Estudio comparativo de las técnicas de acceso múltiple utilizadas en telefonía celular

Wenceslao Rivas*

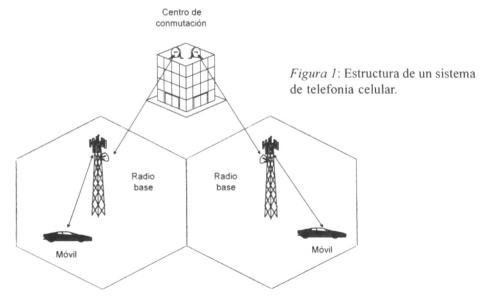
Resumen

En este estudio se analizan las técnicas de acceso múltiple que actualmente se emplean en sistemas de telefonía celular, y al hacer la comparación entre éstas se ha obtenido como resultado que la tecnología de Acceso Múltiple por División de Código (CDMA) se presenta como la que mayores ventajas ofrece sobre el resto de tecnologías, dentro de las cuales la que originalmente se utilizó (Acceso Múltiple por División de Frecuencia, FDMA) ha quedado prácticamente superada por las tecnologías digitales. En este documento se exponen las razones que apuntan hacia el resultado mencionado.

1. Introducción

El concepto de acceso múltiple en un sistema de comunicación se refiere al caso en el cual existe un cierto número de aparatos de transmisión y recepción (por ejemplo: una red telefónica celular) cuando a la vez existe una cierta cantidad, menor a la anterior, de canales de comunicación por los cuales se conducen los mensajes que son dirigidos desde y hacia los aparatos; se da, entonces, en este caso que cuando un usuario necesita comunicarse solicita el uso de un canal y el sistema le asigna cualquiera de los canales libres en ese momento.

En un sistema de telefonía celular el medio de transmisión es mixto, una parte es fija, ésta comprende la conexión de las estaciones con el resto de la red telefónica pública, y la otra es móvil, que es el trayecto entre los aparatos y las estaciones. Como los mensajes deben conducirse vía aérea, cada operador (empresa que ofrece y administra el servicio de telefonía celular) tiene a disposición un espacio en el espectro radioeléctrico nacional. Dentro de este espacio el operador deberá ubicar los canales por los cuales se establece cada comunicación.



^{*} Ingeniero en electrónica por la Universidad Don Bosco; Diploma de ingeniero en electrotecnia por la Technische Universität Berlin en 1997. Docente en la Escuela de Electrónica de la Universidad Don Bosco.

2. Principio de funcionamiento de la telefonía celular

Los objetivos de los sistemas de comunicación de acceso múltiple (celulares y PCS¹) son:

- Servicio de voz de calidad cercana a la de los sistemas alambrados.
- Cobertura geográfica casi universal.
- Bajo costo de equipo tanto para los abonados como para las plantas fijas.
- Número mínimo de estaciones fijas de radio.

Las agencias reguladoras del uso del espacio radioeléctrico han asignado un ancho de banda limitado para estos servicios, de manera que las soluciones deben alcanzar alta eficiencia del espacio otorgado, donde esto es medido en *Erlangs* por unidad de área de servicio por MHz. En algunos sistemas cada operador de celulares tiene por ejemplo 25 MHz a disposición para las dos direcciones de comunicación.

La solución original para un sistema celular hace uso de múltiples estaciones fijas. Cada estación sirve a los abonados dentro de un área geográfica limitada (célula). Cuando un abonado se mueve de una célula a otra el sistema cede el control de la llamada de la célula anterior a la nueva. Esta transferencia de control es conocida como handoff o handover.

El sistema original se llamó Advanced Mobile Phone System (AMPS), el cual es utilizado en Norteamérica, encontrándose sistemas similares en otras regiones del mundo.

2.1 Múltiple utilización de frecuencias

El concepto de múltiple utilización de frecuencias es un punto clave en el concepto de sistema celular. Puesto que hay cientos de canales disponibles, si cada frecuencia se asignara únicamente a una célula la capacidad total del sistema sería igual a la cantidad total de canales corregida por la probabilidad de bloqueo de *Erlang*, dando como resultado una cantidad de

solamente unos pocos de miles de abonados. Por medio de la utilización múltiple de frecuencias el sistema puede crecer sin límites geográficos.

La nueva utilización de una frecuencia depende decisivamente del hecho de que la atenuación del campo electromagnético en la banda que ocupan los celulares y en el medio geográfico de servicio tiende a aumentar más rápidamente con la distancia que en el espacio libre. Experimentalmente se ha demostrado en forma repetida que típicamente la intensidad de campo decae proporcionalmente a R⁻ⁿ, donde 3<n<5 (en el espacio libre n=2).

Si se supone un sistema ideal que da servicio a un área plana y se asume que la señal de radio se propaga uniformemente a R⁻ⁿ para dar óptima cobertura a tal área las celdas tendrán una distribución hexagonal.

Del total de canales disponibles se harán 7 grupos de canales, donde uno será utilizado en una celda y los seis restantes en las celdas adyacentes, luego los mismos grupos se asignarán a otras celdas, siempre que no hayan celdas adyacentes utilizando los mismos canales. Este modo de proceder se conoce como un patrón de uso múltiple de modo 7.

En forma más general, se designa como patrón de uso múltiple de frecuencia de modo k a que en un sistema la cantidad total de canales (ranuras de frecuencia) disponibles se distribuyan en una cantidad k de células.



Figura 2: Ilustración de la geometría de cobertura por células hexagonales (K=7). (Fuente: Ross).

PCS: Personal Communication Systems: sistema de comunicacion móvil que se diferencia de la telefonía celular básicamente en que también contempla la prestación de servicios de comunicación adicionales.

2.2 Sectorización de antena

Puesto que uno de los factores que limita el tamaño de las celdas es la razón de atenuación de la señal, una posibilidad teórica para reducir el tamaño del área en la que se utiliza un grupo de canales es a través de la utilización de antenas sectorizadas, es decir antenas no omnidireccionales que cubren cada una sólo 120° de azimut; de esta manera se podría implementar una especie de segundo patrón de utilización múltiple de frecuencia, esta vez de modo 3, obteniéndose así un incremento en la capacidad del sistema. Condición necesaria para esto es que no exista interferencia entre sectores. Una razón, a la postre más importante, para llevar a cabo una sectorización de antena es que es precisamente mediante el uso de antenas direccionales que se consigue que la potencia de radiación decaiga más rápidamente con la distancia en un sistema celular que en espacio libre.

2.3 Tecnologías bajo estudio

La estructura arriba descrita, a lo largo de la historia de la telefonía celular, ha utilizado distintas técnicas de acceso múltiple; la que se utilizó en la llamada primera generación de las comunicaciones móviles (etapa analógica) fue la de Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA), utilizada en el ya mencionado estándar norteamericano AMPS. En FDMA los canales de comunicación consisten en subintervalos de frecuencia dentro del rango total asignado. En cada intervalo de frecuencia asignado a un canal se encuentra contenido el mensaje, el cual ha sido modulado en frecuencia para efectos de transmisión.

La técnica de Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA) se ha empleado en sistemas celulares tanto en forma única como en conjunto con alguna de las otras; para el caso, se analizarán las ventajas que ésta provee a un sistema originalmente analógico, por ejemplo en el estándar IS-136 cada canal de frecuencia es utilizado por medio de una multicanalización de tiempo por tres canales a la vez.

En la técnica de Acceso Múltiple por División de Código (CDMA) los canales de comunicación se diferencian entre sí mediante la utilización de portadoras que asemejan señales de ruido, donde todas las señales están presentes. Estas señales portadoras, las cuales son generadas digitalmente, tienen características pseudoaleatorias y aunque no son exactamente ortogonales, presentan baja correlación, lo cual permite que, por medio de una circuitería adecuada, puedan ser diferenciadas aún en presencia de otras señales.

La utilización de portadoras pseudoaleatorias, con todos los usuarios ocupando el mismo espectro, produce que el ruido efectivo sea el resultado de la suma de las señales de todos los otros usuarios. El receptor compara su entrada, por medio de la función de correlación, con la portadora esperada, para así identificar la señal deseada de entre las varias señales superpuestas. Luego de esta operación, la relación señal a ruido (SNR) en el detector se ha incrementado a un valor adecuado para que, a pesar de la presencia de las otras señales, la información del canal que interesa se recupere.

3. Comparación entre tecnologías

3.1 Elementos de juicio

Los siguientes parámetros son quizá los más representativos de la eficiencia de un servicio de telefonía celular:

- · Continuidad del servicio
- Claridad en la audición
- · Bajo precio
- · Privacidad en la llamada
- Oferta de servicios adicionales

Por otra parte, a nivel técnico, los factores bajo los cuales se ha de desarrollar la comparación entre tecnologías son los siguientes:

- Capacidad del sistema
- · Calidad de señal
- Facilidad de planeación del sistema
- Complejidad del sistema
- Posibilidad de fallas durante el handoff.

Para iniciar la comparación entre tecnologías se tratarán como base los parámetros técnicos y luego se trasladarán estos resultados a los parámetros de calidad percibidos por el usuario:

3.2 Capacidad del sistema

La capacidad del sistema se mide como la cantidad de canales que una célula maneja. Para el caso de FDMA esto vendría dado por:

$$Ncpc = \frac{W}{K.B_c}$$
 (1)

donde Ncpc es la cantidad de canales por célula, W es el ancho de banda total (en una dirección), K es el factor de utilización múltiple de frecuencias y B_c es el ancho de banda de un canal.

Como ejemplo, si se tienen: un W de 12.5 MHz, un K de 7 y un B de 30 Khz. se tendrá un Nepe de 59. Al realizarse una sectorización de antena, para el caso de 3 sectores, el número de canales por sector es de 19. Anteriormente se había mencionado que la sectorización de antena presentaba la posibilidad de reducir el área de cobertura de los canales disponibles permitiendo al sistema servir a más abonados por unidad de área, en FDMA esto no se obtiene puesto que siendo los sectores de una misma célula adyacentes entre sí y siendo el patrón de radiación de las antenas no ideal se hace necesario que la cantidad de canales que maneja una célula se distribuya en la cantidad de sectores que se establezcan, manteniéndose por lo tanto el espacio geográfico de cobertura del número de canales disponibles.

Un hecho determinante para que la utilización de TDMA en IS-136 aumente la capacidad de un sistema sobre la base original de AMPS es que tal sistema incluya una digitalización y compresión (eliminación de bits innecesarios) de la señal, de esta manera la señal analógica original se convierte en una señal digital de 9600 bps de velocidad. La capacidad de este sistema vendría dado por el resultado de (1) multiplicado por 3, es decir 7 canales por sector para un ancho de banda total disponible de 1.5 MHz.

La capacidad de un sistema CDMA se ve limitada por el máximo de interferencia con la cual le es posible trabajar, conservando las condiciones mínimas para una calidad de señal aceptable. En este caso, al hablar de interferencia se debe entender tanto como el ruido térmico de los circuitos, interferencias comunes en los medios de comunicación y las señales del resto de canales que hacen uso del mismo espacio. Para cuantificar lo anterior, a continuación se muestra la correspondiente descripción matemática:

Base para el presente desarrollo matemático es la definición del parámetro relación señal a ruido SNR:

$$SNR = \frac{E_b}{N_0}$$
 (2)

donde:

E_b es la energía de un bit

N_Q es la densidad espectral de potencia de ruido más interferencia

y además:

$$E_b = \frac{P_s}{R} \tag{3}$$

P_s es la potencia de la señal

R es la velocidad de bits

Considerando que los espectros de potencia de las señales son rectangulares con ancho W

$$N_0 = F_N k_b T_0 + W^{-1} \sum_{\text{otros usuarios}} P_i$$
 (4)

El primer término representa el nivel de ruido térmico del receptor (F_N = figura de ruido del receptor; K_b = constante de Boltzman; T_0 = temperatura)

$$\left(\frac{E_b}{(N_0 + I_0)}\right)_j = \frac{\frac{P_j}{R}}{N_0 + W^{-1} \sum_i P_i}$$
 (5)

Asumiendo que se ha logrado un control de potencia perfecto:

$$N_0 + I_0 = N_0 + (N-1)P_s$$

$$N_0 = F_N k_b T_0$$
(6)

donde N es la cantidad total de canales.

$$\frac{E_b}{\left(N_0 + I_0\right)} = \frac{\frac{P_s}{R}}{N_0 + (N - 1)\frac{P_s}{W}} = \frac{\frac{W}{R}}{\left(N_0 \frac{W}{P}\right) + N - 1}$$
(7)

La expresión de la ec. (7) describe la condición de señal a ruido de un sistema con un número N de canales. A la inversa la capacidad del sistema se determinaría en función de la SNR mínima deseada. Despejando N de (7)

$$N-1 = \frac{\frac{W}{R}}{\left(\frac{E_b}{(N_0 + I_0)}\right)_{min}} - \frac{N_0}{P_s} \xrightarrow{P_s \to \infty} \frac{\frac{W}{R}}{\left(\frac{E_b}{(N_0 + I_0)}\right)_{min}} (8)$$

Operando en notación logarítmica (dB)

$$N \approx \left(\frac{W}{R}\right)_{dB} - \left(\frac{E_b}{(N_0 + I_0)}\right)_{min,dB}$$
 (9)

Al ampliar el análisis a una estructura celular habrá que tomar en cuenta la interferencia producida por los transmisores de las células vecinas. Según [2] esta contribución adicional de interferencia se puede modelar de una manera simplificada por medio de un factor F, el cual típicamente tiene un valor de 1.6

$$F = \frac{\text{potencia total de interferencia}}{\text{potencia de interferencia de la propia celula}}$$
 (10)

La ec (7) se corrige entonces con este factor:

$$N = \frac{\frac{W}{R}}{\left(\frac{E_b}{(N_0 + I_0)}\right)_{min}}.F$$
(11)

Como ejemplo, usando los datos establecidos en el estándar IS-95A: W=1.25 MHz, R=9.6 kbps, SNR mínimo de 6 dB. Considerando un sistema de una sola estación (una sola célula) la capacidad del sistema sería de N = 32. Si además se considera el factor de utilización múltiple efectiva de frecuencia F, la cantidad de usuarios por célula, o por sector si es que adicionalmente existe sectorización de antena, viene a ser de 20.

Tabla 1: Tabla comparativa de los ejemplos mencionados arriba

Técnica de acceso múltiple	FDMA	FDMA/TDMA	CDMA
Estándar	AMPS	IS-136	IS-95A
Ancho de banda total	12.5 MHz	1.5 MHz	1.25 MHz
Factor de utilización múltiple de frecuencias (7 células, 3 sectores)	21	21	12
Ancho de banda de cada señal/ Velocidad de datos	30 khz	9.6 kbps	9.6 kbps
Cantidad de canales por sector	19	7	20

² Lo que tiene lugar es una múltiple utilización de código que conduce a un factor de 1.6 por la interferencia entre células vecinas.

En la tabla 1 se hace claro que por principio de funcionamiento la tecnología CDMA proporciona la mejor utilización del ancho de banda disponible.

3.3 Calidad de señal

La pregunta sobre la calidad de señal de una transmisión se puede tratar desde la perspectiva de la comparación entre los sistemas analógicos y los sistemas digitales. Los primeros están fuertemente condicionados por el nivel de interferencia del medio de transmisión, es decir que el SNR del canal resulta determinante y su mejoramiento a través de las etapas de transmisión y recepción es, salvo algunas excepciones, casi imposible.

Por otra parte, en un sistema digital, donde la calidad de la señal resultante se evalúa por medio de la probabilidad de error de bit (Bit Error Rate, BER), la cual si bien es cierto está fuertemente relacionada con la relación señal a ruido del medio de transmisión, existe la posibilidad de que por medio de ciertas técnicas, a pesar de que el canal presente condiciones especialmente adversas, la señal sea recuperada con una mínima cantidad de errores. Sin embargo esta posibilidad de una transmisión (en teoría), incluso libre de errores, requiere un sacrificio en capacidad y en complejidad del sistema, por ejemplo los casos presentados en la tabla 1 corresponden a sistemas que proveen señales similares en calidad, en donde, a diferencia del FDMA, a costa de una disminución en capacidad la calidad de señal que proveen los sistemas digitales (TDMA y CDMA) puede incrementarse.

3.4 Facilidad de planeación del sistema

El diseño de un sistema de telefonía celular consiste básicamente en lo siguiente: en base a la densidad esperada de usuarios y a la cantidad de canales disponibles por sector se determina el tamaño que debe tener la célula. Luego se hace la distribución de canales a cada célula, de tal modo que exista la menor interferencia posible entre ellas, es decir que células que utilizan los mismos canales estén lo suficiente-

mente alejadas entre sí. Así mismo, se tiene que determinar la ubicación de las estaciones base de cada célula. Además se debe hacer el cálculo de la potencia de transmisión de la estación base.

El procedimiento antes presentado es igualmente válido para sistemas que utilizan distintas tecnologías. En FDMA y en TDMA estándar IS-136 la distribución de canales consiste en la antes explicada distribución de frecuencias; mientras que en CDMA, como el rango de frecuencias utilizado es el mismo para todos los sectores, la manera en que es posible la expansión del sistema, a pesar de tener un número limitado de canales, es la utilización múltiple de códigos, los cuales se distribuven de manera similar a como se realiza la distribución de frecuencias para las otras tecnologías, con la ventaja de que se puede disponer de un número en teoría ilimitado de códigos dependiendo de la longitud en bits del mismo.

3.5 Complejidad del sistema

Haciendo una descripción bastante simple de la estructura de un sistema celular sus componentes básicos son los siguientes:

- Centro de conmutación
- · Radio base
- Transceptor³ móvil

Las funciones del centro de conmutación son la gestación y el mantenimiento de los radioenlaces, la localización del móvil y la transferencia de canales (*handoff*).

Las funciones de la radio base son la evaluación del rendimiento de todos los transceptores, la evaluación de los niveles de potencia para la transferencia (*handoff*) y el control del cambio de protocolo de aire a red fija.

Las funciones del transceptor móvil son la recepción y transmisión de mensajes, la selección del canal de control por programación, la selección de la banda, la selección del canal con mayor calidad, la sintonización de los canales, la verificación del número de llamada y la temporización de secuencias de fallos.

³ Aparato transmisor-receptor.

La diferencia que existe por el uso de distinta tecnología afecta únicamente a la llamada interfaz aire, es decir a la forma de comunicación entre los móviles y la estación base, esto significa que el centro de conmutación conserva su misma estructura, en cambio la radio base y sobre todo el móvil poseerán diferente estructura.

Los sistemas que incorporan la digitalización de la señal utilizan una serie de etapas adicionales a la sola modulación en frecuencia que básicamente se emplea en los sistemas analógicos (FDMA). Por ejemplo, el sistema NADC⁴ (figura 3) tiene en el transmisor las etapas de codificación de voz y codificación de línea, cuyas funciones respectivas son primero reducir la cantidad de bits (unidades de señal) necesarias para representar la información

transmitida y luego agregar de manera sistemática bits que permitan que el transmisor interprete correctamente la información a pesar de que por efectos de ruido en la transmisión se confundan los símbolos⁵ utilizados. Por supuesto, el receptor cuenta con etapas de procesamiento que revierten y utilizan los procesos efectuados en el transmisor. Para el sistema que utiliza CDMA la diferencia fundamental que existe con respecto al sistema NADC es el tipo de modulación, que en este caso significa la utilización de una circuitería más complicada en la etapa de demodulación, además de esto el transceptor para CDMA debe contar con un sistema de control de potencia de modo que la estación base de cada célula reciba todas las señales aproximadamente al mismo nivel de potencia (consultar Ross).

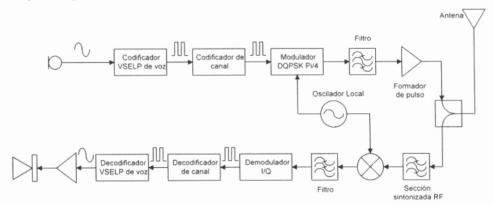


Figura 3: Esquema de un transmisor-receptor de TDMA. (Fuente: Ratliff).

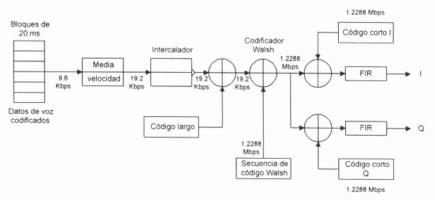


Figura 4: Esquema de un transmisor de CDMA. (Fuente: Thompson).

Este es un estándar que utiliza TDMA sobre la base original del AMPS.

⁵ Símbolo: unidad de señal que representa una determinada combinación binaria de m bits y está presente durante el llamado intervalo de símbolo.

14 Wenceslao Rivas

3.6 Posibilidad de fallas durante el handoff

En cuanto a la transferencia de llamadas de una célula a otra (handoff) los procedimientos que le puedan dar mayor seguridad a esta operación no dependen de la tecnología de acceso utilizada puesto que se lleva a cabo a nivel del centro de conmutación.

4. Conclusiones

Se ha mencionado anteriormente que las tecnologías digitales de acceso múltiple proveen una mayor versatilidad a los sistemas, puesto que permiten un procesamiento de señal más efectivo, por medio del cual la calidad de señal y la capacidad del sistema se pueden incrementar según la tecnología de fabricación lo permita y se puede controlar prácticamente a voluntad. Esto significa que un operador, el cual ofrece un sistema que utilice tecnologías como TDMA y CDMA, puede asegurar a los usuarios una calidad de señal, la cual se puede calificar de aceptable a muy buena. Ahora bien, entre

CDMA y TDMA, ver tabla 1, la primera proporciona una mayor capacidad al sistema en el cual se utilice. Esto trae como consecuencia que para una red con una demanda y cobertura dadas se harán necesarias menos células, lo cual reduce los costos de infraestructura. En cuanto a los teléfonos, los de CDMA tienden a ser un poco más complejos que sus similares de TDMA por las funciones adicionales como generación de portadoras pseudoaleatorias y el control de potencia. Por estas razones debería esperarse que el sistema que utilice CDMA sea más rentable.

Un último aspecto que se debe mencionar es con relación al grado de privacidad que un sistema pudiera ofrecer en el trayecto de transmisión por aire; en el caso del sistema AMPS cualquier radioaficionado con un receptor FM puede oír una transmisión; en cambio, en los sistemas digitales, sobre todo con CDMA, para hacer lo mismo se haría necesario un sistema de intercepción basado en la tecnología de los mismos teléfonos.

Bibliografia

Ratliff B. (1996). Conceptos sobre el Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA): Material escrito para el Simposio de 1996 sobre las pruebas para Unidades Celulares / Servicios de Comunicaciones Personales. Hewlett-Packard

Ross A. H. M. Página Web: "What is CDM4?".

Buscar a través de http://www.cdg.org/
Tech/a_ross/index.html

Thompson, K. y Whipple D. (1996). Conceptos sobre el Acceso Múltiple por División de

Código (CDMA): Material escrito para el Simposio de 1996 sobre las pruebas para Unidades Celulares / Servicios de Comunicaciones Personales. Hewlett-Packard.

Para estudiar con más profundidad la técnica de espectro disperso (*Spread Spectrum*) la cual es la base de CDMA se puede consultar entre otros el siguiente libro:

Simon, M.K. (1994). Spread Spectrum Communications handbook. McGraw-Hill. EE.UU.

Reconocimiento al Ing. Julio Hernández por su aporte a este trabajo en concepto de fuentes bibliográficas, comentarios y, sobre todo, por la información proporcionada a través de su cátedra.