

Diseño y construcción de un sistema digital avanzado de comunicaciones en HF

José Manuel ANDÚJAR MÁRQUEZ

D. Ing. Electrónica, Informática y automática. E. P. S.,
Carretera Huelva-Palos de la Frontera, s/n. 21071, Huelva, España

J. Lluís PIJOAN I VIDAL

Universidad Ramón Llull E. I. T. La Salle, Paseo Bonanova núm. 8
08022, Barcelona, España

RESUMEN

Las investigaciones en el campo de la HF (3-30 MHz) fueron prácticamente inexistentes durante las décadas de los 60 y 70. En estos años, la comunidad científica apostó por los sistemas basados en los satélites debido a que eran más eficaces y a que el canal de comunicaciones proporcionaba un rendimiento muy superior que el de la HF. Al comienzo de la década de los 80, los avances logrados en el campo de los sistemas antisatélite, convencen a los expertos militares de que una acción enemiga podría poner fuera de servicio con relativa facilidad y rapidez los enlaces vía satélite. Lo anterior ha incitado el interés de la OTAN por poseer un sistema de comunicaciones híbrido HF/satélite capaz de seguir funcionando aún en el caso de fallo de los satélites.

En este artículo se presenta un nuevo Sistema Digital Avanzado de Comunicaciones en HF, cuyo funcionamiento está basado en las técnicas de Espectro Ensanchado, lo cual le proporciona gran robustez al multicamino y una baja probabilidad de interceptación. El sistema está basado en una configuración con DSP's capaz de implementar cualquier tipo de modulación; también, ofrece la posibilidad de medir algunos parámetros del canal de comunicaciones que son de interés, tales como la dispersión temporal y el ancho de banda Doppler.

Palabras clave: Pseudo-ruido, Espectro ensanchado, Procesador digital de señal, Ionosfera, Comunicaciones en HF.

ABSTRACT

HF communications (3-30 MHz) have not been object of research during the 60s and 70s. Scientific community was devoted to satellite systems, due to its higher efficiency and better channel performance. At the beginning of the 80's, progress in anti-satellite activity made military forces understand that satellite systems could be put out of service by an enemy action in a very easy way. As a result of that, current NATO interests seem to be a hybrid HF/satellite. In this article, a new Advanced Digital HF Communications System is presented. It communication system, uses Spread Spectrum techniques, showing robustness against multipath interference and low probability of in-

terception. The system is based on a DSP-platform able to implement any kind of communication scheme and it has also been designed to measure some interesting channel parameters, such as time delay spread and Doppler bandwidth.

Keywords: Pseudo-noise, Spread spectrum, Digital signal processor, Ionosphere, HF communications.

1. INTRODUCCIÓN

Este artículo pretende dar a conocer el trabajo de un grupo de científicos de dos universidades españolas (la Universidad Ramón Llull y la Universidad de Huelva), los cuales en coordinación con científicos del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial en su campo de experimentación de El Arenosillo (Huelva), están desarrollando un *Sistema Digital Avanzado de Comunicaciones en HF* que se ha presentado como proyecto de I + D al Ministerio de Defensa español. El sistema pretende dar servicios de comunicación digital complementarios al satélite e incluso, en caso de conflicto, cuando las comunicaciones vía satélite pudieran ser inutilizadas, convertirse en un medio eficaz, seguro y de difícil interceptación que asegure las comunicaciones aún en las peores condiciones.

Los requisitos planteados al sistema en la fase de diseño han sido:

Sistema digital totalmente configurable: con capacidad para transmitir utilizando cualquier tipo de modulación tanto analógica como digital (configurable por software), de forma que fuera totalmente compatible con los equipos actualmente en funcionamiento. Con objeto de proporcionar comunicaciones seguras, debía incorporar técnicas de entrelazado, codificación y corrección de errores.

Máxima reducción de la posibilidad de interceptación: Introducción de un patrón pseudo-aleatorio que permite por un lado el que múltiples usuarios utilicen el mismo canal de comunicaciones sin interferencias entre ellos, y por otro el que una señal interceptada no pueda ser descifrada si no se conoce el patrón de pseudo-aleatoriedad. Con objeto de intentar evitar no ya que la comunicación pueda ser descifrada, sino que ni siquiera pueda ser interceptada, el sistema debería ser capaz de emitir con un nivel de densidad espectral de potencia muy bajo, inferior incluso al nivel de ruido del canal. Esta técnica se conoce como espectro ensanchado de secuencia directa (*Direct Sequence Spread Spectrum*, DS-SS), y comporta un ensanchamiento de la banda de frecuencias utilizada.

Alta velocidad de proceso: el sistema no busca la máxima capacidad de transmisión sino su seguridad. Por ello, la máxima velocidad de bit es muy reducida pero suficiente para transmitir voz comprimida y datos (fax, correo electrónico, imágenes fijas). No obstante, la capacidad de cálculo es elevada y ha sido necesario optimizar al máximo el software (utilizando entre otras técnicas, eficientes algoritmos de compresión de datos) y, sobretodo, el hardware:

implementando todos los algoritmos de alta velocidad en dispositivos de lógica programable y fabricando chips a medida.

Máxima optimización del sistema en transmisión y recepción: lo cual permitiría emitir con la mínima potencia necesaria para establecer una enlace fiable. Lógicamente cuanto menor sea la potencia de transmisión necesaria, mayor será la portabilidad del sistema. Para ello se necesita un buen conocimiento del canal de comunicaciones, bien a través de predicciones, de modelos de canal o de sondeos automáticos previos a la transmisión. Conscientes de la variabilidad de la ionosfera según la hora del día, las estaciones del año y la actividad solar, una parte fundamental del proyecto se orientó a la caracterización del canal ionosférico.

Con objeto de intentar hacer este artículo autónomo respecto del resto de la publicación y, además, posibilitar que lectores interesados en el tema pero con nula o escasa formación en comunicaciones, puedan entender las características y alcance del proyecto de investigación que se presenta, se hará una somera revisión de los conceptos científicos y tecnológicos en los que se fundamenta.

2. BREVE RESEÑA HISTÓRICA DEL DESARROLLO DE LA HF

Si bien ya en 1902 Kennelly y Heaviside postularon el hecho de que la capa superior de la atmósfera era conductora, no fue hasta 1925 cuando se tuvieron pruebas evidentes de ello. En ese año, Appleton y Barnett, comparando los niveles de desvanecimiento de las señales que se recibían de forma simultánea en un arrollamiento y en una antena vertical, probaron la presencia de ondas indirectas procedentes de la bóveda celeste. Estos mismos investigadores indicaron la existencia de más de una capa. Puesto que se presumía que estas capas estaban compuestas de partículas cargadas eléctricamente, conocidas como iones, la región atmosférica en cuestión se denominó *ionosfera*.

En 1926 Breit y Tune comprobaron que un pulso de pequeña duración enviado por un transmisor producía en el receptor, alejado unos pocos kilómetros, dos (algunas veces más) impulsos en vez de uno como era de esperar. La conclusión era obvia: el impulso que llegaba primero era originado por la onda directa que viajaba paralela a la superficie terrestre; las señales posteriores se debían a ondas indirectas o ecos reflejados en la ionosfera (ver figura 1).

Diez años antes de estos experimentos Marconi comenzó a ensayar con transmisiones en onda corta, en la franja de 2-30 MHz, hoy conocida como la banda de alta frecuencia (HF). Él encontró que podía mantener desde Inglaterra contacto con Australia a 9.8 MHz. A partir de aquí, en sucesivos experimentos demostró que a cualquier hora del día o de la noche podía comunicar con cualquier parte del mundo, siempre y cuando se seleccionara la frecuencia adecuada. Así, en 1924, Marconi tenía desarrollado su sistema de comunicaciones. Había nacido la era de la HF.

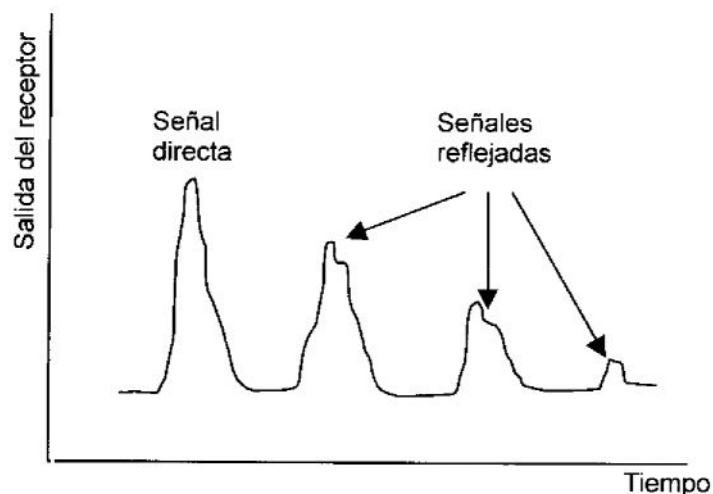


Figura 1. Respuesta del receptor a una señal de HF.

Antes de la Segunda Guerra Mundial las comunicaciones con aviones se hacían casi en exclusiva en la banda de HF mediante el uso de código Morse, aunque ya en 1928 se había conseguido en EEUU establecer comunicaciones de voz aire-tierra. La Segunda Guerra Mundial vio la introducción y el desarrollo de la UHF (0,3-3 GHz) y la VHF (30-300 MHz) para comunicaciones aéreas. Sin embargo, como estas bandas sólo eran útiles para propagaciones en la línea del campo de visión, cualquier comunicación fuera de ella requería el uso de frecuencias en la banda de HF.

La situación descrita se mantuvo hasta la década de los 60. En ésta y en la de los 70, las comunicaciones en HF han evolucionado muy poco como consecuencia del tremendo apoyo dado a las comunicaciones por satélite. A partir de la década de los 80 y sobretodo en los 90, gracias a los avances en las técnicas de integración (desarrollo de microprocesadores y procesadores digitales de señal) y a las debilidades que en ciertos aspectos han mostrado las comunicaciones vía satélite, el uso de la HF ha visto un nuevo resurgir que le augura la plena vigencia como sistema de comunicación en los próximos años.

3. EL NUEVO RESURGIR DE LA HF

Al comienzo de la década de los 70 las comunicaciones vía satélite emergen como una alternativa a la HF. Los investigadores, cansados ya de la gran variabilidad del canal ionosférico según la hora del día, las estaciones del año y la actividad solar (manchas solares), rápidamente optaron por las ventajas del satélite. De repente la HF pareció algo obsoleto: este tipo de transmisión podía ser

sustituida por un sistema fiable y no sujeto a los *caprichos* de la naturaleza. La mayoría de los ejércitos de los países más avanzados situaron al satélite como su sistema de comunicaciones primario, relegando a labores de segundo plano o de reserva a sus viejos equipos de HF.

Al comienzo de los 80, el avance experimentado por los sistemas antisatélite, convenció a los expertos que un posible enemigo podría poner fuera de servicio con relativa facilidad y rapidez los enlaces vía satélite, y lo que es peor, esto podría ocurrir casi inmediatamente después de comenzar las hostilidades. Se demostró que la vulnerabilidad de los satélites podría venir dada por muchos caminos, por ejemplo por su destrucción mediante un misil, lo cual estaría en la actualidad al alcance de muy pocos países, o por métodos menos selectivos pero igualmente eficaces: provocando interferencias electrónicas o dañando al satélite o sus antenas mediante la emisión de pulsos electromagnéticos.

Las comunicaciones por satélite son todavía demasiado caras para que puedan ser contempladas como de uso general en conflictos bélicos, más aún en las denominadas *misiones de paz* en las que de forma continua se ven envueltos los ejércitos de la OTAN, y muy especialmente el nuestro en los últimos tiempos. Los enlaces tradicionales VHF/UHF son incapaces de hacer frente a necesidades de comunicaciones más allá de enlaces en la línea del campo de visión, esto es, donde no hay dificultades del terreno (montañas, curvatura de la tierra, etc.), que impidan que las antenas receptoras y emisoras *se vean*. La única forma de solventar esta contingencia es mediante el uso de repetidores, lo cual, por su vulnerabilidad, es absolutamente inoperante en caso de conflicto bélico dentro de nuestras fronteras. Fuera de ellas es una forma de comunicación inútil. Para todos los propósitos prácticos la UHF está limitada al campo del contacto visual. Respecto de la VHF, aunque supera a la UHF en este aspecto, sufre de problemas de ocultamiento por obstáculos físicos y de atenuación por fenómenos meteorológicos: nieve, lluvia y niebla, lo cual limita mucho su campo de acción. En consecuencia, el único medio fiable de comunicación que es capaz de salvar grandes distancias con poca potencia y que además es en gran medida independiente de la orografía del terreno y de la curvatura de la tierra, es el que hace uso de ondas de radio que se reflejan en las capas ionizadas de la atmósfera de nuestro planeta (también puede ser usado en distancias cortas aumentando el ángulo de salida desde el emisor. Esto está especialmente indicado para solventar necesidades de comunicación en junglas o bosques espesos, o en terrenos muy accidentados, donde el VHF puede tener problemas.) Tales comunicaciones se consiguen empleando la parte baja del espectro de HF, entre los 3 y los 15 MHz.

Hasta aquí sólo se ha hablado de las necesidades de las comunicaciones militares, que tradicionalmente han sido el motor de los principales avances en el campo de las comunicaciones, los cuales han sido de aplicación posterior a la vida civil. Dentro de las aplicaciones no militares de la HF podemos citar el ser-

vicio de embajadas y misiones diplomáticas de y entre los diferentes países. El Ministerio de Asuntos Exteriores español, como el de otros muchos países, tiene una red de comunicaciones con cada una de sus embajadas repartidas por todo el mundo. Si bien la mayoría de sus enlaces se realizan a través del teléfono, telex o redes públicas sobre satélite o cable, muchas de las embajadas están también enlazadas por HF.

Los aviones y barcos de las líneas aéreas y marítimas comerciales usan también de forma extensiva las comunicaciones por HF, sobretudo cuando debido a las condiciones del área de operación no están disponibles otros servicios de radio. Además, los enlaces en HF proveen servicios de comunicaciones entre estaciones costeras y barcos y entre barcos.

Por último, no hay que olvidar a los miles de radioaficionados que, gracias al rebote ionosférico, se comunican desde todas las partes del mundo.

4. CARACTERÍSTICAS DE LA PROPAGACIÓN EN HF

La propagación en la banda de HF es, exceptuando un radio corto (inferior normalmente a 150 Km), función casi exclusiva de la reflexión de las ondas de radio en las capas ionizadas de la atmósfera de la tierra. La *bondad* del camino y por tanto los requerimientos de potencia para efectuar el enlace dependen de la adecuada elección de la frecuencia de transmisión. Esto último no es tarea fácil, ya que el camino a recorrer por las ondas desde el transmisor al receptor está sujeto a cambios continuos dependiendo de la hora del día, la estación del año, el nivel de actividad solar así como la longitud del camino y el ángulo de elevación.

Desde que la señal de HF abandona la antena del transmisor, rebota en la ionosfera con un determinado ángulo y llega a la antena del receptor, sufre una apreciable pérdida de energía debido a los siguientes procesos:

- La propagación espacial de la energía (dependencia inversa al cuadrado de la distancia).
- Antena transmisora mal polarizada.
- Absorción de energía en la ionosfera debido a colisiones de los electrones. Esto hace que parte de la energía que lleva la onda de radio se transforme en calor.
- Dispersión (*scattering*) causada por las irregularidades de la ionosfera.
- Antena receptora mal polarizada. (Dependiendo del tipo de antena, para ciertas direcciones puede haber una ganancia efectiva de la antena, mientras que para otras se tendrán pérdidas.)

Parte de la energía de la señal de radio que emite la antena se transmite casi paralela a la superficie terrestre constituyendo una *onda de superficie* o de

tierra. Dependiendo de las condiciones del terreno y de la potencia utilizada, la onda de superficie se puede utilizar para comunicaciones por encima de los 100 Km de distancia, especialmente en el mar. Las comunicaciones utilizando ondas de superficie son mucho más direccionales que las que utilizan rebote ionosférico, y además son mucho más previsibles, ya que pueden ser consideradas en el receptor como una versión atenuada, retrasada y no distorsionada de la señal emitida. Por el contrario, las señales transmitidas mediante reflexión en la ionosfera sufren, aparte de atenuaciones y retardos muy variables, desvanecimientos (*fading*), desplazamientos de frecuencia (*Doppler*), dispersión temporal y distorsión de retardo.

5. LA IONOSFERA

La ionosfera está formada por un conjunto de regiones ionizadas, las cuales juegan un papel fundamental en la propagación de las ondas de radio. La influencia de estas regiones en las ondas de radio se debe principalmente a la presencia de electrones libres, los cuales están situados formando estratos horizontales, a modo de capas. La ionosfera se divide por razones históricas en tres regiones denominadas D, E y F, en orden de altitud creciente. Bajo ciertas condiciones las regiones citadas pueden a su vez subdividirse en otras, este es el caso de las capas F1 y F2 de la región F.

Desde el punto de vista de propagación en HF, las capas de interés son la E y la F. La región D actúa como una capa de absorción en la banda de HF, si bien refleja las señales de radio en las bandas de ELF (*Extremely Low Frequency*, < 3KHz) y VLF (*Very Low Frequency*, 3-30 KHz).

La principal fuente de ionización de la ionosfera es la radiación electromagnética procedente del sol, lo cual hace que la densidad de electrones varíe con la altitud, latitud y hora del día. Así, mientras que en la capa D (en el intervalo de 70-90 Km de altitud) se tiene al mediodía una densidad media de 10^8 - 10^9 electrones/m³, en la capa E (sobre los 110 Km de altitud) la concentración sube a 10^{11} electrones/m³. Puesto que durante la noche la capa E sólo conserva un nivel de ionización residual de pequeño valor, esta región sólo influye en la propagación de la señal de HF durante el día, y para distancias inferiores a los 2000 Km.

La región F tiene una anchura de entorno a los 130 Km y se divide en las capas F1 y F2, aunque esta división sólo es apreciable durante el día. La capa F1, que sólo existe durante el día, es la región comprendida entre los 130-210 Km de altitud; tiene una densidad electrónica media de 2×10^{10} electrones/m³. Esta capa no suele actuar como reflectora para las señales de HF, sino más bien como absorbente de parte de la energía que lleva la onda, la cual se refleja en la capa F2.

La capa F2 es la más alta de la ionosfera, y usualmente presenta la mayor densidad electrónica, desde los 10^{12} electrones/m³ durante el día a los 5×10^{10}

electrones/m³ por la noche. La capa F2 es la principal región reflectora (entre los 250 y 400 Km) para las comunicaciones en HF de larga distancia.

6. TÉCNICAS DE MODULACIÓN DIGITAL

La tarea primordial en el diseño de sistemas de comunicación digital es encontrar la técnica de modulación más apropiada para contrarrestar las interferencias y el ruido introducidos por cada canal. El proceso de conversión de un dato digital a una señal analógica capaz de transmitirse se realiza por medio de la modulación: a una señal de amplitud y frecuencia constantes, se le cambia en función del valor del dato su amplitud (A_m), frecuencia (ω_m) o fase (θ_m). Si consideramos que los tres parámetros mencionados de la señal portadora han cambiado, la señal modulada adopta la forma:

$$S(t) = (A_c + A_m) \cos [(\omega_c + \omega_m)t + \theta_m]$$

donde A_c es la amplitud constante y $\omega_c = 2\pi f_c$ es la frecuencia fija de la portadora. En cada técnica de modulación se suele variar sólo uno de los parámetros. La modulación digital de datos se denomina comúnmente por el acrónimo SK (*Shift Keying*), donde *keying* es un proceso de modulación que implica la selección de un conjunto finito de estados discretos.

Si bien hay muchos tipos de modulación (ASK, PSK, DPSK, MPSK,...), nos vamos a centrar en la Modulación Digital de Fase Diferencial (*Differential Phase Shift Keying*, DPSK), la cual reúne una serie de características que la hacen idónea para la HF (Maslin, 1987). La figura 2 muestra como funciona este tipo de modulación: la información digital está codificada mediante el cambio de fase entre un elemento y el siguiente (por ejemplo, 0 = sin cambio; 1 = fase invertida).

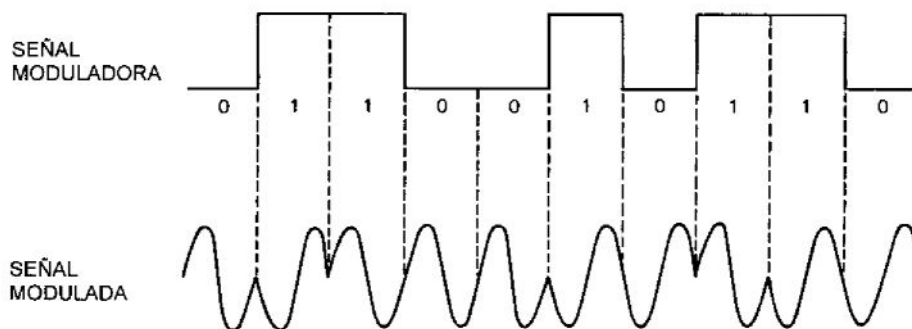


Figura 2. Modulación digital de fase diferencial (DPSK).

7. EL ESPECTRO ENSANCHADO EN COMUNICACIONES DIGITALES

Las señales de espectro ensanchado usadas para la transmisión de información digital se caracterizan (Scholtz, 1977) porque su ancho de banda W es mucho mayor que la velocidad de símbolo R expresada en símbolos/s (un símbolo puede representar uno o varios bits). Esto es, el factor de expansión del ancho de banda, $B_e = W/R$ para una señal de espectro ensanchado es mucho mayor que la unidad. Este ensanchamiento, que se realiza mediante la codificación de la información, introduce una redundancia temporal con el objeto de superar los severos niveles de interferencia y ruido que va a encontrar la información digital que se transmite a través del canal. La interferencia es debida al multicamino, a otros usuarios de banda estrecha y banda ancha, y también puede ser intencionada.

Aunque la señal digital esté codificada, un operador (interferente) dotado de equipo sofisticado puede de una forma relativamente fácil imitar la señal enviada por el transmisor y a partir de ahí confundir al receptor. Para evitar esto, el transmisor ha de introducir un elemento de imprevisibilidad o aleatoriedad (pseudo-aleatoriedad) de forma que sólo sea conocido por el receptor. Esto se consigue mediante el uso de una secuencia binaria pseudo-aleatoria, también denominada pseudo-ruido (*Pseudo-Noise*, PN), que permite que la señal aparezca ante un tercero como un ruido aleatorio, lo cual limita severamente la posibilidad de que se produzcan demodulaciones por usuarios no autorizados.

Básicamente existen dos técnicas para ensanchar el espectro. En la técnica de *secuencia directa* (*Direct Sequence*, DS), la secuencia PN generada se usa en conjunción con la modulación DPSK para generar una señal DPSK pseudo-aleatoria (ver figura 3). Cuando un sistema utiliza modulación FSK, la señal digital a transmitir modula la portadora a modo de código de frecuencias, de manera que en función de los estados bajo o alto de la información a transmitir aparecen paquetes de portadora de amplitud constante pero frecuencias diferentes. En este caso, la secuencia PN selecciona pseudo-aleatoriamente la frecuencia de la señal transmitida. La señal resultante se denomina señal de espectro ensanchado de salto de frecuencia (*Frequency-Hopping*, FH).

En los sistemas de comunicación de acceso múltiple clásicos (Proakis, 1995), los usuarios comparten un canal común transmitiendo en intervalos de tiempo diferentes (*Time Division Multiple Access*, TDMA) o en bandas de frecuencia diferentes (*Frequency Division Multiple Access*, FDMA). Gracias al uso del espectro ensanchado con secuencia directa, las señales transmitidas en este canal común se pueden distinguir unas de otras añadiendo en cada una un patrón pseudo-aleatorio diferente, transmitiendo al mismo tiempo y en la misma frecuencia. Es decir, un receptor concreto sólo recibirá aquella información para la cual conozca su patrón pseudo-aleatorio, esto es, la *llave* que emplea el transmisor correspondiente. Este tipo de técnica de comunicación que permite que múltiples usuarios usen de forma simultánea un mismo canal de comuni-

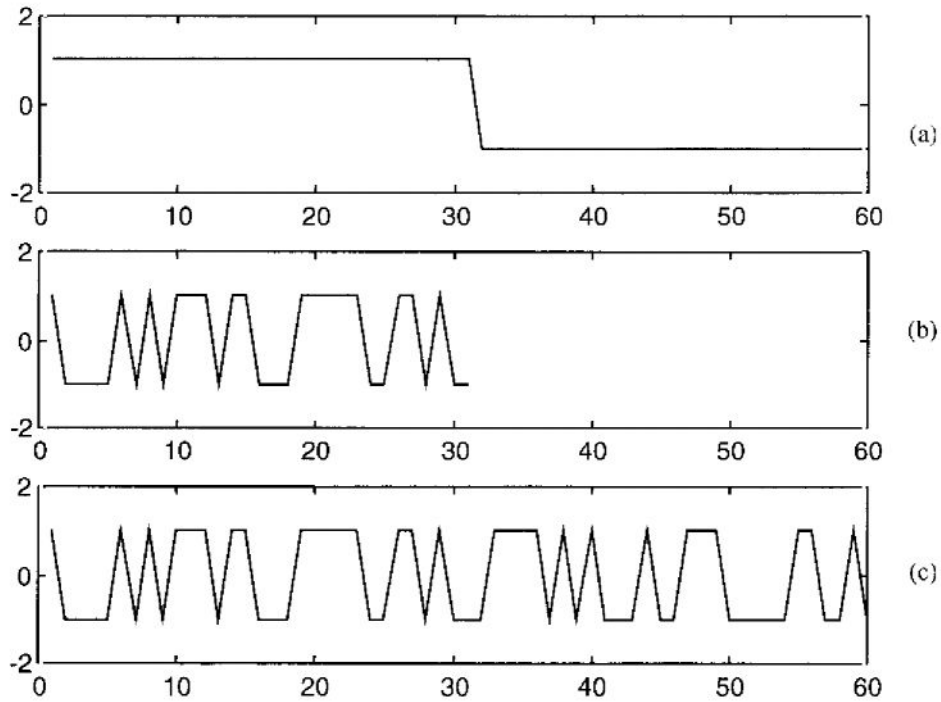


Figura 3. (a) Dato a enviar; (b) pseudo-ruido; (c) señal de espectro ensanchado resultante.

cación para la transmisión de información, se denomina *acceso por múltiple división de código (Code División Multiple Access, CDMA)*.

Gracias al espectro ensanchado DS, un mensaje puede ser ocultado bajo el ruido de fondo ensanchando su ancho de banda y reduciendo la densidad espectral de potencia de la señal resultante (ver figura 4), logrando que la transmisión tenga una probabilidad de interceptación baja (*Low-Probability-of-Intercept, LPI*). La privacidad del mensaje se puede conseguir mediante un patrón pseudo-aleatorio. Esto hace que la señal sólo pueda ser demodulada por los receptores que estén autorizados, esto es, aquellos que conocen el patrón o llave empleada por el transmisor.

El diagrama de bloques mostrado en la figura 5 ilustra los elementos básicos de un sistema de comunicación digital de espectro ensanchado: codificador y decodificador, modulador y demodulador, así como dos generadores idénticos de secuencia PN, uno en el transmisor y otro en el receptor. Esta secuencia es sobreimpuesta a la señal a transmitir por el modulador, siendo después eliminada en el demodulador del receptor. Por supuesto, las secuencias PN en el emisor y en el

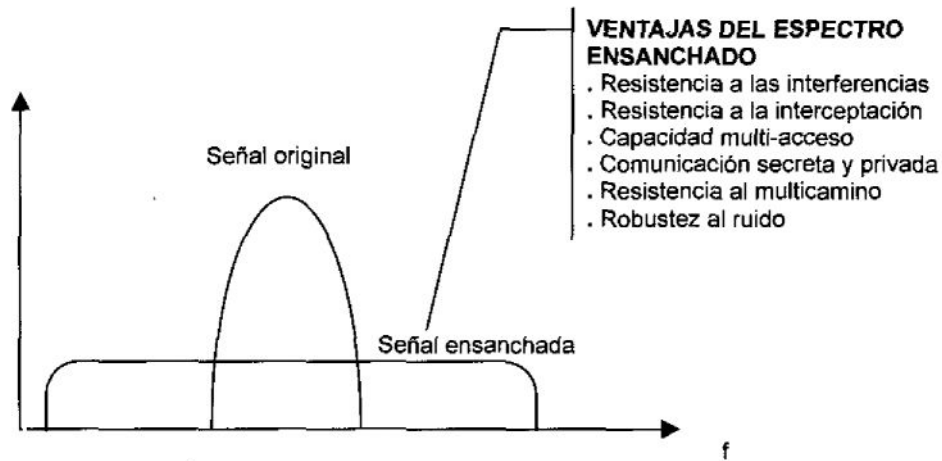


Figura 4. Ensanche del espectro de una señal: al multiplicar por una secuencia pseudo-aleatoria de frecuencia N veces mayor que la velocidad de bit, el espectro se ensancha por un factor N , y la densidad espectral de potencia se reduce por el mismo factor.

receptor han de estar sincronizadas. Este procedimiento, que se llama *adquisición*, se lleva a cabo inicialmente, justo antes de comenzar la transmisión.

8. PROYECTO DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA AVANZADO DE COMUNICACIONES DIGITAL EN HF

8.1 Introducción

Hasta aquí se ha estado repasando de forma somera parte de los principales conceptos científicos y tecnológicos en los que se fundamenta el proyecto de

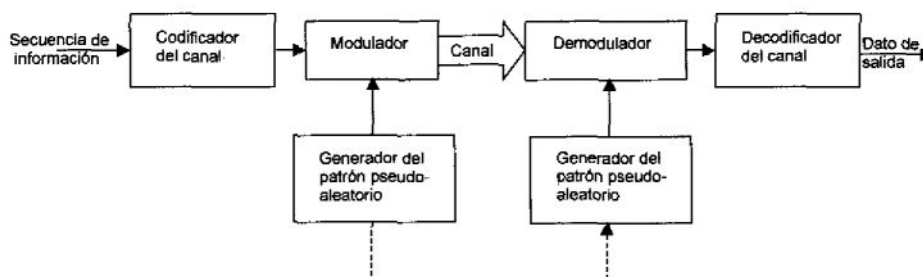


Figura 5. Diagrama de bloques de un sistema de comunicación digital de espectro ensanchado.

investigación que se presenta. A partir de aquí el desarrollo se centrará en el proyecto en sí y en los logros alcanzados hasta el momento.

El proyecto nace en 1997, cuando la Escuela de Ingeniería de Telecomunicación de La Salle (en adelante EIT-La Salle) de la Universidad Ramón Llull (en adelante URL) en Barcelona, el Departamento de Ingeniería Electrónica, Sistemas Informáticos y Automática (en adelante DIESIA) de la Universidad de Huelva (en adelante UH) y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (en adelante INTA), firman un proyecto posteriormente aprobado dentro del Plan Nacional de I + D (CICYT, TIC 97/0787-CO2), denominado *Enlace ionosférico de comunicaciones con espectro ensanchado INTA (El Arenosillo, Huelva)-La Salle (Universidad Ramón Llull)*. En septiembre de 1999, el proyecto anterior fue prorrogado hasta septiembre del 2000 mediante la acción especial CICYT TIC99-1284-E.

8.2. Período 1997-1999

El proyecto CICYT, TIC 97/0787-CO2 se divide en dos subproyectos, uno dedicado a la *Caracterización del canal ionosférico*, desarrollado por el INTA en colaboración con el Observatorio del Ebro y la Universidad Complutense de Madrid, y otro denominado *Montaje del transmisor-receptor, y evaluación del canal* desarrollado por la La Salle y el DIESIA de la UH. El subproyecto *Caracterización del canal ionosférico* tenía dos objetivos fundamentales, uno experimental: realizar sondeos entre las estaciones del Observatorio del Ebro y del INTA en El Arenosillo (Huelva) con objeto de efectuar una evaluación del canal ionosférico (ver figura 6), y otro teórico: modelar el comportamiento del canal ionosférico, de forma que pueda llegarse a una verdadera predicción ionosférica. Este capítulo versará sobre el subproyecto de *Montaje del transmisor-receptor, y evaluación del canal*. El objetivo fundamental de este subproyecto era diseñar e implantar un enlace de comunicaciones de baja velocidad entre la Escuela Politécnica Superior (en adelante EPS) de la UH (sede del DIESIA), y la EIT en La Salle (Barcelona). El enlace se establece mediante rebote ionosférico en la banda de HF utilizando una modulación en espectro ensanchado. Las características principales del sistema son:

- Sistema de comunicación vía radio simplex (unidireccional) en la banda de HF con rebote ionosférico usando técnicas de espectro ensanchado.
- Sistema totalmente digital mediante procesadores digitales de señal o DSP's.
- Modulación DPSK con espectro ensanchado de secuencia directa (DS/SS).
- Portadora variable entre las siguientes frecuencias asignadas temporalmente por la Subdirección General de Servicios Técnicos y Telecomu-

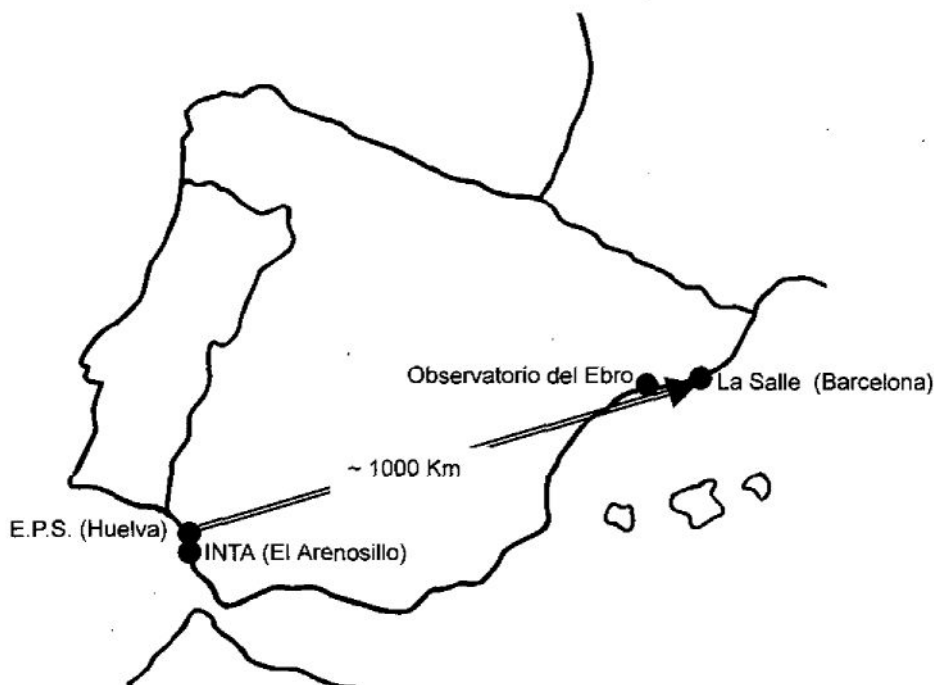


Figura 6. Caracterización y evaluación del canal ionosférico para la transmisión punto a punto Huelva-Barcelona.

nicaciones del M° de Defensa: 7953, 8157, 9379, 9391, 9990 KHz con un ancho de banda de 100 KHz.

- Moduladora con una frecuencia de chip < 5 KHz.
- Velocidad de información: 100-600 bps en esta primera fase.
- Potencia de transmisión: < 100 W.
- Transmisor ubicado en el DIESIA, EPS (UH) y receptor en la EIT La Salle (Barcelona).

Una descripción más detallada del sistema responde al diagrama de la figura 7. El sistema se pensó desde un principio para utilizar técnicas digitales tanto en la modulación como en la demodulación. De ahí que el corazón del sistema transmisor y receptor fueran varios microprocesadores especializados en procesado digital de señales (DSP's). Esto permite gran flexibilidad a la hora de experimentar con diferentes técnicas, sobre todo en la recepción, así como variar la frecuencia de trabajo, pues todo se reduce a un problema de software sin tener que alterar el hardware.

Una primera fase del proyecto previa a la realización definitiva del transmisor y del receptor fue la de medidas de características del canal. Ésta se explica en el apartado *Evaluación del canal*.

Con objeto de poder controlar el transmisor de forma remota para poder variar sus parámetros y evaluar el comportamiento general de forma automática, se creó, como puede verse en la figura 7, un canal de enlace permanente vía Internet entre el transmisor y el receptor.

8.2.1. Descripción del transmisor

En la figura 8 se muestran las operaciones realizadas por el DSP transmisor. Los datos antes de ser modulados son entrelazados (*interleaving*) y codificados para poder corregir fallos y disminuir así la probabilidad de error del sistema. Se fue consciente de que en un sistema unidireccional no había posibilidad de retransmisión y, por tanto, la probabilidad de error debía ser baja.

A continuación la señal se ensancha (se multiplica por una secuencia pseudo-aleatoria PN) y se modula DPSK. Como ya se ha explicado, con el ensanchamiento se logra una mayor inmunidad al ruido, a las interferencias y al multicamino. Al ser este un proceso realizado íntegramente por el DSP, se puede variar fácilmente infinidad de parámetros, tales como el tipo de secuencia PN, la profundidad del *interleaving*, el tipo de codificación, etc.

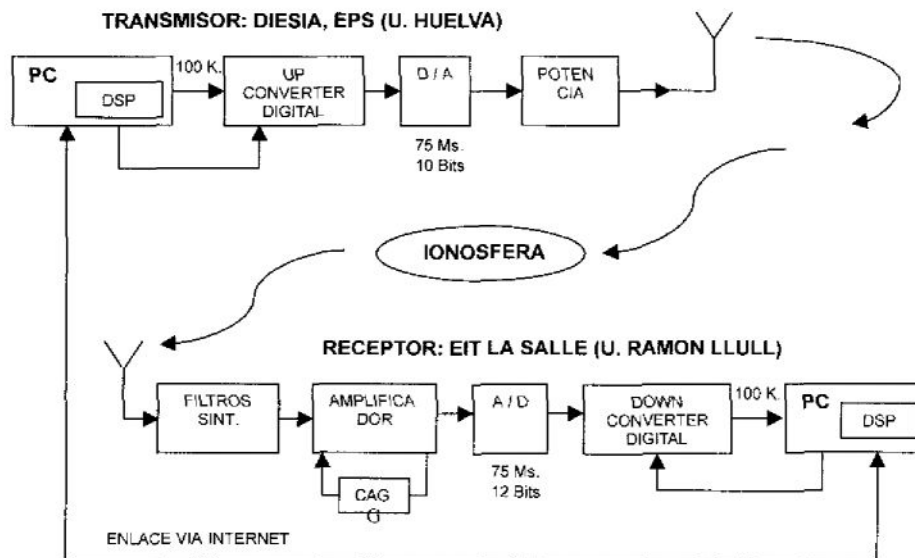


Figura 7. Diagrama del enlace.

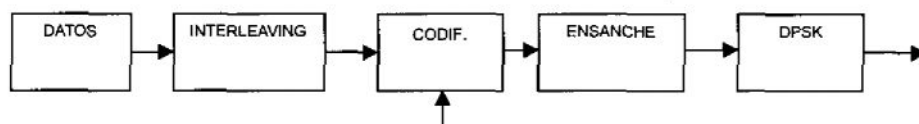


Figura 8. Diagrama de bloques del transmisor.

La señal en banda base es trasladada a la frecuencia final de trabajo mediante el *up-converter* digital, controlado desde el PC, que genera directamente la señal de radiofrecuencia a razón de 60 Mmuestras /seg. Dichas muestras se convierten a analógico y se pasan al transmisor de potencia que alimenta a una antena tipo dipolo invertido.

8.2.2. Descripción del receptor

La señal recibida en la antena se filtra y amplifica antes de atacar el convertidor analógico-digital. El banco de filtros y el amplificador pueden ser substituidos por un receptor convencional de decimétricas con salida de frecuencia intermedia. Una vez convertida la señal a digital, se traslada la frecuencia a banda base mediante el *down-converter* digital con un flujo de muestras que sea asimilable por el DSP. El número de operaciones por muestra que efectúa el receptor es bastante más elevado que el del transmisor, por eso el diseño final se ha provisto con 3 DSP's trabajando en paralelo, ya que esto permite distribuir las tareas de la forma más conveniente.

La figura 9 muestra el conjunto de tareas a realizar por el DSP receptor. Tras una ecualización inicial, un bucle realimentado realiza las funciones de desensanchado, detección de portadora y demodulación. Después solo queda decodificar y desentrelazar obteniendo así los datos.

8.2.3. Evaluación del canal

De forma paralela a la realización y puesta a punto del transmisor y el receptor, se ha estado, y se continúa aún hoy, evaluando el canal ionosférico en-

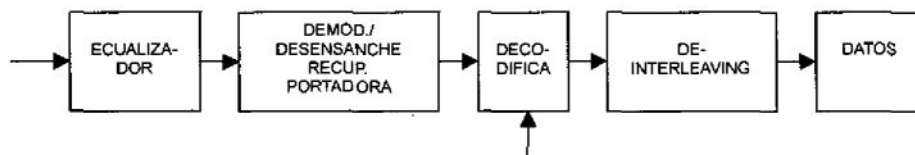


Figura 9. Diagrama de bloques del receptor.

tre Huelva y Barcelona. Para ello, ha sido de capital importancia la cesión por parte del Ministerio de Defensa del equipo transmisor-receptor ELMER SRT-470. Gracias a este equipo, se tiene en funcionamiento un sistema automático de medida de 24 horas que está permitiendo la extracción de una primera serie de resultados que se comentarán más tarde.

El esquema general del montaje se muestra en la figura 10. El control tanto del transmisor como del receptor se realiza vía dos PC's sincronizados con GPS. Se utiliza un analizador de espectros como receptor patrón. La señal se extrae por frecuencia intermedia y se digitaliza con el conversor A/D. El *down-converter* digital la baja a banda base y la diezma para obtener una frecuencia de muestreo más baja. Dicha señal, a través de un puerto paralelo y un hardware diseñado a medida, se manda al PC donde se graba para ser procesada en diferido. Se programan transmisiones discontinuas para no forzar al transmisor. Las etapas de silencio se utilizan para procesar los datos.

Con esta configuración, que funciona desde el mes de octubre de 1998, se pueden obtener cuatro tipos de informaciones imprescindibles para la evaluación y ecualización del canal:

- Ancho de banda de coherencia del canal. Es un parámetro relacionado con la existencia de rebotes y nos da información sobre el retardo temporal entre los mismos.
- Ensanchamiento *Doppler* del canal. Es un parámetro relacionado con el movimiento de las capas ionosféricas, y nos da idea del tiempo durante el cual el canal se puede suponer estacionario. Otro dato importante es el desplazamiento *Doppler* de la frecuencia en recepción.

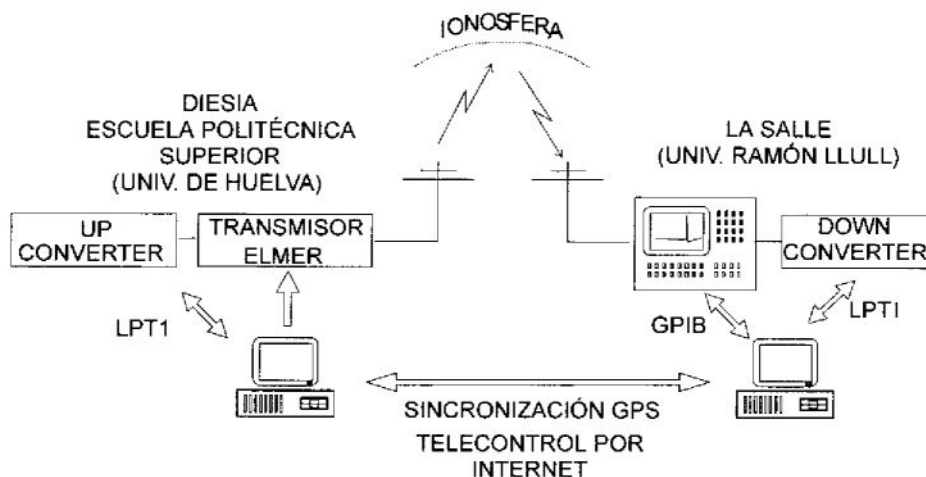


Figura 10. Montaje utilizado para la evaluación del canal ionosférico Huelva-Barcelona.

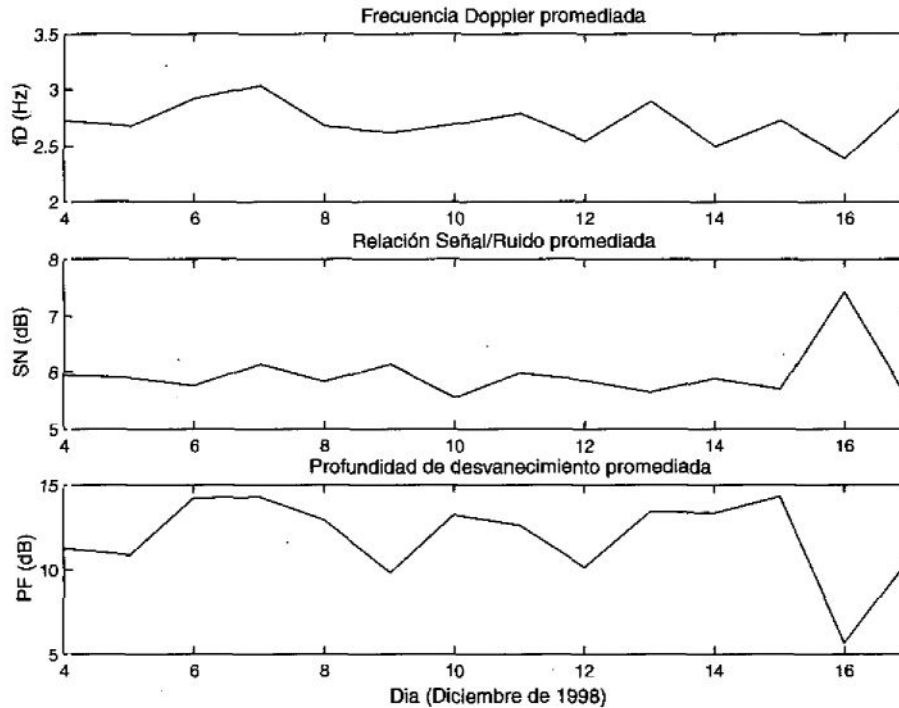


Figura 11. Promedios diarios del ancho de banda Doppler (arriba), la relación señal/ruido (en medio) y la profundidad del desvanecimiento (abajo).

- Atenuación de la señal recibida y análisis de los desvanecimientos, tanto de su duración como de su profundidad.
- Relación señal/ruido (S/N).

En la figura 11 se pueden apreciar los promedios diarios del ancho de banda Doppler (f_D), profundidad del desvanecimiento (PF) y la relación señal/ruido (S/N) (todos los promedios se han realizado sólo con las tramas en las que se recibía la señal). Nótese que a pesar de apreciarse una cierta fluctuación diaria, la variabilidad del ancho de banda Doppler es del orden de 1 o 2 Hz, considerando sólo los casos en que además la profundidad de desvanecimiento es alta. Para una PF baja, pero una SN elevada (en comparación con la PF), no es necesario considerar las variaciones de amplitud, ya que estas no influyen casi en la potencia recibida.

Para poder extraer información sobre la dispersión temporal del canal (número de rebotes, retardos relativos entre cada componente, perfil de retardo de potencia de cada rebote, etc), se transmite una secuencia digital conocida que

posea la propiedad de ortogonalidad al desplazarse temporalmente. Se han utilizado secuencias pseudo-aleatorias como la secuencia *Barker-13* o bien señales del tipo *chirp*.

Los parámetros comunes utilizados en todos los análisis son los siguientes:

- Barrido de frecuencias de la *chirp* (ancho de banda de análisis): $\pm 5\text{KHz}$.
- Potencia transmitida: 200 W.
- Intervalo de análisis: 7 seg.

Los resultados más concluyentes se obtienen con la función de *Scattering*, que muestra el comportamiento dispersivo en los dominios del tiempo o retardo (que marca la selectividad del canal) y de la frecuencia *Doppler* (que marca la variabilidad del canal). La variabilidad del canal no supera la unidad de Hz, mientras que la dispersión temporal de los rebotes es menor que 3 milisegundos, lo que comporta un ancho de banda de coherencia inferior a 1 KHz.

En la figura 12(a) se muestra la función de *scattering* en una situación con un único rebote. La desviación *Doppler* de unos -3 Hz debe considerarse como efecto aditivo del efecto *Doppler* de la ionosfera y el desajuste de los osciladores en emisión y recepción. En la figura 12(b) se aprecia una situación con dos rebotes independientes. Nótese que el retardo relativo entre rebotes es inferior a 1 milisegundo.

8.2.4. Sistema de adquisición

Para la correcta demodulación de los datos en un sistema de comunicaciones con espectro ensanchado, el receptor debe alinear exactamente la secuencia PN que viene por antena con su secuencia PN local. A este procedimiento se le llama adquisición, y consiste básicamente en un bucle cerrado que va probando alineaciones diferentes de la secuencia local. Cuando la posición sea correcta, la señal a la salida estará desensanchada y superará un cierto umbral.

La adquisición es una de las labores más importantes del sistema, ya que sin ésta sería imposible realizar la decodificación de la información con garantías. Ante canales variantes como el ionosférico o canales típicos de comunicaciones móviles, es muy importante realizar el diseño con sumo cuidado.

El coste computacional del sistema de adquisición suele ser elevado, con lo cual, teniendo en cuenta la necesidad de una implementación totalmente digital del mismo, las opciones realizables pasaban por un sistema serie. Existía la posibilidad de implementar un sistema de una sola etapa (*single dwell*) o de múltiples etapas (*multiple dwell*), pero se optó por un sistema *single dwell* por sencillez. Las características del canal ionosférico hacen inviable trabajar con un sistema de adquisición estático, cosa que obliga a plantearse un diseño adaptativo, intentando optimizar siempre las condiciones de funcionamiento para las diferentes condiciones de propagación. Los dos parámetros principales a ajustar son el tiempo de integración, durante el cual se analiza si una determinada

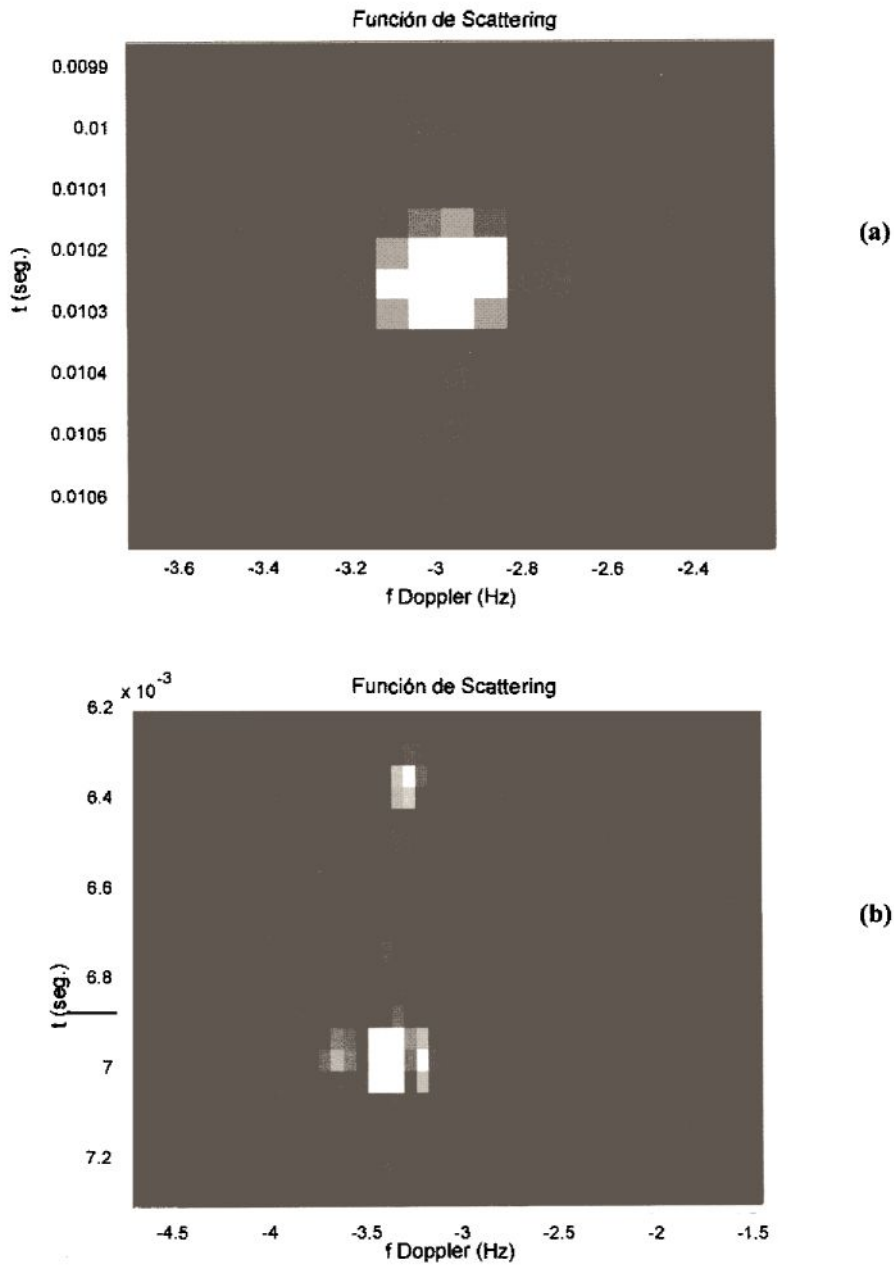


Figura 12. Funciones de *scattering* obtenidas con una frecuencia portadora: 9,99 MHz. (a) Resultado a las 13 h 10 m UT. (b) Resultado a las 13 h 13 m UT. En ambas figuras, los rebotes o señales se representan en blanco, las perturbaciones y/o interfeencias en gris y el ruido en negro.

alineación es correcta, y el umbral que se establece para decidir que se ha producido la adquisición.

Las variaciones del canal ionosférico hacen necesario un tiempo de integración elevado para conseguir decisiones fiables, en detrimento de la velocidad de adquisición. Se optó por un tiempo de integración de un bit. En cuanto al umbral, fue preciso realizar un diseño adaptativo que lo modificara ante estas variaciones.

Después de múltiples pruebas y de las correspondientes evaluaciones, se optó por la técnica mostrada en la figura 13. Como se puede apreciar, el sistema consta de tres ramas de detección de energía, cada una con una secuencia PN en diferente posición, controlada por un algoritmo adaptativo.

Nótese que la estructura de recepción es paralela, aumentando su fiabilidad en cuanto a probabilidades de falsa detección y de pérdidas de la secuencia PN. El funcionamiento es el siguiente. Durante la fase de adquisición las tres secuencias, de longitud N , se desalinean $N/3$. Por tanto, se comienza la fase de búsqueda quedando reducido a $1/3$ el tiempo que necesitaría un sistema serie, de tal forma que cuando una de las tres estructuras detecte adquisición se produce la alineación con la posición correcta. A partir de este instante el algoritmo de control posiciona las otras dos ramas, una medio *chip* adelantada y la otra medio *chip* atrasada. Esto proporciona la posibilidad de realizar un seguimiento o *tracking* simple y de poco coste computacional. Se pueden detectar cuáles son las ramas activas que perciben energía e ir desplazando la posición

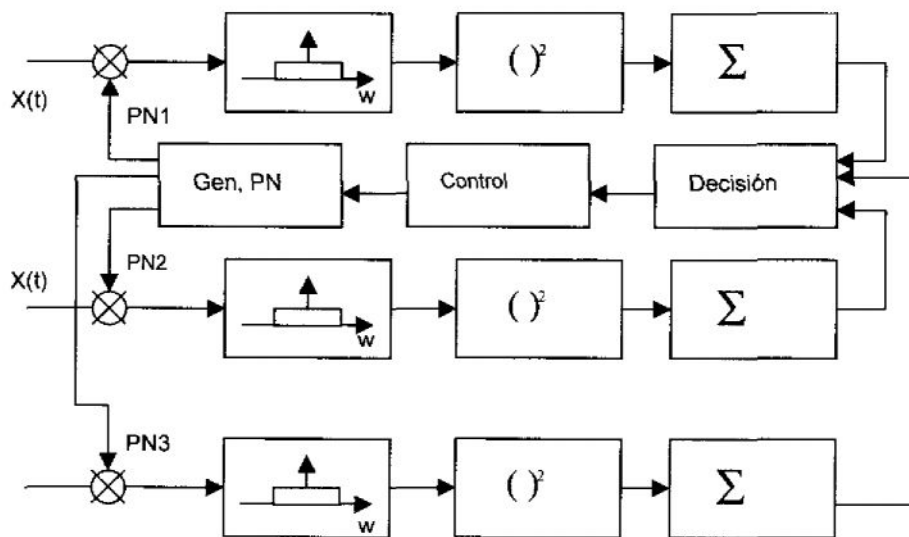


Figura 13. Estructura final del sistema de adquisición.

de la rama central siguiendo las posiciones de las energías activas. Esto evita desadquisiciones periódicas debido al error de los relojes y disminuye de forma importante las probabilidades de error.

Por otra parte, esta estructura facilita enormemente la posibilidad de implementar un receptor RAKE (aquel que aprovecha la energía de los diferentes rebotes que llegan retardados.) El hecho de disponer de tres ramas contiguas permite mejorar la decodificación y reducir errores debidos a la dispersión del canal.

8.2.5. Evaluación del enlace

Se ha evaluado la calidad del enlace en términos de su probabilidad de error. En el caso que nos ocupa, una trama de secuencia PN se corresponde con 127 chips y ocupa exactamente la longitud de un bit. A una frecuencia de muestreo de 4 muestras/chip da un total de 508 muestras por bit. Después de correlacionar la señal recibida con la secuencia PN, se calcula el valor absoluto para detectar el máximo en cada trama de secuencia PN, hallando (en los casos más favorables) un único pico (correspondiente a un camino de propagación ionosférica) que se desplaza lentamente y de forma lineal debido a desajustes de los osciladores que fijan las frecuencias de muestreo en recepción y en emisión.

Los resultados obtenidos (ver tabla 1) han sido medidos en las condiciones siguientes:

- Frecuencia de emisión = 100 b/s.
- Ensanchamiento = 127 (longitud de la secuencia PN, en *chips*).
- Frecuencia de recepción = 50800 muestras/seg. (4 muestras/chip).
- Potencia de transmisión = 200 W.
- N.º bits/muestra I-Q = 32.
- Frecuencia de portadora: 9990 KHz

donde:

Hora, Día: hora y día de la emisión

Seg: Duración de la trama en segundos.

Bits: Núm. de bits enviados durante la trama.

%Apr: Tanto por ciento del tiempo total en el cual se detecta un rebote (con una posición temporal bastante uniforme). Este parámetro da una noción de la cota del % del tiempo en el cual el receptor puede estar en estado de *adquisición o enganchado*.

BER1, BER2, BER3 y BER4 son las probabilidades de error considerando la energía de 1, 2 3 o 4 rebotes más significativos.

Tabla 1. Resultados obtenidos en la evaluación de la probabilidad de error de bit (BER).

Hora	Día	Seg	Bits	BER1	BER2	BER3	BER4	% Apr
15:17	25/06	20	2056	0,010	0,012	0,010	0,010	83
16:01	02/07	41	4088	0,037	0,030	0,025	0,025	79
12:52	05/07	41	4086	0,010	0,0075	0,007	0,0058	83
16:30	05/07	50	5041	0,001	0,0017	0,0015	0,0032	89
16:44	05/07	50	5019	0,019	0,022	0,023	0,027	72
10:32	07/07	50	5042	0,0064	0,0053	0,005	0,0062	95
10:33	07/07	50	5035	0,048	0,035	0,036	0,042	94
10:36	07/07	51	5067	0,014	0,007	0,0097	0,0092	93

Con el fin de combatir las ráfagas de errores producidas en la transmisión y los errores de tipo aleatorio, se requiere que el sistema incorpore una protección contra errores. Dadas las características del enlace (unidireccional-simplex), se debe recurrir a técnicas del tipo FEC (*Forward Error Correction*), que no utilizan el reenvío de la información.

Por otro lado, debido a la longitud de las ráfagas de errores y su alta densidad, es también necesario utilizar técnicas de entrelazado de la información (*Interleaving*). Estas técnicas se basan en la introducción de una dispersión temporal controlada por el propio sistema, con el fin de evitar que el código corrector vea ráfagas demasiado densas de errores.

Se ha realizado un primer estudio de la capacidad de corrección de errores de los datos enviados a través de la ionosfera (con el enlace real), aplicando un código del tipo *Reed-Solomon* (uno de los más eficaces para combatir grandes ráfagas de errores) y un entrelazado uniforme.

En la tabla 2 se muestran los resultados conseguidos aplicando la codificación y el entrelazado a los datos enviados. El parámetro T es el número de errores que es capaz de corregir en un bloque de n bits codificados, η es la eficiencia de la codificación, y P_i es la profundidad del entrelazado (n.º de bits consecutivos que van a ser ordenados dentro de la misma ventana temporal).

8.2.6. Hardware realizado

Sin lugar a dudas, una de las partes más importantes del proyecto ha sido el diseño y puesta a punto de gran cantidad de hardware, más de 15 placas en total, algunas de gran complejidad. De todo este hardware se pueden destacar los siguientes módulos:

- Placa central de procesamiento de datos en tiempo real.

Tabla 2. Probabilidad de error antes (BER) y después de codificar (BERc).

T	η	P_i	BER	BERc
9	0.6	1.028	0.068	0.026
15	0.6	289	0.026	0.0086
21	0.8	400	0.026	0.012
9	0.6	2.500	0.024	< 0.004
3	0.7	2.500	0.024	0.0081
21	0.7	360	0.051	0.0056
21	0.9	838	0.051	0.012
9	0.7	2.500	0.051	0.0048

- Placa de conversores analógico/digital y digital/analógico.
- Placa de adquisición de datos a 200 Kmuestras/seg para el sistema de evaluación del canal.
- Amplificador de RF a la entrada del receptor (2 versiones).
- Placa de control del *up-converter* para el sistema automático de evaluación del canal.

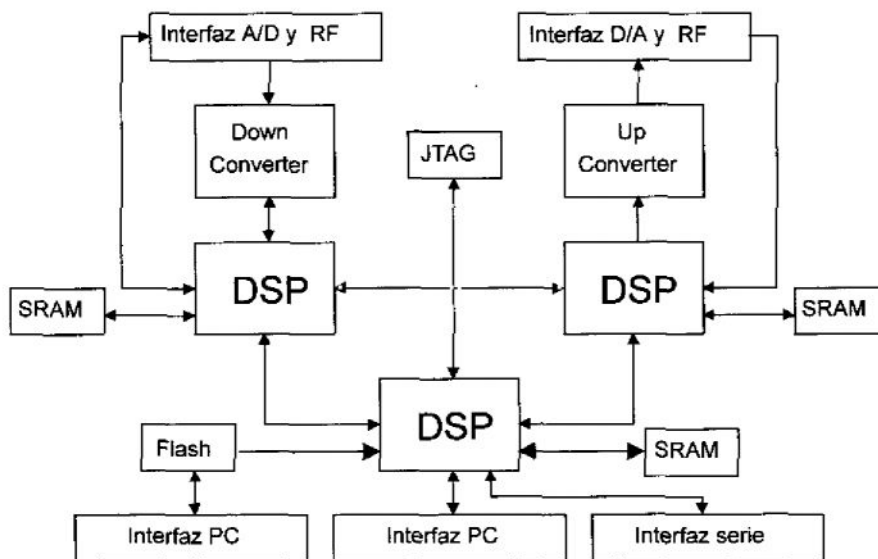


Figura 14. Diagrama de bloques de la placa central de proceso de datos.

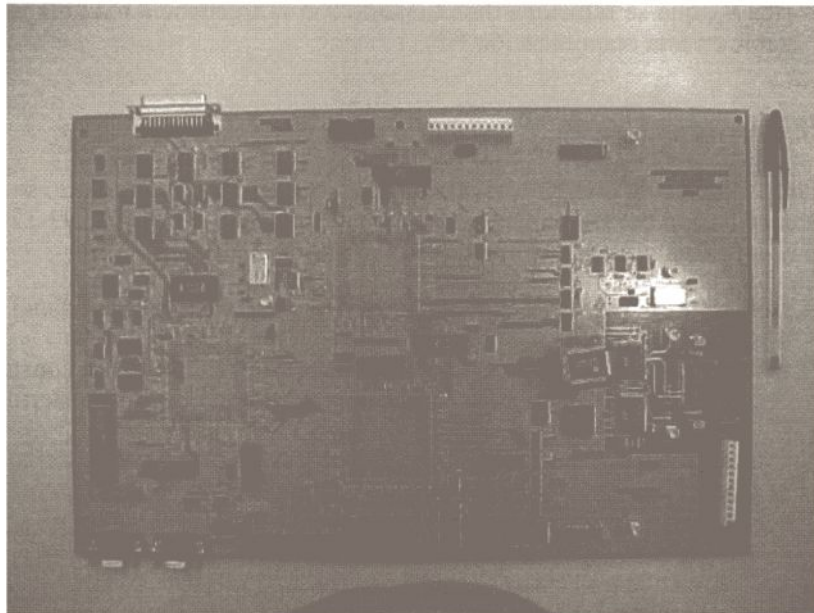
Por brevedad, la descripción se centrará en la placa central de procesado de datos, que es la más compleja (ver figura 14). Consta de tres DSP's intercomunicados, uno actúa como maestro y los otros dos realizan tareas de emisión y recepción, tales como la adquisición, demodulación, control de errores, entrelazado, etc. La comunicación se lleva a cabo a través de puertos paralelos rápidos que permiten la repartición de tareas de forma muy flexible. Además de la memoria interna, cada DSP tiene 256 KB de SRAM externa. El sistema completo tiene una capacidad de cálculo de 180 Mflops, suficiente para nuestra aplicación. La placa incluye dos puertos serie para intercambio de datos y configuración desde el PC.

El sistema está preparado para trabajar con toda la banda de HF hasta 30 MHz. Los conversores trabajan a 60 Mmuestras/seg.

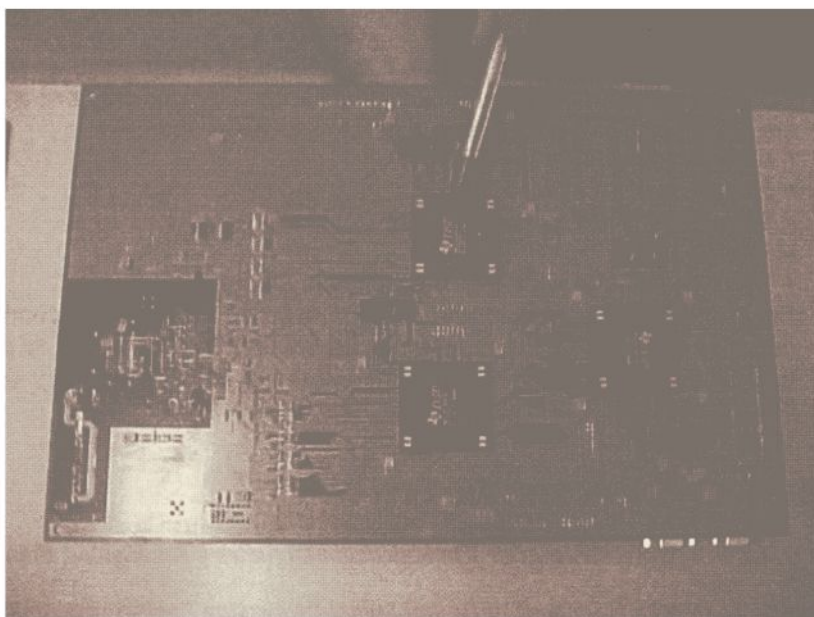
La figura 15 muestra dos fotografías de la placa central de procesado de datos (8 capas) donde van alojados los DSP's.

8.3. Conclusiones período 1997-1999

- Se ha establecido un sistema de emisión y recepción de datos digital que permite la evaluación del canal ionosférico como canal de comunicaciones. Se cree estar en situación de afirmar que no existe en España otro sistema capaz de extraer la función de *Scattering* del canal ionosférico.
- Se ha establecido un enlace de comunicaciones a 100 bps en espectro ensanchado tal y como marcaban las especificaciones (en tiempo diferido sobre PC) que demuestra la viabilidad del proyecto. El control remoto del transmisor via Internet funciona perfectamente.
- Para la realización de la evaluación del canal y establecimiento del enlace ha sido necesario el diseño y fabricación de más de 15 placas, algunas de ellas de gran dificultad. Aunque la recepción en tiempo real no fue completada, todo el hardware (incluso la placa de procesado de datos) quedó verificado y se estaba en condiciones de traspasar el software, el cual estaba ya probado sobre PC, a la plataforma DSP.
- Toda la parte analógica del sistema (amplificadores en recepción, antenas, preamplificador en transmisión..) se completó con éxito.
- Para la *caracterización del canal*, se había creado una base de datos de perfiles de densidad electrónica en la ionosfera, que ha permitido posteriormente seleccionar frecuencias óptimas para establecer el enlace en períodos de baja actividad solar, y calcular otros parámetros necesarios para la comunicación: el ángulo de incidencia, altura del punto de reflexión, retardo entre distintos rebotes, etc.
- Se estableció también, un método estadístico para predecir con tiempos de adelanto entre 1 y 24 horas, la frecuencia crítica de la capa ionosférica.



(a)



(b)

Figura 15. Fotografía de la placa central de procesamiento de datos: (a) cara superior. (b) Cara inferior. El núcleo del sistema lo componen 3 DSP's TMS320C40 a 60 MHz.

rica F_2 , que se relaciona directamente con la frecuencia máxima utilizable en una comunicación HF.

9. PERÍODO 1999-2000

En el momento de escribir este artículo (febrero del 2000) el proyecto se encontraba en la fase correspondiente a la acción especial CICYT (TIC99-1284-E). En esta fase se pretenden cumplir los siguientes objetivos:

- Completar la estadística de evaluación y caracterización del canal ionosférico.
- Instalar el amplificador de potencia definitivo, ya diseñado y construido, el cual ha de sustituir al equipo *Elmer* cedido por el Ministerio de Defensa.
- En todo receptor, una de las partes más críticas es el preamplificador de la señal de antena. Aunque el diseño actual funciona correctamente, es seguro que con ligeras modificaciones se puede disminuir el ruido y obtener una mejor calidad.
- En cuanto a la transmisión de información se refiere, hace falta realizar pruebas exhaustivas de funcionamiento (día y noche, variaciones estacionales, perturbaciones, etc) debido a los retrasos en la finalización de la placa.
- Ahora que el hardware ya ha sido completado, es el momento de ensayar diferentes técnicas para esclarecer cuales son las que mejor se adaptan al canal ionosférico. Algunas de estas técnicas son:
 - Códigos correctores de error.
 - Entrelazado de bits.
 - Grado del ensanchamiento.
 - Ecuilización.
 - Técnicas de adquisición de la secuencia PN, etc...
- Para lograr esta adaptación al canal ionosférico es necesario conocer mejor su comportamiento bajo todas las condiciones. Para ello, se pretende ampliar el cálculo de los parámetros que lo caracterizan y establecer un método preciso de predicción.

10. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- COUCH II, L. W. (1998): *Sistemas de Comunicación Digitales y Analógicos*, Prentice Hall.
- DOUGLAS, F. E. (1987): *Handbook of Digital Signal Processing Engineering Applications*, Academic Press.
- Harris Data Acquisition Application Note, AN9214.2, October 1993, Harris Semiconductor.

- HDP50016 Digital Down Converter, Harris Semiconductor.
HSP50215 Digital Up Converter, Harris Semiconductor.
MARVEN, C., and EWERS, G. (1995): *A Simple Approach to Digital Signal Processing*, Texas Instruments.
MASLIN, N. (1987): *HF Communications: A System Approach*, Plenum Press.
OPPENHEIM, A. V., and SCHAFER, R. W. (1975): *Digital Signal Processing*, Prentice Hall.
PICKHOLTZ, R. L.; SCHILLING, D. L., and MILSTEIN, L. B. (1982): Theory of Spread Spectrum Communications-A Tutorial, *IEEE Trans. Commum.*, vol. COM-30, pp. 855-884, May.
PROAKIS, J. G. (1995): *Digital Communications*, McGraw-Hill.
RUDY VAN DE PLASSCHE (1994): *Integrated Analog-to-Digital and Digital-to Analog Converters*, Kluwer Academic Publishers.
SCHOLTZ, R. A. (1977): The Spread Spectrum Concept, *IEEE Trans. Commum.*, vol. COM-25, pp. 748-755, August.
SHANNON, C. E. (1948): A mathematical theory of communications, *Bell Syst. Tech. J.* 27, pp 379-424, pp 623-657.
TMS320C4x User's Guide, Texas Instruments.