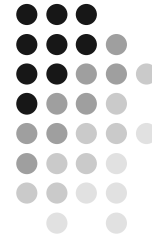
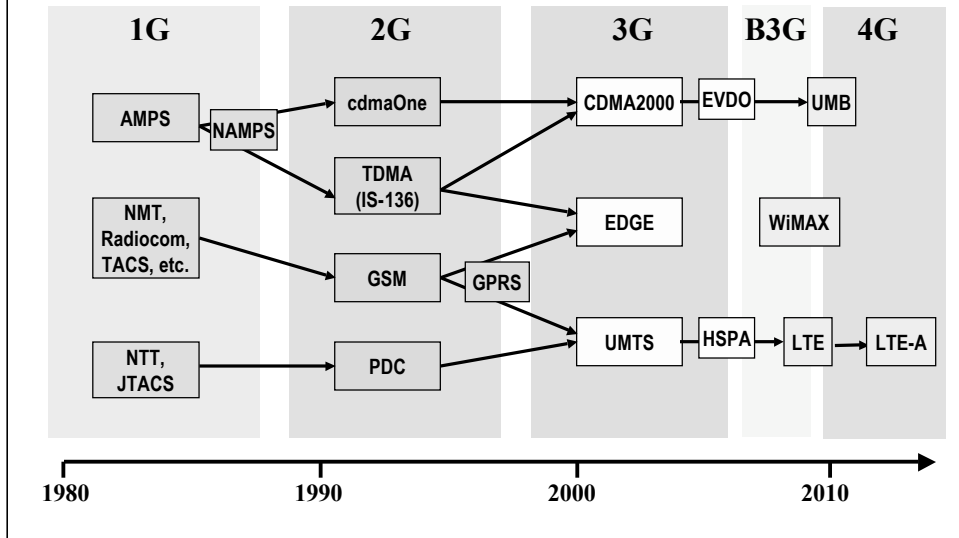


Tema 3: La Segunda Generación Celular

Comunicaciones Móviles
EC4432
Prof. Renny Badra
Septiembre-Diciembre 2011



Evolución de los sistemas móviles celulares

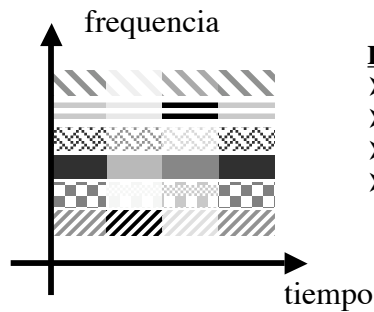


Todos los sistemas celulares, a partir de la 2G, se basan en una interfaz de aire digital.

Entre los sistemas 2G basados en TDMA se cuentan GSM, IS-54-B/IS-236 y el japonés PDC (personal Digital Communications).

El único sistema 2G que no está basado en TDMA es cdmaOne o IS-95, el cual está basado en CDMA.

Time Division Multiple Access (TDMA)



Ejemplos:

- D-AMPS (IS-54) (América)
- IS-136 (TDMA) (global)
- GSM (global)
- PDC (Japón)

En TDMA cada llamada activa recibe una asignación que consiste en una combinación de una banda de frecuencia y un conjunto de ranuras de tiempo que se repiten de forma periódica. El mismo principio es válido en ambos enlaces, subida y bajada. La señal de voz es modulada de manera digital, lo cual otorga a sistemas TDMA una capacidad (eficiencia espectral) mayor que los sistemas FDMA. Cuando un móvil cambia de celda recibe una nueva asignación de ranura de tiempo en una banda diferente. El sistema celular más popular a nivel global es GSM (en 2001, casi 2/3 de los móviles alrededor del mundo eran GSM). El sistema más usado en el continente americano es IS54/IS136, conocido comúnmente como "TDMA". Los sistemas IS54/IS136 emplean el mismo ancho de banda que AMPS (30 kHz), con un total de tres usuarios por canal. En GSM los canales son de 200 kHz cada uno, con 8 usuarios por canal.

Common Features of 2G Systems



- Digital modulation and advanced call processing
- Digital voice coding (compression)
- New network architectures that have reduced the burden at the MSC and standardized their operation
- Support multiple services, in addition to voice, like SMS and data
- Dedicated control channels and trunks
- Mobile-assisted handoff (MAHO)

Second generation systems are characterized by employing digital modulation and advanced call processing capabilities. 2G wireless networks have also introduced network architectures that reduce the burden of the MSC. For instance, GSM has introduced an additional controller between the MSC and the BTS called the BSC (Base Station Controller). Architectural changes have allowed the data interfaces between the BSC and the MSC to be standardized, thereby allowing carriers to use different equipment providers for MSC and BSC components. All 2G systems use voice coding and digital modulation. The systems employ dedicated control channels (common channel signaling) within the air interface for simultaneously exchanging voice and control information between the different elements of the network. 2G systems also provide dedicated voice and signaling trunks between BSC and MSC, and between MSC and the PSTN.

In contrast to 1G systems, which were designated primarily for voice, second generation wireless networks have been specifically designed to provide paging and other low data services. The network controlling structure is more distributed in 2G systems, since MSs assume greater control functions. In 2G systems the handoff process is mobile-assisted and is known as Mobile Assisted Handoff (MAHO), to be explained later. In general, there is more flexibility in channel allocation in 2G systems.

Interfaz de Radio de IS-136



Banda	Celular, PCS	Número de Ranuras	6 (2 por usuario)
Acceso Múltiple	FDMA/TDMA	Tiempo de Trama	40 ms
Dúplex	FDD	Codificación de Voz	VSELP (7.59 kbps)
Separación entre portadoras	30 kHz	Codificación de Canal	CRC + Convolutacional
Tasa de Bits	48.3 kbps	Datos	9.6 kbps (1 ranura) 28.8 kbps (3 ranuras)
Número de Portadoras	Igual que AMPS (en celular)	Líneas Múltiples	No
Tasa de Bits por Usuario (PHY)	16.1 kbps	Radio de Celda Típico (ciudad)	1.5 km
Modulación	$\pi/4$ - DQPSK	Capacidad por celda por MHz	14 llamadas
Potencia del Móvil	0.8 - 20 W max	Año de Introducción	1993

Se muestran los parámetros de la interfaz de radio del sistema TDMA IS-136 (antes IS-54), el cual actualmente ha sido discontinuado.

El sistema se llamó en su época Digital AMPS (D-AMPS) ya que mantenía el mismo ancho de banda y factor de reuso que los sistemas iniciales analógicos AMPS (30 kHz). D-AMPS utiliza una forma de modulación diferencial cuaternaria llamada $\pi/4$ -DQPSK, y la tasa de bits por usuario a nivel de capa física es de 16.1 kbps (3 usuarios por cada portadora).

Soporta datos a bajas velocidades, y su capacidad por celda aproximada (con un factor de reuso de 7) es de unos 14 canales por cada MHz de espectro.

Interfaz de Radio de GSM



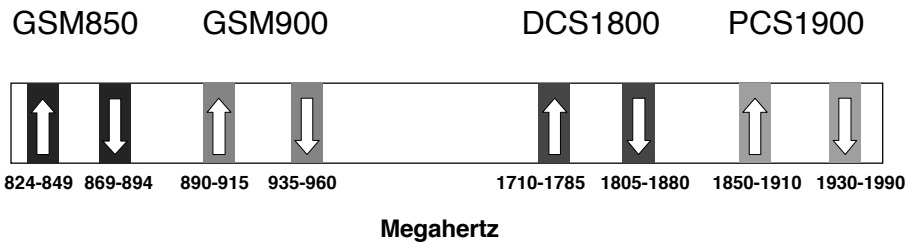
Banda	Multibanda	Número de Ranuras	8
Acceso Múltiple	FDMA/TDMA	Tiempo de Trama	4.615 ms
Dúplex	FDD	Codificación de Voz	Full-rate, Half-rate y Enhanced Half Rate
Separación entre portadoras	200 kHz	Codificación de Canal	CRC + Convolutacional
Tasa de Bits (PHY)	270.83 kbps	Datos	2.4, 4.8, 9.6 y 14.4 kbps
Número de Portadoras	Depende de la banda	Líneas Múltiples	No
Tasa de Bits por Usuario (PHY)	22.8 kbps	Radio de celda máximo	30 km
Modulación	0.3 - GMSK	Capacidad por celda por MHz	10 llamadas
Potencia del Móvil	0.8 - 20 W max	Año de Introducción	1991

GSM es un sistema TDMA con portadoras de 200 kHz. Soporta servicios de datos a velocidades bajas. Utiliza tres tipos de vocoder, pero el más comúnmente usado actualmente es el EFR (Enhanced Full Rate), de 12.2 kbps. Con un factor de reuso de $N=4$, soporta unos 10 (10) canales de voz por MHz por celda.

La tasa de bits a nivel de capa física es de unos 270.83 kbps, lo cual (al dividir por 8) representa unos 22.8 kbps por usuario.

La forma de modulación es fija (0.3-GMSK), y está diseñada de forma de ocupar unos 200 kHz de ancho de banda, que es de hecho la separación entre portadoras del sistema GSM.

Bandas GSM



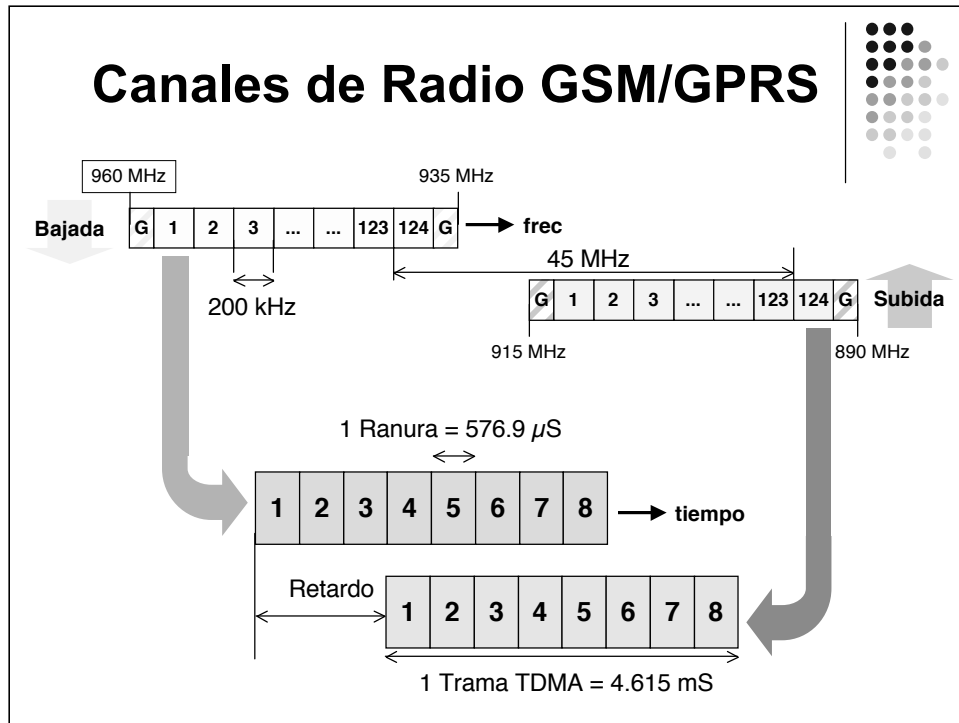
Actualmente GSM opera principalmente en una de cuatro bandas, mostradas en la gráfica.

La banda GSM900 fue la primera banda nativa del sistema. La banda DCS fue desarrollada en Europa con el fin de ampliar la capacidad.

La banda PCS fue desarrollada en USA pero existe en otros países del continente americano.

La banda de 850 MHz, de reciente desarrollo, ha permitido la migración de algunos operadores CDMA que poseen esa banda hacia GSM, especialmente en Latinoamérica.

Canales de Radio GSM/GPRS

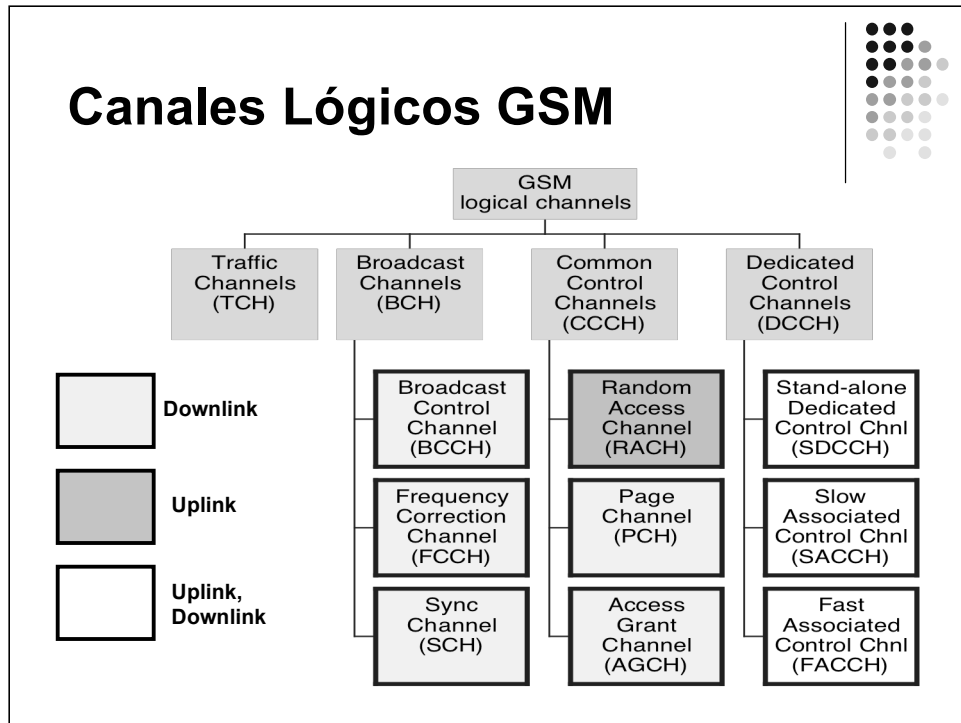


El estándar GSM900 fue publicado en julio de 1987. El primer sistema comercial estuvo en operación para 1991. GSM900 utiliza dos bandas de 25 MHz, que han sido dispuestas a un lado para el uso del sistema en todos los países miembros. La banda 890-915 MHz es utilizada para enlace de subida (MS a BTS) y la banda 935-960 MHz es utilizada para enlace de bajada (BTS a MS). Al igual que en el caso de IS-54-B, GSM utiliza una combinación de TDMA y FDMA para acceso múltiple: canales de frecuencia 124 200-kHz son definidos, y contenido en cada uno de ellos, se define una señal TDMA de 8 canales. Las bandas de subida y bajada son separadas por 45 MHz.

La reciente creación alrededor del mundo de bandas PCS han impulsado el desarrollo de un sistema técnicamente equivalente al GSM1800, también conocido como el DCS1800. Este sistema ofrece un incremento al triple en el número de canales, y por lo tanto, de la capacidad celular en relación con el GSM900. La separación de frecuencia en la banda GSM1800 es 95 MHz, pero el canal y la estructura del marco son idénticos al GSM900.

GSM también ha sido adaptado a la banda PCS Americana, con separación FDD de 80 MHz y estructura de marco idéntica. Recientemente ha habido actividad en dirección de lanzar opciones celulares (800MHz) para equipo GSM. Aun cuando diversos fabricantes han realizado anuncios de prensa, estos productos aun no son de amplia disponibilidad. GPRS opera en las mismas bandas de frecuencia que GSM.

Canales Lógicos GSM



GSM distingue los canales lógicos de los canales físicos. Un canal lógico se define en función del tipo de información que por allí se transporta. Los canales lógicos se mapean en canales físicos, los cuales representan los recursos físicos (frecuencia, ranura d et tiempo, etc) sobre los cuales se transmite la información por radio.

Los canales lógicos son de cuatro tipos:

- Los canales de tráfico son dedicados, existen tanto en subida como en bajada, y llevan el tráfico de voz o datos entre celda y móvil.
- Los canales de Broadcast o de difusión son sólo de bajada, y se dedican a llevar información de control que es de interés para todos los usuarios de una celda, es decir, son canales comunes.
- Los canales comunes de control también son compartidos entre todos los móviles de una celda/sector, pero llevan información de control desde/hacia un móvil en particular. Existen en subida (RACH) y en bajada (PCH, AGCH).
- Los canales dedicados de control, como su nombre lo indica son asignados a usuarios específicos, y llevan también información de control. Existen tanto en subida como en bajada.

GSM Broadcast Logical Channels



- Frequency Correction Channel (FCCH)
 - allows MSs to synchronize its internal oscillator to the exact BTS frequency and phase.
- Synchronization Channel (SCH)
 - Used by the MS to keep track of the frame timing to compensate for changing transmission delays.
- Broadcast Control Channel (BCCH)
 - used to continuously broadcast the network and cell identity, operating characteristics and parameters of the cell, and the list of GSM channels that are currently in use in the cell.

GSM physical channels are managed through various time-division multiplexing techniques. The resulting schemes create logical channels on the physical link. Logical channels can be traffic channels (used to transport speech or user data) and control channels.

The frequency correction channel (FCCH) allows MSs to synchronize its internal oscillator to the exact BTS frequency.

Due to variable propagation distance, the MS must keep track of the frame timing in order to compensate for changing transmission delays. The synchronization channel (SCH) identifies the serving BTS and allows the MS to align its frame timing to that of the BTS. Finally, the broadcast control channel (BCCH) is used to continuously broadcast the network and cell identity, operating characteristics and parameters of the cell, and the list of GSM channels that are currently in use in the cell.

GSM Common Logical Channels



- Paging channel (PCH)
 - provides page signals from the BTS to the mobiles in the cell, and notifies a specific mobile of an incoming call originated from the PSTN.
- Random Access Channel (RACH)
 - is a random-access channel used by the MS to respond to a page or to originate a call. Also used for registration and to request the transmission of an uplink SMS.
- Access Grant Channel (AGCH)
 - Used by the BTS to acknowledged RACH messages.

The paging channel (PCH) provides page signals from the BTS to the mobiles in the cell, and notifies a specific mobile of an incoming call originated from the PSTN. The random access channel (RACH) is a random-access channel used by the MS to respond to a page or to originate a call. The RACH connections are acknowledged by the BTS through the access grant channel (AGCH), which conveys information such as time slot assignment.

GSM Dedicated Logical Channels



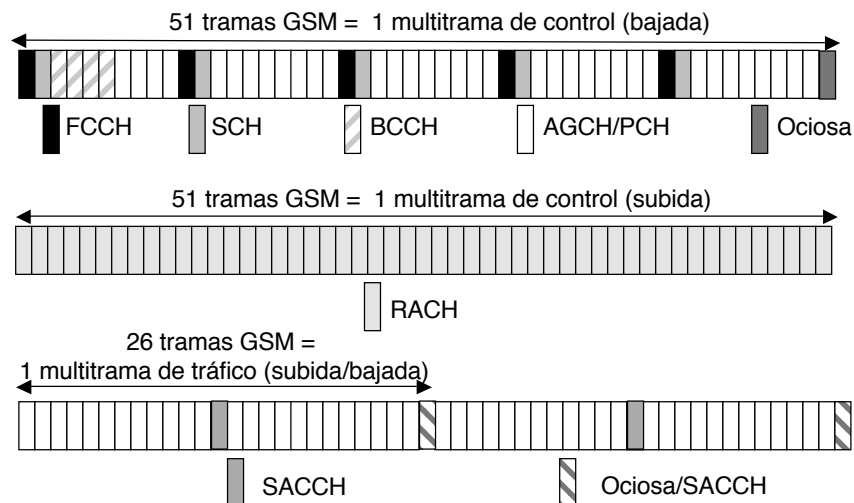
- Traffic Channels (TCH)
 - Carries data or voice traffic (up and downlink)
- Stand-alone Dedicated Control Channel (SDCCH)
 - Temporarily used before a traffic channel is assigned. Also used to carry SMS, and for location area updates.
- Slow Associated Control Channel (SACCH).
 - Basic control channel associated to each traffic channel
- Fast Associated Control Channel (FACCH)
 - Carries urgent messages (such as a handoff request) that are essentially similar to those carried by the SACCH.

The stand-alone dedicated control channel (SDCCH) is temporarily used by a MS right before a traffic channel is assigned, thus ensuring that it remains connected while the BTS verifies MS identity and allocates the necessary resources. SDCCH is also used for SMS and LA updates. Each traffic channel is associated with another channel used for signaling called the slow associated control channel (SACCH). It conveys control instructions to the mobile and measurement reports to the BTS. The fast associated control channel (FACCH) carries messages that are essentially similar to those carried by the SACCH. A FACCH is assigned whenever there is an urgent message, such as a handoff request or power control. FACCH is also used for call set-up over a traffic channel whenever there are no SDCCHs available.

The paging channel (PCH) provides page signals from the BTS to the mobiles in the cell, and notifies a specific mobile of an incoming call originated from the PSTN. The random access channel (RACH) is a random-access channel used by the MS to respond to a page or to originate a call. The RACH connections are acknowledged by the BTS through the access grant channel (AGCH), which conveys information such as time slot assignment. The frequency correction channel (FCCH) allows MSs to synchronize its internal oscillator to the exact BTS frequency.

Due to variable propagation distance, the MS must keep track of the frame timing in order to compensate for changing transmission delays. The synchronization channel (SCH) identifies the serving BTS and allows the MS to align its frame timing to that of the BTS. Finally, the broadcast control channel (BCCH) is used to continuously broadcast the network and cell identity, operating characteristics and parameters of the cell, and the list of GSM channels that are currently in use in the cell.

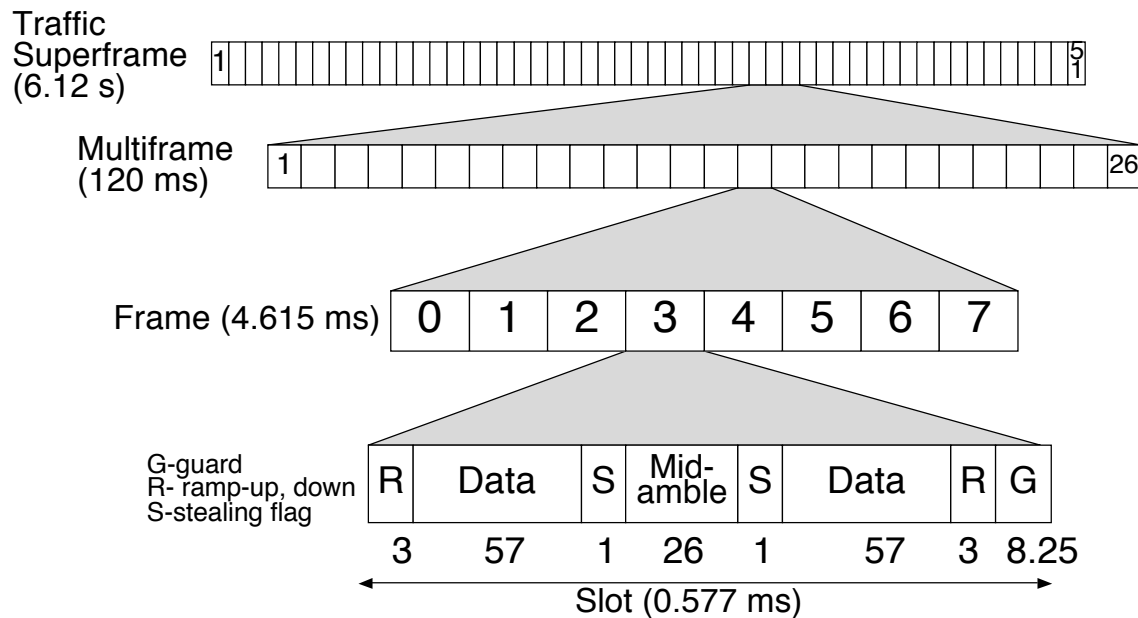
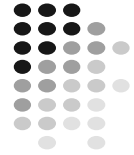
Multitramas de Tráfico y Control



La figura ilustra como se mapean los canales lógicos sobre los canales físicos GSM. Existen dos tipos de canales físicos: los de tráfico y los de control. Cada uno de ellos ocupa una ranura de una portadora GSM. Las ranuras de los canales físicos se organizan en el tiempo en las llamadas multitramas, que ocupan 51 tramas GSM (en el caso de los canales físicos de control) y 26 tramas (en el caso de los canales físicos de tráfico).

La trama ociosa dentro de la multitrama de tráfico permite al equipo móvil detectar o recibir cada cierto tiempo los canales FCCH y SCH, necesarios para mantener la sincronía de portadora y de trama. La relación numérica entre la periodicidad de los canales FCCH/SCH y de las ranuras ociosas (51:52) hace inevitable que eventualmente estas ranuras coincidan, permitiendo la recepción de estos canales.

GSM Normal Burst



The figure shows the format for one of the GSM bursts, as well as the frame and multiframe structure. This is a normal burst, which contains user data (e.g., speech). A different multiframe structure is used for the common control channels, which are transmitted in slot 0 of the physical control channel. The downlink control multiframe contains the SCH, the FCCH, the PCH, the AGCH and the BCCH. The uplink control multiframe contains the RACH.

The 13th and 26th frames of a normal (data) multiframe are not used for traffic, but for control and synchronization purposes. Each frame consists of 8 slots, each one assigned to a different user. Each slot contains a total of 155.25 bits, which run at the channel rate, 270.8333 kbps. The last 8.25 bit periods are not used (guard time). Each burst contains 114 bits of coded data. Stealing flag bits are used to indicate whether the corresponding 57-bit data block contains user data (e.g. speech) or signaling information (FACCH messages). The midamble bits are training bits used by the receiver equalizer for adaptation.

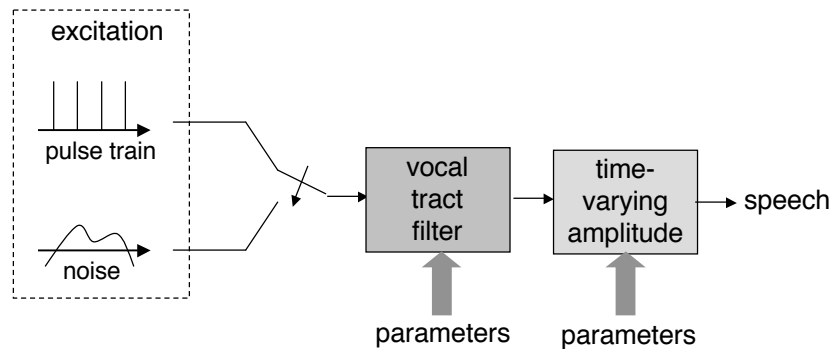
Ejercicio 3.1



- Sabiendo que el SACCH se transmite utilizando los bits de DATA de la ráfaga GSM, encuentre la tasa efectiva de bits de ese canal.

Solución:

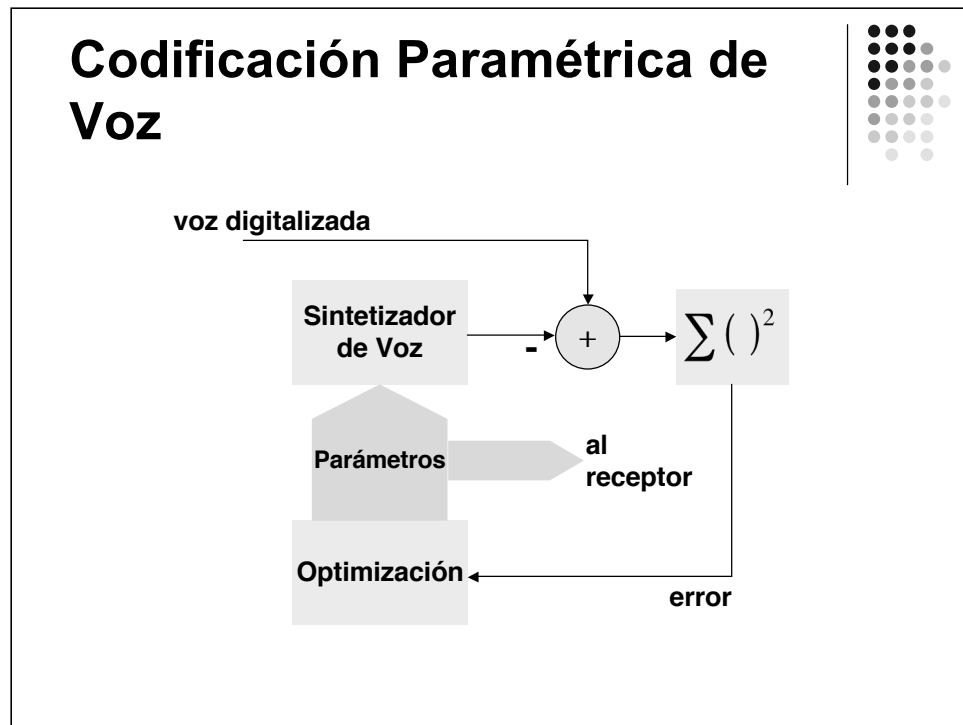
A model for speech generation



The slide presents a popular and simple model for speech generation. The excitation acoustic signals are produced at the lung and the glottis, and they can be either a periodic train pulse (voiced sounds) or noise (unvoiced sounds). These are processed by the vocal tract and the mouth/nose/lips, which comprise an acoustic system with a certain response that can be modeled as a linear system. Next, a time-varying amplifier is used to dynamically control the amplitude of the produced signal.

This model can be used as the basis for a digital speech compression scheme. By representing the speech signal with the relevant information (type of excitation, vocal tract parameters, amplitude), it is possible to eliminate the redundancy that is present in the speech signal and therefore reduce the information rate. A speech coder based on the model presented is called a Linear Predictive Coder (LPC) or vocoder.

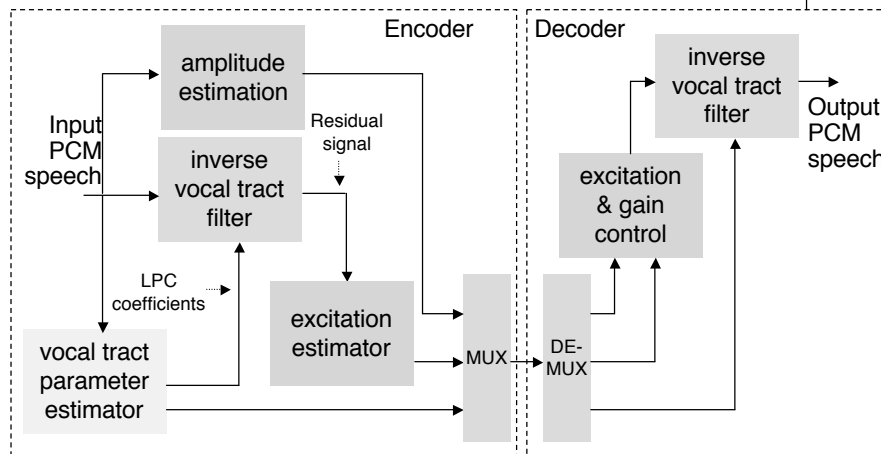
Codificación Paramétrica de Voz



Los esquemas más eficientes para la compresión de voz se basan en el principio de Análisis por Síntesis o codificación paramétrica mostrado en la gráfica. En codificación paramétrica, el codificador en lugar de intentar codificar la señal de voz se encarga de extraer parámetros de ella, como se muestra. Las velocidades de bit que se logran en este caso están en el rango de 5 a 15 kbps.

Todos los sistemas digitales a partir de la segunda generación emplean un codificador paramétrico en alguna de sus variantes.

Speech Linear Predictive Coding



The encoder of a linear-predictive speech coder first estimates the vocal tract parameter (LPC coefficients) and uses them to inverse-filter the input speech signal. This produces an output which resembles the excitation signal of the model presented previously. This residual signal is used to estimate the type and parameters of the excitation signal. The LPC parameters, together with the excitation estimation and the amplitude estimation are time multiplexed and sent to the receiver. The decoder reproduces the signal using the received parameters and the model for speech generation. The system is much more affected by errors than most waveform coders. Coded frames are often discarded when errors are detected at the receiver.

One of the US standards for LPC speech coding is FS-1015 (1977), with an output rate of 2.4 kbps and a MOS performance of 2.3. LPC coding is also the basis for a popular family of speech coders based on standardized excitation pulses called Codebook Excited Linear Predictive (CELP) coders, and Residually-Excited Linear Predictive Coding (RELP). Most digital wireless telephony system employ some variant of these types of coding, which offers a much better quality than LPC (MOS ranging from 3.5 to 4.3), at the expense of increased data rates (around 10 kbps).

GSM Voice Codecs

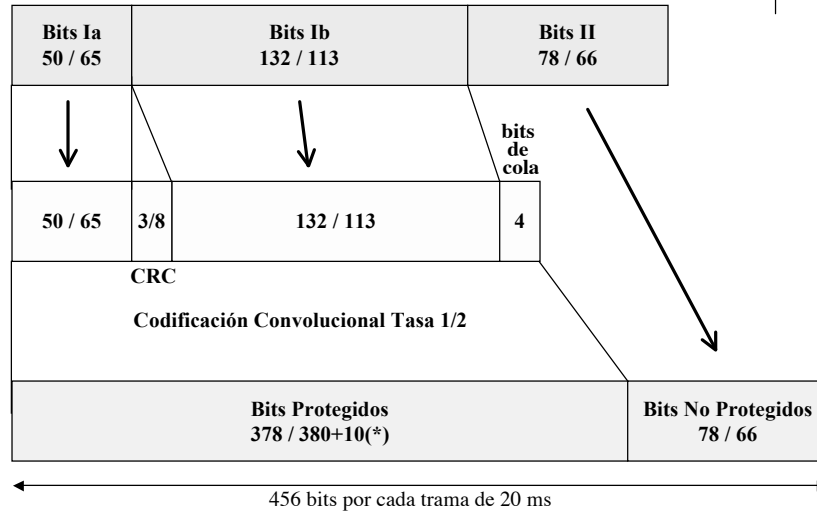


Nombre	Año	Tasa de bits	Técnica	MOS	Bits por trama (20 mS)
Full Rate	1991	13 kbps	Regular Pulse Excitation-Long Term Prediction (RPE-LTP)	3.5	260
Half Rate	1995	5.6 kbps	Vector-Sum Excited Linear Prediction (VSELP)	3.3	112
Enhanced Full Rate (EFR)	1997	12.2 kbps	Adaptive Codebook-Excited Linear Prediction (ACELP)	4.2	244

Se muestran los tres vocoders que históricamente ha usado el sistema GSM. El primero de ellos (Full Rate), así como el Half Rate, tenían una calidad de voz bastante regular, por lo cual fueron reemplazados por el más eficiente EFR (Enhanced Full Rate), el cual tiene una calidad comparable con la de las líneas telefónicas convencionales.

La ventaja del vocoder Half Rate es que permite duplicar la capacidad de voz del sistema.

Protección contra errores (FR / EFR)



(*) Repetición selectiva

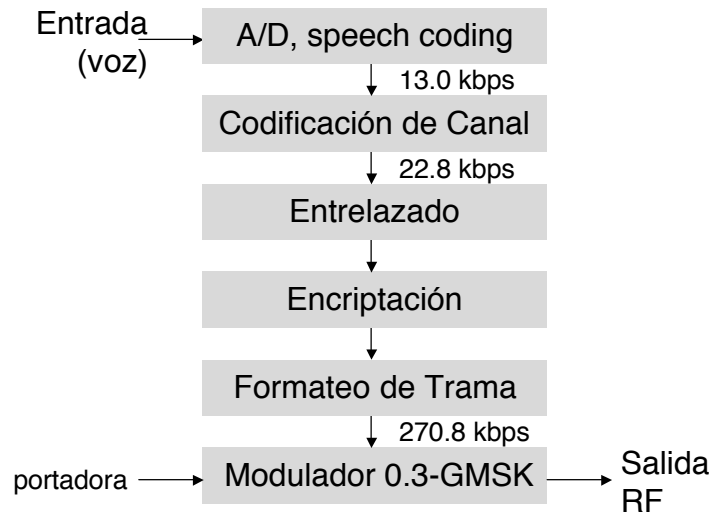
Se muestra la estructura del esquema de protección contra errores de las tramas de voz GSM, el cual aplica una técnica llamada Protección Desigual contra Errores, y distingue entre tres tipos de bits:

Bits Ia: Llevan información esencial del codificador de voz, y son protegidos por el código convolutivo y por un CRC. Si el detector determina que los bits Ia están errados, la trama de voz se descarta.

Bits Ib: Llevan información importante del codificador de voz, pero no esencial; son protegidos por el código convolutivo únicamente.

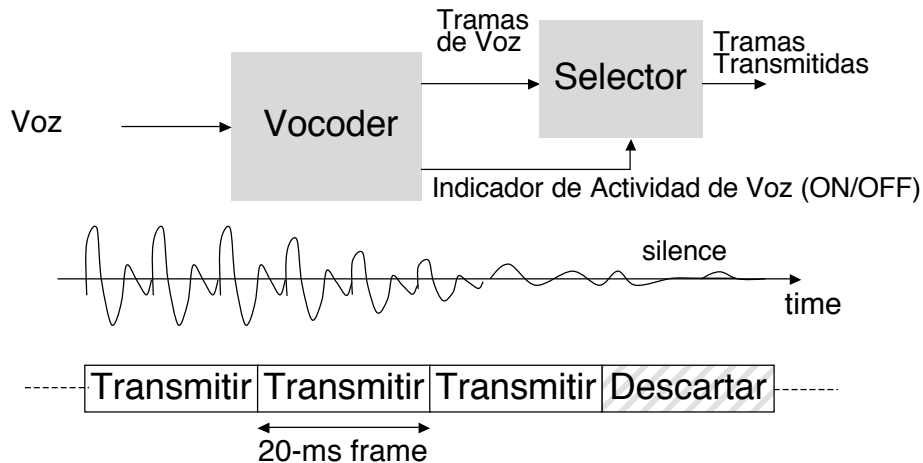
Bits II: Llevan información secundaria del vocoder, y no van protegidos. Al igual que los bits IB, se usan siempre, en el estado en que sean recibidos.

Procesamiento de un canal de Tráfico GSM



The signal processing involved in generating a GSM traffic channel burst is very similar to that employed in IS-54-B. The speech signal is first converted to digital format, and then compressed using the RELP speech coder down to a rate of 13 kbps. The channel coder introduces redundancy by adding parity check bits and by passing the signal through a rate-1/2 convolutional encoder. The coding process, as in IS-54-B, employs different coding levels depending on the importance of the source bits. Interleaving is done on a sub-block basis. The total of 456 bits of encoded data from one 20-ms frame are divided into eight 57-bit sub-blocks. The 16 sub-blocks from two consecutive frames are then diagonally interleaved, with the result of having two sub-blocks from different speech frames on each channel slot. Ciphering modifies the contents of the interleaved blocks through the use of encryption techniques known only to the particular MS and the serving BTS. Security is further enhanced by having the encryption algorithms change from call to call. The burst formatting adds midamble and framing bits, bringing the total bit rate up to 32.1 kbps. The 0.3-GMSK modulation scheme is a special form of Frequency Shift Keying (FSK) modulation that exhibits a smooth spectrum with fast-decaying skirts and reduced out-of-band energy. The parameter $BT=0.3$ indicates that the 3-dB bandwidth of the signal is $0.3/T$, where T is the bit time. This results in a 3-dB bandwidth of 81 kHz. The spectral side band attenuation at the edge of the 200-kHz band is about 20 dB.

Transmisión Discontinua de Tramas de Voz en GSM



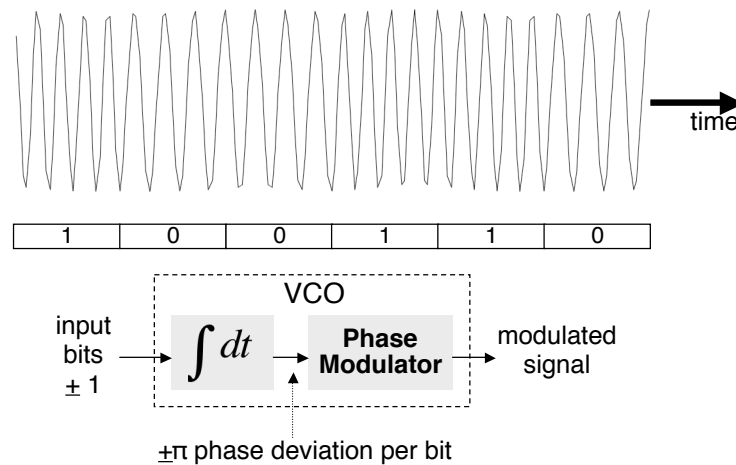
The GSM coder takes advantage of the fact that, in a normal conversation, each person speaks on average for about 40% of the time. By using a Voice Activity Detector (VAD) in the speech coder, GSM systems operate in a *discontinuous transmission mode* (DTX), which provides a longer subscriber battery life and reduces radio interference, both co-channel (on other cells using the same carrier frequency) and adjacent-channel (on same- and other-cells using adjacent carrier frequencies). This is achieved by simply deactivating the transmitter during silence periods. A comfort noise subsystem (CNS) at the receiving end introduces an artificial background noise to reduce the annoying effect when muting occurs due to DTX. DTX is a GSM operator option.

Ejercicio 3.2



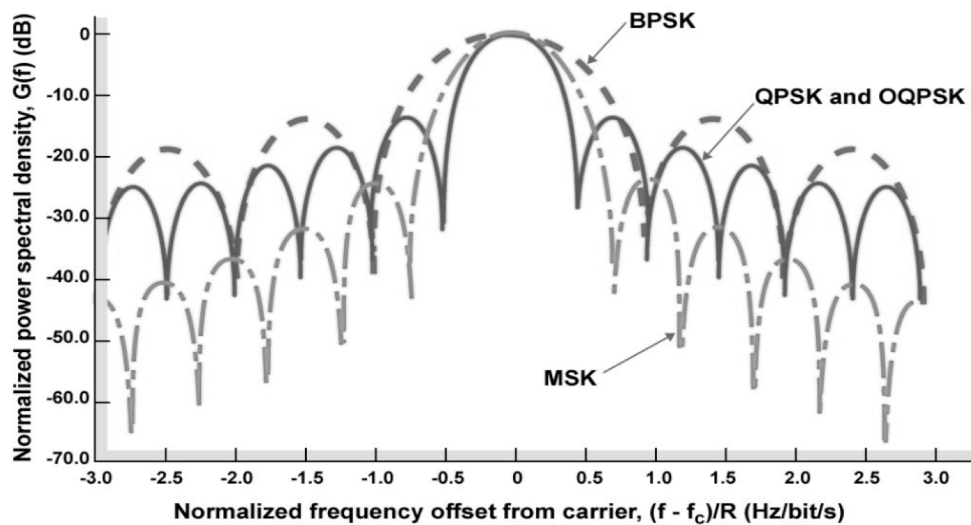
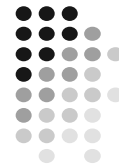
- Determine el número de ráfagas GSM sobre las cuales se transmite una trama de voz, y verifique el número de ráfagas que quedan ociosas dentro de una multitrama de tráfico.

Minimum Shift Keying



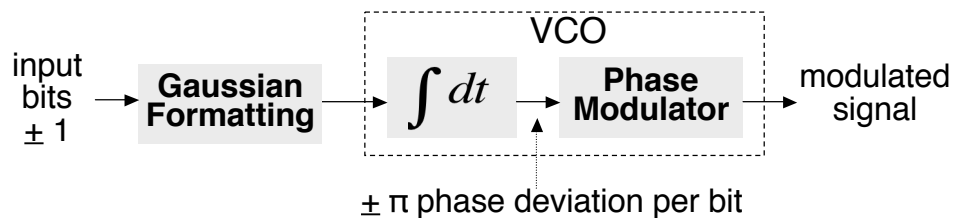
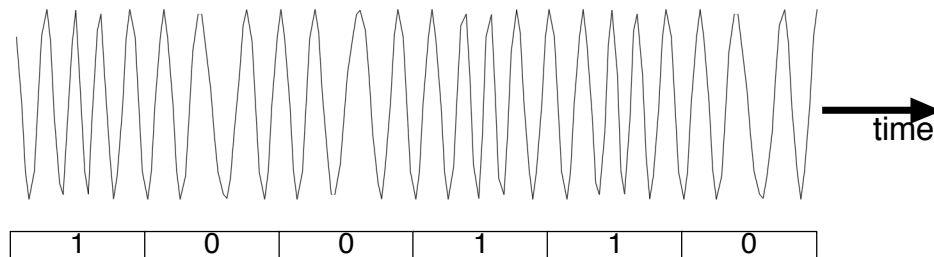
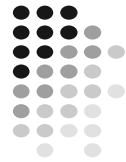
Minimum-shift keying modulation is a continuous-phase FSK (CPFSK) modulation scheme in which the frequency separation between sub-carriers is set to the minimum possible so that the spectrum can be compacted to its maximum and data can still be recovered. Such a frequency separation can be found to be one half the bit rate. This forces the phase deviation produced by each bit to be exactly $\pm \pi$ depending on the polarity of the bit. The phase trajectory within a bit slot is piecewise linear, and the overall waveform shows smooth transitions in between sub-carriers. This features make the spectrum a highly compact one, with side-lobes decaying much faster than those of an FSK signal.

MSK Spectrum



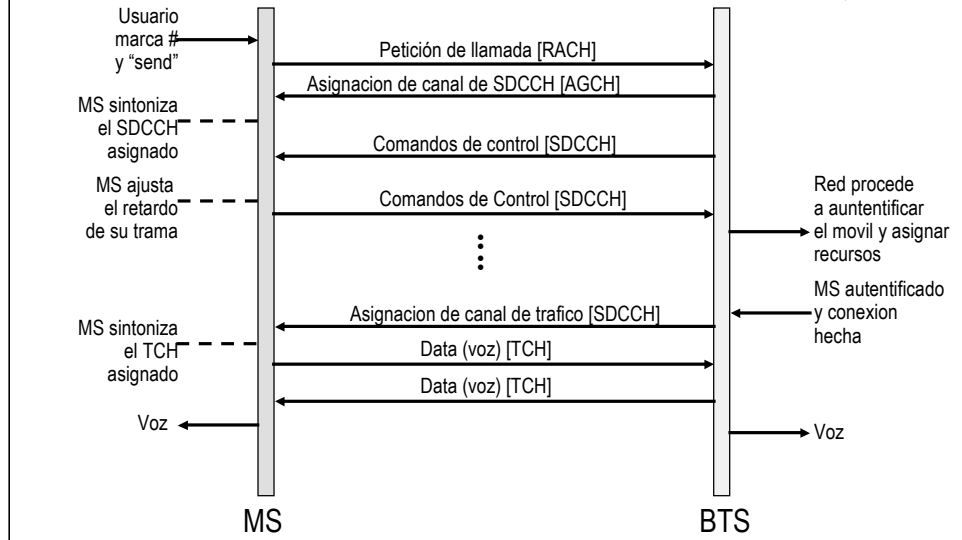
The slide displays the (baseband) power spectra of the MSK and QPSK signals. Although the main lobe of GMSK occupies about $0.7/T$, more than $0.5/T$ occupied by the QPSK main lobe, it is clear that the MSK spectrum decays much faster. GMSK has a similar spectrum to that of MSK, with increasing spectral compacting for larger values of the parameter BT .

Gaussian MSK (GMSK)



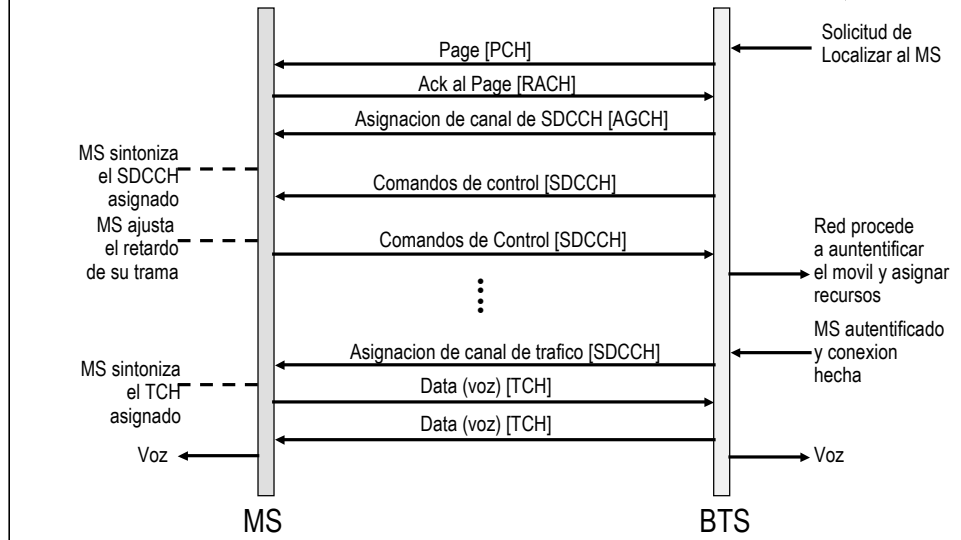
When Gaussian formatting is introduced at the input of an MSK modulator, a GMSK signal is obtained. Such a process has the effect of further compacting the signal spectrum, and further reducing its out-of-band energy. The wider the Gaussian pulse, the narrower the spectrum, and the higher the ISI over adjacent bits. Usually an intermediate trade-off solution is chosen for the pulse width. The pulse width is controlled through the 3-dB-bandwidth*bit-time product (BT). The phase trajectory still takes on the same values as MSK at the bit slot boundaries, although instead of piecewise linear, it has a smoother shape. By virtue of its powerful spectrum compactation feature, GMSK is the modulation of choice in important wireless systems such as GSM/GPSR and the wireless LAN European standard called HIPERLAN.

Ejemplo de una llamada GSM (originación)



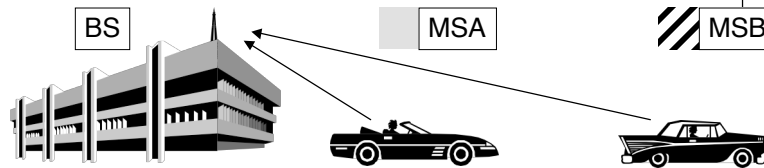
La lámina ilustra el flujograma de una llamada GSM originada en el móvi.

Ejemplo de una llamada GSM (terminación)



La lámina ilustra el flujograma de una llamada GSM terminada en el móvi.

Alineación de Trama en Subida



Sin Alineación de Tramas

Con Alineación de Trama

T_a = Tiempo de avance de ráfaga (transmitido en el SCH y SACCH)

The slide displays the effect of time slot overlap at the BS due to different propagation delays. By introducing an extra time delay to the nearest MS (T_a), the system is able to eliminate the overlap. In order to estimate the value of this extra delay, the BS measures the delay in the uplink SDCCH burst.

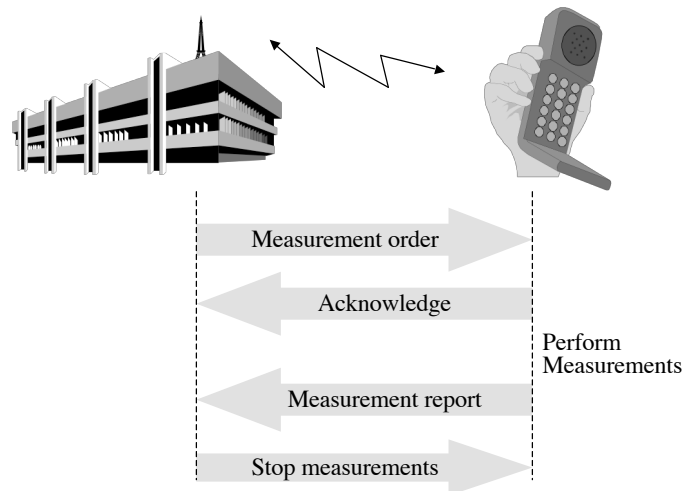


Ejercicio 3.3

- El alcance máximo de una celda GSM está en el orden de 30 km.
- (a) Calcule el máximo T_a que deberá aplicarse a la ráfaga de un móvil con el fin de ajustar su sincronía.
- (b) Exprese este número como una fracción del tiempo de ranura.

Solución:

Mobile-assisted handoff (MAHO)



Unlike AMPS, in which the mobile station does not participate or make decisions about handoff, 2G systems define the mobile-assisted handoff (MAHO), which is used to make the handoff process more efficient and faster. In this situation, the mobile station measures the quality of the forward traffic channel in relation to other channels coming from neighboring BTSs. It performs these operations during idle times not involved in sending or receiving data. The measurements are done on channels specifically requested by the BTS on the measurement order message, and reported back. In turn, the BTS uses this information to decide if handoff is to be implemented. This modification to the traditional AMPS operation reduces signaling substantially because neighboring cells do not have to measure the MS energy. MAHO also enables the call to be handled at a much faster rate. MAHO is particularly suited for microcellular environments, where handoff is more frequent. All second generation systems employ some form of MAHO.

Salto de Frecuencia



- Opción implementada cuando los niveles de interferencia son elevados.
- También permite combatir el desvanecimiento selectivo en frecuencia del canal de radio.
- Operador define una “hopping list” para las BTSs más afectadas por la interferencia.
 - Lista contiene las frecuencias sobre las cuales se la transmisión va a “saltar” (max 64, típicamente 5-15).
 - Portadoras que llevan la trama de control no saltan.
 - Saltos se hacen cada trama (217 por segundo) siguiendo un patrón pseudoaleatorio.

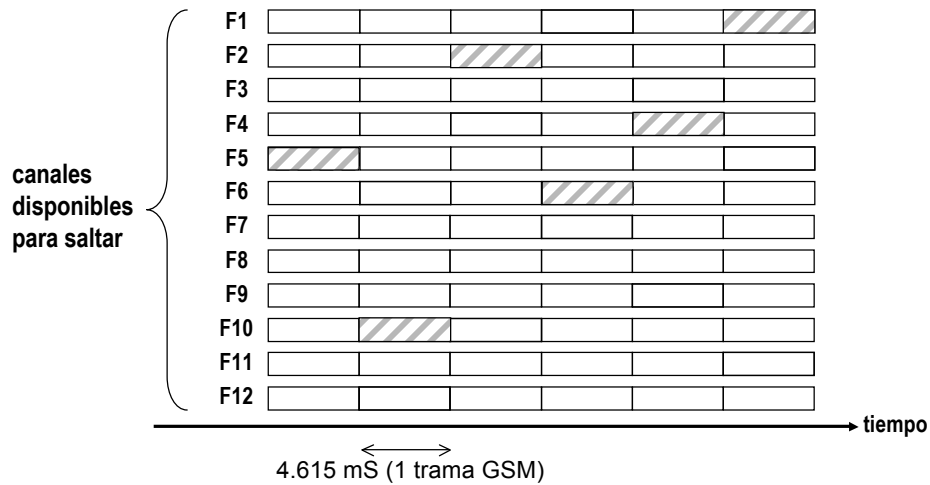
El salto de frecuencia es una técnica implementada en redes GSM cuando los niveles de interferencia son elevados, cuando se desea reducir el factor de reuso, También permite combatir el desvanecimiento selectivo en frecuencia del canal de radio.

El operador define una “lista de salto” o “hopping list” sobre las cuales la transmisión/recepción va a saltar (máximo 64 portadoras, valores típicos son entre 5 y 15).

Las portadoras que llevan la trama de control nunca saltan, ya que su ubicación en una frecuencia predeterminada es crítica para el correcto funcionamiento de los mecanismos de acceso, relevo y paging.

Los saltos en GSM se hacen cada trama (4.615 ms).

Técnica de Salto de Frecuencias



La técnica de salto de frecuencia se usa en GSM con el fin de combatir el desvanecimiento y mejorar el manejo de la interferencia. Consiste en que cada trama GSM (1/217 segundos) se transmite a una frecuencia distinta y prefijada. Tanto el móvil como el transreceptor (TRX) de la celda saltan coordinadamente de frecuencia.

Tipos de Salto



Salto de Frecuencia en GSM

Salto Banda Base

- Cada TRX de la celda usa una frecuencia fija
- Señales desde/hacia cada móvil se alternan en el uso de los TRX de forma periódica
- Involucra todos los TRX de cada sector, excepto el que transmite la trama de control, la cual no salta.
- Esta variante no requiere de planificación adicional (solo convencional)

Salto en RF

- Señales desde/hacia cada móvil usan un TRX fijo
- Cada TRX de la celda varía su frecuencia de acuerdo a un patrón pseudoaleatorio
- Ranura también varía pseudoaleatoriamente
- Saltos se producen sobre una "lista de saltos" que contiene las frecuencias permitidas para saltar
- La "lista de saltos" debe planificarse adecuadamente

El salto de frecuencia se puede implementar de forma sencilla usando lo que se conoce como saltos en banda base. En esta variante, cada TRX de la celda transmite siempre a la misma frecuencia, pero las señales dedicadas a cada móvil se alternan en el uso de los TRX siguiendo un patrón cíclico. En el caso de la portadora que contiene la trama de control, ésta siempre se envía desde el mismo TRX, lo cual implica que los canales asociados a esta portadora no se benefician de la técnica. La ventaja de esta variante es que no requiere de planificación adicional a la planificación de frecuencias ya explicada.

En el caso de la variante de saltos en RF, las señales de cada móvil se transmiten y envían desde un TRX fijo, el cual varía su frecuencia siguiendo un patrón pseudoaleatorio que es conocido tanto por el móvil como por la celda. De forma similar al caso anterior, el TRX que contiene la trama de control no salta de frecuencia. En este caso, los saltos se van a producir sobre una lista de canales disponibles conocida como "hopping list" o "lista de saltos", la cual debe ser planificada adecuadamente de manera de minimizar la probabilidad de que dos sectores o celdas cercanos colisionen al usar una misma frecuencia de forma simultánea.

Ejercicio 3.4



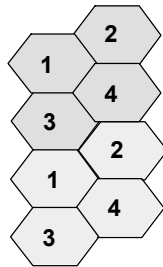
- Un sistema GSM se va a desarrollar con un factor de reuso 4/12 en la banda de 900 MHz. Se dispone de 52 portadoras.
 - (a) Calcule el número máximo de llamadas que puede manejar una celda.
 - (b) Si se usa saltos de frecuencia en banda base, encuentre el número máximo de frecuencias sobre las cuales puede saltar la señal de un móvil.
 - (c) Repita (b) si se usa saltos de frecuencia en RF.

Solución:

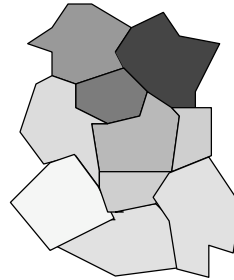
Planificación Frecuencial en GSM



Planificación Frecuencial Convencional

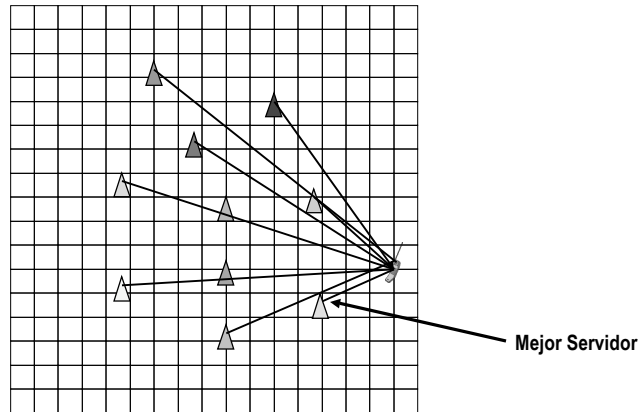


Planificación Frecuencial por "rejilla"



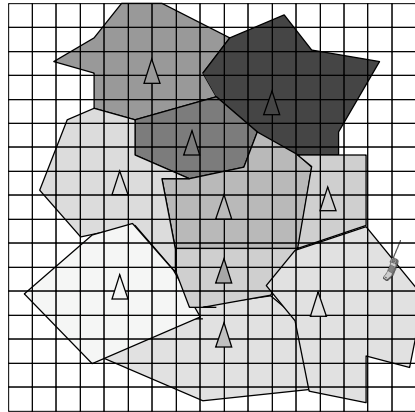
En GSM se suelen emplear métodos de asignación de frecuencia similares a los explicados en la lección anterior para el caso de TDMA IS-136. Sin embargo, con el fin de ilustrar una metodología distinta, vamos a estudiar ahora un método alternativo en el cual la configuración de las celdas no se asume hexagonal regular.

Método de la “rejilla”



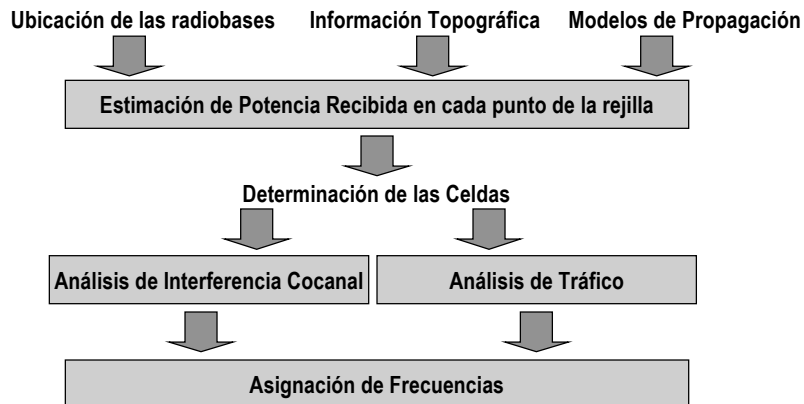
El método de la “rejilla” comienza por ubicar tentativamente las radiobases, y aplicar una rejilla cuadrangular muy fina a la zona a cubrir. Posteriormente, usando modelos de propagación adecuados junto con información topográfica, se procede a estimar la potencia recibida en cada punto de la rejilla desde cada radiobase.

Celdas irregulares



El cálculo del “mejor servidor” se repite en todos los puntos de la rejilla, dando como resultado un dibujo similar al que se muestra, en el cual cada celda viene dada por aquellos puntos en los cuales el mejor servidor es una determinada radiobase. El siguiente paso consiste en la asignación de frecuencias como tal.

Resumen del Método de la Rejilla



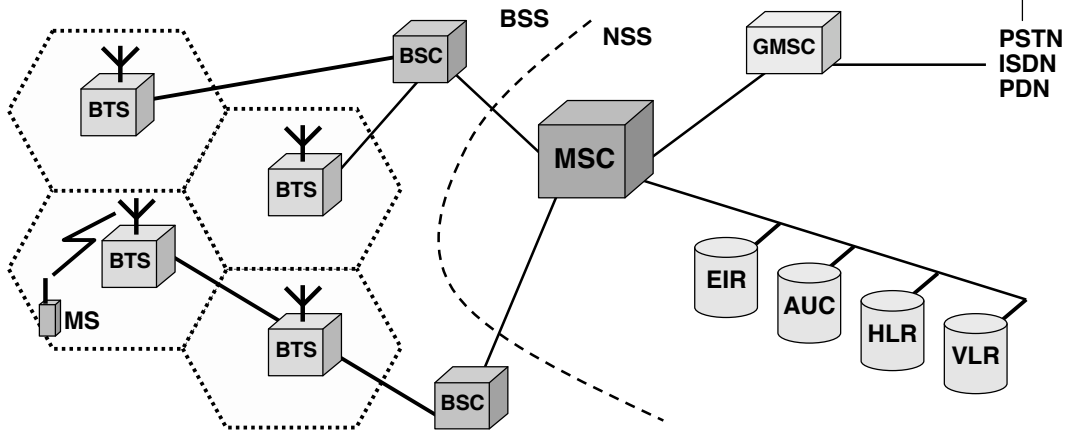
Se muestra un resumen simplificado del método de la rejilla. La asignación de frecuencias, como se observa, se basa en consideraciones tanto de interferencia como de tráfico. Este proceso final de asignación se efectúa siguiendo distintas técnicas heurísticas o evolutivas que buscan una asignación óptima.

Resumen de Técnicas de Asignación de Canales



Se muestra un resumen de las técnicas más usadas para asignación de canales y planificación frecuencial usadas en los sistemas TDMA (IS-136 y GSM), desde la más sencilla (celdas hexagonales con un patrón regular), pasando por el métodos dinámicos y de celdas irregulares, hasta llegar a los saltos de frecuencias (sólo GSM).

Arquitectura Básica GSM



BTS: Base Station Transceiver
 BSC: Base Station Controller
 HLR: Home Location Register
 VLR: Visitor Location Register

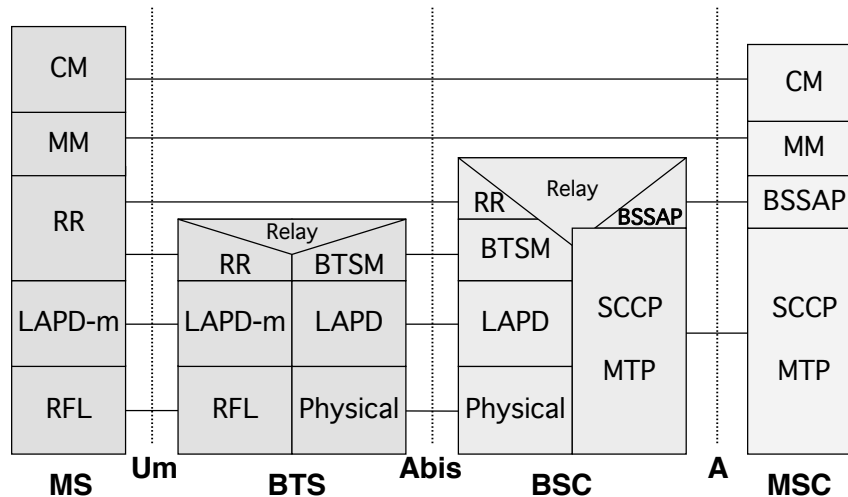
MSC: Mobile Switching Center
 GMSC: Gateway MSC
 EIR: Equipment Identity Register
 AUC: Authentication Centre

EIR: Equipment Identity Register
 PSTN: Public Switched Telephone Network
 ISDN: Integrated Service Digital Network
 PDN: Packet Data Network (e.g., Internet)

The block diagram shows the system architecture of a GSM public land mobile network (PLMN) with essential components. A GSM mobile station is denoted as MS. The MS is the physical equipment used by a subscriber. It contains a small card or plug-in device called the Subscriber Identity Module (SIM), which is used to store all subscriber related information. A cell is formed by the radio area coverage of a base transceiver station (BTS). Several BTSs together are controlled by one base station controller (BSC). The BTS and BSC together form the base station subsystem (BSS). The BSS terminates the radio path in the network side. It communicates with the mobile station and connects to the mobile switching center through an interface termed the A interface. The combined traffic of the mobile stations in their respective cells is routed through a switch, the mobile switching center (MSC). The MSC is an exchange that performs all the switching and signaling functions for mobile stations located in a geographical area designated as the MSC area. Connections originating from or terminating in the fixed network (e.g., ISDN) are handled by a dedicated gateway mobile switching center (GMSC). GSM networks are structured hierarchically. They consist of at least one administrative region, which is assigned to a MSC. Each administrative region is made up of at least one location area (LA). A location area consists of several cell groups. Each cell group is assigned to a BSC.

Several data bases are available for call control and network management: the home location register (HLR), the visited location register (VLR), the authentication center (AUC), and the equipment identity register (EIR).

Protocolos GSM (control)



Se muestran las pilas de protocolos GSM en el plano de control:

Capa Física

RFL + RF Layer (capa de RF)

Physical: enlaces dedicados (microondas, fibra óptica, etc)

MTP1: Message Transfer Part Layer 1

Capa de Enlace

LAPD-m: Link Access Procedures on the D Channel -mobile

LAPD: Link Access Procedures on the D Channel

MTP2: Message Transfer Part Layer 2

Capas Superiores (También llamadas "capa 3")

RR: Radio Resource management

MTP3: Message Transfer Part Layer 3

BTSM: Base Transceiver Station Management

SCCP: Signaling Connection Control Part

BSS AP: BSS Application Part

MM: Mobility Management

CM: Call Management

Funcionalidades GSM



- RR (Radio Resource)
 - Asignación, reasignación y configuración de canales
 - Acceso
 - Voceo (paging)
 - Handover (relevo)
 - Control de potencia
 - Terminación de llamadas
- MM (Mobility Management)
 - Seguimiento de la ubicación de los móviles
 - Autenticación y seguridad
- CM (Call Management)
 - CC (call control)
 - Manejo de Servicios Suplementarios
 - SMS
 - Selección del tipo de servicio

Las redes GSM están diseñadas para ofrecer tres grupos básicos de funcionalidades:

-Radio Resource Management, es decir, la gestión de los recursos de radio de la interfaz de aire.

-Mobility Management, es decir, ofrecer servicios a los móviles de la red independientemente de su ubicación.

-Call Management, la cual cubre todo el procesamiento de llamadas de voz (control de llamadas), así como de otros servicios.

Identificadores GSM



- International MS Equipment Identity (IMEI)
 - Identifica las MS internacionalmente
 - Es un tipo de serial electrónico
- International Mobile Subscriber Identity (IMSI)
 - Identifica al suscriptor de forma única
 - Se guarda en el Identity Module (SIM) card
- Mobile Station ISDN Number (MSISDN)
 - Número de Teléfono de la estación móvil
 - Se asigna a cada SIM de cada suscriptor
- Temporary Mobile Subscriber Identity (TMSI)
 - Asignado por la VLR, válido solo dentro de su área
 - No es permanente, y por ello no se pasa a la HLR

GSM distinguishes explicitly between user and equipment and deals with them separately. In addition to phone numbers and subscriber and equipment identifiers, several other identifiers have been defined; they are needed for the management of subscriber mobility and for addressing of all the remaining network elements.

The international mobile station equipment identity (IMEI) uniquely identifies a mobile station internationally. It is similar to a serial number. The IMEI is allocated by the equipment manufacturer and registered by the network operator who stores it in the EIR.

Each registered user is uniquely identified by its international mobile subscriber identity (IMSI). It is stored in the subscriber identity module (SIM) (see Fig. 1). A mobile station can only be operated if a SIM with a valid IMSI is plugged into equipment with a valid IMEI.

The "real telephone number" of a mobile station is the mobile subscriber ISDN number (MSISDN). It is assigned to the subscriber's SIM. A mobile station set can have several MSISDNs depending on the SIM that is inserted in it.

The VLR, which is responsible for the current location of a subscriber, can assign a temporary mobile subscriber identity (TMSI) which has only local significance within the area handled by the VLR. It is stored on the network side only in the VLR and is not passed to the HLR.

Once inactive, a VLR can reuse a TMSI number by reassigning it to another MS.

Tarjeta SIM



- Dispositivo de memoria R&W que puede ser removible, el cual identifica al suscriptor GSM
- Información guardada en el SIM incluye:
 - número de identificación suscriptor IMSI
 - identificación de los países y las redes donde puede obtener servicio
 - claves para privacidad
- Terminal GSM no funciona sin SIM
 - usuarios pueden emplear su SIM card en teléfonos diferentes



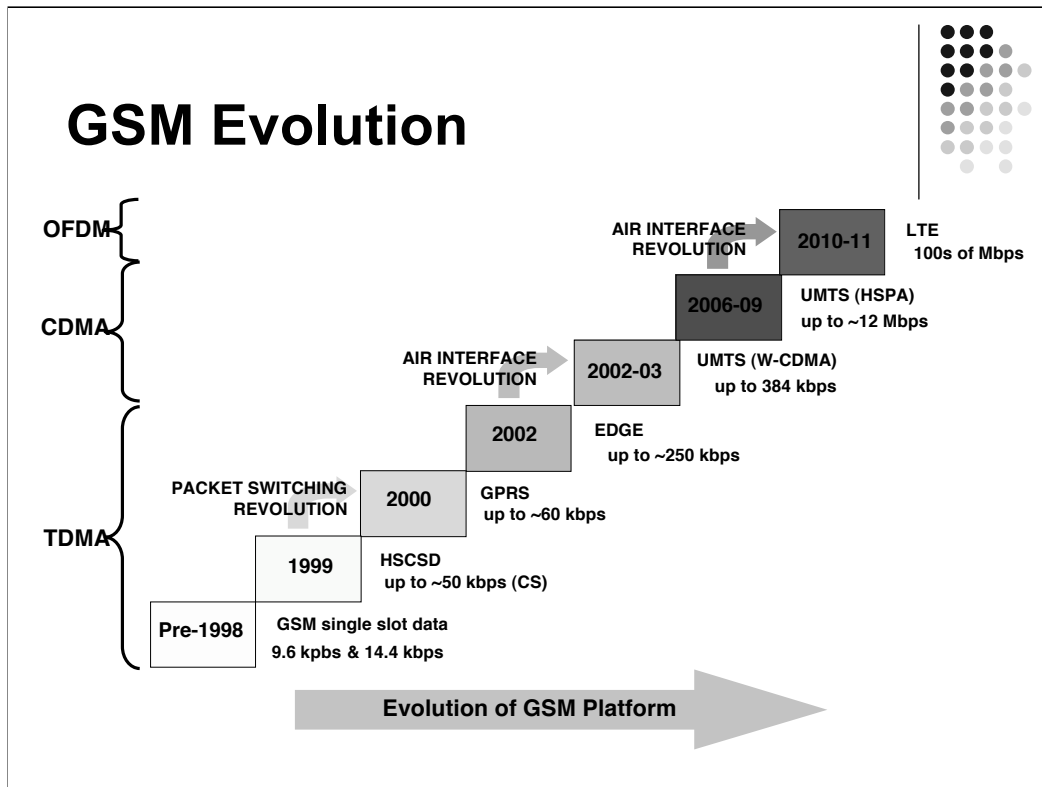
La tarjeta SIM es un dispositivo de lectura/escritura que puede ser removible, pero sin el cual un teléfono GSM no puede obtener servicio.

La tarjeta SIM identifica al suscriptor, y entre la información guardada en ella se cuenta:

El número de identificación suscriptor IMSI

La identificación de los países y las redes donde puede obtener servicio

Las claves para privacidad



GSM evolution:

GSM single slot data (Pre-1998).

HSCSD: High Speed Circuit-Switched Data.

GPRS: General Packet Radio System.

EDGE: Enhanced Data Rates for GSM Evolution.

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System.

W-CDMA: Wideband CDMA.

HSPA; High Speed Packet Access.

LTE: Long-Term Evolution (pre-4G).

Benefits of Packet-Switched data



- Circuit switched connections require a time-consuming access and channel set-up process in order to be initiated.
- Packet switched data can be transported over the air interface less than one second after it is ready for transmission.
- Circuit switched connections remain active even after packet data has been transmitted, thus consuming valuable capacity.
- Packet switched data (either on dedicated or common channel) consumes capacity only while it is actually being transmitted.

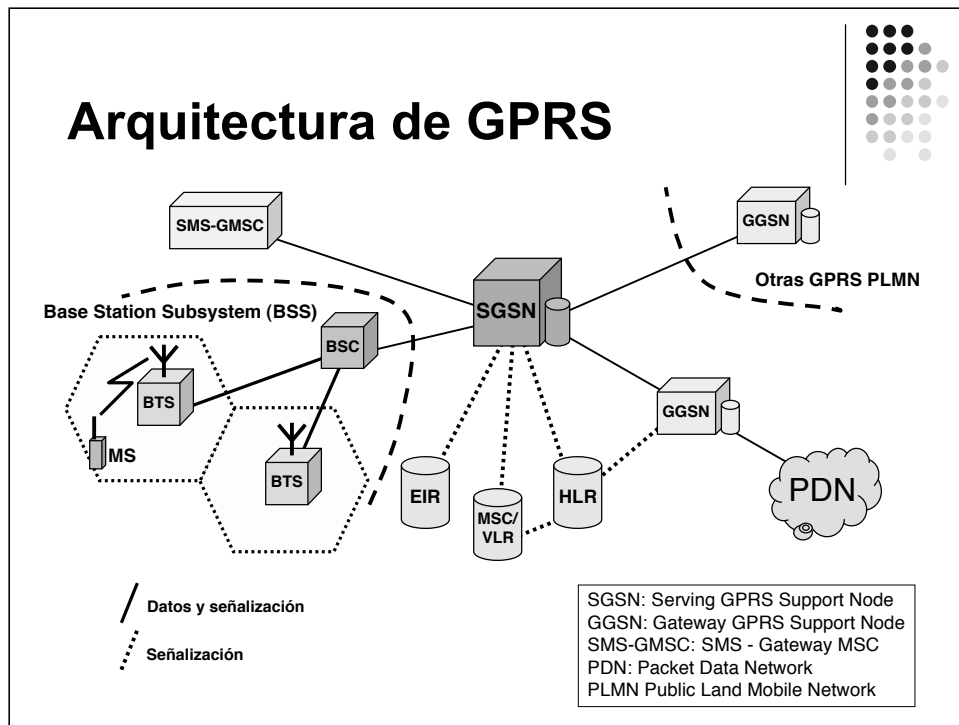
A summary of the benefits of packet-switched data over cellular networks:

- Circuit switched connections require a time-consuming access and channel set-up process in order to be initiated.
- Packet switched data can be transported over the air interface less than one second after it is ready for transmission.

Circuit switched connections remain active even after packet data has been transmitted, thus consuming valuable capacity.

Packet switched data (either on dedicated or common channel) consumes capacity only while it is actually being transmitted.

Arquitectura de GPRS



In order to integrate GPRS into the existing GSM architecture, a new class of packet network nodes called GPRS support nodes has been introduced. GSNs are responsible for the delivery and routing of data packets between the mobile stations and the external packet data networks (PDN), as illustrated in the slide. Accordingly, several new interfaces have been defined as shown in the next slide. The BSC directs regular GSM traffic to its serving MSC, and all GPRS traffic is sent to the SGSN. The SGSN is responsible for the delivery of packets to/from MSs within the service area. The GGSN acts as a logical interface to external packet networks. Within the GPRS network, PDUs are encapsulated at the originating GSN and decapsulated at the destination GSN. In between GSNs, the Internet Protocol (IP) is used as the backbone to transfer PDUs. This whole process is defined as *tunneling* in GPRS. The GGSN also maintains routing information used to tunnel the PDUs towards the SGSN currently serving the destination MS. All GPRS user-related data needed by the SGSN to perform the routing and data transfer functionality is stored within the HLR.

A serving GPRS support node (SGSN) is responsible for the delivery of data packets to and from the mobile stations within its service area. A gateway GPRS support node (GGSN) performs as an interface between the GPRS backbone - network and the external packet data networks. The GGSN also performs authentication and charging functions.

GPRS Coding Schemes



	Code Rate	RLC Data Rate	MAC Data Rate
CS-1	1/2	8.0 kbs	9.05 kbs
CS-2	~2/3	12.0 kbs	13.4 kbs
CS-3	~3/4	14.0 kbs	15.6 kbs
CS-4	1	20.0 kbs	21.4 kbs

Four different coding schemes, CS-1 ~ CS-4, are defined for the radio blocks carrying RLC data blocks or RLC/MAC signaling information.

Rate 1/2 convolutional coding is performed on all modes except CS-4. By puncturing, the effective data rates are brought to 9.05, 13.4, 15.6 and 21.4 kbps. This is achieved through variable puncturing of the rate 1/2 code down to (approximately) 2/3 and 3/4, and no puncturing (for CS-1 and CS-4 modes). The over-the-air bit rate is 22.8 kbps (as in regular GSM channels). Link adaptation selects among the possible rates depending on the channel and interference conditions. By aggregating several dedicated channels, higher data rates per user are possible.

CS-1 is used for the signaling channels, except for the PRACH, which uses a different coding scheme.

As the MS moves away from the cell, a lower CS (and a lower data rate) must be used.

Ejercicio 3.5



- Cierta terminal GPRS sólo puede operar en los modos CS-1 y CS-2, y su configuración es del tipo 3+1 (3 ranuras de bajada y una de subida). Halle las tasas de bit máximas y mínimas (a nivel de capa RLC) que puede soportar en ambas direcciones.

Solución:

Migrando de GSM a GPRS



Elemento	Software	Hardware
MS	Upgrade requerido	Upgrade requerido
BTS	Upgrade requerido	Sin Cambio
BSC	Upgrade requerido	Interfaz PCU
TRAU	Sin cambio	Sin cambio
MSC/VLR	Upgrade requerido	Sin cambio
HLR	Upgrade requerido	Sin cambio
SGSN	Nuevo	Nuevo
GGSN	Nuevo	Nuevo

By reusing GSM infrastructure, most GPRS upgrade costs of the existing GSM nodes are software related. As illustrated in the table above, major hardware impact on the GSM network is limited to the addition of a PCU-model to the BSC and the introduction of two new node types: SGSN and GGSN.

To accommodate GPRS, the Base Transceiver Station (BTS) and the Base Station Controller (BSC) in the BSS are modified, and a new component Packet Control Unit (PCU) is introduced. The BTS is modified to support new GPRS channel coding schemes. The Uu radio interface is modified to support GPRS features. To support GPRS traffic, the transmission capacity of the BSS is increased through standard upgrade process.

GPRS software upgrade can be performed efficiently. In many vendor solutions, GPRS software can be remotely downloaded to BTSs, so that no site visits are needed. In the MS development, a major challenge is to resolve power consumption issue. To support data-related features (e.g., multiple timeslots transmission), GPRS MS consumes much more power than a standard GSM MS.

Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE)



- Aimed at using a new modulation scheme and channel coding to evolve data services in GSM reusing as much of the physical layer as possible
- Considered for both GPRS (EGPRS) and Circuit Switched Data (ECSD)
- Adaptive coding and modulation (GMSK & 8-PSK)
- Supports user data rates up to 384 kbps or more by using up to 8 GSM slots
- Incremental redundancy for improved throughput in delay-tolerant applications

EDGE, which has been standardized within the European Telecommunications Standards Institute (ETSI), represents the final evolution of data communications within the GSM standard. EDGE uses a new modulation and coding schemes to enable user data throughput speeds of up to 384 kbit/s using existing GSM infrastructure.

As 384 kbit/s is the data speed being offered in the first phase of third generation deployment, EDGE could offer an alternative route for GSM operators who will not have third generation licenses. Some of the decisions regarding the air interface (modulation, coding, etc) have already been taken.

EDGE has adopted 8-PSK and GMSK as two alternative modulation schemes, and a set of punctured channel codes to achieve variable coding/modulation.

Delay-tolerant connections (such as best-effort packet delivery) employ Incremental Redundancy (IR) for improved channel throughput. IR operates by initially sending packets using a heavily punctured version of the channel code. If channel conditions are good enough, the receiver will be able to recover the transmitted data without errors. If this is not possible, a fraction of the punctured bits will be transmitted and used for a new decodification attempt at the receiver, using also the originally transmitted bits. The process is repeated until error-free decoding is achieved.

EDGE Modulation/Coding Schemes



Scheme	Modulation	Coding Rate	Data rate (RLC) per slot
MCS-9	8-PSK	1.0	59.2 kbps
MCS-8	8-PSK	0.92	54.4 kbps
MCS-7	8-PSK	0.76	44.8 kbps
MCS-6	8-PSK	0.49	29.6 kbps
MCS-5	8-PSK	0.37	22.4 kbps
MCS-4	GMSK	1.0	17.6 kbps
MCS-3	GMSK	0.8	14.8 kbps
MCS-2	GMSK	0.66	11.2 kbps
MCS-1	GMSK	0.53	8.8 kbps

The table presents the nine (9) possible Modulation/Coding Schemes (MCS) standardized for EDGE. Different code rates are obtained by puncturing the channel code.

While GMSK enjoys the advantage of constant envelope and low peak-to-average power ratio (PAPR), it can convey only one coded bit per symbol, while 8-PSK triples this capacity. In order to improve PAPR and eliminate zero-amplitude crossings, EDGE 8-PSK uses a rotation pattern of $3\pi/8$, which means that two consecutive symbols have their constellations rotated by $3\pi/8$.

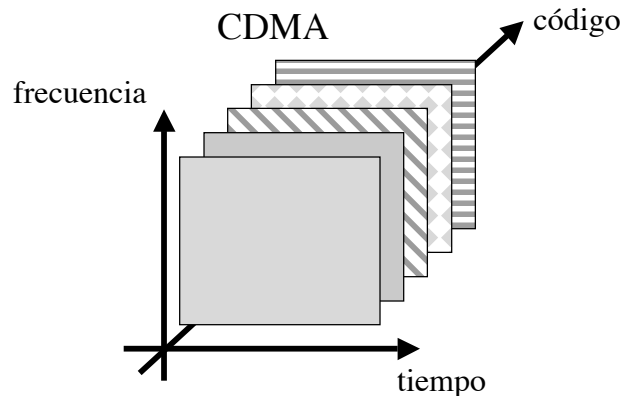
Ejercicio 3.5



- Encuentre el número de bits de datos (a nivel de capa MAC) por cada trama de 20 ms en los siguientes modos de EDGE:
 - MCS-4
 - MCS-9

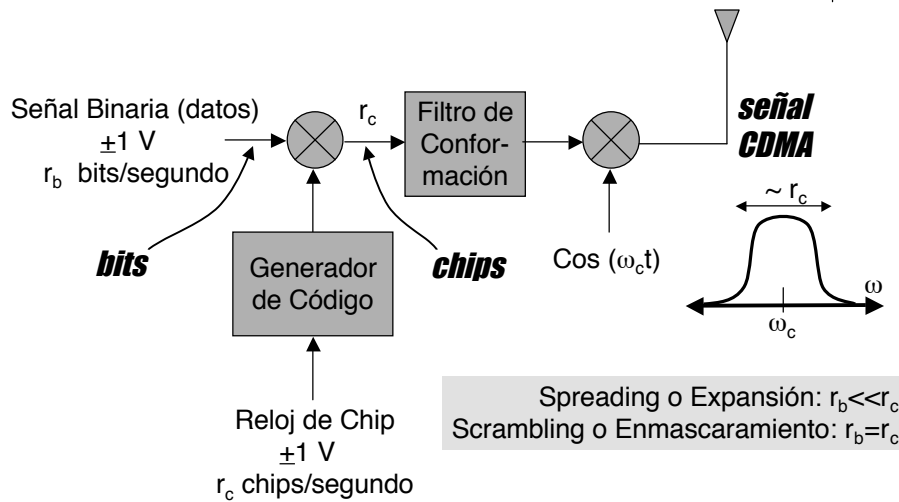
Solución:

Code Division Multiple Access (CDMA)



En CDMA todos los usuarios dentro de una célula transmiten al mismo tiempo y sobre los mismos recursos de frecuencia, es decir, todos coexisten conjuntamente dentro de la misma banda y al mismo tiempo, generando interferencia entre sí. Sin embargo, debido a que están expandidos por el uso de diferentes códigos de canalización en el transmisor, al reproducir simplemente estos códigos, el receptor es capaz de separarlos y reducir significativamente la auto interferencia. Esto se debe al hecho de que las señales de los diferentes usuarios tienen muy poca correlación estadística. Las tecnologías CDMA se aplicaron por primera vez en sistemas celulares comerciales en el estándar IS95, que apareció en 1993. El hecho de que hay un uso compartido de los recursos hace posible mejorar la eficiencia espectral y por lo tanto, la capacidad de estos sistemas con respecto a TDMA. TDMA y FDMA con frecuencia se refieren a las “técnicas de banda estrecha”, en oposición a CDMA, que es una técnica de banda ancha.

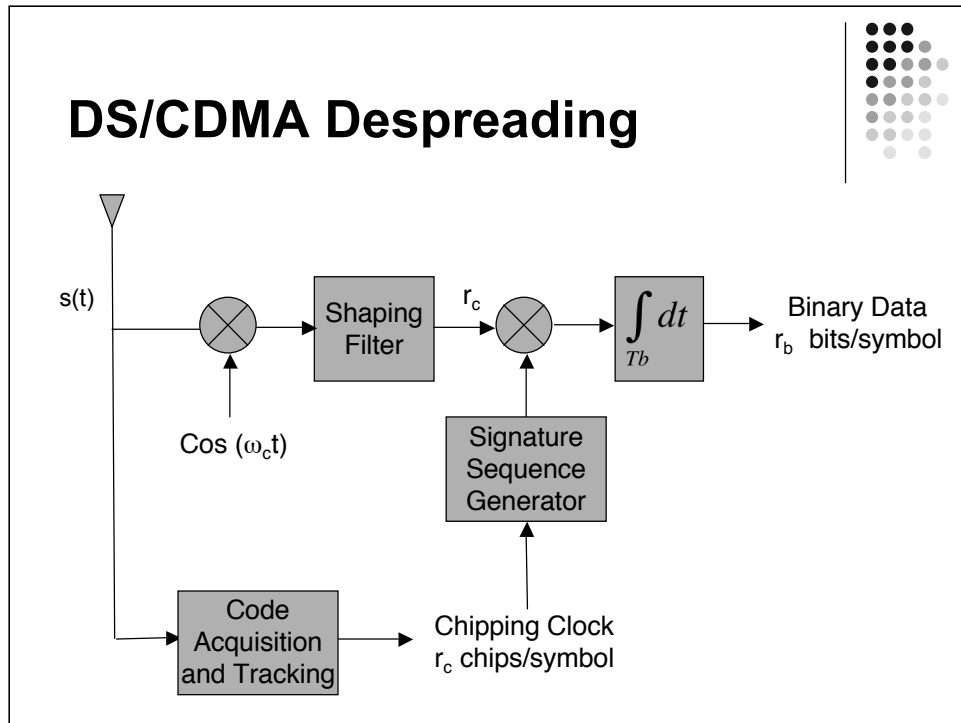
Espectro Expandido por Secuencia Directa (DS/CDMA)



En los sistemas basados en Espectro Disperso por Secuencia Directa la señal de información (datos) es normalmente una señal de baja velocidad, y por tanto de ancho de banda reducido. El proceso de expansión, ilustrado en la gráfica, hace que el ancho de banda de la señal transmitida sea mucho mayor. Esto se logra usando un código especial llamado código de expansión. El procedimiento, logrado a través de un multiplicador analógico (o una compuerta XOR digital), es ilustrado en la gráfica. El ancho de banda de la señal transmitida, luego del filtro de conformación, es aproximadamente igual a la tasa de chips. El código de expansión es exclusivo de cada usuario y sirve para identificarlo.

La tasa de chips puede, en algunas ocasiones, hacerse igual a la de datos, en cuyo caso la operación se denomina enmascaramiento puesto que no implica un aumento del ancho de banda. Los sistemas CDMA usan ambas operaciones en distintos puntos del proceso de generación de las señales.

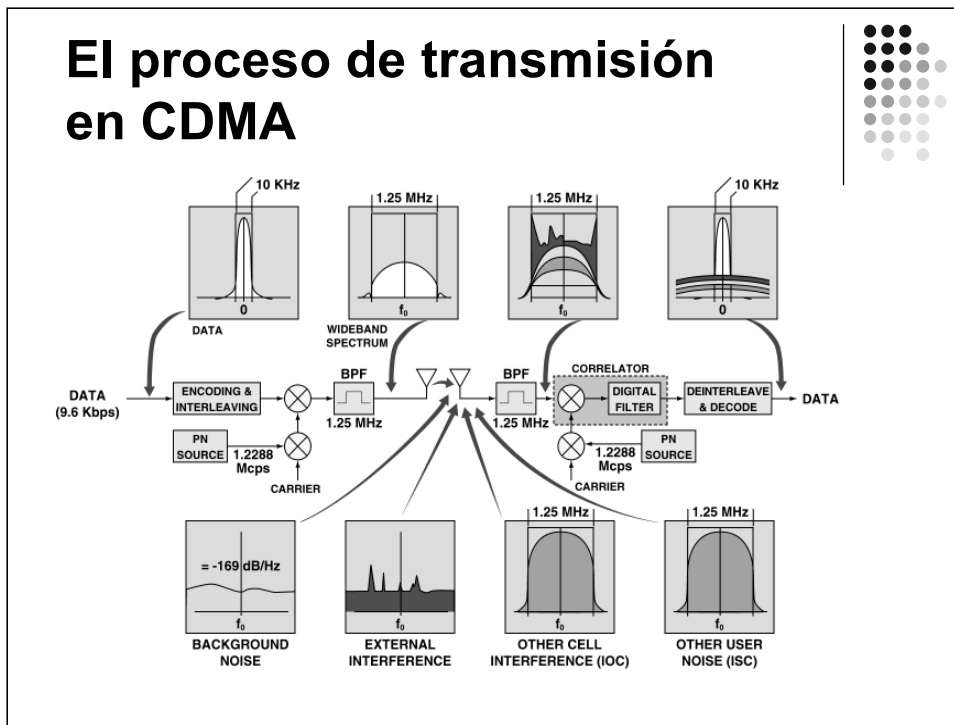
DS/CDMA Despreading



CDMA despreading requires the use of the same signature sequence or code used to spread the transmitted signal.

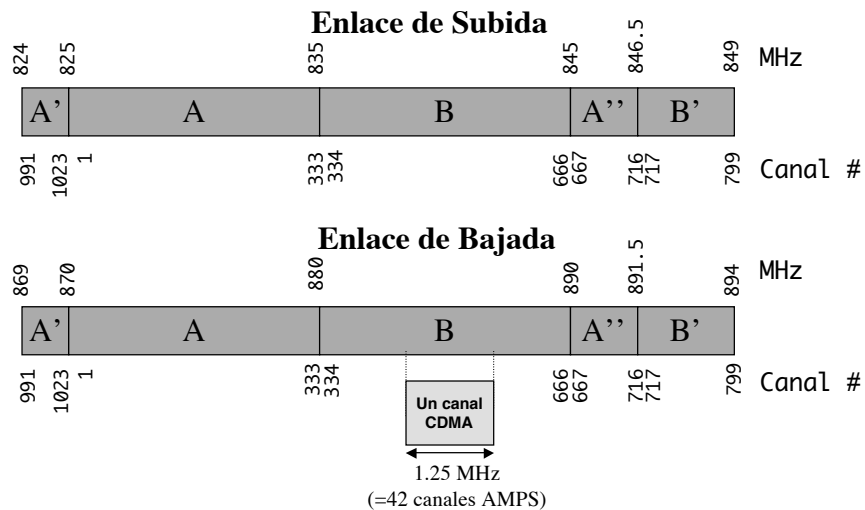
Synchronization circuits ensure that the locally generated code is in sync with the code that is embedded in the received CDMA signal.

El proceso de transmisión en CDMA



La ilustración muestra los procesos involucrados en la generación de una señal CDMA, utilizando los valores de parámetros correspondiente al IS-95. Los procesos desplegados incluyen codificación de canal, entrelazado, expansión directa, conformación de pulsos (filtraje pasabajas) y modulación. La operación de expansión realmente aumenta el ancho de banda de la señal, pero reduce su densidad espectral (energía por unidad de ancho de banda) proporcionalmente. Como se ve, la señal sufre varios efectos de interferencia a medida que viaja a través de los canales inalámbricos, tales como ruido térmico de fondo, interferencia de otras celdas, interferencia de otros usuarios y señales externas. Como consecuencia, el cociente señal a ruido a la entrada del receptor es bastante baja, con la energía de interferencia generalmente mucho mayor que la energía de la señal deseada. Sin embargo, luego de demodular, compactar, y filtrar la señal (que se compacta utilizando el mismo código de expansión utilizado por el transmisor) vuelve a ganar su densidad espectral original. Es decir, la energía de la señal se concentra de nuevo en su banda original. Para la señal restante, no obstante, el proceso de compactación no es otra cosa que un nuevo proceso de expansión, que dispersa la energía aun más. De esta manera, la señal resultante se beneficia de esta *ganancia de procesamiento*, que realmente mejora su relación señal a ruido a valores que hacen posible la detección, luego de entrelazarla y decodificarla.

CDMA en la Banda Celular



En la banda celular, un canal está definido por un par de frecuencias separadas por 45 MHz. Por ejemplo, el canal 777 representa un canal CDMA de subida centrado en 848.310 MHz y un canal de bajada centrado en 893.310 MHz. En la organización de canales AMPS, cada canal ocupa 30 kHz en torno a la frecuencia central. En CDMA, cada canal ocupa 1.25 MHz en torno a la frecuencia central, es decir, unos 42 canales AMPS.

Por mandato de la FCC, en cada mercado existen dos proveedores de servicio, cada uno ocupando sobre 25 MHz de espectro. Estos operadores reciben la banda A o B. Cada banda se compone a su vez de sub-bandas no adyacentes, como se muestra en la figura.

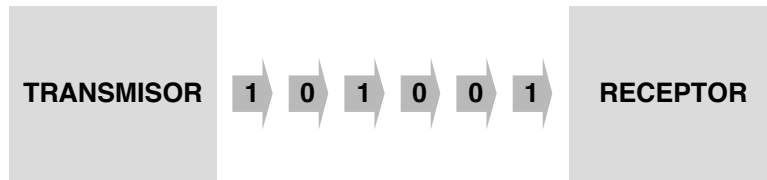
Ejercicio 3.6



- Encuentre el número máximo absoluto de portadoras CDMA que pueden acomodarse en las bandas celulares A y B:
 - Asumiendo que no se usan bandas de guarda.
 - Asumiendo que se dejan 100 kHz de guarda a los extremos de cada banda.

Solución:

Cociente E_b / N_o y Ganancia de Procesamiento



$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{\text{Energía de bit}}{\text{Densidad Ruido}} = \frac{\text{Ancho de Banda}}{\text{Tasa de Bits}} \frac{\text{Potencia Señal}}{\text{Potencia Ruido}} = \frac{W}{R} \frac{S}{N}$$

	GSM	TDMA	IS95
$\frac{W}{R}$	$\frac{200 \text{ kHz}}{270 \text{ kbps}} = 0.74$	$\frac{30 \text{ kHz}}{48.6 \text{ kbps}} = 0.67$	$\frac{1.25 \text{ MHz}}{9.6 \text{ kbps}} = 130$

El objetivo de las capas inferiores de un sistema de comunicaciones digitales es la transmisión de bits desde el transmisor hasta el receptor con la menor cantidad de errores posible.

La medida principal de desempeño de los sistemas digitales es el cociente de energía de bit a densidad de ruido E_b/N_o . A diferencia de las señales analógicas, que son señales de potencia, las señales digitales son señales de energía en las cuales cada bit contiene una cantidad de energía limitada. Los bits son las unidades básicas de información, lo cual explica porqué son usados como referencia en las mediciones de desempeño.

Valores típicos en IS95 son:

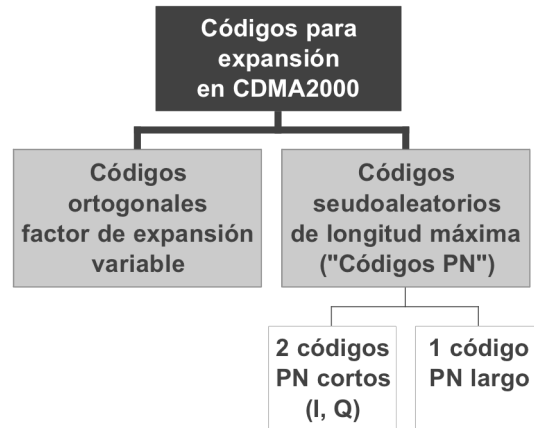
$$W = 1.25 \text{ MHz}$$

$$R = 9.6 \text{ kbps (una de las tasas de vocoder disponibles)}$$

$$W/R=130$$

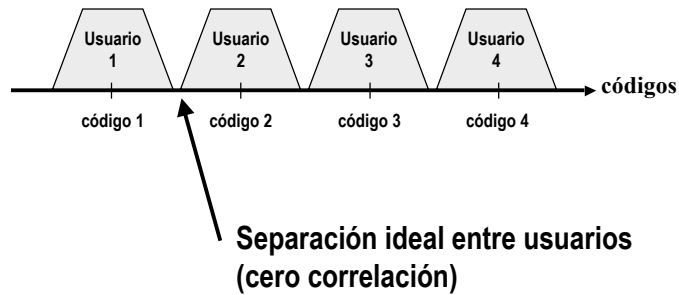
El cociente W/R se denomina Ganancia de Procesamiento.

Códigos para Expansión y Enmascaramiento



En CDMA se usan dos tipos de códigos (secuencias binarias) para expansión y/o enmascaramiento. Los códigos ortogonales Walsh tienen propiedades interesantes en términos de reducción de interferencia entre usuarios. Los códigos Seudoaleatorios de longitud máxima (llamados comúnmente “códigos PN”) pueden tener una longitud muy grande comparada con los Códigos Walsh. En CDMA se usan 2 códigos PN “cortos” (longitud igual a 2^{15} dígitos) y un código PN “largo” ($2^{42}-1$ dígitos).

Códigos ortogonales



Los códigos ortogonales son muy cortos y disfrutan de correlación cero entre sí, permitiendo la separación perfecta de las señales que los usan. Se usan en el enlace de bajada de cada celda. No obstante, propagación multitrayecto introduce cierta correlación entre las señales, impidiendo su separación perfecta.



Ortogonalidad

- Dos secuencias binarias son “ortogonales” cuando el resultado de aplicar XOR entre ellas tiene el mismo número de “0” y “1”. Ejemplos:

1100	0110	XOR
1010 ⊕	1000 ⊕	00 0
<u> </u>	<u> </u>	01 1
0110	1110	10 1
ortogonales	no ortogonales	11 0

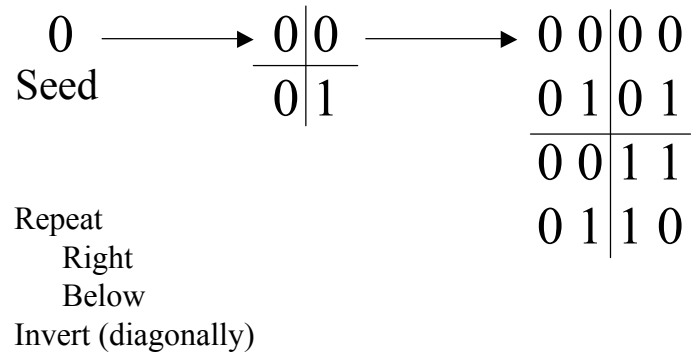
Para que dos secuencias binarias sean ortogonales, el resultado de la operación XOR entre ellas debe contener igual número de 1s y 0s. La gráfica muestra dos ejemplos y la Table de Verdad de la operación XOR.

Cuando se representan los dígitos binarios a través de niveles de voltaje analógicos (“0”=+1V, “1”=-1V), el resultado de multiplicar analógicamente dos secuencias ortogonales e integrar el resultado sobre la longitud de las secuencias es cero.

Walsh Codes



Example:



Se observa el proceso de generación del alfabeto Walsh de palabras de cuatro bits.

Expansión usando códigos Walsh longitud 64



Dato (bit) a Transmitir

1

Walsh #39

0110100101101001011010010110100101101001011010010110100101101001

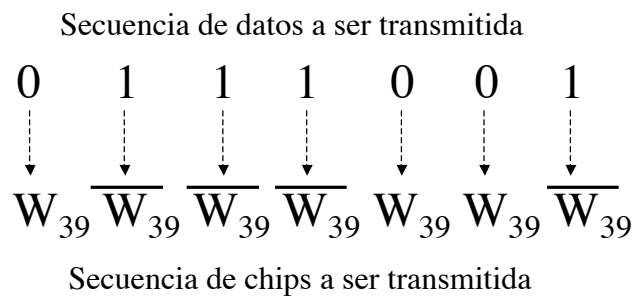
1001011010010110100101101001011010010110100101101001011010010110

Secuencia de "chips" a ser transmitida

La figura muestra el proceso de expansión de un bit de datos usando el código Walsh número 39. Al aplicar la operación XOR, el resultado es el complemento del Walsh #39. Si el dato a transmitir fuera '0', el resultado sería directamente el código Walsh #39.

En CDMA, cuando un móvil solicita un canal de tráfico, un código Walsh es asignado por la estación base a fin de realizar la operación de expansión en el enlace de bajada. El móvil es notificado del índice del código a través de un mensaje especial enviado en el canal de Paging.

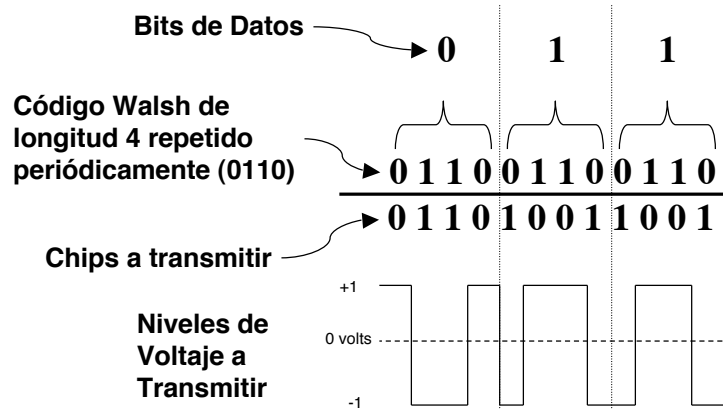
Secuencia de chips a transmitir



La secuencia de chips a ser transmitida es una sucesión de versiones directas o complementadas del código Walsh asignado al usuario, como se muestra en la figura.

Ensanchamiento Ortogonal

(ejemplo usando código Walsh de longitud 4)

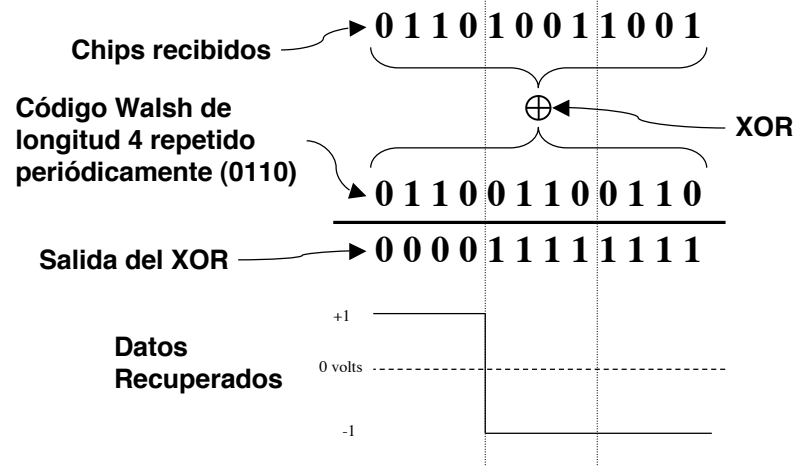


Este es un ejemplo del ensanchamiento de tres bits de datos de usuario "011" con el código Walsh 4-bit asignado "0110".

Nótese que el código Walsh se repite por cada uno de los tres bits de datos de usuario.

En CDMA, una vez que el código Walsh ha sido asignado a un usuario que realiza la llamada en una celda (o sector), ese código Walsh no volverá a ser asignado a otro usuario mientras que el usuario original continúe con la llamada en esa celda o sector. Una vez que la llamada ha sido terminada, o el usuario se retira de del área de cobertura (relevado a otra celda), el código Walsh se hace disponible para otro usuario.

Compactación (receptor)

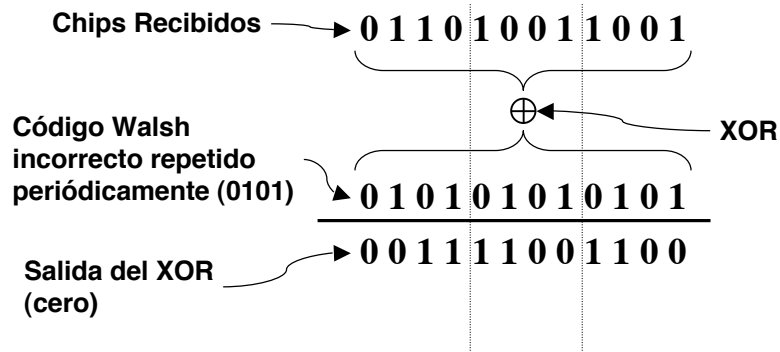


La gráfica muestra la operación de compactación realizada en el receptor CDMA. La gráfica muestra el proceso en el dominio digital.

La secuencia de chips recibido se aplica a una compuerta XOR junto con el patrón Walsh repetido periódicamente. La palabra Walsh debe ser la misma usada en el transmisor, y además en sincronía. El resultado del proceso de compactación, como se ve, es la secuencia de datos transmitidos.

Si agregamos ruido en cantidades moderadas a la señal de chips transmitida de forma de que un chip resulte errado, la salida sería aún correcta puesto que el resultado de integrar la salida del XOR sobre cada intervalo de bit sería aún favorable (tres chips correctos y uno errado).

Compactación usando una palabra Walsh distinta



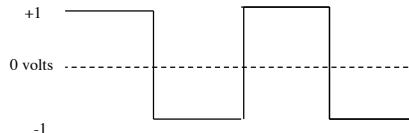
Si el patrón de chips recibido se compacta usando una palabra Walsh distinta a la usada en el transmisor, el resultado del proceso es un cero neto de voltaje. Esto es debido a que dos palabras Walsh distintas tienen cero correlación.

En la gráfica se observa que el resultado de la operación XOR contiene el mismo número de 1s y 0s en cada intervalo de bit, lo cual quiere decir que al integrar el resultado se obtendrá un resultado cero.

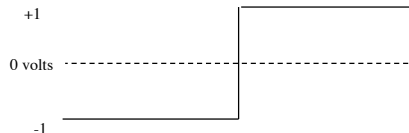
Spreading using Voltage Level References



Voltage levels of data for 1st user (0) when spread with Walsh Code 0101

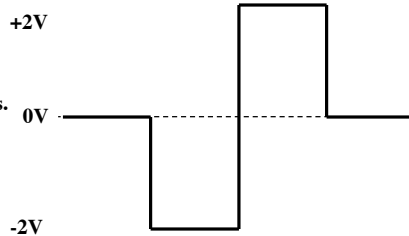


Voltage levels of data for 2nd user (1) when spread with Walsh Code 0011



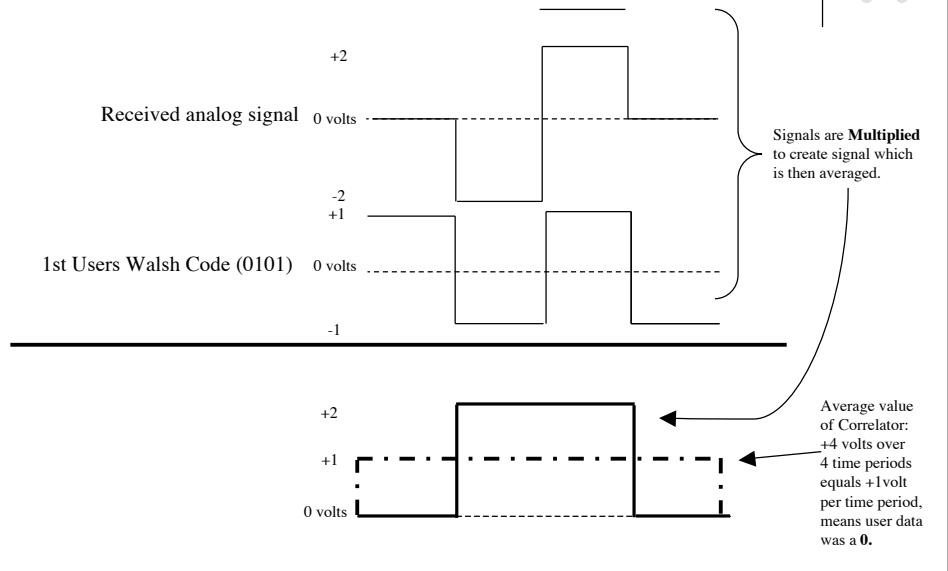
Signals are **Added** to create combined signal.

The Sum of the Voltage Levels.
This is what gets transmitted.



Se observa el proceso de generación de una señal CDMA compuesta, la cual contiene la información de dos usuarios utilizando dos códigos Walsh de longitud 4 distintos.

Despreading



Se aprecia el proceso de detección de la data de uno de los dos usuarios CDMA de la lámina anterior.



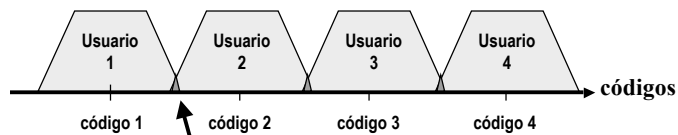
Ejercicio 3.7

Tres usuarios se van a multiplexar usando códigos Walsh de 4 chips por bit.

1. Genere los códigos Walsh apropiados
2. Asuma que los bits de datos para los tres usuarios son '01', '11' y '10'. Asigne los códigos 0,1 y 2 a los usuarios y obtenga las señales expandidas.
3. Muestre la señal CDMA compuesta que sería transmitida por la estación base.
4. Compacte la señal CDMA usando el código del usuario 1 y demuestre la integridad de la data.

Solución:

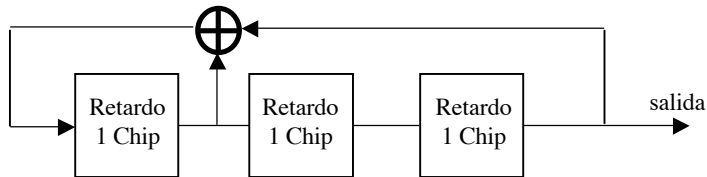
Códigos pseudoaleatorios (PN)



**Separación imperfecta entre usuarios
(correlación baja pero no cero)**

Los códigos pseudoaleatorios (PN) tienen una correlación baja entre ellos, pero ésta no es cero, lo cual hace que la separación entre las señales sea imperfecta. Se usan cuando no es posible sincronizar las señales de los distintos usuarios, es decir, en el enlace de subida de cada celda, y entre celdas diferentes.

Códigos Seudoaleatorios de Longitud Máxima (“PN”)



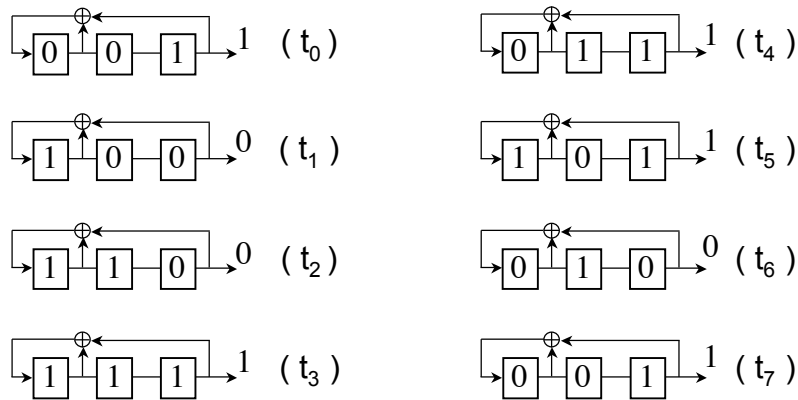
- ✓ **Generador compuesto por un registro de desplazamiento de longitud n y compuertas XOR cuya salida es realimentada**
- ✓ **Salida es periódica con período igual a 2^n-1**

Los generadores de Ruido Seudoaleatorio de Longitud Máxima (llamados comunmente códigos “m” o códigos “PN”) constan de un registro de desplazamiento de longitud n , y un conjunto de compuertas XOR conectadas de tal manera que la salida se realimenta al primer registro. Se trata de un código periódico de longitud $N=2^n-1$.

Los registros cuya salida se toma para realimentar la entrada están definidos por el polinomio generador del código. Para el ejemplo mostrado, un código sencillo de longitud $N=7$, el polinomio generador es $X^3 + X^2 + 1$. Sólo un número limitado de polinomios generadores permiten un código de longitud máxima.

Los códigos PN cumplen con las propiedades de aleatoriedad enunciadas anteriormente de manera aproximada. La aproximación es cada vez mejor a medida de que la longitud de los códigos se hace mayor.

Estados del Generador PN



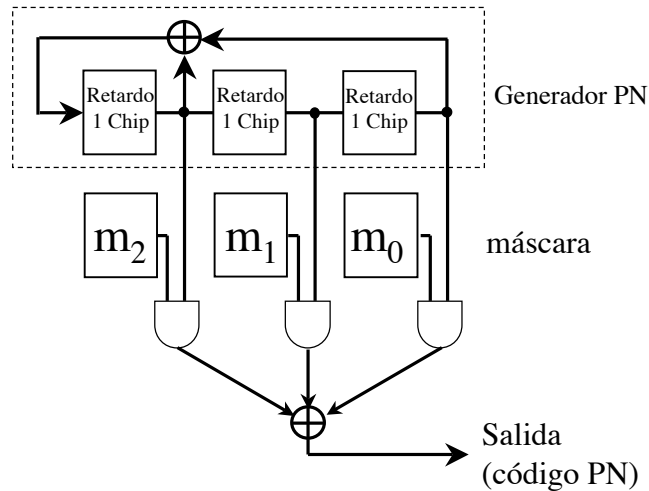
Secuencia de Salida Periódica: 1001110, 1001110,.....

La figura ilustra los siete distintos estados ($t_0 - t_6$) del generador del código PN mostrado anteriormente. Se asume que el estado inicial es "100". La periodicidad del código queda ilustrada con el hecho de que el estado en t_0 es igual al estado en t_7 .

La salida del generador (código PN) en este caso es el último de los registros. La secuencia generada es periódica (1001110).

Notar que el sistema pasa por todos los estados que es posible definir con tres bits. Estos estados excluyen el estado "000", el cual es un estado permanente o *absorbente*, lo cual quiere decir que si el sistema pasa por ese estado, no saldrá nunca de él. Por ello debe garantizarse al menos un "1" como estado inicial del sistema.

Aplicando una máscara sobre un Código PN



A fin de obtener versiones retardadas de la secuencia PN de una forma circuitalmente sencilla que no requiera la implementación explícita de retardo, es necesario aplicar una máscara a las salidas de los registros de desplazamiento del generador como se muestra en la figura. La máscara consiste en una palabra binaria de longitud igual a la del registro de desplazamiento. Un banco de compuertas AND y una compuerta XOR sirven para producir un retardo sobre la secuencia PN. Distintos retardos se obtienen cuando se usan máscaras distintas. Así, un generador de longitud n con una secuencia de longitud $N=2^n-1$ puede usar N máscaras distintas, y por tanto N retardos diferentes pueden ser generados. La única máscara que no puede usarse es la máscara de puros ceros.

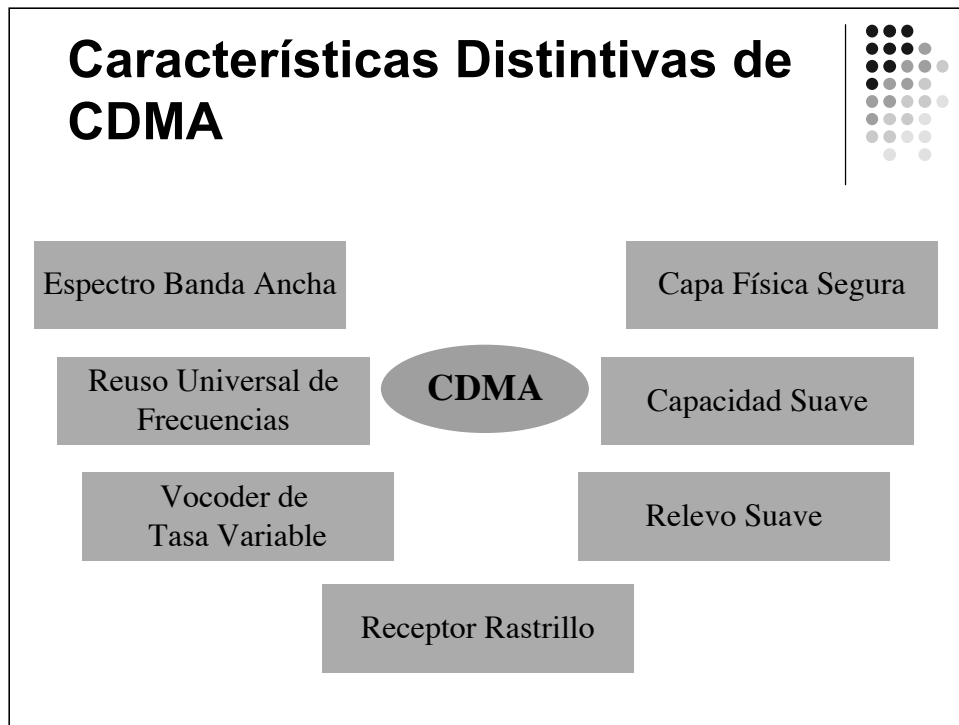
Códigos de Canal en CDMA



Código	Tipo	Rol	Comentario
CRC	Bloque	Detección de Errores	Índice del CRC depende de la longitud del bloque
Convolutacional	Secuencial (usado por bloques)	Corrección de Errores	Tasa variable, longitud 9
Turbo	Bloque	Corrección de Errores	Opcional solo para CDMA2000 con tasas de datos elevadas

Los códigos de canal de bloques operan sobre segmentos de bits de tamaño prefijado. Los códigos convolutacionales, por el contrario, operan sobre la secuencia de bits de entrada de manera continua. Ambos pueden emplearse para detección de errores, corrección de errores o una combinación de ambas tareas. Los códigos convolutacionales son por lo general más poderosos que los de bloque, aunque requieren de mayor complejidad computacional en el lado del receptor.

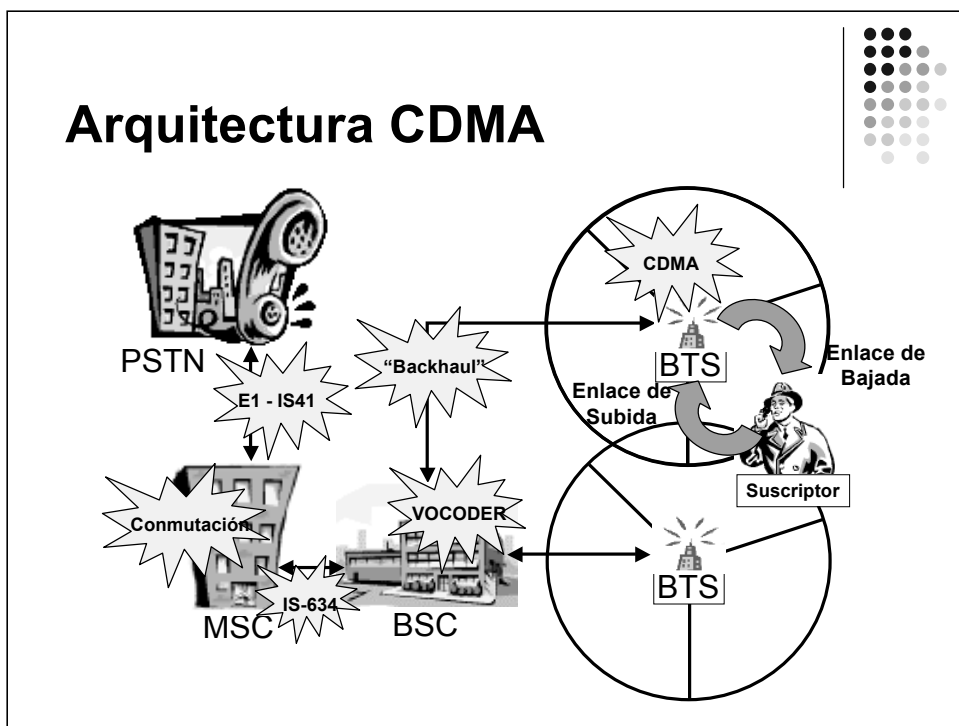
Características Distintivas de CDMA



CDMA tiene muchas de las características de otros sistemas de 2G, tales como codificación digital de voz, modulación digital, codificación de canal, entrelazado, MAHO, etc. Sin embargo, muchas de las características de CDMA son específicas de esa tecnología, tales como:

1. CDMA es la primera tecnología en usar señales de banda ancha, al sustituir los canales de 30 kHz empleados en AMPS y D-AMPS por uno de 1.25 MHz.
2. Factor universal de reuso es una consecuencia de la alta tolerancia de CDMA a la interferencia.
3. Vocoders de tasa variable permiten transmitir una tasa efectiva de información que depende del nivel de actividad de voz, lo cual como se verá reduce la interferencia.
4. Receptor rastrillo es una tecnología que consiste en un banco de detectores conectados en paralelo. Es una forma efectiva de combatir el multitrayecto.
5. La capacidad de CDMA es suave, lo cual significa que es variable pues depende de diversas condiciones de operación.
6. Relevo suave, también conocido como relevo “make-before-break”, permite aumentar la cobertura y mejorar la confiabilidad de una conexión CDMA.
7. A diferencia de otros sistemas, la seguridad en CDMA está garantizada a través de procesamiento de la señal en la capa física del sistema, y no a través de un algoritmo de encriptamiento aparte como en otros sistemas.

Arquitectura CDMA



La interfaz aérea CDMA es transmitida desde/hacia la Base Transceiver Subsystem (BTS) y desde/hacia los móviles o unidades del suscriptor (Mobile Stations, MS). La conexión entre BTS y Base Station Controller (BSC) se denomina "backhaul" o tendido posterior, y también es especificado por el estándar CDMA. En la BSC se efectúan las funciones de codificación y decodificación de la señal de voz. El protocolo entre la BSC y la Mobile Switching Center (MSC) está estandarizado bajo el nombre IS-634. En la MSC se hace la conexión con la red telefónica pública (Public Switched Telephone Network, PSTN). La MSC realiza funciones de conmutación entre las troncales desde/hacia las distintas BSC, troncales desde/hacia la PSTN, y troncales desde/hacia otras MSC asociadas al sistema. El protocolo entre distintas MSC y desde/hacia la PSTN es conocido como IS-41. En la MSC también se encuentran conectadas las bases de datos de identificación, localización y autenticación de usuarios, así como distintas funciones de interconexión (por ejemplo, mensajería corta, Internet, etc).

Desde la BSC hacia la red pública, las señales de voz viajan en formato PCM sobre una línea E1 convencional. Desde la BSC hacia el subsistema de radio, las señales de voz viajan en forma comprimida sobre tramas de 20 ms.

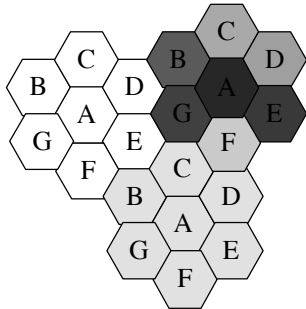
Ejercicio 3.8



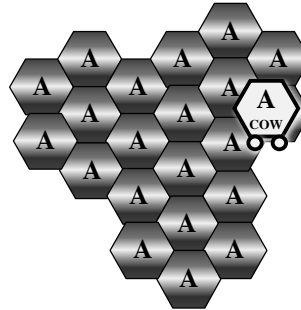
Sabiendo que IS95 requiere -15 dB de C/I para detección adecuada de la señal, encuentre el mínimo Factor de Reuso Celular para este sistemas. (Emplee el valor del coeficiente de propagación para áreas urbanas, que es $n=4$).

Solución:

Factor Universal de Reuso



Factor de Reuso $N=7$



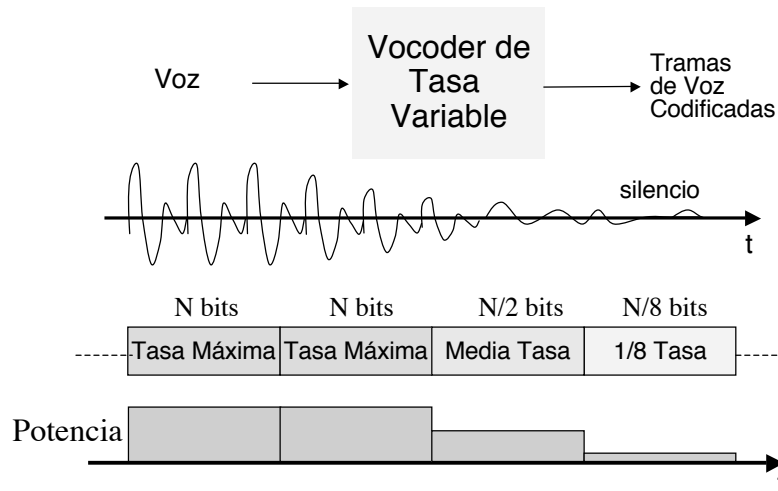
Factor Universal de Reuso $N=1$

Debido al escaso requerimiento de C/I para las señales CDMA, es posible usar las mismas portadoras en todas las celdas y sectores del sistema, en lo que se conoce como Factor Universal de Reuso. Esto trae importantes ventajas:

- mejora la eficiencia espectral;
- facilita la expansión del sistema;
- facilita la instalación de microceldas y celdas temporales (“cell on wheels”);
- posibilita el relevo suave de llamadas entre celdas.

La desventaja del reuso Universal es que la interferencia entre celdas es mayor (pues éstas están más cercanas), lo cual afecta la capacidad de las mismas y ocasionan que haya elevado grado de interacción entre celdas vecinas. La interferencia entre celdas hace que la capacidad de subida se vea reducida por un factor de entre 1.2 y 1.8. A este factor a veces se le llama “Factor de Reuso CDMA”.

Codificador de Voz de Tasa Variable

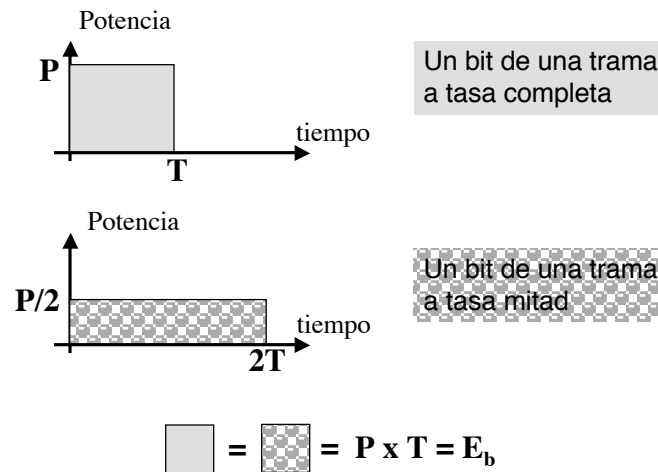


Algunos codificadores de voz, como el empleado en CDMA, emplean un codificador de voz de tasa variable en el cual el número de bits generado por cada trama depende del nivel de actividad de voz. La consecuencia de esto en la interfaz de RF es una reducción de la potencia promedio de transmisión, como se indica en la figura.

El Vocoder genera una trama cada 20 ms. Los datos dentro de la trama van a tasa completa, tasa mitad, tasa cuarta parte o tasa octava parte, dependiendo del nivel de actividad de voz. La tasa completa puede ser 8.55 kbps (Tasa 1, EVRC) o 13.55 kbps (Tasa 2).

Otros sistemas como GSM usan un concepto similar basado en el uso de un codificador ON-OFF, es decir, algunas tramas de voz no se transmiten por no contener actividad vocal. El efecto de esta técnica sobre la interfaz de radio es similar, es decir, una reducción de la interferencia, además de una disminución en el consumo de energía del móvil.

Manteniendo constante la Energía de Bit



Al repetir símbolos transmitidos a una tasa menor que la tasa completa, es posible reducir la potencia instantánea de transmisión en un factor que es igual a la tasa de transmisión de la trama. Así, tramas a tasa mitad pueden transmitirse con la mitad de la potencia que una trama a tasa completa, y así. La idea es mantener la energía de bit constante, independientemente del tipo de trama.

En definitiva, esta reduce la potencia promedio transmitida por cada canal. El factor de reducción depende de la fracción de tramas que son del tipo completa, mitad, etc. Usualmente este factor de reducción de potencia (también conocido como *factor de actividad de voz*) es aproximadamente 50%.

La prolongación del tiempo de bit se logra repitiendo los bits el número de veces necesario. Por ejemplo, para el caso mostrado, los bits de una trama tasa mitad se repiten dos veces respecto al caso de los bits tramas tasa completa.

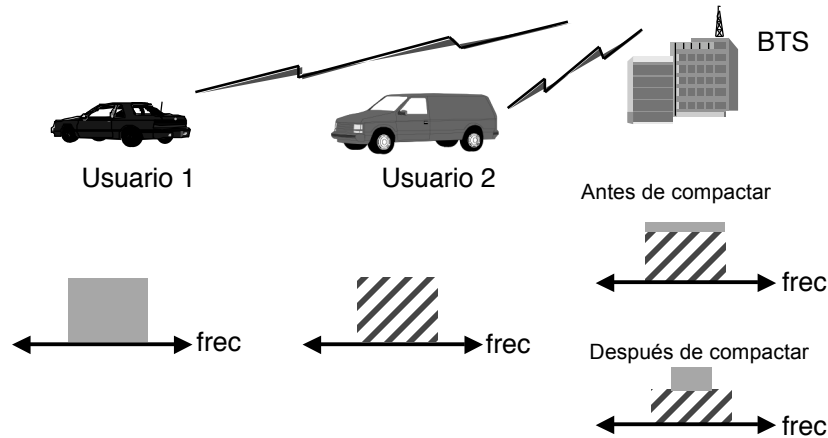
Vocoders en CDMA



Nombre	Tasa a la salida del Vocoder	Tasa Incluyendo Encabezado	Tipos de Trama	MOS
Tasa 1	8.55 kbps	9.6 kbps	1, 1/2, 1/4, 1/8	3.4
Tasa 2	13.35 kbps	14.4 kbps	1, 1/2, 1/4, 1/8	3.8
EVRC	8.55 kbps	9.6 kbps	1, 1/2, 1/8	3.6

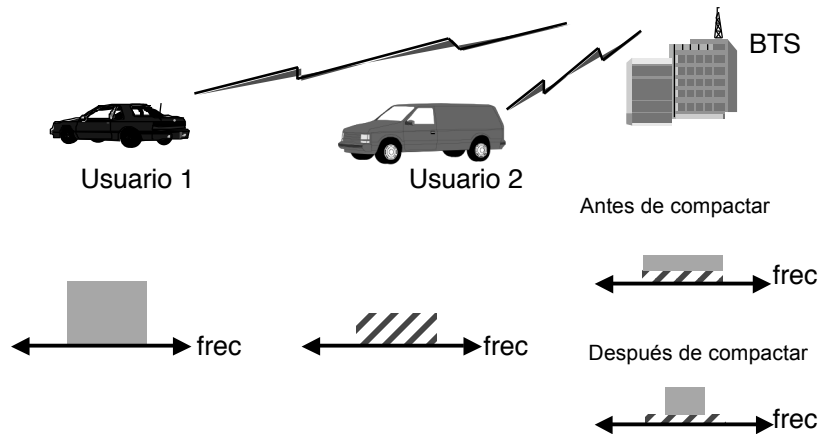
La Tabla muestra los tres Vocoders admitidos en TIA-EIA-95, indicando la tasa de bits a la salida del vocoder, y la tasa de bits incluyendo los bits de encabezado, CRC, etc. La calidad perceptual del Vocoder Tasa 1 es algo inferior a la de los otros dos vocoders. El preferido por los operadores es el EVRC, porque combina una baja tasa de bits y una buena calidad perceptual.

El Efecto “cerca-lejos” en CDMA



La gráfica muestra las características del efecto “cerca-lejos”, Usuario 1 está en el borde de la celda, mientras que Usuario 2 está cerca de la estación base. La diferencia de propagación entre ambos puede ser hasta de varias decenas de dB (valores de 40 a 60 dB son posibles). La señal recibida para Usuario 2 será entonces mucho más potente que la del Usuario 1. Al compactar la señal del Usuario 1, ésta gana unos 20 dB (la Ganancia de Procesamiento, W/R) sobre la del Usuario 2, los cuales no son suficientes para compensar los 40-60 dB de diferencia entre ambos. El resultado es que la señal del Usuario 1 es indetectable debido a una pobre relación señal a interferencia.

Control de Potencia en el Enlace de Subida

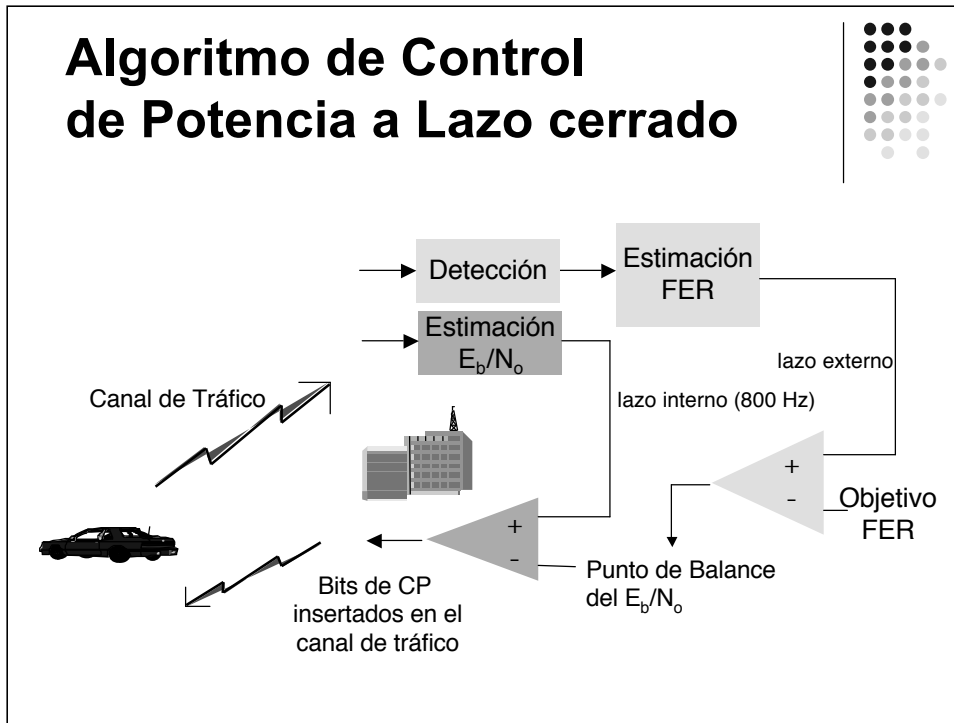


Cuando se aplica control de potencia estricto sobre el enlace de subida, cada móvil transmite una potencia que es proporcional a la atenuación que experimenta su señal. Es decir, Usuario 2 transmite con una potencia mucho menor (posiblemente varias decenas de dB) que la que emplea Usuario 1. Esto hace que ambos usuarios sean recibidos en la estación base con potencias muy similares (idealmente iguales). Luego de la operación de compactación para el Usuario 1, esta señal alcanza una relación señal a ruido favorable que permite el proceso de detección.

Se concluye que el objetivo principal del control de potencia en el enlace de subida es lograr que todos los usuarios de una celda/sector se reciban en la estación base con potencias iguales o al menos similares. Otras razones por las cuales es necesario implementar este control en el enlace de subida son:

- El enlace de subida está limitado por la potencia máxima del móvil.
- El enlace de subida es no-coherente
- Los usuarios no están sincronizados (no hay ortogonalidad).
- El canal de radio cambia rápidamente.

Algoritmo de Control de Potencia a Lazo cerrado



El diagrama muestra el algoritmo para control de potencia de subida en cdmaOne, el cual también ha sido adoptado por otras tecnologías CDMA de tercera generación. Cuando el móvil entra en modo de tráfico, la BTS inicializa un Punto de Balance E_b/N_0 para ese móvil. El objetivo FER es usualmente fijo (entre 1 y 2 %).

El lazo interno es el llamado lazo rápido. La BTS estima el valor de E_b/N_0 recibido de cada móvil una vez cada 1.25 ms. esta estimación se compara con el Punto de Balance nominal, y un comando (subir o bajar potencia) se genera muy rápidamente. Este comando se inserta en el caudal del tráfico de bajada, ocasionando que el móvil aumente o disminuya su potencia cada vez que se reciba un comando válido.

El lazo externo es comparativamente mucho más lento. Se basa en el monitoreo (usualmente en la BSC) de la tasa de errores de trama (FER). Cuando se detecta un valor de FER mayor que el tolerable, el lazo externo ordena al interno que se eleve el Punto de Equilibrio E_b/N_0 . Esto tiene como consecuencia que el lazo interno envíe una ráfaga de comandos de subir potencia, lo cual hace que el móvil aumente su potencia de transmisión y se compense el aumento de FER. El lazo externo no está especificado y depende del fabricante.

Características del Control de Potencia a Lazo Cerrado



- » Comandos se envía cada 1.25 ms.
 - » Bits de Control de Potencia se envían sin codificar, por lo que la tasa de errores es elevada (5 - 10%).
- » Cada comando válido corrige potencia transmitida en ± 1 dB (típicamente).
- » Es muy efectivo en situaciones de baja movilidad.
 - » Retardo del lazo es muy grande para compensar el desvanecimiento rápido en móviles a velocidades medias y altas.
- » En situaciones de relevo suave, comandos enviados por cada celda pueden ser diferentes.
 - » El móvil resuelve conflicto siempre en favor de bajar la potencia.

Algunas características básicas del lazo cerrado de control de potencia son:

- La BTS envía comandos cada 1.25 ms a cada móvil en tráfico.
- Los bits de Control de Potencia se envían sin codificar, por lo que la tasa de errores es elevada (5 - 10%). Esto se hace para posibilitar la extracción rápida en el lado del receptor móvil.
- Cada comando válido corrige potencia en ± 1 dB, típicamente, aunque puede ser menor.
- El algoritmo ha demostrado ser muy efectivo en situaciones de baja movilidad. No obstante, el retardo del lazo es muy grande para compensar el desvanecimiento rápido en móviles a velocidades medias y altas, por lo que el control no es tan efectivo en estas situaciones.
- Cuando el móvil se encuentra en relevo suave, los comandos enviados por cada celda pueden ser diferentes. En este caso el móvil resuelve el conflicto siempre en favor de bajar la potencia.

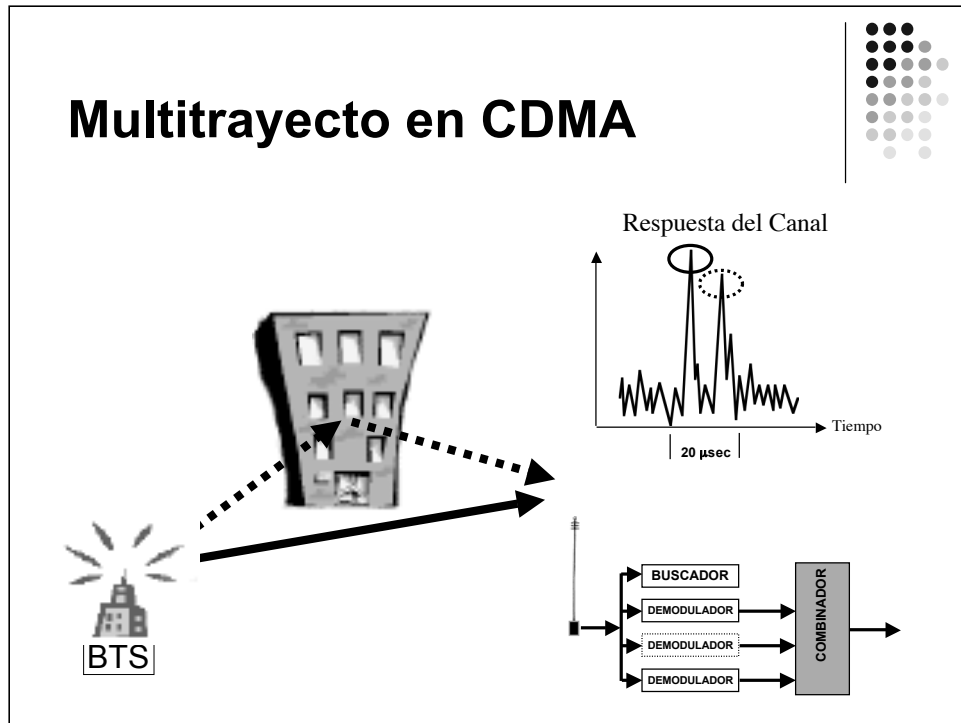
Ejercicio 3.9



Un móvil IS-95 cae abruptamente en un desvanecimiento de 12 dB. Asuma que el canal permanece estable y que el móvil está transmitiendo tramas de tasa completa. Asuma además que los bits de control de potencia tienen una tasa de error del 10%. Calcule el tiempo requerido por el móvil para ajustar su potencia de transmisión al valor apropiado usando el control de potencia a lazo cerrado.

Solución:

Multitrayecto en CDMA

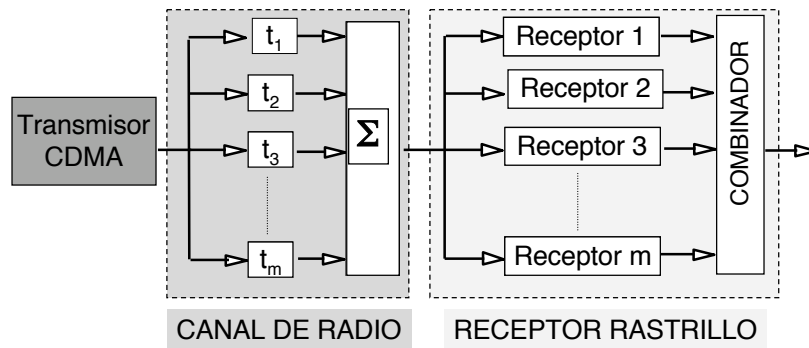


En sistemas banda estrecha, cuando aparecen señales multitrayecto en la antena receptora, la combinación de éstas puede sumarse destructivamente y ocasionar un desvanecimiento de la señal. En CDMA estos multitrayectos pueden ser demodulados independientemente mediante un receptor múltiple conocido como receptor multitrayecto.

El combinador en el receptor móvil toma las componentes de cada detector (o “dedo” del rastrillo) y realiza las siguientes funciones:

- Rotación en fase de manera de alinear todas las componentes del rastrillo. Esta función se facilita con la detección de la señal piloto.
- Combinación de Máxima SNR. Consiste en escalar cada componente en función de la potencia de cada una de ella. Esto maximiza la SNR a la salida del combinador.

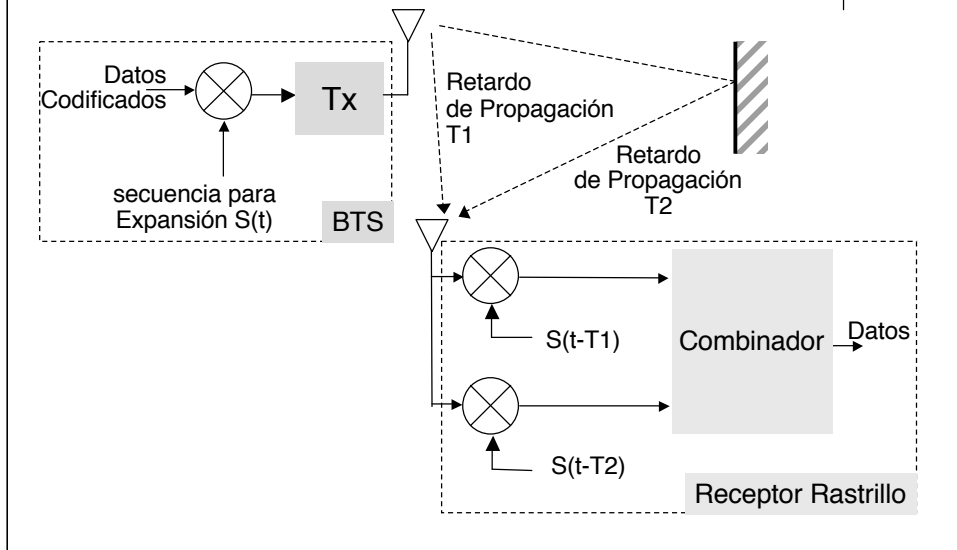
El Receptor Rastrillo



La grafica ilustra el concepto del receptor Rastrillo, según el cual cada “dedo” receptor del rastrillo se emplea para detectar componentes que llegan a la antena del móvil dentro de un tiempo de un chip. El receptor Rastrillo es una forma de diversidad temporal que explota positivamente la propagación multitrayecto, proveyendo robustez al proceso de transmisión de radio.

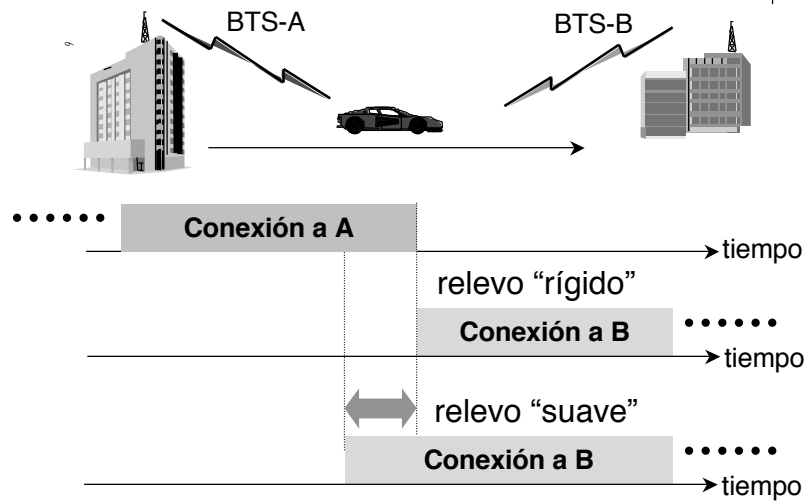
Cada dedo hace el seguimiento de la sincronía y coherencia de sus respectivas componentes, y puede ser reasignado a una componente distinta simplemente cambiando el retardo de la secuencia empleada para la compactación de la señal. La mayoría de los receptores CDMA implementan 4 o 5 “dedos”.

Operación del Receptor Rastrillo



En el ejemplo se muestran dos componentes multirrayecto, retardos de propagación $T1$, $T2$, separadas en más de un chip. Cada componente se detecta con un receptor separado, el cual se sincroniza haciendo que la secuencia para compactación (que es la misma usada para expansión) sea retardada una cantidad de tiempo igual al retardo del componente de radio respectivo.

Relevo de Llamadas



El relevo de llamadas, como es hecho tradicionalmente, se denomina rívido y consiste en que el portátil se "desconecta" de la celda actual antes de iniciar contacto con la celda vecina. El relevo "suave" de llamadas, previsto sólo en CDMA, permite al móvil permanecer conectado con ambas celdas por un cierto período de tiempo.

Relevo Suave



- ✓ Es posible gracias a:
 - ◆ Reuso Universal de Frecuencias
 - ◆ Receptor Rastrillo
- ✓ Proceso asistido por mediciones del móvil
 - ◆ MS reporta la potencia de las pilotos cercanas
 - ◆ BSC decide y ordena añadir o eliminar pilotos
- ✓ Trae importantes ventajas:
 - ◆ Macro-diversidad mejora confiabilidad y calidad
 - ◆ Mejora alcance y cobertura en zonas difíciles
- ✓ Una desventaja: reducción de capacidad del enlace de bajada

El relevo suave es posible gracias al factor universal de reuso, que permite a ambas celdas operar a la misma frecuencia. En CDMA, la tecnología que posibilita la implementación del relevo suave en el móvil es el Receptor Rastrillo, como se verá.

El relevo suave es un proceso asistido por el móvil, que está continuamente midiendo la potencia de las pilotos cercanas a su posición. Las mediciones se hacen a través de uno de los detectores del rastrillo que se dedica únicamente a este fin llamado detector buscador. Los resultados de estas mediciones son reportados (vía señalización de alto nivel) a la BSC, que es la unidad encargada de tomar las decisiones relativas al relevo suave.

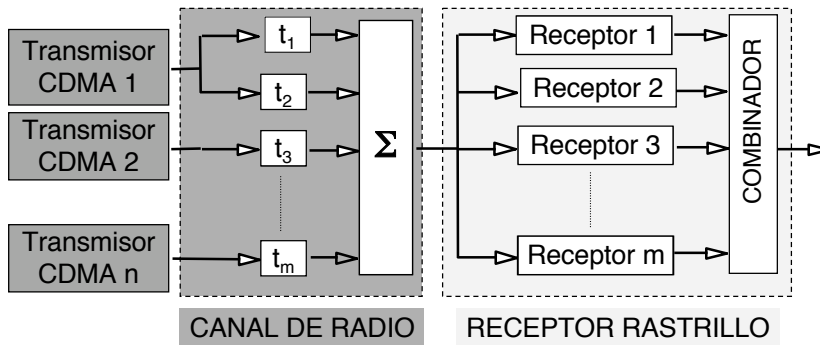
El relevo suave trae importantes ventajas:

-mayor calidad y confiabilidad en la señal gracias a la diversidad que representa el proceso (llamada a veces "macro diversidad")?

-extensión del radio de las celdas y cobertura en zonas difíciles en las cuales una sola BTS por sí sola sería incapaz de proporcionar cobertura adecuada.

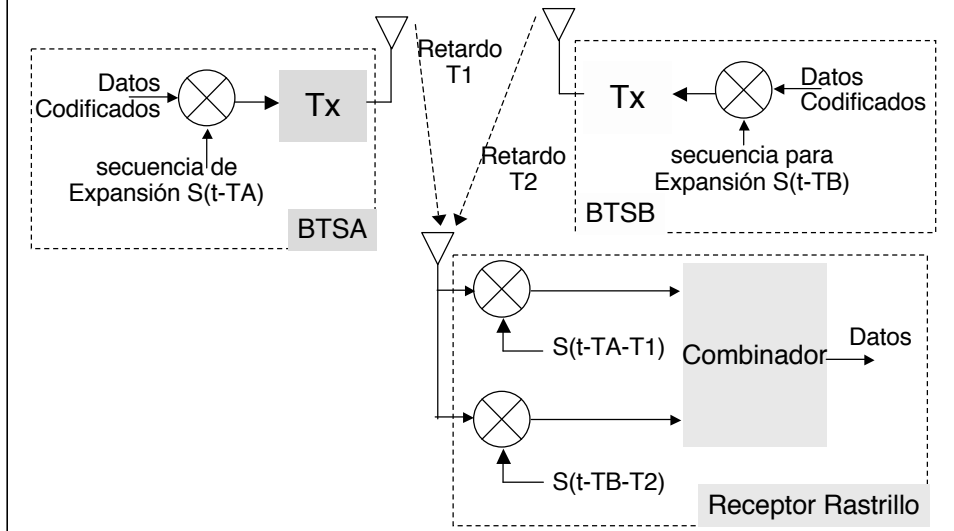
El relevo suave tiene una desventaja sustancial que es la disminución de la capacidad en el enlace de bajada, como se estudiará. Por ello debe controlarse la cantidad de móviles en relevo suave en una celda.

Relevo Suave y el Receptor Rastrillo



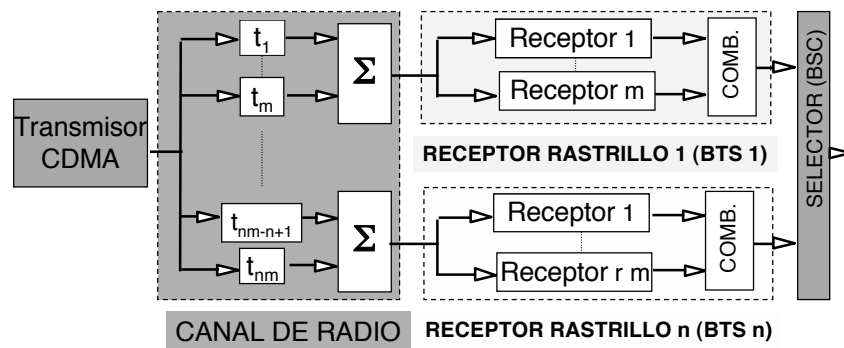
En relevo suave, los dedos del receptor rastrillo se asignan a componentes originados en celdas/sectores distintos (diferentes transmisores CDMA que envían la misma información). Esto se logra a través del ajuste de los códigos de compactación usados en los distintos receptores. Cada señal proveniente de sectores/celdas distintos lleva la “estampa” de ese sector que son los códigos de PN.

Operación del Receptor Rastrillo Durante Relevo Suave



En CDMA, las estaciones base están sincronizadas. Este hecho les permite ser identificadas mediante el uso de desplazamientos (retardos) en sus secuencias PN de expansión. En relevo suave, los dedos del receptor rastrillo en la unidad portátil se asignan a componentes originadas en celdas/sectores distintos. Como se muestra en el ejemplo de la gráfica, la BTS A emplea un retardo identificativo de T_A , mientras que BTS B usa un retardo T_B . Cada uno de los dedos se asocia a cada una de estas BTSs. El primero de ellos usa una secuencia de compactación local retardada en T_A+T_1 a fin de alinearla con la señal proveniente de BTS A. Similarmente, el segundo dedo usa un retardo local de T_B+T_2 .

Relevo Suave en el Enlace de Subida

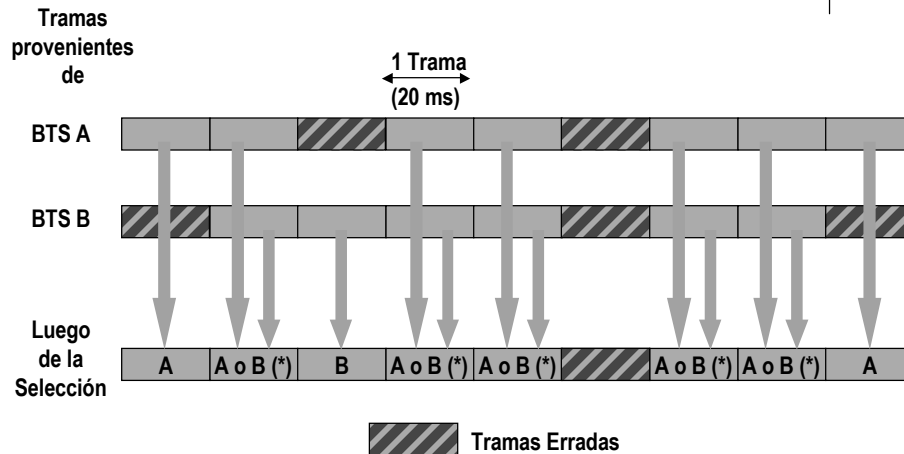


En el enlace de subida, el relevo suave se implementa de manera distinta que en el de bajada, puesto que existe un sólo transmisor y varios receptores.

Cada celda (independientemente de cuántos sectores estén involucrados en el relevo suave) realiza una combinación de los “dedos” receptores a nivel y genera una versión de la señal digital, que es enviada sobre el enlace de “backhaul” a la BSC.

Si hay más de una celda involucrada en el relevo suave, la BSC selecciona la mejor versión de cada trama en función del exámen de sus códigos de paridad (a fin de detectar si hubo o no errores en cada versión). Así el proceso se completa en dos etapas: combinación y selección.

Ejemplo de Selección de Tramas en la BSC

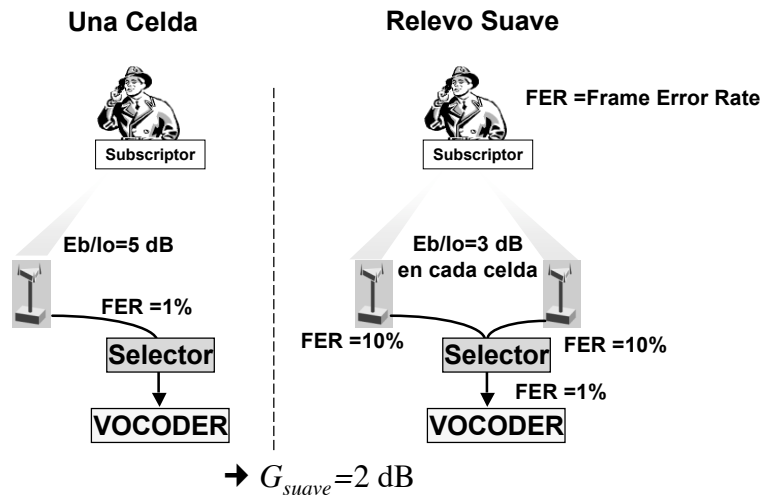


(*) en estos casos, se selecciona cualquiera de las dos tramas, pues son idénticas.

La gráfica ilustra el proceso de selección de tramas correctas en la BSC. Los errores en la BSC se dan únicamente cuando todas las versiones de las tramas (provenientes de todas las BTSs) están erradas.

Así, se comprueba que la probabilidad de trama errada (FER) en la BSC es siempre menor que las probabilidades FER en cada BTS medida individualmente. Esto tiene un efecto beneficioso sobre el enlace de subida CDMA.

Ganancia por Relevo Suave



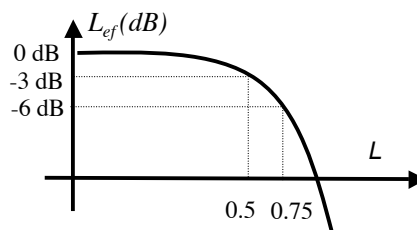
Los dos escenarios que se muestran en la gráfica ilustran el efecto de ganancia en el enlace de subida por efecto del relevo suave de llamadas. Aquí se asumen que los dos enlaces entregan tramas de voz que son estadísticamente independientes, de manera que el valor global de FER es el producto de los valores independientes de FER. La selección de la trama correcta se hace en base a el exámen de los bits de paridad (CRC). El ajuste de la potencia del transmisor de la BTS es una consecuencia del control de potencia rápido que cdmaOne y CDMA2000 tienen en el enlace de subida. En el caso de WLL, el operador puede elegir configurar el sistema de modo de desactivar el relevo suave a fin de hacer que el parámetro K en el cálculo de la capacidad del enlace de subida sea 1; en este caso G_{suave} no aplica.

Efecto de Carga de la Celda



- **Efecto de Carga de la Celda (L_{ef}):**
 - Considera interferencia de otros usuarios en el enlace de subida.
 - La carga se expresa como una fracción de la capacidad de polo (se toma 50% para planificación).
 - El bloqueo de la celda puede ocurrir a valores más elevados (la cobertura se reduce a fin de “estirar” un poco la capacidad).

$$L_{ef} = 10 \log(1 - L)$$

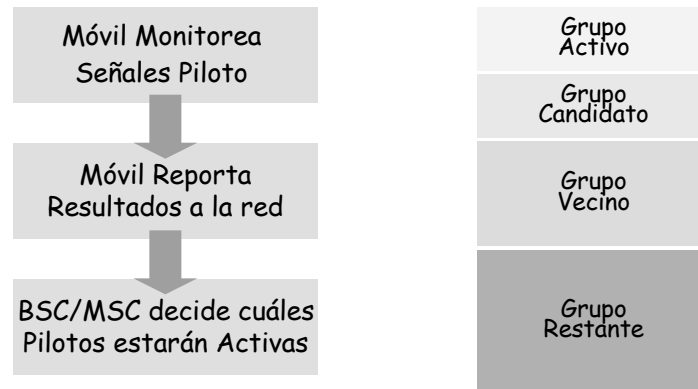


El efecto de carga en el enlace de subida considera la interferencia de otros usuarios (de la misma celda y de celdas vecinas). La carga se expresa como una fracción de la capacidad de polo (se toma 50% para planificación).

Aunque se tome 50% para fines de planificación, el bloqueo de la celda puede ocurrir en realidad a valores más elevados, por ejemplo, 75%. Cuando se llega a éstos niveles de carga, la cobertura se reduce a fin de “estirar” un poco la capacidad.

Esto muestra que en CDMA, la capacidad puede intercambiarse por cobertura, y viceversa.

El Proceso de Búsqueda de Pilotos

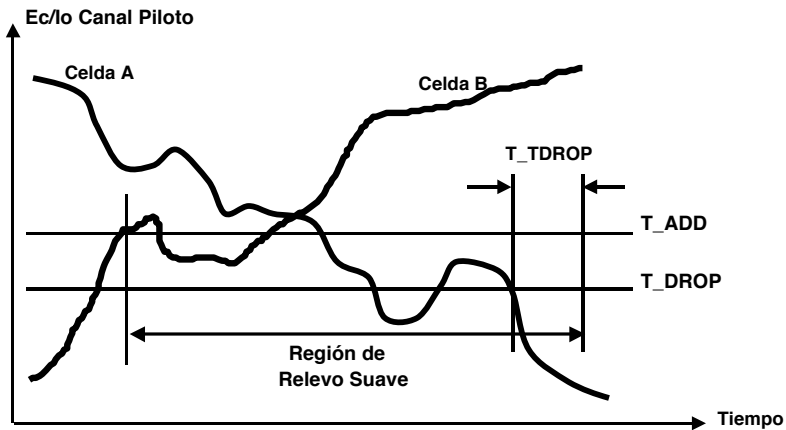


El proceso de búsqueda de pilotos es continuo y se realiza aún cuando el móvil está en estado ocioso (standby). La búsqueda se hace no sólo para encontrar los candidatos para relevo suave, sino también para identificar componentes multitrayecto que son útiles para detección. El proceso de relevo suave es del tipo MAHO (“Mobile Assisted HandOff”), es decir, que el móvil reporta las mediciones pero es la infraestructura (usualmente la BSC) quien decide el inicio y fin de los relevos. El móvil no conduce el proceso sino que sólo obedece a la red.

El móvil mantiene cuatro (4) grupos de señales pilotos en su memoria, cada una identificada por el retardo (“offset”) del código de PN. El grupo de pilotos Activas corresponde a aquellas que están asociadas con un canal de bajada que está siendo demodulado por el móvil. El grupo de pilotos Candidatas son aquellas que tienen suficiente fuerza para ser demoduladas, pero no están activas en ese instante. El grupo Activo y el grupo Candidato pueden contener un mínimo de 6 pilotos cada uno.

El grupo Vecino contiene aquellas pilotos que el sistema ha determinado se encuentran cercanos a la celda actual. El sistema le informa al móvil de éstas pilotos a través de un mensaje llamado NEIGHBOR SET MESSAGE. El móvil mantiene un contador para cada una de ellas, y puede decidir en base a este contador eliminar alguna de ellas. El grupo vecino puede contener al menos 20 pilotos. Las pilotos válidas del sistema no incluidas en los grupos mencionados antes se guardan en el grupo Restante.

Parámetros del Relevo Suave (IS-95A)



La gráfica muestra los parámetros más importantes involucrados en el relevo suave de llamadas. T_ADD es el umbral sobre el cual una señal piloto se considera para el relevo suave. Cuando una portadora cae por debajo de T_DROP por un tiempo mayor que T_TDROD , se considera que la señal no es útil para el relevo suave y debe ser descartada.

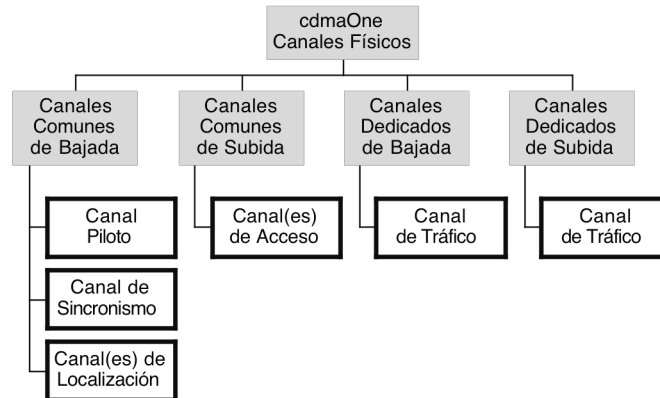
Interfaz de Radio cdmaOne



Banda	Multibanda	Número de Códigos	64 (max)
Acceso Múltiple	FDMA/CDMA	Tiempo de Trama	20 mS
Dúplex	FDD	Codificación de Voz	QCELP / EVRC
Ancho de Banda	1.25 MHz	Codificación de Canal	CRC + Convolutacional
Tasa de Bits	9.6 / 14.4 kbps	Datos	9.6 / 14.4 kbps 115 kbps (IS95B)
Número de Portadoras	Variable	Control de Potencia (móvil)	800 comandos/seg.
Tasa de Bits por Usuario	9.6 / 14.4 kbps	Radio de celda máximo (aprox.)	30 km
Modulación	BPSK (QPSK spread)	Capacidad por celda por MHz	Variable (típicamente 30~45)
Potencia del Móvil	0.2 – 1.25 W max (controlada)	Relevo entre Celdas	Suave

La tabla indica algunos de los parámetros básicos de la interfaz de radio de los sistemas basados en cdmaOne. La potencia de transmisión del móvil es controlada a una tasa nominal de 800 comandos por segundo, La capacidad en sistemas CDMA es suave, lo cual indica que el número de usuarios que puede soportar una celda depende de condiciones muy diversas. El relevo también se llama “suave”, lo cual se explicará en una próxima lámina.

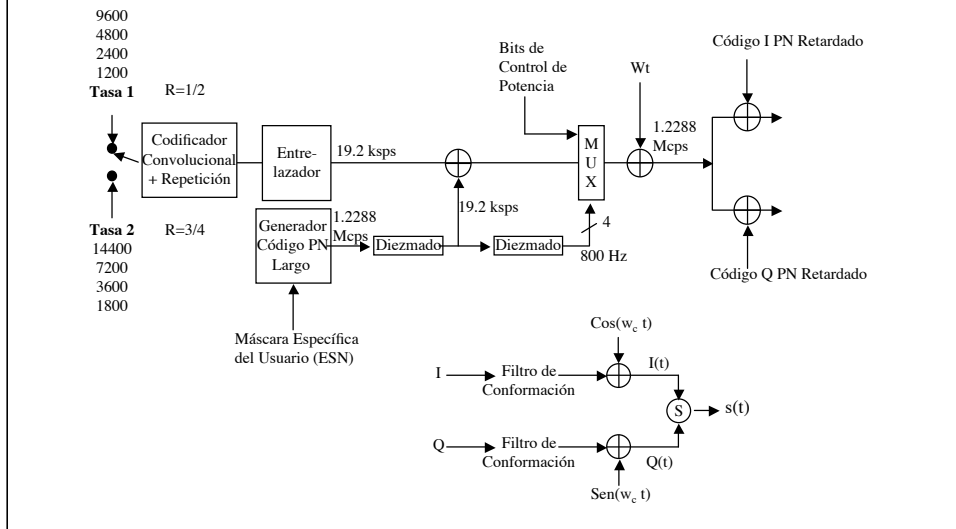
Canales Físicos en cdmaOne



Los canales físicos definidos en cdmaOne pueden ser comunes o dedicados, de subida o bajada.

El canal piloto permite a las estaciones base sincronizar su código PN corto con el de la estación base durante la etapa de inicialización, y le permite mantener su sincronismo una vez que la comunicación se ha iniciado. El canal de sincronismo es usado por el móvil para sincronizar su código PN largo con el de la estación base. El canal de localización lleva mensajes de control de todo tipo en el enlace de bajada. El canal de acceso permite al móvil acceder el sistema para iniciar una llamada, responder a un mensaje de la estación base y para registrarse. Los canales de tráfico llevan las tramas de voz y mensajes de control durante una conversación.

Generación del Canal de Bajada (Tráfico)

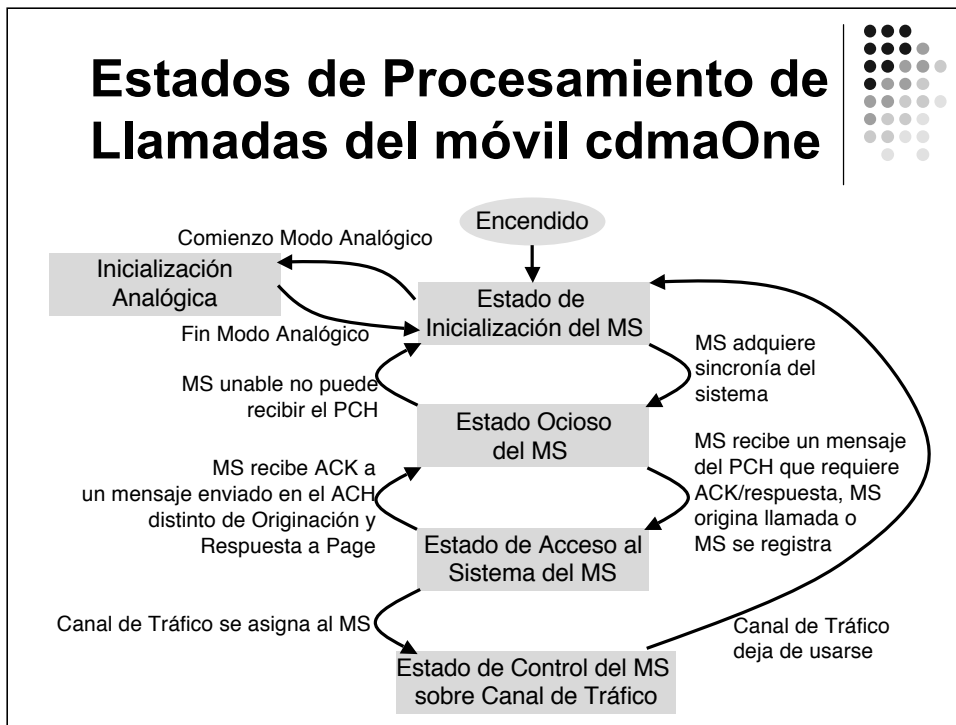


La gráfica muestra la forma cómo es generada la señal en el canal de tráfico del enlace de bajada de cdmaOne. Las próximas laminas explican cada bloque en detalle.

Algunas características generales son:

- Ambas tasas de los vocoders son soportadas
- El código convolucional es distinto para cada Tasa del Vocoder.
- Los dígitos binarios después del codificador convolucional se deninan símbolos.
- Los símbolos se enmascaran usando el código largo de PN (versión diezmada).
- Los bits de control de potencia son insertados en el causal de símbolos codificados.
- El ensanchamiento es logrado usando el código Walsh correspondiente.
- El ensachamiento en cuadratura se logra usando los códigos cortos de PN.
- La señal es filtrada y modulada antes de ser transmitida

Estados de Procesamiento de Llamadas del móvil cdmaOne



La gráfica indica los estados de procesamiento de llamadas en TIA-EIA-95 (para el MS).

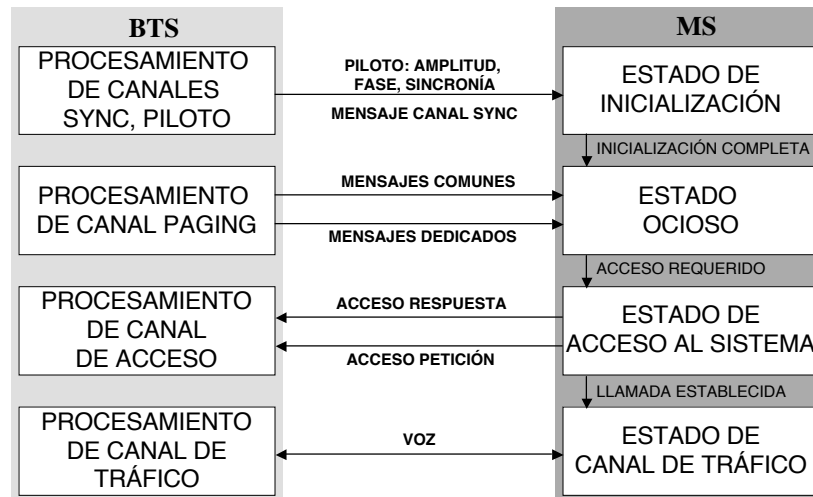
En el estado de Inicialización del móvil la unidad móvil usa el Canal Piloto y el Canal Sync para adquirir la sincronización del sistema CDMA.

En el estado Ocioso el móvil monitorea el Canal de Paging.

En el estado de Acceso al Sistema el móvil responde mensajes recibidos en el PCH que así lo requieran, o bien origina una llamada, o bien se registra.

Durante el Procesamiento del Canal de Tráfico el MS y la BTS se comunican a través de los canales de tráfico de subida y bajada.

Procesamiento de Llamadas

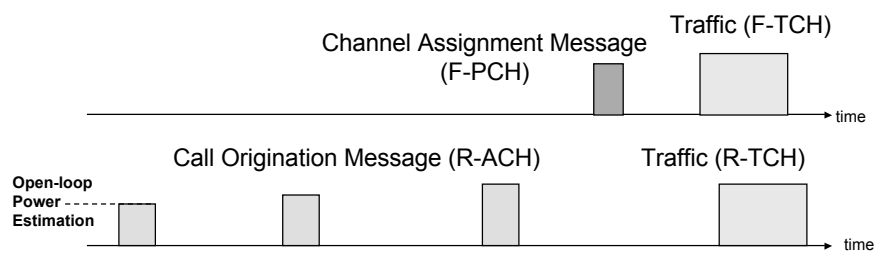


El estándar TIA-EIA-95 define únicamente estados de Procesamiento de Llamadas para la Estación Móvil (Mobile Station, MS). Se sobreentiende que los estados de la estación base están en coordinación con aquellos del móvil.

Spread ALOHA



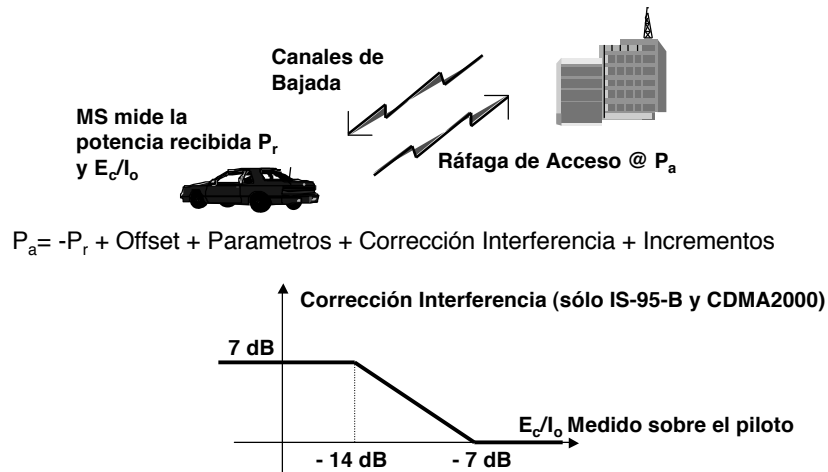
- It is basically a S-ALOHA scheme adapted for DS/CDMA.
- Terminals use one of several available spreading codes
 - Collision probability is reduced at the cost of increased receiver complexity.
- Spread ALOHA bursts must be power-controlled in order to control interference. Example: cdmaOne, CDMA20001X, W-CDMA;



Spread-ALOHA is basically a S-ALOHA scheme adapted for DS/CDMA. Terminals are allowed to use one of several available spreading codes for their random transmissions. Collision probability is reduced at the cost of increased receiver complexity, due to the need of having several parallel receivers (one for each available code).

Spread ALOHA bursts must be power-controlled. For example, in the W-CDMA the Physical Random Access Channel (PRACH) sends its first preamble at a certain power based on the power that is received from the base station (open loop power control). PRACH preambles are repeated at increasing powers, until the base station acknowledges its acquisition through the Acquisition Indicator Channel (AICH). Only then the terminal may start transmitting the message part on the PRACH.

Control de Potencia a Lazo Abierto

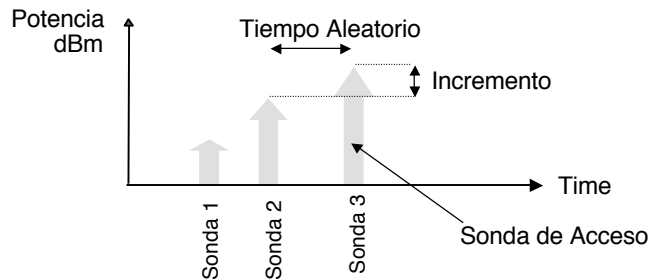


El control de potencia a lazo abierto es un algoritmo autónomo por el cual el móvil estima su potencia de transmisión durante los intentos de acceso en los cuales no está activo el control de lazo cerrado, y también se usa junto con el control a lazo cerrado para corregir la potencia de transmisión a fin de ayudar a superar situaciones de desvanecimiento a largo plazo.

El algoritmo se basa en el hecho de que la atenuación en ambas direcciones es similar debido a la correlación entre ellas. Por ello, la potencia recibida en una dirección es un buen indicativo de las condiciones del canal en la otra dirección. Por ello, el móvil estima su potencia de transmisión en base a la potencia de RF recibida. La ecuación muestra la forma en que se calcula la potencia durante un acceso. La potencia transmitida es inversamente proporcional a la potencia recibida en bajada.

La estimación a lazo abierto es, no obstante, imperfecta, debido a las diferencias en el desvanecimiento a corto plazo entre ambos enlaces.

Secuencia de Sondas de Acceso en cdmaOne



$$\text{Potencia Promedio (dBm)} = \text{Potencia promedio medida (dBm)} + \text{Parametros} + \text{Incrementos}$$

En el modo de acceso, el móvil estima su potencia de transmisión inicial y envía una sonda (ráfaga) de acceso. Si no se recibe respuesta dentro de un tiempo predefinido, el móvil incrementa su potencia en un valor entre 0 y 7 dB (según un parámetro ajustable por el operador) y enviará una nueva ráfaga. El proceso se repite un número predeterminado de veces, y luego la secuencia entera se puede repetir también hasta que se reciba respuesta o se agoten los intentos.

Ejemplo de un balance de enlace de subida cdmaOne



Parámetro	Origen	Valor
Potencia Tx MS [Watts]	Dato:	0.2
Potencia Tx MS [dBm]	Calc:	23.0
Pérdidas Duplexer MS [dB]	Dato:	0.0
Pérdidas Cable MS [dB]	Input:	0.0
Ganancia antena MS[dBi]	Dato:	0.0
EIRP [Watts]	Calc:	0.2
EIRP [dBm]	Calc:	23.0
Pérdidas interacción con el cuerpo [dB]	Input:	-3.0
Pérdidas Penetración Edificios [dB]	Dato:	0.0
Confiabilidad (Borde de la Celda)	Input:	90%
Desviación Estándar Ensombrecimiento [dB]	Dato:	8.0
Margen Desv. por Ensombrecimiento [dB]	Calc:	-10.3
Ganancia Antena BTS [dBi]	Input:	15.0
Pérdida Cable BTS [dB]	Dato:	-2.98
Ganancia Relevo Suave CDMA @P90 [dB]	Input:	4.1
Efecto de carga CDMA [dB]	Calc:	-3.1
Sensitividad Receptor BTS [dBm]	Dato:	-118.2

Parámetros Misceláneos y Valores Asumidos	
Temperatura de Ruido, °K	290
Constante Boltzman	1.38E-23
Densidad Espectral ruido térmico (dBm/Hz)	-174
Ancho de Banda (MHz)	1.2288
Tasa de Datos (bps)	14400
Carga	50.0 %
Factor de Actividad de Voz	40%
Eficiencia de Reuso	65%
Figura de Ruido (dB)	5.0

Máximas Pérdidas Permisibles [dB]	Calc:	141.0
-----------------------------------	-------	-------

Requerimiento Promedio Eb/No [dB]	Input:	6.7
Desviación Estandar Eb/No [dB]	Dato:	2.5

El ejemplo arriba muestra, a manera de ejemplo, un balance de enlace típico de un sistema cdmaOne. Algunos de los valores mostrados pueden variar en cada sistema, aunque en general se han considerado la mayoría de las variables involucradas. Como se ve, la salida del cálculo son las Máximas Pérdidas de Propagación Permisibles, en este ejemplo 141 dB.

No se ha considerado explícitamente la ganancia por diversidad en la estación base, esto pues el valor asumido para Eb/lo asume que se usa diversidad, por lo cual este factor ya está considerado.

El factor de actividad de voz y la eficiencia del reuso (factor f , a ser definido) no se emplean en este cálculo directamente.



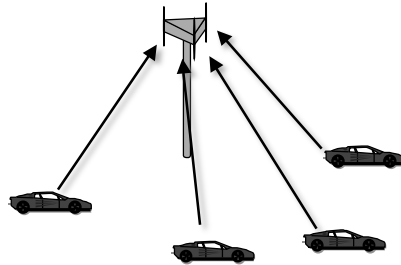
Ejercicio 3.10

- Un sistema cdmaOne se va a desarrollar en la banda celular para servicios de voz a 9.6 kbps. Los datos del enlace de subida son:
 - Potencia máxima del móvil: 23 dBm
 - Margen de desvanecimiento a gran escala: 10.4 dB
 - Factor de carga: 3 dB
 - Ganancia de la antena de la estación base: 14 dB
 - Ganancia por relevo suave: 4.1 dB
 - Pérdidas por penetración en estructuras: 10 dB
 - Requerimiento de Eb/No: $7 \text{ dB} \pm 2.5 \text{ dB}$
 - Ganancia por diversidad: incluida en el Eb/No
 - Pérdidas en cables y conectores: 3 dB
- Halle el radio promedio de una celda.

Enlace de Subida en CDMA



- ✓ Capacidad está limitada por interferencia de otros usuarios, y depende de la E_b/I_o requerida.
- ✓ La estrategia es relacionar E_b/I_o con el número total de usuarios.
- ✓ También deben considerarse el ruido térmico y la sectorización.



Para desarrollar la ecuación para capacidad de enlace de subida, se comenzará encontrar el valor requerido para la detección de un bit transmitido sobre el enlace de subida. En sistemas digitales, las señales son de energía y por lo tanto el criterio para detección es E_b/I_o , donde E_b es la energía por bit y I_o es la densidad de interferencia total, ambas medidas en la antena receptora en la estación base. La mayoría de los receptores comerciales IS-95 están en capacidad de detectar los bits transmitidos con un promedio de E_b/I_o de aproximadamente 6dBs (4 en escala lineal).

Capacidad de Celda Aislada (sólo usuarios de voz)



$$\frac{E_b}{I_o} = \frac{P/R}{I/W} = \frac{W P}{R I} = \frac{W P}{R (N_{users} - 1) \nu P} \approx \frac{W P}{R N_{users} \nu P}$$

W	Ancho de Banda	P	Potencia recibida de cada móvil (tráfico)
R	Tasa de Datos “cruda”	ν	Factor de Actividad de Voz
E_b	Energía de Bit	N_{users}	Capacidad
I_o	Densidad Interferencia		

$$\Rightarrow N_{users} = \frac{(W/R)}{\left(\frac{E_b}{I_o}\right) \nu}$$

Ganancia de Procesamiento

Si el control de potencia en el enlace de subida se asume perfecto, todos los móviles se reciben en la estación base con la misma potencia P . Esta suposición constituye la base de esta primera aproximación para la capacidad de una celda aislada.

El parámetro P se refiere únicamente a la potencia recibida en el canal de tráfico de un usuario. A fin de considerar el total de potencia interferente, es necesario multiplicar P por el número de usuarios interferentes en una celda aislada $N_{users}-1$, por su factor de actividad de voz modificado (para tomar en cuenta el efecto de la señal piloto) y por el parámetro β , que está definido como el cociente de potencia total a potencia promedio del canal de tráfico.

Efecto del Ruido Térmico e Interferencia de Otras Celdas



$$I_o = \frac{v P N_{users} (1 + f)}{W} + N_o$$

$$f = \frac{I_{oc}}{I_{mc}}$$

f	Factor de Interferencia de Otras Celdas
I_{oc}	Interferencia de Otras Celdas
I_{mc}	Interferencia de la Misma Celda
N_o	Densidad Espectral Ruido Térmico

La interferencia de otras celdas debe considerarse para que la expresión de capacidad está completa.

Cuando se introduce el efecto del ruido térmico y de la interferencia proveniente de celdas vecinas, la expresión para la densidad de la interferencia I_o debe modificarse de la forma como se muestra.

Ecuación (completa) de Capacidad



$$N_{users} = \frac{\left(\frac{W}{R}\right) (1 - \eta)}{\left(\frac{E_b}{I_o}\right)^v (1 + f)} G_s F$$

$$\eta = \frac{N_o}{I_o} = \frac{1}{L} - 1$$

G_s Ganancia de Sectorización
 F Control de Potencia Imperfecto
 η Cociente Ruido Térmico a Interferencia

La sectorización en CDMA, a diferencia de TDMA y FDMA, añade capacidad a la red. Una celda de tres sectores tiene una capacidad que es aproximadamente 2.5 veces la capacidad de una celda omni. Una aproximación de primer orden a la ganancia de sectorización está dada por:

$G_s = 0.85 \times (\text{número de sectores})$

La asunción de control de potencia perfecto puede relajarse introduciendo un factor de compensación F (usualmente se hace igual a 0.8).

El valor de η depende de cuán cargada esté. Normalmente se recomienda cargas máximas del orden de 70 - 80 % en referencia a la capacidad de polo, en cuyo caso η vale cerca de 0.25. La capacidad de polo se define en una futura lámina.



Ejercicio 3.11

Calcule la capacidad del enlace de subida de un sistema cdmaOne con tres sectores por celda, $E_b/I_o = 5$ dB, Vocoders Tasa 1, y factor de interferencia de otras celdas $f=0.55$. Asuma que la celda se carga hasta un 85% y que el factor de actividad de voz es de 45%.

Solución:



Capacidad de Polo

- Es la capacidad de una celda omni CDMA o sector asumiendo que la única fuente de interferencia es el mismo sistema (sin ruido térmico, es decir, $\eta=0$)
- Es un límite superior de la capacidad real del sistema

$$N_{users} = \frac{(W/R)}{\left(\frac{E_b}{I_o}\right) v (1+f)}$$

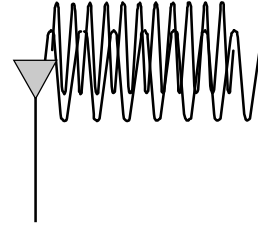
La capacidad de polo se define como la máxima capacidad que un sector o celda omni puede tener en una red CDMA. Este valor de capacidad puede ser calculado anulando la potencia de ruido térmico, es decir, asumiendo que la única fuente de interferencia es el mismo sistema CDMA. Es un parámetro referencial importante en la estimación de capacidad.

Sistemas CDMA Multifrecuencia



√ Con 2 o más frecuencias portadoras, la capacidad de tráfico Erlang más que se duplica ('pooling') si

- Ambas frecuencias son monitoreadas y gestionadas por un sólo controlador de BTS (compartición de carga en la BTS), o
- CCP tiene conocimiento de la carga en cada frecuencia (compartición de carga en la MSC).



Se sabe que cuando se tienen dos o más asignaciones de frecuencia en un sector, la capacidad Erlang más que se duplica, debido a la eficiencia por troncalización ("pooling" de portadoras), si se dispone de uno de estos mecanismos:

-ambos canales son monitoreados y gerenciados por un único controlador BTS (compartición de carga en la BTS).

-el procesador de control de llamadas (CCP) tiene conocimiento instantáneo de la carga en cada frecuencia, y puede por tanto pedir que una llamada entrante por una frecuencia f_1 sea asignada a un canal de tráfico f_2 (compartición de carga en la BSC/MSB).

Debe recordarse que en una zona multifrecuencia una estación móvil siempre intentará acceso y leerá en canal de paging de una única frecuencia, determinada por el número de frecuencias disponibles y una función "hash" basada en su ESN.

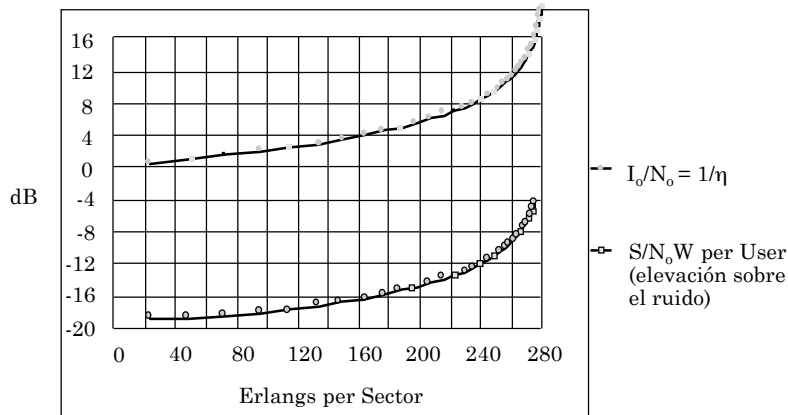
Capacidad de Tráfico por Sector



- (a) Portadoras independientes:
Erlang/Sector = (# portadoras) x Erlang(N_{users})
- (b) Portadoras compartidas (“pooling”):
Erlang/Sector = Erlang(# portadoras x N_{users})
- Ejemplo:
 $N_{\text{users}}=20$; #portadoras=4
(a) Erlang/Sector = 4 x Erlang(20) = 4 x 13.2 = 52.8
(b) Erlang/Sector = Erlang(20*4) = 68.7
Ganancia por “pooling” = (68.7-52.8)/52.8 = 30%

Debido a mejoras en la tecnología CDMA más reciente, ahora es posible que el móvil que origina una llamada en una portadora bloqueada sea redirigido a otra portadora en el mismo sector que esté menos cargada. Este procedimiento se denomina “pooling” de portadoras, y puede incrementar la capacidad por sector de forma significativa, como se muestra en el ejemplo con 4 portadoras.

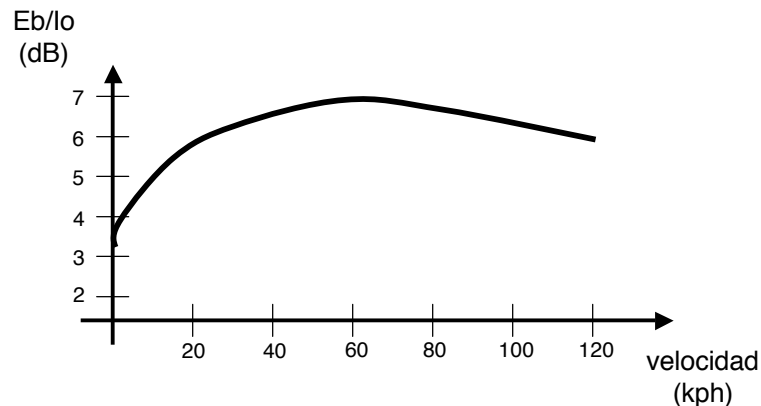
Elevación Sobre el Ruido



La gráfica muestra el parámetro I_o/N_o (el recíproco de η) en función de la carga en Erlang por un sector aislado con 9 portadoras. También se grafica el cociente señal a ruido térmico por usuario, conocido como “elevación sobre ruido”. En la gráfica se observa la capacidad de polo, que no es más que la asíntota de las curvas (280 Erlang). Se observa que ambos parámetros graficados aumentan casi linealmente con la carga hasta que ésta llega a un 70 - 80% de la capacidad de polo. A partir de este punto el crecimiento de la interferencia (y por tanto, la potencia requerida de cada móvil) aumenta exponencialmente.

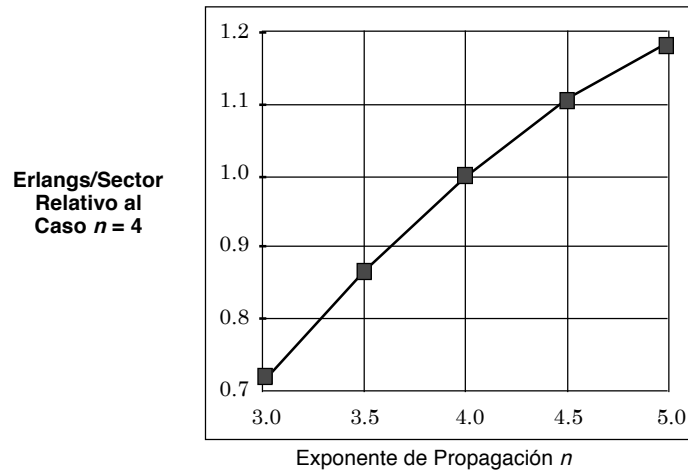
Esto permite entender la razón por la cual no es conveniente operar los sistemas CDMA por encima de 70% de su capacidad de polo. Por arriba de este punto el sistema se hace menos estable, y cada nuevo usuario cuesta al sistema mucho más en términos de interferencia.

Requerimiento de E_b/I_0 Vs. Velocidad de Móvil



Una mejora importante en el comportamiento del E_b/I_0 proviene de los usuarios de baja movilidad, esto es, peatones, usuarios dentro de edificaciones, que no experimentan el desvanecimiento rápido que es consecuencia del movimiento vehicular a velocidades mayores de 40 kph. La gráfica muestra este fenómeno. A velocidades relativamente bajas, el control rápido de potencia es muy efectivo contrarrestando los desvanecimientos lentos mientras que a velocidades muy altas (por arriba de 80 kph) el sistema se beneficia de la acción del entrelazado. Usuarios de baja movilidad típicamente producen aproximadamente la mitad de la interferencia de los usuarios de alta movilidad. Esto tiene efectos beneficiosos en la capacidad del enlace de subida.

Capacidad en Función del Exponente de Propagación

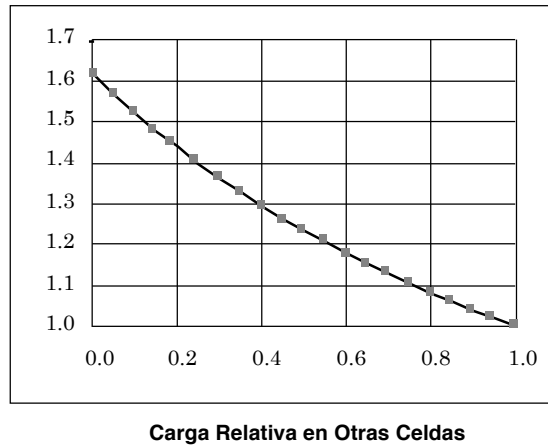


La capacidad de una celda está afectada por la interferencia total que recibe de otras celdas. El nivel de potencia que se acopla de las celdas vecinas depende de la ley de propagación (exponente n). valores altos de este parámetro reflejan una elevada densidad de obstrucciones (edificios, colinas, etc) y por tanto la capacidad aumenta en esos casos. Terrenos muy planos tienen buena propagación, y por tanto menores valores de n y menor capacidad.

Capacidad en Función de la Carga Relativa en Otras Celdas



Erlangs/Sector
Relativo al
Caso $n = 4$



La carga de las celdas vecinas tiene un impacto negativo en la capacidad, como se esperaba. Si la capacidad Erlang de un sector con cero carga se normaliza a 1.6, este valor cae a 1.0 cuando la carga relativa de las celdas vecinas sube a 100%.