

CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE ESPECTRO ENSANCHADO : CDMA

1 Introducción

Recientemente se han llevado a cabo intensas investigaciones para conseguir que un sistema de acceso múltiple por división de código (**CDMA**) se consolide como un acceso a la interfaz radio para múltiples usuarios dentro del estándar de tercera generación **IMT-2000/UMTS**.

CDMA es una tecnología inalámbrica de comunicaciones que aplica el principio de la comunicación de espectro ensanchado (*spread spectrum*, **SS**). Con esta tecnología se podrá trabajar con una relación señal a ruido más baja gracias al empleo de un mayor ancho de banda [HAYKIN94]. Esto se puede comprobar a través del Teorema de Shannon:

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad b/s \quad (1)$$

donde C es la capacidad de información requerida para la transmisión. Esta capacidad se define como la tasa máxima a la cual la transmisión de

información se realiza sin errores a través del canal. Se mide en bits por segundo. Según la ecuación (1), para una determinada capacidad de información, se puede reducir la SNR si se incrementa el ancho de banda B .

Con la técnica de acceso **CDMA** [ROSAS1], las señales son ensanchadas (proceso de *spreading*), en el emisor, sobre un ancho de banda mucho mayor al normalmente requerido, mediante la combinación de la señal original con una señal pseudoaleatoria, que es denominada *código*, y que es totalmente independiente del mensaje de datos que se quiere transmitir. **CDMA** emplea estos códigos como medio para distinguir entre conversaciones individuales. Este código se denomina *ruido pseudoaleatorio PN*. Las señales resultantes (de amplio espectro) operan a una densidad de potencia mucho menor que las señales originales. De aquí le viene a **CDMA** la gran robustez frente a interferencias y a detectabilidad.

A lo largo de este capítulo se tratarán todos los temas relacionados directa o indirectamente con **CDMA**, como: otros tipos de acceso múltiple, técnicas de espectro ensanchado, secuencias pseudoaleatorias, esquemas **CDMA**, ventajas e inconvenientes de **CDMA**.

2 Técnicas de Acceso Múltiple al Medio

Hoy en día, el número de suscriptores en sistemas telefónicos inalámbricos se ha incrementado rápidamente, estando los mismos cercanos a la saturación. Se exige un aprovechamiento eficiente del espectro radioeléctrico para garantizar un canal de comunicación de calidad y capacidad adecuadas. La utilización de técnicas de acceso múltiple permite optimizar el uso del canal mediante la asignación de una única frecuencia, tiempo o código a cada suscriptor o usuario. La base para cualquier diseño de la interfaz aire consiste en el esquema de acceso múltiple, o sea, en cómo el medio de transmisión común se comparte entre los usuarios [TERO96b].

En el Acceso Múltiple por División en Frecuencia (*Frequency Division Multiple Access*, **FDMA**) el ancho de banda total del sistema está dividido en

canales de frecuencia asignados a los usuarios, de manera que en cada porción del espectro sólo transmite un usuario.

En el Acceso Múltiple por División en Tiempo (*Time Division Multiple Access*, **TDMA**) cada canal de frecuencia está dividido en *time slots* y se asigna a cada usuario uno de ellos, de manera que en cada intervalo temporal sólo transmite un usuario.

En el Acceso Múltiple por División en el Código (*Code Division Multiple Access*, **CDMA**) se emplea la técnica de modulación de espectro ensanchado (**SS**). El acceso múltiple [PRASAD98] se consigue asignando a cada usuario un *código pseudoaleatorio* para codificar la señal portadora de información. El receptor, conociendo el código del usuario, es capaz de decodificar la señal recibida y recuperar la señal de información. Esto es posible porque las correlaciones cruzadas entre el código del usuario deseado y los códigos de los demás usuarios son pequeñas en comparación con la autocorrelación de cada código. Puesto que se escogen secuencias de código cuyo ancho de banda es mucho más grande del ancho de banda de las señales portadoras de información, el proceso de codificación ensancha el espectro de la señal y es, por lo tanto, conocido como *modulación de espectro ensanchado* (*spread spectrum modulation*). La señal que resulta es denominada *señal de espectro ensanchado*, y **CDMA** es denominado, a veces, *acceso múltiple por espectro ensanchado* (**SSMA**). Para poder recuperar la señal transmitida, el receptor genera de forma síncrona una réplica del código de ensanchamiento que se ha aplicado en el emisor, y calcula la correlación entre la señal recibida y la réplica para recuperar la señal portadora de información originaria. Naturalmente, esto implica que el receptor necesita conocer el código de ensanchamiento utilizado para modular la señal.

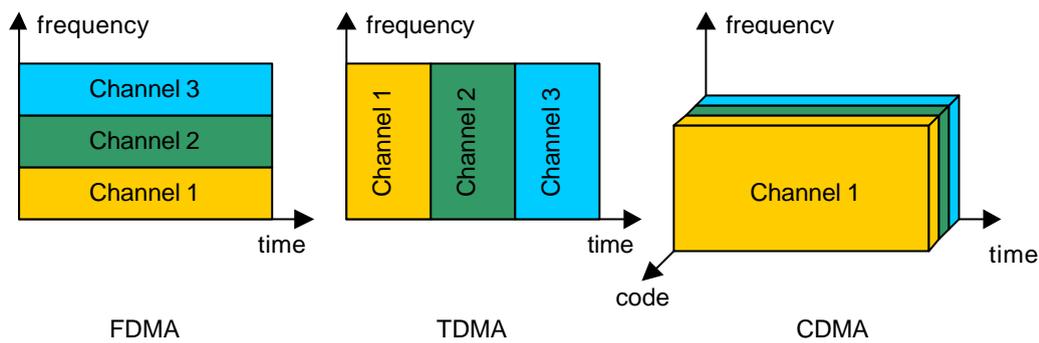


Figura 1. Comparativa frecuencia/tiempo de los distintos tipos de acceso múltiple

En la **figura 1** se puede comprobar visualmente el funcionamiento de estos tres tipos de accesos múltiples al medio.

Las separaciones entre *canales* y entre *ranuras* que deben existir en **FDMA** y **TDMA** respectivamente, constituyen una solución subóptima al problema de la capacidad del sistema. Un sistema que trabaje bajo **CDMA** maximiza su capacidad porque cada usuario utiliza toda la banda de frecuencia y mantiene su código único permanentemente. Las señales asociadas a la técnica de espectro ensanchado (**SS**) son efectivas para minimizar los problemas inherentes a los multitrayectos típicos de los enlaces radio, ya que su gran ancho de banda introduce diversidad de frecuencias. También son útiles para contrarrestar las interferencias del medio debido a su extenso ancho de banda.

Generalmente **TDMA** y **CDMA** suelen utilizar **FDMA** para dividir la banda de frecuencia disponible en porciones más pequeñas que son sucesivamente divididas por tiempo o código.

3 Modulación por Espectro Ensanchado

La técnica de modulación de espectro ensanchado fue originalmente desarrollada pensando en aplicaciones militares, pues con esta técnica se conseguía una transmisión muy resistente a interferencias [TEJE2000]. Era difícil interceptar o interferir una señal **CDMA** pues se trataba de una señal de espectro ensanchado. Su aplicación civil fue propuesta de forma teórica

en los años 40, pero su aplicación práctica no se llevó al mercado hasta 40 años después, debido a la gran cantidad de obstáculos técnicos que se encontraron en su realización. Por aquel entonces la viabilidad de **CDMA** fue desechada por la técnica de acceso múltiple por división en el tiempo, **TDMA**. El rápido desarrollo de la microelectrónica hizo posible la materialización de un sistema con tecnología **CDMA** en la década de los 90. El primer servicio comercial que se ofreció con tecnología **CDMA** fue en Hong Kong, en 1995.

Normalmente, todas las modulaciones utilizadas en comunicaciones buscan una utilización eficiente del ancho de banda y la potencia necesaria para la transmisión, ya que son dos recursos primarios. Sin embargo, la técnica de espectro ensanchado (**SS**) no centra sus objetivos en estos recursos sino en la capacidad de ofrecer una comunicación lo más segura posible con el fin de que la señal transmitida no sea fácilmente detectable por receptores no deseados y, además, sea bastante robusta ante interferencias, ya sean intencionadas o no.

3.1. Técnicas de Espectro Ensanchado

Las técnicas de modulación de espectro ensanchado satisfacen dos criterios [PRASAD98]:

📖 El ancho de banda de transmisión debe ser mucho más grande que el ancho de banda de información.

📖 El ancho de banda en radio frecuencia resultante de la modulación es independiente (estadísticamente) de la información transmitida.

Existe una magnitud que relaciona el ancho de banda de transmisión y el de información. Esta magnitud se denomina ganancia de procesamiento (*processing gain*) del sistema de espectro ensanchado:

$$G_p = \frac{W}{R} \quad (2)$$

3.1.1. Propiedades de señales de espectro ensanchado (SS)

Debido al ensanchamiento en el ancho de banda, las señales **SS** presentan ciertas propiedades que las hacen peculiares frente a las señales de banda estrecha. A continuación se describen las más interesantes.

☒ **Capacidad para el acceso múltiple:** si varios usuarios transmiten simultáneamente señales de espectro ensanchado, el receptor puede distinguir entre ellos con tal de que cada uno utilice un código diferente de los demás. Si las correlaciones entre el código de cada usuario y los códigos de los demás son suficientemente pequeñas, el receptor puede realizar sin problemas el proceso de desensanchado (*despreading*). Esto consiste en calcular la correlación de la señal recibida con la señal código de un determinado usuario, de manera que, sólo la señal de banda ancha de este mismo usuario vuelve a ser una señal de información de banda estrecha, mientras que las señales de los demás usuarios siguen ocupando todo el ancho de banda de transmisión. Así, dentro del ancho de banda de información la potencia del usuario deseado será mayor que la potencia de interferencia de las demás señales (a condición de que no haya demasiados usuarios interferentes). Este proceso es ilustrado en la **figura 2** para el caso de dos usuarios:

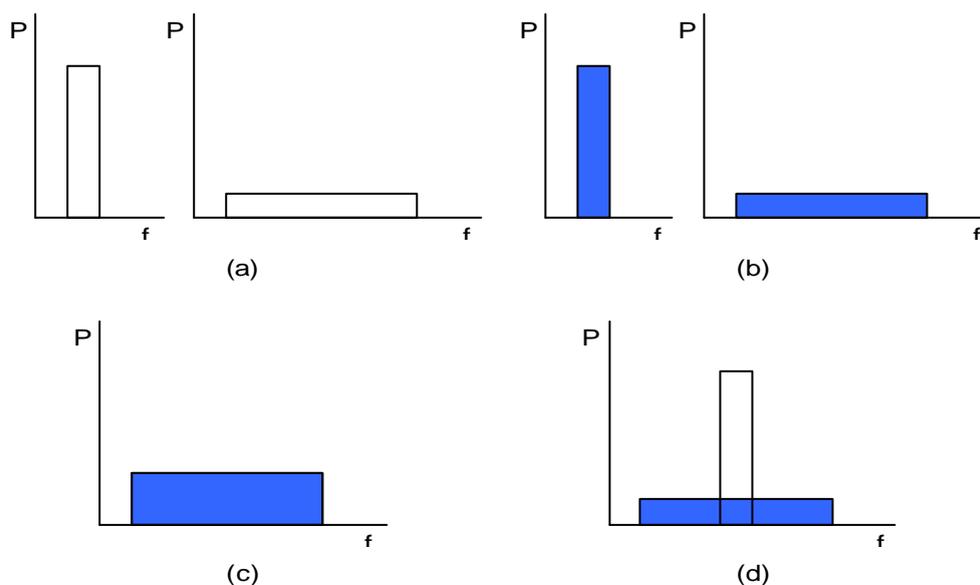


Figura 2. Esquema de transmisión de una señal de espectro ensanchado

Después de haberse ensanchado las señales del primer usuario (a) y del segundo (b), ambas se transmiten juntas (c). El receptor, calculando la correlación cruzada de la señal recibida con el código del primer usuario, es capaz de recuperar la señal portadora de información de éste, quedando la señal del segundo usuario como una señal de interferencia de banda ancha cuya potencia en la banda de información resulta reducida por un factor igual a la ganancia de procesado.

☒ **Protección contra la interferencia multitrayecto** (*multipath fading*): en un canal de radio no hay un trayecto sólo entre el transmisor y el receptor. Debido a las reflexiones y refracciones, una señal puede ser recibida por distintos trayectos. Las señales recibidas por los distintos trayectos son todas copias de la señal transmitida pero con diferentes amplitudes, fases, retrasos, y ángulos de llegada. Estas señales se sumarán en el receptor de forma constructiva a unas determinadas frecuencias y de forma destructiva a otras. La modulación por espectro ensanchado puede combatir esta interferencia multitrayecto. Sin embargo, la forma en la cual se consiga depende mucho de la modulación **SS** empleada. Cuando se discutan los distintos tipos de señales de espectro ensanchado (**CDMA**), se tratará para cada caso el rechazo a la interferencia multitrayecto.

☒ **Seguridad**: la señal transmitida puede ser recuperada sólo si se conoce el código utilizado en transmisión.

☒ **Inmunidad a la interferencia**: si en el ancho de banda de transmisión se encuentra una señal de interferencia de banda estrecha, calculando la correlación cruzada entre ésta y una señal código, la potencia de la señal interferente se distribuye por todo el ancho de banda de transmisión, reduciendo la potencia de interferencia en el ancho de banda de información, de forma que la señal **SS** se recibe correctamente. La **figura 3**, que se presenta a continuación, ilustra el caso de una señal de información afectada por una señal interferente.

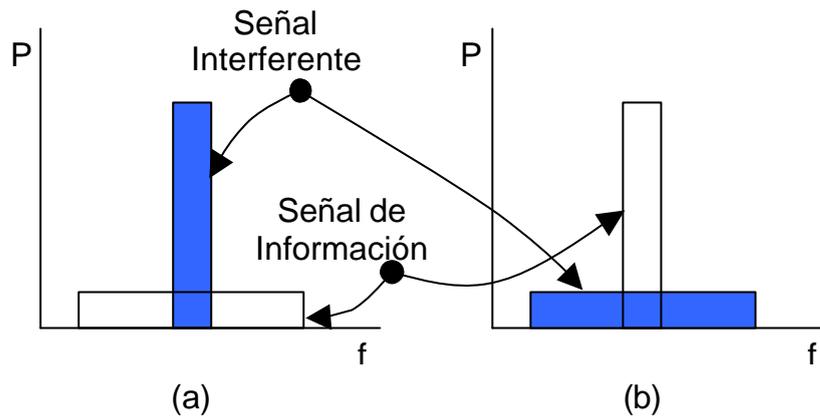


Figura 3. Ilustración del proceso de *despread* de una señal de información

El proceso de *despread*, que se lleva a cabo en el receptor, permite distribuir la potencia de la señal interferente de banda estrecha (a) sobre todo el ancho de banda de transmisión (b) de forma que la potencia de interferencia dentro del ancho de banda de información resulta reducida por un factor igual a la ganancia de procesado.

- ☒ **Inmunidad a la interferencia producida intencionalmente (jamming):** la propiedad anterior resulta válida también en el caso de interferencias intencionadas.
- ☒ **Baja probabilidad de interceptación:** la señal a secuencia directa, ya que utiliza siempre todo el ancho de banda de transmisión, tendrá una densidad muy baja de potencia por unidad de ancho de banda. Esto hace muy difícil la detección de las señales **SS**.

Estas dos últimas propiedades son las que hacen atractiva la modulación **SS** para aplicaciones militares.

3.1.2. Clasificación de las técnicas de Espectro Ensanchado (SS)

Existen diferentes técnicas de modulación para generar señales de espectro ensanchado y, en general, para generar señales **CDMA**. Una clasificación para las señales **CDMA** sería la que se recoge en la **figura 4**:

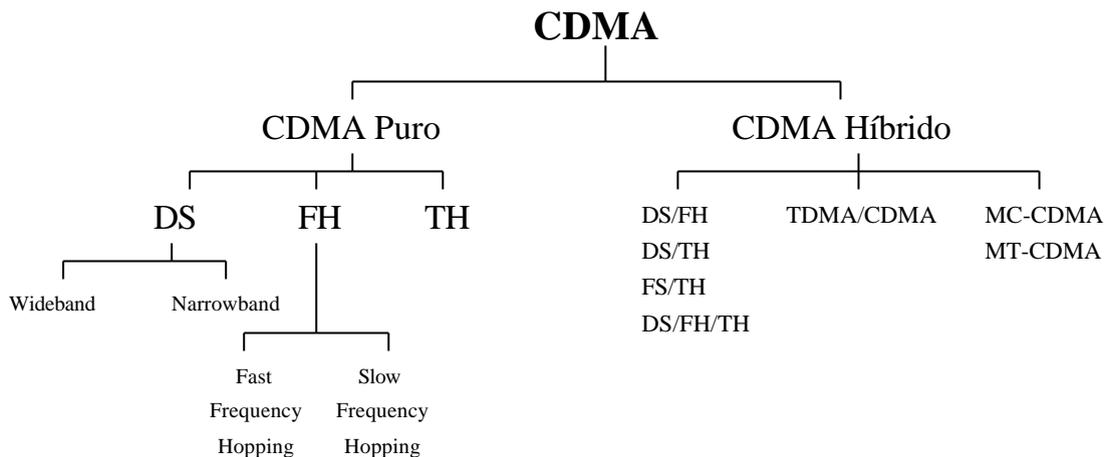


Figura 4. Clasificación de señales CDMA

Discutiremos las más importantes:

📖 **Secuencia directa** (*Direct Sequence*): la señal portadora de información es multiplicada directamente por el código de ensanchamiento de alta tasa binaria, produciendo así una señal de banda ancha con aspecto similar al ruido. Este es el tipo de modulación empleado en este proyecto.

📖 **Salto de frecuencia** (*Frequency Hopping*): la frecuencia de la portadora a la que se transmite la señal cambia velozmente de acuerdo con el código de usuario.

📖 **Salto de tiempo** (*Time Hopping*): la señal portadora de información se transmite de manera discontinua en ráfagas cortas cuyo instante temporal de comienzo depende del código de usuario.

📖 **Modulación híbrida** (*Hybrid Modulation*): cualquier esquema que combine varios de los anteriores mecanismos de modulación, para combinar sus ventajas y, de forma conjunta, combatir sus desventajas. Además, también es posible combinar un sistema **CDMA** con otro tipo de acceso múltiple: **TDMA**, *modulación por multiportadora* (MC, Multicarrier) o *por multitono* (MT, Multitone). En el caso de **MF-CDMA**, el proceso de ensanchamiento (spreading) se produce en frecuencia, mientras que en **MT-CDMA** se produce en el tiempo.

En la **figura 5** se comparan las técnicas puras con respecto a su comportamiento en tiempo y frecuencia:

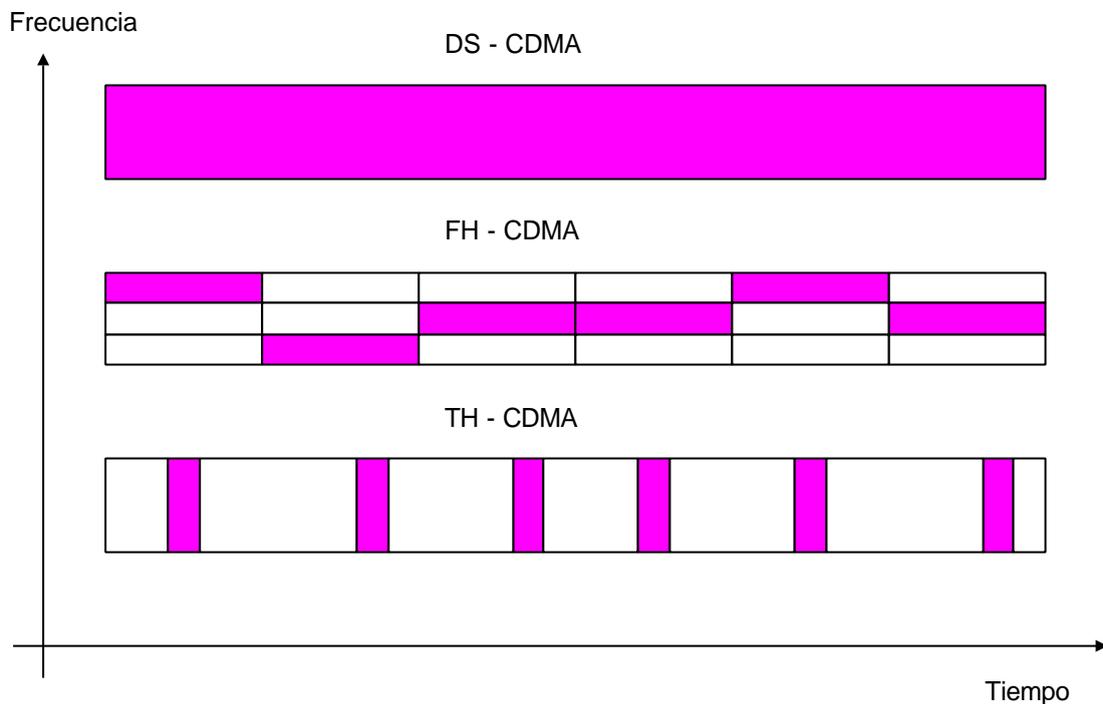


Figura 5. Comparativa tiempo/frecuencia en técnicas puras

Más adelante se tratarán las técnicas **CDMA** puras con el fin de mostrar la capacidad del acceso múltiple de **CDMA**.

3.2. Códigos de Ensanchamiento (*Spreading Codes*)

Los códigos de ensanchamiento son los encargados de proporcionar el acceso de múltiples usuarios a la interfaz radio. Al mismo tiempo proporcionan una señal de banda ancha, robusta y resistente a interferencias. Por estos y otros motivos, es de vital importancia la correcta elección de los códigos de ensanchamiento.

Los códigos de ensanchamiento se pueden clasificar en *códigos pseudoaleatorios (PN)* y en *códigos ortogonales*. Los códigos **PN** son códigos pseudoruidosos, no ortogonales, generados con un registro de desplazamiento realimentado y con características similares a las del ruido Gaussiano. Los códigos **PN** utilizados para **CDMA** están normalmente generados con un registro de desplazamiento lineal. En los códigos

ortogonales, para una transmisión síncrona, la correlación cruzada es cero, lo cual permitirá suprimir la interferencia producida por otros usuarios. Los códigos ortogonales, como los *códigos Walsh*, se emplean normalmente para separación de canales en sistemas **DS-CDMA**.

3.2.1. Propiedades básicas de los códigos de ensanchamiento

Como se ha visto ya, los códigos de ensanchamiento juegan un papel fundamental en cualquiera de las técnicas de generación de señales de espectro ensanchado. En un transmisor **DS-CDMA**, la señal de información es modulada por un código de ensanchamiento, y en el receptor es descorrelada con una réplica del mismo código [JERU92a]. Según este funcionamiento, se pueden extraer ya una serie de características exigibles a estos códigos:

📖 Baja correlación cruzada entre el código del usuario deseado y el resto de códigos para suprimir la interferencia del acceso múltiple.

📖 Buenas características en cuanto a lo que se refiere a autocorrelación para facilitar la sincronización de los códigos y para distinguir las distintas componentes derivadas del multitrayecto. Si la función de autocorrelación tiene lóbulos laterales se pueden derivar problemas de sincronización.

Las funciones de autocorrelación y correlación cruzada están relacionadas entre sí de tal forma que no es posible conseguir una buena autocorrelación y correlación cruzada simultáneamente. Esto se puede ver intuitivamente pensando que unas buenas propiedades en cuanto a autocorrelación son indicativas de una buena aleatoriedad en la secuencia, y éstas presentan peor correlación cruzada que los códigos deterministas por su carácter aleatorio.

3.2.2. Secuencias Pseudoaleatorias

Una secuencia binaria aleatoria consiste en una secuencia estadísticamente independiente de 1's y 0's, los cuales ocurren con probabilidad $\frac{1}{2}$ cada uno. Una secuencia pseudoaleatoria (PN) se define como una secuencia binaria con unas propiedades especiales en su autocorrelación y correlación cruzada. Una secuencia PN se genera mediante un registro de desplazamiento realimentado. En la **figura 6** se puede observar con más detalle el tipo de registro de desplazamiento que permite generar una secuencia PN.

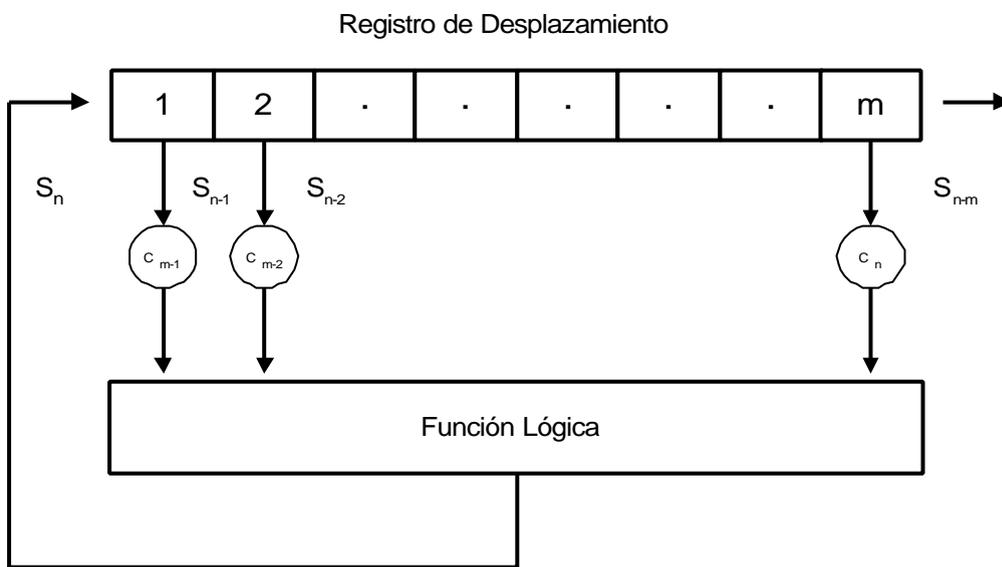


Figura 6. Generación de una secuencia PN

En este registro de desplazamiento realimentado, las secuencias de 1's y 0's se van desplazando de izquierda a derecha según el periodo marcado por el reloj del propio registro. Los bits contenidos en el registro de desplazamiento son realimentados a través de una función lógica. De esta forma, los bits contenidos inicialmente en el registro, denominados *semilla*, son los que determinan los sucesivos estados del registro.

Un registro de desplazamiento realimentado de este tipo es, además, lineal si la función lógica que proporciona la realimentación del registro es una función XOR de varios de los estados del registro de desplazamiento. Así, siguiendo con el ejemplo de la **figura 6**, para el caso de que el registro fuera lineal:

$$S_n = c_{m-1}S_{n-1} \oplus c_{m-2}S_{n-2} \oplus \dots \oplus c_1S_{n-m+1} \oplus c_0S_{n-m} \quad (3)$$

donde S_n da el valor de la secuencia en el instante n , los coeficientes c_i son valores binarios, $c_0=1$, y \oplus indica la función lógica XOR .

Del propio esquema de funcionamiento se puede deducir que, si tenemos un registro de m -posiciones o estados, el número total de estados que puede generar es 2^m , y que en principio la periodicidad de cada uno de ellos es de 2^m . Pero si el registro es lineal y todo su contenido son ceros, entonces el registro permanecerá en ese estado para siempre. Así pues, se puede concluir que con un registro lineal se obtienen exactamente 2^m-1 estados distintos de cero, con lo cual el periodo máximo, que no se puede exceder, es 2^m-1 .

Las secuencias **PN** que se utilizan en las técnicas de espectro ensanchado son aquellas de máxima longitud ($L=2^m-1$ chips) y son denominadas *m-Sequences* .

3.2.2.1. *m-Sequence*

Las secuencias **PN** de máxima longitud, y con ellas las *m-Sequences*, tienen las siguientes propiedades [PROA95a]:

- ☒ Una de las principales características de este tipo de secuencia **PN** es que el número de 1's en un periodo es siempre uno más que el de 0's (están casi balanceadas). De esta forma cada periodo contiene 2^{m-1} unos y $2^{m-1}-1$ ceros. Según esta característica, el código se comportará como un ruido, es decir como una señal binaria aleatoria, que permitirá eliminar interferencias de banda estrecha.
- ☒ Buenas características en la función de autocorrelación. La función de autocorrelación de una secuencia **PN** tendrá forma de pico, es decir, para desplazamiento cero valdrá la longitud de la secuencia, y para cualquier otro valor de desplazamiento tendrá valores lo más próximos a cero posible, con el fin de conseguir una buena sincronización de los códigos. De esta forma, en sistemas de telefonía móvil, se podrán emplear los mismos códigos de

ensanchamiento en células adyacentes sin que interfieran, debido a los bajos niveles de autocorrelación.

La función de autocorrelación será:

$$R_p(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Y(n)Y(n-k) \tag{4}$$

con $Y(n) = (-1)^{S_n}$ y $N = 2^m - 1$. $R_p(k)$ será periódica y será similar a la función de autocorrelación de una secuencia binaria aleatoria sobre un periodo. Esto se puede ver más claro en la figura siguiente:

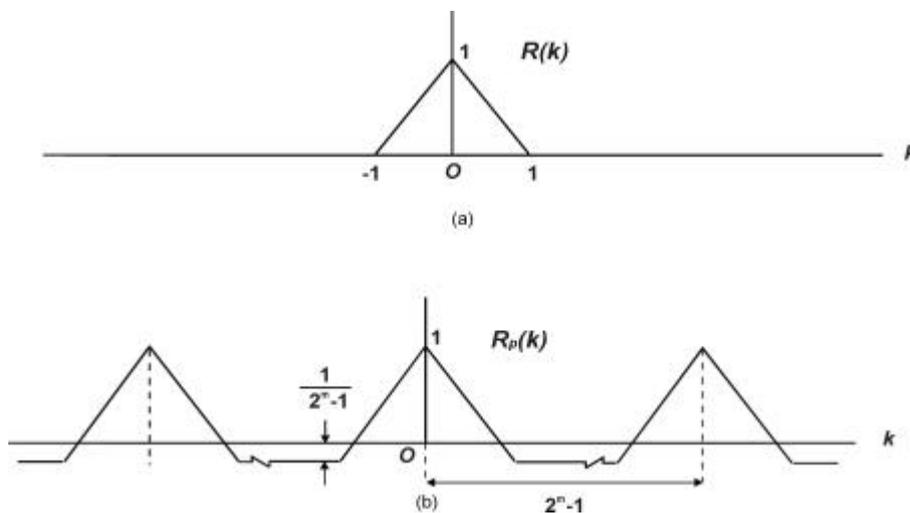


Figura 7. Funciones de autocorrelación: (a) secuencia binaria aleatoria (b) Secuencia PN, periodo = $2^m - 1$

El número de *m-sequences* que se puede obtener depende de las realimentaciones que se realicen en el registro de desplazamiento.

El inconveniente que presentan estas secuencias es que las propiedades que presentan en cuanto a correlación cruzada no tienen el nivel exigido. En un sistema **CDMA**, donde a cada usuario se le asigna un código distinto y todos comparten el mismo canal de transmisión, se exigen valores bajos de correlación cruzada, con el fin de evitar la interferencia del acceso múltiple. Así pues, debido a exigencias en la función de correlación cruzada, se pueden encontrar otro tipo de códigos: *secuencias Gold*, *secuencias Kasami*, *secuencias Walsh*, más interesantes para los sistemas de comunicaciones **CDMA**.

3.2.2.2. Códigos Gold

Los *códigos Gold* son más adecuados para un sistema de múltiples usuarios **CDMA** pues ofrecen mejores propiedades en la función de correlación cruzada que las que ofrecen las *m-sequences*. La compartición del espacio radioeléctrico por los distintos usuarios provoca que la señal que llega al receptor sea la suma de todas ellas, por lo que la interferencia entre los usuarios es grande. Esto, en la práctica, implica trabajar con una buena correlación cruzada. Cuanto menor sea la correlación cruzada más usuarios podremos tener en el sistema. Esta condición debe cumplirse tanto para la correlación cruzada de códigos completos como para la correlación de códigos parciales (incompletos), circunstancia que puede ocurrir dada la naturaleza aleatoria del acceso de los múltiples usuarios.

Las *secuencias Gold* se generan por combinación de dos *m-sequence* concretas, de la misma longitud $L=2^m - 1$ chips, elegidas para obtener una baja correlación cruzada [PROA95a], y a las que se denominará **secuencias preferidas** (*preferred sequences*). Estos pares de secuencias exhibirán una función de correlación cruzada de tres valores $\{-1, -t(m), t(m)-2\}$ donde

$$t(m) = \begin{cases} 2^{(m+1)/2} + 1 \rightarrow m = \text{impar} \\ 2^{(m+2)/2} + 1 \rightarrow m = \text{par} \end{cases} \quad (5)$$

De este modo no dos cualesquiera *m-sequences* son válidas para generar una *secuencia Gold*.

En cuanto a la longitud de una *secuencia Gold*, puesto que las *m-sequences* tienen una longitud $L=2^m - 1$ chips, y la combinación de ellas da lugar a una *secuencia Gold*, la longitud de esta secuencia es también L chips. El número de secuencias posibles es $2^m + 1$, obtenidas de la suma en módulo-2 de una de las *m-sequence* del par preferido con las correspondientes versiones desplazadas de la otra *m-sequence*. La formación de las secuencias Gold queda reflejada en la **figura 8**.

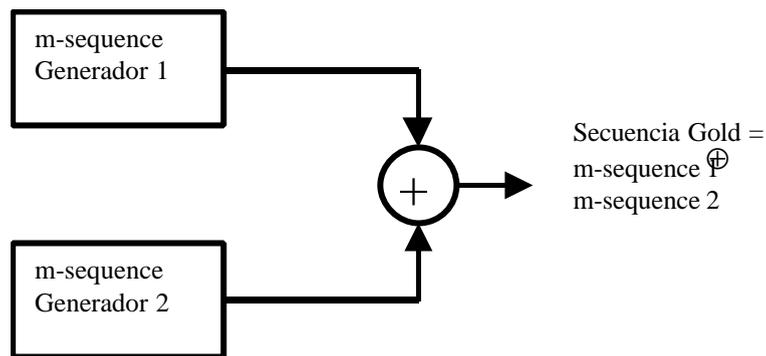


Figura 8. Generación de secuencias Gold

3.2.2.3. Secuencias Kasami

Empleando un procedimiento similar al usado en la generación de *secuencias Gold*, se puede generar un conjunto de $M = 2^{m/2}$ secuencias binarias de periodo $L = 2^m - 1$ chips (donde m es par), y a las que se denominará *secuencias de Kasami*. En este procedimiento se parte de una *m-sequence*, **a**, a partir de la cual se genera una secuencia binaria **b**, como resultado de un diezmado de $2^{m/2} + 1$ chips aplicado sobre la secuencia **a**. Se puede comprobar que la secuencia binaria que resulta, **b**, es periódica de periodo $2^{m/2} - 1$ [PROA95a]. Por ejemplo, si $m = 10$, el periodo de **a** es $L = 1023$ y el periodo de **b** es 31. De esta forma, si se observa una secuencia de 1023 chips de la secuencia **b**, se verán 33 repeticiones de 31 chips.

El nuevo conjunto de *secuencias de Kasami* se obtiene tomando los $L = 2^m - 1$ chips de la secuencia **a** y sumándolos en módulo-2 con la secuencia binaria **b** y todos los desplazamientos cíclicos de la misma. De esta forma, incluyendo la propia *m-sequence a* se obtienen un total de $2^{m/2}$ *secuencias de Kasami* de longitud $L = 2^m - 1$ chips.

Las *secuencias de Kasami* tienen las mismas propiedades de correlación que los *códigos Gold*, la diferencia está en el número de códigos que pueden crearse. Es importante tener un conjunto de códigos grande, pues el número de posibles códigos determina el número de direcciones de código que podemos crear. También, el hecho de tener un conjunto de códigos grande, permite escoger aquellos códigos que muestren mejores características de correlación cruzada.

3.2.3. Códigos Ortogonales

La principal ventaja de un código ortogonal es que, para una transmisión síncrona, el valor de la función de correlación cruzada es cero. Los *códigos Walsh* constituyen un tipo de códigos ortogonales.

3.2.3.1. Códigos Walsh

Las *secuencias Walsh*, al ser códigos ortogonales, tienen la ventaja de eliminar cualquier interferencia producida por el acceso múltiple [MAE2000]. Por el contrario, tienen un par de desventajas, pues los códigos no tienen un solo pico en la función de autocorrelación, y además, la expansión que producen no se realiza sobre todo el ancho de banda, sino que la energía se expande sobre un número de componentes discretas de frecuencia.

3.2.4. Otros tipos de códigos

Otros códigos importantes son aquellos derivados de los *Algoritmos Genéticos*. Estos algoritmos tienen como objetivo la generación y optimización de secuencias binarias en función de unos determinados parámetros. Para más información ver [WINTER96].

4 Técnicas de Acceso CDMA

Estas técnicas se derivan de las técnicas de espectro ensanchado vistas en el apartado 3.1.2 de este mismo capítulo. Se puede tomar una idea de lo que representa cada técnica viendo la **figura 5**, en donde se representa el comportamiento de estas técnicas en tiempo y en frecuencia.

4.1. CDMA de Secuencia Directa: DS-CDMA

En **DS-CDMA** la señal portadora de información es modulada directamente por la señal código digital, que es discreta en el tiempo y discreta en valor [PRASAD98]. La señal de datos puede ser una señal analógica o digital; en la mayoría de los casos es una señal digital. En el caso de que tengamos una señal digital es frecuente omitir la modulación de

la señal de datos. De esta forma esta señal es directamente multiplicada por el código y el resultado de esta operación es lo que modula directamente la portadora de banda ancha. Precisamente, es de este caso de donde **DS-SS** toma su nombre. En las figuras que se presentan a continuación se pueden ver un transmisor **DS-SS** con modulador de datos y otro transmisor simplificado:

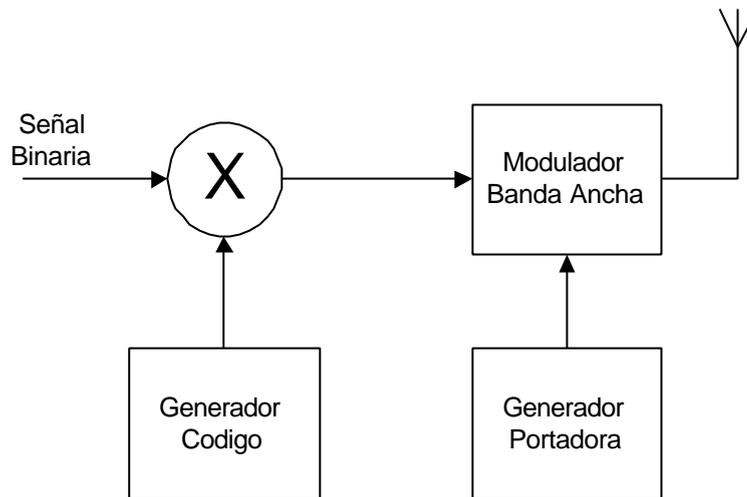


Figura 9. Transmisor DS-SS con modulador de datos

En la **figura 9** se observa como una señal de datos es multiplicada por un código de ensanchamiento para formar una señal de espectro ensanchado.

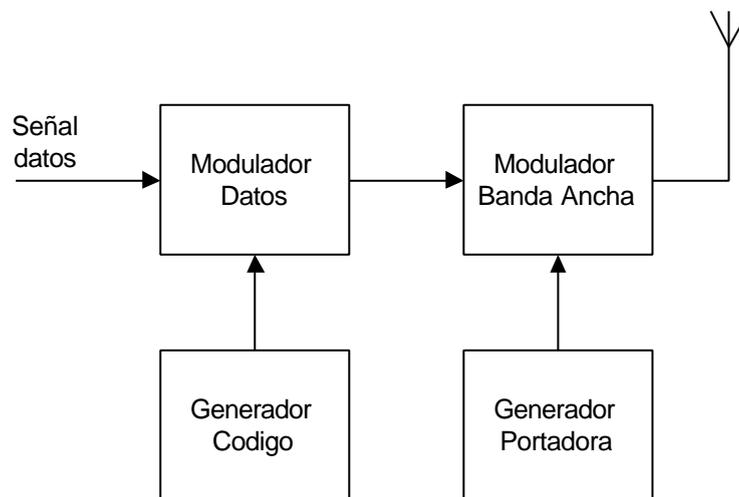


Figura 10. Transmisor DS-SS simplificado

La señal *código* consiste en una secuencia de chips que pueden tomar el valor de +1 o -1. Para obtener el ensanchamiento del espectro

deseado, la tasa binaria de la señal *código*, llamada *chip rate*, debe ser mucho mayor de la tasa binaria de la señal de información.

A continuación se presenta un esquema de bloques de un receptor de señales de espectro ensanchado por secuencia directa, y también un diagrama que explica gráficamente el proceso de formación de una señal de espectro ensanchado por secuencia directa y su posterior modulación digital en fase (**BPSK**).

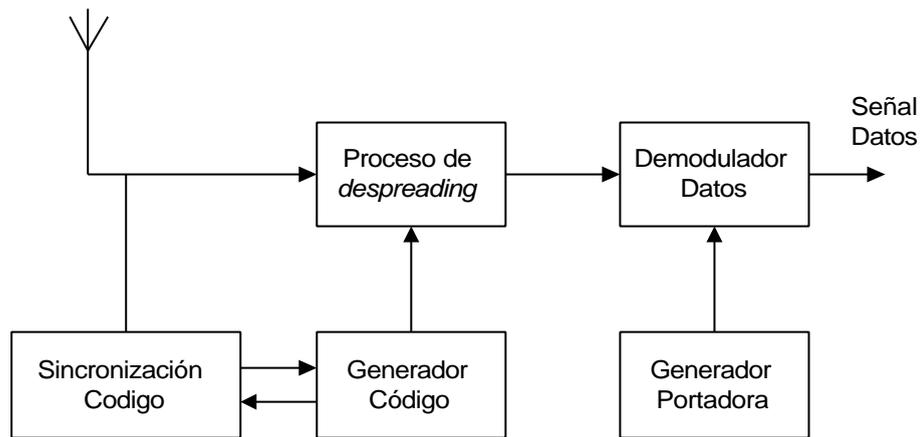


Figura 11.Receptor DS-CDMA

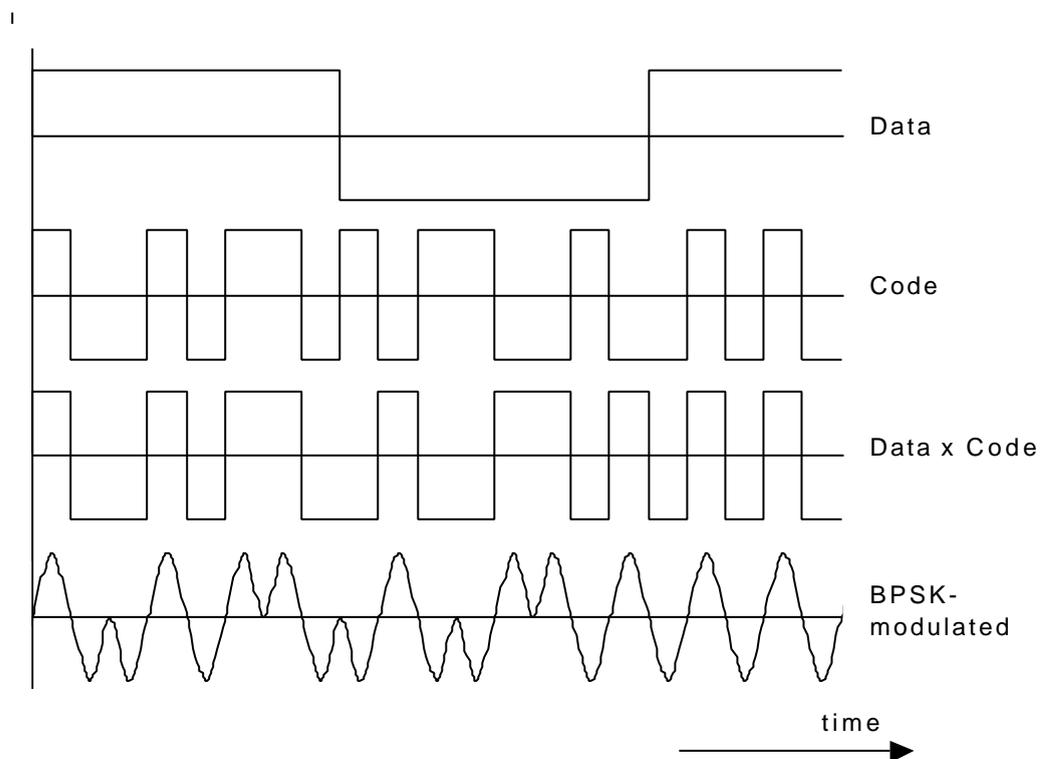


Figura 12.Diagrama de las señales que participan en el proceso de formación de una señal DS-CDMA

En el ejemplo de la **figura 12** se transmiten 8 chips por cada símbolo de información, lo cual implica una ganancia de procesamiento igual a 8. Después de la transmisión de la señal, en el receptor, se emplea una demodulación coherente con una secuencia de código generada localmente, para poder realizar el proceso de *despreading* sobre la señal de espectro ensanchado. El receptor, además de conocer el código utilizado en transmisión, necesita lograr que el código de la señal recibida y la réplica generada localmente estén sincronizadas durante todo el proceso de recepción. La sincronización se controla en el bloque de Sincronización Código. Después del proceso de *despreading* se obtiene una señal modulada y, después de la demodulación la señal de datos.

4.1.1. Propiedades de las señales DS-CDMA

En el apartado 3.1.1. se vieron las propiedades más importantes que definían los rasgos de las señales de espectro ensanchado. Las señales **DS-CDMA**, por ser señales **SS**, también tienen esas propiedades.

☒ **Capacidad para el acceso múltiple:** si múltiples usuarios hacen uso del canal al mismo tiempo, habrá un solapamiento múltiple de señales DS en tiempo y en frecuencia. En el receptor, mediante la demodulación coherente se concentrará la potencia de la señal deseada en el ancho de banda de información. En este ancho de banda se tendrá también una pequeña cantidad de potencia debida a las señales interferentes. Cuanto menor sea la correlación cruzada entre el código correspondiente a la señal deseada y el resto de códigos, menor será la contribución de las señales interferentes a la potencia total en el ancho de banda en cuestión.

☒ **Protección contra la interferencia multirrayecto** (multipath fading): las señales de código poseen una función de autocorrelación que toma valores muy pequeños fuera del intervalo $[-T_c, T_c]$, siendo T_c la duración del chip. Esto significa que si llegan al receptor versiones de la señal por diferentes caminos (con diferentes fases, amplitudes y retardos), y los retardos relativos entre las señales, Dt , son tales que $Dt > T_c$, entonces las señales desfasadas serán tratadas como interferencias, suprimidas por el proceso

de despreading, mientras que la señal transmitida será recuperada gracias a las propiedades de la autocorrelación de las secuencias de código. Las señales de espectro ensanchado por secuencia directa son muy adecuadas para canales de transmisión multicamino.

☒ **Inmunidad a la interferencia:** la detección coherente en el receptor implica una multiplicación por una secuencia de código generada localmente. Como ya se ha visto, si en el ancho de banda de transmisión se encuentra una señal de interferencia de banda estrecha y se multiplica por una secuencia de código de banda ancha, la potencia de la señal interferente se distribuye en todo el ancho de banda de transmisión reduciendo la potencia de interferencia en el ancho de banda de información.

☒ **Baja probabilidad de interceptación:** la señal DS utiliza siempre todo el ancho de banda de transmisión. Así pues, tendrá una densidad muy baja de potencia por unidad de ancho de banda. Esto hace muy difícil la detección de las señales **DS-CDMA**.

Además de las propiedades mencionadas, el acceso **DS-CDMA** presenta una serie de ventajas específicas:

☒ La generación de la señal a transmitir es muy sencilla, pudiendo ser una sencilla multiplicación.

☒ Es posible la demodulación coherente de la señal de banda ancha.

☒ No es necesaria la sincronización entre usuarios.

Por contra, el esquema **DS-CDMA** resulta afectado por algunas limitaciones o inconvenientes:

* Para la recepción correcta, es necesario adquirir y mantener la sincronización entre la señal código generada localmente y la señal recibida, manteniendo además el error por debajo del tiempo de *chip*. Además de resultar complejo en la práctica, esto limita el ancho de banda máximo a 10-20 MHz.

× La potencia recibida de usuarios cercanos a la estación base es mucho más grande que la potencia recibida de usuarios lejanos. Como cada usuario transmite en todo el ancho de banda, un usuario cercano a la estación base creará una gran cantidad de interferencia perjudicando a los usuarios lejanos, haciendo la recepción de estos imposible. Este problema, conocido como efecto cercano-lejano (*near-far effect*) [TERO96c] se puede solucionar aplicando un algoritmo de control de potencia de tal forma que todos los usuarios sean escuchados por la estación base con la misma potencia media. Dicho algoritmo, siendo de difícil realización práctica (debido a retardos en la realimentación, errores de medidas, etc.) resulta ser un elemento crítico en el diseño de un sistema **DS-CDMA**.

Procediendo de las consideraciones anteriores, resultan claras dos características fundamentales de los sistemas **DS-CDMA**:

📖 **Capacidad limitada por interferencia autogenerada:** debido a la naturaleza del esquema de modulación, todas las señales moduladas comparten el mismo medio de transmisión en tiempo y en frecuencia. Desde el punto de vista de cada una de ellas, las demás señales constituyen una interferencia generada por el sistema, reducida por la ganancia de procesamiento. En la práctica, en caso de elevada carga de tráfico, la capacidad de cada celda resulta limitada por esta interferencia autogenerada y no por otros factores, como, por ejemplo, el ruido. Así, un sistema **DS-CDMA** está limitado por la interferencia generada por los propios usuarios del sistema.

📖 **Factor de reutilización de frecuencia igual a 1:** estando el sistema limitado por la interferencia autogenerada, y siendo el canal de transmisión una línea teóricamente inmune a otro tipo de interferencia, cada celda puede utilizar todo el ancho de banda disponible, ya que la naturaleza del esquema de modulación hace que las celdas vecinas no influyan en el buen funcionamiento del sistema. Entonces, la planificación frecuencial resulta innecesaria. La **figura 13** ejemplifica este principio:

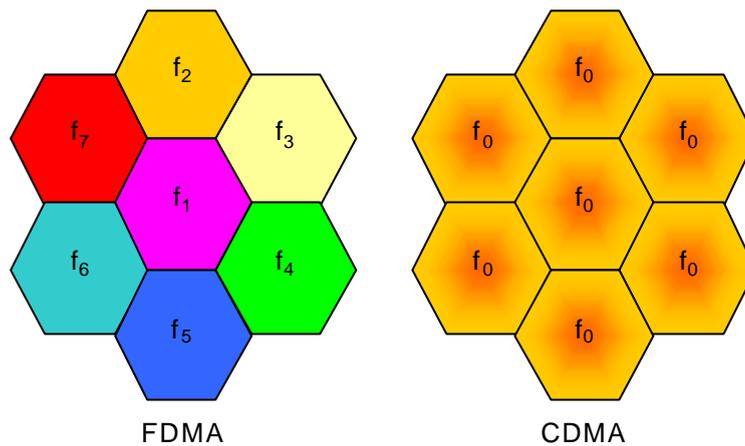


Figura 13. Planificación celular de un sistema con FDMA vs. otro CDMA

4.2. Frequency Hopping: FH-CDMA

En el *frequency hopping* **CDMA**, la frecuencia portadora de la señal de información modulada no es constante, sino que cambia periódicamente. Durante un cierto intervalo de tiempo T , la frecuencia de la portadora se mantiene, pero pasado dicho tiempo salta a otra frecuencia. El patrón de saltos que realiza la frecuencia de la portadora se decide según una señal de código. El conjunto de frecuencias que pueden ser empleadas como portadoras en el **FH** se denomina *conjunto de salto*.

La ocupación de frecuencias de un sistema **FH-CDMA** difiere considerablemente de un sistema **DS-CDMA**. Un sistema de secuencia directa hace uso de toda la banda de frecuencia cuando está transmitiendo, mientras que un sistema de hopping sólo emplea una pequeña parte del ancho de banda cuya localización cambia en el tiempo. Esto se puede ver en la **figura 14**.

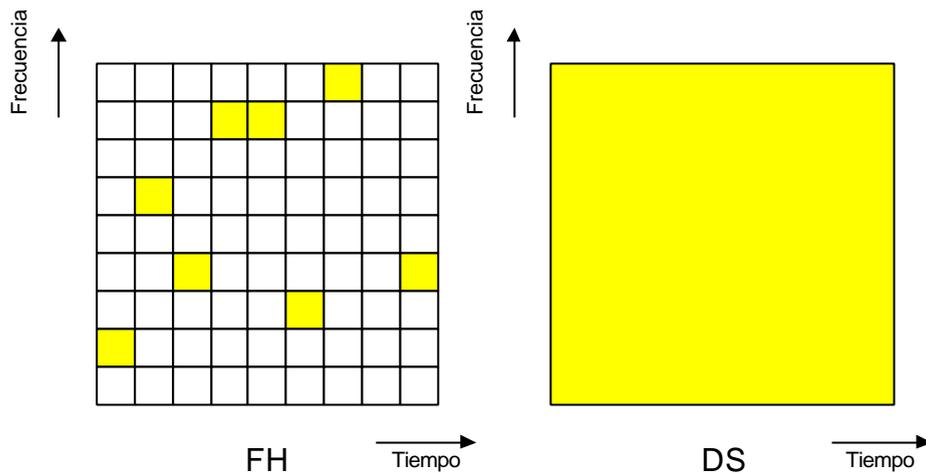


Figura 14. Representación tiempo / frecuencia en FH y DS-SS

Suponiendo que el sistema de **FH** transmitiera en la banda de frecuencia 2 durante el primer periodo de tiempo, un sistema de DS que transmitiera en el mismo periodo esparciría la potencia de la señal sobre toda la banda de frecuencia de tal forma que la potencia transmitida en la banda de frecuencia 2 sería mucho menor que la transmitida por el sistema de **FH** en la misma banda en el mismo periodo. Así pues, se ve que el sistema **DS** transmitiría en la banda 2 durante todos los periodos de tiempo, mientras que el sistema **FH** emplearía esa banda sólo una parte del tiempo. En promedio, ambos sistemas transmitirán la misma potencia en la banda de frecuencia.

El diagrama de bloques de un sistema **FH** se puede resumir en el esquema de la **figura 15** :

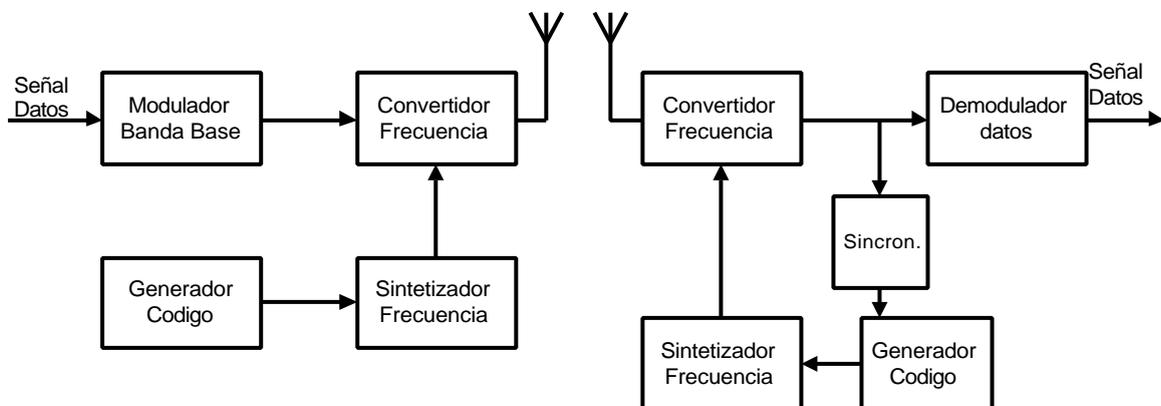


Figura 15. Transmisor y Receptor FH-SS

La señal de datos está modulada en banda base. Mediante un sintetizador de frecuencia controlado por la señal código, la frecuencia de la portadora es convertida a la frecuencia de transmisión.

El proceso inverso se lleva a cabo en el receptor, es decir, usando una secuencia de código generada localmente, la señal recibida se convierte en una señal en banda base. La señal de datos es recuperada después de la demodulación de la señal en banda base. El bloque de sincronización asegura que el *hopping* generado localmente esté sincronizado con el *patrón de hopping* recibido de tal forma que el proceso de *despreading* o de descorrelación se realice de forma correcta.

Dentro de los sistema de **FH-CDMA** se pueden hacer distinciones basadas en la tasa de salto (*hopping*) de la portadora. Si la tasa de salto es mucho mayor que la tasa de símbolo, de forma que un bit es transmitido en varias frecuencias, se habla de *Fast Frequency Hopping (F-FH)*. En el caso en que la tasa de salto sea menor que la tasa de símbolo, de forma que varios símbolos sean transmitidos en una misma frecuencia, se habla de *Slow Frequency Hopping (S-FH)*.

4.2.1. Propiedades de las señales FH-CDMA

Al igual que se hizo con las señales **DS-CDMA**, a continuación se discuten las propiedades más relevantes de las señales **SS** en las señales **FH-CDMA**.

☒ **Capacidad para el acceso múltiple:** es fácil ver cómo se consigue el acceso de múltiples usuarios a la interfaz radio en **F-FH** y **S-FH**. En **F-FH** un símbolo se transmite en diferentes bandas de frecuencia. En el receptor, siguiendo el patrón local de *hopping*, la potencia de la señal deseada será mucho mayor que la potencia de las señales interferentes. En **S-FH** se transmiten varios símbolos en la misma frecuencia. Si la probabilidad de que otros usuarios transmitan en la misma banda es suficientemente baja, el usuario deseado podrá ser escuchado correctamente en la mayoría de los periodos de tiempo. En el caso en que las señales interferentes transmitan en la misma banda de frecuencia, se emplean códigos de

corrección de errores para recuperar la señal de datos en el periodo interferido.

- ☒ **Protección contra la interferencia multicamino:** no será tan efectiva como el rechazo a la interferencia multitrayecto que ofrece un sistema **DS-CDMA**, pero seguirá suponiendo una mejora respecto a otras técnicas de acceso múltiple.
- ☒ **Inmunidad a la interferencia:** suponiendo que una señal de banda estrecha está interfiriendo una de la frecuencias de *hopping*, si hay G_p frecuencias de *hopping* a utilizar por el usuario, siendo G_p la ganancia de procesamiento, la interferencia quedará reducida según un factor G_p , pues la frecuencia interferida solo se emplea un $1/G_p$ del tiempo.
- ☒ **Baja probabilidad de interceptación:** se podría pensar que la dificultad de interceptación de una señal de espectro ensanchado sólo está en la baja potencia de transmisión de la misma. Por esta razón, en principio, una señal **FH-CDMA** sería fácilmente interceptable, más que en una transmisión **DS-CDMA**, pues durante una transmisión **FH**, se emplea mucha más potencia por hertz, que en una transmisión continua. Pero esto no es del todo cierto pues, en transmisiones **FH**, la frecuencia a la cual se va a transmitir es desconocida y, la duración de la transmisión a esa frecuencia es bastante pequeña, por lo cual no es tarea sencilla interceptar esta señal. A pesar de todo esto, las señales **DS-CDMA** son más difíciles de interceptar.

Además de estas propiedades, se pueden añadir ciertas ventajas y desventajas a la lista:

- ☒ La sincronización es mucho más sencilla en **FH-CDMA** que en **DS-CDMA**.
- ☒ Las bandas de frecuencia que una señal **FH** puede ocupar no tienen por qué estar contiguas. Esto, combinado con la fácil sincronización, permite unos anchos de banda ensanchados en el espectro mucho mayores.

- ☒ La probabilidad de que varios usuarios estén transmitiendo en la misma frecuencia al mismo tiempo es pequeña. Un usuario que esté transmitiendo lejos de la estación base, será escuchado sin problemas aunque haya otros usuarios que estén transmitiendo más cerca, siempre y cuando estos lo hagan a otras frecuencias distintas. La resolución del problema *near-far* es mejor que para el caso de **DS-CDMA**.
- ☒ Puesto que los anchos de banda a emplear por un sistema **FH** son mucho mayores que los de un sistema **DS**, se ofrece así una mayor reducción de las interferencias de banda estrecha con respecto a los sistemas **DS-CDMA**.

En cuanto a las desventajas:

- * Por el contrario, para conseguir este mayor ancho de banda será necesario un buen sintetizador de frecuencias.
- * La demodulación coherente es difícil de llevar a la práctica debido a los problemas que se pueden presentar en el mantenimiento de la relación de fase durante el *hopping*.

4.3. Time Hopping: TH-CDMA

En un sistema **TH-CDMA** la señal de datos se transmite a modo de rápidas ráfagas, en intervalos de tiempo determinados por el código asignado a cada usuario. El eje temporal se divide en tramas, y cada trama se divide en M intervalos de tiempo (*slots*). Durante cada trama, el usuario transmitirá en uno de los M *slots* disponibles. El *slot* en el cual transmitirá dependerá del código asociado a dicho usuario. A continuación, en la **figura 16** se presenta un diagrama de bloques que bien podría representar un sistema emisor – receptor **TH-CDMA**.

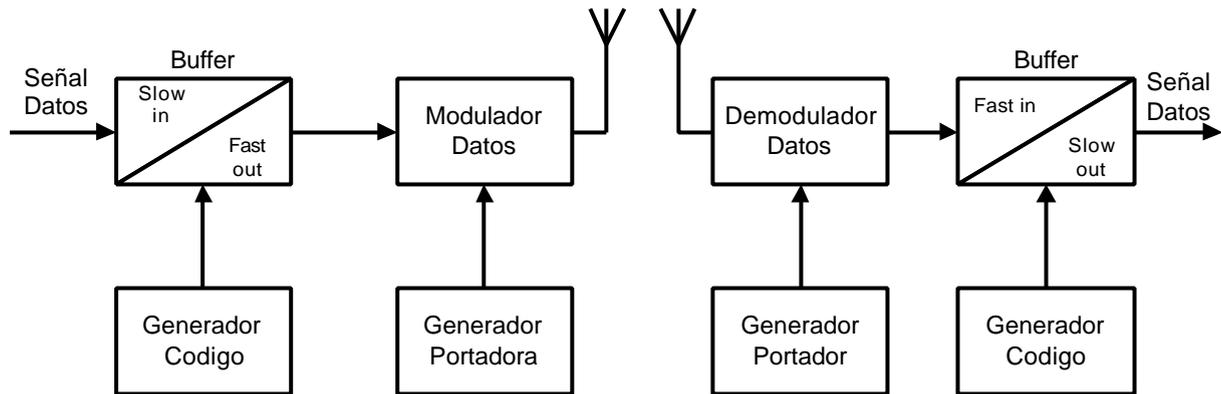


Figura 16. Transmisor y Receptor TH-CDMA

Al igual que se hizo con **DS** y **FH-CDMA**, se muestra un diagrama tiempo / frecuencia que puede facilitar el entendimiento del funcionamiento de un sistema **TH-CDMA**.

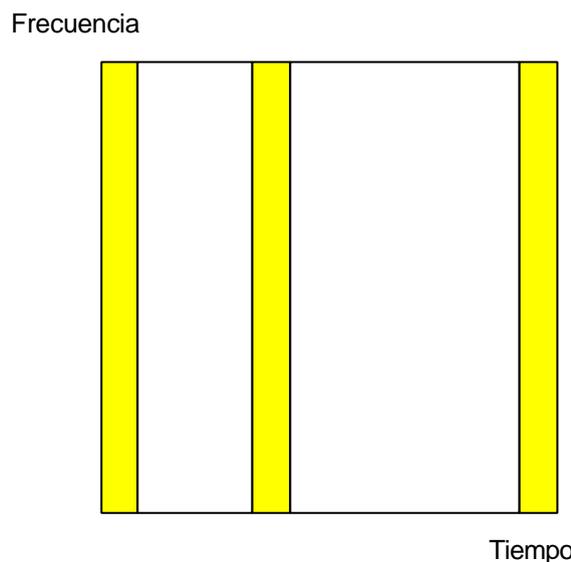


Figura 17. Representación tiempo / frecuencia de TH-CDMA

En este diagrama se puede ver que **TH-CDMA** emplea todo el espectro para periodos cortos de tiempo, en lugar de emplear partes del espectro durante todo el tiempo, o en lugar de emplear todo el espectro todo el tiempo.

4.3.1. Propiedades de las señales TH-CDMA

- ☒ **Capacidad para el acceso múltiple:** se consigue de forma similar a como se hace en los sistemas de **FH-CDMA**, es decir, haciendo que la

probabilidad de transmisiones de usuarios simultáneas en la misma banda de frecuencia, al mismo tiempo, sea pequeña. Como en los sistemas **TH-CDMA** todas las transmisiones están en la misma banda de frecuencia, es necesario, que la probabilidad de que haya más de una transmisión al mismo tiempo sea muy pequeña. La forma de conseguir esto es, cómo no, mediante los códigos asignados a los distintos usuarios. Al igual que en **FH-CDMA**, en el caso de que tengan lugar varias transmisiones simultáneamente, en la misma banda de frecuencia, se emplearán códigos de corrección de errores.

- × **Protección contra la interferencia multicamino:** no será muy buena, pues la señal se transmite en un intervalo muy corto de tiempo, lo cual obliga a que la tasa de la señal se incremente. Esto produce efectos dispersivos que no contribuyen para nada a la protección contra la interferencia multicamino.
- ☒ **Inmunidad a la interferencia:** en sistemas **TH-CDMA** la señal es transmitida en un tiempo reducido. Si hay G_p intervalos de *hopping*, siendo G_p la ganancia de procesado, el usuario sólo transmitirá durante un tiempo $1/G_p$ reduciéndose así la interferencia en un factor G_p .
- ☒ **Baja probabilidad de interceptación:** en los sistemas **TH-CDMA** la frecuencia a la que un usuario transmite es constante, pero el instante, en el cual es empleada dicha frecuencia por el usuario para transmitir, no lo es. Además la duración de la transmisión es muy corta.

Se puede hablar también de ciertas ventajas y desventajas propias de los esquemas **TH-CDMA**:

- ☒ Tienen una implantación más sencilla que los sistemas **FH-CDMA**.
- ☒ Como en **FH-CDMA**, el problema *near-far* tiene mejor resolución que en **DS-CDMA**.

En cuanto a desventajas:

- × Presenta problemas de sincronización con el código.
- × Si ocurriera una transmisión múltiple sobre la misma frecuencia, se perderían mucho bits, motivo por el cual sería necesario un buen código de corrección de errores.

4.4. Técnicas híbridas para sistemas CDMA

En este tipo de técnicas se incluyen todas las posibles combinaciones de dos o más técnicas puras **CDMA** o, también, una combinación de **CDMA** con cualquier otra técnica de acceso múltiple.

Según la combinación de las técnicas básicas o puras de espectro ensanchado tenemos cuatro posibles sistemas híbridos: **DS/FH**, **DS/TH**, **FH/TH** y **DS/FH/TH** y por combinación de **CDMA** con otras técnicas como TDMA o *modulación multiportadora*, tenemos **CDMA/TDMA** y **MC-CDMA**. Una aplicación práctica de estas técnicas mixtas se encuentra en la interfaz radio especificada para UMTS (UTRA), que emplea **FDD** y **TDD** en combinación con **CDMA**. En la **figura 1** del primer capítulo se ilustra este caso gráficamente.

La idea de estos sistemas híbridos es la de conseguir las ventajas de los sistemas que se combinan, y reparar las deficiencias que posean unos y otros individualmente.

5 Ventajas de CDMA sobre TDMA y FDMA

A continuación se presentan algunas de las ventajas más importantes que han hecho que CDMA haya emergido sobre **TDMA** y **FDMA** [LEE93a]:

📖 **Aprovecha las características de la voz:** los ciclos de actividad de la voz son del 35%. El resto son periodos de escucha o de silencio. En **CDMA**, como todos los usuarios comparten el mismo canal radio, cuando uno de ellos no está hablando, el resto de usuarios que en ese momento también

están empleando el canal se benefician por la menor interferencia producida. De esta forma se puede decir que la capacidad del canal se triplica.

📖 **CDMA no requiere ecualización:** cuando se trabaja con una tasa de transmisión superior a los 10 Kbps en **FDMA** y **TDMA**, se requiere el uso de un equalizador para reducir la interferencia entre símbolos (ISI). En **CDMA**, sólo es necesario un correlador en el receptor para recuperar la señal deseada.

📖 **Cambio de estación base:** *Soft handoff* de códigos, no de frecuencias. Mientras que **TDMA** requiere *hard handoffs*.

📖 **No se necesita tiempo de guarda,** a diferencia de **TDMA**, que lo necesita entre *slots*, desperdiciando así varios bits.

📖 **No es necesario sectorización:** en **FDMA** y en **TDMA** cada celda es dividida en sectores con el fin de disminuir la interferencia. Como resultado de esto la eficiencia del sistema disminuye. En **CDMA** la sectorización se emplea para aumentar la capacidad del sistema.

📖 **Menor desvanecimiento** de la señal en ambientes inalámbricos, comparado con señales de banda estrecha (*narrow-band*).

📖 **Mayor capacidad:** **CDMA** puede tener 4 veces la capacidad de **TDMA** y 20 la **FDMA** en número de canales por célula.

📖 **No requiere planificación ni reasignación de frecuencias:** en **FDMA** y **TDMA** es imprescindible mantener un plan de frecuencias riguroso. En **CDMA**, en tanto que sólo hay un canal de radio común, no es necesario.

📖 **Capacidad sólo limitada por umbrales de calidad:** en **CDMA** todos los usuarios emplean el mismo canal radio. Cuando se incorpora un nuevo usuario al canal sólo se produce una débil degradación en la calidad de voz de las otras comunicaciones.

📖 **Coexistencia:** la nueva generación de telefonía móvil, y con ella **CDMA**, está preparados para coexistir con los sistemas de telefonía analógicos y digitales ya existentes.

6 CDMA: Beneficios para todos

6.1. Beneficios para los usuarios

📖 **Calidad excepcional de voz y comunicación.** **CDMA** provee calidad superior de voz, considerada virtualmente tan buena como la de la línea telefónica fija. También filtra los ruidos de fondo, cruces de llamadas, e interferencia, mejorando notablemente la privacidad y calidad de la llamada.

📖 **Menor consumo de energía.** Los teléfonos de **CDMA** típicamente transmiten con fuentes de energía substancialmente menores que los teléfonos que utilizan otras tecnologías, resultando en una vida más larga para las baterías, lo que redundo en una mayor disponibilidad de tiempo para llamadas y tiempo de espera. Debido a que se utilizan baterías más pequeñas, los fabricantes pueden también fabricar teléfonos más pequeños y ligeros.

📖 **Menor congestión de sistemas.** **CDMA** aumenta la capacidad del sistema, eliminando virtualmente señales de ocupado, cruces de llamadas, y llamadas interrumpidas que resultan de la congestión del sistema. Utilizando un sistema patentado de pasar llamadas entre celdas conocido como traslado de llamadas "*soft handoff*," **CDMA** también reduce significativamente la posibilidad de llamadas alteradas o interrumpidas durante el traslado (*handover*) de las mismas.

📖 **Cobertura más extensa.** La señal de espectro amplio de **CDMA** provee mayor cobertura que otras tecnologías inalámbricas, tanto dentro de locales como al aire libre. **CDMA** también interacciona con otras formas de sistemas de telecomunicación, permitiendo amplias y fluidas coberturas y conexiones.

📖 **Seguridad y privacidad.** Además de filtrar el cruce de llamadas y ruidos de fondo, las transmisiones de espectro ensanchado y codificadas digitalmente de **CDMA** son intrínsecamente resistentes a la intrusión.

📖 **Mejoras en los servicios.** El canal de control digital de **CDMA** permite a los usuarios el acceso a una amplia gama de servicios que incluyen identificación del usuario llamante, mensajes cortos y transmisión de datos. **CDMA** también permite la transmisión simultánea de voz y datos.

6.2. Beneficios para los proveedores de servicio

📖 **Mayor capacidad.** **CDMA** provee de 10 a 20 veces la capacidad de las tecnologías analógicas inalámbricas, y más de tres veces la capacidad de otras tecnologías digitales; lo que permite a los proveedores de servicios mantener más suscriptores en mayores volúmenes tráfico inalámbrico, en una porción limitada del espectro de frecuencias de radio. Hoy en día, debido al rápido crecimiento del número de suscriptores del servicio inalámbrico y los minutos de uso, la capacidad del sistema es un problema crítico.

📖 **Cobertura más amplia.** Con su alcance superior y las características de funcionamiento de su señal, **CDMA** mejora la cobertura al aire libre y bajo techo. Las redes **CDMA** requieren solamente una fracción de los emplazamientos de celdas que necesitan otras tecnologías inalámbricas para cubrir un área dada. Con menos emplazamientos de celdas, los proveedores de servicio pueden reducir su inversión inicial de capital así como también sus costes corrientes de operación y mantenimiento.

📖 **Flexibilidad.** **CDMA** es la única tecnología inalámbrica que apoya con efectividad tanto los servicios fijos como móviles desde la misma plataforma, dando apoyo a dos fuentes de ingreso y a la vez permite a los proveedores de servicio el ofrecer a sus clientes un servicio fluido de "un solo teléfono." Las redes de **CDMA** también cuestan menos en diseño e ingeniería que otros tipos de sistemas inalámbricos, haciéndolos más fáciles de reconfigurar y expandir.

 **Implantación rápida.** Los sistemas **CDMA** pueden ser implantados y expandidos más rápidamente y con mayor efectividad-costo que la mayoría de las redes de líneas telefónicas fijas. Como requiere menos celdas y espacio de celdas, las redes **CDMA** pueden instalarse más rápidamente que cualquier otro tipo de red inalámbrica.

 **Interacción en las operaciones.** **CDMA** interacciona con **AMPS** (el Sistema Avanzado de Teléfono Móvil, la base de la mayoría de las redes de teléfonos celulares analógicos), con redes de teléfono **IS-41** y con redes **GSM/MAP**, que permiten amplia cobertura y conexión, además de permitir a los operadores apoyarse en su equipo.

 **Calidad de servicio.** La superior calidad de la voz en **CDMA** y mayores servicios que incluyen datos inalámbricos, dan a los proveedores de servicio una clara ventaja sobre la competencia para ganar y conservar clientes

 **Amplia selección de productos.** Con una amplia base de apoyo de fabricantes líderes en telecomunicaciones en el mundo entero y con un aumento de los ahorros de volumen, los proveedores de servicios pueden elegir entre una amplia gama de productos de **CDMA** avanzados y de costo competitivo.