

# 3 Sistemas CDMA

## 3.1 Tecnología CDMA:

En la técnica CDMA podemos destacar principalmente dos aplicaciones:

- **Tecnología CDMA:** Se utiliza como tecnología en aplicaciones militares, donde el *rechazo a la interferencia* y la *seguridad* son unos de los factores más importantes. Así como para el rechazo al multitrayecto en entornos de radio móvil sobre tierra.
- **Acceso múltiple por división en código:** Donde el número de usuarios comparten canal sin mecanismos de sincronización externa. Como por ejemplo radio móvil.

En general en el diseño de un sistema de comunicación se tiende a optimizar la potencia de transmisión y el ancho de banda. En otras situaciones se tiende a sacrificar el uso eficiente de estos parámetros para conseguir otros objetivos, por ejemplo una comunicación segura en un entorno hostil, donde la señal transmitida no sea fácil de detectar por un receptor no deseado. Éste es el objetivo en la modulación de espectro expandido (*Spread Spectrum Modulation (SS)*).

Nosotros estudiaremos CDMA en el otro ámbito, es decir, utilizándolo como acceso múltiple, por lo que en este apartado no profundizaremos mucho, viendo sólo las principales características.

### 3.1.1 Espectro Ensanchado (SS).

Las *características* para que un sistema pueda ser un sistema SS son:

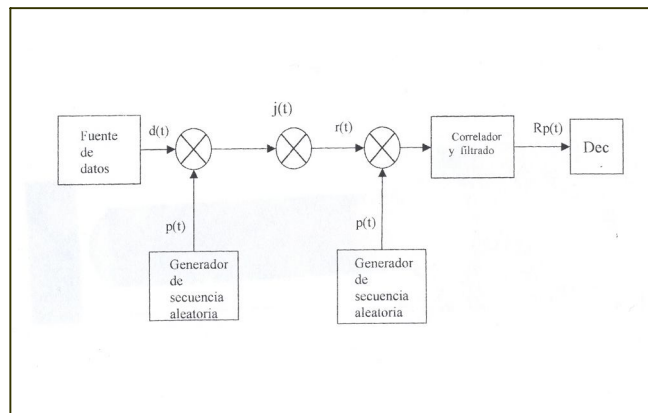
1. La señal que ocupa un BW >> BW mínimo necesario para su transmisión.
2. La expansión del espectro se lleva a cabo por una señal de expansión, llamada señal código, independiente de los datos.

3. La recuperación de los datos originales en recepción se realiza mediante la correlación entre la señal recibida y una réplica sincronizada de la secuencia código.

Existen dos técnicas, de las cuales veremos sólo la primera de ellas:

- *SS de secuencia directa*: La modulación es PSK y luego se realiza una segunda modulación con la secuencia código.
- *SS de salto en frecuencia*: Se ensancha el espectro de la portadora modulada por los datos al cambiar de frecuencia de portadora de forma pseudoaleatoria.

Como ya comentamos antes, éste no es el tema realmente a profundizar en el proyecto, con lo cual haremos un estudio de una señal en banda base. Partimos de una señal de datos  $d(t)$  modulada por una portadora (B-PSK), la cual se vuelve a modular con una secuencia código de banda ancha y alta velocidad ( $p(t)$ ). En la representación del sistema (*figura 3.1*) aparecen tanto el transmisor como el receptor, donde  $j(t)$  es la interferencia que ataca a nuestro sistema.



**Figura 3.1:** Sistema de comunicaciones móviles

La señal interferente puede ser ruido de banda ancha y mucha potencia, o bien una forma de onda multitono enviada al receptor para confundir las comunicaciones. La protección se realiza haciendo que la señal ocupe un BW mucho mayor que el necesario para transmitirla, la cual hace que la señal transmitida parezca ruido, confundiéndola con ruido de fondo (*Figura 3.2* y *Figura 3.3*). De esta manera se transmite sin ser detectada.

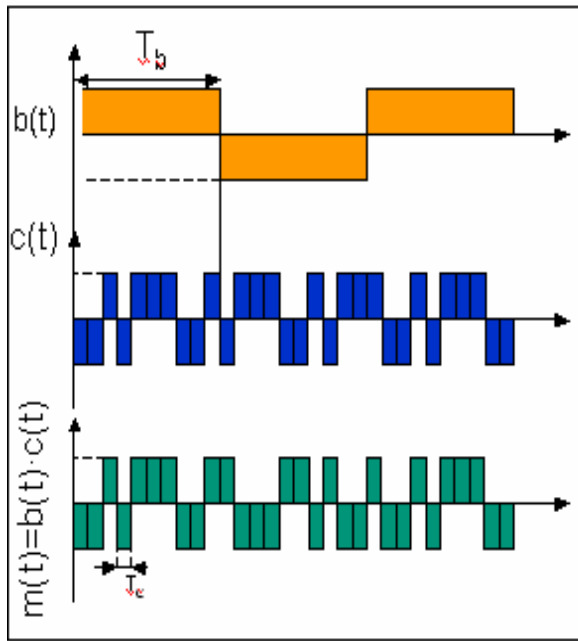


Figura 3.2: Ensanchamiento de Señal

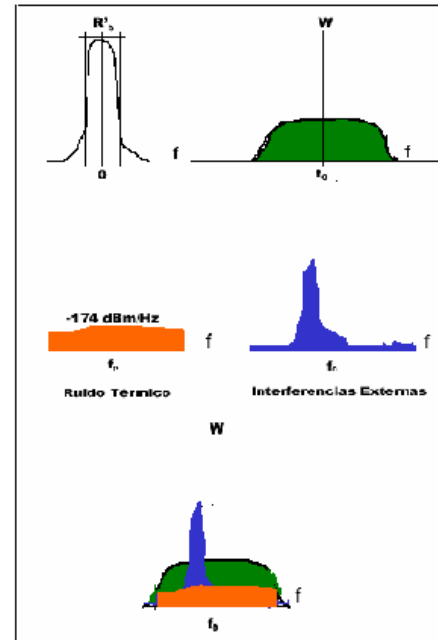


Figura 3.3: Interferencias, ruido y señal

La señal transmitida sería entonces:

$$r(t) = m(t) + j(t) = b(t) \cdot c(t) + j(t) \quad (2.1)$$

En recepción multiplicaríamos por la misma secuencia código, siendo en este caso la señal demodulada:

$$z(t) = c(t) \cdot r(t) = \underbrace{c^2(t)}_{1 \forall t} b(t) + c(t) \cdot j(t) = b(t) + \underbrace{c(t) \cdot j(t)}_{\text{Señal de banda ancha}} \quad (2.2)$$

Realizando un filtrado en banda base obtendríamos la señal

Esto es un pequeño resumen de **CDMA** como *tecnología para evitar las interferencias* y tener una comunicación segura. Es un tema mucho más extenso, pero no nos centraremos en él, además muchos de los temas que vamos a tratar en el siguiente apartado, pueden aplicarse aquí.

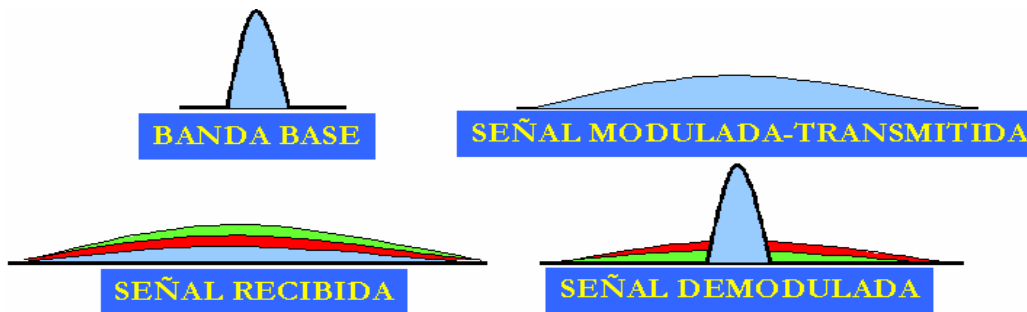
## 3.2 CDMA: Acceso múltiple por división en código.

**CDMA** (*Code Division Multiple Access*) tiene su fundamento teórico en las técnicas de espectro ensanchado (*spread spectrum*). Con esta técnica, la señal ocupa una anchura de banda muy superior a la que sería estrictamente necesaria para su transmisión. Además como consecuencia de su gran ancho de banda, y del método que se utiliza para expandir la señal, la señal ensanchada que se obtiene es similar al ruido blanco.

Con CDMA se resuelven los problemas fundamentales de las técnicas anteriores: los desvanecimientos por **multitrayecto** y la **interferencia** procedente de otros usuarios del sistema. Además, como al utilizar esta técnica se tiene una forma de onda similar al ruido blanco, la **privacidad** es inherente. El problema del *multitrayecto* se soluciona gracias a que, al utilizar señales de gran ancho de banda, se tiene mucha resolución en el dominio temporal, de manera que se pueden separar ecos de la señal muy próximos en el tiempo y combinarlos de forma coherente si se utiliza el receptor Rake. De esta forma se introduce diversidad. En cuanto a la *interferencia*, al tener las señales ensanchadas un espectro similar al ruido blanco, las señales interferentes provenientes de otros usuarios serán vistas como dicho ruido, mucho más fácil de eliminar.

Además de resolver los problemas anteriores, CDMA tiene las siguientes ventajas: mayor capacidad, mejor calidad de voz al eliminar los efectos audibles de los desvanecimientos, disminución del número de llamadas interrumpidas en trasposos y la posibilidad de compartir la banda con otros sistemas.

El proceso para obtener una señal de espectro ensanchado consiste en multiplicar la señal de información  $x(t)$  por la secuencia de expansión, llamada *signatura* o *código de dirección*, del usuario  $c(t)$ , transmitir el producto y en recepción multiplicarlo de nuevo por  $c(t)$ , y realizar el procesado (correlación), recuperando la señal original. Al proceso de multiplicación en transmisión se le denomina **expansión** (*spreading*) ya que origina la expansión de la señal de banda estrecha a toda la banda de frecuencias. De la misma manera al proceso de multiplicación en recepción se le denomina **compresión** (*de-spread*) ya que con él se recupera la señal original. La compartición del espectro se consigue porque el proceso de compresión sólo afecta a la señal deseada, mientras que las señales de otros usuarios permanecen ensanchadas (*Figura 3.4*), y a efectos del receptor se perciben como ruido blanco.



**Figura 3.4:** Demodulación en acceso múltiple

Algunas características de la aplicación de técnicas CDMA en comunicaciones móviles son las siguientes:

Características de las secuencias pseudoaleatorias: Dependiendo si se utilizan secuencias ortogonales o no ortogonales, tendremos distintos tipos de limitaciones.

Factor de reutilización unidad: pueden utilizarse las mismas frecuencias en una célula y en la adyacente.

Multitrayecto: se puede aprovechar de forma positiva gracias a la utilización del receptor Rake

Control de Potencia: Es necesario realizarlo debido al efecto cerca-lejos por el cual, si todos los usuarios utilizaran la misma potencia, las señales de los emisores más cercanos llegarían a la estación base con más potencia que las de los lejanos, quedando estas últimas enmascaradas.

Interferencia: se reduce respecto a otros sistemas, al utilizar señales de banda ancha y que además tienen un espectro similar al del ruido blanco

Traspaso con continuidad: permite realizar un traspaso de una célula a otra de tal manera que no existen microcortes.

Capacidad: CDMA tiene mayor capacidad que los sistemas basados en FDMA o TDMA, en un sistema multicelular.

Respiración celular: el radio celular no está limitado por geometría o propagación sino fundamentalmente por capacidad. A mayor carga menor radio y viceversa.

## 3.2.1 Características de las secuencias pseudoaleatorias.

### 3.2.1.1 Secuencias de pseudo-ruido

#### Revisión histórica:

En los primeros años de SS se utilizaba el *sistema de referencia transmitida* (TR), donde se usan códigos totalmente aleatorios. Se transmiten dos señales, una portadora de los datos y otra portadora sin modular usada en el receptor para recuperar los datos. La principal ventaja es que no hay problemas de sincronismo ya que ambas versiones de la portadora se transmiten simultáneamente.

En cuanto a las desventajas podemos destacar:

1. El código de expansión es transmitido, por lo que puede ser interceptado por algún oyente.
2. El sistema es vulnerable a que un oyente hostil envíe dos formas de onda aceptadas por el receptor.
3. Prestaciones malas con bajos niveles de ruido, pues el ruido está presente en ambas señales.
4. Necesario el doble de potencia y de BW, ya que tenemos dos señales a transmitir.

Posteriormente aparecieron los sistemas modernos SS *sistemas de referencia almacenada* (SR). Donde el código de expansión es generado de manera independiente en el transmisor y en el receptor. La principal ventaja es que dicho código no puede ser observado en la transmisión, pero como desventaja es que la secuencia de código no puede ser aleatoria, entraríamos dentro de las secuencias de código deterministas, aunque aparecen como aleatorias para oyentes no autorizados con lo cual estaríamos hablando ya de *secuencias pseudoaleatorias* (PN).

Las principales diferencias entre la señal aleatoria y la pseudoaleatoria, es que estas últimas son deterministas y aparecen aleatorias para oyentes no autorizados, y las aleatorias son impredecibles y las variaciones están descritas de forma estadística.

#### Propiedades de la aleatoriedad

- **Propiedad de balance:** El número de 1's difiere del número de 0's en un periodo como mucho en un dígito.
- **Propiedad de serie (run property):**
  - Serie o tirada: Secuencia de un único tipo de dígito binario.
  - La aparición de un dígito alternado en una secuencia comienza una nueva serie.
  - La longitud de una serie es igual al número de dígitos en la serie.

- En un periodo es deseable que la mitad de las series de cada tipo tengan longitud 1, un cuarto tengan longitud 2, un octavo tengan longitud 3, etc...
- **Propiedad de correlación:** Si el periodo de una secuencia se compara término a término con un desplazamiento cíclico del mismo, el número de coincidencias debe diferir del de no coincidencias en como mucho uno.

### **Tipos de secuencias PN:**

Uno de los elementos claves para un buen funcionamiento de los sistemas CDMA es una buena elección de las secuencias código. En principio lo ideal sería que todas las secuencias fuesen perfectamente ortogonales entre sí, lo que garantizaría la total separación de las secuencias involucradas. Pero esto tiene ciertas limitaciones, con lo cual surge la necesidad de crear otro tipo de secuencias.

Estas secuencias no ortogonales deben de cumplir una serie de características:

1. Cada secuencia debe ser *fácilmente distinguible de cualquier versión de ella misma desplazada*. Esta propiedad permitirá por un lado facilitar la sincronización de la secuencia código recibida y la generada localmente en el receptor y reducir la interferencia de las distintas réplicas de la señal recibida debida a la propagación multicamino del entorno móvil.
2. Cada secuencia ha de ser *fácilmente distinguible del resto de secuencias código de la misma familia*, con independencia del desplazamiento temporal de las mismas. Esta propiedad permite la capacidad de separación de las señales de los usuarios diferentes, minimizando su interferencia mutua.
3. El número de secuencias de la familia que cumpla las dos características anteriores ha de ser suficientemente elevada para dar cabida a un buen número de usuarios en el sistema.

Con el objetivo de valorar cuantitativamente las propiedades anteriores es preciso recurrir a la definición de una serie de funciones de autocorrelación, que permiten cuantificar el grado de similitud que existe entre dos secuencias de chips, y que servirá para presentar posteriormente algunas secuencias de código utilizadas para CDMA.

### **Correlación cruzada periódica**

La función de autocorrelación cruzada periódica para dos señales  $x(t)$  e  $y(t)$  en general complejas de N chips repetidos periódicamente se define como:

$$\theta_{x,y}(\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y^*(n+\tau)$$

donde  $\tau \in \mathbb{Z}$  corresponde al desplazamiento temporal de los chips entre las secuencias, es un número entero.

En el caso de que las dos funciones sean iguales se denomina **autocorrelación** y vendría dado por:

$$\theta_{x,y}(\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x^*(n + \tau)$$

Así la propiedad anterior (1), relativa a que una secuencia sea fácilmente distinguible de cualquier versión desplazada de sí misma, se puede formular matemáticamente en términos que la autocorrelación presente un valor elevado en  $\tau = 0$ , y bajos en el resto.

Análogamente para la propiedad (2) lo podemos reformular matemáticamente en que tenga una correlación cruzada con el resto de secuencias para cualquier  $\tau$ .

### 3.2.1.1.1 *Secuencias de máxima longitud*

A las secuencias de máxima longitud se les denomina *M-secuencia*. Son un tipo de código cíclico que representa a una secuencia PN muy usada. Dentro de las principales características podemos destacar que tienen periodos muy largos y son de fácil de implementación con registros de desplazamiento de realimentación.

La función de autocorrelación para la forma de onda periódica  $x(t)$  con periodo  $T_o$ , en forma normalizada, viene dada por:

$$R(\tau) = \frac{1}{K} \frac{1}{T_o} \int_{-T_o/2}^{T_o/2} x(t)x(t - \tau)dt \quad -\infty < \tau < \infty \quad (2.3)$$

donde

$$k = \frac{1}{T_o} \int_{-T_o/2}^{T_o/2} x^2(t)dt$$

Si  $x(t)$  es un código PN, cada pulso fundamental se denomina *símbolo del pulso PN* o *chip*.

Para la forma de onda PN con duración de chip la unidad y periodo N chip, la función de autocorrelación vendría dada por:

$$R_x(K) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N C_n C_{n-k} \quad (2.4)$$

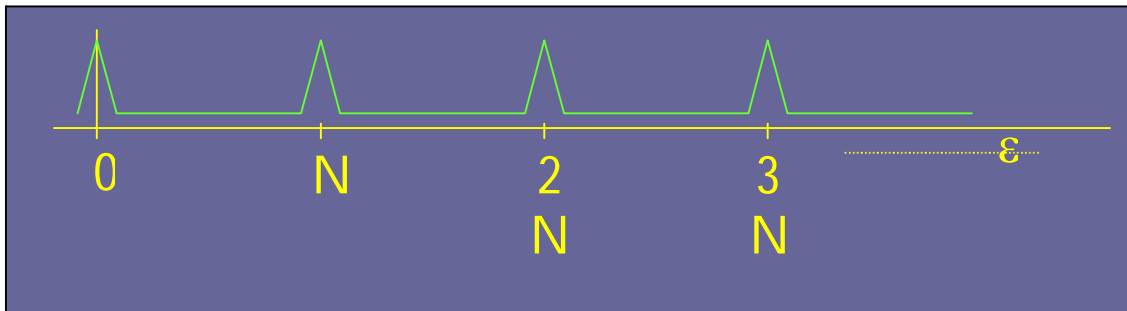
siendo  $C_n$  secuencia binaria +1,-1.

Para una secuencia de longitud máxima de periodo N, la función de autocorrelación normalizada, también tiene periodo N y toma dos valores posibles.



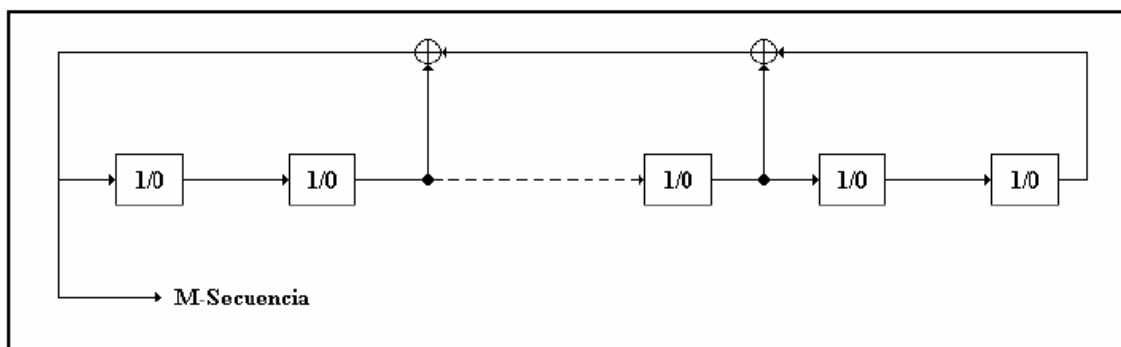
$$R_K(K) = \begin{cases} 1 & \text{Si } K=mN \\ \frac{1}{N} & \text{si } K \neq mN \end{cases} \quad \text{m cualquier valor entero} \quad (2.5)$$

Si  $N \rightarrow \infty$ ,  $R_K(K) \rightarrow$  a la función de autocorrelación de una secuencia binaria aleatoria.



**Figura 2.5:** Función de autocorrelación R(K)

En muchos casos los códigos de ensanchamiento son generados con un registro lineal de desplazamiento, como se mencionó con anterioridad, junto a unos operadores lógicos apropiados. Dichos operadores realimentan a la entrada del registro una combinación de los estados de dos o más de sus registros como se puede ver en la *Figura 3.6*.



**Figura 3.6:** Registro de desplazamiento para generar la m-secuencias

Las conexiones de los registros al módulo sumador vienen determinadas por el polinomio generador de la secuencia PN, que es de la forma:

$$G(X) = 1 + A_1X + A_2X^2 + \dots + A_N X^N \quad (2.6)$$

Donde  $A_i$  es '1' o '0' dependiendo si hay conexión o no con el módulo sumador. El estado inicial de los registros es lo que se denomina **semilla del código**. Los sumadores lógicos realizan una OR-Exclusiva (XOR) de los registros para ser realimentados. Para el caso de códigos binarios la operación de suma módulo-2 es equivalente a la operación XOR. Hay que tener en cuenta que no todos los polinomios generadores producen una secuencia PN de máxima longitud, por lo que es necesario

consultar tablas estándar donde se encuentren las especificaciones. Las M-Secuencias son códigos que tienen la máxima longitud realizable con un registro de desplazamiento consistente en  $N$  casillas, de ahí procede su nombre Máxima-Secuencia. Dicha longitud es  $L=2^{N-1}$ . Las M-Secuencias están definidas por los denominados **polinomios irreducibles o primitivos**, pues no todos los polinomios de realimentación dan lugar a psecuencias de longitud máxima (cumpliendo las características de aleatoriedad mencionado con anterioridad). Matemáticamente hablando se dice que un polinomio de grado  $n$  es irreducible si no es divisible por ningún polinomio de grado no nulo menor que  $n$ , y además no divide a ningún polinomio de la forma  $x^k+1$  siendo  $k < 2^n - 1$ .

Para diferentes valores iniciales de las casillas, la M-Secuencia obtenida es siempre la misma, la única diferencia es que empieza con un desplazamiento en el tiempo llamado fase de código.

A continuación se pueden ver las propiedades más importantes de las M-Secuencias:

- Para la función de autocorrelación se puede encontrar:

$$\phi_{xx}(l) = \begin{cases} L & \rightarrow l = 0 \\ -1 & \rightarrow 1 \leq l \leq L-1 \end{cases}$$

del código son mapeados a  $\{-1, 1\}$ .

- Hay  $2^{N-1}$  unos y  $2^{N-1} - 1$  ceros en un periodo de código.
- El número de *repeticiones* (un cierto número de chips consecutivos con el mismo valor) de longitud  $p$  es  $2^{N-(p+2)}$  tanto para los ceros como para los unos. No hay *repeticiones* de ceros de longitud  $N$  o de unos de longitud  $N-1$ . Además, el número de repeticiones decrece en potencia de 2 a medida que su longitud crece. La distribución estadística de unos y ceros aparenta ser totalmente aleatoria pero está bien definida y siempre es la misma. Esta aleatoriedad también se puede ver en la forma de la función de autocorrelación, ya que la correlación de una M-Secuencia con una versión de ella misma desplazada en el tiempo es casi cero, indicando que los valores del código  $c(i)$  son estadísticamente independientes.
- Si una M-Secuencia se suma módulo-2 con una versión de ella misma desplazada en el tiempo, el resultado es la misma secuencia de código con un nuevo desplazamiento en el tiempo. Si dos M-Secuencias diferentes de igual longitud se suman módulo-2, el resultado es una secuencia compuesta de igual longitud. Esta secuencia compuesta es diferente para cada combinación de desplazamiento en el tiempo de las secuencias originales. Gracias a este resultado se pueden generar un gran número de códigos diferentes, así es como se calculan los *códigos de la familia Gold*.

- Se ha demostrado que para todas las M-Secuencias de una determinada longitud, sólo unas pocas de ellas tienen unas “buenas” propiedades de correlación cruzada. En este contexto “buenas” significa que la correlación cruzada solamente toma tres posibles valores:

$$\phi_{xy} = \{-1, -\Theta_c(N), \Theta_c(N) - 2\} \quad \text{con} \quad \Theta_c(N) = 2^{\lfloor N/2 + 1 \rfloor} + 1$$

donde  $\lfloor x \rfloor$  denota la parte entera del número real  $x$ . Desafortunadamente el número de M-secuencias con estas “buenas” propiedades de correlación cruzada, también conocido como *mightiness*, es muy pequeño y no crece con la longitud de las M-Secuencias como se puede ver en la *Tabla 2.1*.

N	3	5	7	11	15
L	7	31	127	2047	32767
Número de M-Secuencias	2	6	18	167	1800
<i>Mightiness</i>	2	3	6	4	2

**Tabla 2.1:** M-secuencias buenas en función de N y L

A continuación vamos a ver un ejemplo de una M-secuencia:

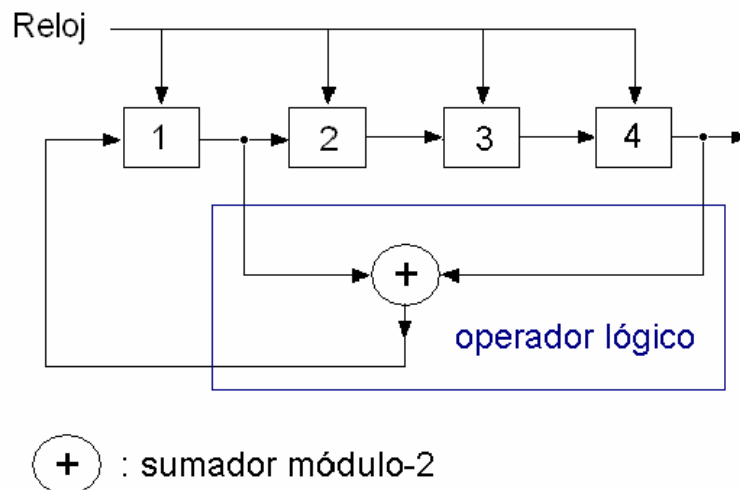
Las principales características son:

$m=4$

$N=2^m-1$

$PN=\{c_k\}=\{100011110101100\}$

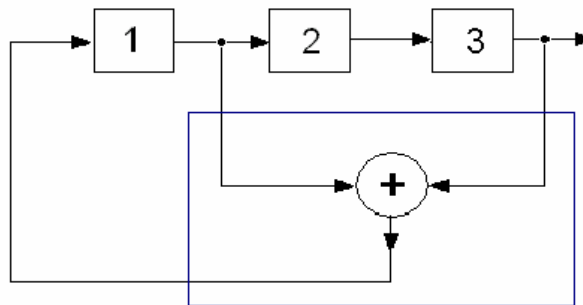
El registro de desplazamiento sería:



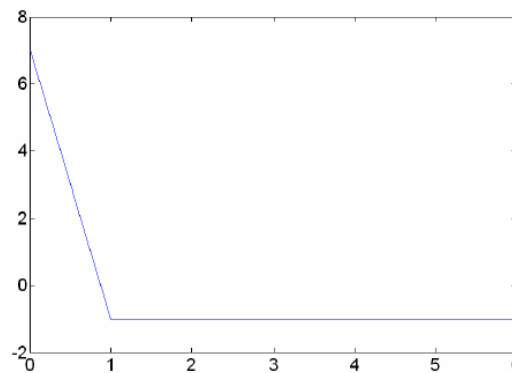
**Figura 3.7:** Registro de desplazamiento para la obtención de la M-secuencia

La secuencia PN se ha obtenido para un determinado estado inicial de los registros, para otros estados iniciales se obtiene la misma secuencia PN pero desplazada. El polinomio utilizado es como puede verse  $g(z)=1+X_1+X_4$ .

Vamos a ver otro ejemplo para estudiar las características de autocorrelación. El ejemplo sería para  $m=3$ ,  $N=7$  y  $g(z)=1+X_1+X_3$

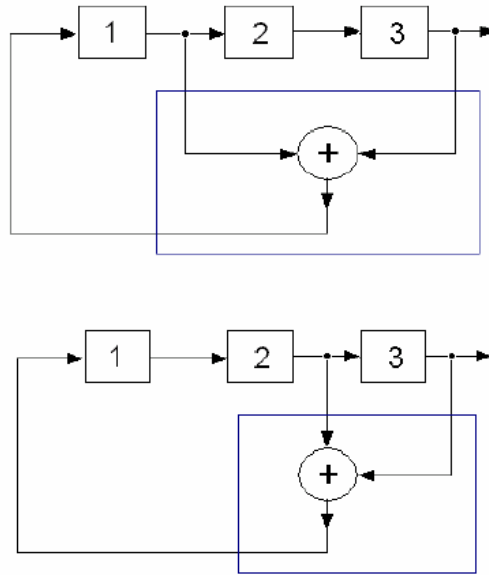


**Figura 3.8:** Generador de secuencia PN

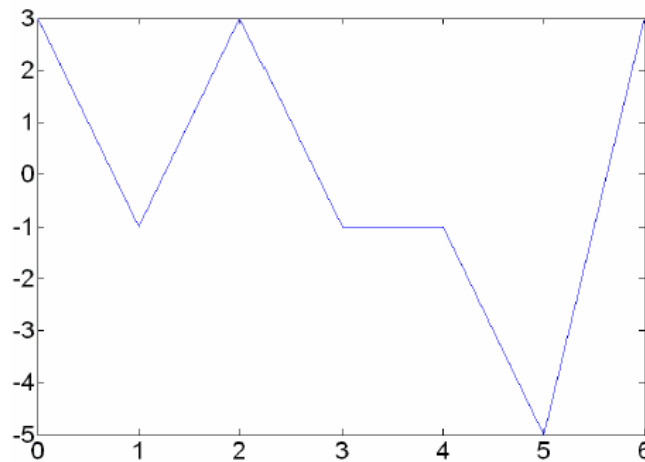


**Figura 3.9:** Autocorrelación de la secuencia PN ( sólo 1 periodo)

Ahora tomaremos dos para estudiar la correlación cruzada:



**Figura 3.10:** Registros para generar secuencias PN



**Figura 3.11:** Correlación cruzada de las secuencias anteriores

### 3.2.1.1.2 *Secuencias de longitud no máxima:*

Estas secuencias son aquellas que cumplen que  $N < 2^m - 1$ , siendo  $m$  el número de etapas o biestables.

#### 3.2.1.1.2.1 **Secuencias Gold**

En algunas aplicaciones no sólo es importante lograr ciertas características de correlación de las secuencias PN sino también es importante que los valores de correlación cruzada cumplan ciertos requisitos.

En los años 60 Gold y Kasami probaron que existían ciertos pares de m-secuencias, que tenían 3 valores de correlación cruzada:

$$-1, -t(m) \text{ y } t(m)-2,$$

donde  $t(m)=2^{0.5(m+1)} + 1$  para m impar y  $2^{0.5(m+2)} + 1$  para m par.

A dos secuencias que cumplan estas condiciones se les denomina *secuencias preferidas*; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Suponga que se tiene dos secuencias de longitud n, se puede construir un conjunto de secuencias de longitud n sumando, en módulo 2, una de ellas con versiones desplazadas de la otra, o al revés. La nueva secuencia tendrá período  $m=2n-1$ . Las secuencias originales generadoras también forman parte de ese conjunto de manera que surgen  $n+2$  secuencias, llamadas *secuencias Gold*.

m	N	Nº Secuencias-M	Ejemplos de sistemas de longitud máxima	Nº Parejas preferentes
3	7	2	[1,3] [2,3]	1
4	15	2	[1,4] [3,4]	0
5	31	6	[2,5] [2,3,4,5] [1,2,4,5]...	3
6	63	6	[1,6] [1,2,5,6] [2,3,5,6]...	2
7	127	18	[4,7] [1,2,3,7] [2,3,4,7] [1,7] [1,3,6,7][2,4,6,7]...	6
8	255	18	[2,3,4,8] [3,5,6,8] [2,5,6,8] [1,3,5,8]...	0

**Tabla 3.2:** Parejas preferentes

Estas secuencias están creadas a partir de dos secuencias de longitud máxima, la autocorrelación cruzada de estas secuencias es menor que el de las M-secuencias

Las secuencias de Gold son generadas mediante la suma módulo-2 de dos M-Secuencias (secuencias preferidas) de igual longitud como se puede ver en la *Figura 3.12*

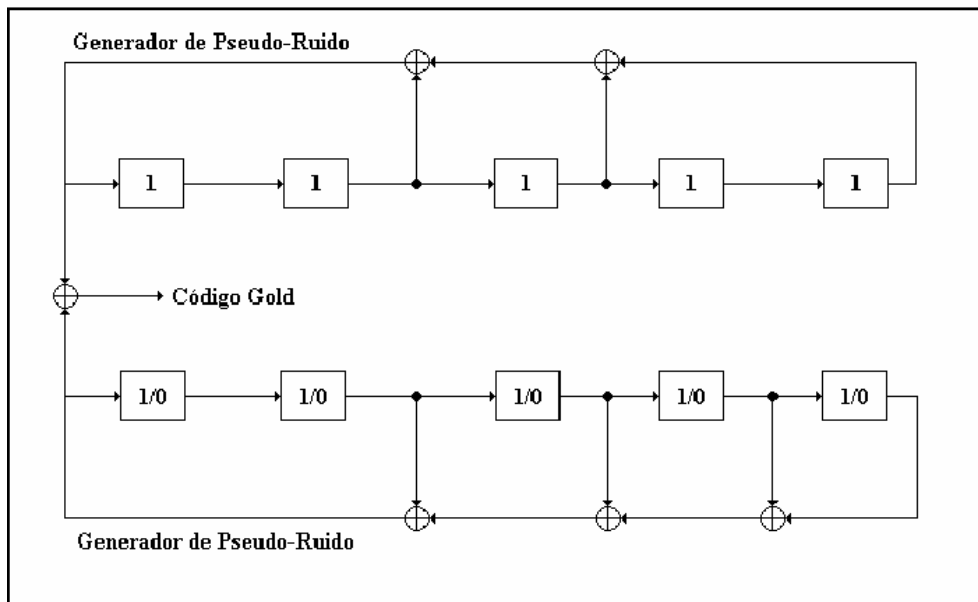


Figura 3.12: Generador de secuencias Gold

Aunque el número de “buenas” M-Secuencias es bajo, se pueden obtener un gran número de secuencias de Gold. Esto es debido a que dos M-Secuencias pueden tener hasta  $2^N - 1$  desplazamientos relativos diferentes entre ellas, y cada desplazamiento resulta en una secuencia de Gold diferente como se explicó en las propiedades de las M-Secuencias.

En oposición a las M-Secuencias, la función de autocorrelación de los códigos Gold tienen cuatro posibles valores diferentes mientras que la correlación cruzada posee tres posibles valores:

$$\begin{aligned}\phi_{xx}(l) &= \{L, \Theta_c(N) - 2, -1, -\Theta_c(N)\} \\ \phi_{xy}(l) &= \{\Theta_c(N) - 2, -1, -\Theta_c(N)\} \\ \Theta_c(N) &= 2^{\lfloor N/2 + 1 \rfloor} + 1\end{aligned}$$

Comparando las secuencias de Gold con las M-Secuencias con respecto a las funciones de correlación, se puede ver como para las secuencias de Gold hay un mayor número de códigos que cumplen la propiedad de la correlación cruzada. Esto está compensado con una empeora de la función de autocorrelación. Los códigos Gold se utilizan en UMTS para el *Scrambling*.

### Teorema de Gold:

Sean dos registros de longitud máxima con  $m$  memorias. Si las dos secuencias creadas tienen una correlación cruzada menor que  $R$  en valor absoluto (pareja preferente),

$$R = \begin{cases} 2^{(m+1)/2} + 1, & m \text{ impar} \\ 2^{(m+2)/2} + 1, & m \text{ par } \wedge m \neq 0 \pmod{4} \end{cases}$$

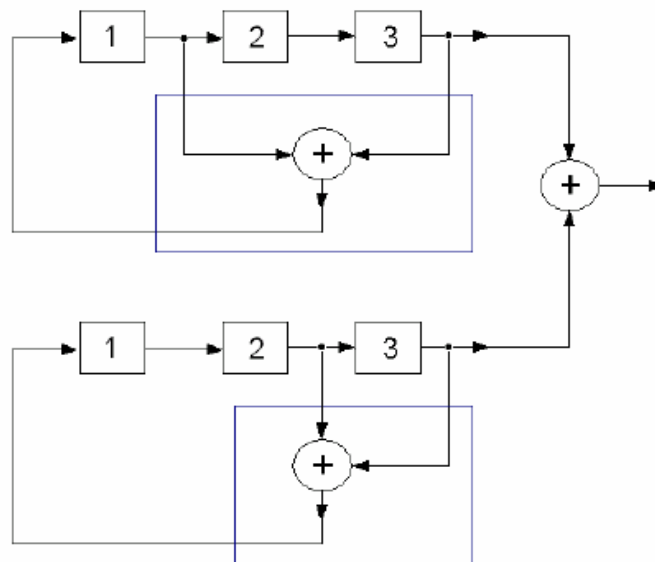
a partir de los dos registros se puede implementar un sistema capaz de generar  $2^m + 1$  secuencias distintas de longitud  $2^m - 1$  con correlación cruzada menor o igual que  $R$  para cualquiera de las secuencias generadas.

Las distintas secuencias Gold se originan partiendo de distintos estados iniciales de las secuencias.

**Ejemplo de secuencia Gold**, con las siguientes características:

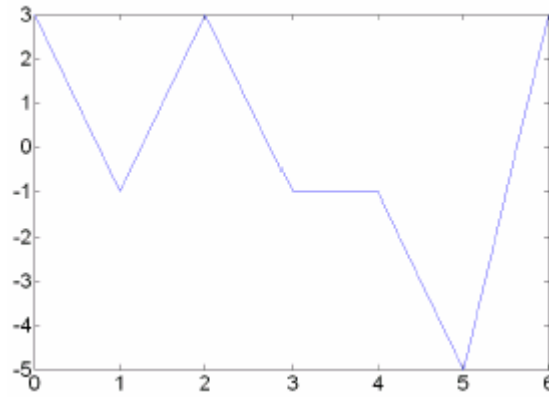
Dos registros de  $m=3$ ,  $N=7$  y  $R=5$ .  $G_1(z)=1+X+X^3$  y  $G_2(z)=1+X^2+X^3$ .

Los polinomios generan secuencias preferentes.



**Figura 3.13: Ejemplo de secuencia Gold**



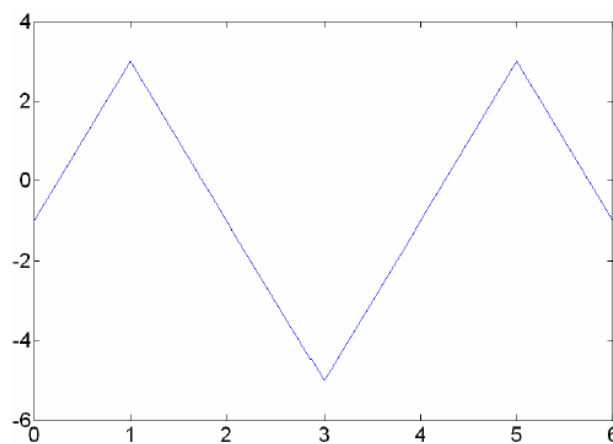


**Figura 3.14:** Correlación Cruzada de las secuencias anteriores.

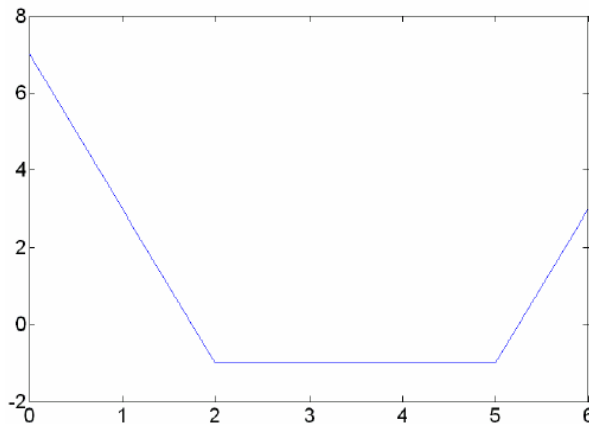
Las secuencias Gold obtenidas son:

Estado inicial reg.1	Estado inicial reg.2	Secuencia de Gold
1 1 1	1 1 1	0 0 0 0 1 1 0
1 1 1	1 1 0	1 0 0 1 1 0 1
1 1 1	1 0 1	0 1 0 1 0 0 0
1 1 1	0 1 0	1 0 1 1 0 1 0
1 1 1	1 0 0	1 1 0 0 0 1 1
1 1 1	0 0 1	0 1 1 1 1 1 1
1 1 1	0 1 1	0 0 1 0 0 0 1
1 1 1	0 0 0	1 1 1 0 1 0 0
0 0 0	1 1 1	1 1 1 0 0 1 0

**Tabla 2.3:** Distinta secuencias Gold para distintos valores iniciales en los registros



**Figura 3.15:** Correlación cruzada de las secuencias [0000110] y [1001101]



**Figura 3.16:** Autocorrelación de la secuencia Gold [0000110]

Comparando la *figura 3.15* con la *3.9* podemos ver que la autocorrelación de las M-secuencias es mucho mejor que las secuencias Gold, pero como contrapartida tenemos que las correlaciones cruzadas de las secuencias Gold son mejores que las de las M-secuencias.

### 3.2.1.1.2.2 Secuencias Kasami

El conjunto de *secuencias Kasami* es uno de los más importantes tipos de secuencia binarias debido a su muy bajo valor de correlación cruzada. Existen dos tipos diferentes de secuencias Kasami:

#### a) Pequeñas secuencias de Kasami:

Empleando un procedimiento similar al de la generación de secuencias Gold, se genera un conjunto de  $m = 2^{n/2}$  secuencias Kasami con período  $N = 2^n - 1$ , siendo  $n$  un número par. Con una secuencia máxima “a” se forma por muestreo otra “a’” de período  $2^{n/2} - 1$ . Así por ejemplo, si  $n = 10$ , el período de la secuencia “a” es  $N = 1023$  y el de la secuencia “a’”,  $N = 31$ . Entonces observando 1023 bits de “a” tendremos 33 repeticiones de 31 bits cada una. Ahora tomando  $n = 2^{n/2} - 1$  bits de las secuencias a y a’ se forma un nuevo conjunto de secuencias por adición módulo 2 de los bits de a y a’ y todos los desplazamientos cíclicos  $(2^{n/2} - 2)$  de los bits de a’.

Además, agregando la secuencia “a” al conjunto formado se obtienen  $2^{n/2}$  secuencias binarias de período  $2^{n/2} - 1$ . Los valores de las funciones de correlación y correlación cruzada toman los valores del siguiente conjunto:

$$\left\{ -1, \left( 2^{\frac{n}{2}} + 1 \right), 2^{\frac{n}{2}} - 1 \right\}$$

#### b) Grandes secuencias de Kasami

Consisten en secuencias de período  $N = 2^n - 1$ , con  $n$  par. Están formadas por secuencias Gold y secuencias pequeñas de Kasami. Dada una secuencia máxima “a”, se

obtienen por muestreo las secuencias  $a'$  y  $a''$  con  $2^{n/2}+1$  y  $2^{(n+2)/2}+1$  puntos y luego, tomando todas las secuencias formadas por  $a$ ,  $a'$  y  $a''$  con diferentes desplazamientos de  $a'$  y  $a''$  se obtienen estas secuencias de Kasami. Los valores de correlación y correlación cruzada están limitados a cinco valores dados por:

$$\left\{ -1, -1, \pm 2^{\frac{n}{2}}, -1 \pm 2^{\frac{n}{2}} + 1 \right\}$$

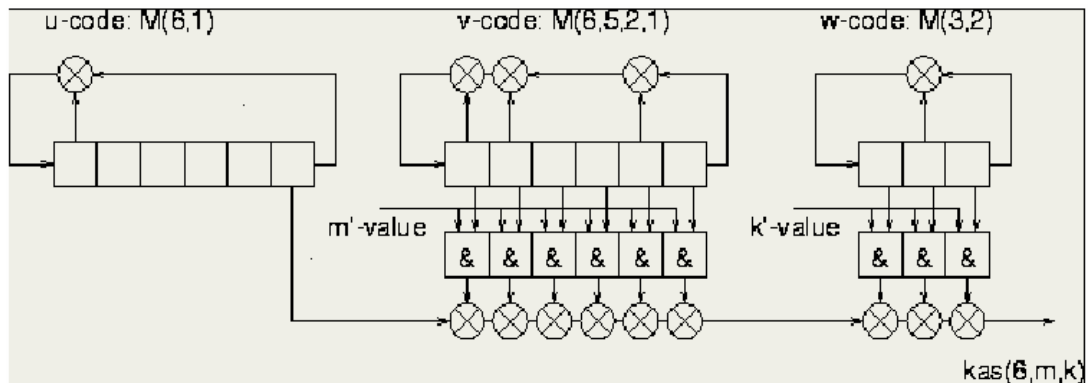


Figura 3.17: Generación de secuencias de Kasami

### 3.2.1.2 Ortogonalidad y no ortogonalidad de las secuencias

#### Secuencias ortogonales

Las principales características de estas secuencias son que no existe interferencia por acceso múltiple, el número de canales es limitado, e igual a la ganancia de procesado.

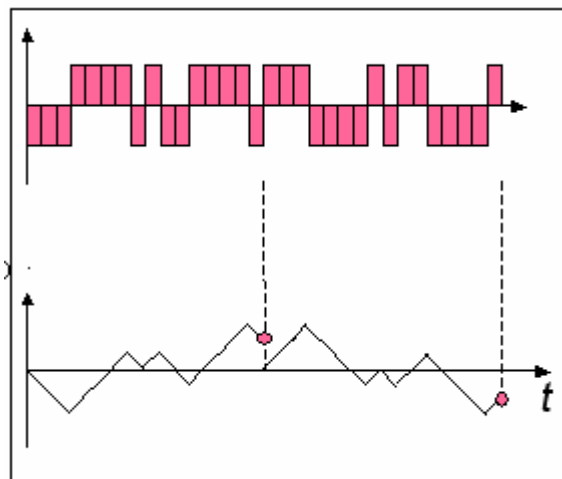
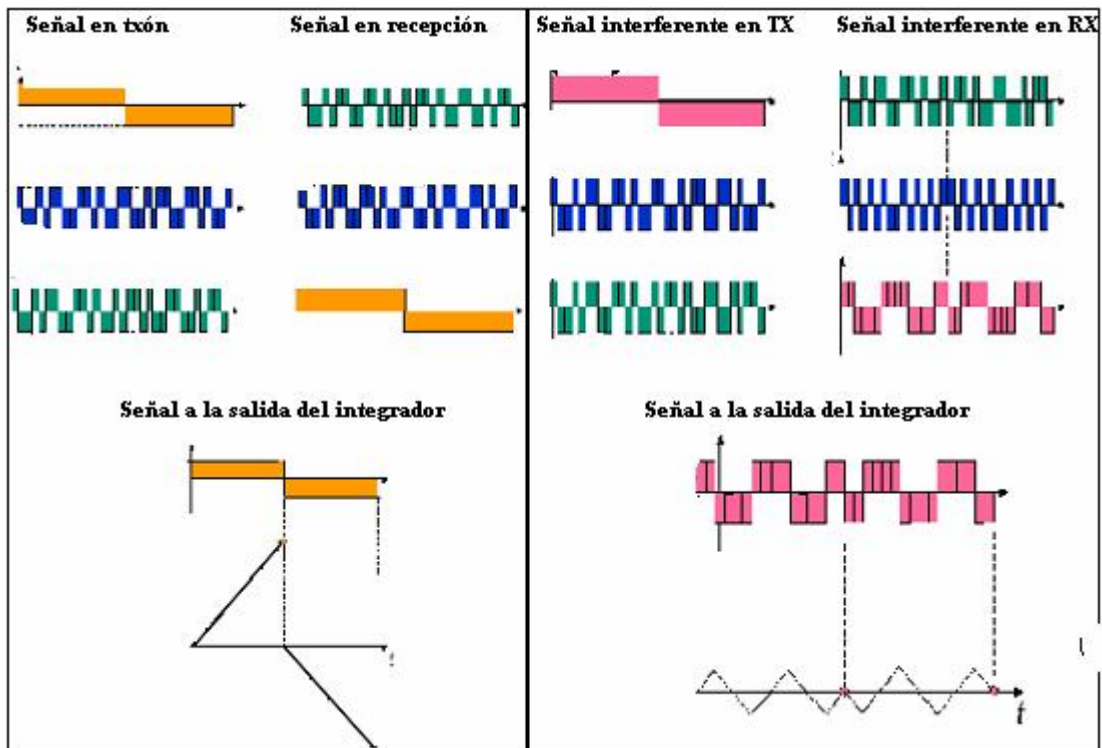


Figura 3.18: señal con pérdida de sincronismo

Existe necesidad de sincronismo muy preciso (fracción de chip).

En las *Figuras 3.18 y 3.19* se ve el comportamiento de este tipo de secuencias cuando el sincronismo es perfecto, como actúa con la señal correcta y la interferente y también cuando tenemos pérdida de sincronismo.

Estos sistemas *están limitados por dimensiones*, igual que los sistemas clásicos



**Figura 3.19:** En la izquierda señal deseada y sincronizada y a la derecha señal interferente

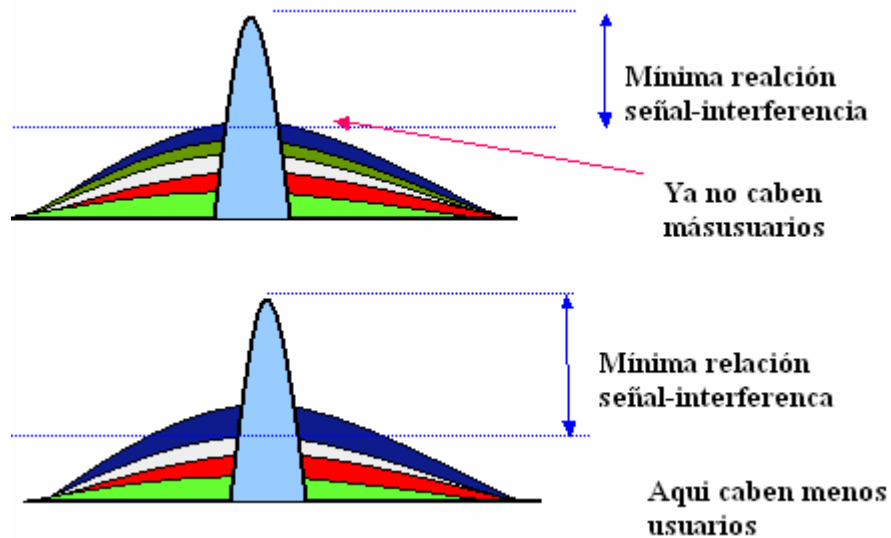
Las limitaciones por principales por la dimensión son el número *reducido* de canales *no interferentes* (ortogonales) y las formas de establecer los canales son mediante frecuencias (FDMA), intervalos de tiempo (TDMA) o códigos ortogonales (CDMA). Con lo cual seguimos teniendo la necesidad de reutilización para remediar la escasez de canales.

Son secuencias que responden a una función que garantiza que la correlación cruzada con las demás es nula. Las propiedades de correlación cruzada se mantienen mientras las secuencias no se desplazan entre sí en el tiempo. La eficacia de estas secuencias para desacoplar transmisiones resulta afectado por el multitrayecto.

### **Secuencias no ortogonales:**

La principal característica de estos sistemas es que se produce interferencia por acceso múltiple, determinada por las propiedades de *correlación* de las secuencias código. El número de canales es ilimitado, no es necesaria la reutilización y no se requiere sincronismo entre señales correspondientes a comunicaciones diferentes.

Son sistemas *limitados por interferencia* (sistemas CDMA), el número prácticamente ilimitado de canales interferentes (no ortogonales). Esta modalidad sólo es posible mediante la utilización de CDMA con códigos pseudoaleatorios y la interferencia no se produce por reutilización, sino por la propia naturaleza de los canales (*Figura 3.20*).



**Figura 3.20:** Limitación por interferencia multiusuario

En UMTS, la calidad condiciona la capacidad del enlace: el ruido de fondo viene determinado por el número de transmisiones simultáneas, separadas por secuencias diferentes cada una => capacidad y calidad van unidas.

### **Secuencias utilizadas en la realidad:**

Se diseñan como sistemas limitados por interferencia, pero se establece ortogonalidad entre algunas señales. En el enlace descendente (DL) la ortogonalidad se refiere a señales transmitidas por la misma base mientras que en el ascendente (UL) se refiere a señales transmitidas por el mismo móvil (varias sesiones simultáneas).

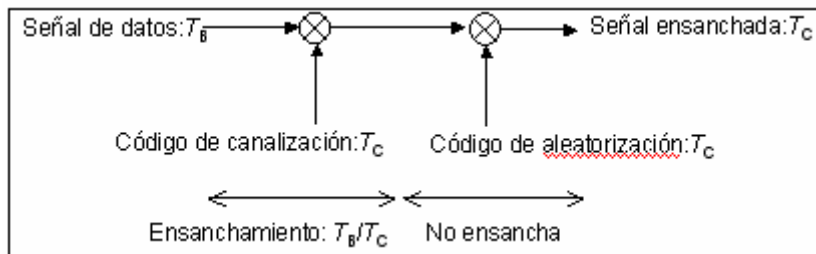
En el enlace ascendente con movilidad reducida se puede extender la ortogonalidad a móviles de una misma base. Ello requiere una sincronización muy estricta.

Lo anterior se consigue mediante la utilización de dos “capas” de código:

Códigos ortogonales o de canalización para usuarios de una misma célula: identifican el móvil dentro de la célula en el DL.

Códigos pseudoaleatorios o de aleatorización para células diferentes: identifican la célula en el DL, y el móvil en el UL.

La ortogonalidad es sólo parcial, debido a la dispersión temporal asociada al multitrayecto



**Figura 3.21:** Sistema CDMA

De este modo se consiguen las ventajas de la limitación por interferencia con la mejora añadida de que se elimina parte de la interferencia. A pesar de su reducido número, la reutilización de los códigos ortogonales no es problema, ya que pueden usarse todos en cada célula (DL) o móvil (UL), gracias a la etapa de aleatorización.

### 3.2.2 Factor de reutilización unidad:

En las anteriores modalidades de acceso múltiple al medio lo importante es jugar bien con la reutilización de frecuencias. Aquí nos olvidamos de los patrones de reuso de frecuencias. Lo que separa las comunicaciones son los códigos. Lo que realmente tiene que controlarse es la **potencia** pues a mayor potencia menor capacidad por celda.

Para la **planificación celular** es preciso decidir primero el repertorio de velocidades a proporcionar, y el perfil de velocidades del tráfico, así como el soportado por los terminales. El cálculo de capacidad en un entorno multiservicios no es evidente analíticamente se tiene que realizar mediante simulaciones y medidas prácticas.

La ganancia de procesamiento es de 3.84 megachips por segundo / velocidad de la señal a transmitir, en CDMA utilizada en UMTS, lo que quiere decir que la ganancia de procesamiento disminuye cuando aumenta la velocidad de transmisión. Las señales más veloces van menos protegidas. Las señales más veloces requieren más potencia. Por todo esto la planificación celular depende de otros factores dejando a un lado la reutilización celular.

Vamos a ver una comparativa de la reutilización celular utilizada en GSM y en UMTS, para ver con mayor claridad lo comentado en el apartado anterior.

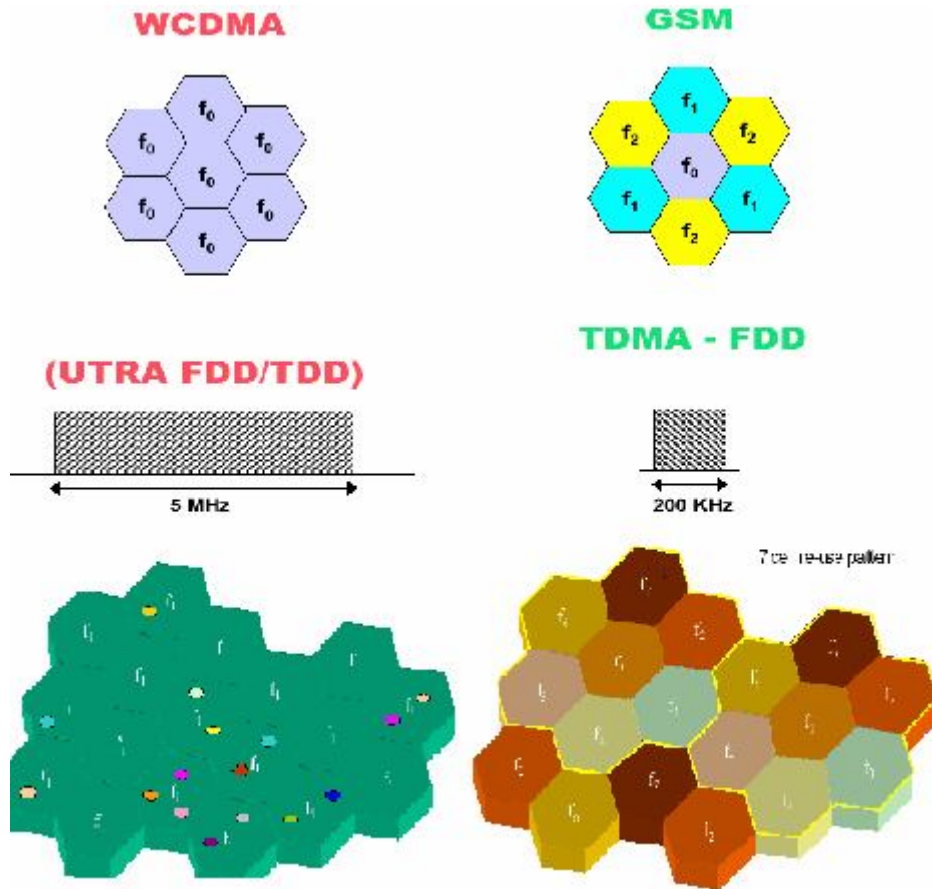


Figura 3.22: Planificación celular UMTS y GSM

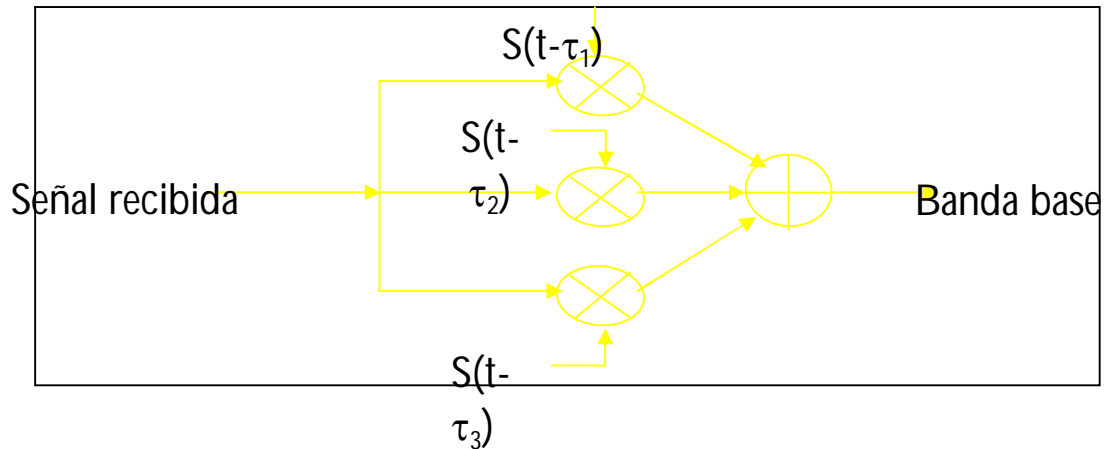
En UMTS se transmite a la misma frecuencia y al mismo tiempo, es en los códigos donde realizamos la reutilización.

### 3.2.3 Multitrayecto

La principal razón por la que tratamos aquí el multitrayecto es debido a que al estar tan expandido en la frecuencia la *resolución en el tiempo es muy buena* y se pueden separar los ecos de la señal muy próximos en el tiempo.

En GSM el multitrayecto se compensa. Mediante una secuencia de entrenamiento, se estima la respuesta impulsiva del canal, y se aplica la contraria.

En UMTS se recuperan y aprovechan las contribuciones de varios de los trayectos (típicamente hasta 6), gracias a la detección RAKE



**Fig 3.23:** Detector RAKE

### 3.2.4 Control de potencia

En recepción tras la correlación sólo se tendrá la señal deseada. En la práctica y debido al multitrayecto, los códigos no son totalmente ortogonales en recepción, siendo necesario un buen control de potencia para que la recepción de todos los usuarios sea similar y al hacer la correlación, de máximo el usuario correcto y no el que transmita con mayor potencia (el de mayor potencia enmascara a las demás). Esto es similar a cuando mucha gente está en una habitación hablando a la vez que se pueden mantener varias comunicaciones siempre que todos hablen a volúmenes similares.

El control de potencia es una necesidad debido al problema “cerca-lejos” (*near-far*), debemos diferenciar:

Enlace ascendente: diferente atenuación de las señales.

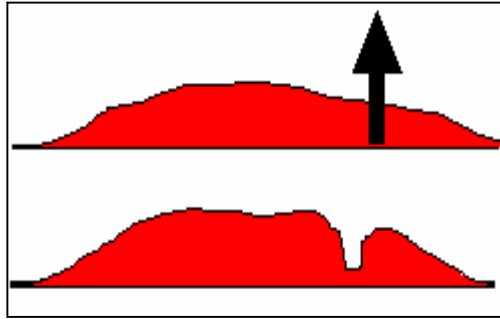
Enlace descendente: diferente nivel de las señales de la célula relativo a la interferencia externa y al ruido térmico.

El control debe ser dinámico con una actualización periódica, por lo que los órdenes de control deben multiplexarse en el tiempo con la información.

### 3.2.5 Interferencia

Como ya comentamos al principio, una de las principales aplicaciones de la técnica CDMA es la protección contra interferencias, entre ellas las selectivas en banda:





**Figura 3.24:** Comportamiento frente a Desvanecimientos

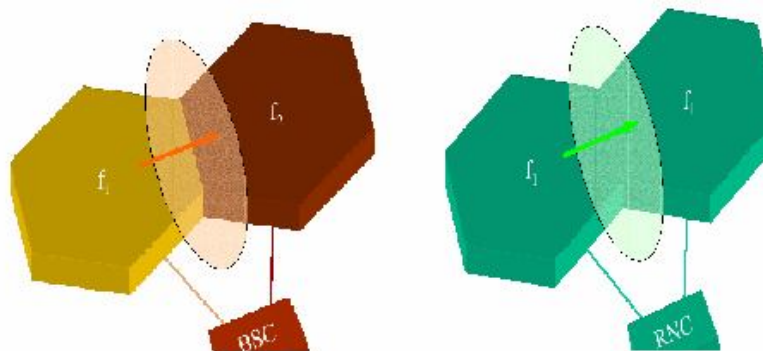
Por *desvanecimientos selectivos* (entornos comerciales).

A mayor ensanchamiento, se pierde menor porción de energía transmitida por la interferencia en una porción de la banda. A mayor ganancia de procesamiento, mayor protección frente a interferencias.

### 3.2.6 *Traspaso por continuidad*

El traspaso puede ser “suave” (con continuidad). Dos o más estaciones base (EB) transmiten la misma señal sobre códigos diferentes. El receptor decodifica cada camino y los suma, gracias a la detección RAKE. Finalmente selecciona la EB de la que desea recibir el servicio.

Por el contrario con las otras tecnologías el traspaso es duro debido a que se emite a distinta frecuencia. (*Figura 3.25*).



**Figura 3.25:** Traspaso duro y suave

El traspaso es distinto si se trata de un enlace ascendente o descendente.

**UL:** recepción desde varias bases y selección/ combinación (RNC)

**DL:** transmisión desde varias bases y combinación en el móvil (Rake)

### 3.2.7 Capacidad

Existe una relación muy grande entre la capacidad y la cobertura de la célula, pues cuando una célula se encuentra muy cargada, la interferencia es mayor, por consiguiente la cobertura es menor, vemos que también se encuentra muy relacionado con la respiración celular.

En estos sistemas se tiende a una compartición automática de la carga, las células menos cargadas, tienen menores interferencias respecto a las células vecinas, con lo que existe una mayor capacidad en éstas últimas.

La carga de las células tiende a equilibrarse, lográndose un uso más eficiente de los recursos. El equilibrio de carga se logra de manera más “natural” que en sistemas clásicos, en los que la compartición de carga exige asignación dinámica de canales.

La capacidad está condicionada por la calidad de los servicios, pues como ya se dijo el ruido de fondo viene determinado por el número de transmisiones simultáneas, si éstas son de mayor calidad la capacidad es menor.

### 3.2.8 Respiración celular

El radio de la célula varía en función del número de usuarios que transporte. Se transportan tantos usuarios como permita la relación señal-interferencia (*Figura 3.26*). Como ya se comentó en el apartado anterior, en el caso de que un usuario no lo pueda soportar una célula, se realiza la compartición automática con las células vecinas menos cargadas.

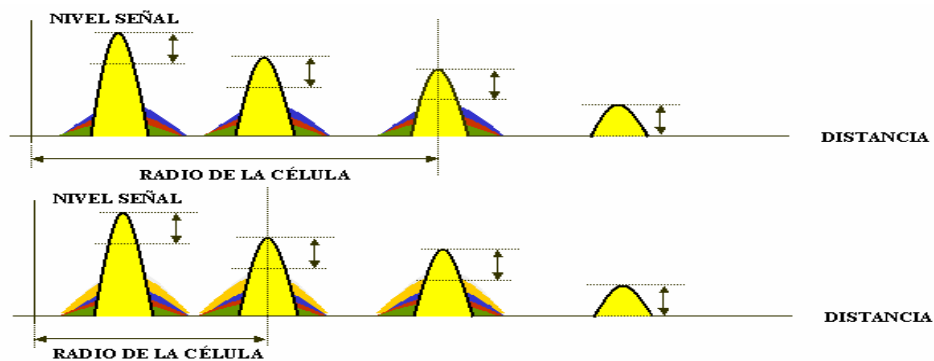


Figura 3.26: Respiración Celular