

Resumen del Proyecto Fin de Carrera

“Sistemas de Comunicaciones Digitales Basado en Técnicas Chirp de Espectro Ensanchado”

Autor: Miguel Ángel Cervera Gómez
Directores: José Luis García y Jesús María Ibáñez.



Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones,
Universidad de Cantabria.

Fecha de presentación:
12 de Septiembre de 2005.



Calificación: Matrícula de Honor (10).



Índice

Descripción del proyecto fin de carrera (PFC).....	3
Motivación.....	4
Objetivos.....	5
Desarrollo.....	5
Conclusiones.....	8
Originalidad.....	9
Resultados.....	11
Aplicabilidad.....	14
Referencias.....	16

Descripción del proyecto fin de carrera (PFC).

Hoy en día existe un gran interés por el prometedor mundo de las comunicaciones inalámbricas. Esto que anteriormente se veía como una tendencia o una suposición es ahora una realidad consolidada, y prueba de ello es que tanto el mundo académico como el empresarial forman parte de esta revolución, cuya relevancia es trascendental para el futuro de lo que se conoce como Sociedad de la Información.

Existen un gran número de líneas de investigación abiertas relacionadas con las comunicaciones inalámbricas, en especial en el ámbito de las redes personales de corto alcance, también conocidas como WPAN (*Wireless Personal Area Networks*), donde por primera vez se introduce el concepto del ser humano como eje o motor de las comunicaciones a corta distancia, ofreciendo una solución eficaz y de bajo coste proporcionando tanto movilidad como conectividad.

El éxito de Internet, junto con la eclosión de las redes de acceso celular, ha provocado que movilidad y conectividad sean el punto y partida de cualquier proyecto tecnológico sobre redes inalámbricas. Pero sin lugar a dudas, la clave de las nuevas redes de telecomunicación inalámbricas es el espectro radioeléctrico y el uso de bandas no licenciadas, conocidas como bandas ISM (*Industrial Scientific and Medical*). Sin embargo, su uso está masificado y por consiguiente, el nivel de potencia interferente puede llegar a ser muy elevado.

En el momento en el que este proyecto fin de carrera fue concebido el grupo de trabajo TG 4a del IEEE, dentro del estándar que se encarga de normalizar las redes personales de corto alcance (IEEE 802.15), debatía dos esquemas de transmisión radio de naturaleza completamente diferente. Por un lado, el *Impulse Radio – Ultra WideBand* (IR-UWB) y por el otro el *Chirp Spread Spectrum* (CSS), ambas operando en la banda ISM de 2.45 GHz. Podríamos pensar que ambas opciones se basan en espectro ensanchado, pero no es cierto. Sólo CSS es espectro ensanchado. La opción IR-UWB se basa en la transmisión de pulsos eléctricos de muy corta duración, del orden de nanosegundos y, por tanto, con una expansión frecuencial del orden de los GHz, lo que conlleva a niveles de densidad espectral de potencia (Watt/Hz) por debajo del ruido térmico. De esta manera se consiguen sistemas robustos ante el multicamino, y difíciles de interceptar. Asimismo, dada la baja densidad espectral de potencia manejada, no interfieren a los usuarios que operan en la gran banda ocupada por los sistemas UWB.

Por otro lado, el sistema CSS se basaría en la transmisión de señales chirp con un producto ancho de banda – tiempo de bit (ganancia de procesado) elevado, lo que repercutiría en la capacidad del sistema para rechazar señales interferentes de forma directamente proporcional a la ganancia de procesado.

En el Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones (DICOM) de la Universidad de Cantabria se estaba trabajando en el desarrollo de sistemas CSS analógicos basados en líneas de retardo dispersivo [7]. La complejidad y alto coste de fabricación de las líneas de retardo hacían inviable la realización de prototipos analógicos dentro del departamento. La búsqueda de una solución más asequible, su análisis y comparativa con el sistema original es el origen de este proyecto fin de carrera titulado “Sistema de Comunicaciones Digitales Basado en Técnicas Chirp de Espectro Ensanchado”.

Motivación.

Los sistemas chirp de espectro ensanchado analógicos basaban su funcionamiento en la utilización de líneas de retardo dispersivo, implementadas mediante filtros SAW caracterizados por una respuesta frecuencia quasi-plana y un retardo de grupo lineal con pendiente constante a lo largo de un ancho de banda determinado. Estos sistemas consiguen ensanchar los pulsos eléctricos con forma de señal tipo *sinc* a su entrada, convirtiéndolos en señales moduladas linealmente en frecuencia (LFM), es decir señales sinusoidales cuya frecuencia varía con el tiempo.

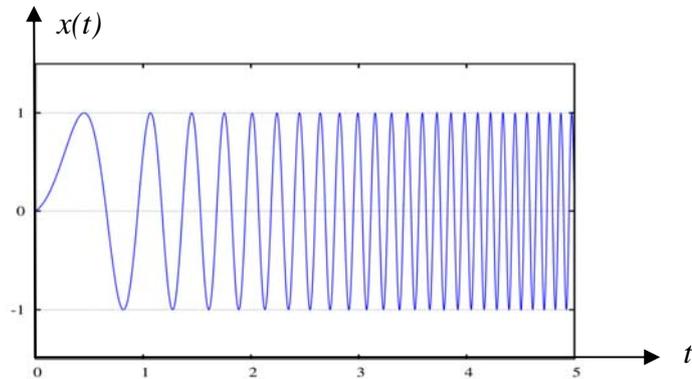


Figura 1. Señal LFM o chirp.

La señal chirp o LFM (*Linear Frequency Modulation*), tras viajar por el canal radio es filtrada de nuevo por un filtro SAW semejante al del transmisor pero con características de retardo de grupo opuestas. De esta manera el proceso de ensanchar y desensanchar la señal de información es transparente a la cadena de procesado de banda base. En la Figura 2 puede apreciarse de manera gráfica el proceso.

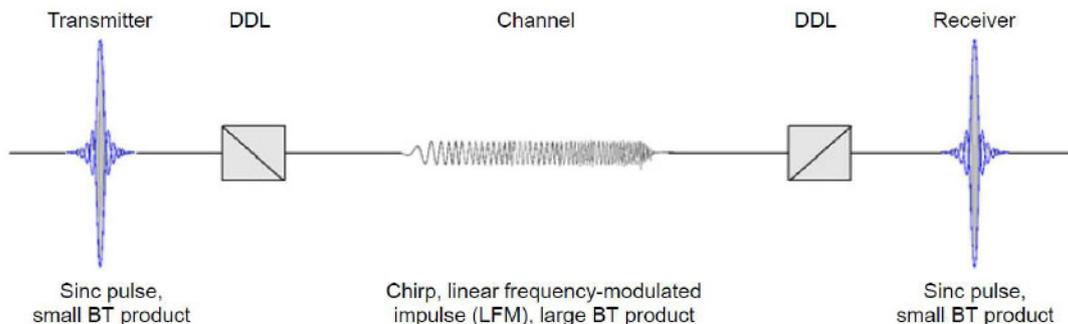


Figura 2. Cadena de procesado de un sistema CSS basado en líneas de retardo dispersivo (DDL).

Las aplicaciones a las que estaría orientado este esquema de modulación se caracterizarían por:

1. Velocidades brutas (a la salida de la antena) moderadas.
2. Alcance de cobertura pequeño (aprox. 10 m.)

Es decir, un buen ámbito de trabajo podrían ser las redes personales de corto alcance introducidas previamente en este resumen, por lo que parece sensato que el IEEE 802.15.4 hubiera apostado en un principio por este esquema de modulación aunque al final se decidiera por IR-UWB.

Sin embargo, para que el sistema funcione acorde a lo esperado y por tanto el comportamiento de la señal chirp aporte las prestaciones que justificarían su implementación, la realización de las

líneas de retardo dispersivo debe ser perfecta, cuidando que el retardo de grupo de ambos filtros sea complementario y por tanto la señal original no se vea alterada.

A este problema hay que añadir el hecho de que la fabricación de un filtro de estas características necesita de una inversión elevada pues su construcción requiere de tecnología fotolitográfica de alta resolución. Por lo tanto, sería necesario encargar su elaboración a empresas especializadas, siendo sólo rentable en el caso de necesitar elevados volúmenes de unidades.

En definitiva, el origen de este proyecto se debe a necesidades tecnológicas y económicas reales, necesarias para el correcto desarrollo de sistemas WPAN basados en un esquema de modulación chirp de espectro ensanchado (CSS) dentro del Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Cantabria.

Objetivos.

Desde el departamento se pensó en buscar una alternativa tecnológica basada en técnicas de procesado digital de la señal aplicadas, en concreto, al esquema de modulación. La posibilidad de implementar estos sistemas sobre plataformas digitales (DSPs, ASICs...) reduce de forma considerable los costes de fabricación. Asimismo, el diseño digital elimina los dos problemas tecnológicos que planteábamos en el origen de este proyecto sobre la implementación de filtros SAW. Ahora todo el sistema se estudiará desde una perspectiva de banda base siendo sólo necesario un modulador I/Q para subir la señal a la banda de operación.

El diseño pretende cubrir dos aspectos fundamentales de las WPAN: 1) fiabilidad en la transmisión y 2) uso razonable de la batería. Es decir, un comportamiento del sistema optimizado en términos de probabilidad de error de bit.

Asimismo, se pretende realizar un análisis de las posibilidades de acceso múltiple que las señales chirp presentan desde una perspectiva tiempo-frecuencia (2D). Así como un tono se identifica en la frecuencia por una determina componente frecuencial en un plano 2D, una señal chirp se identifica por la pendiente de su rampa tiempo-frecuencia. De la misma forma que dos tonos a frecuencias distintas son ortogonales (FDMA), dos señales chirp con pendientes distintas son también ortogonales (MDMA) con la única salvedad de añadir una modulación en amplitud adicional. En la Figura 3 se ilustra lo comentado previamente.

En resumen, el objetivo de este PFC consiste en estudiar las posibilidades que ofrece el diseño de los sistemas chirp de espectro ensanchado mediante técnicas de procesado de señal, atendiendo a niveles de calidad y acceso al medio.

Desarrollo

El desarrollo del PFC se centró en cumplir los objetivos marcados inicialmente, dividiendo el trabajo en tres partes fundamentales: modulación, acceso al medio y comparativa con el equivalente analógico.

1. Esquema de modulación chirp binario.

La utilización de tasas chirp constantes durante todo el tiempo de bit, implica que dos usuarios distintos de una red ocuparán anchos de banda diferentes (Figura 3). Esto es inviable en cualquier sistema de comunicación con unos límites de ancho de banda y régimen binario determinados.

Una solución a este problema consiste en dividir el tiempo de bit en dos partes iguales (Figura 4), asignando a cada intervalo una pendiente distinta. De esta forma, conseguimos un método de

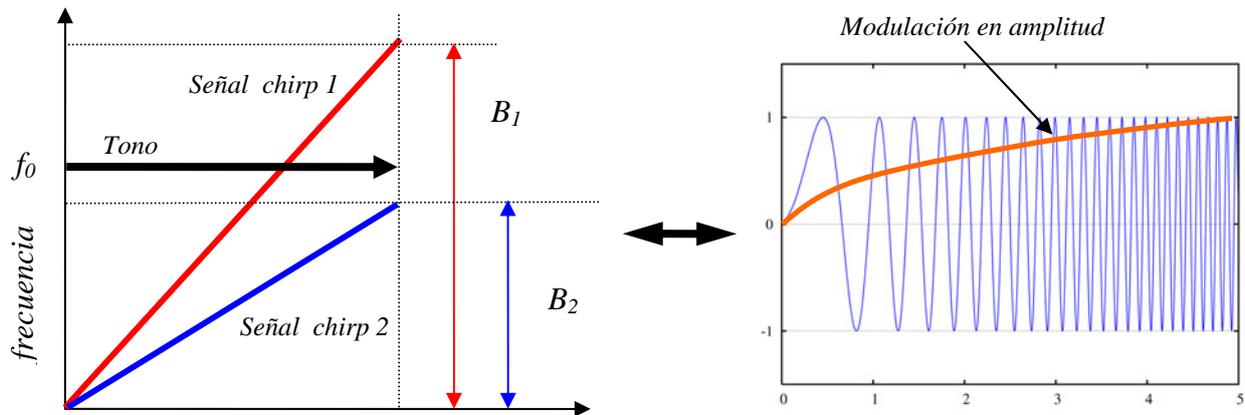


Figura 3. Respuesta tiempo-frecuencia de dos señales chirp y un tono @ f_0 (izquierda). Modulación en amplitud necesaria para conseguir una ortogonalidad perfecta (derecha).

multiplexación en el que todos los usuarios compartan un mismo ancho de banda y tiempo de bit.

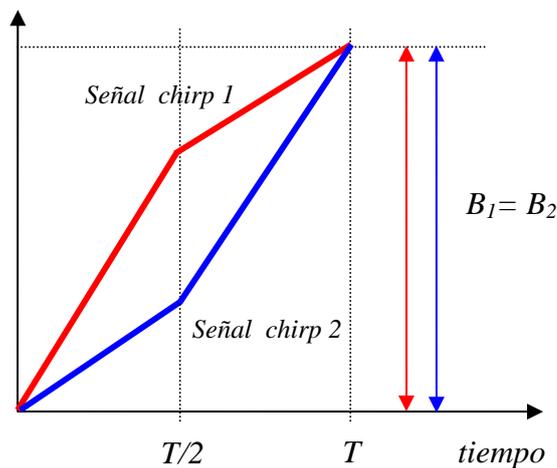


Figura 4. Representación tiempo-frecuencia del esquema de modulación.

Este esquema de modulación se encuentra en [1] y [2], propuesto como mejora en sistemas FH-CDMA. Sin embargo, un análisis detallado nos llevó a la conclusión de que no satisfacían los objetivos iniciales del PFC en cuanto a probabilidad de error de bit y aprovechamiento espectral. Para el caso de dos usuarios, este esquema de modulación binario pierde 4.2 dB de E_b/N_0 y tiene un aprovechamiento espectral del 50%.

Nuestro estudio sobre este esquema de modulación nos llevó a proponer dos modificaciones. Por un lado, el hecho de transmitir la información en la fase de la portadora conlleva un malgasto de ancho de banda, en consecuencia, decidimos transmitir la información en la envolvente. De esta misma manera conseguimos una disposición antipodal de los símbolos en el espacio de señal, lo que conlleva implícitamente una mejora del comportamiento en términos de probabilidad de error de bit. Además, consideramos necesaria una traslación del espectro, de tal manera que la señal se encuentre centrada en torno a la portadora.

En el apartado de resultados expondremos con más detalle las simulaciones correspondientes.

2. Análisis de las posibilidades de acceso múltiple.

Al presentar un nuevo esquema de modulación, debemos analizar que consecuencias implica en cuanto a multiplexación se refiere. Las señales chirp se caracterizan por presentar esta característica en la envolvente de la señal.

En el esquema propuesto, la modulación en amplitud de la señal no cumple con el principio de ortogonalidad de señales chirp durante el segundo intervalo (Ver Figura 5). La envolvente verde es la modulación en amplitud necesaria para que exista una ortogonalidad perfecta entre usuarios, la azul es la utilizada en este proyecto.

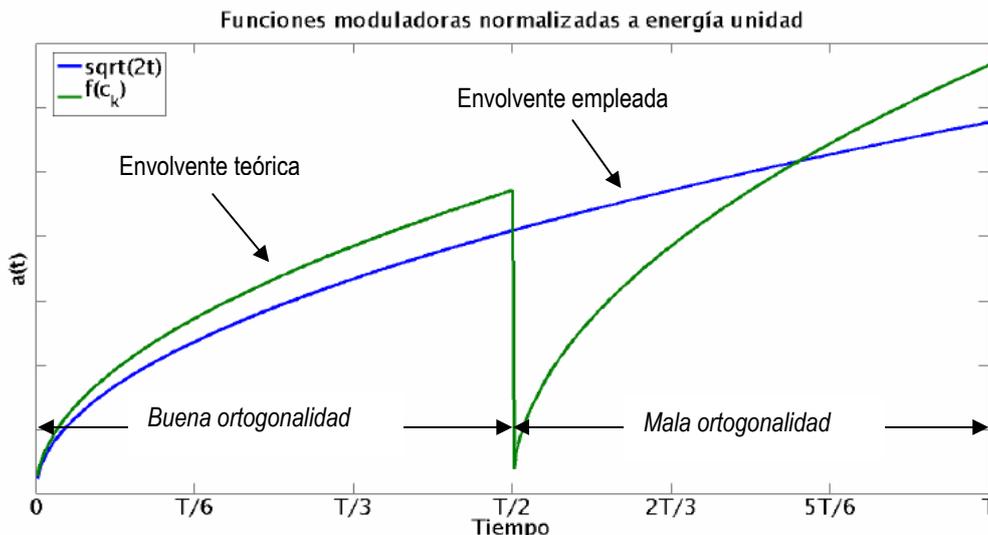


Figura 5. Comparativa entre la envolvente teórica y la empleada.

Al finalizar este trabajo encontramos el motivo por el cual el esquema de modulación no presentaba una ortogonalidad perfecta. En realidad, nuestro trabajo consistió en utilizar una ganancia de procesamiento determinada que cumpliera con la normativa ISM de radiación. El método que utilizamos para calcular nuestra ganancia de procesamiento se explica en el proyecto.

Tras obtener el método de cálculo de la ganancia de procesamiento o producto BT , procedimos a analizar la robustez del sistema frente a interferencias con y sin ruido blanco gaussiano en un sistema con canal ideal y filtro adaptado en el receptor.

En el análisis sin ruido blanco, quedó patente la quasiortogonalidad del esquema de modulación, al presentar un comportamiento de BER vs SIR escalonado. Se llegó a obtener una expresión analítica que describía el comportamiento para un número N de usuarios simultáneos y se corroboró mediante simulaciones.

Asimismo, en el análisis con ruido blanco, dedujimos otra expresión analítica para el caso de $N=2$ usuarios en función del factor de ortogonalidad y de la relación señal a interferencia (SIR). Asimismo, verificamos dichos comportamientos mediante simulaciones para el caso de $N=2$ y $N=5$ usuarios simultáneos.

Al igual que el caso anterior, en el apartado de resultados expondremos las simulaciones y resultados analíticos.

3. Comparativa con el sistema NanoNet.

Una vez conocido el comportamiento del sistema en términos de probabilidad de error de bit para un determinado número de usuarios simultáneos procedimos a compararlo con el de su equivalente analógico.

El sistema de comunicaciones Nanonet es un sistema chirp de espectro ensanchado basado en líneas de retardo dispersivo implementadas mediante filtros SAW. El esquema de modulación empleado es un esquema OOK (*On-Off Keying*) cuya respuesta en BER equivale a la de un sistema unipolar, es decir, para un mismo nivel de probabilidad de error se necesitan 3dB más que con la opción antipodal. En lo referente a las señales chirp, Nanonet utiliza como base una señal chirp en proceso de expansión con pendiente chirp constante durante todo el tiempo de bit. De esta manera, NanoNet no contempla acceso multiusuario.

En la comparativa utilizamos los datos y expresiones que Nanotron presentó en el grupo de trabajo TG4a del IEEE 802.15 cuando propuso su dispositivo como estándar de capa física [3]. De estos informes destacamos las simulaciones realizadas para un ancho de banda de 64 MHz, tiempo de bit de 1 μ s (es decir, una ganancia de procesamiento igual a 64 o 18 dB). Los resultados para una BER umbral igual a 10⁻³ la relación E_b/N_0 era igual a 14 dB y la relación portadora a interferencia igual a unos -4 dB.

Cabe destacar que las simulaciones serán expuestas en el apartado correspondiente a resultados.

Conclusiones

Desde un punto de vista de implementación, el hecho de optar por una tecnología digital consigue resolver los costes asociados a la implementación de los filtros SAW, necesarios en la implementación de sistemas CSS analógicos.

Atendiendo al esquema de modulación digital empleado, nuestra propuesta mejora en 4 dB la relación E_b/N_0 del esquema original, al separar la distancia entre símbolos y conseguir, por tanto, un comportamiento antipodal. De la misma manera, el hecho de no transmitir la información en la fase de la portadora consigue un aprovechamiento espectral del 100%, superior al del esquema original.

En cuanto a las capacidades de acceso múltiple del sistema de comunicaciones, nuestro esquema de modulación no presenta una ortogonalidad perfecta debido a que no utilizamos una modulación en amplitud que siga el principio de ortogonalidad de las señales chirp. La utilización de una ganancia de procesamiento proporcional al número de usuarios, necesaria para cumplir la normativa de radiación de las bandas ISM, nos llevó a obtener unos resultados de E_b/N_0 para una $BER=10^{-2}$ y $SIR=-10$ dB de 6 y 7.8 dB para 2 y 5 usuarios simultáneos, respectivamente. Resultados interesantes para la utilización de estos sistemas en redes con tasas de probabilidad bajas y limitaciones en potencia de los terminales.

La comparativa con NanoNet desprende resultados interesantes ya que demuestra que la apuesta por una nueva tecnología es interesante y alentadora. Partiendo de las mismas condiciones comentadas de $BER = 10^{-3}$, $BT = 18$ dB y $C/I=-4$ dB el sistema propuesto es capaz de soportar tres usuarios simultáneos. Si optáramos por tener un sólo usuario simultáneo, al igual que NanoNet, nuestro sistema tendría una mejora de más de 3 dB en términos de E_b/N_0 .

Finalmente, como líneas futuras, sería interesante analizar el comportamiento del sistema con una nueva envolvente, realizar simulaciones con el modelo de canal WPAN del IEEE e implementar el sistema en DSPs para analizar su comportamiento.

Originalidad

A lo largo de este resumen se ha presentado un sistema de comunicaciones digitales basado en técnicas chirp de espectro ensanchado. Como se comentó anteriormente, este proyecto se presenta como una alternativa tecnológica del sistema de comunicaciones chirp de espectro ensanchado original, basado en líneas de retardo dispersivo implementadas mediante filtros SAW.

Hasta la fecha, no somos conscientes de que exista ningún diseño alternativo de sistemas CSS basados en técnicas de procesado digital de la señal distinto del nuestro. Por consiguiente, dentro del ámbito de las redes de área personal, nuestro estudio aporta un ápice de originalidad que abarca aspectos tales como el esquema de modulación o el acceso multiusuario. Además, aún no habiéndose recogido un estudio al respecto en este trabajo, la nueva alternativa tecnológica presenta una reducción de costes tanto de diseño como de implementación.

Desde el punto de vista del esquema de modulación, nuestro trabajo ha consistido en encontrar la manera de conseguir un sistema de comunicaciones que en términos de *BER* presente un comportamiento BPSK utilizando como base una señal chirp. De esta forma conseguimos, por un lado, todas las ventajas de una señal BPSK y, por el otro, dos aspectos fundamentales de las señales chirp: inmunidad inherente al efecto Doppler y a la distorsión multicamino, y la utilización del análisis tiempo-frecuencia para conseguir acceso múltiple.

Partiendo de un análisis previo sobre la utilización de señales chirp en sistemas FH-CDMA, se estudió su comportamiento y se propusieron mejoras de forma que nuestro sistema presentase un rendimiento óptimo en redes de corto alcance.

El hecho de utilizar las señales chirp como base del esquema de modulación BPSK, nos permitió introducir en el ámbito de las redes WPAN la utilización del plano tiempo-frecuencia como método de multiplexación. El empleo de un análisis 2D, sólo posible mediante técnicas de procesado de señal, implica una mejora en el método de acceso. De esta manera se podría progresar en el desarrollo de sistemas WPAN desde una perspectiva de acceso múltiple mediante TDMA, por ejemplo, considerando que es posible que en un mismo slot coincidan más de un usuario y no se produzca ninguna colisión, tal y como se observa en la figura siguiente para el caso de dos usuarios chirp simultáneos. Obsérvese en la Figura 6 cómo se puede doblar la capacidad del sistema. En nuestras simulaciones es posible distinguir hasta cinco usuarios simultáneos dentro de un mismo slot TDMA.

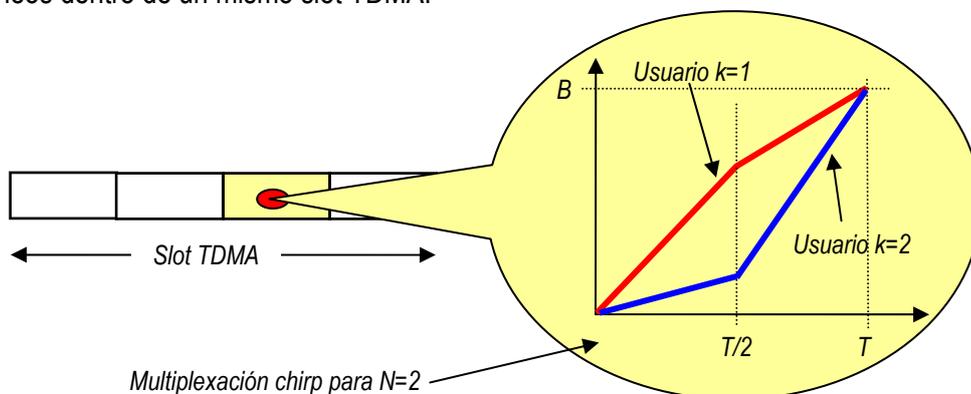


Figura 6. Ejemplo de multiplexación utilizando TDMA y un análisis tiempo-frecuencia.

De igual manera, por ser el primer sistema CSS basado en técnicas de procesamiento digital de la señal, nuestro trabajo presenta el primer estudio comparativo entre las dos alternativas de implementación. Como se verá más adelante, nuestro sistema presenta unas prestaciones de BER frente a $E_b/(N_0+I_0)$ bastante prometedoras en una comparativa de coexistencia intrasistema, con acceso multiusuario y sin él.

En definitiva, este trabajo fin de carrera se caracteriza por su originalidad, siendo pionero en la utilización de técnicas de procesamiento de la señal para el desarrollo de sistemas chirp de espectro ensanchado. De esta manera conseguimos mejorar el comportamiento en términos de probabilidad de error y añadir un concepto nuevo en estos sistemas: la capacidad de acceso múltiple mediante multiplexación en el plano tiempo-frecuencia.

Resultados

En las próximas líneas recogeremos todos los análisis y simulaciones relativos a nuestro esquema de modulación digital chirp binario. Vamos a dividir este apartado en tres categorías, a saber: modulación, acceso al medio y comparativa con el equivalente analógico.

1. Esquema de modulación chirp binario.

Del esquema de modulación original calculamos, para el caso $N=1$, $TB=4$, $R_b=1$ bps y frecuencia de muestreo, $f_s = 100$ muestras/seg; la base ortonormal asociada y llegamos a la conclusión de que la distancia, d , entre el '1' y el '0' es de aprox. $1.23\sqrt{E_b}$. Esto implica que su comportamiento

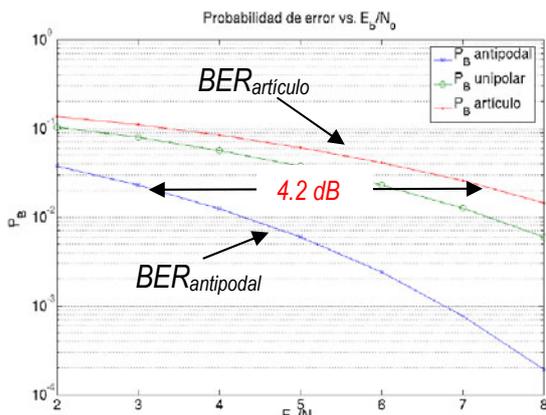


Figura 7. Comparativa entre la BER del artículo y un sistema antipodal.

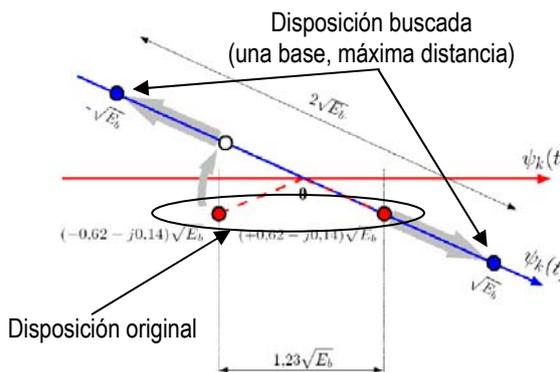


Figura 8. Representación de la base original y la buscada en nuestro trabajo.

en términos de BER sigue la siguiente expresión $P_B = Q[\sqrt{(0.757E_b/N_0)}]$, es decir, pierde 4.2 dB de E_b/N_0 respecto a un sistema antipodal para un mismo nivel de calidad o BER. En la Figura 7 puede observar éste resultado.

Esto se debe a que la distribución de los símbolos no se produce sobre una misma base (opción eficiente en un sistema binario) sino que se realiza en bases distintas (ver símbolos color rojo en la Figura 8).

Nuestra opción consiste en modificar el esquema original de forma que los símbolos se coloquen de forma antipodal sobre una misma base, es decir, que $d=2\sqrt{E_b}$ (color azul en la Figura 8).

Asimismo, el hecho de transmitir la información utilizando los procesos de expansión (bit '1') y compresión (bit '0') implica un malgasto de ancho de banda en términos de aprovechamiento espectral, definido éste como la relación entre el ancho de banda útil sobre el ancho de banda utilizado. Como se puede apreciar en la Figura 9, cuando se transmite un '1', la señal se expande B Hz. Cuando se transmite un '0', se comprime B Hz. Esto conlleva a un malgasto de ancho de banda ya que en realidad hacemos uso de $2B$ Hz. En definitiva, el aprovechamiento espectral de este sistema es del 50%.

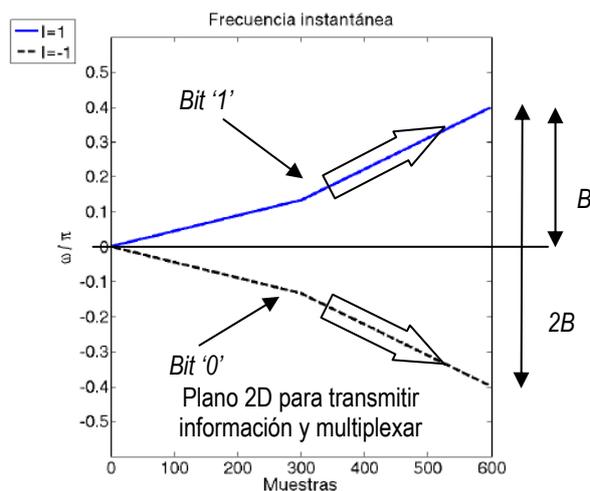


Figura 9. Plano tiempo-frecuencia cuando se utiliza el esquema de modulación original.

Lo que nosotros proponemos es un sistema que transmita la información en la amplitud de la señal empleando sólo el plano tiempo-frecuencia para multiplexar la información. De esta manera conseguimos un comportamiento antipodal en términos de BER y un aprovechamiento espectral del 100 %. El esquema de modulación y los resultados se presentan en las siguientes líneas.

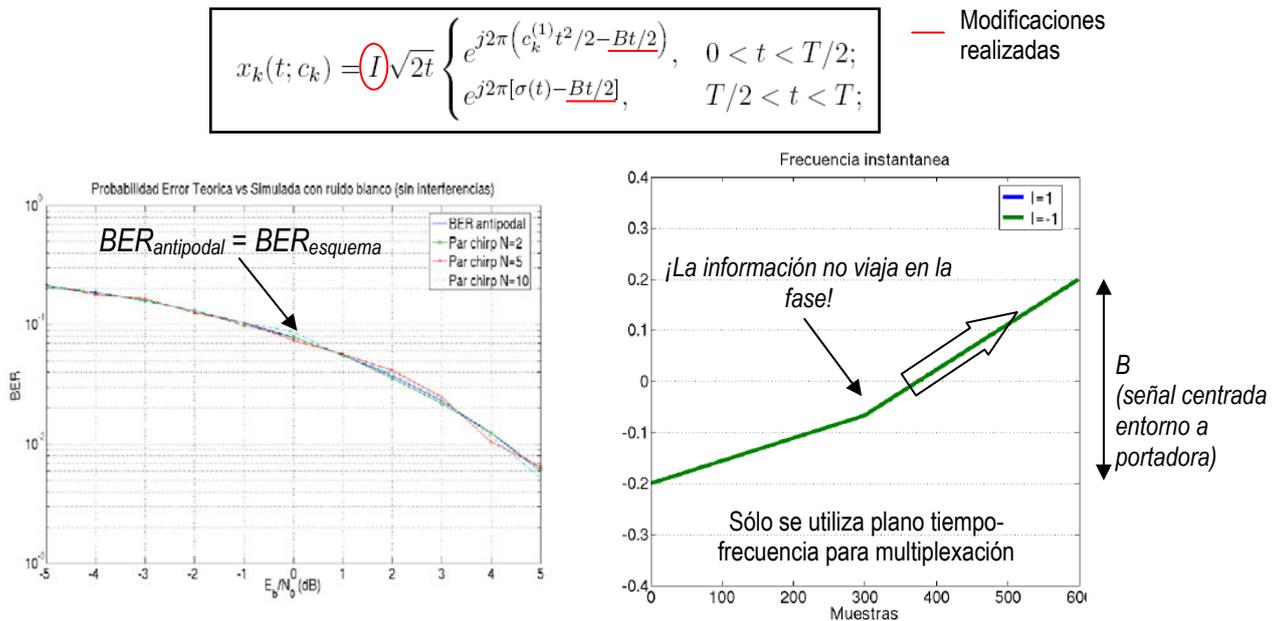


Figura 10. Comparativa entre la BER de un sistema antipodal y la BER de nuestro esquema de modulación (izquierda). Plano tiempo-frecuencia característico de nuestro sistema (derecha).

2. Análisis de las posibilidades de acceso múltiple.

En este apartado, por su extensión, sólo vamos a exponer los resultados sin atender a toda la formulación teórica necesaria para llegar a ellos, disponible en el trabajo fin de carrera. Asimismo, para todos los cálculos, fijamos un valor de $BER = 10^{-2}$, canal ideal y filtro adaptado a la diferencia en el receptor.

En el análisis sin ruido gaussiano, llegamos a calcular las expresiones analíticas sobre el comportamiento del sistema en función del número de usuarios (N) y la relación señal a interferencia (SIR), llegando a que la probabilidad de error de bit es igual a

$$P_B = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{N-1} u[SIR - \gamma_{SIR}(i)] \quad \gamma_{SIR}(i) = \frac{a_i^2}{N-1}$$

Proyección usuario i -ésimo sobre la base del usuario de interés

Siendo γ_{SIR} los umbrales de salto. Dicho resultado se simuló para $N=2$ y $N=3$, obteniendo para

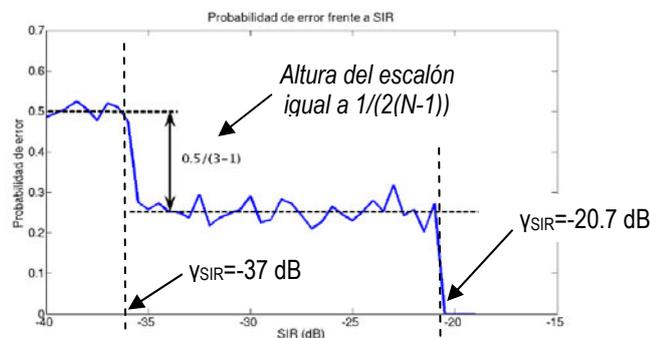


Figura 11. BER vs SIR en ausencia de AWGN.

éste último caso la gráfica de la Figura 11 (resultados teóricos γ_{SIR} igual a -20.7 y -37 dB).

Asimismo, el análisis con ruido blanco nos llevó también a una expresión analítica para el caso de $N=2$ usuarios, en función de la constante a (efecto de la ortogonalidad: $a=0$ ortogonalidad perfecta, $a=1$ no ortogonalidad) y la SIR .

$$P_B = \frac{1}{2}Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) + \frac{1}{4}Q\left(\sqrt{\left[1 + |a|\left(\frac{|a|}{SIR} + \frac{2}{\sqrt{SIR}}\right)\right]\frac{2E_b}{N_0}}\right) + \frac{1}{4}Q\left(\sqrt{\left[1 + |a|\left(\frac{|a|}{SIR} - \frac{2}{\sqrt{SIR}}\right)\right]\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

Dicha expresión se analizó mediante simulaciones. De igual manera, se simuló el comportamiento del sistema para $N=5$ usuarios.

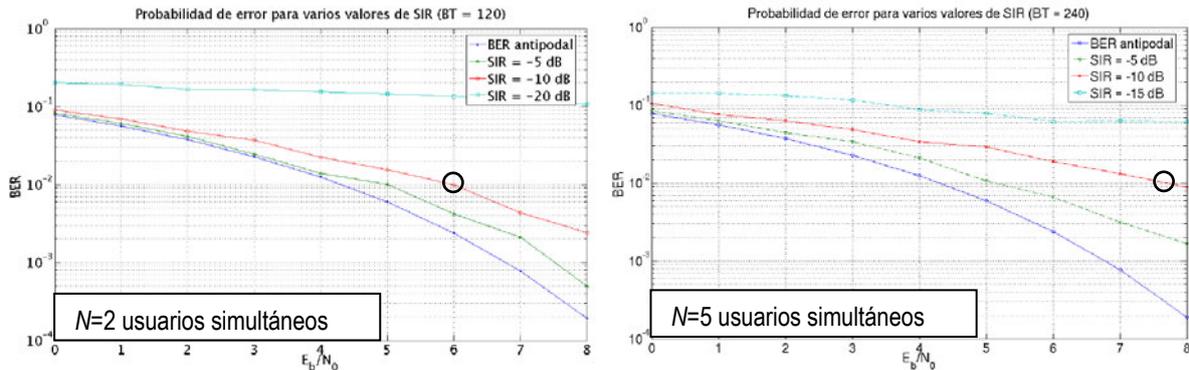


Figura 11. BER vs $E_b/(N_0+I_0)$ para el caso de dos usuarios simultáneos (izquierda) y cinco (derecha).

De dichas simulaciones se puede concluir que para mantener una $BER=10^{-2}$ cuando la $SIR=-10$ dB es necesario una $E_b/N=6$ dB ($N=2$ usuarios, $BT=120$) y de 7.8 dB para $N=5$ usuarios y $BT=240$ (Figura 11, puntos 'o'). Apréciase el hecho de que pasar de $N=2$ a $N=5$ supone un incremento en la ganancia de procesamiento de 3 dB.

3. Comparativa con el sistema NanoNet.

Nanotron presentó en Noviembre de 2003 un estudio sobre la coexistencia de su sistema en términos de BER. Para sus simulaciones, utilizaron un ancho de banda $B=64$ MHz y un tiempo de bit $T=1$ μ s, y por tanto, una ganancia de procesamiento $BT=64$ (18 dB). Para una BER de 10^{-3} , la relación $E_b/(N_0+I_0) = E_b/N = 14$ dB (energía de bit a ruido total). Asimismo, la relación C/I resultante fue $C/I = E_b/(N_0+I_0) - 10\log BT = -4$ dB.

En la Figura 12 puede observar nuestras simulaciones para distintas situaciones multiusuario. Para el caso de $N=2$ usuarios simultáneos y una BER de 10^{-3} , la relación E_b/N ronda los 11 dB. Por consiguiente, la relación $C/I = -7$ dB y por lo tanto 3 dB más eficiente que NanoNet. Nótese que estamos hablando de acceso múltiple mientras el sistema NanoNet no contempla esa posibilidad.

Si fijáramos los requerimientos del sistema en $C/I=-4$ dB ($E_b/N=14$ dB) y $BER = 10^{-3}$ (resultados de NanoNet), entonces nuestro sistema podría soportar hasta un máximo de 3 usuarios.

Para el caso en que no contempláramos acceso múltiple en nuestro sistema, el comportamiento del sistema es aún mejor de 3 dB para una $BER = 10^{-3}$.

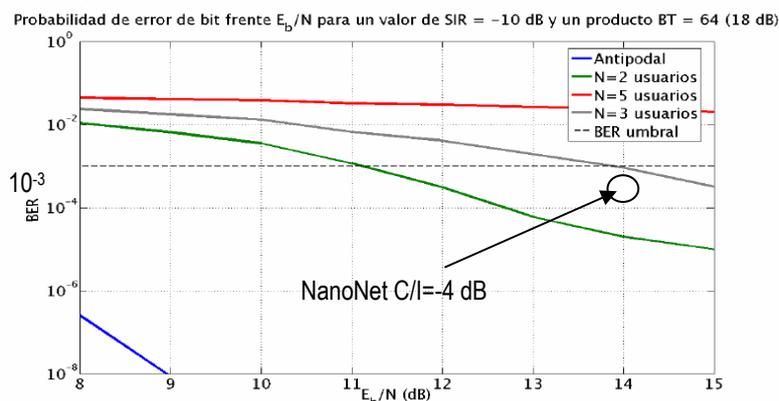


Figura 12. Comparativa entre el sistema NanoNet y nuestro sistema CSS en términos de BER.

Aplicabilidad

El sistema de comunicaciones propuesto en este trabajo, está diseñado bajo la perspectiva de lo que se conoce como *Software Defined Radio*. De esta manera, el hecho de trabajar toda la cadena de comunicaciones en banda base, reduce el coste asociado a la etapa de RF. Asimismo, la implementación de estos sistemas en DSPs o ASICs reduce su tamaño y añade un factor de repetibilidad adicional.

Por consiguiente, con este proyecto se abre un mundo de posibilidades al alcance de cualquier empresa o institución interesada en el despliegue de redes sensoriales, tipo WPAN, caracterizadas por:

- (1) Tasas de datos bajas-moderadas,
- (2) Cobertura del orden de los metros,
- (3) Fiabilidad en la transmisión,
- (4) Bajo coste.

Las aplicaciones de estos sistemas son múltiples y variadas, en las próximas líneas expondremos posibles ámbitos de aplicación de estos sistemas inalámbricos.

Control del inventario industrial. En muchas empresas es necesario un control y mantenimiento de todos sus materiales. Podríamos pensar en aplicaciones de localización, caracterizadas por velocidades de datos bajas y comunicaciones esporádicas y no prolongadas.

Seguridad personal. Generalmente orientadas a localizaciones en tiempo real. Caracterizadas por una comunicación uni-direccional aparato-servidor a velocidades realmente bajas. Un punto crítico en estos sistemas sería la corrupción de los datos por agentes externos. Imagine el caso de monitorización de un niño de una guardería, un falso positivo en esta aplicación (detectar que el niño se ha escapado) puede ser muy crítico.

Tickets electrónicos. Por la naturaleza de estos sistemas, podría pensarse en la posibilidad de incluirles dentro de cualquier teléfono celular para aplicaciones tales como e-Tickets, en donde el terminal se identificaría en la red del banco, entidad, etc., respondiendo éste con un recibo, de forma que en estadios, cines, etc. el uso del papel tendría los días contados.

Natural networks. Imagine el caso anterior en el que disponemos de un sistema WPAN dentro de nuestro móvil. El operador de red puede ofrecer servicios personalizados, mantenidos por terceros, de forma que cada vez que usted se acerque al cine que suele visitar todos los viernes, la cafetería que frecuenta a la hora de la comida, etc. reciba un mensaje multimedia con las nuevas ofertas de lúdicas, productos, ...

Ambient networks. Sin duda un ámbito que puede crear una revolución sería lo que se conoce como *Ambient Networks*. Imagine que dispone de un terminal WPAN incluido en una PDA con tecnología WiFi y un teléfono móvil con acceso WPAN. Asimismo, suponga que está realizando una llamada mediante su terminal GSM o UMTS mientras usted camina por la calle. Como es lógico, estaría conectado a la red GSM/UMTS y su operador le estaría tarificando según su contrato. Sin embargo, imagine que se acerca a un hotspot al que usted tiene acceso, la PDA podría detectarlo y comunicarlo a su terminal móvil dentro de su WPAN. De esta forma, el terminal móvil podría alternar la comunicación y pasar a utilizar VoIP, realizando desde este momento la llamada a coste de llamada local y, sin haber perdido ni un instante la comunicación.

Otros. Otras aplicaciones pueden encontrarse en el ámbito de la domótica, telemedicina o las propias de las telecomunicaciones inalámbricas.

Estos seis ejemplos son sólo una muestra de la multitud de posibles aplicaciones de este tipo de sistemas. No obstante, con estos seis ejemplos esperamos haya quedado patente la posibilidad de negocio y futuro que el desarrollo de sistemas WPAN y más aún, el desarrollo de terminales CSS basados en técnicas de procesado de la señal, aporta al mundo de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.

Referencias.

[1]: C. Gupta, T. Mumtaz, M. Zaman y A. Papandreou-Suppappola, *On the use of wideband time-varying signaling for multiuser wireless communications* en Proc. SPAWC IEEE Workshop, Roma, Junio 2003.

[2]: C. Gupta, H. Shen y A. Papandreou-Suppappola, *Time-varying multichirp rate modulation for multiple access systems* en IEEE Signal Processing Letters, Vol. 11, no. 5, mayo 2004.

[3]: Nanotron Technologies. *Introduction to Chirp Spread Spectrum (CSS)*, 11 de Noviembre de 2003, http://grouper.ieee.org/groups/802/802_tutorials/nov03/15-03-0460-00-0040-IEEE-802-CSS-Tutorial-part1.ppt

[4]: Antonia Papandreou-Suppappola. *Applications in Time-Frequency Signal Processing*, 2003. Ed. CRC Press

[5]: M. R. Winkler, *Chirp signals for communications*, en Proc. IEEE WESCON Conv., 1962.

[6]: A. J. Berni, *On the utility of chirp modulation for digital signaling*, IEEE trans. Commun, pp 748-751, June 1973.

[7]: García Bravo, José Jorge. *Redes WLAN y WPAN con técnicas chirp*. Proyecto Fin de carrera, Universidad de Cantabria. Marzo 2005.