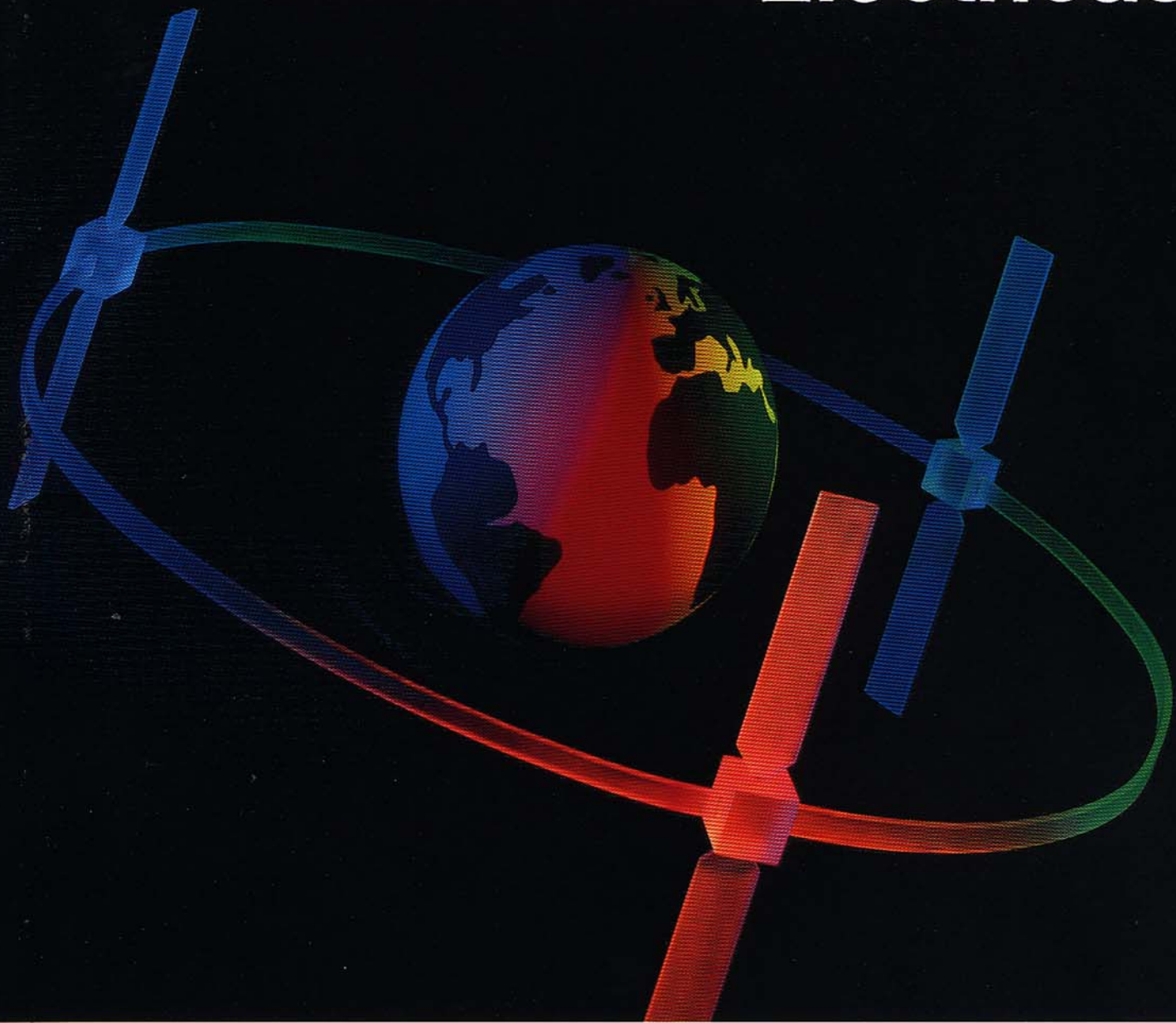


# Comunicaciones Eléctricas



Tecnología espacial

Volumen 62 N° 1 1988



Comunicaciones Eléctricas presenta las investigaciones, los desarrollos y las realizaciones conseguidas por Alcatel NV y sus compañías asociadas.

Publicada desde 1922 en versión inglesa, se edita actualmente en cuatro idiomas y se distribuye en el mundo entero.

*Dirección*  
Lester A. Gimpelson

*Coordinación internacional*  
Michael Deason, Romford

*Ediciones locales*  
*Comunicaciones Eléctricas*  
Antonio Soto, Madrid

*Revue des Télécommunications*  
Bernard Canceill, París

*Electrical Communication*  
Rod Hazell, Romford

*Elektrisches Nachrichtenwesen*  
Wolfgang Schmid, Stuttgart

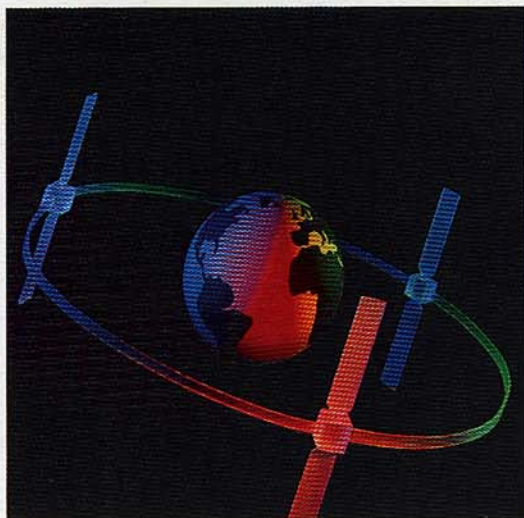
Publicado en agosto de 1988  
© Alcatel NV, 1988

Las direcciones de los editores se dan en la página 123

Comunicaciones Eléctricas, Director:  
A. Soto, Ramírez de Prado, 5  
28045 Madrid (España)

## Tecnología espacial

- 2 **Presentación**
- 4 **Introducción a los sistemas espaciales**  
J-C. Husson
- 12 **Estaciones terrenas para nuevas normas, nuevos sistemas y nuevos servicios**  
G. Lefrançois
- 19 **Sistema Syracuse de comunicaciones militares por satélite**  
P. Mollat du Jourdin
- 27 **Sistema de transmisión de datos TELECOM 1**  
J. Bléret, A. Demars y A. Karas
- 35 **Sistema de microestación para redes de datos empresariales**  
A. F. Beaucent, J. Bousquet y G. Guillemaud
- 42 **Sistema de comunicación por satélite para países en desarrollo**  
J. Esculier, A. Parnière y J. Salomon
- 49 **Carga útil para el satélite de difusión directa de televisión TDF1**  
X. Rozec
- 55 **Repetidores para satélites de telecomunicación de los años 90**  
J. Beaucher
- 61 **Nuevos receptores híbridos en naves espaciales**  
A. Cerro y D. Parise
- 67 **Las antenas, área técnica esencial para los satélites**  
B. Vidal Saint-André
- 75 **Antena multihaz reconfigurable para satélites EUTELSAT II**  
G. Duret y T. Guillemin
- 81 **Sistema de seguimiento, teledirigido y teledirigido para el satélite de comunicaciones Kopernikus**  
F. Gass y M. Kracht
- 87 **Seguimiento de posición de naves espaciales mediante el sistema de posicionamiento mundial**  
W. Beier y H. Kallerhoff
- 92 **Demodulador de datos de alto rendimiento para aplicaciones del espacio lejano**  
T. Tack
- 98 **Transmisión de imágenes por satélites de observación de la Tierra**  
G. Schang y P. Van der Stock
- 106 **Caracterización de dispositivos de fibra óptica para aplicaciones espaciales**  
A. Aguilar
- 113 **Red de área local de las estaciones espaciales Columbus**  
P. Alonso, L. Bermejo y V. Quílez
- 121 **En este número**



*Los satélites artificiales de la Tierra han creado una nueva dimensión en las comunicaciones mundiales. Suspendido en los cielos como un minúsculo espejo, el satélite de telecomunicación puede retransmitir incontables conversaciones telefónicas a través del océano o difundir programas de televisión a países enteros. Los receptores, procesadores de señales, transmisores y redes de antena a bordo del satélite, alimentados todos por los rayos del Sol, deben tener una extrema eficacia, ser ligeros y compactos y no sufrir fallos durante largos años en un entorno adverso. Sólo una tecnología de vanguardia en telecomunicaciones puede afrontar este reto.*

## Presentación

Durante los siguientes decenios la tecnología del espacio ejercerá una influencia cada vez mayor en nuestras vidas, y quizá en ningún campo sea esto tan cierto como en las telecomunicaciones. Más de cien satélites circundan hoy la Tierra en la órbita geoestacionaria, proporcionando servicio telefónico al mundo entero y retransmitiendo programas de televisión de un extremo a otro del globo de forma prácticamente instantánea. Estos satélites transmiten en ondas centimétricas y milimétricas para complementar las redes terrenas de cables y radioenlaces, sobre todo en regiones del mundo donde la aspereza del suelo y el adverso entorno hacen impracticables o prohibitivos por su coste los sistemas convencionales.

Otros satélites describen órbitas a grande y baja altitud, llevando a cabo un gran número de funciones en campos tan diversos como la observación de los recursos de la Tierra, la navegación, la astronomía y la geofísica, y, como es bien sabido, hay varias estaciones tripuladas en órbita o en proyecto.

Las limitaciones de la tecnología han impuesto que la mayoría de estos sistemas requieran en las estaciones terrenas antenas de grandes dimensiones para recibir las señales, relativamente débiles, que transmiten los satélites de la generación anterior. Así, millares de tales reflectores de antena apuntan hacia sus respectivos satélites para captar las señales que éstos envían. Dado el elevado costo de estas antenas, que llegan a alcanzar los 32 m de diámetro y a veces requieren artificiosos sistemas de seguimiento, las estaciones terrenas muchas veces se han convertido en núcleo de una red de distribución de señales por la superficie terrestre.

No obstante, al compás del avance tecnológico, el tamaño de las antenas de las estaciones terrenas se ha ido reduciendo hasta extremos espectaculares, con diámetros de 1 m en ciertos casos. De ahí que los costes hayan descendido de forma no menos rotunda, hasta el punto de que numerosos usuarios puedan permitirse la instalación de antenas en su propio hogar para recibir televisión por difusión directa desde el satélite. La consecuencia será un crecimiento explosivo de este servicio de difusión directa por satélite y el que dentro de diez años pueda haber millones de antenas apuntadas al cielo para recoger en nuestras casas programas de televisión procedentes de todos los lugares del planeta.

Las ondas electromagnéticas constituyen el único medio de comunicación entre Tierra y nave espacial. Por consiguiente, las técnicas de comunicación juegan un papel vital en el éxito de todas y cada una de las misiones espaciales. Es preciso transmitir a tierra información sobre el estado operacional del satélite unida a los datos recogidos por los sistemas de telemetría de a bordo, y a su vez las estaciones terrenas deben transmitir al satélite órdenes — señales de telemando — que éste debe recibir correctamente. Tales órdenes controlan las maniobras del satélite para mantenerse en posición orbital, además de gobernar el equipo de mediciones de a bordo y la carga útil del satélite. Es, pues, esencial que se desarrollen en paralelo las tecnologías de comunicaciones y de naves espaciales y que combinen sus recursos para garantizar un programa espacial viable y de buen rendimiento económico.

Las compañías de Alcatel trabajan con las más preeminentes organizaciones espaciales del mundo, como son Intelsat, Eutelsat, Inmarsat, la Agencia Europea del Espacio, la NASA, el CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) y France Télécom. Mantienen, además, estre-

chas relaciones con las agencias nacionales de menor magnitud establecidas en numerosos países, especialmente en aquéllos en vías de desarrollo donde el difícil terreno y el clima extremado confieren a las comunicaciones por satélite un papel preponderante para extender servicios de comunicación modernos a regiones aisladas. La posición de Alcatel como primer suministrador internacional de sistemas de telecomunicación en el mundo le da una base ideal para elaborar sistemas de comunicación embarcados en el espacio que ofrezcan una completa gama de facilidades modernas y se relacionen de un modo natural con los correspondientes sistemas terrenales. Por consiguiente, la Compañía combina de un modo tal vez único el dominio de las tecnologías del espacio y las telecomunicaciones.

A menudo se olvida que el éxito de cualquier sistema de satélite depende tanto de la calidad y las prestaciones de las estaciones terrenas como del equipo de a bordo del satélite. Alcatel Telspace posee una gran experiencia en desarrollar, planificar y construir estaciones de telecomunicación de todos los tamaños, mientras que Alcatel Espace y Alcatel Bell se especializan en estaciones de control de teledirigida y teledirigida. Un simple ejemplo de la aportación de Alcatel en estos aspectos es el desarrollo de un subsistema de teledirigida y teledirigida para utilizarse a bordo de la sonda de espacio lejano Giotto, que se acercó al cometa Halley en 1986. Se construyó también un demodulador de alto rendimiento para el segmento terreno de esta singular misión, el cual presenta frente al modelo teórico ideal una degradación técnica de 0,15 dB solamente, tan pequeña que ha de medirse por métodos estadísticos.

Con las crecientes densidades de tráfico en la superficie, en el aire, e incluso en órbitas en torno de la Tierra, crece la demanda de sistemas de navegación precisos. Standard Elektrik Lorenz ha alcanzado gran experiencia en construir receptores para el sistema Navstar de los EE.UU., el cual permite a vehículos y naves localizar su posición en cualquier lugar del globo con precisión del orden de cincuenta metros. El desarrollo actual consiste en extender la utilización de estos receptores para localizar con exactitud las naves espaciales en órbita. Se estudian, además, sistemas de localización que ofrecerán precisiones aún mayores, tal como el Locstar.

En cualquier satélite las antenas transmisoras y receptoras son de una importancia primordial. Para atender las necesidades de los nuevos servicios, y en particular la difusión directa de señales de televisión, las antenas modernas tienen que poder reconfigurarse y ofrecer haces múltiples. Ejemplo es la antena multihaz reconfigurable desarrollada para los satélites Eutelsat II, en la que los 16 canales pueden pasar desde la extensa cobertura requerida en los servicios de comunicaciones a la cobertura más restringida, mediante transmisión de haces estrechos, adecuada para la difusión de televisión.

Este número de *Comunicaciones Eléctricas* se dedica a la tecnología espacial, aunque por supuesto no pretenda abarcar todas las tecnologías implicadas y se concentre en los sistemas electrónicos para las comunicaciones y el proceso de señales. Los autores, procedentes de diversas casas Alcatel involucradas en actividades espaciales, son especialistas que capitalizan más de 20 años de experiencia de la Compañía en estas materias. Muchos de los artículos describen sistemas y equipos ya en uso o de inclusión prevista en próximos lanzamientos, y algunos otros describen desarrollos que van a utilizarse en los sistemas de satélite que orbitarán nuestro planeta en el próximo siglo. Entre estos figuran los receptores híbridos en nave espacial desarrollados por Alcatel Espace, y los estudios de una red de área local por fibra óptica para la estación espacial Columbus que realiza actualmente Alcatel SESA.

Gracias a esta única y singular experiencia en tecnologías del espacio y de telecomunicaciones, las compañías de Alcatel se encuentran en posición ideal para contribuir destacadamente y durante largos años al desarrollo de sistemas espaciales.

### **Jacques Imbert**

Director Ejecutivo del Grupo de Transmisión  
Alcatel NV

# Introducción a los sistemas espaciales

Los sistemas espaciales ofrecen una amplia gama de aplicaciones, desde la exploración, tripulada o no, de los planetas y el espacio lejano, hasta actividades habituales de telecomunicaciones, astronomía, navegación y observación de los recursos naturales de la Tierra. A medida que las cargas útiles aumenten su complejidad, y se introduzcan estaciones terrenas de bajo coste, crecerá el papel desempeñado por los satélites en nuestras vidas.

## J-C. Husson

Alcatel Espace, Toulouse, Francia

### Introducción

Desde 1957, miles de objetos se han puesto en órbita alrededor de la Tierra, la Luna, y los principales planetas. Uno de ellos incluso ha salido del sistema solar. Algunos se han alejado del Sol hacia planetas como Marte, y otros al acercarse han fotografiado el planeta Mercurio.

Una clasificación inicial de estos vehículos puede dividirlos en satélites en órbita terrestre, satélites en órbita lunar o en torno de planetas, y sondas espaciales que realizan misiones muy alejadas de la Tierra, capaces de acercarse a cuerpos del sistema solar, orbitarlos y aterrizar en ellos, como en la Luna, Marte o Venus. Tres sondas se aproximaron al cometa Halley en 1986, y las imágenes transmitidas por radio desde la sonda europea utilizaron equipos de Alcatel Espace.

Los vehículos en órbita alrededor de la Tierra son de dos tipos esenciales: satélites

no tripulados para aplicaciones tales como telecomunicaciones, observación, navegación, astronomía y geofísica, y estaciones o naves tripuladas, cuales son el Soyuz, Saliut, Mir, Columbus y el transbordador espacial Hermes.

El espacio ha sido explotado comercialmente desde el lanzamiento del Telstar, el primer satélite de comunicaciones del mundo, en 1962. Dos años más tarde se fundó la organización mundial de telecomunicaciones Intelsat, tras el lanzamiento con éxito por la NASA del primer satélite geostacionario Syncom 4. A partir de entonces fueron desarrollados y fabricados una serie de cohetes, como el Ariane, para el lanzamiento de satélites de telecomunicación.

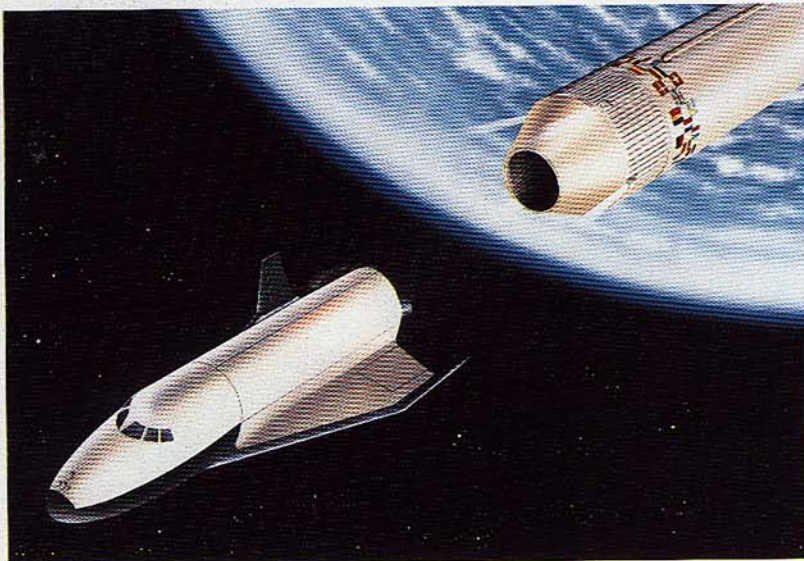
### Sondas espaciales

La trayectoria de un satélite alrededor de un planeta es una elipse, parábola o hipérbola. Cuando es parábola, la nave deja la Tierra y se convierte en una sonda espacial. A una altitud de 200 km, altura a la que entra en órbita el cohete Ariane, la velocidad necesaria para escapar del campo gravitatorio terrestre es de 11 km/s. El Ariane puede poner un vehículo espacial en una órbita de transferencia elíptica con perigeo de 200 km y apogeo de 36.000 km. En el apogeo basta una velocidad de 4,33 km/s para alejarse de la Tierra. Como la velocidad de la órbita de transferencia es de 1,59 km/s, un motor de apogeo que aporte el incremento de 2,74 km/s es suficiente para que la nave abandone nuestro planeta.

### Satélites en órbita terrestre

La mayoría de los vehículos espaciales son satélites en órbita alrededor de la Tierra. La fuerza principal a la que están sujetos es el

Nave espacial Hermes





**Satélite SPOT en órbita alrededor de la Tierra.**

campo gravitatorio terrestre, representado por un desarrollo esférico armónico con varios miles de términos, siendo el primero y dominante el potencial gravitatorio de Newton.

#### *Periodo de revolución*

Un parámetro importante es el periodo de revolución  $T$  (en segundos), que viene dado aproximadamente por la tercera ley de Kepler.

$$T = 2\pi \sqrt{a^3/\mu}$$

donde  $a$  es el semieje mayor de la trayectoria elíptica y  $\mu$  es el producto de la constante de gravitación universal ( $G$ ) y la masa de la Tierra ( $M$ ).

La tabla 1 da varios valores de  $T$  para una órbita circular en cuyo caso  $T$  es  $10^{-2} (6378 + h)^{3/2}$ , siendo  $h$  la altitud en km de la

órbita circular sobre el Ecuador. Esta tabla distingue entre satélites de órbita baja que dan unas diez revoluciones por día, y satélites geosíncronos que rodean la Tierra en 24 horas. El periodo de 24 horas es de especial interés, pues si un satélite se coloca en órbita circular en el plano ecuatorial de la tierra con un periodo de revolución igual al día sideral, o sea de 23 h 56min 04s (86.164 s), aparece estacionario en relación a la Tierra. La mencionada ley de Kepler da un semieje mayor de 42.164,172 km para la órbita geoestacionaria, pero considerando el achatamiento de la Tierra el valor real resulta ser de 42.166,260 km.

La mayor parte de los satélites de telecomunicación están en órbita geoestacionaria, así que sus posiciones son fijas con respecto a la Tierra. Cada uno se posiciona sobre un punto de longitud determinada, que le es asignado mediante acuerdo internacional para evitar interferencias de radiofrecuencia entre satélites.

Los satélites se desvían de su posición por la influencia de los términos de segundo orden del campo gravitatorio de la tierra, y los efectos combinados de los campos gravitatorios del Sol y la Luna. Debido a ello, se han de corregir sus órbitas semanalmente o mensualmente, para mantenerlos "en posición".

#### *Inclinación orbital*

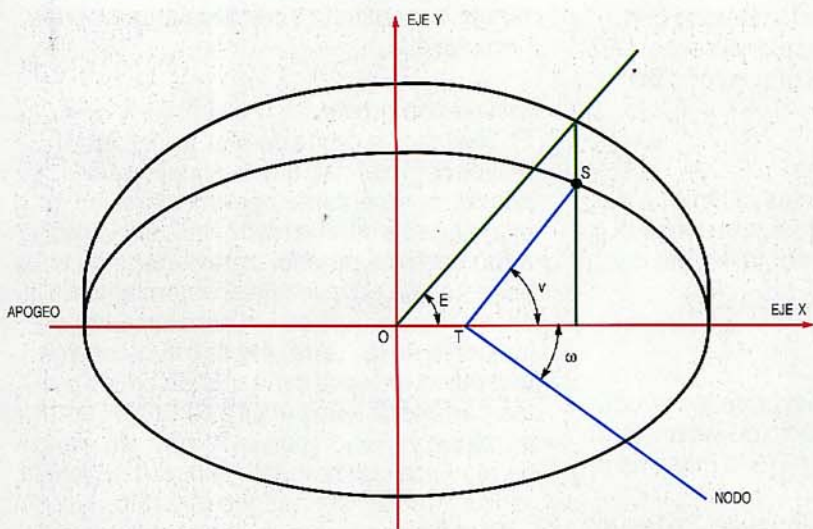
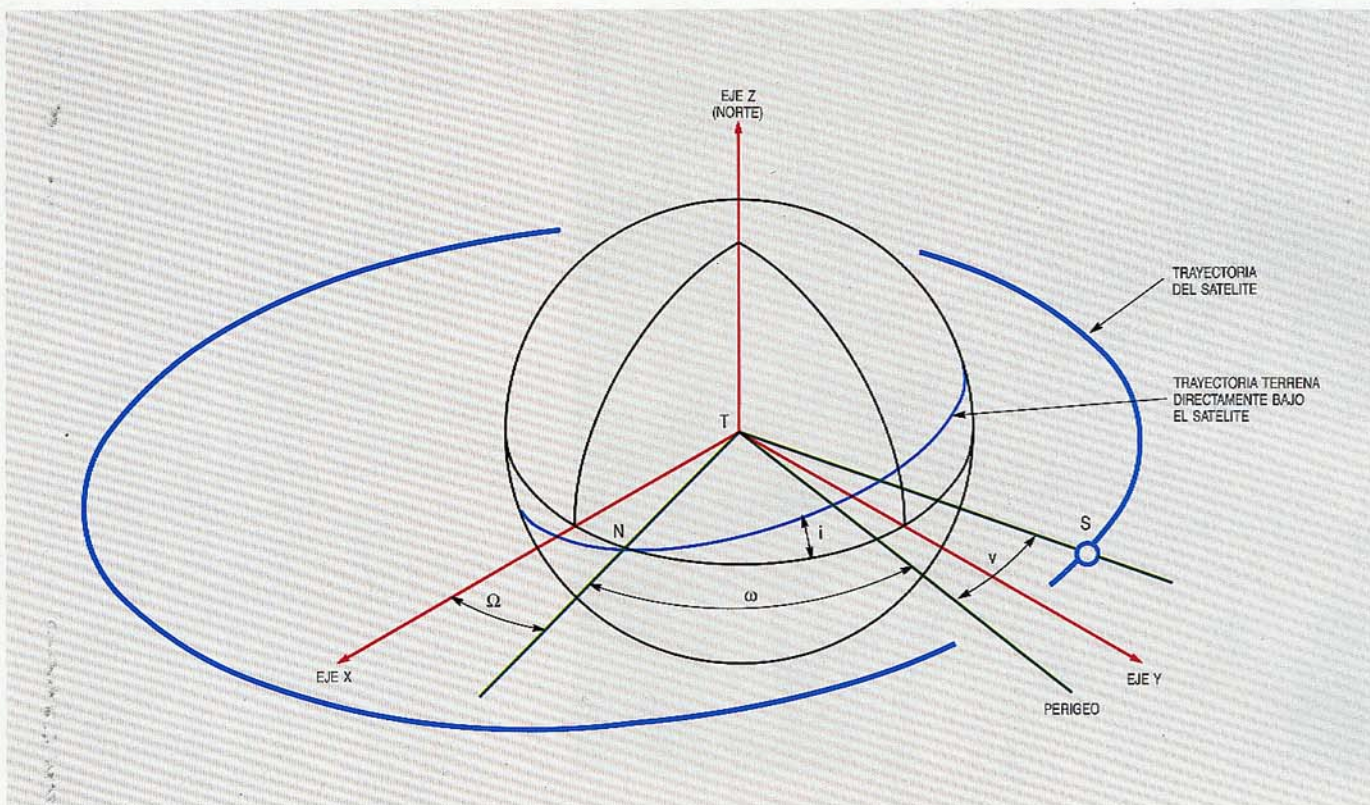
En realidad, la órbita de un satélite tiene mayor complejidad que la elipse, pero puede representarse por una elipse en un plano que se mueve bajo la influencia de los armónicos del potencial gravitatorio de la tierra, lo que produce un achatamiento de la elipse relacionado con el achatamiento de los polos de la Tierra. Así, la trayectoria es una curva tortuosa cada uno de cuyos puntos pertenece a una elipse diferente, en perpetua variación con el tiempo; su plano se modifica con respecto al punto de referencia inercial, y el perigeo gira (Fig. 1).

Si la órbita es perpendicular al plano ecuatorial terrestre y el nodo es fijo, el plano orbital permanece fijo dentro de una referencia inercial, y la Tierra gira con relación a esa trayectoria. Los satélites de navegación Transit y Nova tienen este tipo de órbita polar. Un satélite Transit a 1100 km de altitud completará su revolución en 1 h 47 m, durante la cual la Tierra habrá girado 26,8°.

En órbitas heliosíncronas el nodo orbital avanza a la misma velocidad que el Sol, con lo que la traza del plano orbital sobre el Ecuador forma siempre el mismo ángulo con el eje Tierra-Sol. Dos propiedades de las órbitas heliosíncronas son de especial interés. Primera, la Tierra se ve siempre bajo una iluminación prácticamente

**Tabla 1 - Parámetros de una órbita circular**

Altitud (km)	Periodo (segundos)	Periodo (horas/mins)	Número de revoluciones por día
150	5.249	1 h 27	≈ 16
200	5.309	1 h 28	≈ 16
500	5.676	1 h 34	≈ 15
800	6.032	1 h 41	≈ 14
1.500	6.958	1 h 56	≈ 12
4.000	10.521	2 h 55	≈ 8
10.000	20.859	5 h 47	≈ 4
20.000	42.636	11 h 50	≈ 2
36.000	86.820	24 h 07	≈ 1



**Figura 1**  
Movimiento del satélite alrededor de la Tierra. Debajo, el plano de la órbita.

constante. Segunda, si los paneles solares del satélite se desvían respecto al plano de la órbita en la dirección del Sol, mantienen esa orientación y así reciben máxima energía solar. El plano de la órbita puede, desde luego, fijarse libremente con relación al Sol.

Para una inclinación crítica ( $i = 63^{\circ}26'$ ,  $5 \cos^2 i - 1 = 0$ ), el perigeo permanece inmóvil. La Unión Soviética aprovechó esta propiedad para establecer su primer sistema de telecomunicación espacial, que utiliza varios satélites Molnya en órbitas excéntricas. El apogeo está a una altura de 42.000 km; el perigeo, sólo a unos pocos cientos de kilómetros, se localiza en los antípodas de la URSS. El satélite pasa,

pues, a gran altura sobre la URSS, y puede suministrar enlaces de comunicación a todo el país. Como la inclinación es  $63^{\circ}26'$ , el apogeo sigue siempre en el hemisferio Norte.

Los satélites GPS (sistema de posicionado mundial) están también en planos orbitales inclinados  $63^{\circ}$  sobre el Ecuador.

Ciertos sistemas espaciales utilizan órbitas a la vez heliosíncronas y en fase. Una órbita está en fase si después de un número entero de revoluciones, pasa por el mismo punto de la superficie de la Tierra (por ejemplo, un nodo) y en la misma dirección (órbita ascendente o descendente). Así, el satélite de observación SPOT está en órbita heliosíncrona y en fase, pasando por el mismo punto cada 26 días, al cabo de 369 órbitas. En cada órbita el satélite sobrevuela una región del globo a una hora media solar siempre idéntica (sobre las 10 h 30 m), en este caso en órbita descendente. La Tierra se ve siempre en las mismas condiciones y las cámaras exploran una zona de 110 km de ancho, lo que permite observar todo el globo en 26 días (369 órbitas).

Los satélites Landsat de teledetección y los satélites meteorológicos NOAA y Tiros describen también órbitas heliosíncronas en fase.

#### Estabilización

Los satélites se estabilizan haciéndolos girar alrededor de su centro de gravedad.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el satélite no es un cuerpo rígido: los paneles solares, antenas, cámaras y otros elementos pueden moverse.

La estabilización es necesaria en general para que el satélite pueda realizar su misión. Por ejemplo, las antenas de telecomunicación deben apuntarse a un país o continente determinado. Análogamente, los satélites astronómicos pueden tener que apuntar hacia el Sol o hacia una parte determinada del sistema solar, mientras que las cámaras de los satélites de observación de la Tierra deberán orientarse hacia la región terrestre o marítima que haya de estudiarse. Sin embargo, la orientación correcta no es el único requisito importante, y así, por ejemplo, la fotografía impone restricciones en las velocidades de balanceo, cabeceo y guiñada para evitar imágenes borrosas. A 800 km de altitud, un error de estabilización de  $0,1^\circ$  es equivalente a 1400 m en el suelo.

Hay que distinguir entre estabilización *pasiva* y *activa*, pudiendo ambas existir a bordo del mismo satélite. La estabilización por rotación aprovecha el efecto giroscópico, que da al vehículo una velocidad angular, y por tanto un momento angular, considerable. Para que este movimiento sea estable, el satélite ha de girar alrededor del eje de inercia principal. En general, las perturbaciones causadas por el movimiento de los fluidos en el satélite y la interacción con el campo magnético de la Tierra modifican la rotación, y al cabo del tiempo la estabilización rotacional se pierde.

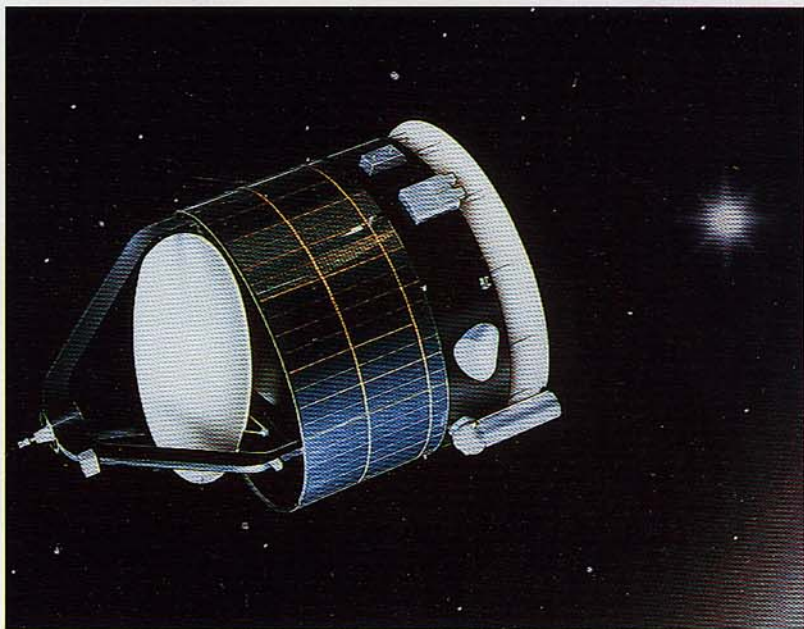
La estabilización por gradiente de gravedad utiliza el par creado por los cambios en el campo gravitatorio según la altitud. El gradiente de gravedad crea un par real en un cuerpo asimétrico cuando los momentos de inercia principales son grandes en relación con el momento de inercia más débil. Cuando los dos momentos principales son iguales, la posición de equilibrio estable corresponde a la alineación geocéntrica del eje de menor momento. En la práctica, se consiguen momentos grandes colocando una masa al extremo de un mástil, técnica empleada en los sistemas de navegación Transit y en satélites geofísicos como el Arcad 3. Sin embargo, la estabilización tiene también sus límites. Los satélites de navegación NOVA se estabilizan por gravedad y tienen un sistema de control de órbita que compensa los efectos de la fricción atmosférica.

Se puede utilizar para estabilización el campo magnético terrestre mediante imanes permanentes que producen un dipolo magnético a bordo del satélite. También es posible desacelerar la rotación de un satélite usando la disipación por histéresis magnética (corrientes de Foucault) cuando

el cuerpo se desplaza con respecto al campo magnético local. Los materiales que constituyen el satélite influyen directamente en estos efectos.

La estabilización por radiación solar se vale de la presión de los fotones solares. Este efecto puede aprovecharse a muy elevada altura para estabilizar el satélite por medio de grandes velas perpendiculares a la dirección del Sol, como ya se ha probado en el OTS y va a realizarse en los satélites de telecomunicación Eurostar (por ejemplo, el Telecom 2) para complementar la estabilización activa.

En el caso de estabilización activa, los actuadores de a bordo mueven el satélite alrededor de su centro de gravedad de una manera controlada para que apunte hacia la Tierra, el Sol, o una estrella, según sea su misión. Para conseguir esto, debe conocerse la posición del satélite referida a un sistema de ejes (inercial o geocéntrico), información suministrada por la unidad de actitud y los sensores asociados. Los actuadores están normalmente controlados por un ordenador de a bordo, y pueden aplicar



**Sonda espacial Giotto utilizada para investigar el cometa Halley.**

fuerzas de varios newtons con pares de varios Nm. Los actuadores más frecuentes son los propulsores, pequeños motores de cohete, motores de líquido o motores eléctricos, motores de gas frío y actuadores inerciales.

Los actuadores por *volante de inercia* crean una rigidez giroscópica en los satélites estabilizados por rotación, generando pares a base de variar la velocidad de rotación hasta un 20% del valor nominal. Se



mantiene así a bordo de la nave espacial un momento cinético medio importante, que alcanza 20 Nms para el satélite Symphonie.

### Componentes de un sistema espacial

Un sistema espacial consta de satélites en órbita junto con estaciones de seguimiento que reciben señales de telemida, envían órdenes de telemando y localizan el satélite. Todas éstas son especialidades del grupo Alcatel en tecnología espacial. Además, el sistema puede incluir estaciones terrenas dedicadas a una aplicación específica. Por ejemplo, los satélites de telecomunicación operan con una amplia red de estaciones terrenas transmisoras/receptoras o sólo receptoras. Las compañías Alcatel Telspace, Alcatel Bell y Alcatel Espace construyen numerosos elementos de tales sistemas. Igualmente, los satélites de observación terrestre como el SPOT, construido por Alcatel Espace, transmiten imágenes por un enlace de telemida a las estaciones de recepción de imagen en la banda de 2 ó de 8 GHz.

Los sistemas espaciales de navegación y localización como Transit, GPS<sup>1</sup>, Argos y Geostar, utilizan millares de balizas terrenas, en muchos casos a bordo de plataformas móviles como aeronaves, barcos, automóviles, globos y boyas. Estos sistemas requieren pequeñas antenas omnidireccionales.

Los satélites son supervisados día y noche por operadores desde estaciones terrenas. La telemida proporciona información del estado térmico y eléctrico del equipo de a bordo. Desde estos centros de control pueden enviarse órdenes al satélite para activar un transpondedor, controlar la actitud, o desconectar un equipo averiado.

Hay un cierto número de centros de control en Europa. Los satélites Telecom 1 se controlan desde el centro de CNES en Toulouse, mientras que los de Eutelsat II serán gobernados desde París. Alcatel Espace está construyendo un centro de control para Eutelsat en asociación con Logica. Las estaciones de seguimiento repartidas por todo el mundo están enlazadas con los centros de control.

El satélite es un elemento esencial en cualquier sistema espacial. Puede hacerse una clara distinción entre la plataforma del satélite y la carga útil que transporta. La plataforma suministra todos los servicios soporte necesarios para mantener el satélite en órbita durante su vida, incluyendo la estructura física, la alimentación, control de órbita, control térmico y el suministro de combustible. La carga útil depende de la misión: puede ser una cámara de observa-

ción con electrónica de imagen, telemida y registro magnético, o puede ser un transpondedor de telecomunicaciones con sus antenas transmisora y receptora, amplificadores con tubo de ondas progresivas y fuentes de alimentación.

Alcatel Espace se dedica intensamente al diseño y construcción de cargas útiles para satélites. Así, ha construido la carga útil del satélite Telecom 1 y va a construir las del Telecom 2.

### Energía eléctrica

La energía para operar los satélites procede generalmente de células solares de silicio que transforman la radiación solar en corriente eléctrica. Aunque la iluminación solar es del orden de 1353 W/m<sup>2</sup>, el rendi-



Visión del cometa Halley desde la sonda espacial Giotto.

miento de conversión suele ser del 8 al 10%. Además, la radiación iónica (electrones, protones) en órbita produce fallos en el cristal de silicio, y hace descender el rendimiento de conversión a lo largo de la vida del satélite. Así, pues, para suministrar 4 kW de potencia a bordo hacen falta generadores solares con una superficie de 40 m<sup>2</sup>, que suelen adoptar la forma de alas de unos 10 m de envergadura, replegadas durante el lanzamiento. Los paneles solares se orientan permanentemente hacia el Sol para recibir el máximo de energía. También se usan generadores planos y cilíndricos; en este último caso, el satélite gira en torno de un eje perpendicular al Ecuador (Intelsat VI, Meteosat).

La energía eléctrica generada por las células solares ha de ser almacenada para su posterior distribución, para lo cual se utilizan baterías de níquel-cadmio y níquel-hidrógeno. SAFT, compañía del grupo

CGE, es uno de los principales suministradores. Cuando un satélite cruza la zona de sombra de la Tierra (eclipse), las baterías de a bordo mantienen al equipo funcionando. En el caso de satélites geoestacionarios, los eclipses sólo ocurren durante unas pocas semanas alrededor de los equinoccios.

**Termorregulación**

Como hay partes del satélite iluminadas por el Sol mientras otras están en sombra, las diferencias de temperatura son grandes, a veces hasta de 100°C. El satélite sólo puede ganar o perder calor en el espacio por radiación, y por tanto es indispensable disponer de termorregulación. En la mayoría de los casos este control es pasivo, utilizando las propiedades termoópticas de los materiales para reducir al mínimo las variaciones de temperatura; algunas partes del satélite están revestidas de superaislantes para disminuir el intercambio de calor. A veces, no obstante, se ha de descargar calor en el espacio, y para ello hay que evacuarlo por conductos caloríficos desde los focos de calor a las superficies radiantes. Cada fabricante tiene que garantizar la termorregulación adecuada para los equipos que suministra.

La termorregulación pasiva se complementa con métodos activos, como el enfriamiento por efecto Peltier y los bloques de calefacción. En el campo de la astronomía espacial, se está construyendo actualmente un criostato que permite alcanzar temperaturas de unos pocos grados Kelvin en torno a un detector de infrarrojos.

**Control de actitud y órbita**

El subsistema de control de actitud y órbita permite desplazar el satélite en torno de su centro de gravedad o a lo largo de su órbita. El satélite Telecom 1 transportaba unos 100 kg de combustible de hidrazina para controlar su actitud y mantenerlo "en posición" en su punto geoestacionario.

El subsistema de telemida y telemando permite a los controladores en tierra comunicar con el satélite en todo momento y cualquiera que sea su actitud, en una serie de bandas de frecuencia. Alcatel Espace es especialista en la producción de estos equipos en todas las bandas posibles.

Los satélites Telecom 1 y SPOT están equipados con transmisores-receptores de 2 GHz (banda S) y una antena omnidireccional. Así, cuando falló el sistema de control de actitud del Telecom 1B, pudo mantenerse la comunicación a través del transpondedor de banda S. El equipo también permite determinar la posición del satélite con aproximación de 20 m midiendo el tiempo transcurrido entre la transmisión de

una señal y la recepción de la señal de retorno.

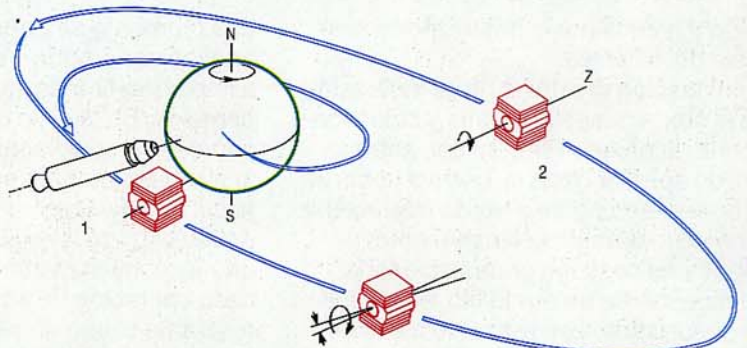
**Colocación de un satélite de telecomunicación en órbita geoestacionaria**

Al estar los satélites de telecomunicación en una órbita geoestacionaria, las antenas terrenas pueden orientarse a un punto fijo, facilitando así el intercambio de llamadas telefónicas, incluso entre continentes. Dado que los satélites actúan como repetidores, las antenas de a bordo deben apuntar permanentemente hacia la Tierra, o hacia una zona más limitada, tal como un solo país.

El lanzamiento de un satélite es breve pero espectacular. Al cabo de sólo 20 minutos de su lanzamiento en Kourou, Guayana Francesa, un satélite pasa sobre Africa en órbita de transferencia con un perigeo de 200 km, apogeo de 36.000 km y una inclinación de 7°. Antes de que se separe la tercera fase, se hará girar al satélite si fuera necesario (Fig. 2). En el momento de la separación, el eje de rotación apuntará en la

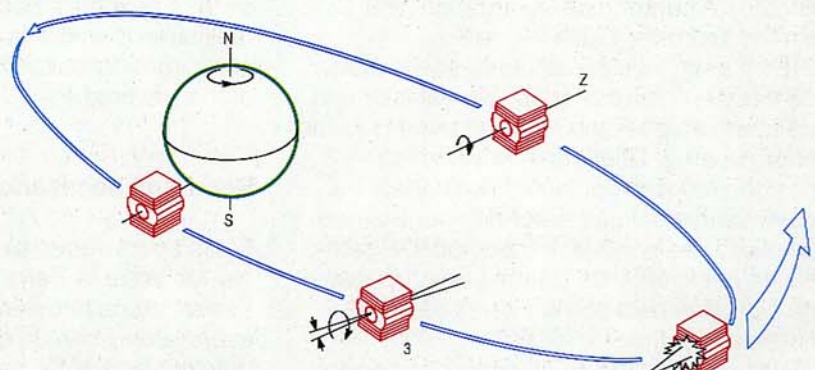
**Figura 2**  
Colocación de un satélite geoestacionario en la órbita de transferencia antes del posicionado en la órbita final.

PRIMERA, SEGUNDA Y TERCERA ORBITAS DE TRANSFERENCIA



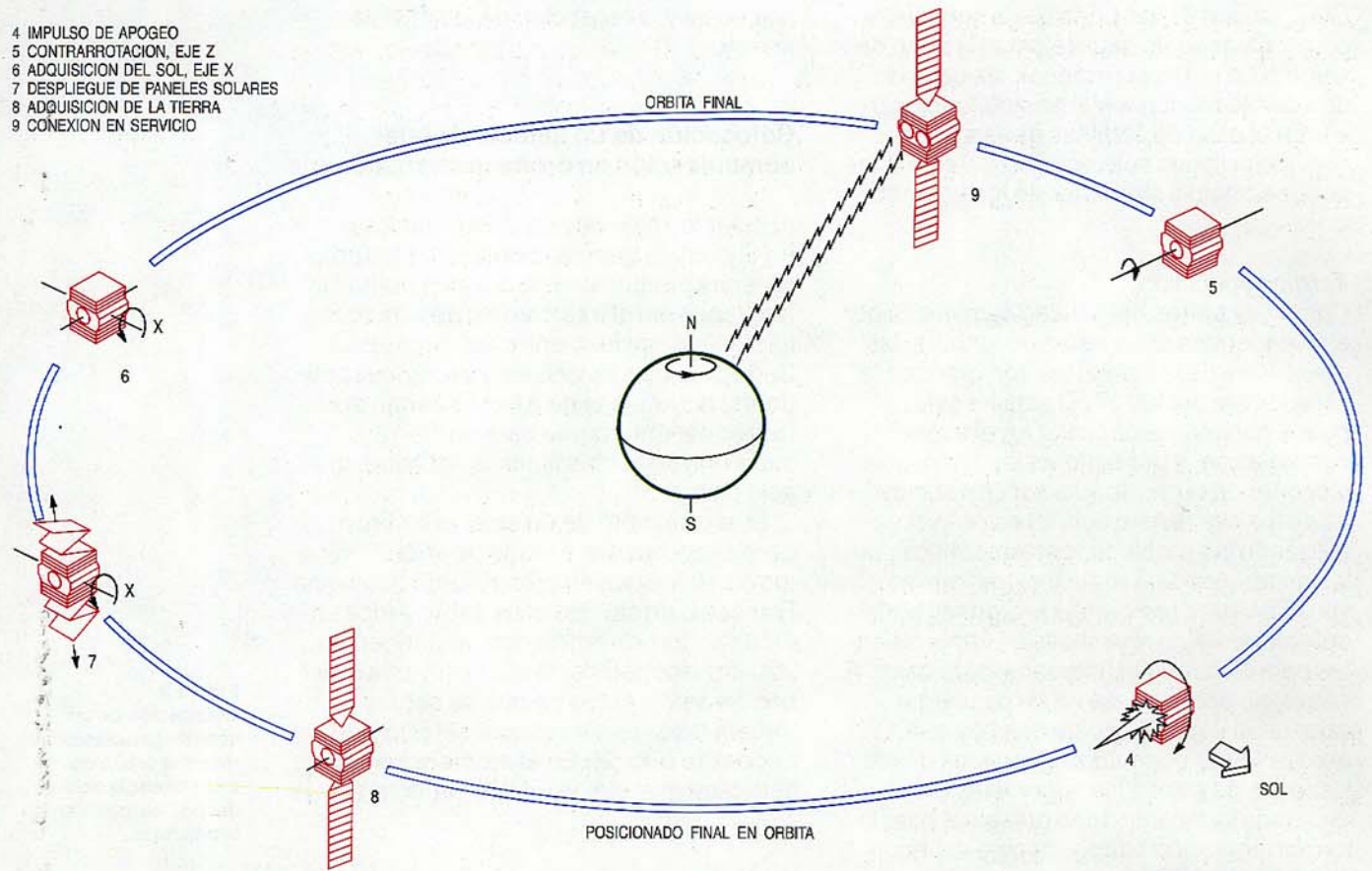
- 1 INYECCION A ORBITA DE TRANSFERENCIA
- 2 ROTACION SOBRE EJE Z

CUARTA ORBITA DE TRANSFERENCIA



- 3 ADQUISICION DE ANGULO OPTIMO PARA IMPULSO DE APOGEO
- 4 IMPULSO DE APOGEO

- 4 IMPULSO DE APOGEO
- 5 CONTRARRROTACION, EJE Z
- 6 ADQUISICION DEL SOL, EJE X
- 7 DESPLIEGUE DE PANELES SOLARES
- 8 ADQUISICION DE LA TIERRA
- 9 CONEXION EN SERVICIO



**Figura 3**  
Transferencia de un satélite a su posición en órbita geostacionaria desde la última órbita de transferencia.

dirección marcada por la organización responsable del satélite.

A continuación el satélite ha de ser trasladado a la órbita geostacionaria y colocado en el punto acordado (Fig. 3). Las antenas tienen que apuntar hacia la Tierra y ponerse a funcionar el equipo de a bordo que estaba desconectado durante el lanzamiento.

Aunque una posición geostacionaria sea nominalmente un punto fijo, el satélite puede desplazarse con respecto a ella en cierto margen que depende de la misión. En el Telecom 1A, como las antenas terrenas son de orientación fija, el satélite debe mantenerse en posición dentro de  $\pm 0,05^\circ$  de una longitud determinada. De igual manera, la estabilización del satélite hacia la Tierra se caracteriza por la tolerancia del ángulo de puntería de las antenas ( $\pm 0,15^\circ$  para el Telecom 1A).

Para desplazar el satélite desde la órbita de transferencia a la órbita geostacionaria y situarlo en posición hace falta energía. Tal energía, en el Telecom 1, la suministran dos conjuntos propulsores: un cohete de combustible sólido (motor de apogeo) que se utiliza una sola vez para colocar el satélite en posición, y un sistema de propulsión de hidrazina para correcciones de órbita y control de actitud.

Una vez encendido el motor de apogeo para aproximar el satélite a su órbita final, hay que suministrarle energía eléctrica. En

ese momento se pueden desplegar los frágiles generadores solares, pues ya no va a haber maniobras importantes capaces de dañarlos. En el caso del Telecom 1, los paneles se despliegan perpendicularmente al plano ecuatorial y se mantienen vueltos hacia el Sol.

Estabilizada la rotación del satélite sobre un eje, comienza inmediatamente la delicada operación de adquisición de la Tierra mediante el uso de sensores. Esta adquisición debe iniciarse en un momento preciso para evitar la adquisición de cualquier otra fuente de infrarrojos, como la Luna. Para completar la estabilización de actitud se le da al satélite rigidez giroscópica a lo largo del eje perpendicular al Ecuador.

El satélite se encuentra ya estabilizado en los tres ejes, a partir de lo cual pueden realizarse maniobras de control de órbita por medio del subsistema de control de órbita y actitud.

### Recursos necesarios

Estas operaciones exigen enlaces permanentes entre la Tierra y el vehículo espacial. Los recursos necesarios en Tierra son esenciales y han de estar distribuidos por todo el planeta. Se requiere una red de estaciones de telemetría y telemando que operen en banda S, junto con un centro de

control responsable de la transmisión de datos entre las distintas estaciones terrenas.

Además, puede necesitarse hasta un centenar de expertos, trabajando en turnos para cubrir las 24 horas del día: matemáticos, especialistas en informática, ingenieros y técnicos.

### **El Grupo Alcatel y los sistemas espaciales**

La industria espacial europea emplea unas 30.000 personas, la décima parte de las que trabajan en este campo en los Estados Unidos. En el desarrollo de un sistema espacial es frecuente que trabajen mil a dos mil personas por un periodo de cinco años. En un gran proyecto espacial como el aterrizaje en la Luna, han podido trabajar simultáneamente hasta 200.000 personas en el desarrollo y producción del sistema.

Alcatel es uno de los principales suministradores europeos de equipos electrónicos, en una extensa gama que incluye sistemas espaciales. Alcatel Espace produce equipos de teledirigidos y telemando, cargas útiles de telecomunicación y equipo para proceso de mediciones de radar, siendo elegida por su gran experiencia en tales áreas para el suministro de los equipos de teledirigidos y telemando destinados a la sonda espacial Giotto, los satélites SPOT, y los satélites de telecomunicación Telecom 1, TVSAT, TDF1 e Intelsat VI.

Alcatel Bell ha suministrado gran parte de los equipos de las estaciones de seguimiento en banda S del Centre National d'Etudes Spatiales (CNES). SEL ha desarrollado y está fabricando un receptor espacial GPS que será utilizado para localizar el transbordador espacial Hermes.

Alcatel Kirk en Dinamarca suministra componentes para los subsistemas de alimentación, incluyendo los del Ariane, y

los que se han de emplear en los ERS1, Telecom 2 y Hermes. Las baterías las proporciona SAFT, filial del grupo CGE.

El grupo Alcatel se dedica principalmente a equipos y sistemas de telecomunicación y de comunicaciones de empresa. Así, Alcatel Espace cuenta con importantes medios y considerable experiencia en el diseño, desarrollo y pruebas de cargas útiles de telecomunicación. Además, Alcatel Espace, Alcatel Thomson Faisceaux Hertiens y Telspace pueden suministrar sistemas completos que comprenden satélites, estaciones terrenas de comunicaciones y estaciones de seguimiento.

Alcatel Espace, Bell, KIRK y SEL cooperan igualmente en el desarrollo y la realización de sistemas espaciales con otros grandes fabricantes europeos como MATRA, Aerospatiale, Marconi, ANT, Selena, MBB y British Aerospace.

### **Referencias**

- 1 W. Beier y H. Kallerhoff: Seguimiento de posición de naves espaciales mediante el sistema de posicionamiento mundial: *Comunicaciones Eléctricas*, 1988, volumen 62, n° 1, págs. 87-91 (en este número).

**J-C. Husson** nació en 1937. Se graduó en la Ecole Polytechnique y en la Ecole d'Application des Officiers de Marine et du Service Hydrographique de la Marine. En 1966, tras siete años de ingeniero hidrógrafo en la Marina Francesa, se incorporó al Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) donde sucesivamente se ha encargado del programa geodésico francés, de programas científicos espaciales y de planificación a medio y largo plazo, antes de ser director general del Centro Espacial del CNES en Toulouse. Ha participado en todos los programas espaciales franceses. En 1986 fue nombrado director general de IFREMER donde se dedica a sentar las bases de la oceanografía espacial. En ese mismo año entra en el Grupo Alcatel, y es nombrado director general de Alcatel Espace. Es Caballero de la Legión de Honor, Oficial de la Orden Nacional del Mérito, y ha obtenido el Premio de Astronáutica (1983) y la Medalla Roja del CNES. Pertenece a la Académie Nationale Aérospatiale francesa y a la Sociedad Internacional de Aeronáutica y Astronáutica.

# Estaciones terrenas para nuevas normas, nuevos sistemas y nuevos servicios

La industria que equipa a estaciones terrenas afronta una rápida evolución, en la que crece la demanda de redes totalmente digitales y de comunicaciones directas de usuario a usuario para múltiples servicios. El estímulo procede de la mayor competencia de los sistemas de fibra óptica y de la necesidad de prestar una amplia gama de nuevos servicios, compatibles con la RDSI.

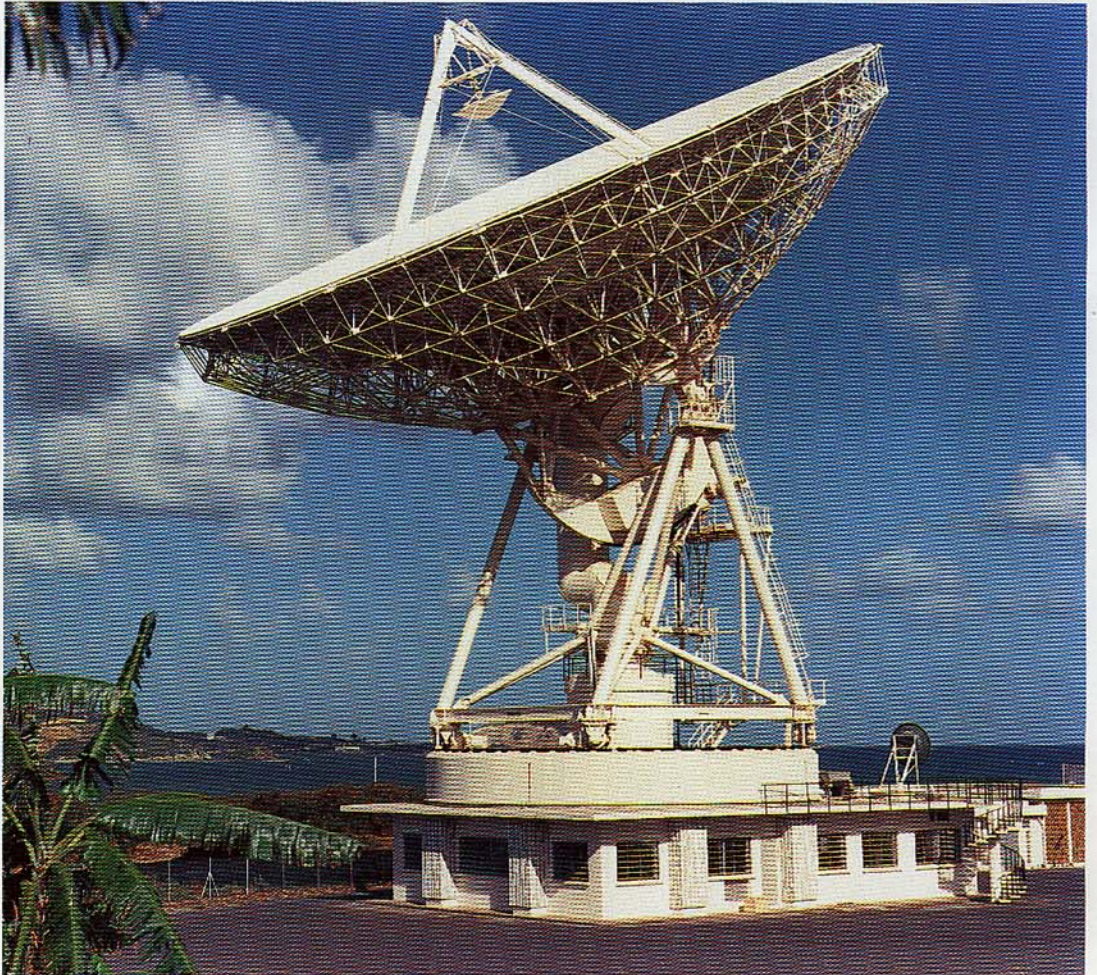
## G. Lefrançois

Alcatel Telspace, Cergy-Saint-Christophe,  
Francia

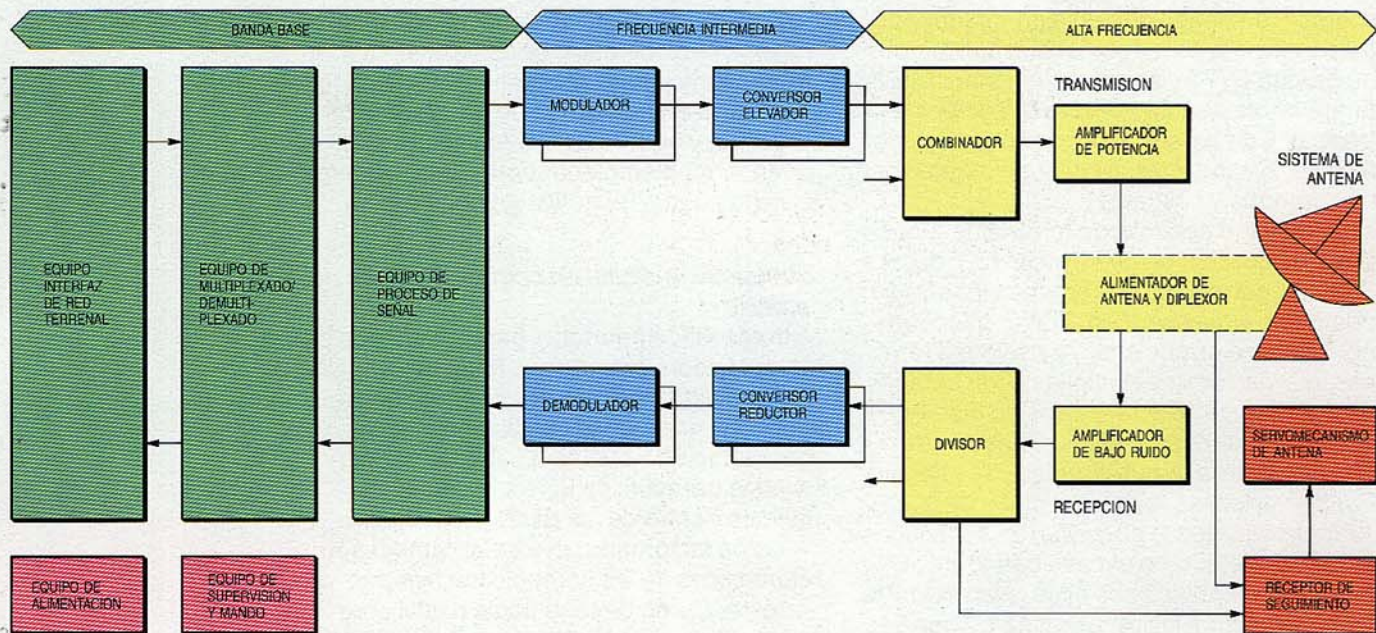
### Introducción

Igual que otras muchas industrias, la industria de las comunicaciones por satélite evoluciona con rapidez. Muchos factores subyacen en este progreso, entre ellos la aparición de la transmisión por fibra óptica y de las RDSI (redes digitales de servicios

integrados). En consecuencia, las organizaciones explotadoras de comunicaciones por satélite (por ejemplo, INTELSAT y EUTELSAT) están esforzándose por aumentar la competitividad de los enlaces por satélite mediante un uso más eficaz de los transpondedores del satélite, el aumento de la potencia radiada, y la intro-



Estación terrena típica Norma A equipada con una antena de 32 m y emisión por guíaonda. Consta de un reflector quasi parabólico de alta precisión, un elaborado alimentador primario periscopico (sistema de emisión por guíaonda), y un sistema de pedestal totalmente orientable, gobernado por servos, capaz de seguir automáticamente la dirección del satélite con una precisión de  $\pm 0,01^\circ$ .



**Figura 1**  
**Diagrama funcional de una estación terrena para comunicaciones por satélite, cuyas dos características principales son la G/T y PIRE. La G/T (o factor de calidad), de máxima importancia para la recepción, es la relación entre la ganancia de la antena (a la frecuencia de recepción) y la temperatura equivalente de ruido en recepción, y se expresa en dB/K. La PIRE (potencia isotropa radiada equivalente), el parámetro más significativo en la transmisión, es el producto de la ganancia de la antena (a la frecuencia de transmisión) y la potencia de salida del amplificador, expresado en dBW.**

ducción de nuevas técnicas de transmisión. Esto ha obligado a implantar nuevas normas que permiten reducir el coste de los equipos y de su explotación (tarifas).

La mayoría de las nuevas técnicas de transmisión utilizan portadoras digitales, lo cual sitúa a la comunicación por satélite en línea con otros tipos de redes y permite utilizar los enlaces vía satélite en la RDSI.

Al mismo tiempo, se están introduciendo nuevos sistemas que aprovechan las características de los satélites, tales como su capacidad de difusión y de acceso múltiple, abriendo paso a numerosos nuevos servicios en campos tan variados como las comunicaciones de empresa, comunicaciones rurales, distribución de imágenes, difusión de datos y transferencia interactiva. Muchos de estos sistemas utilizan pequeñas estaciones terrenas que pueden instalarse en las dependencias del usuario, proporcionando enlaces telefónicos directos (estaciones para comunicaciones rurales), enlaces de datos (microestaciones o TAMP – terminales de abertura muy pequeña – para comunicaciones internas de una organización), o recepción de imágenes (estaciones sólo receptoras de televisión). Estas estaciones terrenas pequeñas habrán de fabricarse en cantidades considerables y a bajo coste si se desea que ofrezcan nuevas oportunidades a la industria del sector.

Desde 1969, Alcatel Telspace ha acumulado una experiencia sin par como suministrador de avanzados equipos y sistemas completos para estaciones terrenas. La Compañía utiliza ventajosamente las nuevas tecnologías y ofrece una extensa gama de modernos equipos, incluyendo sistemas completos "llave en mano".

### Nuevas normas para tráfico internacional

La fundación de Intelsat en 1964 marcó una nueva era en las comunicaciones internacionales a larga distancia. Desde entonces, el sistema mundial de Intelsat ha sido prácticamente sinónimo de comunicaciones mundiales por satélite, puesto que Intelsat posee y explota tales sistemas en nombre de sus 114 países miembros. En resumen, el sistema mundial transporta unos 45.000 circuitos permanentes de voz y datos, y más de 50.000 horas al año de transmisiones programadas de televisión, y se complementa con sistemas regionales como el Eutelsat en Europa.

Las estaciones terrenas (271 estaciones en 160 países) que constituyen los equipos terminales de estos enlaces por satélite pertenecen a las autoridades nacionales de telecomunicación y son explotadas por ellas. No obstante, tienen que cumplir las normas dictadas por Intelsat, Eutelsat, etc., y de ahí la importancia primordial de tales normas técnicas y de explotación en esta aplicación industrial. La figura 1 expone las funciones y equipos de la estación terrena afectados por la evolución normativa.

La mayoría de las estaciones terrenas para tráfico internacional son de la Norma Intelsat A. Operando en la banda de 6/4 GHz (banda C), pueden cursar cualquier tipo de tráfico (telefonía multiplexada, datos, programas de televisión, etc.) y adaptarse fácilmente a cualquier aumento o cambio en la composición de dicho tráfico.

### Evolución de las normas sobre antenas de estación terrena

Hasta 1986, en las estaciones tipo A, se necesitaba un sistema de antena muy

costoso, equipado con un alimentador por guíaonda para conseguir el elevado factor de calidad G/T (relación entre ganancia y temperatura de ruido) especificado por Intelsat. Como este sistema pesa alrededor de las 200 toneladas, requiere cimentaciones grandes y costosas.

La reciente decisión de Intelsat de reducir la especificación de G/T desde 40,7 dB/K a 35 dB/K permite utilizar antenas más pequeñas y más sencillas. En consecuencia, Telspace ofrece ahora estaciones terrenas internacionales equipadas con antenas parabólicas de 16 a 18 metros de diámetro con alimentador simple tipo Cassegrain que cumplen la nueva Norma A de Intelsat. Pueden utilizarse antenas incluso de 13 metros (la tipo A pequeña) en estaciones terrenas que cursen escaso tráfico y que operen con elevaciones altas (ello mejora la G/T al reducirse las pérdidas de propagación atmosféricas).

Existen otros tipos de estaciones terrenas con antenas aún más pequeñas para tráfico internacional:

- Estaciones Norma B de Intelsat, que suelen equiparse con antenas de reflector de 11 m, para tráfico relativamente pequeño.
- Estaciones Norma C de Intelsat, y semejantes estaciones normalizadas Eutelsat operando en 14/11 a 12 GHz (Banda Ku).
- Diversos tipos de Intelsat (E2, E3, F2, F3), normalmente suministradas para servicios de empresa Intelsat.

Al disminuir los costes de inversión, estos nuevos tipos de estaciones permitirán a las Administraciones instalar nodos de tráfico internacional más cerca de los centros urbanos, y abrir rutas internacionales de buen rendimiento económico hacia lugares aislados donde el tráfico es poco denso.

#### *Transmisión digital en comunicaciones por satélite*

Otro desafío importante para la industria es la rápida conversión de la tecnología analógica en digital por efecto de la tendencia generalizada a digitalizar la transmisión, conmutación y bucles de abonado. Este avance permitirá incluir los enlaces vía satélite dentro de las RDSI.

Otros factores asociados al cambio son específicos de las comunicaciones por satélite. El uso de tecnología digital abre paso a espectaculares mejoras de rendimiento económico en las comunicaciones por satélite y en la utilización de lo que se denomina recurso órbita/espectro, ya que las nuevas técnicas, componentes, equipos, y codecs para la corrección de errores sin canal de retorno han permitido mejorar en varios decibelios el balance de los enlaces vía satélite. Al mismo tiempo, los EMCD (equipos multiplicadores de circuitos digitales) permiten transmitir hasta 150 canales telefónicos con un solo portador MIC de 2 Mbit/s, cinco veces la capacidad anteriormente posible. Intelsat ha impulsado el desarrollo de la transmisión digital por satélite variando su política de tarificación por



Terminal AMDT para 120 Mbit/s.

unidades de medio circuito telefónico a tarificación por unidades de soporte digital (portador), lo que reduce notablemente los costes mensuales pagados por compañías explotadoras equipadas con EMCD.

Hay dos principales métodos de acceso para establecer enlaces digitales a través de los transpondedores de los satélites. El primero es el AMDF (acceso múltiple por distribución en frecuencia), utilizado para transmitir portadoras analógicas. Este método también lo ha normalizado Intelsat para transmisión de portadoras digitales, denominadas IDR (velocidad de datos intermedia), que pueden transmitir en MDT (múltiplex por distribución en el tiempo) trenes digitales de 64 kbit/s sobre portadoras de 44 Mbit/s. Ello debería facilitar la transición desde las portadoras analógicas MDF/MF (múltiplex por distribución en frecuencia) a las nuevas portadoras MDT/IDR.

El segundo método es el AMDT (acceso múltiple por distribución en el tiempo). Desde 1986 funcionan regularmente enlaces AMDT con velocidades altas (120 Mbit/s) en el sistema Intelsat, y en el Eutelsat se está aplicando una norma AMDT análoga.

Alcatel ha estudiado todas estas técnicas y las ha puesto en práctica en una nueva generación de equipos utilizables por las compañías explotadoras de comunicaciones por satélite para incorporarse al avance mundial hacia la comunicación digital. En Europa están funcionando terminales AMDT de 120 Mbit/s de Telspace, que cumplen las especificaciones de Intelsat y de Eutelsat. Proporcionan una alta calidad de transmisión (tasa de error y disponibilidad acorde con las normas del CCITT y de la RDSI) combinada con una gran fiabilidad y sencillez de manejo para el usuario. El terminal de AMDT instalado en la estación terrena Pleumeur Bodou de los PTT franceses en 1985 fue el primero que entró en servicio dentro del sistema mundial de Intelsat.

Telspace ha desarrollado y produce modems IDR totalmente digitales, modems de velocidades variables y estaciones IDR completas que pueden utilizarse eficazmente en sistemas de satélites regionales y nacionales, así como en el sistema Intelsat.

Alcatel es líder en el desarrollo de terminales EMCD. El equipo EMCD CELTIC\*, desarrollado por Alcatel CIT/ATC inicialmente para aplicaciones en cable submarino, viene operando con éxito desde hace años en enlaces terrenales por satélite y de microondas. Los terminales CELTIC-3G multiplican por cinco o más la capacidad de tráfico de los enlaces por satélite en IDR

y AMDT. Siguiendo las recientes normalizaciones de EMCD para aplicaciones de IDR y AMDT en redes abiertas, Alcatel desarrolla ahora el terminal G/M CELTIC-3, acorde con las nuevas especificaciones de Intelsat.

### **Sistemas para comunicaciones de empresa**

Los servicios de comunicaciones de empresa pueden ser utilizados por compañías, sociedades y Administraciones en campos tan diversos como la industria, minería, finanzas y transportes, para unir directamente sus distintos centros mediante enlaces digitales ajustados a sus necesidades específicas. Las posibles aplicaciones van desde los servicios de telefonía privada y transmisión de datos hasta nuevos servicios, tales como comunicaciones entre ordenadores, videoconferencia, distribución y recogida de datos y transferencia bidireccional de datos.

Por presentar características como el acceso múltiple, capacidad de distribución e independencia de la distancia, las comunicaciones vía satélite son un medio ideal para tales servicios. Según las exigencias de tráfico del usuario, pueden ofrecerse diversos tipos de arquitectura de red, entre las que destacan las de punto a punto, en malla y en estrella.

#### **Redes punto a punto**

Se utilizan redes punto a punto cuando cada estación terrena sólo puede comunicarse con un número limitado de otras estaciones. Ejemplos importantes son los enlaces totalmente digitales del IBS (servicios de empresa Intelsat), su variante Super IBS que es compatible con la RDSI, y el sistema SMS (satélite multiservicio) de Eutelsat.

El sistema IBS opera bien en banda C (estaciones Norma F) o en banda Ku (estaciones Norma E), ofreciendo a los usuarios un servicio digital integrado para aplicaciones nacionales o internacionales. Intelsat acepta configuraciones IBS con redes entre usuarios cerradas o abiertas, estas últimas con interfaces normalizados.

Tanto el IBS como el SMS (equivalente al IBS en Eutelsat) pueden explotarse de tres diferentes formas, dependiendo de la reglamentación de telecomunicaciones local. Primeramente, en países con monopolio del estado o de compañía explotadora sólo puede haber un acceso nacional al IBS, y deberán instalarse redes terrenales para conectar los usuarios a esta gran estación terrena IBS (Normas A, B, C, E3, F3). En segundo lugar, si la reglamentación estatal

\* Marca registrada del grupo Alcatel



lo permite, el punto de acceso podría ser regional o urbano, o cubrir solamente una zona industrial. En tales casos pueden utilizarse estaciones de mediana capacidad (Normas E2, E3, F2 y F3). En tercer lugar, y también si las leyes locales lo permiten, se puede dar servicio al usuario final por medio de una pequeña estación terrena instalada en sus dependencias, dándole acceso al servicio prestado por el satélite sin enlaces terrenales intermedios.

Tel-space produce e instala una variedad de estaciones terrenas IBS/SMS, equipadas todas ellas con el mismo modem digital avanzado, de velocidad variable, utilizado en enlaces IDR. El tamaño de las estaciones terrenas y de sus equipos depende de la capacidad de tráfico de los usuarios y de los requisitos del acceso múltiple. En el extremo inferior de la gama, las pequeñas estaciones Norma E1 pueden equiparse con antenas de 3,5 m, uno o más modems, y un transmisor de baja potencia radiada. Por el otro extremo, las estaciones Norma E3 ó F3 suelen poseer antenas de 8 a 10 m, varios modems, y su potencia de transmisión es mediana o alta. Incluso las grandes estaciones terrenas que cursan tráfico internacional (Normas A, B y C) pueden acceder a los enlaces IBS.

En los casos más sencillos, sobre todo cuando la utilización se hace en la propia estación, Tel-space produce estaciones compactas, compuestas de dos unidades separadas. La unidad exterior consta de antena junto con subunidades de RF, amplificador de bajo ruido, amplificador de potencia (tal vez enteramente de estado sólido), y convertidores elevadores y reductores. La unidad interior es el terminal de comunicación, incluyendo los modems y placas de interfaz.

#### *Redes en malla*

Cuando se requiere conectividad total con acceso múltiple entre un número apreciable de estaciones terrenas, se utilizan arquitecturas de red en malla. En este caso, un sistema de portadora única que funcione en modo AMDT suele ser más económico y eficiente que los AMDF, ya que en éstos cada estación debe equiparse con tantos modems como estaciones a las que deba acceder. En consecuencia, el AMDT, que utiliza un modem único por ráfagas, suele ofrecer ventajas notables en cuanto al coste, flexibilidad de operación, capacidad de reconfigurarse, y asignación por demanda.

Alcatel Tel-space posee una gran experiencia en redes AMDT para comunicaciones de empresa, como contratista principal de los PTT franceses para el sistema de comunicaciones multiservicio TELECOM 1, que viene operando en Francia y Europa

desde diciembre de 1984<sup>1</sup>. El sistema proporciona todo tipo de vías de comunicación entre interfaces normalizados (hasta 2,048 Mbit/s). Cada estación local comprende una unidad exterior equipada con antena de 3,5 m, una subunidad protegida de transmisión-recepción en RF, y un terminal AMDT interior. Hay cerca de 60 estaciones en servicio. La sincronización y gestión de la red se basan en una estación de referencia duplicada y un centro de gestión situado en Mulhouse, al este de Francia.

Los terminales TDMAX\* desarrollados por Tel-space a partir de equipos y principios de operación TELECOM 1 trabajan con velocidades comprendidas entre 3 a 25 Mbit/s. Estos terminales compactos amplían los servicios de empresas de TELECOM 1 a aplicaciones menos centralizadas (ejemplo, redes especializadas internas de una compañía) y a otros sistemas de satélite. Además, la variabilidad de la velocidad binaria permite adaptar el sistema a las necesidades del usuario. Pueden utilizarse terminales TDMAX en muchos sistemas de comunicación por satélite que operan a 6/4 GHz y a 14/11-12 GHz.

Por contrato con Intelsat, se ha probado el sistema TDMAX funcionando en el modo de sincronización "haz puntual", con vistas a abrir paso a un nuevo servicio IBS transcontinental capaz de ofrecer todas las posibilidades de mallas en la red.

#### *Redes en estrella*

La mayoría de las compañías han adoptado una jerarquía propia, reflejada en sus necesidades de comunicación. Numerosas actividades humanas se gobiernan de modo centralizado y ello debe traducirse en sus comunicaciones. En tales casos la configuración más apropiada es la red en estrella, con una estación terrena central (el núcleo) y un cierto número de terminales remotos equipados con microestaciones (TAMP), ofreciendo así distribución y recogida de datos, servicios interactivos de transferencia de datos, y opcionalmente canales de voz y difusión de imágenes.

El pequeño tamaño de las antenas (típicamente de diámetro 1,8 m) hace que estas redes necesiten una porción apreciable de la potencia radiada por el transpondedor del satélite. No obstante, el gran número de usuarios con conexión directa (repartidos por toda la zona de cobertura del satélite) y la capacidad de difundir datos de la estación central propician el rendimiento económico especialmente bueno de estos sistemas.

Alcatel Tel-space ha desarrollado la microestación FASTAR\* destinada a comu-

\* Marca registrada del grupo Alcatel



**Terminal TDMAX**  
compacto para AMDT  
de 3 a 25 Mbit/s.

nicaciones internas de la empresa<sup>2</sup>, utilizando las más avanzadas técnicas y tecnologías:

- modems con demodulador de elevada sensibilidad y codecs con corrección de errores sin canal de retorno
- amplificadores de potencia de estado sólido
- microprocesadores y tecnología VLSI
- técnicas de acceso en modo paquete y transmisión MDT/AMDT
- interfaces de usuario y protocolos normalizados (p. ej., CCITT X.25).

Telspace suministra sistemas completos, incluyendo el equipo y los programas para explotar la red desde la estación central y para la implantación de aplicaciones específicas de los usuarios.

### **Estaciones para aplicación rural y rutas de poco tráfico**

Telspace posee una larga experiencia en el suministro de redes nacionales de comunicación por satélite, con 65 estaciones terrenas actualmente en servicio en seis países

de África y Sudamérica. La Compañía no sólo suministra las estaciones y equipos asociados sino que puede hacerse cargo de todo el proyecto de ingeniería, incluyendo los estudios de optimización de la capacidad del segmento espacial.

Hasta hace muy poco tiempo, estas redes nacionales servían principalmente para crear vías de telecomunicación entre centros principales, como son las capitales de provincia, en países en desarrollo. Hoy en día, la viabilidad de pequeñas estaciones terrenas de bajo coste abre el paso hacia el uso intenso de las comunicaciones por satélite en zonas remotas de escasa población. Estos servicios de comunicaciones rurales pueden establecerse a través de satélites de Intelsat, bien utilizando el servicio VISTA (que permite imputar los costes del segmento espacial circuito por circuito), o bien alquilando o comprando transpondedores a Intelsat. También pueden implantarse por medio de satélites nacionales especializados.

Las estaciones terrenas FASTCOM\* han sido diseñadas por Alcatel Telspace para atender las principales exigencias de este tipo de sistemas: facilidad de operación, fiabilidad, resistencia a extremas condiciones ambientales, y bajo coste<sup>3</sup>. Pueden ofrecer comunicaciones telefónicas, transmisión de datos y tal vez la recepción de televisión en condiciones económicas, a las zonas más desfavorecidas de los países en desarrollo.

### **Conclusiones**

Se están produciendo cambios en las comunicaciones por satélite que favorecerán el crecimiento económico del mundo, y en particular el bienestar de los países en desarrollo. La industria de estaciones terrenas debe intensificar sus esfuerzos en I+D para afrontar el desafío que plantean las nuevas exigencias de los clientes. De ahí resultará el desarrollo de una gama entera de equipos digitales y equipo integrado de bajo coste para estaciones terrenas, así como la introducción de sistemas completos de equipo y programación para todo tipo de aplicaciones – como las comunicaciones de empresa y las rurales – en que los usuarios se conecten directamente a la red del satélite.

Alcatel Telspace ha aceptado este reto y se asienta en una posición predominante en la industria de estaciones terrenas. La larga experiencia de la Compañía en comunicaciones digitales y en tecnologías de pequeñas estaciones terrenas garantiza una poderosa sinergia entre sus trabajos de desarrollo en toda la gama de nuevos pro-

\* Marca registrada del grupo Alcatel

ductos, incluyendo equipos IDR/IBS/SMS, terminales AMDT, TAMP Fastar, y estaciones Fastcom analógicas y digitales. Al mismo tiempo, Telspace podrá capitalizar la experiencia de otras compañías de Alcatel en cuanto a la compatibilidad con la RDSI y servicios directos de usuario a usuario.

#### Referencias

- 1 J. Bléret, A. Demars y A. Karas: Sistema de transmisión de datos TELECOM 1: *Comunicaciones Eléctricas*, 1988, volumen 62, n° 1, págs. 27-34 (en este número).
- 2 A. F. Beaucent, J. Bousquet y G. Guillemaud: Sistema de microestación para redes de datos empresariales: *Comunicaciones Eléctricas*, 1988, volumen 62, n° 1, págs. 35-41 (en este número).
- 3 J. Esculier, A. Parnière y J. Salomon: Sistema de comunicación por satélite para países en desarrollo: *Comunicaciones Eléctricas*, 1988, volumen 62, n° 1, págs. 42-48 (en este número).

**Guy Lefrançois** nació en 1940. Se graduó en la Ecole Polytechnique en 1964, y en la ENST (Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications) en 1966, trabajando después en el Centre National d'Etudes des Télécommunications. Desde 1972 a 1978 fue decano y luego presidente adjunto de dicha ENST, siendo después nombrado director adjunto del Ministerio de Industria para industrias informáticas y electrónicas. El Sr. Lefrançois fue durante varios años presidente del Comisariado para la energía solar, antes de incorporarse al grupo Thomson como vicepresidente para el desarrollo de negocios de la LTT. En 1984 fue nombrado presidente de Alcatel Telspace.

# Sistema Syracuse de comunicaciones militares por satélite

El sistema del satélite Telecom 1 se ha utilizado con éxito para realizar dos aplicaciones civiles y una militar. El Syracuse I, un sistema de comunicación militar para las fuerzas armadas francesas, utiliza una carga útil separada y su propia red de estaciones terrenas, pero se aprovecha de los servicios comunes del satélite y de un centro de control común para ofrecer servicios de comunicación militar de télex, telefonía y de datos.

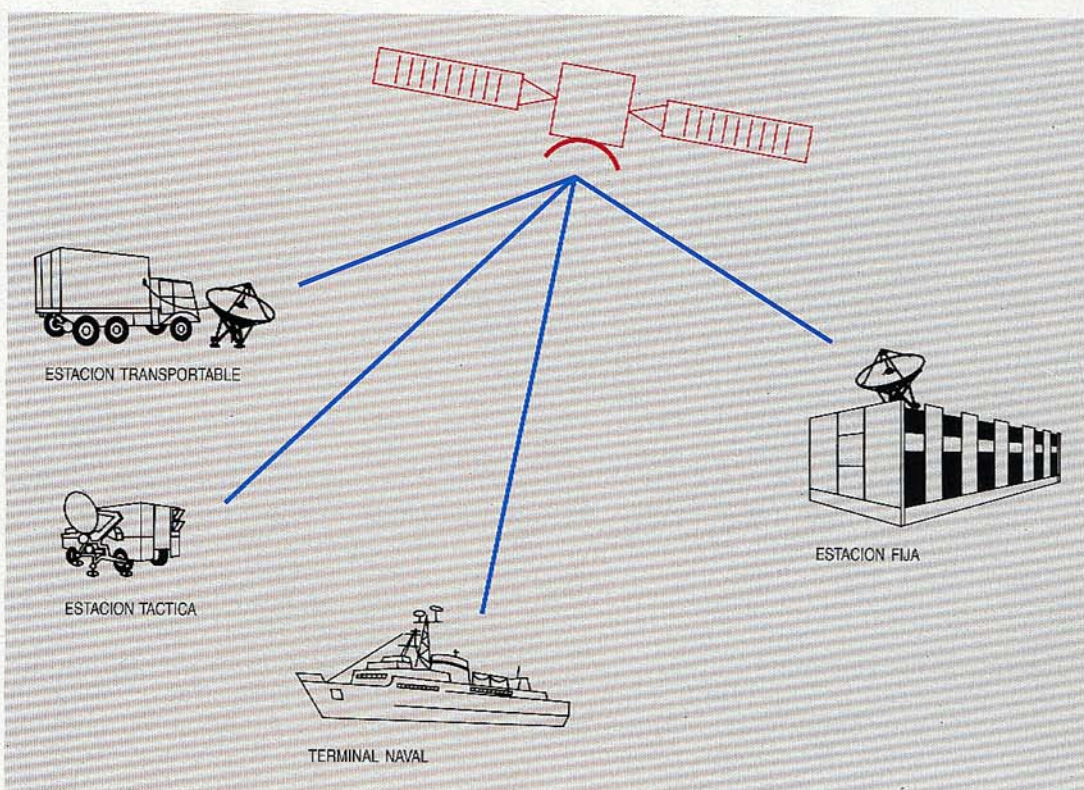
**P. Mollat du Jourdin**

Alcatel Espace, Courbevoie, Francia

## Introducción

El sistema Syracuse I de comunicaciones militares por satélite, que entró en funcionamiento en 1985, se basa en los satélites Telecom 1 del gobierno francés, incluido el subsistema de seguimiento, teledirigido y telemando. Sin embargo, posee su propio segmento terreno para las estaciones militares en tierra. El satélite Telecom 1A fue lanzado en agosto de 1984, seguido por el Telecom 1B en mayo de 1985 hasta principios de 1988; el Telecom 1C fue lanzado en marzo de 1988.

Alcatel Espace se responsabilizó de la definición del sistema Syracuse, y actuó como contratista principal para la carga útil del Telecom 1 y el segmento terreno militar. Esto suponía identificar las necesidades de los usuarios militares (tipos de tráfico, capacidad de transmisión, número de enlaces simultáneos, valoración de amenazas, situación de usuarios y zonas de cobertura) y dimensionar la carga útil militar (masa, volumen, consumo, etc.). Hubo también que preparar las especificaciones de los elementos principales del sistema, tales como carga útil del satélite, estaciones



**Figura 1**  
Diagrama mostrando los cuatro tipos de estaciones terrenas utilizadas en el sistema Syracuse de comunicaciones militares.

terrenas fijas y móviles y equipo terminal de usuario, y establecer o seleccionar las normas tecnológicas, de acuerdo con las fuerzas armadas, con el objetivo de obtener el máximo aprovechamiento del equipo común dentro de la red. Todos estos estudios se realizaron por encargo de la DGA (Délégation Générale pour l'Armement), que en el Ministerio de Defensa francés es responsable de adquisición de sistemas y equipos para los ejércitos. Finalmente, Alcatel Espace se encargó de las evaluaciones técnicas y económicas para seleccionar a los subcontratistas.

### Historial técnico

En 1977, el Ministerio de Defensa francés inició un estudio para demostrar la viabilidad de la comunicación entre una estación a bordo de un buque y una estación costera vía un repetidor de satélite (Fig. 1). Otro de los objetivos fue utilizar la técnica AMEE (acceso múltiple por ensanchamiento del espectro) en un enlace vía satélite, lo cual exigía resolver problemas de sincronización, contando con los movimientos del buque y del satélite. Por esta razón, la estación experimental Sextius una vez desarrollada, fue probada en el mar. Por entonces no había ningún satélite nacional, excepto el satélite francoalemán Symphonie, que funcionaba en la banda de 6/4 GHz, y por consiguiente la estación Sextius tuvo que utilizar estas frecuencias.

A lo largo de los ensayos se establecieron y probaron las principales características técnicas del sistema Syracuse, incluyendo las técnicas de modulación y protección, la arquitectura y el sistema de puntería para la antena naval, el uso de frecuencias de la banda SHF, etcétera. Sin embargo, no fue posible mantener las frecuencias de 6/4 GHz para el sistema Syracuse por estar reservadas para el servicio fijo de radiocomunicación por satélite, mientras que una red militar incluye estaciones móviles y transportables que pueden utilizarse en toda la zona de cobertura del satélite. De acuerdo con las normas de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, las frecuencias más próximas que puede emplear un servicio móvil por satélite son 8/7 GHz. Estas bandas facilitan además el interfuncionamiento con los satélites de la OTAN y otros aliados.

### Descripción del sistema

La principal misión del sistema Syracuse I es proporcionar vías de comunicación entre buques de guerra y bases navales costeras,

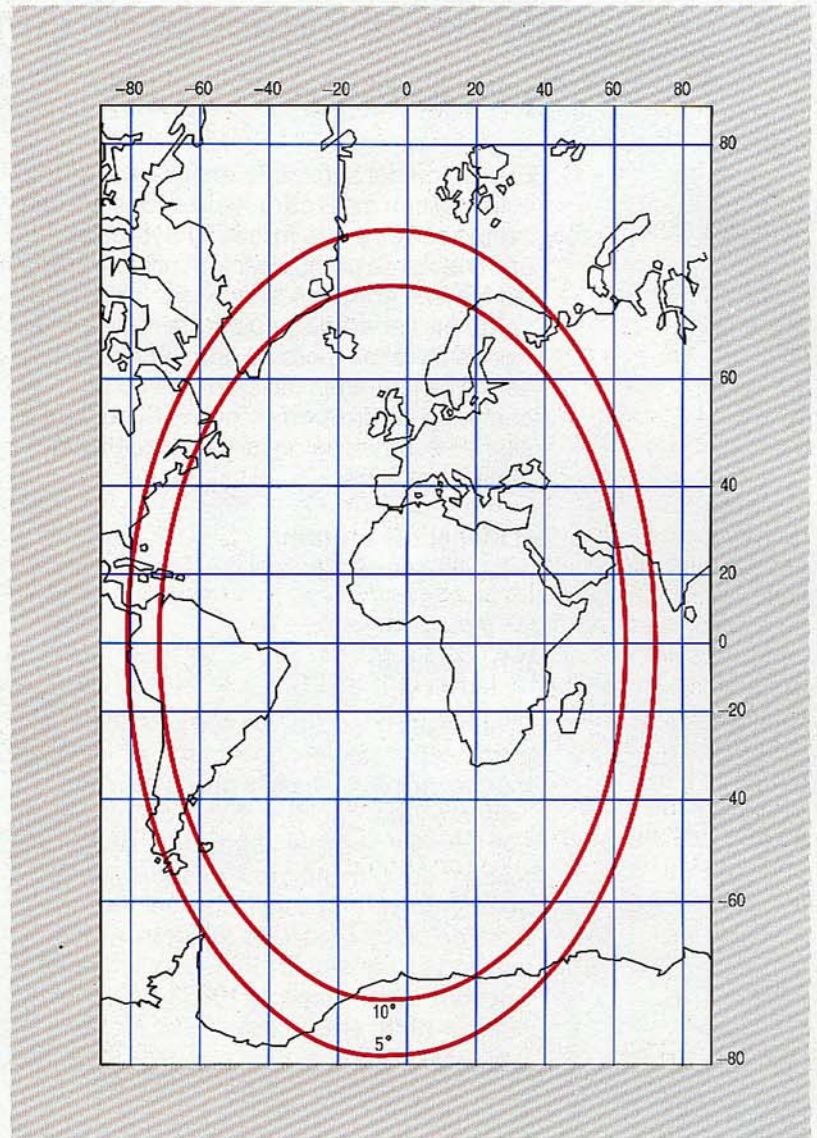


Figura 2  
Diagrama de cobertura global del satélite Telecom 1 para ángulos de elevación de 5° y 10°.

así como entre bases militares de la Francia metropolitana y ejércitos desplegados fuera del territorio francés o autoridades militares de territorios franceses de ultramar. Además, sirve como sistema de reserva para la red de infraestructura militar nacional y la red de radiocomunicación táctica de campo de batalla. Todas las comunicaciones por satélite están protegidas contra interferencia intencionada, intrusión y escucha clandestina.

La red de tierra se basa en estaciones terrenas, situadas en la Francia continental y conectadas a la red de defensa terrenal. Las estaciones incluidas en la zona de cobertura del satélite se pueden comunicar con estas estaciones de gran tamaño.

El tráfico de seguridad de télex y datos, con velocidades de 75 bit/s, 2400 bit/s y 16 kbit/s, es controlado a través de los modems AMEE, en cada estación. Los enlaces telefónicos utilizan bien un codificador vocal cifrado LPC10 (codificación predictiva lineal) de 2400 bit/s, o bien circui-

tos de voz de 16 bit/s, en modulación delta. Se aplican técnicas de espectro ensanchado para obtener una alta protección a la interferencia y proporcionar acceso múltiple a la red.

### Satélites Telecom 1

El satélite Telecom 1A está situado en una órbita geostacionaria a 5° O (Fig. 2). Los tres satélites Telecom 1 fueron diseñados para una vida operativa de 7 años y tienen una capacidad de eclipse del 100% (pueden continuar operando durante el eclipse más largo previsto durante su vida activa).

Los satélites Telecom 1 tienen tres misiones independientes: dos para los PTT franceses y una misión militar. El sistema Syracuse utiliza antenas de bocina separadas para el enlace ascendente y el enlace descendente, proporcionando una cobertura que se extiende desde las Indias Occidentales hasta las Islas Reunión en el océano Indico, entre 70° N y 70° S, aproximadamente.

La carga útil consta de dos repetidores de 40 MHz, de alta ganancia, provistos cada uno de ellos de un amplificador de tubo de onda progresiva de 20 W (más uno de

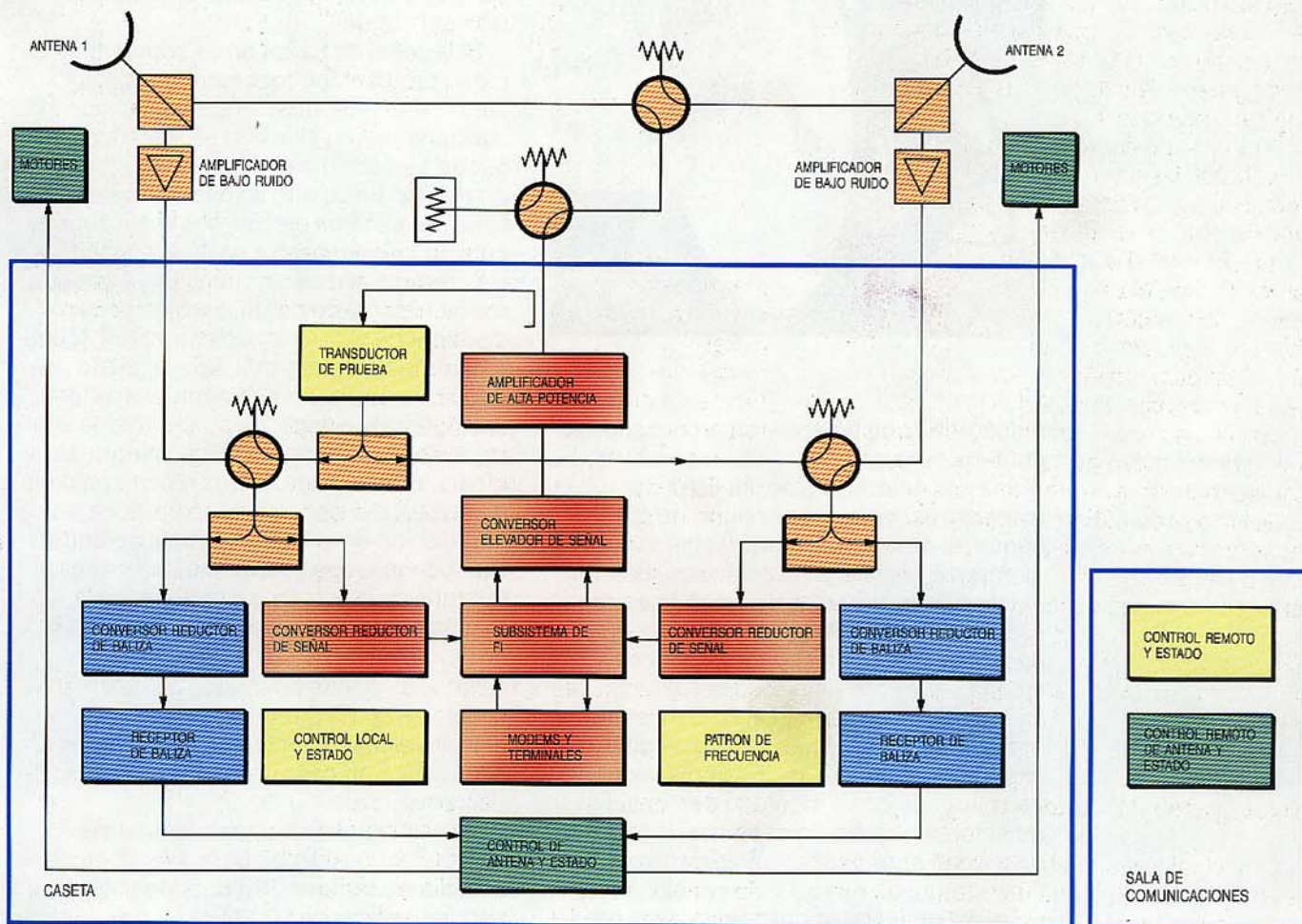
reserva en común) que opera a 7 y 8 GHz, conectado a unas antenas de bocina con ganancia de 19 dB. El enlace ascendente y el descendente utilizan polarizaciones circulares ortogonales. La temperatura de ruido de la antena de 8 GHz es de 1030 K. La mínima densidad del flujo de potencia en la antena de recepción, que proporciona la ganancia de amplificador máxima, es de  $-87,0 \text{ dBW/m}^2$ . Los repetidores están diseñados para resistir fuertes señales de interferencia.

El subsistema de seguimiento, telemetría y telemando es común a las tres misiones. El enlace de telemando está cifrado por seguridad, especialmente por la índole militar del Syracuse.

### El segmento terreno

El segmento terreno del Syracuse I incluye estaciones fijas, estaciones tácticas (móviles), terminales transportables y estaciones a bordo de buques. Algunas partes de estos cuatro tipos de estaciones terrenas son idénticas, como los convertidores de elevación y reducción de frecuencia, los amplificadores de alta potencia (salvo en la estación táctica), los receptores de baliza y

**Figura 3**  
Esquema de bloques de un terminal naval.  
FI - frecuencia intermedia.



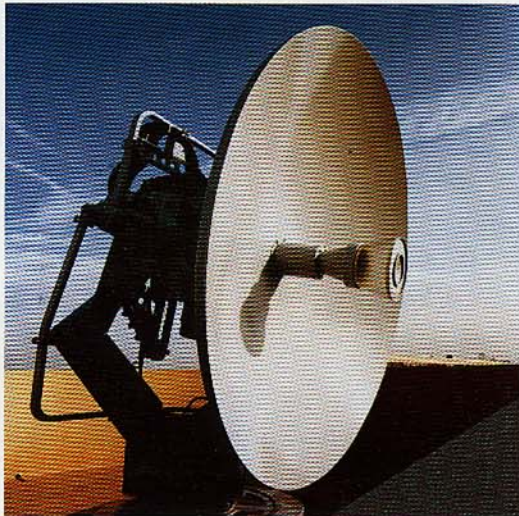
amplificadores de bajo ruido. Este enfoque simplifica el desarrollo y mantenimiento del equipo del segmento terreno. Aunque las estaciones se hayan destinado a operar con el satélite Telecom 1, pueden también trabajar con satélites de la banda SHF, pertenecientes a la OTAN y a otros aliados.

### Estación naval

La estación naval (Fig. 3), consta de una caseta montada sobre la cubierta, dos antenas (protegidas por radomos) en los lados de babor y estribor, y los equipos de la sala de comunicación (terminales de operador y las unidades de control remoto y estado). El equipo puede trasladarse de un buque a otro con facilidad.

La caseta alberga el equipo de comunicación y el de control de antena: un amplificador a klystron de 1,5 W, elevadores y reductores de frecuencia, receptor de baliza, dispositivos de prueba y de control, servo-

Estructura de antena para una estación de a bordo.



mecanismos de antena y un procesador de puntería de la antena.

Las dos antenas están situadas de manera que, en cualquier posición del buque, al menos una tenga visibilidad directa del satélite, sin obstáculos. Los detalles de la superestructura del buque están almacenados en una memoria PROM para que la estación sepa siempre cuál antena tiene libre visibilidad del satélite. Las antenas tipo Cassegrain, de 1,5 m, están estabilizadas en los tres ejes, usando un soporte en forma de lira. El amplificador de tipo paramétrico va montado detrás del reflector principal para asegurar un factor de calidad bueno (relación de ganancia a temperatura de ruido, G/T), consiguiendo así el máximo aprovechamiento de la capa-

dad del satélite. La precisión del sistema de puntería de la antena es mejor que  $0,25^\circ$ , aun con la cubierta del buque inclinada en  $30^\circ$ .

La puntería puede alcanzarse de modo manual o automático. En el segundo caso hay un modo normal (o programado) y dos modos en reserva: la búsqueda en espiral y el seguimiento por barrido. En el modo normal, las antenas apuntan automáticamente hacia el satélite, utilizando datos computados a partir de los valores de latitud, longitud, rumbo, balanceo y cabeceo que el buque proporciona al *control por servos de la antena*, junto con los datos de las efemérides del satélite (posición del satélite, definida en las tablas de pronóstico) que se introducen de modo manual a través de la unidad de control de antena y estado. Cuando la antena alcanza la posición computada, un indicador visual informa al operador que se ha captado la señal de baliza enviada por el satélite. La puntería óptima de la antena se consigue mediante un procedimiento paso a paso, automático, que modifica cada coordenada por incrementos hasta recibir el máximo nivel de la señal de baliza, a la vez que se actualiza la posición calculada. El procedimiento de seguimiento paso a paso y la actualización de posición se efectúan periódicamente para compensar los posibles errores de rumbo y situación del buque.

Si la señal de baliza no se adquiere en el modo programado (por ejemplo, si los datos de efemérides del satélite no son lo suficientemente exactos) el operador puede seleccionar el modo de *búsqueda en espiral*. En cuanto se detecta la señal de baliza, el sistema ejecuta automáticamente un seguimiento paso a paso, y a continuación retorna al modo normal. En el caso de recibir la señal de baliza, pero no poder disponer de algunos datos de latitud, longitud, rumbo o datos verticales, el modo de *seguimiento por barrido* permite mantener una óptima precisión de puntería de la antena, al ser permanente el seguimiento. En efecto, el eje de una antena recorre un cono de revolución, con lo cual se produce una modulación de la señal; la señal demodulada puede luego utilizarse para corregir la puntería de la antena. La otra antena la orienta el procesador de puntería hacia la posición media de la primera.

También puede apuntarse manualmente la antena, como puede ser necesario durante el mantenimiento o las pruebas en el puerto, o en caso de fallo en la indicación del rumbo.

La estación naval comparte algunas características con los otros tres tipos de estaciones terrenas. Se pueden utilizar las bandas enteras de 500 MHz, tanto de trans-

**Estación táctica.**

misión como de recepción, siendo la banda útil instantánea de 40 MHz, lo cual significa que el espectro de frecuencia de un enlace se puede extender a esta anchura de banda. La frecuencia de transmisión se puede seleccionar por pasos de 10 kHz, y la de recepción, de 100 en 100 Hz. Se utilizan polarizaciones circulares dextrógira y levógira para la transmisión y la recepción, respectivamente. La relación axial de la polarización no supera 1,4 (3 dB).

La temperatura de ruido del amplificador paramétrico es aproximadamente de 100 K. Los elevadores y reductores de frecuencia proporcionan conversión entre las bandas de frecuencia de 8/7 GHz y la frecuencia intermedia, de 70 MHz. (El diseño permite también utilizar una frecuencia intermedia de 700 MHz en otras aplicaciones).

La estación naval tiene una PIRE (potencia isotropa radiada equivalente) de 67 dBW y un factor de calidad (G/T) de 18 dB/K.

**Estación transportable.****Estación táctica**

La estación táctica es una estación terrena de tipo ligero, transportable. Consiste en un vehículo todo terreno, una caseta con equipo, una antena provista de un amplificador de bajo ruido, un juego de cables de conexión, y un grupo generador móvil que puede ser remolcado por el vehículo. La caseta alberga equipos de telecomunicación y acondicionamiento de aire.

Todo el equipo, con el sistema de antena, los carretes de cable, y los aparatos de operador, puede quedarse dentro de la caseta mientras la estación se desplaza. Un avión de transporte puede llevar una estación táctica completa, incluyendo vehículo, grupo generador móvil, combustible y personal de operación.

Durante el funcionamiento, la caseta permanece en el vehículo, mientras que la antena se instala sobre un terreno sin acondicionar. La estación se puede montar y poner en servicio en menos de una hora, y la manejan tres personas, con lo que es utilizable las 24 horas del día. Los terminales de operador se pueden situar dentro de la caseta o a una distancia de 400 m, si así conviniere o se necesitare mayor aislamiento.

La antena, que se desmonta para el transporte, consta de un trípode con patas ajustables, una fuente excéntrica con dispositivo deshelador y reflector monobloque de 1,3 m de diámetro. Se coloca a una distancia de 2 m del vehículo y se orienta manualmente hacia el satélite utilizando el mecanismo de puntería. El azimut y la elevación se calculan a partir de la posición del satélite (datos publicados en efemérides astronómica), y las coordenadas del terminal. Se efectúa un ajuste con ayuda de una brújula y un clinómetro. El sistema de montaje de la antena permite elevaciones que van desde 0° hasta 90°, y una gama acimutal de 360° por sectores de  $\pm 30^\circ$ . Por consiguiente, la antena puede ser utilizada en cualquier parte de la zona global de cobertura del satélite. La puntería de la antena se puede corregir haciendo máximo el nivel de la señal de baliza recibida.

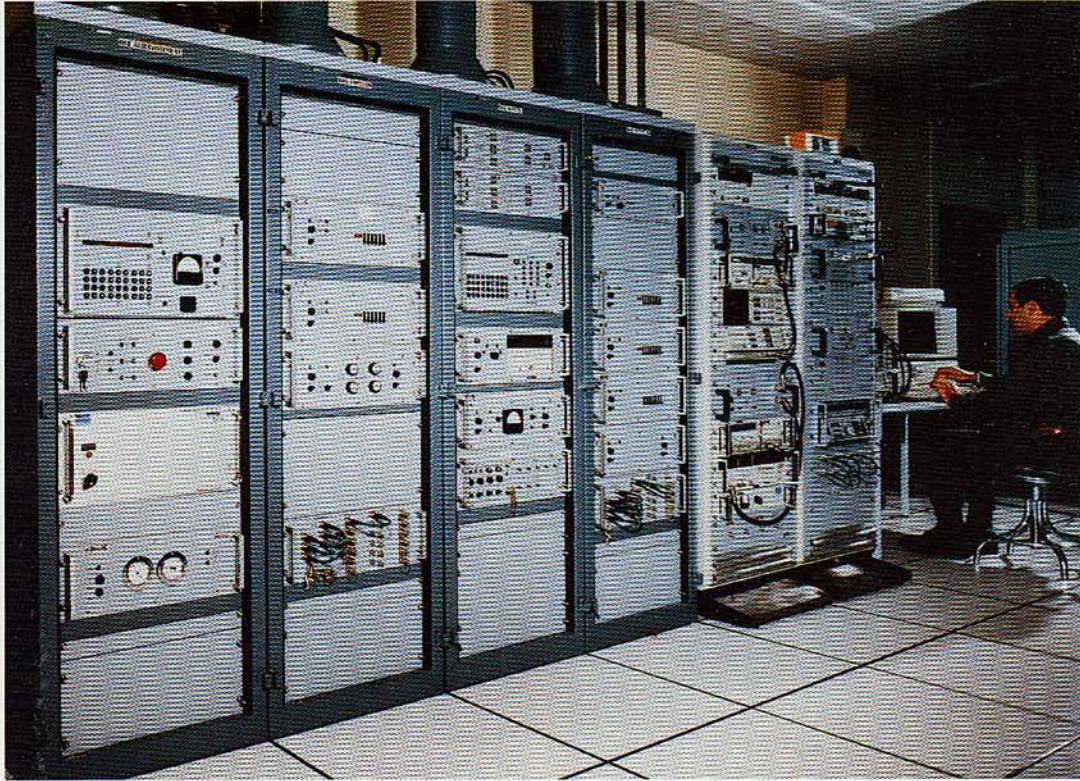
La potencia del transmisor es generada por un amplificador de tubo de onda progresiva de 150 W, lo que da una PIRE de 58 dBW para la estación táctica. El factor de calidad (G/T) es de 15 dB/K.

**Estación transportable**

La estación transportable utiliza los mismos elementos de la estación táctica, y también se puede manejar desde el interior de la caseta o a 400 m de la misma. Por su mayor



Estación fija.



tamaño de antena y potencia más elevada, ofrece una capacidad de tráfico superior y protege mejor contra las interferencias intencionadas. Un amplificador de potencia, con klystron de 1,5 kW, proporciona una PIRE de 74 dBW y un factor de calidad (G/T) de 22 dB/K.

La antena parabólica con alimentador en el foco, tiene un reflector de 3 m de diámetro compuesto por cuatro sectores ensamblados. La puntería se lleva a cabo como en la estación táctica.

Cuatro personas son capaces de montar la estación en dos horas, y ésta puede funcionar las 24 horas ininterrumpidamente.

### Estaciones fijas

Las estaciones fijas, las más grandes de la red, actúan como nodos para el intercambio de la información. Los usuarios están conectados a las estaciones fijas a través de la red de telecomunicación militar francesa, que proporciona una gestión automática del tráfico y medios de supervisión.

La antena, en forma de disco parabólico, de 8 m de diámetro, se alimenta en el punto focal. El seguimiento del satélite se efectúa bien por el cálculo de su posición o bien por la captación de la señal de baliza del mismo.

Las estaciones fijas pueden trabajar simultáneamente en ambos canales del satélite de anchura de banda 40 MHz. Se equipan dos amplificadores a klystron, de

1,5 kW (más uno de reserva), para dichos canales, obteniendo una PIRE de 80 dBW por canal. El factor de calidad de la estación (G/T) es de 31 dB/K. Una de las estaciones fijas controla el conjunto del tráfico de la red militar, asignando los recursos del satélite y de la red según la demanda.

### Estado y experiencia operativa

La red del sistema Syracuse es totalmente operativa. Entre 1985 y 1987 se entregaron a las fuerzas armadas veintiseis estaciones: tres estaciones fijas, nueve transportables, tres estaciones tácticas y once estaciones navales. El sistema Syracuse ha demostrado su fiabilidad y ventajas operativas en todo este tiempo, concretamente por establecer enlaces de comunicación con buques dentro de la zona de cobertura, tras largos periodos transcurridos navegando fuera de la misma.

El mantenimiento lo realiza el personal adscrito a la estación, hasta el nivel de placas de circuito impreso. Las facilidades de operación y mantenimiento se han centralizado cerca de una de las estaciones fijas, almacenando en tal lugar el equipo y las piezas de repuesto para toda la red.

### Desarrollo del sistema Syracuse II

El tiempo de vida operativo del satélite Telecom 1A, estimado en siete años, signi-

fica que se debería poner en órbita un nuevo sistema a finales de 1991. Ya en 1983, el Ministerio de Defensa francés, confió a Alcatel Espace la misión de estudiar y definir la segunda generación de sistemas de comunicación vía satélite.

El sistema Syracuse II cumplirá todos los requisitos del sistema de primera generación. A ello añadirá una mayor capacidad de tráfico y el soporte de un número de estaciones terrenas más elevado, con una superior movilidad y una mayor resistencia a los sistemas de guerra electrónica, tanto para los enlaces de comunicación como para los enlaces de teledando. En enero de 1987 el Ministerio de Defensa francés aprobó el proyecto Syracuse II. De la misma forma que en el Telecom 1, el segmento espacial en el nuevo sistema tendrá dos misiones, una civil y otra militar, pero con un tiempo de vida activa de 10 años.

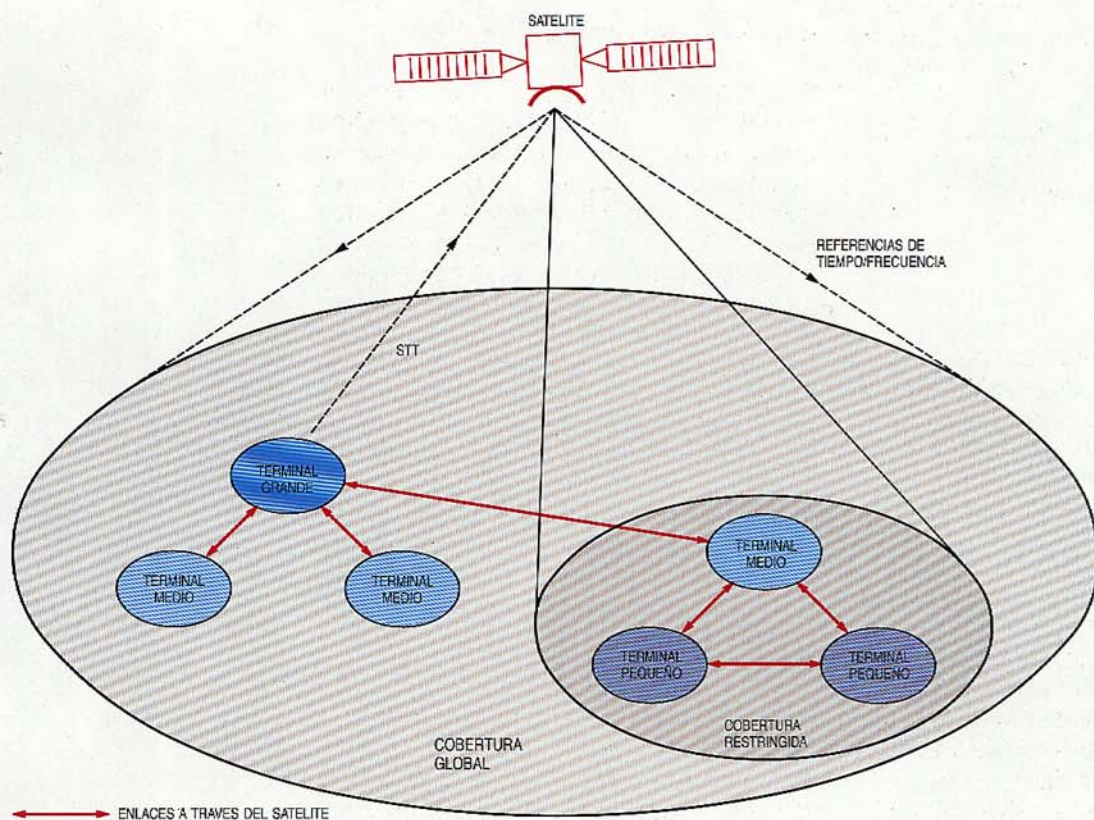
La carga útil militar del Telecom 2 será mucho más grande que la del presente sistema. Constará de cinco transpondedores (algunos con potencia de salida de 40 W), antenas de bocina que proporcionan la misma cobertura global que en el Telecom 1, otra antena que cubre el territorio francés y la Europa central, y una antena orientable de haz estrecho cuya traza mide 1800 km de diámetro, que puede ser desplazada por teledando a cualquier punto dentro de la zona de cobertura (Fig. 4). Además, el satélite puede aprovecharse de disponer de un enlace militar de órdenes

especializado, y difundir la sincronización de la red a todos los usuarios del sistema Syracuse.

Todos los tipos existentes de estaciones terrenas del sistema Syracuse son utilizables dentro del sistema de nueva generación, además de varios tipos nuevos de estación, de potencia inferior y antenas más reducidas (de 0,4 a 0,9 m de diámetro), que pueden instalarse a bordo de buques más pequeños, submarinos, vehículos ligeros, e incluso aviones. Dos estaciones fijas en el territorio de la metrópoli, con antenas de 18 m de diámetro, proporcionarán una recepción de teledanda y transmisión de teledando, incluyendo las funciones del centro de control de la red.

Como el sistema actual, el Syracuse II podrá establecer enlaces vía satélite entre las estaciones terrenas fijas y todas las estaciones móviles. Proporcionará asimismo enlaces directos entre estaciones móviles o transportables, particularmente en la zona cubierta por el haz estrecho. El sistema normal AMEE será complementado con el de acceso múltiple por distribución de frecuencia. Finalmente, las estaciones terrenas serán capaces de interfundir con la red táctica de combate RITA (red integrada de transmisión automática) y con la cuarta generación de equipos radio portátiles del ejército francés.

El equipo del proyecto nombrado por el Ministerio de Defensa francés, que comprende la DGA (Délégation Générale pour



**Figura 4**  
Operación típica del sistema Syracuse II. STT - seguimiento, teledanda y teledando.

l'Armement), y el STEI (Service Technique de l'Electronique et de l'Informatique) ha confiado a Alcatel Espace tres grandes responsabilidades:

- contratista principal del sistema Syracuse II
- compartiendo la responsabilidad con Matra, contratista principal de la carga útil para el satélite Telecom 2
- contratista principal conjunto con ATFH para el segmento terreno del sistema Syracuse II.

Actualmente se desarrollan intensas negociaciones internacionales para adjudicar los contratos de diseño y fabricación del sistema, que asegurarán altos niveles de calidad junto con costes óptimos.

## Conclusiones

La experiencia del sistema Telecom 1 ha demostrado que es técnica y operativamente posible implantar aplicaciones militares y civiles en un sistema de satélite común. Aunque los usuarios generalmente prefieren ser independientes y tener un control total de su propio sistema, el com-

partir los costos es un argumento poderoso para el establecimiento de un sistema conjunto. No obstante, esto sólo se puede conseguir si se forma pronto un equipo común que adopte las principales decisiones técnicas.

## Bibliografía

- 1 B. Blachier, J. Bouguet, J. D'Hollander y J. L. Soula: Telecom 1 Payload: *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1982.
- 2 P. Luginbuhl y J. Salomon: Telecom 1 Digital Transmission Earth Stations: *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1982.
- 3 P. Luginbuhl, A. Le Roux y P. Mollat du Jourdin: Syracuse, the French Military Satellite Communication System, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1986.
- 4 G. du Chéné: Syracuse II: *Revue L'Armement*, edición especial, n° 11, febrero de 1988.

**Patrick Mollat du Jourdin** nació en París, en 1946. Se graduó en ingeniería por la Ecole Navale, de Brest y después por la Ecole National Supérieure des Télécommunications de París. Como oficial de comunicaciones en la armada francesa, participó en el diseño de varios sistemas de comunicación así como de equipos de a bordo. Ingresó en Alcatel Espace en 1982 como director de proyecto para el diseño preliminar del sistema Syracuse II. El Sr. Mollat du Jourdin es en estos momentos responsable comercial de los sistemas de satélites para la defensa, incluyendo los satélites de telecomunicación.

# Sistema de transmisión de datos TELECOM 1

Los transpondedores del satélite Telecom 1 sirven de base para establecer una red digital de datos multiservicio con conmutación de circuitos, que atiende a abonados de Francia y del resto de Europa. Esta red trabaja con estaciones terrenas compactas y de buena relación coste-servicio, instaladas cerca de las dependencias del abonado.

**J. Bléret**

**A. Demars**

**A. Karas**

Alcatel Telspace, Cergy-Saint-Christophe, Francia

## Introducción

Desde finales de 1984, el PTT francés explota una red de datos multiservicio con conmutación de circuitos que utiliza como medio de transmisión los transpondedores de la banda de frecuencias Ku (14/12 GHz) de los satélites Telecom 1. Esta red digital sirve para establecer enlaces de datos entre abonados de Francia y Europa a través de pequeñas estaciones terrenas próximas a las dependencias que han de atenderse. En la figura 1 se aprecia la zona de cobertura de los satélites.

La red Telecom 1 ofrece un servicio de enlaces conmutados de voz, videoconferencia y datos a velocidades de transmisión que van de 2,4 kbit/s a 2 Mbit/s, tanto en el

modo de enlace reservado (punto a punto) como en asignación por llamadas a petición. La red consiste en un CCR (centro de control de red) situado en Mulhouse, con un centro de socorro a 18 km en Feldkirch que gestiona el tráfico y es la estación de referencia para la operación en AMDT (acceso múltiple por distribución en el tiempo), y en un conjunto de estaciones terrenas que transmiten y reciben voz, imagen y datos. Cada estación terrena equipa un terminal de tráfico AMDT. Algunas acceden directamente al usuario por enlaces reservados, y otras lo hacen a través de una central de conmutación digital Alcatel E10S para tratamiento llamada por llamada.

Una estación terrena comprende un equipo exterior (antena y equipo de radio) y un equipo interior (terminal de tráfico). El interfaz AMDT permite enlazar al terminal de tráfico, directamente o mediante conmutación digital, una gran variedad de equipos de abonado, incluyendo codecs de vídeo, PABX y facsímiles.

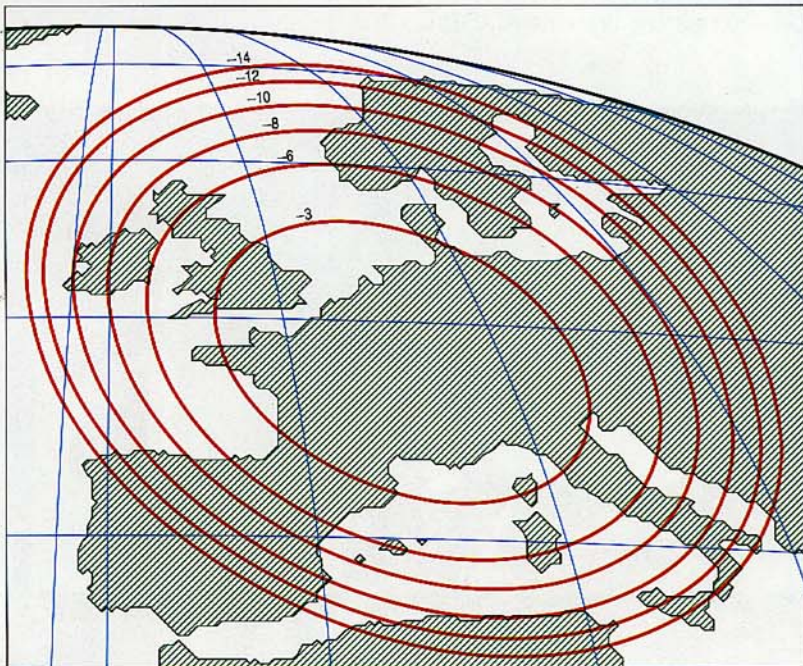
La red puede trabajar en cinco frecuencias de transmisión, ofreciendo una capacidad máxima de 125 Mbit/s (25 Mbit/s por cada frecuencia). Se pueden conectar hasta 310 terminales de tráfico que, por grupos de 62, transmiten en una de esas cinco frecuencias y reciben en todas ellas.

Todo el sistema lo ha desarrollado y fabricado un consorcio de compañías francesas: Alcatel CIT, Thomson CSF y SAT.

## Principios de funcionamiento

La red Telecom 1 utiliza las técnicas AMDT para establecer enlaces múltiples a través del satélite. En tales redes, todos los terminales de tráfico transmiten hacia el satélite por un solo canal de banda ancha y se sincronizan mediante una ráfaga que les

**Figura 1**  
Mapa mostrando la zona de cobertura del sistema de transmisión de datos Telecom 1.



PIRE MAXIMA = 52 dBW: NIVELES EXPRESADOS EN dB POR DEBAJO DE LA PIRE MAXIMA

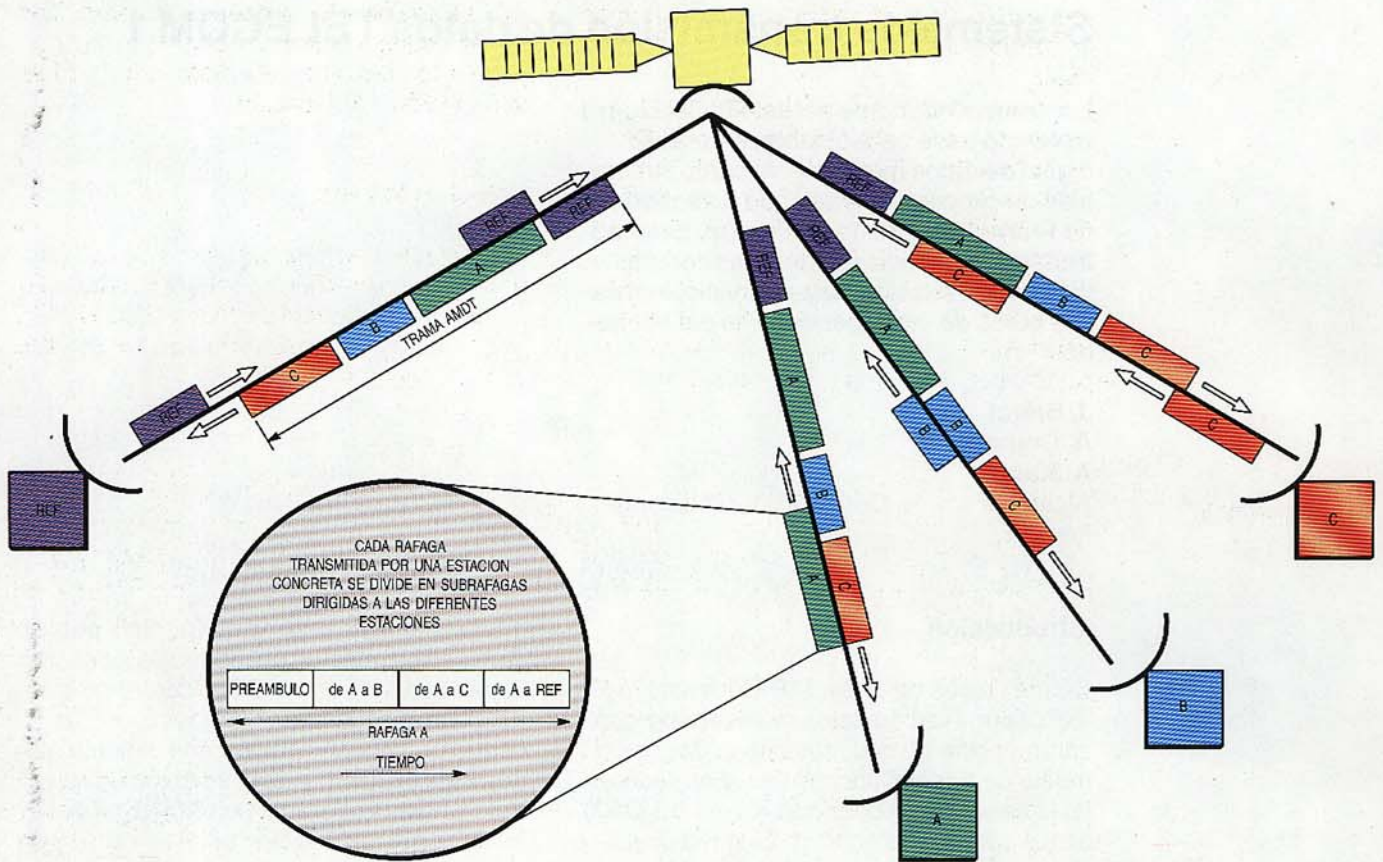


Figura 2 Sistema AMDT de Telecom 1.

transmite la estación de referencia. Los datos se transmiten y reciben en tramas AMDT que consisten en ráfagas procedentes de los distintos terminales, colocadas en la trama de forma tal que lleguen al satélite en una secuencia predefinida. El satélite retransmite la trama en una radiofrecuencia diferente y cada terminal "lee" las ráfagas que corresponden a su dirección (Fig. 2).

El CCR recibe completa información de los circuitos reservados y los asignados por llamadas, y envía mensajes de gestión de trama dentro de la ráfaga de referencia a todos los terminales para que éstos modifiquen las ráfagas comprendidas en la trama (creación, supresión y modificación de ráfaga).

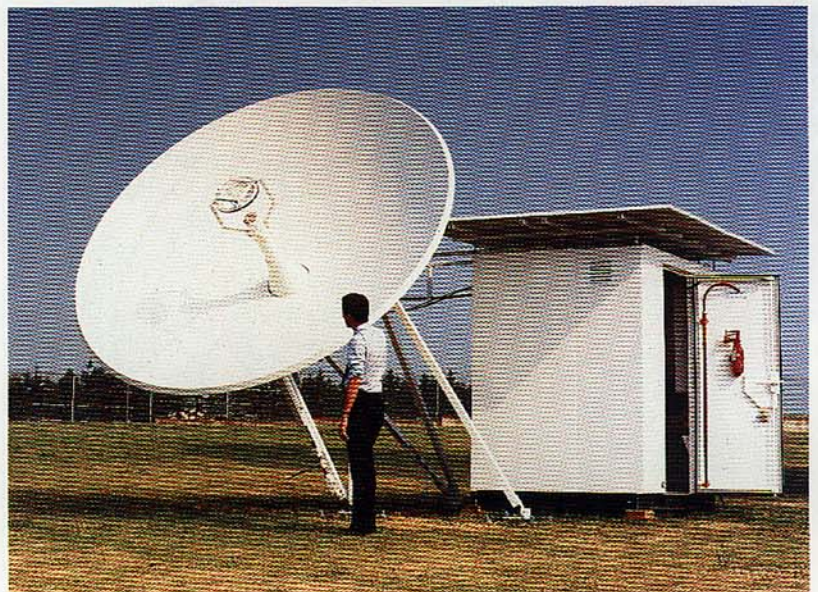
En la red Telecom 1, un terminal de tráfico transmite ráfagas en una de las cinco frecuencias de transmisión solamente, pero puede recibirlas en cualquiera de ellas (salto de frecuencia), de acuerdo con las órdenes que señalan cuáles ráfagas debe recibir (longitud, frecuencia y posición dentro de la trama).

señalización AMDT, que transporta los mensajes internos entre el CCR y los terminales de tráfico con el fin de mantener la integridad de la red y controlar la estructura de la trama AMDT, y una red de señalización que intercambia mensajes entre los equipos de conmutación digital y el CCR con el fin de establecer y liberar llamadas, centralizar las alarmas, y asegurar la tarificación, las pruebas a distancia, etc. Estas tres subredes comparten la trama AMDT; las dos

Antena.

### Breve descripción funcional

La red Telecom 1 está formada por tres subredes diferentes: red de datos que transporta los datos del usuario, red de



redes de señalización consumen un tiempo de sistema en torno al 3% de la capacidad total.

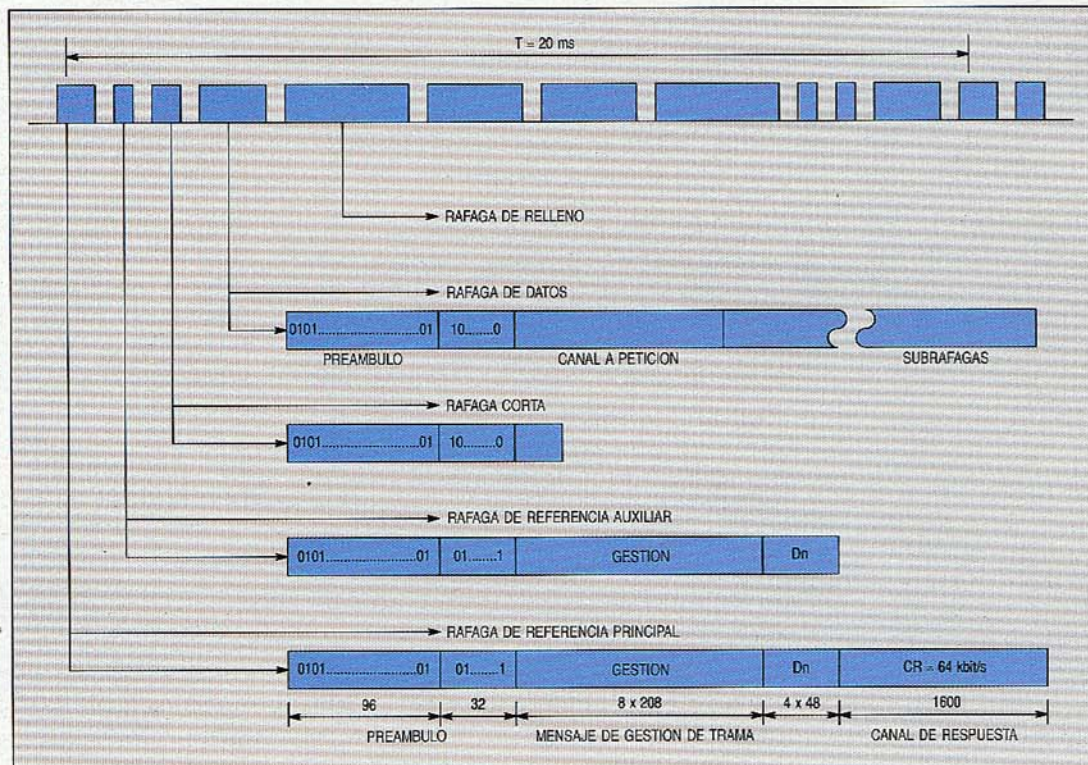
La señalización AMDT utiliza una arquitectura de bucle abierto para difundir mensajes desde el CCR a los terminales de tráfico a través de la red. Dado que en esta arquitectura la estación receptora no puede acusar recibo, cada bit de información se repite ocho veces con el fin de asegurar la correcta recepción. Al comienzo de cada trama AMDT hay una *ráfaga de referencia principal*, que la estación de referencia

se usa para los procesos de asignación por llamadas a petición. Asimismo, transporta información de alarmas, calidad de la transmisión y tarificación.

### Estación terrena

Una estación terrena está formada por un equipo de transmisión y recepción de radio, un terminal de tráfico para el proceso AMDT y conexiones de la red terrenal a los equipos de los usuarios.

Figura 3  
Plan general de la trama.



principal del CCR difunde a todos los terminales de tráfico (Fig. 3). La estación de referencia auxiliar transmite al satélite una *ráfaga de referencia auxiliar*, idéntica a la principal, que sirve de reserva. Cada ráfaga de referencia contiene un *mensaje de gestión de trama* que informa a los terminales de tráfico de cualquier cambio en la estructura de la trama.

La señalización AMDT se utiliza además para los *mensajes de compensación de retardo* que mantienen el sincronismo de la red. Estos mensajes los envía por turno el equipo de referencia a cada terminal de tráfico, y cada uno de ellos contesta con una *ráfaga corta* que permite la sincronización mediante la medición de su posición exacta en la trama.

El sistema emplea señalización por canal común n° 7 del CCITT. La red de señaliza-

El equipo exterior (Fig. 4) consta de una antena de 3,5 m junto con su alimentador, duplexor y amplificador de bajo ruido, y un transmisor y receptor de RF encerrado en una caseta. Dicho equipo ofrece un interfaz a 70 MHz hacia el terminal de tráfico, que junto con un modem se aloja en un armario interior. La central de conmutación digital E10S se ubica en otro lugar.

### Equipo de radiofrecuencia

Los terminales de transmisión digital de la red AMDT Telecom 1, operan en la banda de 14/12 GHz. La antena y el amplificador de bajo ruido están adaptados al balance del enlace por Telecom 1, que incluye el enlace ascendente, la intermodulación en el satélite, el enlace descendente y la atenuación en el espacio libre. En consecuencia, dependen de la PIRE del satélite (potencia

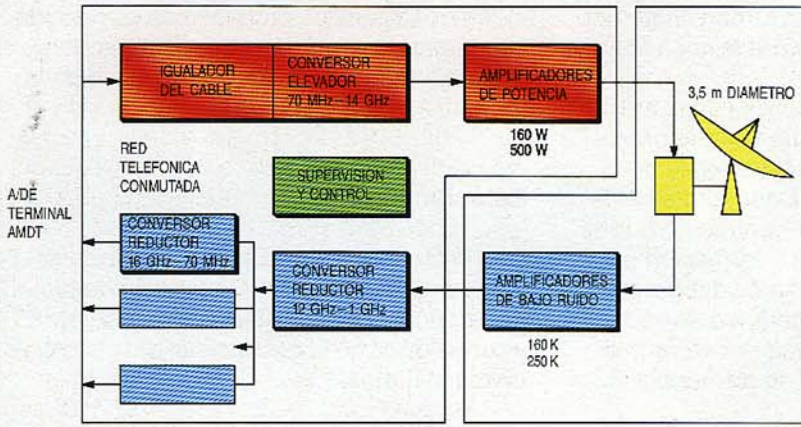


Figura 4 Estación terrena.

isotrópa radiada equivalente), de la relación ganancia/temperatura de ruido y del flujo de saturación recibido. El amplificador de bajo ruido utiliza un transistor de efecto de campo para amplificar la débil señal de 12 GHz.

El equipo, utilizable en condiciones ambientales normales en Europa, incluye:

- Amplificador transmisor de alta potencia, normalmente provisto de un tubo de ondas progresivas de 160 W refrigerado.
- Conversor elevador de frecuencia simple: la frecuencia de transmisión del terminal, fijada de antemano, se selecciona entre cinco posibles cambiando la frecuencia de la señal piloto obtenida de un cristal intercambiable de 100 MHz, y sintonizando a 3,5 GHz la cavidad de un oscilador controlado por tensión.
- Conversor reductor de frecuencia doble: a la salida del primer paso de reducción de frecuencia se utiliza un divisor de 1 GHz, que cubre toda la anchura de banda, para recibir señales de los cinco canales por una técnica de salto de frecuencia.
- Sistema de supervisión y control de alarmas: gestiona el terminal desde el centro de mantenimiento. Los terminales de tráfico se han concebido para trabajar desatendidos; todas las operaciones de control y vigilancia se efectúan en el referido centro de mantenimiento de la estación de referencia.

Se utiliza un guíaondas para enviar la señal de transmisión de 14 GHz del amplificador de alta potencia a la antena, y un cable coaxial para llevar la señal de recepción de 12 GHz desde la antena al conversor reductor.

**Características del modem**

El modem Telecom 1 se ha diseñado para funcionar por ráfagas en sistemas de trans-

misión por satélite AMDT. Las características principales son:

- modulación por desplazamiento de fase diferencial de dos estados entre cuatro (MDPD 2/4)
- codificación diferencial
- demodulación diferencial
- velocidad binaria de 24,576 Mbit/s
- adquisición rápida (96 símbolos)
- frecuencia intermedia (FI) de 70 MHz.

El módem consta de cinco módulos. El *modulador* codifica los datos a 24,576 Mbit/s pasándolos al formato MDP 2. Los símbolos "1" y "0" se transmiten por respectivos desplazamientos de fase de la portadora en +90° y -90°. Esta modulación MDPD 2/4 reduce las variaciones de amplitud de la portadora durante las transiciones, y hace mínima cualquier degradación de la señal al atravesar unidades no lineales (en particular, amplificadores de onda progresiva).

El *filtro de transmisión* Butterworth de 6 polos con retardo de grupo autoigualado, reduce las interferencias entre los canales adyacentes de FI, así como los armónicos generados por el modulador.

Se utiliza un *conmutador del igualador del cable* para seleccionar una de las cinco frecuencias intermedias posibles. Cualquier pérdida y distorsión que introduzcan los cables de conexión entre la estación terrena y los terminales AMDT en cada punto de acceso se compensa en la frecuencia intermedia.

El *filtro de recepción* y el *amplificador del control automático de ganancia* limitan la anchura de banda del ruido y amplifican la señal para compensar las variaciones lentas del nivel causadas por anomalías en la propagación, y las variaciones rápidas entre las ráfagas que transmiten los diferentes terminales remotos.

El *demodulador* es diferencial MDPD 2-4, y en él se extrae mediante un filtro la señal de reloj de la señal demodulada. Tanto los datos regenerados como el reloj se envían al terminal de tráfico.

**Terminal de tráfico**

El terminal de tráfico (Fig. 5) comprende equipo lógico, fuente de alimentación y modem. El controlador de ráfagas recibidas actúa sobre órdenes generadas por el módulo de descripción de trama de recepción. Detecta las palabras únicas de referencia y de datos que identifican el comienzo de la ráfaga, y genera impulsos que procesa la base de tiempos. Este controlador realiza la conversión serie-paralelo y la sincronización de los datos recibidos desde el demo-

dulador, y desaleatoriza los datos transmitidos al codec corrector de errores.

De forma similar, el controlador de ráfagas a transmitir actúa sobre órdenes generadas por el módulo de descripción de trama del transmisor. Así, aleatoriza los datos que le suministra el codec corrector de error, inserta el preámbulo (recuperación de sincronismo de trama y de bit y palabra única de datos), sincroniza los datos a transmitir respecto a la referencia de trama de transmisión, y realiza por último la conversión paralelo-serie antes de enviar los datos al modulador.

La base de tiempos genera el reloj patrón de 24,576 MHz, extrae la referencia de la trama local a partir de la palabra única de referencia detectada, genera la referencia de la trama de transmisión y comunica su propio estado al procesador de trama, el cual le da información actualizada del retardo del satélite.

Los módulos de descripción de trama generan las órdenes de descripción de la trama de transmisión y de recepción para los módulos de interfaz AMDT, aportan las órdenes de salto para el sistema de recepción de frecuencias, supervisan la inserción del preámbulo que hace el controlador de transmisión de ráfagas, y gobiernan el codec de corrección de errores sin canal de retorno. Cualquier canal de datos con velocidad superior a 3,2 kbit/s se puede codificar independientemente de otros canales por medio de un código de bloques Ham-

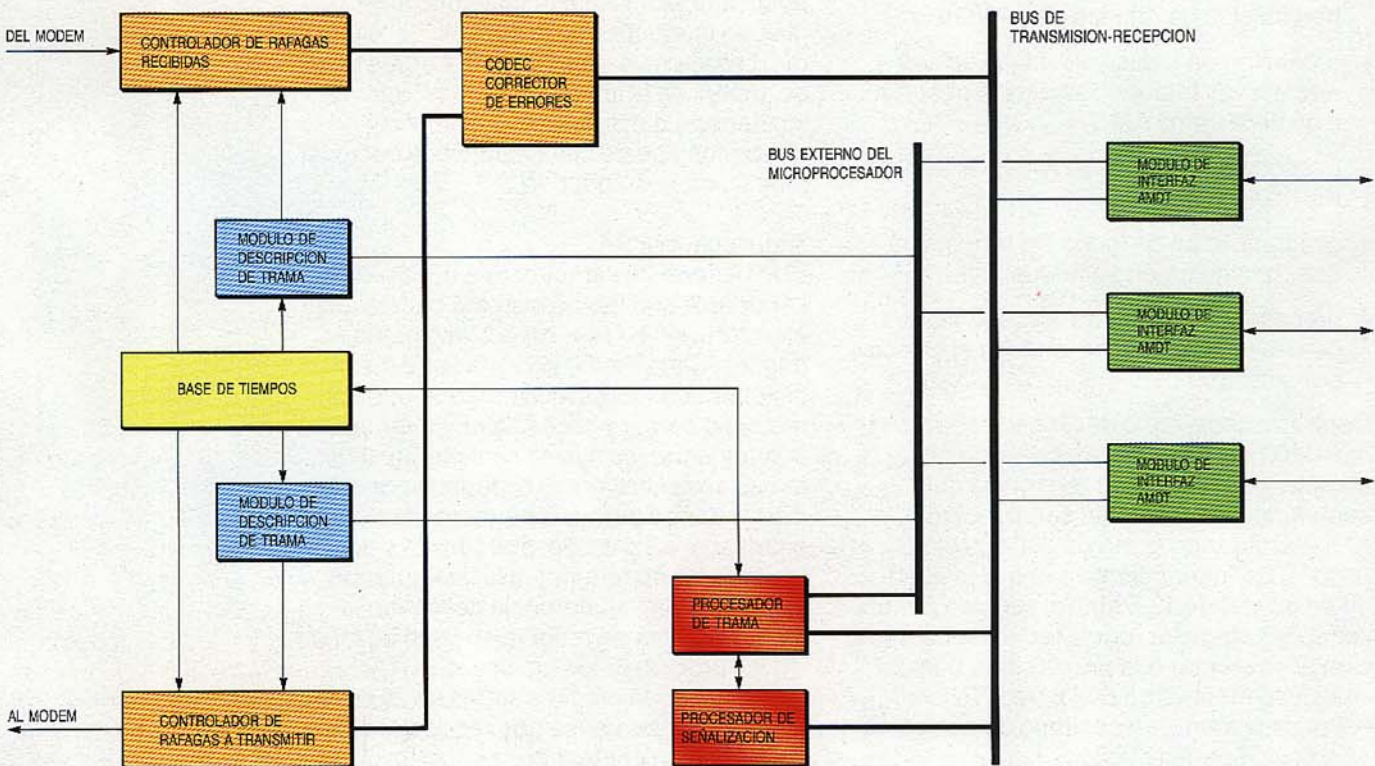
ming de relación 4/5, que corrige un error y detecta dos por cada bloque de 40 bits.

El procesador de señalización proporciona un trayecto de comunicación a través del satélite (vía procesador de trama) para los equipos de la red terrenal. El procesador de trama, que es la unidad de control del AMDT, procesa los mensajes de señalización AMDT y actualiza las memorias de descripción de trama y el registro de la memoria de referencia de tiempo. Además, procesa los mensajes de mantenimiento y servicio, transmite órdenes de puesta en bucle a los módulos de interfaz terrenal, almacena informaciones de alarma transmitidas por los módulos de interfaz AMDT, y retransmite mensajes para el procesador de señalización.

El procesador de trama comunica con otros módulos a través del bus externo (ampliación del bus interno del microprocesador) y tiene enlaces asíncronos suplementarios con el procesador de señalización y con la base de tiempos.

Los módulos de interfaz AMDT utilizados en la red Telecom 1 ofrecen un interfaz CEPT que proporciona velocidades desde 2,4 a 2048 kbit/s, dependiendo de las necesidades de los usuarios y del tipo de placa de interfaz. Cada trama contiene 32 intervalos de tiempo. El intervalo 0 se usa para sincronizar la trama, y lo genera localmente el módulo de interfaz AMDT (desde el terminal de tráfico al equipo del usuario) pero no se transmite en la trama del satélite. Se

**Figura 5**  
**Diagrama de bloques**  
**del terminal de tráfico.**





puede elegir un intervalo de tiempo cualquiera para transportar señalización por canal común entre dicho equipo de usuario y terminal de tráfico.

### Centro de control de red

Un CCR se compone de dos estaciones de referencia, que incluyen los terminales de referencia y la base de tiempos central, y de un centro de gestión o procesador del sistema AMDT. Por razones de seguridad dichas estaciones de referencia se ubican en diferentes lugares (Mulhouse y Feldkirch), a fin de superar problemas de atenuaciones locales debidas a precipitaciones (lluvia, granizo, etc.).

Como cada frecuencia tiene un terminal de referencia, habrá cinco de estos terminales en el mismo lugar. Uno de los dos terminales afectados a una frecuencia determinada se considera *principal* y emite la *ráfaga de referencia principal*, mientras que el otro se constituye como *auxiliar* y envía la *ráfaga de referencia auxiliar*. Si uno de los dos terminales falla, el otro emite ambas ráfagas de referencia. El equipo de referencia se comunica con los terminales de tráfico vía enlace del satélite, y con el PSA (procesador del sistema AMDT) vía enlaces terrestres.

Cada terminal de referencia se conecta al PSA por dos enlaces X.25 a 64 kbit/s. Uno de ellos transporta la señalización AMDT y el otro, la señalización del sistema.

Las funciones por cada trama del terminal de referencia son:

- transmisión de ráfagas de referencia
- recepción de todas las ráfagas en sus respectivas frecuencias para la observación de la trama AMDT
- gestión de la trama AMDT bajo el control del PSA
- sincronización de todos los terminales que transmiten en su frecuencia
- proceso, en nivel 2, de procedimientos de señalización del sistema en el enlace por satélite.

Dentro de cada trama de 20 ms, cada terminal AMDT del lugar de referencia debe transmitir una ráfaga de referencia que contenga un mensaje de señalización AMDT (utilizando la red de señalización AMDT), correspondiente a una velocidad de datos real de 12,8 kbit/s, seguida por el canal de respuesta (por la red de señalización del sistema) que proporcione una velocidad efectiva de 64 kbit/s.

Por cada trama, un conjunto de equipo de referencia puede recibir:

- hasta 62 canales de señalización del terminal de tráfico
- la palabra única de referencia de cada ráfaga; los datos incluidos en la ráfaga no interesan
- ráfaga corta para esa trama, si la hubiere.

La base de tiempos en cada estación de referencia suministra señales de sincronismo de alta precisión que se distribuyen a todo el equipo de referencia local. El generador de reloj estándar de rubidio, genera una señal de referencia de 5 MHz con estabilidad superior a  $10^{-11}$  por mes. Esta señal de referencia se lleva a un sintetizador que la convierte en 24,576 MHz, frecuencia exigida para el AMDT y que se envía a cada terminal de referencia en la estación.

### Procesador del sistema AMDT

El procesador del sistema AMDT (PSA) ofrece un interfaz de operador que ayuda al personal de explotación en las siguientes actividades:

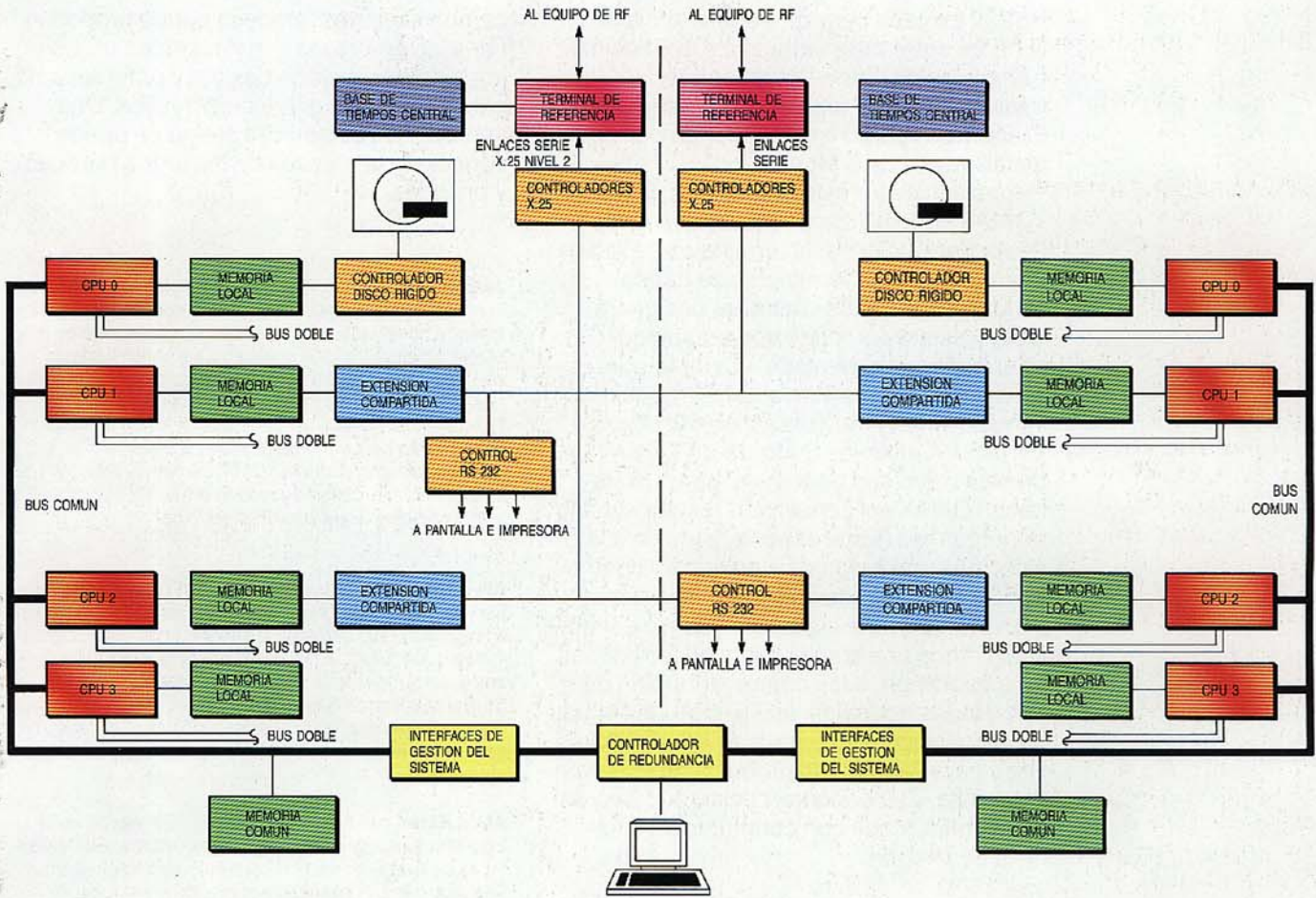
- arranque y desconexión de la red
- configuración y reconfiguración dinámica
- descripción del enlace de datos y gestión de los datos
- mantenimiento del sistema y localización de averías
- diagnóstico a distancia y control de los terminales de tráfico.

Estas funciones se ejecutan mediante diálogo interactivo en la consola del sistema. Las alarmas y las tasas de errores de bit se anotan en la impresora que registra las incidencias del sistema, y se archivan en disco o unidad de cinta magnética opcional para su proceso diferido.

### Arquitectura PSA

El PSA tiene una arquitectura duplicada por seguridad, con medio sistema trabajando y el otro medio en reserva activa o parado (Fig. 6). Cada medio sistema tiene hasta ocho procesadores locales, cada uno con memoria propia y acceso a una memoria común, entre los cuales se distribuyen las tareas de aplicación. El sistema en operación actualiza permanentemente al sistema en reserva a través del bus común y del controlador de redundancia, asegurando este último la transferencia del control al medio sistema en reserva en caso de fallo.

Dos procesadores locales (CPU1 y CPU2) en cada medio sistema se conectan a sendas extensiones que respectivamente gobiernan un controlador asíncrono de



**Figura 6**  
Estructura general del procesador del sistema AMDT.

vigilancia de las consolas y los controladores X.25 que enlazan el PSA a los terminales de referencia. Para conseguir la redundancia deseada, el terminal de referencia principal se conecta a uno de los procesadores locales, y el terminal de referencia auxiliar al otro.

**Producto TDMAX**

La experiencia adquirida por Alcatel Telspace con Telecom 1 ha servido de base al desarrollo de un nuevo producto, TDMAX, que satisface las necesidades del sector empresarial en materia de comunicaciones multiservicio digitales en una topología de red en malla. Las principales diferencias con respecto a Telecom 1 son:

- Terminal de tráfico de menor volumen, que en su versión no redundante es un terminal de sobremesa.
- Nuevo diseño del modem con una velocidad de trama ajustable de 3 a 25 Mbit/s (disponible para funcionamiento mono o multiportadora), de forma que el sistema pueda adaptarse a las necesidades de tráfico del cliente.

- Nueva generación de placas de interfaz AMDT según las normas CEPT ó T1 de señalización y velocidad binaria.
- PSA opcional simplificado para redes pequeñas y menor velocidad de conmutación de tráfico.

Estas características hacen que el TDMAX dé solución económica a las necesidades de telecomunicación actuales de las empresas, ya que ofrece una red en malla integrada para telefonía, videoconferencia y transmisión de datos, del tamaño ideal para empresas de dimensión mediana a grande. Al ofrecer la asignación de enlaces por llamada a petición se pueden reducir drásticamente los costes recurrentes, y sobre todo los asociados al segmento espacial. Las placas de interfaz versátil permiten conectar directamente al TDMAX una amplia variedad de equipo de abonado (codecs de vídeo, PABX, equipo facsímil, terminales de ordenador).

Como ejemplo de red típica TDMAX, consideremos una empresa que desee intercomunicar sus seis centros regionales, equipados con una PABX cada uno. El tráfico se compone de telefonía (capacidad de 48 canales), facsímil (un terminal en cada centro), correo electrónico (15 puertos

RS232 en cada centro), transferencia de ficheros entre ordenadores a alta velocidad, y servicios de video-audioconferencia (tanto de manera regular como esporádica). El ancho de banda total requerido por el usuario sería de 6 Mbit/s.

Para satisfacer estos requisitos, la red TDMAX debe utilizar un cuarto del transpondedor del satélite, seis terminales de radiofrecuencia y seis terminales de tráfico TDMAX (uno de los cuales se designará CCR y estará equipado con equipo de referencia suplementario). Cada terminal de tráfico dispondrá de un MIA (módulo de interfaz AMDT) transparente de 2 Mbit/s ó T1, un MIA mixto de 2 Mbit/s ó T1, y un MIA de baja velocidad de transmisión. Un sistema TDMAX así constituido resulta ser una poderosa red digital especializada en comunicaciones de empresa, con control centralizado y reconfiguración instantánea por el PSA si lo requiere alguna aplicación específica. Ofrece una amplia gama de facilidades de explotación, tales como: atribución de prioridades a canales, tarificación centralizada, asignación por llamada a petición (para voz y para datos), transferencia de ficheros inmediata, y videoconferencia o audioconferencia planificada con conmutación dinámica de imagen.

### Conclusiones

Mediante el sistema de transmisión de datos Telecom 1, la Administración de tele-

comunicaciones francesa puede proporcionar a las empresas e instituciones un sistema de transmisión flexible y potente, apto para una amplia gama de servicios. Una ventaja más es que el sistema se puede conectar a la mayoría de las redes públicas y privadas.

**Jean Bléret** nació en París, en 1942, y se graduó en la Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications. Transcurridos varios años en LMT, donde trabajó en el primer simulador digital europeo para aprendizaje de aviónica militar, ingresó en AERO para dirigir los programas de simulación e investigación operativa. Desde 1974, el Sr. Bléret trabaja en Telspace, como encargado del proyecto del centro de gestión de Telecom 1 y responsable del producto TDMAX. Además es el jefe de la división de terminales y redes para la dirección de investigación y desarrollo de productos.

**Alain Demars** nació en París, en 1935, y se graduó en la Ecole Nationale de l'Aviation Civile. Después de estudiar ciencias informáticas en la Universidad de Grenoble de 1961 a 1964, produjo programas para SOGREAH y para una gran compañía de servicios de ordenadores. El Sr. Demars entró en Telspace en 1984, donde trabaja en el desarrollo y diseño de soporte lógico para el centro de gestión de Telecom 1.

**Alain Karas** nació en París, en 1952. Se graduó en la Ecole Nationale Supérieure d'Electronique et Radioélectricité de Burdeos, en 1977. Al siguiente año entró en Telspace como responsable in-situ de la estación de tráfico, y dirigió la instalación de varias estaciones terrenas. En 1981 se especializó en la integración del instrumental de comunicaciones del satélite en la red Telecom 1. Desde 1985 el Sr. Karas viene dirigiendo el laboratorio de proceso digital de Telspace, incluyendo desarrollos de equipo e integración de terminales AMDT.

# Sistema de microestación para redes de datos empresariales

Los sistemas de telecomunicación por satélite de la nueva generación ofrecen medios eficaces para proporcionar servicios de vídeo, voz y datos a empresas y Administraciones. En el sistema FASTAR se utilizan un potente soporte lógico y unos circuitos de la más avanzada tecnología para obtener una gama completa de características y facilidades.

**A. F. Beaucent**

**J. Bousquet**

**G. Guillemaud**

Alcatel Telspace, Cergy-Saint-Christophe, Francia

## Introducción

El sistema FASTAR\* ofrece a empresas y Administraciones un medio económico para establecer y explotar redes de comunicación por satélite potentes y especializadas, capaces de transportar servicios de vídeo, voz y datos. Tales redes no solamente son adecuadas para nuevas aplicaciones, sino también para suplementar o reemplazar a redes existentes.

El sistema, de arquitectura en estrella, emplea técnicas avanzadas de transmisión digital para comunicaciones en la banda C (4/6 GHz) o la banda Ku (12/14 GHz). Se puede difundir información y programas de vídeo a un gran número de receptores de televisión. En el servicio telefónico, con voz codificada a 16 kbit/s, el abonado se conecta vía satélite a una PABX normal. El servicio de datos utiliza la avanzada red de datos en estrella para difundir, descargar o intercambiar datos entre un ordenador central y múltiples terminales remotos, a velocidades de hasta 64 kbit/s.

Una gran ventaja del sistema FASTAR es que cada equipo terminal de datos de usuario, sea cual fuere su ubicación, se conecta directamente al ordenador central por un enlace digital, a través de una compacta estación terrena, denominada "microestación" o TAMP (terminal de abertura muy pequeña), instalada en las dependencias del usuario, la cual actúa como puerta de acceso a la red.

La microestación opera totalmente desatendida bajo el control del nodo central de la red (estación terrena principal), que se relaciona con el ordenador central. La con-

figuración de una red es modificable desde la estación principal, lo que da a las empresas entera autonomía en cuanto a gestión, control del coste y expansión de su red.

En virtud de su alta calidad de transmisión y disponibilidad y del uso de interfaces y protocolos normalizados (ISA, interconexión de sistemas abiertos), la operación se asemeja desde el punto de vista del usuario a la de una red terrenal de datos de conmutación de paquetes, con difusión de vídeo y datos añadida.

La economía del sistema FASTAR proviene de su arquitectura en estrella, del uso de métodos eficaces de multiplexado y acceso múltiple, y de aplicar tecnologías avanzadas como en los decodificadores Viterbi. La arquitectura en estrella permite utilizar TAMP de bajo coste que pueden instalarse en los locales del usuario, lo que ahorra todo enlace terrestre. Como las técnicas de multiplexado y acceso múltiple optimizan el uso del "segmento espacial", para transmitir las portadoras de datos sólo se necesita una pequeña porción de la capacidad del transpondedor del satélite, reduciendo así los costes de utilización.

## Aplicaciones

El sistema FASTAR ofrece un medio avanzado para intercambiar información entre una central de proceso de datos y hasta varios miles de terminales u ordenadores remotos. Su gama de aplicaciones es muy amplia, y aquí sólo se citan unos pocos ejemplos (Fig. 1). Las dos ventajas principales sobre un sistema por línea terrestre son la facilidad para difundir información y la ausencia de ese tipo de líneas.

\* Marca registrada del Grupo Alcatel

**Difusión de datos:** el sistema puede difundir una gran variedad de información desde la estación principal a todas o a un grupo escogido de microestaciones. Son ejemplos la distribución de noticias o partes meteorológicos, los servicios de correo electrónico, la actualización de ficheros locales y la descarga de programas de ordenador.

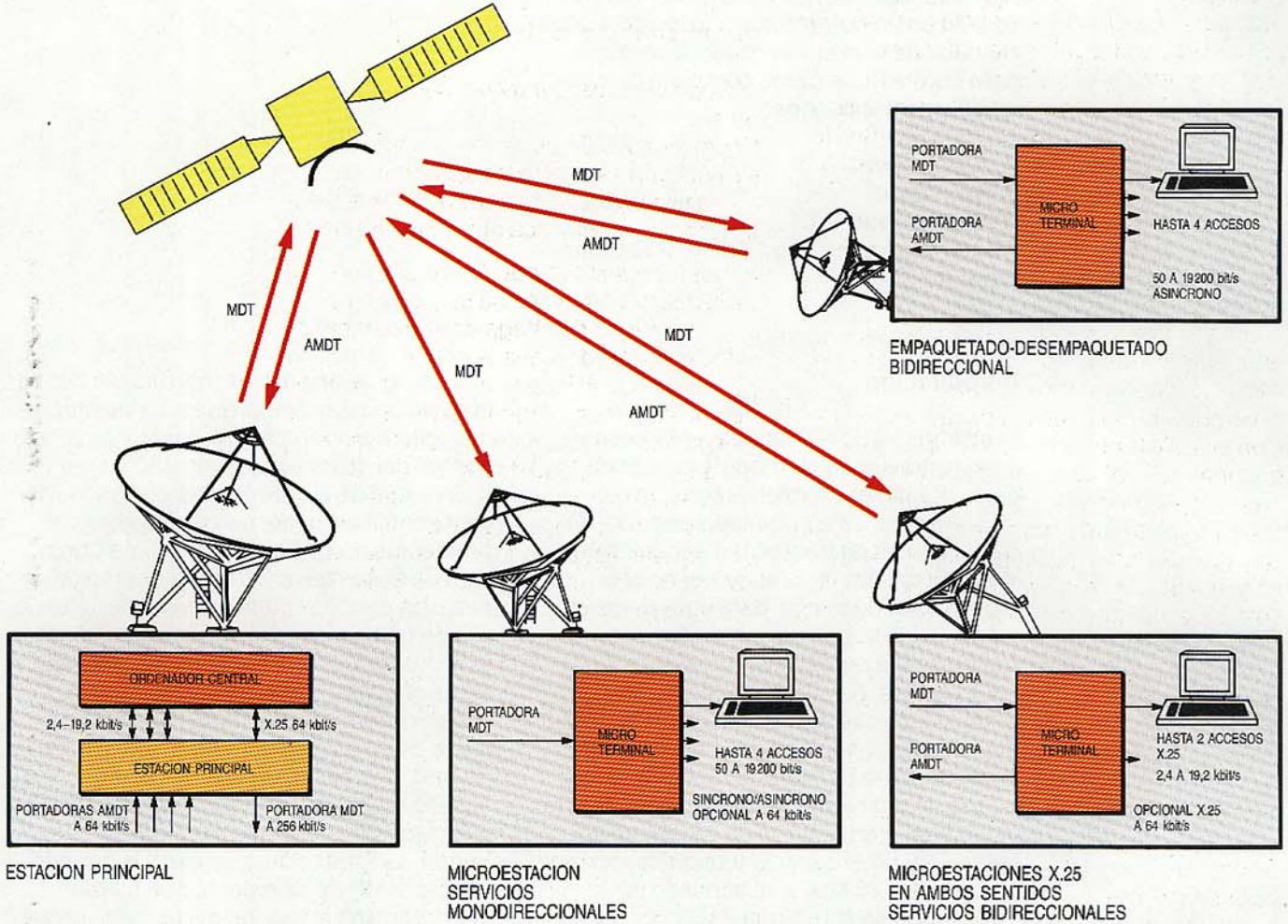
aplicaciones de telefax, teletex y telegrafía rural.

**Sistema Fastar**

**Arquitectura**

El sistema Fastar tiene una arquitectura de comunicaciones en estrella, con una esta-

**Figura 1**  
**Típicos interfaces**  
**Fastar.**



**Recogida de datos:** se pueden transferir ficheros y datos desde las microestaciones a la estación principal, en tiempo real o diferido. Esto sirve para enviar ficheros de oficinas distantes a su central (industria, comercio), recopilar datos de sensores remotos (condiciones ambientales, meteorología) y vigilar oleoductos, redes de distribución, ferrocarriles, etc.

**Transferencia interactiva:** este modo de transferencia, basado en pregunta y respuesta, se necesita en toda una serie de aplicaciones tales como transacciones comerciales y financieras, consultas a base de datos, canales interactivos para procesos conversacionales, autorización de crédito en tiempo real, sistemas de reserva, diseño y fabricación asistidos por ordenador, conexiones de redes de área local, y

ción terrena principal y microestaciones distribuidas. La centralización de los equipos más costosos en la estación principal garantiza la economía. Así, una antena de gran diámetro en la estación principal permite emplear antenas de pequeño diámetro y bajo coste en las microestaciones. Además, el sistema de gestión de red centralizado asegura el uso óptimo de los costosos recursos del satélite y que el sistema atienda al máximo número de microestaciones.

La gestión del flujo de datos se basa en las necesidades reales del usuario (tipo de tráfico), junto con métodos de acceso auto-adaptables, y utiliza de modo óptimo los canales disponibles en el satélite, con lo que el coste de equipo en la estación principal se reduce al mínimo.

Las aplicaciones que requieren comunicación entre un ordenador central y un gran número de terminales remotos se consiguen conectando dicho ordenador a la red en la estación principal, y los terminales remotos a la red en los TAMP.

#### **Enlaces de transmisión MDT y AMDT**

Como se han de transmitir datos desde la estación principal a todas las microestaciones, bien sea simultáneamente (difusión) o por canales a una determinada microestación (o grupo de ellas), el método más flexible y eficaz es utilizar MDT (múltiple por división de tiempo), y después modular digitalmente una portadora de RF en onda continua.

Puesto que cada microestación transmite sólo su propia información, el método de transmisión más eficaz en el sentido inverso, del TAMP a la estación principal, es compartir una portadora de RF entre un gran número de microestaciones mediante AMDT (acceso múltiple por distribución en el tiempo). En tal sistema, cada microestación modula la portadora de RF a su alcance por una "ráfaga" (esto es, solamente mientras dura su mensaje y después de una compresión de velocidad binaria adecuada). Hay que destacar que el método de AMDT es más eficaz que otros como el SCPC (un solo canal por portadora) o el AMEE/AMDC (acceso múltiple por ensanchamiento de espectro/acceso múltiple por división de código), permitiendo un tráfico notablemente mayor para potencias y anchuras de banda de transpondedor del satélite dadas, con lo que más microestaciones pueden acceder simultáneamente al sistema.

Toda información, tanto en modo MDT como AMDT, se ha formatado en paquetes, y por ello el sistema Fastar se comporta como un conmutador de paquetes, en el cual los protocolos internos de la red garantizan una transmisión de datos libre de errores.

Dependiendo de las necesidades de tráfico de los usuarios y del número de microestaciones, una red puede soportar hasta 32 portadoras MDT y 128 AMDT.

#### **Gestión de red**

Un ordenador dedicado a gestión de la red en la estación principal centraliza todas las funciones de gestión, incluyendo supervisión y control de los equipos de la red y la atribución de los recursos en canales de acuerdo con el tráfico y número de terminales de usuario conectados. Además, si la red la comparten varios usuarios, el ordenador la dividirá en subredes y ofrecerá a cada una de ellas por separado control y gestión remota. Así, cualquiera de dichos usuarios podrá controlar cierto número de paráme-

tros de la subred que le corresponde, disponiendo para ello de sus propias unidades de consola.

El ordenador de gestión de red mantiene al día la base del datos que define la configuración de equipo y programación de cada microestación, y las de las distintas subredes de microestaciones.

### **Características de la red**

#### **Método de acceso múltiple por distribución en el tiempo**

Cada canal AMDT se divide en intervalos de tiempo iguales, utilizados para transmitir mensajes desde la microestación a la estación principal. Hay dos métodos de acceso:

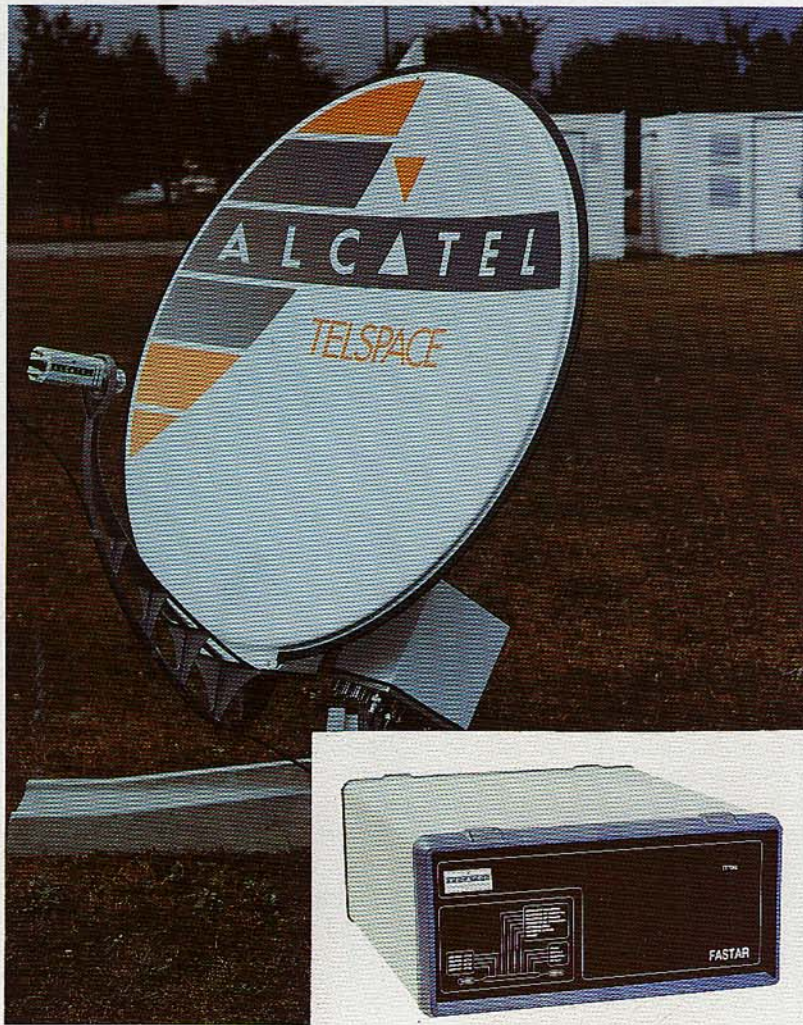
**Acceso aleatorio** (modo Aloha a intervalos): cada microestación envía un paquete de datos en forma de ráfaga en cualquier intervalo de tiempo del canal AMDT. En previsión de posibles colisiones con ráfagas de otras microestaciones, el mensaje se repite automáticamente hasta obtener un acuse de recibo. La capacidad de tráfico global debe limitarse para evitar la saturación de la portadora AMDT. Como el retardo de transmisión es pequeño, este modo es adecuado para aplicaciones interactivas (p. ej., consultas a la base de datos).

**Asignación por demanda** (llamado también modo de reserva): en este modo cada microestación transmite en intervalos de tiempo previamente asignados, con arreglo a tres métodos diferentes. El primero se emplea cuando el operador sabe de antemano qué capacidad requiere la aplicación y por cuánto tiempo. El segundo método se utiliza ocasionalmente cuando una microestación que trabaja en modo de acceso aleatorio necesita con urgencia incrementar su emisión para evacuar un pico de tráfico local. La conmutación entre este modo y el de acceso aleatorio la realiza automáticamente la red. El tercer método se usa para aplicaciones de voz, que requieren una capacidad fija durante las llamadas telefónicas. Si se dispone de la capacidad necesaria, ésta queda automáticamente reservada al marcar el número.

Ambos modos de acceso, de reserva y aleatorio, pueden concurrir en el mismo canal AMDT, si bien una microestación sólo puede transmitir en un modo a la vez.

#### **Equilibrio de carga de frecuencias**

Un grupo de microestaciones que reciban la misma portadora MDT pueden utilizar varias portadoras AMDT para transmitir a la estación principal. Para evitar sobrecargas de una portadora AMDT, la red puede



Unidad exterior de TAMP Fastar y unidad interior (ángulo inferior derecho).

repartir automáticamente la carga, obligando a ciertas microestaciones a pasar a otra portadora AMDT.

Todas estas funciones aseguran la autoadaptación de la red a cualquier configuración de tráfico que pueda producirse durante una transmisión de datos.

#### *Interfaces y protocolos de usuario de la microestación*

Una versión normalizada de microestación tiene hasta cuatro puertos serie de usuario, y cada uno de ellos puede configurarse por separado para uno de los siguientes interfaces: V.24/V.28, V.24/V.11 ó V.24/V.35, todos ellos del CCITT. Cada puerto admite también varios protocolos. La función PAD (ensamblado-desensamblado de paquetes) (CCITT X.3/X.28/X.29) permite conectar cualquier terminal asíncrono estándar. El protocolo X.25 del CCITT se aplica para la conexión de ordenadores remotos. En esta configuración, Fastar opera como una RDCP (red de datos por conmutación de paquetes) muy fiable, admitiendo velocidades que alcanzan los 64 kbit/s.

Los puertos configurados en el modo de difusión permiten al usuario recibir servicios de difusión de datos por un enlace síncrono o asíncrono, a una velocidad de 50 a 19200 bit/s.

La voz se transmite entre una microestación y la estación principal mediante un sistema de "abonado lejano": el Fastar conecta un teléfono receptor/transmisor situado en la microestación a una PABX localizada en la estación principal. Una placa de extensión en la microestación proporciona un interfaz para transmisión de voz, convirtiendo la señal de voz analógica a señal digital de 16 kbit/s y viceversa.

#### *Estación terrena principal*

La estación principal proporciona interfaces para conectar uno o más ordenadores centrales. Cada enlace principal es configurable para cualquiera de los interfaces definidos por el CCITT V.24/V.28, V.24/V.11 y V.24/V.35, utilizando protocolos que cumplen la citada Recomendación X.25. La conmutación de circuitos virtuales permite establecer enlaces lógicos entre los ordenadores y los terminales de microestaciones. Los interfaces soportan velocidades hasta de 64 kbit/s.

Se puede disponer de interfaces síncronos o asíncronos para aplicaciones de difusión de datos, a velocidades entre 50 y 19200 bit/s. En este caso, cada línea se dedica a un servicio de difusión.

#### **Estación TAMP**

La microestación consta de una unidad interior y una unidad exterior. Su diagrama de bloques se presenta en la figura 2.

La unidad interior contiene un codec/modulador de ráfagas AMDT que opera a 64 kbit/s y un codificador FEC 1/2 convolucional, un demodulador MDT continuo a 256 kbit/s y su decodificador secuencial asociado, un procesador de banda base, y la fuente de alimentación principal que también abastece a la unidad exterior.

A su vez, la unidad exterior comprende la antena con su alimentador, un amplificador de potencia de estado sólido, un amplificador de bajo ruido, un convertidor elevador, otro reductor y un regulador de alimentación. El amplificador de potencia de estado sólido y el de bajo ruido están integrados con el alimentador, mientras que el resto del equipo se aloja en una caseta a prueba de humedad y adosada a la antena.

La antena es del tipo excéntrico de foco primario, con un reflector de precisión de un solo bloque sobre un montaje tubular con movimientos en azimut y elevación.

**Estación principal**

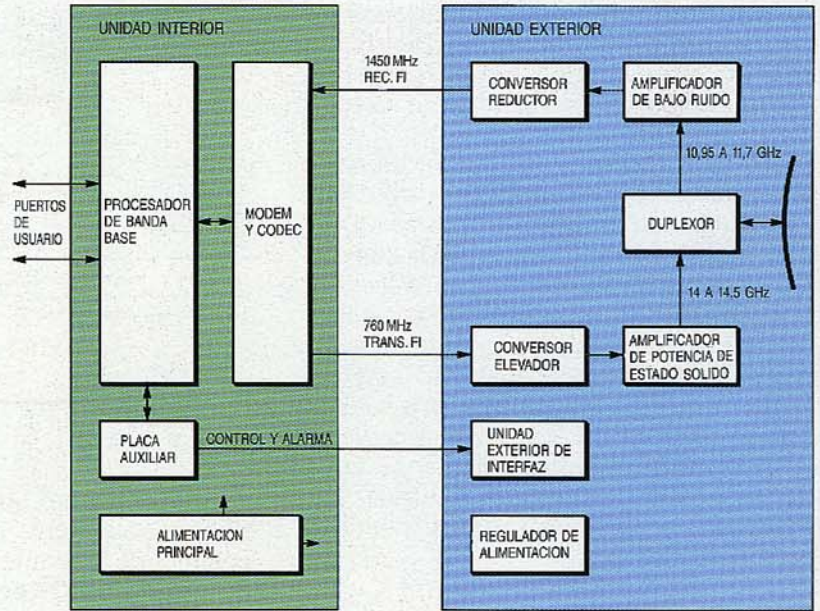
El equipo de radio (Fig. 3) de la estación principal es comparable al de una estación terrena, con la diferencia principal en el equipo que procesa la señal (modem y procesadores de banda base). El modem está conectado en FI al equipo de RF, y a nivel de banda base a la UCP (unidad de control principal), como se muestra en la figura 4; su equipo consiste en un modulador redundante por cada portadora MDT, un receptor de seguimiento de portadora redundante y un conjunto de demoduladores AMDT.

El equipo de banda base (Fig. 4) consta de varias UCP y multiplexores MDT, y de una unidad de control de red (UCR). Cada unidad se conecta a un bus de RAL IEEE 802.3. El diálogo entre unidades hace uso de enlaces lógicos independientes sobre el mismo bus.

Una UCP puede recibir hasta cuatro portadoras AMDT y controlar hasta cuatro puertos de usuario, cada uno de los cuales admite el protocolo X.25 a velocidades hasta de 64 kbit/s.

El multiplexor MDT recibe de las UCP y la UCR los datos que han de transmitirse, y los multiplexa en una trama MDT a 256 kbit/s. Hasta ocho UCP pueden conectarse a un multiplexor. Por consiguiente, una microestación que reciba el canal MDT procesado por un determinado multiplexor, transmitirá por un canal AMDT recibido por la UCP asociada con el mismo multiplexor. La UCR controla esa configuración.

Los multiplexores MDT tienen redundancia de 1 + 1, controlada por una unidad lógica de conmutación. Por el contrario, las



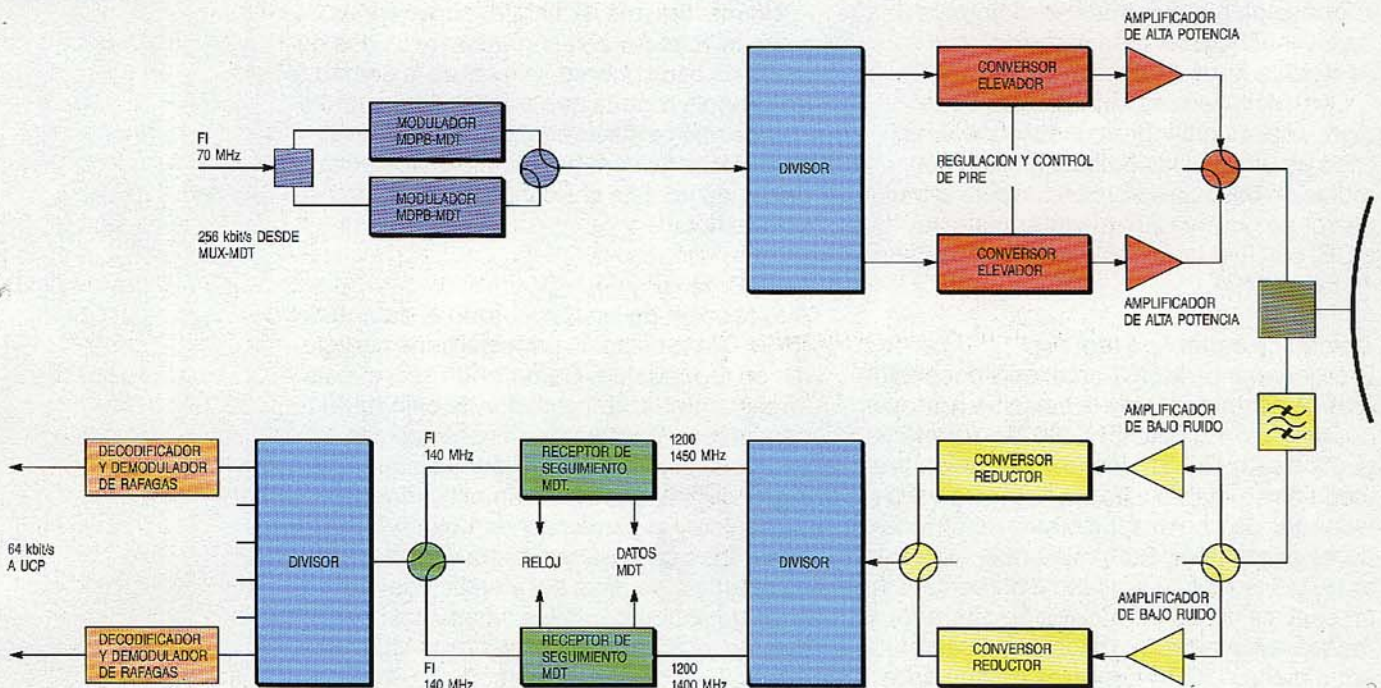
**Figura 2**  
Configuración del equipo de la microestación.

UCP poseen redundancia de N + 1, controlada por la UCR, que introduce la UCP de reserva en caso de fallo.

**Unidad de control principal**

La UCP está formada por varias placas de procesador que gobiernan la recepción de portadora AMDT, el interfaz con el ordenador central, la carga de portadora AMDT, y el interfaz con la RAL. A su vez está controlada por el operador a través de la UCR.

La UCP gobierna la transición desde el modo de acceso aleatorio al de asignación por demanda, de acuerdo con las peticiones de las microestaciones. Además, controla el protocolo de comunicación con el ordenador central capaz de establecer circuitos



**Figura 3**  
Equipo de radio de la estación principal.



virtuales con los terminales conectados a los puertos de la microestación. Dichas UCP y microestaciones realizan también la conversión del protocolo entre el acceso X.25 y la red del satélite.

Los datos recibidos del citado ordenador se envían al multiplexor MDT por la red local y se transmiten después en la trama MDT, y en cambio los que se reciben en la trama AMDT se envían al ordenador central.

Es posible conseguir una gran eficiencia y un tiempo de transferencia corto merced al control del acceso al canal AMDT, evitando los efectos irreversibles de la saturación de carga del canal. Cuando la carga de un canal AMDT es demasiado grande, la UCP correspondiente puede reducirla cambiando la frecuencia en que transmite la microestación.

**Multiplexor MDT**

El multiplexor MDT se compone de dos placas de procesador, que controlan la transmisión de la trama MDT y el interfaz con la RAL. Como en la UCP, el multiplexor MDT lo gobierna el operador a través de la UCR.

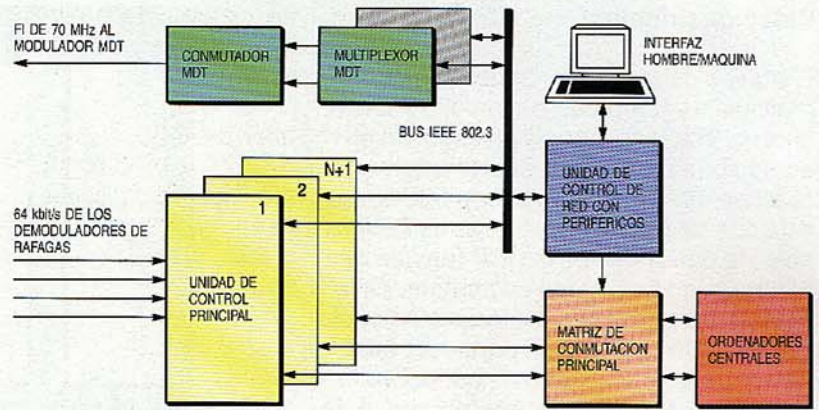
El multiplexor recibe información de las UCP y UCR, la multiplexa y transmite en la misma trama MDT a 256 kbit/s. Si la red la comparten varios usuarios, el multiplexor procesa las diversas colas de mensajes para dar a cada usuario la capacidad suscrita.

La sincronización de red es otra función importante del multiplexor. Al comienzo de cada trama MDT, el multiplexor envía una palabra de sincronismo a las microestaciones. Como él también recibe esta trama a través del satélite, puede calcular el comienzo de las tramas AMDT recibidas, información que después se distribuye a las UCP asociadas para el control de los demoduladores AMDT.

Los multiplexores MDT, como queda dicho, están totalmente duplicados. En el caso de un fallo, la unidad lógica de conmutación bascula automáticamente al multiplexor de reserva sin que intervenga la UCR, con lo cual se mantiene la alineación de trama MDT.

**Unidad de control de red**

El ordenador de la UCR, que está conectado a las otras unidades de la estación principal por medio de la RAL IEEE 802.3, asume la gestión de la red. La comunicación hombre-máquina se realiza a través de una o varias unidades de consola, provistas de ordenadores personales. Esto releva a la UCR de todas las tareas de proceso y presentación en pantalla de los terminales de operador, y reduce la cantidad de datos a intercambiar entre dichas UCR y consolas de operador.



**Figura 4**  
Equipo de banda base y modem de la unidad principal.

La UCR puede configurar las unidades de consola remotas, proporcionando los parámetros relevantes. Dichas consolas se conectan a la UCR por un enlace X.25 que es particularmente útil para la gestión remota de subredes.

La UCR gestiona unas bases de datos que almacenan:

- información en tiempo real del estado de las unidades de red
- registro de las alarmas
- registro de las órdenes
- información estadística de las características del tráfico y de la red
- información de facturación.

Un grupo jerárquico de consolas permite a los encargados de la explotación controlar o modificar la configuración de la red o subred, observar las alarmas y reponer cualquiera de ellas al recibir la orden adecuada, obtener información sobre el estado de las unidades y estadísticas de tráfico.

Un mecanismo de filtraje (contraseñas) permite acceder con seguridad a la base de datos de cada subred, y lo utiliza la unidad de consola remota que gestiona las subredes de microestaciones. El control a nivel de sistema (la configuración de la estación principal) no está al alcance de dicha consola remota.

**Equipo de RF y FI**

A excepción de la antena, todo el equipo de RF y FI de la estación principal tiene configuración redundante. Comprende seis subsistemas: antena, amplificador de bajo ruido, convertidor reductor, amplificador de alta potencia, convertidor elevador y sistema de supervisión y control. El amplificador de bajo ruido y el convertidor reductor están integrados en la parte trasera de la antena. La potencia nominal del amplificador se elige de acuerdo con los parámetros del satélite, el número de portadoras MDT y las especificaciones de intermodulación. El

conversor elevador y el sistema de supervisión y control se alojan en el interior de la estación.

#### **Características y prestaciones**

El diseño y la configuración de la estación principal aseguran la fácil ampliación de la red. Se pueden añadir nuevos ordenadores o microestaciones a la red por el simple aumento de UCP o MDT sin afectar al funcionamiento normal de dicha red.

Una red puede abarcar hasta 16 000 microestaciones, 32 MDT y 32 UCP. A cada portadora MDT de salida se pueden asociar hasta 32 portadoras AMDT de llegada.

El usuario puede requerir una subred propia de MDT y UCP a medida de sus necesidades de transmisión. Por otra parte, varios usuarios pequeños pueden compartir un MDT o una UCP. Todo ello es un claro exponente de la versatilidad del sistema.

#### **Conclusiones**

El sistema Fastar incorpora una serie de innovaciones técnicas. Alcatel Telspace ha producido una nueva generación de equipos de radio y de banda base con la tecnología más avanzada. Las técnicas de transmisión de datos MDT y AMDT con acceso aleatorio y por reserva optimizan la utilización del segmento espacial, al tiempo que ofrecen una transferencia de datos rápida y fiable.

La arquitectura modular de la estación principal admite numerosas configuraciones con el fin de atender las necesidades de los diversos usuarios. Los interfaces de usuario normalizados y los interfaces de

comunicación de estación principal y microestaciones permiten conectar una amplia gama de equipos terminales.

Gracias al eficaz control de red, los usuarios pueden controlar su propia red o subred. Por todas estas características unidas a las ventajas inherentes a la transmisión por satélite, una empresa o sociedad puede construirse una configuración de red a medida de sus necesidades de comunicaciones telefónicas, de datos y de imagen.

**Alain F. Beaucent** nació en Burdeos, Francia, en 1949. Tras graduarse en ingeniería electrónica en la Ecole Nationale Supérieure d'Electronique et de Radioélectrique de dicha ciudad, pasó cinco años trabajando en programación de tiempo real, y luego entró como responsable de la programación en el departamento de telecomunicación por satélites de ATFH. En ese puesto se ha encargado del desarrollo del terminal de referencia de red AMDT del Telecom 1, y del terminal de tráfico para la red AMDT de 120 Mbit/s de Intelsat y Eutelsat. En 1986, como director del proyecto, el Sr. Beaucent inició el programa FASTAR de Alcatel.

**Jacques Bousquet** nació en Béziers, Francia, en 1955. Se graduó ingeniero electrónico en la Ecole Supérieure d'Electricité de Gif/Yvette en 1979, y después trabajó en el desarrollo de equipos de radio en Thomson CSF. En 1981, se dedicó al desarrollo de soporte lógico para la estación de referencia de red AMDT del Telecom 1. El Sr. Bousquet entró en Alcatel en 1985, donde se encargó del control y supervisión de estaciones terrenas. Desde 1986 es responsable del desarrollo de circuitos y soporte lógico del equipo de banda base del sistema Fastar.

**Gilles Guillemaud** nació en Nueva York, en 1957. Estudió ingeniería eléctrica en el Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, donde se graduó en 1981. Trabajó en Thomson CSF en el desarrollo de circuitos y soporte lógico de las estaciones terrenas de 120 Mbit/s de Intelsat y Eutelsat. El Sr. Guillemaud pertenece al equipo de desarrollo del sistema Fastar.

# Sistema de comunicación por satélite para países en desarrollo

Siempre ha sido difícil proporcionar servicios de telecomunicación en lugares aislados. Las comunicaciones por satélite permiten establecer vías en cualquier punto del planeta, aunque generalmente a un precio muy alto. La introducción de la económica estación terrestre FASTCOM abre el camino para extender los servicios de telecomunicación hasta las zonas más remotas.

**J. Esculier**

**A. Parnière**

**J. Salomon**

Alcatel Telspace, Cergy-Saint-Christophe,  
Francia

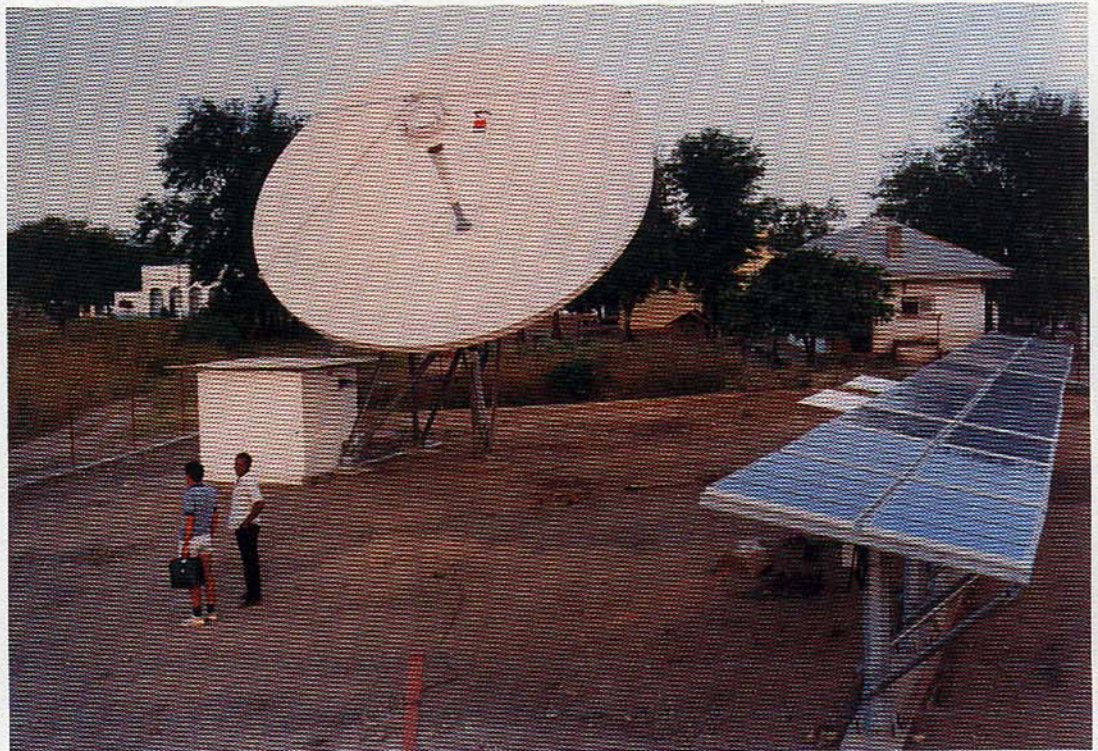
## Introducción

La comunicación por satélite es muy adecuada para establecer servicios de telecomunicación en regiones aisladas, zonas rurales o dondequiera los enlaces terrestres sean de difícil implantación. Además, la introducción de estaciones terrenas pequeñas y de reducido coste ha abierto recientemente el paso a un uso generalizado de las comunicaciones por satélite en países donde los sistemas terrenales de comunicación resultan más costosos, menos seguros

y más difíciles de instalar. Alcatel Telspace ha concebido y desarrollado la pequeña estación terrena FASTCOM\* para ofrecer la facilidad de explotación, fiabilidad y economía que son esenciales en tales aplicaciones.

Las estaciones Fastcom son compactas, pues sólo constan de sistema de antena y terminal de comunicación. Como su consumo de energía es bajo, pueden alimentarse con paneles solares. Si se les añade

\* Marca registrada del Grupo Alcatel.



Instalación típica de estación Fastcom en la República Central Africana.

un pequeño conmutador telefónico Fastcom, las estaciones pueden conectarse a la red telefónica nacional y extender así el servicio a numerosos núcleos de población.

El sistema Fastcom ofrece una gama de servicios: telefonía, télex (en la parte alta de la banda de telefonía), transmisión de datos hasta 9600 bit/s, recepción de televisión (suponiendo que la potencia isotropa radiada equivalente del satélite o el tamaño de la antena utilizada sean suficientes), y recepción de radio en alta fidelidad. Las estaciones terrenas pueden utilizar los siguientes transpondedores de satélite:

- Transpondedores de la red global Intelsat, utilizados para el servicio Vista. Las compañías explotadoras alquilan capacidad del segmento espacial de Intelsat por circuitos, de forma que el coste del alquiler se base exclusivamente en la capacidad real de tráfico.
- Transpondedores Intelsat (o parte de ellos) alquilados, o incluso comprados por los explotadores.
- Transpondedores de satélites nacionales, si existen en el país del que se trata.

La tabla 1 resume las principales características de las estaciones Fastcom y explica cómo resuelven los problemas de las comunicaciones rurales.

### Estaciones terrenas

Las estaciones terrenas Fastcom utilizan la técnica de un solo canal por portadora (single channel per carrier, SCPC) en la que cada medio circuito telefónico se transmite por separado, modulando en banda estrecha una portadora de RF. La ventaja de este método es su adecuación para enlaces con baja densidad de tráfico. Como las estaciones terrenas están diseñadas para funcionamiento desatendido, son bastante sencillas y sólo comprenden dos subsistemas: la antena y el terminal de comunicación.

#### Subsistema de antena

La antena en sí es del tipo Cassegrain, con reflector primario y secundario, alimentador y duplexor. Como los satélites modernos son de órbita muy estable, las estaciones terrenas pueden tener antenas de orientación fija, y no necesitan equipo de seguimiento.

Las dimensiones de la antena dependen de la PIRE (potencia isotropa radiada equivalente) del satélite así como de la que requiere el enlace ascendente. Se debe alcanzar un compromiso entre la ganancia de la antena y la potencia de salida del amplificador, teniendo en cuenta la reco-

**Tabla 1 — Características principales de las comunicaciones rurales**

Problemas de las comunicaciones rurales*	Características de las estaciones Fastcom
Dificultad de obtener energía eléctrica	Bajo consumo (compatible con alimentación por paneles solares)
Carencia de personal local técnicamente capacitado	Funcionamiento desatendido sin apoyo en personal local. Posibilidad de vigilancia remota
Zona aislada	Facilidad de transporte e instalación
Condiciones ambientales duras	Robustez y fiabilidad
Restricciones de coste (beneficio sobre la inversión y costes de explotación)	Equipo de bajo coste. Coste reducido del segmento espacial.

\* La UIT define las comunicaciones rurales como: comunicación para poblaciones dispersas, pueblos o pequeñas ciudades en una zona caracterizada por los problemas enumerados en esta tabla.

mendación 542-1 del CCIR sobre la PIRE fuera del eje de la antena.

Pueden utilizarse diversos tipos de antena en las estaciones Fastcom. Las estaciones remotas en redes rurales en estrella generalmente utilizan antenas de 4,5 m, 6,1 m ó 7,3 m de diámetro, todas ellas adecuadas para el servicio Vista de Intelsat. Las estaciones maestras se suelen equipar con antenas de 11 m.

Las estaciones terrenas con cargas de tráfico mayores y las que operan en redes en malla suelen necesitar antenas de 7,3 m de diámetro porque su mayor ganancia permite utilizar un amplificador de estado sólido. Además estas antenas mayores sirven para recepción de programas de televisión.

Todas estas estaciones cumplen la Norma D de Intelsat (IESS-204) y son igualmente aptas para redes de satélites nacionales. Se pueden utilizar también antenas de otros diámetros: por ejemplo, las que trabajan con ciertos satélites especializados (como Palapa en Indonesia, Insat en India, Brazilsat o Arabsat) se pueden equipar con antenas de menos de 4,5 m de diámetro.

Por su estrechez de haz (solamente de unos 0,3°) las antenas de 11 m deben equiparse con un sistema de seguimiento que las mantenga apuntando al satélite. Aunque las antenas menores no suelen requerir equipo de seguimiento, pueden llegar a necesitarlo cuando el satélite se acerca al fin de su vida y presenta cierta inestabilidad orbital. Existe un sistema de seguimiento opcional totalmente automático, controlado por microprocesador.

El amplificador de bajo ruido utiliza transistores de efecto de campo de AsGa en lugar de los anticuados amplificadores paramétricos que necesitan refrigeración. Este amplificador da ganancia suficiente para compensar el ruido del paso reductor

de frecuencia y las pérdidas en el cable de interconexión, y se encierra en una caja hermética fijada directamente al alimentador.

**Terminal de comunicación**

El terminal de comunicación está montado en un pequeño armario que puede situarse en el exterior, y se conecta a la antena por un guíaondas de 6 GHz para transmisión y un cable coaxial de 4 GHz para recepción.

Como se ve en la figura 1, el equipo consta de:

- amplificador de potencia de estado sólido
- conversores de frecuencia elevador y reductor que utilizan un mismo sintetizador de microondas de alta estabilidad
- equipo común que comprende el divisor y combinador de FI, la unidad generadora de referencias de tiempo y frecuencia, el control automático de frecuencia y el control automático de ganancia
- de una a seis unidades de canal SCPC con sus propias unidades de interfaz terrenal (incluidos supresores o compensadores de eco).

Opcionalmente puede suministrarse un receptor de televisión.

**Funcionamiento general**

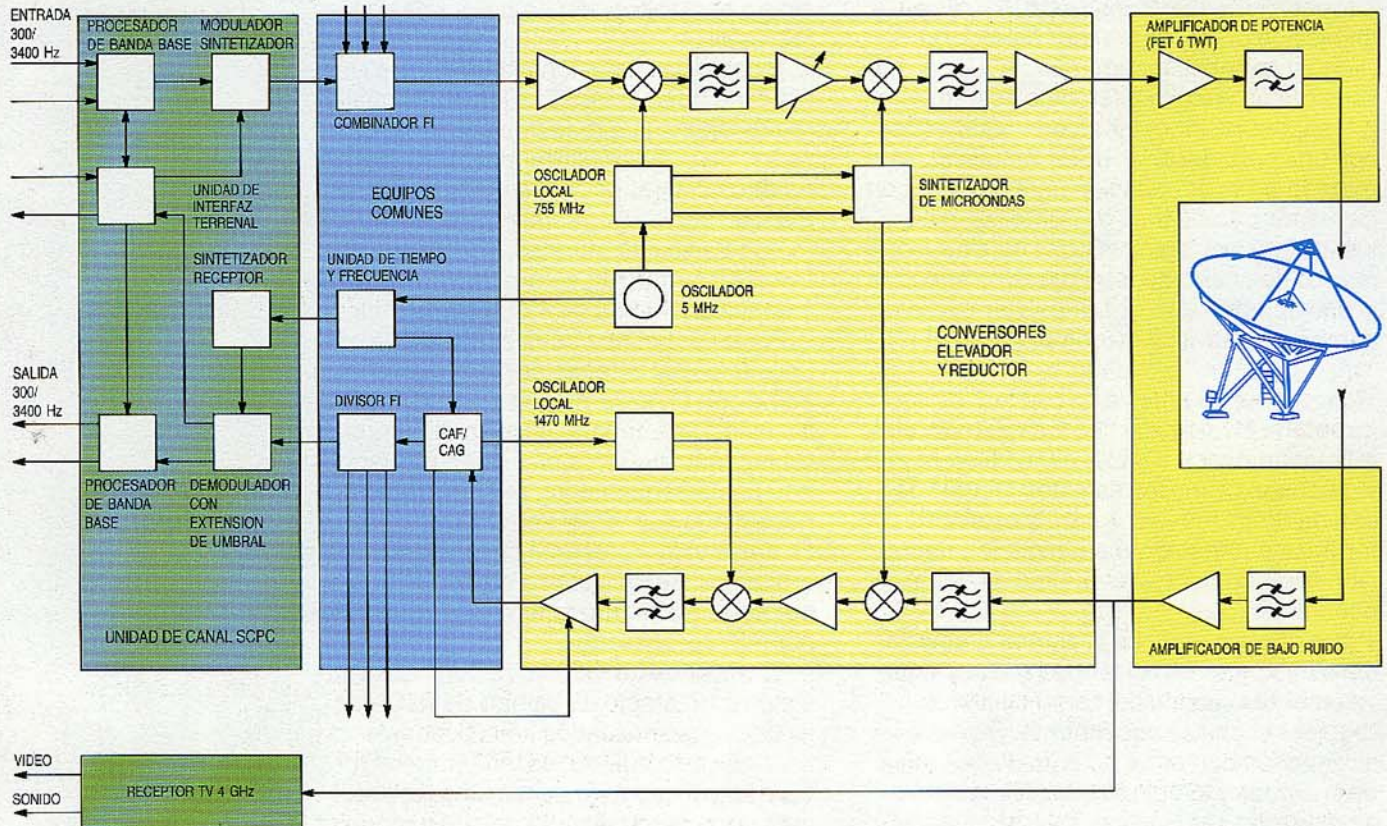
En la parte transmisora, cada canal telefónico (300 a 3400 Hz) modula una portadora

de frecuencia determinada por un sintetizador de transmisión en la banda de FI (140 ± 18 MHz). Las portadoras moduladas obtenidas en el equipo de canal se llevan al combinador de FI y luego se trasladan a la banda de RF mediante una doble conversión. La segunda conversión de frecuencia utiliza un sintetizador de microondas como oscilador local. La frecuencia es ajustable en pasos de 0,5 MHz, lo que permite colocar cualquier canal telefónico en cualquier posición de la banda de frecuencias del enlace ascendente del transpondedor en banda C (5 850 a 6 425 MHz).

Las portadoras de RF se amplifican en un amplificador de potencia común, normalmente de estado sólido (5 W, 10 W ó 20 W de potencia de saturación). Se puede utilizar un tubo de onda progresiva si se requieren potencias más altas (25 W, 75 W ó 125 W).

En el trayecto de recepción, las portadoras procedentes del transpondedor del satélite en la banda de frecuencias del enlace descendente (3 625 a 4 200 MHz), pasan por un amplificador de bajo ruido y se reducen luego en frecuencia a la banda de FI. Aquí también tal operación se realiza por doble conversión de frecuencia con un mismo sintetizador de microondas. Para compensar cualquier posible deriva de frecuencia entre el satélite y la estación terrena, la frecuencia del último oscilador local de FI está controlada automáticamente

**Figura 1**  
Configuración general de una estación terrena Fastcom.  
CAF – control automático de frecuencia  
CAG – control automático de ganancia.



por una señal piloto que transmite la estación maestra a través del satélite; el nivel de esta señal permite además el control automático de ganancia de las portadoras.

Las portadoras en FI ( $140 \pm 18$  MHz) se distribuyen mediante el divisor de FI a los demoduladores, cada uno de los cuales selecciona sólo una portadora gracias a su sintetizador. La demodulación de portadora la realiza un demodulador con extensión del umbral, el cual mediante un proceso con bucle de enganche de fase (PLL) consigue un umbral que mejora en más de 3 dB el obtenido con los demoduladores convencionales de FM.

Si la estación dispone del receptor de televisión opcional, éste va en el armario del Fastcom. Se utiliza un sintetizador para seleccionar cualquier programa de televisión comprendido en la banda de 3625 a 4200 MHz. El receptor obtiene las señales de vídeo y sonido directamente de la señal de RF.

#### Equipo de canal SCPC

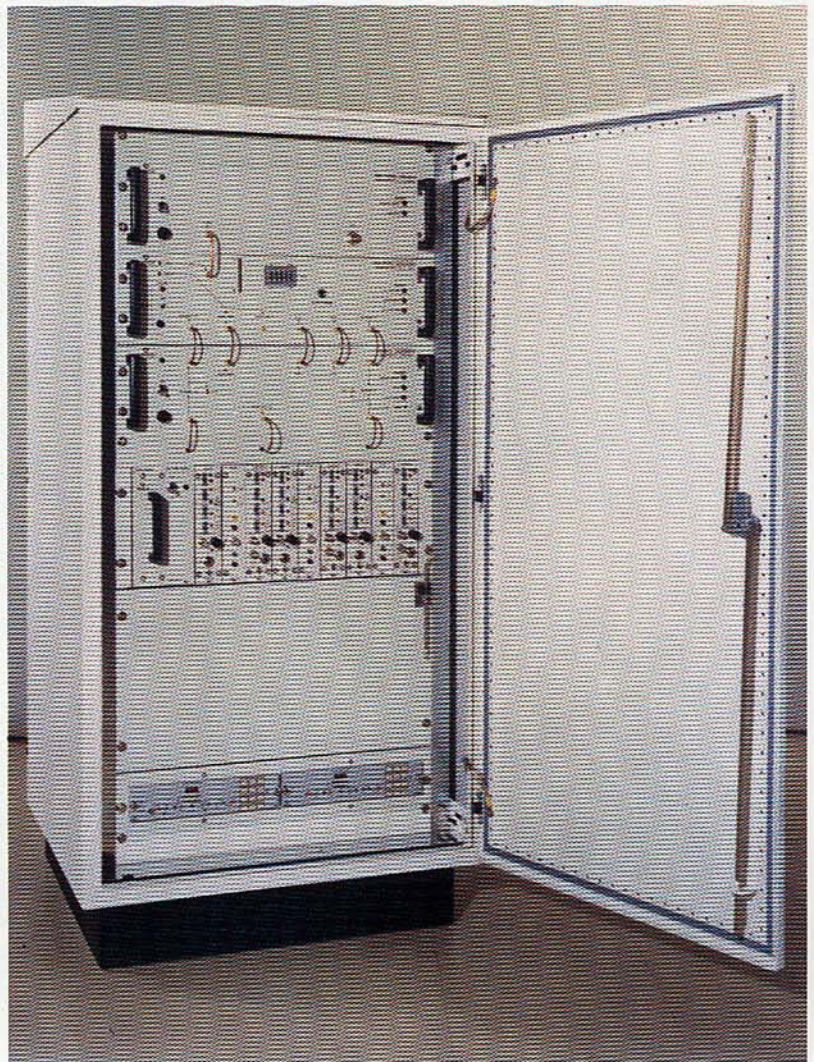
Cada portadora SCPC se procesa por separado, tanto en transmisión como en recepción, en su propia unidad de canal que consta de tres módulos enchufables: modulador, demodulador y unidad de interfaz terrenal.

El buen funcionamiento y gran flexibilidad de las estaciones Fastcom se basan en el avanzado diseño del equipo de canal, con circuitos VLSI. Cada bandeja de 19 pulgadas puede albergar tres unidades de canal con sus fuentes de alimentación.

El rendimiento de la transmisión mejora notablemente reduciendo con compensadores de 2 dB a 1 dB la variación de nivel antes de la transmisión (Recomendación G.162 del CCITT). Se consigue así una elevación objetiva de calidad del canal telefónico, pues el ruido añadido en el enlace por satélite a bajo nivel se amplifica menos que la señal en el expansor debido a la ley logarítmica utilizada en el compresor. Además hay una mejora subjetiva por reducirse el ruido de fondo en los periodos de silencio. En conjunto, la mejora total debida a esta técnica está comprendida entre 13 y 20 dB.

Teniendo en cuenta la compresión y la ponderación sofométrica, la calidad de transmisión de un circuito SCPC cumple la norma usual de 50 dB de relación señal a ruido. La tabla 2 resume las principales características del terminal de comunicación.

La activación por voz de la portadora asegura que sólo se transmite mientras realmente se habla, con lo que el consumo



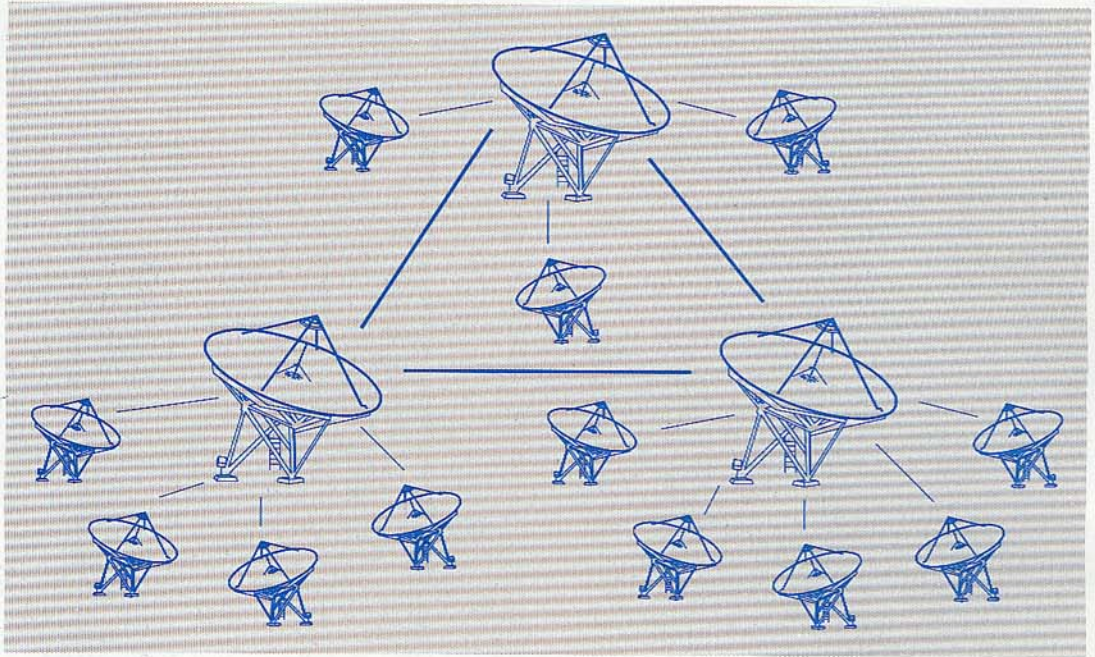
Terminal de comunicación Fastcom.

Tabla 2 - Características del terminal de comunicación

Características técnicas y prestaciones principales			
Convertidores (transmisión y recepción): ágiles con doble conversión de frecuencia			
Primera FI: un oscilador local común con sintetizador (pasos de $\pm 0,5$ MHz)			
Segunda FI: modems SCPC ( $139,5 \pm 18,5$ MHz)			
Control automático de frecuencia: compensa la deriva de frecuencia del satélite por recepción de una señal piloto desde el equipo de canal SCPC del satélite:			
- sintetizadores separados para transmisión y recepción			
- separaciones de frecuencia: 22,5, 30, 45 y 60 kHz			
- demodulador con umbral mejorado: (7 dB de relación portadora a ruido en el umbral)			
Características típicas de funcionamiento			
Separación (kHz)	Desviación de pico (kHz)	C/No (dB.Hz)	S/N* (dB)
22,5	4,5	55	$\geq 32$
30	7,2	55	$\geq 34$
45	12	55	$\geq 39,5$
* con preacentuación			
* sin ponderación sofométrica (+ 2,5 dB) ni mejora por compresión/expansión (+ 13 a + 20 dB)			

C/No - relación de portadora a densidad de ruido  
S/N - relación señal a ruido

Figura 2  
Red por satélite que  
combina subredes en  
estrella y en malla.



de potencia de RF en el transpondedor del satélite se limita a un 40% de la duración de la llamada (valor medio estadístico). Un detector de voz y el supresor de eco asociado controlan la activación de la portadora desde el modulador. Hay un circuito de inhibición que desactiva este control durante las fases de señalización y de transmisión de datos.

El equipo puede ajustarse para cualquier anchura de banda de las normalmente usadas en transmisión SCPC, las cuales corresponden a separaciones de canales de 22,5 kHz (1 600 frecuencias por cada transpondedor de 36 MHz), 30 kHz (1200 frecuencias), y 45 kHz (800 frecuencias). También se puede adoptar una separación de 360 kHz para programas de sonido de alta calidad (40 a 15000 Hz). La separación de 30 kHz se ha estandarizado en el servicio Vista (Intelsat IESS-305).

Los sintetizadores independientes de transmisión y recepción permiten ajustar cada canal SCPC en cualquier frecuencia dentro del plan de asignación de frecuencias del transpondedor.

Cada unidad de canal incluye una unidad de interfaz terrenal para la adecuada conexión con los sistemas telefónicos locales, por ejemplo:

- *Enlace de línea larga* para conectar abonados remotos a la central telefónica a través del satélite.
- *Enlaces de 4 hilos* para tráfico manual entre abonados de forma prefijada o por operadora. Puede transmitirse señalización CCITT n° 5 usando estas unidades de interfaz terrenal.

- *Enlaces E y M de 4 hilos*, especialmente diseñados para conexión a una central telefónica local.

Estas unidades de interfaz son ideales para conectar los terminales de comunicación al conmutador Fastcom.

### Conmutador Fastcom

En muchas aplicaciones, incluso en zonas aisladas, hace falta una pequeña central local. El conmutador Fastcom, concebido para atender tal necesidad, es un sistema digital de conmutación por división en el tiempo controlado por programa, que puede servir de central telefónica local. Se aloja en un armario similar a los utilizados para los sistemas Fastcom y puede emplazarse junto a la estación terrenal. Se compone de:

- bandejas de puertos, que albergan las placas de interfaz del enlace por satélite (2 ó 4 hilos) y las de interfaz del usuario (telefonía y datos)
- red de conmutación exenta de bloqueo, con 512 puertos
- unidad de control, basada en un solo microprocesador.

En su configuración mínima, el conmutador utiliza una señalización decádica, por lo que es compatible con la mayoría de las redes públicas. Esta configuración, que puede dar servicio hasta a 120 abonados, incluye todo lo necesario para el control y supervisión de la llamada, mantenimiento remoto y tarificación, permitiendo la gestión local o remota

de los datos del usuario, la tarificación y el mantenimiento del sistema.

### Alimentación

Las células solares suelen ser el mejor, y a veces único, medio de alimentar las estaciones aisladas. Por esta razón las estaciones Fastcom y los conmutadores asociados se han diseñado para tener un mínimo consumo de potencia, normalmente de 250 W para una estación de tres canales. Además, el uso de paneles solares no restringe el servicio y es coherente con el funcionamiento desatendido, modo normal de explotación. En la práctica, el estado de la técnica en células solares (los paneles solares pueden suministrar unos 10 W permanentes por metro cuadrado) y su coste total, incluidas las baterías de reserva, limitan el consumo a unos 500 W.

Si se necesita más potencia se pueden utilizar fuentes con reabastecimiento de combustible como turbogeneradores de ciclo cerrado o generadores diesel. Aun contando con el suministro local de red eléctrica, se ha de tener un suministro de emergencia para asegurar el funcionamiento ininterrumpido.

### Arquitectura de la red

Las estaciones terrenas para aplicaciones rurales suelen configurarse en una red en

estrella, en la que una estación central maestra se comunica con un conjunto de estaciones locales. No obstante, para mayor generalidad, la figura 2 muestra una red más completa que combina subredes en estrella con subredes en malla enlazando, por ejemplo, capitales regionales.

El número total de canales SCPC que se pueden transmitir en una red depende de los servicios, la arquitectura de la red y las características del transpondedor. La tabla 3 muestra algunas configuraciones típicas y sus capacidades.

### Instalación, pruebas y puesta en servicio

Se han elaborado procedimientos estándar de instalación para reducir los costes al mínimo. En concreto, Alcatel Telspace ha normalizado tres tipos de instalación, destinados a funcionar en intemperie, en contenedor y en interior. Cada tipo incluye todo lo necesario para dejar preparada la estación y detalla las comprobaciones a efectuar antes de poner en funcionamiento la misma. Entre los aspectos cubiertos figuran el manejo y transporte de los equipos, la disponibilidad de trabajadores locales, la obra civil y el suministro eléctrico.

La estación entera, y en particular el terminal de comunicación, funcionan a la intemperie, en condiciones ambientales rigurosas. Las antenas pequeñas se pueden erigir sobre un simple pilar de cemento,

Tabla 3 - Capacidades típicas de satélites Intelsat para el servicio Vista

Número de canales SCPC (o medios circuitos) que puede transmitir un transpondedor				
Tipo de estación terrena	Tipo de transpondedor y satélite			
	Transpondedor de cobertura mundial		Transpondedor de cobertura hemisférica o zonal	
Norma D2 (antena 11 m) G/T = 31,7 dB/K ó Norma D1 (antena 4,5 m) G/T = 22,7 dB/K	Intelsat V o VA  (PIRE = 23,5 dBW Anchura de banda total, 36 MHz)	Intelsat VI  (PIRE = 26,5 dBW Anchura de banda total, 36 MHz)	Intelsat V (F1 a F4)  (PIRE = 29 dBW Anchura de banda total, 72 MHz)	Intelsat VI  (PIRE = 31 dBW Anchura de banda total, 72 MHz)
Ejemplo A (para referencia) Sólo estaciones D2 Canales SCPC	1200	1200	1368	1368
Ejemplo B Sólo estaciones D1 Canales SCPC	355	776	897	1368
Ejemplo C Configuración mixta típica Estaciones D1 y D2 Canales SCPC	631	1200	1368	1368



y los paneles solares con sus baterías de repuesto pueden instalarse también en el exterior. Normalmente, una estación Fastcom con antena de 4,5 m se instala y se prueba en tres días.

Para que sea mínimo el coste de un sistema "llave en mano" asegurando una alta fiabilidad, todo el equipo se prueba exhaustivamente en fábrica, en bancos de prueba totalmente automatizados. Las pruebas in situ y la entrega en servicio pueden crear problemas en estaciones ubicadas en lugares difíciles, tales como islas remotas. Para resolver este caso, se puede instalar temporalmente el sistema completo (estaciones maestra y locales) en otro lugar donde se compruebe el funcionamiento total (incluido el satélite). Realizada esta prueba, el sistema podrá ya trasladarse a su emplazamiento definitivo, donde sólo necesitará una breve comprobación tras su definitiva instalación.

### Operación y mantenimiento

Las estaciones terrenas son totalmente autónomas y no requieren operadores locales. Incluso sin redundancia de equipos puede lograrse una disponibilidad del 99,98%. Utilizando las comunicaciones del propio terminal, la estación maestra puede vigilar y controlar la estación local a través, por ejemplo, de un canal telegráfico que comparta el espectro de banda base de un canal SCPC.

En estaciones pequeñas no se suele considerar la instalación de subsistemas activos redundantes. No obstante, el conseguir los niveles especificados de disponibilidad depende de un adecuado soporte logístico que incluya mantenimiento periódico, dotación de repuestos y la existencia de personal de mantenimiento capacitado.

En principio, las estaciones Fastcom están diseñadas para formar parte de la red permanente de telecomunicación. Sin embargo, sus posibilidades, fiabilidad y robustez, así como su facilidad de transporte, instalación y puesta en servicio las hacen ideales para constituir enlaces provisionales y de emergencia, sobre todo para reanudar las comunicaciones tras grandes catástro-

fes naturales. Por ejemplo, pasada la erupción volcánica de Armero, Colombia, en diciembre de 1985, Telspace entregó a la Administración colombiana dos estaciones Fastcom para restablecer rápidamente los circuitos telefónicos de emergencia con la capital.

### Conclusiones

Gracias a una larga experiencia como proveedor de estaciones terrenas en regiones donde la situación geográfica, el clima y el entorno plantean problemas difíciles, Alcatel Telspace es capaz de suministrar, instalar, probar y poner en servicio estaciones Fastcom en cualquier lugar del mundo. Aunque estas estaciones se utilicen mucho para comunicaciones rurales, también pueden proporcionar servicios de telefonía y datos por enlaces nacionales e internacionales a lugares como minas, plataformas de petróleo alejadas de la costa, y entidades administrativas o industriales aisladas.

**Jean Esculier** nació en 1936. Se graduó en ingeniería en la Ecole Centrale Lyonnaise y en la Ecole Supérieure d'Électricité, entrando luego en Thomson-CSF donde trabajó en las primeras estaciones terrenas de seguimiento y telemando francesas y europeas, y en la producción de equipos de radiocomunicación. El Sr. Esculier pasó a Alcatel Telspace en 1979 como jefe de proyecto para las redes de estaciones terrenas de telecomunicación por satélite. Actualmente es director de la ingeniería del departamento de ventas y marketing.

**Alain Parnière** nació en 1946. Tras graduarse ingeniero en la Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers y en la Ecole Supérieure d'Électricité, entró en Thomson-CSF donde trabajó en varios proyectos de equipos de telecomunicación por satélite (analógico, digital, bandas UHF/SHF), llegando a ser responsable técnico de las pequeñas estaciones terrenas. Actualmente el Sr. Parnière es director de equipos de radiofrecuencia en Alcatel Telspace.

**Jean Salomon** se diplomó en ingeniería por la Ecole de Physique et Chimie y está graduado en la Universidad de París. De 1948 a 1972 trabajó en Thomson-CSF, desempeñando varios puestos en las divisiones de radar y radioenlaces de microondas. Más tarde fue nombrado jefe de ingeniería por Alcatel Telspace. Actualmente el Sr. Salomon es consultor de comunicaciones por satélite, con responsabilidad sobre prospecciones avanzadas y relaciones con organizaciones internacionales.

# Carga útil para el satélite de difusión directa de televisión TDF1

El proyecto conjunto francoalemán para desarrollar y lanzar una serie de satélites de difusión directa de televisión comenzó con los TVSAT1 y TDF1. Estos satélites y los dos que les siguen – TVSAT2 y TDF2 – proporcionarán señales de televisión de alta calidad, transmitiendo a la vez por cuatro canales.

**X. Rozec**

Alcatel Espace, Toulouse, Francia

## Introducción

El acuerdo francoalemán TVSAT/TDF1 firmado en 1980 cubría el desarrollo y la fabricación de dos satélites de difusión directa de televisión. Por aquella época, eran los satélites de mayor peso producidos en Europa. Por ello, hubo que preparar nuevas tecnologías, como las de fibra de carbono, filtros de invar, tubos de alta potencia, generadores solares y circuitos híbridos para microondas a base de FET (transisto-

res de efecto de campo) para reducir al mínimo la masa de la carga útil del satélite, todas las cuales tuvieron que ser calificadas para el espacio. En estos desarrollos, Alcatel Espace jugó un papel de liderazgo.

El proyecto completo lo controla una organización que incluye al CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) y TDF (Télédiffusion de France) por el lado francés, y al DFVLR (Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt) y el Departamento Central de Ingeniería de Telecomunicaciones por el lado alemán. Como asociada del Consorcio Eurosatélite (Alcatel Espace, Aérospatiale, MBB, AEG-Telefunken/ANT, ETCA), Alcatel Espace se encargó de suministrar la carga útil del satélite TDF1, y algunos equipos del TVSAT. Además, la Compañía fue designada contratista principal de los subsistemas de telemetría y telemando (TM, TC).

La carga útil del TDF1 basa sus requisitos en las directrices de la CAMR (Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones), apéndices 77 y 79, resumidas en la tabla 1.

## Requisitos y limitaciones de la carga útil

El área cubierta por los enlaces descendentes es una elipse que abarca Francia. Los cinco canales (1, 5, 9, 13 y 17) se transmiten en la banda de 11,7 a 12,1 GHz con un máximo de potencia radiada de 63 dBW por canal. Tomando como base este valor, la figura 1 muestra el tamaño de la antena parabólica terrena que garantiza una relación portadora a ruido de 14 dB durante el 99% del tiempo con un factor de calidad (relación ganancia a temperatura de ruido) mayor que 6 dB/K.

El satélite puede emitir simultáneamente por cuatro de los cinco canales. La banda de los enlaces ascendentes de 17,3 a

Tabla 1 – Directrices de la CAMR y principales parámetros

<b>Frecuencias/polarización</b>	
Señales de TV del enlace ascendente	17,3 a 17,7 GHz/LHC
Señales de TV del enlace descendente	11,7 a 12,1 GHz/RHC
Canales	1, 5, 9, 13, 17
Seguimiento en RF	11,2 GHz/LHC
Telemando (ascendente)	18,1 GHz/LHC
Telemetría (descendente)	12,5 GHz/RHC
<b>Flujo de potencia recibida en el satélite</b>	
Señal de televisión	-92,5 a -78,5 dBW/m <sup>2</sup>
Seguimiento en RF	-117 a -108 dBW/m <sup>2</sup>
Señales interferentes ascendentes	Todos los satélites europeos situados a 19° Oeste
<b>Antena de recepción</b>	
Abertura	0,7° × 0,7°
Precisión de puntería	mejor que 0,2°
Capacidad de desviación	0,4°
Relación ganancia a temperatura de ruido a la potencia mínima de recepción	12,5 dB/K
<b>Repetidor</b>	
Anchura de canal	27 MHz
Número de canales	5
Funcionamiento simultáneo	4 canales
<b>Antena de transmisión</b>	
Copolarización y polarización cruzada	Diagramas CAMR
Precisión de puntería	mejor que 0,1°
<b>Cobertura (elipses CAMR)</b>	
	1,62° × 1,62°
Potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE)	62,9 dBW (canal 9)
Potencia radiada sobre la tierra	-103 dBW/m <sup>2</sup>

LHC – polarización circular levógiara

RHC – polarización circular dextrógiara

**Tabla 2 – Principales características del satélite TDF1**

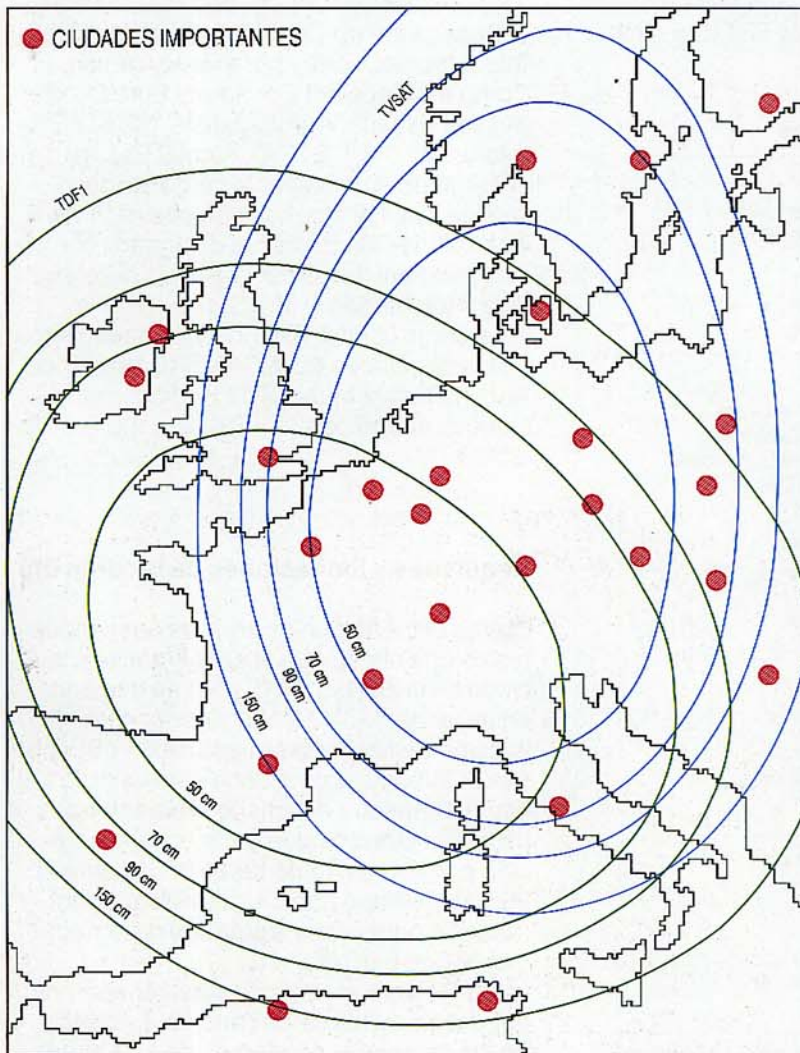
Altura	6,35 m
Envergadura con las alas extendidas	19 m
Tamaño del cuerpo	2,33 x 2,40 x 1,64 m
Peso sin combustible	1 025 kg
Paneles solares	3 215 W
Probabilidad de éxito por satélite al cabo de 7 años	80% por 3 canales 65% por 4 canales
Peso cargado de combustible	2 077 kg

17,7 GHz corresponde a una frecuencia de conversión de 5,6 GHz. Las principales características del satélite se resumen en la tabla 2.

**Composición de la carga útil**

La carga útil, esquematizada en la figura 2, consiste en el subsistema de antena para recepción, transmisión y seguimiento, y el subsistema repetidor.

**Figura 1**  
Diámetros de antena para la recepción de TDF1/2 y TVSAT1/2.



**Subsistema repetidor**

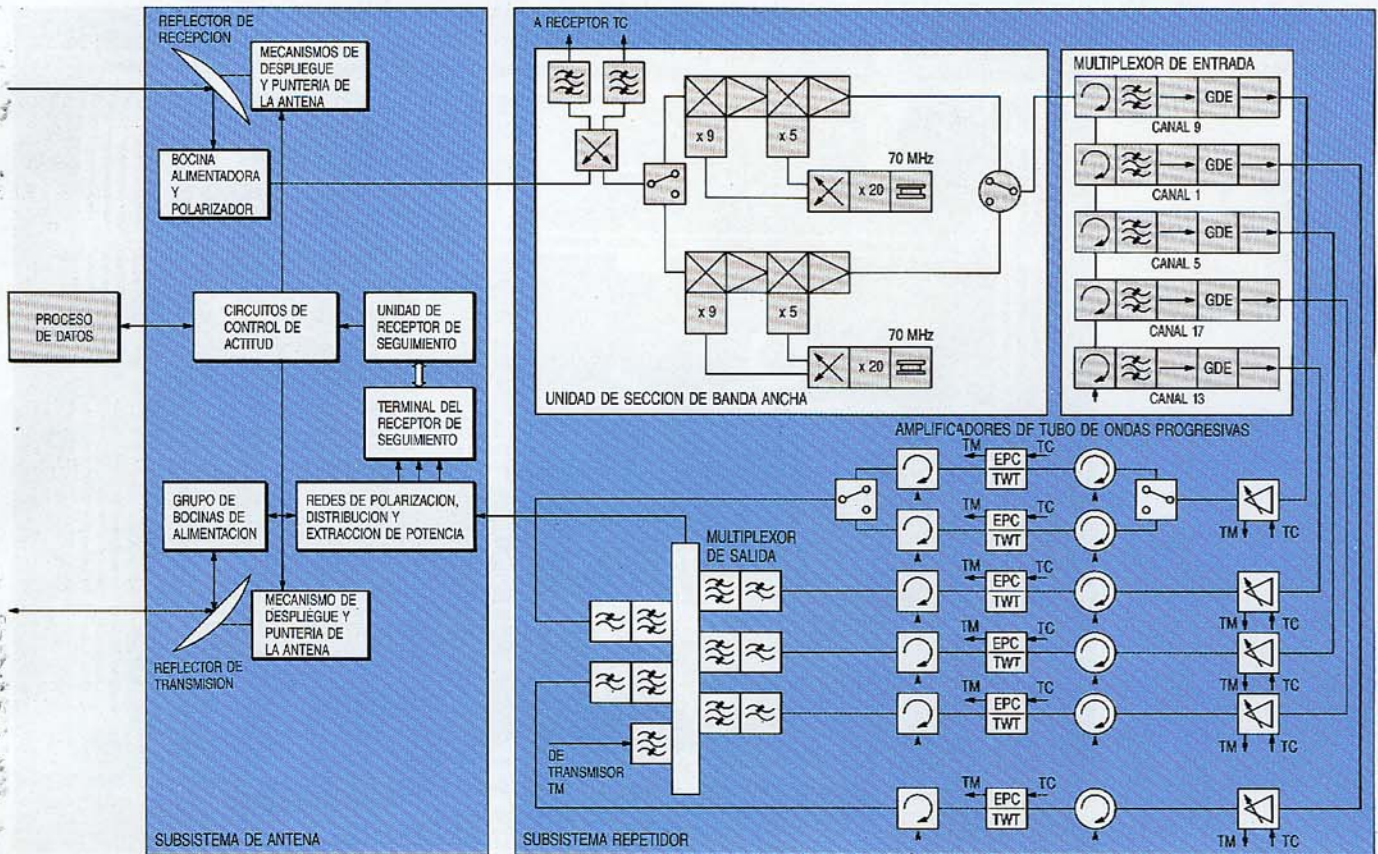
Las señales de televisión y teletexto recibidas por las antenas del satélite en la banda de 17 a 18,1 GHz se llevan al receptor de entrada (sección de banda ancha) que separa la señal de televisión deseada de la señal de teletexto a 18,09 GHz, dirigiendo ésta a la cadena de teletexto. El amplificador/conversor de entrada de dicha sección de banda ancha contiene dos receptores de 17/12 GHz, uno de ellos en reserva desactivada, conectados en la entrada por un conmutador de guíasondas a 17 GHz. El receptor de entrada amplifica en banda ancha los cinco canales de televisión (de 27 MHz de anchura de banda) en la gama de 17,3 a 17,7 GHz, y además convierte esta última banda en otra de 11,7–12,1 GHz utilizando un plan de doble cambio de frecuencia que asegura un excelente rechazo de las combinaciones no deseadas.

La unidad, desarrollada por Alcatel Espace, usa transistores FET híbridos, filtros de guíaonda y filtros helicoidales para conseguir una ganancia de 35 dB con un factor de ruido de 8 dB. Tiene un consumo de 9 W y una masa de 9,5 kg.

Un multiplexor de entrada que Alcatel Espace ha desarrollado y conseguido calificar para el espacio, separa los cinco canales de televisión procedentes de la sección de banda ancha mediante un sistema de filtros y circuladores seguidos por igualadores de retardo de grupo. Todos estos componentes se realizan en invar para garantizar su estabilidad ante variaciones térmicas. Esta tecnología reduce el rizado de la banda de 27 MHz a menos de 0,2 dB, y las pérdidas a valores entre 3 y 4 dB.

Cada una de las secciones para los canales 1, 5, 13 y 17 consiste en un amplificador de potencia media seguido de otro de alta potencia TWT (tubo de ondas progresivas). En el caso del canal 9, se conecta un segundo amplificador TWT en paralelo para servir de reserva. Esta redundancia se ha restringido al canal 9 por razones de coste y peso. El amplificador de canal de potencia media, con etapas múltiples de híbridos cerámicos y FET, da una potencia de salida constante susceptible de control remoto en pasos de 0,2 dB en la gama de 8 a 18 dBm. Puede funcionar bien con control automático del nivel de salida, o bien con ganancia regulada desde la estación terrena entre 19 y 64 dB, en pasos de 0,8 dB. Cada amplificador pesa 1,1 kg y consume 2,8 W.

Las potencias de salida de 230 y 260 W se consiguen mediante amplificadores TWT de alta potencia. La versión de 230 W contiene una hélice, con tres secciones de cobre soldadas a soportes de óxido de berilio, y un colector de cuatro etapas. El uso de esta configuración ha demostrado



**Figura 2**  
**Diagrama de bloques de los subsistemas de la carga útil de TDF1.**  
**EPC** - acondicionador electrónico de potencia  
**GDE** - igualador de retardo de grupo  
**TM** - telemida  
**TC** - telemando.

que puede lograrse una ganancia de 50 dB con un rendimiento del 50% en un TWT de 3 kg. Tanto el tubo de 230 como el de 260 W poseen colectores multietapa con radiadores y un cátodo impregnado en tungsteno.

Un acondicionador electrónico de potencia suministra a los TWT la tensión de varios kilovoltios necesaria. Este acondicionador lleva dispositivos de protección de sobrecorriente en la hélice y de caída de tensión en la fuente de alimentación, así como un sistema de nuevo arranque automático. El consumo de los amplificadores TWT es de 580 W en la versión de 230 W, y de 680 W en la de 260 W.

El multiplexor de salida recombina las cinco señales de televisión con la señal de telemida procedente de la cadena de telemando/telemida. Cada canal de televisión consta de un filtro paso bajo seguido por un filtro paso alto, y el filtro de telemida es de paso bajo. Dado que la potencia de salida es alta, se genera una gran cantidad de calor, disipada por unas tuberías de gran conductividad térmica que van atornilladas y pegadas a los filtros. El multiplexor de salida es del tipo de guíaonda de conducto múltiple en el que cada filtro de canal va fijado a los bordes del conducto múltiple. Los filtros paso banda son de invar y los demás, de acero.

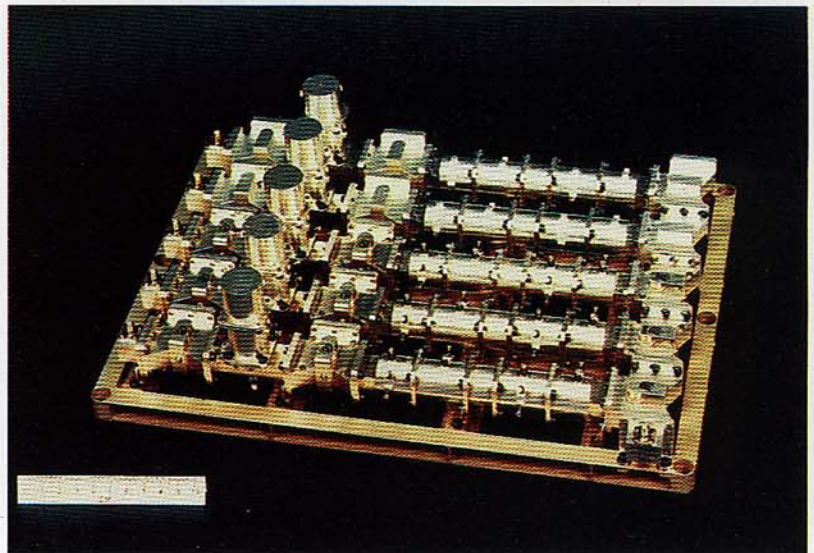
Las características principales del multiplexor son un rizado menor de 0,15 dB en

una anchura de banda de 27 MHz y unas pérdidas de 0,67 dB.

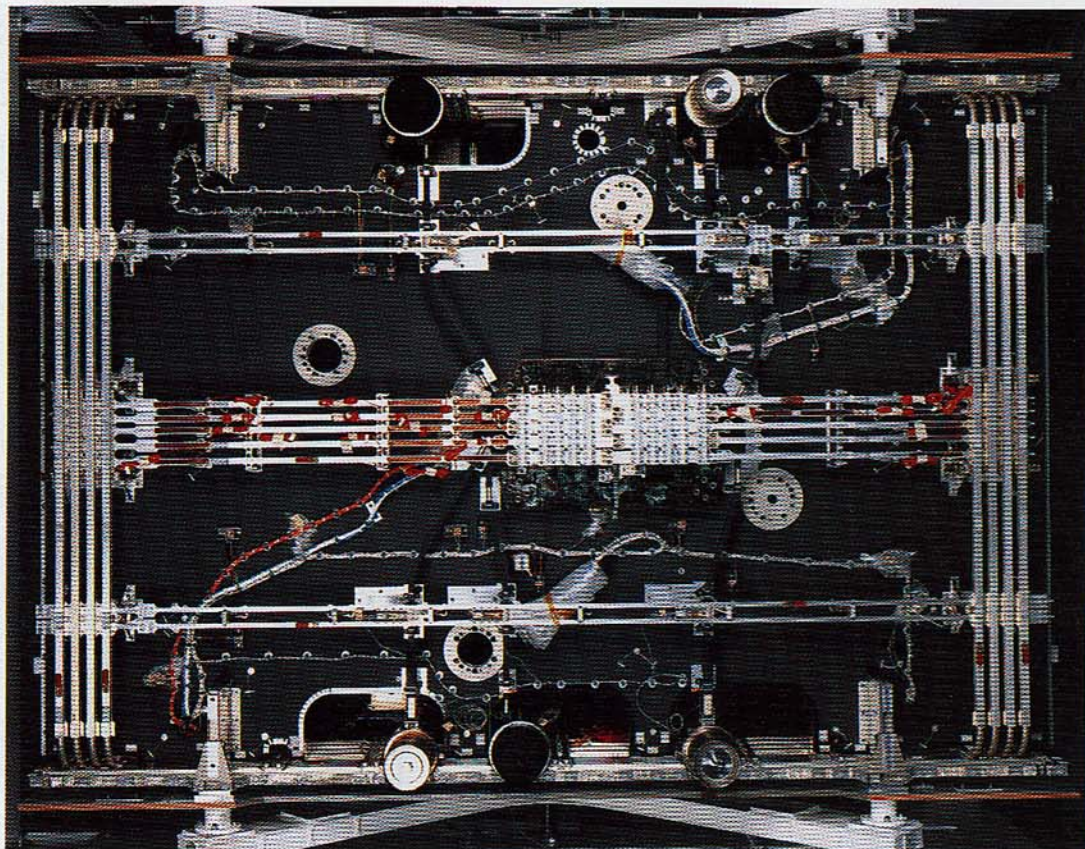
**Fuente de alimentación del repetidor**

Los amplificadores de canal y la sección de banda ancha se alimentan de un bus primario de 50 V mediante una fuente de alimentación especial del repetidor que activa también el conmutador de guíaonda a la entrada del receptor de banda ancha y los conmutadores de redundancia del canal 9, según las órdenes de telemando recibidas.

**Multiplexor de entrada.**



Panel "de tierra" del satélite, mostrando el módulo de comunicación.



El consumo es de 44 W para cuatro canales. El equipo lo ha desarrollado ETCA, compañía belga.

#### *Otros componentes*

Las antenas y la sección de banda ancha están conectadas por un guíaondas de aluminio. Como la potencia de RF es alta, se utilizan también guíaondas para conectar los TWT con el multiplexor de salida. Para las demás conexiones se utilizan cables coaxiales de cobre.

Hay unos aisladores entre la sección de banda ancha, el multiplexor de entrada, amplificador de canal y el TWT para evitar las reflexiones múltiples a lo largo de los diversos trayectos. Unos aisladores de guíaondas de bajas pérdidas protegen los TWT de las reflexiones procedentes del multiplexor de salida. Estos aisladores fueron desarrollados y calificados en el marco del proyecto TVSAT/TDF1. Cuando se produce un sobrecalentamiento, un termistor adherido a cada aislador controla un circuito dentro de la fuente de alimentación del repetidor, el cual desactiva el amplificador de canal correspondiente y evita así la destrucción del aislador.

#### *Características del subsistema repetidor*

Las prestaciones detalladas en radiofrecuencia son demasiado extensas para exponerse aquí. El repetidor pesa 106 kg,

con un máximo especificado de 112 kg y un consumo máximo de 2555 W, cuando trabajan simultáneamente los cuatro amplificadores TWT.

Todo el equipo del repetidor va fijado a una estructura en U, consistente en unos paneles norte y sur y un "panel de tierra", llamado así por su orientación hacia la Tierra cuando el satélite está en órbita. Sobre las caras interiores de los paneles norte y sur, y en la superficie exterior del panel de tierra se montan equipos con gran disipación de calor. A estos equipos se fijan unas conducciones térmicas, para repartir calor hacia los radiadores de las caras exteriores de los paneles norte y sur.

#### **Subsistema de antena**

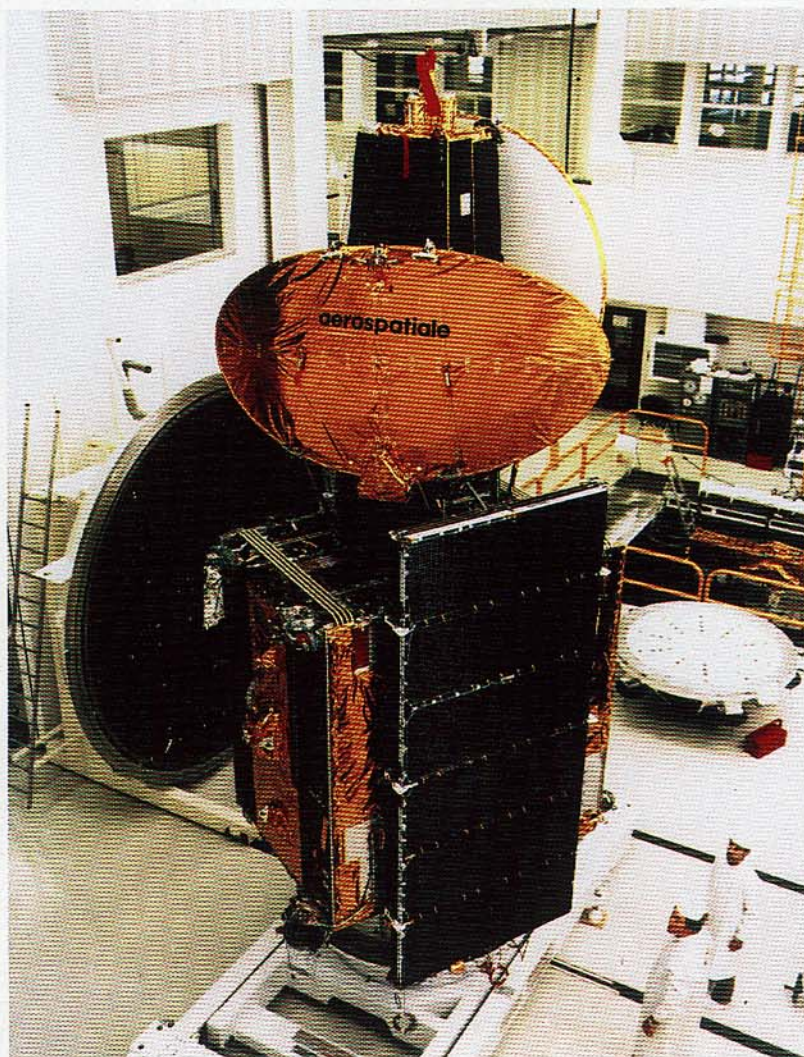
El subsistema de antena tiene tres funciones. Así, recibe señales de televisión transmitidas por la estación terrena en la banda de 13,3 a 17,7 GHz, así como la señal de telemando a 18,09 GHz, y devuelve estas señales de televisión hacia tierra tras ser convertidas a la banda de 12 GHz y amplificadas por el receptor. Junto con estas señales de televisión se retransmite la señal de telemida. Como una tercera función, el subsistema de antena corrige automáticamente la puntería fina de las antenas. En la figura 2 se presentan tales funciones.

Son tres los componentes principales del subsistema de antena: antena de recepción, antena de transmisión y unidad de seguimiento y puntería fina. El conjunto formado por los reflectores de transmisión y recepción, el mecanismo de puntería, el mecanismo de despliegue y bloqueo del reflector, los alimentadores y el equipo terminal, junto con los guiondas asociados, va fijado a una estructura de fibra de carbono de 2,90 m de altura.

#### *Antena de recepción*

La antena de recepción del satélite opera en la banda de 17,3 a 18,1 GHz. Su configuración es excéntrica (para evitar que el alimentador obstaculice la señal reflejada) con una bocina circular ondulada como elemento fuente. El reflector circular, de 2 m de diámetro y distancia focal 1,5 m, es de plástico reforzado con fibra de carbono. El mecanismo de puntería permite una desviación de 0,4°, bajo control de la estación terrena. En modo esclavo, corrige automáticamente la puntería por medio de señales procedentes de los receptores de seguimiento.

**Integración final del satélite TDF1. Aparece en su posición de lanzamiento, con los paneles solares y los reflectores de antena plegados.**



La antena de recepción, de ganancia no inferior a 46,3 dB, usa polarización circular levógira, con un nivel de polarización cruzada que no rebasa los 33 dB. La abertura a 3 dB es circular, de 0,7° por 0,7°. El peso total de la bocina y el guionda es sólo de 1,5 kg.

#### *Antena de transmisión*

Tiene configuración excéntrica, con alimentador de elementos múltiples para transmitir señales de televisión en la banda de 11,7 a 12,1 GHz, y la señal de telemetría a 12,49 GHz. Se utiliza también para seguimiento. El reflector elíptico de 2,40 x 0,9 m tiene 1,5 m de distancia focal.

El alimentador comprende nueve bocinas de aluminio plateado, de muy bajas pérdidas; las cuatro bocinas centrales extraen señales excéntricas de medición a 11,2 GHz. La antena tiene una ganancia no menor de 40,7 dB utilizando polarización circular dextrógira, con un nivel de polarización cruzada inferior a 30 dB. La abertura a 3 dB es una elipse de 2,5° por 0,98°. Guionda y alimentador pesan en total 6,8 kg.

Este tipo de alimentador, especialmente desarrollado por Alcatel Espace, representa una de las más avanzadas técnicas para conformación del haz de la antena.

#### *Dispositivo de seguimiento y puntería fina*

Este dispositivo asegura el posicionamiento preciso del eje de RF de la antena de transmisión con respecto a la estación terrena, mediante una señal de 11,2 GHz con polarización levógira. El alimentador de la antena transmisora incluye una red que genera dos señales "diferencia" en dos planos perpendiculares, y una señal "suma" que se toma como referencia de nivel y de fase. Las señales extraídas del alimentador se llevan al terminal, donde tales señales suma y diferencia se multiplexan en el tiempo y luego se convierten a 70 MHz. A continuación, se inyectan a un receptor de seguimiento que suministra las tensiones de corrección para el sistema de control de actitud orbital.

#### **Otros subsistemas**

Alcatel Espace fue asimismo responsable del desarrollo y fabricación del subsistema de telemando y telemetría, que consiste en un transpondedor a 2 GHz con proceso por ordenador a bordo. Este subsistema entra en funcionamiento tan pronto como el satélite es situado en su órbita de transferencia por el vehículo de lanzamiento. Otra unidad de transmisión-recepción a 18/12 GHz, también producida por Alcatel

Espace, toma el relevo una vez colocado el satélite en la órbita circular y desplegados los paneles solares. Ambos dispositivos utilizan ordenador y sistema de proceso de señales idénticos.

### Conclusiones

En cuanto inicien su operación los satélites TVSAT y TDF1, será posible recibir programas de televisión de alta calidad y sonido estereofónico utilizando pequeñas antenas individuales. La población que estos satélites de difusión directa abarcarán en Europa pasará de varios cientos de millones de habitantes. El acuerdo alcanzado por Francia y Alemania Federal, y recientemente por la Unión Europea de Radiocomunicaciones, sobre el uso de la norma "D2 Mac Paquet" permitirá mejorar la calidad de la imagen.

El TVSAT1 fue lanzado el 21 de noviembre de 1987 y se colocó en su órbita final, aunque no pudo ser utilizado debido a que no se desplegó uno de los paneles solares. El lanzamiento del TDF1 está programado para el 8 de octubre de 1988.

La continuidad del programa TVSAT1/TDF1 queda asegurada por la producción de los TDF2 y TVSAT2, cuyo lanzamiento está programado para mediados de 1989 y principios de 1990, respectivamente. La culminación del proyecto TVSAT/TDF debe-

ría abrir paso a una nueva generación de satélites de difusión directa de televisión. Basándose en un mayor conocimiento y dominio de las tecnologías utilizadas en satélites grandes, y en las mejoras continuas de las prestaciones de los equipos, es ya posible instalar más equipo y de superior calidad de funcionamiento que en los satélites de la generación actual. Los considerables avances también experimentados en los equipos receptores de tierra durante los últimos diez años, permitirán que los satélites del futuro puedan utilizar amplificadores TWT con potencias de RF cercanas a los 100 W. Por otra parte, también se incrementará el número de canales para atender así las necesidades de varios países europeos que comparten el mismo satélite.

Alcatel Espace es uno de los precursores en este fascinante sector de desarrollo.

**Xavier Rozec** tiene 50 años de edad. Se graduó en la Ecole Française de Radio et Electronique y en la Ecole National Supérieure de l'Aeronautique et l'Espace. Tras entrar en Thomson-CSF en 1966, trabajó en el Centro de Investigación de Corbeville en dispositivos semiconductores (variadores de fase, detectores, selectores, matrices de conmutación para COMSAT). En 1981 pasó al departamento espacial como responsable del equipo para las fases iniciales del proyecto TDF1/TVSAT1, y después se encargó del subsistema repetidor para finalmente convertirse en jefe del proyecto TDF1/TVSAT1. El Sr. Rozec es responsable de todos los proyectos TDF/TV en Alcatel Espace, Toulouse, desde 1987.

# Repetidores para satélites de telecomunicación de los años 90

La segunda generación de satélites de telecomunicación incorporará un refinado proceso de señal a bordo así como medios de conmutación que les permitan dar servicio a las nuevas estaciones terrenas de bajo coste, ya en fase de introducción. Aunque esto aumente el coste del segmento espacial, los costes totales de la red se reducirán, provocando una gran expansión de los servicios de telecomunicación por satélite.

**J. Beaucher**

Alcatel Espace, Toulouse, Francia

## Introducción

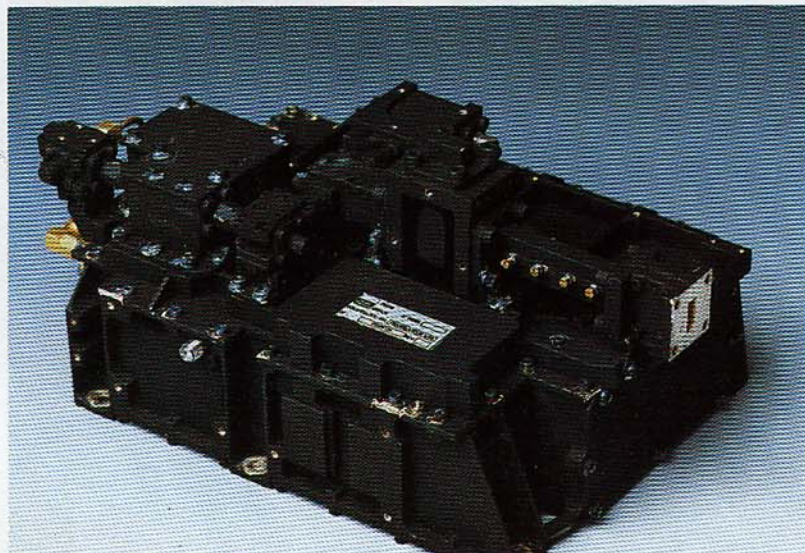
El crecimiento de la demanda en telecomunicaciones es indiscutible. Una parte importante de la capacidad de la red de telecomunicación mundial la proporcionan los satélites geoestacionarios, que actúan como retransmisores automáticos para enlazar de modo estable estaciones terrenas de cualquier tipo. Hoy en día estos sistemas experimentan un notable avance tecnológico.

Funcionalmente, hay cuatro tipos básicos de enlace: comunicaciones punto a punto (intercontinentales o nacionales) entre estaciones fijas, comunicaciones con estaciones móviles o instalaciones transitorias, difusión de televisión a pequeñas estaciones receptoras, y comunicaciones estatales o militares. Estas diversas aplicaciones descansan sobre los dos principales sub-

sistemas de un satélite de telecomunicaciones: la carga útil y la plataforma. La carga útil, que incorpora uno o más repetidores acoplados a las antenas, aporta las funciones de telecomunicación, mientras que la plataforma proporciona los servicios de soporte – concretamente, el soporte mecánico de la carga útil – y está diseñada para resistir las condiciones ambientales del espacio. Además, en la plataforma se incluye la propulsión necesaria para colocar el satélite en posición y mantenerlo en órbita geoestacionaria, controlando su actitud para estabilizarlo respecto a los tres ejes del espacio inercial. Otras funciones son la termorregulación, la generación y el almacenamiento de energía eléctrica, la telemetría y el telemando para las funciones de a bordo y el cálculo de posición del satélite.

El tipo de enlace, comunicación o difusión, determina la cobertura que se desea en Tierra. La zona de cobertura viene dada por la apertura de la antena y le afecta cualquier imprecisión en la puntería de la misma. Esta cobertura proporcionada por una o más antenas, permite establecer el enlace estación terrena – satélite – estación terrena por un trayecto de propagación único y utilizando un solo satélite geoestacionario.

Repetidor para satélite  
ATHOS.



## Aspectos reglamentarios

Como los sistemas de telecomunicación por satélite comparten con buen número de otros satélites el espectro electromagnético y la órbita geoestacionaria, se ha tenido que llegar a acuerdos internacionales sobre el uso de estos limitados recursos. Las bandas de frecuencia son atribuidas por pares (enlace ascendente/enlace descendente)



a satélites geoestacionarios específicos según la misión:

- comunicaciones punto a punto para servicios fijos: utilizan los pares de 6/4 GHz, 14/12 GHz y 30/20 GHz
- comunicaciones con estaciones móviles: 6/4 GHz y 1,6/1,5 GHz
- difusión de televisión: banda de 18 GHz en enlace ascendente y de 12 GHz para la difusión (dividida en canales asignados a diferentes países)
- comunicaciones estatales y militares: 8/7 GHz.

La longitud del satélite sobre el plano ecuatorial depende también de la misión. Manteniendo tal posición dentro de límites muy estrictos ( $\pm 1^\circ$ ) y mediante la polarización cruzada, se asegura que no hay interferencia entre diferentes satélites. Además la separación angular entre grupos de satélites debe ser al menos  $0,9^\circ$ . Una restricción adicional es que deben limitarse las densidades de flujo de potencia en bandas de frecuencia compartidas con otros servicios.

La vida de un satélite en órbita está limitada por la cantidad de combustible disponible para la estabilización y por la fiabilidad de los equipos de a bordo. Al final de su vida se le retira de la órbita.

### Sistemas actuales

Los repetidores de los satélites de telecomunicación actuales funcionan como relevadores bidireccionales entre dos estaciones terrenas. Por tanto son transparentes y realizan básicamente las funciones de recepción, conversión de frecuencia y transmisión.

Normalmente un satélite de telecomunicación incorpora equipos para uno, dos, o tal vez tres repetidores (como el Telecom 1). Técnicamente el límite está en la gran linealidad de amplificación de las señales en una banda muy ancha. Por esta razón, cada banda de frecuencias procesada por un repetidor se divide en sub-bandas o canales. Así, un repetidor consta de:

- sección de entrada de banda ancha: antena y receptor
- sección de canal de banda más estrecha
- sección de salida de banda ancha: multiplexor y antena.

Los canales se separan por filtrado en un demultiplexor de entrada y se recombinan en un multiplexor de salida. La amplificación de potencia se consigue con amplificadores de tubo de onda progresiva. Para tener una alta probabilidad de que el sistema funcione

a lo largo de toda su vida prevista (unos 10 años), se equipan con redundancia los componentes activos en la sección de banda ancha y en la sección de canal del repetidor.

Puede haber antenas dedicadas a funciones específicas, o bien utilizar la misma antena para transmisión y recepción. En el Telecom 1, dos repetidores comparten la antena. Las antenas de transmisión suelen radiar en un lóbulo conformado por medio de una fuente compleja.

Alcatel Espace ha producido tres satélites Telecom 1: dos llevan funcionando varios años y el tercero pronto será puesto en órbita. Para realizar su misión, la carga útil del satélite Telecom 1 consta de tres repetidores que proporcionan:

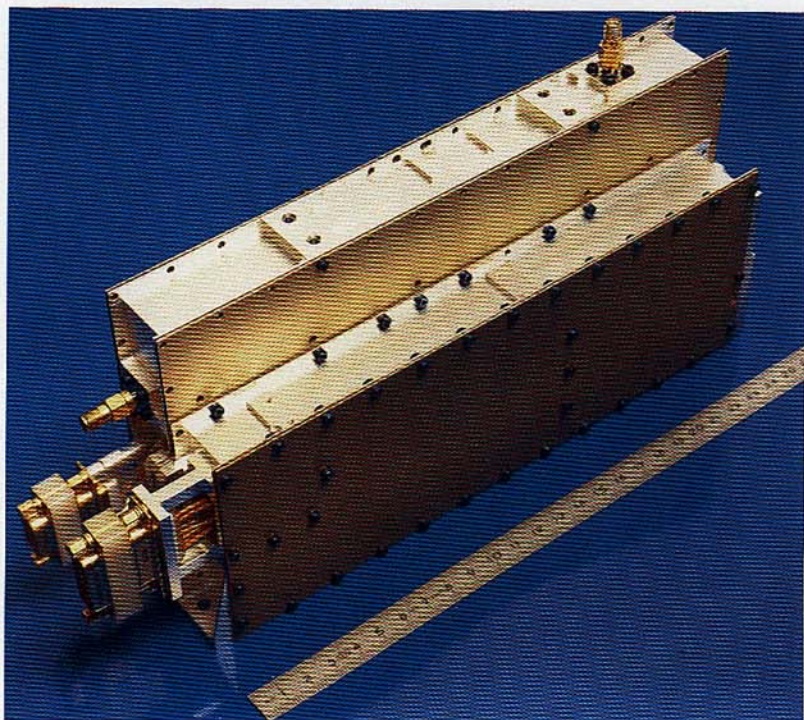
- seis canales en la banda de 14/12 GHz para cobertura de Francia metropolitana
- cuatro canales en 6/4 GHz para cubrir Francia y territorios de ultramar
- dos canales en 8/7 GHz para cobertura mundial.

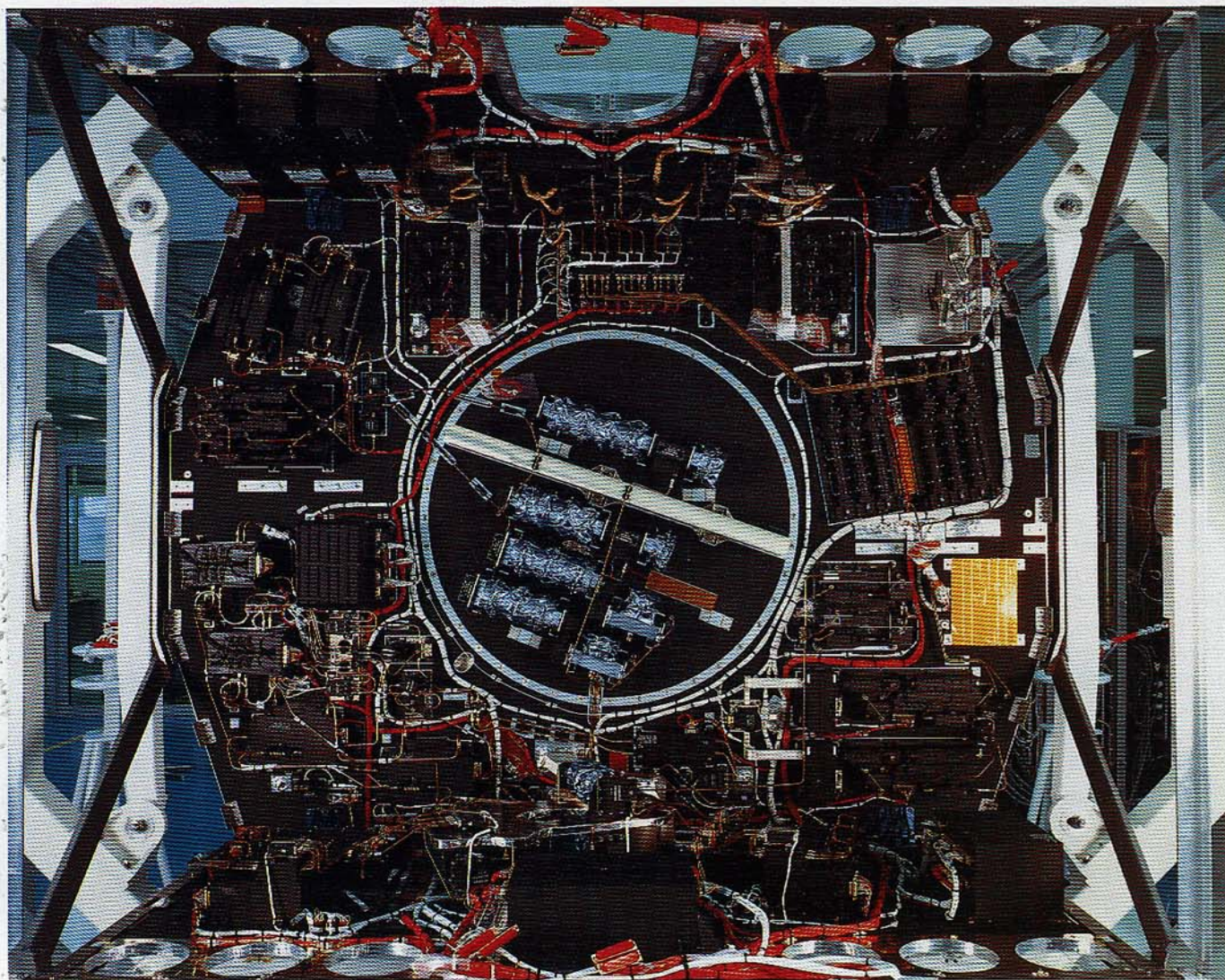
El uso de tres bandas de frecuencia, que exige tres bocinas y tres reflectores diferentes, convierte la compatibilidad radioeléctrica a bordo en tarea ardua pero que se ha sabido llevar a buen término.

### Evolución de los satélites de telecomunicación

Hoy en día la mayoría de los satélites de telecomunicación transmiten canales no

Receptor para el satélite Inmarsat.





**Carga útil del segundo modelo de vuelo de Telecom 1.**

multiplexados y canales de televisión en conjunción con grandes estaciones terrestres. Sin embargo, los recientes avances tecnológicos abren paso a nuevas aplicaciones en las que estaciones pequeñas, fijas o móviles, transmiten con baja capacidad señales compuestas de sonido, vídeo y datos.

Los actuales repetidores transparentes (que no procesan la información a bordo del satélite) se ciñen a regenerar la señal portadora de RF. Los modos de acceso son básicamente AMDF (acceso múltiple por distribución de frecuencia) y AMDT (acceso múltiple por distribución en el tiempo). Aunque se eleve al máximo el número de satélites en la órbita geostacionaria y se apliquen técnicas avanzadas de reutilización de frecuencias y compresión de datos, no se obtendrá capacidad de transmisión suficiente para atender el crecimiento previsto de la demanda, sobre todo para satélites nacionales que operen en 6/4 GHz y 14/12 GHz. Como el ciclo de diseño y fabricación de un sistema espacial de nueva

generación es de siete a ocho años, los sistemas que se diseñen ahora deben ser capaces de atender la demanda esperada de 1995 en adelante.

Los sistemas de satélites futuros deben tener la versatilidad necesaria para asignar los recursos de forma flexible de acuerdo con las necesidades de diferentes usuarios. Esto obliga a utilizar tecnología digital, que no distingue entre los distintos tipos de servicio (voz, imagen, datos).

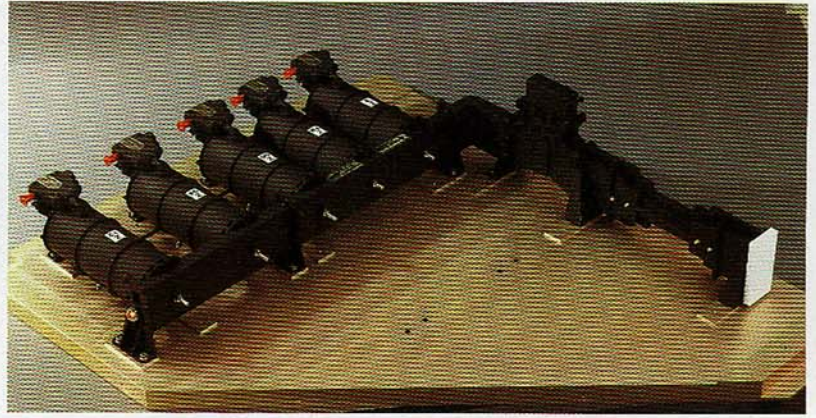
### **Repetidor de satélite para el nuevo servicio fijo**

Los nuevos repetidores de satélite de telecomunicación utilizarán frecuencias más altas (30 GHz ascendente y 20 GHz descendente) que permiten multiplicar por 200 la capacidad de transmisión y así alcanzar velocidades de hasta 10 Gbit/s. Al mismo tiempo eliminarán las limitaciones de los repetidores actuales, como falta de

linealidad en las secciones de canal y disipaciones en filtros y multiplexor de salida.

Los nuevos repetidores asegurarán una mayor flexibilidad de enlace al poder reconfigurar las zonas de cobertura de la antena y procesar las señales a bordo (conmutación en banda base y regeneración de señal). Este desarrollo mejorará notablemente la reutilización de frecuencias.

Finalmente, los repetidores de la próxima generación utilizarán plenamente las nuevas tecnologías que aparecen ahora: antenas desplegables, elementos activos de equipo con microelectrónica, filtros de resonadores dieléctricos.



Multiplexor de 5 canales para el satélite Intelsat VI.

### Reconfiguración de la cobertura de la antena

Las frecuencias asignadas pueden reutilizarse aprovechando las polarizaciones ortogonales y recurriendo a la diversidad geográfica (haces de anchura inferior a  $0,4^\circ$ ). En un sistema nacional, esto permite reutilizar hasta seis veces la misma gama de frecuencia, ya que cada haz estrecho da una cobertura reducida (300 km de diámetro). Para obtener cobertura regional se emplean haces múltiples (p. ej., 20 haces estrechos) o haces de barrido (seis, por ejemplo). Las redes activas de antenas pueden generar múltiples haces orientables, y son por ello muy adecuadas para esta función.

### Proceso de señal a bordo

Sólo puede hacerse proceso de señal a bordo si se demodula y se remodula la señal de RF en el repetidor, que deja entonces de ser transparente. Con ello es posible regenerar la señal a bordo y optimizar los enlaces en ambos sentidos, así como realizar conmutación en banda base para mejorar en gran medida la versatilidad.

Los usuarios con pequeñas estaciones terrenas suelen utilizar el modo de acceso SCPC (un solo canal por portadora). Sin embargo para el satélite resulta más eficaz transmitir en modo AMDT. La conversión AMDF-AMDT a bordo exige demodular y modular de nuevo.

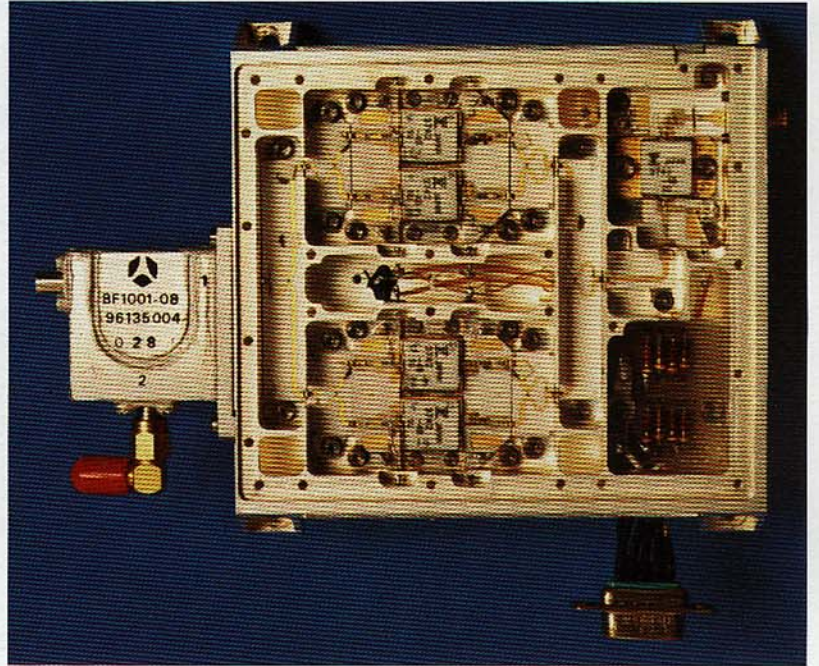
La integración del repetidor del satélite con la red terrena requiere adaptar las señales digitales mediante conversión de velocidades binarias y direccionarlas a nivel de banda base (AMDT con asignación por demanda). La conmutación tiende a repartirse entre el segmento terreno y el espacial. En consecuencia, el repetidor del satélite ya no es exclusivamente un retransmisor.

La decodificación y codificación adaptativas posibilitan la corrección de errores, y por tanto el mantenimiento de una baja tasa

de errores de bit y la reducción del bloqueo al mínimo.

Los enlaces con estaciones terrenas de un país se establecen mediante un procedimiento secuencial que proporciona una operación flexible. Cada estación puede transmitir a cualquier otra a través del satélite, en el modo AMDT. El repetidor demodula y almacena la información digital recibida por el haz de barrido desde todas las estaciones terrestres, tras lo cual el ordenador de a bordo agrupa la información recibida en paquetes AMDT destinados a una estación específica. Esta información modula a una portadora de RF única para establecer enlace con dicha estación.

Las conexiones se van estableciendo secuencialmente con todas las estaciones dentro de la zona de cobertura instantánea del satélite. El proceso se repite sucesivamente para cada una de las zonas que va



Amplificador de potencia de estado sólido de microondas.

cubriendo el haz. La utilización de una sola portadora de RF simplifica mucho la estación receptora.

Los satélites repetidores futuros deberán, por tanto, ser capaces de realizar gran número de funciones: recepción, demultiplexación, demodulación, almacenamiento de datos, decodificación (en caso necesario), encaminamiento, formateo, codificación (cuando convenga), modulación y transmisión. Para lograr esto se requiere desarrollar una gama de nuevos equipos y subsistemas:

- redes de antenas y circuitos de microondas asociados
- amplificadores de bajo ruido a 30 GHz
- amplificadores de potencia de estado sólido para microondas
- ordenadores de a bordo
- unidad de conmutación
- demoduladores multiservicio (portadoras SCPC y multiplexores de división en el tiempo de velocidad binaria variable).

Las nuevas tecnologías para equipos activos (circuitos de microelectrónica) y equipos pasivos (filtros de resonadores dieléctricos) mejoran apreciablemente la distribución de masa, el consumo de energía y el coste, todos ellos parámetros críticos de la carga útil de un satélite de telecomunicaciones.

Estudios y desarrollos ya emprendidos en Alcatel Espace contribuirán a asegurar que la próxima generación de cargas útiles permanezcan competitivas en capacidad, prestaciones y coste.

### **Repetidor de satélite para servicios móviles**

Para asegurar una cobertura mundial (casi hemisférica) los enlaces ascendentes desde estaciones terrenas fijas usan la banda de 6 GHz mientras que los descendentes se sitúan en la banda de 4 GHz. Sin embargo, los enlaces entre el satélite y estaciones móviles, en barcos o aeronaves, utilizan las bandas de 1,6 GHz y 1,5 GHz para el enlace ascendente y descendente, respectivamente. En la banda de 1,5 GHz, se logra la cobertura total y los haces estrechos de transmisión y recepción utilizando una red optimizada de antenas de transmisión.

La utilización de haces estrechos y bien aislados (20 dB) (once haces de 6°, dos de ellos orientables) permite la reutilización de frecuencias entre Europa y el Este de los Estados Unidos, así como construir peque-

ñas estaciones de potencia de transmisión reducida y antenas de poco diámetro, instalables sobre vehículos, cuyas prestaciones técnicas varían considerablemente según la aplicación.

El repetidor es transparente porque el modo de acceso no sincronizado monocal (SCPC), así como los tipos de modulación en frecuencia (MF) o por desplazamiento de fase cuadrivalente (MDP4) utilizados en las estaciones móviles, requerirían demoduladores complicados a bordo. La conmutación a bordo se efectúa a nivel de frecuencia intermedia en el enlace del satélite hacia el móvil. El repetidor puede encaminar simultáneamente 290 comunicaciones hacia estaciones móviles y 420 en sentido inverso. El tráfico se distribuye de manera flexible entre los haces.

El programa de estudio ARAMIS acometido por Alcatel Espace tiene el objetivo de definir la especificación técnica de una nueva generación de repetidores de telecomunicación para utilizar con estaciones móviles.

### **Repetidor para satélites de difusión de televisión**

Los repetidores de satélite pueden utilizarse de dos formas para la difusión de programas de televisión. Actualmente el satélite suele transmitir a una estación terrena fija equipada con antena receptora grande, desde la cual los programas se distribuyen por la red terrestre de cable; es un caso particular de servicio fijo de telecomunicación. Sin embargo, el perfeccionamiento de las tecnologías de antenas y repetidores hace factible la difusión directa de programas de televisión desde los satélites a pequeñas estaciones receptoras. Este método es particularmente adecuado para las regiones de población dispersa, en las que el coste de instalación de sistemas de distribución por cable sería prohibitivo.

El segmento espacial de los sistemas de difusión directa de televisión por satélite se desarrollará en tres direcciones principales. Primero, ampliando la cobertura de un programa más allá de los tradicionales límites nacionales, con solapes controlados. Segundo, introduciendo la difusión de televisión de alta definición según las normas D2-MAC. En tercer lugar, reduciendo considerablemente el coste de las estaciones receptoras privadas.

Para alcanzar estos objetivos los repetidores futuros necesitarán una antena que pueda dar cobertura a varios países desde la posición orbital asignada. También deberán ser capaces de difundir un gran número de canales con una potencia isotropa

**Receptor-limitador a 8/7 GHz.**



radiada equivalente por canal superior a 56 dBW, lo que ofrece el mejor compromiso entre factibilidad técnica a bordo y el coste de las estaciones receptoras privadas para televisión de alta definición.

El programa de desarrollo en Alcatel Espace para los sistemas de la segunda generación contribuye a la evolución de los satélites de difusión directa de televisión TDF y TVSAT.

### **Repetidor para telecomunicaciones estatales y militares**

La utilización de frecuencias más altas (44 GHz ascendente y 20 GHz descendente) permite conseguir haces de antena muy estrechos que dan una mejor protección contra interferencias. Al mismo tiempo, la mayor anchura de banda posibilita el uso de técnicas de ensanchamiento de espectro y salto de frecuencias para dificultar la interceptación y la interferencia intencionada. Además, el haz de la red activa de antenas puede ser conformado de manera que el nulo del diagrama de radiación se oriente en dirección de la fuente perturbadora.

Los equipos para aplicaciones militares deben ser insensibles a los impulsos de RF y a los altos niveles de radiación producidos por explosiones nucleares. Asimismo los circuitos del ordenador de a bordo deben tolerar fallos en los semiconductores.

Después de la colocación de dos satélites Telecom 1 en órbita, Alcatel Espace continúa el desarrollo de un sistema de telecomunicación por satélite para comunicaciones estatales y militares inscrito en el programa SYRACUSE.

### **Conclusiones**

Los futuros desarrollos de sistemas de telecomunicación por satélite deben aumentar su competitividad y reducir el coste de explotación por canal. La principal contribución a esta reducción de coste provendrá del segmento terreno, donde se

multiplicarán las pequeñas estaciones de bajo coste. Estas estaciones serán relativamente sencillas ya que su perfeccionamiento aumentaría su complejidad, y por consiguiente su coste, lo que les restaría competitividad.

El uso de frecuencias más elevadas y la integración de la conmutación y el proceso de señal en el segmento espacial ayudará a simplificar las estaciones terrenas. Aunque estos cambios mantendrán un elevado nivel de costes en el segmento espacial, tales costes vendrán sobradamente compensados por los ahorros en el segmento terreno, muy disperso.

Veinte años atrás, la mayoría del equipamiento complejo de los sistemas espaciales se ubicaba en las estaciones terrenas, y ello era debido a las limitaciones técnicas y tecnológicas del segmento espacial y al pequeño número de tales estaciones. Hace unos diez años la tendencia se invirtió al crecer el número de estaciones terrenas y aparecer la necesidad de conexión directa con la red terrestre. De este modo se mantendrá la competitividad de los sistemas de telecomunicación por satélite frente a las redes de fibra óptica, y se reforzará el carácter complementario entre los sistemas de satélite y de cable.

El futuro de los sistemas de telecomunicación espacial es brillante, ya que las previsiones de mercado alcanzan 10.000 millones de dólares al final de este siglo. A través de sus actuales programas de estudio y desarrollo para Eutelsat II y Telecom 2, Alcatel Espace aporta una contribución eficaz para lograr tal objetivo.

**Jacques Beaucher** nació cerca de París en 1930, y se graduó en ingeniería electrónica en 1951. Trabajó en el laboratorio de investigación electrónica de la Comisión de Energía Nuclear francesa hasta 1964, dedicado a aplicaciones militares. Desde entonces hasta 1974 fue responsable del desarrollo de equipos de energía solar en el Centre National d'Etudes Spatiales, tras lo cual entró en Electronique Marcel Dassault para trabajar en sistemas aerotransportados. Desde 1980 el Sr. Beaucher se dedica al equipo de sistemas de satélite dentro de Alcatel Espace.

# Nuevos receptores híbridos en naves espaciales

Se han desarrollado nuevos receptores híbridos para satélites, con masa notablemente inferior a los equipos anteriores. Su arquitectura es modular y ofrecen una serie de funciones estándar de poca complejidad, utilizables en un amplio abanico de aplicaciones espaciales sin apenas modificaciones.

**A. Cerro**  
**D. Parise**

Alcatel Espace, Toulouse, Francia

## Introducción

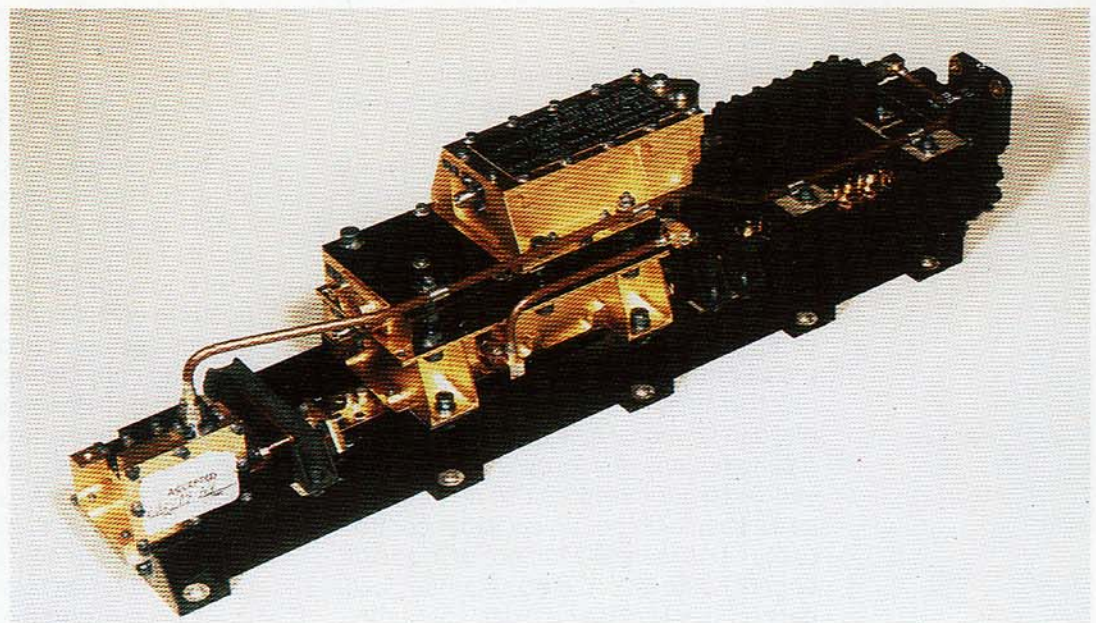
El receptor utilizado en los transpondedores de telecomunicación espacial es un elemento clave del equipo, gracias a su contribución a la relación de ganancia a temperatura de ruido del satélite. Además, proporciona la conversión de frecuencia y la mitad de la ganancia del repetidor de a bordo, por lo que su desarrollo presenta un gran interés.

Los costes de desarrollo en la industria espacial tienden a ser altos por diferentes razones. Primeramente, por tener cada proyecto exigencias particulares, las especificaciones del equipo no suelen ser estándar. En segundo lugar, hay que construir varios modelos del equipo (prototipo eléctrico de laboratorio, modelo de ingeniería, modelo de calificación) para comprobar que se han respetado las reglas de diseño propias del proyecto y las espaciales. Esto unido al reducido número de modelos desti-

nados a pruebas de vuelo, presiona fuertemente sobre los costes de desarrollo y los recurrentes, entendiéndose aquí por recurrentes los de fabricación y pruebas de cada modelo de vuelo.

Alcatel Espace se esfuerza ahora por reducir estos costes en sus receptores de nueva generación. Dado el vasto abanico de aplicaciones espaciales (Tabla 1), la consecución de unos costes de desarrollo mínimos se basa en adoptar una arquitectura común que sea utilizable en todos los proyectos con ligeros cambios solamente. Los costes recurrentes se mantienen bajos gracias a elaborar funciones estándar modulares, aplicables a numerosas versiones, así como a reducir la complejidad funcional y la necesidad de ajustes.

El segundo objetivo de la nueva generación de equipos es la reducción de masa, importante por dos razones principales. La primera es el coste de lanzamiento del satélite, en torno a los 35.000 \$ por kg. La



Conversor reductor de frecuencia del TDRSS.

**Tabla 1 – Tipos de receptores**

Bandas de frecuencia (entrada/salida)	Aplicación	Ejemplos de programas
6/4 GHz (banda C)	Transmisión de canales telefónicos o de télex	Intelsat VI Telecom 1
14/12 GHz (banda Ku)	Transmisión de datos y vídeo	Telecom 1
14/4 GHz (banda Ku)	Transmisión de datos y vídeo	Intelsat VI
18/12 GHz (banda K/Ku)	Difusión directa de televisión	TDF 1 TVSAT
8/7 GHz (banda X)	Enlaces estatales	Syracuse 1
6/1,5 GHz (banda C/L)	Comunicación con sistemas de radio móvil	Inmarsat 2
30/4 GHz ó 30/20 GHz (banda Ka/C ó banda Ka)	Transmisión de canales telefónicos o de télex; transmisión de datos y vídeo	Athos

**Tabla 2 – Reutilización de los módulos**

Banda de frecuencias (GHz)	6/4	6/1,5	14/4	14/12	18/12
Fuente de alimentación	A	A	A	A	A
Oscilador local	A	B	B	A	B
Preamplificador	A	A	D	D	E
Mezclador	A	A	A	A	A
Amplificador de frecuencia intermedia	A	C	A	D	D
Estructura del oscilador local	A	A	A	A	A
Estructura de RF	A	A*	A*	A*	A*

A: receptor de 6/4 GHz tomado como referencia  
 B: oscilador local + multiplicador  
 C: amplificador específico para 1,5 GHz  
 D: amplificador específico para 14 GHz y 12 GHz  
 E: amplificador específico para 18 GHz  
 \*: con ligeros desplazamientos de los orificios de fijación

segunda, que el uso de un equipo más pequeño y más ligero facilita el desarrollo de cargas útiles más sofisticadas, sin aumentar apreciablemente el tamaño y la masa del satélite.

Un receptor espacial convencional tiene alrededor de 2 kg de masa, mientras que la del nuevo tipo debe reducirse a la mitad, sólo 1 kg. Esto representa un ahorro importante, ya que puede haber hasta 20 receptores a bordo del satélite. Para alcanzar este objetivo, ante todo se ha reducido la complejidad funcional aplicando conceptos de diseño nuevos. Así, el oscilador local convencional por multiplicación de frecuencia se ha sustituido por un oscilador controlado por tensión, estabilizado por un bucle de enganche de fase. Como segundo paso, para reducir la masa se están aplicando

nuevas tecnologías, calificadas para el espacio. Valga como ejemplo el uso de circuitos híbridos de pastilla abierta.

Para asegurar el cumplimiento de los dos principales objetivos se realizan análisis de coste y de masa durante la fase de desarrollo, con el fin de alcanzar un compromiso óptimo entre las soluciones posibles.

### Estudio del receptor

Se ha acometido el estudio de esta nueva familia de receptores a la luz de nuevos conceptos y con nuevas y precisas finalidades, entre ellas la posibilidad de reutilizar los módulos para varias aplicaciones. Por otro lado se han fijado los objetivos en cuanto al coste y la masa del nuevo receptor.

Dicho estudio se inició con dos tareas conjuntas. La primera consistió en el análisis de valor del receptor de 6/4 GHz, tomando como referencia de coste el receptor de la generación anterior. La segunda fue un análisis de los costes no recurrentes, con el fin de asegurar que las soluciones técnicas elegidas redujeran notablemente los costes de desarrollo. Tales reducciones de costes son aplicables a receptores tan diferentes como el de 14/12 GHz y el de 6/4 GHz, así como a dos receptores que trabajen en la misma banda pero posean características ligeramente diferentes. Por ejemplo, puede aumentarse la ganancia de toda una cadena de amplificación o mejorar la linealidad del receptor añadiendo un potente amplificador de salida, sin modificación alguna del chasis.

Los estudios sobre los módulos en curso de desarrollo apuntan también a conseguir que sea posible utilizarlos en otros tipos de receptores. Así, la cadena amplificadora de 4 GHz podría formar parte de un receptor de 6/4 GHz o de uno de 14/4 GHz. De forma similar, el mezclador podría fácilmente adaptarse a una extensa gama de receptores (Tabla 2). Otros elementos susceptibles de reutilización son el oscilador local, de fácil adaptación eléctrica, y la fuente de alimentación, adecuada para todo tipo de receptores.

El primer paso consistió en una descomposición en funciones con el fin de determinar sus costes individuales (Tabla 3), tomando como referencia el receptor de 6/4 GHz del satélite Intelsat VI para identificar las funciones de alto coste. Seguidamente el análisis pasó a considerar los requisitos técnicos para los futuros receptores, especialmente masa, volumen, consumo, factor de ruido y la linealidad, todo ello contando con las tecnologías más recientes y con las que pronto estarán disponibles.

**Tabla 3 – Reparto del coste por funciones**

Análisis funcional	Reparto del coste
F1 Generar las tensiones de alimentación	14%
F2 Filtrar la señal de entrada	3%
F3 Amplificar el ancho de banda útil	30%
F4 Transponer la banda de entrada a la de salida	30%
F5 Relacionarse con el OBDH* (TM/TC)	5%
F6 Resistir las condiciones ambientales	15%
F7 No polucionar el ambiente	2%
F8 Ser transportable	1%

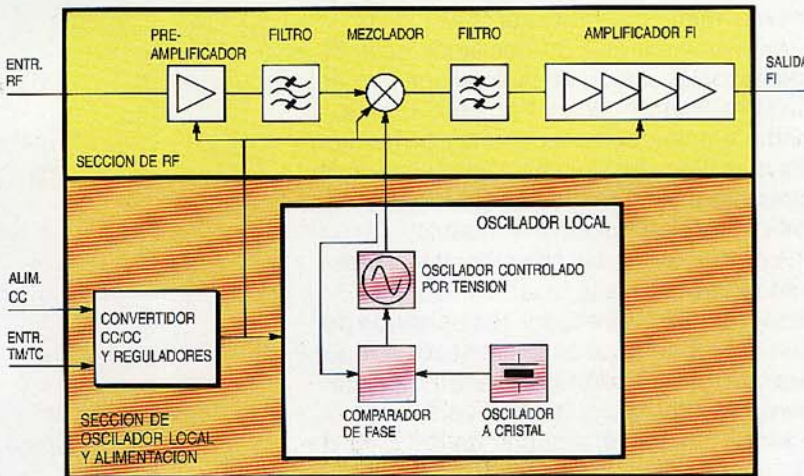
\* OBDH: tratamiento de datos a bordo (on-board data handling)

La juiciosa aplicación de nuevas tecnologías para híbridos, calificadas para el espacio, así como el desarrollo de una nueva arquitectura, han dado como resultado un receptor de alto rendimiento que cumple todos los requisitos de calidad exigibles a un sistema transportado en naves espaciales.

**Receptor típico**

Los receptores del tipo señalado en la tabla 2 se componen de cinco partes principales (Fig. 1): preamplificador, mezclador, cadena amplificadora de transmisión, oscilador local y fuente de alimentación. El preamplificador debe combinar un buen factor de ruido con una ganancia suficiente para enmascarar cualquier pérdida y ruido que introduzcan los módulos siguientes, mientras que la cadena amplificadora de transmisión debe compensar las variaciones de la ganancia con la temperatura y al mismo tiempo ofrecer una buena linealidad. Es importante que el mezclador, encargado de la conversión de frecuencia entre las bandas de recepción y transmisión, tenga

**Figura 1**  
**Arquitectura del receptor de nave espacial.**  
FI – frecuencia intermedia  
RF – radiofrecuencia  
TC – telemando  
TM – telemetria



las mínimas pérdidas de inserción posibles (alrededor de 10 dB).

Para generar la conversión de frecuencia se requiere un oscilador local de alta estabilidad, típicamente de  $\pm 1$  a  $\pm 5 \times 10^{-6}$  en una vida útil de 10 años. Esta subunidad, que toma un oscilador a cristal como referencia, puede enclavarse en fase cual indica la figura 1, o emplear un multiplicador, como el receptor de 6/4 GHz del Intelsat VI en el que la frecuencia del cristal (61,8 MHz) se multiplica por 36 para obtener la frecuencia de 2,2 GHz requerida por el oscilador local.

Finalmente, la fuente de alimentación genera, a partir de la tensión no regulada del bus de a bordo (valor típico, de 24 V a 52 V), las tensiones de funcionamiento. Según la aplicación, dichas tensiones podrán ser reguladas y filtradas, o sólo filtradas. El consumo del receptor entero suele estar entre 5 y 15 W.

**Soluciones técnicas adoptadas**

Durante el análisis de valor, surgieron varias ideas clave entre las soluciones técnicas y tecnológicas examinadas, principalmente relativas a la arquitectura. Con base en tales ideas se ha desarrollado una arquitectura (Fig. 1) que podría utilizarse para construir todos los receptores enumerados en la tabla 1.

Se han señalado semejanzas importantes entre todas las fuentes de alimentación y entre todos los osciladores locales. En consecuencia, se desarrolló un chasis único para estas dos subunidades, cada una de ellas diseñada para una fácil adaptación a todos los tipos de receptor posibles. Además, el diseño permite que todas las partes "ajustables" de estas subunidades sean accesibles en el receptor ensamblado.

Todos los módulos de RF están integrados en otro chasis, y también ahí puede accederse a todas las secciones que requieran ajuste en el receptor ensamblado, lo cual no era posible en los receptores anteriores, construidos sobre tres chasis rígidamente superpuestos.

La fuente de alimentación, la cual utiliza modulación de impulsos en anchura para generar las tensiones de +12 V, +6 V, y -6 V que necesita el receptor, consiste en una placa de circuito impreso de poliimida con componentes de montaje superficial. Las tres tensiones están reguladas mediante circuitos híbridos. Un mismo circuito puede generar un amplio margen de tensiones positivas y negativas. Además de su relativa sencillez de diseño, la fuente de alimentación es fácilmente adaptable a diferentes necesidades sin más que añadir o suprimir unos pocos componentes.



El oscilador local utiliza el principio de la generación directa de frecuencia, asociado a un bucle de enganche de fase; el elemento principal es el oscilador de cavidad resonante enclavado al de referencia de cuarzo. Esta técnica permite variar la frecuencia del oscilador dentro de una octava de anchura de banda sin más que cambiar el tamaño de la cavidad y sustituir el cristal de cuarzo, con lo cual no hay que desarrollar multiplicadores y filtros nuevos.

El oscilador controlado por tensión está construido sobre un sustrato cerámico. El circuito del bucle de enganche de fase, incluido el oscilador a cristal, va montado en una placa de circuito impreso de poliimida con componentes de montaje superficial. Para las aplicaciones que requieran estabilidad de frecuencia aún mayor (mejor que  $\pm 5 \times 10^{-6}$  en 10 años), el cristal de cuarzo podría alojarse en un horno e incluirse un circuito de actualización de frecuencia para cambiar la frecuencia del oscilador por telemando.

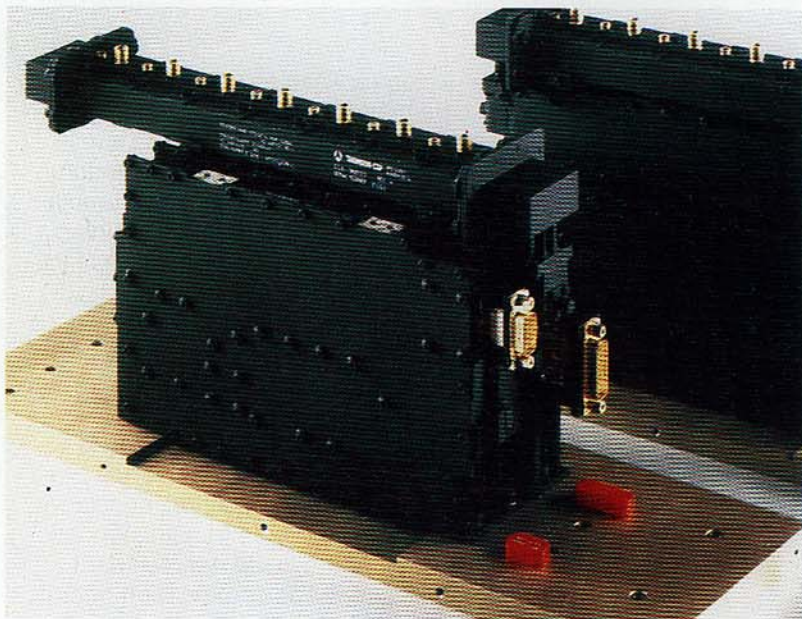
Un mezclador de equilibrado doble, elegido por su alta selectividad (suele exigirse mejorar los  $-60$  dBc), es el núcleo de la sección de RF del receptor. Construido a base de cuatro diodos de "terminales en viga" (beam-lead), este mezclador utiliza en el diseño líneas finas y líneas de transmisión tipo coplanar. Su anchura de banda basta para satisfacer las necesidades de cualquier receptor indicado en la tabla 1. Se aplica a los diodos una polarización de CC para mejorar la estabilidad de las pérdidas de conversión con respecto a la potencia entregada por el oscilador local. Para seleccionar la banda de entrada y de salida sólo hay que cambiar los filtros correspondientes (4 GHz, 6 GHz, 12 GHz, 14 GHz y 18 GHz).

Análogamente, la familia de amplificadores de bajo ruido sobre sustrato cerámico de capa fina puede satisfacer las exigencias de cualquier receptor. Estos amplificadores utilizan la última tecnología en semiconductores HEMT (transistores de alta movilidad de electrones) para conseguir una ganancia de 20 a 30 dB con un factor de ruido muy bajo: suele exigirse 1,8 dB en 6 GHz y 2,5 dB en 14 GHz.

La cadena amplificadora de salida utiliza la tecnología de pastilla abierta para reducir el tamaño, tecnología que también da cierta flexibilidad por la gran reducción de elementos parásitos y es especialmente idónea para diseños de banda ancha. Los módulos que la constituyen utilizan dos etapas equilibradas de manera que puedan conectarse en cascada sin problemas de adaptación y sin necesidad de aisladores que originen problemas mecánicos por la fragilidad de los sustratos de ferrita. Esta cadena permite ajustar la ganancia total del receptor (hasta

los 70 dB), por medio del atenuador de diodos PIN ( $\pm 7$  dB por diodo).

El módulo del amplificador de salida compensa las variaciones de ganancia del receptor con la temperatura. Su ganancia también puede ajustarse por telemando, con el fin de compensar las variaciones de ganancia del repetidor a lo largo de la vida del satélite. La sección pasiva del amplificador puede ajustarse para eliminar las variaciones de ganancia dentro de la banda de paso, producidas por desadaptaciones del módulo después de haber integrado el



Receptor de 6/4 GHz, del Telecom 1.

receptor entero. Típicamente, el rizado de la ganancia no debe exceder los 0,5 dB en una banda de 500 MHz.

La tabla 2 indica qué subunidades deben modificarse para cumplir las especificaciones de cada tipo de receptor. Como se puede observar, la fuente de alimentación y el mezclador de banda ancha son componentes totalmente estándar, que pueden utilizarse en todos los receptores. Análogamente, tampoco cambia el chasis de la fuente de alimentación/oscilador local. El oscilador local requiere sólo el añadido de un sencillo multiplicador ( $\times 2$  ó  $\times 3$ ) para poder emplearse en receptores de frecuencia más elevada, y el chasis de RF necesita simplemente ligeros desplazamientos en los orificios de fijación del módulo.

En conclusión, las soluciones técnicas escogidas han dado lugar a un equipo receptor que cubre todos los objetivos de diseño y, en particular, los relativos a reducción de masa, posibilidad de reutilizar los componentes y arquitectura versátil. La figura 2 muestra el receptor de 6/4 GHz de la nueva generación con sus dos chasis:

uno para la cadena RF y otro para el oscilador local y la alimentación.

### Soluciones tecnológicas

Todos los módulos nuevos emplean tecnologías calificadas o que pronto van a serlo. En particular, se utilizan circuitos híbridos de pastilla abierta para frecuencias bajas y de microondas. Estas dos tecnologías satisfacen las exigencias de alta fiabilidad, masa reducida y pequeño tamaño que son primordiales en las aplicaciones espaciales, y sirven para realizar funciones complejas en forma de conjunto reutilizable en diferentes tipos de equipos.

Los circuitos híbridos de pastilla abierta para bajas frecuencias se construyen con técnicas de multicapa sobre sustrato de alúmina. Para la fabricación de líneas de conducción y componentes pasivos (resistencias, condensadores) se emplea la impresión de película gruesa. Se utilizan hilos de unión de oro, y los circuitos híbridos van montados en cápsulas selladas herméticamente. Las pastillas activas se adhieren al sustrato mediante resina epoxídica conductora. Se emplea esta tecnología para el regulador híbrido y el convertidor CC/CC de la alimentación.

En 1987 fue calificada con éxito esta tecnología para aplicaciones espaciales, en las instalaciones de Alcatel Espace. El procedimiento de calificación siguió fielmente la especificación PSS 01-606 de la Agencia Europea del Espacio.

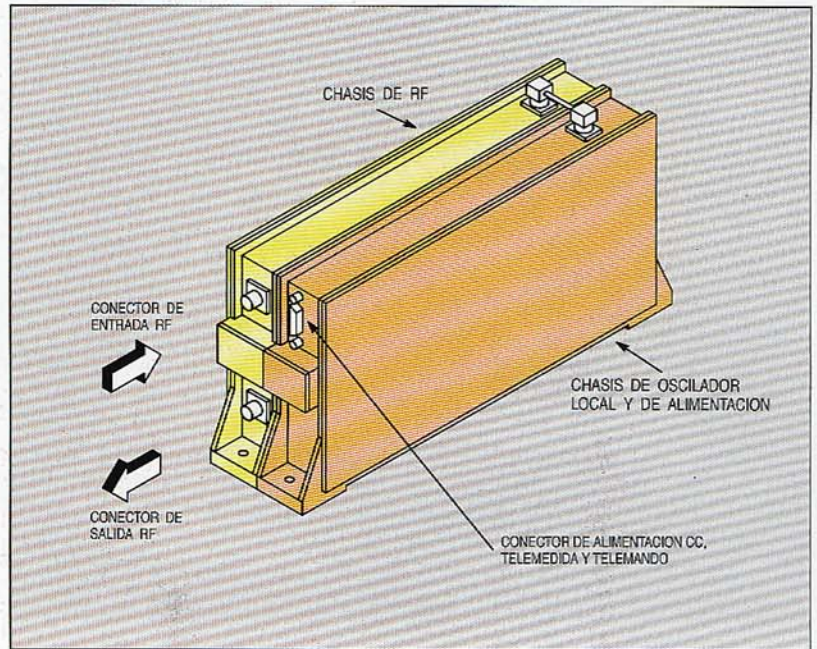
La tecnología de pastilla abierta empleada en aplicaciones de microondas es similar, salvo en que las pistas conductoras deben realizarse por ataque químico sobre película fina para conseguir la elevada precisión requerida. Esta tecnología se utiliza en el preamplificador, mezclador y amplificador de salida. En la actualidad Alcatel Espace está llevando a cabo la calificación para el espacio según dicho procedimiento PSS 01-606.

Una tercera tecnología de receptores, ya calificada para aplicaciones espaciales, consiste en el uso de componentes de montaje superficial sobre circuito impreso de poliimida. Se utiliza en el receptor para las funciones de baja frecuencia (oscilador a cristal, fuente de alimentación y circuitos de polarización del amplificador de RF).

Todas estas tecnologías se utilizarán en un futuro próximo en programas como el ERS, Eutelsat 2 y Telecom 2.

### Conclusiones

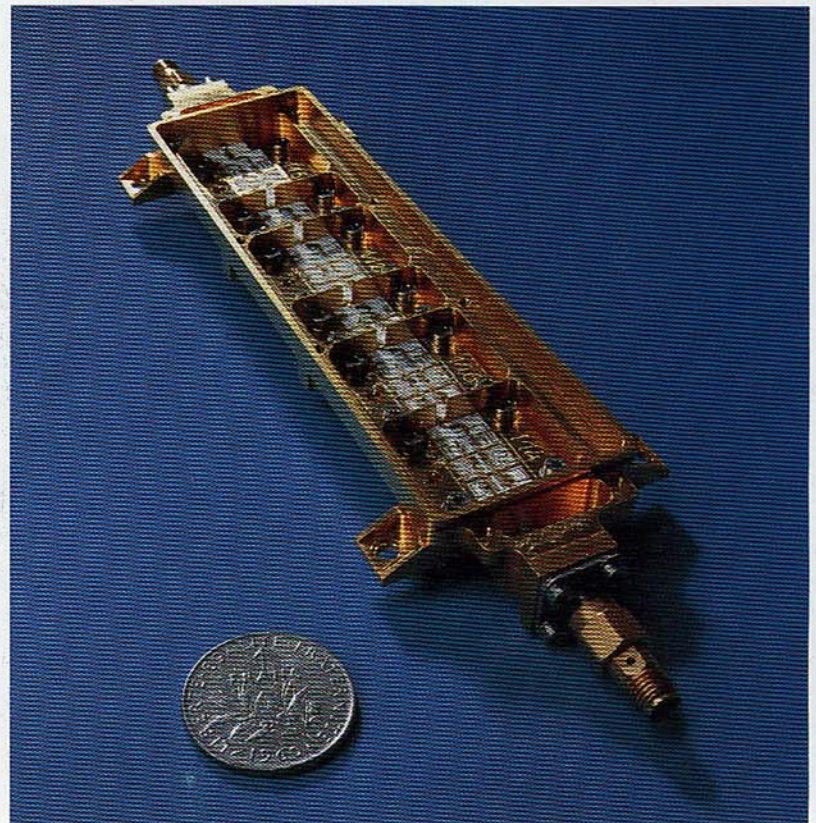
La nueva familia de receptores desarrollada por Alcatel Espace, reduce al mínimo los

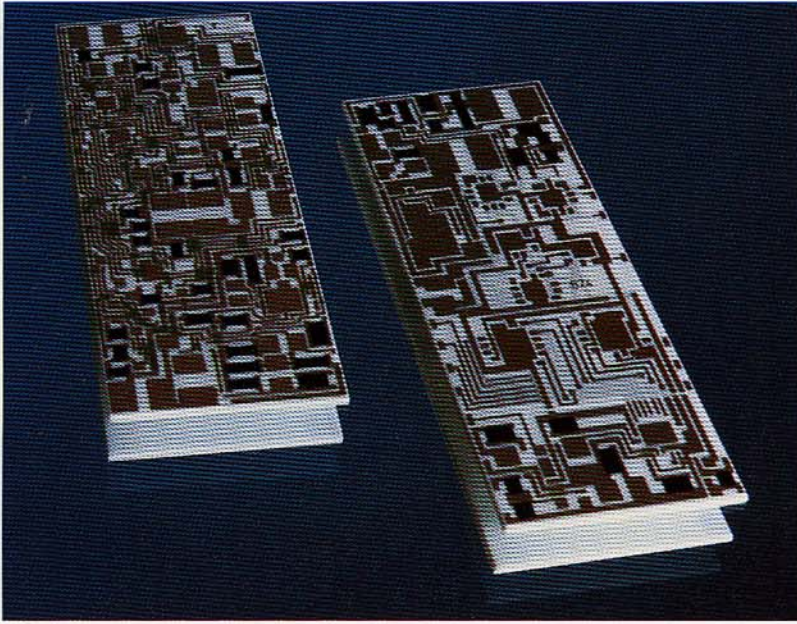


**Figura 2**  
Receptor de 6/4 GHz  
de nueva generación.

costes recurrentes y acorta de un modo notable la planificación del desarrollo. Ello se debe a la flexibilidad de su arquitectura, utilizable para cumplir especificaciones no estándar en una vasta gama de aplicaciones, tales como la transmisión de tráfico de télex y telefónico en la banda C, las de datos y vídeo en la banda Ku, los enlaces estatales en la banda X, las comunicaciones con sistemas de radio móvil en la banda L y

**Cadena híbrida RF de nueva generación en 12 GHz, para el Eutelsat II.**





Sustratos cerámicos para circuitos híbridos de baja frecuencia.

los sistemas de difusión directa de televisión por satélite. El uso de funciones estándar y la menor necesidad de ajustes y pruebas, han conseguido costes recurrentes muy bajos.

Esta nueva familia de receptores se utilizará por primera vez en los satélites Telecom 2 (versiones de 6/4 GHz y 14/12 GHz), cuyo lanzamiento está programado para 1991. Dichos receptores se presentan también como atractiva opción

para el proyecto de Intelsat VII, mientras que la versión de 18/12 GHz es adecuada para equipar los futuros satélites de difusión directa de televisión.

El receptor de la banda C/banda L es un fruto de los proyectos antes mencionados.

La evolución que a medio y largo plazo se prevé en el diseño de estos nuevos receptores, se centra en mejorar todavía más el factor de ruido mediante el uso de preamplificadores de ruido muy bajo, basados en la refrigeración por efecto Peltier, así como en sustituir los circuitos híbridos (como los amplificadores y mezcladores) por circuitos integrados monolíticos de arseniuro de galio para microondas.

**Albert Cerro** nació en Tánger, en 1956. En 1980, tras haberse graduado en la Ecole Nationale Supérieure d'Electronique, Electrotechnique, Informatique et Hydraulique de Toulouse, se incorporó al departamento espacial y de satélites de la Thomson-CSF, que luego se convirtió en Alcatel Espace. Ha sido responsable del diseño, desarrollo y fabricación de los receptores de los satélites Intelsat VI y Athos. Desde 1985, el Sr. Cerro se ha encargado de la gestión de productos de telecomunicación en la división de equipos de Alcatel Espace.

**Daniel Parise** nació en Francia, en 1949. Después de finalizar sus estudios en la Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, en 1973, entró en el departamento espacial y de satélites de Thomson-CSF, que luego fue Alcatel Espace. Ha tenido a su cargo el diseño y desarrollo de los equipos a bordo de naves espaciales para numerosos proyectos, incluyendo el TDRSS, Telecom 1, y el Intelsat VI. En la actualidad, el Sr. Parise es responsable de sistemas de microondas dentro de la Dirección Técnica de Alcatel Espace.

# Las antenas, área técnica esencial para los satélites

Las antenas de los satélites actuales son componentes importantes del sistema total, con interfaz a otros equipos de a bordo. El diseño y desarrollo de estas antenas requiere dominar la física de radiofrecuencia, así como el diseño mecánico y térmico para conseguir una estructura de las prestaciones exigidas que resista las fuertes vibraciones del lanzamiento y las rigurosas condiciones ambientales en órbita.

**B. Vidal Saint-André**

Alcatel Espace, Toulouse, Francia

## Introducción

Alcatel Espace viene produciendo antenas para satélites de comunicaciones por más de 15 años, y en todo ese tiempo ha participado en cuatro importantes programas: Telecom 1 (francés), Symphonie y TDF 1/2 (francoalemán), y Eutelsat II (europeo). Los reflectores de las antenas utilizados en todos estos programas son de "alimentación excéntrica" \*, dado que esta tecnología elimina el bloqueo \* y es más fácil de realizar. La principal evolución se ha dado en una mayor pureza de la polarización para aprovechar más la banda de frecuencia, en el uso de potencias más altas, y en la conformación y contornos del haz para aumentar la ganancia.

\* Véase glosario de términos en pág. 73.

**Tabla 1 – Aislamiento de polarización de los diferentes reflectores de "alimentador excéntrico"**

Lanzamiento		Programa
1974	[ • A	A: Symphonie, banda C/PC
1975		Polarizadores de rejilla Pobre = 16 dB
1983	[ • B	B: Telecom 1, banda Ku/PL
1984		Reflector sólido/desv. 45°
1985		Pobre = 15 dB
1988	[ • C	C: TDF1, banda Ku/PC
1989		Multialimentador/bocinas Buena > 33 dB
1990	[ • D	D: Eutelsat 2, banda Ku/PL
1991		Reflector de rejilla Buena > 36 dB

PC – polarización cruzada

PL – polarización lineal

## Pureza de la polarización

No se especificó ningún criterio de pureza de polarización para las antenas del Symphonie ni del Telecom 1, ambas con un aislamiento de polarización relativamente pobre (alrededor de 15 a 16 dB), como indica la tabla 1. La pureza de polarización es necesaria para limitar la interferencia entre dos haces de antena polarizados ortogonalmente. Esta interferencia ocurre en dos casos. Primero, en satélites de difusión directa cuyas zonas de cobertura elípticas se solapan en cierto grado (p. ej., TDF 1/2 y TVSAT). Segundo, en satélites de telecomunicaciones que usan ambas polarizaciones para reutilización de frecuencia \* en la misma zona de cobertura (p. ej., Eutelsat II).

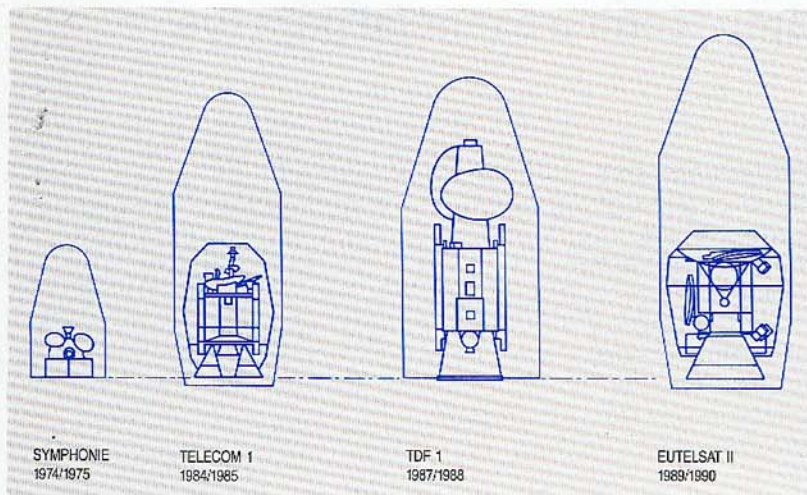
## Potencia

Las potencias máximas de RF transmitidas por cada salida de antena en estos cuatro programas de satélites son:

- Symphonie: 20 W en la banda C (6–4 GHz)
- Telecom 1: 30 W en la banda C, y 140 W en la banda Ku (14–12 GHz)
- TDF1: 800 W, ampliables a 1 kW, en la banda Ku (18–12 GHz)
- Eutelsat II: 600 W en la banda Ku, con un compromiso entre las funciones de transmisión y recepción.

## Configuración del haz

La configuración de haz más sencilla corresponde a un contorno de cobertura circular o elíptico con una conformación pseudogaussiana del haz. Otras configuraciones más elaboradas usan haces contorneados y conformados. Idealmente, un haz



**Figura 1**  
Configuraciones de lanzamiento de los vehículos espaciales.

contorneado radia una densidad de potencia constante dentro de un contorno complejo. Esta configuración, la más conveniente cuando las estaciones terrenas se distribuyen sobre una zona definida, se utiliza ahora profusamente para antenas de comunicaciones. Por el contrario, el haz conformado radia una densidad de potencia variable dentro de un contorno especifi-

cado, y resulta adecuado cuando se necesita compensar variaciones de tráfico o pérdidas de propagación sobre la zona considerada.

La evolución actual va de grandes a pequeñas zonas de cobertura y de haces elípticos a haces contorneados. Ello se aprecia en la tabla 2, que también resume las principales características de las antenas.

**Otras consideraciones**

Son importantes los interfaces del subsistema de antena con la carga útil y la estructura del satélite, y afectan por lo tanto a sus características. Los principales parámetros del segmento espacial relativos a las antenas se dan en la tabla 3, que muestra un considerable aumento de la potencia de RF (potencia radiada + pérdidas óhmicas entre el transpondedor y la antena) frente al satélite Symphonie, y cómo ha aumentado también la masa de las antenas, incluidas las partes estructurales, con respecto a la masa en órbita. En particular, la estructura de las antenas del TDF1 resulta muy pesada debido al soporte del subsistema de antena, que comprende una torre. Las diferentes configuraciones de lanzamiento del satélite se ilustran en la figura 1.

**Tabla 2 – Principales características de antenas de "alimentador excéntrico"**

Programa/frecuencia	Cobertura	Diámetro del reflector (m)	Ganancia en el EOC (dB)
Symphonie/banda C	10,8° x 14,4° (1)	0,7 x 0,45	19,5
Telecom 1/banda C	Semimundial	0,8 x 0,8	19/21 (2)
Telecom 1/banda Ku	1,04° x 1,74° (3)	1,25 x 0,8	37
Telecom 1/banda Ku	1,5° x 2,6° (3)	1,25 x 0,8	34
TDF1/banda Ku	0,98° x 2,5° (4)	2,4 x 0,9	37,7
Eutelsat 2/banda Ku	contorno de Europa	1,6 x 1,6	25/31

- (1) Medido en un contorno iso-dB – especificado = 9,3° x 14,4°
- (2) 21 dB/Francia, 19 dB/ultramar
- (3) Se debe de añadir un error de puntería del haz ± 0,16° para obtener la abertura del haz
- (4) Abertura del haz, especificada; incluido el error de puntería del haz ± 0,1°

EOC (Edge of Coverage) – borde de cobertura.

**Tabla 3 – Parámetros espaciales más importantes para los subsistemas de antena**

Vehículo espacial	Symphonie	Telecom 1	TDF 1	Eutelsat 2
Masa en el despegue (kg)	400	1150	2000	1700
Masa en órbita (kg)	230	700	1000	770
Masa de la carga útil (kg)	25	130	300	320
Masa del subsistema de antena (kg)	9 (6)*	28 (14)	110 (30)	40 (33)
Potencia primaria (W)	180	1100	3300	3000
Consumo de potencia (W)	125	700	2100	1900
Potencia de RF (W)	25	195	1000	800

\* Los números entre paréntesis se refieren a alimentadores y reflectores solamente.

**Programas de satélites y subsistemas de antena**

**Symphonie**

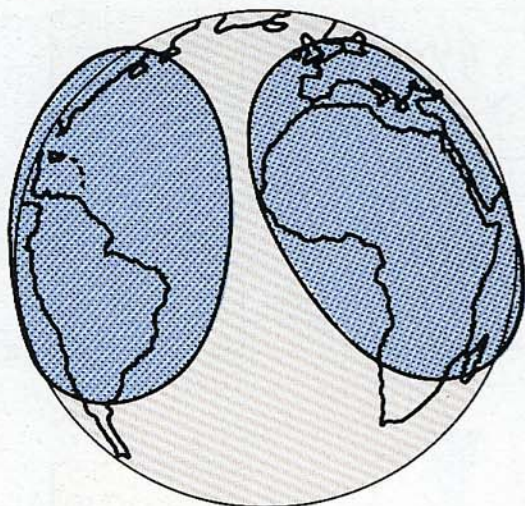
Symphonie fue un programa experimental francoalemán que implicó el lanzamiento de dos satélites, uno en diciembre de 1974 y el otro en agosto de 1975. Aunque se esperaba que sólo operarían hasta 1981, en la práctica continuaron en servicio hasta 1983.

La posición nominal en órbita geoestacionaria era de 11,5° Oeste. La figura 2 muestra la cobertura de transmisión en la banda C, o traza del haz. La realización se vió constreñida por la falta de espacio disponible en el panel norte después de montar el motor de apogeo (Fig. 3).

**Telecom 1**

Dentro de este programa francés de múltiple finalidad se lanzaron dos vehículos espaciales mediante la mitad de un cohete Ariane (SYLDA)\* en agosto de 1984 y mayo de 1985, con un tiempo de vida previsto de siete años, aunque el segundo ha dejado de funcionar a principios de 1988. A reemplazarlo ha venido un tercero, lanzado con éxito en abril de 1988. Las posiciones orbitales de los satélites son 8° y 5° Oeste; el tercer modelo de vuelo, en reserva inactiva, ocupará una posición orbital de 3° Este.

**Figura 2**  
Cobertura de transmisión del satélite Symphonie.



Cada vehículo espacial tiene una carga útil compuesta de tres partes:

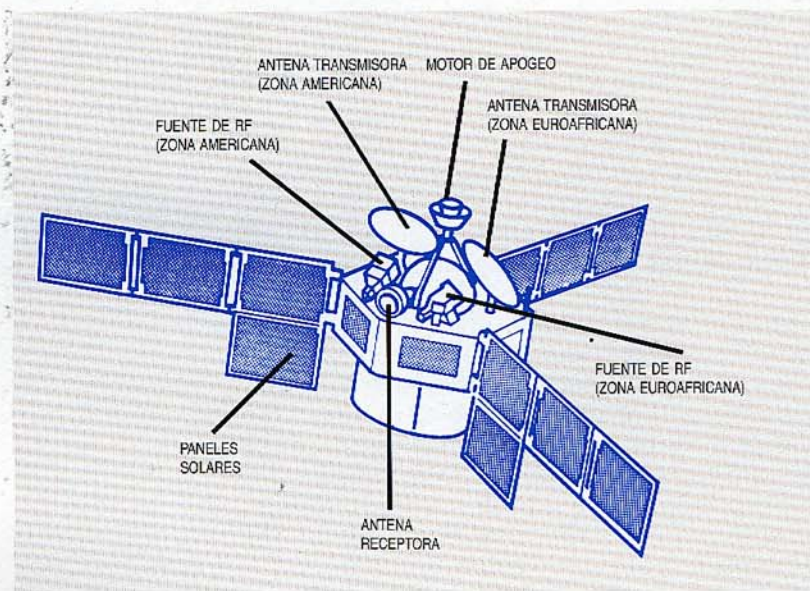
- Cuatro repetidores en la banda C para enlaces entre Francia y ultramar. Las coberturas de transmisión (Fig. 4) se llaman "semimundial" y "zonal Antillas-Guayana"; la cobertura de recepción es mundial.
- Dos repetidores en 8/7 GHz para comunicaciones militares que dan cobertura de transmisión y recepción mundial.
- Seis repetidores en la banda Ku para enlaces entre compañías. La cobertura sobre Francia es elíptica (Tabla 2).

Una importante restricción del diseño fue la estrechez de espacio entre la plataforma superior (panel orientado a tierra) del vehículo espacial y la cubierta del SYLDA. Otro factor crítico fue el acoplamiento por proximidad entre las antenas. Estas limitaciones condujeron a elegir fuentes primarias pequeñas (helicoidales en lugar de bocinas) y una configuración de sistema flexible, a base de antenas totalmente independientes.

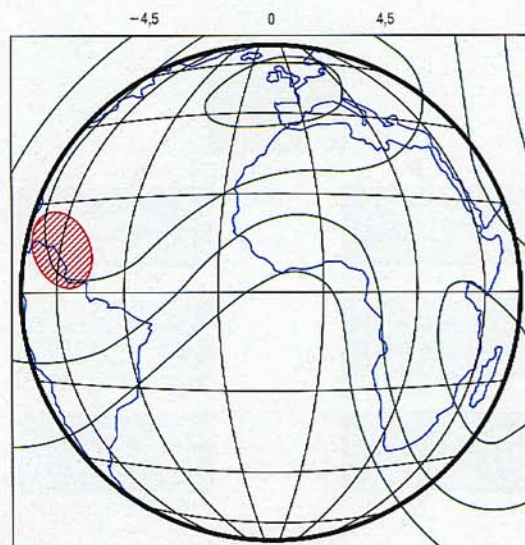
La figura 5 es un diagrama de bloques funcional del subsistema de antena que consta de seis antenas: tres bocinas de cobertura mundial y tres antenas con reflector de alimentación excéntrica. Las tres bocinas referidas trabajan en 6 GHz y 8 GHz con polarización circular dextrógira, y en 7 GHz con polarización circular levógira. El diseño de cada bocina en RF es similar al adoptado para la bocina receptora del Symphonie, salvo en que la polarización circular se consigue por medio de un terminal polarizador de guíasondas. La abertura de la bocina está protegida por una cubierta de sílice.

Se prefirió un conjunto de tres antenas reflectoras independientes a una configuración de mástil único, a causa de su mayor flexibilidad y más fácil alineación sin aumento apreciable de la masa. Se dedica una antena de reflector circular a la transmisión en la banda C, dando una cobertura "semi-mundial", mientras que dos antenas de reflector elíptico se utilizan para transmitir y recibir en la banda Ku y para la transmisión zonal "Antillas-Guayana" en la banda C.

El diseño y la tecnología del reflector y la estructura son idénticos para las tres antenas. El reflector es un emparedado cuyo interior es de malla de aluminio en forma de panal de abeja, recubierto de CFRP\* (plástico reforzado con fibra de carbono) por ambas caras. Las ondas electromagnéticas se reflejan en el CFRP que tiene unas pérdidas de reflexión menores de 0,1 dB en la banda Ku. La estructura monopieza



**Figura 3**  
Configuración del vehículo espacial para el proyecto Symphonie.



ZONAL ANTILLAS-GUAYANA

**Figura 4**  
Cobertura de transmisión del Telecom 1 en la banda C.

consiste en un soporte triangular del reflector y un soporte cónico del alimentador (mástil), ambos de CFRP.

El acoplamiento mecánico entre estructura y reflector permite la alineación\* del eje focal de este último.

### Programa TDF 1

Es parte del programa francoalemán TVSAT/TDF DBS (satélite de difusión directa). El primer satélite francés TDF1 tiene programado su lanzamiento para finales de 1988, con una duración de vida de 7,3 años (se espera que llegue a 9 años), y se situará en órbita a los 19° Oeste.

La banda de frecuencias de recepción es de 17,3 a 17,7 GHz, con una anchura del haz de 0,66° y polarización circular levógiara. La banda de frecuencias de transmisión es de 11,7 a 12,1 GHz, con un haz de apertura elíptica de 0,98° x 2,5°. La inclinación del eje mayor de la elipse de cobertura es 20° en el sentido de las agujas del reloj con relación al plano Este-Oeste, mientras que las coordenadas del punto central son 2,6° Este/45,9° Norte. Cuatro de los cinco canales, de unos 200 W cada uno, pueden transmitir simultáneamente con anchura de banda de 27 MHz y polarización circular dextrógiara.

Los condicionantes del desarrollo fueron:

- las especificaciones CAMR sobre la forma del diagrama de radiación y el nivel de los lóbulos laterales, así como las plantillas que imponga el cliente a esos mismos parámetros
- una precisión global de puntería de 0,1° con desviación típica de 3  $\sigma$ , que asegura buenos enlaces durante más del 99% del tiempo
- capacidad de modular la potencia.

El subsistema de antena se monta sobre el panel del vehículo espacial enfrentado a la Tierra. El diseño de la antena de transmisión se basa en el concepto de multialimentación, con una fuente primaria que consta de nueve elementos radiantes, nueve polarizadores, y nueve elementos T ortomodales, cuatro de ellos utilizados para detectar desviaciones por RF\*. El segundo puerto de entrada de los otros cinco T ortomodales se carga de manera que absorba la potencia residual, que de otro modo sería reemitida por el elemento radiante como polarización cruzada y degradaría la pureza de polarización.

### Eutelsat II

Este programa abarca cuatro vehículos espaciales que serán lanzados en 1989 y 1990, con duración de vida esperada de 10 años. Dos antenas reflectoras de doble

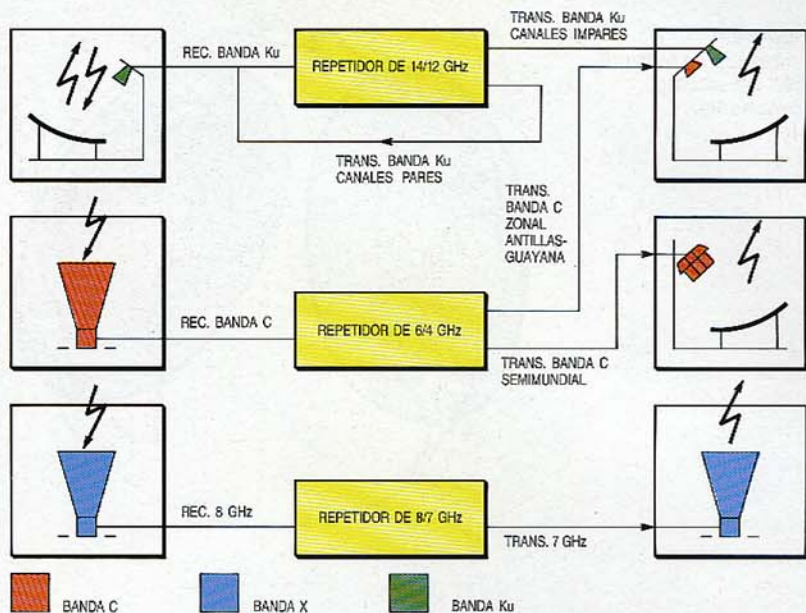


Figura 5 Diagrama funcional del subsistema de antena del Telecom 1.

rejilla\* se montan en las caras este y oeste del vehículo espacial. El subsistema de antena se describe en otra parte de este número de Comunicaciones Eléctricas<sup>1</sup>.

### Herramientas de diseño de antenas

Se utilizan herramientas de diseño en la fase de propuesta y durante las primeras fases del proyecto para demostrar que el subsistema de antena satisface las exigencias de la misión durante el tiempo de vida del satélite. Hay por tanto dos objetivos. El primero, demostrar que cada una de las antenas puede resistir los esfuerzos del lanzamiento y puesta en órbita, concretamente sin sufrir deformación permanente a consecuencia de las fuertes vibraciones, ni errores o degradaciones de puntería del haz causados por distorsión térmica. El

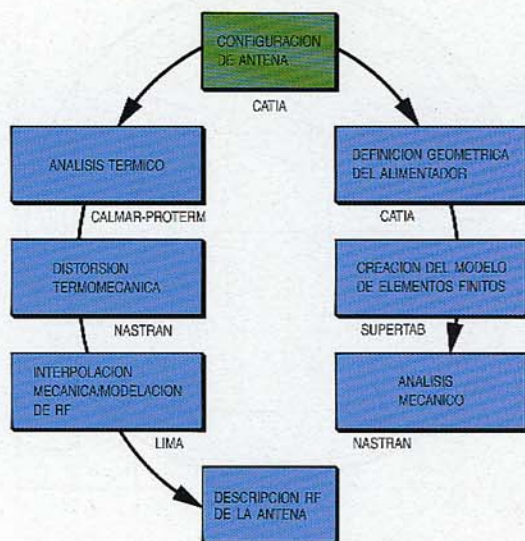


Figura 6 Estructura lógica del diseño mecánico y térmico para el desarrollo de la antena.

segundo, comprobar que cada antena alcanza sus prestaciones de RF especificadas, en particular la cobertura, ganancia, nivel de polarización cruzada, y reflexión de potencia.

La figura 6 resume las herramientas de diseño mecánico y térmico utilizadas para el desarrollo de antenas. Comenzando por la configuración de la antena y los datos de interfaz, hay un análisis que predice las características mecánicas de la antena mediante un modelo de elementos finitos.

Un análisis termoelástico realizado en paralelo identifica cualquier desplazamiento y distorsión que surja de diferencias de temperatura en la antena y su estructura. Los resultados de este análisis se toman como datos en la descripción de RF de la antena.

La figura 7 es un diagrama simplificado del análisis de RF, el cual se utiliza para predecir y optimizar el comportamiento de la antena, a partir de modelos o datos medidos.

## Tendencias

El contrato para la segunda generación de satélites de comunicaciones franceses fue otorgado al grupo conjunto Alcatel Espace-MATRA al final de 1987, estando programado el primer lanzamiento para 1992. Igual que en el sistema Telecom 1, cada vehículo espacial llevará tres cargas útiles:

- Carga útil en banda C: su cobertura semimundial se halla dispersa en una serie de haces estrechos además de una zona africana. El diámetro de apertura de la antena de multialimentador ha aumentado de 0,8 m a 2,2 m.
- Carga útil en banda X: además de la cobertura mundial, proporcionará un haz estrecho móvil por medio de una antena con reflector de apertura 0,9 m mecánicamente direccionable, más una cobertura europea utilizando una antena de multialimentador con apertura de 2,2 m.
- Carga útil en banda Ku: las nuevas especificaciones sobre reutilización de frecuencias implican que esta antena será de reflector de doble rejilla.

Los alimentadores primarios asociados se basan en refinadas tecnologías (líneas con soporte dieléctrico, divisores de potencia de doble entrada), particularmente para las complejas redes de conformación de haz y reconfigurabilidad (control en órbita de los contornos de haces).

Las masas de la carga útil y del subsistema de antena serán de 391 kg y 88 kg,

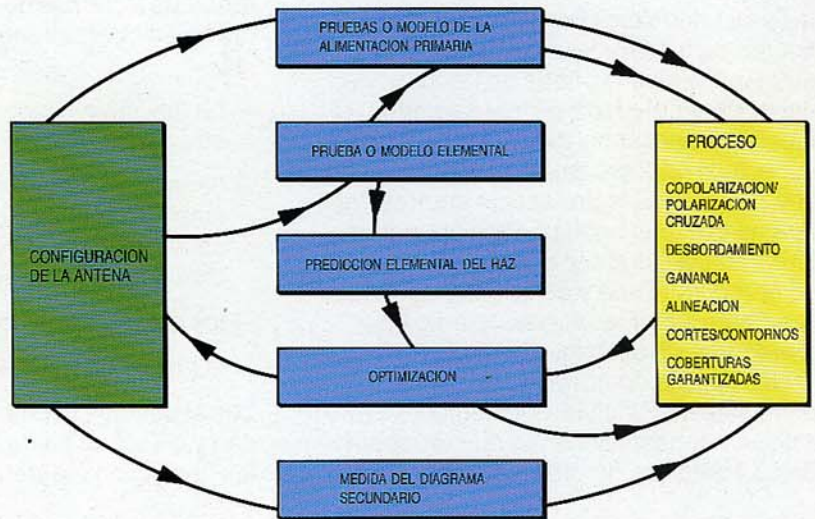
respectivamente, mientras que en el Telecom 1 son de 130 kg y 28 kg.

## Evolución de las necesidades

Las aplicaciones tradicionales de las comunicaciones vía satélite son los servicios fijos (incluyendo transmisión de vídeo), servicios móviles, satélites de difusión directa y comunicaciones militares.

En Europa, los servicios fijos seguirán un proceso distinto al del Telecom 1 en varios aspectos:

- Evolución de las redes telefónicas hacia redes digitales multiservicio capaces de



**Figura 7**  
Estructura del diseño y soporte lógico de pruebas de RF.

transportar correo electrónico, distribuir datos, y permitir la consulta de bases de datos. Al mismo tiempo se desarrollan intensamente las transmisiones de vídeo.

- Establecimiento de redes locales con interconexión vía satélite.
- Flexibilidad en la configuración de haces, permitiendo una mayor adaptación a las variables exigencias del tráfico.

Estas consideraciones, unidas a la tendencia a aumentar la capacidad para reducir los costes por canal, obligan a reutilizar frecuencias para poder ampliar la anchura de banda efectiva. Las configuraciones multihaz o de salto de haz permiten reutilización de frecuencias por separación angular; el salto de haz es muy adecuado para sistemas de acceso múltiple por distribución en el tiempo (AMDT). Una tendencia más es la de utilizar contornos de haz reconfigurables para mejorar la adaptabilidad. Otra consecuencia de la necesidad de aumentar el ancho de banda es el desplazamiento a frecuencias más elevadas, como la banda Ka (20–30 GHz).



Los servicios móviles están constreñidos por las relativamente bajas frecuencias asignadas, que requieren grandes antenas, y por la estrechez de la banda de frecuencias, que implica tener que reutilizar frecuencias por funcionamiento multihaz.

Si han de utilizarse generalmente satélites de difusión directa para televisión, las estaciones terrenas deben ser más pequeñas y menos costosas que en el pasado. Para lograr este objetivo importante se necesitan satélites con mayor PIRE (potencia isotropa radiada equivalente), aunque una alternativa sería la de tener estaciones terrenas locales de mayor tamaño y distribuir las señales de televisión en tierra, por cable o enlaces de microondas.

La facultad de disponer de una reserva común para diferentes misiones que empleen la misma banda de frecuencias dependerá del grado en que se pueda reconfigurar el subsistema. Un requisito específico para sistemas de comunicaciones militares es la protección contra interferencias intencionadas. Para oponerse a tal amenaza, las antenas deben ser capaces de reconfiguración y de orientar de modo adaptable sus direcciones de nulo para protegerse de tales interferencias.

Una aplicación nueva es la de enlaces entre satélites, incluidos los enlaces entre satélites geostacionarios que retransmiten datos y satélites de órbitas bajas (satélites

de observación) a cientos de kilómetros de la Tierra solamente. Ello requiere una gran capacidad de orientación angular y una alta precisión de puntería.

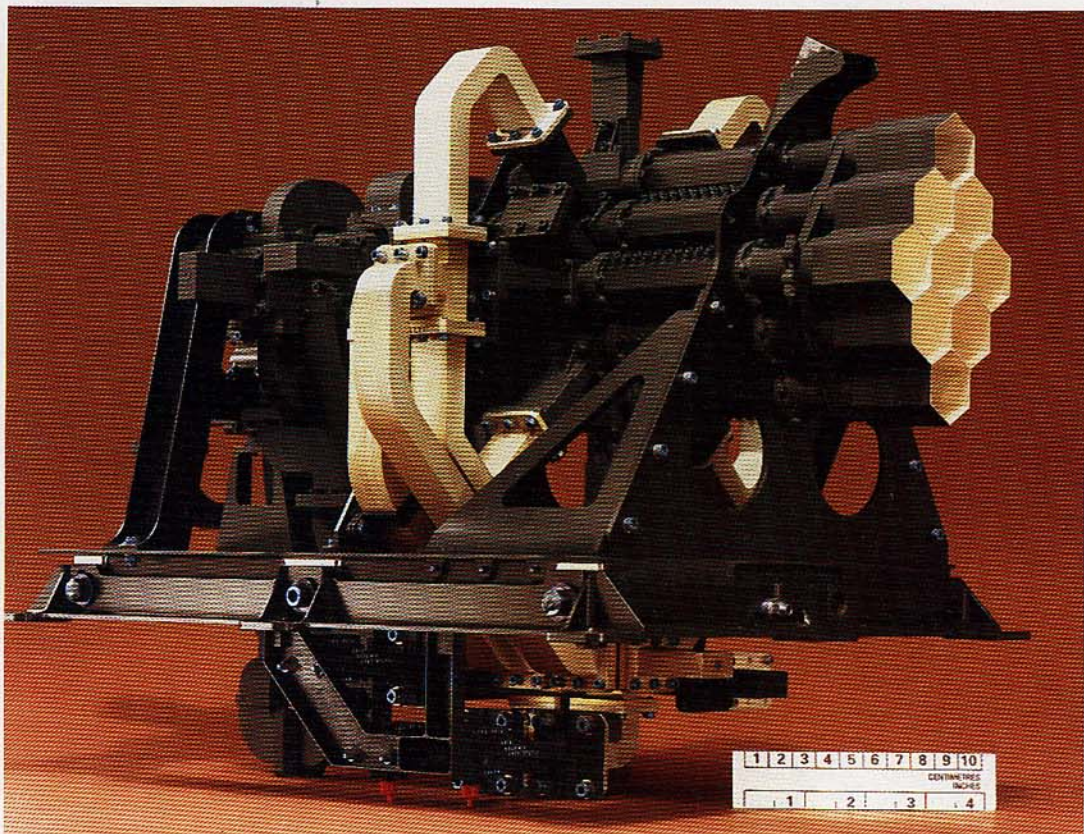
Al dar satisfacción a las exigencias de todas estas aplicaciones, hay que tener en cuenta otro elemento más: el diseño de la lanzadera de transporte espacial y del Ariane V favorece una disposición plana del vehículo espacial y de las antenas.

#### Configuraciones de antena

Se utilizan dos tipos de configuraciones: antenas reflectoras y redes de radiación directa (son aplicables tecnologías similares a éstas últimas y a las redes de alimentadores). Los sistemas de elementos activos de radiación directa tienen las siguientes ventajas:

- no hay multiplexor de salida, y por tanto sus pérdidas de RF son menores
- tienen mayor fiabilidad: cuando falla un amplificador de potencia de estado sólido, la ganancia y el diagrama de radiación sufren "degradación moderada"
- los componentes son reproducibles
- el haz se orienta con rapidez.

Los aspectos críticos incluyen la complejidad y dificultad de despliegue de los paneles que llevan elementos activos de



Alimentador primario del transmisor del TDF1. La red detectora de desviaciones por RF aparece en color más claro en el centro.

microondas como desfasadores y amplificadores, el rendimiento y linealidad de los amplificadores de potencia de estado sólido (utilizados por todos los canales), y el volumen y peso de los diversos componentes. Los elementos radiantes impresos son potencialmente más ligeros que las bocinas, diplexores y elementos activos. Sin embargo, puede reducirse el coste y la masa de los amplificadores de potencia de estado sólido y amplificadores de bajo ruido merced al desarrollo de la tecnología de circuitos integrados monolíticos de microondas.

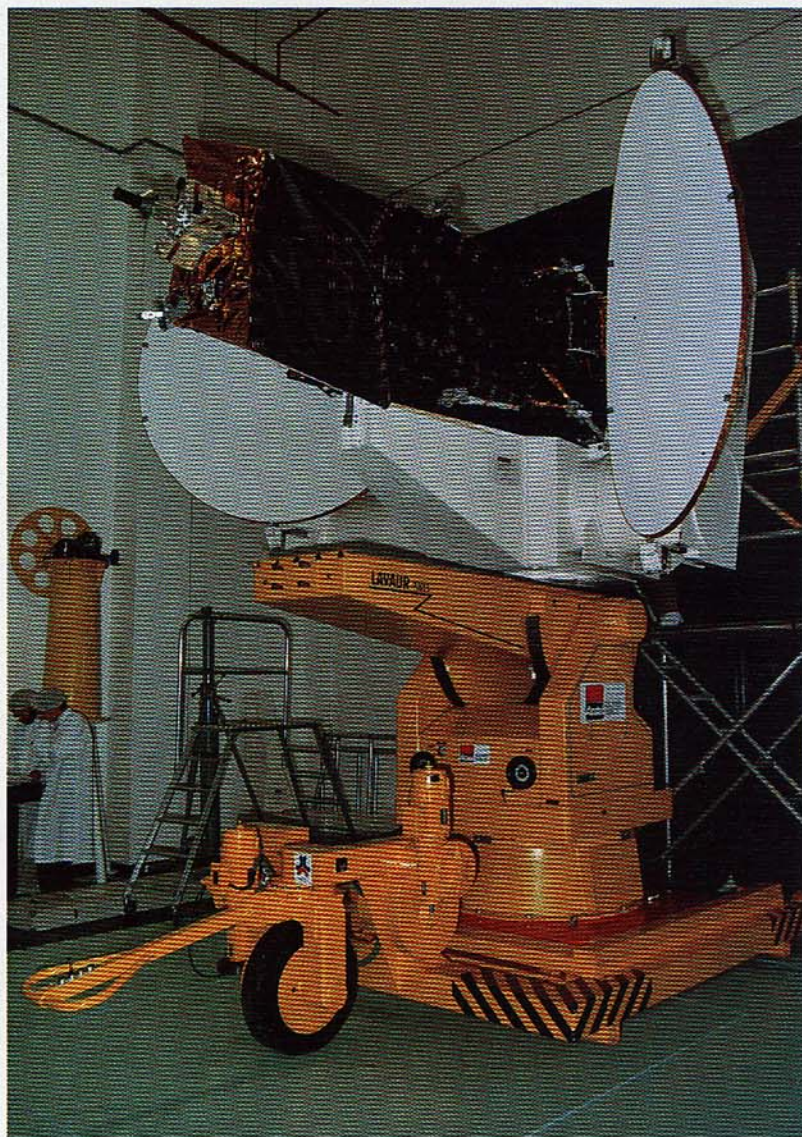
Una característica más general de los sistemas activos de radiación directa es que funciones que solían ser parte de la carga útil, tales como el multiplexaje de frecuencias, la amplificación y el desplazamiento de fase, han pasado a pertenecer a la antena. Por consiguiente, el uso de esta configuración de antena junto con las técnicas digitales para regeneración y conmutación de las señales a bordo permite utilizar nuevas arquitecturas en las que se asocian los componentes activos de microondas con los elementos radiantes.

La evolución futura de las tecnologías de RF y la tendencia a utilizar frecuencias superiores aumentan cada vez más el atractivo de las configuraciones en red, ya que se hace posible colocar circuitos integrados monolíticos de microondas tras los elementos radiantes, y las frecuencias más elevadas permiten el uso de antenas más pequeñas y no desplegables.

No obstante, en el caso de antenas de comunicación grandes (aquéllas que exceden la capacidad del vehículo de lanzamiento, alrededor de 4 m), los reflectores desplegables parecen ser la mejor solución.

## Conclusiones

Está claro que la tecnología de las comunicaciones por satélite evoluciona hacia una expansión de la gama de frecuencias, ampliando los dominios de las comunicaciones tradicionales a tales ámbitos como el de localizar y mantener comunicación con equipos móviles y el de comunicarse con satélites de órbitas bajas, al tiempo que crece el uso de componentes de microondas y de frecuencias más bajas (p. ej., mezcladores) en las antenas. Por otra parte, el aumento de complejidad de las estructuras y operaciones de las antenas implica que las actividades complementarias (es decir, electrónica, mecánica y diseño térmico) tendrán que integrarse en el diseño de la antena a lo largo de todo el proyecto.



**Configuración del vehículo espacial del Telecom 2. Los grandes reflectores de 2,2 m se muestran en la posición de lanzamiento, recogidos contra los paneles de la nave.**

También es cierto que la importancia relativa del subsistema de antena en el vehículo espacial va aumentando a medida que se integra con la carga útil. Esto conduce inevitablemente a la pregunta: *¿Hay que diseñar antenas para los vehículos espaciales, o segmentos espaciales para las antenas?*

## Glosario de términos

### *Configuración excéntrica*

El reflector es un paraboloide de revolución truncado. Cuando el eje focal de este paraboloide no pasa por el centro del contorno del reflector, la configuración de antena es de "alimentador excéntrico". En antenas de satélites de telecomunicación, se hace que el eje focal caiga fuera de la superficie del reflector para evitar que el campo reflejado sea cortado por el alimentador (bloqueo).

### *Reflector de rejilla*

Cuando se usa polarización lineal, el mejor camino para seleccionar la polarización nominal y corregir así la polarización cruzada inducida por la alimentación o la disposición geométrica, es usar un reflector dieléctrico (transparente) que soporte una rejilla metálica (reflectante). Estos dos reflectores pueden superponerse, uno con los alambres en sentido horizontal y el otro en sentido vertical. Esta configuración, con las tecnologías más avanzadas, se denomina de "doble rejilla".

### *Reutilización de la frecuencia*

Cuando la pureza de polarización es suficiente (relación de aislamiento de polarización habitualmente mejor que 27 dB), puede utilizarse la polarización ortogonal (es decir, la lineal vertical por lineal horizontal, o la dextrógira por levógira, y viceversa) para transmitir o recibir otra señal de la misma frecuencia.

### *Alineación*

Los procedimientos de alineación aseguran que el haz apunta en la dirección correcta cuando la antena se ha posicionado en el vehículo espacial. Ello requiere unas minuciosas pruebas de RF, y la medida y ajuste de distancias y ángulos con ayuda de instrumentos ópticos. La traza efectiva del haz de la antena es la zona específica de cobertura aumentada por los errores de alineación y los efectos de la distorsión de la antena y variaciones en la actitud del vehículo espacial.

### *Relación de elipticidad*

Con polarización circular, la relación de elipticidad de la polarización refleja su contribución al nivel de polarización cruzada.

### **SYLDA**

"Système de Lancement Double Ariane". Estructura intermedia que permite lanzar dos vehículos espaciales simultáneamente (véase figura 1 para el Telecom 1 y Eutelsat II).

### *CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic)*

La fibra de carbono puede disponerse de modo que el coeficiente de dilatación de la

superficie del emparedado sea prácticamente nulo, mejorando por tanto el comportamiento térmico de las estructuras y los reflectores.

### *Detector de desviaciones por RF*

Cuando la anchura del haz es pequeña ( $1^\circ \times 2^\circ$  como en los satélites TDF), se utiliza un sistema detector de RF que corrige las desviaciones de dirección del haz. Este sistema sensor funciona con una radiobaliza transmisora en tierra y una plantilla de desviaciones de recepción a bordo. Se utiliza el mismo reflector para la plantilla de desviaciones y para el haz de comunicaciones; dicha plantilla viene dada por una red integrada en el alimentador primario de la antena cuya dirección de nulo se enclava a la radiobaliza terrena, y en cuanto a los desplazamientos del haz, éstos se obtienen mediante pequeñas correcciones de orientación del reflector.

### *Eficacia de la antena*

La interpretación tradicional, que es la relación del valor de cresta de la ganancia a la directividad máxima nominal, no es apropiada en el caso de antenas de comunicaciones espaciales. La optimización de la ganancia sobre una zona de cobertura específica da como resultado aberturas de antena mayores de lo necesario para conseguir la ganancia máxima.

### **Referencias**

- 1 G. Duret y G. Guillemin: Antena multihaz reconfigurable para satélites EUTELSAT II: *Comunicaciones Eléctricas*, 1988, volumen 62, nº 1, págs. 75-80 (en este número).

**Bruno Vidal Saint-André** nació en 1934 en Toulouse, Francia. En la misma ciudad se graduó en ingeniería electrónica en la Ecole Nationale Supérieure d'Electronique, Electrotechnique, Informatique et Hydraulique, y además obtuvo la licenciatura en ciencias en la Universidad. En 1959 entró a formar parte de Thomson-CSF como ingeniero de I+D en el departamento de microondas y antenas de la división de misiles. Posteriormente ésta se convirtió en la división espacial y fue transferida a Alcatel NV. Desde 1967 hasta 1982 tuvo a su cargo las actividades de antenas de la división espacial, y después en Alcatel Espace. El Sr. Vidal Saint-André es miembro de la dirección técnica, responsable del sector de las antenas.

# Antena multihaz reconfigurable para satélites

## EUTELSAT II

Se han aplicado tecnologías avanzadas en el desarrollo de una antena de haz reconfigurable y ligera para los satélites Eutelsat II, eligiendo la configuración de antena más sencilla para poder llevar al máximo la carga útil del satélite. El diseño permite reconfigurar los 16 canales desde una cobertura amplia para servicios de comunicación a otra más restringida para difusión de televisión.

**G. Duret**

**T. Guillemín**

Alcatel Espace, Toulouse, Francia

### Introducción

Eutelsat, Organización Europea para Telecomunicaciones por Satélite, se prepara activamente para explotar sus sistemas de la siguiente generación, y ha encargado ya cuatro satélites (con opción para cuatro más) cuyo lanzamiento se ha programado

desde finales de 1989 en adelante. La principal característica de la serie Eutelsat II será su capacidad de adaptarse a los cambios de demanda para telefonía europea, televisión, y servicios de transmisión de datos.

Eutelsat fue creada por las Administraciones europeas en 1977 con el objetivo de interconectar unas 20 estaciones terrenas, repartidas por el continente, mediante una red común por satélite que complementa a la red telefónica. En 1979, la Agencia Europea del Espacio decidió comprar y lanzar cinco satélites europeos de comunicaciones (SEC), confiando su explotación a Eutelsat. No obstante, tras el lanzamiento de los primeros SEC, quedó claro que sería la televisión y no la telefonía el principal recurso de Eutelsat. El desarrollo de la red telefónica europea terrenal y la rápida evolución tecnológica de las microondas y los cables, en particular los de fibra óptica de banda ancha, es la causa de que sólo una pequeña parte de la capacidad de los satélites se haya utilizado para telecomunicaciones. Al mismo tiempo, los servicios de televisión han superado todas las previsiones, sobre todo por haber aparecido las estaciones terrenas de bajo coste.

Afortunadamente, los SEC pudieron responder a esta modificación de la demanda. Concebidos con la intención de proporcionar comunicaciones telefónicas por toda Europa, estos satélites emplean "Eurohaces" con grandes trazas elípticas que cubren el continente entero. Para aumentar la capacidad total se añadieron haces más estrechos de alta ganancia que permiten transmitir a velocidades de hasta 120 Mbit/s en AMDT (acceso múltiple por distribución en el tiempo), modo actualmente muy utilizado para servicios de televisión.

Tabla 1 - Principales características de los satélites de Eutelsat

	SEC	Eutelsat II
Número de antenas	2 receptoras 4 transmisoras	1 transmisora de polarización doble 1 transmisora y receptora de polarización doble
Concepto de antena	Reflector cilíndrico-parabólico y alimentador único	Reflector de doble rejilla y multialimentador
Coberturas	Gran eurohaz elíptico Estrecho haz puntual elíptico	Eurohaz conformado Haz puntual conformado
Cobertura reconfigurable	No	Sí
PIRE		
Eurohaz	37 a 41 dBW	42 a 46 dBW
Haz puntual	41 a 45 dBW	47 a 51 dBW
Potencia RF por canal	20 W	50 W
Número de canales en explotación:		
Con sol incidente	10	16
En eclipse	6	16
Potencia eléctrica (al fin de su vida)	900 W	3000 W
Vida útil	7 años	7 años
Masa de lanzamiento	1100 kg	1800 kg
Masa en órbita	680 kg	900 kg
Estabilización	3 ejes	3 ejes
Dimensiones del satélite	2,5 x 2,5 x 2,5 m	2,8 x 2 x 2,5 m
Envergadura, paneles solares desplegados	13,8 m	22,4 m

No obstante, la cobertura que ofrecen los satélites SEC tiene limitaciones notables: las zonas cubiertas no coinciden con las áreas de alta demanda pública, especialmente en la Europa Oriental, y la anchura de banda de 80 MHz es más del doble de la requerida para canales de televisión comerciales (27 a 36 MHz) con lo que, como sólo se puede dar un canal, sobra más de la mitad de la banda. Además, el pequeño tamaño del satélite y la limitada potencia que suministran los paneles solares impiden sustituir los amplificadores de TWT (tubos de onda progresiva) previstos originalmente por versiones de potencia más elevada que ofrezcan una mayor PIRE (potencia isotrópica radiada equivalente). Finalmente, la capacidad de las baterías es insuficiente para asumir la carga durante los eclipses, que ocurren dos veces al año. Hubo, pues, que definir importantes modificaciones para la segunda generación de satélites Eutelsat II (Tabla 1).

En la serie Eutelsat II se utilizarán amplificadores de mayor potencia y haces de cobertura más extensa para producir la misma densidad de flujo de potencia en Tierra que los de la serie SEC. Además, el uso de alimentadores múltiples en las antenas de doble reflector permitirá reconfigurar los haces de antena, y por consiguiente las áreas de cobertura. Para cada antena y modo de polarización será posible conmutar desde un haz de tipo estándar con ganancia media y extensa cobertura a un

haz estrecho con elevada ganancia y cobertura reducida. Estos últimos transmitirán señales de 51 dBW, que podrán ser recibidas por antenas de menos de 1 m de diámetro sobre gran parte de Europa.

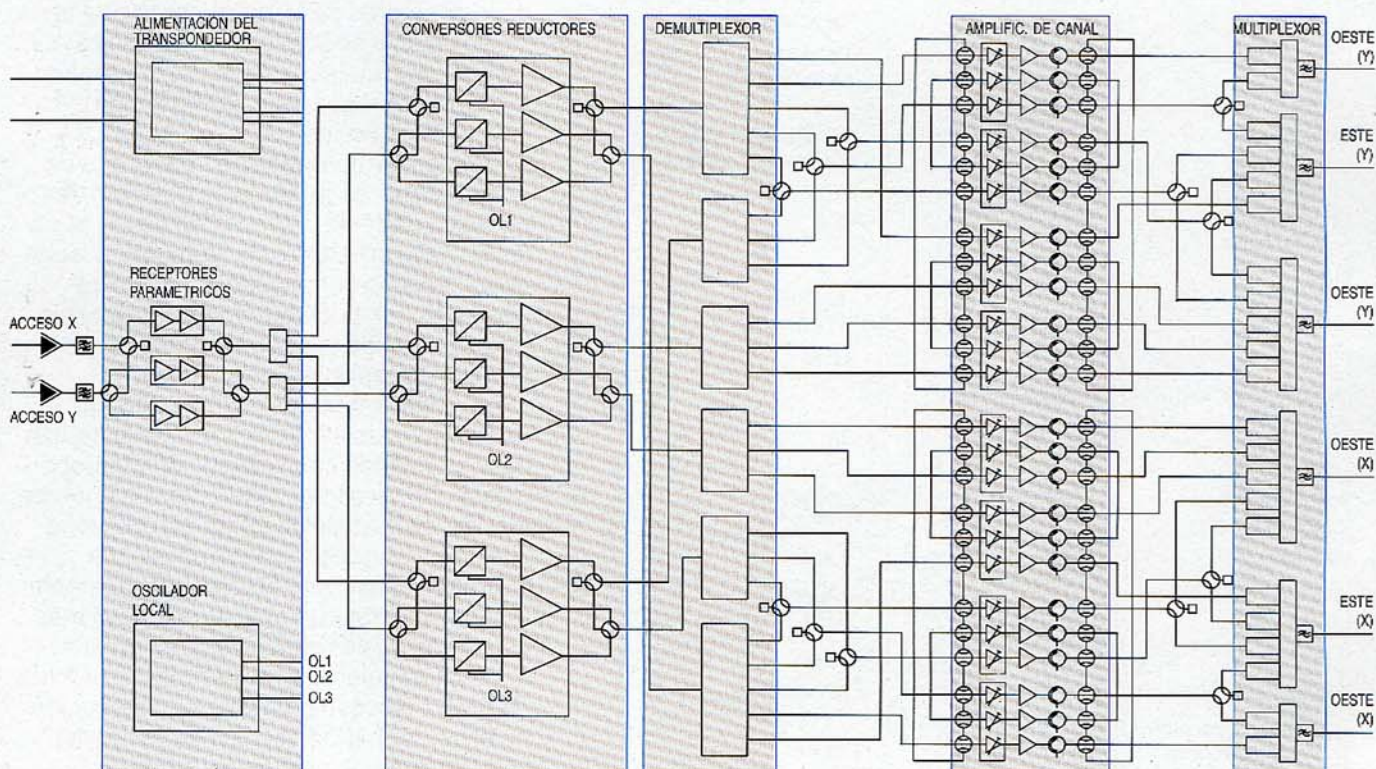
Además, la posibilidad de seleccionar canales y haces facilitará el combinar en un mismo satélite los servicios de telefonía, difusión de televisión y transmisión de datos.

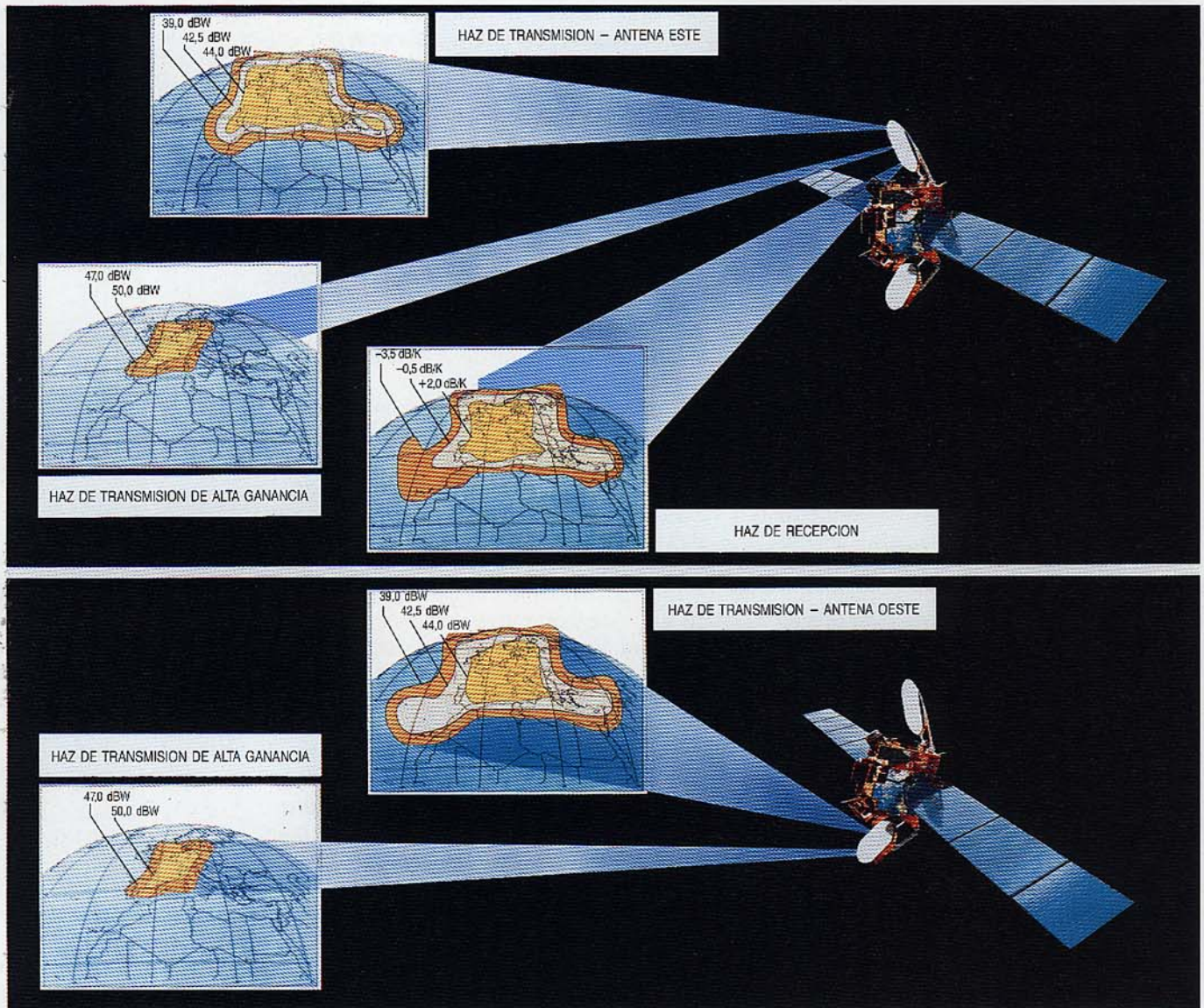
### Misión y configuración del subsistema de antena

El subsistema de antena del Eutelsat II ha sido diseñado por Alcatel Espace para satisfacer las complejas exigencias de la misión espacial, adoptando la más sencilla configuración posible. El objetivo de los satélites es prestar unos servicios de comunicación en banda Ku mediante 16 canales activos, y ello se ha conseguido aplicando tecnología y diseño avanzados al sistema de antena (Fig. 1). La carga útil de telecomunicación se configura también con suficiente redundancia para garantizar que el satélite permanezca operativo durante sus siete años de vida activa. Al optimizar el diseño del repetidor y de la antena ha podido lograrse una gran flexibilidad de explotación, traducida en gestión de los canales de transmisión.

El diseño de la configuración de la antena responde a seis requisitos básicos:

Figura 1 Diagrama de bloques del transpondedor del satélite Eutelsat II.





- capacidad de reconfigurar en órbita, por control remoto, las zonas de cobertura terrenas
- polarización lineal ortogonal doble para reutilización de frecuencias
- alta pureza de polarización: 34 dB de aislamiento entre polarizaciones para frecuencias reutilizadas
- capacidad de elevadas potencias: 16 canales, cada uno con potencia de salida de 50 W
- Gran anchura de banda: de 10,95 GHz a 12,75 GHz en transmisión y de 14 GHz a 14,5 GHz en recepción
- construcción compacta y ligera de peso.

La carga útil total emplea sólo dos antenas de haz conformado para la recepción y para la cobertura de transmisión reconfigurable deseada. La red de alimentadores permite reconfigurar para obtener haces de zona de

cobertura menor (efecto zoom) en los 16 canales simultáneamente, con el fin de incrementar la PIRE sobre Europa central para la difusión de televisión.

Una antena, situada en la cara este del satélite, puede recibir señales desde todas las zonas europeas y continentales, y puede también transmitir señales en ocho canales, bien al continente, o bien, tras una conmutación a bordo, a las zonas más restringidas de difusión de televisión. La segunda antena, en la cara oeste del satélite, puede transmitir señales en 14 canales a zonas del centro y del occidente europeo o bien, tras la conmutación ya citada, a zonas más reducidas donde se da el servicio de difusión de televisión.

Alcatel Espace, un líder mundial en diseño y producción de antenas, desarrolló las antenas para Eutelsat II usando una tecnología avanzada de alimentador múltiple y los reflectores sensibles a la polarización más modernos.

**Antenas de haz conformado que proporcionan la cobertura reconfigurable de transmisión y recepción requerida. El satélite está situado a 7° Este.**

**Prestaciones y diseño de antenas**

Cada antena consta de un reflector circular parabólico de doble rejilla de alimentador excéntrico, equipado con dos unidades de alimentadores múltiples, una por cada polarización lineal ortogonal. La característica más crítica del diseño fue el incorporar las funciones de transmisión y recepción en una sola antena, ya que la operación en banda ancha prohíbe el uso de componentes sensibles a la frecuencia, y deben evitarse los componentes híbridos para no obtener una pobre respuesta en frecuencia de la red conformadora del haz, que haga necesario utilizar unidades perfectamente adaptadas. Asimismo, la alta potencia transmitida requiere unos procedimientos de diseño, ensamble y prueba muy cuidadosos para eliminar los productos de intermodulación pasivos en la señal recibida y las descargas automantenidas.

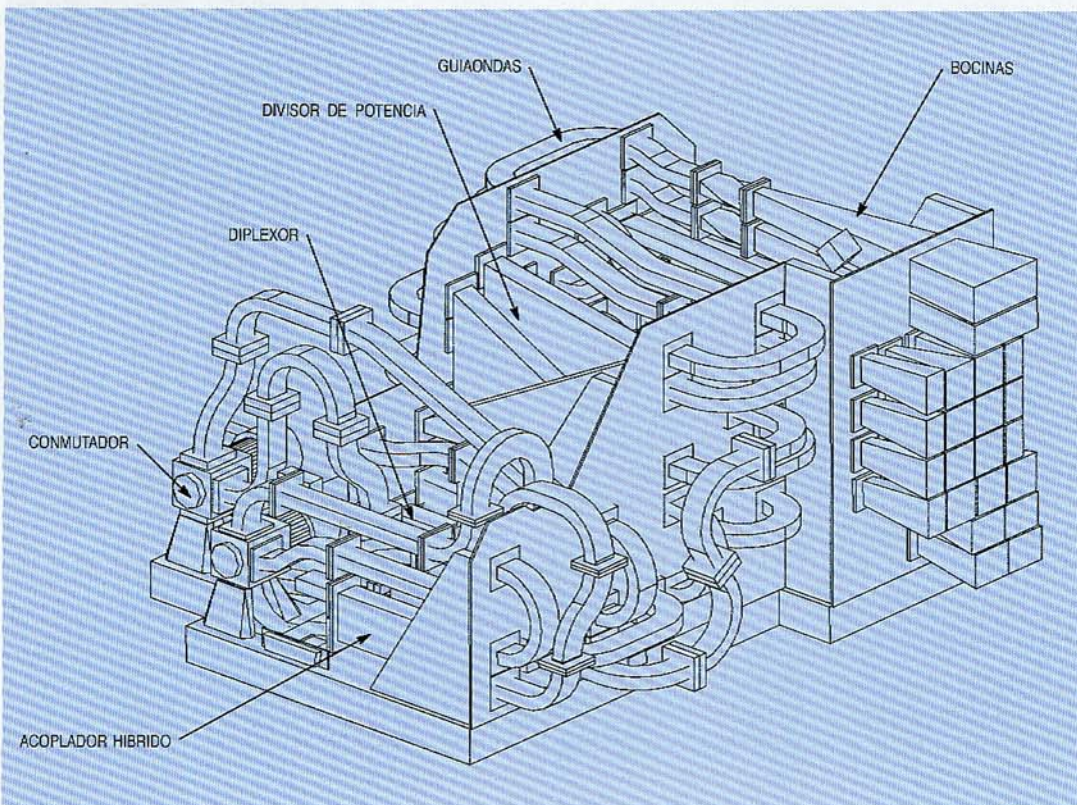
Cada unidad de alimentador múltiple (Fig. 2) consta de 22 bocinas piramidales alimentadas por una red de guiondas de banda ancha que conforman los diferentes haces. Alcatel Espace fabricó estos alimentadores con materiales calificados para el espacio que había elaborado para las antenas del Telecom 1 y del TDF1. Las pequeñas bocinas de la parte central de la red producen haces de reducida cobertura y elevada ganancia; pueden ser activadas por dos conmutadores. Los diferentes tamaños y situaciones de las bocinas piramidales han

sido optimizados para eliminar ondulaciones de la ganancia sobre las zonas de cobertura y a la vez reducir al mínimo el número de bocinas utilizadas.

Las redes que conforman los haces se constituyen usando divisores de potencia convencionales de banda ancha, desfases, diplexores y conmutadores que proporcionan bocinas con las respuestas en amplitud y fase necesarias para lograr un diagrama de radiación optimizado, así como unos medios de conmutación para reconfigurar la zona de cobertura. La figura 3 es un diagrama de bloques de la unidad de alimentador.

Los divisores de potencia pueden repartir desigualmente la potencia emitida, al tiempo que aseguran una respuesta plana potencia/frecuencia sobre una banda de gran anchura que abarca todas las frecuencias de transmisión y recepción. Los diplexores separan las unas de las otras.

Ambos reflectores tienen una abertura de 1,6 m de diámetro y una distancia focal de 1,2 m. Se construyen con doble cubierta, siendo la trasera parabólica, con dos capas de fibra de carbono que encierran un núcleo en panel de abejas de aluminio, y la delantera también parabólica con dos láminas de Kevlar alrededor de un núcleo en panel de la misma materia, y con hilos de cobre dorado soldados a cada lámina. Las cubiertas anterior y posterior están ensambladas por una estructura de Kevlar que les da la rigidez necesaria.



**Figura 2**  
Unidad de alimentadores de antena para la antena del oeste.

Para reducir el gradiente térmico, la parte anterior del reflector se recubre con un parasol transparente a la RF. Una característica importante de estos parasoles desarrollados por Alcatel Espace, es la conductividad de su revestimiento exterior que evita los daños causados por descargas electrostáticas. La estructura que da rigidez y el interfaz isostático del reflector de doble rejilla son ligeros de peso y aseguran que no haya deformaciones térmicas de la superficie parabólica del reflector.

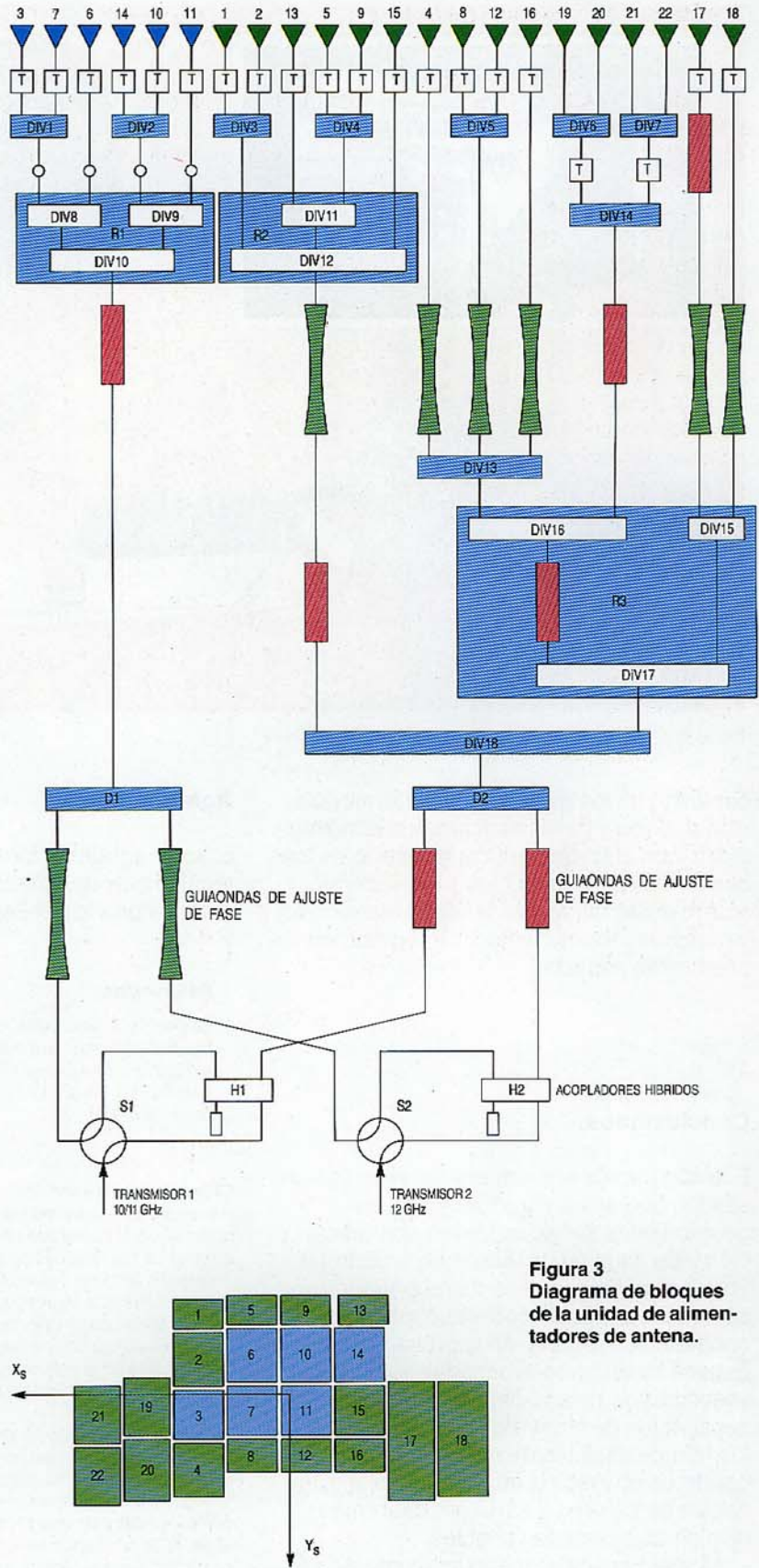
**Medios para el diseño de la antena**

Los haces de antena fueron optimizados mediante un programa de simulación por ordenador llamado Profil, original de Alcatel Espace, que también se ha utilizado con éxito para predecir el comportamiento eléctrico de las antenas de los satélites Telecom 1 y TDF1, y durante la fase de precalificación del Eutelsat II. Además, se han comprobado módulos específicos de este programa por mediciones sobre:

- el reflector de doble rejilla en el polígono de pruebas de campo lejano de Alcatel Espace
- tres prototipos de multialimentador en la cámara anecoica de Alcatel Espace.

Las restricciones de masa y de volumen en el subsistema de antena impulsieron una red de conformación de haces de diseño compacto. Alcatel Espace ha desarrollado componentes de guiaondas para tales aplicaciones. El uso de CAD (diseño asistido por ordenador) fue esencial para el trazado mecánico de la complicada red de conformación de los haces. Anteriormente, el diseñador se veía limitado por las herramientas CAD que solamente daban una simple representación de la estructura de la red. En cambio, las herramientas CAD que ahora emplea Alcatel Espace ofrecen prestaciones tales como la rotación en tiempo real, el cálculo de distancias entre ejes de guiaondas y el borrado de líneas ocultas. Además, pueden mostrar imágenes en perspectiva sombreadas de las partes seleccionadas, con supresión de los objetos ocultos. Por medio de estas herramientas Alcatel Espace ha podido diseñar un conjunto compacto y de masa reducida, y asegurar una fabricación eficaz de la red conformadora de haces.

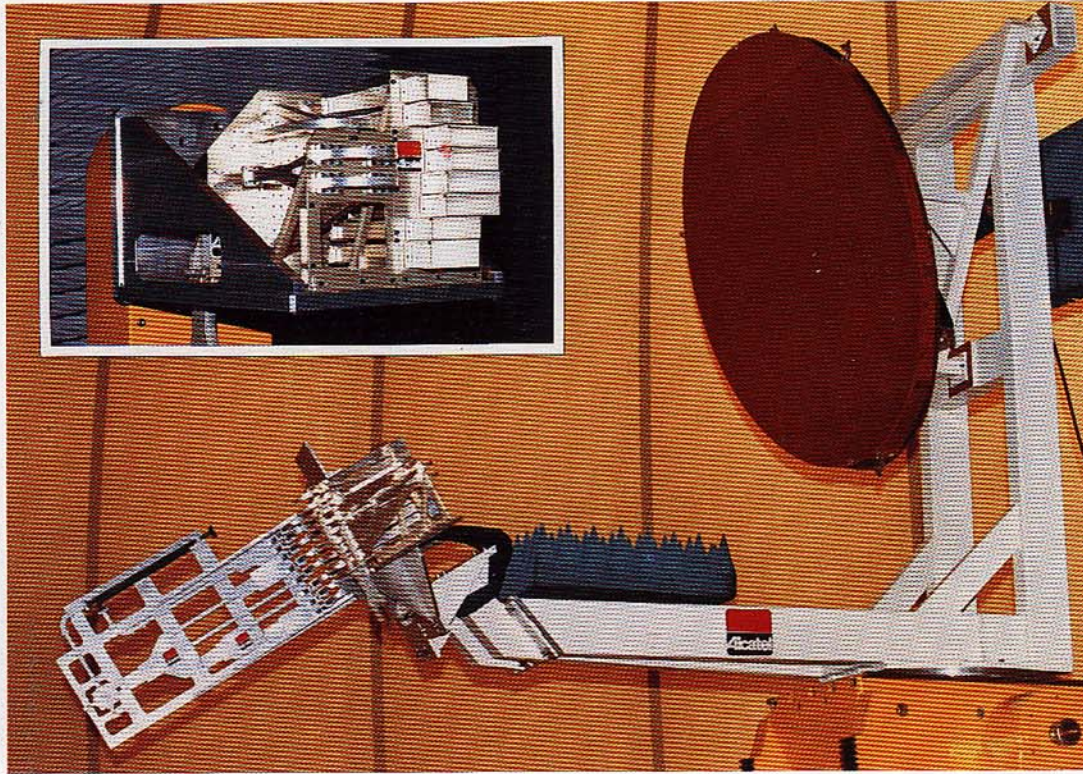
Los productos pasivos de intermodulación se investigaron exhaustivamente en la primera fase del programa, utilizando un montaje de prueba capaz de proporcionar señales de onda continua con una potencia



**Figura 3**  
Diagrama de bloques de la unidad de alimentadores de antena.

de 800 W sobre dos portadoras. No se detectó ningún producto de intermodulación pasivo que superara un nivel de -185 dBc (dB con respecto a la portadora). Específicamente para el programa Eutelsat II se ha establecido un plan de prueba





Reflector de doble rejilla en las pruebas de campo lejano de Alcatel Espace.

completo de los productos de intermodulación pasivos y de las descargas automantendidas, con el fin de verificar el diseño de los componentes individuales y del sistema entero en las diferentes fases del desarrollo, y probar el multialimentador integrado en un entorno espacial.

## Conclusiones

Eutelsat trabaja activamente en preparar un satélite operacional que satisfaga las demandas de servicios de telecomunicación y de difusión de televisión en Europa. Para cumplir el requisito de reconfigurabilidad de las zonas de cobertura mediante conmutación remota, en la órbita, Alcatel Espace ha utilizado avanzadas tecnologías y técnicas de diseño para desarrollar un subsistema de antena que abre el paso a los futuros satélites de misión múltiple, donde es obligada la flexibilidad en la asignación de canales a servicios diferentes y niveles de demanda variables.

Alcatel Espace procede actualmente a la fabricación y prueba del modelo de calificación del subsistema de antena y el primer modelo de vuelo, que deben completarse durante el verano de 1988.

## Agradecimiento

El autor agradece sinceramente el soporte técnico proporcionado por el grupo de antenas de Alcatel Espace.

## Referencias

- 1 G. Duret y B. Vidal Saint André: The Eutelsat II Reconfigurable Antenna Subsystem. *IEEE 1987 International Symposium Digest: Antennas and Propagation*, Blacksburg, VA (EE.UU.), 15-19 junio 1987, págs. 187-190.

**Gilles Duret** nació en Ambert, Francia, en 1953. Estudió microondas en la Universidad de Clermont-Ferrand, obteniendo el doctorado en 1978. Después de trabajar durante 18 meses en Thomson-CSF (división de radar de superficie) en el desarrollo de avanzados sintetizadores de frecuencia, ingresó en Alcatel Espace donde se hizo cargo del desarrollo de antenas con reflectores de doble rejilla y multialimentador. El Dr. Duret, que fue responsable de la antena propuesta a Eutelsat II, es el actual director adjunto para antenas en Alcatel Espace.

**Thierry Guillemín** nació en Roanne, Francia, en 1959. En 1981 se graduó ingeniero en la Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace de Toulouse, y luego entró en la división espacial de Thomson-CSF como ingeniero de investigación térmica y mecánica. En 1984, el Sr. Guillemín se incorporó al grupo de antenas de Alcatel Espace, donde tuvo a su cargo el desarrollo de antenas de multialimentador, y después estudios térmicos y mecánicos y el desarrollo del subsistema de antena para Eutelsat II. Actualmente dirige el grupo térmico y mecánico para la línea de productos de antena de Alcatel Espace.

# Sistema de seguimiento, teledirigido y teledirigido para el satélite de comunicaciones Kopernikus

El satélite DFS Kopernikus suministrará a Alemania una serie de servicios de telefonía, transmisión de datos y distribución de televisión, con una expectativa de vida útil de 10 años. La sección de seguimiento, teledirigido y teledirigido aplica un concepto nuevo que reduce el peso y la potencia al mínimo, rebaja el coste de las pruebas y elimina la necesidad de receptores de banda Ku separados.

**F. Gass**  
**M. Kracht**

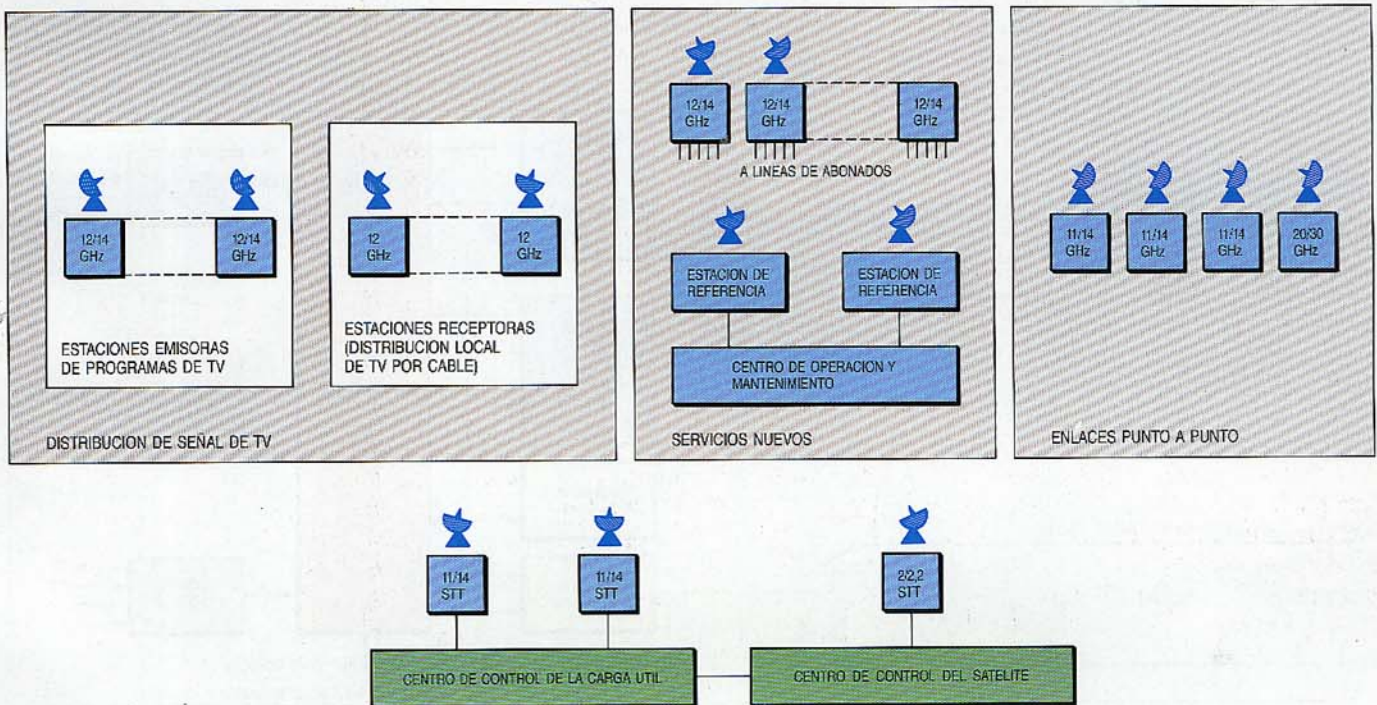
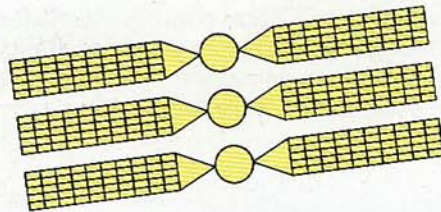
Standard Elektrik Lorenz AG, Stuttgart,  
República Federal de Alemania

**Figura 1**  
Configuración de sistema del satélite de telecomunicación alemán DFS Kopernikus.  
STT - seguimiento, teledirigido y teledirigido.

## Introducción

El Deutsche Bundespost está instalando un sistema de satélites para comunicaciones nacionales (DFS Kopernikus) que se prevé entre en servicio a principios de 1989. Las

principales aplicaciones del sistema DFS serán la telefonía, transmisión de datos, distribución de televisión entre Usingen y Berlín Oeste, y la distribución nacional de programas de televisión que se inyectarán en la red de distribución de televisión



pública. Además ofrecerá "nuevos servicios", tales como transmisión de datos de alta velocidad y videoconferencia.

El sistema DFS consta de los segmentos espacial y terreno, como se ilustra en la figura 1. Además de la red de distribución de televisión, el segmento terreno comprenderá de 30 a 40 estaciones para cursar el tráfico de comunicaciones, más otras tres estaciones (dos en banda Ku y una en banda S) para supervisar y controlar el estado, funciones y parámetros del satélite y de la carga útil.

El segmento espacial contendrá tres satélites, dos de ellos (uno activo y otro en reserva) situados en la misma órbita geostacionaria a 23,5° Este. Si el tráfico de comunicaciones excede de la capacidad del satélite activo, se pondrá en servicio el segundo satélite, y el tercero será colocado en la órbita a 28,5° Este para servir como reserva de ambos satélites operativos.

El diseño del satélite DFS Kopernikus es modular y está constituido por un módulo de comunicaciones que transporta la carga útil de telecomunicación (las unidades de repetidor y de antena), y un módulo de servicios el cual incorpora los equipos para corrección de actitud y de órbita, alimentación, funciones STT (seguimiento, telemida y telemando) y el sistema de propulsión.

SEL es responsable del diseño, desarrollo, integración y pruebas del STT que controla los modos de operación del satélite y determina la órbita del vehículo espacial en cooperación con las estaciones terrenas de

control. Por consiguiente, el sistema STT ha de ser capaz de:

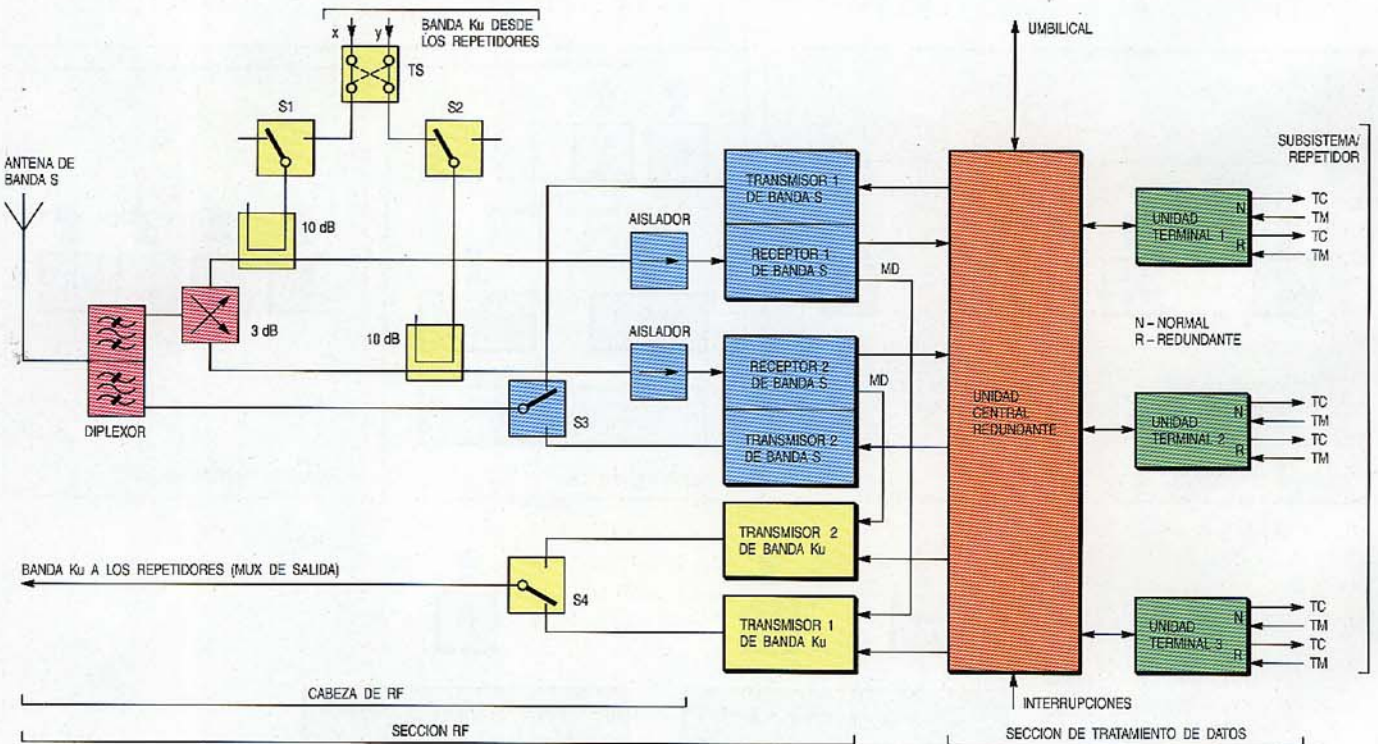
- adquirir, codificar, formatear y transmitir señales de telemida a las estaciones terrenas
- recibir, decodificar y distribuir señales de telemando dentro del satélite
- recibir y retransmitir las señales de medición de distancia utilizadas para determinar la posición del satélite.

Se han asignado dos bandas de frecuencia (S y Ku) a las operaciones de dicho sistema STT.

### Configuración del sistema STT

Tras un análisis detallado de los conceptos de STT necesarios para satisfacer las exigencias del sistema DFS Kopernikus, se seleccionó la configuración expuesta en la figura 2. A diferencia de otros sistemas de STT que utilizan tipos de receptores diferentes para las bandas de frecuencia S y Ku, la configuración elegida requiere solamente un tipo de receptor de banda S que se utiliza para enlaces ascendentes de STT en ambas bandas asignadas. La operación en la banda Ku se consigue por medio de los conversores reductores de banda Ku a banda S incluidos en la carga útil del satélite. Además de suprimir la necesidad de dos tipos de receptores, esta solución es ventajosa por reducir el coste de las pruebas, la masa y la potencia exigidas y el

**Figura 2**  
Diagrama de bloques del sistema STT para el satélite de telecomunicación DFS Kopernikus.  
DH - tratamiento de datos  
TC - telemando  
TM - telemida  
MD - medición de distancia.



número de interfaces entre las secciones de RF y de tratamiento de datos.

Un circuito de protección en la unidad central supervisa las operaciones de telemando y permite desconectar un enlace de la banda Ku que sufra degradación. Así, pues, pueden investigarse averías en la banda S sin interferencia de la banda Ku. Unos microprocesadores de la unidad central controlan la adquisición de datos de telemetría y la distribución de órdenes. Para garantizar la fiabilidad operacional necesaria y una larga vida útil, el sistema STT está provisto de redundancia en cada una de sus funciones.

Varios análisis desde la óptica del sistema STT, incluyendo el examen de los efectos y carácter crítico\* de los modos de fallo, el cálculo de la fiabilidad, el análisis de los fallos en un solo punto, y el cálculo del balance de enlace, han demostrado que este nuevo concepto satisface todas las exigencias de la misión DFS.

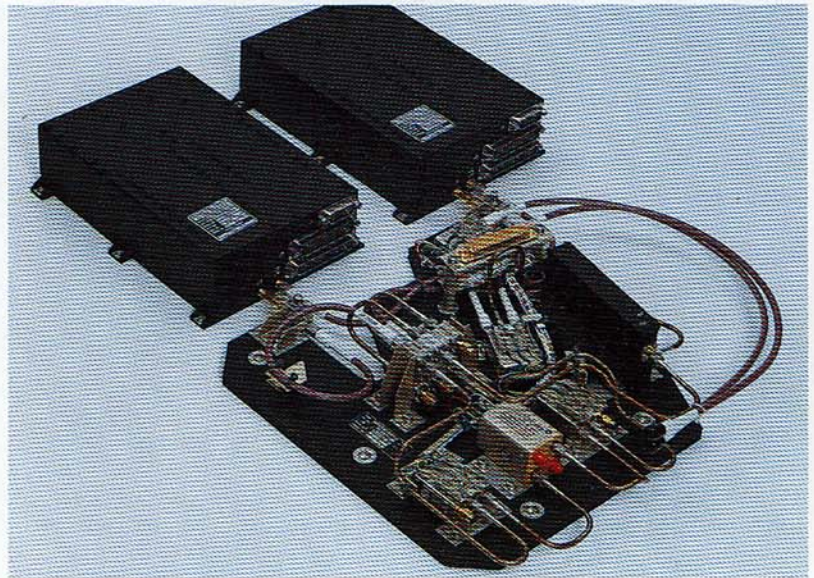
La configuración de STT se divide en dos partes principales: sección RF y sección de datos. La sección RF consiste en dos transpondedores de banda S, dos transmisores de banda Ku y diversos componentes de microondas tales como un diplexor, acopladores, conmutadores y aisladores. Estos componentes de microondas van montados sobre una cabeza de RF que se utiliza para establecer los enlaces RF con la antena de banda S y, a través del repetidor, con la antena de banda Ku.

La sección de tratamiento de datos consta de una unidad central y tres unidades terminales idénticas, las cuales sirven de interfaz con todos los sistemas del satélite para la distribución de órdenes y la adquisición de datos de telemetría.

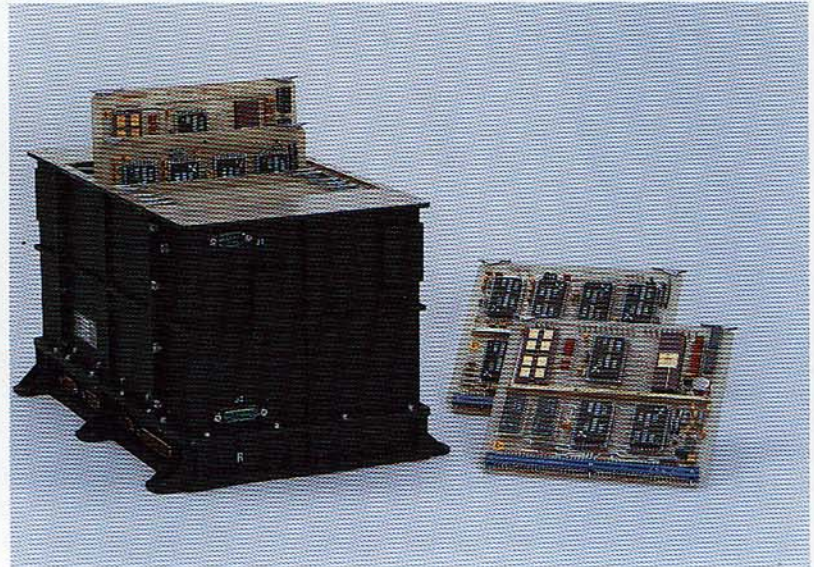
#### **Enlaces radioeléctricos STT**

Tras el lanzamiento, durante la transferencia de la órbita elíptica a una circular e incluyendo el posicionado final del satélite, se utiliza la banda S para la operación STT a través de una antena isotrópica en esa banda. Esta antena es parte del módulo de comunicaciones y está dedicada a los enlaces STT. Una vez colocado el satélite en su posición final, el STT utiliza la banda Ku por medio de una antena direccional en dicha banda que es parte de la carga útil. El modo de banda S queda entonces disponible para casos de emergencia, tales como pérdida de la supervisión de la órbita. Durante la transición desde funcionamiento en banda S a banda Ku y viceversa, es posible operar en ambas bandas simultáneamente.

\* El análisis del carácter crítico revela el grado de repercusión de un modo de fallo en el funcionamiento del sistema, subsistema, o parte del equipo, y por consiguiente el riesgo que entraña para el éxito de la misión.



**Cabeza de RF conectada a los transpondedores de banda S.**



**Unidad central: circuitos impresos enchufables equipados con híbridos de SEL.**

Las operaciones del sistema STT están basadas en las normas de la Agencia Europea del Espacio, siempre que éstas se hayan definido como aplicables al proyecto DFS Kopernikus<sup>1,2,3,4</sup>.

#### **Enlace ascendente**

La señal del enlace ascendente en la banda S es conducida desde la antena correspondiente al diplexor y, a través de una híbrida de 3 dB, a ambos receptores en el transpondedor de banda S. Las señales de telemando se entregan a la unidad central para ulteriores procesos, en tanto que las señales de medición de distancia se encaminan desde los receptores a los transmisores.

Pueden utilizarse dos frecuencias portadoras diferentes para el enlace ascendente en banda Ku, que se transmiten con campos eléctricos de polarización ortogonal

(polarización lineal  $x,y$ ). Dependiendo de la frecuencia portadora, el repetidor conduce la señal de RF por caminos diferentes a los interfaces ( $x,y$ ) del sistema STT. En cada camino  $x,y$  un convertidor reductor Ku/S transforma las señales de banda Ku al margen de frecuencias de los receptores de banda S del sistema. A cada receptor se le asigna un trayecto de señal RF. Un conmutador de transferencia en la cabeza RF permite reasignar un receptor para pruebas y reparaciones.

Si el enlace ascendente en servicio se deteriora (por problemas dentro del satélite o malas condiciones del enlace de RF) y falla un receptor de la banda S, se activa un circuito de protección (temporizador) por una orden desde Tierra. Dicho circuito, que es parte de la unidad central, supervisa las operaciones de control. Siempre que se ejecuta una orden de telemando, se pone a cero el tiempo transcurrido. Si así no ocurre (por falta de acceso al STT a través de enlaces de la banda Ku) durante 4 horas, la unidad central automáticamente envía órdenes a los conmutadores S1 y S2 (Fig. 2) para desconectar los enlaces de la banda Ku en fallo, con lo que todas las operaciones del STT tendrán que utilizar la banda S para localización de averías. Sin embargo, siempre es posible volver a operar en banda Ku mediante órdenes adecuadas en la banda S.

**Enlace descendente**

Todos los datos de telemida son adquiridos por las unidades terminales de la sección de datos, distribuidas por el interior del satélite. A partir de cada unidad terminal los datos se encaminan por un bus unidireccional (denominado *bus de respuesta*) a la unidad central. Una vez formateados y modulados, los datos de telemida se entregan simultáneamente como un flujo continuo de datos a todos los transmisores, aunque sólo uno de ellos está normalmente funcionando.

La portadora de RF, modulada por las señales de telemida y medición de distancia, se lleva a través del conmutador S3 al diplexor y a la antena de banda S para el funcionamiento en dicha banda, y por el S4 al multiplexor de salida de la sección del repetidor para operaciones en la banda Ku.

La tabla 1 recoge los principales parámetros de la sección RF.

**Tabla 1 – Datos técnicos para la sección de RF**

Frecuencias de entrada	2,027 GHz a 2,028 GHz
Margen de barrido	$f_c \pm 120$ kHz
Velocidad de barrido	< 25 kHz/s
Umbral de seguimiento de portadora	< -134 dBm
Umbral de telemando	< -106 dBm
Umbral de medición de distancia	< -106 dBm
Frecuencias de transmisión	
Banda S	2,201 GHz a 2,203 GHz
Banda Ku	11,450 GHz a 11,453 GHz
Potencia de salida	
Banda S	34,4 dBm
Banda Ku	14,4 dBm
Disipación de potencia	
Transpondedor de banda S	21,0 W
Transmisor de banda Ku	7,4 W
Cabeza de RF	-
Masa	
Transpondedor de banda S	2,4 kg
Transmisor de banda Ku	1,6 kg
Cabeza de RF	1,4 kg

che de fase) de segundo orden. El receptor utiliza este PLL para enclavarse y así hacer el seguimiento de la frecuencia portadora  $f_c$  sin modular del enlace ascendente, barrida ( $f_c \pm 120$  kHz) por la estación terrena. La adquisición se completa cuando los receptores se enganchan a la frecuencia. Los datos de estado apropiados se transmiten a la estación terrena por el enlace de telemida descendente.

**Medición de distancia**

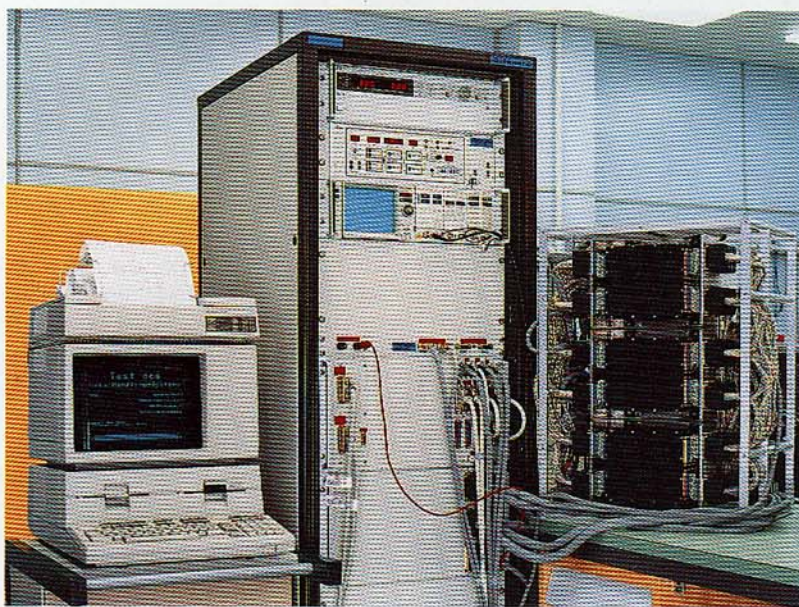
Las mediciones de distancia y de variación de distancia toman como base la normativa

**Equipo de prueba de la sección de tratamiento de datos controlado por ordenador, conectado al bastidor especial de pruebas.**

**Comportamiento y funciones del sistema STT**

**Adquisición**

El receptor de la banda S es un superheterodino doble con un PLL (bucle con engan-



de la Agencia Europea del Espacio al respecto<sup>3</sup>. La estación terrena utiliza señales de medición de 100 kHz (tono principal), junto con tonos entre 16 y 20 kHz (auxiliares), que modulan en fase la portadora de RF. Los valores medidos del retardo entre la transmisión de la señal y la recepción en la estación terrena se utilizan para determinar la posición del satélite. La contribución absoluta del subsistema STT por sí mismo al retardo total es de unos 2000 ns; las variaciones causadas por fluctuaciones de temperatura y parámetros eléctricos son menores de  $\pm 50$  ns. Para medir la variación de distancia cada transpondedor de banda S se conmuta por telemandos al modo coherente, en el cual la frecuencia del enlace descendente se obtiene directamente de la del enlace ascendente – con relación de 240/221 – y las señales de medición de distancia transmitidas y recibidas guardan una relación de fase fija. En este modo las curvas de calibración de la sección de RF y los datos de telemetria (temperatura de filtros utilizados en la medición de distancia, nivel y frecuencia en el enlace ascendente) pueden servir para calcular las variaciones de retardo dentro de  $\pm 5$  ns.

#### Telemando

La estructura de la trama de telemando se basa en la correspondiente norma de la Agencia Europea del Espacio<sup>1</sup>. La trama codificada contiene una unidad de datos de 3 x 24 bits, un decodificador de direcciones de 16 bits (dedicado a seleccionar y direccionar los sincronizadores de trama en el sistema STT), y un indicador de modo de 8 bits. Se utiliza la trama para definir cuáles órdenes van a la unidad central (ejecutar, conmutar redundancia, cargar memoria, etc.) y cuáles han de ser distribuidas a los terminales, como son las de un solo impulso o las de 16 bits en serie (órdenes de carga en memoria).

Para transmitir órdenes, la portadora ascendente se modula en MDP/MP/NRZ (sin retorno a cero) por la información de telemando, y ambos receptores demodulan dicha señal en la banda base. Las desviaciones de frecuencia, las variaciones de fase y nivel por el efecto Doppler y las rotaciones indeseadas del satélite causan degradaciones inapreciables en la señal de telemando demodulada.

Tras una amplificación a 600 mV ef. (relación señal-ruido  $> 12$  dB; anchura de banda, 4 kHz), la señal en banda base se envía a los dos sincronizadores de bit/trama en la unidad central, cada uno de ellos dedicado a un receptor. Cada sincronizador de bit reconstruye la información de datos y reloj a partir de la señal en banda base

mediante un PLL digital, y la pasa a su sincronizador de trama. Un microprocesador controla la decodificación y detección de errores de la información de telemando, y comunica al enlace descendente de telemetria el estado de este proceso decodificador, a efectos de verificación. La información de telemando decodificada (la orden) se almacena hasta que la libera una señal de ejecutar.

Una vez liberada, la señal de orden (32 bits, incluidos bits de comprobación) se lleva por un bus unidireccional (*bus de interrogación*) desde la unidad central simultáneamente a todas las unidades terminales. Tras comprobar la información que recibe, la unidad terminal direccionada distribuye la orden al usuario seleccionado.

El microprocesador en el sincronizador de trama gestiona automáticamente funciones de telemando adicionales, tales como:

- Ejecución de secuencias de control si el temporizador es activado y ha transcurrido el intervalo de tiempo. Un bit de estado de la telemetria indica la generación de la secuencia de control siguiente. El temporizador puede ser conectado o desconectado por telemando en cualquier momento.
- Ejecución de secuencias de control para reconfigurar los subsistemas del satélite en caso de emergencia, si el control de actitud y de órbita o el sistema de alimentación emiten señales de activación a las unidades centrales (p. ej., pérdida de control de la órbita, caída de la tensión de alimentación).

#### Telemetria

Todos los datos necesarios para la atención del propio sistema del satélite son adquiridos por las unidades terminales, pero controlados y formateados por el generador de formato en la unidad central. De modo similar a la distribución de órdenes, la unidad central suministra señales de control de telemetria (32 bits, incluidos los de comprobación) a las unidades terminales, a través del bus de interrogación. Estas señales especifican el modo (analógico, digital – serie, bipolaridad) de los datos a adquirir, el número del terminal, y la entrada de la unidad terminal para adquisición de datos de telemetria.

El formato de telemetria, basado en la norma pertinente de la Agencia Europea del Espacio<sup>2</sup>, consta de 32 tramas, cada una con 128 palabras de 8 bits. Las velocidades binarias son de 512 y 1024 bit/s. Sin embargo, la de 1024 bit/s es una opción que sólo se utiliza para pruebas en tierra antes del lanzamiento.

Todas las funciones del generador de formato las controla un microprocesador.

Tabla 2 — Datos técnicos para la sección de tratamiento de datos

Salidas de órdenes de impulsos	2 × 144 por terminal
Nivel	26 V
Corriente	100 mA
Duración	45 ms
Salida de órdenes de carga de memoria (16 bits serie)	2 × 14 por terminal
Nivel	26 V
Corriente	20 mA
Duración	3906 $\mu$ s
Entradas normalizadas, diferencial	2 × 144 por terminal
Margen de voltajes	0 V a 5,12 V
Conversión analógico/digital	8 bit
Periodo de muestreo	1,953 ms
Disipación de potencia	
Unidad central	9,1 W
Unidad terminal	1,0 W
Masa	
Unidad central	7,8 kg
Unidad terminal	2,8 kg

Los parámetros importantes para la telemida en sentido descendente (p. ej., velocidad de muestreo, conmutador de redundancia, modo residente, velocidad binaria) pueden modificarse o reprogramarse por telemando desde las estaciones terrenas en caso necesario. Se suministran dos formatos de telemida, y puede utilizarse un tercero para sacar datos de la memoria.

Las unidades terminales envían a la unidad central por el bus de respuesta los datos de telemida en octetos. La unidad central añade además la información de sincronización (16 bits) y de estado interno al tren de datos de telemida. Tras una modulación SPL/MDP (modulación por desplazamiento de fase con nivel separado) sobre una subportadora de 32.768 kHz, el tren de datos pasa al modulador de fase en cada transmisor y se envía luego a Tierra.

La tabla 2 contiene los principales parámetros de la sección de datos.

## Diseño de equipo

### Radiación

El equipo del STT tiene un diseño resistente a la radiación, compatible con los requisitos de una misión DFS de 10 años en la órbita geoestacionaria. Se utilizaron componentes eléctricos con resistencia a las radiaciones inherente de más de 100 krads (Si), incluyendo microprocesadores CMOS, RAM y circuitos integrados CMOS. Durante el diseño eléctrico se tuvo en cuenta la degradación de comportamiento de los dispositivos bipolares. Además, el diseño puede

resistir *perturbaciones aisladas* causadas por partículas de alta energía (electrones, protones). La inmunidad del diseño a la radiación ha sido comprobada por varios análisis, tales como el de los efectos de la radiación y el de casos extremos.

### Tecnologías

Los equipos de RF están ensamblados en módulos que equipan sustratos cerámicos con dispositivos montados en superficie (componentes discretos, híbridos).

El equipo de tratamiento de datos va sobre placas de circuito impreso que contienen componentes discretos e híbridos. Los circuitos híbridos calificados para uso espacial son fabricados por SEL.

### Estado del proyecto

SEL ha suministrado ya modelos de ingeniería y calificación con los cuales se ha comprobado que el diseño eléctrico y mecánico responde a los requisitos del sistema DFS. Además, se ha desarrollado un simulador para verificar que las funciones y parámetros del STT son compatibles con las estaciones terrenas que han de emplearse. Durante 1987, se llevaron a cabo pruebas en varias estaciones terrenas de Alemania y la NASA sin encontrar problema alguno de incompatibilidad.

Los sistemas STT para los dos satélites en órbita fueron suministrados en 1987; el tercero y último sistema será entregado en 1988 para el satélite de reserva.

### Referencias

- 1 PCM Telecommand Standard: *European Space Agency PSS-45 (TTC.A.01)*, abril 1978, edición 1.
- 2 PCM Telemetry Standard: *European Space Agency PSS-46 (TTC.A.02)*, abril 1978, edición e.
- 3 Ranging Standard: *European Space Agency TTC.A.04*, marzo 1980, edición 1.
- 4 Radio Frequency and Modulation Standard: *European Space Agency TTC.A.05*, mayo 1981, edición 1.

**Franz Gass** nació en Bischofsheim, Hungría, en 1938. Tras su graduación en ingeniería de comunicaciones en la Universidad Técnica de Stuttgart en 1964, entró en SEL, donde se ha dedicado al desarrollo de unidades de proceso de datos para aplicaciones espaciales, primero en calidad de ingeniero y luego como jefe de grupo de ingeniería. Desde 1980 el Sr. Gass ha dirigido un laboratorio de ingeniería para sistemas de datos.

**Manfred Kracht** nació en Heringsdorf, República Democrática de Alemania, en 1949. Estudió tecnología de las telecomunicaciones en la Fachhochschule Konstanz, graduándose en 1972. Dos años más tarde entró en SEL, donde trabajó como ingeniero de desarrollo en varios proyectos de sistemas de radioenlace. Desde 1984 el Sr. Kracht se ha dedicado a la ingeniería de sistemas de la sección de RF del subsistema STT del DFS.

# Seguimiento de posición de naves espaciales mediante el sistema de posicionado mundial

La red de satélites del sistema de posicionado mundial puede servir para determinar con exactitud la posición de cualquier vehículo terrestre o espacial. Se ha preparado un nuevo receptor para nave espacial que mediante técnicas de proceso digital de señales y tecnologías VLSI de diseño a medida determina la posición con una precisión de 30 m.

**W. Beier**  
**H. Kallerhoff**

Standard Elektrik Lorenz AG, Stuttgart,  
República Federal de Alemania

## Introducción

Hasta ahora, el seguimiento de naves espaciales se ha confiado a sistemas situados en Tierra. En el futuro, sin embargo, podrá utilizarse el sistema de posicionado mundial por satélite (GPS), desarrollado en los Estados Unidos, cuya precisión es superior. A diferencia de los procedimientos usuales de medición de distancia en ambos sentidos, el GPS mide en un sólo sentido, transmitiendo unos satélites de posiciones conocidas señales de tiempo muy precisas. Cuando se reciben estas señales pueden medirse sus tiempos de propagación referidos al reloj del receptor. Así, el receptor puede utilizar cuatro mediciones del tiempo de propagación para calcular su posición y velocidad y la precisión de su propio reloj.

La configuración GPS completa tendrá al menos 18 satélites, tres en cada una de seis diferentes órbitas de 12 horas a una altura aproximada de 20.000 km. Además, una sección de control desde Tierra supervisará constantemente la operación de los satélites (en particular, sus posiciones y relojes). Esta red de satélites hará posible que un usuario localice con exactitud su posición en cualquier instante y en cualquier lugar de la superficie terrestre.

## Requisitos

En los últimos años se han desarrollado varios tipos de receptor GPS para usuarios situados en la Tierra. Generalmente, su diseño responde a necesidades específicas del usuario, condicionadas entre otros factores por la dinámica (velocidad y aceleración) a que se someten los receptores durante su empleo; hay pues que tener en

cuenta altos desplazamientos de frecuencia Doppler al diseñar los receptores GPS.

Hasta la fecha, SEL ha desarrollado dos tipos de receptores GPS para uso terrenal: un receptor monocanal para aplicaciones móviles y un receptor multicanal que también puede utilizarse a bordo de aviones. Tomando estos desarrollos como base, en 1986 se inició el diseño y preparación de un receptor GPS para aplicaciones espaciales.

Este nuevo tipo de receptor actuará como sensor de posición para el sistema de navegación de a bordo, a fin de ir actualizando la posición y calcularla asimismo con respecto a otras naves espaciales cooperadoras, que transmiten sus posiciones (obtenidas también de un receptor GPS) al sistema de navegación. Irá instalado a bordo de satélites en órbita, así como en vehículos y estaciones espaciales en órbitas aproximadamente ecuatoriales o polares. El receptor debe ser capaz de procesar los desplazamientos Doppler próximos a 45 kHz (en la frecuencia de transmisión de 1,57 GHz), resultantes de velocidades orbitales de hasta 8 km/s. Sin embargo, los receptores en el espacio no sufren grandes exigencias dinámicas, ya que las fuerzas generadas son débiles y las naves espaciales tienen una gran masa. En estas condiciones y en el supuesto de que hayan de recibirse señales horarias del satélite GPS de acceso público y no clasificadas, el receptor GPS puede determinar la posición y velocidad con errores respectivos inferiores a 30 m y 0,3 m/s, así como obtener información horaria del GPS, con precisión de  $\pm 5 \mu\text{s}$ . Además de los datos de posición absoluta, el receptor puede determinar su posición y velocidad con respecto a otra nave espacial, con un margen de error de 1 m ó 0,01 m/s, para distancias entre receptores cooperantes que no superen los 30 km.



**Análisis de exigencias**

Comparando la operación de un receptor de vehículo espacial en órbita baja con la de un receptor GPS en Tierra, está claro que las señales de satélites GPS pueden en el primer caso recibirse en condiciones geométricas y atmosféricas más favorables debido a la mejor visibilidad y a eliminarse el error de retardo producido al paso de la troposfera, por lo que puede alcanzarse mayor precisión. Contribuyen también a este mejor resultado la capacidad de determinar con precisión el movimiento de la nave espacial (y por tanto del receptor) en la órbita, y la leve aceleración debida a la maniobra orbital, cuyos efectos pueden hallarse con exactitud. El diseño del receptor espacial debe aprovechar al máximo estas ventajas, y tener en cuenta también las superiores frecuencias y variación más rápida del desplazamiento de frecuencia Doppler causadas por la mayor velocidad del receptor, pues de otro modo serían imposibles la adquisición de señal y el seguimiento, y estos acentuados efectos Doppler producirían medidas erróneas que rebajarían la exactitud.

Otro problema a resolver es el requisito de alta precisión, necesario para el posicionado relativo. Mientras que la exactitud del posicionado absoluto viene determinada sobre todo por fuentes de error externas, la precisión del posicionado relativo depende casi enteramente de los errores del propio receptor (ya que en esta determinación todos los errores externos se eliminan por diferenciación de los datos de posición). Las tablas 1 y 2 resumen las contribuciones de varias fuentes de error al balance global de errores para posicionado relativo y absoluto, y muestran los errores de posición resultantes. La tabla 2 indica que pueden lograrse errores de posicionado relativo tan pequeños como 5 m sólo si el error debido al ruido del receptor se mantiene por debajo de 1 m. No obstante, para ello es necesario utilizar técnicas complementarias de supresión del ruido (como es el aplanamiento de las mediciones de distancia con ayuda de mediciones de fase de la portadora), ya que la baja relación señal/ruido de la señal reci-

**Tabla 1 – Balance de errores para el posicionado absoluto**

Fuente del error	Error de distancia equivalente	
	Sistemático	Estadístico
Reloj del satélite GPS	2,7 m	0,7 m
Predicción de efemérides	2,5 m	
Predicción de perturbación	1,0 m	
Compensación de retardo ionosférico	7,0 m	
Difusión por multitrayecto	0,2 m	
Ruido del receptor		1,0 m
<b>Error medio</b>	<b>8,0 m</b>	<b>1,2 m</b>
Factor de mejora del filtro Kalman		3
PDOP		3
<b>Error absoluto de posición</b>	<b>24 m</b>	

Valores expresados en distancias equivalentes para el usuario. Los errores de posición resultantes de estos errores se calcularon adoptando un valor 3 del llamado PDOP, que expresa cómo se transforma un error de medición de distancia en un error de posición, dentro de una configuración favorable de satélites GPS, suponiendo que los errores estadísticos en la medición de distancia se dividen por 3 mediante un filtrado tipo Kalman en el receptor, y que durante el posicionado relativo ambos receptores tienen el mismo error. PDOP significa Precision Dilution of Position.

**Tabla 2 – Balance de errores para el posicionado relativo**

Fuente del error	Error de distancia equivalente	
	Sistemático	Estadístico
Reloj del satélite GPS		0,7 m
Recepción multitrayecto	0,2 m	
Ruido del receptor		1,0 m
<b>Error medio</b>	<b>0,2 m</b>	<b>1,2 m</b>
Factor de mejora del filtro Kalman		3
PDOP		3
<b>Error relativo de posición</b>	<b>1,9 m</b>	

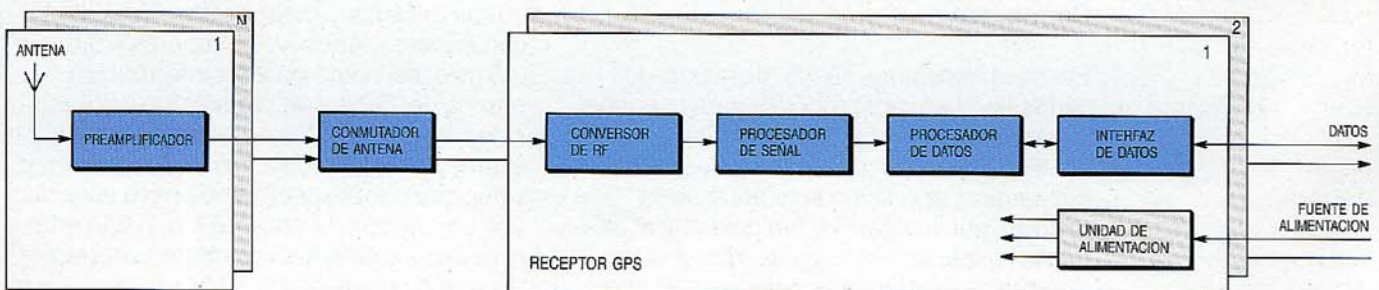
bida (Tabla 3) produce errores de ruido de unos 10 m en las referidas mediciones de distancia.

**Principios del receptor**

El receptor espacial del sistema GPS consta de unidad de antena y unidad receptora. La figura 1 muestra el diseño de un sistema receptor compuesto de tales partes funcionales.

Tomando como punto de partida que la posición de una nave espacial es variable, y que las antenas GPS con suficiente ganancia tienen zonas de cobertura hemisférica,

**Figura 1 Diagrama de bloques del receptor GPS para determinar la posición de la nave espacial.**



el paso de entrada de RF debe ser diseñado de manera que las señales GPS puedan ser recibidas por una antena única o por una configuración de antenas múltiples que apunten en varias direcciones. Ello implica, no obstante, que el receptor debe ser capaz de seleccionar una sola antena o, si fuera necesario, varias antenas sucesivamente dependiendo de la actitud de la nave espacial, con el fin de asegurar que puedan recibirse señales desde los satélites GPS deseados. Asimismo significa que el receptor ha de poder procesar secuencialmente las señales GPS recibidas por varias antenas.

Dado el bajo nivel de la señal recibida, cerca de cada antena ha de montarse un preamplificador tal que, siendo su factor de ruido de 4 dB, el efecto del cable de antena sobre la temperatura de ruido eficaz pueda mantenerse tan bajo que la temperatura de ruido total no exceda los 705 K (Tabla 4).

La unidad receptora utiliza redundancia para aumentar la fiabilidad del sistema y ofrecer tolerancia a errores aislados. La función de esta unidad es la de medir distancias y variaciones de distancia a los satélites GPS individuales, corregir los errores introducidos por el tiempo de propagación ionosférico, calcular posición, velocidad y tiempo con la ayuda de los valores de medición corregidos, así como determinar el instante en que son válidos la posición calculada y los datos de velocidad. Para realizar todo esto, debe entregarse a la unidad receptora información sobre la actitud del vehículo espacial, sobre cualquier maniobra orbital o de actitud y, posiblemente, sobre los satélites GPS a utilizar (si ha de efectuarse un posicionado relativo).

El receptor funciona en los modos de *operación*, *reserva* y *telemando*. En el modo de operación, las señales recibidas de los satélites GPS se procesan, bien secuencialmente (cuando provienen de más de una antena), o en paralelo (cuando todas las señales llegan por una sola antena). Cualquier información disponible sobre la actitud y maniobra de la nave espacial sirve al circuito procesador para calcular la posición y la velocidad de dicha nave, y convertirlas en datos de salida. El código y los datos del programa, necesarios para una rápida adquisición de las señales de satélite (posiciones del satélite GPS, posición del receptor y los datos horarios correspondientes) se pueden cargar al receptor en el modo de telemando. Finalmente, en modo de reserva, el código del programa y los datos principales (posiciones del satélite GPS, posición del receptor) se guardan en la memoria, y se activa el reloj de a bordo para que las señales del GPS puedan adquirirse con rapidez al conmutar al modo de operación.

**Tabla 3 – Balance del enlace**

Potencia de salida de la señal	26,8 dBW
Atenuación de alineación	-1,0 dB
Atenuación de camino	-185,8 dB
Atenuación de polarización	-0,4 dB
Ganancia de la antena	-3,0 dB
Potencia de la señal recibida	-163,4 dBW
Temperatura de ruido eficaz	28,5 dBK
Constante de Boltzmann	-228,6 dBW/Hz K
Densidad de salida del ruido	-200,1 dBW/Hz
Relación de densidad de salida señal/ruido	36,7 dB Hz

**Tabla 4 – Factores de temperatura de ruido**

Universo	17 K
Tierra	125 K
Cable de antena	57 K
Preamplificador	491 K
Cable del receptor	4 K
Receptor	11 K
Temperatura de ruido eficaz	705 K

Ambos receptores constan de un convertidor de frecuencia, procesador de señal, procesador de datos, interfaz de datos y unidad de alimentación. El diseño de estas unidades funcionales viene en gran medida determinado por los procedimientos de proceso digital de datos y señales, aplicados en el receptor de SEL. Es de particular importancia el concepto de proceso de señales, que se lleva a la práctica mediante un procesador de señal programable unido a módulos digitales desarrollados especialmente para procesar las señales del GPS. Estos módulos, diseñados como circuitos VLSI a medida, realizan las tareas de tratamiento de señal que son demasiado rápidas para el citado procesador.

Otro concepto esencial del receptor de SEL es la conversión en un solo paso de las señales recibidas, desde la banda de alta frecuencia hasta la frecuencia intermedia. La FI se elige de forma que caiga justo por encima de la frecuencia Doppler más elevada. La conversión utiliza una frecuencia de mezcla fija para que la señal de FI fluctúe con el desplazamiento instantáneo de frecuencia Doppler. La señal recibida se digitaliza inmediatamente después de la conversión, y a continuación se demodula en el procesador de señales.

Tanto el concepto de proceso digital de señal como la conversión de frecuencia en un solo paso con una frecuencia de mezcla fija, contribuyen a mejorar el comportamiento y a reducir el peso y el consumo del receptor.

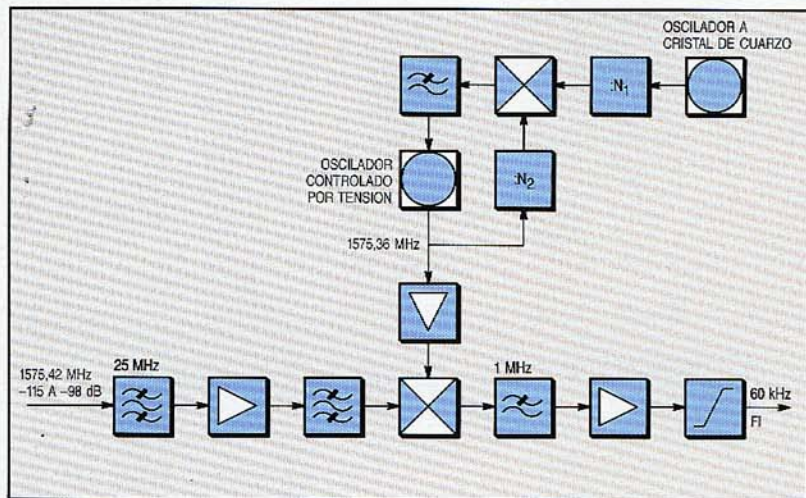


Figura 2 Diagrama de bloques del convertidor de frecuencias.

### Diseño del receptor

Las señales GPS recibidas son señales de banda ancha, transmitidas en un formato de código multiplexado y separadas en el receptor por multiplicación con los códigos que corresponden a las señales GPS deseadas. Por esta razón, después de limitar la banda y sin aplicar técnicas de selección de banda estrecha, pueden pasar por una amplificación en banda ancha y ser convertidas a frecuencia intermedia, donde

Figura 3 Diagrama de bloques del proceso de señal.

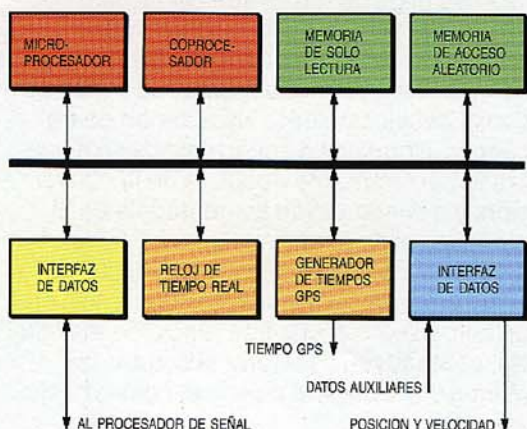
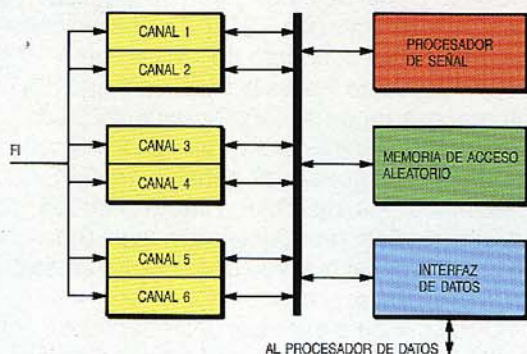


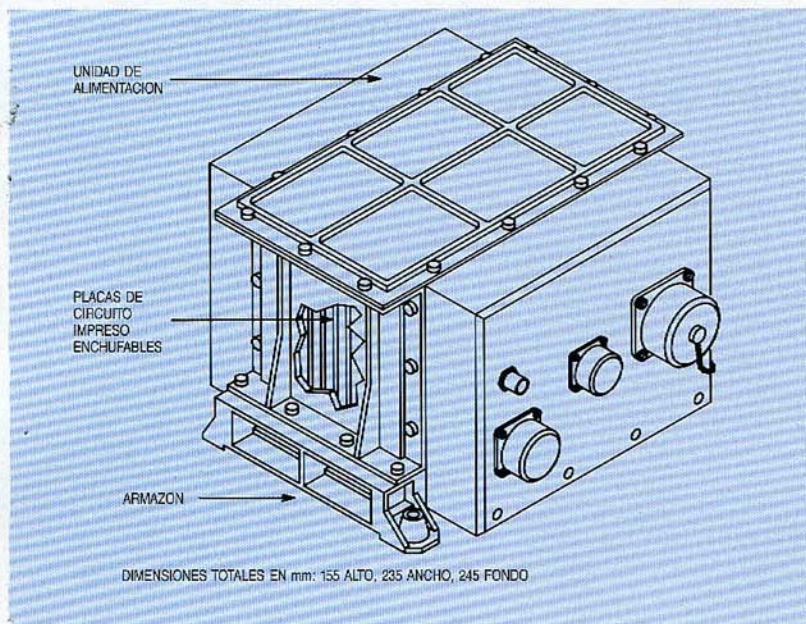
Figura 4 Diagrama de bloques del procesador de datos.

una vez más se limita su banda antes de digitalizarse (Fig. 2). Como esta digitalización se hace a 1 bit y la señal de entrada es de bajo nivel dinámico, no se requiere control de ganancia en el amplificador. La frecuencia del mezclador la genera un oscilador controlado por tensión, de frecuencia estabilizada por un oscilador de cristal de cuarzo, con ayuda de un bucle de enganche de fase.

Los bucles de portadora y código en el procesador de señal detectan, siguen y demodulan las señales GPS recibidas, y miden las fases de dichos portadora y código, para la determinación de distancia y de su ritmo de variación. El reconocimiento de bits y el sincronismo de trama para los datos transmitidos junto con las señales GPS, se llevan también a cabo en el procesador de señal. Se utilizan bucles digitales Costas para sincronización de la portadora, y bucles digitales de retardo para sincronización del código. Las funciones de estos bucles en parte las realizan circuitos digitales especialmente diseñados, y en parte una programación que se ejecuta en un procesador de señal TI 320 (Fig. 3).

Se utiliza tecnología VLSI a medida para los circuitos de desarrollo específico, lo que permite incluir en un solo dispositivo VLSI todos los circuitos necesarios para procesar señales procedentes de dos satélites GPS. De este modo es posible, sin grandes gastos adicionales, utilizar tres circuitos VLSI para preprocesar a la vez señales de seis satélites. Cuando las señales GPS se reciben por varias antenas, solamente se realiza el preproceso en los canales individuales cuando se conectan las correspondientes antenas. Cuando todas las señales llegan por una sola antena, se preprocesan en paralelo. En ambos casos, los programas del procesador de señal realizan un proceso ulterior de las señales, en secuencia.

El procesador de datos consta de un microprocesador asistido por un coprocesador para tareas matemáticas, una memoria ROM, una RAM y un reloj de tiempo real (Fig. 4). Existen, además, interfaces para la entrada y salida de datos y un generador de tiempos del sistema GPS. La función del procesador de datos es controlar las funciones del receptor, seleccionar los satélites GPS cuyas señales han de ser recibidas, seleccionar las correspondientes antenas, asegurar la adquisición de bucles de portadora y código, y eliminar los errores de retardo ionosférico en las mediciones de distancia que proporciona el procesador de señal. Asimismo computa la posición y velocidad del receptor a partir de las medidas corregidas, calcula el error del reloj de a bordo y, finalmente, controla el intercambio de datos con el procesador de señal y el



**Figura 5**  
Diseño mecánico del receptor GPS.

exterior a través de los interfaces de datos y del generador de tiempos GPS.

La determinación de los errores de posición, velocidad y señal horaria se basa en el uso de un filtro tipo Kalman que estima los valores esperados de estos parámetros en base a las medidas existentes, y a continuación los ajusta, utilizando una evaluación ponderada de las nuevas medidas. Como el receptor describe órbitas alrededor de la Tierra, se aplican las ecuaciones de Kepler para predecir los valores de medición. Esto permite reducir todavía más el ruido causado por el bajo nivel de señal, aumentando así la precisión de las medidas. Sin embargo, esta ventaja se consigue a expensas de un mayor tiempo de reacción del filtro Kalman a las desviaciones inesperadas. Para compensar esto, se utilizan los datos sobre aceleración durante las maniobras orbitales para facilitar el proceso de cálculo en el filtro Kalman.

La figura 5 muestra el diseño mecánico del receptor espacial, que consta de cinco placas enchufables para la alta frecuencia y módulos digitales, más el módulo de alimentación. Dos de las placas enchufables corresponden al procesador de datos (con

sus memorias e interfaces de datos), una placa al convertidor de frecuencia, una al procesador de señales y una al generador de tiempos GPS. El volumen del receptor es de 6 litros, su masa de 6 kg y tiene un consumo de 27 W.

## Conclusiones

El diseño del receptor espacial GPS ha sido definido en colaboración con la Agencia Europea del Espacio; el desarrollo en sí lo ha iniciado SEL. Cuando se hayan ultimado los procedimientos de calificación espacial, el receptor se utilizará para futuras misiones espaciales a bordo de satélites, que llevarán a término misiones científicas de astronomía y de observación terrestre. Se usará también, junto con los elementos espaciales de cada nación del programa europeo Columbus, como parte del proyecto internacional de estación espacial.

## Agradecimientos

El trabajo descrito en este artículo fue en parte financiado por el Ministerio Federal de Investigación y Tecnología y por contratos con la Agencia Europea del Espacio. Los autores asumen toda la responsabilidad del contenido.

**Wolfgang Beier** nació en 1948 en Hameln. Estudió comunicaciones eléctricas y teoría de la información en Paderborn. Desde 1970 ha trabajado en SEL en desarrollo de sistemas de radionavegación y equipos de aviación y tierra para ayudas al aterrizaje, así como de sistemas de navegación inercial y doppler. El Sr. Beier es actualmente responsable del desarrollo del receptor digital GPS de código C/A, para instalaciones aeroespaciales, terrestres y marítimas.

**Hermann Kallerhoff** nació en Osnabrück, en 1929. Estudió comunicaciones eléctricas en la Universidad Técnica de Braunschweig, y en 1956 entró en SEL, donde desde 1963 ha trabajado en desarrollo de sistemas de proceso de datos. El Sr. Kallerhoff fue el responsable del desarrollo de los sistemas de telemedida y telemando para el satélite científico alemán AEROS y para el sistema de navegación NAVEX, lanzado en la primera misión alemana del Spacelab, en 1985. Actualmente es responsable del desarrollo del receptor de nave espacial del sistema GPS.

# Demodulador de datos de alto rendimiento para aplicaciones del espacio lejano

El demodulador MIC/MDP/MP concebido para recibir las débiles señales de la nave espacial Giotto durante su encuentro con el cometa Halley, así como antes y después del mismo, alcanza prestaciones muy cercanas a los límites teóricos. Al mismo tiempo, el uso generalizado del proceso digital de señal asegura que el demodulador es útil en una amplia gama de aplicaciones exigentes.

**T. Tack**

Alcatel Bell Telephone, Amberes, Bélgica

## Introducción

El encuentro de la sonda espacial europea (llamada Giotto en honor del pintor medieval) con el cometa Halley el 14 de marzo de 1986, representó la culminación de un gran esfuerzo acometido por científicos y técnicos de todo el mundo.

En 1980, mientras los astrónomos correlacionaban y precisaban más las predicciones orbitales, la Agencia Europea del Espacio (ESA), ultimó un proyecto completo que incluía la construcción de un ingenio espacial y el despliegue de las instalaciones pertinentes en tierra. El ESOC (Centro Europeo de Operaciones Espaciales), organismo responsable del despliegue y explotación de las instalaciones de apoyo en tierra, construyó dos estaciones de telemando y recepción en Australia, una en

Carnarvon y la otra en Parkes; en la última había de utilizarse la antena de 64 metros perteneciente al CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization).

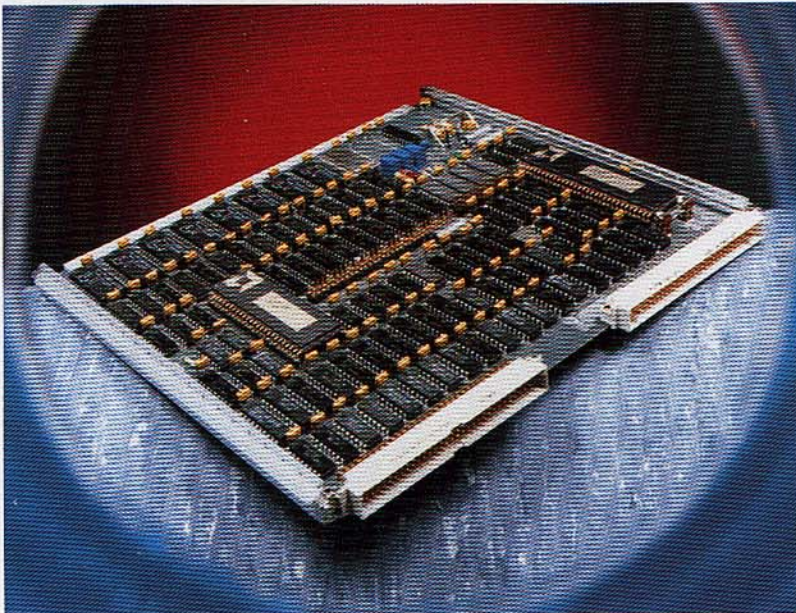
La estación de Carnarvon, equipada con una antena de 15 m y demoduladores de alto rendimiento, se encargó de la transmisión de señales de telemando, las mediciones de distancia y variación de distancia, y la recepción de señales de telemada a 360 bit/s. La estación del DFVLR (Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt) de Weilheim, con su antena de 30 m, se utilizó como reserva. La estación de Parkes tuvo que asumir la fase final y crucial de la misión. En efecto, dado que todos los experimentos se iniciaron al aproximarse la sonda al cometa, a unos 144 millones de kilómetros de la Tierra, la velocidad de transmisión de los datos de telemada se aumentó por dos veces, primero a 5,76 kbit/s y después a 46,08 kbit/s.

Durante los tres días del encuentro con el cometa Halley, la estación de Parkes tuvo el soporte de la red de la NASA para espacio lejano, consistente en tres estaciones con antenas de 34 m en Madrid (España), Canberra (Australia) y Goldstone (Estados Unidos).

## La estación de Parkes

La estación de Parkes era excepcional por muchos motivos. Además de su antena de 64 m, equipada con un paso de entrada especial a 8 GHz, comprendía dos contenedores transportables que encerraban un sistema integrado, en su mayor parte preparado específicamente para la misión. La cadena de recepción consistía en un amplificador de muy bajo ruido basado en tecno-

Placa de procesador de señal en tiempo real



**Tabla 1 — Especificaciones principales del demodulador de datos de alto rendimiento**

Señal de entrada:	tipo	MIC/MDP/MP: NRZ ó SPL
	portadora	10 MHz (búsqueda $2 \times 100$ kHz)
	subportadora	2 kHz a 1200 kHz
	velocidad binaria	40 bit/s a 600 kbit/s (SPL) 40 bit/s a 1200 kbit/s (NRZ)
relación de velocidad binaria de subportadora		1 a 1024, hasta 600 kbit/s
		1 por encima de 600 kbit/s
relaciones de potencia		
	— portadora/total	> -8 dB
	— datos/portadora	> -14 dB
	— EBNO*	> -3 dB
Funciones:	adquisición de portadora	
	adquisición de subportadora	
	adquisición de reloj de bit	
	resolución de la ambigüedad MDP	
	decisión ponderada en 3 bits	
	total programabilidad	
	control remoto y local	
Rendimiento:	autoarranque por defecto	
	autopruueba y control de prestaciones incorporado	
	TEB en comparación con los límites teóricos (o degradación tecnológica):	
	para $-1,5 \text{ dB} < \text{EBNO} < 1 \text{ dB}$ :	$< 0,4 \text{ dB}$
	para $1,0 \text{ dB} < \text{EBNO} < 11 \text{ dB}$ :	$< 0,2 \text{ dB}$
típica	: 0,15 dB	

\* EBNO: energía por bit dividida por la densidad de ruido.

logía maser seguido de un conversor reductor de frecuencias relativamente convencional y el receptor. La señal de salida del receptor se llevaba a un demodulador de datos de alto rendimiento, seguido por un decodificador. Tras un cierto preproceso, la trama de datos decodificada se empaquetaba para ser transmitida por la red de comunicaciones de la ESA.

El *decodificador en cascada* combina un decodificador convolucional (Viterbi) y un decodificador de códigos bloque (Reed-Solomon), ambos con corrección de errores, que mejoran considerablemente la tasa de error de bit (TEB) y por consiguiente la precisión de la señal recuperada. La ganancia inherente al proceso de codificación, el rendimiento del demodulador precedente, y el elevado valor de G/T (relación de la ganancia a la temperatura de ruido) de la antena y el amplificador de bajo ruido, son los factores dominantes que determinan la calidad del flujo de información resultante. Para un demodulador de teledemida típico, la degradación técnica, que mide el rendimiento de un equipo en comparación con un modelo teórico ideal, es de 1,5 a 2 dB. Por el contrario, el demodulador elaborado por Alcatel Bell tiene una degradación técnica de 0,15 dB solamente, valor tan pequeño que sólo puede medirse por métodos estadísticos.

Cuando se han de recibir señales débiles, los decibelios resultan ser muy costosos. Los precios de las antenas aumentan acusadamente con el tamaño, y además las etapas de entrada de bajo ruido requieren

técnicas de refrigeración especiales para paliar las restricciones fundamentales inscritas en las leyes termodinámicas. De este modo, el alto rendimiento del demodulador contribuyó con su granito de arena al éxito global de la gigantesca misión Giotto.

### Concepto del demodulador de alto rendimiento

En línea con las directrices del ESOC, este demodulador se ha diseñado con arreglo a una especificación suficientemente genérica para cubrir la especificación general de teledemida de la ESA. Puesto que la nave espacial Giotto tenía que modificar en distintas fases de la misión sus características de señal, tales como la velocidad binaria y la frecuencia de subportadora, se hacía necesario que el demodulador fuese programable, lo que además ofrecía la ventaja de extender su dominio de aplicación. La tabla 1 resume los principales aspectos de la especificación general del sistema. En resumen, se exigía al demodulador una degradación tecnológica despreciable, un umbral de adquisición bajo, una salida de datos con decisiones ponderadas, y la facultad de tratar diversas señales de teledemida.

Las normas de teledemida de la ESA definen un esquema de modulación NRZ/MDP/MP, en el que un tren de datos NRZ (sin retorno a cero) module por desplazamiento de fase (MDP) a una subportadora sinusoidal, y la señal resultante module finalmente la fase (MP) de una portadora. La portadora remanente, a menudo débil, sirve a la estación de apoyo en tierra para efectuar el seguimiento, tanto angular como de frecuencia, de la nave. La "versión Giotto" del demodulador acepta velocidades binarias NRZ comprendidas entre 0,04 y 300 kbit/s. Actualmente se está potenciando el demodulador para tratar datos codificados en bifásico (SPL, *split phase level*), con velocidades de transmisión que alcancen los 1200 kbit/s.

El diseño general del demodulador, tal como lo prefirió la ESOC, se basa en el principio de la correlación de máxima verosimilitud, según el cual la señal recibida se demodula o multiplica primeramente por la portadora recuperada y por la subportadora antes de inyectarse al filtro adaptado. El orden de las anteriores operaciones es irrelevante. Dado que en general se han de tratar varias frecuencias de subportadora, la demodulación de éstas se realiza primero. La energía espectral de la señal se reagrupa de este modo en torno a la frecuencia portadora. La tabla 2 enumera las funciones básicas del demodulador.

Tabla 2 – Clasificación estructurada de las funciones básicas del demodulador

Receptor de correlación por máxima verosimilitud
demodulación
demodulación de subportadora
mezclador
subportadora sincronizada
bucle Costas
cadena de datos
cadena de errores
correlador
filtro
oscilador controlado por tensión
generador de formas de onda
demodulación de portadora
mezclador
portadora sincronizada
bucle de enganche de fase
detector de fase
filtro
oscilador a cristal controlado por tensión
sincronización de bit y decisión
filtro adaptado
reloj de bit sincronizado
bucle de seguimiento de multiplicación lineal
señal de datos
señal de errores
correlador
filtro
modulador de fase
codificación de decisión ponderada

**Realización**

En la descripción conceptual simplificada quizá no parezca obvio que así se garantice la máxima calidad alcanzable, y en realidad esto solamente es cierto cuando se satisfacen los supuestos teóricos implicados. La realización de Alcatel Bell, que utiliza en profusión las técnicas de proceso digital de señal, se ha optimizado cuidadosamente con vistas a la precisión que puede lograrse en los puntos críticos del sistema. La figura 1 muestra un diagrama de bloques del demodulador.

La demodulación de la subportadora se lleva a cabo utilizando un mezclador no ideal, cuyas deficiencias pueden salvarse aplicando una forma de onda distorsionada previamente a voluntad; estas ondas digitalizadas se almacenan en memoria. La salida del generador de formas de onda hacia el mezclador se sincroniza con una señal de reloj patrón, obtenida del oscilador controlado por tensión del bucle de Costas.

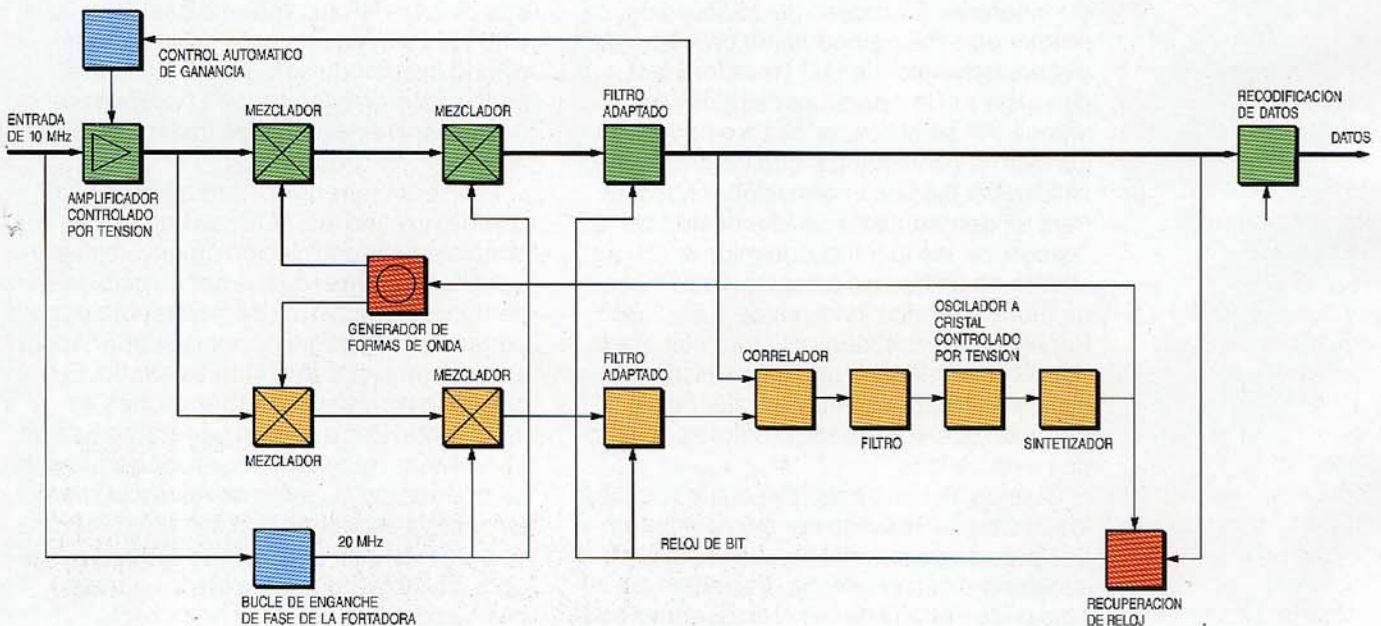
La demodulación de la portadora sigue a la demodulación de la subportadora, y se combina con una conversión analógico/digital en la que se muestrean alrededor de 20 millones de muestras por segundo, el doble de la frecuencia portadora. La señal muestreada se multiplica por la portadora recuperada y después se aplica al filtro adaptado, el cual está realizado como filtro de muestras múltiples, quasicontinuo.

La sincronización de bit la lleva a cabo un bucle de seguimiento de multiplicación lineal, el cual es una versión mejorada de un bucle de seguimiento por transición de datos. Dado que la especificación inicial fijaba una relación entera entre la frecuencia de la subportadora y la del reloj de bit, el bucle de este último sólo tiene que resolver la deriva de fase de dicho reloj.

El comportamiento dinámico del demodulador de datos se controla mediante diferentes algoritmos de búsqueda y detección de enganche. Existen tres modos de búsqueda: predictivo, manual y automático. El posible deslizamiento del reloj de bit se detecta por comparación continua entre el valor muestreado y la media deslizante adecuadamente calibrada de las muestras precedentes.

Como el correlador del bucle Costas, situado en el bucle de sincronización de

Figura 1 Diagrama de bloques del demodulador de datos de alto rendimiento utilizado para la misión Giotto.



subportadora, tiene dos puntos estables de operación, podría haber necesidad de resolver ambigüedades en la MDP. Para ello se vigila el desplazamiento de fase de la onda de subportadora generada digitalmente, con las correcciones de fase adecuadas para los efectos asociados al retardo de grupo. Esta función puede inhibirse en aquellas aplicaciones en las que se prefiera resolver la ambigüedad MDP por medio del decodificador o del sincronizador de trama que sigue al demodulador.

Todos los algoritmos utilizados en el demodulador están parametrizados, ya que son muy variables las características de la señal: intensidad, inestabilidad de frecuencia, frecuencia de subportadora y velocidad binaria. Así, las características del filtro, las velocidades de muestreo y numerosos factores de escala se ajustan para cada configuración particular. Este alto grado de programabilidad se ha logrado mediante la utilización de procesadores de señal digital en tiempo real.

Existen cinco de estos procesadores rápidos en el demodulador, respectivamente para las funciones de los dos filtros adaptados, del filtro de bucle y de correlador de subportadora del bucle Costas, del bucle del reloj de bit completo, y de la recodificación de decisión ponderada. Todo el equipo de proceso digital es idéntico, siendo el microprograma quien determina las distintas funciones. Los programas especializados están parametrizados con valores suministrados por el controlador interno del demodulador, un microprocesador convencional que controla la configuración adoptada y el comportamiento operacional (p. ej., actividades de sincronización o resolución de ambigüedades MDP).

El procesador rápido en tiempo real es quizás el elemento más importante de los muchos diseñados por Alcatel Bell para este demodulador de alto rendimiento. A velocidades de 1200 kbit/s no se dispone de mucho tiempo para realizar un cierto número de pasos de programa durante un periodo de bit. El procesador de señal se construye mediante pastillas de procesadores microprogramables de alta velocidad, que operan con un reloj ajustable situado en torno a los 10 Mbit/s. La memoria de microprograma contiene 2048 palabras de 64 bits en pastillas de RAM (memoria de acceso aleatorio) muy rápidas. Durante la fase de configuración el microprograma es transvasado desde la ROM (memoria de sólo lectura). La memoria de datos contiene 1024 palabras de 16 bits.

Las prestaciones del procesador se potencian mediante equipo adicional situado a bordo, en particular un multiplica-

dor de 16 bits por 16 bits. Un bus bidireccional rápido, independiente del bus controlador del microprocesador, sirve para intercambiar datos entre los procesadores de señal. No obstante, lo que ha permitido



**Demodulador de datos de alto rendimiento desarrollado por Alcatel Bell para misiones espaciales como la sonda Giotto que se aproximó al cometa Halley.**



alcanzar el nivel de prestaciones exigido ha sido el diseño del microprograma, que aprovecha plenamente las posibilidades del tratamiento de instrucciones en paralelo y los efectos "pipeline". Incluyendo todo, la potencia de proceso en tiempo real dentro del demodulador sobrepasa claramente los 50 Mips (millones de instrucciones/segundo).

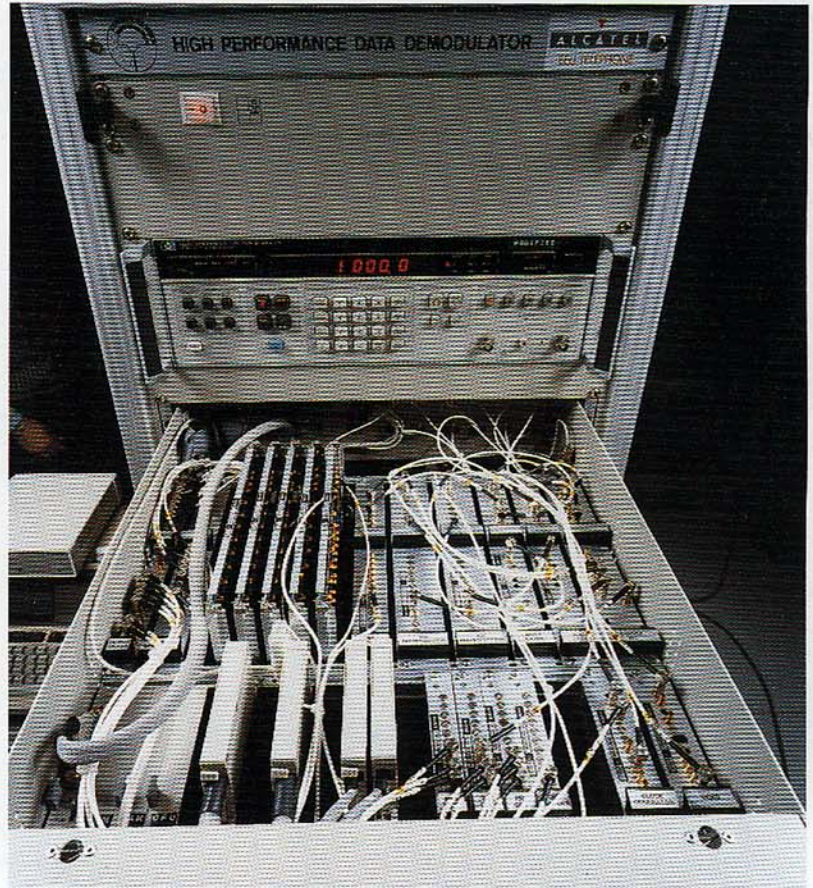
### Sistema de demodulación completo

Hasta ahora sólo se han descrito las funciones básicas del demodulador. Sin embargo, también se le han incorporado amplias funciones de soporte con el fin de aprovechar al máximo estas capacidades. Son éstas esencialmente funciones de control, supervisión y ajuste del demodulador para cada aplicación específica. Hay otras funciones integradas que permiten verificar el rendimiento del demodulador durante la calibración y en funcionamiento operativo.

Existen dos niveles de control y supervisión. El primero corresponde a las tareas dedicadas al control interno, las cuales se ejecutan mediante un sistema de microprocesador integrado en el demodulador; éste se encarga del procedimiento completo de arranque por defecto, iniciado cada vez que se conecta o restaura la alimentación externa. Además, intercambia datos con todos los bloques funcionales, gestiona el comportamiento operativo y se comunica con el segundo nivel de control. Este último asume un doble papel, pues proporciona un interfaz para operador local y funciones de supervisión y control a distancia.

Un ordenador de instrumentación clásico asegura el control local, permitiendo al operador la puesta a punto y la interrogación interactiva del demodulador a través del teclado y la pantalla gráfica. El controlador local ofrece algunas opciones para evaluar el funcionamiento del demodulador, tales como la representación de la tasa de errores de bit (TEB) estimada y la visualización de formas de onda. Sus unidades de disco, de 3,5 pulgadas, contienen habitualmente todos los ficheros de puesta en servicio, incluido el microprograma destinado a los procesadores en tiempo real y los datos relativos a las formas de onda. El demodulador también puede controlarse a distancia a través de un interfaz normalizado de instrumentación, tal como el bus IEEE-488 ó CEI-625.

Además de las funciones de control, el demodulador posee diversos medios para pruebas globales, valiéndose de un generador de secuencias pseudoaleatorias, un codificador convolucional, un modulador de



Bandeja del demodulador mostrando los circuitos electrónicos.

subportadora y un modulador de portadora que puede conectarse a la entrada del demodulador o reemplazarse por unidades externas. En el lado receptor existen dos contadores de la TEB independientes que, conjuntamente con el codificador convolucional interno o externo y un decodificador externo compatible, permiten las mediciones directas de dicha TEB antes y después de la decodificación convolucional. Puede utilizarse una disposición menos compleja para la simulación de señales no codificadas.

Físicamente el demodulador de datos de alto rendimiento ocupa un armazón estándar de 19 pulgadas totalmente equipado, dejando espacio para un generador de pruebas suplementario. Con una sola excepción, el demodulador y sus funciones de prueba incorporadas tiene cabida en un contenedor ad-hoc de 400 mm de altura. Dicha excepción la constituye el oscilador controlado por tensión del bucle de subportadora, compuesto de un oscilador interno y un sintetizador convencional debidamente modificado. El controlador local, junto con su unidad de visualización y su unidad de disco, ocupa alrededor de un tercio del armazón. La fuente de alimentación del demodulador, con múltiples tensiones de salida, se monta en una bandeja independiente de 19 pulgadas provista de refri-

geración forzada, al objeto de atender bien el consumo de 40 A CC.

### **Mejoras futuras**

Durante la misión Giotto, los módulos de soporte lógico aseguraron una demodulación óptima de señales NRZ/MDP/MP para velocidades que podían alcanzar los 300 kbit/s. Sin embargo, se ha demostrado la factibilidad de extender el concepto a velocidades binarias superiores y a datos codificados según el modo SPL, y se ha acometido su realización. Se dispondrá de tal mejora en todos los demoduladores futuros y podrá incorporarse fácilmente a todos los ya existentes.

Están en proyecto otro tipo de mejoras, concretamente sustituir el controlador local convencional por una versión más integrada, en línea con la evolución actual de las operaciones de control en la estación terrena. Asimismo, se estudia la posibilidad de efectuar en el futuro misiones de espacio lejano u otras misiones difíciles con distintas

características de señal. No sería prudente considerar inmejorable una realización técnica como la de este demodulador de datos, por muy perfeccionado que esté, y por ello Alcatel Bell se compromete a apoyar su evolución, así como a extender su campo de aplicaciones en todos los casos posibles.

**Tom Tack** nació en Amberes, Bélgica, en 1947. En 1971 se graduó en electrónica por la Universidad de Gante, donde fue nombrado profesor adjunto del centro de ordenadores analógicos y del laboratorio de control automático. Finalizado el servicio militar, trabajó para Control Data Corporation como ingeniero técnico-comercial para configuraciones y aplicaciones de ordenadores. Ingresó en Bell Telephone en 1973, para participar como diseñador, ingeniero de sistema, y jefe de proyecto en el desarrollo de diversos sistemas de pruebas en tierra de naves espaciales, siendo posteriormente nombrado responsable de la ingeniería de producto de dos sistemas DAMA. El Sr. Tack también ha dirigido el grupo de ingeniería de programación y seguidamente el grupo de sistemas de programación y pruebas, siempre dentro del departamento espacial. Desde 1983 dirige el departamento de sistemas combinados satélite/Tierra, parte esencial del Grupo de Defensa y Aeroespacial de Alcatel Bell.

# Transmisión de imágenes por satélites de observación de la Tierra

Varios satélites de observación de la Tierra están ya en órbita o tienen programado su lanzamiento. Mediante instrumentos de alta precisión realizan observaciones en varias bandas espectrales, y transmiten seguidamente a la estación terrena las imágenes obtenidas por un enlace de muy alta calidad. La información de estas imágenes sirve a un gran número de aplicaciones.

**G. Schang**

Alcatel Espace, Toulouse, Francia

**P. Van der Stock**

Alcatel Bell Telephone, Amberes, Bélgica

## Introducción

La observación de la Tierra desde el espacio se basa en la teledetección. Los satélites utilizan todas las técnicas existentes para adquisición y proceso remoto de la información que suministra la radiación emitida, reflejada o propagada por cualquier objeto en la superficie terrestre. Con ayuda de diversos instrumentos se analiza esta radiación, tanto en frecuencias radioeléctricas como ópticas, lo que abre una gran variedad de aplicaciones: cartografía, prospección minera, agricultura, análisis de humedad del suelo, mejora de las tierras y vigilancia de la polución.

Un sistema espacial de observación de la Tierra consta de satélite y segmentos terrestres.

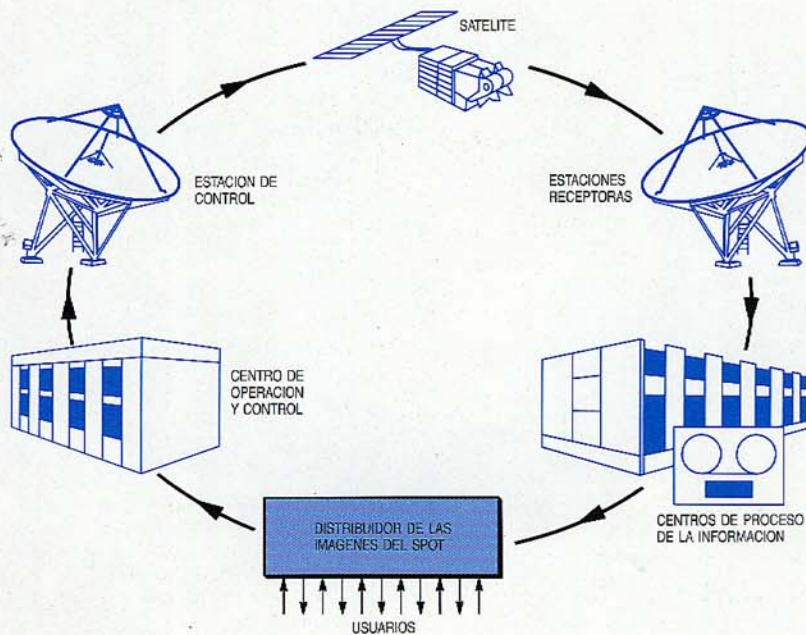
El satélite, normalmente colocado en una órbita baja con alta inclinación respecto al plano del ecuador, transporta una carga útil constituida por instrumentos fotográficos o de radiofrecuencia, con los equipos electrónicos asociados para procesar los datos de las imágenes y transmitirlos hacia Tierra. La elección de la órbita permite explorar por completo el globo terráqueo en menos de un mes y actualizar la información a intervalos regulares. En el caso de la teledetección óptica, la elección de una órbita heliosíncrona permite mantener las mismas condiciones de iluminación en cada pasada sobre un objetivo dado.

El segmento terreno abarca las estaciones que reciben las señales de imagen y gobiernan el satélite (telemedida y telemando), junto con un centro de proceso de imágenes, y un centro de control de la misión que define el programa de trabajo del satélite.

Las compañías Alcatel están desarrollando equipos y subsistemas completos para los segmentos terreno y espacial de varios sistemas de observación. En particular, Alcatel Espace es contratista principal de toda la electrónica de la carga útil del SPOT, y es responsable del diseño, prestaciones e integración del sistema, así como del desarrollo del equipo de proceso digital de a bordo, del modulador MDP4 (en desplazamiento de fase cuadrivalente) y del generador de 8 GHz. Alcatel Bell ha desarrollado una familia de demoduladores MDP4 y MDP4A con suficiente versatilidad para ser utilizada en estaciones terrenas de varios sistemas de observación terrestre.

Como ejemplo, se cita aquí el satélite de observación SPOT. Las figuras 1 y 2 muestran el sistema y el satélite en sí. El SPOT1

**Figura 1**  
Principio del sistema SPOT de observación de la Tierra por satélite.



lleva funcionando desde febrero de 1986. El SPOT2 está ya preparado, con lanzamiento previsto para comienzos del año 1989, mientras que el SPOT3 se está fabricando. En la actualidad se estudia una nueva generación de satélites SPOT4 para mejorar las prestaciones y asegurar la continuidad después de 1992.

### Resumen de la misión SPOT

La misión del satélite SPOT es fotografiar toda la superficie de la Tierra en cuatro bandas espectrales: 0,5 a 0,59  $\mu\text{m}$ , 0,61 a 0,68  $\mu\text{m}$ , 0,79 a 0,89  $\mu\text{m}$  y 0,51 a 0,73  $\mu\text{m}$ . Las tres primeras bandas, que forman el *canal multiespectral*, son analizadas con una resolución espacial de 20 x 20 m, mientras que la cuarta banda, que constituye el *canal pancromático*, se analiza con resolución espacial de 10 x 10 m. La elección de bandas espectrales y sus resoluciones espaciales asociadas da acceso a numerosas aplicaciones tales como las prospecciones mineras y petrolíferas, cartografía, agricultura, forestación y mejora de las tierras.

La órbita heliosíncrona elegida es circular, a 822 km de altitud. Siendo la amplitud del campo de observación (o anchura de barrido) de 120 km en el suelo, en 26 días puede vigilarse la superficie entera del globo.

### Principios de funcionamiento de la carga útil

Para conseguir la anchura de barrido requerida, se capta la luz reflejada por el terreno en dos telescopios idénticos, cada uno de los cuales es capaz de analizar una franja de tierra de 60 km de anchura. Las imágenes obtenidas en el punto focal de cada telescopio, en cada una de las cuatro bandas espectrales, se analizan por detectores fotosensibles CCD (dispositivos de acoplamiento de cargas). Una hilera de 6.000 detectores analiza una faja de la superficie terrestre (10 ó 20 m por 60 km) perpendicular a la órbita del satélite. El movimiento orbital normal del satélite permite analizar secuencialmente fajas contiguas, denominadas *líneas de imagen*; este procedimiento llamado de exploración en "rastrillo", evita tener que utilizar piezas mecánicas móviles.

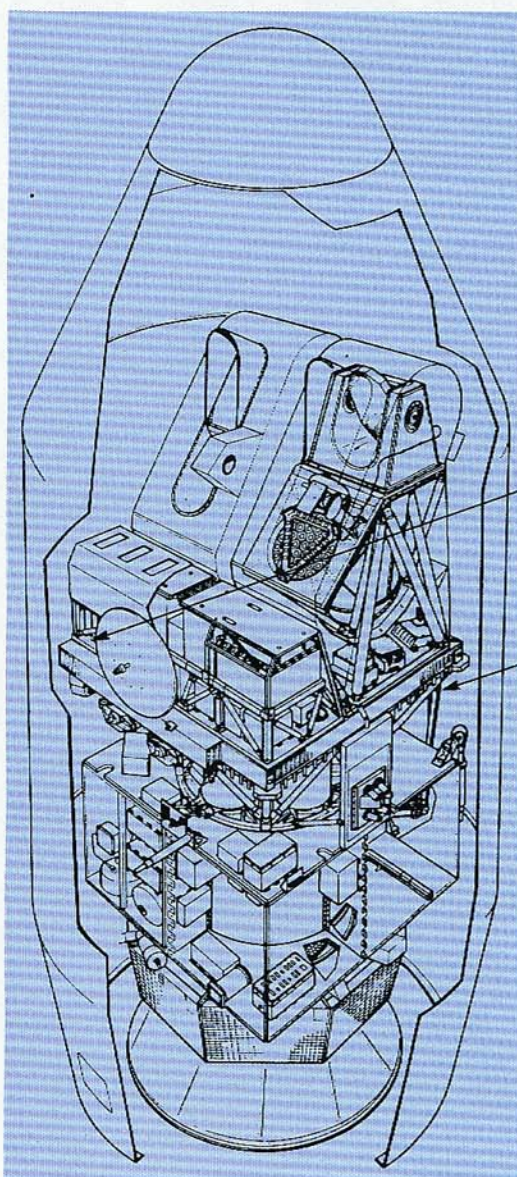
La información sin estructurar obtenida de los detectores, que forma una señal analógica compleja, se procesa para extraer la información de vídeo útil y se corrige en escala para compensar variaciones en la iluminación del terreno (según la latitud de la escena observada), y después se digita-

liza y formata. En esa fase, los datos se registran en cinta magnética para su transmisión posterior, o bien se transmiten inmediatamente a la estación terrena sobre una portadora en banda X modulada en MDP4.

### Equipos electrónicos de la carga útil

Todas las funciones situadas a la salida de los detectores CCD son aportadas por los equipos electrónicos de la carga útil, que comprende dos unidades: la electrónica de alta resolución en la región visible (HRV) y la telemida de la carga útil (TMCU).

La figura 3 es un diagrama de bloques de los equipos HRV, que efectúan el proceso analógico y digitalizan y multiplexan los datos de imágenes en dos trenes binarios correspondientes a los canales multiespectral y pancromático. Además, desempeñan varias funciones secundarias para los telescopios, tales como la orientación del eje de



TELEMIDA  
DE LA CARGA ÚTIL  
TMCU

CIRCUITOS  
ELECTRÓNICOS  
DE HRV

**Figura 2**  
Vista general del  
satélite SPOT mos-  
trando la ubicación de  
los circuitos electróni-  
cos TMCU y HRV.

puntería, la calibración y la termorregulación. La tabla 1 resume las principales características de estos equipos.

El TMCU, a petición del usuario, selecciona dos de los cuatro canales disponibles,

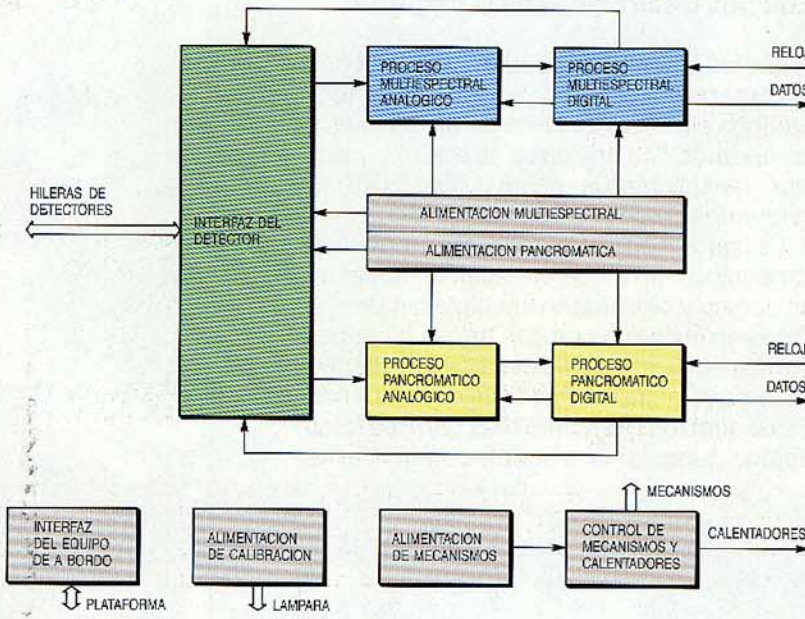


Figura 3 Diagrama de bloques de los circuitos HRV.

Tabla 1 - Características de los circuitos de HRV

Peso:	30 kg (por instrumento)
Potencia consumida:	23 a 115 W (dependiendo de los modos)
Probabilidad de éxito de una misión completa	
canales de imagen:	0,96
otras funciones:	0,98
Dimensiones globales:	0,8 x 0,8 x 0,4 m
Margen dinámico del circuito de procesamiento a ganancia mínima:	3,5 V
Ganancia variable de 1 a 16 dB en ocho pasos iguales	
Ruido total (térmico + cuantificación):	< 0,33 BMS
Linealidad:	< 0,5 BMS

BMS: bit menos significativo. En el caso del SPOT, el BMS es equivalente a 1/256 del margen dinámico de entrada.

Tabla 2 - Características del TMCU

Peso (incluyendo los registradores de cinta)	240 kg
Potencia consumida	10 a 190 W (dependiendo de los modos)
Probabilidad de éxito en una misión completa (todos los equipos con redundancia)	0,985
Dimensiones globales	1,9 x 0,73 x 0,8 m
Potencia transmitida	20 W
Frecuencia de portadora	8.253 MHz
Frecuencia de baliza	8.307 MHz
TEB en el enlace descendente	< 10 <sup>-6</sup>

además de proporcionar el formato final, conmutar las señales a los registradores de cinta o al transmisor de banda X, generar y modular la portadora, y amplificar ésta para su transmisión a las estaciones terrenas receptoras (Fig. 4). Es un subsistema autónomo, con estructura mecánica y termorregulación propias. Sus características esenciales se resumen en la tabla 2.

Los equipos electrónicos de la carga útil contribuyen notablemente a la calidad de la imagen, al reducir los ruidos térmico y de cuantificación y proporcionar una linealidad excelente. Además, el enlace RF tiene una tasa de errores de bit (TEB) muy baja, lo cual es fundamental para la misión y se debe a la alta calidad del modulador MDP4 de a bordo y del receptor de tierra.

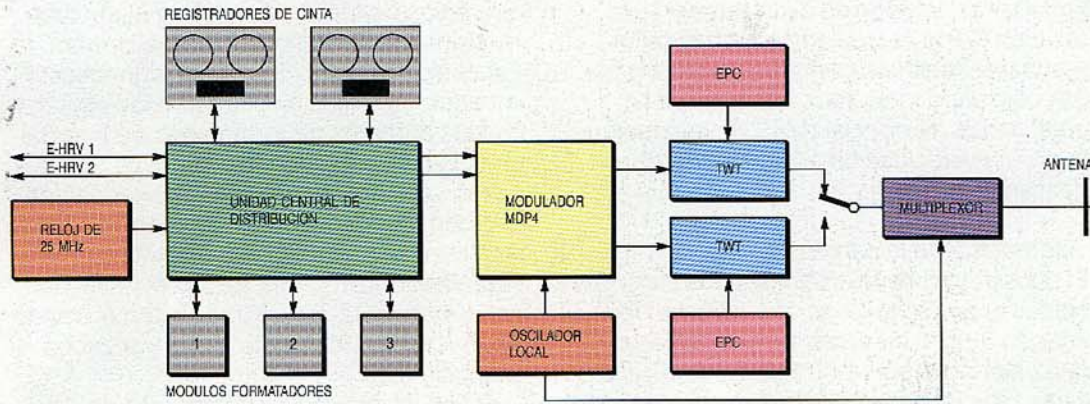
### Los equipos electrónicos HRV

Alcatel Espace ha desarrollado y producido varios elementos para la misión SPOT, entre ellos los equipos de HRV. En cada banda espectral, los detectores fotosensibles se agrupan en cuatro franjas de 1.728 células CCD cada una, de las que se utilizan 1.500 para cubrir el campo de 60 km.

El tiempo de integración de las cargas eléctricas en las fotocélulas (llamado también duración de línea) determina la resolución espacial a lo largo de la traza de la órbita, que es la distancia recorrida en el suelo, en una duración de línea, por un punto situado bajo el satélite. La resolución espacial final a lo largo de la traza depende exclusivamente de las características ópticas del telescopio, las dimensiones físicas del detector y la altitud del satélite, y resulta ser de 10 m en cualquiera de las cuatro bandas espectrales. Al terminar la duración de línea, las cargas almacenadas en las fotocélulas (proporcionales a la energía luminosa recibida) se transfieren a un registro de desplazamiento y se leen en secuencia mientras se fotografía la línea siguiente. Las figuras 5 y 6 muestran la disposición física y el modo de lectura de dichas líneas.

En el modo multiespectral, se leen de forma simultánea las líneas impares y después las líneas pares en cada una de las tres bandas espectrales. La resolución final requerida es de 20 m x 20 m, y se obtiene utilizando un tiempo de integración de 3 ms y sumando la información de los dos detectores adyacentes a un tiempo. En el modo pancromático, las líneas se leen al mismo tiempo sin sumar información alguna, lo que da una resolución de 10 m x 10 m.

Los equipos HRV desempeñan además varias funciones relativas al telescopio y a la electrónica del proceso, como son:



**Figura 4**  
Esquema de bloques del subsistema de telemida de la carga útil.  
EPC – acondicionador electrónico de potencia  
TWT – tubo de onda progresiva.

- distribución de los buses de alimentación primaria y acondicionamiento de energía
- operación de los espejos para ajustar el mecanismo de puntería y de reenfoque (activando un motor de avance escalonado)
- operación de los dispositivos de calibración (calibración solar y calibración con lámpara)
- operación de los 24 calentadores que aseguran la termorregulación del telescopio, siguiendo instrucciones recibidas del ordenador de a bordo.

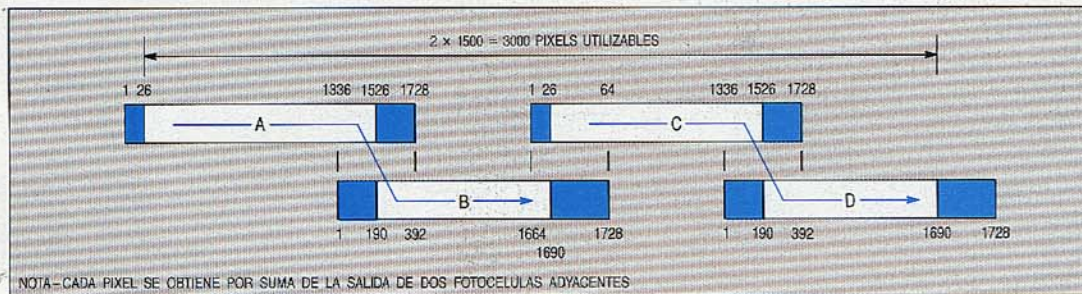
La adquisición de las tensiones de datos de imagen  $V_u$  requiere primero fijar la señal a una señal de referencia, tras lo cual se la muestra en la región útil. La salida de la unidad de muestreo se convierte a un formato de 8 bits mediante un convertor analógico/digital que actúa por aproximaciones sucesivas. Antes de la fijación y el muestreo, un atenuador adapta la sensibilidad del detector al margen dinámico del circuito de proceso. Se utiliza un amplificador de ganancia programable (ocho pasos de regulación) para adaptar, por telemando, la dinámica de la señal recibida a la del circuito de proceso.

**Proceso analógico**

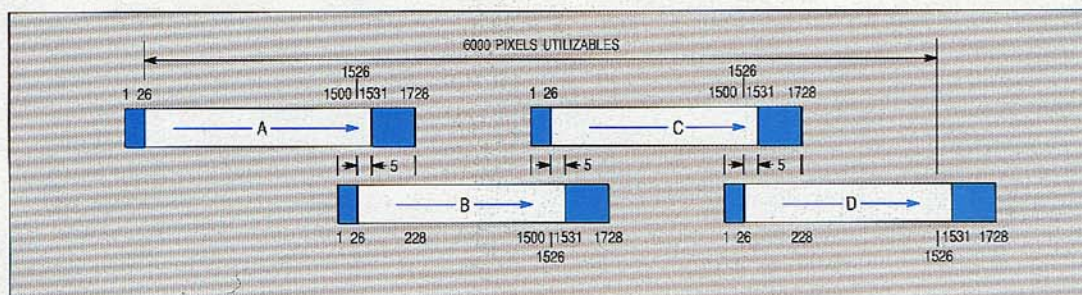
La principal función del proceso analógico es la adquisición y digitalización de la señal de vídeo deseada. Las figuras 7a y 7b muestran la forma general de las señales de vídeo generadas por los detectores en los modos multispectral y pancromático, respectivamente.

**Proceso digital**

El proceso digital de los canales multispectrales se utiliza para multiplexar las señales procedentes de las tres primeras bandas espectrales en un tren binario de 25 Mbit/s. Las señales de los cuatro detectores CCD del canal pancromático se multiplexan



**Figura 5**  
Disposición física y modo de lectura de las franjas multispectrales.



**Figura 6**  
Disposición física y modo de lectura de las franjas pancromáticas.

igualmente, y luego se disminuye en una relación 7/8 la velocidad del tren binario resultante; tras una compresión de relación 3/4 utilizando modulación por impulsos codificados diferencial (MICD), se consigue la misma velocidad binaria de salida que la del canal multiespectral.

**Telemetria de la carga útil**

El subsistema de telemetria de la carga útil selecciona dos de los cuatro canales de imagen disponibles, los formata, inserta una palabra de sincronización y datos auxiliares relacionados con las condiciones fotogríficas, y luego los envía, bien a los registradores de cinta o bien a la unidad de modulación y transmisión. Análogamente a la electrónica de HRV, la TMCU tiene su propio terminal para interfaz con el ordenador de a bordo; esto asegura la distribución de las señales de telemetria y la adquisición de los datos de telemetria. También acondiciona la energía que recibe de los buses primarios.

Todo el equipo TMCU va integrado en una estructura en celosía que soporta los dos registradores de cinta magnética, que

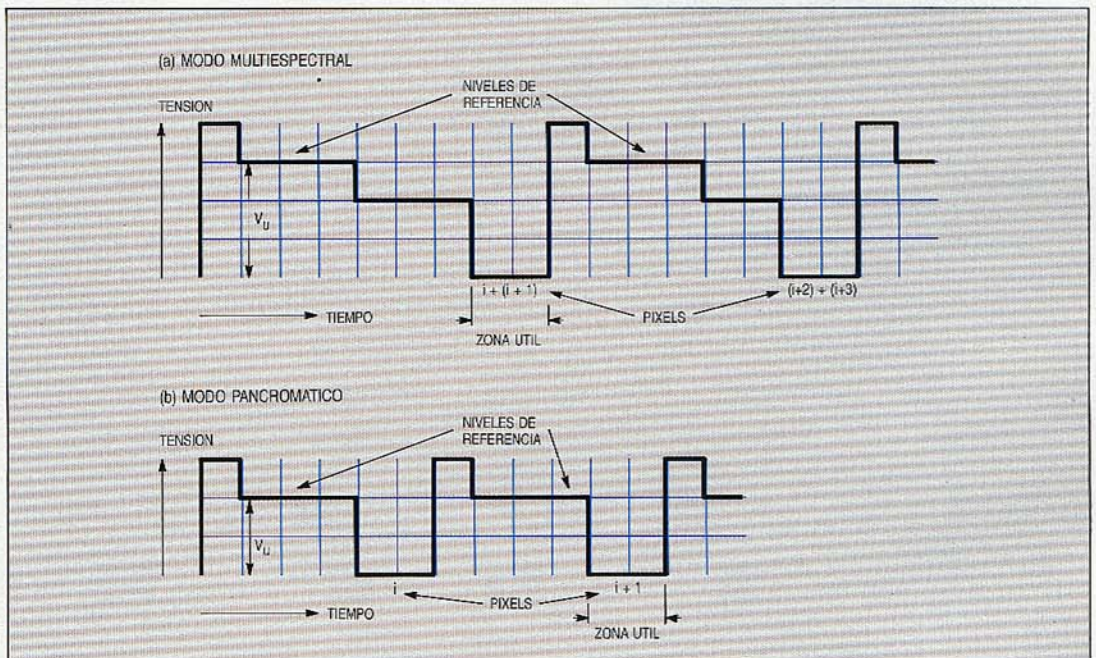
operación de las sondas define el encaminamiento de las señales por el sistema. Esta unidad de distribución se conecta con los equipos HRV a nivel de función digital, y con los módulos de formatao que insertan en el canal de imagen la palabra de sincronismo y los datos auxiliares aportados por el ordenador de a bordo. También va conectada con los registradores de cinta y el modulador MDP4. Los datos se codifican en formato NRZ-L y se transmiten en modo diferencial por medio de pares trenzados apantallados.

El TMCU incorpora un oscilador de 25 MHz que suministra las señales primarias de sincronismo (reloj de bit y sincronización de línea) a todos los equipos electrónicos de la carga útil.

**Funciones de microondas**

La estación de microondas recibe dos canales de imagen de 25 Mbit/s de cualquiera de los dos módulos formatao o de los registradores de cinta, a través de la unidad central de distribución. Ambas señales son recibidas por el modulador MDP4 y luego sufren codificación diferencial, lo que per-

**Figura 7**  
Señales de imagen detectadas:  
**(a) multiespectral y**  
**(b) pancromática.**



pesan 70 kg cada uno. La termorregulación se obtiene mediante mantas térmicas y radiadores.

**Funciones digitales**

Los datos son seleccionados y conmutados por una unidad central de distribución que consiste en un conjunto de sondas activas que muestrean los trenes binarios de entrada; estas sondas están conectadas al resto del equipo TMCU. El telemetria de la

mite resolver ambigüedades de fase en la recepción de estas señales por la estación terrena.

La portadora genera un oscilador de microondas constituido por una fuente de 80 MHz, seguida de un multiplicador que aumenta la frecuencia hasta 8 GHz en tres etapas. Un oscilador idéntico suministra una señal de radiobaliza desplazada en 50 MHz, la cual utiliza la estación terrena para el seguimiento del satélite.

Tabla 3 — Características resumidas de los tres satélites de teledetección

	SPOT	Landsat D	ERS 1 (alta velocidad)	ERS 1 (baja velocidad)
Modulación	MDP4	MDP4A/MDPB	MDP4	MDP4A/MDPB
Velocidad binaria	50 Mbit/s (I + Q)	85 Mbit/s (I) 15 Mbit/s (Q)	105 Mbit/s (I + Q)	4.4 MSym/s (I) 15 Mbit/s (Q)
Formato de datos	NRZ-M	NRZ-M	NRZ-M	SP-L NRZ-M
Frecuencia de emisión	8253 MHz	8212,5 MHz	8 140 MHz	8040 MHz
Relación de potencias I:Q	1:1	4:1	1:1	1:4
Otras características		el canal Q se desconecta		el canal I se desconecta

La portadora modulada a 50 Mbit/s se hace pasar por un amplificador de tubo de ondas progresivas de 20 W que trabaja a saturación. Dicha portadora modulada y la frecuencia de radiobaliza se llevan, a través de un multiplexor de salida, a una antena de 0,8 m de diámetro y abertura de 120°, la cual asegura la cobertura radioeléctrica de toda la superficie de la Tierra visible desde el satélite. La antena produce un haz conformado que aprovecha al máximo el balance del enlace durante la adquisición de señal por la estación terrena.

### Estación terrena

Los trenes binarios de alta velocidad generados por los instrumentos a bordo del SPOT y de otros satélites de teledetección, son transmitidos a la estación terrena con sistemas de modulación, velocidades binarias y formatos de datos diferentes. La tabla 3 resume las especificaciones de tres satélites de teledetección: SPOT, Landsat D y ERS 1. El Landsat D lleva un instrumento de observación llamado "cartógrafo temático", y un explorador multispectral. El primero registra los datos en siete bandas espectrales utilizando unos elementos de imagen que corresponden a 30 m de terreno, mientras que el segundo, con elementos de imagen de 80 m en el suelo, registra datos situados en dos bandas del espectro visible y en dos bandas del infrarrojo cercano. Este satélite ha estado en funcionamiento durante varios años.

El ERS 1, de lanzamiento programado para 1990, llevará cinco sensores de microondas para vigilancia de las zonas costeras, océanos y regiones glaciares. Los datos serán transmitidos por dos enlaces de alta y baja velocidad, a 105 Mbit/s y 15 + 1,1 Mbit/s, respectivamente. Cuando se utiliza modulación MDP4, dos trenes de datos de igual velocidad binaria modulan dos portadoras desfasadas 90° entre sí. Las señales resultantes se suman, reduciendo

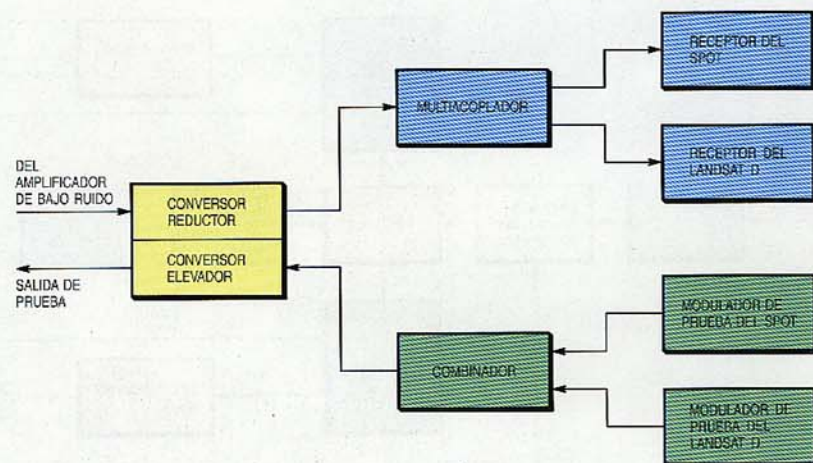
así a la mitad la anchura de banda y la potencia de emisión que se necesitaría con dos portadoras separadas moduladas en MDP. Los trenes binarios pueden ser independientes o bien resultado de dividir un tren de datos único. También es posible modular las dos portadoras ortogonales por dos fuentes de información de distinta velocidad, a fin de transmitir en la misma banda de frecuencias dos trenes binarios independientes sin ninguna interferencia mutua. Este método se denomina MDP4A (MDP4 asimétrica).

En los satélites de baja velocidad Landsat y ERS 1, puede desconectarse uno de los canales cuando se pone fuera de servicio uno o más instrumentos por razones de explotación. En este caso, el modo de transmisión es MDPB (modulación por desplazamiento de fase bivalente).

Alcatel Bell ha desarrollado una familia de demoduladores MDP4 y MDP4A, así como los equipos asociados, para la recepción de imágenes en los satélites Landsat D, SPOT y ERS 1. La figura 8 ilustra el sistema de recepción de SPOT y Landsat.

Una vez recibida por la antena y amplificada en un amplificador de bajo ruido, la señal modulada pasa por un convertidor reductor que la transpone de la banda X

Figura 8  
Diagrama de bloques de un sistema de recepción de imágenes de varios satélites, con sus dispositivos de prueba.





(8 GHz) a una frecuencia intermedia adecuada. La señal se lleva luego a los demoduladores SPOT o Landsat a través de un multiacoplador, que ofrece también accesos de entrada y salida para pruebas. Cada receptor contiene un filtro de canal, un demodulador coherente, sincronizadores de bit y decodificadores diferenciales para ambos canales. Además, el receptor del SPOT incluye un combinador o un demultiplexor.

Los moduladores de prueba y el convertidor elevador de frecuencia se utilizan para comprobar el funcionamiento de la cadena de demodulación. Los moduladores generan una señal con la misma frecuencia intermedia que el receptor correspondiente, modulada por trenes binarios pseudoaleatorios o datos externos (de un generador de trama, por ejemplo). A través del combinador, la señal se transpone a la banda X con el mismo oscilador local que utiliza la transposición de recepción. La señal resultante puede acoplarse al enlace de recepción antes del convertidor reductor o del amplificador de bajo ruido. La simulación del ruido utiliza, bien el ruido del sistema, o bien el ruido de entrada del modulador de pruebas. Para pruebas de laboratorio y corrección de fallos puede fácilmente montarse un bucle de prueba en frecuencia intermedia.

### Familia de receptores

El receptor MDP4 ó MDP4A fue un desarrollo original de Alcatel Bell para el Centre National d'Etudes Spatiales, destinado a la estación terrena del SPOT en Toulouse. Hoy día la mayoría de las estaciones terrenas SPOT del mundo utilizan este equipo.

Para el satélite ERS 1 se desarrollaron dos receptores partiendo del mismo concepto de diseño patentado. Como este satélite todavía no está en operación, no han podido verificarse en la práctica las

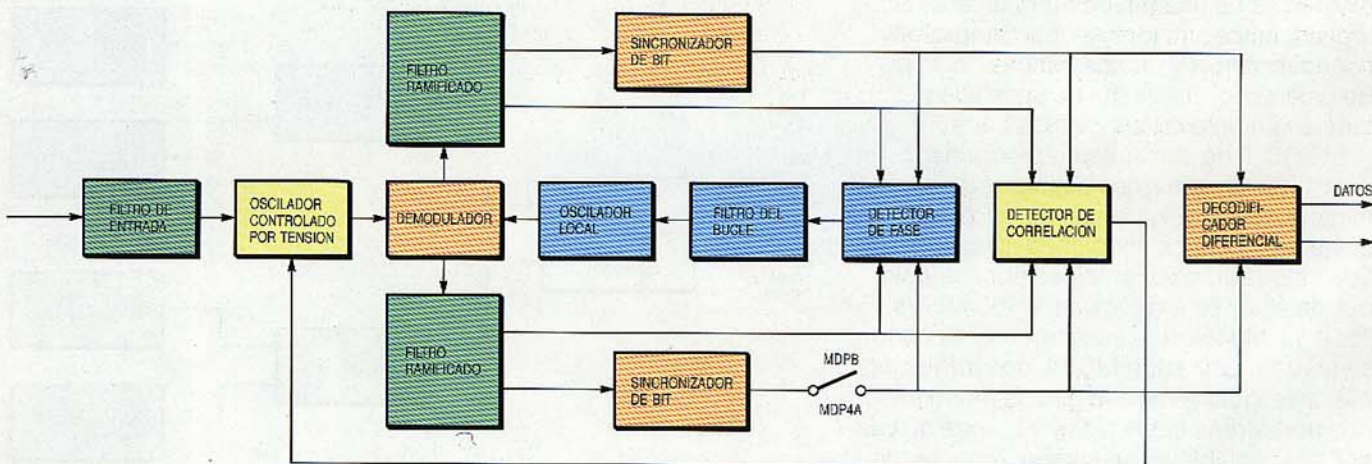
prestaciones de estos dos receptores. No obstante, las pruebas en bucle con los moduladores del prototipo han dado excelentes resultados. Gracias a la flexibilidad del diseño, el receptor puede fácilmente adaptarse a otras velocidades binarias, formatos y filtros de canal.

Un receptor adecuado para la demodulación coherente de señales MDP4 ó MDP4A requiere un circuito de recuperación de portadora a fin de demodular la señal recibida, y un sincronizador de bit para la extracción del reloj y regeneración de datos. No obstante, en el caso de señales de portadora suprimida, no es factible utilizar un circuito de enganche de fase (PLL) convencional para recuperación de portadora, dado que no existe portadora residual. Alcatel Bell estudió varios modos de resolver este problema, para llegar a la conclusión de que un bucle de multiplicación en banda base sería la solución más atractiva. Las razones son las siguientes:

- el comportamiento teórico en presencia de ruido es mejor que en otras alternativas técnicas
- otras configuraciones requerirían circuitos de RF más críticos
- la compensación activa de fase garantiza que no se produzca degradación adicional al modificarse la frecuencia de entrada por el efecto Doppler
- se puede utilizar la misma configuración para demodular señales con modulación MDPB, MDP4 y MDP4A.

La figura 9 muestra el diagrama de bloques de un receptor MDP4(A). La señal de entrada se filtra para conseguir la selectividad del receptor requerida. A continuación la señal se amplifica y se estabiliza su nivel mediante un amplificador controlado en tensión. Tras la demodulación, las señales atraviesan un módulo de distribución de

Figura 9 Diagrama de bloques de un receptor de estación terrena.



**Tabla 4 – Características generales del demodulador MDP4**

Frecuencia intermedia:	
SPOT + Landsat	720, 415,5, 375 MHz
ERS 1 (alta velocidad)	720 MHz
ERS 1 (baja velocidad)	620 MHz
Nivel de entrada	-50 a -10 dBm
Tiempo de adquisición	< 300 ms
Umbral	EBNO < 6 dB
Degradación por TEB	< 2 dB comparado con el valor teórico, incluyendo las pérdidas en el decodificador diferencial

EBNO – energía por bit dividida por densidad de ruido.

señal y filtros ramificados y van a parar a los sincronizadores de bit, que extraen la señal de reloj y regeneran los datos. Puede estimarse la calidad de la señal regenerada por medio de los indicadores de tasa de errores de bit (TEB) y de enganche de fase, expuestos en el panel frontal. Las ambigüedades en los datos regenerados se resuelven mediante un circuito decodificador diferencial. Los datos analógicos se multiplican en el detector de fase por los datos recuperados (procedentes de la sincronización de bit), para obtener una señal de error nítida que gobierna la fase del oscilador local. El filtraje de bucle se realiza mediante un PLL, un filtro de control automático de ganancia y los circuitos de enganche. En un sistema MDP4, los dos trenes de datos de salida pueden fundirse en uno solo. Se puede pasar de MDP4A a MDPB desconectando el sincronizador de bit innecesario, lo cual se hace automáticamente en los receptores del ERS 1 de baja velocidad y del Landsat D.

La tabla 4 resume las principales características de los demoduladores MDP4A y MDP4.

La construcción modular garantiza un fácil mantenimiento y simplifica la sustitución de componentes. Varios de los módulos pueden servir para más de una aplicación. Por ejemplo, pueden utilizarse igual oscilador local, amplificador de entrada y placa de control en los receptores SPOT, Landsat y ERS 1, por lo que se reduce la dotación de repuestos. Los módulos van

equipados en un único bastidor de 19 pulgadas, refrigerado por una unidad separada que lleva dos ventiladores. Todas las funciones del panel frontal se pueden supervisar y gobernar a distancia a través de un interfaz analógico o uno compatible con la norma IEEE 488.

Esta concepción del receptor se puede extender hasta velocidades de transmisión muy elevadas, y en la actualidad se trabaja en el desarrollo de receptores MDP4 que funcionan a 2 x 150 Mbit/s. Si bien es teóricamente posible trabajar a velocidades aún más altas, para ello habrá que elaborar las tecnologías adecuadas. Por ejemplo, habrá que pensar en utilizar lógica de AsGa en lugar de lógica ECL.

## Conclusiones

Los satélites de observación terrestre son muy valiosos en aplicaciones tan variadas como la cartografía, agricultura y vigilancia de la polución. Estos satélites necesitan un enlace de alta calidad para retransmitir las imágenes captadas a las estaciones terrestres, desde donde podrán distribuirse para su proceso ulterior. La electrónica de proceso de señal digital, el modulador MDP4 y la fuente de 8 GHz desarrollados por Alcatel Espace, así como el demodulador MDP4 de alto rendimiento desarrollado por Alcatel Bell, son la garantía de la mejor calidad de imagen posible en el enlace satélite-Tierra.

**Guy Schang** nació en Metz, Francia, en 1945. Se graduó ingeniero electrónico y luego licenciado en ciencias en la Universidad de Lille, incorporándose a Alcatel Espace (entonces Thomson-CSF/DSP) como miembro del grupo de proyecto Symphonie, encargado de presupuestar el enlace de STT y de las operaciones de vuelo. Desde 1980, el Sr. Schang es jefe de proyecto de la electrónica de la carga útil SPOT, y actualmente es responsable en Alcatel Espace de las actividades sobre proceso a bordo y telemetría.

**Peter Van der Stock** nació en Amberes, Bélgica, en 1957. Tras obtener su graduación en ingeniería electrónica, entró en Alcatel Bell (entonces BTM) en 1982, donde participó en la prueba e integración de equipos para las estaciones de STT, así como en el desarrollo de la parte analógica de un demodulador de alto rendimiento. Desde 1985 es el responsable del continuo desarrollo y la producción de los receptores de datos de alta velocidad y equipos asociados.

# Caracterización de dispositivos de fibra óptica para aplicaciones espaciales

Crece el interés por utilizar sistemas de transmisión de datos por fibra óptica en aplicaciones espaciales, debido a su baja atenuación, excelente anchura de banda e inmunidad a interferencias y diafonía. No obstante, el espacio es un entorno hostil que afecta al comportamiento del sistema de varias maneras. En consecuencia, se ha evaluado un amplio grupo de componentes de fibra óptica para determinar su adecuación a las referidas aplicaciones.

**A. Aguilar**

Alcatel Standard Eléctrica, Madrid, España

## Introducción

El interés por los sistemas de transmisión de datos por fibra óptica va creciendo al madurar la tecnología, en gran parte por su baja atenuación y gran anchura de banda, junto con su inmunidad a las interferencias electromagnéticas y a la diafonía. En particular, estos sistemas ofrecen considerables ventajas para aplicaciones espaciales, en las que es probable lleguen a ser obligatorios; otra ventaja más es su bajo peso frente a los de pares trenzados y cable coaxial. Por todo ello los sistemas de fibra óptica se han señalado como área de desarrollo tecnológico dentro de los programas espaciales Columbus y Hermes de la Agencia Europea del Espacio (ESA).

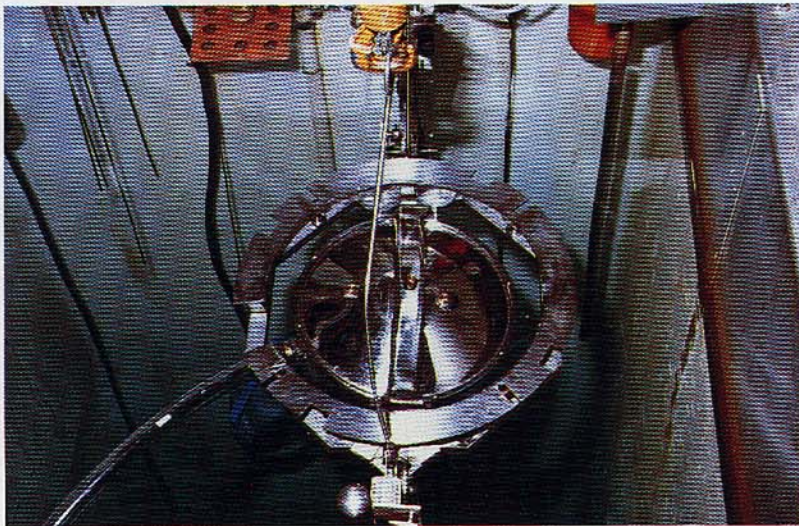
Los enlaces de datos por fibra óptica utilizan una gran variedad de dispositivos ópticos: fuentes de luz, detectores, fibras y

cables, conectores, acopladores, y conmutadores. Antes de utilizarlos en cualquier aplicación espacial, es fundamental asegurar que estos dispositivos y subsistemas van a funcionar satisfactoriamente durante la misión entera, por lo cual hay que seleccionarlos cuidadosamente, probarlos con rigor y, si es necesario, modificarlos para satisfacer los requisitos del sistema y del entorno.

El factor más crítico en cualquier misión espacial son las rigurosas condiciones ambientales: temperaturas extremas, altos niveles de radiación nuclear, vibración mecánica y choque, alto vacío y rápida pérdida de presión. Salvo en fiabilidad y en mantenimiento, los demás requisitos del sistema son comparables a los de las aplicaciones terrenales en cuanto a velocidad binaria, número de usuarios, longitud de cable y otros parámetros.

Los dispositivos de fibra óptica actuales son idóneos para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo telecomunicaciones públicas, y usos militares e industriales. Sin embargo, muy pocos de ellos, si acaso existen, están calificados para el espacio. Ciertos componentes presentan características aprovechables en aplicaciones espaciales. Por ejemplo, hay tipos de fibras ópticas resistentes a la radiación, protegidas y cableadas con materiales especiales, que se pueden utilizar de modo fiable en naves espaciales pese al entorno hostil. Además, es posible hallar componentes activos que satisfagan con ligeras adaptaciones las estrictas especificaciones de fiabilidad, inherente inmunidad a la radiación, hermeticidad, y comportamiento mecánico. Otros componentes necesitan mejora o rediseño (p. ej., los conmutadores ópticos que cam-

Caja hermética sumergida en la unidad de irradiación gamma.



**Tabla 1 — Especificaciones ambientales**

Temperatura	Interior del vehículo espacial	-30°C a 70°C	
	Exterior del vehículo espacial	-50°C a 70°C	
Vacío	10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-7</sup> mbar		
Vibración	Norma MIL STD 750, método 2056		
	Amplitud de la aceleración 20 g		
	Barrido de frecuencia 100 a 2000 Hz		
Choque	Norma MIL STD 750, método 2016.2		
	Pico de aceleración 1500 g		
	Duración del impulso 0,5 ms		
Radiación	Dosis y flujo de neutrones (1 MeV) (caso más desfavorable)		
	Apantallamiento	Dosis	Flujo de neutrones
	Espesor de Al		
	mm	Rad(Si)/año	n/cm <sup>2</sup> año
	0	5 × 10 <sup>5</sup>	6 × 10 <sup>12</sup>
2	6 × 10 <sup>3</sup>	4 × 10 <sup>11</sup>	
4	1 × 10 <sup>3</sup>	3,5 × 10 <sup>11</sup>	

bian por medios eléctricos las posiciones de las fibras de entrada y salida) para acomodarse a las condiciones ambientales.

### Contratos con la Agencia Europea del Espacio

Los estudios realizados por Alcatel Standard Eléctrica para la ESA han abarcado dos fases distintas. En la primera, se analizaron las tecnologías de componentes de fibra óptica, se redactaron las especificaciones del sistema y del entorno, se determinaron las prestaciones requeridas y se caracterizaron dichos componentes. Se creó una base de datos como soporte de la evaluación de componentes comerciales y fabricantes que habría de servir para elegir componentes idóneos. En la segunda fase, los componentes seleccionados fueron probados en condiciones ambientales realistas.

Todas estas actividades se integran en el Programa Preparatorio de Soporte Tecnológico del Columbus, que comprende la caracterización y evaluación de componentes de fibra óptica para determinar su adecuación para aplicaciones espaciales, y en particular para el proyecto Columbus de estación espacial.

En 1986, Alcatel Standard Eléctrica (SESA) y la ESA definieron conjuntamente como área de interés común los sistemas de datos para misiones espaciales. La especialización del Centro de Investigación de SESA en comunicaciones ópticas, junto con la experiencia de la Compañía en sistemas de transmisión por fibra óptica, componentes pasivos y activos y caracterización de componentes ópticos fueron determinantes de la adjudicación por la ESA a Alcatel Standard Eléctrica del contrato de "Caracterización/adaptación de nuevos

dispositivos de fibra óptica para aplicación en el espacio".

Los resultados de esta actividad, pionera en su campo, y de los estudios paralelos de sistemas de transmisión de datos servirán de base para el desarrollo de un sistema de gestión de datos por fibra óptica en el proyecto Columbus. Cumpliendo un nuevo contrato con la Agencia, SESA ha iniciado recientemente el desarrollo de un banco de pruebas de enlaces de transmisión por fibra óptica, mediante el cual podrán caracterizarse diversos sistemas de datos para importantes misiones espaciales, tales como el Columbus y el Hermes.

### Condiciones del entorno espacial

La tabla 1 resume las especificaciones del entorno para aplicaciones espaciales, que son la base del presente estudio. El tiempo de duración de la estación espacial Columbus se fija hoy en 10 años, pero el objetivo es extenderlo a 25 años.

Los niveles de radiación en el espacio son de especial interés, en cuanto que pueden dañar a la mayoría de los componentes, incluidos los de fibra óptica. El entorno natural de radiación en el espacio consiste en partículas cargadas (electrones y protones) atrapadas en el campo magnético terrestre, formando dos anillos toroidales (los anillos de Van Allen)<sup>1,2</sup>. Además de la radiación atrapada en estos anillos, existe un flujo de protones apreciable (que alcanza las 10<sup>14</sup> partículas/cm<sup>2</sup>/s durante las manchas solares), con energías de hasta 500 MeV. También se ha de tener en cuenta la radiación secundaria de Bremsstrahlung, que son rayos X producidos por el impacto de electrones de alta energía con otras partículas cargadas como los núcleos.

Los componentes sensibles se apantallan para protegerlos contra la radiación. El nivel total de radiación que soportan los componentes instalados en un vehículo espacial depende de varios factores<sup>3</sup>:

- órbita del vehículo (altura e inclinación) que define el flujo de partículas cargadas y su espectro de energía
- duración de la misión espacial
- apantallamiento, definido por el espesor total (expresado comúnmente en mm de aluminio equivalentes) de la protección física, que incluye la estructura del vehículo, compartimentos de subsistemas y encapsulado de los componentes.

La radiación espacial se especifica en dosis o flujo de partículas equivalentes correspondientes a las fuentes de radiación disponibles en los laboratorios terrestres, capaces

de causar unos daños de ionización y desplazamiento comparables. La ionización aumenta la atenuación de las fibras ópticas y la corriente de oscuridad de los fotodiodos. Se utiliza el concepto de dosis total (expresado en rad) para evaluar el daño de ionización, puesto que el factor más importante es la cantidad total de energía absorbida por el material. El Cobalto 60, que emite fotones gamma, se toma como fuente de radiación para simular los efectos de ionización en el espacio.

Los daños de desplazamiento ocurren porque el exceso de energía que incide sobre los átomos de un cristal no se convierte en calor, sino que desplaza algunos átomos de su posición regular en la red cristalina. Este fenómeno degrada de modo permanente la potencia óptica de salida de las fuentes de luz, así como la responsividad (relación entre la corriente generada y la potencia óptica incidente) y la corriente de oscuridad de los fotodiodos<sup>4</sup>. Para simular los daños de desplazamiento se utiliza una fuente de neutrones, cuyo flujo se expresa en número de neutrones por cm<sup>2</sup> con energía de 1 MeV. Los efectos de desplazamiento producidos por electrones, protones y neutrones se pueden correlacionar, como se ha demostrado en detallados estudios<sup>5</sup>.

### Programa de pruebas

El objetivo de este programa fue valorar el comportamiento de los componentes de fibra óptica seleccionados, comerciales o en desarrollo, en condiciones similares a las que existen en el espacio. La rigurosidad de este programa concuerda con las especificaciones de la ESA para componentes de la nave Columbus. Algunos procedimientos de prueba responden a normas militares (MIL), mientras que otros, como los de radiación, se basan en el nivel total calculado de la radiación durante la misión Columbus y en el uso de las fuentes de radiación disponibles en el laboratorio. La velocidad de irradiación en la prueba, que ha de ser mucho mayor que la del espacio para poder simular en pocos días los efectos de 25 años, es un compromiso entre la duración de la prueba y la recogida de información válida que se pueda extrapolar para la misión real.

La selección de los componentes se fundó en los siguientes criterios:

- Los fabricantes deberían tener un completo control de todos los procesos, dando prioridad a aquellas compañías que aporten planes de aseguramiento del producto.

**Tabla 2 — Componentes de fibra óptica probados para el espacio**

<p><i>Fibras ópticas recubiertas.</i> Cuatro tipos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- fibra comercial, de 50/125 <math>\mu\text{m}</math> e índice gradual, de <math>\text{GeO}_2</math>, con núcleo de sílice dopada con F y resistente a la radiación</li> <li>- dos tipos de fibras resistentes a la radiación, de 100/140 <math>\mu\text{m}</math>, con núcleo de sílice pura y envoltura de sílice y F</li> <li>- fibra estándar de 100/140 <math>\mu\text{m}</math> con cubierta resistente al calor.</li> </ul> <p><i>Cable desplegable en campo:</i> construido con dos fibras multimodo del primero de los tipos anteriores.</p> <p><i>Módulos de diodos láser InGaAsP/InP:</i> cinco tipos con tallos de fibra multimodo.</p> <p><i>Diodos electroluminiscentes de InGaAsP/InP:</i> dos de los cinco probados estaban montados en un encapsulado DIP (en doble fila) y equipados con tallos de fibra resistente a la radiación.</p> <p><i>Detectores PIN de InGaAs/InP:</i> tres de los siete probados tenían encapsulados DIP.</p> <p><i>Acopladores multimodo de estrechamiento biconico fundido:</i> dos tipos con 2 x 2 puertos y otros dos con 4 x 4 puertos.</p> <p><i>Conectores:</i> dos de haz expandido y cuatro de acoplamiento directo.</p> <p><i>Conmutadores ópticos multimodo actuados eléctricamente:</i> dos tipos para aplicaciones en RAL.</p>
--

- Los dispositivos operarían en 1,3  $\mu\text{m}$ , para aprovecharse de la baja atenuación y gran anchura de banda de la fibra en esta longitud de onda. Se eligió la operación multimodo por la mayor estabilidad de las conexiones ópticas ante vibraciones mecánicas y choques.
- Para la selección se tendrían muy en cuenta características tales como alta fiabilidad, amplio margen de temperaturas de operación, hermeticidad, e incluso el grado de rigor de las pruebas mecánicas para calificación del equipo (p. ej., según especificaciones militares STD MIL).
- Serían preferibles los componentes activos (p. ej., diodos láser) con poca sensibilidad a la temperatura, ya que resultarían menos afectados por la radiación, y por consiguiente la potencia de salida de las fuentes de luz y la responsividad de los fotodetectores se mantendrían más constantes. Además, y por razones análogas, se optó por los detectores PIN de InGaAs/InP con valores pequeños de capacidad y de corriente de oscuridad.
- Se consideraron dos tipos de conectores ópticos: los de acoplamiento directo (incluyendo una versión óptica del conector de microondas SMA) y los de haz expandido.
- En cuanto a las fibras ópticas, se cuidó especialmente la composición de los vidrios para conseguir fibras resistentes a la radiación, y los materiales y espesores de las protecciones primaria y secundaria al fin de asegurar una buena estabi-

lidad de la transmisión de la luz en un margen amplio de temperatura.

Del compromiso entre los criterios anteriores y la disponibilidad de los componentes en cuanto a plazo de entrega, resultaron los 34 dispositivos enumerados en la tabla 2, los cuales se sometieron a una serie abundante de pruebas.

#### **Pruebas funcionales**

Estas pruebas, realizadas a temperatura ambiente, abarcaron los parámetros siguientes:

- Curvas características de las fuentes de luz: potencia óptica de salida en función de la corriente de excitación, caída de tensión en función de la corriente de excitación, y potencia óptica de salida en función de la fotocorriente generada en el detector monitor de los módulos láser.
- Responsividad y corriente de oscuridad de los detectores a  $1,3 \mu\text{m}$ .
- Atenuación espectral y anchura de banda de las fibras y cables.
- Pérdidas de inserción de los dispositivos pasivos.

#### **Pruebas térmicas**

Se realizaron dentro de los márgenes de temperatura especificados por los fabricantes.

#### **Pruebas de radiación con electrones**

Se midieron las características de los componentes activos, y después se les sometió a un bombardeo de electrones colocándoles en el haz de un acelerador de Van de Graff, en vacío ( $< 10^{-5}$  mbar) y a temperaturas por debajo de  $30^{\circ}\text{C}$ . Cada uno de los componentes fue irradiado por separado sobre un área de diámetro 9 mm con un haz de electrones de 1,8 MeV de energía, densidad de  $1,2 \times 10^{12}$  electrones/cm<sup>2</sup>/s durante 830 segundos. El flujo total fue de  $10^{15}$  electrones/cm<sup>2</sup> ( $\pm 10\%$ ), que equivale al flujo de neutrones anteriormente definido. Tras la irradiación se midieron de nuevo los parámetros característicos de los componentes para determinar el efecto producido por la radiación.

#### **Prueba de irradiación Gamma**

Esta prueba se realizó exponiendo los componentes a la acción de fuentes de Cobalto 60 en una unidad de irradiación de tipo piscina. Los componentes se colocaron dentro de una caja hermética con un tubo de plástico a través del cual pasaba un paquete de cables coaxiales y fibras ópticas que permitían la conexión eléctrica y óptica entre los componentes de la caja y los

equipos de excitación y de medida situados en el exterior con el fin de medir y supervisar los componentes. La caja se sumergió en la piscina a profundidad de 4,5 m y se expuso a la radiación procedente de 12 barras de Cobalto 60, colocadas en círculo en el fondo de la piscina para asegurar una irradiación uniforme en el interior de la caja.

La prueba comprendió dos fases: en la primera, la tasa de dosis media y la dosis total fueron respectivamente de 0,95 Mrad/día y 5 Mrad, y en la segunda fase, de 3,7 Mrad/día y 7 Mrad. Al final de la segunda fase, la dosis total media acumulada era de 12 Mrad. A causa del modo de distribuirse la radiación dentro de la caja, las fibras recibieron una dosis de irradiación aproximadamente el 10% mayor que la recibida por los componentes activos.

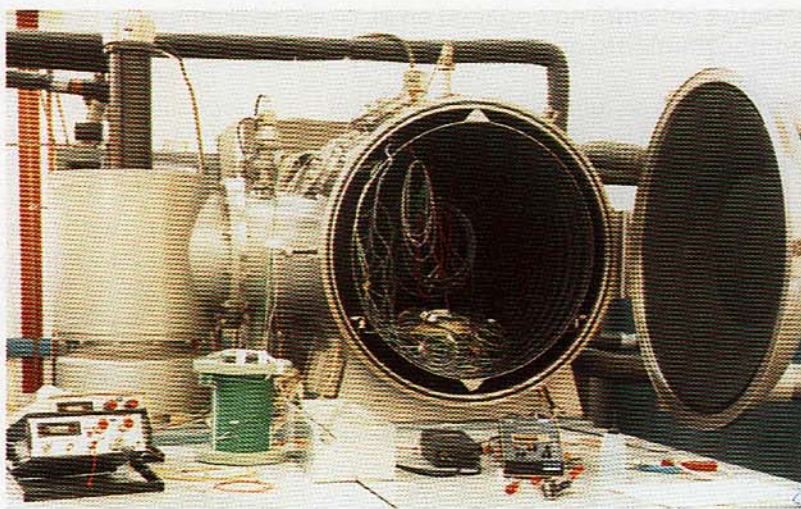
#### **Pruebas de vacío**

Los componentes se sometieron a ciclos térmicos en un simulador espacial a  $10^{-5}$  mbar, supervisando en esta prueba algunos componentes pasivos, y midiendo los componentes activos antes y después de la prueba de vacío para determinar el efecto en sus comportamientos.

La prueba se dividió en dos fases, cada una consistente en cuatro ciclos térmicos, con temperaturas extremas de  $-30^{\circ}\text{C}$  y  $+70^{\circ}\text{C}$  en la fase 1, y de  $-45^{\circ}\text{C}$  y  $+100^{\circ}\text{C}$  en la fase 2. El tiempo medio por ciclo fue de 14 horas. Los componentes activos se sometieron solamente a la primera fase, ya que las temperaturas extremas de la segunda sobrepasaban los márgenes de temperatura de almacenamiento especificados por los fabricantes.

Algunos de los componentes fallaron totalmente: un acoplador de fibras multimodo 4 x 4, un conmutador óptico y un conector de haz expandido. Las fibras con recubrimiento estándar presentaron un

**Vista de la cámara de vacío, dispositivos en prueba y equipos de medida.**



fuerte aumento en la atenuación. Por el contrario, la fibra resistente al calor y el cable no mostraron aumento apreciable de la atenuación, aunque el peso del cable se redujo cerca del 3,5%.

#### Prueba de vibración

Los componentes se probaron en una máquina de vibración a frecuencia variable, con una aceleración máxima de 20 g. En dicha máquina fueron sometidos a cuatro ciclos, cada uno de duración aproximada cuatro minutos, a lo largo de cada eje. Cada ciclo correspondía a un barrido de frecuencia desde 100 a 2000 Hz.

Los componentes se sujetaron rígidamente a una placa fijada a la plataforma de la máquina. En particular, los componentes activos se montaron en una placa impresa con los terminales eléctricos soldados al circuito electrónico que les proporcionaba excitación adecuada y polarización a las fuentes de luz y los detectores. Todos los componentes fueron observados con ayuda de un registrador X-t (desplazamiento-tiempo) durante la prueba.

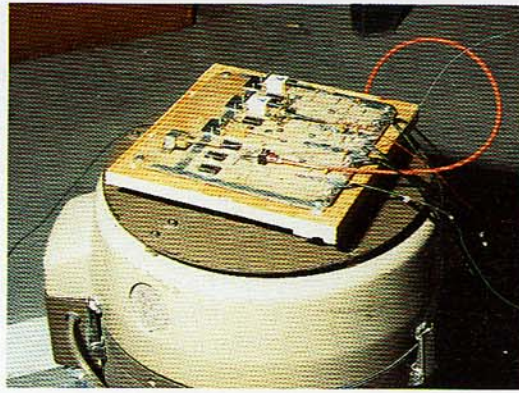
#### Prueba de choque

Se puso a prueba la capacidad de los componentes para resistir impulsos de choque mecánico mediante caída libre. Los componentes se montaron sobre una placa atornillada a una base en forma de L, que a su vez iba atornillada a la plataforma de la máquina, permitiendo pruebas según los tres ejes. Los impulsos de aceleración tenían forma de semionda senoidal, con valor de cresta de 800 g y duración de 0,8 ms, de acuerdo con la norma STD MIL 750 (método 2016.2), que se corresponde con las fuerzas soportadas por los componentes durante un trato extremadamente duro, en la etapa de ignición de misiles y en equipos sujetos a armas de fuego o artefactos explosivos.

### Efectos del entorno espacial en el comportamiento de los componentes

Los cambios de temperatura afectan a la atenuación de las fibras ópticas de los cables, pues los diferentes coeficientes de dilatación de la fibra y de cualquier recubrimiento o material de la estructura del cable, producen efectos de microcurvatura. En el caso de los componentes pasivos (acopladores, conectores), tales cambios de temperatura pueden alterar las pérdidas de inserción, e incluso causar la fractura de la fibra en casos extremos.

Las fuentes de luz y los detectores son componentes sensibles a la temperatura ya que su rendimiento cuántico disminuye al



Dispositivos activos instalados en la máquina de vibración.



Conectores ópticos montados en la base en forma de L para la prueba de choque mecánico.

aumentar la temperatura, problema particular de los diodos láser. La vida útil de estos dispositivos varía con la temperatura según la función  $\exp(-E_a/kT)$ , donde  $E_a$  es la energía de activación,  $k$  la constante de Boltzmann, y  $T$  la temperatura en grados Kelvin.

El vacío altera las características y hace perder peso a los materiales como resultado de la evaporación, sublimación y descomposición. Estos efectos pueden producir fisuras en la cubierta del cable o del recubrimiento de la fibra así como deformación de los encapsulados de dispositivos, deteriorando su fiabilidad e incluso llegando a fallos catastróficos.

La vibración excesiva o los choques repetitivos producidos por un torpe manejo, el transporte o la propia operación en el campo pueden afectar a las características funcionales de algún componente o causar roturas en terminales eléctricos, conexiones ópticas o encapsulados.

Además, la radiación produce efectos de ionización y de desplazamiento en los dispositivos de fibra óptica<sup>5</sup>, como se analiza seguidamente.

#### Fibras ópticas

El efecto de ionización más común en las fibras ópticas es la atenuación inducida que

depende de la composición y proceso de fabricación de la fibra, longitud de onda de operación, potencia luminosa acoplada, tasa de dosis y dosis total de radiación, temperatura ambiente y radiación absorbida con anterioridad<sup>6,7</sup>. Las mediciones comprendidas en el programa de pruebas demostraron que la atenuación inducida puede llegar a 7 dB/m, lo que impide utilizar en el entorno espacial de intensa radiación las fibras corrientemente empleadas en aplicaciones terrenales.

Se ha probado que las fibras de núcleo de sílice pura presentan las mejores características ante la radiación a 1,3  $\mu\text{m}$ , con atenuaciones inducidas de 20 dB/km y 25 dB/km tras exponerse a respectivas dosis totales de radiación de  $10^6$  y  $10^7$  rads.

### Detectores

El mismo mecanismo por el que los detectores son sensibles a la energía óptica también hace que la mayoría de ellos sean sensibles a la radiación, la cual produce pares electrón-hueco que crean un ruido indeseado<sup>8</sup>. Tres son los principales efectos de la radiación en los fotodetectores: disminuye la responsividad, aumenta la corriente de oscuridad e induce una corriente de ruido. Los dos primeros se relacionan con la dosis o flujo total de partículas y el tercero, con la tasa de dosis.

Se ha notificado una degradación de la responsividad<sup>8</sup> de menos del 20% para algunos detectores PIN de Si tras un flujo total de  $10^{14}$  n  $\text{cm}^{-2}$  ó dosis de  $10^7$  rad (gamma Cobalto 60). Aunque la alta atenuación inducida en los tallos de fibra de los detectores enmascaró el efecto de la radiación gamma sobre la responsividad de los mismos, las mediciones en el Centro de Investigación antes y después de la irradiación mostraron que la responsividad se reduce en menos del 15% y la corriente de oscuridad se multiplica por 1 a 3,5, dependiendo del dispositivo.

### Diodos electroluminiscentes (LED)

El principal efecto de la radiación en los LED es la reducción de intensidad luminosa. Esta degradación se relaciona con el producto del tiempo de vida de los portadores minoritarios por la constante de daño<sup>9</sup>, de acuerdo con la expresión:

$$(L_o/L)^{1/3} - 1 = t_o K \Phi$$

donde  $L_o$  y  $L$  son las potencias luminosas antes y después de la irradiación,  $t_o$  es el tiempo de vida inicial de los portadores minoritarios,  $K$  es la constante de daño, y  $\Phi$  es el flujo de radiación (n  $\text{cm}^{-2}$ ) o la dosis total (rads).

De las pruebas se ha obtenido un producto  $t_o K$  de  $7,7 \times 10^{-9}$  rad<sup>-1</sup> en los dos

casos mejores de LED (InGaAsP), en los cuales la potencia se redujo a la mitad (3 dB de pérdida) para una dosis total aproximada de  $3,4 \times 10^7$  rads. Estos valores son coherentes con los resultados obtenidos en otras pruebas para un LED de InGaAs ( $1,06 \mu\text{m}$ ), que dieron un valor de  $t_o K$  igual a  $1,7 \pm 1,0 \times 10^{-9}$  rad<sup>-1</sup>. Otros dos LED fallaron durante las pruebas de radiación.

### Láseres

El efecto principal de la radiación en los diodos láser es el incremento de la corriente umbral ( $I_{th}$ )<sup>10</sup>. Para dosis mayores de  $10^7$  rads,  $I_{th}$  aumentó del 12% al 32% de su valor inicial. Los láseres recuperan totalmente sus características iniciales al cabo de cierto tiempo de cesar la radiación.

### Otros dispositivos

Se ha medido una fuerte atenuación inducida, hasta 7 dB por metro, en los tallos de fibra estándar presentes en detectores y dispositivos pasivos. Este fue el único efecto apreciable de la radiación en los conectores, acopladores y conmutadores.

### Conclusiones

Las fibras ópticas para aplicaciones espaciales deben ser resistentes a la radiación, incluso en los tallos cortos de los dispositivos, dadas las altas atenuaciones inducidas en la mayoría de las fibras estándar. De acuerdo con el programa de pruebas desarrollado por Alcatel Standard Eléctrica, la fibra más adecuada para aplicaciones espaciales tiene núcleo de sílice pura y envoltura de sílice fluorada. Tal fibra tiene una atenuación inducida de 20 a 25 dB/km para dosis de radiación totales de  $10^6$  y  $10^7$  rads. Además ha de estar revestida con adecuados materiales de espesor suficiente para soportar el amplio margen de temperatura y las condiciones de alto vacío del espacio, ya que el comportamiento de las fibras depende del espesor de las protecciones. Este tipo de fibra se puede fabricar por el método "rod-in-tube" modificado u otros métodos más usuales como la deposición axial de vapor o la deposición química de vapor.

Dos fibras con las protecciones primaria y secundaria de poliamida y resina fluorada en la primera, y de acrilato curado con UV y poliamida en la segunda, han demostrado tener una buena estabilidad durante las pruebas de temperatura y de vacío a  $10^{-5}$  mbar con ciclos térmicos de  $-50^\circ\text{C}$  a  $+100^\circ\text{C}$ . Un cable seleccionado de dos fibras (recubiertas de acrilato curado con UV y poliamida), desplegable en campo para aplicaciones militares, presentó



asimismo una buena estabilidad térmica y en vacío. La pérdida de peso se limitó a un 5,5% tras haber pasado más de 8 días sometido al vacío y a ciclos térmicos.

Ciertas fuentes de luz (diodos láser y LED) se han comportado muy bien durante las pruebas de radiación, mecánicas y de vacío. Se recomienda que el láser semiconductor opere a 25° para asegurar el máximo de vida operativa. Como se ha especificado un margen de temperatura de -30°C a 70°C dentro de la estación espacial, se requiere regular la temperatura de la pastilla del láser, lo cual suele realizarse mediante una célula Peltier que da calor o frío por inversión de la corriente eléctrica. En los módulos láser probados no se podía mantener la temperatura operativa a 25°C cuando la temperatura ambiente superaba los 60°C, por lo que hubo que mejorar la máxima capacidad de enfriamiento de las células Peltier incorporadas.

Los conectores para fibras multimodo del tipo SMA han demostrado una buena estabilidad y en contraste con los de haz expandido, son ligeros y de bajo coste. Un acoplador en estrella falló durante los ciclos térmicos de -35°C a +70°C, y otro durante las pruebas de vacío a 70°C.

Los conmutadores ópticos del tipo electromecánico están sujetos a desgaste mecánico y no pudieron superar las rigurosas pruebas de vibración y choque.

#### Referencias

- 1 H. M. L. Olesen: Designing Against Space Radiation: Part 3: *Electronics*, diciembre 1964, n° 37, págs. 61-71.
- 2 Space Station Program Definition and Requirements Section 3, Appendix 3.1., Natural Environment Definition for Design: *European Space Agency Report*, marzo 1986.

- 3 L. Adams: Laboratory Simulation of the Space Radiation Environment for Electronic Components: *Radiation Physics and Chemistry*, 1980, volumen 15, págs. 525-535.
- 4 C. E. Barnes y J. J. Wiczer: Fiber Optic Data Links Optimized for Radiation Environment: *Proceedings Integrated Optic and Optical Communication Conference - European Conference on Optical Communication '85*, 1985, págs. 707-710.
- 5 V. A. J. Van Lint, G. Gigas y L. Barengoltz: Correlation of Displacement Effects Produced by Electrons and Protons and Neutrons in Silicon: *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1975, volumen NS-32, n° 6, págs. 2663-2668.
- 6 W. B. Beck, T. L. Reinhardt y B. Skutnik: Radiation Hardened Fibers: Asking the Right Questions: *Photonics Spectra*, mayo 1986, págs. 65-72.
- 7 E. J. Friebele, C. G. Askins y M. E. Gingerich: Effect of Low Dose Rate Irradiation on Doped Silica Core Optical Fibers: *Applied Optics*, 1984, volumen 23, n° 23, págs. 4202-4208.
- 8 L. N. Aukerman, Y. Song y F. L. Vernon, Jr: Radiation Effects on Semiconductor Optical Devices for Space Communications: *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 1982, volumen 328, págs. 56-65.
- 9 C. E. Barnes: Radiation Effects in 1,06  $\mu\text{m}$  InGaAs LED and Si Photodiodes: *Journal of Applied Physics*, 1979, volumen 50, n° 8, págs. 5242-5250.
- 10 C. E. Barnes: The Effect of Neutron Irradiation on the High Temperature Operation of Injection Laser Diodes: *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 1984, volumen 506, págs. 218-223.

**A. Aguilar** nació en Granada, España, en 1945. Se graduó en ciencias físicas por la Universidad de Madrid, en 1968, y después trabajó en el Instituto de Óptica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Obtuvo el grado de Doctor en 1980. En 1972 entró en SESA en la división de planificación de las telecomunicaciones, y pasó algún tiempo en Standard Telecommunication Laboratories (Reino Unido) dedicado a fabricación, medidas y sistemas de fibras ópticas. Desde 1977 a 1986, el Dr. Aguilar ha trabajado en el grupo de Comunicaciones Ópticas del Centro de Investigación y Desarrollo de Alcatel Standard Eléctrica como responsable de la tecnología de fibras ópticas. Actualmente en el grupo de redes de área local, dirige el proyecto para el contrato con la ESA que cubre la caracterización de nuevos dispositivos y sistemas de fibra óptica aplicables en el espacio.

# Red de área local de las estaciones espaciales Columbus

Alcatel Standard Eléctrica ha contribuido a la definición de la red de área local destinada al subsistema de gestión de datos del programa Columbus. Se ha especificado el medio de transmisión y los protocolos de comunicación ISA, y se ha preparado un simulador para su evaluación funcional.

**P. Alonso**  
**L. Bermejo**  
**V. Quílez**

Alcatel Standard Eléctrica, Madrid, España

## Introducción

La contribución europea más importante a la futura estación espacial del mundo occidental, concebida en torno de la Estación Espacial de los Estados Unidos (EEEU) es el ambicioso programa Columbus, auspiciado por la Agencia Europea del Espacio. Las naves espaciales Columbus, de lanzamiento previsto en el transcurso de los años 90, se unirán a la ya mencionada EEEU, y conjuntamente con las aportaciones provenientes de Canadá y Japón crearán un centro orbital capaz de acomodar gran número de actividades científicas.

Además de los necesarios equipos de seguimiento y telemando localizados en la estación terrena, el programa Columbus comprende tres naves espaciales diferentes:

- el módulo presurizado de 4 segmentos, un laboratorio tripulado que vuela en órbita ecuatorial
- la plataforma polar, un laboratorio de observación de la Tierra de 5 kW, no tripulado y situado en órbita polar
- la estación autónoma, compuesta por un módulo presurizado de 2 segmentos, ocasionalmente tripulado para fines de servicio, acoplado a un módulo de recursos de 10 kW.

En el interior de cada una de estas naves espaciales se necesita transmitir y procesar un gran volumen de datos entre distintos puntos de la estructura para funciones tales como comunicaciones, distribución de energía eléctrica, control de la posición y de la trayectoria de navegación, detección de las condiciones ambientales, mediciones, servicio de las cargas útiles, etc. Todas estas funciones las asume el subsistema de gestión de datos (SGD), a bordo de cada

una de las tres naves espaciales. El SGD se encarga asimismo de las comunicaciones con las estaciones terrenas.

El diseño del SGD, orientado a reducir al mínimo los costes del programa global, requiere conseguir una arquitectura tolerante a fallos, capacidad de evolucionar tanto en tecnología como en operación, y máxima similitud de equipamiento con respecto a otros elementos del Columbus.

## La red de área local del SGD

Cada una de las naves espaciales Columbus debe poseer su propia red de área local (RAL) para sustentar la manipulación de los datos en el SGD correspondiente. En dicha red se transmiten dos tipos distintos de datos: los de tipo interno intercambiados entre usuarios de a bordo (es decir, puntos en los que se adquieren, escriben o procesan datos), y los de tipo externo, entre usuarios de a bordo y usuarios situados en la Tierra o en otras naves.

El equipamiento físico del SGD, se configura realmente en dos RAL: red del sistema y red de la carga útil (Fig. 1). La primera RAL sustenta todos los servicios a nivel de sistema (gestión y control de la misión, gestión de la base de datos, sincronización, gestión de los recursos, telemedida, etc.), mientras que la segunda proporciona los servicios genuinos de la carga útil (adquisición de datos para telemedida, telemando y supervisión de dicha carga útil, y transporte de los datos científicos).

Un nodo común a ambas RAL, con funciones de puente, posibilita el intercambio de datos entre ellas. El formador de telemedida y la unidad de telemando son los nodos que comunican con el usuario en tierra, mientras que el nodo con funciones de pasarela intercambia datos con las

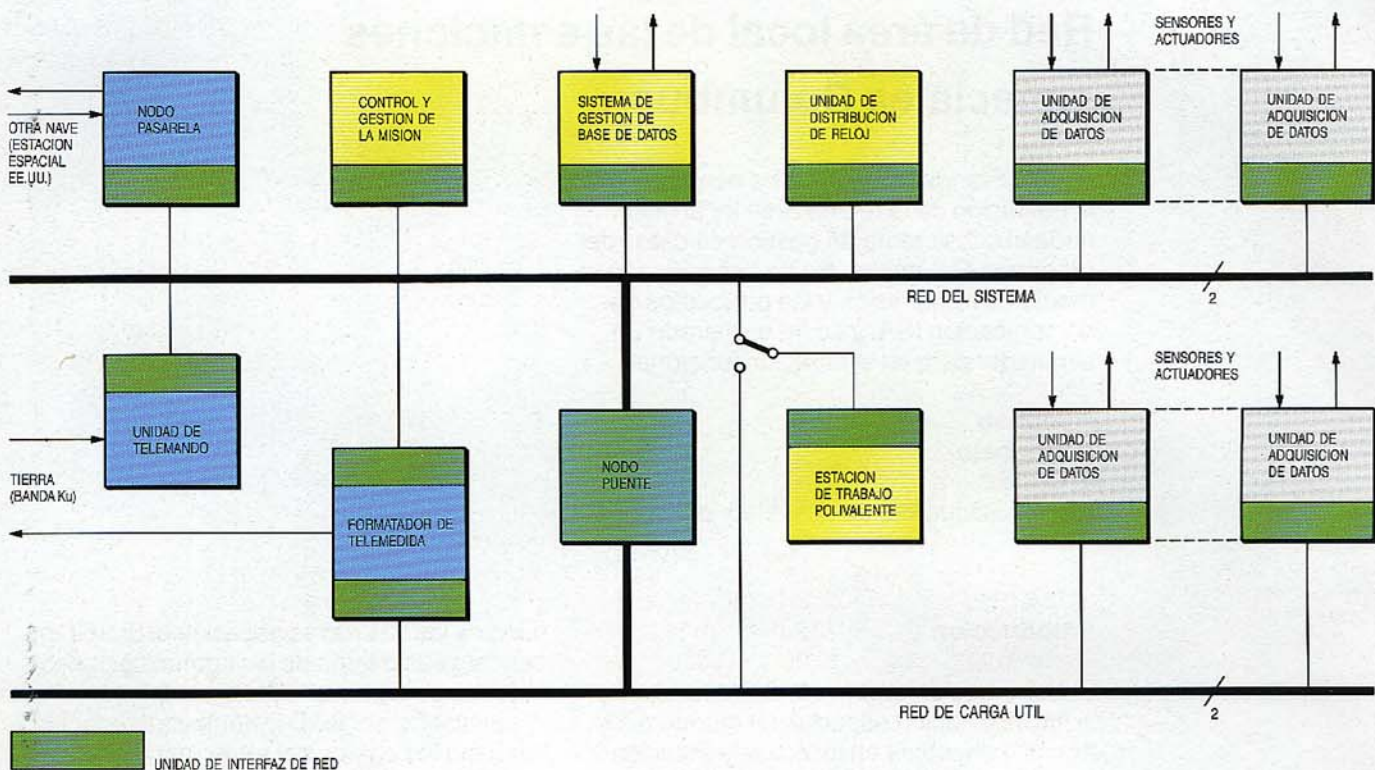


Figura 1  
Configuración de la  
RAL del SGD.

demás naves. Los nodos de adquisición, presentes en ambas RAL, transmiten datos a los actuadores y reciben datos de los sensores. Existe un nodo encargado de la gestión de la base de datos que permite el almacenamiento y la extracción de ficheros, y por otra parte una estación de trabajo polivalente proporciona información de una u otra de las RAL a la tripulación. Cada uno de los nodos se comunica con el medio de transmisión a través de un interfaz idéntico.

Para cumplir los objetivos del programa preparatorio del Columbus, actualmente en curso y cuya finalización se prevé para enero de 1989, debe haberse definido y especificado enteramente la RAL del SGD tras un cuidadoso estudio de un conjunto de alternativas y la elección de la solución óptima. A Alcatel Standard Eléctrica se le ha asignado la responsabilidad de definir y diseñar a alto nivel esta red del SGD, así como la de llevar a cabo todos los análisis y pruebas que permitan elegir el medio y la configuración más adecuados. Las decisiones deben apoyarse en evaluaciones del comportamiento ante las distintas opciones, sopesando parámetros tales como fiabilidad, coste, consumo de energía, masa y volumen.

### Elección del medio físico

En la elección del medio físico que ha de constituir la RAL del SGD se han conside-

rado dos grandes alternativas: la fibra óptica y el cable coaxial.

El uso de fibras ópticas para aplicaciones espaciales tiene notables ventajas, ya que además de sus propiedades intrínsecas en cuanto a atenuación, ancho de banda, inmunidad a interferencias electromagnéticas y diafonía, son muy ligeras y ocupan un volumen pequeño.

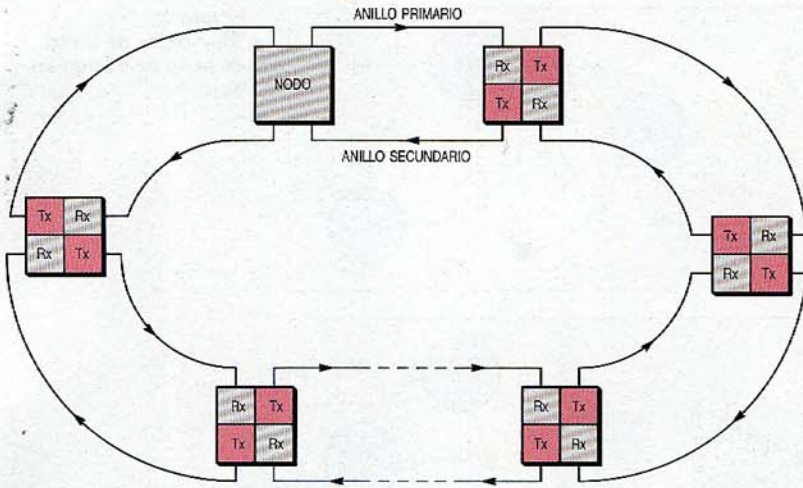
Se consideró asimismo la opción de cable coaxial, sobre todo por tratarse de una tecnología suficientemente madura y muy controlada que por ello ofrece un grado de confianza muy elevado, factor éste esencial en aplicaciones espaciales.

A la hora de redactar este artículo, la Agencia Europea del Espacio todavía no ha decidido el medio que va a adoptar en la fase de realización. Sin embargo, las posibilidades en favor de la fibra óptica parecen crecer con el paso del tiempo. El reciente anuncio por la NASA de que la estación espacial americana será equipada con fibras ópticas tendrá sin duda notable influencia sobre la decisión final europea.

### Alternativas de fibra óptica

En el supuesto de haber elegido como medio de transmisión la fibra óptica, se estudiaron dos alternativas: el interfaz de fibra de datos distribuidos (en inglés, FDDI) y el paso de testigo en bus, las cuales utilizan topologías físicas de anillo y estrella, respectivamente.

La norma FDDI proporciona un sistema de interconexión polivalente de gran veloci-

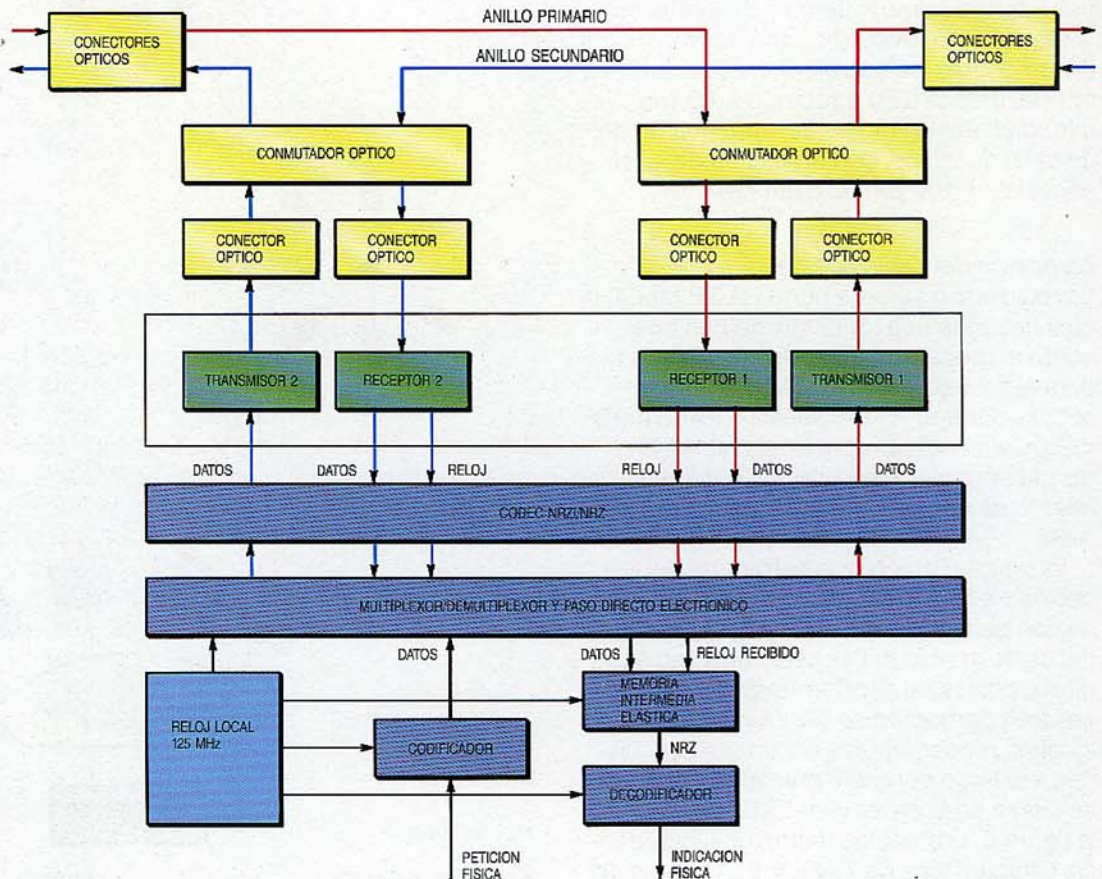


**Figura 2**  
La red del interfaz de fibra de datos distribuidos (FDDI).

dad de transmisión (100 Mbit/s), capaz de admitir una velocidad de transferencia continua del orden de 80 Mbit/s. Las estaciones o nodos se interconectan mediante dos anillos (Fig. 2) en los que la información circula en sentidos opuestos. Cada estación puede acceder a ambos anillos, y tiene posibilidad de unirlos en bucle a su través, así como de conectar directamente la entrada a la salida, lo cual confiere a la red una gran fiabilidad al poder sustituir por otro el elemento afectado sin interrupción del tráfico en la red. Esto permite tolerar fallos

sencillos y un buen número de fallos dobles manteniendo la funcionalidad. El interfaz entre cada estación y el medio físico comprende dos conectores ópticos, cada uno de los cuales es capaz de conectar dos fibras ópticas con arreglo a un esquema preestablecido. Cada transceptor óptico se conecta a las fibras ópticas por medio de un elemento de paso, eventualmente un conmutador óptico, con el fin de dotar al nodo de las posibilidades de paso directo y bucle interno ya mencionadas. En la figura 3 se representa la estructura general de un nodo, incluyendo las funciones básicas asociadas al nivel físico.

Se tomó la norma IEEE 802.4 como referencia para la alternativa de red con paso de testigo en bus. Con el fin de optimizar las capacidades de proceso, se eligió una velocidad de transmisión de 10 Mbit/s. La configuración consiste en estaciones interconectadas por medio de una estrella óptica pasiva central, que actúa funcionalmente como un bus. Para materializar la estrella había dos soluciones básicas: la transmisiva y la reflexiva (Fig. 4). Puede verse que la primera solución requiere el doble de fibra óptica que la segunda, mientras que en esta última el balance de potencia se ve afectado por la adición de divisores de potencia en cada extremo del enlace. Este hecho, unido a la mayor existencia de



**Figura 3**  
Estructura de nodo de la FDDI.

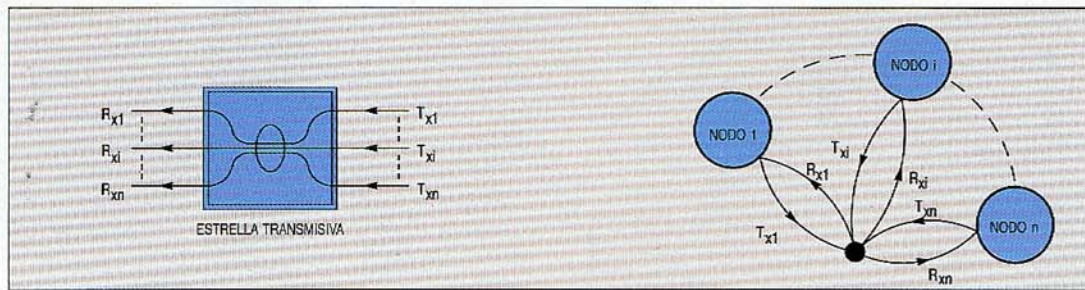


Figura 4 Topologías de la red de paso de testigo en bus.

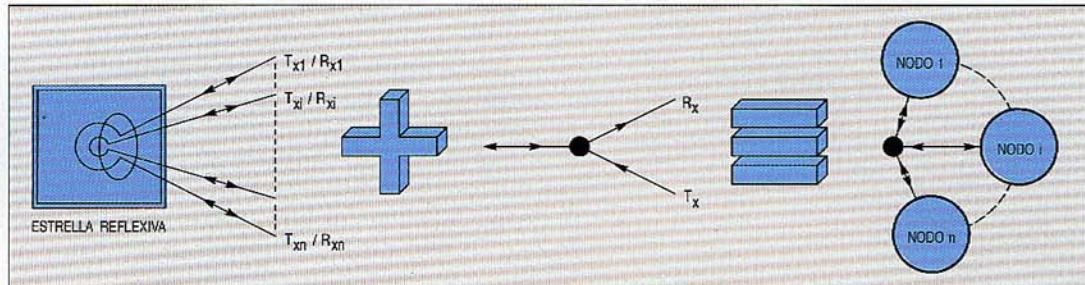


Figura 5 Estructura de la red de paso de testigo mediante bus.

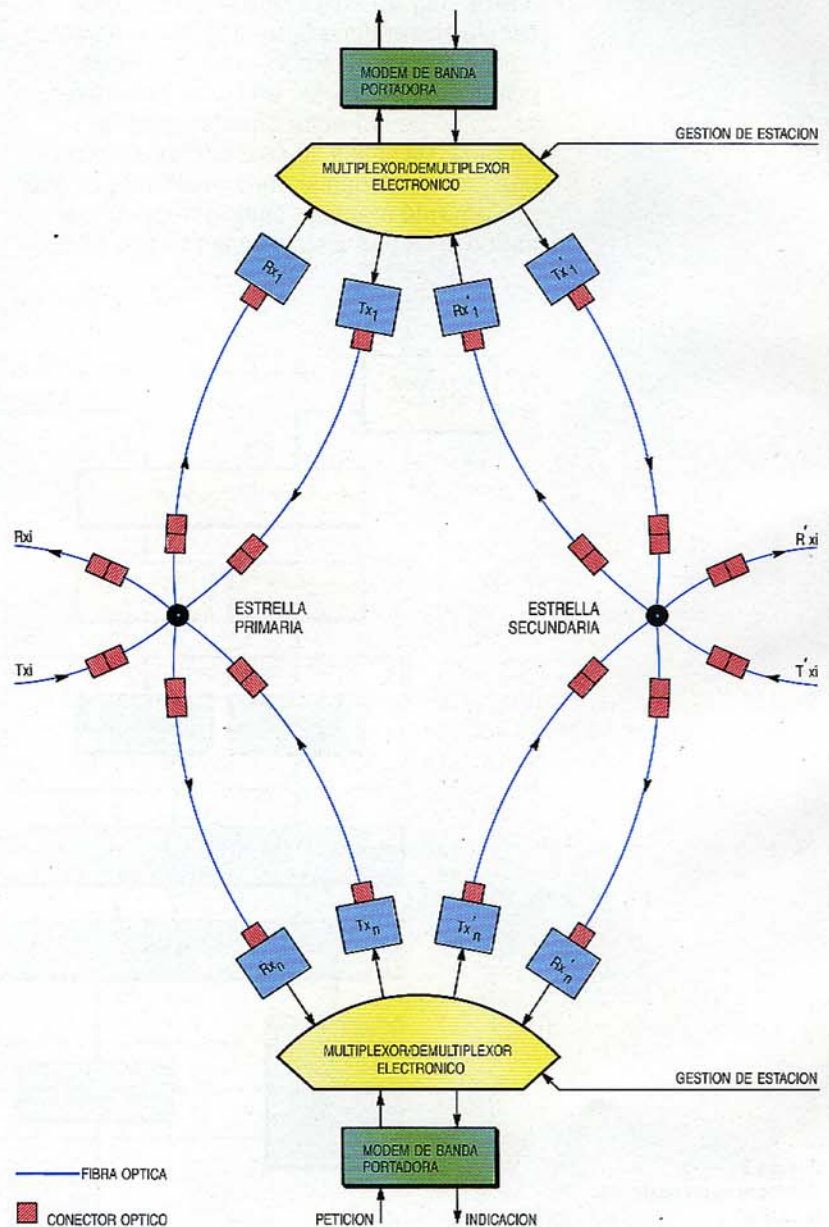
productos comerciales, favorece la opción de estrella transmisiva. Por razones de fiabilidad se duplica toda la estructura, de modo que cada estación recibe cuatro fibras, dos de ellas dedicadas a los transmisores y las otras dos a los receptores. Solamente la estrella primaria está habitualmente activa, mientras que la secundaria permanece en reserva. La disponibilidad de los elementos de reserva se revisa periódicamente. La figura 5 muestra un diagrama de bloques general, incluyendo las funciones básicas pertenecientes al nivel físico.

Con el fin de evitar los complejos circuitos de los láseres, se han elegido como fuentes ópticas diodos LED operando a  $1,3 \mu\text{m}$ , mientras que la fibra es del tipo multimodo de salto de índice, con un núcleo de sílice especial de  $100 \mu\text{m}$  de diámetro.

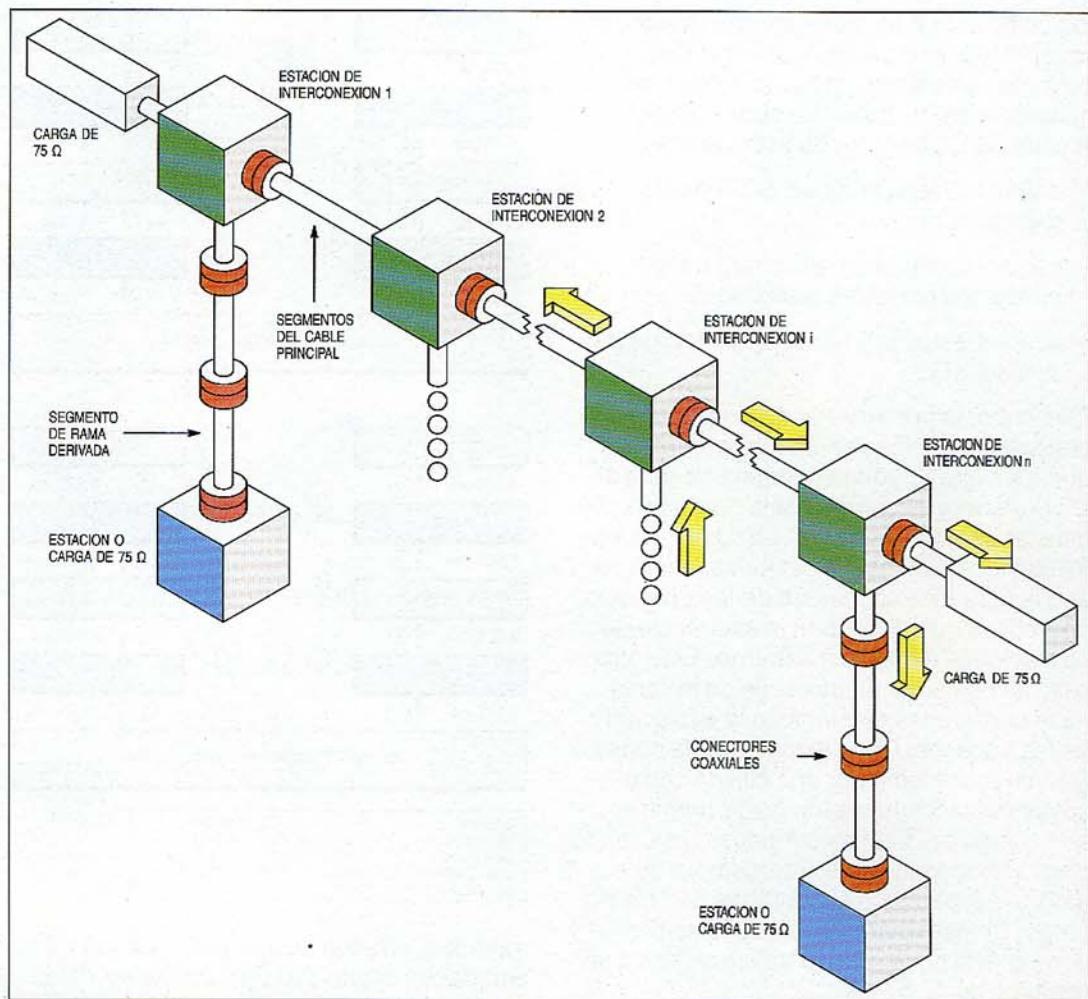
**La opción del cable coaxial**

La realización sigue la norma IEEE 802.4, la cual describe una topología de bus que utiliza el mecanismo de paso de testigo para el acceso al medio (MAC, medium access control). Entre las técnicas de transmisión alternativas contempladas en la norma se eligió la modulación por desplazamiento de frecuencia (MDF) con fase coherente.

La figura 6 muestra la estructura del cableado. Se utilizan estaciones de interconexión para conectar las ramas derivadas del cable principal. Las estaciones no son direccionales; la señal enviada desde una rama en derivación se divide en partes iguales, propagándose en ambas direcciones a lo largo del cable principal, tal y como se ilustra en la sección derivada central de la figura 6. Los cables tienen una impedancia característica de  $75 \Omega$ ; los extremos del



**Figura 6**  
Estructura del sistema de cableado.



cable principal y de las ramas de derivación se terminan asimismo en resistencias de 75 Ω.

Cuando una señal que se propaga a lo largo del cable principal alcanza una estación de interconexión, una pequeña parte se segrega y se dirige hacia la rama, tal como se ilustra en la sección derivada de la derecha (Fig. 6). La mayor parte de la señal continúa propagándose por el cable principal hasta que alcanza el extremo, absorbiéndose en la resistencia de carga.

Todos los componentes (cable principal y ramas de derivación, conectores, cargas de

terminación y estaciones de interconexión) fueron caracterizados, y se realizaron detalladas simulaciones con el programa Spice para determinar el comportamiento de la estructura general de cableado en función de parámetros tales como el número, naturaleza y localización física de las estaciones de interconexión, el número de ramas derivadas carentes de terminación, las posibles rupturas en el cable principal y/o ramas derivadas, la protección frente a interferencias electromagnéticas y las medidas para evitar su generación, así como los aspectos de puesta a masa y seguridad personal.

**Tabla 1 - Funciones de las capas superiores del SGD**

Núcleo, lectura, escritura	} Gestión y acceso a transferencia de ficheros
Acceso a fichero	
Gestión limitada de fichero	
Gestión potenciada	
Agrupamiento, recomienzo, recuperación	} Elemento de servicio de aplicación común (ESAC)
Control de asociación	
Transferencia de información (como en el protocolo de fabricación automática)	} Presentación
Núcleo	
Núcleo, semidúplex, dúplex	} Sesión
Sincronizaciones menores	
Resincronización	

### Soporte lógico del SGD

Se ha elegido para esta red de área local el modelo de referencia ISA (interconexión de sistemas abiertos) desarrollado por la ISO (International Standards Organization), el cual divide las funciones de comunicación en una jerarquía de siete niveles o capas. Las funciones de las tres capas superiores (aplicación, presentación, sesión) están orientadas al usuario, mientras que las cuatro capas inferiores realizan funciones orientadas a la comunicación.

Las directrices de la Agencia Europea del Espacio para la preparación del soporte

lógico de esta RAL, consistían en tratar de sacar el máximo partido posible de los paquetes existentes, adaptándolos a las necesidades del SGD. En consecuencia, Alcatel SESA ha seguido estas etapas:

- definir los requisitos del SGD en las capas superiores
- contactar con compañías que posean productos portables adecuados
- adaptar estos productos a las necesidades del SGD.

Para cubrir la primera etapa, se tomaron una serie de decisiones en cuanto a identificar qué funciones podrían necesitarse para el SGD de las que contempla la normativa ISA para las capas superiores. La tabla 1 muestra las necesidades así definidas, mientras que la figura 7 expone uno de los procesos operativos que describen la secuencia de operaciones extremo a extremo. Este proceso se compone de una serie de instantáneas numeradas que indican la evolución de los sucesos. Cada extremo de la conexión se representa por una pila de capas, cuyas interacciones a través de primitivas se señalan por flechas continuas. Las flechas a trazos indican el intercambio de datos de protocolos entre capas del mismo rango. En este guión de proceso se presupone que la conexión de transporte está ya establecida.

Seguidamente se emprendió la búsqueda de paquetes comerciales de programación que fueran adaptables a las necesidades del SGD. Se recopiló información de más de 300 compañías, utilizándose una base de datos para almacenar y procesar todos los datos pertinentes. Cinco compañías fueron preseleccionadas, evaluando sus productos con respecto a criterios tales como disponibilidad, portabilidad, grado de satisfacción de los requisitos y precio, ponderado cada factor con el peso adecuado. La última etapa, que se completará durante la siguiente fase de realización del proyecto Columbus, a partir de 1989, desarrollará la adaptación de los paquetes preseleccionados al entorno real que presenta el SGD, permitiendo así el realizar la selección final, seguida por la integración y las pruebas.

### Evaluación de la funcionalidad de la RAL del SGD

Para evaluar la funcionalidad de la RAL del SGD se utiliza un simulador. En una primera etapa, se compararon varios simuladores posibles, tomando como base sus exigencias de equipo y programación, su disponibilidad comercial, flexibilidad de uso y capacidad de expansión, facilidad de generar

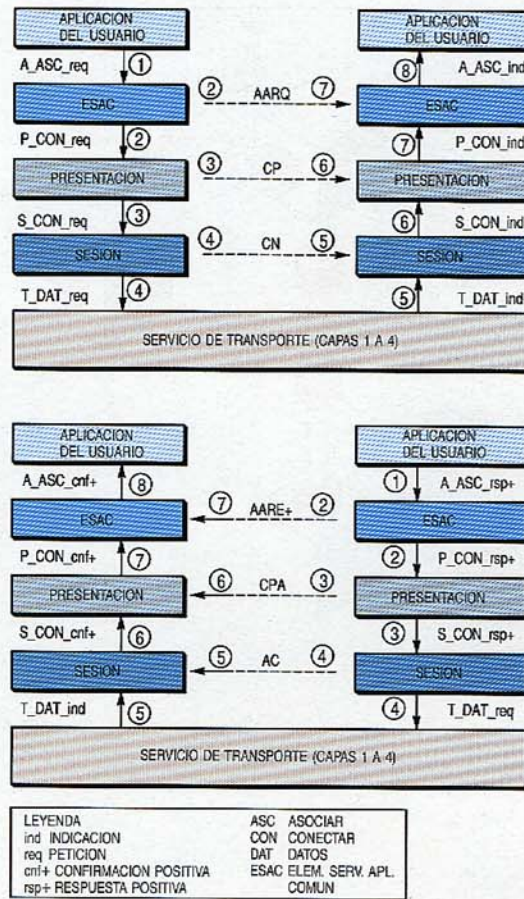
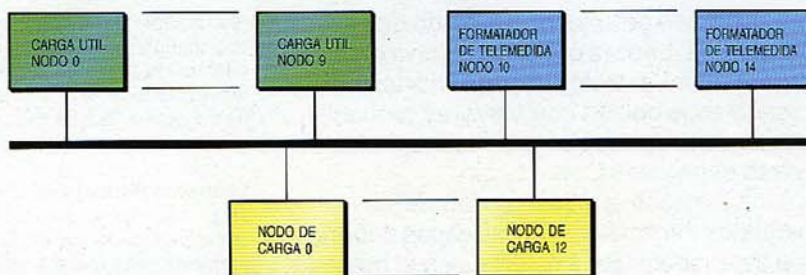


Figura 7  
 Procesos operativos (establecimiento logrado de una conexión, supuesta una conexión de transporte previa).

modelos, empleo del lenguaje natural y uso agradable, capacidad de suministrar datos estadísticos y, por último, el nivel de confianza. Como resultado de esta comparación, se seleccionó el simulador del National Bureau of Standards (Institute for Computer Science and Technology, Ministerio de Comercio de los Estados Unidos). Este simulador NBS tiene las características siguientes:

- El soporte lógico está estructurado según el modelo de referencia ISA. Hay un módulo por cada capa de protocolo (módulos de usuario, transporte, red, enlace y físico).
- La mayoría de los protocolos de las capas inferiores y de la capa de transporte del SGD están ya implantados en el simulador.
- La modelación de las capas de transporte, red y subred (enlace de datos y capa física) es suficientemente completa para permitir una correcta evaluación de la RAL del SGD.
- Además de los nodos simulados totalmente (nodos activos), el simulador permite definir nodos de carga para generar tráfico de carga en el bus.
- Se pueden utilizar distintas leyes estadísticas para generar mensajes y determinar su tamaño.

- Proporciona un conjunto bien escogido de aplicaciones potenciales de usuario.
- Contiene módulos de soporte lógico para varios protocolos de acceso: se seleccionaron los correspondientes al paso de testigo en bus para construir el simulador del SGD.
- Los parámetros más importantes que pueden evaluarse son: capacidad neta de transferencia ofrecida al usuario, retardo medio en un sentido, utilización del bus, utilización de la unidad central de proceso, tiempo de rotación del testigo y utilización media de la memoria.



**Figura 8**  
Arquitectura simulada de red.

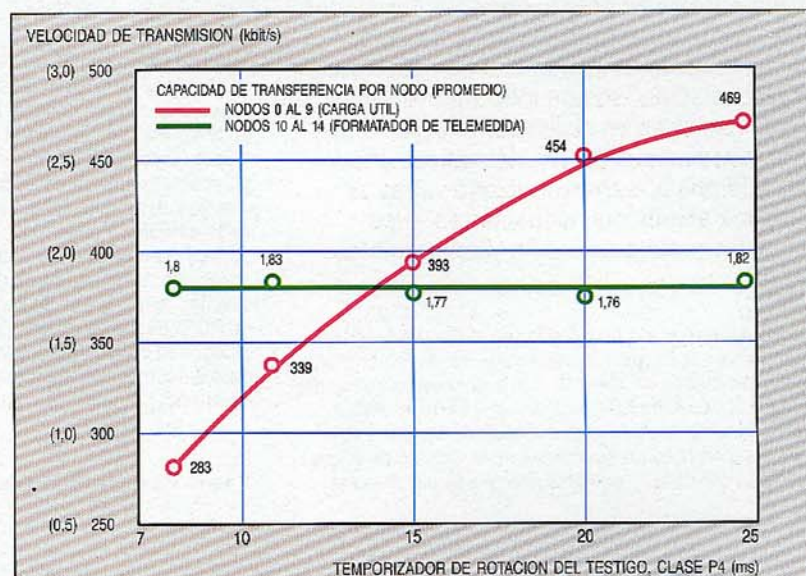
Los estudios iniciales de simulación se dirigieron a evaluar el comportamiento de los nodos formadores de la información de telemida. Estos nodos procesan los datos de telemida recibidos de los nodos de carga útil (sensores de telemida). Para alcanzar este objetivo, se efectuaron medidas exhaustivas de las prestaciones obtenidas en relación con distintos parámetros de los protocolos. Como ejemplo se incluye aquí el estudio realizado para determinar la duración ideal de la temporización para el testigo con prioridad P4 (P4 TRT).

Este temporizador gestiona el acceso de los mensajes clasificados con clase de prioridad P4, dentro del mecanismo de acceso al bus por paso de testigo. La función del P4 TRT es distribuir el tiempo total disponible del bus de una manera equitativa entre los nodos de la RAL, de tal forma que cuando aparezca sobrecarga en uno o más de estos nodos, el temporizador impida a ningún nodo acaparar el bus durante un largo periodo en detrimento del resto de los nodos. En este sentido, es deseable acortar la duración del temporizador P4 TRT. Sin embargo, se detectó que las duraciones cortas del P4 TRT tenían un impacto negativo en la máxima capacidad neta de transferencia para una configuración dada. Por consiguiente, se procedió a un estudio detallado de dicha capacidad de transferencia en función de la duración del temporizador para la configuración indicada en la figura 8. La figura 9 muestra cómo varía tal capacidad para el usuario en función de la duración del temporizador, aplicando los parámetros de tráfico indicados en la tabla 2 y los parámetros de protocolo, medio físico y testigo reflejados en la tabla 3. Los resultados obtenidos permitieron recomendar una duración óptima para el temporizador.

**Conclusiones**

La tecnología de fibras ópticas ofrece grandes expectativas para la realización de

**Figura 9**  
Capacidad neta de transferencia para el usuario.



**Tabla 2 - Parámetros de tráfico para simulación**

Tráfico	Tamaño del mensaje	Tiempo transcurrido entre mensajes consecutivos
De la carga útil al formador de telemida	128 a 1024 octetos distribución uniforme	9,2 ms distribución constante
Del formador de telemida a la carga útil	20 octetos distribución constante	160 ms distribución constante
De carga	60 octetos distribución constante	200 ms distribución exponencial

**Tabla 3 - Parámetros de la simulación de protocolo, medio físico y testigo**

Tamaño del paquete	1060 octetos
Estructuras de la unidad de datos del protocolo de transporte y de acuse de recibo	Formato normal (5 octetos)
Cabecera de red	2 octetos
Cabecera de subred	22 octetos
Mecanismo de acuse de recibo (ACK)	10 DT (mensajes), antes de un ACK
Velocidad de transmisión del enlace	10 Mbit/s
Retardo de propagación	0,55 μs
Tamaño trama de testigo	19 octetos
Duración del P4 TRT	8, 11, 15, 20 y 25 ms



futuras redes de área local a bordo de naves espaciales. La fibra óptica ha sido ya elegida para la futura estación espacial norteamericana, y es la opción con mayores probabilidades de aceptarse para las redes de las naves espaciales Columbus.

Una exhaustiva investigación de los paquetes informáticos de las capas superiores del modelo ISA existentes en el mercado, ha conducido a elegir un conjunto muy reducido de productos por ser los más adecuados para satisfacer las necesidades del SGD. Actualmente se realizan las adaptaciones pertinentes de tales productos.

Se han estudiado varios simuladores, y finalmente se ha seleccionado el simulador NBS como el instrumento más apropiado para evaluar la funcionalidad de esta red de área local. Después de introducir algunas modificaciones en el simulador para compatibilizarlo con ciertas características específicas del SGD, se han realizado varias simulaciones en distintas situaciones, y los primeros resultados están ya disponibles.

**Pedro Alonso** nació en España, en 1940, graduándose ingeniero en la Escuela Técnica Superior de Telecomunicación de Madrid en 1965. Desde entonces ha trabajado en Alcatel Standard Eléctrica, en labores de investigación dentro del área de comunicaciones de datos. En 1970 fue nombrado responsable de la división de datos de los laboratorios, y posteriormente asumió diversas

responsabilidades en ingeniería de productos informáticos, ingeniería de subsistemas de conmutación, y desarrollos de interfaces teletex y X.25 para ordenadores personales. El Sr. Alonso es también profesor titular de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid.

**Leonardo Bermejo** nació en Madrid, en 1944. En 1971 se graduó ingeniero en la Escuela Técnica Superior de Telecomunicación de dicha ciudad en 1971, y seguidamente se incorporó a Alcatel Standard Eléctrica, trabajando en el Centro de Investigación, en el área de tráfico. Participó en el dimensionamiento de los sistemas Pentaconta\* 32, 1000 y 2000, proporcionó el soporte de simulación durante la definición de la estrategia de control de carga del Sistema 12 de conmutación digital, además del soporte de ingeniería de tráfico para el desarrollo del sistema 5700 BCS. El S. Bermejo actualmente trabaja en la evaluación del comportamiento frente al tráfico de las RAL del programa Columbus.

**Vicente Quílez** nació en España, en 1950. En 1971 se graduó ingeniero técnico de telecomunicación por la Universidad Politécnica de Madrid, y en 1977 se licenció en física por la Universidad Complutense de dicha ciudad. Entró en Alcatel SESA en 1971, y se ha dedicado particularmente al área espacial. Ha participado en el diseño y desarrollo del satélite INTASAT, de un sistema de teledata y telemando en banda S, de redes de datos y sistemas de transmisión por fibras ópticas para aplicaciones industriales y de telecomunicación. Ha sido además responsable de la planificación de un sistema de RDSI de banda ancha. En 1987 el Sr. Quílez fue designado para dirigir la participación de Alcatel Standard Eléctrica en el subsistema de gestión de datos, dentro del programa Columbus.

\* Marca registrada del Grupo Alcatel

Husson, J.-C.

## **Introducción a los sistemas espaciales**

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, nº 1, págs. 4-11

Para entender los sistemas espaciales es necesario saber cómo giran los satélites alrededor de la Tierra. Estos pueden clasificarse de acuerdo con su órbita y su método de estabilización. Pero los sistemas espaciales no incluyen solamente satélites, sino que también llevan asociados estaciones de seguimiento, centros de control, y centros de proceso de datos. El propio satélite está formado por diversos subsistemas: carga útil, alimentación, control de temperatura, control de actitud y de órbita, telemetría y telemando, y estructura. El autor describe estos y otros aspectos de los sistemas espaciales, incluyendo el proceso de colocación de un satélite en órbita geostacionaria.

Lefrançois, G.

## **Estaciones terrenas para nuevas normas, nuevos sistemas y nuevos servicios**

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, nº 1, págs. 12-18

Las comunicaciones por satélite están sufriendo una rápida evolución como resultado de la mayor competencia de los cables de fibra óptica, la sustitución de la transmisión analógica por la transmisión digital (incluyendo la RDSI) y la demanda de nuevos servicios, a menudo con conexiones directas de usuario a usuario. El autor describe cómo Alcatel Telspace se ha apoyado en su larga experiencia de suministrador de estaciones terrenas y en su intensa dedicación a la I+D para desarrollar una nueva gama entera de productos que cumplen plenamente las nuevas normas sobre equipos, y los requisitos de los nuevos sistemas y servicios (enlaces internacionales digitales, redes multiservicio entre oficinas, rutas de comunicación con poco tráfico).

Mollat du Jourdin, P.

## **Sistema Syracuse de comunicaciones militares por satélite**

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, nº 1, págs. 19-26

El sistema Syracuse de comunicaciones militares por satélite, utiliza los satélites Telecom 1, explotados por France Télécom. La carga útil militar incluye los transpondedores de 7 y 8 GHz de cobertura mundial, equipados con tubos de onda progresiva de 20 W, mientras que el segmento terreno de Syracuse contiene estaciones fijas, transportables y a bordo de buques. El sistema proporciona comunicaciones seguras de télex, telefonía y tráfico de datos a 75, 2400 y 16000 bit/s, utilizando técnicas de espectro ensanchado para asegurar alta resistencia a la perturbación y permitir acceso múltiple a la red. El autor describe el sistema global, incluyendo la carga útil del satélite y las estaciones terrenas, y demuestra cómo se ha integrado con las aplicaciones civiles en los satélites Telecom 1. Finalmente se presenta en líneas generales el sistema de la nueva generación Syracuse II.

Bléret, J.; Demars, A.; Karas, A.

## **Sistema de transmisión de datos TELECOM 1**

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, nº 1, págs. 27-34

Desde finales de 1984 el PTT francés tiene en explotación una red de datos multiservicio por conmutación de circuitos, usando como medio de transmisión los transpondedores de la banda Ku (14/12 GHz) de los satélites Telecom 1. Esta red digital permite establecer enlaces de datos entre abonados de Francia y Europa mediante estaciones terrenas compactas situadas cerca de las dependencias del abonado. Los autores describen este sistema que proporciona servicios de voz, imagen y datos a velocidades comprendidas entre 2,4 kbit/s y 2 Mbit/s, tanto con enlaces reservados como asignados por llamadas a petición.

Beaucent, A.F.; Bousquet, J.; Guillemaud, G.

## **Sistema de microestación para redes de datos empresariales**

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, nº 1, págs. 35-41

Las microestaciones de comunicaciones vía satélite pueden utilizarse para constituir redes de transmisión de datos de un buen rendimiento económico. Este artículo describe el sistema de microestación FASTAR\* de Alcatel Telspace. Los autores presentan las aplicaciones para tales redes y describen las características que convierten al sistema Fastar en una de las redes TAMP (terminales de apertura muy pequeña) más avanzadas existente. Se incluyen ahí la flexibilidad y las facilidades de gestión de la red, que no solamente optimizan el uso de la vía por satélite sino que permiten configurar el sistema dinámicamente en redes privadas, divididas y múltiples.

Esculier, J.; Parnière, A.; Salomon, J.

## **Sistema de comunicación por satélite para países en desarrollo**

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, nº 2, págs. 42-48

La comunicación por satélite es particularmente adecuada para establecer servicios de telecomunicación en países en desarrollo y, en un sentido más general, en lugares aislados. Los autores describen la estación terrena FASTCOM\*, ideal para enlaces de poco tráfico por su bajo coste, facilidad de instalación y manejo, compacidad y escaso consumo de energía. El sistema se puede utilizar con satélites Intelsat, ofreciendo el servicio VISTA especialmente para esta aplicación, o con cualquier satélite nacional.

Rozec, X.

## **Carga útil para el satélite de difusión directa de televisión TDF1**

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, nº 1, págs. 49-54

Los satélites de difusión directa de televisión TVSAT1/TDF1 — proyecto conjunto francoalemán —, debieron haber entrado en servicio tras el lanzamiento del TVSAT1 en noviembre de 1987, pero al fracasar éste será el TDF1, programado para lanzarse en octubre de 1988, el primer satélite europeo para difusión directa de televisión. El autor resalta las principales características del proyecto TDF1 y describe los aspectos técnicos del módulo de comunicación y el subsistema de antena, explicando cómo se han respetado las limitaciones de peso y consumo de energía. La experiencia adquirida con el presente proyecto servirá para definir una nueva generación de satélites de difusión directa de televisión.

Beaucher, J.

## **Repetidores para satélites de telecomunicación de los años 90**

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, nº 1, págs. 55-60

Hasta ahora los satélites de telecomunicación eran relativamente sencillos pues se limitaban a la conversión de frecuencias y amplificación de señal. Las principales funciones de proceso de señal y de distribución se realizaban en unas pocas estaciones terrenas más complejas y costosas. Sin embargo, las nuevas tecnologías permiten ahora construir estaciones terrenas pequeñas y de bajo coste que pueden recibir directamente las señales del satélite. El autor explica cómo podrá incorporarse en las futuras generaciones de satélites un sofisticado proceso de señal y funciones de conmutación, reduciendo así el coste de estas pequeñas estaciones terrenas y popularizando su empleo.

\* Marca registrada del Grupo Alcatel

Cerro, A.; Parise, D.

**Nuevos receptores híbridos en naves espaciales**

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 1, págs. 61-66

El receptor es el componente clave en los repetidores transportados en satélites de telecomunicación, dada su contribución al rendimiento total del sistema. Los autores describen la familia de receptores de bajo coste, ligeros y de diseño avanzado, desarrollados por Alcatel Espace para el uso en futuros proyectos de satélites. El diseño aprovecha nuevas soluciones técnicas y nuevas tecnologías calificadas para el espacio, y se apoya en análisis de coste y de masa. Una arquitectura adaptativa y modular, basada en una complejidad menor y funciones estándar, reduce los costes de desarrollo y los recurrentes, y es adecuada para utilizarse en una amplia gama de misiones espaciales.

Vidal Saint-André, B.

**Las antenas, área técnica esencial para los satélites**

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 1, págs. 67-74

En los últimos 15 años el diseño de antenas para satélites de comunicaciones ha evolucionado considerablemente para satisfacer las exigencias cada vez más apremiantes de los usuarios actuales. El subsistema de antena para el satélite Symphonie, lanzado al espacio en 1974, pesaba solamente 9 kg, mientras que dicho subsistema para la serie de satélites TDF 1 pesa más de diez veces, unos 110 kg. El autor expone la evolución del diseño de antenas de satélites, mostrando su creciente importancia en los sistemas modernos. También examina algunas de las herramientas de diseño en uso y comenta las tendencias y nuevas tecnologías que determinarán el diseño de los sistemas de antena futuros.

Duret, G.; Guillemin, T.

**Antena multihaz reconfigurable para satélites EUTELSAT II**

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 1, págs. 75-80

El subsistema de antena para los satélites de Eutelsat II puede transmitir y recibir comunicaciones y servicios de difusión de televisión en la banda Ku. Es posible el acceso simultáneo a los 16 canales de los usuarios de toda Europa. El diagrama de radiación de la antena es reconfigurable por órdenes desde tierra, lo que permite dar servicios de comunicación a una extensa zona de cobertura con una PIRE (potencia isotropa radiada equivalente) de 44 dBW, o bien distribuir señales de televisión con una ganancia mayor sobre un área más restringida en Europa Central, con PIRE de 50 dBW. El autor describe la configuración de antena desarrollada por Alcatel Espace, que ofrece máxima flexibilidad en cuanto a la asignación de capacidad y canales a los diversos servicios.

Gass, F.; Kracht, M.

**Sistema de seguimiento, teledirigido y teledirigido para el satélite de comunicaciones Kopernikus**

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 1, págs. 81-86

El sistema de seguimiento, teledirigido y teledirigido (STT) en los satélites DFS-Kopernikus controla y supervisa el modo de operación y el estado del satélite, y efectúa mediciones de distancia en cooperación con las estaciones terrenas. Ha sido diseñado para resistir las condiciones adversas experimentadas durante el lanzamiento y los 10 años de vida activa en el espacio. El autor describe el nuevo concepto de STT, en el que sólo se utiliza un tipo de receptor de banda S que también puede emplearse para el enlace ascendente de teledirigido en banda Ku. Para asegurar que el sistema STT funciona a lo largo de toda la misión, se le ha provisto de redundancia en todas sus funciones. Hay facilidades importantes de teledirigido que pueden reprogramarse desde tierra.

Beier, W.; Kallerhoff, H.

**Seguimiento de posición de naves espaciales mediante el sistema de posicionamiento mundial**

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 1, págs. 87-91

Se está constituyendo una red de satélites GPS (sistema de posicionamiento mundial) para que barcos y vehículos puedan determinar sus posiciones con exactitud, en cualquier lugar del mundo. Es posible, además, que una nave espacial utilice esa misma red para localizar su posición. Los autores marcan las diferencias entre los requisitos de los receptores terrenos del GPS y los receptores de naves espaciales y describen el receptor desarrollado por SEL para esta aplicación. En este nuevo receptor se utilizan generalizadamente las técnicas de proceso digital de señales y los circuitos VLSI a medida para conseguir un posicionamiento con errores inferiores a los 30 m.

Tack, T.

**Demodulador de datos de alto rendimiento para aplicaciones del espacio lejano**

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 1, págs. 92-97

Alcatel Bell ha desarrollado un demodulador MIC/MDP/MP versátil y de alto rendimiento para recibir las débiles señales procedentes de la nave espacial Giotto durante su misión con el cometa Halley. Sus extraordinarias prestaciones, muy cercanas a los límites máximos teóricos, y su gran aptitud para ser programado, hacen de este equipo una ayuda muy valiosa en aplicaciones exigentes. En su realización, basada en un concepto de diseño nuevo, utiliza ampliamente el proceso digital de señal de alta velocidad. El autor describe el demodulador en cuestión y muestra la idoneidad de su diseño para una amplia gama de aplicaciones. Asimismo describe los perfeccionamientos que se están introduciendo para extender aún más su campo de utilidad.

Schang, G.; Van der Stock, P.

**Transmisión de imágenes por satélites de observación de la Tierra**

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 1, págs. 98-105

Los satélites de observación son de gran importancia en muchos campos, incluyendo cartografía, prospecciones mineras, agricultura, análisis de humedad del suelo, mejora de las tierras y vigilancia de la polución. Alcatel Espace y Alcatel Bell han participado intensamente en el desarrollo de los segmentos espacial y terreno del SPOT, el satélite francés óptico de observación de la Tierra. Los autores describen a grandes rasgos la misión del SPOT, y después el sistema de adquisición de imágenes y el equipo de a bordo asociado, así como el diseño del receptor de la estación terrena.

Aguilar, A.

**Caracterización de dispositivos de fibra óptica para aplicaciones espaciales**

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 1, págs. 106-112

Crece el interés en utilizar sistemas de transmisión de datos por fibra óptica al madurar la tecnología, permitiendo aprovecharse de las características del medio: gran anchura de banda, inmunidad a interferencias electromagnéticas, ausencia de diafonía y bajo peso. Todos los dispositivos ópticos utilizados en un sistema de transmisión a bordo de un vehículo espacial (fuentes de luz, detectores, fibras, cables conectores, acopladores y conmutadores) deben operar de modo fiable durante toda la misión espacial y en un entorno hostil donde sufrirán temperaturas extremas, radiación nuclear, vacío, vibración y choque mecánico. El autor describe una exhaustiva evaluación de los dispositivos ópticos a fin de determinar su idoneidad para el uso en el espacio, así como identificar las modificaciones que pudiesen requerir.

Alonso, P.; Bermejo, L.; Quílez, V.

**Red de área local de las estaciones espaciales Columbus**

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, nº 1, págs. 113-120

Dentro del programa Columbus, la contribución de Alcatel Standard Eléctrica a la definición y especificación de la red de área local del subsistema de gestión de datos se ha centrado en las áreas de interconexión física, niveles superiores del modelo ISA y evaluación funcional de la arquitectura seleccionada. El artículo describe las tareas realizadas hasta el momento presente, las cuales incluyen la selección del medio de interconexión más adecuado para la RAL, la caracterización de los componentes más relevantes que forman dicho medio, la identificación y adaptación de los paquetes comerciales de soporte lógico del modelo ISA más adecuados, y la evaluación y selección de la herramienta de simulación. También se incluyen los resultados iniciales de las simulaciones.

**Oficinas Editoriales**

La correspondencia relacionada con las diferentes versiones de Electrical Communication debe dirigirse al editor correspondiente:

Rod Hazell  
Electrical Communication  
P.O. Box 3  
South Street, Romford  
Essex, RM12AR, England

Wolfgang Schmid  
Elektrisches Nachrichtenwesen  
Lorenzstrasse 10  
7000 Stuttgart 40  
Bundesrepublik Deutschland

Antonio Soto  
Comunicaciones Eléctricas  
Ramírez de Prado, 5  
28045 Madrid  
España

Bernard Canceill  
Revue des Télécommunications  
ALCATEL N.V.  
33 rue Émeriau  
75725 Paris CEDEX 15  
France