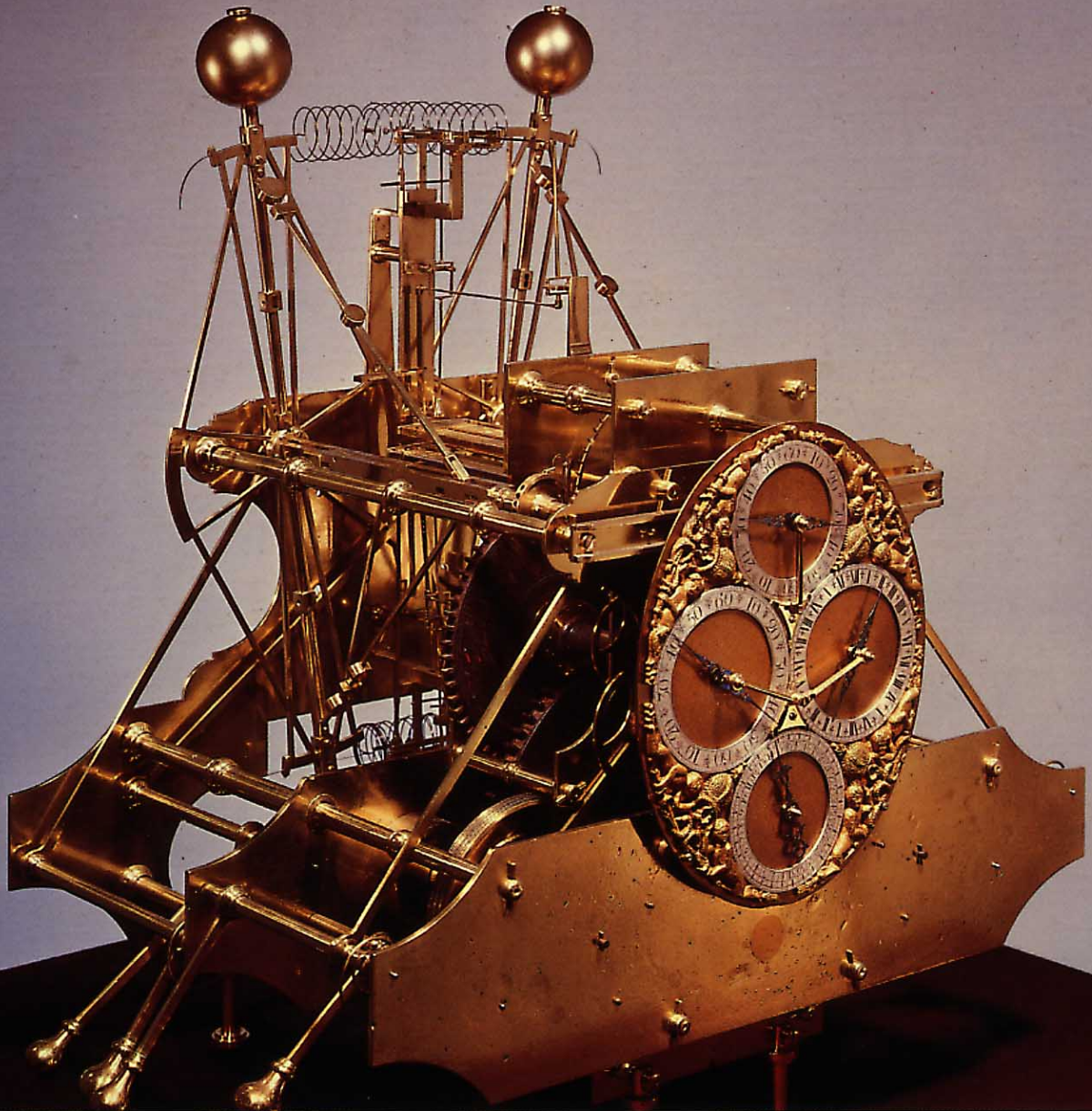


# Comunicaciones Eléctricas



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

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

Se invita a los ingenieros de ITT a proponer proyectos de artículos, cuyos resúmenes deben enviarse al editor internacional para su consideración.

*Director Ejecutivo*

Lester A. Gimpelson, Bruselas

*Editor, Comunicaciones Eléctricas*

Antonio Soto, Madrid

*Editor, Electrical Communication*

Michael Deason, Harlow

*Editor, Elektrisches Nachrichtenwesen*

Otto Grewe, Stuttgart

*Editor en funciones, Revue des Télécommunications*

Lester A. Gimpelson, Bruselas

Publicado en 25 de mayo de 1984.

© ITT Corporation, 1984.

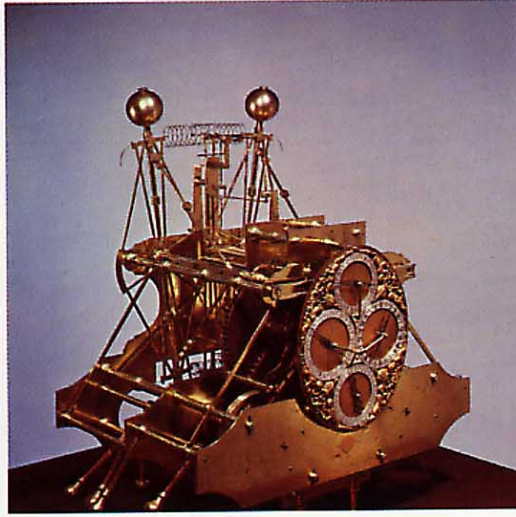
Las direcciones de los editores se dan en la página 360

---

## Ayudas a la Navegación

---

- 250 **Presentación**
  - 251 **Sistemas de ayuda a la navegación civil en ITT,**  
S. H. Dodington
  - 256 **Segunda generación de equipos VORTAC,**  
A. H. Lang
  - 263 **Equipo terrestre de comunicaciones para control de tráfico aéreo,**  
D. W. Walters
  - 270 **Sistema 4000 de ayudas a la navegación,**  
H. Kleiber, N. Knoppik y H. Vogel
  - 277 **Estructuras de equipo y programación del Sistema 4000,**  
F. Limbach y K. Pählig
  - 283 **Radiofaro de VHF,**  
R. Johannessen
  - 289 **Nueva familia de equipos TACAN y DME,**  
G. Bertocchi
  - 293 **Uso civil del TACAN,**  
E. Lazzaroni
  - 299 **Radar de aproximación de gran precisión con exploración de haz cónico,**  
R. E. Johnson
  - 305 **Nuevos desarrollos de la técnica de doble modelado de impulsos para el DME de precisión,**  
G. Corazza y F. Vatalaro
  - 310 **Subsistemas de RF para el DME de precisión,**  
F. Ardemagni, P. Basile y A. Clementi
  - 314 **Giróscopo de fibra óptica,**  
W. Auch y E. Schlemper
  - 319 **Sistema de posicionado por DME para radio-navegación de helicópteros en alta mar,**  
M. Böhm
  - 326 **Triplexor de banda L de aplicación espacial para el sistema de posicionado mundial,**  
G. Gorder y J. Ranghelli
  - 332 **Receptor para el sistema de posicionado mundial,**  
A. Bethmann y H. Tschiesche
  - 336 **Equipo de medida de distancia de precisión para el sistema de aterrizaje por microondas,**  
K. Becker, A. Müller y H. Vogel
  - 344 **Sistema de navegación LORAN-C para Arabia Saudí,**  
W. J. Garmany, V. L. Johnson y W. J. Romer
  - 352 **Navegación por satélite,**  
P. K. Blair y P. J. Hargrave
  - 359 **En este número**
-



*La navegación mundial descansa en una exacta cronometría. Este antiguo cronómetro de Harrison fue uno de los primeros relojes realmente exactos y fiables que se utilizaran a bordo de naves. La navegación a escala mundial requiere hoy una precisión tan elevada como para incorporar relojes atómicos en los propios satélites del nuevo sistema de posicionado universal, y aun entonces han de compensarse los efectos de la relatividad.  
(Fotografía cedida por el National Maritime Museum, Londres)*

## Presentación

Desde tiempos remotos, desconocidas aún las ondas electromagnéticas, el arte de navegar se cimentaba en las referencias terrestres, las estrellas y el tiempo. La navegación "autónoma", basada en la brújula, el sextante y el cronómetro, permitía que los barcos cruzaran regularmente los océanos del globo — dos terceras partes de su superficie — mucho antes de inventarse la navegación inercial, en los años 20.

Sin embargo, al iniciarse este siglo y comenzar a utilizarse las ondas radioeléctricas para guiar aviones y barcos, se abrió una nueva era para la navegación: por fin las incertidumbres inherentes al "arte" de navegar sucumbían ante los avances de la ciencia. Desde los primeros días de los sistemas de radionavegación, ITT ha contribuido sustancialmente a su expansión, desarrollando refinados equipos que ofrecían mayor fiabilidad y precisión siempre en aumento. Estos dos factores han adquirido gran importancia en las dos o tres últimas décadas por el explosivo crecimiento del tráfico aéreo.

En los años 30, ingenieros de ITT en Europa inventaron e introdujeron los sistemas de aterrizaje instrumental, todavía utilizados universalmente. Los años 40 vieron otras dos grandes aportaciones de científicos e ingenieros de ITT, esta vez en EE.UU.: el sistema LORAN-C de navegación hiperbólica a frecuencias muy bajas, que ayudó a los buques durante la guerra y que sigue dando amplios servicios como en este número se expone, y el TACAN, ingenioso sistema de navegación "de crucero" que la OTAN adoptó como estándar y se convirtió en patrón mundial para equipos medidores de distancia en aviación civil.

Durante los 50 y los 60 las casas ITT en ambos continentes desarrollaron y produjeron gran variedad de sistemas de radionavegación: los ILS, VOR, VOR-Doppler, DME y TACAN con sus derivados continúan sirviendo a muchos usuarios en todo el mundo.

El espectacular desarrollo de la tecnología digital en los años 70 con ordenadores y microprocesadores, permitió grandes avances en los sistemas de navegación por mar y aire, que pudieron utilizar nuevas técnicas gracias al maridaje de dicha tecnología con los sistemas de radio. Tanto el nuevo sistema de aterrizaje por microondas, normalizado internacionalmente, y su equipo asociado para medida de distancia de precisión, como el sistema de posicionado mundial extremadamente preciso (GPS), han recibido grandes aportaciones de ITT en EE.UU. y en Europa.

La navegación inercial entra ahora en una fase innovadora, en la que los giróscopos mecánicos son reemplazados por otros que no giran y es la luz el agente que detecta inercialmente las velocidades de rotación. ITT se ha introducido en este campo al desarrollar giróscopos de fibra óptica de reducido coste, que se basan en el efecto Sagnac descubierto en 1913. La fibra óptica, tan promocionada por ITT para comunicaciones, está pues abriéndose camino en la navegación inercial a bajo coste.

Acortar las distancias aparentes y reales entre las gentes es una meta que ITT persigue desde su fundación; para ello perfecciona las comunicaciones y favorece la navegación segura y fiable de buques y aviones por todo el mundo, siguiendo la regla de "preservar la tradición, impulsando la innovación". Este número de *Comunicaciones Eléctricas* dedicado a las Ayudas a la Navegación atestigua que ITT trabaja en un amplio frente, desarrollando sistemas enteramente nuevos y mejorando los existentes, a la par que ofrece una extensa gama de productos que van desde el sencillo radiofaro en VHF a los receptores para el muy elaborado sistema de posicionado mundial. Hacia el futuro, se tiende a combinar en un solo sistema las funciones de comunicación, navegación e identificación, con objeto de aumentar la seguridad operativa y reducir el coste de cada función. ITT seguirá potenciando su decisiva participación en este campo.

M. Böhm  
Director  
Investigación, Desarrollo e Ingeniería  
Sistemas de Radio y Navegación  
Standard Elektrik Lorenz, Stuttgart

# Sistemas de ayuda a la navegación civil en ITT

En los pasados 10 años se han producido múltiples cambios en las ayudas a la navegación civil, incluyendo la normalización del sistema de aterrizaje por microondas con haz explorador referido al tiempo y el desarrollo de un sistema de posicionado mundial muy preciso. Sin embargo, siguen utilizándose los sistemas tradicionales por la mayoría de los usuarios civiles.

## S. H. Dodington

ITT Headquarters, Nueva York,  
Estados Unidos de América

### Introducción

*Comunicaciones Eléctricas* dedicó en 1975 un número especial a las ayudas a la navegación (volumen 50, nº 4). Desde entonces se han producido numerosos cambios en el panorama mundial, siendo uno de los más importantes la normalización por la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) del haz explorador referido al tiempo para el MLS (sistema de aterrizaje por microondas). La OACI está también a punto de adoptar un DME (equipo de medida de distancia) de precisión en banda L, compatible con el DME de navegación en ruta.

Gran interés ha despertado el sistema de posicionado mundial basado en satélite, aunque haya desaparecido el concepto Aerosat.

Finalmente, no se ha continuado con el sistema Loran-A.

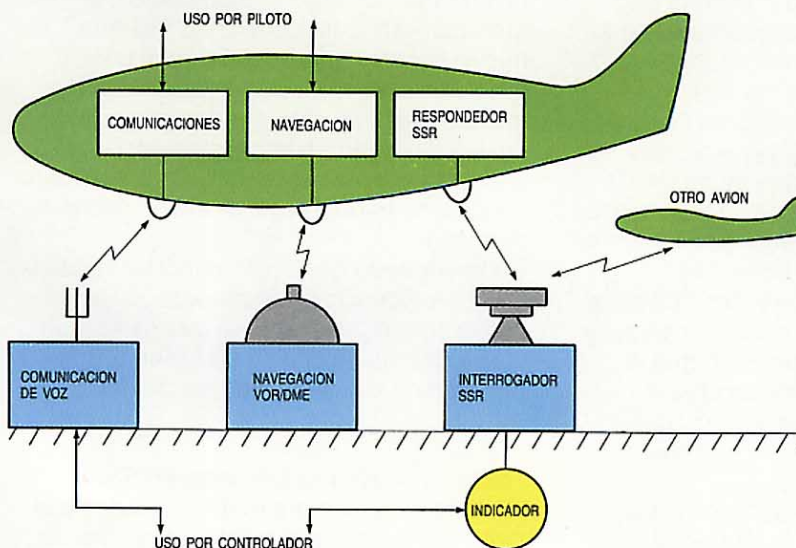
La navegación es sólo uno de los tres puntos en que se sustenta el control de tráfico aéreo: comunicación, navegación y vigilancia. En los años recientes ha sido,

con mucho, el más sólido de los tres, no existiendo realmente ningún lugar del mundo en que no se dispusiera de algún tipo de navegación, por lo menos la incorporada en el propio avión. Sin embargo, no existe vigilancia alguna sobre los océanos, terrenos montañosos, ni sobre gran parte del mundo en desarrollo, y la comunicación está sometida a los azares de la transmisión por altas frecuencias.

Estas deficiencias, junto con algunos problemas de navegación remanentes, han promovido la creación en 1983 del comité especial SC-155 por la Comisión Radio-técnica Aeronáutica de los Estados Unidos (RTCA). Dicho comité va a acometer una revisión total, con especial atención al uso de satélites, que será la primera desde que en 1948 el famoso comité SC-31 de la RTCA sentara las bases de la OACI actual (véase la figura 1). La influencia de este nuevo comité no se dejará sentir probablemente hasta los años 90.

Por otra parte, la mayoría de los sistemas de radio actuales son los mismos de 1975. Véase resumen en la tabla 1.

Sistema básico actual de control de tráfico aéreo de la OACI.



### Sistemas

En cada uno de los sistemas, aun manteniendo inalterables los formatos de señal, se han producido múltiples cambios desde 1975:

#### Omega

Actualmente funcionan todas las estaciones (8), y proporcionan un auténtico servicio mundial<sup>1,2</sup>. Muchas aerolíneas oceánicas, que anteriormente utilizaban tres sistemas inerciales por avión, emplean hoy día dos sistemas inerciales y un Omega, con importantes ahorros tanto en costes iniciales como de operación. La mayoría de receptores de a bordo utilizan también como reserva estaciones de comunicación en

Tabla 1 — Principales sistemas de radionavegación en el mundo

Sistema	Frecuencia	Estaciones	Usuarios		Actividad de ITT
			Aire	Mar	
Omega	10 a 13 kHz	8	10600	7000	ITT Avionics
LORAN-C	90 a 110 kHz	33 cadenas	2000	60 000	
DECCA	70 a 130 kHz	50 cadenas	1000	30 000	
* Balizas/gonios	200 a 1600 kHz	5000	200 000	500 000	FACE
* ILS	75, 108 a 112, 329 a 335 MHz	1600	70 000	—	SEL, FACE
* VOR	108 a 118 MHz	2000	200 000	—	SEL, FACE
Transit	105, 400 MHz	5 satélites	—	38 000	
TACAN	960 a 1215 MHz	2000	17 000	—	ITT Avionics, FACE, SEL
* DME	960 a 1215 MHz	1000	80 000	—	ITT Avionics, FACE, SEL
* SSR	1030, 1090 MHz	1000	100 000	—	
* MLS	5031 a 5091 MHz	Realización a punto de comenzar			

\* Formato de señal normalizado por la Organización de Aviación Civil Internacional

VLF, en el modo "ro-ro". La selección es enteramente automática.

#### LORAN-C

Para este sistema<sup>1,3</sup> han servido de gran ayuda los receptores automáticos que reducen el trabajo en la cabina a la simple actuación de mandos que consultan a puntos de referencia, pudiendo el piloto leer la dirección y la distancia igual que en el sistema "ro-teta". El uso del LORAN-C está muy extendido, al menos en los EE.UU. para los helicópteros que vuelan desde la costa a las plataformas petrolíferas.

#### Balizas y radiogoniómetro automático<sup>1,4</sup>

Sigue siendo la ayuda a la navegación más popular del mundo. La tendencia es eliminar la voz, para reducir la anchura de banda y permitir a las estaciones frecuencias más próximas.

#### ILS (aterriaje instrumental)

El sistema ILS<sup>1</sup> todavía se mantiene con fuerza. Al disponer de localizadores de gran apertura y sendas de planeo, independientes de las reflexiones del suelo<sup>5</sup>, se reducen los efectos de situación. La otra importante ayuda al aterriaje — aproximación controlada a tierra — no ha tenido aceptación en aplicaciones civiles, a causa de la división de responsabilidades entre el piloto y el controlador de tierra. Sin embargo, su uso está muy extendido para aplicaciones militares en muchos países, y para usos civiles en naciones en que el piloto y el controlador pertenecen a la misma organización (p. ej., la URSS).

#### VOR<sup>1</sup>

Ha habido importantes mejoras en los equipos de tierra del sistema VOR (radiofaro

omnidireccional en VHF), como se describe en otro lugar de este número, junto con un crecimiento constante del VOR-Doppler.

#### Transit<sup>6</sup>

Inicialmente este sistema se equipó en unos 500 barcos de la Marina de los EE.UU., pero ahora lo utilizan cerca de 38.000 mercantes de todas las nacionalidades, sin tener que pagar por ello. El sistema es de ámbito mundial con una precisión 10 veces superior a la del Omega, si bien opera a intervalos de 90 minutos.

#### TACAN<sup>1</sup>

Su principal evolución ha consistido en el desarrollo de un equipo de tierra totalmente de estado sólido (descrito también en este mismo número), que transmite potencias hasta de 5 kW.

#### Equipo medidor de distancia (DME)<sup>1</sup>

El sistema DME continúa su expansión. Se mantendrá por largo tiempo como integrante del sistema VOR/DME "ro-teta". Un nuevo desarrollo de interés es el DME de precisión para el MLS, que ofrece una mayor exactitud, siempre dentro de los límites del espectro impuestos por la OACI. Este sistema permite utilizar un solo equipo de a bordo para la navegación en ruta y el aterriaje.

Un segundo desarrollo importante es el DME de exploración propuesto por las líneas aéreas, en el cual se rastrean a la vez varias balizas de DME para obtener una posición muy exacta, independiente del sistema VOR.

#### Radar de vigilancia secundario (SSR)<sup>1</sup>

Cuando parecía a punto de introducirse el tanto tiempo esperado DABS (radiobaliza

con direcciones discretas) o la codificación de interrogaciones ADSEL (direccionamiento selectivo), llamada ahora "Modo S"<sup>7</sup>, la situación se complicó (al menos en EE.UU.) al aparecer un elaborado sistema anticolidión aire-aire, llamado TCAS<sup>8</sup> (sistema de alerta de tráfico y evitación de choque).

#### **Sistema de aterrizaje por microondas (MLS)<sup>9</sup>**

Aunque la OACI adoptó en 1978 un formato de señal, seis años después sólo hay en el mundo una pista de aterrizaje donde se utilice (en Valdez, Alaska), y no existe ningún usuario comercial. Las razones son múltiples, sin olvidar el conocido círculo vicioso entre "huevo" y "gallina". El alto costo de realización, con escaso beneficio económico inmediato, debe ser seguramente el principal factor en estos días de austeridad financiera. Sin embargo, la Federal Aviation Authority acaba de encargar 176 sistemas MLS, y se esperan más pedidos próximamente.

#### **Otras áreas**

Con relación a las ayudas *autónomas*, hay relativamente poco que añadir sobre radioaltímetros y sistemas Doppler de navegación. Sin embargo, en los sistemas inerciales, el giróscopo láser está rápidamente desplazando a los mecánicos, y el

tubo de rayos catódicos en color, empleado por largo tiempo en radares meteorológicos, comienza a ser la pantalla de uso general en las cabinas de mando de los aviones. Mediante un simple conmutador, sirve como pantalla de radar, para obtener la lista de pasajeros previa al despegue, como indicador de ILS o para otras muchas funciones. Los helicópteros de servicio regular entre la costa y las plataformas petrolíferas utilizan hoy día radares meteorológicos, junto con balizas en banda X, como ayuda de aproximación a las plataformas.

#### **Sistemas en desarrollo**

Actualmente se desarrollan dos sistemas de interés. El TCAS/modo S emplea las mismas frecuencias que el SSR, pero ofrece nuevas prestaciones. El sistema de posicionado mundial<sup>10</sup>, nuevo sistema de navegación por satélite, aspira a dar una gran precisión en todos los lugares del mundo, aunque a un coste superior al de todos los restantes sistemas de navegación juntos.

#### **TCAS/modo S**

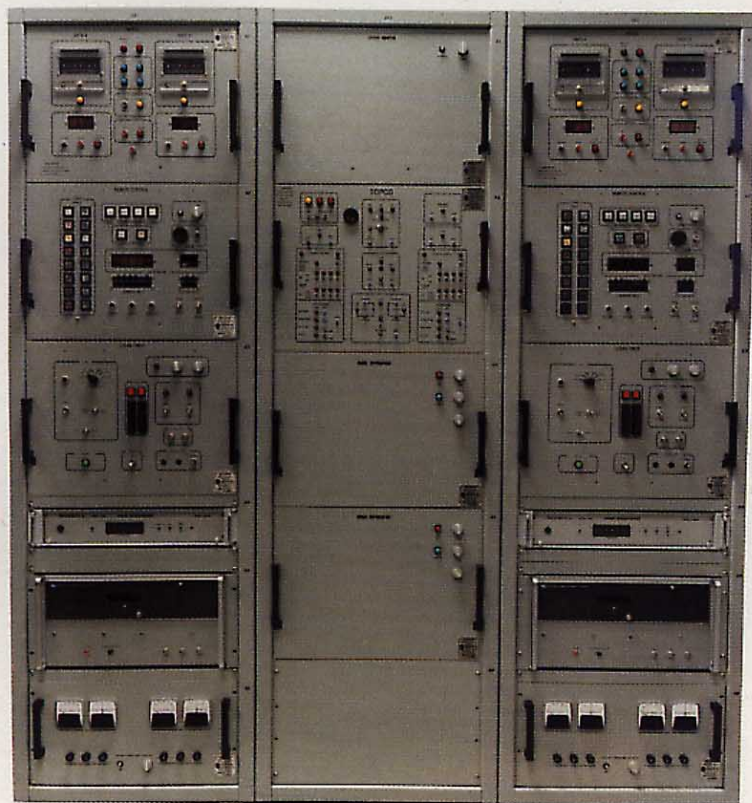
El sistema SSR, que interroga con una frecuencia de 1030 MHz y responde a 1090 MHz, comenzó como sistema militar IFF (identificación amigo o enemigo) a mitad de los cuarenta y fue después normalizado por la OACI. Dado que todos los interrogadores preguntaban a todos los respondedores de una determinada área, se experimentó durante largo tiempo una excesiva "confusión" y, ya en 1969 en el Informe Alexander<sup>11</sup>, se recomendaba que la identificación de cada avión fuera codificada en el interrogador. La OACI ha adoptado en la actualidad un plan análogo, llamado "Modo S".

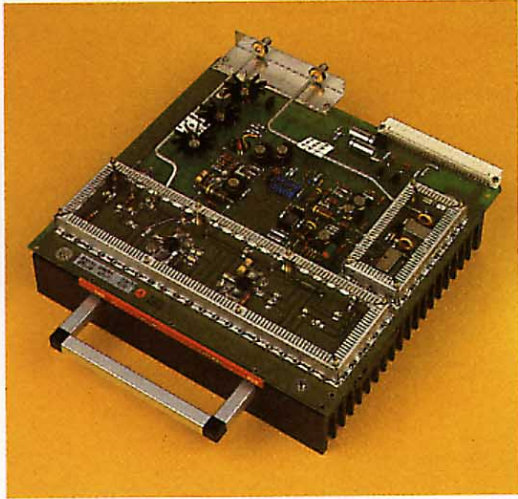
Sin embargo, en 1981, la Federal Aviation Authority de Estados Unidos propuso desarrollar un sistema de interrogación desde aviones, llamado TCAS, que permitiría a los aviones equipados con interrogador "ver" a los que tuvieran respondedor (de los que existen aproximadamente 100.000) y así poder evitar las colisiones. En algunos aviones grandes podría utilizarse la directividad de la antena, alrededor de  $\pm 10^\circ$ , para suprimir la excesiva "captación". La complejidad del sistema hace que la norma propuesta RTCA SC-147, contenga más de 300 páginas. Todavía queda mucho por hacer; por ahora no hay ninguna realización del modo S.

#### **Sistema de posicionado mundial (GPS)**

Denominado también Navstar, el GPS está en desarrollo por las Fuerzas Aéreas de los

**Consola de control del transmisor LORAN-C fabricado por ITT Avionics Division.**





munication Laboratories (Harlow, Inglaterra) ha fabricado 8 receptores.

**Módulo de la familia del Sistema 4000 de SEL para ayuda a la navegación.**

### Pronóstico personal para el año 2000

Lo que sigue es una predicción a título personal del estado de las ayudas a la navegación en el año 2000:

- El sistema GPS será utilizado como sistema militar, con algunos usuarios civiles. Probablemente su utilización será gratuita y no existirán restricciones sobre la precisión.
- Se utilizarán todavía todos los sistemas de la tabla 1, con la posible excepción del Transit, el cual, como sistema totalmente costado por EE.UU., podría suprimirse para ayudar en la financiación del GPS.
- Se extenderá el uso de toda clase de sistemas autónomos.
- Se incrementará la utilización de circuitos digitales, y los sistemas electrónicos sustituirán a los electromecánicos.
- Las instalaciones de ILS seguirán sobrepasando en número a las de MLS, tanto a bordo como en tierra.
- El Modo-S sólo se utilizará moderadamente, y aún menos el TCAS.
- Cualquier sistema "nuevo" intentará hacer uso de los actuales formatos de señal y equipos; el SSR/Modo S/TCAS es quizá un caso extremo de ello. Otro ejemplo es el DME de precisión y, en

EE.UU. aproximadamente desde 1960, y, en su propuesta actual, utiliza 18 satélites en órbitas de 12 horas, que transmiten onda continua codificada en fase en torno a 1200 y 1500 MHz. (Véanse detalles en otro artículo de este número). Se pretende alcanzar, en cualquier lugar del mundo, precisiones de unos 20 metros. Se estima un coste inicial de 6000 millones de dólares y un coste anual de operación de 250 millones de dólares, excediendo ambas cifras a la suma de las correspondientes a todos los demás sistemas de radionavegación existentes. Por esta razón, el Departamento de Defensa de EE.UU. aspira a asegurar su utilización en el sector civil y a que se desechen las restantes ayudas a la navegación. Sin embargo, para evitar que posibles enemigos se aprovechen del GPS, a los usuarios civiles sólo se les permite una precisión de 100 m (codificando la señal) y con un cargo anual de 400 dólares. (El uso de cualquiera de las actuales ayudas a la navegación es gratuito). Los usuarios civiles han rechazado unánimemente estas condiciones; incluso los operadores de helicópteros, que no están contentos con los VOR/DME, han protestado contra la limitación de precisión a 100 m. Además, hay pocos indicios de que a ninguno de los 130 países integrados en la OACI le guste abandonar sus propias ayudas en favor de otras controladas por militares de un país extranjero.

En la actualidad, se fabrican en EE.UU., por dos casas ajenas a ITT, cerca de 100 receptores de diversos tipos. Hay en órbita 5 satélites utilizables. Dentro de ITT, la División de Comunicaciones para Defensa ha producido transmisores banda L para satélites, y Bell Telephone Manufacturing Company (Amberes, Bélgica) y Standard Elektrik Lorenz (Stuttgart, Alemania Federal) tienen contratos de estudio y equipos. La filial de ITT Standard Telecom-

**El giróscopo de fibra óptica no tiene partes móviles. Este modelo podría servir de ejemplo de un diseño futuro.**



menor escala, el radiofaro de STL. El MLS es un ejemplo de la orientación opuesta. Se requieren nuevos equipos de a bordo y de tierra, así como equipos de prueba, toda una serie de barreras a superar.

Se empezarán a notar los efectos de las recomendaciones SC-155, aunque más probablemente en comunicaciones y vigilancia que en la navegación.

## Conclusiones

Los artículos de este número describen algunos de los equipos que las compañías de ITT, a ambos lados del Atlántico, están produciendo para adaptarse al medio ambiente mundial. Como en el número de 1975, se hace hincapié en aquellos equipos que se ajustan a sistemas normalizados, con formatos de señal bien establecidos.

## Referencias

- 1 *Electronic Engineers Handbook*, 2ª edición, capítulo 25, McGraw-Hill, Nueva York, 1982.
- 2 W. K. May: The Omega Navigation System: An Overview: *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers PLANS-82 Symposium*, diciembre 1982.
- 3 *US Navigation*: Número especial sobre LORAN-C primavera 1982, volumen 28, n° 1.
- 4 Minimum Performance Standard for ADF: *RTCA SC-146*, 1982.

- 5 C. Watts: A New End-Fire Glide-Slope: *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers PLANS-80 Symposium*, diciembre 1980.
- 6 T. A. Stansell: The Many Faces of Transit: *US Navigation*, primavera 1978, volumen 25, n° 1.
- 7 Minimum Performance Standard for Mode S: *RTCA SC-142*, 1983.
- 8 Minimum Performance Standard for TCAS: *RTCA SC-147*, 1983.
- 9 H. Redlien y R. Kelly: MLS: *Academic Press*, 410 págs., 1981. (Pueden solicitarse copias a Bendix Corporation, Baltimore).
- 10 *US Navigation*: Número especial sobre GPS, verano 1978, volumen 25, n° 2.
- 11 Report of the DOT ATC Advisory Committee, United States Department of Transportation, diciembre 1969.

**Sven H. Dodington** nació en Vancouver, Canadá, en 1912 y obtuvo el Grado AB en la Universidad de Stanford en 1934. Al año siguiente comenzó a trabajar en Scophony Ltd., Londres, en el desarrollo de proyectores de televisión de pantalla grande. Se incorporó a ITT en Nueva York en 1941, donde permanece actualmente. Desde 1941 hasta 1945, durante la Segunda Guerra Mundial, contribuyó en gran medida a las contramedidas para radares de a bordo del tipo de enmascaramiento. Después fue nombrado jefe del laboratorio de radionavegación de ITT en Nutley, Nueva Jersey, en el cual se sentaron las bases para el sistema DME actual. Como resultado obtuvo el premio Pioneer de IEEE/AESS. En 1958 fue designado presidente de la Avionics Division de ITT, puesto que conservó hasta su paso al Departamento Técnico de ITT Headquarters, en Nueva York, como consultor para radionavegación y electrónica de aviación. Desde 1969, ha sido asesor de la Comisión Técnica de Radio para Aeronáutica. En 1982 la Asociación de Patentes de Nueva York le nombró "Inventor del Año".



## Segunda generación de equipos VORTAC

Se están sustituyendo los viejos sistemas VORTAC por equipos de estado sólido capaces de supervisión y mantenimiento a distancia, para prolongar el servicio hasta 1995 y aún más allá. Por su mayor fiabilidad, menores costes de operación, y mantenimiento remoto basado en microprocesadores, los nuevos sistemas se amortizarán en 5 ó 6 años.

**A. H. Lang**

ITT Avionics Division, Nutley, Nueva Jersey

### Introducción

Los equipos VORTAC y VOR/DME se han convertido en las principales ayudas a la navegación para la cobertura del espacio aéreo de los Estados Unidos. El plan de cobertura de dicho espacio aéreo se ha actualizado para asegurar que el servicio continúe hasta 1995, y todo hace esperar que estos sistemas mantengan un papel esencial dentro del conjunto de medios de navegación previstos después del año 2.000. El problema de la FAA (Federal

Aviation Agency) era el encarecimiento del mantenimiento y operación de las radio-balizas terrestres instaladas entre 1950 y 1965, y las dificultades en obtener repuestos.

Para resolver esta situación, la FAA adjudicó un contrato conjunto a ITT Avionics Division y Wilcox Electric Company para sustituir todos los viejos equipos VORTAC, DME y VOR de tubos de vacío, por sistemas de arquitectura basada en la tecnología más moderna, totalmente de estado sólido. Su desarrollo, incluyendo las pruebas de fiabili-



Instalación VORTAC de la segunda generación.

dad y calificación, ya se ha completado, y hasta finales de 1983 centenares de viejas unidades se han reemplazado por sistemas de la segunda generación, cuya vida útil superará los 20 años. Además de su elevada fiabilidad, estos sistemas aportan un nuevo enfoque del mantenimiento tal que se reducen los costes del mismo, y la adquisición del equipo puede amortizarse en 5 ó 6 años.

### Antecedentes

La FAA opera y mantiene unas 725 instalaciones VORTAC que cubren todo el espacio aéreo de los Estados Unidos. Junto con unas 145 unidades VOR/DME y 80 VOR, prestan un servicio de navegación a aeronaves civiles y militares en la parte continental, Alaska, Hawai y otros territorios de los Estados Unidos. El primero de los nuevos sistemas se instaló en julio de 1982, y todas las instalaciones estarán terminadas a finales de 1985.

El objetivo primario de los nuevos equipos es rebajar los costes del ciclo de vida de las radiobalizas VORTAC y VOR/DME, sin dejar de prestar el mismo servicio de navegación, mejorado en ciertos aspectos. Se ha logrado esto a través de un nuevo concepto de mantenimiento apoyado en tecnología de estado sólido de gran fiabilidad, equipos de supervisión remota del mantenimiento combinados con análisis e informes por ordenador sobre pruebas y fallos, y la centralización del personal. Este concepto permite que un pequeño y centralizado grupo de técnicos atienda un conjunto cada vez mayor de equipos de navegación aérea, ya que el mantenimiento preventivo requerido es mínimo.

El punto clave de este proyecto ha sido la aplicación de la tecnología de ordenadores para supervisar a distancia las prestaciones del VORTAC, medir los parámetros del equipo, y predecir fallos potenciales. Por todo esto, las visitas a cada unidad para mantenimiento rutinario se han reducido de una o dos por semana a una cada tres meses.

El nuevo equipo VORTAC de la FAA puede también ofrecer una explotación menos costosa a usuarios que operen un pequeño número de balizas VORTAC o TACAN. Para estas aplicaciones, ITT Avionics Division ha desarrollado el sistema TACAN 9996 G. Esta radiobaliza reúne todas las características avanzadas del TACAN de la FAA (incluyendo la potencia de salida de 5 kW), más una unidad remota monitora y de control que puede instalarse en la torre de control de un aeropuerto. Además de una mayor fiabilidad, una venta-

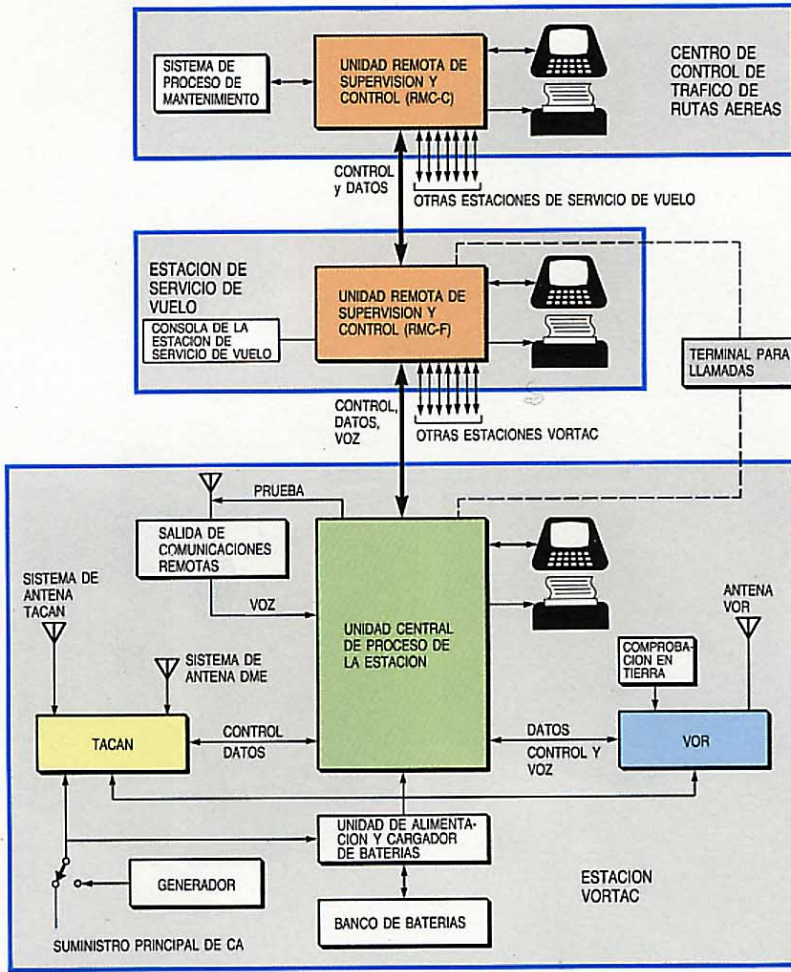


**Radiobaliza TACAN de estado sólido 9996-G, de ITT Avionics.**

ja importante para los usuarios de pocos sistemas es que el equipo remoto de supervisión automatiza las pruebas, el mantenimiento y el aislamiento de fallos, pudiendo así mantener el equipo un técnico con limitada experiencia o con poco tiempo disponible. La red de mantenimiento remoto de la FAA se reduce al acceso por marcación desde un lugar remoto para el análisis y control centralizados del funcionamiento de todos los sistemas. Y lo que es más importante, esta facilidad de llamada permite que un técnico de mayor cualificación, situado en el centro de mantenimiento, pueda probar el equipo y prestar asistencia técnica sin desplazarse a la estación. Todas estas características juntas, minimizan los costes de mantenimiento para el usuario de un corto número de sistemas.

### Segunda generación de VORTAC para la FAA

En torno a la periferia de la contraantena se montan dieciséis nuevas antenas monitoras VOR que dan desde tierra una comprobación instrumental automática del VOR en 16 direcciones para determinar errores de rumbo, eliminando así las laboriosas pruebas que antes se necesitaban. Además se añade una antena DME con mayor ganancia



**Figura 1**  
**Diagrama de bloques del sistema VORTAC con facilidades de supervisión y mantenimiento a distancia.**

que la antena TACAN, de forma que el sistema pueda cambiar a un modo de funcionamiento DME en caso de fallo en la función de medida de azimuth del TACAN, pérdida parcial de la potencia de salida de éste o fallo de la alimentación en CA. Se ha utilizado a menudo esta facilidad en una estación en la cima de una montaña, en California, cuando las súbitas tormentas de invierno acumulaban hielo y nieve sobre las cubiertas de las antenas TACAN, provocando alarmas del monitor de azimuth. La transferencia automática al modo auxiliar DME mantuvo entonces el servicio de navegación para la aviación civil.

Dentro de su caseta, el equipo del nuevo sistema ocupa solamente tres armarios, en lugar de los 16 antes requeridos. El terminal de entrada/salida y la impresora sirven para el control y la presentación de datos. Por su pequeño tamaño, el equipo cabe en un reducido compartimiento de la caseta. Unido esto al amplio margen de temperaturas de funcionamiento (de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+50^{\circ}\text{C}$ ) y a la menor disipación del equipo de estado sólido, hará que se necesite menos calefacción y refrigeración y rebajará los costes de explotación.

Las prestaciones del nuevo VORTAC de la FAA siempre igualan o superan a las que

ofrecía el sistema anterior. Una potencia de salida de 5 kW del amplificador TACAN y una sensibilidad del receptor mayor que  $-94\text{ dBm}$ , aseguran la necesaria cobertura de 240 km (130 millas náuticas) a unos 5.500 m de altura (18.000 pies), con elevada disponibilidad. Con 150 W de salida el VOR ofrece la misma cobertura. Las mejoras en prestaciones del sistema TACAN incluyen modos de operación de reserva, como, por ejemplo, paso a funcionamiento DME, temporización con el primer impulso, modo de canal Y, mayor capacidad de manejo de tráfico, y mayor exactitud del sistema. Además, se han resuelto problemas tales como el de seguimiento de falsas distancias. Entre las nuevas características del VOR se encuentran el registro de mensajes de voz en dispositivos de estado sólido, comprobación instrumental automática en tierra en 16 direcciones, y un amplificador de radiofrecuencia y goniómetro de estado sólido que puede funcionar con una separación de canal VOR de 50 kHz en el canal Y.

La configuración operacional del sistema VORTAC de la segunda generación se muestra en la figura 1. Todas las unidades suministradas, además de los equipos básicos TACAN y VOR, cumplen los objetivos de mantenimiento. Se usa tecnología de microprocesadores con gran profusión: tanto el VOR como el TACAN incluyen monitores dobles provistos de microordenadores, que permiten el uso múltiple de una cantidad mínima de equipo físico. Además de supervisar las principales funciones de navegación, los microordenadores realizan el control del sistema, el ajuste remoto de los parámetros de funcionamiento del transmisor y los límites de alarma del monitor. Asimismo controlan la ejecución y secuencia de todas las pruebas automáticas de mantenimiento, y el almacenamiento y reporte de todos los datos. El equipo de prueba incorporado se ajusta automáticamente mediante los programas de supervisión y prueba para efectuar medidas rutinarias y repetitivas. Se pueden realizar pruebas especiales operando el equipo de pruebas en modo manual, lo que permite a un técnico fijar la frecuencia, la potencia de salida, la cadencia de los impulsos, etc.

El control de los monitores y la recogida de datos de los mismos se realizan remotamente por la FCPU (unidad central de proceso de la instalación). Esta unidad, controlada por microprocesador, incluye los interfaces con el teleimpresor y con el terminal local de entrada/salida. La FCPU realiza también otras funciones de control y de reporte del estado de la instalación, tales como el encendido y apagado remoto de las luces superiores del mástil de antena, y la

prueba y control de los receptores de la unidad de salida de comunicaciones remotas.

La unidad de alimentación y cargador de baterías proporciona las principales tensiones de CC a los TACAN, VOR y FCPU. Dicha unidad, junto con el banco de baterías asociado, asegura un servicio ininterrumpido durante la conmutación al generador de reserva cuando falla la alimentación primaria de CA. En tal situación de fallo, las baterías dan más de dos horas de funcionamiento. El montaje en flotación del sistema de baterías proporciona a los microordenadores una alimentación en CC libre de transitorios, reduciendo así los fallos de ordenador relacionados con este fenómeno.

El equipo VORTAC se comunica, a través de la FCPU, con una RMC-F (unidad remota de control y supervisión, F) situada en una estación de servicio de vuelo. Dicha RMC-F puede conectarse por líneas telefónicas normales con un máximo de 8 instalaciones VORTAC. Cada RMC-F se conecta a una RMC-C, situada en uno de los 23 centros de control de tráfico de las rutas aéreas, a través de una red de comunicaciones en la cual hasta 128 VORTAC pueden reportar a una sola RMC-C. El sistema permite realizar el mantenimiento de las instalaciones y el reporte de la situación desde la estación de servicio de vuelo, o bien desde un terminal centralizado de control y de situación ubicado en el referido centro de control de tráfico. Además, hay puntos de entrada de llamadas telefónicas para que un terminal remoto con módem tenga acceso al sistema, con lo que un técnico podrá probar desde cualquier teléfono.

### Funcionamiento de la supervisión y el mantenimiento

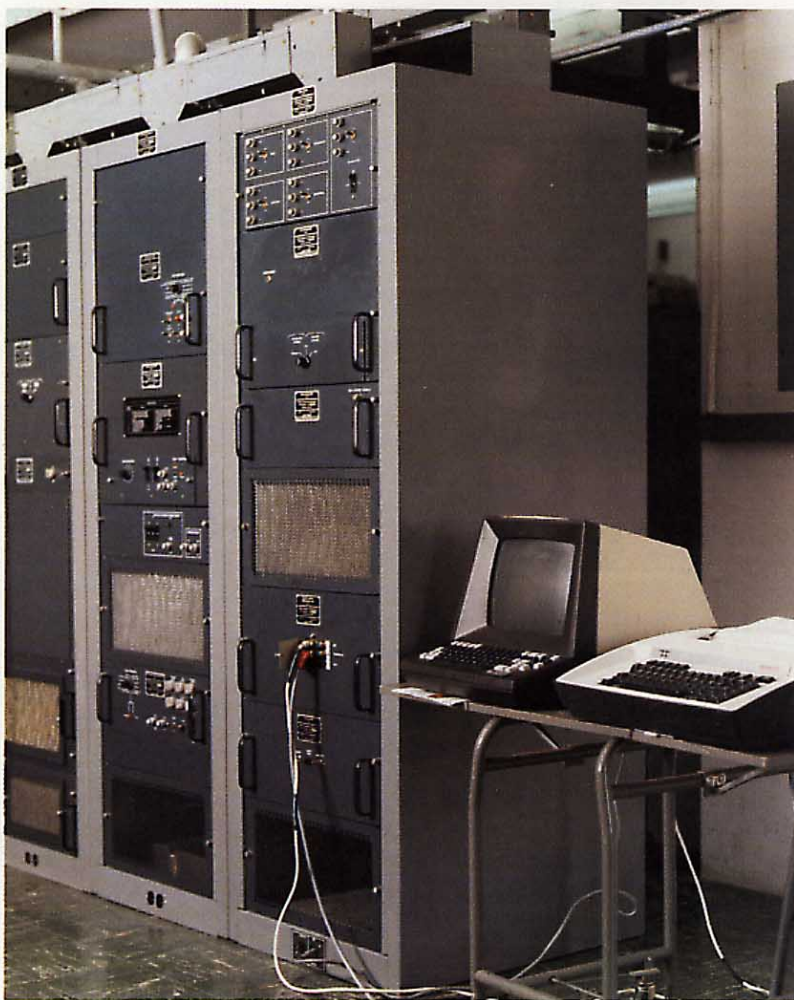
La experiencia inicial con los sistemas ha confirmado que se alcanzan los objetivos operacionales del sistema de supervisión y mantenimiento. Este ha probado su eficacia en el aislamiento de fallos, sobre todo en las primeras etapas de instalación. Los ingenieros de diseño podían permanecer en la fábrica, llamar por teléfono a cualquier instalación VORTAC y diagnosticar un fallo a distancia, ayudando así a los técnicos. A medida que la FAA asume el control de nuevas instalaciones, sus propios técnicos asumen estas funciones.

Toda la operación, control y prueba del sistema puede realizarse desde cualquier terminal de entrada/salida de la red. Además, en estos terminales se presenta continuamente el estado de las instalaciones. Cualquier alarma del sistema inicia

un destello intermitente en la pantalla del terminal y una alarma sonora.

Si un operador quiere observar los datos de prueba o supervisión, o bien realizar pruebas, solicita primero acceso a la FCPU. Después debe introducir un código especial de seguridad que impida el acceso de personas no autorizadas y la manipulación indebida del sistema. Un código de seguridad de alto nivel (asignado sólo a unas pocas personas) permite cambiar los parámetros, realizar pruebas, y observar los datos. Las personas cuyo código de seguridad sea de menor nivel sólo tienen acceso a las pantallas de datos.

**Instalación del equipo de radiobaliza VORTAC de la segunda generación.**



El usuario puede seleccionar a través de un menú cualquiera de las pantallas disponibles. En cada pantalla se presentan preguntas e indicaciones para facilitar la prueba o entrada de parámetros.

Una prueba de tendencia muestra los parámetros críticos del equipo que podrían variar en el caso de degradación. Por utilizar en gran escala las técnicas digitales, los datos de tendencia suelen aplicarse a tensiones en continua, a niveles en bucles de

control y, en el caso del TACAN, al número de transistores de salida del amplificador de potencia que han fallado. Puede así comprobarse cualquier cambio en el comportamiento del equipo y, si es necesario, programar un viaje de mantenimiento para repararlo. Si se observa una condición fuera de límites, acaso pueda mejorarse el funcionamiento del sistema pasando a un modo auxiliar o cambiando uno de los parámetros operacionales, siguiendo el sistema en servicio hasta que pueda ser reparado.

Las pruebas rutinarias de certificación de los principales parámetros del respondedor y de los límites de alarma del monitor pueden ejecutarse automáticamente, sin interrumpir el funcionamiento. Estas pruebas que antes ocupaban 2 días por semana, se realizan ahora en menos de 4 minutos. Todos los datos de certificación se muestran en pantalla y se imprimen de modo automático, formando así un registro permanente de resultados de prueba con indicación de tiempos. Análogamente, otras pruebas que necesitaban mucho tiempo pueden ahora realizarse automáticamente mediante el equipo de pruebas incorporado.

Durante el funcionamiento normal, si cualquiera de los parámetros comprobados sale fuera de límites, se inicia una alarma del sistema, ejecutándose automáticamente una prueba de aislamiento del fallo, seguida de una conmutación al modo auxiliar o de la desconexión. El operador puede solicitar diferentes tipos de datos y de pruebas. Primero, puede analizar el fichero de historia del fallo, que contiene los datos observados en el instante de aparición del problema, para determinar qué parámetros estaban fuera de límites y qué valores tenían entonces. En segundo lugar, puede observar el fichero de aislamiento de fallos, que indica la hora exacta en que ocurrió el suceso, el estado del sistema en ese momento y, finalmente, el módulo con mayor probabilidad de haber fallado a la vista de los resultados de la prueba en cuestión. Basado en estos datos, puede decidirse un viaje a la instalación. Si el sistema está funcionando en un modo auxiliar, no es necesario desplazarse de inmediato, ya que no es probable un segundo fallo de un equipo de alta fiabilidad. El técnico puede también determinar qué módulos necesita para la reparación. La experiencia indica que las pruebas de aislamiento identifican correctamente el módulo afectado, al menos en el 90% de los casos. Utilizando también otros datos de la instalación accesibles a distancia, los fallos restantes pueden normalmente asignarse a un grupo de no más de tres módulos, con lo que se facilita la reparación.

### Sistema TACAN/DME

Algunos de los principales resultados del sistema TACAN/DME de la segunda generación ilustran las orientaciones adoptadas en el diseño del equipo VORTAC para cumplir los objetivos fundamentales de elevada fiabilidad y mantenimiento remoto.

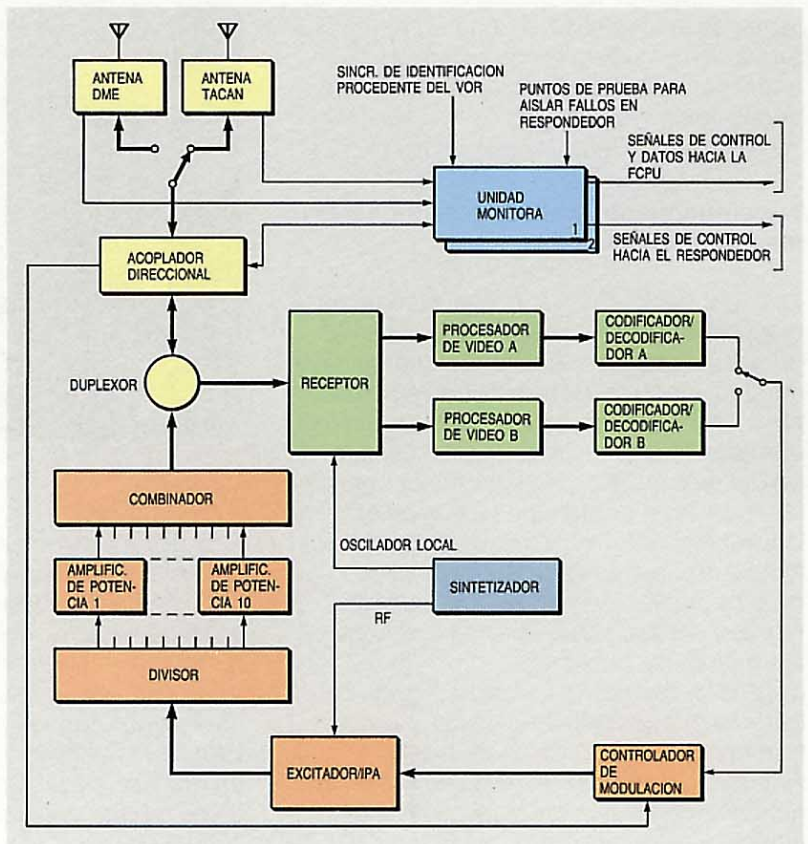
#### Fiabilidad y disponibilidad

Combinando en proporciones razonables los circuitos de estado sólido en elementos duplicados y redundantes, y en modos auxiliares de operación, se consigue una elevada fiabilidad y disponibilidad. Los anteriores equipos TACAN con tubos tenían una fiabilidad muy pobre para las actuales normas, con un MTBF (tiempo medio entre fallos) de pocos centenares de horas. No obstante, la utilización de respondedores dobles, el intensivo mantenimiento y la inmediata reparación de unidades con fallo, lograba un sistema de ayuda a la navegación de elevada disponibilidad (aproximadamente del 99,7%).

Las exigencias básicas del equipo VORTAC de la segunda generación fueron:

- Disponibilidad del 99,7%, especificada como un MTBO (tiempo medio entre interrupciones del servicio) de 9600 horas para el TACAN.

**Figura 2**  
Diagrama de bloques del nuevo sistema TACAN que combina adecuadamente elementos de circuito redundantes y dobles, y modos auxiliares de funcionamiento. IPA- Amplificador intermedio de potencia.



- Costes mínimos de adquisición del sistema, en línea con la necesidad de un bajo coste del ciclo de vida total.
- Cuando existan elementos no duplicados, éstos deberán tener al menos la misma fiabilidad que los elementos no duplicados (por ejemplo, unidad de control y transferencia) del anterior sistema a base de tubos.

En la figura 2 se muestra el diseño TACAN resultante.

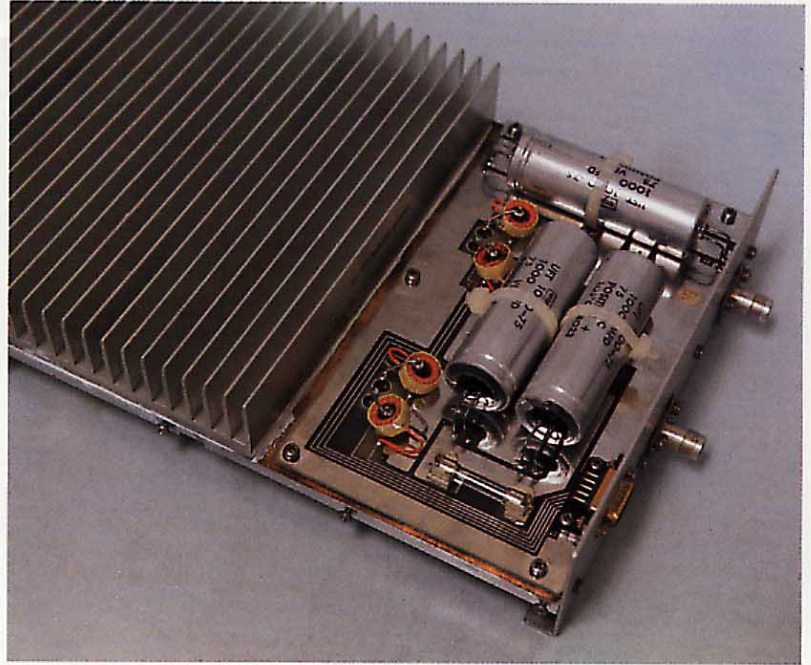
Las pruebas de fiabilidad han demostrado que se cumple la especificación sobre MTBO de la FAA. Realmente, el MTBO calculado es superior a 12.000 horas, incluso si un elemento en fallo redundante o duplicado no se repara hasta el próximo viaje de mantenimiento programado. De esta forma no se necesita duplicar todo el sistema, y el coste de adquisición será inferior.

### *Amplificador de potencia de 5 kW de estado sólido*

Mediante circuitos de protección y determinada redundancia en el amplificador de potencia de 5 kW, se admite el fallo hasta de 10 transistores de salida sin que la potencia llegue a caer 3 dB, con lo que se mejora grandemente la fiabilidad. La especificación de la FAA pedía que se utilizaran dispositivos de estado sólido para obtener una señal de salida de RF de 5 kW en cualquier frecuencia de canal TACAN sin resintonía. Las pruebas funcionales de la FAA y los cálculos de pérdidas de transmisión fijaron en este valor la potencia necesaria para proporcionar una recepción fiable dentro del espacio cubierto solicitado, incluso para interrogadores civiles con sensibilidades tan bajas como - 82 dBm.

Se ha conseguido una potencia de salida superior a 5 kW combinando la salida de 10 módulos amplificadores, por medio de redes combinadoras y divisoras de 10 vías y de bajas pérdidas. Cada módulo amplificador contiene un transistor de alta potencia que excita a cuatro transistores idénticos en paralelo, en la etapa final. Un conjunto de eficientes divisores de potencia de RF de dos vías, que distribuyen uniformemente la potencia en toda la banda de frecuencias con escasa pérdida de inserción y un aislamiento entre transistores superior a 20 dB, asegura un funcionamiento no sujeto a fallos (es decir, el fallo de un transistor puede reducir la potencia de RF pero no afecta al funcionamiento de los otros transistores). Las salidas de estos módulos se reúnen después en un combinador de 10 vías para obtener más de 5 kW.

El desarrollo del combinador de banda ancha y bajas pérdidas fue un elemento



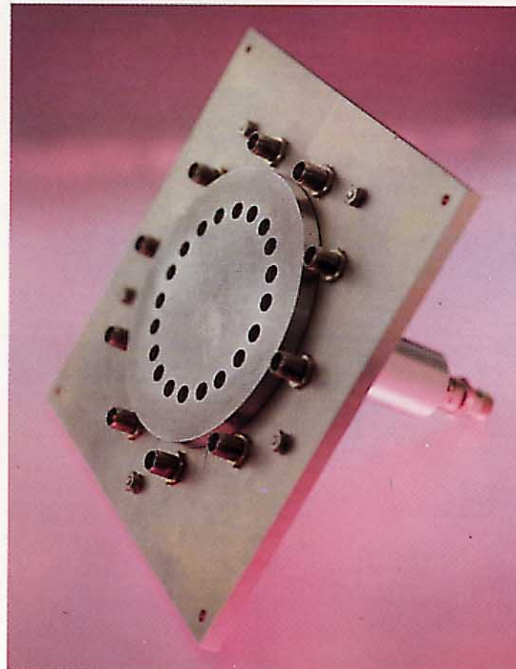
**Módulo del amplificador de potencia, de estado sólido, del equipo TACAN.**

clave en el diseño del amplificador. El combinador de 10 vías utiliza una sección de transformador coaxial con red divisora para conseguir un dispositivo de bajas pérdidas con un aislamiento típico entre puertas de 25 dB a cualquier frecuencia.

### *Unidad monitora controlada por microordenador*

Existe una unidad monitora, duplicada, controlada por microordenador para:

- supervisión ejecutiva de los parámetros fundamentales del sistema, y control por conmutación o desconexión si están fuera de tolerancia



**Combinador-divisor de RF de 10 vías del equipo TACAN.**

- transmisión a un centro de pruebas remoto de los datos medidos, observados y obtenidos de las pruebas
- control local y remoto del sistema
- prueba y certificación automática
- puesta a punto y control del equipo de prueba incorporado
- aislamiento automático de fallos.

Con el propósito de incrementar el MTBO del sistema, se utilizan para estas funciones unidades monitoras duplicadas. Cada unidad incluye una fuente de señal de RF para interrogar al receptor del respondedor. Los detectores de RF y los circuitos del procesador detectan las señales transmitidas y las convierten a un formato especial para su análisis por el microordenador. Estos mismos circuitos, reconfigurados dinámicamente por el microordenador, constituyen el equipo de prueba incorporado.

Los parámetros críticos del respondedor se miden y se comparan con los límites una vez por segundo. Si cualquiera de las medidas está fuera de tolerancia se produce una alarma. Ambas unidades monitoras deben coincidir en que se han sobrepasado dichos límites para que el respondedor se conmute a un modo auxiliar o se desconecte. Si no hay acuerdo entre las monitoras, la FCPU realiza una prueba de integridad de estas unidades para comprobar su buen funcionamiento; si falla esta prueba, la correspondiente monitora se inhabilita.

Además, se realizan pruebas rutinarias de todos los circuitos críticos de medida de la unidad monitora, desactivando ésta automáticamente si cualquiera de las pruebas falla. Esta prevención contra todo fallo hace

que el monitor sea apto para realizar otras funciones. Para control del sistema, se asigna la función de "controladora" a una de las dos unidades monitoras, sirviendo de interfaz con la FCPU para la transmisión de todos los datos de control y de situación, y gobernando la operación del respondedor. En caso de fallo en la unidad "controladora", la segunda unidad monitora asume el control. Se obtiene así una completa redundancia de las funciones de control del sistema sin necesidad de equipo adicional.

## Conclusiones

El objetivo básico de prolongar la vida útil de los sistemas VORTAC hasta más allá de 1995 se ha conseguido con el equipo TACAN de la segunda generación. Este sistema, totalmente integrado, es fiable y económico de adquirir y de mantener, y garantiza que los costes iniciales de sustitución se amortizarán en 5 ó 6 años. El amplio uso de la tecnología de microordenadores permite que el sistema de supervisión y mantenimiento a distancia sea fácilmente reconfigurable para ajustar el sistema a cada aplicación concreta, incluso a usuarios que utilizan sólo unas pocas instalaciones.

**Arnold H. Lang** nació en Hackensack, Nueva Jersey, en 1932. Se graduó BS en 1954 y MS en 1960, en ambos casos por el Stevens Institute of Technology. En 1954 ingresó en ITT Laboratories en Nutley, Nueva Jersey, trabajando inicialmente en el diseño de sistemas de guía de misiles. Fue después responsable de la ingeniería de sistemas de telemetría e instrumentación de polígonos de pruebas de misiles. Desde 1969, el Sr. Lang se ha hecho cargo de la ingeniería de sistemas para el DME y el TACAN. Dirigió la ingeniería de sistemas del programa VORTAC de la segunda generación.

# Equipo terrestre de comunicaciones para control de tráfico aéreo

La División Aeroespacial/Optica de ITT produce transmisores y receptores de canal único tierra-aire que se han convertido en modelo para las comunicaciones vocales de control de tráfico aéreo. Las nuevas tecnologías conducirán a mejorar su comportamiento y posibilidades con vistas al incremento de viajes aéreos en el futuro.

## D. W. Walters

ITT Aerospace/Optical Division,  
Fort Wayne, Indiana, Estados Unidos de América

## Introducción

El objetivo primario del control de tráfico aéreo es garantizar el seguro y eficaz gobierno de aeronaves. La salida y llegada a tiempo del avión, el movimiento de la carga, los costes operacionales y la seguridad de pasajeros y tripulación, descansan todos sobre un control de tráfico aéreo eficiente. Suele afirmarse que la comunicación por radio entre la tripulación y los controladores

constituye el elemento más crítico de tal función, y por ello se le exigen una fiabilidad e inteligibilidad muy elevadas.

## Requisitos de la comunicación de control de tráfico aéreo

Un sistema de comunicaciones de control de tráfico aéreo ha de realizar tareas muy variadas para facilitar la operación ordenada



Transmisor VHF/UHF.



de un aeropuerto. Los picos de tráfico de los grandes aeropuertos alcanzan un avión por minuto, lo que reclama canales de voz claros y un estrecho trabajo en equipo entre el piloto y el controlador, demostrándose la importancia de esta coordinación por el considerable intercambio de información necesario para manejar una sola llegada o salida:

- Asignación de rumbo, altura, velocidad en el aire, frecuencia de comunicación, configuración y código del respondedor para un uso eficiente del corredor aéreo y para separación del tráfico aéreo en las proximidades.
- Informes al controlador sobre el estado del avión y de los pasajeros.
- Informes al avión sobre el estado del aeropuerto, la meteorología, las ayudas de navegación y el tráfico.
- Cambios y permisos de despegue o aterrizaje, con confirmación a medida que progresa cada vuelo.
- Dirección del tráfico de aviones y vehículos terrestres dentro del aeropuerto.

**Requisitos del sistema de radio tierra-aire**

Las operaciones de control de tráfico aéreo exigen un equipo de comunicación vocal experimentado, de comportamiento claro y fiable, tal como el equipo de portadora modulada en amplitud de VHF y UHF que se describe en este artículo.

La banda de VHF comprendida entre 118 y 136 MHz y la banda de UHF entre 225 y 400 MHz están asignadas a comunicaciones vocales entre piloto y controlador para salida y llegada del avión. La banda de VHF se usa más a menudo debido a la disponibilidad y menor coste del equipo.

Son esenciales para el comportamiento del sistema las características operacionales de sus componentes constitutivos. Muchos de los criterios examinados aquí para los equipos de tierra, se aplican también para el equipo de a bordo. El sistema consta de tres unidades básicas: receptor, transmisor y antena. El comportamiento en servicio de estas unidades está afectado por la instalación de la estación terrestre. El aislamiento entre las antenas transmisora y receptora es un parámetro crítico, ya que influye en las prestaciones de un transmisor y receptor en ubicación contigua. La disponibilidad de terreno para el edificio y el número necesario de canales de comunicación condicionan también la instalación terrestre.

**Características globales**

Al considerar las características del sistema, hay que establecer ante todo unos requisitos mínimos de comportamiento. Una relación señal + ruido a ruido,  $(S + N)/N$ , de 10 dB en el receptor, da una buena inteligibilidad, incluyendo en el término ruido la



**Figura 1**  
Intensidad de campo en función de la distancia, para antenas en aviones a 5000 y 20000 pies de altura. Las curvas corresponden a una potencia radiada de 1 kW con la antena emisora a 60 pies sobre el nivel del suelo.

señal de interferencia y un 15% de distorsión máxima de audio.

Como el margen operacional de las comunicaciones de VHF y UHF se limita generalmente al horizonte visual, la altura de la antena terrestre y la altura del avión afectan de modo significativo al alcance de la comunicación. La distancia radioeléctrica es, aproximadamente, un 15% mayor que la distancia geométrica tangencial, por efecto de la curvatura de las ondas de radio.

La figura 1 muestra la rápida caída de la intensidad de señal más allá del horizonte; ni el aumento de la potencia transmitida ni la sensibilidad del receptor mejoran apreciablemente el alcance. Las curvas ilustran la importancia de las instalaciones de las antenas y de su emplazamiento<sup>1,2</sup>.

Las características de comportamiento del sistema deben prever la combinación más desfavorable de varios factores: alcance requerido, ubicación conjunta con señales interferentes, y condiciones ambientales.

**Ubicación contigua**

Desde los comienzos de la radio se reconoce que los transmisores fuera de canal causan degradación en el receptor.

Este efecto, llamado ahora distorsión de modulación cruzada, se ha agravado en muchos casos por el uso de tecnología de estado sólido en los modernos equipos de comunicaciones. Al mismo tiempo, ha aumentado el número de sistemas de radio, y el usuario con frecuencia requiere que los equipos operen en ubicación contigua. La degradación del receptor debida a ruido y señales fuera de canal suele denominarse desensibilización.

### Consideraciones generales

Cuando dos o más antenas de radio están muy próximas (contiguas), hay riesgo de interferencia. Diseñar con acierto un sistema de comunicaciones requiere estudiar con atención las numerosas fuentes de interferencia posibles.

Las variables que intervienen en el diseño en ubicación contigua son: el comportamiento básico de los radios individuales, el aislamiento mínimo entre las distintas antenas, y las mejoras en prestaciones que pueden conseguirse agregando dispositivos tales como filtros pasobanda sintonizables de banda estrecha. El uso de estos filtros en el conductor de antena del equipo de radio mejora el rechazo de las señales próximas en los receptores o proporciona una mayor atenuación de las salidas espurias de los transmisores. Los párrafos siguientes analizan los efectos a considerar cuando se diseña un sistema con equipos contiguos.

### Intermodulación transmisor-transmisor

Cuando dos transmisores radian simultáneamente utilizando antenas muy próximas, parte de la señal de cada una de ellas se acopla en la otra. La señal transmitida y la señal acoplada interactúan en las partes no lineales de las etapas de salida del transmisor, generando muchos productos espurios. Para el sistema usual, el más importante viene dado por:

$$f_s = 2f_1 - f_2$$

donde

$f_s$  — frecuencia del producto espurio

$f_1$  — frecuencia del transmisor 1

$f_2$  — frecuencia del transmisor 2.

El producto anterior es de tercer orden, pero existen también otros muchos, dados por el término general:

$$f_s = mf_1 + nf_2$$

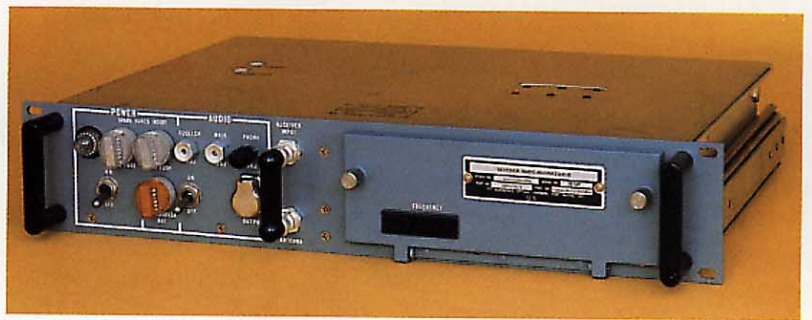
siendo  $m$  y  $n$  números enteros positivos. ( $m + n$ ) expresa el orden.

El término de tercer orden es el más perturbador. El nivel de los productos de

intermodulación de tercer orden de un transmisor de comunicaciones de control de tráfico aéreo de ITT es, al menos, 40 dB inferior al nivel de portadora del transmisor generador, cuando la portadora acoplada procedente del transmisor adyacente está 20 dB por debajo de la portadora de dicho transmisor generador. Además, el valor de 40 dB crece en 1 dB por cada dB que aumente el valor de 20 dB.

*Desensibilización del receptor por sobrecarga del circuito de entrada.* Las señales de alto nivel que entran al receptor procedentes de un transmisor contiguo pueden saturar los circuitos de entrada del receptor y reducir la sensibilidad de éste. Los receptores que aquí se describen aceptarán señales de  $-10$  dBm sin apreciable desensibilización por saturación.

*Desensibilización del receptor por ruido de banda ancha del transmisor y ruido del oscilador local del receptor.* Estos dos efectos se tratan conjuntamente porque suele ser difícil, si no imposible, observarlos por separado. Se deben a que, ni la señal procedente de un transmisor contiguo, ni la del oscilador local del receptor, son espectralmente puras sino que contienen componentes que se extienden desde la portadora deseada hasta varias decenas o centenas de MHz a cada lado. El ruido procedente del transmisor se introduce en el receptor adyacente y enmascara la señal deseada. El ruido del oscilador local se transfiere a la banda de paso de frecuencia intermedia, mezclándose con las fuertes señales fuera de canal que llegan al circuito de entrada del



Receptor VHF/UHF.

receptor, lo cual también enmascara la señal. Estos equipos de radio de ITT requieren un aislamiento total de transmisor a receptor de 24 dB en UHF, y de 30 dB en VHF, para un funcionamiento satisfactorio con frecuencias separadas en 7 MHz y 3 MHz, respectivamente.

*Modulación cruzada del receptor.* Se produce cuando una señal intensa fuera de canal interactúa con la señal deseada en

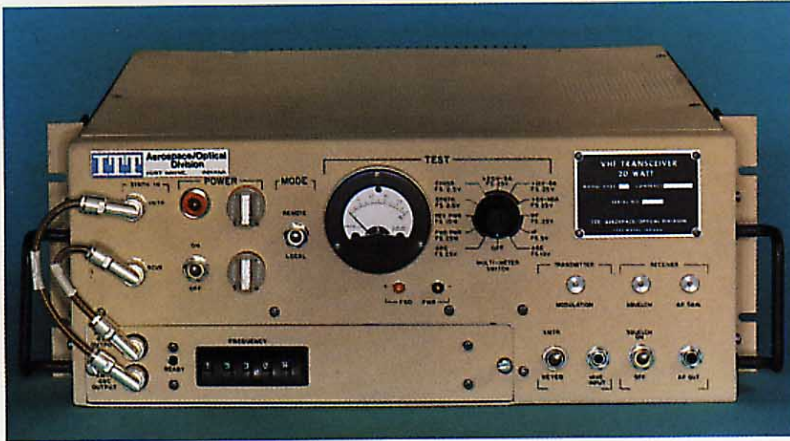
las partes no lineales del circuito de entrada del receptor. Esto hace que se transfiera la modulación de amplitud de la señal interferente a la señal deseada, y se reduzca la relación señal/ruido resultante. El efecto es, a veces, difícil de observar por la desensibilización causada por el ruido del transmisor y del oscilador local. En la mayoría de los casos, las medidas tomadas para eliminar la desensibilización debida al ruido y a la sobrecarga del circuito de entrada,

mezclador, un receptor responderá a señales de frecuencias diferentes a la que está sintonizado. El equipo de comunicación que aquí se describe mantiene todas las respuestas espurias como mínimo a 80 dB menos que la respuesta deseada.

### Diseño del sistema de RF para ubicación contigua

Con un adecuado reparto de las frecuencias, es posible seleccionar una asignación de canales tal que los productos de intermodulación del transmisor y receptor caigan en frecuencias de canal no utilizadas. Se puede reducir más aún la separación de frecuencias utilizando filtros más selectivos o mejorando el comportamiento básico de los equipos de radio.

Otra posibilidad es aumentar la separación entre las antenas adyacentes. Esto se considera impracticable, debido a que el aislamiento aumenta muy lentamente con la separación más allá de los 30 metros, y tanto el terreno necesario como las pérdidas del cable resultarían prohibitivos.



Transceptor VHF/UHF.

aseguran también que la modulación cruzada es insignificante.

*Intermodulación del receptor.* Es similar a la intermodulación transmisor-transmisor. En este caso, las señales procedentes de dos transmisores interactúan en las partes no lineales del circuito de entrada del receptor para producir la señal (más desfavorable):

$$f_s = 2f_1 - f_2$$

donde

$f_s$  — frecuencia de la señal espuria  
 $f_1, f_2$  — dos frecuencias de transmisiones interferentes.

Hay interferencia en el receptor cuando  $f_s$  iguala a la frecuencia sintonizada del mismo. El receptor de ITT está diseñado para tolerar dos señales de  $-10$  dBm con mínima degradación.

*Salidas espurias y armónicas del transmisor.* Cuando una salida espuria del transmisor coincide con una frecuencia sintonizada del receptor, se produce una desensibilización. En el equipo de control de tráfico aéreo de ITT, todas las salidas espurias y armónicas están, al menos, 80 dB por debajo de la portadora.

*Respuestas del receptor a los espurios.* Debido a la no linealidad de los circuitos de entrada del receptor, especialmente el

### Sistemas actualmente en servicio

Durante los últimos años, el Gobierno de los Estados Unidos ha emprendido un amplio programa para modernizar los equipos de comunicaciones por radio instalados en tierra, con el objetivo fundamental de sustituir los equipos de válvulas por dispositivos de estado sólido. ITT ha jugado un importante papel en este programa para los Departamentos Militares de los Estados Unidos y la Agencia de la Aviación Federal, desarrollando y produciendo equipos que combinan fiabilidad y elevadas prestaciones con facilidad de mantenimiento. Estos nuevos equipos, que sirven de pauta para el control de tráfico aéreo, se utilizan mundialmente en las bases militares de los Estados Unidos e instalaciones de este género, aproximándose a 100.000 los receptores, transmisores y transceptores en servicio.

### Transmisores

Se han desarrollado transmisores con tecnología de estado sólido, componentes de elevada calidad y construcción robusta, que consiguen altas prestaciones técnicas. Los equipos AN/GRT-21 (VHF) y AN/GRT-22 (UHF) proporcionan enlaces fiables de voz y datos, tanto para usuarios civiles como militares. Estas unidades existen en configuraciones de 10 W y 50 W; ambas tienen excelentes características para ubicación contigua, en entornos de gran densidad de señales. La tabla 1 resume el comportamiento de la configuración de 50 W.

**Receptores**

Los receptores AN/GRR-23 (VHF) y AN/GRR-24 (UHF) incorporan dispositivos de estado sólido y componentes de elevada calidad; tienen también una construcción robusta. Estas propiedades aseguran su fiabilidad y altas prestaciones en condiciones más severas de control de tráfico aéreo. La estrecha selectividad del circuito

de entrada y la capacidad de tratar señales de elevado nivel cumplen los requisitos más exigentes de ubicación contigua. En la tabla 2 se dan las características del receptor.

**Equipo multicanal**

Los transeceptores multicanales de estado sólido FA8190 (VHF) y FA8191 (UHF), de 20 W, sintetizados y con control remoto, se comportan en ubicación contigua como exigen las áreas de control de tráfico aéreo de elevada densidad de señal. Estas unidades se desarrollaron especialmente para la Agencia de la Aviación Federal de los Estados Unidos, como reserva de emergencia, a fin de mantener la comunicación durante las grandes interrupciones provocadas por fallos en el equipo primario o la línea de alimentación. Las características del transeceptor de reserva para comunicaciones de emergencia son similares a las del transmisor y del receptor dadas en las tablas 1 y 2.

Los equipos de radio REFLEX de la División Aeroespacial/Optica de ITT se derivan de los receptores (AN/GRR-23, -24) y los transmisores (AN/GRT-21, -22), ambos de canal único. La modificación REFLEX introduce sintonía totalmente electrónica, manteniendo muchas de las características deseables del equipo de canal único. La sintonía electrónica permite un control remoto total de los equipos de radio a través de conexiones alámbricas directas o de líneas telefónicas normales.

**Tabla 1 — Características del transmisor VHF/UHF**

Banda de frecuencia	VHF — 116 a 149,975 MHz UHF — 225 a 399,95 MHz
Canales VHF	680 (50 kHz), 1360 (25 kHz)
UHF	3500 (50 kHz), 7000 (25 kHz)
Estabilidad	0,001 %
Potencia de salida en RF	
Excitador de estado sólido	VHF 10 W portadora mínimo UHF 10 W portadora mínimo
Amplificador lineal	VHF 50 W portadora mínimo UHF 50 W mínimo
Ruido de portadora	45 dB por debajo con modulación del 90%
Armónicos	80 dB por debajo de la portadora
Intermodulación	40 dB por debajo para un acoplamiento de 20 dB a 0,5 MHz (VHF) ó 1 MHz (UHF)
Capacidad de modulación	Modulación de amplitud del 90%, entrada de -35 a +10 dBm
Distorsión	15% máximo para modulación del 90%
Banda de audiofrecuencia	0,3 a 6 kHz (voz) 0,3 a 25 kHz (datos)
Alimentación primaria	105/120, 210/230 V CA ± 10% (47 a 420 Hz) Excitador sólo 24 a 30 V CC
Margen de temperatura funcional	-29°C a +60°C
Margen de temperatura de almacenamiento	-62°C a +71°C

**Tabla 2 — Características del receptor VHF/UHF**

Banda de frecuencias	VHF — 116 a 149,975 MHz UHF — 225 a 399,95 MHz
Canales VHF	680 (50 kHz). Opcional: 1360 (25 kHz)
UHF	3500 (50 kHz). Opcional: 7000 (25 kHz)
Estabilidad	0,001 %
Sensibilidad	10 dB de relación señal más ruido a señal, a 3 µV, modulación al 30%
Banda de audiofrecuencia	0,3 a 3 kHz (voz)
Salidas (2) de audio	100 mW (600 ohmios)
Ruido y zumbido de audio	50 dB por debajo de 100 mW
Distorsión armónica	10% máximo para 30% de modulación
Margen del control automático de ganancia	6 µv a 1 v (± 3 dB)
Rechazo de imagen	80 dB mínimo
Respuesta a espurios	80 dB mínimo
Selectividad	± 18 kHz (6 dB), separación de canales 50 kHz ± 9 kHz (6 dB), separación de canales 25 kHz
Silenciador	Ajustable, 3 a 50 µv
Alimentación primaria	105/210, 120/250 V CA ± 10% (47 a 420 Hz), 22 a 30 V CC
Margen de temperatura funcional	-29°C a +60°C
Margen de temperatura de almacenamiento	-62°C a +71°C

**Futuras exigencias de las comunicaciones tierra-aire**

El movimiento de pasajeros y carga por vía aérea crece con rapidez. Sin embargo, el espacio del corredor aéreo y los espectros de radiofrecuencia que deben sustentar esta expansión son fijos. La administración del espacio aéreo y del espectro de frecuencias se han convertido, pues, en los factores fundamentales para garantizar la seguridad y el crecimiento ordenado del tráfico, siempre de acuerdo con los tres objetivos esenciales de los sistemas de control de tráfico aéreo: mayor seguridad, mayor eficiencia y mayor productividad de los controladores individuales. Hay que conseguir también que el coste de operación de estos sistemas sea reducido al mínimo. Esta presión sobre el coste conducirá probablemente a menos centros operacionales y a más equipo en cada centro<sup>3</sup>.

A medida que evolucione el sistema, los equipos de radio tierra-aire se automati-

zarán en mayor grado, lo cual les exigirá disponer de interfaces de ordenador y funcionar mejor en ubicación común, ya que habrá más equipo en menos estaciones. La pregunta crítica al diseñar los sistemas del futuro no es lo que pueda hacerse sino lo que deberá hacerse. Exactamente, cuánta automatización y de qué clase debe ayudar o sustituir al controlador humano. Una vez diseñado el sistema, surge la preocupación de cómo debe instrumentarse. Todo esto significa que los nuevos equipos tierra-aire para control de tráfico aéreo necesitarán mayor flexibilidad de control y mayor capacidad de instalación contigua<sup>4</sup>.

Varios proyectos acometidos por la División Aeroespacial/Optica afrontan el reto de diseñar este nuevo sistema de control de tráfico aéreo. Se ha desarrollado un elaborado sistema de control remoto que es adecuado para la automatización por ordenador, pudiendo controlar equipos de radio desde cualquier distancia, a través de circuitos de interfaz telefónico compatibles. Permite el control total de cualquier equipo de radio, sea cual fuere su localización, ofreciendo la flexibilidad que requiere un futuro sistema de este tipo. Los circuitos de control por microprocesador le hacen

capaz de manejar potencias de transmisión hasta de 120 W, siendo adecuado tanto para transmisores como para receptores.

Otros proyectos de desarrollo incluyen la reducción del ruido de banda ancha generado en los circuitos de RF del transmisor, lo cual reducirá la desensibilización del receptor en un entorno de ubicación contigua. Se han conseguido mejoras hasta de 20 dB, y se está estudiando su introducción.

Aparte de los desarrollos directamente relacionados con el comportamiento en ubicación contigua, hay otros desarrollos como los de circuitos incorporados para pruebas y supervisión remota. El uso de microprocesadores, juntamente con puntos de prueba esenciales, hace que puedan darse económicamente las anteriores prestaciones en los equipos de radio de la próxima generación. Estos circuitos podrán supervisar y analizar el comportamiento radioeléctrico de manera continua, sin afectar en nada a la operación, y enviar los datos funcionales a un depósito central o instalación de mantenimiento donde puedan iniciarse las acciones oportunas. Todo ello hará descender, de modo significativo, los costes de soporte y conservación.

Unidad de control remoto.



capaz de admitir cambios y atender necesidades futuras. Se dispone de unidades de control con interfaz a líneas telefónicas, a fin de establecer conexiones directas con los equipos de radio para control local.

La División Aeroespacial/Optica se ha comprometido también a mejorar el comportamiento de receptores y transmisores en ubicación contigua. Ha desarrollado un filtro paso banda de sintonía electrónica, que puede conmutarse de un canal a otro en pocos microsegundos. Tiene una anchura de banda del 2%, a 3 dB, y es

## Conclusiones

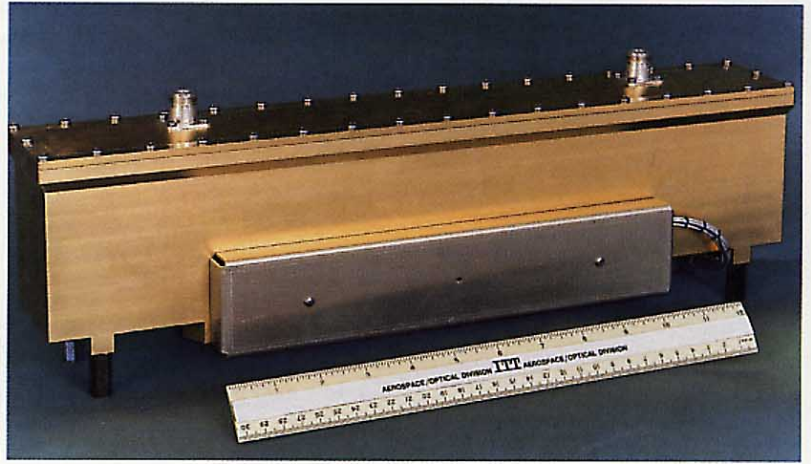
Los volúmenes de pasajeros y carga transportados por avión aumentan rápidamente en todo el mundo, mientras que los corredores aéreos y el espectro de radiofrecuencias que los soportan son fijos. Afortunadamente, el rápido cambio de la tecnología electrónica hace posible diseñar sistemas de radio de prestaciones más elevadas que resuelvan este conflicto. La vigilancia de la calidad y el aislamiento de los fallos mediante indicadores incorpo-

rados será un distintivo de la próxima generación de equipos, minimizando así las interrupciones del servicio y reduciendo los costes de operación y mantenimiento.

La administración del espacio aéreo y del espectro de frecuencias exigirá una continua investigación y desarrollo en la tecnología de comunicaciones para el control de tráfico aéreo, con el fin de mantener y mejorar el envidiable nivel registrado en la seguridad de pasajeros.

### Agradecimiento

El autor manifiesta su agradecimiento al Dr. William Robertson de la División Aeroespacial/Optica de ITT, Fort Wayne, Indiana.



4 National Airspace System Plan: US Department of Transportation, abril 1983, págs. 1-19.

**Filtro de UHF sintonizado electrónicamente.**

### Referencias

- 1 Reference Data for Radio Engineers ITT; Quinta edición, octubre 1968, pág. 26-14.
- 2 Curvas de propagación. Bell Telephone Laboratories Inc: octubre 1944, número 3, pág. 20.
- 3 R. Wesson, K. Soloman, R. Steeb, P. Thorndyke y K. Wescourt: Scenarios for Evolution of Air Traffic Control: noviembre 1981, págs. 2, 56.

**D. W. Walters** nació en Indiana, EE.UU., en 1934. Se graduó BSc en ingeniería electrónica por la Universidad de Purdue en 1956 y MSBA en el St Francis College en 1981. El Sr. Walters ingresó en ITT en 1956, donde se ocupa en el desarrollo de equipos de comunicaciones de control de tráfico aéreo en VHF/UHF. En la actualidad es jefe del departamento de ingeniería de control de tráfico aéreo en la División Aeroespacial/Optica de ITT.

# Sistema 4000 de ayudas a la navegación

El Sistema 4000 es una nueva generación de ayudas a la navegación que incluye los sistemas ILS, VOR y DVOR. Mediante las técnicas de proceso de señales digitales y control por microprocesador, se logran excelentes prestaciones y fiabilidad.

**H. Kleiber**  
**N. Knoppik**  
**H. Vogel**

Standard Elektrik Lorenz AG, Stuttgart,  
República Federal de Alemania

## Introducción

El Sistema 4000 es una nueva generación de ayudas a la navegación aérea que comprende el ILS (sistema de aterrizaje instrumental), el VOR (radiofaro omnidireccional VHF) y el DVOR (VOR Doppler).

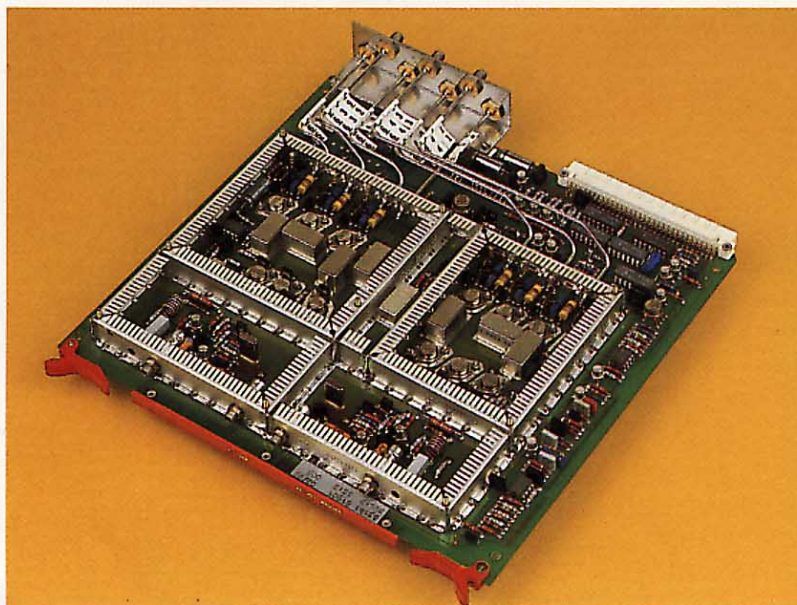
El ILS, la ayuda al aterrizaje aceptada internacionalmente, permite mantener el rumbo y la senda de descenso. Fue normalizado en 1952 y continuará hasta 1995. Cada estación terrestre emite señales mediante un transmisor de VHF para guía horizontal y un transmisor de UHF para guía vertical hasta el punto de toma de contacto. A bordo del avión, un indicador de agujas cruzadas marca las desviaciones laterales respecto al rumbo de aproximación, así como cualquier desviación de la senda de descenso deseada.

El VOR se emplea internacionalmente para vuelos de distancias medias y zonas próximas a los aeropuertos. Este sistema fue normalizado por la OACI en 1960, y se

va a utilizar en tal sentido hasta 1985, si bien se espera su continuación más allá del año 2000. El funcionamiento del VOR se basa en la emisión de señales desde una estación terrena, a partir de las cuales el equipo de a bordo obtiene una indicación visual de la desviación del rumbo real del avión con respecto al azimut seleccionado por el piloto.

Se utiliza el VOR Doppler — sistema de gran apertura — cuando las condiciones del terreno (superficie desfavorable, con muchos obstáculos que pueden crear señales espurias) son tales que una estación terrestre VOR normal daría lecturas erróneas. Con relación al equipo de a bordo, las señales VOR y DVOR son equivalentes. Aunque el método de generar y radiar señales de navegación sea diferente, el DVOR es totalmente compatible con el sistema VOR convencional.

Módulo de radio-frecuencia del Sistema 4000.



## Principales características de diseño

Partiendo de la larga experiencia de SEL en ayudas a la navegación aérea, se especificó una serie de requisitos básicos para la familia 4000, incluyendo:

- amplio uso de tecnología de microprocesadores
- operación automatizada
- equipo de pruebas incorporado con localizador de averías
- fiabilidad aún mayor que la del modelo anterior
- construcción modular
- costes de operación reducidos.

El más importante de ellos es el uso de microprocesadores, por influir en todos los demás criterios de diseño. En efecto, se emplean microprocesadores para controlar las funciones del equipo, simplificando y automatizando la operación y el manteni-

**Tabla 1 — Principales parámetros de los modernos sistemas de navegación**

Parámetros específicos	VOR	VOR Doppler	Localizador ILS	Senda de descenso ILS	Margen de parámetros
Banda de radiofrecuencia (MHz)	108 a 117,975		108 a 112	328,6 a 335,4	108 a 118 y 325 a 340
Potencia de portadora (W)	25 a 100		20 a 25	10 a 15	25 a 100
Frecuencias de modulación (Hz)	9960	30	90,150		30 a 9960
	1020		1020	—	
	300 a 3000		(300 a 3000)	—	
Profundidades de modulación	Señal de navegación %	30	2 × 20	2 × 40	5 a 85
	Identidad %	10	5 a 15	—	
	Voz %	20 a 30	(20 a 30)	—	
Suma de modulación (portadora) %	60 a 70		45 a 55 (65 a 85)	80	
Supervisión	Entrada	Radiofrecuencia (RF)		Radiofrecuencia (RF)	Intensidades de campo
	Nivel	30 Hz, 9960 Hz (1020 Hz)		RF, 90 Hz, 150 Hz	Niveles de señal de modulación
	Fase	Referencia/variable		—	Orientación

miento, y para generar todas las señales sinusoidales de modulación y controlar las amplitudes y fases de las señales de RF. Gracias a la tecnología digital, se han eliminado los circuitos analógicos con sus críticos ajustes, mejorando así la calidad y estabilidad a largo plazo de las señales radiadas.

**Principio del Sistema 4000**

Los principales elementos de los sistemas ILS y VOR son el sistema de antena y los transmisores, monitores, y fuentes de

alimentación duplicados. En la tabla 1 se resumen las señales normalizadas para sistemas de navegación VHF/UHF.

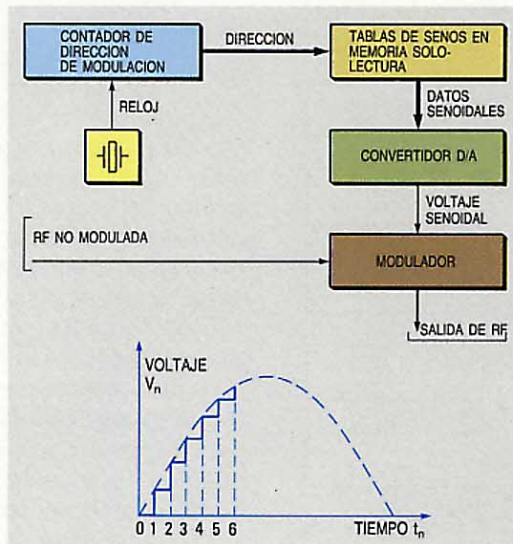
La calidad de señal es particularmente significativa para el error de tierra, factor importante en la precisión del sistema; dicha calidad depende de diversos parámetros:

- estabilidad de frecuencia y fase de las señales de modulación
- estabilidad de las amplitudes de portadora y bandas laterales
- estabilidad de frecuencia y fase de la señal de RF
- distorsión de la forma de onda de las señales de modulación
- estabilidad de la profundidad de modulación.

La utilización de componentes digitales, como microprocesadores y memorias, y convertidores analógico/digital, facilita la estructura modular de programas y equipos.

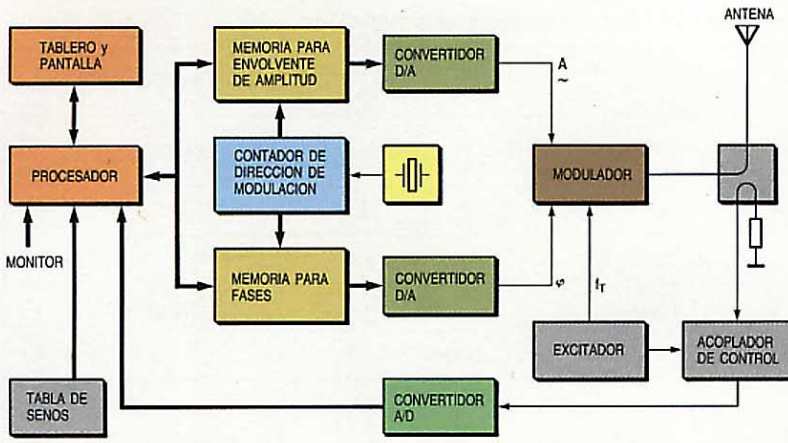
**Generación de señal**

Ya se ha mencionado la necesidad de una señal de navegación de precisión y estabilidad excelentes. Los avances de la tecnología de semiconductores permiten, con buena relación coste-eficacia, generar señales de modulación de tono que pueden extraerse de una tabla almacenada de valores senoidales, como indica la figura 1.



**Figura 1**  
Principio de la generación de señal en el Sistema 4000  
D/A - digital/  
analógico.





**Figura 2**  
Transmisor del Sistema 4000, indicando cómo se generan las señales de banda lateral por técnicas digitales.

Un contador de dirección, controlado por reloj de oscilador a cristal, va pidiendo a la memoria de sólo lectura los sucesivos valores de amplitud, los cuales se convierten luego de formato binario a analógico para obtener el voltaje senoidal que modula la señal de RF. Mediante este sistema puede seleccionarse la frecuencia del tono cambiando la frecuencia del reloj.

Para aproximar lo más posible el perfil escalonado de la onda a una senoide, se requiere almacenar un número de valores de amplitud suficiente y que la resolución de amplitud sea lo bastante elevada. Para el ILS se necesitan 1024 direcciones en un semiperiodo de 30 Hz, con una resolución de amplitud de 10 bits.

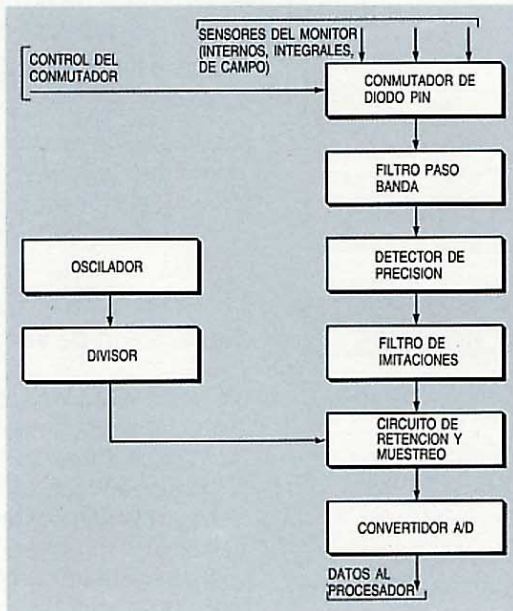
La figura 2 muestra cómo se genera la señal de banda lateral por técnicas digitales; no se usan filtros analógicos ni se requieren ajustes en los circuitos<sup>1</sup>.

La señal de audio es elaborada por el generador de reloj, contador de dirección, y tablas de senos, como ya se ha dicho. Otros

elementos importantes son el procesador de datos y un convertidor A/D (analógico/digital) con traductor, los cuales permiten controlar la amplitud y la fase de las señales de RF, utilizando memoria de acceso aleatorio para almacenar los valores de control. Estos valores se calculan a partir de los nominales dados por el procesador, los valores digitalizados reales realimentados, y los valores de control existentes. El traductor entrega la envoltura que ha sido demodulada por un demodulador de precisión y la denominada *señal FI cero* (frecuencia intermedia cero) al convertidor A/D. Dicha señal se genera como mezcla de la señal desacoplada de salida del transmisor y de una salida de referencia del oscilador de control. Poniendo la salida de referencia en cuadratura de fase, se obtiene el producto mezcla de  $u_s \cdot \sin \Phi$  y  $u_s \cdot \cos \Phi$ , del cual puede calcularse la fase de RF, utilizando el *arco-tangente* bajo el control del procesador. Este proceso es continuo.

El método anterior es válido para señales de banda lateral. Para portadoras, sin embargo, hay que considerar también las señales de modulación de la voz y la identificación de la estación. El control digital por medio del procesador del equipo no es técnicamente factible, debido al carácter cuasi-estadístico de las señales de voz. En este caso, la señal analógica se realimenta directamente al modulador. Para generar la señal de modulación de portadora se utilizan también tablas de senos; los factores de modulación se establecen a través del bus de datos del procesador. Se utilizan convertidores D/A multiplicadores como circuitos de control.

El procesador no sólo controla las señales del transmisor, sino que además evalúa las señales del monitor, pudiendo a petición visualizarse los resultados del mismo modo que los datos del transmisor.



**Figura 3**  
Concepto de la supervisión en la familia de ayudas a la navegación Sistema 4000.

### Supervisión

El monitor tiene dos funciones. Primero, asegurar que las variaciones en las condiciones ambientales y el envejecimiento de los componentes no influyan en el funcionamiento del propio monitor. Segundo, detectar cambios de señal inadmisibles en el campo radiado por observación de las señales de campo reales.

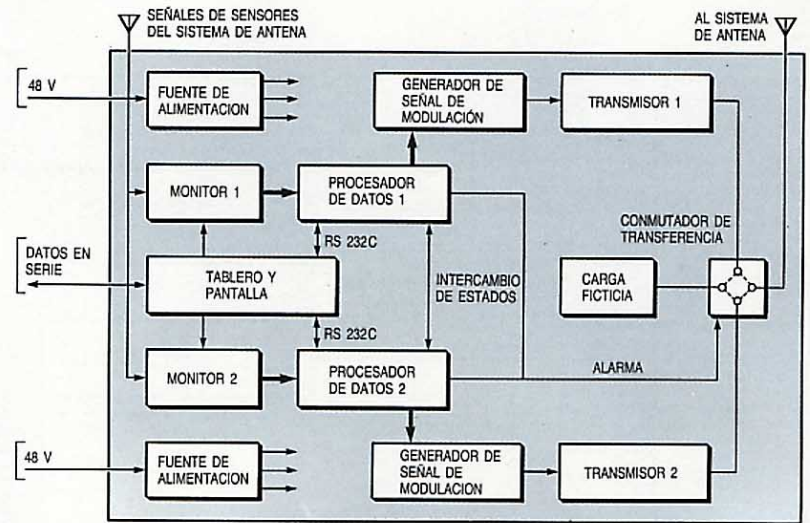
En la figura 3 se presenta el principio del monitor del ILS. Un filtro de alta frecuencia, no crítico, suministra las portadoras de VHF requeridas al circuito de muestreo y retención. De la envoltura demodulada se obtienen 32 muestras durante un ciclo de 30 Hz, digitalizando después los valores de amplitud muestreados. En el procesador

del equipo se separan, mediante el análisis de Fourier, los componentes de modulación (90 y 150 Hz) de estas señales, siendo los parámetros de la señal (profundidad de modulación, nivel de RF, etc.) calculados y comparados con los límites de alarma programables. Se han eliminado los críticos filtros de 90 y 150 Hz que antes eran necesarios. El monitor del VOR también utiliza la transformación discreta de Fourier de 32 muestras durante un periodo de 30 Hz. Hay además un discriminador de FM para la señal de referencia<sup>2</sup>.

**Diseño del equipo**

En la figura 4 se aprecian los principales módulos funcionales de la familia 4000, incluyendo los transmisores dobles con generador de señal de modulación, las unidades centrales de proceso y procesadores de señal de monitor duplicados, el tablero de mando y la pantalla, y las fuentes de alimentación duplicadas.

Como queda dicho, muchas de las funciones de los ILS y (D)VOR pueden realizarse básicamente igual, por lo que un mismo diseño modular con módulos comunes es aplicable a los diferentes sistemas. En particular, el control por microprocesador permite utilizar módulos de transmisión comunes, siendo las funciones reales



**Figura 4**  
Principio del transmisor duplicado.

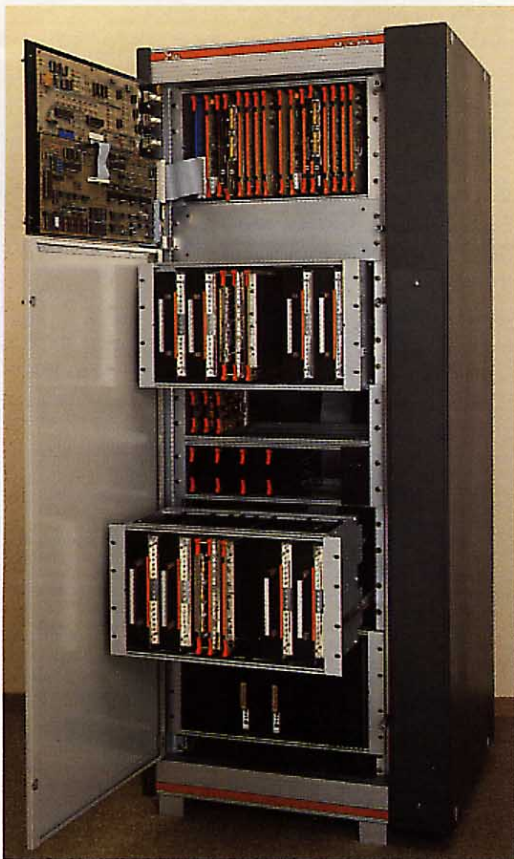
determinadas por la programación. La supervisión automática, el control y la visualización del estado operacional también se basan en microprocesador.

El diagrama de bloques de un sistema ILS localizador de 2F duplicado (Fig. 5) presenta el diseño básico del equipo para los diversos sistemas.

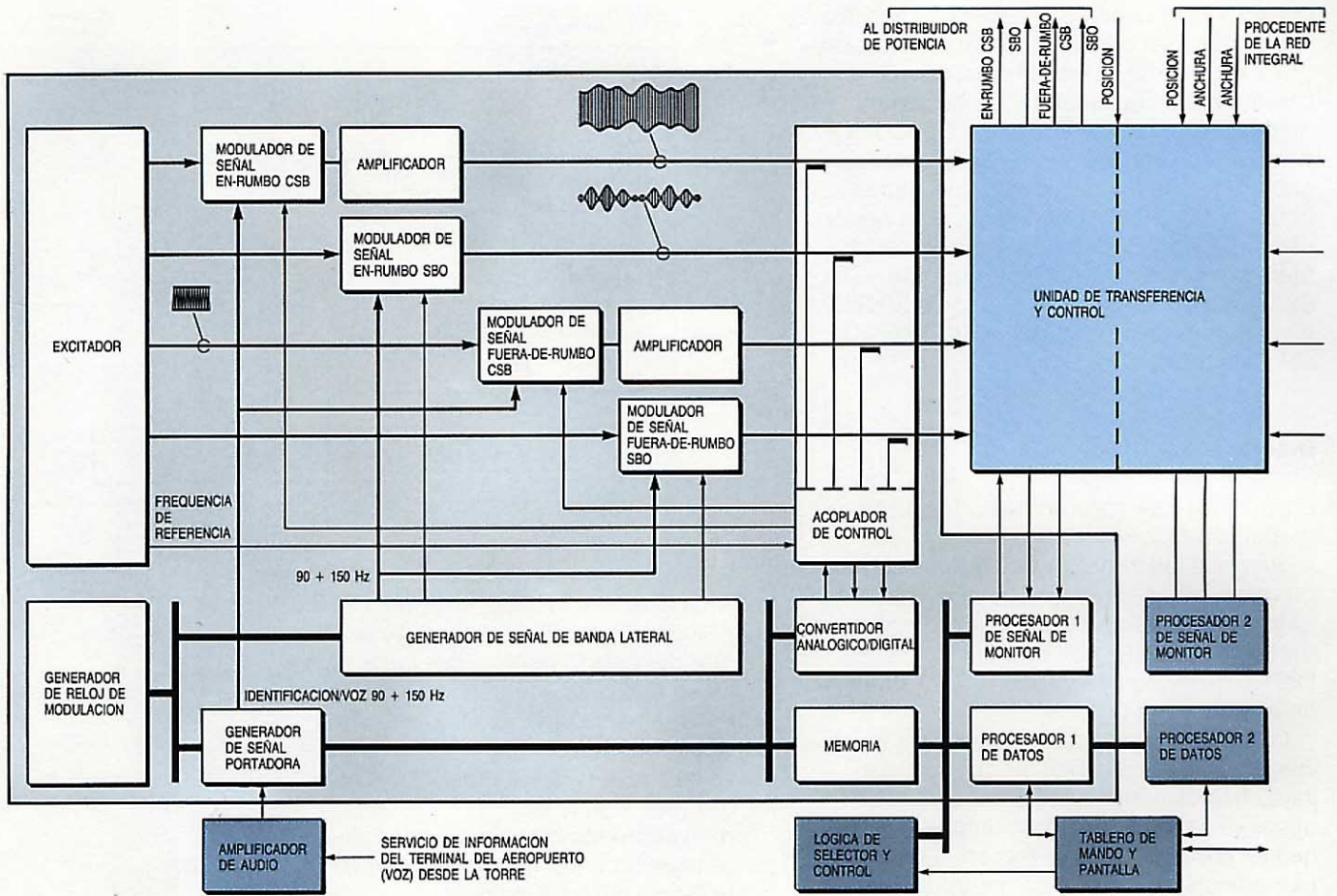
En un elemento modulador se amplifican las señales procedentes del excitador controlado a cristal, adaptándose las funciones y el número de canales a las necesidades de los sistemas VOR, DVOR o ILS. Para la señal portadora, se aumenta en 10 dB la potencia de salida del modulador mediante un amplificador de onda continua de 25 W y 80 W de potencia de pico. Se logra una potencia de transmisión de 100 W conectando cuatro amplificadores en paralelo; un quinto amplificador excita la etapa de salida.

Unas señales de audio, generadas digitalmente y controladas por cristal, modulan la portadora de RF y las señales de banda lateral. Tanto la señal de modulación de portadora como las señales de modulación de bandas laterales proceden de respectivos generadores, controlados por las señales que envía el generador de reloj de modulación.

El control del equipo y el proceso digital de las señales se realizan por medio de un microprocesador, procesador de datos, y una expansión de memoria. La transformación discreta de Fourier en tiempo real durante el proceso de supervisión requiere una unidad central de proceso de 16 bits. El sistema de supervisión está formado por un procesador de señal de monitor y parte de la unidad de control y transferencia, junto con el procesador de datos y la expansión de memoria. Las señales de navegación se pueden supervisar a través de diversos puntos sensoriales. Después de la detec-



**Armario de transmisor del Sistema 4000.**



**Figura 5**  
**Diagrama de bloques del Sistema 4000**  
**CSB - portadora y bandas laterales**  
**SBO - bandas laterales puras.**

ción, las señales se convierten en una palabra de 12 bits a velocidad de muestreo de 960 Hz. Se evalúan los datos, y, en caso de detectarse una señal incorrecta, aparece una alarma y se inicia automáticamente el paso a la unidad de reserva o la desconexión.

El tablero de mando y la pantalla se utilizan para introducir datos, indicar datos y valores medidos, y para visualizar el estado y prestaciones del sistema. Puede haber control remoto a través de un módem V.24 conectado a un tablero adicional y a una unidad de pantalla en el centro de mantenimiento. Todas las funciones son controladas por un microprocesador de 40 k-octetos de memoria.

Todos los transmisores del Sistema 4000 están equipados con tablero de mando y pantalla, conjuntamente con los siguientes cuadros contenidos en un armario de 19 pulgadas (483 mm): cuadro de audiofrecuencia, dos cuadros de RF (SBR-D/F), un cuadro para el amplificador de voz, módem, etc., y un cuadro para la fuente de alimentación. El amplificador del transmisor está en un compartimiento lateral separado.

La integración del equipo duplicado en un armario único de 19 pulgadas implica una disipación de potencia elevada, a pesar de utilizar microelectrónica. Un mantenimiento

eficaz requiere la eliminación de ventiladores en el armario, aun en el caso de 100 W de potencia de salida por equipo. Por ello la práctica de equipo se dirige a optimizar el flujo de aire; los amplificadores de potencia adicionales se montan en un armario separado, sobre una gran superficie disipadora de calor, consiguiendo una disipación de 500 W, sin ventiladores.

Es característica de la práctica de equipo del Sistema 4000 la utilización de circuitos impresos para las etapas de RF. La fabricación se simplifica mediante un nuevo apantallado que consiste en láminas elásticas producidas por un proceso de grabación.

#### Sistemas de antena

Los sistemas de antena para los VOR, DVOR, localizador ILS y senda de descenso ILS, no pueden formarse a partir de elementos comunes, como ocurría con los transmisores. En principio se necesitan los siguientes diagramas horizontales de radiación:

- diagrama omnidireccional para la señal portadora del VOR y para bandas laterales y portadora del DVOR
- diagrama de sección en ocho con anchura de haz de 90° exactamente a 6 dB, para las bandas laterales del VOR

- diagrama bidireccional convencional para la señal en-rumbo (*course*) del localizador ILS
- diagrama de dipolo en V para las señales fuera-de-rumbo (*clearance*) del localizador ILS
- diagrama especial para las señales de senda de descenso ILS.

Estos diagramas se consiguen con los siguientes elementos radiantes:

- anillos Alford para el diagrama omnidireccional
- dipolos magnéticos para el diagrama en ocho
- dipolos de  $\lambda/2$  para el diagrama bidireccional convencional
- dipolos en V para el diagrama bidireccional "insertado"
- redes de dipolos escalonados para los diagramas especiales.

Los sistemas de antena necesarios se forman utilizando los elementos indicados.

Por su diseño, la antena del VOR minimiza la componente vertical de señal y logra un ángulo para el cono de silencio (cono de confusión) menor de  $60^\circ$ . Consta de dos dipolos ranurados cruzados para la radiación en banda lateral, y dos anillos Alford para la portadora. Los anillos Alford están colocados encima y debajo de las antenas ranuradas. Entre los dipolos y los anillos se colocan pantallas horizontales para evitar la interacción. Todos los elementos de antena y las pantallas van montados sobre un tubo de aluminio extruido, fijado a la contraantena sólida. Este tubo constituye el eje de simetría del sistema de antena<sup>3</sup>.

La antena DVOR, que consta de 50 anillos Alford en círculo de 13 m para verdadera radiación de doble banda lateral, y de un anillo Alford en el centro para radiación de portadora, presenta un mínimo de acoplamiento cruzado para evitar la distorsión del diagrama omnidireccional. Un módulo especial de desacoplo, colocado directamente enfrente de la alimentación de

antena, disminuye el acoplamiento mediante una transformación de reactancia y enviando alguna energía al elemento que sigue al contiguo. Se minimiza así el acoplamiento de los elementos de banda lateral, y se asegura que el espectro de frecuencia transmitido cumple con los requisitos de la OACI, Anexo 10<sup>4,5</sup>.

Los nuevos perfiles de aluminio permiten una estructura modular, con longitud de base variable, para construcción de las diversas versiones de antenas de localizadores ILS.

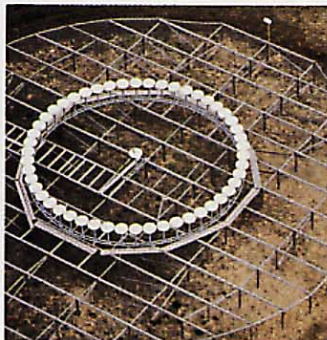
### Operación y mantenimiento

Se ha considerado en especial el interfaz entre operador y equipo. Dado que todos los valores de control y datos variables se pueden alterar mediante el bus de datos del procesador, y que una gran variedad de señales de prueba analógicas y de datos se miden por multiplexación de tiempo, tanto para el bucle de control como para el BITE (equipo de pruebas incorporado), la memoria del procesador almacena datos completos para la evaluación del estado del transmisor. Como el microprocesador gobierna también la supervisión, en su memoria se almacenan el estado del monitor y los valores de las señales supervisadas con los límites de alarma correspondientes<sup>6</sup>.

El tablero de mando y la pantalla informan sobre el estado y los valores de los datos medidos. Los datos se introducen por un teclado de diseño ergonómico y se visualizan en dos salidas alfanuméricas de lectura, de 16 caracteres cada una. Con la ayuda de ITT/ESC, Harlow, y de la Dirección de Aviación Civil Alemana, se ha logrado un nuevo concepto de visualización; sólo aparece el estado actual, no siendo visibles las informaciones no relevantes.

Durante la instalación y puesta en servicio del sistema, el BITE y el monitor permiten realizar el ajuste de las antenas sin necesidad de equipo de medidas adicional. Después de ajustar la antena para el sistema

**Antenas del Sistema 4000: de izquierda a derecha, antenas de VOR, DVOR, localizador ILS y senda de descenso ILS.**



completo (antena y transmisor), se programan los parámetros de acuerdo con las necesidades locales en cada caso (p. ej., nivel de potencia de la banda lateral, fases de la RF, etc.). La determinación final de los datos, realizada durante el vuelo de puesta en servicio, puede programarse en el centro de control remoto (en el área de mantenimiento).

Como ya se ha indicado, la transferencia de datos desde el tablero y la pantalla locales hasta los remotos se hace vía el interfaz RS 232 C, en FSK (desplazamiento de frecuencia) y por una línea de dos hilos. Desde un equipo en la central remota, pueden interrogarse hasta siete instalaciones en multiplexación de tiempo. Si se produce una alarma, automáticamente se da la señal de alarma principal en la estación central de mantenimiento. En el extremo local, el procesador de datos comprueba continuamente las señales del BITE; en caso de fallo, la rutina del BITE localiza el módulo averiado. El personal de mantenimiento obtiene información pulsando en el tablero de mando las correspondientes teclas de datos. La sustitución del módulo averiado puede efectuarse sin necesidad de hacer medidas locales, y no requiere ajuste alguno después de reemplazar dicho módulo. Mediante equipo opcional es posible disponer de un servicio con llamada automática para los sistemas VOR/DVOR. La utilización del microprocesador para control del equipo reduce al mínimo el mantenimiento y la puesta en servicio.

## Conclusiones

El Sistema 4000, nueva generación de ayudas a la navegación, se ha desarrollado en estrecha colaboración con la Administración Federal de Alemania Occidental para la Seguridad del Vuelo, con el apoyo

del Ministerio Federal de Investigación y Tecnología. La tecnología moderna, combinada con la gran fiabilidad e integridad de los sistemas, garantiza que estos equipos prestarán servicios a la aviación hasta finales del siglo.

## Referencias

- 1 H. Kleiber, H. Idler, y J. Stammelbach: A Transmitter for a Navigation System: Solicitud de patente alemana P 3029 169.
- 2 S. Bloch, K. Bressler, H. Idler, y H. Kleiber: Facility for Monitoring the Level of a Radio Frequency Signal: Solicitud de patente alemana P 31 03 118.8.
- 3 H. Würth y G. Greving: Antenna for a VHF Omnidirectional Range: Solicitud de patente alemana.
- 4 W. Kautz: Doppler VHF Omnidirectional Range: Solicitud de patente alemana P 31 08 980.
- 5 W. Kautz: Doppler VHF Omnidirectional Range: Solicitud de patente alemana P 33 09 784.4.
- 6 H. Vogel y H. Kleiber: Mikroprozessorgesteuerte Funknavigationshilfen für die Zivilluftfahrt.

**Herbert Kleiber** nació en Neutitschein, Checoslovaquia, en 1942. Estudió en la Gesamthochschule de Kassel donde se graduó Ingeniero-diplomado. Entró en SEL en 1966, como ingeniero de I + D, y trabajó en el desarrollo de sistemas de navegación. Desde 1979 ha dirigido la ingeniería del proyecto del Sistema 4000, y es responsable del equipo de tierra para la navegación civil.

**Norbert Knoppik** nació en 1944 en Henzegrund, Baja Silesia. Obtuvo el título de Ingeniero-diplomado en la Technische Hochschule de Aquisgrán (Alemania), así como el de Doctor Ingeniero por sus investigaciones en tecnología de las ondas milimétricas. El Dr. Knoppik entró en SEL en 1982, y es jefe de investigación y desarrollo para electrónica de aviones, navegación y vigilancia. Es miembro del VDE/NTG.

**Horst Vogel** nació en Stuttgart, Alemania, en 1936. Estudió ingeniería de comunicaciones en Esslingen, obteniendo el título de Ingeniero-diplomado. Ingresó en SEL en 1962 y trabajó activamente en grandes ordenadores, Tacan y navegación civil. En 1967 fue nombrado jefe de desarrollo para electrónica de aviones y, en 1976, ingeniero jefe para navegación civil, responsable de todas las actividades de desarrollo en este campo. En 1983 pasó a ser jefe de programas, supervisando como tal todos los proyectos de gran escala de SEL.

# Estructuras de equipo y programación del Sistema 4000

La aplicación de técnicas digitales al control y supervisión de la familia de ayudas a la navegación Sistema 4000, permite realizar las funciones ILS, VOR y DVOR con módulos de equipo y programación comunes.

**F. Limbach**  
**K. Pählig**

Standard Elektrik Lorenz AG, Stuttgart,  
República Federal de Alemania

## Introducción

Un sistema estándar de navegación tal como el VOR (radiofaro omnidireccional en VHF), DVOR (VOR Doppler), o ILS (sistema de aterrizaje instrumental), consta de transmisores dobles, sistemas de antena, y monitores dobles. La figura 1 muestra la configuración de la familia de ayudas a la navegación Sistema 4000, incluyendo las funciones de control y supervisión.

En el Sistema 4000, hay una clara separación entre funciones de control y de supervisión (Fig. 2). Mientras que el bus de monitor trabaja continuamente durante el funcionamiento normal del sistema, no hay necesidad de utilizar el bus de control del transmisor cuando el transmisor correspondiente no está en servicio. Este último bus sustenta todas las operaciones E/S (entrada/salida) necesarias para inicializar la lógica de control de transmisor y transferir las formas de onda de la señal de modulación, utilizándose también para el ajuste digital de las curvas de la señal de banda lateral y las fases de bandas laterales de RF. El procesador tiene acceso directo a parámetros del transmisor, tales como potencia de portadora, profundidad de modulación,

señales del BITE (equipo de pruebas incorporado), y algunas otras funciones de control, pero no así al bus independiente del GSM (generador de señal de modulación). Sólo a través de un interfaz se puede leer o escribir en las memorias del GSM, que contienen las curvas envolventes de modulación, los parámetros para controlar las fases de bandas laterales de RF, y la identidad en código morse de la estación. Las transferencias de los datos se realizan por procedimientos de intercambio con la UPCE (unidad de proceso central del equipo) como realizador activo.

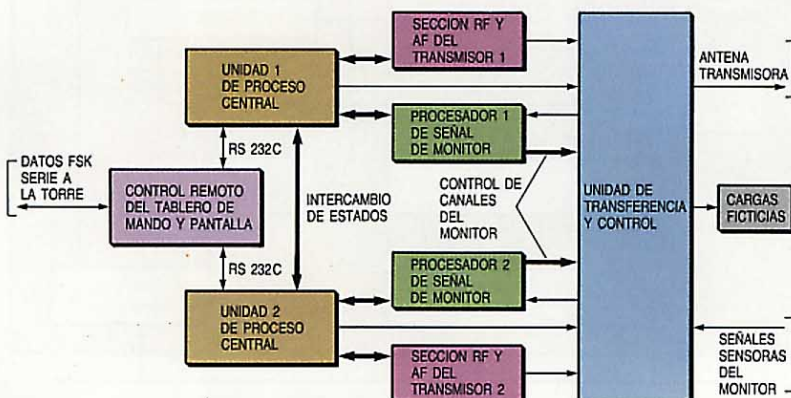
## Generador de señal de modulación

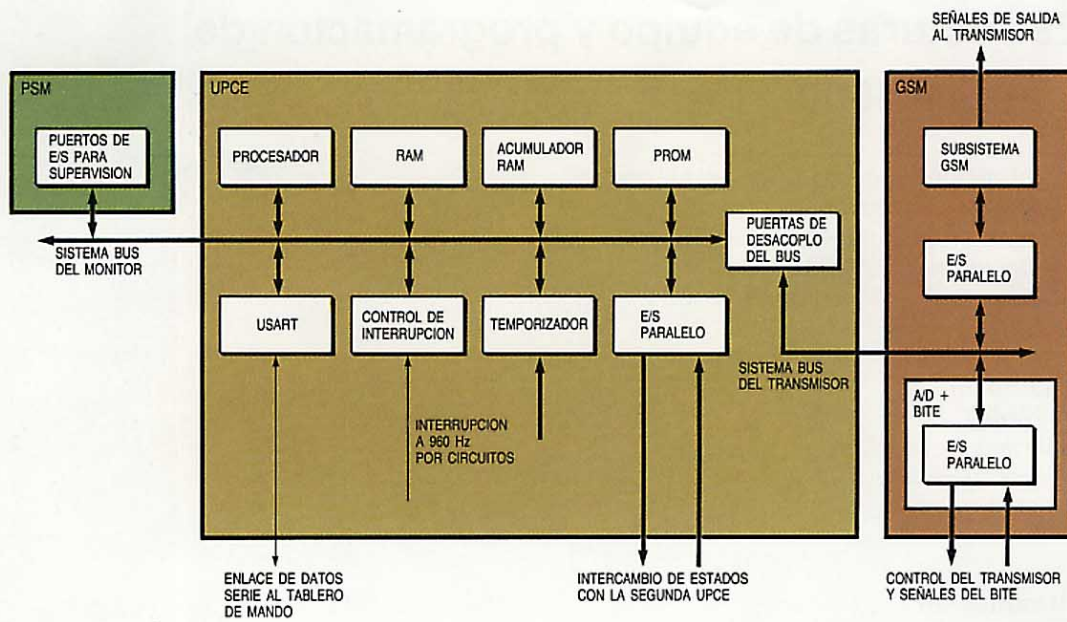
El GSM y su sistema de bus se comporta ante la UPCE como un subsistema E/S desacoplado del procesador central y trabajando por separado (Fig. 3). Las memorias de amplitud y fase se cargan desde la UPC cuando se activa el transmisor, o durante la supervisión. Normalmente el operador selecciona el modo de prueba, ajusta el equipo para funcionamiento correcto, y luego desconecta el modo de prueba, para que los monitores tomen el control.

En la memoria de acceso aleatorio del GSM se escriben valores definidos durante la inicialización del transmisor. La unidad de control del bus del GSM lee cíclicamente estos valores y los transfiere a los registros del convertidor D/A (digital/análogo). Así se generan, en el caso de una estación ILS, las cinco señales cuasiparalelas siguientes:

- $K_{90} \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot 90 \cdot t) + K_{150} \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot 150 \cdot t)$  para modulación de amplitud del transmisor de portadora de los sectores "en-rumbo" y "fuera-de-rumbo"
- $K_i \cdot [\text{sen}(2 \cdot \pi \cdot 90 \cdot t) - \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot 150 \cdot t)]$  para modulación de envolvente del transmisor de banda lateral "en-rumbo"

**Figura 1**  
**Diagrama de bloques de un equipo duplicado del Sistema 4000 de ayudas a la navegación**  
AF - audiofrecuencia  
FSK - modulación por desplazamiento de frecuencia.





**Figura 2**  
Diagrama de bloques simplificado del equipo de control y supervisión del Sistema 4000

- A/D - convertidor analógico-digital
- BITE - equipo de prueba incorporado
- PSM - procesador de señal del monitor
- UPCE - unidad de proceso central del equipo
- USART - transmisor-receptor síncrono-asíncrono universal
- GSM - generador de señal de modulación.

- tensión adecuada de control de fase de RF
- $K2 * [\text{sen}(2 * \pi * 90 * t) - \text{sen}(2 * \pi * 150 * t)]$  para modulación de envolvente del transmisor de banda lateral "fuera-de-rumbo"
- tensión adecuada de control de fase de RF.

La distorsión creada por la modulación en las señales de portadora generadas, sólo puede eliminarse mediante bucles de realimentación analógicos, debido a la modulación adicional con la voz y los tonos de identidad. No obstante, las envolventes de banda lateral y las fases de RF se pueden corregir por bucles controlados digitalmente. Sólo se exige este proceso adicional a la UPC durante los procedimientos de ajuste en el modo de prueba; existen módulos de programas que facilitan el ajuste de los niveles de banda lateral y las fases de RF. En supervisión, sin embargo, lo principal es evaluar las señales de los sensores del monitor. En este modo, el procesador utiliza para atender al tablero de mando periodos que no tendrían otro uso, ajustando además las curvas envolventes de banda lateral y las tensiones de fase de RF y recogiendo datos del BITE. Para lograr esto, se manipulan a través del interfaz los datos en la memoria del GSM, o bien inicia éste las acciones correspondientes.

La lógica de control del bus del GSM proporciona temporización para un máximo de ocho señales analógicas cuasiparalelas, cuya velocidad de acceso al bus es de 61,44 kHz; asimismo, lee y transfiere el código morse de la estación, y controla la transferencia de datos hacia y desde la UPCE. La gran rapidez lógica que exigen estas funciones no se puede alcanzar con

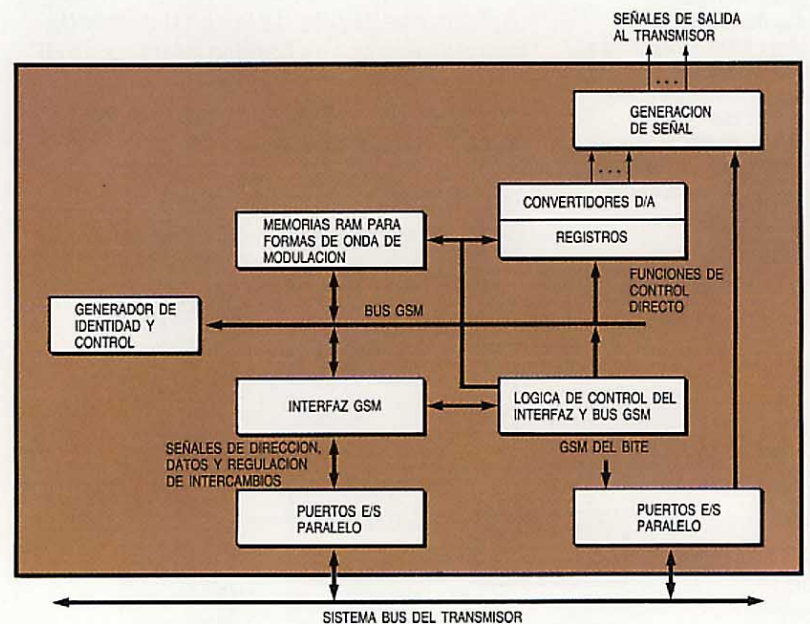
microprocesadores estándar. Sin embargo, las funciones de control son relativamente simples, y el control del GSM puede formarse con componentes lógicos discretos.

El tablero de mando incorpora su propio procesador, ante todo para atender al interfaz del sistema con su entorno.

### Circuitos componentes de la supervisión

El procesador controla directamente los componentes de supervisión a través del bus del monitor. Se utilizan puertos E/S en paralelo para controlar los multiplexores de RF que seleccionan las señales de los sensores del monitor. Estas señales demoduladas se convierten a forma digital, siendo

**Figura 3**  
Diagrama de bloques del subsistema GSM. Las operaciones del bus GSM son independientes de las funciones de la UPCE  
RAM - memoria de acceso aleatorio.

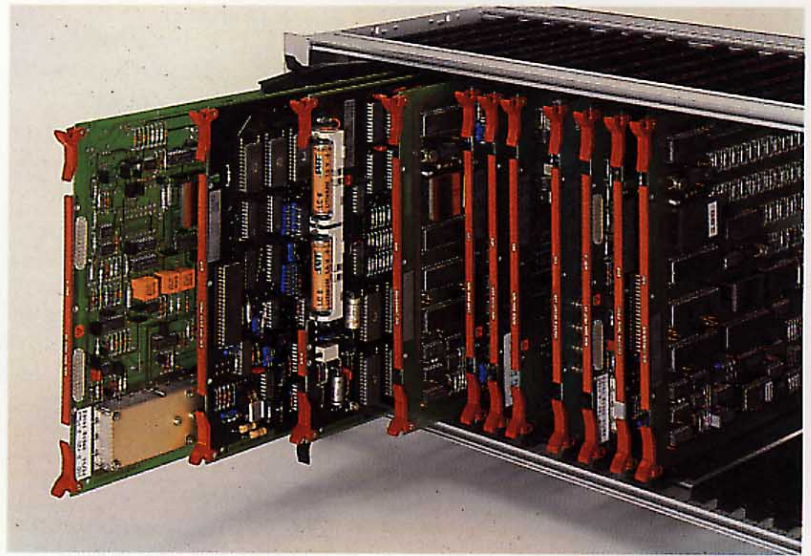


leídas y analizadas por el procesador. Las UPCE se comunican los resultados obtenidos que atañen al estado del equipo y a las pruebas autoejecutadas, a través del bus de intercambio de estados.

Tal intercambio de estados juega un papel importante en comprobar la conmutación a la unidad de reserva o la desconexión en caso de mal funcionamiento. Además, garantiza la detección de un monitor defectuoso y que se le excluya de las decisiones posteriores. La autosupervisión asegura que una UPCE reconozca un fallo en su propio sistema monitor, o sea calificada defectuosa por la otra UPCE. Si ambos monitores tuvieran fallo, la lógica simple de los circuitos desconectaría el equipo.

En la figura 4 se expone la configuración adoptada. Si un monitor se ha puesto en estado de *fallo de monitor*, el otro decide por sí solo las acciones a realizar. Esta situación no conduce necesariamente a un corte del sistema, ya que la decisión depende todavía de la calidad de las señales sensoras del monitor evaluadas por el otro monitor. Sin embargo, el equipo está fuera de categoría, y se activa el indicador de aviso del campo de estados principal del tablero de mando. Suponiendo que el transmisor del monitor defectuoso se encuentre en el modo de reserva, el transmisor principal funciona aún correctamente. Si el monitor funcional detecta un fallo en la señal radiada, desconectará de la antena su propio transmisor y conmutará al otro transmisor, que tiene el monitor desactivado. Si el fallo está en el monitor y no hay otras anomalías funcionales, este transmisor generará salidas de señal correctas, con lo que el sistema podrá seguir funcionando en un nivel no categorizado. Si el monitor defectuoso está asociado al transmisor principal y no hay fallo en el equipo restante, este procesador todavía ajustará correctamente las envolventes de la señal de banda lateral y las fases de RF. Incluso si el equipo del procesador falla, provocando una *parada*, el GSM continuará en servicio, aunque en tal caso los efectos de la temperatura sobre la sección de RF correspondiente pueden llegar a alterar los niveles de banda lateral y las fases de RF. No obstante, éste es un proceso lento, y puede tardarse horas o días en alcanzar los límites de alarma establecidos. Cuando esto sucede, el monitor funcional conmuta al transmisor de reserva, que todavía funciona correctamente, y el sistema sigue operativo.

El objetivo fundamental es mantener el funcionamiento del sistema el mayor tiempo posible, incluso en un nivel no categorizado, de modo que sólo los fallos fatales suspendan el servicio del sistema. El diagrama

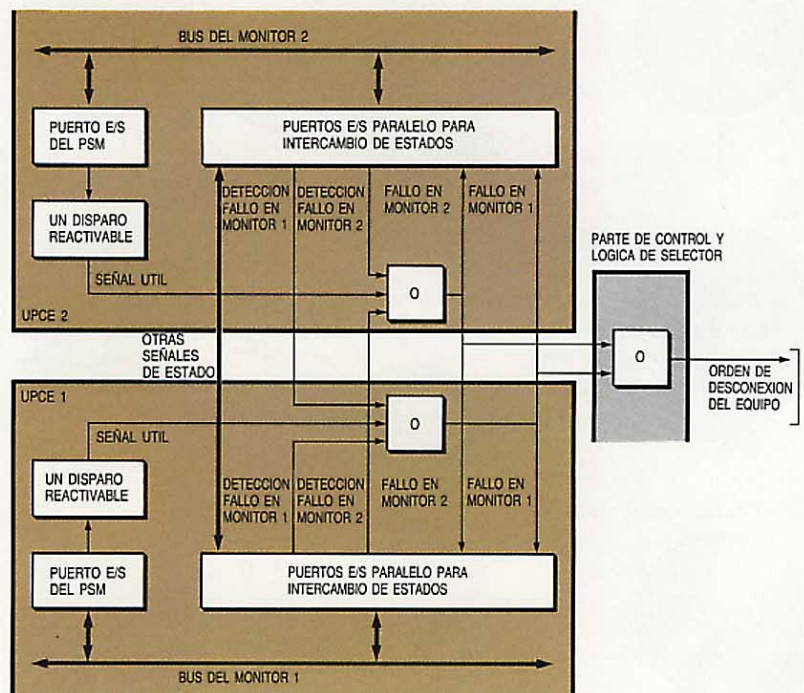


**Armazón de audiofrecuencia mostrando la construcción típica del Sistema 4000.**

de transición de estados de la figura 5 indica las funciones básicas de la sección de control y supervisión en el Sistema 4000.

En el modo de supervisión el sistema no acepta entradas que cambien los datos del monitor o transmisor; en tal estado, únicamente los monitores pueden tomar decisiones que conciernen al sistema. El operador tiene que pasar de nuevo al modo de prueba para que se le admita alterar los datos de transmisor o monitor. Se sigue enviando al tablero de mando la información sobre el estado del sistema, y a petición del operador se pueden visualizar los parámetros del sistema y los resultados de las medidas.

**Figura 4**  
**Lógica de detección de fallos del monitor.**





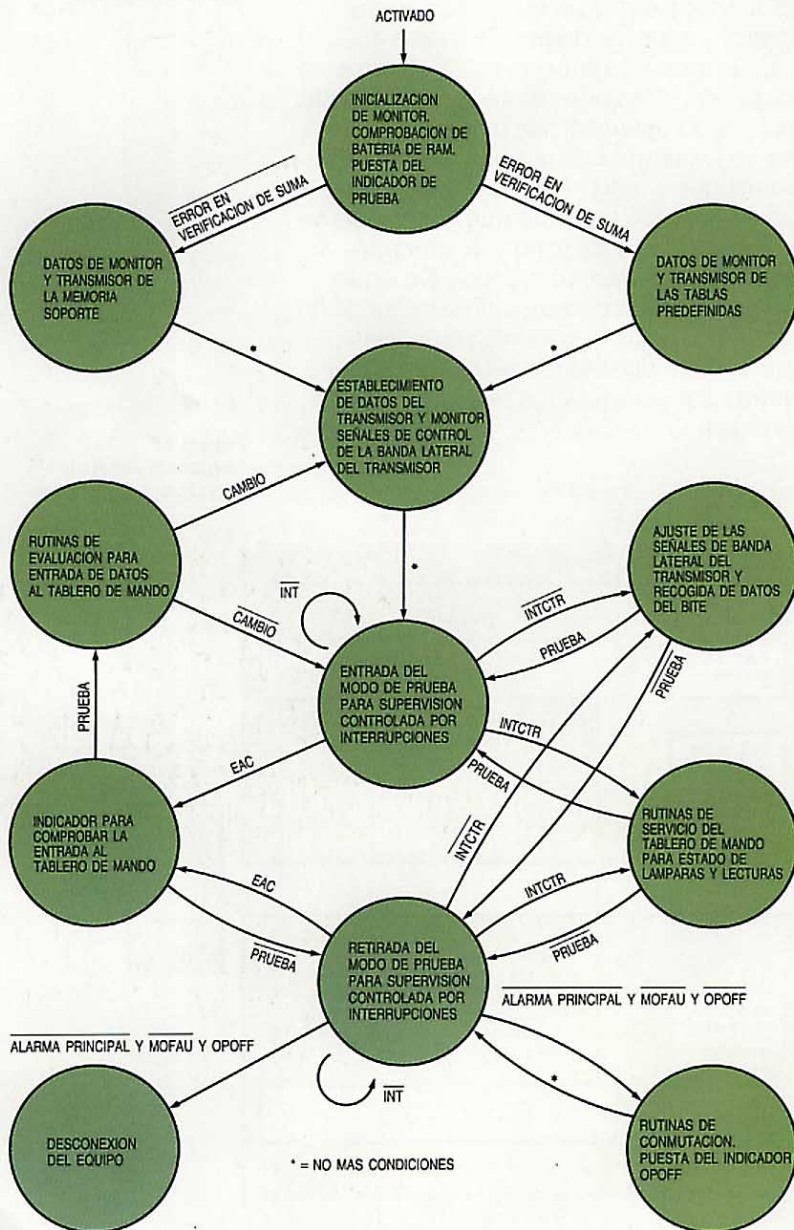
**Estructura de programación**

Se describe aquí la estructura de programación del equipo ILS del Sistema 4000; las estructuras de los otros equipos (VOR, DVOR e ILS de senda de descenso) son similares. Consta de dos partes principales: arranque e inicialización, y el programa principal controlado por señales de interrupción.

El programa de arranque libera el área de la memoria operativa (memoria de acceso aleatorio, RAM) e inicializa el controlador de interrupciones, temporizadores, interfaz serie con el tablero de mando, y varios interfaces paralelo que el procesador utiliza para controlar y supervisar el transmisor. A continuación se carga el área de la memoria operativa con los datos necesarios para la correcta ejecución del programa principal y para comparación de los valores medidos y

**Figura 5**  
Diagrama de transición de estados de la unidad de control del monitor y transmisor del Sistema 4000

- EAC - comprobación de final de alarma
- INTCTR - condición para servicio de rutinas del tablero de mando
- MOFAU - señal de fallo del monitor
- OPOFF - señal de fuera de operación
- \* - transición sin ninguna condición.



calculados. Tales datos se extraen, bien de una batería de RAM CMOS, o bien del área de PROM (memoria de sólo lectura programable). Se toman de la RAM CMOS, que almacena los más recientes valores específicos, únicamente si al comienzo contiene tres octetos de prueba reconocidos y si la suma de todos los octetos utilizados iguala la suma acumulada al final de la batería RAM. De no ser así, se utilizan los valores estándar de la PROM, es decir, los recomendados por la OACI, Anexo 10.

**Programa principal**

Las funciones más importantes del programa principal son:

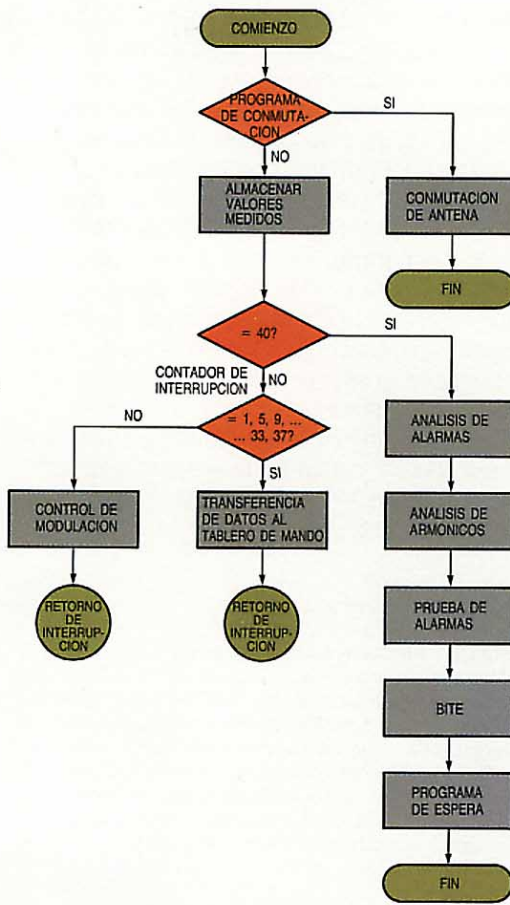
- comprobación y supervisión del equipo
- control de modulación (amplitud y fase de RF)
- funcionamiento de tablero de mando y visualizador.

El equipo se comprueba y supervisa mediante la recepción de los valores medidos en cada interrupción sobre la señal monitora de un canal. Esta señal se explora cada 1,04 ms (960 Hz), se convierte a digital, y se envía a un interfaz paralelo. Cada canal se activa durante 41,6 ms (40 interrupciones); los ocho primeros valores medidos no se utilizan, quedando para el análisis 32 valores. Existen canales de primer orden y canales de segundo orden o sencillos, cuya diferencia principal reside en el tiempo de reacción ante las alarmas. Con canales de primer orden, dos alarmas seguidas provocan la reacción, mientras que con canales sencillos se necesitan 20 alarmas consecutivas. Los de primer orden se seleccionan seis veces por segundo, y los sencillos sólo una vez por segundo. Así, pues, los canales de primer orden reaccionan después de 0,5 s como máximo, mientras que los sencillos tienen un tiempo de reacción de 20 s, siendo generalmente la reacción una conmutación o la desconexión. Los mensajes de alarma se transmiten de un equipo al otro; los mensajes con parámetros de alarma (indicando qué valores de qué canal son incorrectos) aparecen en el panel visualizador del tablero de mando.

**Estructura**

El programa principal, que se controla mediante una señal de interrupción de 960 Hz, consta de ocho módulos, todos escritos en PL/M86. Algunos módulos de programas incorporan a su vez submódulos escritos en PL/M86 y ensamblador. Los submódulos escritos en ensamblador para

**Figura 6**  
Diagrama de flujo del programa principal controlado por señal de interrupción.



minimizar las necesidades de memoria y procesador, se pueden usar sin modificación en todos los equipos del Sistema 4000 (localizador ILS, ILS de senda de descenso, DVOR, VOR). El diagrama de flujos de la figura 6 muestra la secuencia del programa y la asignación de módulos del mismo.

**Módulos del programa**

A continuación se describen las funciones de los módulos del programa:

*Control de señales de modulación.* La amplitud y fase de la señal de modulación se comparan punto por punto con los valores nominales y se ajustan como sea necesario.

*Funcionamiento de tablero de mando y pantalla.* El procesador del tablero tiene tres funciones principales (visto desde el procesador del monitor):

- escribe el estado del equipo para visualizarlo en el tablero de mando
- escribe los valores medidos o límites especificados
- lee y almacena los valores o límites especificados.

La última función permite cambiar los límites de los valores computados, tales como nivel de RF, SDM o DDM (suma o diferencia

de profundidad de modulación). Estos valores se almacenan en la RAM CMOS, de forma que puedan ser utilizados cuando sea necesario arrancar de nuevo y la RAM CMOS esté corregida.

*Conmutación de antena.* Durante la conmutación de antena, un equipo actúa como maestro (no necesariamente el que es "principal"), y el otro como esclavo. Primero, el maestro informa al esclavo de que la conmutación va a comenzar. El esclavo interrumpe su programa normal, y espera mientras el maestro controla la conmutación. Cuando ésta termina, ambos programas maestro y esclavo continúan en su estado normal.

Los equipos que funcionan en modo de reserva pasiva (un transmisor funcionando, el otro desconectado) requieren procesos ulteriores. Hay que dar alimentación al transmisor pasivo y tenerle en reserva activa un breve periodo. Luego debe desconectarse el transmisor que antes operaba y asumir el control de la modulación el nuevo transmisor activo.

*Análisis de alarmas.* Se analizan los resultados procedentes de la prueba del módulo de alarmas para los canales de primer orden y sencillos, comparándolos con los del otro equipo. Se pueden presentar los siguientes casos:

- No hay acciones posteriores si no aparecen alarmas.
- Si hay una alarma continua, confirmada por el otro equipo, comienza la conmutación de antena. Sin embargo, si ha habido anteriormente una conmutación, dentro de un periodo especificado, el equipo se pone fuera de servicio. El mensaje de alarma probablemente indica un error del transmisor.
- Si hay una alarma continua que no es confirmada por el otro equipo, probablemente hay un fallo en el monitor. Ese fallo se transmite al otro equipo por medio de un bitio en uno de los interfaces paralelo. El equipo defectuoso no inicia más acciones, pero el otro equipo sabe que debe actuar por sí mismo y que una alarma en su propio equipo no puede ser confirmada por la otra unidad.

*Análisis de armónicos.* Los 32 valores medidos  $X(n)$  de un canal se emplean para calcular valores de  $A_m$ , utilizando la fórmula siguiente:

$$A_m = \sum_{n=0}^{31} X(n) e^{-j \frac{2\pi}{32} nm}$$

donde  $m = 0, 1, \dots, 5$

$$e^{-i\varphi} = \cos \varphi - i \sin \varphi.$$

Para ahorrar tiempo de ordenador, se utilizan estas equivalencias:

$$\sin \varphi = \cos (90 - \varphi)$$

$$\cos (180 - \varphi) = -\cos \varphi$$

$$\cos (-\varphi) = \cos \varphi.$$

Así, de más de 100 multiplicadores, quedan solamente siete:  $\cos 11,25^\circ$ ;  $\cos 22,5^\circ$ ;  $\cos 33,75^\circ$ ;  $\cos 45^\circ$ ;  $\cos 56,25^\circ$ ;  $\cos 67,5^\circ$ ; y  $\cos 78,75^\circ$ .

Estos siete multiplicadores son constantes conocidas por la PROM y no necesitan calcularse.  $A_0$  es la suma de todos los valores;  $A_1$  a  $A_5$  se calculan, primero la parte real, y después la parte imaginaria:

$$|A_m| = \sqrt{[\operatorname{Re}^2(A_m) + \operatorname{Im}^2(A_m)]^{1/2}}.$$

**Prueba de alarmas.** Los valores del equipo se calculan a partir del análisis de armónicos (p. ej., nivel de RF, suma y diferencia de la profundidad de modulación) y se comparan con los límites predefinidos. El resultado — alarma o no alarma — se almacena y puede visualizarse en el tablero de mando; asimismo se lleva al módulo de análisis de alarmas.

**Equipo de prueba incorporado (BITE).** Los parámetros del equipo, tales como temperatura, tensión, y tiempo de utilización de la batería durante el fallo de alimentación, se prueban y comparan con los valores predefinidos. Todo resultado fuera de límites se almacena y visualiza en el tablero mediante **BITE WARNING**.

**Programa de espera.** Se aceptan 40 interrupciones (= 41,6 ms) para un canal. Mientras se almacenan estos valores, se analizan los valores del canal precedente en los módulos de análisis de armónicos, prueba de alarmas y análisis de alarmas. Después funciona el módulo BITE. El programa de espera, que se ejecuta durante el resto del tiempo, se detiene mediante la señal de interrupción de 960 Hz para recibir nuevos valores medidos, y posteriormente continúa, bien con el control de modulación, o bien con el funcionamiento del módulo del tablero de mando. Ambos módulos terminan con un retorno desde la situación de interrupción, de forma que el programa interrumpido, en este caso el programa de espera, pueda proseguir.

**Friedrich Limbach** nació en Winterborn, Pfalz, en 1952. Estudió ingeniería eléctrica en la Universidad Técnica de Kaiserslautern desde 1973 a 1978. En 1978 ingresó en SEL, en Stuttgart, dedicándose al diseño y desarrollo de unidades de control digital para sistemas de navegación para aterrizaje. Su trabajo se centra principalmente en: diseño estructurado de unidades de control digital complejas, aplicaciones de microprocesadores, y desarrollo de programación muy elaborada.

**Klaus Pählig** nació en Freital, Alemania, en 1939. Obtuvo el grado de Diplommathematiker en la Universidad Técnica de Stuttgart, en 1965. El mismo año ingresó en SEL, Stuttgart, donde trabajó en desarrollo de programación y codificación para varias aplicaciones, incluyendo sistemas de radar, ayudas a la navegación y aterrizaje, y sistemas militares. Desde 1980 es jefe del laboratorio para desarrollo de programación.

## Radiofaro de VHF

Los sistemas de navegación existentes, a base de radiobalizas no direccionales, son difíciles de usar en embarcaciones pequeñas, sobre todo con mar movida. En contraste, la información azimutal del radiofaro no está afectada por el movimiento del barco. La ventaja primordial es que puede conocerse la orientación exacta usando un receptor de comunicaciones existente.

### R. Johannessen

Standard Telecommunication Laboratories Limited, Harlow, Inglaterra

### Introducción

El radiofaro de VHF está diseñado para embarcaciones pequeñas, por lo que es importante tomar marcaciones con facilidad en mares movidos. Al no poder tales barcos suavizar el movimiento de las olas, sufren fuertes sacudidas con la mar gruesa. En estas condiciones, los actuales sistemas NDB (radiobaliza no direccional) son muy difíciles de usar si el instrumental de a bordo es un receptor portátil, porque habrá que mover éste continuamente de modo que la antena siempre apunte al transmisor.

El radiofaro se basa en la filosofía de que la navegación es más sencilla si no hay que estabilizar la antena del receptor. El control direccional se incluye, pues, en el transmisor fijo, permitiendo al receptor emplear una simple antena omnidireccional del tipo usado para comunicaciones. Así el

balanceo, cabeceo y guiñada que continuamente sufre una embarcación pequeña no afectan a la navegación.

En todo sistema de radionavegación juega un papel básico la relación entre la longitud de la antena (expresada en longitudes de onda) y la protección contra errores obtenida en un entorno con múltiples trayectos azimutales: dentro de ciertos límites, a mayor antena, habrá menor error. Han de considerarse aquí dos factores. Primero, los sistemas NDB trabajan en torno a los 300 kHz, con longitudes de onda próximas al kilómetro, por lo que sería impracticable usar transmisores con antenas de ese orden de longitud. El radiofaro, por el contrario, opera en longitud de onda de 2 m, y por tanto una antena de 4,5 m supera las dos longitudes de onda, con lo que tendrá un gran potencial de



Antena de radiofaro montada en la torre del faro de North Foreland.

reducción de errores. El segundo factor es que resulta más sencillo ubicar, montar y mantener una estructura grande de antena en tierra que a bordo de un barco sujeto a violentos cabeceos, balanceos y guiñadas.

### Funcionamiento

El radiofaro trabaja en la banda marítima internacional de VHF, a 160 MHz aproximadamente. Se oye un tono cuando los receptores se sintonizan en el canal correcto. El transmisor está dispuesto de modo que, dentro del sector de cobertura, se oiga el tono en todas las direcciones que parten del

nulo pase por el receptor. Al aproximarse el nulo el tono decrece gradualmente en intensidad, y vuelve a crecer cuando ya ha pasado.

La antena transmisora es fija y el radio nulo se rota electrónicamente, eliminándose todas las partes móviles.

### Formato de señal de cada radiofaro

Las transmisiones comienzan con las horas y con cada minuto posterior. Cada transmisión dura 58 s y va seguida por 2 s de pausa antes de comenzar la siguiente. Los 58 s constan de tres partes:

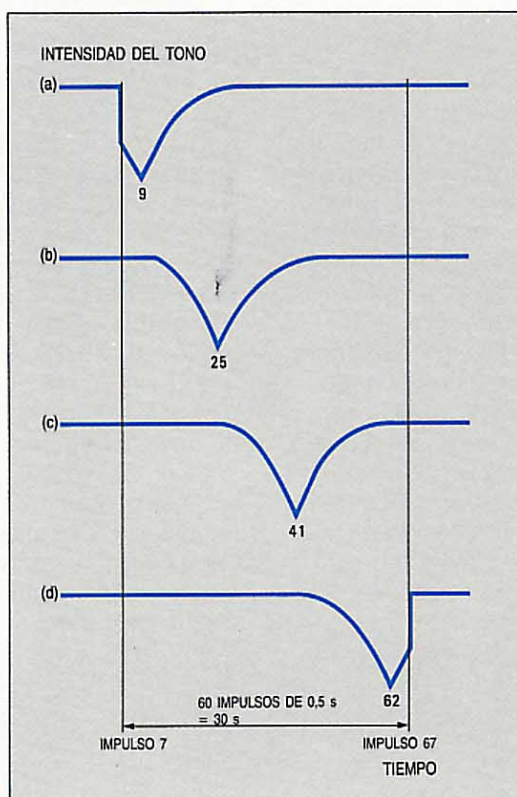
- código morse que identifica al radiofaro transmisor
- señal de navegación, que permite al navegante determinar su marcación con respecto al transmisor
- código morse que repite la identidad del radiofaro transmisor.

Estas partes van separadas por pausas para facilitar el reconocimiento de las señales. Entre la primera y segunda parte, y después de la tercera, se emiten datos digitales utilizables por instrumentos de medida.

La señal de navegación comprende 70 impulsos de 0,4 s de tono y 0,1 s de silencio. De ellos, los impulsos 7 a 67 inclusive se emplean para navegación, y durante los mismos el radio nulo barre un sector azimutal de 120°, que es la cobertura publicada del radiofaro. Como se ve en un mapa, el radio gira en el sentido de las agujas del reloj desde la marcación correspondiente al impulso 7 hasta la correspondiente al 67. Los impulsos 1, 2, 3 y 4 ayudan al navegante a coger el ritmo de la cuenta, mientras que el impulso 70 marca el final de la secuencia. La figura 1 muestra cómo varía la intensidad de tono para diferentes marcaciones respecto al transmisor.

Cuanto más va penetrando el navegante en el sector de 120°, mayor es el número de impulsos recibido antes de pasar por el radio nulo. Si oye el nulo durante los impulsos 3, 4, 5, 6, 68 ó 69, de ello deducirá que está fuera del sector cubierto.

**Figura 1**  
Variación del nivel del tono para diferentes marcaciones  
(a) marcación 4° dentro del sector de cobertura  
(b) marcación 36° dentro del sector de cobertura  
(c) marcación 68° dentro del sector de cobertura  
(d) marcación 110° dentro del sector de cobertura.

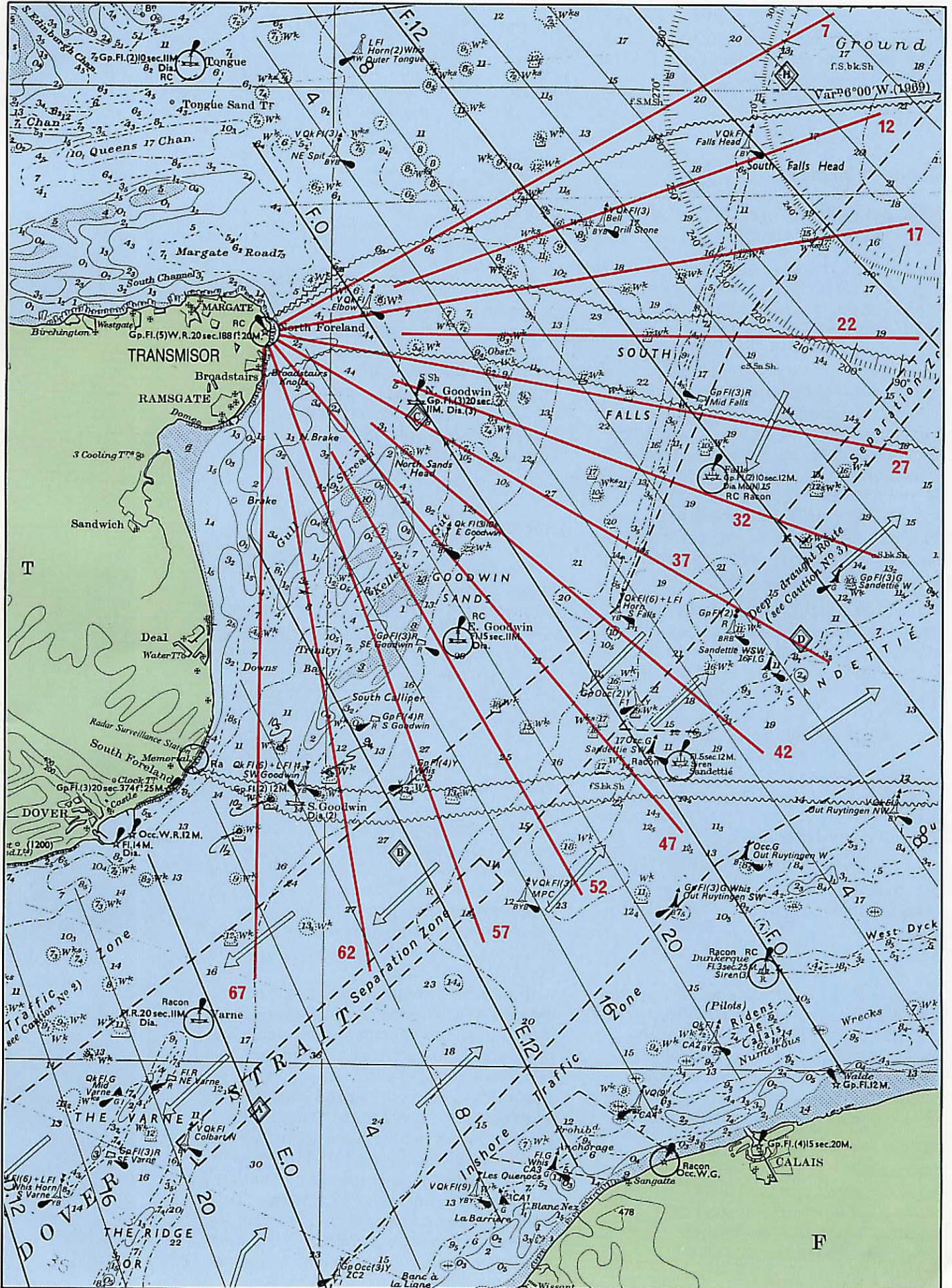


transmisor excepto en una, en la que el nivel de tono baja notablemente. Este *radio nulo* es rotado lentamente por el transmisor, a razón de 4° por segundo. Conociendo esta velocidad y el instante de referencia en que el radio pasa por una *marcación de referencia*, publicada para cada radiofaro, se obtiene la marcación (azimut) del receptor a partir del tiempo transcurrido desde el instante de referencia hasta que el radio nulo pasa por la marcación en que se encuentra el receptor. Para simplificar esto aún más, la emisión se fragmenta en pulsaciones de 0,5 s, de forma que la marcación se obtenga contando impulsos desde el instante de referencia hasta que el radio

### Reparto del tiempo entre varios radiofaros

Para conservar el espectro de frecuencia, es posible disponer que varios radiofaros compartan en el tiempo una misma frecuencia de canal. Dos radiofaros pueden transmitir alternativamente durante periodos de 58 s, separados por 2 s en que

**Figura 2** Radios de navegación para el radiofaro de North Foreland en la costa sur de Inglaterra



ninguno transmite, o puede haber tres o seis radiofaros que transmitan por turno. En todos los casos el navegante puede determinar qué radiofaro transmite, escuchando la identificación morse antes y después de la parte de navegación de la señal.

**Modos de empleo**

El navegante puede utilizar el radiofaro de cuatro maneras diferentes:

*Radios trazados sobre el mapa.* Si se utiliza regularmente un radiofaro, puede merecer la pena dibujar sobre el mapa el sector de información de 120°. Los extremos del sector se marcan como impulsos 7 y 67, y se traza un número conveniente de radios intermedios equiespaciados. En la figura 2 se dibujan sobre el mapa los radios para cada quinto impulso, separados de 10 en 10°, para el transmisor de North Foreland, en la forma acostumbrada desde mediados de 1983. Para usar el sistema, el navegante escucha las emisiones, espera a la identidad morse correcta, cuenta los impulsos hasta oír el radio nulo, y lee la marcación correspondiente en el mapa.

*Plantilla de plástico.* Una alternativa es dibujar un arco de 120° sobre una lámina de plástico transparente y dividirlo en sectores apropiados, por ejemplo de 10° de anchura, cada uno de los cuales se marca con un número de impulso, comenzando con el 7 por el lado izquierdo. Esta plantilla se coloca sobre el mapa, con el centro del arco en la posición del transmisor y el radio correspondiente al impulso 7 sobre la dirección *R* dada en la tabla 1. A partir de ahí, se sigue el procedimiento anterior.

*Fórmula por recuento.* Si se pierde la plantilla, puede obtenerse la marcación aplicando el impulso de mínimo tono a la sencilla fórmula:

$$B = R + 2(N - 7)$$

donde *B* es la marcación angular verdadera desde el transmisor al barco, *N* es el número del impulso del radio nulo y *R* es la marcación de referencia. Esta fórmula y las marcaciones de referencia publicadas pueden anotarse en un margen del mapa o en una etiqueta pegada al receptor VHF.

*Medida del tiempo.* En vez de contar, puede utilizarse un cronómetro que se arranque en el impulso 7 y se pare en el impulso de mínima señal. Si han transcurrido *T* segundos, la marcación desde el transmisor al barco está dada por:

$$B = R + 4T:$$

**Tabla 1 — Características de los transmisores de los radiofaros a partir de 1983**

Transmisor	Posición	<i>R</i>	Alcance en millas náuticas	Canal	Identificación morse
North Foreland	51° 22' 28" N 1° 26' 48" E	060°	20	88	ND
Calais	50° 57' 44" N 1° 51' 18" E	270°	20	88	CL
Anvil Point	50° 35' 30" N 1° 57' 33" O	067°	14	88	AL
High Down	50° 39' 42" N 1° 34' 36" O	157°	30	88	HD
Holy Island (Pillar Rock Point)	55° 31' 03" N 5° 03' 34" O	341°	17	88	PK

Este método es particularmente útil cuando se tomán marcaciones que corresponden a un alto número de impulsos.

Para facilitar la labor de contar hasta 70, sobre todo con fatiga o mareo, cada décimo impulso se diferencia de los demás. Así, los impulsos 10°, 20°, etc., hasta el 60° inclusive, se emiten a una frecuencia audible ligeramente inferior.

**Receptores radio**

El sistema está diseñado para utilizarse con el transceptor marítimo normal existente en la mayoría de los barcos. No importa si el aparato es sintetizado en frecuencia o controlado a cristal, con tal de que esté preparado para la frecuencia empleada. Es posible, pues, navegar sin más equipos a bordo que el receptor de comunicaciones.

**Transmisor**

El transmisor consiste en un bastidor de equipo y un sistema de antena con cables de interconexión. El bastidor contiene todas las unidades RF y el sistema de distribución asociado, la lógica de control, el supervisor integral y las fuentes de alimentación. Seis enchufes posteriores conectan el bastidor del equipo a la antena.

El sistema de antena comprende seis dipolos verticalmente polarizados, puestos cada uno en un reflector angular para minimizar acoplamientos mutuos y proporcionar una buena relación entre lóbulos frontal y posterior. Los reflectores son varillas de aluminio, como casi todo el resto de la antena, para combinar la baja oposición al viento con el poco peso. La tabla 2 muestra los principales parámetros del transmisor.

Como el sistema emplea barrido electrónico en vez de mecánico, puede sujetarse a una pared de hormigón, a una torre metálica o a una barandilla; incluso podría montarse entre postes verticales. Así,

pues, el sistema es en general fácilmente instalable en una torre de faro, caseta guardacostas u otro edificio.

En el faro de North Foreland, en Kent, al sur de Inglaterra, la antena está fijada a una barandilla justo bajo el plano focal. Como ejemplo distinto, en Anvil Point, también en la costa sur de Inglaterra, la antena está sujeta al tejado de una caseta de sirenas para niebla.

Los cables de conexión pueden ser simples cables coaxiales de  $50 \Omega$  de impedancia, con buena estabilidad de fase y pérdidas de inserción máximas de 3 dB.

Debe subrayarse que el equipo está diseñado para funcionar automáticamente, y por tanto puede emplearse en sitios desatendidos.

### Alcance y sector de información

El alcance del sistema depende de varios factores, entre ellos las alturas de las antenas emisora y receptora, las pérdidas de los alimentadores en ambos extremos, el tipo de antena receptora y su montaje, y la clase de receptor.

En un caso típico, el alcance operativo es de unas 20 millas náuticas (37 km) para un receptor con antena dipolo montada en lo alto de un mástil, a 28 pies (8,5 m) sobre la superficie del mar, y un transmisor elevado a 57 m. Al dividir esta última altura por 2 se reduce el alcance en un 40%.

El sector de información es de  $120^\circ$ . Si se necesitan  $240^\circ$  pueden usarse dos transmisores, que cada uno cubra su propio sector de  $120^\circ$ .

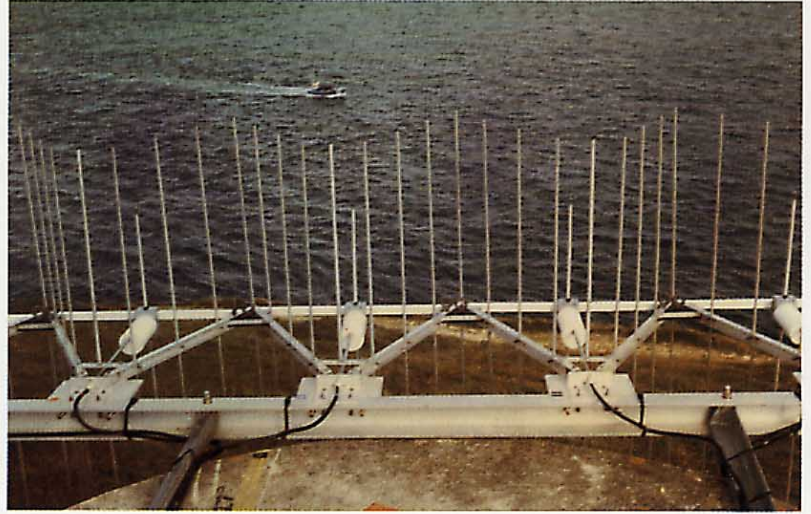
### Prueba del sistema

Durante 1981 se realizaron más de 1000 medidas de la precisión del sistema; éstas

indicaron una desviación típica de unos  $2^\circ$ . Las mejoras introducidas durante 1983 redujeron tal desviación a sólo  $1,6^\circ$ .

De 1981 a 1983 se instalaron supervisores distantes en tres lugares fijos a fin de apreciar la estabilidad de transmisión a largo plazo. Las 2406 medidas tomadas entre el 4 de diciembre de 1981 y el 10 de septiembre de 1983 mostraron una desviación típica mejor que  $0,6^\circ$ .

**Antena de radiofaro montada en la caseta de señales para niebla de Anvil Point, Inglaterra.**



Durante extensas pruebas en el mar se hicieron evaluaciones para determinar la facilidad de uso del sistema. Se pidió a cierto número de observadores a bordo del barco de prueba que hallaran simultánea e independientemente la marcación del barco respecto a una estación costera, por recuento de los impulsos hasta que pasase el radio nulo. Para cada posición del barco se estudiaba la dispersión de las observaciones, que cuanto menor fuera supondría un uso más fácil del sistema. Se tomaron 3952 marcaciones durante las pruebas, y en el 99,2% de los casos los resultados expresados no diferían de la marcación media en más de un impulso, que equivale a una dispersión de sólo  $\pm 2^\circ$ .

**Tabla 2 — Resumen de las especificaciones del transmisor**

Frecuencia de salida	Cualquier canal marítimo en la banda 160,625 a 162,125 MHz
Estabilidad en frecuencia:	Mejor que 10 partes por millón
Ganancia de la antena:	+ 7 dBI* nominal
Potencia a la salida del bastidor:	2 W $\pm$ 3 dB
Potencia de entrada:	Ambas (a) y (b) (a) 110 a 120 V ó 220 a 240 V CA 45 a 400 Hz a 280 VA (b) 22 a 30 V CC, menos de 1 A

\* dBI - decibelios con relación a una fuente isotropa.

### Medidas adoptadas para la seguridad del navegante

Es importante para el navegante confiar en la integridad del sistema. Para asegurarlo, un supervisor incorporado en cada transmisor comprueba continua y automáticamente que el nivel de portadora y la energía en bandas laterales superan unos valores predeterminados, y que la alineación electrónica que controla la información direccional está dentro de límites prefijados.



Si surge un fallo (permanente o transitorio) el sistema alerta inmediatamente al navegante convirtiendo el tono en aullido (por batido de dos frecuencias distintas). En tal caso, el navegante no debe usar la información de marcación.

Al término de la secuencia transmitida el sistema hace un nuevo intento, y si el problema persiste el transmisor se desactiva hasta que sea reparado.

Periódicamente, los técnicos de mantenimiento examinan el sistema. Si por cualquier motivo necesitan provocar la transmisión de información no fiable, cambian antes la identidad morse a T.E.S.T. Así, pues, el navegante debe comprobar siempre si la señal morse recibida es la asignada a la estación.

### **Historia del desarrollo**

El radiofaro se desarrolló por Standard Telecommunication Laboratories, juntamente con STC International Marine y la Corporation of Trinity House en representación de la General Lighthouse Authority.

El primer sistema se puso a disposición de los marinos en North Foreland, Kent, Inglaterra, a partir de marzo de 1980.

En 1981 se añadieron cuatro transmisores más, de modo que a fines de ese año se

estaban evaluando sistemas en Inglaterra, Escocia y Francia. Durante 1983 sus identidades morse y formatos de señal se ajustaron a lo establecido en la tabla 1.

Se dispone ya de planes para la producción del sistema en STC International Marine.

### **Conclusiones**

El radiofaro permite a pequeñas embarcaciones recibir marcaciones azimutales exactas usando el receptor de comunicaciones existente. Como la información de marcación está bajo el control del transmisor, no se altera por los movimientos de la embarcación, incluso en mar gruesa. Ni el rumbo del barco ni la desviación magnética son necesarios para determinar la posición del barco.

**R. Johannessen** nació en 1937. En 1962 obtuvo el BSc en la Universidad de St. Andrews en Escocia. Trabajó durante tres años en STC, Londres, sobre sistemas de radionavegación para aviones. A continuación pasó cierto tiempo en International Computers, antes de ingresar en STL, Harlow, donde ha trabajado desde entonces. Fue responsable del concepto y desarrollo del radiofaro VHF, y su trabajo en este área mereció un PhD de la Universidad de Londres. El Dr. Johannessen es miembro de la Institution of Electrical Engineers.

# Nueva familia de equipos TACAN y DME

Las técnicas digitales y la tecnología del estado sólido en RF han promovido una nueva familia de ayudas a la navegación TACAN y DME, con prestaciones mejoradas. Se ha elevado la fiabilidad, simplificado el mantenimiento, y reducido los costes del periodo de vida útil.

**G. Bertocchi**

Industrie FACE Standard, Milán, Italia

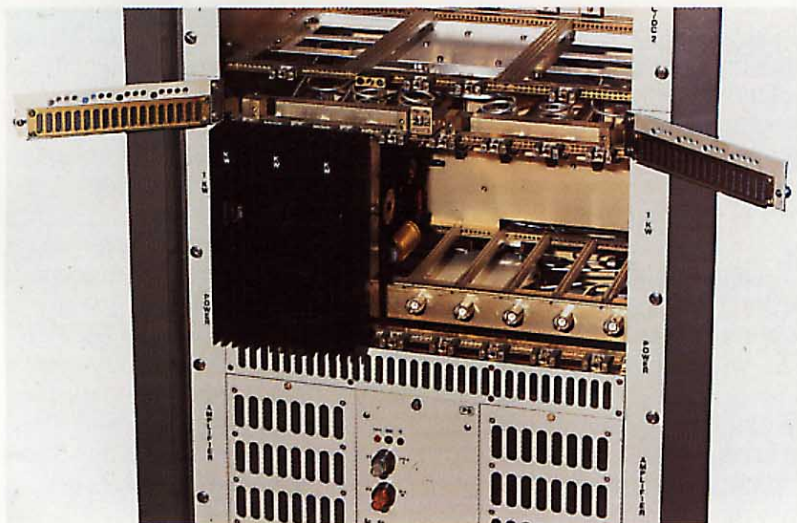
## Introducción

Industrie FACE Standard ha desarrollado una nueva familia de balizas de tierra TACAN y DME (equipo de medida a distancia) para conseguir prestaciones avanzadas y reducir el coste total del ciclo de vida útil. Esto último se ha logrado mediante circuitos digitales de estado sólido que aumentan la fiabilidad y reducen el mantenimiento, simplificado también por la total modularidad del equipo.

El primer equipo de esta familia fue el TACAN FTA-10 de 3 kW, que incorpora un amplificador final de válvulas. Fue seguido por el DME FSD-15 de 1 kW, el DME FSD-10 de 100 W, el TACAN FTA-10/S de 1 kW, y el TACAN FTA-13/S de 3 kW, que utilizan todos transmisores enteramente de estado sólido y pueden instalarse junto a equipos VHF para formar estaciones VORTAC, VOR/DME, o ILS/DME.

Se utilizan cuatro tipos diferentes de antenas: una antena TACAN estática de estado sólido, dos antenas omnidireccionales DME de alta ganancia, y una antena DME sectorial. Asimismo el equipo TACAN puede trabajar con cualquier antena TACAN existente.

**Amplificador de 1 kW de potencia de pico, para la nueva familia de equipo TACAN y DME. Se han quitado algunos módulos para mostrar la disposición general.**



## Descripción del equipo TACAN/DME

El equipo TACAN/DME consta de radiobaliza respondedora doble, monitor doble, unidad de control, y equipo de prueba programable incorporado. En los FSD-15, FTA-10/S, y FTA-13/S, el amplificador final único, alimentado por cualquiera de los dos excitadores, tiene redundancia paralelo de ocho módulos amplificadores de potencia.

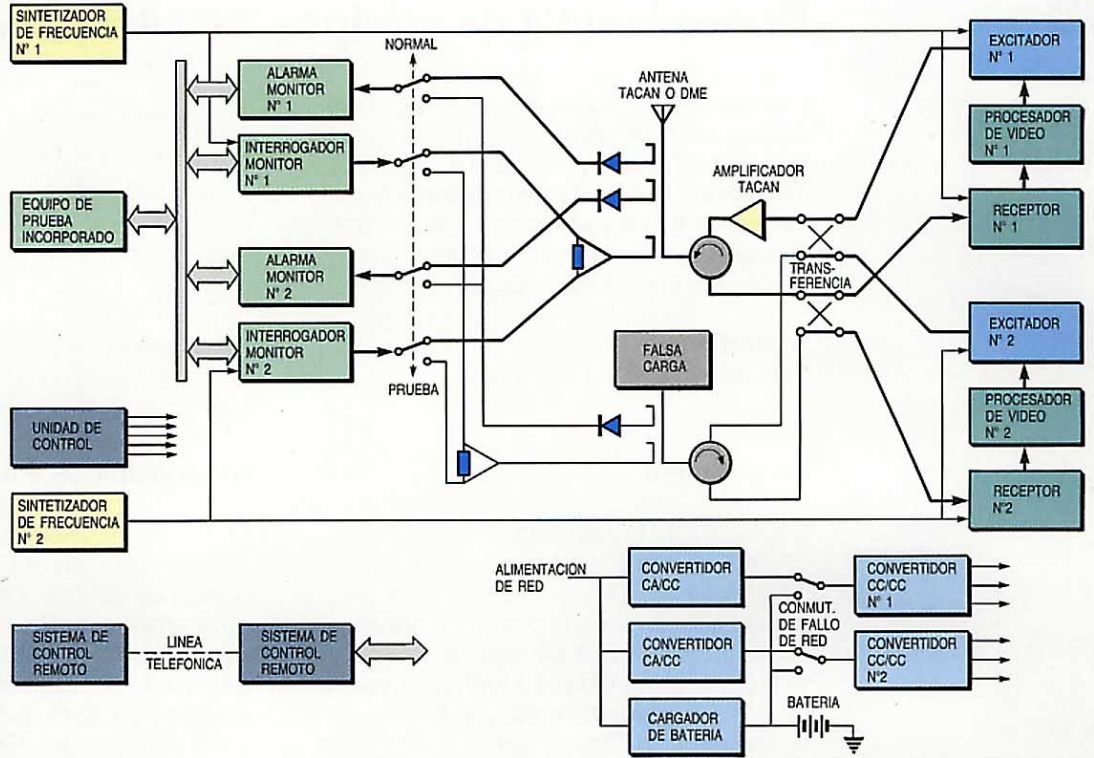
Si se requiere una potencia menor (p. ej., cuando se acepte una cobertura reducida), puede conectarse a antena el respondedor de reserva con su excitador de 100 W. Así se mantienen las prestaciones con una potencia de salida inferior.

La figura 1 es un diagrama de bloques de los equipos FTA-10/S, FSD-15 y FTA-13/S. Todos los equipos TACAN y DME emplean estas unidades, aunque varíen los amplificadores de potencia y los módulos de alimentación conforme a la potencia de salida necesaria.

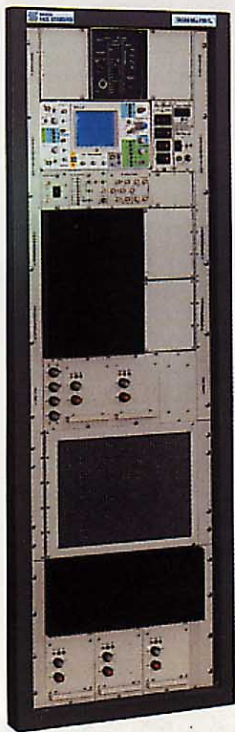
La señal interrogante de RF procedente de la antena se aplica a los circuitos de entrada del receptor a través de los acopladores direccionales, duplexor y conmutador de transferencia. El receptor tiene una sensibilidad mejor que  $-92$  dBm, un margen dinámico de entrada de más de 80 dB y una capacidad de rechazo superior a 80 dB para todas las señales fuera de canal. La sensibilidad del receptor se puede reducir a  $-70$  dBm. Por medio de un receptor de canal doble se consigue alta precisión: la detección de la cadencia de las interrogaciones se realiza en la salida de un canal de moderada anchura de banda, mientras que la validación se efectúa mediante la salida de un canal de banda estrecha. Con dos circuitos de supresión de eco se desensibiliza el receptor proporcionalmente al nivel de la interrogación. La anchura de puerta y el umbral de supresión de eco pueden ajustarse para las condiciones de eco en cada caso particular.

Los circuitos del codificador/decodificador y el procesador de vídeo utilizan al máximo las técnicas digitales. Se pueden

Figura 1  
Diagrama de bloques  
de los equipos TACAN  
FTA-10/S, DME FSD-15  
y TACAN FTA-13/S.



Baliza de estado  
sólido TACAN  
FTA-13/S, de 3 kW.



seleccionar los canales X/Y, el modo TACAN/DME, la temporización con el 1<sup>er</sup> o el 2<sup>o</sup> impulso, y la anchura de puerta del tiempo muerto. Unos contadores síncronos en el procesador de vídeo introducen un retardo estable entre interrogaciones y respuestas; la precisión en el retardo de respuesta de la baliza llega a  $\pm 0,2 \mu s$  ( $\pm 30$  m en distancia). Los contadores síncronos sirven además para generar ráfagas de referencia del azimut e impulsos de identidad, en respuesta a los activadores de la antena TACAN, así como para controlar los impulsos parásitos fortuitos. Respuestas y parásitos se suman con la prioridad correcta a las ráfagas de referencia del azimut y a las señales de identidad para formar el tren de impulsos de modulación.

Cuando sea preciso, puede funcionar en *modo demanda*: se cuentan las interrogaciones recibidas y decodificadas por el equipo de tierra, y si su número supera un límite prefijado se activa el transmisor. Además, el circuito del *modo demanda* cuenta las interrogaciones del monitor decodificadas, controlando así el funcionamiento del receptor cuando el equipo está en reserva.

La portadora de RF se genera mediante un sintetizador de frecuencia directa/síntesis indirecta, cuya frecuencia de salida se controla también por medio de un contador de frecuencia que desconecta el sintetizador si la frecuencia sale fuera de límites. Ello da una alta seguridad contra el desenganche o fallo del propio sintetizador. La salida de éste se amplifica y se utiliza para

suministrar impulsos rectangulares de RF al excitador (amplificador final del FSD-10), donde se ubica la etapa moduladora de RF.

La potencia de 1 kW de salida del FTA-10/S y FSD-15 se consigue combinando las salidas amplificadas de ocho módulos que emplean redes combinatorias y divisores de ocho vías de bajas pérdidas. En estas redes el aislamiento entre ramas es del orden de 25 dB, lo que asegura una alta inmunidad a los fallos. Así, al fallar uno o más módulos, el amplificador continúa trabajando a baja potencia, pero sin degradar ninguna otra prestación. Durante el servicio se pueden sustituir los módulos averiados, sin interrupción ni ajuste.

La característica de transferencia del amplificador de potencia de RF requiere una generación particular de la forma de onda de modulación para configurar con precisión la excitación de RF al amplificador final, asegurando así que se cumplen las normas sobre el espectro de emisión (STANAG 5034 y OACI, Anexo 10). La forma del impulso de salida se controla mediante un bucle de realimentación negativa.

Cada módulo amplificador de potencia contiene un sensor que vigila la situación del transistor final.

Todos los nuevos transmisores TACAN/DME son resistentes y pueden soportar el intenso ciclo de trabajo necesario para dar servicio hasta a 200 interrogadores.

Unos monitores dobles supervisan constantemente el funcionamiento del receptor conectado a la antena. Todos los

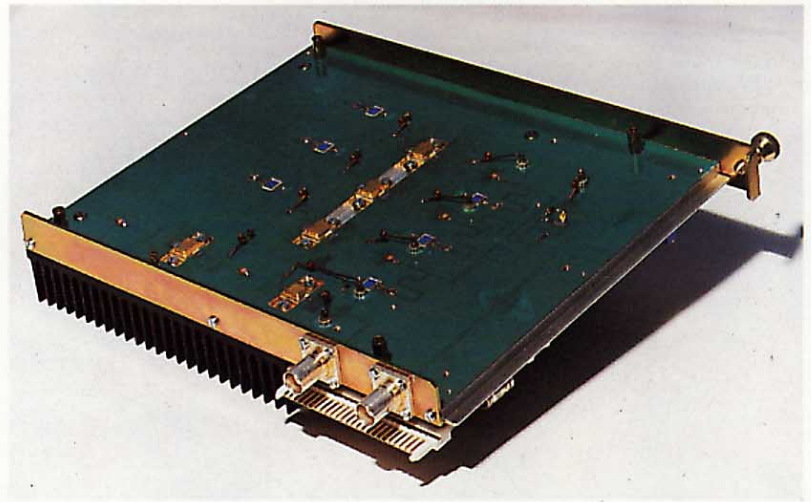
circuitos monitores se autocomprueban por rutina: cada dos segundos se simulan condiciones de alarma a todos los circuitos, debiendo el monitor reaccionar con una situación de alarma temporal para cada parámetro, tras de lo cual vuelve a la operación normal. Si falla esta alternancia de estados por un tiempo ajustable entre 4 y 10 segundos, se envía una señal de monitor "alertado" a la unidad de control, la cual decide si pasar al respondedor de reserva o desactivar el equipo.

La acción monitora se inicia por las señales de RF aplicadas a la entrada del receptor a través del acoplador direccional de la línea de antena. En el modo normal, el interrogador del monitor envía alternativamente pares fuertes y débiles de impulsos de interrogación. Los primeros supervisan el retardo de respuesta del respondedor, y los segundos la sensibilidad del receptor. El monitor toma las respuestas del acoplador direccional ya mencionado, o de las sondas de antena en el caso del DME. Se supervisan, además, la separación de impulsos, la potencia de pico, el ciclo de trabajo, y la identificación. Todos los parámetros se pueden asignar a alarma primaria o secundaria, excepto el retardo de respuesta, que es siempre alarma primaria. Sólo una alarma primaria puede poner el equipo fuera de servicio.

Además de su funcionamiento normal, cualquiera de los dos o ambos interrogadores pueden operar como generadores de vídeo o RF versátiles, en conjunción con el equipo de prueba incorporado.

La salida de RF, bien en onda continua o pulsada, es ajustable entre  $-110$  y  $0$  dBm; se puede seleccionar el canal, así como las frecuencias de prueba de  $\pm 200$  kHz y  $\pm 900$  kHz. La separación entre pares de impulsos y el retardo pueden variarse en pasos de  $0,1 \mu s$ , y la velocidad de los impulsos entre 2 y 10.000 por segundo.

Mediante el equipo incorporado, pueden realizarse las pruebas más importantes sobre el respondedor conectado a la



Módulo amplificador de potencia de 600 W.

antena, sobre el de reserva, y sobre los dos monitores, sin interrupción del servicio. Entre las medidas realizables se incluyen: retardo en la respuesta (dentro del margen dinámico del receptor), separación de los impulsos de respuesta, ventana de decodificación del receptor, recuento de los impulsos de salida, recuento y velocidad de repetición de las ráfagas de azimut, sensibilidad del receptor y eficacia de la respuesta, anchura de banda del receptor, rechazo del canal adyacente en el receptor, funcionamiento de los circuitos supresores de eco, tiempo muerto del receptor, potencia de pico de salida, duración del impulso de salida del respondedor y monitor, tiempos de subida y bajada del mismo, y límites de alarma de los parámetros del monitor.

Todo el equipo se puede alimentar con batería.

Un económico sistema de control remoto permite enviar controles e indicaciones a una estación de operación centralizada.

### Funcionamiento del amplificador de potencia de estado sólido

La figura 2 muestra un diagrama de bloques del amplificador de potencia de 4 kW, que

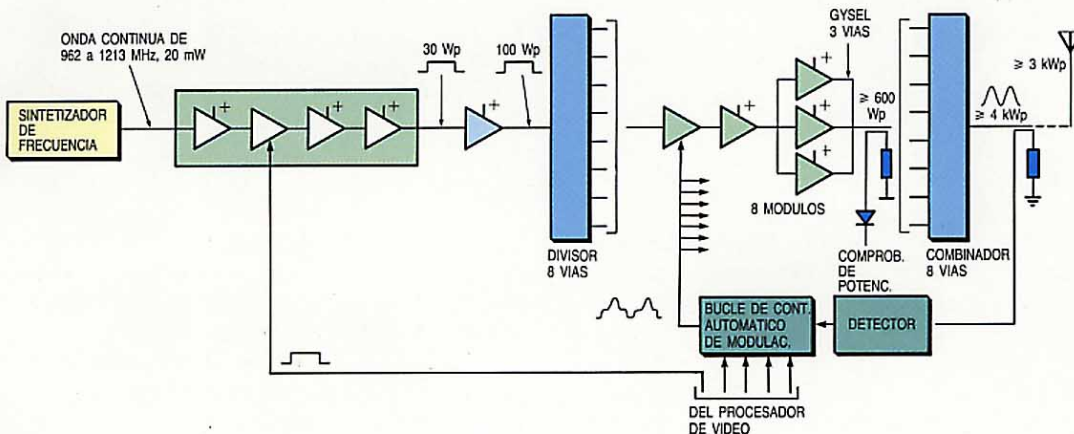
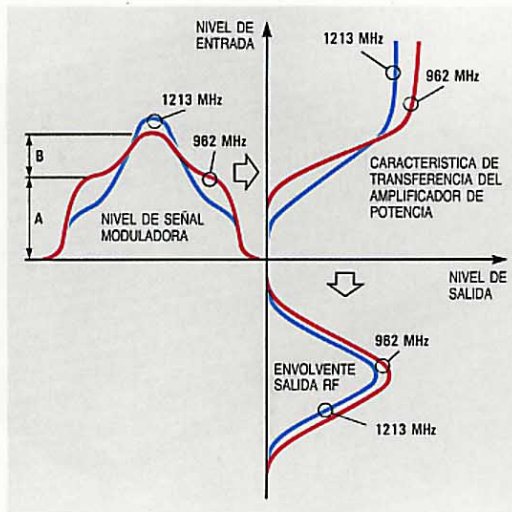


Figura 2 Diagrama de bloques del transmisor de estado sólido de 4 kW de potencia de pico utilizado en la baliza de tierra TACAN FTA-13/S.

**Figura 3**  
Característica de transferencia del amplificador de potencia.



cumple todas las especificaciones civiles y militares. No requiere sintonización ni reajustes, y puede repetirse en grandes series merced al uso de técnicas microlínea. El amplificador de 100 W excita las etapas moduladoras (una por cada módulo de 600 W). El modulador RF, con su capacidad de superar los 80 W de potencia de salida, se alimenta por el colector con una forma de onda que genera la señal de RF necesaria para excitar los transistores finales.

Una típica característica de entrada/salida del amplificador final (Fig. 3) presenta una zona cuasilínea cuando el nivel de entrada rebasa el umbral necesario para activar las tres etapas en cascada. La pendiente de la curva, fijada por la ganancia total de las tres etapas, y el umbral necesario para activar los transistores, pueden variar con las condiciones (entrada de RF, temperatura ambiente), pero la linealidad no cambia apreciablemente. Así, pues, no es necesario el control automático de las formas de las dos componentes A y B, una vez fijadas éstas para optimizar el espectro, aunque sí

habrá que controlar sus niveles. La característica de transferencia del amplificador de potencia puede también variar ligeramente durante las ráfagas de referencia norte. En particular, el calentamiento de los transistores puede hacer variar la potencia de un impulso a otro.

El bucle de control automático de la modulación, mantiene mediante realimentación negativa el ancho de los impulsos con tensiones aproximadamente del 15% y el 85% de la de pico. Las anchuras temporales detectadas se comparan continuamente con impulsos rectangulares de duración fija, generados digitalmente, creando así tensiones de control que establecen los niveles de las componentes A y B sin alterar sus formas.

El control automático de la modulación es lo bastante rápido para mantener dentro de los límites especificados cualquier variación de potencia en los últimos impulsos de las ráfagas de referencia norte.

### Conclusiones

Se han utilizado circuitos digitales síncronos y la más reciente tecnología de estado sólido en RF para realizar equipos TACAN y DME de alta fiabilidad. La elevada modularidad y alto grado de integración del sistema permite alojar en un armario pequeño el respondedor doble, monitor doble y todas las unidades necesarias para operar y mantener el equipo.

**Giuseppe Bertocchi** nació en 1950 en Vertova, Bérgamo, y en 1975 se graduó en ingeniería electrónica en la Politécnica de Milán. Ingresó seguidamente en FACE, donde se dedicó al desarrollo de equipos TACAN y DME. Actualmente es jefe de ingeniería de proyectos de radiobalizas terrestres TACAN y DME en dicha Compañía.

# Uso civil del TACAN

El sistema TACAN es una probada ayuda para la navegación, utilizada principalmente en aplicaciones militares. Sin embargo, la tecnología moderna ha permitido reducir el coste de las instalaciones TACAN, abriendo un abanico de nuevas aplicaciones civiles como la navegación de helicópteros a plataformas petrolíferas marinas.

## E. Lazzaroni

Industrie FACE Standard SpA, Milán, Italia

### Introducción

Entre los sistemas de navegación aérea, el TACAN ha obtenido una posición predominante durante casi cuatro décadas. Si bien el sistema se emplea principalmente en aviones militares, el progreso tecnológico, sobre todo en transistores de microondas y circuitos conmutadores de RF, permite ahora fabricar radiobalizas y antenas electrónicas de estado sólido y bajo coste. Como resultado, la instalación y operación del sistema TACAN es ya económicamente viable como ayuda a la navegación en algunas aplicaciones civiles.

La flexibilidad operativa de esta nueva generación de balizas TACAN de estado sólido, equipados con antenas electrónicas, junto a su bajo coste y fácil uso, los hace especialmente aptos para la navegación de helicópteros y como ayuda para aproximación a plataformas petrolíferas marinas.

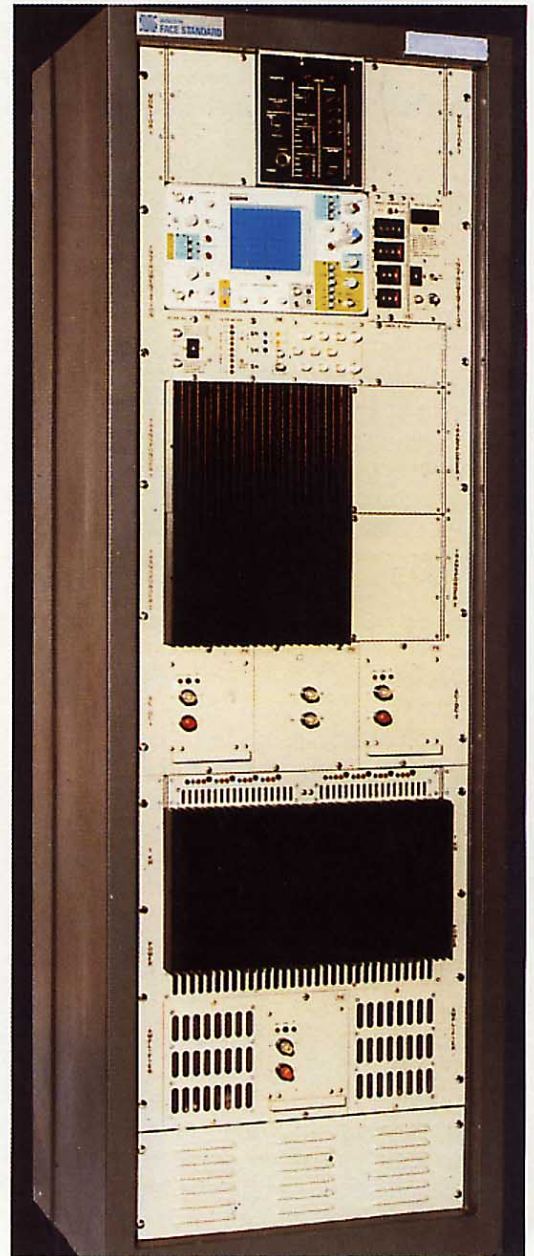
### Ventajas del TACAN

El TACAN se concibió como sistema militar basado en añadir una función de orientación al DME (equipo de medida de distancia) usando sus mismas frecuencias. La radiobaliza resultante es más transportable que la estación terrestre VOR/DME empleada en aviación civil.

El equipo TACAN de a bordo consta de un interrogador DME al que se han añadido circuitos para orientación. De este modo las balizas TACAN dan un servicio completo a todo interrogador DME, y las balizas DME dan información de distancia a todo equipo TACAN aerotransportado. Las ventajas sobre el sistema VOR/DME incluyen:

- La mayor frecuencia (960 – 1215 MHz frente a 108 – 118 MHz) permite reducir la antena del TACAN, adecuándola más para servicio móvil y a bordo de barcos.

- Siendo un sistema pulsante que emplea la técnica de detección de primer flanco, el TACAN es menos afectado por errores



Baliza TACAN  
FTA-10/S, fabricada  
por Industrie FACE  
Standard.

del emplazamiento que los sistemas de onda continua, minimizando el "escalonomamiento" del VOR (variaciones cíclicas del error de orientación) producido por reflexiones indeseadas de señal en obstáculos.

- La técnica multilóbulo del TACAN puede, en principio, dar mayor precisión que el sistema VOR de lóbulo único.
- En helicópteros la señal TACAN es insensible a la "modulación del rotor", que origina indicaciones de navegación erráticas.
- Se pueden lograr economías usando el mismo canal de frecuencia para las informaciones de orientación y de distancia.

De las 2879 ayudas a la navegación que actualmente funcionan en el mundo, 1276 pueden emplearse con TACAN aerotransportado y otras 694 ofrecen operación DME solamente.

### Empleo del TACAN sobre tierra

Dado que el TACAN es la ayuda primaria a la navegación militar, existen estaciones terrestres en instalaciones militares de todo el mundo. A veces tales estaciones pueden ser una ayuda conveniente a la navegación para usos civiles.

#### Estacion VORTAC

La mayor aplicación civil del TACAN es en estaciones VORTAC. Este sistema se usa en varios países para evitar la necesidad de instalar equipo VOR/DME adicional en aviones militares, que ya van provistos de interrogadores TACAN. En el sistema VORTAC, junto a cada estación VOR se instala una baliza TACAN, en vez de una DME.

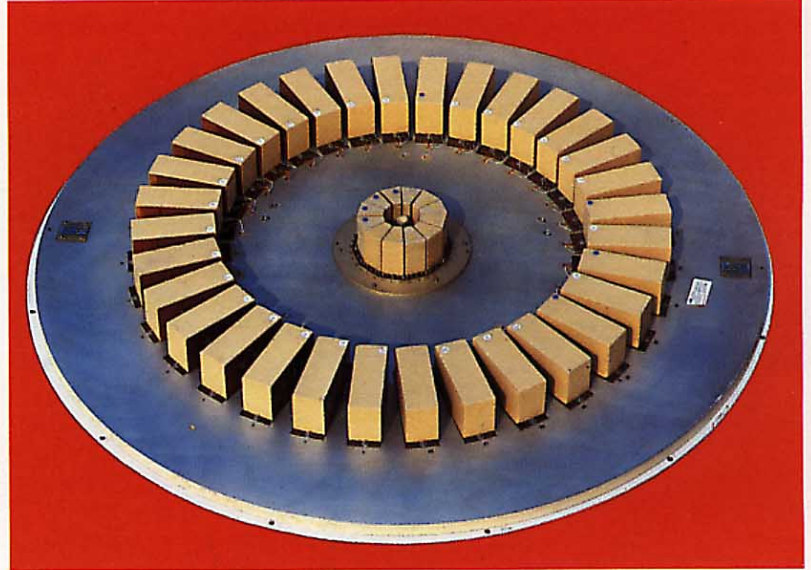
Los aviones militares reciben información de distancia y orientación de la baliza TACAN, mientras los civiles obtienen de ésta las distancias y la orientación de la baliza VOR. Por consiguiente, ambos tipos de aviones operan con la misma red de control de tráfico aéreo. Dado que las radiobalizas TACAN de nueva generación cuestan poco más que las DME, parece probable que continúe desarrollándose la red VORTAC.

#### Estaciones móviles TACAN

Además de su aplicación táctica y para sustituir temporalmente a balizas fijas TACAN que sufran avería, las estaciones TACAN móviles pueden servir de ayuda a la navegación sobre campos de aterrizaje de emergencia. Esto es particularmente útil en caso de catástrofes naturales o grandes

accidentes, cuando se requiere con urgencia un apoyo aéreo militar y no hay aeropuerto equipado con ayudas a la navegación.

El poco peso y pequeño tamaño de las modernas antenas electrónicas TACAN, así como el bajo consumo de las radiobalizas



Antena electrónica TACAN FAN-29 fabricada por Industrie FACE Standard, sin la cubierta.

de estado sólido, permiten fabricar estaciones TACAN flexibles y eficaces, con la misma precisión y fiabilidad que las estaciones fijas.

#### TACAN para aeropuertos privados

A veces puede convenir a los pequeños aeropuertos privados instalar un TACAN. Es típico que un aeropuerto así esté atendido por una pequeña compañía aérea y que no pueda usar una estación VOR/DME por estar situado en una zona montañosa. En tal caso, puede emplearse una estación TACAN en vez de una VOR/DME, ya que aquélla no es tan sensible a problemas de emplazamiento y es mucho menos costosa, aun teniendo en cuenta el coste de los interrogadores aerotransportados.

### Empleo del TACAN en plataformas petrolíferas marinas

La exploración y extracción de petróleo y gas en alta mar exigirá un creciente apoyo de helicópteros en los próximos años. Esta necesidad se prolongará 20 ó 30 años dependiendo del tamaño de las bolsas petrolíferas y del ritmo de extracción.

El estricto horario de los vuelos de helicópteros a y desde las plataformas, junto a posibles necesidades de emergencia para

evacuación médica y servicios de rescate, exige que los helicópteros puedan operar con baja visibilidad (niebla, oscuridad, lluvia abundante, etc.) en las más severas condiciones previstas en el Reglamento de Vuelo Instrumental (IFR).

Mediante el sistema TACAN, el piloto del helicóptero que se aproxima a una plataforma equipada con baliza TACAN terrestre, obtiene su orientación y distancia respecto a ella, así como su velocidad relativa y tiempo hasta la estación. Esto asegura una navegación precisa, en tiempo de vuelo mínimo, aunque las condiciones meteorológicas sean adversas; se reduce así el gasto de combustible y el tiempo de trabajo de la tripulación.

### *Ayudas a la navegación de helicópteros sobre el mar*

Las ayudas a la navegación para helicópteros que operan con plataformas petrolíferas marinas pueden dividirse en las tres categorías descritas a continuación.

La primera categoría abarca los sistemas que permiten al piloto dirigirse hacia la plataforma. En igualdad de condiciones, los pilotos prefieren estos sistemas, pues les dispensan del uso de mapas, son de fácil manejo y su precisión crece al acercarse al objetivo. Los principales sistemas de esta categoría son DME/NDB (baliza no direccional), TACAN y TACAN/NDB. Por razones técnicas y económicas, el TACAN (TACAN/NDB) parece el más adecuado.

Los sistemas TACAN se han probado con éxito en la navegación con plataformas en mares de Alaska, si bien hasta ahora no se han podido utilizar mucho por su elevado coste de instalación y mantenimiento, principalmente debido al uso de técnicas obsoletas (como el klystron y los tubos de microondas en amplificadores RF de potencia), a la construcción de tipo militar y al empleo de antenas mecánicas giratorias.

En contraste, los modernos transistores de potencia para microondas reducen el tamaño, peso, coste y necesidades de mantenimiento de los sistemas TACAN de nueva generación, simplificando por ello su instalación y operación en plataformas petrolíferas.

La segunda categoría son los sistemas autocontenidos, que incluyen los inerciales, Doppler y radar cartográfico aerotransportado. Son voluminosos y caros.

En la tercera categoría están los sistemas que suministran a la plataforma y al helicóptero sus coordenadas sobre alguna forma de rejilla. Estos sistemas raramente pueden utilizarse sin un ordenador a bordo que convierta coordenadas en información para dirigir el aparato. Los principales son el DECCA (usado en el Mar del Norte), el

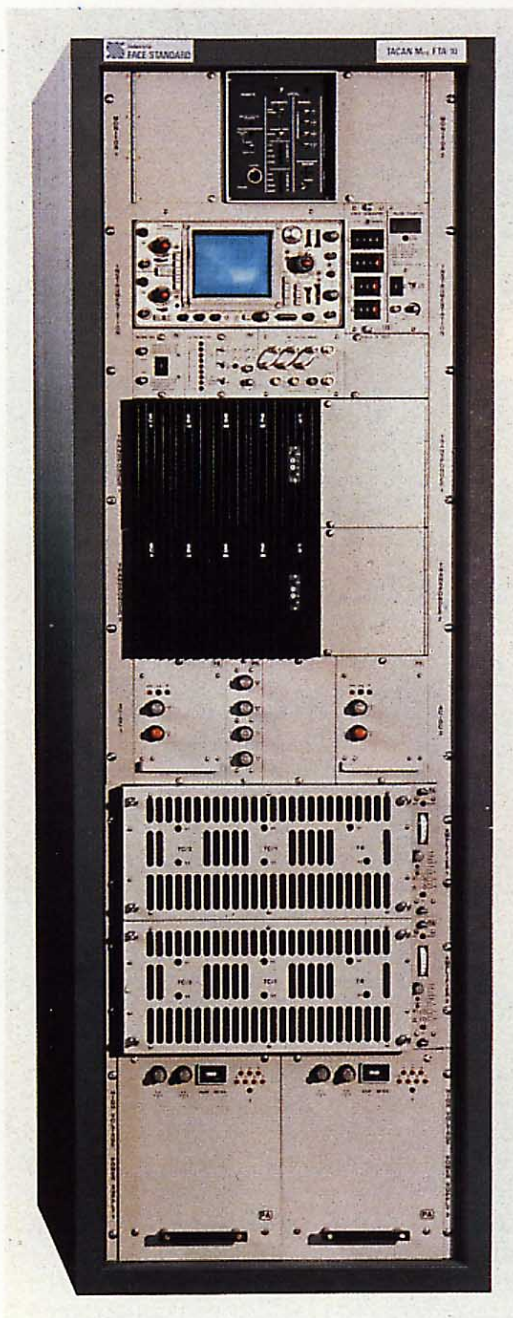
LORAN-C, el OMEGA y el posicionado mundial por satélite.

Hasta ahora ninguno de estos sistemas tiene la plena aprobación de una organización de aviación civil para aproximación instrumental, excepto el LORAN-C en áreas limitadas.

Al OMEGA parece faltarle la necesaria precisión y capacidad de aproximación instrumental.

En el caso del LORAN-C, quedan por resolver varias cuestiones fundamentales para que se le considere como un posible sistema primario IFR de navegación y aproximación para helicópteros. Estos problemas incluyen:

- posible ambigüedad en las indicaciones



**Baliza TACAN moderna, adecuada para aplicaciones civiles.**



- frecuencias de operación bajas, que le hacen vulnerable a interferencias de frecuencias adyacentes utilizadas para otros fines
- posibilidad de interrupciones de servicio incontroladas e inesperadas, causadas por cortes de la estación LORAN-C, ya que éstas son operadas por el Servicio de Guardacostas de los Estados Unidos y los usuarios carecen de control sobre ellas
- errores de temporización que dependen de la condición estacional del suelo y de la calibración local; la dilución geométrica de la precisión añade más errores.

El sistema de posicionado mundial por satélite (Navstar) probablemente no estará realizado antes de mediados de los 90. Los puntos más débiles de este sistema son:

- cortes periódicos sobre algunas zonas, si se usan 18 satélites
- supresión de los cortes al utilizar 24 satélites, aunque sin redundancia
- variación constante en la dilución geométrica referida
- imposición por el Departamento de Defensa de una precisión degradada hasta 100 m para uso civil
- necesidad de dos a cuatro meses para sustituir un satélite, si no hubiera ninguno de reserva en órbita.

Antena TACAN FAN-29; su diámetro es de sólo 1,3 m.



Junto a la reciente decisión de la FAA (Agencia Federal de Aviación) de gastar 111 millones de dólares en nuevas estaciones VORTAC, estos factores indican que el sistema de posicionado mundial aún no tiene la madurez suficiente para utilizarlo como ayuda primaria a la aproximación de helicópteros civiles.

#### Comparación de prestaciones de sistemas de navegación de helicópteros

La tabla 1 expone los parámetros de prestación más importantes de los principales

sistemas de navegación de helicópteros. Estos parámetros, de especial interés para el usuario, son:

- cobertura
- precisión
- contenido de datos
- principal aplicación
- acción del piloto
- indicación al piloto
- fiabilidad de la señal
- coste del equipo de usuario.

Esta comparación es sólo una reseña de las diferencias entre los diversos sistemas de navegación en uso actual, basados en equipos de diseño reciente.

*Acción del piloto* recoge las operaciones necesarias para obtener una indicación.

*Indicación al piloto* recoge las indicaciones audibles y visuales típicas.

La *fiabilidad de la señal* expresa la probabilidad de disponer de una señal *utilizable* para la navegación en cualquier momento dado. Entre los fenómenos que afectan a este parámetro están: perturbaciones atmosféricas para sistemas que operan por encima de 10 GHz, perturbaciones ionosféricas repentinas para sistemas de baja frecuencia, y efectos multitrayecto o de sombra para sistemas de trayectoria óptica.

Los demás parámetros son autoexplicativos.

#### Más consideraciones sobre el TACAN

##### Fiabilidad

La fiabilidad de una baliza debe ser tal que el fallo de la unidad menos fiable (transmisor) no cause una pérdida completa de navegación. Los modernos transmisores TACAN de estado sólido, compuestos de varios módulos de potencia en paralelo, pueden cumplir fácilmente este requisito. El amplificador de potencia suele disponerse de forma que el fallo de un módulo de potencia reduzca simplemente la potencia de salida sin provocar corte de estación. El módulo averiado puede aislarse y sustituirse rápidamente.

Otras unidades de radiobaliza pueden funcionar dualmente con cambio automático, controlado por el monitor, en caso de avería. Estas técnicas han conseguido un tiempo medio entre cortes de 10.000 horas para una estación TACAN. Además, si la estación funciona en modo *petición* (o sea, que el transmisor se active automáticamente al recibir la primera señal de interrogación del equipo aerotransportado, como es posible en plataformas petrolíferas), se puede aumentar más el tiempo medio entre cortes.

**Redundancia**

Además de ser adecuado para la navegación de helicópteros que van y vienen de plataformas petrolíferas, los helicópteros en vuelo sobre tierra pueden utilizar la parte DME del TACAN si falla el DME normal.

El sistema de orientación TACAN está aprobado por la FAA como alternativa del VOR en navegación aérea (esto es, en rutas preestablecidas cubiertas por VOR/ VORTAC, DME y otras ayudas a la navegación) y para aproximaciones de baja pre-

**Tabla 1 — Prestaciones comparadas de modernos sistemas de navegación para helicópteros**

Sistema Parámetro	NDB/DME	TACAN	TACAN/NDB	DECCA	LORAN-C	OMEGA	Posicionado mundial	Inercial	Doppler	Radar a bordo
Cobertura (MN = milla náutica)	NDB: depende de la potencia de transmisión (típicamente > 200 MN) DME: horizonte óptico	Horizonte óptico	NDB: depende de la potencia de transmisión (típicamente > 200 MN) TACAN: horizonte óptico	> 200 MN pero no toda la superficie terrestre	1200 MN, pero no toda la superficie terrestre	Mundial	Mundial	Ilimitada	Ilimitada	Ilimitada
Error	NDB: variable DME: 160 m*	Distancia < 160 m* Orientación < 2°*	NDB: variable TACAN: distancia < 160 m* orientación < 2°*	20-3000 m, según distancia	30-400 m, según distancia	1-2 MN RMS	100 m (uso civil)	1,5-2 MN por hora CEP	0,5-1% CEP	Variable
Contenido de datos	NDB: dirección relativa DME: distancia	Orientación relativa, distancia, velocidad, tiempo hasta la estación	TACAN: orientación, distancia, velocidad, tiempo hasta la estación NDB: dirección relativa fuera de la cobertura del TACAN	Posición absoluta en 2D	Posición absoluta en 2D	Posición absoluta en 2D	Posición absoluta en 3D, velocidad en 3D, tiempo	Posición en 3D, velocidad en 3D	Posición en 2D, velocidad en 3D	Posición relativa en 2D (ro-teta)
Principal aplicación	Navegación de alcance medio	Navegación de corto a medio alcance, aproximación	Navegación de alcance medio, aproximación	Navegación de largo alcance	Navegación de largo alcance	Navegación de largo alcance	Navegación de largo alcance	Navegación de largo alcance	Navegación de largo alcance	Toma de posición intermitente
Acción del piloto	NDB: 1) Seleccionar 1 de 1400 canales 2) Poner el equipo en goniometría (ADF) DME: Seleccionar 1 de 252 canales	1) Seleccionar 1 de 252 canales 2) Seleccionar orientación deseada	TACAN: 1) Seleccionar 1 de 252 canales 2) Seleccionar orientación deseada NDB: 1) Seleccionar 1 de 1400 canales 2) Poner el equipo en goniometría (ADF)	1) Seleccionar 1 de 64 canales 2) Insertar mapa en registrador de vuelo	1) Seleccionar 1 de 40 velocidades 2) Insertar diferencia de tiempos de partida (en algunos aparatos)	1) Seleccionar 3 de 8 estaciones 2) Corregir mediante tablas el retardo conocido	1) Insertar posición y hora actuales. Esto anula la inicialización automática y reduce el tiempo hasta la primera toma de posición	1) Arrancar el sistema 2) Realizar alineación inicial 3) Insertar coordenadas de destino 4) Pasar a modo "navegación"	1) Introducir datos de navegación necesarios para el vuelo	
Indicación al piloto	NDB: lectura en dial de 360° DME: lectura de distancia en contador digital	1) Lectura de distancia en contador digital. Lectura de orientación en dial de 360° 2) Lectura en medidor izquierda-derecha. Lectura de velocidad y tiempo hasta la estación	Lecturas TACAN como en columna anterior + lectura NDB en dial de 360° fuera de cobertura TACAN	1) Lectura de pasillos y fracciones o de 3 medidores, marcando posición sobre mapa hiperbólico 2) Lectura de posición en el mapa	Lectura del retardo en indicador digital, marcando posición en mapa hiperbólico	Lectura del retardo en indicador digital, marcando posición en mapa hiperbólico	Lectura de posición en cualquier sistema de coordenadas 3D	Lectura de distancia y orientación respecto al destino	Lectura en indicador de: velocidad respecto al suelo-información de guía izquierda/derecha-distancia a recorrer	Observación de imagen tipo mapa sobre el indicador radar
Fiabilidad de la señal	NDB: Buena (200 a 500 kHz) DME: Alta (Banda L)	Alta (Banda L)	TACAN: Alta (Banda L) NDB: Buena (200 a 500 kHz)	Buena (70 a 130 kHz)	Buena (100 kHz)	Buena (10 a 14 kHz)	Alta (1230 a 1575 kHz)	Moderada (13 GHz)	Moderada (5 a 16 GHz)	Moderada (5 a 16 GHz)
Coste del equipo de usuario	Bajo	Bajo	Moderado	Moderado	Moderado a alto	Moderado a alto	Alto	Moderado a alto	Alto	Alto

\* en las cercanías de la estación

cisión que utilicen VORTAC. Puesto que los sistemas VOR y TACAN emplean equipos separados tanto en el avión como en tierra, un fallo del VOR en uno u otro no inhabilita el TACAN; si el helicóptero dispone de este sistema, podrá continuar el vuelo orientándose por el TACAN en lugar de hacerlo por el VOR.

#### *Navegación zonal*

Los helicópteros pueden llevar a bordo ordenadores de bajo coste para la navegación en una zona, con preselección y almacenamiento de hasta 10 puntos de trayecto (puntos escogidos sobre una línea de rumbo, o próximos a ella). La capacidad de navegación zonal por TACAN, además de permitir vuelos a una plataforma equipada con TACAN, faculta al piloto a utilizar como punto de referencia cualquier otra plataforma situada en la zona cubierta por el TACAN. Incluso se puede usar la misma estación para el vuelo de retorno a la base.

Varias estaciones TACAN pueden así conectarse de manera sencilla para formar una red que permita la navegación en una extensa zona, ya sea mediante los mismos procedimientos que para estaciones VOR-DME, o por los de navegación zonal.

#### **Conclusiones**

El sistema TACAN tiene algunas aplicaciones civiles interesantes, entre ellas la navegación de helicópteros a plataformas petrolíferas marinas parece especialmente prometedora. Su comparación con otros sistemas muestra que el TACAN ofrece una mejor capacidad de aproximación, unida a un mayor contenido de datos en información de navegación. Además su coste es inferior al de los otros sistemas.

#### **Bibliografía**

- 1 M. Kayton y W. R. Fried: *Avionics Navigation Systems: John Wiley & Sons*, Nueva York.
- 2 W. R. Fried: *A Comparative Performance Analysis of Modern Ground Based, Air-Based, and Satellite Based Radio Navigation Systems: Navigation*, primavera 1977, volumen 24, nº 1, págs. 48-58.
- 3 E. Lazzaroni: *A Solution for Helicopter Navigation to Offshore Oil Rigs*: noviembre 1982, Industrie FACE Standard, Milán.

**Elio Lazzaroni** nació en Génova en 1939, en cuya universidad se graduó ingeniero de telecomunicación. En 1969 ingresó en Industrie FACE Standard para trabajar como ingeniero de diseño y desarrollo en el laboratorio de ayuda a la navegación. El Sr. Lazzaroni es actualmente jefe de proyectos relativos a ayudas a la navegación dentro de FACE.

# Radar de aproximación de gran precisión con exploración de haz cónico

El radar de aproximación con exploración de haz cónico, PAR-80, da una cobertura tridimensional fiable y precisa en un sector de acercamiento al aeropuerto. El equipo de radar trabaja desatendido cerca de la pista, conectándose por cables subterráneos a las pantallas de radar situadas en un centro de operaciones próximo a la torre de control.

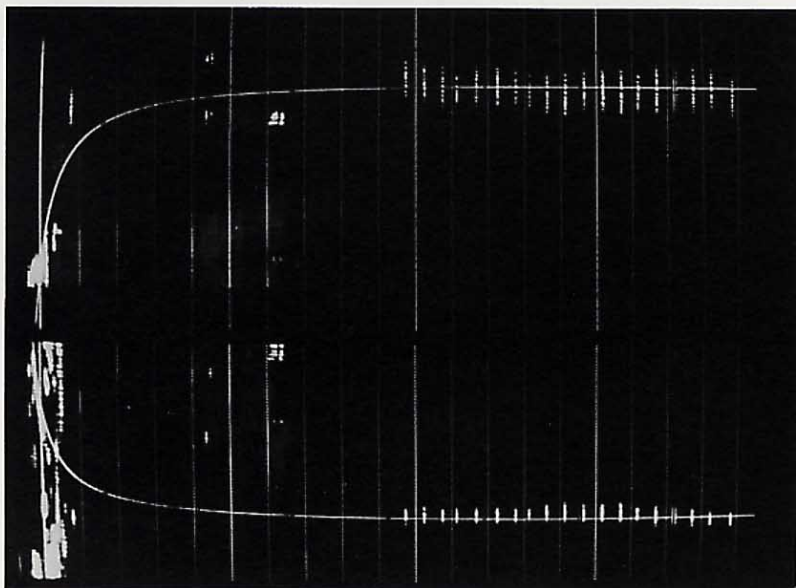
**R. E. Johnson**

ITT Gilfillan, Van Nuys, California,  
Estados Unidos de América

## Introducción

El radar de aproximación PAR-80 funciona como ayuda al aterrizaje de aviones, explorando el sector de espacio que circunda la trayectoria de acercamiento a una pista del aeropuerto, e indicando luego la posición de cualquier avión que se aproxime en un formato de exploración beta. Dicho formato presenta en una pantalla de rayos catódicos un perfil (elevación vs. alcance) al lado de un plano del sector (azimut vs. alcance), incluyendo marcas de distancia referenciadas al punto de contacto con la pista y cursores de líneas de ruta y de planeo que representan la trayectoria de vuelo preferida, como se ve en la fotografía inferior. En funcionamiento, el controlador mira la pantalla para determinar la posición del avión con respecto a la trayectoria idónea y recomienda al piloto (por radio) las correcciones de vuelo necesarias.

Formato de exploración beta del PAR-80, mostrando una representación de elevación vs. alcance, encima de una representación de azimut vs. alcance. Los cursores de senda de planeo y línea de ruta representan líneas rectas en el espacio, pero aparecen curvados debido a la expansión angular del origen.



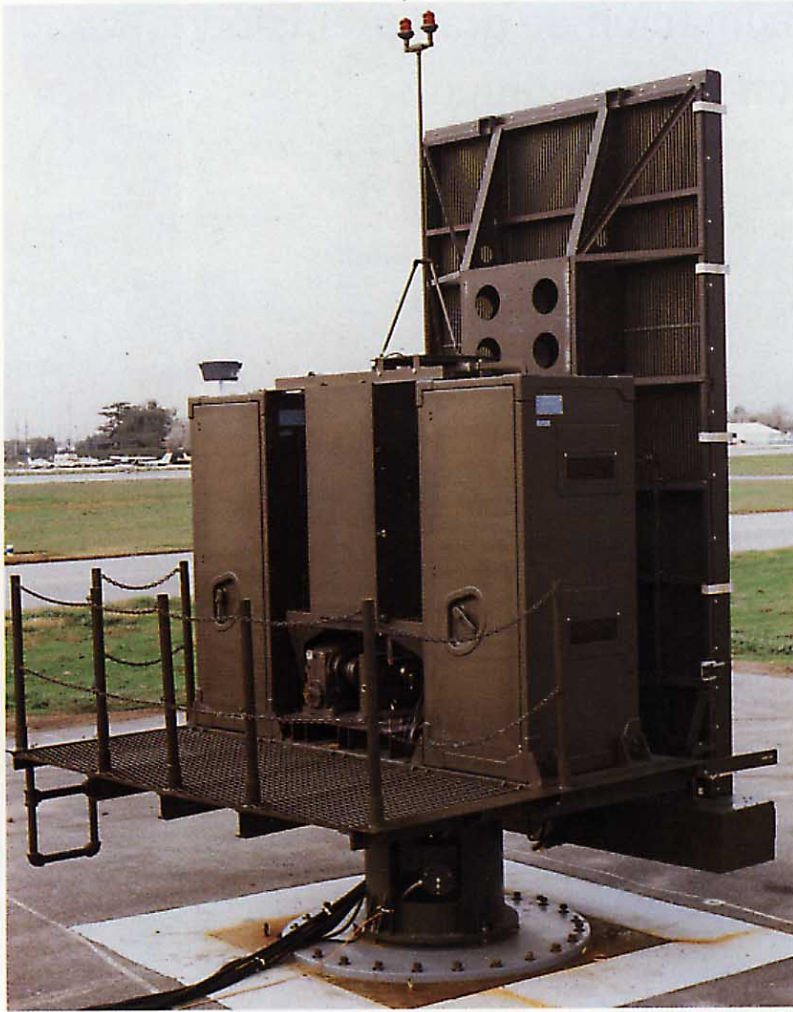
El PAR-80 es un moderno perfeccionamiento del PAR original, que cubre de modo sistemático todo el sector de aproximación mediante una antena exploradora de haz cónico, en lugar de utilizar antenas independientes de azimut y elevación que exploren secuencialmente segmentos del sector. La cobertura volumétrica total resultante elimina toda necesidad de repositonar los sectores de exploración en azimut y elevación (como en los antiguos sistemas), da máxima visibilidad del espacio atendido para la detección de intrusos y permite al PAR-80 dar un servicio simultáneo a pistas paralelas.

## Descripción del sistema

El PAR-80 consta de un equipo de radar que trabaja desatendido en un lugar fijo adyacente a la pista, y de un equipo indicador que se relaciona con los controladores en un centro unido al radar por un cable de longitud máxima 3000 m.

El equipo de radar se compone de una red plana de antenas, conjuntos dobles de receptor-transmisor, unidad programadora de exploración, mecanismo de gobierno de elevación, soporte del equipo y plataforma giratoria azimutal, juntamente con los cables y guías de interconexión necesarios. El equipo está diseñado para instalación fija, normalmente atornillado a una base de hormigón. Opcionalmente, puede llevar una cubierta protectora (radomo), aunque sin ella el sistema cumple sus requisitos operativos incluso en muy malas condiciones climáticas.

El equipo indicador consta de dos pantallas, procesador de vídeo, caja de conmutación de pantallas y todos los cables necesarios para interconectar estas unidades con la caja remota de uniones de línea.



Grupo del equipo de radar del PAR-80. Las cabinas duales del receptor-transmisor están colocadas a cada lado de la plataforma giratoria, con el programador de exploración y control de elevación entre ellas.

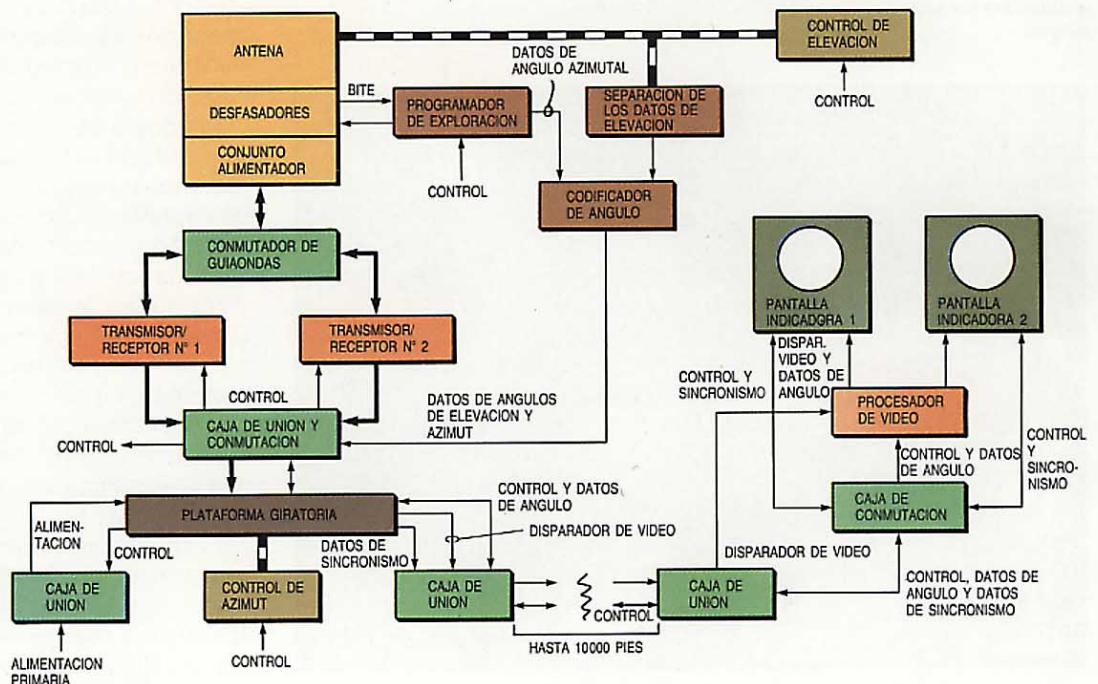
Todo este equipo está situado en un centro de operaciones apartado de la pista. El procesador y la caja de conmutación suelen instalarse en una sala de equipos, contigua

a la sala de operaciones donde se alojan las pantallas indicadoras. Si es necesario, se instala una tercera pantalla monitora para mantenimiento. Las unidades se conectan como indica la figura 1.

### Antena

La antena está formada por una red plana de guíaondas ranurados que trabajan en la banda X. La abertura de radiación tiene 12,5 pies de altura (3,81 m) por 7 pies de anchura (2,13 m). Cada uno de los 85 elementos verticales de la red contiene 176 ranuras radiantes por los bordes, dispuestas en serie a lo largo del elemento guíaondas. Los factores de acoplamiento de las ranuras se ajustan para producir la distribución de amplitud deseada en el plano de elevación. Cada elemento recibe energía a través de un desfaseador de ferrita de enclavamiento, con un excitador integral. Los 85 desfaseadores alojados en la base de la red proporcionan el control de fase necesario para dirigir el haz radiado en un margen de  $\pm 15^\circ$  en azimut. Un alimentador de línea horizontal distribuye la energía a los 85 elementos utilizando acopladores de ranura de 3 puertas situados en serie a lo largo del guíaondas primario, con factores de acoplamiento ajustables para conseguir la distribución azimutal de amplitud deseada. Las puertas de salida de los acopladores incorporan pequeños bloques dieléctricos que aleatorizan la fase de salida del alimentador de línea. Programando estos desfases fijos mediante los desfaseadores, se evitan los lóbulos laterales de cuantificación en el plano azimutal.

Figura 1 Diagrama de bloques del sistema PAR-80, en el que se aprecian los grupos dobles transmisor-receptor, y los indicadores dobles que potencian la disponibilidad. BITE - equipo de prueba incorporado.



En frente de la red vertical ranurada se monta un polarizador plano del tipo de transmisión, de tres capas, para producir polarización circular. Las capas están formadas por hilos y trozos cuadrados o rectangulares de cobre, grabados en paneles de fibra de vidrio, cuyos diagramas de radiación se orientan a 45° con respecto a la polarización vertical de las ranuras de guíaondas. Las capas están separadas por núcleos alveolados de nailon y laminadas luego conjuntamente para formar el panel polarizador.

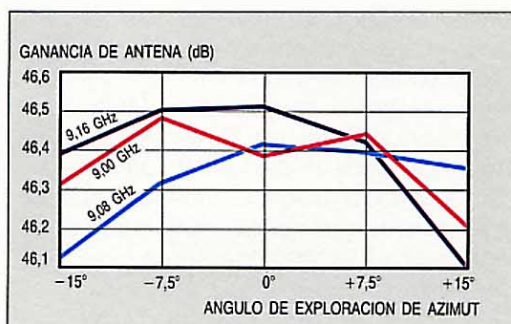
Las pruebas y mantenimiento de la antena se facilitan mediante un monitor de comportamiento, fuera de línea, que consiste en una red ranurada horizontal montada tras el borde superior de la abertura de la antena. El monitor se acopla espacialmente a la red de antena por una ranura extra, en el borde posterior de cada uno de los guíaondas verticales. Produce una señal de salida en relación fija con el diagrama de radiación del campo lejano, y puede servir para determinar el estado de los desfases y programador de exploración.

La antena PAR-80, con su red de 14.960 elementos radiantes, garantiza que el diagrama de radiación, ganancia y relación axial de polarización circular se comporten correctamente en todo el margen de exploración azimutal (figuras 2 y 3).

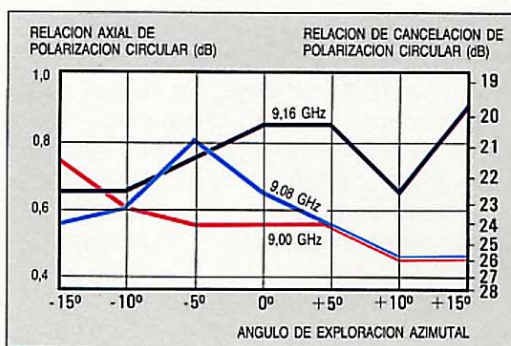
### Exploración del haz

El sistema PAR-80 opera por exploración de haz cónico: electrónica para el azimut, y mecánica por cabeceo para cubrir la elevación de 7°. Hay varios programas de exploración azimutal que dan diferentes densidades de impactos en el objetivo; la frecuencia de exploración en elevación se fija en 1,5 observaciones por segundo.

La unidad programadora almacena los programas de exploración azimutal en memoria de sólo lectura; realiza una función separadora de la guía del haz, genera los datos de ángulo azimutal enviados a las pantallas indicadoras, y arranca la sincronización del sistema. Típicamente, los programas de exploración hacen desplazarse el haz 1,81 anchuras de haz en azimut para cada impulso. Este ágil movimiento del haz permite a la antena discriminar respuestas de alcance ambiguas, funcionando así correctamente el sistema con un simple transmisor de magnetrón de sintonía fija de frecuencia de repetición de impulsos relativamente alta: 3450 impulsos por segundo. Una secuencia de 16 pasos de 1,81 anchuras de haz, completa una exploración azimutal de 30°. Para que la distribución de



**Figura 2**  
Ganancia de la antena PAR-80 en función del ángulo de exploración azimutal a tres frecuencias.



**Figura 3**  
Relación axial de polarización circular del PAR-80, medida en función del ángulo de exploración azimutal.

las transmisiones sea uniforme, dentro del volumen cubierto, se entrelazan sucesivas exploraciones de 17/29 pasos incrementales.

Además de la exploración uniforme de 30°, existen ocho programas de zona reforzada que concentran la energía en la vecindad inmediata de la trayectoria de vuelo preferida y cubren cualquier combinación de desviaciones en la ruta y en la inclinación de la senda de planeo. Estos programas reducen la cobertura azimutal a 20°, utilizando el tiempo así ganado para generar posiciones de haz extras en un sector de 5° que circunda el camino de vuelo. La zona reforzada da aproximadamente el triple de impactos por exploración de los obtenidos fuera de ella.

Las órdenes de guía del haz se almacenan en forma de números de haz azimutales. La función separadora de la guía del haz procesa aritméticamente estos datos para convertirlos en las órdenes individuales que requieren los 85 desfases, incluyendo la sustracción de los desfases fijos de los bloques de aleatorización.

La exploración de elevación utiliza un mecanismo de biela accionado por motor. La antena pivota sobre dos cojinetes de apoyo próximos a cada lado de la misma, uniéndose el brazo de la biela a la antena por su parte inferior. Un engranaje elíptico, dentro del mecanismo de la biela, linealiza el movimiento de la antena y reduce el tiempo muerto entre exploraciones de elevación. A la antena se conecta, en su punto de giro izquierdo, un transductor digital que

codifica el ángulo de elevación para transmitirlo al grupo de pantallas.

Esta combinación de exploración electrónica y mecánica logra la deseada agilidad de posicionado del haz sin el coste que supondría tener un desfasador para cada elemento de radiación. La antena resultante tiene unas características excelentes de conformación del haz.

### Receptor-transmisor

El grupo receptor-transmisor se basa en el experimentado Quadradar MK-V con pequeñas modificaciones. Se utilizan dos grupos de receptor-transmisor para aumentar la fiabilidad y la disponibilidad en servicio. Un conmutador con control remoto conecta un grupo a la antena, quedando el otro en reserva conectado a una carga artificial.

El receptor es superheterodino y de simple conversión, utilizando un tubo transmisor-receptor pasivo en un diseño, por lo demás, totalmente de estado sólido. Típicamente, el factor de ruido es de unos 8,9 dB. No se ha necesitado amplificador de RF de bajo ruido debido a la elevada ganancia de antena y al relativamente corto alcance instrumentado de 20 millas náuticas (37 km). El receptor trabaja con frecuencia intermedia de 30 MHz y su anchura de banda es de 4 MHz. Posee un control de la sensibilidad en el tiempo de 54 dB, y ofrece al operador una selección entre vídeo lineal, y vídeo con rápida constante de tiempo (logarítmico o lineal).

El transmisor se basa en un magnetrón coaxial, excitado por un modulador tipo línea de probada fiabilidad. Se utiliza carga resonante como capacidad de la red formadora de impulsos, y a continuación se activa un tiratrón cerámico para descargar dicha red a través de un transformador de impulsos, excitando el cátodo del magnetrón. La salida es sintonizable entre 9,0 y 9,16 GHz; la potencia de pico nominal es de 180 kW, con una anchura de impulso de 0,24  $\mu$ s y una frecuencia de repetición de 3450 impulsos por segundo.

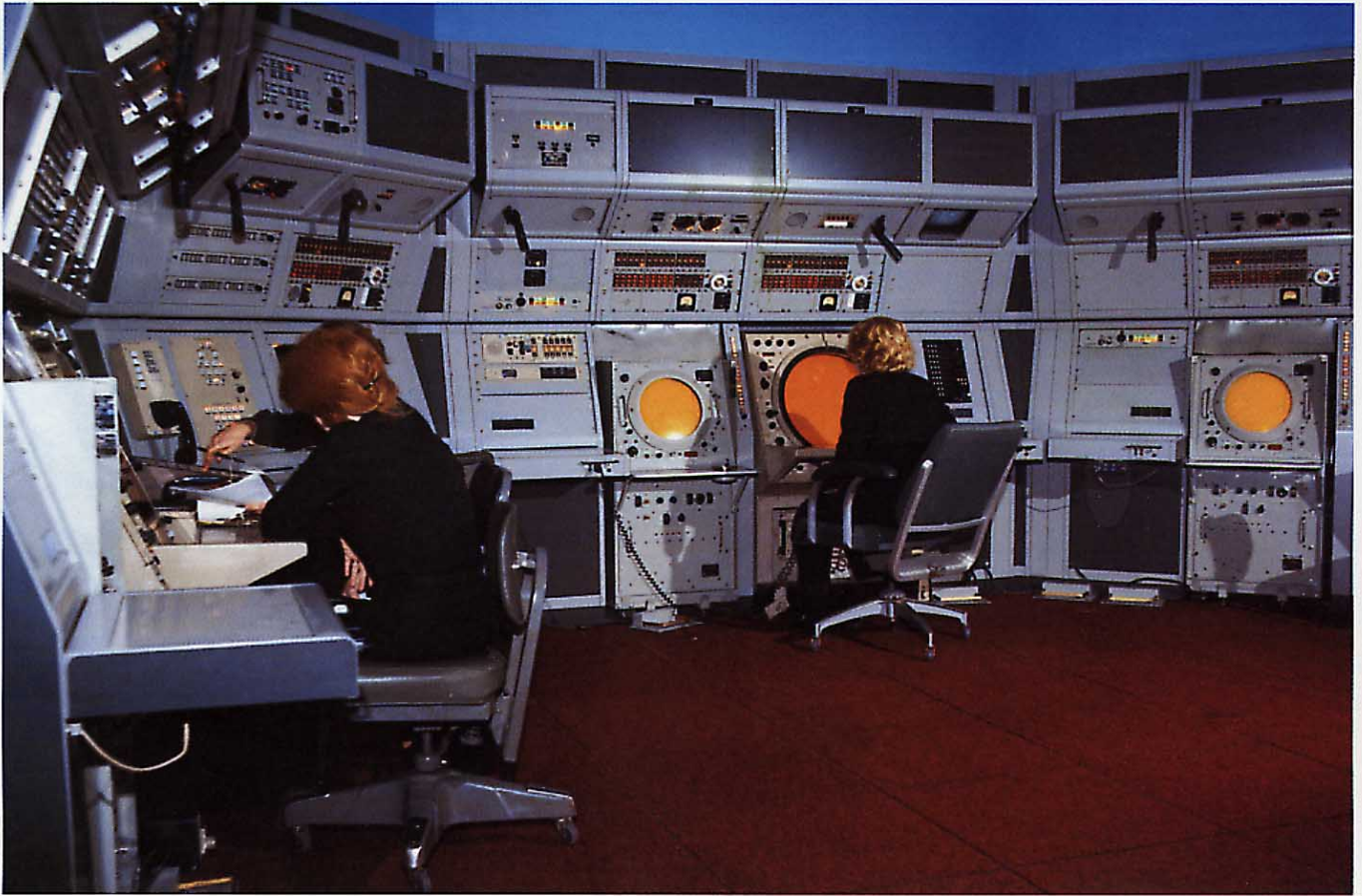
### Procesador de vídeo

Esta unidad contiene el amplificador de compensación remota de línea de vídeo y los circuitos decodificadores que convierten los datos de ángulo digitales procedentes del equipo de radar al formato analógico exigido por los indicadores. Además realiza la compresión del tiempo de vídeo y el rechazo de ecos parásitos.

En un sistema de exploración de haz cónico de este tipo, los informes en vídeo recibidos del objetivo importan tanto para la representación azimutal como para la de elevación. Un circuito de compresión del tiempo de vídeo retiene los datos de ambas representaciones, y, no obstante, el indicador funciona con un tubo de rayos catódicos de un solo cañón. La mencionada compresión se realiza convirtiendo el formato vídeo analógico en digital y escribiéndolo en memoria a una velocidad de reloj de 7 MHz, leyendo luego los datos de la memoria dos veces a velocidad de 14 MHz. Se utilizan dos memorias de vídeo, capaz cada una de almacenar toda la información recibida durante un periodo activo entre impulsos del radar. Mientras una memoria está escribiendo datos, la otra lee datos por dos veces a la velocidad superior: una vez para la elevación y la otra para el azimut.

Los circuitos de proceso de vídeo incluyen el supresor de ecos parásitos, que evita que los ecos fuera de ángulo debidos al terreno se superpongan a los objetivos de interés en la representación, aprovechando la elevada resolución propia de la antena de haz cónico para detectar por separado objetivos y ecos del terreno y eliminar luego estos últimos de la pantalla indicadora. El supresor consta de una serie de células tridimensionales que cubren, aproximadamente, la mitad inferior del volumen que abarca el radar. Cada célula cubre un alcance de 562 pies (170 m), 1,034° de azimut y 0,35° de elevación (salvo en la capa superior de células, ajustable en elevación). El supresor de ecos emplea un algoritmo de observación secuencial, según el cual se dice que hay ecos perturbadores en una célula si se detectan cruces del umbral de vídeo durante un tiempo superior al que cabe esperar de un avión en movimiento. En cada barrido en elevación, se examina el espacio buscando cruces de umbral. Si en una célula se detecta un número de cruces predeterminado, se incrementa la cuenta en la célula de memoria correspondiente, pero si no se alcanza ese número de cruces, la cuenta se disminuye. El nivel de umbral y el límite de cruces admisible se ajustan para establecer la proporción de falsa alarma deseada. Cuando la cuenta acumulada alcanza un nivel preestablecido, se inicia la supresión de ecos parásitos para esa célula, a menos que ésta se halle desactivada por la lógica de *zona libre*. El nivel prefijado para actuación del contador se ajusta para que el avión más lento de interés atraviese la célula sin accionar dicho contador.

Las zonas libres son espacios fijados de antemano, dentro del espacio operativo del



supresor de parásitos, en los que no se permite a éste realizar su función, visualizándose en la pantalla cualquier señal de vídeo presente. Estas zonas suelen ajustarse para incluir el espacio inmediatamente en torno a los cursores de la trayectoria de vuelo. Para fines de prueba y alineación, puede mostrarse el mapa de zonas libres en el indicador maestro.

Aunque pueden detectarse objetivos sin utilizar el supresor de parásitos (incluso sobrevolando fuertes reflexiones del terreno) por la diferencia en tiempo entre la iluminación de los ecos y la del objetivo, el supresor reduce el centelleo en la pantalla producido por la exploración vertical repetida periódicamente sobre el terreno. Esto hace que la pantalla resulte menos fatigosa, aumentando, por lo tanto, la eficacia del controlador y la seguridad del vuelo. La zona libre es también un recurso de seguridad, concebido para impedir el rechazo de un objetivo de interés.

### **Indicador**

El indicador se basa en el fiable y experimentado equipo del Quadrarad MK-V. Se necesitó algún rediseño para conseguir las mayores velocidades de barrido y los tiempos de conmutación más cortos exi-

gidos para adaptarse a la función de comprensión del tiempo de vídeo. También se introdujeron cambios en los controles del panel frontal del equipo de radar por compatibilidad con el sistema PAR-80.

Se pueden seleccionar dos escalas de alcance; una logarítmica de 10 millas náuticas (18,5 km), y una líneal de 20 millas náuticas (37 km). Tanto en exploración beta como en escala logarítmica, la imagen se expande para mejorar la precisión en la vecindad crítica del punto de aterrizaje. El origen de las marcaciones de alcance se hace coincidir con la distancia a la toma de tierra. En ambas escalas pueden situarse marcaciones de milla en milla, intensificando la del punto de aterrizaje y una de cada cinco marcaciones. En cada pantalla pueden preestablecerse cuatro juegos de cursores de líneas de ruta y sendas de planeo. Estos, en unión con la plataforma giratoria de la antena, facilitan la rápida orientación a una nueva pista cuando el viento cambie de dirección (se requieren menos de 60 s para girar y alinear a la nueva pista).

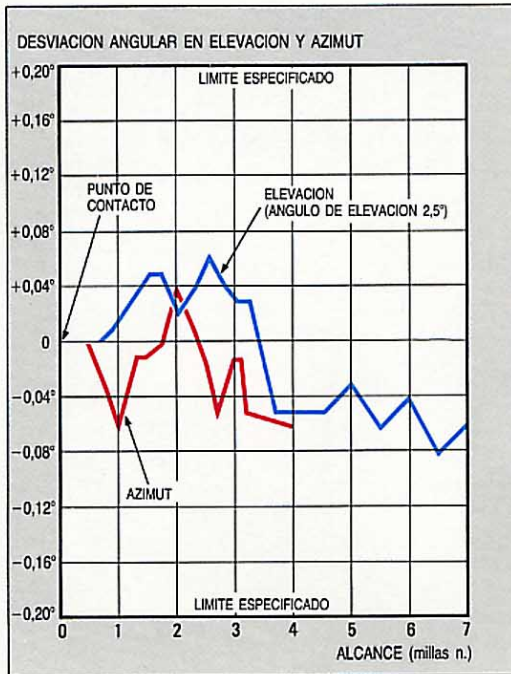
### **Resultados de prueba del sistema**

El sistema PAR-80 ha completado con éxito una serie de pruebas ambientales, pruebas

**Centro típico de operaciones. Las pantallas más pequeñas corresponden al PAR, las más grandes al radar de vigilancia del aeropuerto.**



**Figura 4**  
**Precisión en elevación**  
**y en azimut del**  
**PAR-80, demostradas**  
**por pruebas de vuelo**  
**típicas. Ambas**  
**encajan perfecta-**  
**mente en los límites**  
**especificados.**



de vuelo y demostraciones de fiabilidad. Las pruebas ambientales incluyeron manejo en banco, pérdidas en lluvia, temperatura de servicio (-30 a +52 °C) y fuera de servicio (-62 a +71 °C), humedad (95%) y pruebas de carretera Munson<sup>1</sup>. El sistema demostró cumplir todos los requisitos ambientales.

Mediante pruebas en prototipo se estudiaron a fondo las características de precisión, resolución y cobertura, y luego cada sistema producido pasó la prueba de certificación de vuelo antes de entrar en servicio. Se logran ordinariamente unos resultados excelentes. El sistema ha demostrado un margen operativo de 7 dB para detectar aviones de prueba a un alcance hasta de 20 millas náuticas, con errores angulares máximos sólo de un tercio, aproximadamente, del valor especificado. En la figura 4 se muestran datos de las pruebas de precisión en vuelo.

El sistema PAR-80 ha demostrado también una fiabilidad sobresaliente. Antes de su entrega, el sistema prototipo superó con éxito una prueba de maduración de 96 horas y una prueba del control de la elevación durante 1500 horas sin fallo. Una vez entregado, el sistema completó tres meses de pruebas operacionales sin fallos. La

experiencia de campo confirma la fiabilidad pronosticada de 1541 horas de tiempo medio entre fallos.

### Conclusiones

El PAR-80 tiene la antena de abertura mayor de cualquier sistema PAR. Gracias sobre todo a su excepcional antena de exploración de haz cónico, el sistema ofrece varias ventajas notables. El haz cónico de exploración reticular da una cobertura total del sector de aproximación, y la amplia capacidad de exploración azimutal aumenta la flexibilidad de ubicación. La resolución y la precisión sobrepasan los requisitos de la OACI.

Las características de detección, reforzadas por una ganancia de antena de 46 dB, garantizan un buen margen de seguridad, aun para detección de aviones pequeños al máximo alcance. La elevada resolución de la antena permite detectar objetivos separados de los ecos parásitos, pudiendo así eliminarse emborronamientos de la pantalla sin degradar la cobertura del radar a lo largo del trayecto de vuelo.

La resolución angular y la polarización circular reducen la energía de retrodispersión por lluvia, aceptada dentro de una célula de resolución de objetivo radar, mientras que la elevada ganancia de antena contrarresta los efectos de atenuación de la lluvia.

La disponibilidad operacional se ve potenciada por el diseño de canal doble en tecnología de estado sólido.

### Referencia

- 1 ITT Gilfillan: Service Conditions Test Report: ER 1195/1200-1, octubre 1977.

**Robert E. Johnson** nació en Iowa en 1930. En un principio sirvió en el Ejército de los Estados Unidos como técnico de radar durante la guerra de Corea. Recibió el grado BSEE en la Universidad del Estado de Iowa, en 1956, e ingresó en ITT Gilfillan (entonces Gilfillan Bros) el mismo año. Su experiencia ha sido variada, contribuyendo al diseño de sistemas de misiles, simuladores, dispositivos ECM/ECCM, sistemas de radar de defensa aérea y sistemas de radar de control de tráfico aéreo. En la actualidad es el jefe de ingeniería de sistemas de la línea de producto de control de tráfico aéreo en ITT Gilfillan.

# Nuevos desarrollos de la técnica de doble modelado de impulsos para el DME de precisión

La técnica de doble modelado de impulsos es compatible con los últimos requisitos definidos por la OACI para el equipo de medida de distancia de precisión. Es especialmente apropiada donde se necesite una gran exactitud de la posición.

## G. Corazza

Dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica, Università di Bologna, Italia

## F. Vatalaro

FACE-RC, Industrie FACE Standard SpA, Pomezia, Italia

## Introducción

Se encuentra ya muy adelantada la normalización del sistema de aterrizaje por microondas (MLS), por parte de la Organización de Aviación Civil Internacional. La aprobación final de los estándares para las funciones de elevación y azimut fue obtenida en abril de 1981. A continuación, el All Weather Operations Panel (AWOP) de dicha Organización se concentró en el DME/P (equipo de medida de distancia de precisión).

Al mismo tiempo, FACE Standard estaba trabajando en un programa de investigación patrocinado, que condujo a una propuesta italiana basada en la técnica DPS (doble modelado de impulso), descrita anteriormente en *Comunicaciones Eléctricas* y otros lugares<sup>1,2,3</sup>.

A lo largo de 1981 y 1982 se celebraron varias reuniones del AWOP y sus grupos de trabajo, obteniéndose numerosos resultados útiles, algunos de los cuales originaron cambios en la configuración de las propuestas italianas originales. Finalizando 1982 se completaron los SARP (estándares y recomendaciones) y directrices para el nuevo sistema<sup>4</sup>.

Se definieron dos normas de precisión: la norma 1 para las operaciones de despegue y aterrizajes más convencionales, y la norma 2 para despegues y aterrizajes cortos y aplicaciones de toma de tierra y despegue verticales, así como otras funciones especiales. Ambas normas especifican unos límites superiores notablemente bajos para los errores de trayectoria:  $\pm 30$  m y  $\pm 12$  m, respectivamente, en la aproximación de referencia del MLS. También se redactaron directrices sobre el ruido de frecuencias medias que causa ligeras fluctuaciones cinéticas (CMN, *control motion noise*), junto con presupuestos de error detallados.

Además, el AWOP escogió el concepto de *dos impulsos/dos modos*, propio del DME/P, que en esencia se caracteriza por lo siguiente:

- Las interrogaciones y las respuestas siguen efectuándose mediante pares de impulsos.
- El modo de aproximación inicial es aplicable a aeronaves distantes de 7 a 22 millas náuticas del respondedor. En este caso, el comportamiento del equipo no se distingue básicamente de un DME/N convencional, aunque su precisión es ligeramente mayor.
- A distancias inferiores a unas 7 millas es aplicable el modo de aproximación final, el cual difiere del modo de aproximación inicial en el tiempo de separación entre los impulsos del par (p. ej., en canales X la separación cambia de 12 a 18  $\mu$ s). Evidentemente en este modo se especifica mayor precisión.

Durante las discusiones que condujeron a sentar las bases del sistema, se estudió cuidadosamente la técnica DPS<sup>4</sup>, reconociendo que es una técnica prometedora, si bien demasiado alejada del tradicional DME para aceptarla sin el apoyo de un gran número de pruebas reales. No obstante, también se admitió que es compatible con el concepto de *dos impulsos/dos modos*, y que confiere al sistema una mayor capacidad para futuras aplicaciones avanzadas.

También se fijaron varios requisitos sobre la forma del impulso transmitido; para el modo de aproximación final la forma del impulso está casi totalmente especificada, debiendo tener:

- duración  $t_d = 3,5 \pm 0,5 \mu$ s, medidos entre los puntos del 50% del valor de pico
- tiempo de subida  $t_r$ , menor que 1,6  $\mu$ s, entre los puntos del 10 y el 90%

- tiempo de subida parcial  $t_{rp} = 250 \pm 50$  ns, entre los puntos del 5 y el 30%.

En la figura 1 se muestra un impulso con tales características.

Un requisito más es que la estimación del tiempo de llegada debe efectuarse con el primer impulso del par y en su porción de subida parcial, en cuyo intervalo la forma debe ser casi lineal. Además, los estudios de factibilidad descubrieron diversos problemas y posibles soluciones<sup>4</sup>. Para medir la distancia, se necesita una estimación del tiempo de emisión de los impulsos, que debe deducirse mediante los mismos circuitos que estiman el tiempo de llegada. El ancho de banda del receptor debe ser suficientemente grande para no afectar la linealidad del tramo de subida parcial del impulso recibido, y por tal motivo ha de alcanzar los 3 MHz; se necesita, pues, un discriminador de canal<sup>5</sup>, debido a la organización del DME en canales de 1 MHz. La técnica más conveniente para la estimación del tiempo de llegada parece ser el circuito DAC (retardo, atenuación y comparación), en el que los valores óptimos del retardo y la atenuación resultan de un compromiso que tenga en cuenta las señales especulares por trayectos múltiples, el ruido térmico y otras fuentes posibles de error instrumental. Es importante subrayar que los SARP sólo imponen limitaciones esenciales, permitiendo a los fabricantes la búsqueda de soluciones óptimas. En particular, no impiden el uso de la técnica DPS.

valor absoluto de la potencia eficaz radiada, se toma un valor de 57 dBm<sup>4</sup>.

Para cumplir la norma de precisión 1, se pasa el impulso recibido a través de un filtro paso banda Butterworth de 4 polos, de 3,5 MHz de ancho de banda, cuya principal característica es la de no distorsionar el frente del impulso durante su tramo de subida parcial. Se estima el tiempo de llegada del impulso  $u(t)$  detectado mediante el circuito DAC de la figura 2, cuya atenuación  $A_d = 6$  dB y retardo  $\tau_d = 95$  ns. Esta elección de los parámetros asegura que los dos impulsos, producidos a la salida de la línea de retardo DAC y del atenuador, alcan-

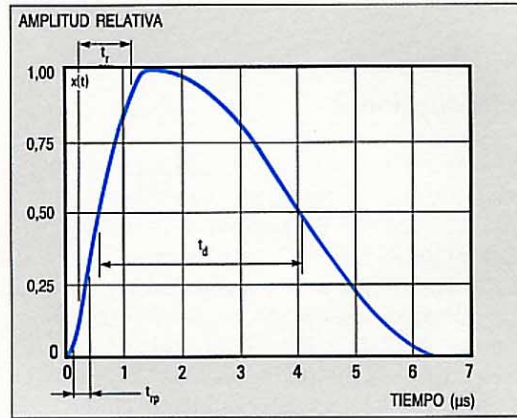


Figura 1 Envolvente de onda transmitida por el DME/P.

cen el 10% y el 20% de su respectivo valor de pico en el instante de cruce  $t_c$ . Así, dicho instante de cruce  $t_c$  cae dentro del tiempo de subida parcial de ambos impulsos. El comparador, con un umbral  $V_s$ , protege al circuito contra falsas alarmas<sup>3,6</sup>. Como  $u(t)$  debe cruzar el umbral antes del instante  $t_c$ , se escoge  $V_s$  a 17 dB por debajo del valor de pico de  $u(t)$ , dejando un margen de 3 dB para la posible distorsión del impulso.

Para poder valorar el comportamiento del sistema es necesario distinguir entre el canal estación-nave y el de nave-estación a fin de evaluar separadamente el error de trayectoria y el debido al CMN, y asegurarse de que son compatibles con el error pre-asignado<sup>4</sup>.

**Diseños del DME/P para las normas de precisión 1 y 2**

La característica de transmisión está fuertemente controlada por la limitación del tiempo de subida parcial, dejando poco margen para optimizar la forma del impulso. Sin embargo, en la parte receptora se imponen pocas obligaciones, y las que existen limitan sobre todo la interferencia asíncrona producida por los impulsos de los canales adyacentes.

Consideramos aquí un sistema con iguales características de impulsos transmitidos en la interrogación que en la respuesta. Para cumplir la especificación, se obtiene la señal transmitida pasando un impulso cos/cos<sup>2</sup> por un filtro paso bajo de 10 MHz de ancho de banda a 3 dB. La figura 1 muestra el impulso transmitido  $x(t)$ , con tiempo de subida parcial  $t_{rp}$  de 225 ns y una potencia eficaz radiada en el respondedor de unos 57 dBm. Además, ya que las restricciones espectrales en el interrogador no limitan el

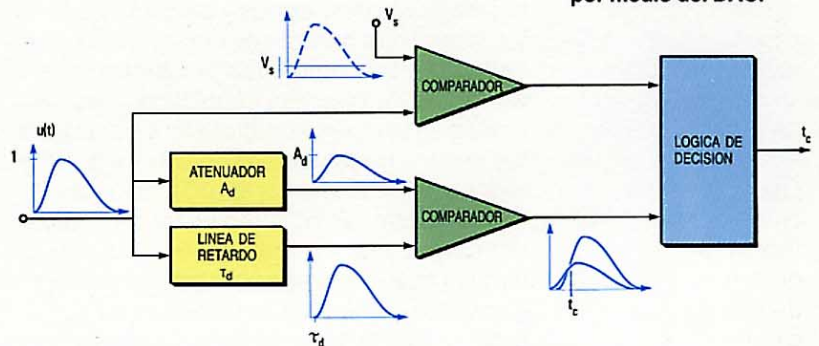


Figura 2 Estimación del tiempo de llegada del impulso, por medio del DAC.

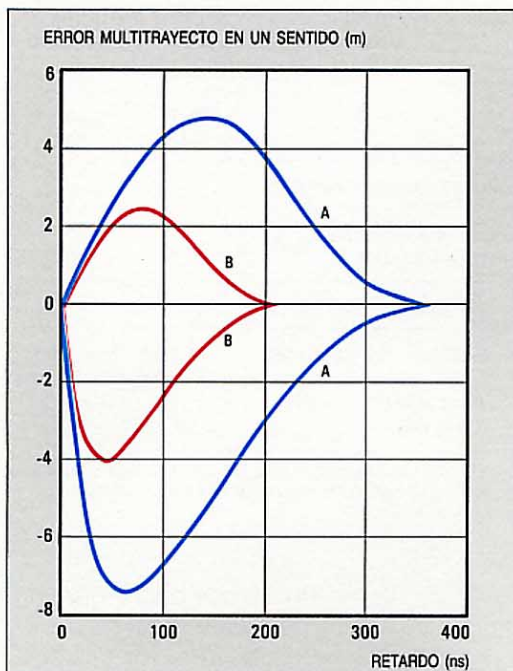
El diseño expuesto debe ante todo cumplir con el requisito de un error máximo de 10 m en el seguimiento de la trayectoria, que es el límite superior para el trayecto especular en un sentido. Este enfoque es conveniente porque la contención del error debido a trayectos múltiples es el objetivo más difícil de todo el diseño. El diagrama de ojos de la figura 3 (curva A) muestra un error máximo de 7,3 m para una señal multitrayecto que llegue al receptor en oposición de fase ( $\Delta\phi_e = 180^\circ$ ), con un retardo  $\tau_e$  de 60 ns y una amplitud relativa  $\rho_e$  de  $-3$  dB respecto de la señal útil.

El comportamiento ante el ruido térmico debe también estar de acuerdo con los SARP: se distinguirá entre los enlaces estación-nave y nave-estación, incluso en el caso peor, que ocurre durante las maniobras de rodadura sobre la pista. Suponiendo que la relación mínima entre el umbral y el ruido  $V_s^2/N$  sea 8 dB, se deduce una tasa de falsas alarmas – muy conservadora – de 1 Hz<sup>6</sup>, con lo que la razón máxima entre la señal y el ruido debe ser al menos de 25 dB. Las relaciones señal/ruido presentes realmente en la entrada del DAC vienen dadas en la tabla 1 junto con los errores por CMN a ellas asociados<sup>7</sup>.

Otras fuentes de error pueden controlarse razonablemente, recordando que el error global viene dado por la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los errores individuales. Por ejemplo, una frecuencia de reloj de 60 MHz contribuye al error global, cuando se combina con ruido térmico, con unos despreciables 1,7 m. Así, pues, el error global debido al CMN resulta ampliamente compatible con los presupuestos de error sugeridos por AWOP, especialmente si se toma en cuenta el filtrado digital del interrogador, que produce una reducción del error de cuatro veces como mínimo.

El sistema descrito consigue la precisión de la norma 1 sin ningún proceso especial de la señal. Sin embargo, se podría utilizar el filtrado DPS para obtener un umbral más elevado, con algunas ventajas para el diseño del sistema y su fabricación. Por otra parte, la inclusión del proceso de la señal se revela esencial para alcanzar la precisión fijada en la norma 2.

Para reducir la influencia del trayecto especular, un planteamiento consistiría en reducir el retardo  $\tau_d$  del DAC utilizando una atenuación  $A_d$  fija: ello daría un  $\tau_d$  de 50 ns y un error por trayecto especular de unos 4 m. Aunque esta precisión es suficiente para cumplir con la norma 2, los niveles de cruce caen al 5,5% y al 2,8%, violando el requisito de que ambos cruces ocurran dentro del tiempo de subida parcial. Esto demuestra que la simple optimización del circuito DAC no es adecuada para lograr la



**Figura 3**  
Prestaciones de los dos sistemas presentados en el texto, en presencia de trayectos múltiples. Ambas curvas A y B representan errores en un solo sentido en función del retardo multitrayecto: los valores positivos se aplican a señales en fase ( $\Delta\phi = 0^\circ$ ) y los negativos a las de fase opuesta ( $\Delta\phi = 180^\circ$ ). La curva A corresponde al sistema apto para operaciones convencionales (norma 1), y la curva B al adecuado para aterrizajes y despegues cortos y verticales (norma 2).

precisión de la norma 2. Por el contrario, la técnica DPS procesa el impulso recibido, proporcionando un umbral más alto para un error de trayectoria dado. Este concepto se usa seguidamente para describir un sistema basado en DPS que logra la precisión de la norma 2 sin incumplir los SARP.

Por sencillez, supongamos que hasta la salida del filtro receptor el sistema es tal como se ha descrito antes, y por ello puede cumplir la norma de precisión tipo 1. En dicho punto se inserta el filtro DPS con una función de transferencia paso bajo<sup>5</sup> equivalente:

$$A'(f) = \left(1 + j \frac{f}{f_1}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_2}\right)^{-1}$$

donde  $f_1$  vale 0,1 MHz y  $f_2$ , 1,7 MHz.

El impulso de salida  $y(t)$ , dado por  $J^{-1}[X(f) \cdot A'(f)]$ , es atenuado 13,5 dB y tiene un tiempo de subida parcial  $t'_{rp}$  de 65 ns, considerablemente menor que  $t_{rp}$ . Enviando este impulso así procesado  $y(t)$  a la entrada del DAC, que se caracteriza por una atenuación  $A_d$  de 6 dB y un retardo  $\tau_d$  de 50 ns, resultan los dos puntos de cruce en el

**Tabla 1 – Prestaciones del sistema de norma 1 en presencia de ruido térmico**

	Nave-estación	Estación-nave
Potencia transmitida (dBm)	57	57
Potencia recibida en rodadura (dBm)	-67	-73
Factor de ruido (dB)	6	9
Relación señal/ruido (dB)	39	30
Error por ruido térmico y CMN (m)	4	12

**Tabla 2 — Prestaciones del sistema de norma 2 basado en DPS en presencia de ruido térmico**

	Nave-estación	Estación-nave
Potencia transmitida (dBm)	57	57
Potencia recibida a 2,5 millas (dBm)	-53	-52
Factor de ruido (dB)	6	9
Relación señal/ruido (dB)	40,5	38,5
Error por ruido térmico y CMN (m)	3	4

Los cálculos suponen que el filtro DPS atenúa 13,5 dB la señal útil y reduce el ancho de banda equivalente en ruido en el receptor, de 3,5 a 2,8 MHz.

21,4% y 10,7%, lo cual cae bien dentro del tiempo de subida parcial de  $y(t)$ .

Para evaluar el resultado de este diseño del sistema hay que considerar en primer lugar el error de trayectoria debido al camino especular, como se ha representado en el diagrama de ojos de la figura 3 (curva B), el cual demuestra que los ecos retardados en más de unos 200 ns no producen ningún error, y que el error máximo es de unos 4 m para un  $\tau_e$  de 40 ns y  $\rho_e$  de -3 dB.

Las condiciones más desfavorables para los efectos del ruido térmico se dan a una distancia de 2,5 millas náuticas del respondedor. En tales circunstancias los resultados del sistema basado en la técnica DPS son los dados en la tabla 2, que están dentro de los límites de precisión establecidos en la norma 2 para despegues y aterrizajes verticales. Así, pues, la técnica DPS ofrece un medio atractivo para el acertado diseño de sistemas según la norma 2.

### Técnica DPS con proceso en banda base

La técnica DPS requiere dos filtros de modelado,  $A(f)$  en emisión y  $A'(f)$  en recepción, colocados en la parte lineal del sistema de transmisión<sup>2,3</sup>. Sin embargo, es importante investigar la factibilidad de situar el filtro  $A'(f)$  a la salida del demodulador de amplitud, en la sección de banda base del receptor. Si dicha disposición logra la misma reducción del error por trayecto especular, la prestación global del sistema habrá mejorado sin duda, por haberse reducido la influencia de la interferencia desde los canales adyacentes. Además, es más claramente compatible con las especificaciones SARP.

Por estas razones, se calcularon numéricamente los errores debidos a trayecto especular en un sistema con filtrado DPS en banda base, siguiendo el modelo de eco

usual. Los diagramas de ojos resultantes se parecieron mucho a los del filtro receptor DPS en frecuencia intermedia: nuevamente se obtuvo un error máximo por eco de 4 m en un sentido, cumpliendo la precisión de la norma 2.

También se construyó un montaje experimental para la validación del sistema: un transmisor genera impulsos de RF que se envían a dos canales para producir las señales directa y de trayecto múltiple con amplitudes, fases y retardos relativos ajustables. Estas dos señales se suman y se presentan al receptor y a los procesadores siguientes. La envolvente del impulso transmitido tiene un tiempo de subida de 2,1  $\mu$ s y no es exactamente la definida por el AWOP, pero es satisfactoria a efectos de validación. Los subsistemas de RF usados en el montaje experimental se describen en otro lugar de este número<sup>8</sup>. El filtro DPS, con una atenuación de la señal de 18 dB, modela el impulso en banda base para lograr un tiempo de subida parcial de 220 ns. Le sigue el DAC, que tiene una atenuación de 16 dB y un retardo de 325 ns. La figura 4 ilustra los resultados de las medidas. Las curvas de diferente color representan los errores teóricos debidos a señales de trayectos múltiples con amplitudes relativas de -6 dB, -3 dB, y 0 dB. Los puntos marcados corresponden a medidas en presencia de tales señales con amplitudes relativas -6 dB (+), -3 dB (x) y 0 dB (o). Los resultados medidos concuerdan bien con los cálculos teóricos.

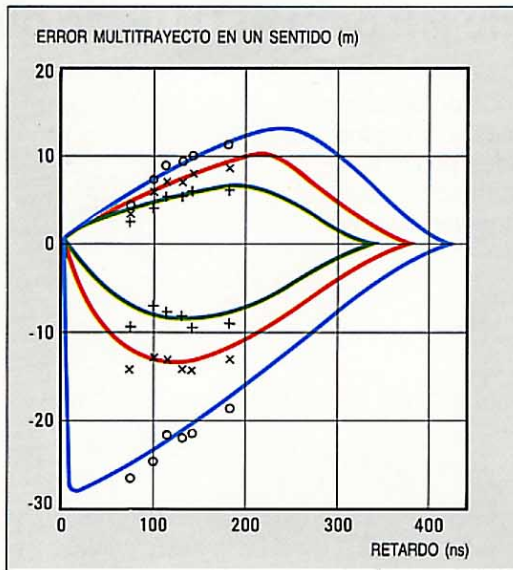
### Conclusiones

Recientes investigaciones han tratado de determinar cómo puede usarse la técnica DPS en el marco del nuevo sistema DME de precisión, concluyendo que es aplicable a este sistema y posiblemente le incorpora posibilidades para expansión. En particular, se necesita procesar la señal para conseguir la precisión fijada en la norma 2, y esto se ha demostrado ser viable con un sistema basado en DPS. Finalmente, el DPS puede también realizarse colocando el filtro receptor en banda base, con la ventaja de un menor coste y unos buenos resultados.

### Agradecimiento

Los autores desean agradecer a la dirección técnica del programa del CNR "Aiuti alla Navigazione Aerea e ATC", y especialmente al prof. F. Valdoni y prof. M. Carnevale, el valioso apoyo prestado durante su investigación. El prof. G. Falciasecca también ha aportado análisis y consejos útiles.

**Figura 4**  
Comparación entre los errores multi trayecto teóricos y los resultados experimentales. La curva verde representa el error teórico en presencia de una señal múltiple de amplitud relativa  $-6$  dB. Los puntos  $+$  indican las medidas correspondientes. La curva roja y puntos  $x$ , lo mismo para  $-3$  dB, y la curva azul y puntos  $o$  corresponden a la amplitud de  $0$  dB.



#### Referencias

- 1 M. Carnevale: The Italian Proposal for DME/M System, presented to AWOP, Precision DME System Concept and Analysis Subgroup, Amsterdam, enero 1981.
- 2 F. Chiarini, M. Gori, G. Corazza y G. Falciasacca: DME de precisión para sistemas de aterrizaje por microondas: *Comunicaciones Eléctricas*, 1980, volumen 55, n° 4, págs. 292–303.
- 3 F. Chiarini, G. Corazza, G. Falciasacca, M. Gori y F. Vatalaro: A New Technique for the Precision DME of Microwave Landing System. *Alta Frecuencia*, 1982, volumen LI, n° 5, págs. 242–256.

- 4 Report of AWOP-9 Meeting. Montreal, 23 noviembre–8 diciembre 1982.
- 5 R. J. Kelly y G. Jensen: DME/P: the New International Standard: Position Location and Navigation Symposium, Atlantic City, Nueva Jersey, 6 diciembre, 1982.
- 6 F. Chiarini, G. Corazza, G. Falciasacca y F. Vatalaro: False Alarms in Time-of-Arrival Estimators. *Alta Frecuencia*, 1983, volumen LII, n° 5, págs. 429–438.
- 7 M. Carnevale: The Thermal Noise Contribution to the Instrumentation CMN; AWOP WG-M-7, WP-21, Roma, 13–24 septiembre, 1982.
- 8 F. Ardemagni, P. Basile, A. Clementi: Subsistemas de RF para el DME de precisión: *Comunicaciones Eléctricas*, 1984, volumen 58, n° 3, págs. 310–313 (en este número).

**Giorgio Corazza** nació en Bolonia en 1946. Se doctoró en ingeniería electrónica por la Universidad de Bolonia en 1969, y a continuación se incorporó como profesor ayudante al Instituto de Electrónica de dicha Universidad. De 1974 a 1976 fue profesor adjunto de circuitos digitales y de impulsos. A partir de 1977 ha sido profesor adjunto y lector de comunicaciones eléctricas, especializándose en sistemas digitales y ayudas a la navegación. El Dr. Corazza en miembro de la Asociación Eléctrica Italiana y del IEEE.

**Francesco Vatalaro** nació en Vibo Valentia en 1953. Se doctoró en ingeniería electrónica por la Universidad de Bolonia en 1977 y luego se incorporó al centro de investigación de la Fundación Bordonni en Pontecchio Marconi. En 1980 pasó a FACE Standard para trabajar en la definición y desarrollo del equipo DME/P. Actualmente se ocupa de la recepción de las señales de difusión de televisión por satélite. El Dr. Vatalaro es miembro de la Asociación Eléctrica Italiana.

# Subsistemas de RF para el DME de precisión

Se han combinado métodos de diseño y tecnología de componentes avanzados para conseguir subunidades de RF compactas, con elevadas prestaciones, para el equipo de medida de distancias de precisión.

**F. Ardemagni**

**P. Basile**

**A. Clementi**

Laboratorio Centrale Industrie FACE  
Standard SpA, Pomezia, Italia

## Introducción

Desde 1977 FACE está involucrada en un programa de investigación patrocinado por el Consejo de Investigación Nacional Italiano para definir un equipo de precisión para medida de distancias (DME/P) en la banda L, que tendrá aceptación en organismos internacionales tales como la OACI.

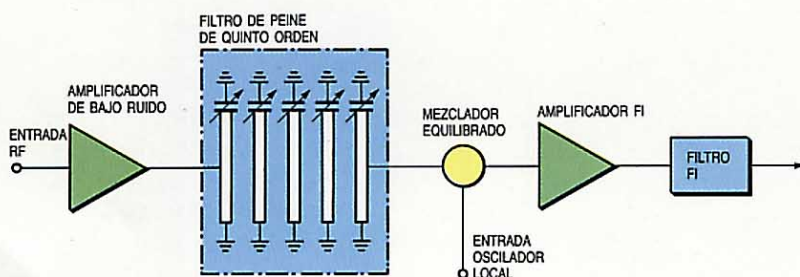
Continuando un informe original en *Comunicaciones Eléctricas*<sup>1</sup>, se han realizado<sup>2</sup> más estudios teóricos y simulación de equipo. En el Centro de Investigación de FACE se han desarrollado varios subsistemas en la banda L para una completa evaluación del sistema, que incluye simulación del interrogador de a bordo. La tecnología avanzada, a base de circuitos integrados de microondas en sustrato blando de alta permitividad, se ha combinado con técnicas de diseño asistido por ordenador para lograr un desarrollo acorde con el estado del arte.

## Paso de entrada de bajo ruido

Para simulación del equipo terrestre DME/P se consideró apropiada la operación de un paso de entrada con bajo nivel de ruido y sintonización mecánica. Sus características principales son:

Banda de frecuencia	1025 a 1150 MHz
Factor de ruido	3,5 dB máximo

**Figura 1**  
Paso de entrada de bajo ruido, con sintonía mecánica.

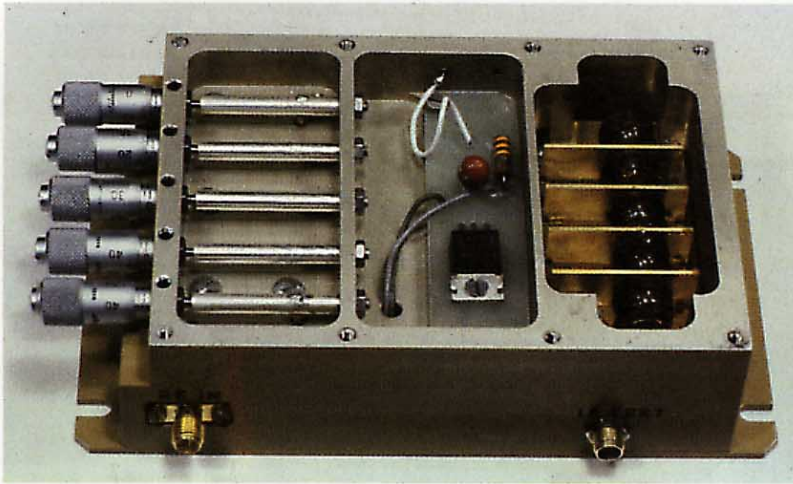


Ganancia total	20 dB mínimo
Rechazo imagen	80 dB mínimo
Nivel de entrada FI	-10 dBm máximo
Anchura de banda de la FI	63 MHz
	3,5 MHz (3 dB).

Según la figura 1, el subsistema se compone de un amplificador de bajo ruido bipolar de dos etapas, acoplado directamente a un filtro en forma de peine de quinto orden. Le sigue un mezclador equilibrado con diodo Schottky y un preamplificador de FI para la primera conversión de frecuencia, y un filtro de FI de elevada pendiente con características adecuadas para satisfacer las exigencias del sistema. La señal del oscilador local se genera mediante un sintetizador de frecuencia externo.

Se ha realizado un paso de entrada compacto utilizando montaje en multicaja, con el filtro de peine relativamente grande situado bajo el circuito RF de capa fina. Las conexiones al filtro se hacen por enlaces coaxiales a través de la pared de separación.

Para reducir al mínimo su tamaño, el mezclador y amplificador de bajo ruido se han realizado en técnica microlínea sobre un sustrato blando de alta permitividad, basado en teflón. El filtro de rechazo de imagen de quinto orden utiliza una línea coaxial, debido a la alta  $Q_0$  sin carga que necesitan los resonadores para conseguir el mínimo rechazo de 80 dB especificado. Se eligió la configuración de peine por su compactidad y la conveniencia de situar todos los condensadores ajustables a un lado de la estructura, facilitando así su integración en el montaje completo. Ajustando unos tornillos micrométricos a las posiciones dadas en una hoja de calibración, se consigue la sintonización a una frecuencia central  $f_0$  requerida. El extremo abierto de cada tornillo forma un condensador de placas paralelas con su resonador cilíndrico opuesto.

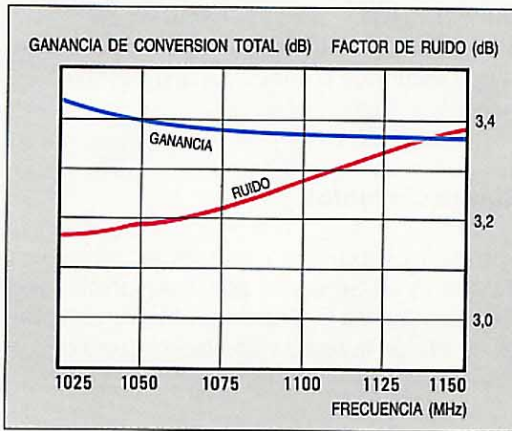


**Paso de entrada de bajo ruido y sintonía mecánica.**

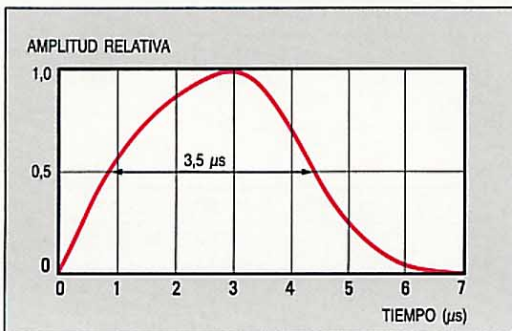
Los puntos críticos del diseño han tenido sobre todo relación con el acoplamiento directo entre el amplificador de bajo ruido y alta ganancia y el filtro, fuente de inestabilidad a las frecuencias más bajas. Por esta razón, se ha utilizado un programa de diseño asistido por ordenador<sup>3</sup> para optimizar las redes de adaptación entrada-salida y analizar la estabilidad del amplificador cuando está terminado con cargas altamente reflexivas.

Este programa de diseño sirvió también para analizar la posición óptima para la derivación de las líneas de entrada y salida a los resonadores primero y último del filtro.

**Figura 2**  
Factor de ruido y ganancia de conversión del paso de entrada completo.



**Figura 3**  
Envolvente de salida impulsos de salida del transmisor.



Hubo que hacer algunos ajustes experimentales en el posicionado mecánico de dichas líneas de entrada/salida, a fin de reducir la excitación de los modos de guíaonda y el acoplamiento no deseado dentro de la caja. No se consiguieron mejoras significativas en la pérdida de conversión del mezclador al variar la longitud de su línea de entrada, en un intento para recuperar la potencia de la frecuencia imagen.

La figura 2 muestra el factor de ruido y la ganancia total de conversión en el margen completo de sintonización (tomada a la frecuencia central instantánea  $f_0$ ).

**Tabla 1 — Objetivos de diseño**

	A bordo	Terrestre
Potencia de pico de salida	700 W	200 W
Banda de frecuencia	1025 a 1150 MHz	960 a 1215 MHz
Ganancia	≥ 48 dB	≥ 43 dB
Anchura del impulso (al 50%)	3,5 μs	3,5 μs
Ciclo de trabajo	0,1%	5%
Forma del impulso de salida	Ver fig. 3	Ver fig. 3
Eficiencia	≥ 20%	≥ 20%
Relación de onda estacionaria de la tensión de entrada	≤ 1,5	≤ 1,5

**Transmisores de alta potencia**

Tanto para el equipo de tierra como para el de a bordo se han diseñado transmisores de estado sólido. Las principales diferencias entre ellos son la anchura de banda, potencia de pico y ciclo de trabajo; en la tabla 1 se resumen los objetivos de diseño. La filosofía general utilizada sigue los bien experimentados diseños de Graziani<sup>4</sup>, adoptados para los equipos DME producidos por FACE durante muchos años. La forma de onda de modulación está compuesta por un impulso pedestal adecuado más un impulso que tiene la forma de modulación verdadera, en este caso no Gaussiana sino como se indica en la figura 3. Aunque esta forma de onda difiere ligeramente de la especificada por la OACI, se considera adecuada para fines experimentales.

Cada amplificador de RF consta de tres bloques principales: un preamplificador, un excitador modulado con un impulso preformado para lograr la forma de onda requerida, y un amplificador de potencia pseudo-lineal. Como ejemplo, en la figura 4 se observa el diagrama de bloques del transmisor de a bordo. Se ha utilizado amplia-



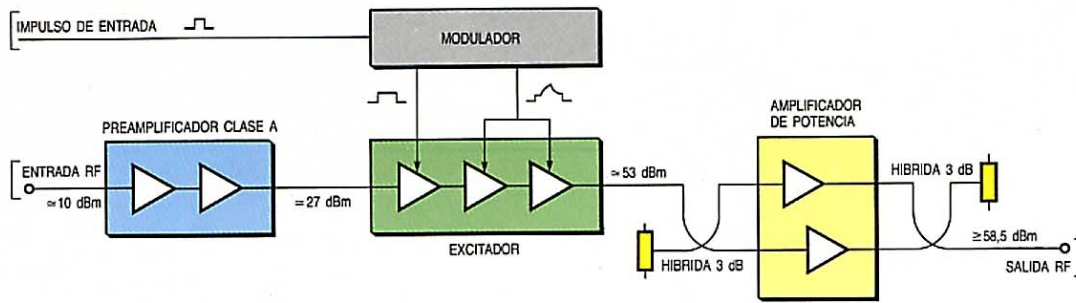


Figura 4 Diagrama de bloques del transmisor de a bordo.

mente el diseño por ordenador para los amplificadores de RF, tanto en tierra como a bordo. Como demostración de la metodología, se describe en los siguientes párrafos el transmisor de a bordo.

El preamplificador clase AB se diseñó por el método de los parámetros S, a pesar de que esto conllevara cierta falta de linealidad, que se aceptó dadas las pequeñas variaciones de la matriz S medidas a los niveles de potencia en funcionamiento. Los parámetros de los transistores se obtuvieron por medio de un analizador automático de la red en la banda de frecuencias requerida, y se procesaron para seleccionar unas características de adaptación entrada/salida que combinaran una relación de onda estacionaria plana en la tensión de entrada con una compensación reductora de la ganancia.

Para lograr el máximo aplanamiento y estabilidad, se efectuó una optimización final en la anchura total de la banda. Naturalmente, no puede seguirse este método lineal para las características de las etapas amplificadoras clase C pulsadas que forman el excitador y la salida final. En este caso, cada transistor se insertó en un montaje especial con un par de sintonizadores de entrada/salida, y se alimentó con la potencia nominal de entrada a una frecuencia fijada  $f_x$ . Se ajustaron luego los sintonizadores para mínima reflexión y máxima ganancia. Los coeficientes de reflexión óptima  $G_{opt}(f_x)$  y  $L_{opt}(f_x)$  se determinaron retirando el transistor para mirar desde los planos de referencia adecuados hacia el generador y la carga, con un analizador de red de baja potencia, a la misma frecuencia  $f_x$ . La repetición del procedimiento para varias frecuencias dentro del margen de interés, condujo a una caracterización total del transistor. La secuencia completa de funcionamiento, excepto el ajuste del sintonizador, se realizó en un banco de prueba automático controlado por un microordenador. Una particularidad importante de este montaje experimental es que permite conseguir una gran cantidad de datos relacionados, tales como comportamiento del transmisor cuando se varían polarización, potencia de pico, o ciclo de trabajo.

Una vez evaluados enteramente los componentes activos, se dedujeron redes adecuadas para adaptación interetapas y entrada/salida, por medio de técnicas de diseño asistidas por ordenador, con la misma metodología descrita para el preamplificador. En la figura 5 se observa la variación de la potencia de pico de salida del transmisor con la frecuencia.

En las fotografías incluidas se muestran el transmisor de a bordo y el amplificador banda L para el equipo terrestre. La diferencia principal entre los dos equipos radica en el modulador; en el equipo de tierra las señales de vídeo pulsadas se llevan a los transistores de RF por conexiones a través de la pared común del módulo en doble caja.

Todas las etapas del circuito, excepto la etapa final equilibrada del equipo de a bordo, están colocadas transversalmente. Esta solución ha demostrado ser compacta, y permite un fácil acceso para la prueba final.

Como en el paso de entrada descrito anteriormente, todos los circuitos de RF se han construido utilizando técnica microlínea sobre sustratos blandos de alta permitividad.

### Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a P. Monti y G. Selvazzo por el desarrollo del sintetizador, y a F. Cecchini y M. Caruso por su ayuda en la realización del circuito de capa fina.

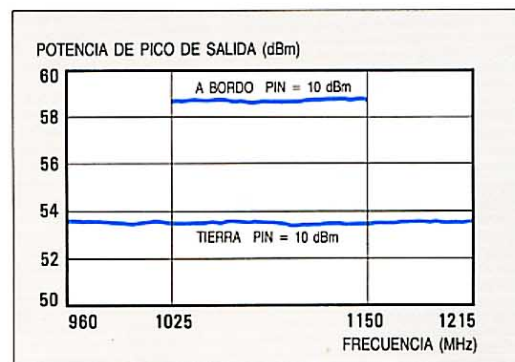


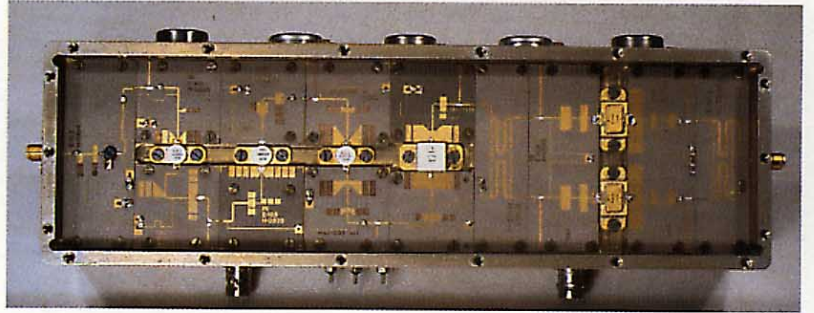
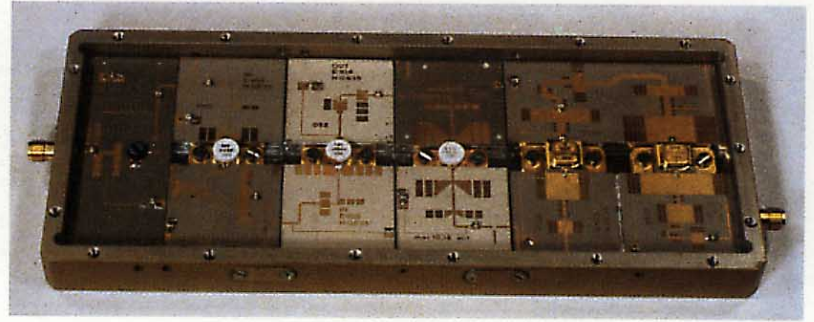
Figura 5 Potencia de pico de salida del transmisor en función de la frecuencia.

## Referencias

- 1 F. Chiarini, M. Gori, G. Corazza y G. Falciasecca: DME de precisión para sistemas de aterrizaje por microondas: *Comunicaciones Eléctricas*, 1980, volumen 55, n° 4, págs. 292–303.
- 2 G. Corazza y F. Vatalaro: Últimos desarrollos de la técnica DPS para DME/P: *Comunicaciones Eléctricas*, 1983, volumen 58, n° 3, págs. 305–309 (en este número).
- 3 COMPACT User Manual, versión 5.1, agosto 1979, Comsat General Integrated Systems, 1131 San Antonio Road, Palo Alto, California 94303.
- 4 D. Graziani: Amplificadores de estado sólido para radiotaras DME: *Comunicaciones Eléctricas*, 1975, volumen 50, n° 4, págs. 299–303.
- 5 AMPSYN™ User Manual, versión 1.1, julio 1978, Comsat General Integrated Systems, 1131 San Antonio Road, Palo Alto, California 94303.

**Fiorenzo Ardemagni** nació en Milán, en 1945. Estudió telecomunicaciones en el Istituto Radiotecnico A. Beltrami de dicha ciudad, graduándose en 1964. Seguidamente trabajó en GTE Telecomunicazioni, Telettra y Selenia, en el campo de las microondas. En 1976 obtuvo el doctorado en Físicas por la Universidad de Milán, y en 1979 ingresó en FACE Standard, donde creó el departamento de microondas que ahora dirige. El Dr. Ardemagni es miembro del IEEE.

**Piero Basile** nació en 1948, en Pescara (Italia). En 1975 se doctoró en ingeniería electrónica por la Universidad de Roma, e ingresó en GTE Telecomunicazioni. Tras cierto período en SIT Siemens, volvió a GTE para trabajar en el diseño de subsistemas de microondas. Desde 1980 trabaja en FACE Standard, diseñando subsistemas de RF para el DME de precisión, y más recientemente como ingeniero del proyecto de receptores terminales para el satélite de radiodifusión directa. El Dr. Basile es miembro de la Asociación Eléctrica Italiana.



**Transmisor de a bordo (arriba), y amplificador de banda L para equipo terrestre (abajo).**

**Armando Clementi** nació en Roma, en 1951. Se doctoró en ingeniería electrónica por la Universidad de aquella ciudad en 1977, ingresando en Litton Italia para trabajar en sistemas militares. En 1978 entró en el centro de investigación de FACE Standard, donde se ha dedicado al diseño de subsistemas de microondas para radio-aeronáutica y, más recientemente, a la ingeniería del proyecto de un sistema de comunicaciones móviles.

# Giróscopo de fibra óptica

Se están desarrollando giróscopos de fibra óptica para utilizarse en los sistemas inerciales de navegación como sensores de rotación de fijación directa. En esta aplicación, los principales requisitos son la baja deriva y la posibilidad de gran velocidad angular.

**W. Auch**

**E. Schlemper**

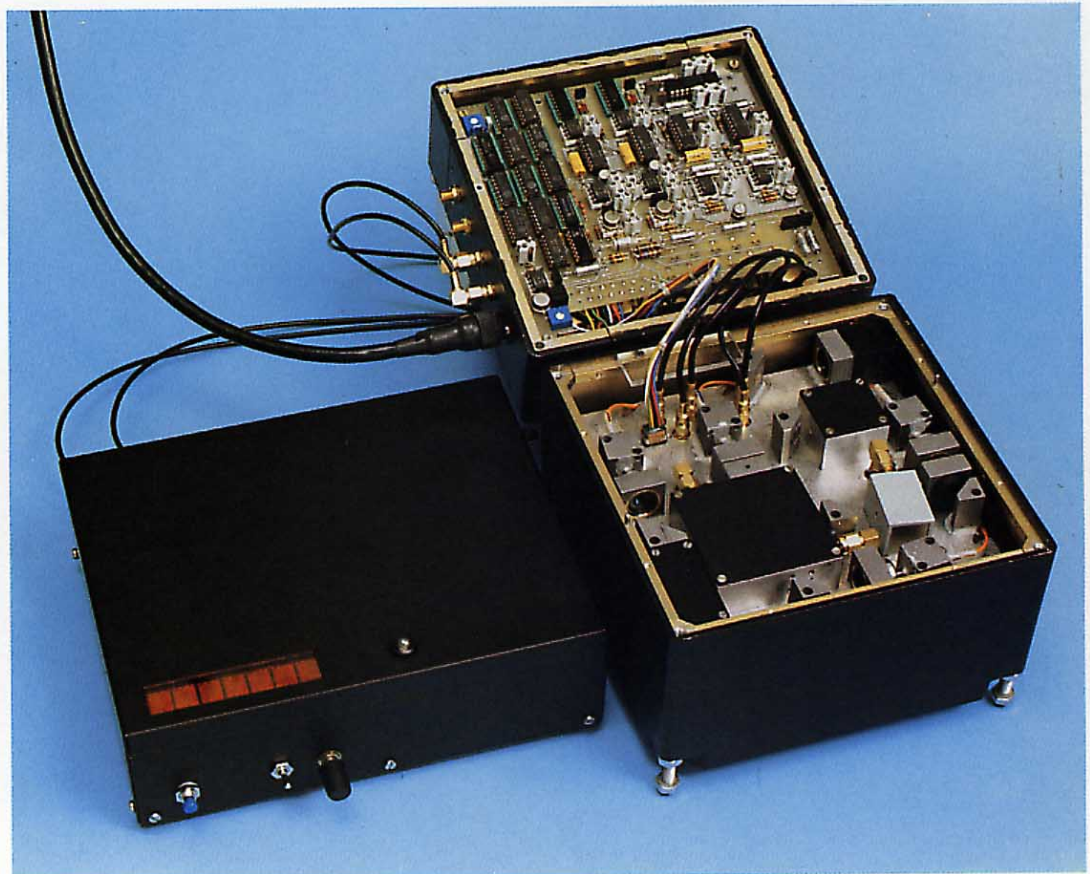
Standard Elektrik Lorenz AG, Stuttgart,  
República Federal de Alemania

## Introducción

En 1850, dos años después de su famoso experimento del péndulo, Foucault usó por primera vez una masa rotatoria exenta de movimiento lineal para demostrar la rotación de la tierra. En las siguientes décadas, el desarrollo de giróscopos de volante giratorio fue muy influenciado por las exigencias de estabilización, orientación y navegación de barcos, vehículos y aviones. Así, hoy día existen muchos giróscopos miniatura convencionales, algunos de los cuales alcanzan precisiones apenas creíbles. No obstante, continúa la búsqueda de alternativas no mecánicas.

Que pueda saberse, se están investigando unos 10 tipos de sensores de velocidad de rotación no mecánicos en varios laboratorios. Entre ellos, el giróscopo de resonancia nuclear magnética, el equipo de determinación de rotación absoluta por superconductividad y distintos giróscopos ópticos.

Los fabricantes sueñan con sensores de alta fiabilidad, simplicidad, fácil fabricación y bajo coste, y ello motiva vigorosamente la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías de giróscopos. Las soluciones no mecánicas pretenden además dar al usuario un giróscopo que combine baja deriva con gran margen dinámico, el cual se denomina sensor de fijación directa.



Modelo de un giróscopo de fibra óptica de SEL.

**Giróscopos ópticos**

Los giróscopos de fijación son sensores robustos y de altas prestaciones, que pueden instalarse directamente (sin suspensión) en un vehículo y deben ser capaces de operar en condiciones adversas sobre un amplio margen dinámico. La principal ventaja de estos sensores inerciales es que pueden a la vez facilitar datos para navegación, rumbo, altitud, o cualquier otra función que requiera información inercial.

Una tecnología muy prometedora para uso en entornos hostiles es el giróscopo óptico. Por su principio, este tipo de giróscopo no está sujeto a las limitaciones que afectan a los giróscopos mecánicos con sus masas giratorias, a grandes velocidades angulares y extenso margen dinámico. El giróscopo activo de anillo láser, basado en un láser de helio-neón, está ya en producción.

En contraste con el de anillo láser, el giróscopo de fibra óptica está en una etapa primaria de desarrollo. No obstante, es capaz de convertirse en el primer giróscopo óptico de estado sólido de bajo coste, gracias al uso generalizado de componentes ópticos y tecnologías de comunicaciones ópticas (láseres de semiconductor, diodos fotoemisores, fibras ópticas, detectores, óptica integrada). El importante esfuerzo y los millones de dólares que en todo el mundo se están invirtiendo en el campo de comunicaciones ópticas deberían allanar el camino para la producción económica de un giróscopo de fibra óptica. Además, este giróscopo no presenta el efecto de enganche, que impide al giróscopo de anillo láser trabajar a velocidad de rotación inferior a un determinado umbral, a menos que se le hagan modificaciones costosas.

**Efecto Sagnac**

Como el fundamento de los giróscopos de fibra óptica se ha descrito con detalle en otras publicaciones<sup>1 a 8</sup>, daremos aquí sólo un resumen del mismo. Este giróscopo está basado en un interferómetro Sagnac (Fig. 1), descrito por primera vez en 1913. La rotación del interferómetro alrededor de un eje ortogonal al plano de propagación de la luz, induce un desplazamiento de fase  $\Delta\Phi_s$  entre los rayos de luz que se propagan en dirección opuesta:

$$\Delta\Phi_s = \frac{8\pi A}{\lambda c} \omega \quad (1)$$

donde

$\omega$  — velocidad angular de rotación

$\lambda$  — longitud de onda en el espacio libre

$c$  — velocidad de la luz en el espacio libre

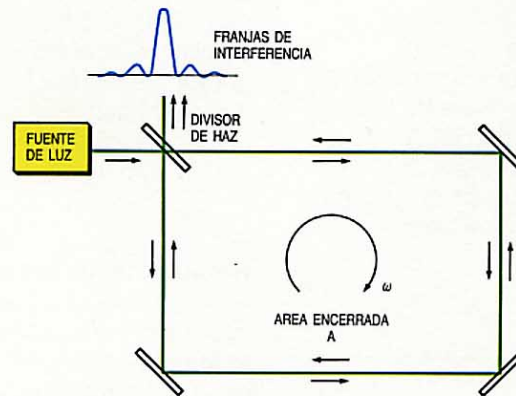
$A$  — área efectiva del interferómetro.

Con la aparición de las fibras monomodo se hace posible encerrar un área efectiva grande en un pequeño espacio, acoplado ondas de luz que se propagan en dirección opuesta en una fibra óptica (de longitud  $L$ ) arrollada sobre una bobina cilíndrica de radio  $R$ . En este caso la ecuación (1) se convierte en:

$$\Delta\Phi_s = \frac{4\pi RL}{\lambda c} \omega. \quad (2)$$

En un diseño típico con  $L = 1$  km,  $R = 70$  mm y  $\lambda = 850$  nm, el desplazamiento de fase por efecto Sagnac  $\Delta\Phi_s$  varía entre 0,001 y 1000° para velocidades angulares de rotación  $\omega$  entre 1° por hora y 300° por segundo, respectivamente.

En cualquier giróscopo pasivo con láser es problemática la lectura de la fase de Sagnac  $\Delta\Phi_s$ . La diferencia de fase entre las ondas de propagación opuesta se mide como un cambio cosenoidal de intensidad



**Figura 1**  
**Interferómetro tipo Sagnac.**

$I = I_0 (1 + \cos \Delta\Phi_s)$ , dando así una salida ambigua cuando  $\omega$  exceda de unos 50° por segundo en el ejemplo anterior.

Diversos grupos dedicados a investigar sobre giróscopos de fibra óptica han elaborado directrices para el diseño de un dispositivo práctico, las cuales se resumen en la llamada "arquitectura mínima", y son comúnmente aceptadas. De acuerdo con esta arquitectura mínima, dicho dispositivo debe tener:

- construcción recíproca, para asegurar que las ondas propagadas en sentidos opuestos viajen exactamente por el mismo camino
- medios para estabilizar o aleatorizar la polarización
- técnicas de modulación no recíprocas, para conseguir lecturas en CA con objeto de eliminar el ruido de baja frecuencia y la deriva asociados con los detectores y la electrónica

- bucle de compensación de fase que garantice una lectura lineal y no ambigua sobre la velocidad angular que dé más problemas.

**Concepto**

La figura 2 muestra la configuración que se desarrolla en Standard Elektrik Lorenz. El rayo del láser pasa por el divisor de haz 1, entra al filtro espacial, y en el divisor de haz 2 se divide en dos ondas coherentes que se propagan en sentidos horario y antihorario. Después de haberse propagado por la fibra, el divisor de haz 2 recombina las ondas de sentidos opuestos, y la señal de interferencia se acopla al detector a través del filtro espacial y el divisor de haz 1. En esta configuración, la reciprocidad de la trayectoria luminosa entera se obtiene por la inserción del divisor de haz 1 y del filtro espacial<sup>9</sup>.

La modulación no recíproca de fase y la compensación de fase requeridas, se introducen mediante los moduladores de frecuencia (células de Bragg 1 y 2)<sup>10</sup>.

En cuanto se desigualan las frecuencias de excitación de las dos células de Bragg, se genera una fase no recíproca  $\Delta\Phi_{Bragg}$  que es proporcional a la diferencia de frecuencias  $\Delta f$  entre las ondas propagadas en sentidos opuestos por la fibra sensora:

$$\Delta\Phi_{Bragg} = 2\pi \frac{nL}{c} \Delta f. \tag{3}$$

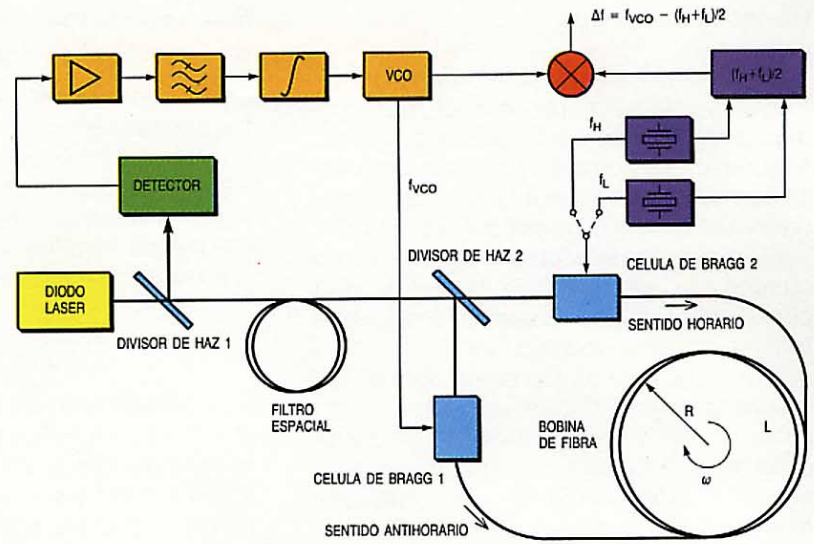
Esta fase no recíproca y ajustable compensa, funcionando en bucle cerrado, la fase de Sagnac  $\Delta\Phi_s$ , dependiente de la rotación, de manera que:

$$\Delta\Phi_s = \Delta\Phi_{Bragg} \text{ o bien,} \tag{4}$$

$$\Delta f = \frac{2R}{n\lambda} \omega.$$

De aquí que, en bucle cerrado, la diferencia de frecuencia entre dos células de Bragg dependa linealmente de la velocidad angular  $\omega$ . Téngase en cuenta la salida pulsada inherente al principio del modulador de frecuencia.

La variación de fase no recíproca y la compensación de fase de este concepto (Fig. 2) puede entenderse fácilmente. La célula de Bragg 2 se conmuta periódicamente entre dos osciladores de frecuencias fijas,  $f_H$  y  $f_L$ . Se elige una diferencia  $f_H - f_L$  que produzca una fase no recíproca  $\Delta\Phi_{Bragg} = \pi$  de acuerdo con la ecuación (3). Sin rotación y en funcionamiento en bucle cerrado, la frecuencia de salida  $f_{VCO}$  del oscilador controlado por voltaje se fija al valor medio  $(f_H + f_L)/2$ , causando así un cambio de fase de  $\pm\pi/2$  (Fig. 3). A la salida



**Figura 2**  
Concepto del giróscopo de fibra óptica que desarrolla Standard Elektrik Lorenz VCO - oscilador controlado por voltaje.

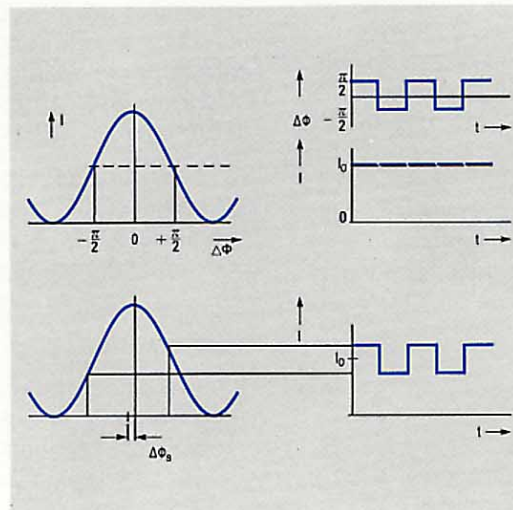
del fotodetector se obtiene una señal en CC.

Al rotar el giróscopo de fibra óptica, la desviación de fase de Sagnac  $\Delta\Phi_s$  produce un cambio de fase no simétrico, excitando una señal de CA en el fotodetector. El amplificador, el filtro paso banda y el integrador, desplazan la frecuencia de salida del VCO hasta que tal señal de CA desaparezca. Por tanto,  $\Delta f = f_{VCO} - (f_H + f_L)/2$  resulta directamente proporcional a  $\omega$ .

**Resultados de las pruebas**

El principio del giróscopo de fibra óptica expuesto en la figura 2 se ha probado exhaustivamente durante el último año en tres montajes experimentales. En la tabla 1 se resumen los parámetros geométricos y los factores de escala de estos modelos.

En la figura 4 se muestra el ruido a corto plazo de las señales de salida de los tres interferómetros, operando en bucle abierto.



**Figura 3**  
Lectura del giróscopo de fibra óptica.

Las medidas se tomaron en bucle abierto para obtener valores de ruido no influenciados por el diseño del bucle de control de anulación de fase. Dichos valores se midieron con un tiempo de integración de 125 ms, que corresponde a una banda de 1 Hz para las características del filtro del amplificador de enganche de fase.

La densidad del ruido de los modelos de diodo láser de 850 nm se compara ventajosamente con el láser de helio-neón. Las numerosas medidas de ruido con la versión de helio-neón demostraron que la principal fuente de ruido era el cambio de frecuencia en sí, en vez del ruido granular, el ruido de amplitud de la fuente misma, o la retrodispersión de Rayleigh de la fibra (la cual se suprime por las diferentes frecuencias de control de las células de Bragg).

Para aplicaciones inerciales, el parámetro requerido es la velocidad integrada de rotación, es decir, el ángulo de rotación. Suponiendo que el ruido blanco sea el factor limitativo para medir la velocidad de rotación, la desviación típica del ángulo de rotación puede calcularse como función del ruido de la señal de velocidad de rotación, medida en una anchura de banda dada. Una densidad de ruido de  $(1^\circ \text{ hora}^{-1})^2 \text{ Hz}^{-1}$  conduce a una desviación típica en el ángulo de rotación de  $0,013^\circ \text{ hora}^{-0,5}$ , la cual varía con la raíz cuadrada del tiempo de integración (excursión errática de ángulo).

Comparando esta desviación típica de  $0,013^\circ$  en el ángulo de rotación con el resultado obtenido respecto a la inestabilidad del nivel de polarización ( $\pm 3^\circ$  por hora, medido en un periodo de 8 horas), se advierte una diferencia de dos órdenes de magnitud, lo cual significa que tal inestabilidad debe reducirse para poder alcanzar mejores resultados de ruido.

### Valoración de los resultados de las pruebas

Cualquier valoración de las características del giróscopo de fibra óptica debe relacionarse con las exigencias futuras de la navegación inercial. Muchas de estas exigencias dependen en gran manera de la aplicación particular. Por ejemplo, los requisitos sobre deriva varían desde unos  $0,02$  hasta  $100^\circ$  por hora.

Una aplicación clásica para el margen de  $5$  a  $100^\circ$  por hora es un arma táctica autónoma. Los giróscopos en los misiles aire-aire con tiempos cortos de vuelo, deben cumplir típicamente los siguientes requisitos: deriva de  $10^\circ$  por hora, excursión errática de  $1^\circ \text{ hora}^{-0,5}$ , frecuencia angular de  $1000^\circ \text{ s}^{-1}$ , y una estabilidad en el factor de escala de  $5 \times 10^{-4}$ . Aunque sea arriesgado

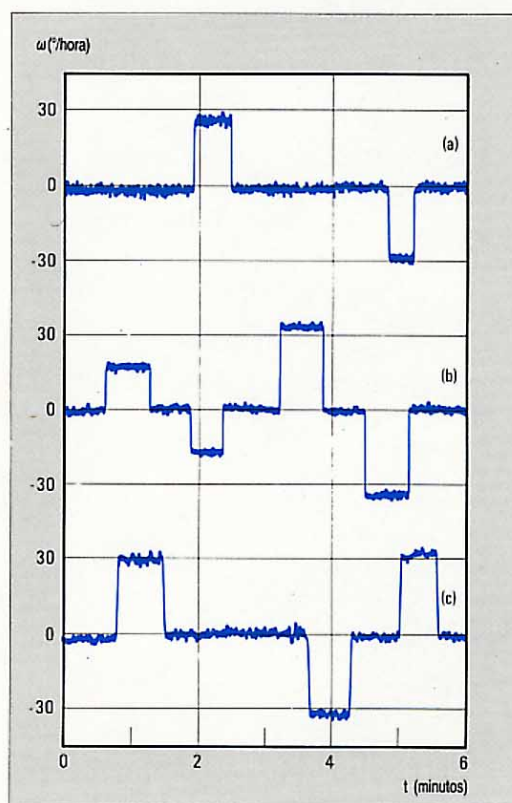
**Tabla 1 — Parámetros geométricos y factores de escala de los modelos de giróscopos probados**

Modelo	(a)	(b)	(c)
	Fibra monomodo estándar		Fibra con conservación de polarización
Longitud de onda $\lambda$	633 nm	855 nm	829 nm
Radio $R$	0,15 m	0,07 m	0,06 m
Longitud $L$	1.180 m	1.055 m	937 m
Factor de escala	1,57 Hz/ $^\circ$ /h	0,54 Hz/ $^\circ$ /h	0,46 Hz/ $^\circ$ /h

comparar resultados de las pruebas de laboratorio con exigencias de la fabricación en serie, hay margen suficiente en los actuales resultados para satisfacer tales condiciones.

Los sistemas de navegación exigen las más elevadas prestaciones. Las precisiones de los giróscopos variarán entre  $0,02$  y unos  $3^\circ$  por hora, dependiendo del tiempo de vuelo. Los giróscopos en un sistema inercial de fijación de 1 milla náutica por hora tienen que presentar una deriva de  $0,02^\circ$  por hora, una excursión errática de  $0,001^\circ \text{ hora}^{-0,5}$ , frecuencia angular de  $500^\circ \text{ s}^{-1}$ , y estabilidad del factor de escala de  $10^{-5}$ .

En la actualidad es difícil predecir con exactitud qué mejoras en deriva pueden lograrse en un futuro próximo. Sin embargo, no debe olvidarse que el análisis de la deriva de los giróscopos de fibra óptica es un área nueva de estudio, que los actuales



**Figura 4**  
Señales de salida en bucle abierto: a) fibra monomodo estándar a 633 nm; b) fibra monomodo estándar a 855 nm, y c) fibra con conservación de polarización a 829 nm.

modelos de prueba permiten distinguir con precisión los orígenes de la deriva, y que los resultados más recientes demuestran ya que pueden alcanzarse frecuencias de deriva de sólo  $\pm 3^\circ$  por hora.

### Conclusiones

Las pruebas iniciales demuestran que se pueden alcanzar en principio unas prestaciones de tipo medio con los giróscopos de fibra óptica. Más allá de esta aplicación, hay indicaciones de que estos giróscopos podrán satisfacer las crecientes exigencias que impone la navegación. En cuanto a margen dinámico y ruido, el giróscopo de fibra óptica opera ya con notable calidad. El margen dinámico no es evidentemente un factor que deba afectar a los giróscopos de fibra óptica con moduladores de frecuencia. Puede decirse que si un vehículo puede hacer frente a la dinámica, el giróscopo puede hacerlo también. Sin embargo, para llegar a ser una opción viable como sensor de fijación en sistemas de navegación inercial, se necesita aún un considerable esfuerzo de desarrollo que mejore el comportamiento en cuanto a la deriva.

### Referencias

- 1 S. Ezekiel y H. J. Arditty: Fiber-Optic Rotation Sensors: *Springer-Verlag*, 1982, Berlín.
- 2 V. Vali y R. W. Shorthill: Fiber Ring Interferometer: *Applied Optics*, 1976, volumen 15, pág. 1099.
- 3 K. Böhm, P. Russer, E. Weidel y R. Ulrich: Low Noise Fiber Optic Rotation Sensing: *Optics Letters*, 1981, volumen 6, pág. 64.

- 4 R. A. Bergh, H. C. Lefèvre y H. J. Shaw: All Single-Mode Fiber Optic Gyroscope: *Optics Letters*, 1981, volumen 6, pág. 198.
- 5 R. F. Cahill y E. Udd: Phase Milling Fiber Optic Laser Gyro: *Optics Letters*, 1979, volumen 4, pág. 93.
- 6 J. L. Davis y S. Ezekiel: Closed Loop, Low-Noise Fiber Optic Rotation Sensor: *Optics Letters*, 1981, volumen 6, pág. 505.
- 7 C. C. Cutler, S. A. Newton y H. J. Shaw: Limitation of Rotation Sensing by Scattering: *Optics Letters*, 1980, volumen 5, pág. 488.
- 8 W. Auch y E. Schlemper: Drift Behaviour of a Fiber-Optic Rotation Sensor Using Polarization Preserving Fiber: *First International Conference on Optical Fibre Sensors: Institution of Electrical Engineers*, 1983, Londres.
- 9 R. Ulrich: Fiber Optic Rotation Sensing with Low Drift: *Optics Letters*, 1980, volumen 5, pág. 173.
- 10 J. L. Davis y S. Ezekiel: Techniques for Shot-Noise-Limited Inertial Rotation Measurement Using a Multi-turn Fiber Sagnac Interferometer: *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrument Engineers*, 1978, volumen 157, pág. 131.

**W. Auch** nació en Waldenbucher, Alemania, en 1949. Se graduó Diplomado en Físicas por la Universidad de Stuttgart en 1977, y Doctor en Ciencias Naturales en 1980 por sus trabajos sobre polarización nuclear por bombeo óptico en sólidos. En 1980 ingresó en SEL como ingeniero de planificación de sistemas. Desde 1982 el Dr. Auch ha dirigido el desarrollo en SEL de giróscopos de fibra óptica. Es miembro de la Optical Society of America.

**Eberhard Schlemper** nació en Erbach, Alemania, en 1945. Se graduó Diplomado Ingeniero en ingeniería eléctrica por la Universidad Técnica de Stuttgart en 1971. El mismo año ingresó en SEL, donde trabajó en el desarrollo de equipos de telemetría y telemando para satélites. El Sr. Schlemper pasó en 1977 al grupo de planificación de sistemas, y ahora es el responsable técnico de la división de electrónica aeronáutica en SEL, que tiene a su cargo el equipo de radio y de navegación autónomo.

# Sistema de posicionado por DME para radionavegación de helicópteros en alta mar

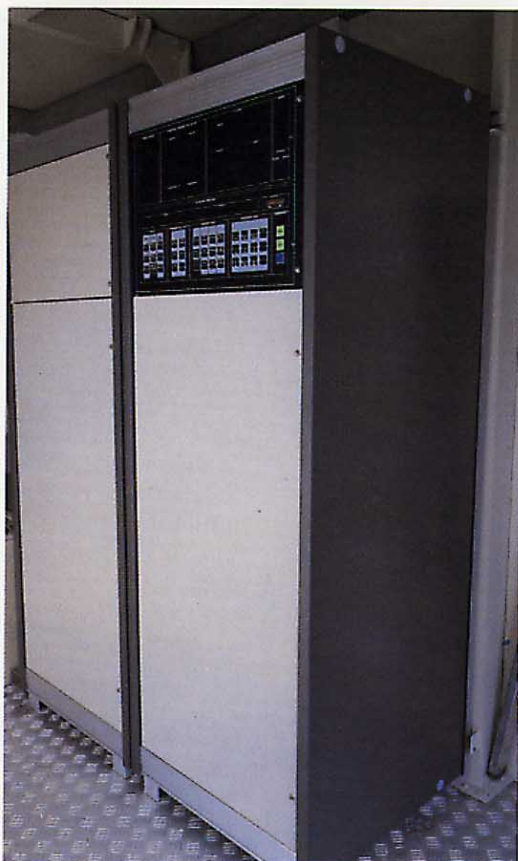
Está en desarrollo un sistema de posicionado basado en DME para operaciones de helicópteros, en cualquier situación meteorológica, en las cercanías de plataformas petrolíferas. El sistema combina experimentadas técnicas DME con una determinación avanzada de ángulo basada en el proceso de las señales de una red de antenas.

**M. Böhm**

Standard Elektrik Lorenz AG, Stuttgart,  
República Federal de Alemania

## Introducción

El abastecimiento aéreo a las plataformas petrolíferas en el duro entorno del Mar del Norte se basa exclusivamente en helicópteros. Aunque la regularidad presente de los vuelos en esa zona alcance al 95%, el constante incremento del tráfico aéreo requiere mejorar la precisión en la navegación, así como los procedimientos de control de tráfico aéreo para, al menos, mantener la seguridad y economía de los vuelos en el futuro.



Equipo electrónico  
DAS.

### Tabla de abreviaturas

DAS	sistema azimutal basado en DME
DME	equipo de medida de distancia
DME/P	DME de precisión
DPS	sistema de posicionado basado en DME
HAS	sistema de aproximación de helicópteros
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
TMA	área terminal de maniobras
VOR	radiofaro omnidireccional en VHF

Deben considerarse cinco fases de vuelo: despegue de la costa, TMA costera, en ruta, TMA de la plataforma, y aterrizaje en la plataforma. Las tres últimas son de particular importancia como manifiestamente mejorables:

- En ruta, con una separación mínima de 25 millas náuticas debido a la limitada precisión del Omega en el Mar del Norte Oriental. Se necesita un sistema más preciso que apoye al Omega o lo sustituya cuando se pierden sus señales.
- La navegación TMA a menudo sigue basándose en balizas no direccionales, con errores azimutales de 5° a 10° y sin información de distancia. Se necesita una información de posición precisa y completa.
- El aterrizaje actual en las plataformas petrolíferas de Noruega se caracteriza por los mínimos de visibilidad fijados (alcance 800 m, altura 200 pies) y por el uso a bordo de un altímetro y radar convencionales. Esta situación podría mejorar extraordinariamente utilizando una ayuda de aterrizaje de categoría IIIc, que permitiría completar casi el 100% de los vuelos.

Para un mejor comportamiento en todas las fases del vuelo, se ha propuesto la aplica-



Tabla 1 — Especificaciones principales de los sistemas DME

Sistema	Tiempo nominal de subida del impulso	Anchura de banda del proceso	Método de activación	Separación de impulsos de interrogación	Separación de impulsos de respuesta	Error máximo del sistema	
						Norma 1	Norma 2
DME/N	2,5 $\mu$ s 10 a 90%	0,5 MHz	HAF	x: 12 $\mu$ s y: 36 $\mu$ s	x: 12 $\mu$ s y: 30 $\mu$ s	370 m ó 0,25% de distancia, la que sea mayor*	
DME/P	IAM 250 ns 5 a 30%	0,5 MHz	HAF	x: 12 $\mu$ s y: 36 $\mu$ s w: 24 $\mu$ s z: 21 $\mu$ s	x: 12 $\mu$ s y: 30 $\mu$ s w: 24 $\mu$ s z: 15 $\mu$ s	250 m a 22 millas n 85 m a 7 millas n	
	FAM 250 ns 5 a 30%	3,5 MHz	LL-DAC	x: 18 $\mu$ s y: 42 $\mu$ s w: 30 $\mu$ s z: 27 $\mu$ s	x: 12 $\mu$ s y: 30 $\mu$ s w: 24 $\mu$ s z: 15 $\mu$ s	85 m a 7 millas n 30 m a 2 millas n	85 m a 7 millas n 12 m a 2 millas n

HAF - buscador de amplitud mitad

LL-DAC - activador de retardo y comparación a bajo nivel

IAM - modo de aproximación inicial activado a más de 7 millas n

FAM - modo de aproximación final, activado a menos de 7 millas n

\* El respondedor DME/N de la estación de tierra DAS para una TMA en alta mar tendrá un error más pequeño, tal que, combinado con el DME/P (IAM) del DAS de a bordo, se consiga un error del sistema inferior a 100 m.

ción de un sistema de posicionado llamado DPS<sup>1</sup>. Este sistema multifuncional de banda L, comprende el actual DME de la OACI, el futuro DME de precisión, el DAS y el HAS (DAS con radiogoniómetro añadido para elevación). El DPS será muy económico y podrá cumplir los presentes y futuros requisitos de una navegación de helicópteros eficiente y segura sobre el mar y la tierra, con una cantidad de equipo a bordo aproximadamente igual que para el DME actual. El DPS es una solución evolucionada que aprovecha la tecnología experimentada del DME (Tabla 1)<sup>2</sup> y evita los riesgos técnicos y económicos de la complejidad.

### Requisitos operacionales futuros<sup>3,4</sup>

#### Navegación en ruta

Debe disponerse de un adecuado método de navegación sobre la ruta entera, bajando hasta 1000 pies sobre el nivel medio del mar. Los requisitos para la navegación en ruta son:

cobertura:  $\geq$  200 millas n  
error de posición:  $\leq$  1 milla n  
capacidad: 20 a 50 aeronaves.

#### Navegación TMA

Los requisitos pueden aquí diferir entre una sola plataforma aislada y un grupo de ellas tales como las de Ekofisk Field, tanto en alcance como en cobertura azimutal. Las exigencias del sistema están gobernadas por el tamaño máximo del área a la que haya de servirse, el número de aviones que utilicen simultáneamente la ayuda de navegación TMA, las futuras necesidades de control de tráfico aéreo y la guía para los servicios de rescate.

El sistema de navegación TMA debe permitir guía simultánea ininterrumpida hasta de 20 helicópteros en condiciones meteorológicas instrumentales. Dentro del área, deberán poderse conducir con seguridad vuelos a lo largo de rutas paralelas y opuestas entre plataformas petrolíferas, con una separación horizontal de 1 a 2 millas n, aproximadamente, y sin necesidad de separación vertical; es esencial la flexibilidad en altura cuando hay heladas en invierno.

La precisión de guía proporcionada por el sistema deberá ser suficiente para evitar obstáculos (instalaciones petrolíferas, chimeneas de gases) a distancias de 0,5 millas n. La aproximación a un helipuerto debe ser segura hasta un punto distante 0,5 millas de la plataforma petrolífera.

La guía deberá cubrir hasta una altura mínima de 200 pies dentro de una zona de 30 millas de diámetro, y hasta 500 pies si el diámetro es de 50 millas. El alcance máximo deberá ser 50 millas para altitudes de 10.000 pies.

Es deseable la transferencia automática de información a cualquier otra aeronave. Si la estación de tierra (plataforma) dispone de los datos de posición del helicóptero, aumentará notablemente la capacidad de control del tráfico aéreo. Finalmente, es también deseable que la guía de navegación llegue hasta el nivel del mar para fines de rescate.

Los requisitos de la navegación TMA son:

Cobertura: alcance  $\geq$  40 millas n  
azimut  $360^\circ$   
elevación  $\geq 20^\circ$  (preferiblemente desde el nivel del mar)

Error de posición:  $\leq 100$  m  
 Capacidad:  $\geq 20$  aeronaves.

Es esencial un sistema monitor adecuado.

**Navegación de aproximación y aterrizaje**  
 Es necesario un aterrizaje de categoría IIIc para lograr regularidad al 100% de los vuelos. Mientras tanto, una solución razonable puede ser un sistema que permita aproximación en condiciones meteorológicas instrumentales hasta el punto de decisión final, a 60 pies aparte y 40 pies por encima de un helipuerto. A partir de aquí, podría hacerse una aproximación estándar en condiciones meteorológicas visuales.

La cobertura viene determinada en gran medida por el procedimiento de aterrizaje. Brevemente, los requisitos son:

- Cobertura: alcance  $\approx 2$  millas n  
 azimut  $\approx 270^\circ$  total  
 elevación  $2^\circ$  a  $20^\circ$  (desde el helipuerto)
- Error de posición: alcance  $\leq 12$  m  
 ángulo error lateral  $\leq 4$  m a 0,1 millas n  
 $\leq 75$  m a 2 millas n
- Capacidad:  $\geq 5$  aeronaves.

También aquí es esencial un monitor adecuado.

**Control de tráfico aéreo**

Si se ha de establecer control de tráfico aéreo en un área de instalaciones petrolíferas, el centro de control debe poder localizar todas las aeronaves dentro de su zona. El modo más sencillo es que la aeronave

informe de la posición, tiempo y altura en puntos de referencia dados, o cuando se le solicite. Un método más conveniente y seguro sería informar de la posición de manera automática y continua, utilizando, por ejemplo, un radar de vigilancia secundario, con cobertura y precisión del mismo orden que las del sistema de navegación.

**DPS: un sistema para navegar en entornos adversos**

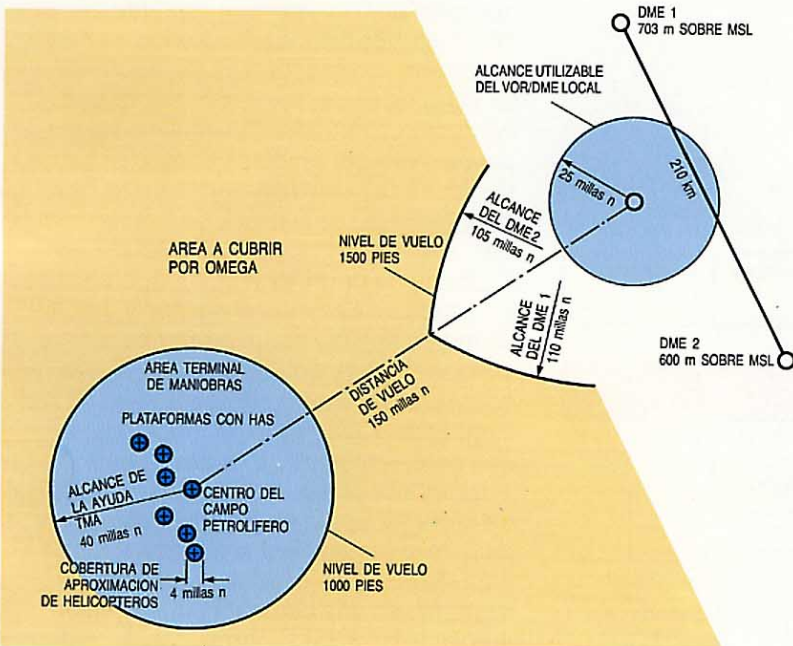
El DPS es un método seguro para atender la mayoría de las exigencias operacionales del futuro. La figura 1 ilustra la cobertura de sus tres subsistemas. Para navegación en ruta se utilizará el conocido sistema de aproximación ro-ro basado en dos DME costeros (DME/N, tabla 1). El DME trabaja en la banda de 962 a 1213 MHz. El interrogador de a bordo transmite pares de impulsos de RF que se reciben en un respondedor de tierra, transmitiendo este último en respuesta a cada interrogación otro par de impulsos de RF. El interrogador de a bordo determina su distancia al respondedor midiendo el tiempo de ida y vuelta de dichos impulsos.

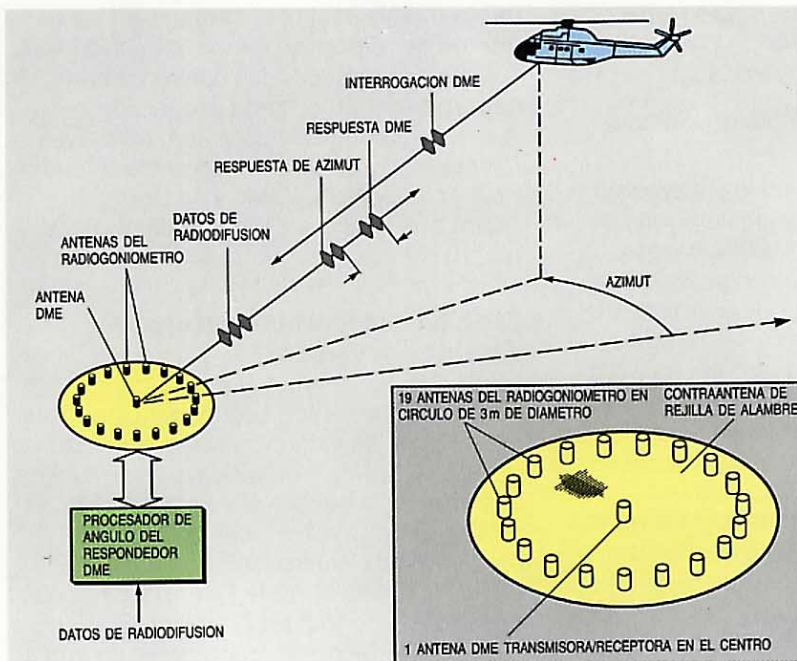
Se requiere una alta precisión del posicionado para operaciones de vuelo en el área terminal de un campo petrolífero. Aquí el DAS daría guía azimutal y medida de distancia de alta precisión, así como datos por radiodifusión, utilizando solamente una estación de tierra. El equipo de a bordo tiene las mismas dimensiones físicas que un DME convencional, pero da también información de azimut y datos operacionales por radiodifusión (Fig. 2).

La parte DME terrestre del DAS cumple las especificaciones del DME/N convencional, pero con precisión acrecentada, mientras que el DME de a bordo satisface los requisitos del nuevo DME/P (Tabla 1). La razón de esta combinación es que la potencia de transmisión admisible del equipo de tierra DME/P no daría el alcance requerido para operaciones TMA. Sin embargo, el equipo de a bordo debe poder operar con todas las estaciones DME terrestres.

El radiogoniómetro DAS es un suplemento de la estación DME de tierra. Las amplitudes y fases relativas de los impulsos de interrogación entrantes se miden utilizando una red de antenas circular, alimentando cada elemento de antena su propio receptor coherente. Las salidas de receptores se digitalizan y se llevan a un procesador rápido, que determina el ángulo de llegada procesando las señales de la red de antenas. El resultado, que es la posición azimutal, se transmite con la respuesta a la aeronave que interroga mediante impulsos

**Figura 1**  
**Cobertura del DPS**  
 (ejemplo para costa montañosa)  
 MSL - nivel medio del mar.



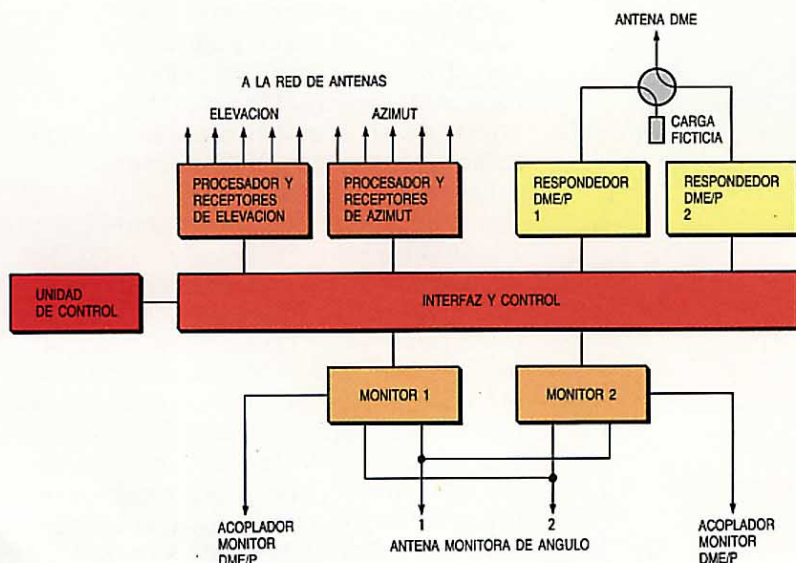


**Figura 2**  
Principio funcional del DAS.

codificados en posición. El tiempo entre la respuesta de distancia y la "respuesta de azimut", también dado por un par de impulsos de RF, es una medida del azimut de la aeronave con respecto al norte geográfico. La longitud de onda, formato de la señal y algoritmos de formación del haz elegidos para el proceso, aseguran una alta protección contra los efectos de trayectorias múltiples.

Un servicio adicional del DAS es la radiodifusión de datos tierra-aire, basada también en impulsos codificados en posición. Cada palabra de datos consta de tres tripletes de impulsos de RF. La información va contenida en la separación del segundo y tercer tripletes, con relación al primero.

**Figura 3**  
Diagrama de bloques del equipo de tierra HAS.



El sistema propuesto para aproximación de helicópteros (HAS) es un derivado del DAS, pero con las siguientes diferencias:

- Menor precisión de medida de ángulo azimutal. Esto puede aceptarse debido al pequeño alcance del HAS (2 millas n).
- Mayor precisión en la medida de distancia utilizando DME/P (Tabla 1).
- Medida adicional de elevación<sup>5</sup>.
- Cobertura horizontal reducida a 270°.
- Potencia del transmisor del respondedor reducida, para operación a pequeños alcances.

El equipo DAS de a bordo necesita un accesorio HAS para decodificar la información de elevación, la cual se transmite por un par adicional de impulsos codificados en posición. El HAS también proporciona datos por radiodifusión. En la figura 3 se da un diagrama de bloques del sistema de tierra.

Los sistemas DME, DAS y HAS se discriminan por canales de RF separados.

### Equipo instalado en la plataforma

El equipo DAS y HAS con base en la plataforma, se derivará de la nueva familia de ayudas a la navegación Sistema 4000 de SEL. El equipo de tierra DAS está alojado en dos armarios de 19 pulgadas. Para el HAS se requiere un armario adicional que aloje el sistema de elevación.

El sistema de antena de la estación de tierra DAS es una red circular, con un elemento central que es la antena transmisora/receptora del respondedor DME. La red circular radiogoniométrica, consistente en 19 elementos equiespaciados, tiene un diámetro de 3 m, que corresponden a 10 longitudes de onda. Todos los elementos de antena son monopolos de cuarto de longitud de onda, montados sobre una contraantena que forma un plano de tierra para el correcto funcionamiento. Esta contraantena para el TMA-DAS en alta mar será una rejilla de alambre de 5 m de diámetro.

La antena del HAS (Fig. 4), que combina las antenas de azimut, elevación y del DME, se monta encima de un cobertizo. Como contraantena puede utilizarse el tejado del cobertizo. La antena de azimut es una red circular de 13 monopolos montada sobre una contraantena de 3 m de diámetro.

La antena de elevación es una red vertical de unos 10 dipolos acortados, con altura total de la parte activa próxima a 2 m. Está montada en el centro de la antena azimutal, en una columna corta, y fijada mediante hilos de sustentación. La antena

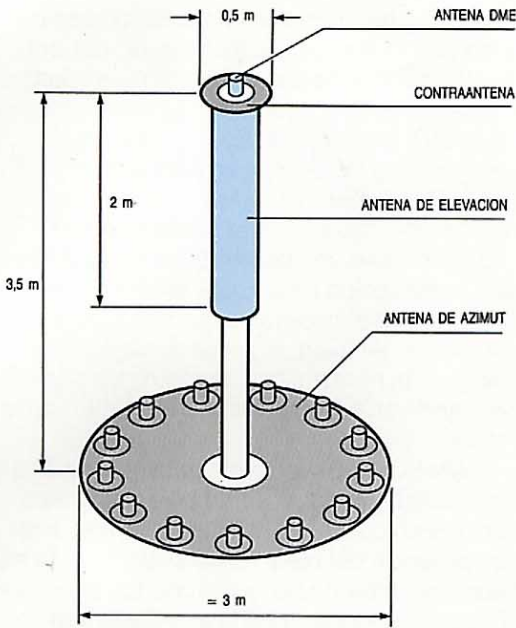


Figura 4 Configuración de la antena HAS.

DME/P es un monopolo con una pequeña contraantena en la parte superior de esta construcción.

Una de las antenas monitoras se colocará en la periferia del helipuerto, la otra en el borde exterior de un lado de la plataforma a distinta altura, permitiendo la prueba de dos azimutes y elevaciones diferentes.

### Equipo de a bordo

El equipo de a bordo DAS es básicamente una unidad DME/P que trabaja en el modo de aproximación inicial, capaz además de decodificar los datos de azimut y de radiodifusión<sup>6</sup>. El equipo (Fig. 5) cumplirá la norma ARINC 709; asimismo, incluirá funciones extra relativas al tratamiento de los datos mencionados.

El equipo está alojado en cuatro unidades modulares, con una unidad extra para el accesorio HAS.

Las instalaciones de a bordo deben de admitir diferentes conceptos de indicación, con o sin sistema de gestión de vuelo o posibilidad de navegación zonal (Fig. 6).

La información DME y la angular DAS pueden manejarse como en el VOR/DME, salvo que debe tenerse en cuenta la mayor precisión del DAS. La información azimutal DAS corresponde a la radial VOR. Los modos de visualizar la indicación de situación horizontal pueden considerarse adecuados para un sistema de aproximación de helicópteros. Son aprovechables todas las ventajas de la capacidad de navegación zonal del sistema de gestión de vuelo.

### Aspectos operacionales

#### Navegación en ruta

Durante la primera fase de vuelo en ruta, el error de la determinación de posición ro-ro disminuye desde elevados valores hasta 300 m. Incluso entonces, no se puede prescindir totalmente del Omega porque, debido a la baja altitud de vuelo de los helicópteros, el alcance no siempre es suficiente para cubrir la distancia a las ayudas de navegación del terminal de alta mar. Durante el corto periodo de vuelo, cuando no hay acceso a otras ayudas de navegación (salvo las basadas en satélites), tiene que utilizarse el Omega.

#### Navegación TMA

Los datos primarios DAS (radial y distancia) pueden presentarse al piloto o llevarse al sistema de gestión de vuelo, donde se tratan de la misma manera que los datos VOR/DME. La precisión incrementada debe utilizarse para aprovechar al máximo las posibilidades del DAS. Los datos de vuelo se presentan al piloto en la pantalla vídeo de situación horizontal, ya sea en modo de orden o de indicación.

La plena explotación de las posibilidades del DAS para navegación zonal estruc-

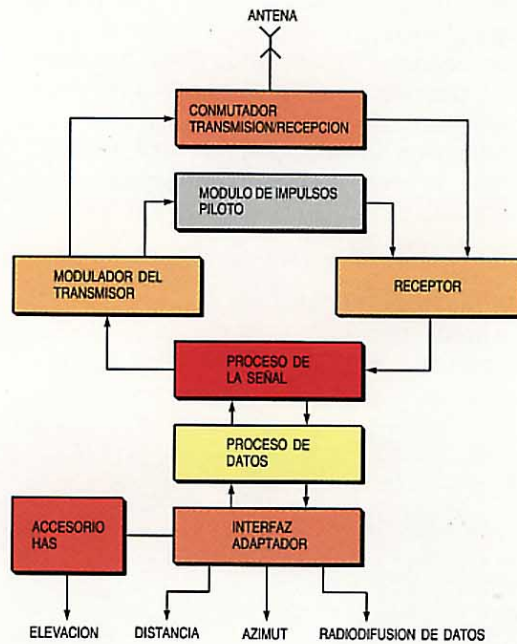


Figura 5 Diagrama de bloques de la unidad de a bordo DAS.

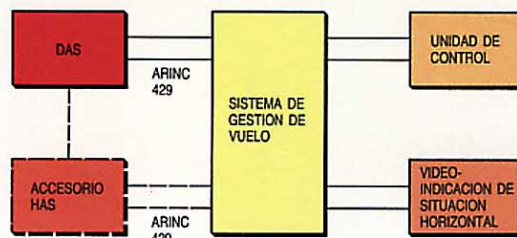


Figura 6 Propuesta de instalación a bordo DAS.

Unidad de a bordo  
DAS y antena DME.



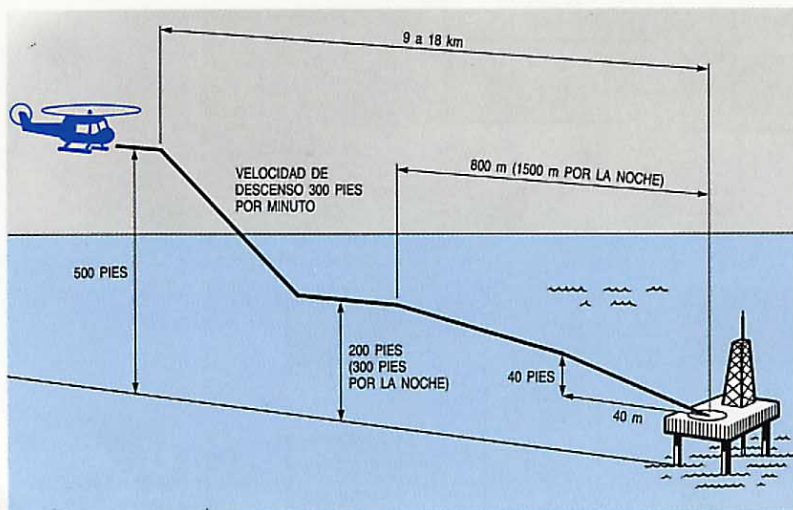
turada, se consigue mediante una red completa de rutas de vuelo instrumental en un campo de plataformas petrolíferas, que pueden entonces sobrevolarse con alta precisión y seguridad. Pueden definirse puntos de referencia, tales que permitan el control del tráfico aéreo y la supervisión de todas las operaciones dentro del referido campo.

El formato de señal de los datos radiodifundidos DAS permite distribuir 256 tipos diferentes de información, incluyendo datos meteorológicos (dirección del viento, velocidad del viento, temperatura y visibilidad), datos de navegación, e información relacionada con los helipuertos en el campo petrolífero. Las posiciones de los helipuertos, rutas de aproximación y puertas de entrada para aterrizaje se dan en un sistema de coordenadas basado en el DAS. Además, se transmite el estado del helipuerto (libre para aterrizaje, ocupado, no utilizable). Los obstáculos, instalaciones provisionales y áreas de rescate pueden especificarse en coordenadas DAS, fácilmente interpretables sin conversión.

Figura 7  
Perfil de vuelo vertical  
de helicóptero utili-  
zando DAS y HAS (no  
a escala).

**Aproximación final**

La aproximación final por medio del HAS se expone en la figura 7. De acuerdo con la



dirección del viento, el piloto selecciona uno de los puntos de decisión predeterminados para dicha aproximación. Las coordenadas de este conjunto de puntos de decisión se transfieren desde la estación fija al equipo de a bordo por un enlace de datos de radiodifusión, situándose todos estos puntos de decisión sobre un círculo de 40 m de radio con centro en el helipuerto, y a una elevación de 40 pies (altura de decisión) sobre el mismo. Cuando llegue al punto de decisión, el piloto deberá ver el helipuerto para realizar un aterrizaje manual, iniciando en caso contrario una maniobra de rodeo.

La visibilidad requerida para la aproximación depende del error de posición y del error técnico de vuelo. Puesto que el error de posición del HAS no es superior a 12 m ( $2\sigma$ ) en un punto de decisión, puede esperarse que la visibilidad final exigida sea inferior a 200 m.

**Ventajas previstas**

Los sistemas de navegación actuales para vuelos en ruta sobre alta mar, maniobras en el área terminal y aterrizaje, utilizan el Omega, radiobalizas no direccionales/radiogoniómetros automáticos y radares de a bordo, presentando todos grandes inconvenientes. La situación empeora a causa del creciente número de horas de vuelo anuales. La simplicidad del DPS, que emplea un solo tipo de equipo a bordo para todas las fases de vuelo y aplica los formatos de señal normalizados por la OACI para el DME/N y el futuro DME/P, satisfará sin duda las estrictas exigencias del futuro inmediato y más distante.

El DPS constituye una ayuda de precisión para navegación en ruta, terminal y de aterrizaje, pero también podría sostener y promover un nuevo método de control de tráfico aéreo, que proporcionaría una información de posición automática, continua, segura y precisa, incluyendo la identidad y altitud barométrica de todas las aeronaves que estén dentro de la región de cobertura de una instalación DAS en plataforma petrolífera<sup>7</sup>.

Aparte de resolver un problema específico del vuelo de helicópteros en el Mar del Norte, se espera que el DPS propuesto ofrezca otras ventajas de comportamiento y de coste para una variedad de aplicaciones en muchas partes del mundo. Por ejemplo, es aplicable para logística naval aerotransportada y para pequeños aeropuertos no sujetos a la OACI, con objeto de mejorar el servicio en condiciones atmosféricas adversas.

**Conclusiones**

El DPS ofrece prestaciones considerablemente superiores para la radionavegación de helicópteros, sin penalizar los gastos ni los costes. Siguiendo una evolución basada en el experimentado DME, el DPS ofrece seguridad y superior economía, con riesgos de desarrollo razonables. El uso generalizado de la moderna tecnología de ordenadores, combinado con las últimas técnicas de proceso de señales de una red de antenas, sitúa al DPS en vanguardia del diseño de sistemas de radionavegación.

**Referencias**

- 1 Standard Elektrik Lorenz AG y otros: Concepto técnico del sistema de posicionado basado en DME-DPS: Propuesta de programa, junio 1982.
- 2 OACI: Anexo 10 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional, volumen I, 1972.

- 3 B. Forssell: Helicopter Operations to/from Norwegian Offshore Installations: Discussion of operational requirements, ELAB, 7 octubre, 1981.
- 4 T. Porteous: Navigation of Helicopters in Support of the North Sea Oil Industry, Colloquium on Helicopter Guidance and Navigation Systems, Londres, 12 enero, 1981.
- 5 Der Bundesminister für Verkehr (Ministerio Federal de Transportes): Sistema DLS de aterrizaje basado en DME; República Federal de Alemania, noviembre 1976, informe a la OACI.
- 6 DAS, a Future Navigation System: Standard Elektrik Lorenz AG, en nombre del BMFT, folleto, 1980.
- 7 A. Becker y otros: Dreiweg-DME mid DAS: DFVLR Institutsbericht IB 112-82/06, febrero 1982.

**Manfred Böhm** nació en Schlewecke, Wolfenbuttel, en 1934. Estudió telecomunicaciones en Darmstadt y Berlín desde 1954 a 1960. En 1960 se incorporó a Standard Elektrik Lorenz AG, en el campo de control remoto digital que pronto cambió por el de radionavegación, con especial atención al proceso de señales digitales. En 1977 el Dr. Böhm se convirtió en director de RD & E de sistemas de navegación; desde 1980 es director de RD & E de sistemas de radio y de navegación.

# Triplexor de banda L de aplicación espacial para el sistema de posicionado mundial

El triplexor para el sistema de posicionado mundial por satélites tuvo que satisfacer exigentes condiciones, tanto radioastronómicas como de grado de ocupación de espectro. El diseño, basado en una combinación de filtros paso banda de Chebyshev, dos de 6 polos y uno de 3, configura un triplexor de bandas no contiguas y se caracteriza por su pequeño peso entre otras propiedades.

**G. Gorder**  
**J. Ranghelli**

ITT Defense Communications Division,  
Clifton, Nueva Jersey, Estados Unidos de América

## Introducción

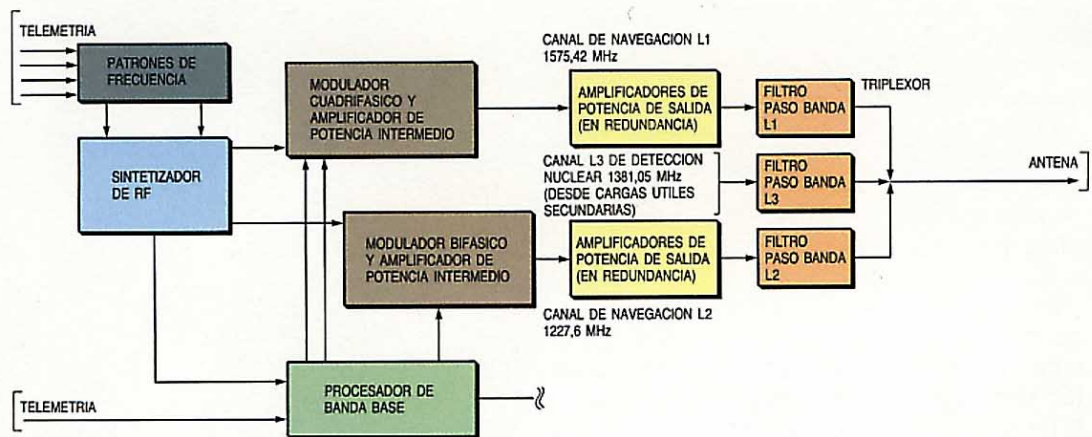
El sistema GPS (sistema de posicionado mundial) o Navstar es un conjunto de satélites en órbita que transmiten señales codificadas de ayuda a la navegación, a partir de las cuales los receptores convenientemente equipados pueden calcular exactamente su posición en tres coordenadas espaciales, y su tiempo. En 1983 se inició el programa de producción del GPS de cobertura mundial. ITT Defense Communications ha desarrollado un triplexor para el GPS, apto para comunicaciones espaciales. Los estrictos requisitos del espectro en cuanto a radioastronomía y grado de ocupación, se satisfacen en la banda L combinando dos filtros paso banda Chebyshev de 6 polos y uno de 3, para formar un triplexor de bandas no contiguas. Para conseguir unas pérdidas menores de 0,45 dB en la banda de paso se necesitan cavidades coaxiales cuyo factor Q, sin carga, sea

superior a 6000. La técnica original utilizada para compensación de temperatura no penaliza el peso, importante condición en aplicaciones espaciales. Desarrolla una potencia de transmisión de 100 W sin riesgo de efecto multi-impacto.

## Generalidades del sistema

En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques de la unidad de señales de ruido pseudoaleatorio, que genera y cursa hacia el triplexor tres señales moduladas (los canales L1 y L2 de ayuda a la navegación y el L3 para datos de detecciones nucleares). El triplexor combina estas señales en una salida única que alimenta la antena transmisora de RF del satélite. También suprime las radiaciones espurias o ecos parásitos, en frecuencias ajenas al sistema GPS:

- canal ascendente espacio-tierra, de  $1783,74 \pm 2,5$  MHz



**Figura 1**  
Unidad de señales de ruido pseudoaleatorio para el satélite de posicionado mundial.

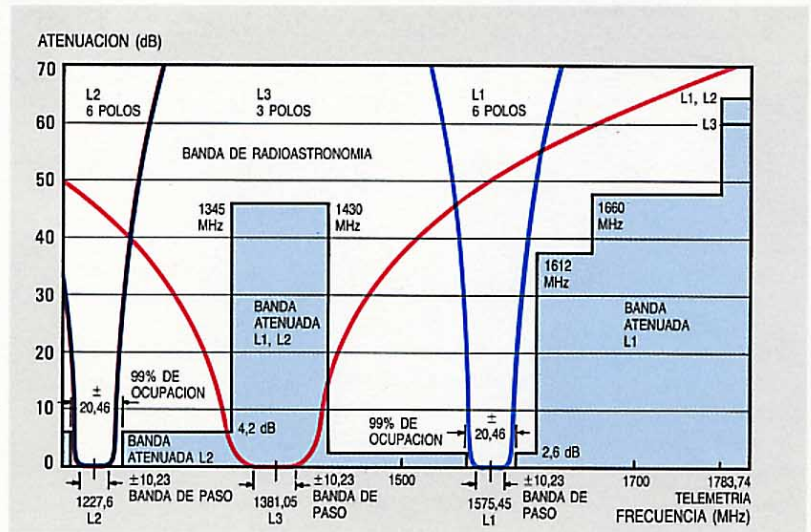
- bandas de radioastronomía, de 1345 a 1427 MHz, 1612 MHz y 1665 a 1667 MHz
- ocupación de espectro al 99%, en L1, L2,  $\pm 20,46$  MHz.

Los compromisos del sistema en emisiones fuera de banda dieron dos alternativas: filtrado de RF o banda base modelada en modo de impulso. Aunque el filtrado de RF cumpla todos los requisitos y se utilice ya en la combinación de transmisores, las nuevas especificaciones del espectro exigen aumentar el tamaño de los filtros, su peso, y las pérdidas de la banda de paso. La modelación de la banda base, lograda con un mínimo de equipo, puede satisfacer los requisitos del 99% de ocupación y reducir las emisiones fuera de banda, limitando así las exigencias de los filtros de RF. Esta solución requiere, sin embargo, que los siguientes amplificadores de RF sean lineales, a fin de evitar que la modulación de amplitud producida en los amplificadores no lineales del GPS reintroduzca los lóbulos laterales suprimidos. En consecuencia, se consideró más conveniente la técnica de filtrado en RF. La figura 2 indica los requisitos de atenuación.

### Diseño del triplexor

El triplexor es producto de la evolución de anteriores multiplexores GPS. El diplexor original de bandas no contiguas utilizaba dos filtros paso banda y uno de banda suprimida para obtener un rechazo superior a 65 dB a la frecuencia de enlace ascendente de 1783 MHz. El filtro supresor de banda reducía la cantidad de polos del filtro cuya banda de paso podía ser de 145 MHz, rebajando así el valor de Q sin carga necesario para conseguir pérdidas máximas de 0,35 dB en dicha banda de paso. Esto permitió utilizar un relleno dieléctrico de cavidad en todos los filtros, eliminando la ruptura de arco por efecto multi-impacto (multipacting). Dicho efecto es una acumulación de electrones de emisión secundaria por resonancia, en el vacío, debida a la aceleración del campo creado por la potencia de RF en este medio; puede causar arco y variaciones de impedancia en los circuitos de RF, dañando al equipo e interrumpiendo la comunicación.

El diplexor se convirtió en un triplexor de bandas no contiguas al añadir un tercer transmisor, produciendo un rechazo selectivo a 1783 MHz en la banda atenuada y la supresión del efecto multi-impacto en la cavidad dieléctrica de los cuatro filtros. Sin embargo, la banda de paso más estrecha (58 MHz) del tercer canal elevó hasta 0,7 dB la pérdida máxima en la banda.



**Figura 2**  
Respuesta a frecuencia del triplexor.

### Selección del tipo de filtro

La elección del tipo de filtro es un compromiso entre sus características eléctricas, tamaño y peso, efecto multi-impacto y los resultados obtenidos en las aplicaciones espaciales. En virtud de tales factores se eligió un filtro de Chebyshev con un rizado de 0,01 dB. El filtro escogido cae entre los tipos ideales plano y elíptico, cuyo peso y tamaño es función del número de polos necesario para cumplir las características de rechazo para la banda atenuada. Aunque el tipo elíptico sólo requiere cuatro polos, las variaciones de retardo de grupo en la banda de paso son superiores a las de cualquiera de los otros tipos, con riesgo de producirse multi-impacto en las estructuras resonantes que se necesitan para obtener los ceros de la función de transferencia. La figura 2 muestra las respuestas teóricas del

**Modelo de desarrollo de Ingeniería del triplexor para el satélite de posicionamiento mundial.**

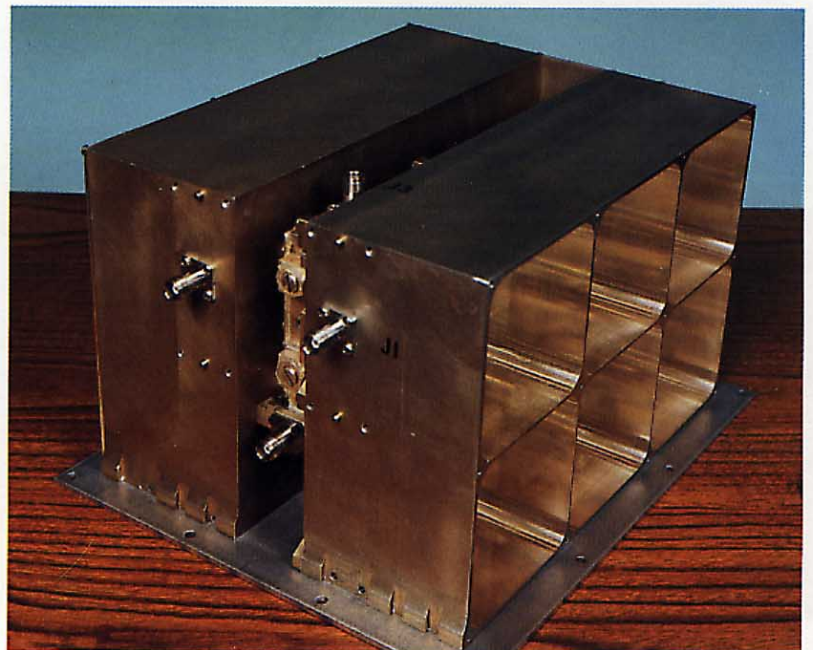




Tabla 1 — Datos de diseño

Filtro	L1	L2	L3
Tipo	Chebyshev, 0,01 dB de rizado		
Polos	6	6	3
Tipo de resonador	coaxial en $\lambda/4$ acoplado por diafragma	coaxial en $\lambda/4$ acoplado por diafragma	Inter-digital
$Z_0$ del resonador	100 $\Omega$	100 $\Omega$	70 $\Omega$
Dieléctrico	Vacío	Vacío	Rexolite 1422, $\epsilon = 2,56$
Ancho de banda 3 dB (%)	2,3%	2,9%	4,2%
Q sin carga	6000, mínimo	4500, mínimo	1000, mínimo
Potencia, margen operativo del diseño	85 W	15 W	30 W
Tipo de la unión	----- 6 dB ----->		
Medio de la unión	----- en paralelo ----->		
Construcción	----- dieléctrico de teflón, coaxial de 50 $\Omega$ -----> ( $\epsilon = 2,05$ )		
Deriva de frecuencia compensada por temperatura	----- Aluminio plateado con acabados -----> en L1 y L2 a 0,38 $\mu\text{m}$		
Peso total	1 MHz máximo	1 MHz máximo	No necesita
	----- 4,54 kg ----->		

filtro, superpuestas a las atenuaciones especificadas.

### Combinación elegida

La combinación en serie o paralelo se puede obtener utilizando líneas de transmisión en vacío o con dieléctrico de relleno. Se eligió la combinación en paralelo en medio dieléctrico para ofrecer menor riesgo de multi-impacto y ventajas de empaquetado, peso y tamaño.

La selección de las longitudes de línea desde el filtro a la unión implica salvar nuevos compromisos entre tamaño y peso y su comportamiento eléctrico. Mediante un análisis se demostró que la solución óptima es una configuración mixta no convencional compuesta por secciones de línea cortas y largas.

### Técnicas de construcción

La realización de las especificaciones de diseño depende críticamente de las técnicas de construcción en tres áreas: peso pequeño y caja robusta, compensador de temperatura mediante fuelle, y revestimiento metálico y acabado de las superficies.

Las cajas de los filtros para las bandas L1 y L2 encierran grandes volúmenes rarificados para reunir las características del factor Q y de efecto multi-impacto. Cada caja de 6 cavidades se fabrica a partir de una pieza única de aluminio para reducir peso, añadiéndole la tapa, las conexiones de acoplamiento de entrada y salida y los seis conjun-

tos de fuelle y sintonización. El trabajo a máquina del bloque de aluminio elimina las juntas para optimizar la pérdida de inserción, y asegura las dimensiones exactas. Cada caja mide 273 x 184 x 91 mm, sus tabiques exteriores tienen un espesor de 2 mm, los interiores son de 1,4 mm, y la base de 3,18 mm.

### Compromisos de diseño

Las especificaciones actuales del triplexor han reducido la anchura de banda de los canales L1 y L2 a 35 MHz, afectando notablemente a la elección de la técnica de multiplexación y los tipos de filtro. La anchura de banda del canal L3 continúa siendo de 58 MHz, debido al filtrado previo en el transmisor. La tabla 1 resume las características del diseño definitivo.

El circuito multiplexor elegido (Fig. 1) utiliza sólo filtros paso banda, ya que sus bandas estrechas y los flancos de atenuación agudos proporcionan suficiente atenuación a 1783 MHz. Como las tres bandas están bastante separadas, se eligió un diseño de bandas no contiguas con filtros componentes de doble terminación. La combinación en paralelo en una unión, utilizada para la integración de los filtros, es la menos propensa al multi-impacto y simplifica la fabricación.

Para seleccionar los filtros se tomó como base la necesidad de reducir las pérdidas en la banda de paso, de evitar el multi-impacto, y de conseguir un peso pequeño y un amplio margen de temperatura de funcionamiento (de -20 a +71 °C). El anterior diseño de 3 polos para el canal L3 cumplía todos los requisitos, y se aplicó por lo tanto sin cambios. Sin embargo, los canales L1 y L2 requerían un nuevo diseño de 6 polos y una reducción aproximada de 5 a 1 en el ancho de banda; ambos factores conducían a elevar la pérdida en la banda de paso. Como la especificación para estas pérdidas no había variado, hubo que compensar tal aumento potencial incrementando desde 1000 a 6000, como mínimo, el Q sin carga de las cavidades. Esto se consiguió aumentando el tamaño del resonador, pulimentando las superficies metálicas y utilizando un dieléctrico de baja pérdida. Cualquier aumento de tamaño tenía que evaluarse frente al asociado aumento de peso y la posibilidad de modos de orden superior que generarían bandas de paso espurias. El tamaño y el material dieléctrico pueden también afectar adversamente al comportamiento contra el multi-impacto y ante la temperatura ambiente en el espacio.

### Selección del resonador coaxial

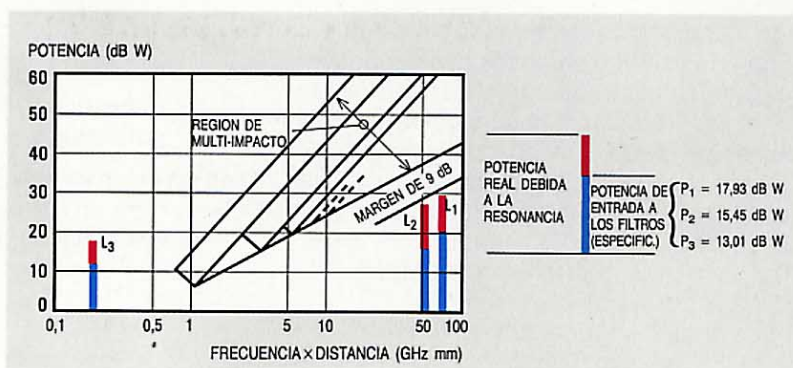
Teniendo en cuenta los anteriores compromisos, se eligió un resonador de cavidad

coaxial en cuarto de onda de campo electro-magnético transversal sin cargas de dieléctrico (en vacío). La eliminación del dieléctrico era necesaria para conseguir el alto Q y reducir el peso, aunque se hacía más posible la ruptura de arco por efecto multi-impacto. Se fijaron cuidadosamente todas las separaciones entre electrodos en la cavidad con el fin de no operar en la región de ruptura por multi-impacto de la curva "Woo"<sup>1</sup>, que representa la potencia en función del producto frecuencia-distancia (Fig. 3). Esta curva muestra cómo evitar la región de efecto multi-impacto, bien mediante separaciones muy pequeñas, como en L3 donde éstas no pasan de 0,254 mm, bien con separaciones muy grandes, como las de los filtros L1 y L2, que alcanzan 35,6 mm.

La figura 4a muestra la disposición del resonador de cavidad. El conductor exterior cuadrado aumenta el factor Q y facilita la fabricación. La relación entre el diámetro del conductor interior y el lado del conductor exterior es de 0,2, que corresponde a una impedancia aproximada de 100 Ω; esta relación optimiza la separación entre electrodos para el debido margen contra el multi-impacto, en contraposición a fijar en 70 Ω la impedancia  $Z_0$  para obtener un Q sin carga óptimo. Se consigue así un mejor comportamiento ante el multi-impacto, a expensas de incrementar un poco la pérdida en la banda de paso. La dimensión de 89 mm del lado de la cavidad da un Q teórico superior a 14 000, que en la práctica alcanza 8000 para el 60% de la producción, suficiente para cumplir la especificación de 0,45 dB de pérdida en la banda de paso.

La figura 4 ilustra también los acoplamientos de entrada/salida de toma o bucle, el acoplamiento de diafragma entre cavidades y la compensación de temperatura. Los acoplamientos en ambas técnicas son predominantemente magnéticos, reduciendo así el riesgo de efecto multi-impacto.

En las bandas L1 y L2 es necesario compensar la temperatura en todo el margen de aplicación de -20 a +71 °C, debido a su estrecha banda de 35 MHz. La limitación de peso impide fabricar el filtro con metales de bajo coeficiente de temperatura, de aleaciones tales como el invar. La técnica de compensación de temperatura elegida (Fig. 4b) se basa en una terminación de resorte tipo fuelle, que se monta en el extremo en circuito abierto del conductor central del resonador y es controlada por una varilla insertada en el conductor central. La respuesta de este montaje a la temperatura depende del material de la varilla, ya que la longitud de ésta controla la del conductor central, principal parámetro que determina la frecuencia de resonancia. Casi todas las

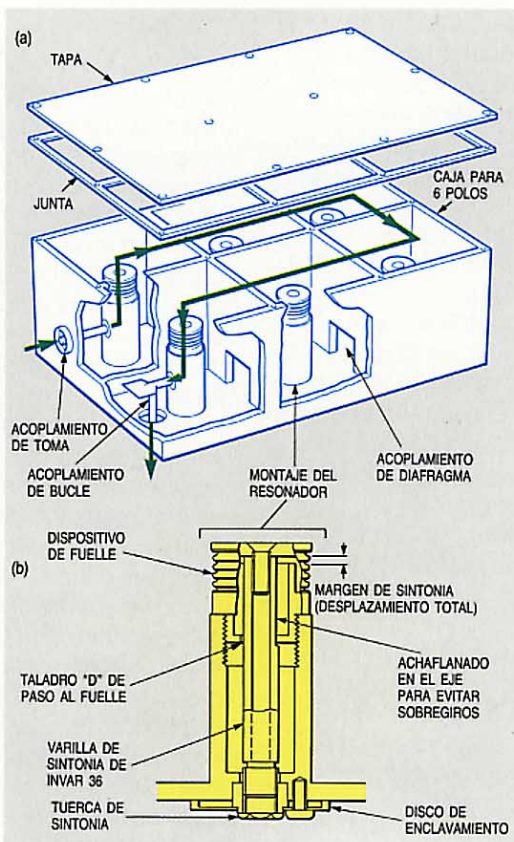


**Figura 3**  
Análisis del efecto multi-impacto.

partes del filtro se pueden, pues, fabricar de aluminio, ofreciendo no obstante el mismo comportamiento ante la temperatura que un filtro de invar, mucho más pesado. Otra ventaja más es la utilización del fuelle para la sintonía fina de las cavidades.

La figura 4b muestra el dispositivo de fuelle. La varilla de sintonía extiende o contrae el fuelle, variando la longitud del conductor central de resonancia y la frecuencia de la cavidad. Los sucesivos cambios de temperatura sólo pueden modificar la longitud del resonador en proporción al pequeño coeficiente térmico de dilatación de la varilla de invar.

El acabado de las superficies internas de RF de las cajas y tapas de los filtros L1 y L2 afecta notablemente a la pérdida de inser-



**Figura 4**  
Diseño del resonador:  
(a) diseño básico  
(b) técnica de acoplamiento.

ción. Para alcanzar factores Q sin carga superiores a 6000 se necesita un espesor de plata 10 veces superior al de penetración del efecto pelicular, y pulimentar la superficie con un grado de acabado mejor que  $0,38 \mu\text{m}$ , lo que consigue una reflexión casi igual a la de un espejo. Se depositó un espesor mínimo de  $25,4 \mu\text{m}$  de plata sobre  $10,2 \mu\text{m}$  de cobre y se le preparó luego contra el deslustrado.

Los otros componentes del triplexor, el filtro L3 y la unión, son menos críticos y utilizan técnicas convencionales de fabricación a máquina y galvanizado. La unión utiliza conductores interior y exterior cuadrados, rellenos con material dieléctrico de teflón.

Los dos distintivos finales de la construcción fueron: la utilización de una junta de material de latón con plata galvanizada metida en las acanaladuras de las tapas de L1 y L2, y taladros colocados estratégicamente para efectuar el vacío completo durante el paso de la atmósfera al espacio. Estas juntas son esenciales para reducir las pérdidas de inserción, al proporcionar un cierre comprimible de resistencia muy pequeña. Los taladros de vaciado se diseñaron como atenuadores de guíasondas al corte.

### Resultados experimentales

El desarrollo de los filtros L1 y L2 comenzó con una verificación experimental del concepto básico de la cavidad, y determinando el acoplamiento entre cavidades en función de los tamaños de diafragma. Se construyeron y probaron filtros completos de 6 cavidades basados en estos resultados iniciales. Igualmente se probó el concepto de la unión simulando las terminaciones del filtro con otros filtros de dos polos.

Se fabricó una cavidad aislada con fuelle de sintonización, de superficies de plata pulimentadas hasta un acabado de  $0,38 \mu\text{m}$ . Los resultados medidos incluían un Q sin carga de 7800 y una reducción de 6 a 1 en la deriva de frecuencia, hasta  $\pm 0,45 \text{ MHz}$ . Las pruebas en el vacío entre  $-20$  y  $+71 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura no revelaron ningún efecto multi-impacto, sobrepasando las potencias utilizadas en ambos filtros L1 y L2 los valores especificados.

Generalmente, no puede calcularse con exactitud el acoplamiento por diafragma para formas prácticas de las cavidades. Para las cavidades empleadas se aplica una ecuación general que requiere determinar experimentalmente las constantes<sup>2</sup>:

$$K = BL^3 \cos^2(AL)$$

en donde

- K – coeficiente de acoplamiento
- L – espesor del diafragma
- A, B – constantes.

Las medidas se realizaron por el método de Dishal<sup>3</sup> con un filtro de dos cavidades para diferentes tamaños de diafragma, ampliando el margen de características de los filtros L1 y L2. Luego se determinaron las constantes A y B. La figura 5 contiene las curvas de resultados. Las medidas de

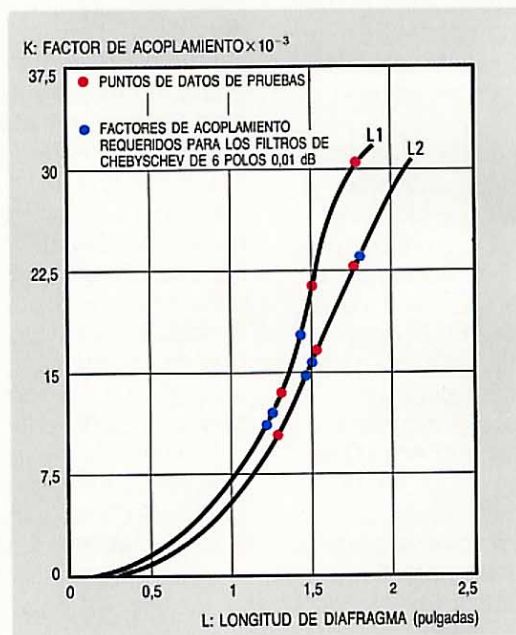


Figura 5  
Resultados de prueba de las dos cavidades.

perturbaciones indicaron la necesidad de unas tolerancias de fabricación iguales o inferiores a  $127 \mu\text{m}$ .

Los tamaños del diafragma para los filtros experimentales L1 y L2 de 6 polos se obtuvieron por interpolación de los datos de acoplamiento por diafragma, sin que hubiese que modificar tales filtros. También se determinó experimentalmente la posición del acoplamiento de toma en ambos filtros.

El diseño de la unión se comprobó utilizando filtros de dos cavidades como terminaciones provisionales. Dicho diseño se basaba en un análisis que demostraba la posibilidad de lograr una adaptación exacta en las tres bandas, utilizando un sistema de interconexión no convencional con líneas de longitudes distintas, dos líneas de cuarto de longitud de onda y la tercera de media onda, aproximadamente. Los resultados de las medidas revelaron que se podía obtener una excelente relación de onda estacionaria en tensión, y por lo tanto una directriz de diseño válida para evolucionar hacia la realización definitiva.

**Resultados del triplexor**

Se ha ensamblado y probado un modelo completo del triplexor, que incorpora los tres filtros L1, L2 y L3, y la unión. Fueron necesarios algunos ajustes de la longitud de línea de la unión para adaptar correctamente las respuestas individuales de cada filtro. La tabla 2 expone los resultados medidos después de optimizar las longitudes de las líneas.

Durante el desarrollo se construyeron primero las cajas sin detalles finales, tales como los diafragmas, y fueron terminándose a medida que se obtenían datos de las pruebas de experimentación del diseño. Esto permitió realizar algunas pruebas críticas, como la respuesta del triplexor a vibraciones, en una versión figurada concurrente con el diseño eléctrico. Las primeras pruebas de vibración demostraron la posibilidad de utilizar tabiques delgados, posibilitando así razonables recortes para reducir aún más el peso.

**Referencias**

- 1 P. F. Clancy: Multipactor Control in Microwave Space Systems: *Microwave Journal*, marzo 1978.
- 2 Matthaei, Young y Jones: Microwave Filters, Impedance Matching Networks and Coupling Structures: *McGraw Hill*, Nueva York, 1964, pág. 1016.
- 3 M. Dishal: Alignment and Adjustment of Synchronously Tuned Multiple Resonant Filters: *Electrical Communication*, 1952, volumen 29, n° 2, págs. 154-164.

**Greta Gorder** nació en 1959 en Oak Ridge, Tennessee, EE.UU. En 1981 recibió el grado BSEE de la Brown University, Providence, Rhode Island, y participó en cursos para graduados en ingeniería eléctrica. Como ingeniera de diseño de microondas ha trabajado en el área de filtros y amplificadores de bajo ruido. La Sra. Gorder, que ingresó en 1981 en ITT DCD, se ocupa actualmente del diseño de un amplificador monolítico de bajo ruido.

**Joseph Ranghelli** nació en 1931 en Brooklyn, Nueva York y estudió ingeniería eléctrica en el Polytechnical

**Tabla 2 — Características medidas en el modelo de desarrollo (EDM) del triplexor**

Parámetro	Filtro L1		Filtro L2		Filtro L3	
	Especif.	EDM	Especif.	EDM	Especif.	EDM
$F_0$	1575,42		1227,6		1381,05	
Ancho de banda 3 dB (MHz)	> 30	36,2	> 30	38	> 58	63
Banda de paso (MHz)	+ 10,23		+ 10,23		+ 10,23	
Pérdidas en $F_0$ (dB)	< 0,45	0,29	< 0,45	0,31	< 0,7	0,50
Variación de pérdidas en la banda de paso (dB)	< 0,10	0,07	< 0,10	0,07	< 0,10	0,08
Pérdidas en banda atenuada:						
1345 a 1427 MHz (dB)	> 50	> 70*	> 50	> 70*		
1612 MHz (dB)	> 35	44,23	> 50	> 70*		
1665 a 1667 MHz (dB)	> 50	65	> 50	> 70*		
Ancho de banda al 99% máximo (MHz)	± 20,5	± 18,4	± 20,5	± 19		
Inter-acoplamiento						
J2-J3, L2 (dB)					> 39	47
J2-J1, L2 (dB)	> 50	> 70*				
J1-J3, L1 (dB)					> 39	52
J1-J2, L1 (dB)			> 50	> 70*		
J3-J2, L3 (dB)			> 50	> 70*		
J3-J1, L3 (dB)	> 50	> 70*				
Impedancia ( $\Omega$ )	50	50	50	50	50	50
VSWR en la banda de paso (:1)	< 1,20	1,18	< 1,20	1,13	< 1,22	1,11
Variación del retardo de grupo (ns)	< +1	0,22	< +1	0,05	< +1	0,26
Margen de temperatura ( $^{\circ}$ C)	-20/+71		-20/+71		-20/+71	
Potencia (W)	85	100	15	40	30	30
Aislamiento del canal ascendente a 1783,74 + 2,5 MHz (dB)	> 65	> 70*	> 65	> 70*	> 60	68,3
Número de polos	6		6		3	

\* con interferencias de ruido en planta.  
VSWR: relación de onda estacionaria en voltaje.

Institute de dicha ciudad. En 1959 obtuvo el grado BSEE y en 1965 el MSEE. Ha trabajado en varias compañías, en investigación y desarrollo de componentes y sistemas de microondas, antes de su ingreso en ITT DCD. El Sr. Ranghelli tiene gran experiencia en diseño de filtros, sistemas de antenas en fase, redes adaptables de antenas y dispositivos de conmutación. Ha trabajado en ITT durante diez años, y actualmente es jefe de sección en el grupo de microondas de la DCD y jefe del proyecto de desarrollo de ingeniería del triplexor GPS.

# Receptor para el sistema de posicionado mundial

En los próximos años, el sistema de posicionado mundial por satélites se convertirá en fundamental para la localización y navegación. SEL está desarrollando un receptor prototipo, en cuyas primeras aplicaciones se encuentra el experimento de ayudas a la navegación German Spacelab.

**A. Bethmann**  
**H. Tschiesche**

Standard Elektrik Lorenz AG, Stuttgart,  
República Federal de Alemania

## Introducción

Los sistemas en tierra para ayuda a la navegación de buques y aeronaves se basan en la medida del retardo de propagación de señales de radio, transmitidas desde estaciones de coordenadas conocidas, o en medidas de marcación radiogoniométrica. Los progresos en tecnología espacial permiten ya producir sistemas de navegación por satélites, de muy alta precisión. En los próximos seis o siete años, el sistema de posicionado mundial (GPS) adquirirá la máxima importancia para la localización y la navegación, facilitando a los usuarios de todo el mundo la información de tiempo y posición con una exactitud sin precedentes. La localización de posición se basa en la medida del tiempo de retardo de propagación de señales de radio, procedentes de

un mínimo de cuatro satélites entre los 18 que formarán una constelación.

Standard Elektrik Lorenz (SEL) desarrolla un prototipo de receptor GPS para aplicaciones civiles, capaz de ser reclasificado para usos militares.

## El sistema GPS

El programa Navstar-GPS de Estados Unidos se divide en tres fases operativas. Por motivos técnicos y económicos, no puede ya alcanzarse el objetivo inicial de establecer en 1984 un sistema con 24 satélites. Sin embargo, el programa continúa y el sistema estará en plena operación con 18 satélites en 1987. Cinco de estos satélites ya están en funcionamiento. La figura 1 representa los tres componentes clave del Navstar-

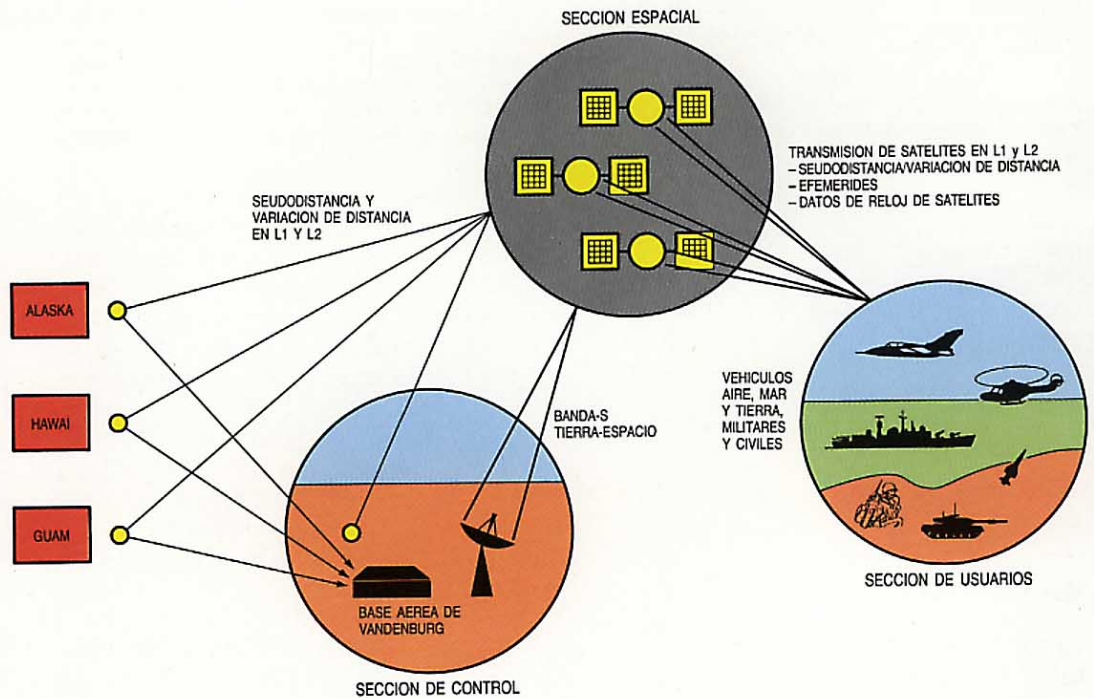


Figura 1  
Sistema Navstar-GPS.

GPS: sección espacial, sección de control y sección de usuarios.

La sección espacial constará de 18 satélites colocados en seis planos de órbita de 12 horas, a una altura aproximada de 20000 km. Los usuarios situados en cualquier lugar del globo tendrán a cualquier hora visibilidad de al menos cuatro de estos satélites, situados a elevaciones sobre el horizonte no inferiores a 5°. Las señales se transmiten en dos frecuencias de la banda L (Tabla 1), para poder corregir los retardos de propagación en la ionosfera. Estas señales están moduladas con dos códigos pseudoaleatorios: *P* para medidas exactas del tiempo, y *C/A* para facilitar el enganche con la señal útil de exactitud reducida. Cada señal se modula también con mensajes de ayuda a la navegación (efemérides, corrección, estado y parámetros de control del sistema). La tabla 1 indica la precisión que puede alcanzarse en posición y tiempo mediante los dos códigos mencionados. Cada satélite lleva un reloj atómico actualizado una vez al día por la sección de control. El ordenador de cada satélite calcula los datos reales de las efemérides y actualiza los mensajes de navegación.

La sección de control tiene cuatro estaciones supervisoras, una estación tierra-espacio y una estación principal de control. Cada estación supervisora opera como centro de recogida de datos; contiene un receptor de cuatro canales de elevado rendimiento, un reloj atómico y un ordenador que controla la toma de datos y hace de interfaz con el procesador de la estación principal de control. La estación tierra-espacio proporciona interfaz entre la sección de control y la sección espacial por medio de un enlace de radio en la banda S. La estación principal de control efectúa los cálculos necesarios para determinar las efemérides y los errores del reloj atómico del satélite, genera los datos de navegación del usuario que han de enviarse al satélite, y mantiene registro del contenido y estado del procesador del satélite.

La sección de usuarios (receptor GPS con antena y periferia) depende de la aplicación. Puede variar, desde un receptor de dos frecuencias con cinco canales para usuarios militares que requieran gran fiabilidad y exactitud, hasta un receptor sencillo monocanal para usuarios civiles. Por ello, la sección de usuarios debe ser de construcción modular, tanto en equipo como en programas, para satisfacer condiciones tan diferentes.

### Receptor GPS

La figura 2 es un diagrama de bloques de un receptor prototipo de SEL para uso civil.

**Tabla 1 — Características de señales y precisión del sistema**

Señal del satélite	Frecuencia portadora	Código	Anchura de banda
L1 L2	1575,42 MHz 1227,60 MHz	<i>C/A</i> y <i>P</i> <i>C/A</i> ó <i>P</i>	2 MHz en <i>C/A</i> y 20 MHz en <i>P</i>
Parámetro	Código <i>C/A</i>	Código <i>P</i>	Datos
Velocidad de pulsación	1,023 MHz	10,23 MHz	50 bit/s <sup>-1</sup>
Tipo de código	Código Gold	Código PRN* de 200 días	—
Periodo	1 ms	7 días	—
Precisión de navegación	Posición	Velocidad	Tiempo
Con código <i>C/A</i>	100 a 300 m	0,3 ms <sup>-1</sup>	50 a 100 ns
Con código <i>P</i>	17 m	0,2 ms <sup>-1</sup>	11 ns

\* ruido pseudoaleatorio

Sus componentes principales son la antena con preamplificador, la unidad de receptor/procesador, la de control y presentación, y la alimentación. La estructura modular permite adaptarlo a casi todas las aplicaciones en proyecto, sin más que cambiar o añadir módulos de equipo o programas. El receptor monocanal de uso civil puede, además, ampliarse hasta convertirse en un receptor multicanal con sensores auxiliares para fines militares. La figura 2 indica los módulos que componen el receptor de la primera aplicación en el programa alemán de experimentación, para utilizarse en la sección de superficie del proyecto Navex.

El receptor tiene un canal de datos y un canal de navegación. El primero realiza medidas secuenciales de pseudodistancias a los cuatro satélites óptimos, mientras que el segundo recoge los datos de todos los satélites con visibilidad directa. Para la adquisición de la señal y el seguimiento del código *C/A* y de la portadora, se utilizan un bucle de enganche de retardo y un bucle Costas.

El receptor GPS debe ser capaz de medir su distancia desde cuatro satélites. Para ello debe amplificar la señal, comprimir el código, demodular, decodificar e interpretar la señal de datos a 50 bit s<sup>-1</sup> procedente de cada satélite. Los datos transmiten al usuario el estado del satélite, los parámetros de corrección del reloj de satélite y del retardo de señal en la atmósfera, las efemérides de satélite, y otros parámetros de control y condiciones del sistema. Incluyen también la información de almanaque que define las efemérides aproximadas y el estado de todos los satélites<sup>1</sup>. Gracias a esta información y a las medidas de distancia, el usuario del receptor GPS puede hacer los cálculos necesarios para una navegación correcta.

**Aplicaciones en la experiencia Navex**

SEL ha preparado conjuntamente con la DFVLR alemana una propuesta de experiencia de navegación con el Spacelab (Navex), cuyo objeto es la sincronización de relojes, la transferencia de señales horarias y la medición de distancias en sentido único. Este trabajo culminará en 1985 con la misión D1 del transbordador espacial, que irá seguida por una evaluación de los datos. El proyecto Navex<sup>2,3</sup> es un paso importante para adquirir conocimientos sobre sistemas de navegación por satélites, y persigue los objetivos siguientes:

- Investigar el comportamiento en órbita de los relojes atómicos (estabilidad, efecto relativista).
- Probar técnicas de precisión para sincronizar (en un margen de 10 ns) los relojes atómicos de a bordo y de superficie por un método bidireccional.
- Distribuir señales horarias y comparar entre los relojes de superficie y el reloj de a bordo por medio de medidas en sentido único.
- Medir la distancia en sentido único y determinar la posición con precisión de 30 m o mejor.
- Determinar la posición del transbordador espacial midiendo las distancias en sentido único a tres estaciones de superficie (técnica inversa a la del GPS).
- Utilizar y probar la modulación de código con códigos de ruido pseudoaleatorio.
- Investigar efectos de propagación.
- Simular nuevos sistemas de navegación por satélites.

La figura 3 representa la configuración del Navex. Los equipos comprenden una estación de a bordo, una estación de control en superficie y dos estaciones receptoras. También incluyen un radar AN/MPS-36 y un equipo adicional para pruebas, tratamiento de datos y transferencia de frecuencia y señal de sincronismo de los relojes de

superficie. El equipo de a bordo se aloja en tres contenedores con tres antenas, fijados a una estructura soporte en el compartimiento de carga del transbordador. A bordo se utiliza un reloj de cesio y un reloj de rubidio, que tendrán un efecto relativista aproximado de  $-25 \mu s$  por día. La sincronización y medida de distancia entre la estación de a bordo y las de superficie se realizará por enlaces de microondas con modulación de pseudoruido y códigos diferentes. La comparación de los relojes de alta precisión se verificará por un método bidireccional de sincronización entre la estación de a bordo y la de control de superficie, con una exactitud mejor que 10 ns.

El enlace unidireccional entre la estación de a bordo y la estación receptora en superficie emplea la técnica de medida de pseudodistancias, la cual sigue los mismos procedimientos secuenciales de medida y evaluación que el GPS para determinar la posición de dicha estación de tierra. Las medidas paralelas de pseudodistancias a las tres estaciones de superficie que poseen relojes sincronizados y posiciones conocidas, permiten hallar la posición de la estación de a bordo (técnica inversa a la del GPS). Se necesita una exacta sincronización de relojes en tierra para evaluar adecuadamente los datos experimentales. Esto se conseguirá por transporte de relojes y con la ayuda del GPS. Se utilizarán, pues, los receptores GPS para sincronización mediante la *técnica de visión común*.

**Perspectiva y aplicaciones del GPS**

Las aplicaciones civiles de los receptores GPS se están estudiando con amplitud en Alemania y otros países. Se han realizado análisis de necesidades e investigación de mercados, y se prevé que los receptores GPS tendrán muchas aplicaciones:

- Terrestres: vehículos de policía, incendios, y de rescate; ambulancias; vehículos de transporte urbano e interurbano (autobuses, camiones, taxis); análisis y exploraciones geológicas.

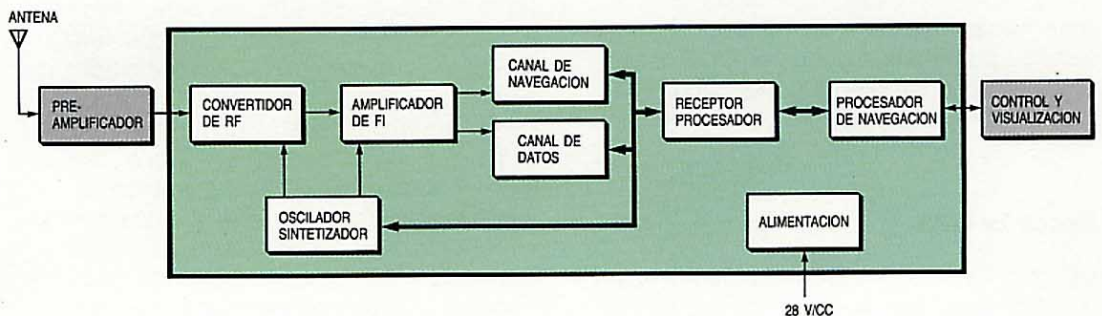
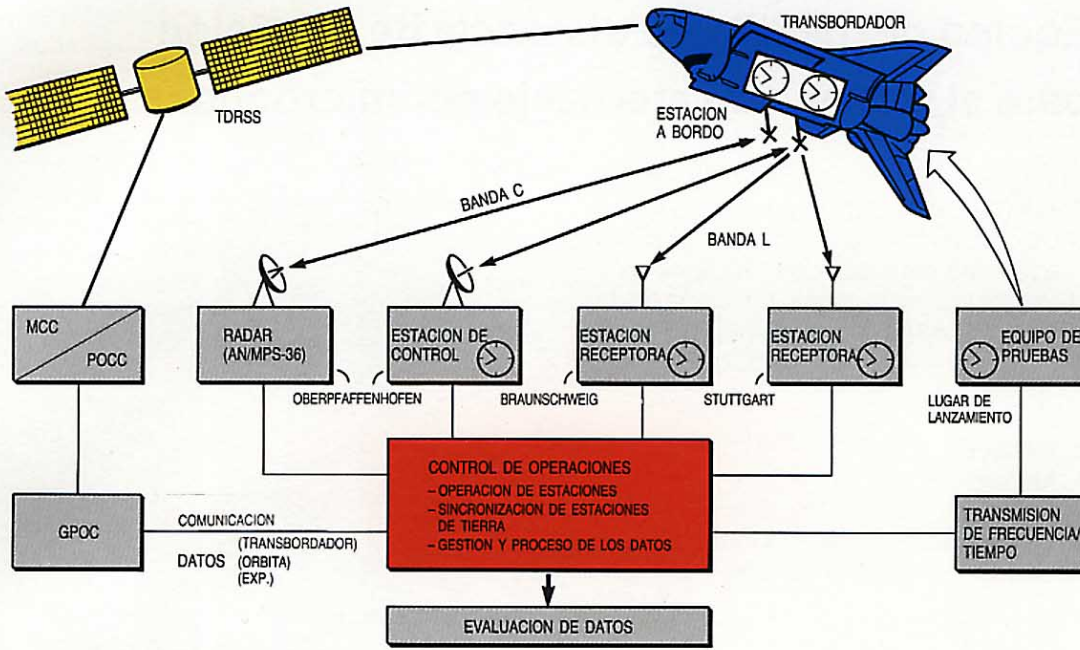


Figura 2 Diagrama de bloques del receptor GPS.



**Figura 3**  
Configuración de equipo para la experiencia Navex.  
TDRSS - satélite retransmisor de datos y navegación  
MCC - control de la misión  
POCC - control operativo de carga  
GPOC - centro alemán de carga.

- Marítimas: pesca de bajura y de altura; comercio (navegación costera, en alta mar o fluvial); cruceros de recreo y vigilancia de costas.
- Aéreas: soporte del sistema de navegación inercial; búsqueda y rescate; soporte de vuelos de aproximación; navegación de zona y distante.
- Generales: distribución de señales horarias en todo el mundo para coordinación del tiempo universal; sincronización de sistemas existentes de ayuda a la navegación (Loran-C, Omega); control de experiencias y medidas (astronomía); sincronización de sistemas de comunicación (sistemas de acceso múltiple en el dominio del tiempo); navegación de vehículos espaciales.

El gobierno de Alemania Federal está definiendo un amplio programa de pruebas y ensayos de receptores GPS, capaz de ofrecer a los futuros usuarios una experiencia de este nuevo sistema de ayuda a la navegación. En estas pruebas, programadas para los años 1984/1985, se utilizarán prototipos del receptor de SEL.

**Referencias**

- 1 AGARD-AG-245: Principles and Operational Aspects of Precision Position Determination Systems.
- 2 S. Starker, H. Nau, J. Hammesfahr y H. Tschiesche: Navex - A Space Shuttle Experiment with Atomic Clocks: NASA CP-2265 Proceedings of the 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, 30 noviembre, 1-2 diciembre 1982.
- 3 D. Rother, H. Tschiesche y H. Kallerhoff: GPS und Navex für die satellitengestützte Navigation: Nachrichtentechnische Zeitschrift, 1982, volumen 35, n°9, págs. 582-587.

**Andreas Bethmann** nació en Oberhausen, Alemania, en 1951. Estudió ingeniería eléctrica en la Rheinisch Westfälische Technische Hochschule de Aquisgrán. Se graduó Ingeniero Diplomado en 1974. El Sr. Bethmann ingresó en SEL en 1976, donde se dedicó a desarrollo de programación para sistemas de navegación. Desde 1980, es también responsable de desarrollos de programación para el Navex.

**Hugo Tschiesche** nació en Osek, Checoslovaquia. Estudió ingeniería en la Universidad Técnica de Darmstadt, especializándose en electrotécnica teórica. Después de graduarse Ingeniero Diplomado en 1973, ingresó en SEL, donde se dedicó al desarrollo de sistemas de comunicación y de navegación, y a las aplicaciones de la tecnología de ensanchamiento de espectro. Desde 1981, el Sr. Tschiesche ha sido jefe del laboratorio para integración de sistemas.



# Equipo de medida de distancia de precisión para el sistema de aterrizaje por microondas

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) ha definido un nuevo tipo de equipo de medida de distancia de precisión que formará parte del futuro sistema de aterrizaje por microondas. Funciona en dos modos: aproximación inicial y aproximación final. SEL tiene muy avanzado el desarrollo de tal equipo.

**K. Becker**

**A. Müller**

**H. Vogel**

Standard Elektrik Lorenz AG, Stuttgart,  
República Federal de Alemania

## Introducción

En 1982, el All Weather Operations Panel (AWOP) de la OACI terminó una evaluación del concepto y características operacionales del DME/P (equipo de medida de distancia de precisión), que se integrará en el futuro sistema de aterrizaje por microondas (MLS). SEL viene desarrollando desde 1981 equipos de tierra y de a bordo DME/P, y en 1986 lanzará los primeros modelos de producción.

## Concepto del sistema DME/P

Según el AWOP, el DME/P se basa en dos modos de operación nuevos: el IA (aproximación inicial) y el FA (aproximación final). El modo IA es totalmente compatible con el DME/N convencional. En el FA se utilizan técnicas especiales para mantener la elevada precisión necesaria durante la aproximación y el aterrizaje, aunque haya fuertes señales multitrayecto.

En ambos modos se utilizan señales de transmisión con flancos muy inclinados. En FA, la pendiente del impulso entre puntos de amplitud 5% y 30% debe ser lo más lineal posible (Fig. 1). La aguda pendiente del impulso aumenta la anchura de banda, si bien ésta se mantiene dentro del espectro asignado al DME/N siempre que se reduzca adecuadamente la potencia eficaz radiada por el respondedor de tierra, y por tanto la cobertura.

El equipo DME/P de a bordo selecciona el modo de operación de acuerdo con la distancia medida, identificándolo por la separación de los impulsos que forman el par de interrogación. Los dos modos también difieren en la forma de procesar las señales. En el modo IA se utiliza un proceso en banda estrecha basado en la convencional técnica de fijación del umbral en la amplitud mitad (HAF, buscador de amplitud mitad). Por el contrario, para las señales de FA el proceso se hace en banda ancha, con un nuevo circuito de disparo de umbral muy bajo (10% de la amplitud del impulso), denominado DAC (delay and compare, retardo y comparación).

En el modo FA, el corto tiempo de subida de los impulsos del transmisor mejora la inmunidad a los ecos. El disparo al comienzo del impulso recibido puede reducir notablemente los errores de distancia debidos a señales de eco con pequeño retardo por multitrayecto.

## Características técnicas generales

La realización del concepto DME/P requiere cambios técnicos en el respondedor y en el equipo de a bordo del sistema DME/N, incluyendo el uso de una sección receptora

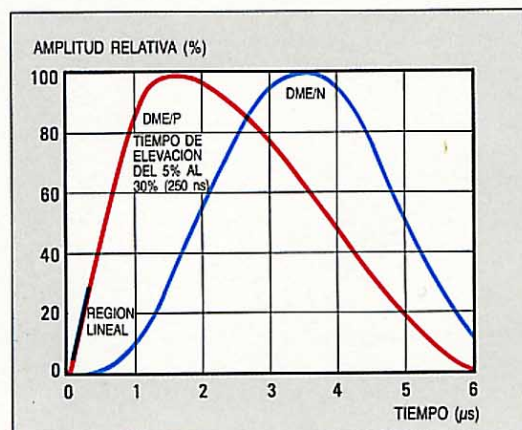


Figura 1  
Forma de impulsos de los equipos DME/P y DME/N.

de banda ancha y circuitos especiales de disparo, y medios para generar impulsos de transmisión de corto tiempo de subida.

### Sección de banda ancha del receptor

Para preservar la rápida subida y la linealidad del flanco anterior de las señales recibidas, los receptores de a bordo y del respondedor deben tener una anchura de banda en FI próxima a 3,5 MHz. Frente a los típicos receptores de banda estrecha, presentan los inconvenientes de una menor relación señal/ruido y de pérdida de selectividad de canal por no suprimir los canales adyacentes, espaciados 1 MHz. El primer problema puede paliarse utilizando preamplificadores de alta frecuencia y bajo ruido. El necesario rechazo del canal adyacente se asegura equipando el receptor con una sección adicional de banda estrecha (unos 0,5 MHz en FI). La correspondiente salida de señal vídeo se compara con la de la sección de banda ancha para determinar si está *en-frecuencia*, y si la distorsión introducida por el canal adyacente es tan alta que obligue a suprimirla y excluirla del proceso posterior<sup>1</sup>.

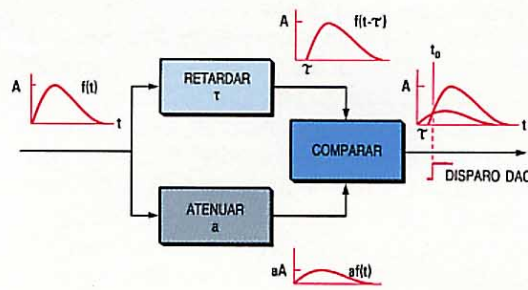
### Fijación del umbral en el modo FA

El método DAC da una solución para fijar el umbral de bajo nivel que se necesita. Como en el circuito de disparo HAF, el impulso vídeo se aplica a un atenuador y a una línea de retardo (Fig. 2). El valor típico de retardo en el DAC es de 100 ns, muy inferior a los 3  $\mu$ s del HAF. Como ya se ha indicado, sólo los ecos que llegan antes de la activación del DAC producen errores de disparo. En comparación con la técnica HAF, aumenta así considerablemente la inmunidad contra errores causados por ecos, si bien a costa de una menor relación umbral/ruido, ya que el DAC se activa aproximadamente a un 10% de la amplitud del impulso, y el HAF lo hace, por definición, al 50%<sup>2</sup>.

El actual sistema DME/P da escaso margen para mejorar esta susceptibilidad bastante crítica al ruido, ya que la máxima potencia permisible de transmisión del respondedor está estrictamente limitada por el espectro.

### Modulación de impulsos de gran pendiente

En el modo FA se necesita un impulso de transmisión de subida rápida, con tolerancias bastante estrictas, sobre todo respecto a la linealidad entre el 5% y el 30% de la amplitud. Para mantener las necesarias características de los impulsos, en cualquier frecuencia del canal y condición de funcionamiento, hay que introducir técnicas de modulación de alto rendimiento. El respon-



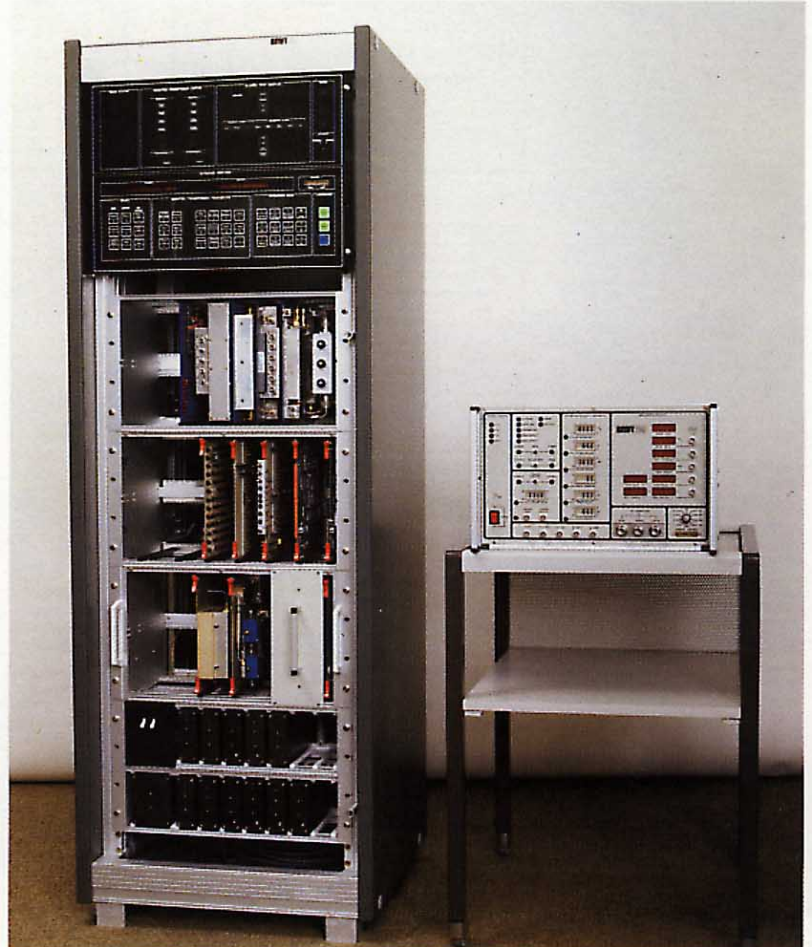
**Figura 2**  
Principio del método de disparo por retardo y comparación.

dedor de tierra de SEL emplea un modulador controlado digitalmente con modelado de impulso programable<sup>3</sup>. Para el equipo de a bordo se está desarrollando un circuito de modulación similar.

### Respondedor de tierra del DME/P

El diseño de este respondedor sigue muy de cerca las normas de otras ayudas a la navegación de SEL. Además del respondedor, el equipo de tierra incorpora una o dos unidades monitoras y una unidad de control. La figura 3 muestra las funciones básicas del respondedor, y la tabla 1, sus principales características.

**Equipo del respondedor de tierra DME/P.**



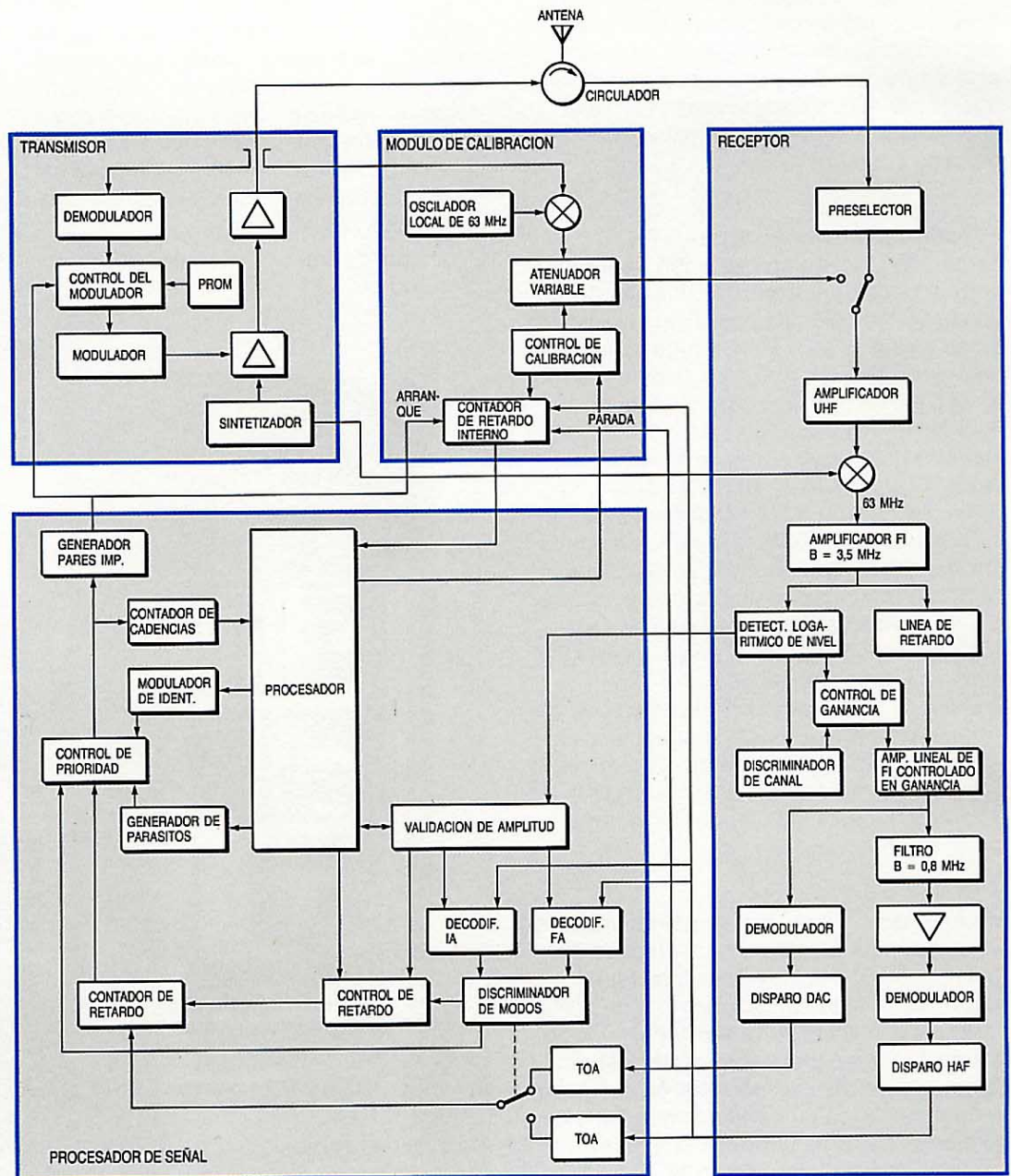
**Técnica de los dos modos**

Cuando el respondedor de tierra recibe una interrogación del equipo de a bordo, debe primero analizar si se trata de una interrogación DME/N convencional, DME/P en modo IA, o DME/P en modo FA, para lo cual decodifica el par de impulsos de cada interrogación a fin de determinar el proceso aplicable. En el receptor, esto implica un proceso simultáneo en banda ancha y en banda estrecha, y fijación de umbrales HAF y DAC.

La decodificación simultánea de los modos IA y FA se realiza en la sección de proceso de señal del respondedor. El decodificador se activa siempre con señales HAF para un mejor rechazo de interferencias. Según el tipo de interrogación, el

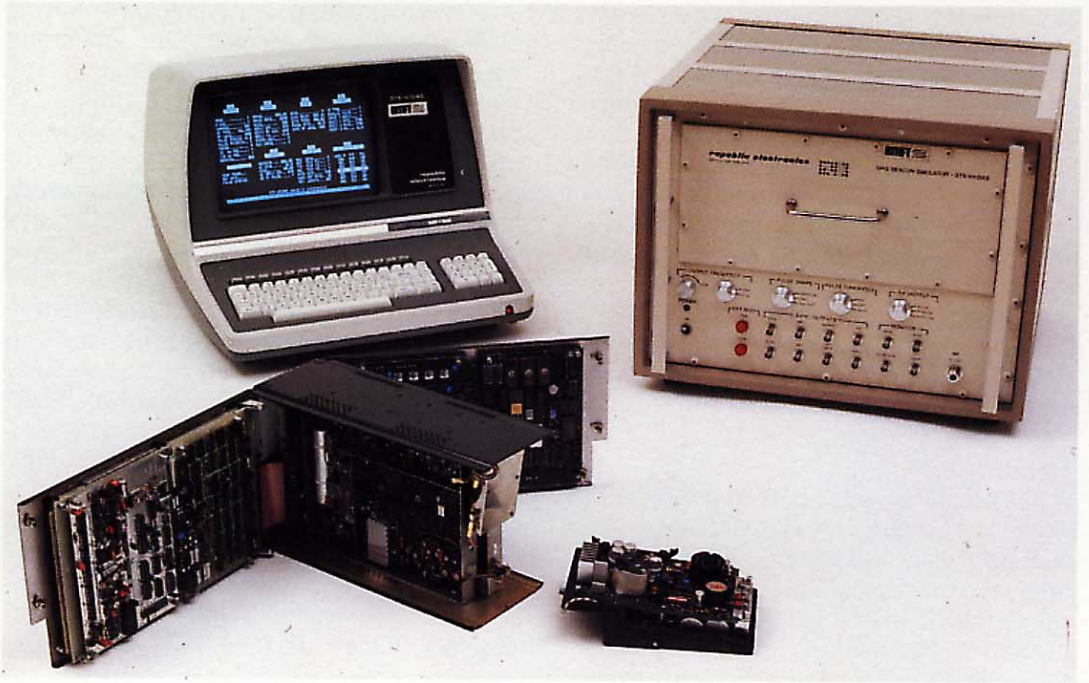
**Tabla 1 — Principales características del respondedor DME/P**

Especificaciones de diseño		
AWOP-WP/401	(12/82)	
FAA-E-2721/3	(9/82)	
EUROCAE ED-31	(7/80) en lo aplicable	
Principales características		
Potencia transmitida	300 W EIRP	
Sensibilidad	} para una relación señal vídeo/ruido de 30 dB	
Modo IA		< -82 dBm
Modo FA		< -76 dBm
Error de instrumentación	< 10 m, error de trayectoria (modo FA)	
	< 8 m, error por ruido cinético (modo FA)	



**Figura 3**  
Diagrama simplificado de bloques funcionales del respondedor DME/P. TOA - indicador de instante de llegada.

**Equipo DME/P de a bordo.**



proceso posterior estará regido por estos factores:

- técnicas independientes de supresión de ecos para los modos IA y FA
- desensibilización producida por sobrecarga, únicamente en el modo IA
- distinto retardo para las señales de los modos IA y FA
- esquema de prioridades: respuestas en el modo FA, señales de identificación, respuestas en el modo IA, impulsos erráticos.

Las dos primeras características exigen el diseño apropiado de la función de control de sensibilidad del receptor. A diferencia de las técnicas convencionales, la sensibilidad del receptor se encuentra siempre al valor máximo, por lo que las señales debidas a ecos o sobrecargas habrán de suprimirse discriminando bajo control del procesador los niveles de señal recibida.

### **Principales unidades funcionales**

#### *Receptor*

El diseño de un receptor de banda ancha con una anchura de banda de proceso de 3,5 MHz asegura que se transfieren, sin distorsión del impulso, las interrogaciones DME/N o DME/P de las aeronaves. La señal de FI sigue dos caminos en paralelo. La rama de banda estrecha tiene un ancho de banda de 0,8 MHz, y la señal pasa después por un demodulador y por el cir-

cuito de disparo HAF. En la otra rama de FI prosigue el proceso en banda ancha, y tras la demodulación se obtiene el disparo DAC.

La gran anchura de banda de la rama que excita al circuito DAC puede interferir a los canales adyacentes. Para evitarlo, la salida del detector logarítmico de nivel se acopla a un discriminador de canal, de modo que al producirse interrogaciones en canales adyacentes se reduzca la ganancia del amplificador lineal de FI y se inhiban los disparos erróneos.

El respondedor está equipado con dos decodificadores, que decodifican simultáneamente los pares de impulsos de interrogación de modo IA y de modo FA. Un discriminador de amplitud da vía libre a estos decodificadores si el nivel de la señal recibida supera cierto valor, que el procesador determina separadamente para cada modo, dependiendo de las condiciones reales de supresión de ecos, y, en el modo IA, de la situación de sobrecarga. Se utiliza el principio de discriminación de amplitud en lugar de reducir la sensibilidad del receptor, como es usual.

Tras decodificar el modo de interrogación, un discriminador de modo decide cuál de los disparos DAC o HAF debe procesarse. Durante la decodificación, se almacenan las temporizaciones de estos disparos en valores digitales con una resolución de 31,25 ns. El dato de la señal de disparo correspondiente se utiliza luego para prefijar y arrancar el contador de retardo, que cuenta a una frecuencia de reloj de 32 MHz hasta alcanzar el valor de parada preestablecido. Este valor resulta a la vez de los ciclos de calibración, del nivel

de la señal recibida y del retardo del sistema especificado para ese modo en particular.

Temporizado el retardo, se produce el disparo de respuesta que pasa por la lógica de prioridades y se lleva al transmisor a través del codificador de pares de impulsos. Cuando a la vez solicitan transmisión impulsos de respuesta, de identificación o erráticos, se utiliza una lógica de prioridad para resolver el conflicto. También se atienden las prioridades específicas del DME/P; las respuestas en modo FA tienen mayor prioridad que los impulsos de identificación.

#### Transmisor

El transmisor (sintetizador, amplificador y modulador) emite impulsos del respondedor de hasta 100 W de potencia de pico. Un nuevo modulador controlado digitalmente mantiene con la exactitud requerida la forma del impulso, en cualquier condición operativa. La señal de modulación se aplica al preamplificador y al amplificador de potencia del transmisor. La continua comparación entre la forma ideal del impulso (almacenada en una PROM) y la forma real, conocida mediante un demodulador de alta precisión, produce una tensión de control que se utiliza para mantener la forma óptima de la señal de modulación.

#### Módulo de calibración

La relativamente elevada frecuencia de reloj (32 MHz) y la autocalibración automática del equipo garantizan una alta precisión del retardo en el respondedor DME/P. El procesador controla la calibración, iniciando periódicamente ciclos de calibración cuyos resultados analiza.

Antes de iniciar un impulso de transmisión, se arranca el ciclo conmutando la entrada del receptor al módulo de calibración. El siguiente disparo del transmisor sirve para arrancar el contador de retardo de calibración. Se acopla a la salida el correspondiente impulso de RF del transmisor y se mezcla con 63 MHz, convirtiéndose así a la frecuencia de recepción. Antes de su inyección al receptor, se ajusta el nivel al prefijado por el procesador mediante un atenuador conmutable.

En la salida del receptor, los impulsos de calibración inyectados se tratan igual que cualquier otra señal recibida, y al final paran el contador de retardo de calibración. El procesador decide si se utiliza DAC o HAF. El valor medido incluye el retardo del transmisor más el del receptor (el retardo del módulo de calibración es despreciable). Este retardo se asocia a los niveles de entrada simulados por las diferentes posiciones del atenuador y se almacena en la memoria del procesador.

Como el proceso de calibración recorre cíclicamente los diversos niveles de entrada del receptor, se obtienen dos conjuntos completos de valores de retardo relacionados con niveles de las señales recibidas: un conjunto se refiere al modo IA, y el otro al modo FA. Los valores de calibración tabulados se actualizan continuamente, lo que permite compensar las desviaciones y variaciones de retardo debidas, por ejemplo, a la temperatura y envejecimiento, y a diferencias en el nivel de las señales recibidas. Dependiendo del modo operativo y del nivel medido de señal recibida, el procesador utiliza una corrección, deducida de los datos tabulados, para prefijar el contador de retardo. Así, el retardo del respondedor mantendrá su precisión dentro de un periodo de la frecuencia de reloj (31,25 ns).

#### Equipo de a bordo DME/P

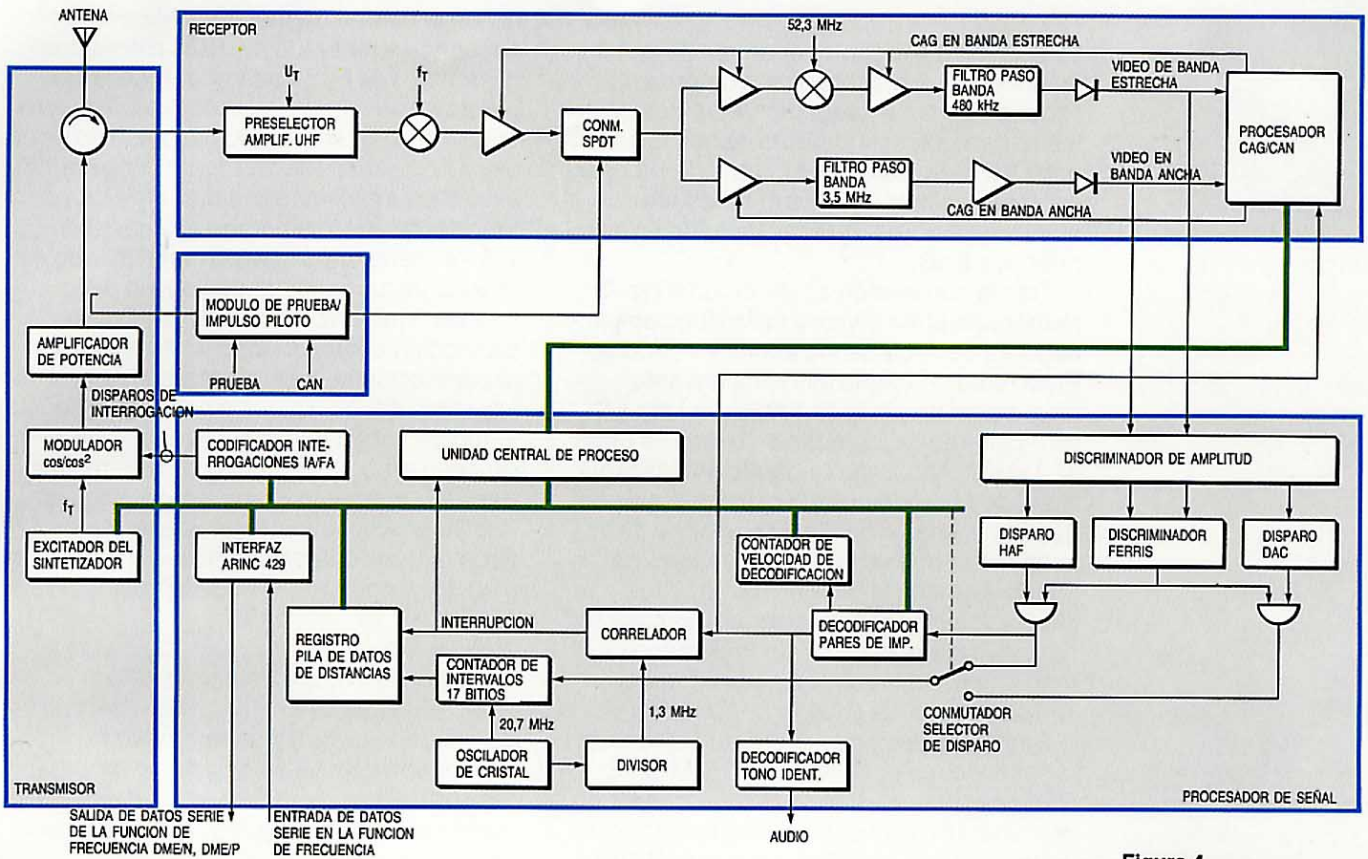
El nuevo sistema DME permite combinar en un interrogador único las funciones DME/N y DME/P. Para asegurar la intercambiabilidad, la forma, montaje y funciones deben cumplir las características de la ARINC para equipos DME de a bordo convencionales.

La semejanza entre DME/N y DME/P aconsejó utilizar un moderno equipo DME de serie como núcleo de un modelo de laboratorio del DME/P. El receptor y el procesador de señal fueron sustituidos por unidades de nuevo diseño, y se modificaron adecuadamente módulos tales como el modulador/transmisor y la unidad central de proceso. La figura 4 es un diagrama de bloques simplificado de la unidad de a bordo DME/P. En la tabla 2 se dan sus principales características.

#### Técnica de los dos modos

Las funciones de a bordo en el modo IA son similares a las del DME/N, aunque se exige mayor exactitud. Tras la selección de la frecuencia de la baliza DME/P y a distancias de aproximación superiores a 18,5 km, la aeronave transmite pares de impulsos de interrogación en modo IA a una cadencia de 16 Hz. Los impulsos DME/P del respondedor de tierra se procesan en la sección de banda estrecha del receptor. Como en la operación *en ruta*, el proceso posterior de la señal vídeo, incluso el cálculo de distancia, se basa exclusivamente en disparos HAF que se procesan en el contador de intervalos y en la unidad central de proceso para obtener la distancia.

Cuando la distancia desciende a unos 13 km, se añaden progresivamente pares de impulsos de interrogación en el modo FA



**Figura 4**  
Diagrama simplificado de bloques funcionales del equipo DME/P de a bordo. SPDT - unipolar de doble acción.

(separados  $6 \mu s$  más), entrelazados con interrogaciones en IA. La cadencia de respuesta de las interrogaciones en FA se comprueba por separado, y el correspondiente nivel de aceptación se basa en el del seguimiento en modo IA, que continúa en paralelo (modo mixto).

**Tabla 2 — Principales características del equipo DME/P de a bordo**

Características de diseño	
Función DME/N	TSO C 66a, ARINC 709, 429, DO 160
Función DME/P	AWOP-WP/401 (12/82)
Características técnicas	
Dimensiones (forma)	
	anchura 123 mm, altura 194 mm, longitud 318 mm (4 unidades)
Peso	aproximadamente 6 kg
Consumo de potencia	115 V/50 W
Potencia del transmisor	500 W <sub>p</sub>
Sensibilidad del receptor	
Modo DME/N	} para una relación señal vídeo/ruido de 23 dB
Modo DME/P	
Error de Instrumentación	
	< 15 m, error de trayectoria (modo FA)
	< 10 m, error por ruido cinético (modo FA)

Una vez lograda una eficacia suficiente en la respuesta a las interrogaciones en FA, se finaliza el modo mixto y sólo se transmiten pares de impulsos en FA. En los ciclos de interrogación FA se utiliza un umbral de bajo nivel (es decir, las respuestas se temporizan a través de la sección de banda ancha del receptor y el circuito de disparo DAC asociado). No obstante, por integridad en el proceso de la señal, la validación de la señal DME/P recibida, incluyendo la decodificación de los pares de impulsos y la correlación detección/seguimiento, se realiza siempre en paralelo, utilizando la salida coherente obtenida del proceso en banda estrecha.

### Principales unidades funcionales

**Sintetizador de frecuencias del transmisor**  
El sintetizador funciona en la banda 256,25 – 287,50 MHz. Va seguido por una etapa cuadruplicadora/excitadora de potencia, que suministra la frecuencia portadora y la del oscilador local. El transmisor es un amplificador de potencia de 4 etapas, generándose la forma escarpada de los impulsos de interrogación DME/P mediante modulación por colector. La forma del impulso es igual para todos los modos operacionales del equipo de a bordo.

### *Receptor*

La entrada del receptor comprende un filtro de preselección de 2 polos y un preamplificador de 2 etapas, seguido de un postselector de 3 polos; la anchura de banda es de unos 25 MHz. La unidad central de proceso controla la sintonía del filtro mediante diodos varactores. El factor de ruido es muy inferior a 8 dB.

Tras la conversión a la FI de 63 MHz, la señal recibida se divide y aplica a los amplificadores de FI de banda ancha y estrecha. En la rama de banda estrecha hay una nueva conversión a 10,7 MHz. El filtro LC de 6 polos tiene un ancho de banda de unos 480 kHz, y el correspondiente amplificador lineal de FI, un margen dinámico mayor de 80 dB. La tensión de CAG se obtiene de las amplitudes de los impulsos de vídeo de banda estrecha, junto con los circuitos lineales de proceso de la señal. Las características del amplificador de FI de banda estrecha determinan la selectividad de ambos modos, IA y FA.

En la rama de banda ancha, el proceso de la señal ocupa una banda de 3,5 MHz. El filtro paso banda es de 10 polos, con FET en cascada. Un discriminador Ferris consigue un rechazo del canal adyacente de 42 dB, de modo análogo al situado en el respondedor. El amplificador de banda ancha está también controlado por una tensión lineal de CAG, obtenida de la ya mencionada de banda estrecha, con un ajuste fino para compensar la desviación de ganancia entre los amplificadores de las dos ramas de FI.

El amplificador FI de banda ancha alimenta el circuito DAC a través de un demodulador de precisión, cuya respuesta en frecuencia y margen dinámico, y en particular su linealidad a niveles bajos, son esenciales para la precisión e inmunidad al ruido del umbral DAC.

### *Procesador de señal*

La medida precisa de intervalos de tiempo se basa en un contador de 20,7 MHz de frecuencia. La detección del impulso de interrogación arranca la cuenta de intervalos. Al llegar cualquier impulso de disparo (DAC en el modo FA, o HAF en todos los demás), el número de intervalos correspondiente — una palabra de 17 bits que expresa el instante de llegada — se transfiere a un registro pila. La transferencia final a la UCP se produce sólo tras la detección y/o validación repetitiva del impulso síncrono de respuesta por parte del circuito correlador. Entonces la UCP extrae los datos del instante de llegada pertenecientes al primero de los impulsos del par síncrono de respuesta.

El correlador de intervalos consiste en un registro de desplazamiento de 10 bits que

divide el campo de medida DME en una secuencia numerada de 1024 elementos de tiempo, de 6  $\mu$ s cada uno. A cada elemento se asocia un contador, que se incrementa cuando se produce un impulso de disparo durante ese elemento. Solamente el contador asociado al elemento que contenga el intervalo síncrono alcanzará un valor superior a los demás, identificando así el instante aproximado de llegada del impulso síncrono de respuesta. Como protección contra el ruido y falsas señales, la correlación se basa siempre en pares de impulsos decodificados a partir de la señal vídeo de banda estrecha. El posterior proceso en la UCP de los datos primarios del DME incluye la limitación de datos de intervalos (rechazo de datos aberrantes), filtrado de los datos primarios, y la reducción a escala y conformación de los datos de salida.

Por simplicidad de diseño lógico, se eligió un filtro digital del tipo  $\alpha/\beta$ , con las características de un servobucle del tipo II, de segundo orden, y se realizó como un filtro adaptativo. La selección de los parámetros del filtro está bastante restringida por la estrecha interdependencia que existe entre ellos y la distribución espectral asignada a las componentes de error de trayectoria y de error por ruido cinético. En el diseño actual, el valor de  $\alpha$  se varía dentro de límites específicos, que dependen del modo operativo y de la varianza de los datos primarios de entrada. Las constantes del filtro resultan de un compromiso entre la capacidad de aplanamiento y la respuesta dinámica.

### *Módulo de autocalibración*

Para compensar las variaciones del retardo y las tolerancias del equipo se incorpora un bucle de autocalibración, que sigue fielmente la técnica de impulsos piloto de FI probada en el equipo MITAC de a bordo.

En el módulo de prueba o de impulsos piloto, los impulsos de interrogación de RF se trasladan a la frecuencia portadora de 63 MHz, y los impulsos piloto resultantes se aplican a las ramas de banda estrecha y de banda ancha del receptor. El nivel del impulso piloto se adapta automáticamente al de la señal que entra en el receptor. Los disparos DAC o HAF obtenidos del impulso piloto se procesan igual que los demás impulsos recibidos. Tras la conversión a datos del instante de llegada (TOA) por medio del contador de intervalos, y la transferencia a la UCP, se aplica un algoritmo especial de filtraje que produce un valor de referencia de cero kilómetros de gran precisión, en el que se basan los cálculos posteriores de distancias.

La sección de entrada del receptor se excluye del bucle de impulsos piloto de FI. No obstante, el filtro preselector tiene suficiente anchura de banda para hacer despreciables los errores de variación del retardo.

El módulo de prueba/impulsos piloto incorpora también la generación de la señal para autopueba.

### Equipo de prueba y simulación

Para probar los equipos DME/P de tierra y de a bordo se desarrollaron equipos especiales. El nuevo simulador de baliza terrestre DME/P se convirtió en imprescindible para la prueba de equipos de a bordo. Da una precisión de retardo mejor que 5 m y produce impulsos de respuesta con ecos superpuestos. Pueden prefijarse parámetros de los ecos, tales como retardo, amplitud y diferencia de fase de RF, así como la velocidad de cambio de la diferencia de fase (frecuencia de escalonamiento).

Para probar los respondedores de tierra se utiliza el simulador de interrogador DME/P de SEL: la medida del intervalo de tiempo da una precisión superior a 5 m. Los parámetros de las interrogaciones de prueba son prefijables, y se mide intervalo de tiempo, separación entre pares de impulsos, cadencia y nivel de los mismos, y velocidad relativa de respuesta. También se incorpora un nuevo estándar para decodificar el tono de identificación en modo FA. Combinando dos de estos equipos pueden simularse situaciones específicas de señales con ecos.

### Conclusiones

Aún faltan algunos años para que entre en servicio el primer equipo DME/P, ya que ello depende de la difusión del nuevo sistema MLS. Se presupone además que el DME convencional es adecuado para instalaciones MLS de categoría I en aeropuertos regionales.

En general, sin embargo, la importancia del DME irá en aumento. En modo exploración, los modernos DME de a bordo facilitan medidas multiplexadas de distancia a varios respondedores terrestres, permitiendo a un

ordenador asociado calcular la posición de la aeronave. Un equipo DME múltiple y rentable podría suponer un paso decisivo en la formación de un sistema de navegación de zona.

La organización alemana DFVLR está investigando sobre un equipo DME de tres vías que proporcione a la estación terrena datos completos de posición e información de identificación de la aeronave, ofreciendo un control rentable del tráfico aéreo. Esta filosofía podría culminar en un sistema DME múltiple con equipos de a bordo de tres vías que operasen en modo exploración. La configuración podría finalmente conducir a un sistema combinado de navegación/control de tráfico aéreo basado exclusivamente en la técnica DME.

### Referencias

- 1 W. J. Koller: Meßfehler des Entfernungsmesssystems. Sonderforschungsbereich Flugführung der TU Braunschweig: *Wissenschaftliche Berichte*, 1982, 229-260.
- 2 R. Ullrich: Fehlerverhalten eines DME-Verfahrens mit Trapezimpulsen bei Störung durch Mehrwegeeffekte und Rauschen: *DFVLR-Forschungsbericht* 81-34, Colonia, 1981.
- 3 Patente de SEL: HF-Leistungsverstärker mit einer Modulationsschaltung: *Deutsches Patentamt*, Auslegeschrift 1835751, 1979, Munich.

**Klaus Becker** nació en Andernach, Alemania, en 1943. Estudió ingeniería de comunicaciones en la Universidad de Karlsruhe, graduándose Ing-Dipl. Ingresó en SEL en 1970, trabajando en el desarrollo y calificación del TACAN de a bordo del sistema MITAC, y de equipos DME y DAS. En 1981 fue nombrado jefe del grupo de desarrollo de equipos de a bordo para navegación civil, siendo responsable del sistema DME/P.

**Albrecht Müller** nació en Leipzig, Alemania, en 1945. Estudió ingeniería de comunicaciones en la Universidad Técnica de Darmstadt. Tras graduarse Ing-Dipl, llegó a ser lector de dicha universidad. En 1978 recibió el grado de Doctor. Ingresó entonces en SEL, trabajando en el desarrollo del DAS. En 1981 fue nombrado jefe del grupo de desarrollo de planificación de sistemas de navegación civil, y en 1983, jefe de la ingeniería de aviación civil. Ha dirigido el desarrollo de la estación terrestre del DME/P.

**Horst Vogel** nació en Stuttgart, Alemania, en 1936. Estudió ingeniería de comunicaciones en Esslingen y se graduó Ing-Dipl. Ingresó en SEL en 1962, dedicándose a los grandes ordenadores, TACAN y sistemas de navegación civil. En 1967 pasó a ser jefe de desarrollo de electrónica aeronáutica, siendo de 1976 a 1982 jefe de ingeniería de navegación civil. En 1983 fue nombrado jefe de programas y ahora supervisa los proyectos de larga duración de SEL.



# Sistema de navegación LORAN-C para Arabia Saudí

Está en curso una importante ampliación del servicio de navegación LORAN-C en Arabia Saudí, con dos nuevas cadenas que mejorarán la seguridad y eficacia del tráfico marítimo en las concurridas aguas del Mar Rojo, Golfo Pérsico y alrededores de la península arábiga.

**W. J. Garmany**

**V. L. Johnson**

**W. J. Romer**

ITT Avionics Division, Nutley, Nueva Jersey, Estados Unidos de América

## Introducción

El uso del LORAN-C para la navegación marítima ha avanzado con rapidez durante la última década, al aparecer receptores de bajo coste con microprocesadores y extenderse la cobertura LORAN-C en el hemisferio norte. Los EE.UU. completaron en 1980 una ampliación importante de este servicio al instalar 13 estaciones transmisoras, que, junto a las cinco existentes, forman seis nuevas cadenas LORAN-C que cubren totalmente las aguas costeras de EE.UU., incluyendo Alaska. ITT Avionics suministró los equipos transmisores de ocho de las nuevas estaciones.

Actualmente, 43 estaciones emisoras LORAN-C de elevada potencia (14 cadenas) prestan servicio a la navegación en el hemisferio norte, 19 de ellas con equipos suministrados por ITT Avionics. El número de usuarios ha crecido desde unos pocos miles, a mediados de los 70, hasta unos

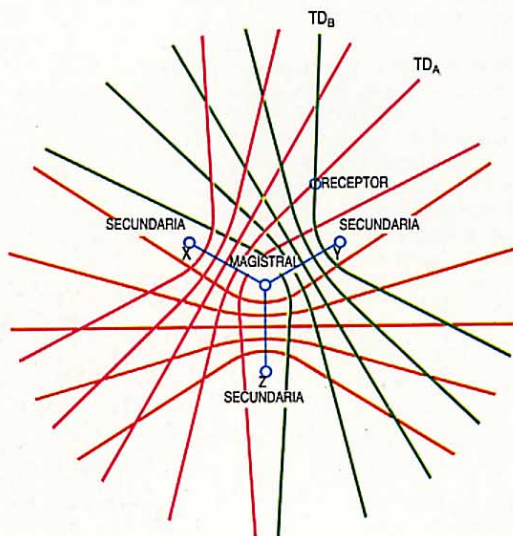
70000 en 1981, y se espera que sobrepase los 250000 a finales de esta década<sup>1</sup>.

La siguiente ampliación notable del servicio LORAN-C la está instalando en Arabia Saudí la compañía Standard Electric Alireza (mixta de ITT y la Alireza Saudí) mediante un contrato "llave en mano" con las autoridades portuarias saudíes. ITT Avionics suministra la ingeniería de sistemas y el equipo LORAN-C.

## Principios básicos del LORAN-C

El LORAN-C es un sistema de navegación hiperbólico de baja frecuencia que transmite impulsos y utiliza la medida de la diferencia de tiempo (TD), o la medida del tiempo de llegada de las señales procedentes de tres estaciones para fijar la posición del receptor. Cada cadena LORAN-C consiste en una estación emisora magistral y dos o más secundarias. La disposición de las cadenas suele tomar forma de terna o estrella (Fig. 1). Las hipérbolas de trazo continuo unen puntos de diferencia de tiempo constante, y son líneas de posición correspondientes a la terna formada por la estación magistral y las secundarias X e Y. La intersección de dos líneas de posición determina la situación del receptor. Al añadir la estación secundaria Z se obtiene la familia completa de hipérbolas que corresponde a la configuración en estrella. La situación de las estaciones es tal que en toda el área de cobertura se reciban las señales de la estación magistral y, por lo menos, de dos secundarias.

Las estaciones monitoras de zona, en el área de servicio, comprueban continuamente las señales transmitidas, midiendo la TD de cada par de estaciones magistral-secundaria con referencia al valor predeterminado para esa pareja. Esta información se



**Figura 1**  
Configuración de transmisores en terna y en estrella.

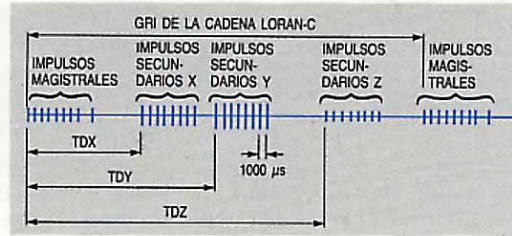
envía a una estación de control de la cadena que gobierna la cronometría del sistema. Las estaciones transmisoras están equipadas con patrones de frecuencia de haz de cesio, que aseguran una elevada estabilidad y exactitud de los tiempos.

Todos los transmisores radian grupos de impulsos a 100 kHz, usando la forma de señal de la figura 2. Cada cadena tiene asignado su propio intervalo de repetición de grupo (GRI) para permitir la selección de la cadena deseada, sincronizando el receptor al GRI escogido. Las estaciones transmisoras se utilizan a menudo en dos cadenas adyacentes, en cuyo caso el transmisor usa ambos GRI.

En números anteriores de *Comunicaciones Eléctricas*<sup>2,3</sup> se encuentra una descripción detallada del sistema LORAN-C.

### Configuración del sistema

Se están montando en Arabia Saudí dos nuevas cadenas LORAN-C, que constan de siete estaciones transmisoras de gran potencia, y tres estaciones monitoras. Los requisitos principales son: proporcionar buena cobertura LORAN-C en las aguas saudíes del Mar Rojo y Golfo Pérsico, y ubicar todas las estaciones dentro de Arabia Saudí. La figura 3 muestra la configuración del sistema y los límites de la cobertura



**Figura 2**  
Formato de la señal LORAN-C.

prevista. Se proyecta obtener la posición con una precisión repetible de 0,1 millas (2 dRMS)\*, o mejor, en las aguas saudíes, incluyendo los importantes puertos de Jeddah, Yanbu, Jubail y Dammam.

La configuración del sistema se ha ampliado para cubrir todas las aguas que rodean la península arábiga, permitiendo su circumnavegación con LORAN-C. La cobertura prevista se muestra en la figura 3.

Los transmisores modulares, de estado sólido, permiten ajustar la potencia radiada por cada estación a las necesidades de cobertura, con un límite superior de 800 kW. Se ha elegido esta potencia en las cuatro estaciones más importantes para la cobertura del sur, con largas propagaciones sobre tierra, donde la atenuación es mucho mayor que sobre el mar.

\* (dRMS) = distancia media cuadrática, es el radio de un círculo que contiene al menos el 95% de todas las posibles posiciones que pueden obtenerse con un receptor en cualquier lugar.



**Estación transmisora de Afif en Arabia Saudí.**

La puesta en servicio del sistema está prevista para 1984. Standard Electric Alireza será responsable de la operación y mantenimiento durante los dos primeros años.

emisiones. El equipo de control remoto integrado en el emisor, permite insertar correcciones de tiempo en el sistema desde la estación controladora de la cadena.

Los receptores gobernados por ordenador de las estaciones monitoras reúnen datos sobre las señales radiadas y transmiten informes regulares a la estación controladora.

La supervisión y control centralizados de las dos cadenas LORAN-C se efectúan por medio de un subsistema de control de cadena atendido en permanencia, en la estación transmisora de Al Lith. Los datos de las estaciones monitoras se registran y analizan continuamente para apreciar si necesitan ajuste el sincronismo del emisor o las características de la señal. Los medios de control remoto permiten hacer cambios operacionales en cualquiera de los siete emisores. En Al Lith existe también un centro de mantenimiento bien dotado.

### Elementos del sistema

Los impulsos LORAN-C, de exacta cronometría como requiere una navegación precisa, se obtienen radiando señales desde siete transmisores y corrigiendo sus tiempos desde una estación controladora de la cadena, donde se analizan los datos obtenidos por las tres estaciones monitoras.

Las estaciones transmisoras combinan la tolerancia a las averías con la redundancia para garantizar fiabilidad y disponibilidad máximas. La supervisión local de la señal da medios a cada estación para asegurar por separado la exactitud y estabilidad de sus

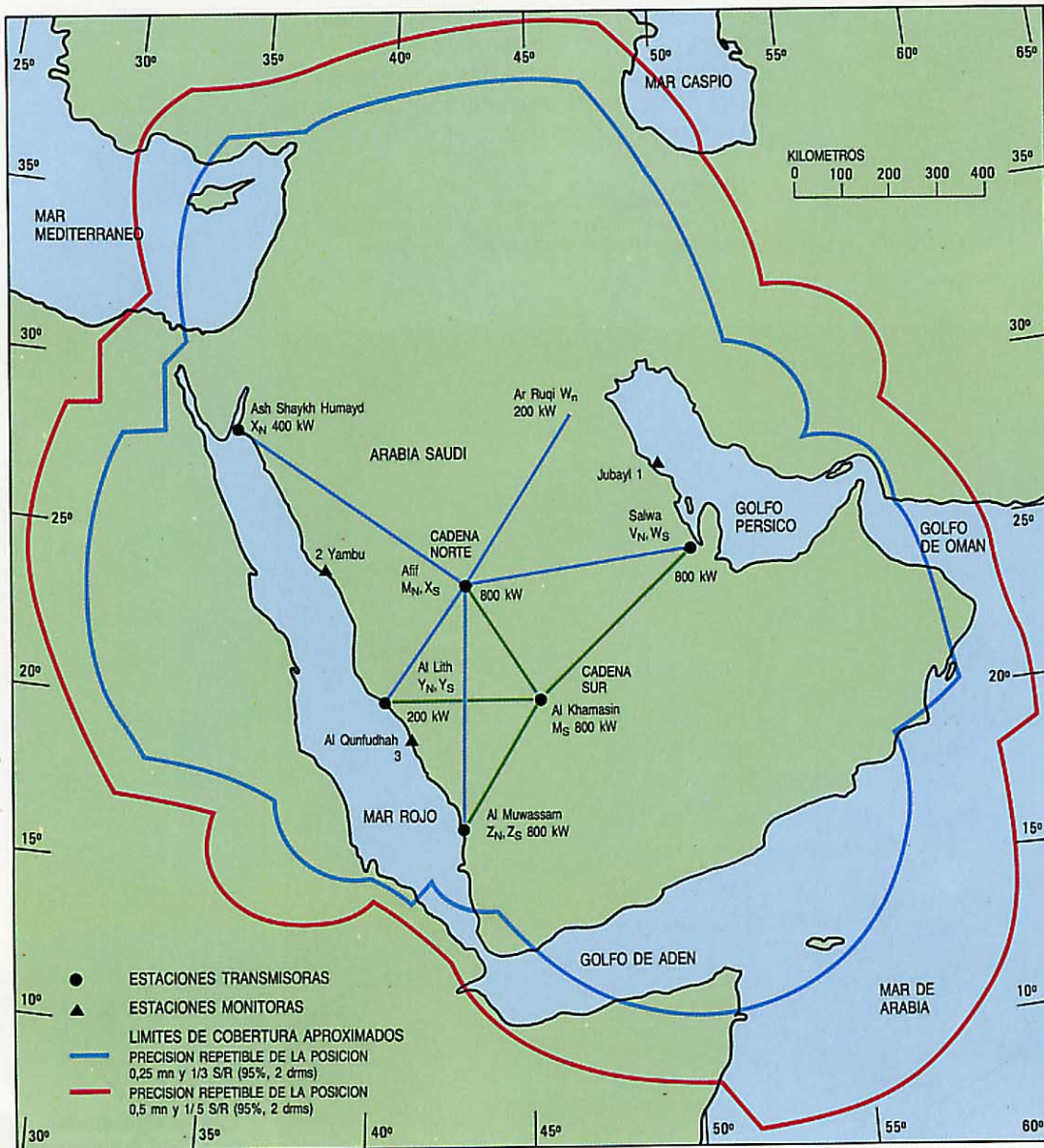


Figura 3 Sistema LORAN-C para Arabia Saudí.

Se dispone de canales de comunicación de datos para operación del receptor monitor, control remoto del transmisor, y una red de teleimpresores con fines administrativos. Una red de líneas especializadas, dentro del sistema telefónico saudí, interconecta los módems multicanales de todas las estaciones, mientras que enlaces de microondas conectan cada estación al punto más cercano de acceso a la red telefónica.

### Estaciones transmisoras

Cada estación transmisora LORAN-C es una entidad autosuficiente, con su propio alojamiento y generador de CA. Las principales unidades funcionales son: la antena, el transmisor y el equipo analizador de la señal.

Los impulsos LORAN-C se radian desde una torre de acero arriostrada, de 220 m de altura. El nivel de riorstras superior consta de 18 elementos de carga terminal de 200 m de longitud. La contraantena se compone de 120 radiales, de unos 325 m.

Los potentes impulsos de RF están generados por emisores modulares, de estado sólido. Las estaciones van equipadas con 16, 32 ó 64 módulos generadores de semiciclo (HCG), según la potencia que deban radiar.

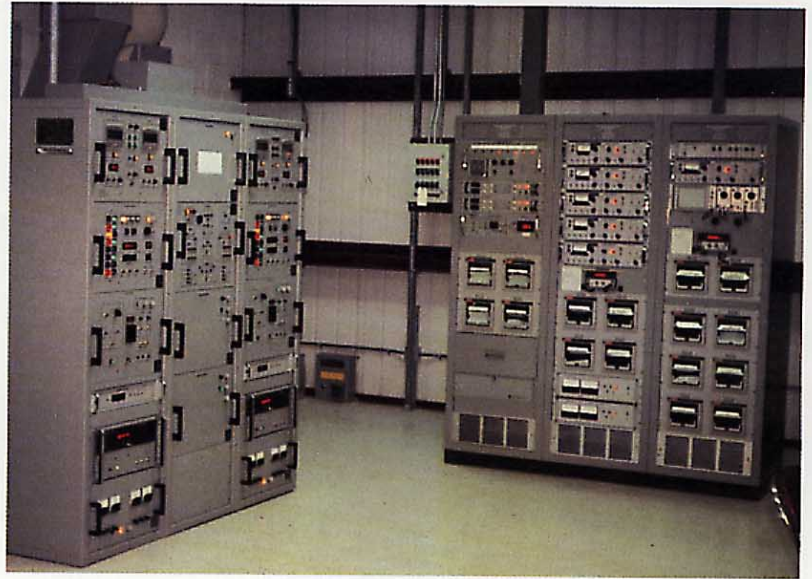
La cronometría de la salida RF del emisor descansa en disparos ultraestables generados en el formato de señal LORAN-C por el equipo de control y tiempo. Se incorporan detectores de fallo para el basculamiento automático a las unidades redundantes. Las funciones primarias del transmisor pueden ser gobernadas localmente o desde la estación de control de la cadena.

El funcionamiento correcto del transmisor se verifica mediante el equipo analizador de señal, que supervisa la amplitud de la señal de RF, la forma, y la relación entre la envolvente y los ciclos. Asimismo se comprueba continuamente la sincronización de la estación respecto de las señales recibidas desde otras estaciones.

### Equipo transmisor

El equipo transmisor consta de dos grupos principales: un cuadro de mando y un emisor.

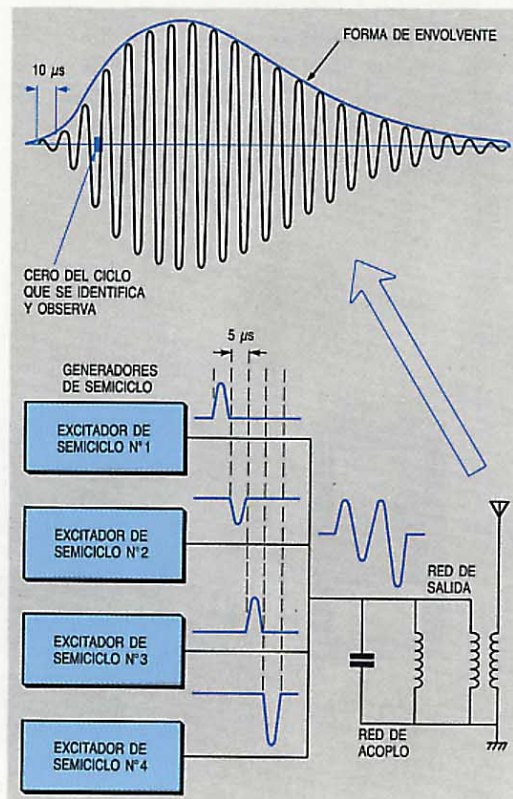
El cuadro de mando incluye todas las funciones básicas de control y tiempos en una configuración activo-reserva, que bascula automáticamente si se pierden las señales de tiempo. El emisor consta de múltiples HCG idénticos, junto con redes redundantes de acoplamiento y salida. La configuración de generadores múltiples



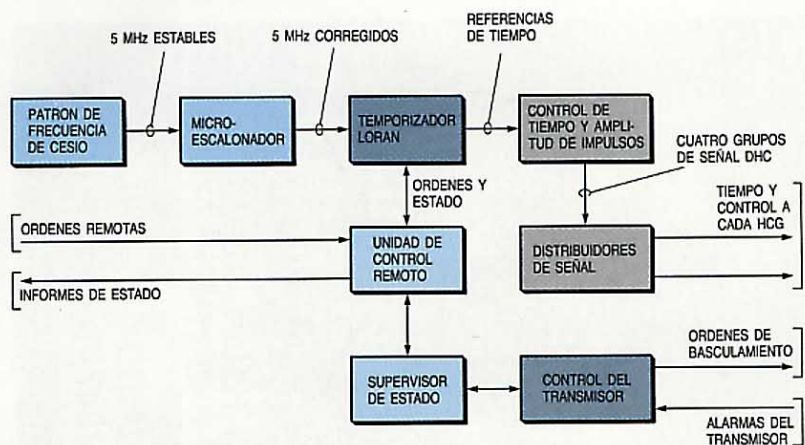
**Cuadro de mando del transmisor y equipo analizador de señal en la estación de Afif.**

funciona de modo tolerante a los fallos a fin de mantener la emisión con señales de salida aceptables, aun con varios HCG desconectados.

La figura 4 ilustra la técnica básica de generación del impulso LORAN-C. Los circuitos de control del transmisor dividen los HCG en cuatro grupos, cada uno de los cuales produce un semiciclo de excitación (DHC) de 5  $\mu$ s. La amplitud de cada DHC es función sobre todo del número de generadores HCG asignados a dicho semiciclo.



**Figura 4**  
**Generación del impulso LORAN-C.**



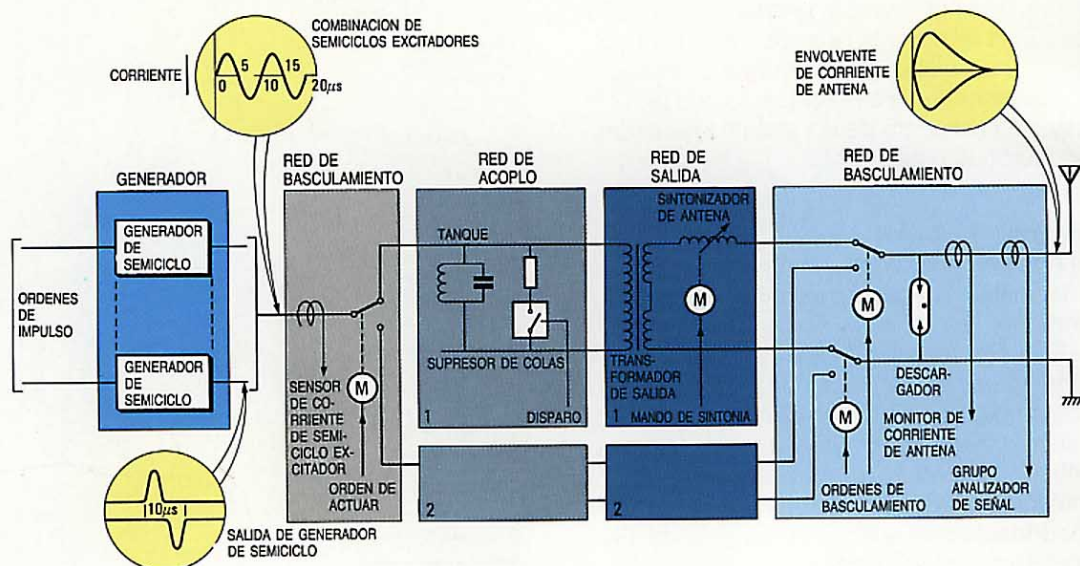
**Figura 5**  
Diagrama funcional del cuadro de mando.

Los DHC se sincronizan de tal manera que la salida de todos los generadores forme un impulso RF de 100 kHz de dos ciclos de duración, el cual ataca a una red LC de acoplamiento de elevado Q. Las amplitudes de los DHC, la red de acoplamiento, la relación de transformación de la red de salida y la impedancia de la antena, producen, conjuntamente, la forma correcta del impulso LORAN-C. El control de la forma del impulso se logra con pequeños ajustes de las amplitudes relativas de los DHC.

El cuadro de mando contiene los circuitos de tiempo y control (Fig. 5). La señal estable de 5 MHz, producida por un patrón de frecuencia de cesio, se aprovecha para obtener de ella toda la sincronización de las señales LORAN-C. Un circuito microescalador corrige las pequeñas variaciones (del orden de  $10^{-13}$ ) de la frecuencia patrón. El temporizador utiliza la señal corregida de 5 MHz para generar una secuencia de disparos en el formato LORAN-C que actúan como referencias de tiempo para los

impulsos transmitidos. El circuito temporizador también genera las señales que gobiernan la codificación de los impulsos en fase y la intermitencia que advierte a los usuarios de que hay condiciones fuera de tolerancia. Además, el circuito temporizador incluye un bucle de control compensador de ciclo para mantener un retardo fijo en el transmisor, y medios para el ajuste local de fase, que permite insertar los saltos de tiempo necesarios para conservar las relaciones correctas de tiempo y sincronismo de la señal radiada.

Los circuitos de tiempo y amplitud de los impulsos reciben disparos desde el circuito temporizador, y utilizan éstos como referencia para producir los cuatro grupos de señal DHC que necesita el transmisor. Cada grupo de señal DHC contiene: todos los disparos requeridos por los HCG del amplificador de potencia, una palabra de datos de amplitud que gobierna el nivel de salida de dichos HCG, y una palabra de datos de tiempo que controla el sincronismo de la salida de tales generadores. Una unidad de distribución de señal encamina las señales excitadoras (DHC) a los generadores individuales. Los circuitos de prueba incorporados por todo el transmisor proporcionan datos a la unidad de control del transmisor y a la unidad de supervisión de estado para el basculamiento automático hacia las unidades redundantes y la generación de alarmas. La unidad de supervisión de estado recibe también datos sobre el estado del transmisor, que se combinan junto con los datos de alarma en una salida por teleimpresor, sirviendo ésta de registro o diario de la estación. Una unidad de mando a distancia permite que la estación de control de la cadena gobierne el transmisor.



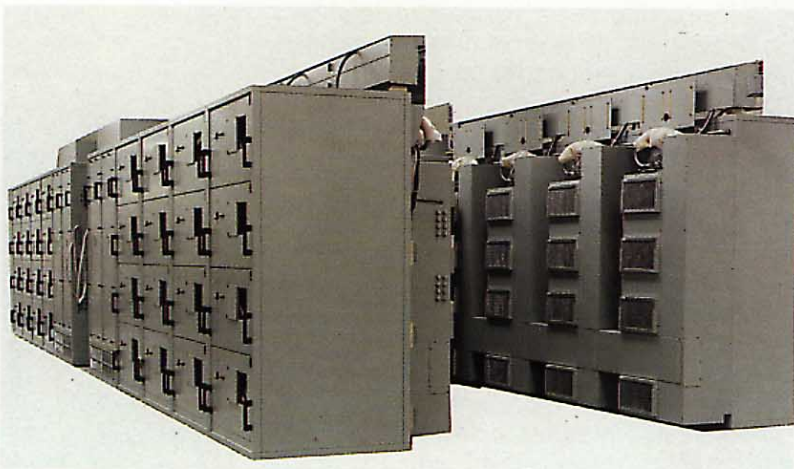
**Figura 6**  
Elementos del transmisor de estado sólido.

La figura 6 muestra los elementos básicos del transmisor. Los 64 HCG se representan como un único generador cuya salida forma la señal combinada DHC que ataca a la red de acoplamiento. Se ha dispuesto un circuito de basculamiento, ya que, tanto dicha red como los circuitos de salida, funcionan en modo activo-reserva. Un transformador de corriente a la entrada del circuito basculador proporciona una muestra DHC al cuadro de mando, donde los bucles de control mantienen a cada semiciclo excitador en su nivel adecuado. Los factores Q de la red de acoplamiento y de la antena son lo bastante elevados como para necesitar una red amortiguadora de la cola del impulso. Esta red se activa en el pico de cada impulso para absorber el exceso de energía y asegurar que el impulso caiga a cero antes de comenzar el siguiente. En la red de salida, un circuito de sintonización automática de la antena garantiza que tal sintonización se mantenga a 100 kHz. La red de basculamiento en el lado de la antena incluye un transformador de corriente, del cual se obtiene el control automático de sintonía. Un segundo transformador suministra la señal para el equipo analizador.

#### *Equipo analizador de señal*

El equipo para analizar la señal comprueba la forma y los tiempos del impulso LORAN-C, y ayuda a mantener la sincronización correcta de la estación cuando se corte la comunicación con la estación de control de la cadena. Los receptores, junto con los contadores de intervalo, establecen una relación de tiempo entre los temporizadores del emisor y las señales recibidas de otras estaciones LORAN-C. La frecuencia relativa de los patrones de frecuencia de cesio, activo y de reserva, se registra de modo continuo para garantizar la estabilidad del patrón de frecuencia de reserva. Un registro de la característica de compensación de ciclo verifica la constancia del retardo del transmisor. Un analizador eléctrico de impulsos mide la amplitud y forma del impulso de corriente en la antena emisora. La relación entre la forma del frente del impulso y el cruce por cero estándar del impulso de RF (diferencia de envolvente a ciclo) debe mantenerse dentro de límites prefijados: esta diferencia se registra y supervisa continuamente mediante un sistema de alarma.

La alarma de diferencia envolvente/ciclo, las alarmas de transmisor, y la de pérdida de portadora procedente de la unidad telegráfica, son algunas de las entradas de un repetidor de alarmas, que dispara señales acústicas y visuales para alertar al personal de la estación acerca de cualquier condición de funcionamiento anormal.



**Transmisor LORAN-C.**

#### **Estaciones monitoras**

Los equipos de supervisión se encuentran en las dos estaciones monitoras del Mar Rojo. El equipo monitor de Jubayl tiene dos receptores para dar supervisión redundante a la zona. Las tres estaciones supervisoras proporcionan conjuntamente supervisión primaria y de reserva para todas las estaciones transmisoras.

**Equipo supervisor del Mar Rojo.**



Bajo el control de un procesador de señal en tiempo real, el receptor de supervisión filtra, amplifica y muestrea las señales LORAN-C de los transmisores de ambas cadenas y prepara los datos digitales resultantes en el formato adecuado para su transmisión a la estación de control. Las diferencias de tiempo se miden con una precisión de 15 ns, y las etapas de ganancia controlada por programas dan al receptor un margen dinámico de 128 dB.

Cada receptor observa estaciones y prepara informes siguiendo las instrucciones de la estación de control de la cadena. Estos informes incluyen información sobre diferencias de tiempo, niveles de la señal, niveles de ruido y pérdidas de señal. Los informes acerca de todas las estaciones observadas son codificados, multiplexados y transmitidos por un canal de datos, en el que un módem telegráfico proporciona comunicación dúplex hacia y desde el procesador.

Un relé, gobernado a distancia, en el acoplador de antena, permite sustituir las señales de antena por la salida de un simulador, de modo que pueda probarse el equipo de supervisión desde la estación de control de la cadena.

Aunque una estación monitora esté normalmente desatendida, se ha previsto un terminal de datos con platina de cassette para el mantenimiento: se usa la platina para cargar los programas de funcionamiento y de diagnóstico, y el terminal para introducir órdenes y recibir respuestas localmente.

### Equipo analizador de datos

Los informes de la estación monitora son transmitidos al equipo analizador del subsistema de control de la cadena. Para cada uno de los cuatro receptores de supervisión, un demultiplexor de información distribuye los datos codificados entrantes a un teleimpresor y a registradores de cinta de papel. El teleimpresor se usa para control remoto del receptor de supervisión asociado. La diferencia de tiempo para cada pareja magistral/secundaria se obtiene en dos receptores supervisores y se registra en cintas de papel diferentes. También se registra la relación de envolvente a ciclo en cada señal transmitida.

Tres ordenadores de sobremesa analizan los datos de la cadena del sur, la sección del Mar Rojo de la cadena del norte, y la sección del Golfo Pérsico de la cadena del norte. Cada ordenador recibe datos de dos o más receptores supervisores y controla una impresora, un registrador gráfico y una unidad de alarmas.



Subsistema de control de una cadena.

Los ordenadores y sus periféricos dan información para controlar la diferencia de tiempo, detectar e informar acerca de la transmisión de señales anormales, y producir registros del funcionamiento de la cadena LORAN-C. Cada ordenador elabora un análisis estadístico de los datos sobre la diferencia de tiempo obtenidos por los receptores supervisores, y produce recomendaciones para el ajuste del sincronismo de los transmisores. Dichos ajustes, típicamente de  $\pm 20$  ns, se basan en el error acumulativo a largo plazo en la diferencia de tiempo, y en los datos sobre la diferencia de tiempo en cada momento. Siempre que el análisis indique que las señales transmitidas están fuera de las tolerancias especificadas, se provoca una alarma y se imprime la información del fallo. La impresora registra ciertas actividades de la cadena a medida que van ocurriendo, y resume diariamente el valor medio de la diferencia de tiempo y otros datos. El registrador gráfico traza continuamente, y para cada pareja magistral/secundaria seleccionada, las curvas de los valores diarios de la diferencia de tiempo media y del error acumulado de la diferencia de tiempo.

En esta estación se ha incluido una unidad telegráfica multicanal que multiplexa trece canales de datos a 110 baudios en una línea de 4 hilos, para la comunicación con todas las estaciones transmisoras y monitoras.

### Equipo de control remoto

El operador del control de la cadena vigila y gobierna los transmisores de todas las

estaciones mediante el equipo de control remoto, compuesto de un armario central y tres teleimpresores. La unidad de supervisión de estado transforma los datos codificados en anotaciones en lenguaje claro, escritas en los teleimpresores.

Cada transmisor envía automáticamente informes sobre situaciones anormales a la unidad de control remoto (RCU) de la cadena. Tales situaciones comprenden averías del equipo, sobrecalentamiento, y variaciones en la corriente de antena.

El operador del control de cadena puede utilizar el equipo remoto para enviar diversas órdenes a cualquier transmisor que elija, como las siguientes:

- insertar ajuste de tiempo
- conmutar al canal de tiempo de reserva
- abrir o cerrar la salida del transmisor
- enviar el informe de estado global.

Cada RCU de control de cadena dispone de un canal dúplex de datos. Todo mensaje saliente contiene un código de destino, a fin de que sólo responda el transmisor elegido. Las RCU de los transmisores prueban la línea entrante y demoran la transmisión de datos si está ocupada.

## Conclusiones

El Mar Rojo y el Golfo Pérsico son vías marítimas con un importante tráfico. El aumento de tráfico por el canal de Suez, unido al rápido crecimiento del tamaño y número de puertos activos en ambas costas de Arabia Saudí, conduce a elevar más aún el ya denso tráfico por dichas zonas. Gran parte de la costa está casi totalmente desprovista de marcas naturales o artificiales y presenta escollos mar adentro, haciendo difícil la navegación. Por otra parte, el uso creciente de instalaciones mineras y plataformas en alta mar contribuye a hacer nece-

saría una navegación exacta en todo tiempo, tanto para evitar abordajes como para el soporte de tales operaciones en alta mar.

El sistema LORAN-C saudí ofrece una precisión, repetible, de 0,1 a 0,2 millas náuticas en la determinación de la posición, de día y de noche, todo el año, en las costas saudíes bañadas por el Mar Rojo y el Golfo Pérsico. Da además una buena cobertura de las aguas al sur y al este de la península arábiga, permitiendo circumnavegar la península entera. Se estima que el sistema ofrece una disponibilidad de señal superior al 99,5%.

## Referencias

- 1 Edward L. McGann: The Evolution of Loran-C Coverage: *Navigation*, primavera 1982, volumen 29, n° 1, págs. 89–101.
- 2 J. P. Van Etten: Fundamentos de navegación hiperbólica en LF y VLF: *Comunicaciones Eléctricas*, 1970, volumen 45, n° 3, págs. 211–232.
- 3 J. P. Van Etten: El sistema LORAN-C y su desarrollo: *Comunicaciones Eléctricas*, 1970, volumen 45, n° 2, págs. 113–130.

**William J. Garmany** se graduó BS en ingeniería eléctrica por el Newark College of Engineering en 1942, y entró en ITT en 1946. Ha participado estrechamente en el diseño, fabricación e instalación del equipo LORAN-C de ITT. El Sr. Garmany es miembro destacado del grupo técnico de ingeniería del sistema LORAN. Pertenece al IEEE, al Institute of Navigation y a la Wild Goose Association (organización profesional LORAN).

**Vernon L. Johnson** recibió su grado BS en ingeniería eléctrica del North Carolina State College en 1949, y el MS del Newark College of Engineering en 1954. Desde 1949 trabaja en ITT Avionics, siendo actualmente jefe de ingeniería para los programas LORAN. Anteriormente trabajó en el desarrollo del sistema TACAN de navegación ro-teta y en un sistema de comunicación a bordo de buques. El Sr. Johnson es miembro del IEEE, del Institute of Navigation y de la Wild Goose Association.

**William J. Romer** obtuvo en 1950 el grado BS en ingeniería eléctrica del Newark College of Engineering. En 1972 entró en ITT Avionics como miembro destacado del grupo técnico de ingeniería del sistema LORAN. Antes de su ingreso en ITT había sido ingeniero de sistemas LORAN en el Servicio de Guardacostas de EE.UU. Pertenece al Institute of Navigation y a la Wild Goose Association.



# Navegación por satélite

La navegación por satélite, tanto aérea como marítima, es hoy día una técnica consolidada gracias al sistema Transit. El sistema Navstar, cuya implantación total está prevista para 1987, ofrece aún mayores precisiones, con cobertura prácticamente continua y de ámbito mundial.

**P. K. Blair**

**P. J. Hargrave**

Standard Telecommunication Laboratories Limited, Harlow, Essex, Inglaterra

## Introducción

Las medidas básicas posibles en las transmisiones por satélite son la distancia y la velocidad relativa de la línea de visión directa (o velocidad de variación de distancia). La distancia puede obtenerse del tiempo de tránsito de una señal desde el satélite al observador, y la velocidad relativa de visión directa, del desplazamiento de frecuencia Doppler de las señales recibidas. De estos datos se deduce información de navegación observando un solo satélite durante su paso por el hemisferio, para el sistema Transit, o realizando medidas a varios satélites visibles simultáneamente, como en el Navstar.

## Medida de distancia

La medida de distancia requiere que las señales procedentes del satélite lleven en su modulación indicaciones eficaces del tiempo transcurrido. En el sistema Navstar esto se consigue con el uso de códigos PRN (ruido pseudoaleatorio). Se modula la onda portadora con una secuencia aparentemente aleatoria de estados  $+1$  y  $-1$  de duración  $1/b_r$ , donde  $b_r$  es la velocidad binaria del código. Si la secuencia es una convenida y no puramente al azar, los instantes en que se reciben estados de código proporcionarán la información de distancia.

La modulación de códigos PRN reparte la energía de la portadora primitiva en un espectro de potencia  $[\text{sen } x/x]^2$ , centrado en la frecuencia portadora y con los primeros nulos desplazados  $\pm b_r$ . Un receptor mide el tiempo de llegada alineando un código generado localmente con la señal recibida. Cuando este código se mezcla con la señal demodulada, suprime todas las inversiones de fase producidas por la modulación PRN, dejando una portadora cuya frecuencia se mide para obtener la velocidad de variación de distancia. En la

señal del Navstar, la portadora principal es ligeramente modulada en fase por una señal de baja velocidad binaria ( $50 \text{ bit s}^{-1}$ ) que transporta efemérides sobre posición y movimiento del satélite.

Los códigos PRN, además de informar sobre la distancia, protegen contra las interferencias. Al suprimirse las inversiones de fase de la señal deseada, se aplican a una onda cualquiera de banda estrecha, repartiendo así la potencia interferente sobre una banda próxima a  $b_r$ , de manera que, después del filtrado, tal interferencia disminuya sensiblemente. Se dice que el aumento resultante en la relación señal-ruido proviene de la *ganancia de proceso en espectro ampliado* del código PRN.

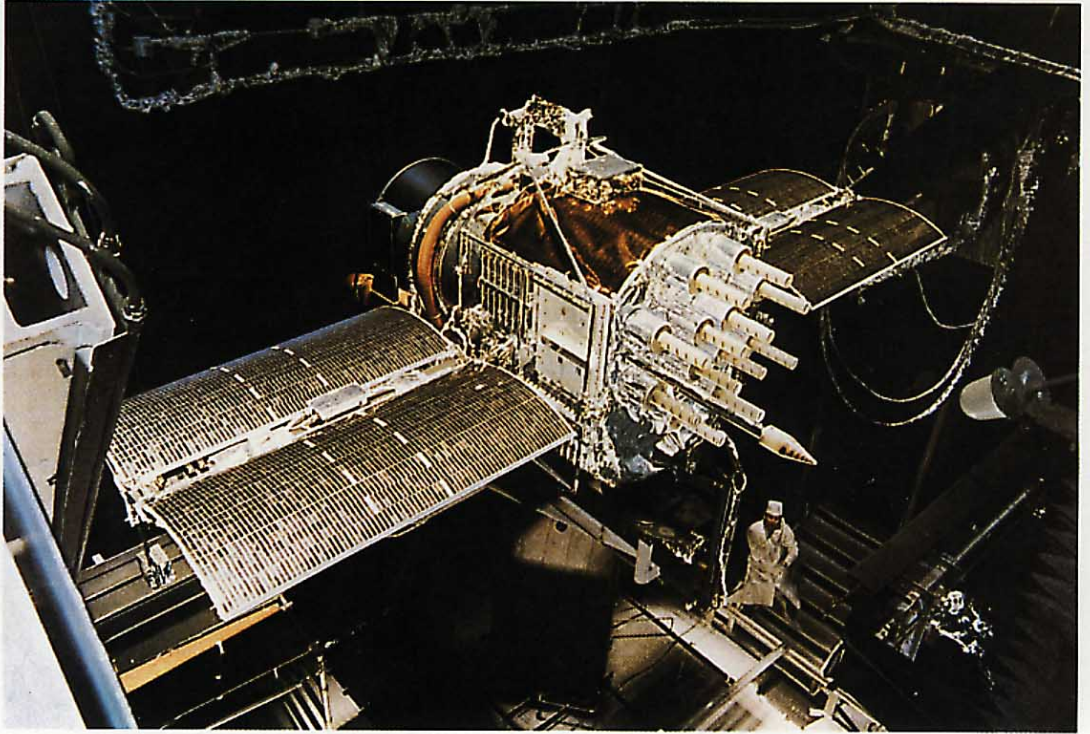
Una tercera razón para el empleo de códigos PRN es que pueden utilizarse para división espectral. Cierta número de satélites pueden transmitir en la misma frecuencia utilizando códigos de modulación con bajas funciones de correlación de cruce. Se pueden constituir grupos de códigos con buena correlación sumando las salidas de dos registros de desplazamiento de  $n$  etapas, que cada uno de ellos produzca una secuencia de longitud máxima<sup>1,2</sup>. Estas dos secuencias se escogen cuidadosamente y dan lugar a  $(2^n + 1)$  códigos Gold, al poder combinarse con  $(2^n - 1)$  desplazamientos posibles y pertenecer también a ese grupo las dos secuencias referidas.

Los códigos PRN se utilizan para medir el tiempo de tránsito de la señal de radio a lo largo de la línea de visión directa hasta el observador. Realmente se mide lo siguiente:

$$\Delta t = \int_{\text{Satélite}}^{\text{Observador}} [V_g(l)]^{-1} dl$$

donde  $V_g(l)$  es la velocidad de grupo del medio atravesado y la trayectoria de integración es la línea de visión directa desde el satélite al observador. Para convertir  $\Delta t$  a

**Satélite Navstar en pruebas.**



verdadera distancia hay que incluir los efectos del medio, que reducen  $V_g(l)$  sensiblemente por debajo de la velocidad de la luz en el vacío.

### Medida de la variación de distancias

La velocidad relativa de la línea de visión directa entre el satélite y el observador se deduce del desplazamiento Doppler de la frecuencia de señal recibida. Según esto, la variación relativa de frecuencia ( $\nu$ ) será:

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = - \frac{d}{dt} \left( \int_{\text{Satélite}}^{\text{Observador}} [V(l)]^{-1} dl \right)$$

que es la velocidad a que cambia el tiempo de tránsito de la señal desde el satélite al observador.  $V(l)$  es la velocidad de grupo del medio, si se trata de una señal modulada, o bien es la velocidad de fase, en caso de una onda portadora.

En el receptor Navstar la velocidad de variación de distancia se mide mediante un bucle de enganche de fase, el cual se alimenta con parte de la señal recibida, remodulada por un código perfectamente alineado. Dicho bucle sirve para enclavar un oscilador, controlado por voltaje (o número), a una de las fases de la señal principal, todavía bifásica modulada por datos a  $50 \text{ bit s}^{-1}$ . La velocidad de variación de distancia se mide entonces observando la frecuencia a la que se enclava la fase. El oscilador así enclavado sirve también como

referencia para detectar datos de  $50 \text{ bit s}^{-1}$ , que se llevan luego al procesador de control del receptor.

La información se puede extraer del bucle de enganche de fase siguiendo otra técnica, en la que se basa el algoritmo de navegación del sistema Transit. Durante un intervalo se controla el número total de ciclos de portadora procedentes del satélite. Se integra así en el intervalo la velocidad de variación de distancia observada, que nos permite obtener el correspondiente cambio en la distancia al satélite. Como el bucle de enganche de fase está siguiendo, hasta en pequeñas fracciones de longitud de onda, la portadora de RF recibida, esta medida es extremadamente precisa. Sin embargo, a diferencia de la medida del tiempo de tránsito, esto da solamente la variación (incremento) de distancia al satélite durante cierto periodo, en vez de distancias absolutas en un instante dado. No obstante, estos datos pueden proporcionar la posición, siguiendo un proceso iterativo de búsqueda hasta coincidir con las mediciones efectuadas.

### Consideraciones sobre la sección de control

Para que un observador pueda utilizar las medidas tomadas de posición y velocidad en su navegación referida a la superficie terrestre, necesita información sobre velocidades y posiciones de los satélites en función del tiempo. Los satélites deben también transmitir estos datos efemérides.

En ambos sistemas Transit y Navstar, dichos datos van modulados en fase sobre las portadoras utilizadas para medidas Doppler.

Las efemérides de los satélites Transit y Navstar se calculan a partir de datos obtenidos en las estaciones terrenas de seguimiento. Estas estaciones, en emplazamientos conocidos, utilizan la correspondiente información de navegación que procede de los satélites para el cómputo de los parámetros orbitales. La información se envía luego al satélite, vía un enlace ascendente, para su proceso y consiguiente reenvío al observador. Dado que las transmisiones tierra-satélite son poco frecuentes, los satélites van equipados con relojes de exactitud suficiente para mantener la precisión adecuada en las transmisiones descendentes.

Cualquier error de frecuencia en el oscilador maestro del satélite causará un error de tiempo  $\Delta t$  en la transmisión. Cuando la distancia al satélite se mide por el tiempo de tránsito de la señal a lo largo de la línea de visión directa, dicho error de tiempo producirá un error de posición próximo a  $c\Delta t$ , siendo  $c$  la velocidad de la luz en el vacío. Por ello, los sistemas que utilizan este tipo de medidas (p. ej., Navstar) requieren a bordo sistemas de temporización muy precisos, tales como relojes atómicos, y algún procedimiento para sincronizar el reloj del receptor con los de los satélites.

### Correcciones de medida

Las transmisiones desde el satélite al observador atraviesan la ionosfera y la troposfera. Las velocidades de grupo y fase de las señales de radio en estos medios difieren sensiblemente de las que hay en el vacío, y por ello se hace necesario aplicar a las medidas factores de corrección antes de ser procesadas en el algoritmo de navegación.

En un sistema que mide distancia a satélites por el tiempo de tránsito y que utiliza patrones de tiempo muy exactos en los propios satélites, hay que corregir los efectos de la relatividad general y la especial. Ambas afectan a la velocidad de marcha de los relojes de los satélites y por tanto a la precisión de posicionado.

### La ionosfera

La velocidad de grupo apropiada a través de la ionosfera, para frecuencias del Navstar y Transit, puede calcularse por un método estándar de aproximación. Después, utilizando la expresión de la velocidad de grupo, se determina el retardo causado por el paso de la señal modulada por la ionosfera,

pudiendo demostrarse que tal retardo depende de la densidad superficial de electrones a lo largo de la línea de visión directa.

El observador puede introducir correcciones para compensar el retardo ionosférico, si posee información sobre las densidades superficiales aplicables. Con este fin, los satélites Navstar envían parámetros que caracterizan una ionosfera tipo, dentro del flujo de datos a  $50 \text{ bit s}^{-1}$ . Alternativamente, puesto que  $\Delta t$  es proporcional a  $1/\nu^2$ , el retardo ionosférico se corrige hallando el tiempo de tránsito para dos frecuencias distintas. El Navstar emplea esta técnica para conseguir un servicio de navegación lo más preciso posible. Todos los satélites transmiten dos señales de banda L, moduladas por códigos PRN.

Como norma general, hay que observar el desplazamiento Doppler de una portadora de RF para medir la velocidad de variación de distancia. Así, pues, se controla la rapidez de cambio del tiempo de tránsito de una señal procedente del satélite, siendo la velocidad de propagación relevante la velocidad de fase en la ionosfera. Aquí también pueden corregirse los efectos de la ionosfera midiendo la velocidad de variación de distancia para dos frecuencias portadoras distintas.

### La troposfera

El tiempo de tránsito de una señal transmitida aumenta de nuevo al pasar por la troposfera. A diferencia de la ionosfera, la troposfera es un medio no dispersivo para las radiofrecuencias. Es decir, la velocidad de grupo no depende de la frecuencia de la portadora, y el medio se caracteriza por un índice de refracción  $n(l)$  que no varía con la frecuencia. Así, pues, el retardo extra que impone a las señales la troposfera puede expresarse de la siguiente forma:

$$\Delta t = c^{-1} \int_{\text{Satélite}}^{\text{Observador}} [n(l) - 1] dl.$$

Como la troposfera es un medio no dispersivo, el retardo no puede corregirse mediante observaciones múltiples. Por ello hay que introducir un modelo. En los modelos más sencillos se suele suponer que el índice de refracción depende de la altura.

El uso de esta atmósfera patrón puede producir errores importantes a pequeños ángulos de elevación, en condiciones meteorológicas extremas. Por esta razón, cuando se desean datos precisos de navegación, es conveniente no realizar observaciones de tiempos de tránsito desde satélites con elevaciones inferiores a unos  $5^\circ$ .

Para obtener una buena precisión hay que efectuar las correcciones oportunas en las medidas de velocidad de variación de distancia.

#### *Correcciones por relatividad*

A causa del efecto de la relatividad especial, a un observador sobre la superficie de la tierra le parece que el reloj del satélite atrasa; esto ocasionará una deformación en cualquier medida de distancia basada en el tiempo de tránsito.

El reloj del satélite está también a un potencial gravitatorio superior al del observador y, de acuerdo con la teoría general de la relatividad, parece que adelanta. También existen fórmulas para estimar la magnitud de este efecto.

Para un satélite situado en una órbita cercana a la tierra predomina el efecto de la relatividad especial, y el observador ve atrasarse el reloj del satélite. A la inversa, si la órbita es elevada, domina el efecto de relatividad general, y parece que el reloj del satélite adelanta.

En los satélites Navstar, con periodos orbitales de 12 horas, predomina el efecto de relatividad general. Si no se introducen correcciones, la medida de distancia al satélite tendrá un error, que crecerá a unos 500 m/hora. Para evitar esto, el reloj del satélite se construye de tal forma que atrase deliberadamente en la superficie de la tierra. Al algoritmo de navegación se le aplica también otra corrección, por ser ligeramente elípticas las órbitas de los satélites, lo que supone variaciones con el tiempo de la velocidad del satélite y del radio orbital.

#### **Requisitos de navegación y sistemas de navegación por satélite**

Entre los criterios aplicados por los usuarios para la elección de un sistema de navegación figuran los siguientes: conveniencia operacional, coste, cobertura, fiabilidad, e integridad (operación en cualquier clima, libre de interferencias atmosféricas). Los sistemas basados en satélite ofrecen el atractivo de propagación por línea de visión directa y cobertura mundial, habiendo sido a veces presentados como la solución para todas las necesidades de navegación. Sin embargo, la historia de la radionavegación enseña que la solución óptima suele residir en combinaciones de sistemas, a menudo distintos en sus características.

Los satélites son excelentes para la navegación de *crucero* u oceánica, pero en la fase final, cuando un barco o avión se aproxima a su destino, hace falta mayor precisión. Es más racional un sistema de

ayuda que relacione la nave con el puerto o con la pista de aterrizaje. Además, durante el aterrizaje de un avión, el tiempo de reacción es muy corto (sólo 2 segundos) para avisar en caso de emergencia. Los satélites pueden satisfacer estos requisitos, pero el coste adicional de la estación terrestre sería prohibitivo.

Debido al alto coste de los sistemas por satélite es difícil dotar al usuario de un nivel de redundancia semejante, por ejemplo, al de los sistemas VOR, balizas radiogoniométricas y radares secundarios de vigilancia. Tanto el Transit como el Navstar, ven limitadas su cobertura y redundancia por el coste del sistema.



#### **Sistemas de navegación por satélite actuales y futuros**

##### *Transit*

El Transit es el único sistema actual totalmente operativo, explotado por la Marina de EE.UU. desde 1959, y al que hoy acceden cerca de 40.000 usuarios, civiles en un 90%. Los presentes planes suspenden su empleo a partir de 1992, cuando el sistema Navstar estará en plena explotación.

El Transit consta de 4 satélites que operan en órbitas polares a 1075 km. Cada satélite transmite frecuencias portadoras estables coherentes de 150 y 400 MHz. El mensaje de navegación, conteniendo parámetros orbitales, desviaciones de la órbita elíptica, tiempo de carga del mensaje, etc., se transmite cada 2 minutos modulando en fase las dos señales. El receptor del usuario mide el desplazamiento Doppler durante una pasada del satélite, y luego calcula su posición geográfica.

Se introducen correcciones de refracción ionosférica y troposférica. La precisión del posicionado final depende de que el usuario conozca la velocidad y altura sobre el esferoide de referencia.

El sistema Transit tiene en EE.UU. 4 estaciones monitoras terrestres que proporcionan, cada 12 horas, información para

**Receptor Navstar desarrollado por Standard Telecommunication Laboratories. De izquierda a derecha: unidad de carga de programa, unidad de entrada de RF, unidad de canal, y unidad de control y presentación.**

actualizar los parámetros orbitales del satélite. La precisión de posicionado RMS en dos dimensiones se prevé<sup>3</sup> que alcance 25 m, midiendo con dos frecuencias, pero puede incurrirse en errores importantes a causa de estimaciones inexactas de la velocidad. La cobertura del Transit es quizá su peor inconveniente; pueden darse variaciones de posición, desde aproximadamente 30 minutos a 80° de latitud, hasta 110 minutos en el ecuador.

Se ha utilizado mucho el Transit para vigilancia, con precisiones diferenciales por debajo de un metro<sup>4</sup>, y se dispone de receptores de navegación para una amplia gama de aplicaciones, desde submarinos hasta embarcaciones de recreo, de coste inferior a las 1000 libras en los más sencillos.

### Navstar

El éxito del Transit estimuló al Departamento de Defensa de EE.UU. para estudiar sistemas más avanzados, destinados a aplicaciones más dinámicas. Esto condujo al nacimiento del sistema Navstar, actualmente en fase de desarrollo y evaluación experimental en EE.UU. y otros países, sobre todo en el Reino Unido.

Se prevé que el sistema Navstar completo conste de 18 satélites operacionales con tres en órbita como reserva, dispuestos en órbitas casi circulares, de radios de 26600 km e inclinaciones de 55° con respecto al plano ecuatorial terrestre. Cada satélite transmite dos señales de navegación sobre portadoras de 1575 y 1228 MHz, que provienen ambas de patrones atómicos de frecuencia de los propios satélites, y transportan información de la distancia mediante modulaciones sincronizadas a dichos patrones. Estas modulaciones son exclusivas para cada satélite. Midiendo las fases de los códigos recibidos en el reloj del receptor, conjuntamente con los desplazamientos Doppler de las portadoras de RF, un observador puede calcular la distancia y la velocidad de variación de distancia a un satélite dado. Estos cálculos no son muy seguros, dada la falta de precisión del reloj del receptor, que no posee la estabilidad inherente a los patrones atómicos empleados por los satélites.

Sin embargo, mediante el control de 4 satélites (y decodificando datos de sus movimientos, que están también modulados en las señales transmitidas) el observador puede hallar su posición tridimensional y velocidad, así como corregir su reloj, ajustándolo al tiempo horario del satélite. De otro modo, si el observador se limita a desplazarse sobre la superficie terrestre o está situado a una altitud conocida, podrá obtener medidas bidimensionales utilizando tres satélites. La programación de

control del receptor deberá escoger, entre los satélites a la vista, el equipo que proporcione la geometría más favorable para los cálculos de navegación. Igual que sucedía con el sistema Transit, se pueden utilizar dos señales para corregir los efectos de la ionosfera.

Cada satélite transmite dos códigos pseudoaleatorios. El primero, *un código de adquisición a primer nivel*, se utiliza para ayudar a la captación de señales del satélite y para navegación a primer nivel (recientemente se denomina *servicio de posicionado estándar*). El segundo, llamado *código de precisión o servicio de posicionado de precisión*, tiene una tasa de modulación 10 veces superior, lo cual da una plena precisión al sistema.

Las transmisiones por satélite están supervisadas continuamente por estaciones monitoras receptoras, situadas en puntos fijos muy separados, que miden las distancias al satélite y permiten a la estación de control principal determinar con exactitud las posiciones del satélite y los errores de los relojes. Estos datos se retransmiten al satélite, a través de una estación de control principal, a fin de que actualice su mensaje de navegación<sup>3,5</sup>.

### Proceso de navegación Navstar

A fin de obtener una posición completa tridimensional y una estimación de la velocidad, es necesario sintonizar el receptor a las transmisiones procedentes de los cuatro satélites. Se toman cuatro medidas de seudodistancia sintonizando los bucles de seguimiento de códigos a las señales recibidas, y hallando los tiempos de ocurrencia de ciertos estados, o épocas, de los generadores de códigos dentro de dichos bucles, con ayuda del reloj del receptor. Estas medidas no son de distancia real, a causa de la (todavía) indeterminada desviación en el reloj del receptor. Análogamente, se obtienen cuatro medidas de velocidad de variación de seudodistancia, midiendo las frecuencias de los osciladores controlados en tensión por el bucle de seguimiento de portadora, durante un tiempo determinado por el reloj del receptor. Estas difieren de los verdaderos valores debido al error de frecuencia del reloj, y, unidas a los datos orbitales de cada satélite, proporcionan una exacta información de navegación (Fig. 1).

### Tipos de receptores

Todos los receptores Navstar tienen una forma genérica similar: amplificación RF y conversión en baja, bucles de seguimiento de portadora y código de FI, un procesador de control para "vigilar" la operación, un procesador de navegación, y un interfaz de operador.

Se han experimentado receptores de estructuras diversas; dependiendo de la dinámica de trabajo del receptor, rigurosa o leve, los bucles de seguimiento de portadora y de código pueden funcionar en paralelo o secuencialmente. Se pueden utilizar múltiples pasos de entrada de RF, en caso de necesitar más de un sistema de antena para tener visibilidad continua del satélite. En algunas aplicaciones, el interfaz del operador o unidad de control y presentación se integra en una unidad existente, con el fin de mantener el peso y el espacio; en otros casos, puede ser rentable utilizar parte de la capacidad de proceso de otro ordenador de a bordo para el cálculo de los datos de navegación.

STL ha fabricado ocho receptores Navstar, mediante contrato con el Ministerio de Defensa del Reino Unido, que actualmente se están probando en aviones y barcos. Estos receptores trabajan con cinco canales en paralelo y además se acoplan a una antena adaptable y sistemas inerciales<sup>6</sup>.

La precisión absoluta dada por el servicio de posicionado es de 18 m (RMS) en el

posible la operación diferencial, que probablemente dará precisiones (utilizando el código del servicio de posicionado estándar) comparables a las conseguidas por el posicionado de precisión, pero hace falta un enlace de datos para transmitir la corrección diferencial. El usuario y el receptor estático han de utilizar forzosamente el mismo satélite.

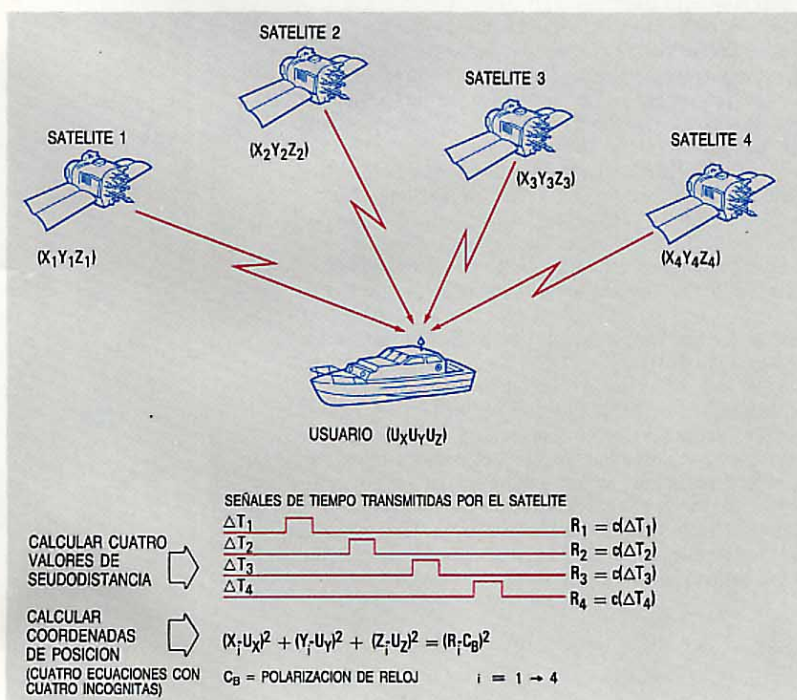
Se ha proyectado para 1987 la plena capacidad operacional del sistema. Las Fuerzas Aéreas de EE.UU. han hecho recientemente un pedido de 28 satélites, disipando cualquier duda sobre la adopción del sistema por el Departamento de Defensa. La cobertura dada por el Navstar se considera hoy como "casi continua"; con 18 satélites se producen algunos "agujeros" en la cobertura, si bien por menos de una hora al día. Sin embargo, estos agujeros aparecen en algunas zonas importantes, como el Mar Mediterráneo<sup>7</sup>.

### Sugerencias sobre sistemas alternativos

Quizás por las limitaciones iniciales sobre el uso civil del Navstar, se han formulado propuestas de otros sistemas de navegación por satélite, específicos para aplicaciones civiles. Tal vez el más conocido es el Navsat, resultado de los estudios de la Agencia Espacial Europea<sup>8</sup>, cuyo objetivo es minimizar el coste del equipo de usuario y el equipo espacial simplificando el formato de la señal, aun a costa de una mayor complejidad de la estación de tierra. Con estas premisas se espera rebajar el coste total.

Para el sistema Navsat se recomienda una constelación de 24 satélites, análoga a la propuesta inicialmente para el Navstar, aunque la operación de cada satélite se simplifica en gran manera. Dado que todas las frecuencias de enlace en ambos sentidos con los satélites Navsat pueden protegerse mediante acuerdos internacionales, y que el control de satélites puede distribuirse entre países colaboradores, es factible mantener transmisiones constantes tierra-satélite. El diseño de los satélites puede, por consiguiente, ceñirse a la simple función de respondedor que retransmita las informaciones de navegación desde la sección de control, simplificando así la sección espacial.

El método de determinación de posición propuesto para el Navsat, consiste de nuevo en la medida de pseudodistancias a cuatro satélites visibles simultáneamente. A fin de simplificar el equipo de usuario, y por no hacer falta proteger contra interferencias las transmisiones satélite-tierra, puede adoptarse un formato de señal más sencillo.



**Figura 1**  
Principio del sistema Navstar, mostrando cómo el usuario puede calcular su posición resolviendo un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas.

plano horizontal y de 15 m (RMS) en el vertical<sup>3</sup>, con una exactitud en tiempo de 35 ns y una desviación del UTC (tiempo universal coordinado) de 120 ns. El nivel de precisión para aplicaciones civiles será controlado por el gobierno de los Estados Unidos. Últimamente se ha revisado este nivel y, en la actualidad, está fijado en 100 m (95%), lo cual aproxima a 40 m el error circular probable. Con el sistema Navstar es

Una solución consiste en que el satélite transmita ráfagas de señales multiplexadas por división temporal. Estas señales pueden contener modulaciones de código pseudoaleatorias, pero no es necesario que difieran de un satélite a otro. Así, pues, el receptor no necesita saber qué satélites son inicialmente visibles, ni tiene que realizar operación secuencial alguna para recibir señales de satélites distintos.

Un requisito de la sección de control es que cada satélite sea visible constantemente desde una estación terrena al menos, lo cual requiere unas cinco estaciones. Estas tienen la misión de determinar las órbitas exactas de los satélites y generar las transmisiones hacia los mismos. SEL propone un sistema llamado GRANAS, que se asemeja bastante al Navsat.

No es necesario utilizar satélites especializados para obtener información de posición. En 1981 se demostró que la posición de un barco fluvial podía determinarse con una precisión de 0,1 millas náuticas, mediante una técnica basada en la medición de distancia por una señal enviada a través del satélite ATS6, unida a una medición del tiempo de llegada procedente del satélite NOAA-GOES<sup>9</sup>.

En el futuro se pueden imaginar satélites que atiendan a comunicaciones, navegación y vigilancia, repartiendo así su elevado coste entre varias funciones y pudiendo recuperar tales costes de algunos de los usuarios, por lo menos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen de forma especial la ayuda prestada por el Ministerio de Defensa del Reino Unido (Procurement Executive) para el desarrollo del receptor Navstar.

## Referencias

- 1 R. Gold: Maximal Recursive Sequences with 3-valued Recursive Cross Correlation Functions:

*Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Information Theory*, págs. 154–156, enero 1968.

- 2 R. Gold: Optimal Binary Sequences for Spread Spectrum Multiplexing. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Information Theory*, págs. 619–621, octubre 1967.
- 3 *Federal Radio Navigation Plan*, marzo 1982. DOD-4650.4-P, DOT-TSC-RSPA-81-12, volumen 3, Radio Navigation System Characteristics.
- 4 W. F. Blanchard: The Continuing Development of Transit. Third International Conference on Satellite Systems for Mobile Communication and Navigation, *Institution of Electrical Engineers Conference Publication n° 222*, págs. 189–199.
- 5 *Diario de Navegación Internacional*: verano 1978, volumen 25, n° 2.
- 6 J. P. Sudworth et al: Design and Performance Evaluation of a Five Channel Navstar Receiver. *Proceedings of the Military Microwaves Conference*, octubre 1982.
- 7 P. Kruh: Satellite Constellation. Proceedings of the Global Positioning System Symposium, 21–22 abril 1983, Arlington, Virginia.
- 8 P. Diederich: The promise of Navsat for Civil Navigation. Third International Conference on Satellite Systems for Mobile Communications and Navigation, *Institution of Electrical Engineers Conference Publication n° 222*, págs. 200–206.
- 9 R. E. Anderson et al: Position Surveillance using one Active Ranging Satellite and Time-of-Arrival of a Signal from an Independent Satellite. *Navigation*, invierno 1980–81, volumen 27, n° 4.

**Peter Kenneth Blair** nació en 1937, obtuvo el grado HNC y el diploma en ingeniería eléctrica mientras practicaba en Marconi Company. Entró en STL en 1962 como ingeniero de investigación, trabajando en sistemas MIC de gran velocidad, transmisores de microondas de estado sólido y reemisores de TV. En 1971 fue nombrado jefe del departamento de ayudas a la navegación y radio móvil. Desde 1977, es jefe de la división de defensa y sistemas afines, y entre sus responsabilidades está la programación del GPS (sistema de posicionamiento mundial) Navstar, sistemas de radar, ayudas para la marina mercante, e investigación de sistemas avanzados de antenas. El Sr. Blair es miembro del IEE.

**Philip J. Hargrave** obtuvo el grado BSc en física por la Universidad de Bristol, en 1971. Se dedicó a la investigación en radioastronomía en el Laboratorio Cavendish, Cambridge, y en 1975 consiguió el PhD. En 1977 entró en STL, donde se dedicó al diseño de receptores Navstar de alto rendimiento, al estudio de sistemas de antena adaptativos y, más recientemente, a la modelación matemática de una amplia gama de sistemas de defensa. El Dr. Hargrave es miembro del IEE y socio de la Royal Astronomical Society. Actualmente es jefe del departamento de sistemas adaptativos en STL.

# En este número

Dodgington, S. H.

## **Sistemas de ayuda a la navegación civil en ITT**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, n°3, págs. 251—255

En los pasados 10 años se han producido considerables cambios en el campo de ayudas a la navegación. Uno de los más importantes es la normalización por la OACI del haz explorador referido al tiempo para el sistema de aterrizaje por microondas. A esto hay que añadir el gran interés despertado por el sistema de posicionamiento mundial por satélites, que permite precisiones de 20 metros. El autor examina estos nuevos desarrollos y la evolución de los sistemas actuales, y hace un breve pronóstico del estado de las principales ayudas a la navegación a finales de siglo.

Lang, A. H.

## **Segunda generación de equipos VORTAC**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, n°3, págs. 256—262

VORTAC y VOR/DME son las principales ayudas a la navegación en el sistema de cobertura del espacio aéreo de los Estados Unidos. Los equipos de válvulas existentes, cuyo mantenimiento se ha encarecido, se están sustituyendo para asegurar la continuación de este servicio más allá de 1995. El autor describe el nuevo equipo, que utiliza moderna tecnología para ofrecer mayor fiabilidad, posibilidades de supervisión y mantenimiento remotos, y una mayor disponibilidad del sistema. La introducción de microordenadores permite utilizar control y mantenimiento remotos en todas las funciones de control de la estación, en pruebas automáticas de certificación, y en pruebas remotas de diagnóstico y de tendencias, a fin de mejorar aún más el mantenimiento. El sistema VORTAC de estado sólido resultante, proporciona una vida útil superior a 20 años a un reducido coste total.

Walters, D. W.

## **Equipo terrestre de comunicaciones para control de tráfico aéreo**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, n°3, págs. 263—269

Actualmente se están utilizando en comunicaciones vocales para ATC (control de tráfico aéreo) transmisores y receptores de canal único y sintonía fija producidos por la División Aeroespacial/Optica de ITT. El funcionamiento de la radio en ATC, contigua a otros equipos electrónicos y de radio, es crítico en cuanto afecta a la seguridad de los pasajeros, y a la eficiencia y productividad del controlador aéreo. El desarrollo de nuevas tecnologías conducirá a mejorar las prestaciones radioeléctricas y a añadir nuevas características a los equipos de radio para hacer frente a los ajustados presupuestos y al incremento de viajes aéreos.

Kleiber, H.; Knoppik, N.; Vogel, H.

## **Sistema 4000 de ayudas a la navegación**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, n°3, págs. 270—276

El Sistema 4000 es una nueva generación de equipo de navegación para el ILS (sistema de aterrizaje instrumental), VOR (radiofaro VHF omnidireccional) y DVOR (VOR Doppler). Se han logrado fiabilidad y prestaciones superiores a las de anteriores sistemas por la intensa utilización de microprocesadores en control y supervisión, y aplicando técnicas digitales a la generación de señales analógicas. Con una gama limitada de módulos de equipo y de programas pueden formarse todos los sistemas. La práctica de equipo emplea placas enchufables de circuito impreso en bastidores de 19 pulgadas. Los módulos del transmisor se montan sobre una gran placa disipadora en el costado del armario, prescindiendo así de ventiladores. El tablero de mando y la pantalla incorporan al sistema toda una serie de facilidades. Existen antenas para las distintas aplicaciones, con diagramas omnidireccionales y de sección en ocho en el VOR, y bidireccionales, de dipolos o especiales para el ILS.

Limbach, F.; Pählig, K.

## **Estructuras de equipo y programación del Sistema 4000**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, n°3, págs. 277—282

La aplicación de la tecnología digital a las funciones de control y supervisión en el Sistema 4000 de ayudas a la navegación ha permitido el diseño y desarrollo común de ambos módulos de alta frecuencia y de proceso de señal en baja frecuencia, posibilitando que las funciones ILS, VOR y DVOR se efectúen con equipo virtualmente idéntico. El sistema de control y supervisión se realiza mediante un microprocesador de 16 bits, que ejecuta la función principal de vigilar las señales de los transmisores radiante y en reserva. Los autores describen cómo se han satisfecho estos requisitos, utilizando una estructura de equipo modular. La programación asociada se subdivide en módulos que se pueden compilar y probar independientemente, y desempeñan funciones específicas para diversas configuraciones de equipo.

Johannessen, R.

## **Radiofaro de VHF**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, n°3, págs. 283—288

El radiofaro es una ayuda a la navegación específicamente diseñada para pequeñas embarcaciones costeras, pesqueros de bajura y naves de recreo. Además ha demostrado ser muy útil para barcos mayores cuando los otros receptores de navegación se inutilizan, por ejemplo, en caso de fuerte interferencia electrostática. Da información azimutal a cualquier barco que, dentro del área de cobertura, esté equipado con un transceptor o receptor de VHF adecuado, sin requerir más equipo a bordo. Dado que la información radio es independiente del rumbo del barco y de su balanceo, cabeceo y guiñada en mar gruesa, resulta muy fácil tomar marcaciones. El sistema es atractivo para las autoridades responsables de la señalización costera, ya que es sencillo de instalar, el montaje de la antena es de bajo coste, y apenas requiere mantenimiento.

Bertocchi, G.

## **Nueva familia de equipos TACAN y DME**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, n°3, págs. 289—292

La mayoría de los equipos de navegación TACAN y DME utilizados en el mundo llevan muchos años en servicio y su mantenimiento se está encareciendo. Puesto que ambas ayudas a la navegación seguirán en uso extendido durante los años 1990, FACE emprendió el desarrollo de una nueva familia de TACAN y DME con mejores prestaciones y fiabilidad, mantenimiento más sencillo, y coste reducido en su vida útil. El autor describe cómo se han logrado en la práctica estos objetivos mediante la utilización de tecnología digital, radiobalizas respondedoras y monitores dobles, y equipo de prueba incorporado. El resultado es un diseño de amplio espectro, que cumple todas las especificaciones civiles y militares.

Lazzaroni, E.

## **Uso civil del TACAN**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, n°3, págs. 293—298

El sistema TACAN es una ayuda a la navegación bien conocida, utilizada sobre todo en aplicaciones militares. El autor describe cómo la tecnología moderna ha permitido reducir el coste de las instalaciones TACAN, abriendo un abanico de nuevas aplicaciones civiles como la navegación de helicópteros a plataformas petrolíferas marinas. Comparando el TACAN con otras grandes ayudas a la navegación, el autor llega a la conclusión de que las modernas balizas TACAN de estado sólido con antenas también de estado sólido, ofrecen varias ventajas en tales aplicaciones.

Johnson, R. E.

## **Radar de aproximación de gran precisión con exploración de haz cónico**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, n°3, págs. 299—304

El PAR-80 es un radar de aproximación de gran precisión (PAR) con exploración de haz cónico, desarrollado y producido por ITT Gilfillan. Este radar se utiliza para guiar al avión durante el aterrizaje. El artículo describe el PAR-80, dando ejemplos de sus excelentes resultados de pruebas. El sistema tiene doble canal para reforzar su disponibilidad operacional. Su red plana de antena, de gran abertura, proporciona mejores prestaciones de cobertura del radar, resolución, precisión y comportamiento frente a ecos parásitos. Combinando la exploración mecánica en elevación con la exploración azimutal electrónica, estas ventajas que aumentan la seguridad del vuelo, se obtienen a un coste muy reducido.

Corazza, G.; Vatalaro, F.

## **Nuevos desarrollos de la técnica de doble modelado de impulsos para el DME de precisión**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, n°3, págs. 305—309

Recientemente, la Organización de Aviación Civil Internacional se pronunció sobre la normalización casi final del sistema DME de precisión. Los autores describen el uso de la técnica de doble modelado de impulsos con las últimas normas de la OACI y, en particular, su utilidad en aquellas aplicaciones que requieren mayor exactitud. Asimismo exponen una realización posible de dicha técnica mediante el proceso de la señal analógica en banda-base, demostrando que ofrece notables ventajas de coste junto con buenos resultados.



Ardemagni, F.; Basile, P.; Clementi, A.

**Subsistemas de RF para el DME de precisión**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, nº3, págs. 310-313

Se ha trabajado mucho, teórica y prácticamente, en el área de subsistemas de RF, que operan en banda L, para el equipo de medida de distancias de precisión (DME/P). Dentro de un programa de investigación de FACE, patrocinado por el Consejo de Investigación Nacional Italiano, se evaluaron las prestaciones de varios componentes del sistema. En este artículo se describen dos diseños: un paso de entrada de bajo ruido con sintonización mecánica, y un transmisor de estado sólido de alta potencia. Se utiliza el estado actual de la tecnología, incluyendo circuitos integrados para microondas en sustrato blando de alta permitividad. Los diseños se optimizaron mediante técnicas de diseño asistido por ordenador.

Auch, W.; Schlemper, E.

**Giróscopo de fibra óptica**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, nº3, págs. 314-318

Pese a que los giróscopos mecánicos en miniatura ofrezcan precisiones muy altas, se están desarrollando distintos sensores no mecánicos de rotación en laboratorios de todo el mundo. Los autores describen los principios, la construcción y los resultados de las pruebas de un giróscopo de fibra óptica, con grandes posibilidades como sensor de fijación para sistemas inerciales de navegación. Los resultados de pruebas sobre modelos de laboratorio indican que pueden ya cumplirse los requisitos de algunas aplicaciones, pero que se necesita reducir aún más la deriva para atender las exigencias de exactitud de los sistemas de navegación.

Böhm, M.

**Sistema de posicionado por DME para radionavegación de helicópteros en alta mar**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, nº3, págs. 319-325

El sistema de posicionado basado en DME permitirá operar con helicópteros dentro de áreas terminales de plataformas petrolíferas en alta mar, por duro que sea el tiempo. La regularidad de los vuelos en estas áreas es ya del 95%, pero el creciente tráfico exige mejorar la precisión en la navegación y el control de tráfico aéreo para mantener la seguridad y la economía. El sistema combina acreditadas técnicas de DME con determinación angular mediante proceso de señales de una red de antenas. El artículo analiza cada fase del vuelo y describe los equipos de tierra y de a bordo adecuados para navegación en ruta y aproximación final a la plataforma.

Gorder, G.; Ranghelli, J.

**Triplexor de banda L de aplicación espacial para el sistema de posicionado mundial**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, nº3, págs. 326-331

El triplexor del sistema de posicionado mundial tenía que cumplir requisitos rigurosos del espectro, tanto para radioastronomía como para el grado de ocupación del mismo. El diseño de un triplexor de bandas no contiguas, formado por filtros paso banda de Chebyshev, uno de tres polos y dos de seis, satisface estas y otras especificaciones, incluso la de un peso reducido. Los autores describen cómo se desarrolló el diseño definitivo a partir de las primeras versiones y las modificaciones que fue preciso realizar para obtener un alto factor Q cercano a 8000. Destaca la técnica original aplicada para compensación de temperatura, que permite alcanzar el margen de -20 a +71°C sin aumento de peso.

Bethmann, A.; Tschiesche, H.

**Receptor para el sistema de posicionado mundial**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, nº3, págs. 332-335

Los adelantos en tecnología de satélites posibilitan la utilización de sistemas por satélite que dan una protección de muy alta precisión y de cobertura mundial a la navegación de todos los usuarios civiles y militares. Los autores describen los elementos básicos de este sistema y comentan el desarrollo de un receptor del sistema de posicionado mundial para aplicaciones civiles, tales como servicios de urgencias médicas, pesca o transbordadores espaciales. Un prototipo de este receptor se incluirá en las pruebas de navegación del sistema transbordador/Spacelab, programadas para el año 1985, en la misión alemana D1.

Becker, K.; Müller, A.; Vogel, H.

**Equipo de medida de distancia de precisión para el sistema de aterrizaje por microondas**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, nº3, págs. 336-343

Standard Elektrik Lorenz ha participado estrechamente en la normalización internacional del DME/P (equipo de medida de distancia de precisión) del futuro sistema de aterrizaje por microondas. Desde 1981 se desarrollan en SEL los equipos de tierra y de a bordo del DME/P, y la producción en serie comenzará en 1986. Los autores explican el concepto, las características técnicas generales y exigencias operacionales del sistema, y describen sus principales unidades funcionales. El artículo concluye con un resumen de las perspectivas de los equipos DME/P.

Garmany, W. J.; Johnson, V. L.; Romer, W. J.

**Sistema de navegación LORAN-C para Arabia Saudí**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, nº3, págs. 344-351

Se están instalando dos nuevas cadenas LORAN-C en Arabia Saudí para ofrecer un servicio de navegación completo y fiable en el Mar Rojo, Golfo Pérsico y demás aguas en torno a la península arábiga con intenso tráfico marítimo. Los autores describen el sistema saudí, que consta de siete estaciones transmisoras, de elevada potencia, y tres estaciones monitoras. Esta nueva instalación LORAN-C permitirá obtener la situación con una precisión repetible entre 0,1 y 0,2 millas náuticas, de día y de noche, en cualquier época del año, aumentando así la seguridad y eficacia del transporte marítimo en aquella región.

Blair, P. K.; Hargrave, P. J.

**Navegación por satélite**

Comunicaciones Eléctricas (1984), volumen 58, nº3, págs. 352-358

Este artículo analiza los principios fundamentales de la navegación por satélite, examinando en particular los factores que afectan a la precisión de las medidas básicas y a sus correcciones. Considera luego el uso y operación de los actuales sistemas, terminando con un resumen de los sistemas propuestos como alternativa.

**Oficinas Editoriales**

La correspondencia relacionada con las diferentes versiones de Electrical Communication debe dirigirse al editor correspondiente:

Michael Deason  
Electrical Communication  
Great Eastern House  
Edinburgh Way  
Harlow, Essex  
England

Otto Grewe  
Elektrisches Nachrichtenwesen  
Hellmuth-Hirth-Strasse 42  
7000 Stuttgart 40  
Deutsche Bundesrepublik

Antonio Soto  
Comunicaciones Eléctricas  
Ramírez de Prado, 5  
Madrid - 7  
España

Lester A. Gimpelson  
Revue des Télécommunications  
ITT Europe Inc.  
Avenue Louise 480  
1050 Bruxelles  
Belgique