

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO  
LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y  
ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

TECNICAS DE ACCESO MULTIPLE PARA  
COMUNICACIONES INALAMBRICAS

POR ING. JAIME GARZA MARTINEZ

TESIS EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN ELECTRONICA

CD UNIVERSITARIA A 6 DICIEMBRE 2007

## **TECNICAS DE ACCESO MULTIPLE PARA COMUNICACIONES INALAMBRICAS.**

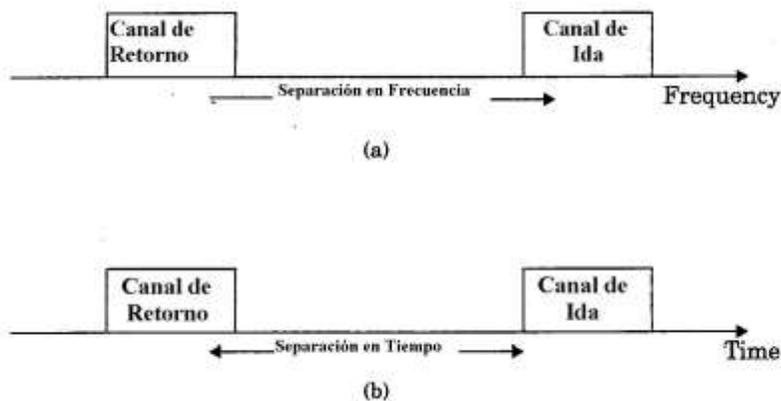
Los esquemas de acceso multiple son utilizados para permitir a muchos usuarios móviles compartir simultáneamente una cantidad finita de espectro de radio. La compartición de espectro es necesaria para lograr una alta capacidad por asignar simultáneamente el ancho de banda disponible ( o la cantidad de canales disponibles ) a múltiples usuarios. Para comunicaciones de alta calidad, esto debe ser hecho sin una degradación grande en el funcionamiento del sistema.

### **1.1 Introducción.**

En sistemas de comunicaciones inalámbricas, es frecuentemente deseable permitir al suscriptor enviar y recibir información en forma simultanea. Por ejemplo, en sistemas telefónicos convencionales, es posible hablar y escuchar simultáneamente, y este efecto, llamado DUPLEXING, es generalmente requerido en sistemas telefónicos inalámbricos. El efecto de DUPLEXING puede ser hecho utilizando técnicas con dominio en la frecuencia o en el tiempo. El DUPLEXING por división de frecuencia (FDD) proporciona dos distintas bandas de frecuencias para cada usuario. La banda hacia delante o canal de ida (FORWARD) proporciona o lleva trafico desde la estación base hacia el móvil, y la banda de retorno o canal de retorno (REVERSE) proporciona o lleva trafico desde el móvil hacia la estación base, para entender mejor esto, tomemos como referencia siempre la estación base y si es trafico que sale, entonces será en el canal de ida o FORWARD y si es trafico que entra será en el canal de retorno o REVERSE. Bien en FDD, cualquier canal dúplex consiste en dos canales simplex, y un dispositivo llamado duplexer es utilizado dentro de cada unidad del suscriptor y de la estación base para permitir la transmisión y recepción simultanea en el canal en dúplex. La frecuencia de separación entre el canal de ida y de retorno es constante a través del sistema, independientemente de que canal sea ocupado. Duplexing por división del tiempo ( TDD ) utiliza el tiempo en lugar de frecuencia para proporcionar los enlaces de ida y de retorno . Si la separación en tiempo entre los tiempos de ida y de retorno es pequeño, entonces la transmisión y recepción de datos parece ser

simultanea para el usuario. La figura 1.1 ilustra las técnicas FDD y TDD. TDD permite comunicación en un canal simple al contrario de FDD que necesita dos canales simplex y simplifica el equipo del suscriptor debido a que no necesita de un duplexer.

Existen varias diferencias entre las técnicas FDD y TDD. FDD esta orientado hacia sistemas de radiocomunicación que proporcionan radiofrecuencias individuales a cada usuario. Debido a que cada transreceptor transmite y recibe señales de radio simultáneamente las cuales pueden variar mas de 100 db, la asignación de frecuencias utilizadas para los canales de ida y de retorno debe ser cuidadosamente coordinada con usuarios fuera de banda que ocupan el espectro entre estas dos bandas. Además, la separación de frecuencia debe ser coordinada para permitir el uso de tecnología de RF de bajo costo. TDD habilita a cada transreceptor a trabajar ya sea como receptor o transmisor en la misma frecuencia, y elimina la necesidad de bandas separadas de canales de ida y de retorno. Sin embargo, hay un retardo en tiempo debido al hecho de que las comunicaciones no son en full dúplex en el sentido estricto.



**Figura 1.1 Tipos de Duplexing.**

**(a) FDD provee dos canales simplex al mismo tiempo.**

**(b) TDD provee dos ranuras de tiempo en la misma frecuencia.**

### 1.1.1 Introducción a Acceso Múltiple.

Acceso múltiple por división de frecuencia ( FDMA ), acceso múltiple por división del tiempo ( TDMA ) y acceso múltiple por división de código ( CDMA ) son las tres técnicas mayormente utilizadas para compartir el ancho de banda disponible en un sistema de comunicaciones inalámbricas. Estas técnicas pueden ser agrupadas como sistemas de banda angosta y sistemas de banda ancha, dependiendo de que tanto ancho de banda es asignado a los usuarios. La técnica de duplexing de un sistema de acceso múltiple es usualmente descrita junto con el esquema de acceso múltiple, como se muestra en los siguientes ejemplos.

**Sistemas de Banda Angosta-** El termino banda angosta es utilizado para relacionar el ancho de banda de un canal simple al ancho de banda coherente del canal. En un sistema de acceso múltiple de banda angosta, el espectro disponible es dividido en un gran numero de canales de banda angosta. Los canales son usualmente operados en FDD. Para minimizar la interferencia entre los enlaces de ida y de retorno en cada canal, la separación en frecuencia es hecha lo más grande posible en el espectro de frecuencias, permitiendo el uso de duplexers de bajo costo y con esto el uso de una antena común en cada unidad del suscriptor. En FDMA de banda angosta, un usuario es asignado a un canal en particular el cual no es compartido por otros usuarios en las inmediaciones, y si FDD es utilizado (esto es, cada canal tiene un enlace de ida y otro de retorno) entonces el sistema es llamado FDMA/FDD. TDMA de banda angosta, de otra manera, permite a los usuarios compartir el mismo canal pero asigna una ranura de tiempo única a cada usuario en una forma cíclica en el canal. Para TDMA de banda angosta, hay generalmente un gran numero de canales asignados utilizando ya sea FDD o TDD, y cada canal es compartido utilizando TDMA. Tales sistemas son llamados TDMA/FDD o TDMA/TDD.

**Sistemas de Banda Ancha-** En sistemas de banda ancha, el ancho de banda de transmisión de un canal simple es mucho más grande que el ancho de banda coherente del canal. De esta forma, el desvanecimiento por multitrayectoria no afecta grandemente a la señal

recibida en un canal de banda ancha, y el desvanecimiento selectivo de frecuencia ocurre únicamente en una pequeña fracción del ancho de banda de la señal. En sistemas de acceso múltiple de banda ancha, los usuarios pueden transmitir en una gran parte del espectro. Un gran número de transmisores pueden también transmitir en el mismo canal. TDMA asigna ranuras o intervalos de tiempo a muchos transmisores en el mismo canal y permite únicamente a uno acceder al canal en cualquier instante de tiempo, mientras que CDMA de espectro disperso permite a todos los transmisores acceder al canal al mismo tiempo. TDMA y CDMA pueden utilizar las técnicas de duplexing de FDD o TDD.

En adición a FDMA, TDMA y CDMA, otros dos esquemas de acceso múltiple son utilizados para comunicaciones inalámbricas. Estos son **Radiopaquetización (PR)** y **Acceso Múltiple por División de Espacio (SDMA)**. En este trabajo, las técnicas de acceso múltiple, su funcionamiento, y su capacidad en sistemas celulares digitales serán discutidos.

La tabla 1.1 muestra las diferentes técnicas de acceso múltiple que utilizan varios sistemas de comunicaciones inalámbricas.

<b>Sistema Celular</b>	<b>Técnica de acceso Múltiple</b>
AMPS (Advance Mobile Phone System)	FDMA / FDD
GSM (Global System for Mobile)	TDMA / FDD
USDC (U.S. Digital Celular)	TDMA / FDD
JDC (Japanese Digital Celular)	TDMA / FDD
CT2 (Cordless Telephone)	FDMA / TDD
DECT (Digital European Cordless Telephone)	FDMA / TDD
IS-95 (U.S. Narrowband Spread Spectrum)	CDMA / FDD

**Tabla 1.1 Técnicas de Acceso Múltiple utilizadas en diferentes Sistemas de Comunicación Inalámbricas.**

## **1.2 Acceso Múltiple por División de Frecuencia ( FDMA).**

Acceso múltiple por división de frecuencia asigna canales individuales a usuarios individuales. Esto puede ser visto en la figura 1.2 en la cual cada usuario es asignado a una

única frecuencia o canal. Estos canales son asignados en demanda a usuarios que necesitan de servicio. Durante el periodo de llamada, ningún otro usuario puede compartir la misma frecuencia o canal. En sistemas FDD, los usuarios son asignados a un canal como un par de frecuencias; una frecuencia es utilizada como FORWARD o canal de ida, mientras que la otra es utilizada como REVERSE o canal de retorno. Las características de FDMA son las siguientes:

- El canal FDMA lleva únicamente un circuito telefónico a la vez.
- Si un canal FDMA no está en uso, entonces permanece desempleado y no puede ser usado por otros usuarios para incrementar o compartir capacidad. Este es esencialmente un recurso desperdiciado.
- Después de la asignación de un canal de voz, la estación base y el móvil transmiten simultáneamente y continuamente.
- Los anchos de banda de los canales FDMA son relativamente angostos ( 30 KHz. ) ya que cada uno soporta un circuito por portadora. Esto es, FDMA es usualmente implementado en sistemas de banda angosta.
- El símbolo tiempo es grande comparado al retardo promedio de dispersión. Esto implica que la cantidad de interferencia de intersímbolo es baja y, entonces, poca o ninguna ecualización es necesaria en sistemas de banda angosta FDMA.
- La complejidad de los sistemas FDMA es menor cuando los comparas con los de TDMA, aunque todo esto está cambiando debido a que los métodos de procesamiento digital de señales están mejorando para TDMA.
- Debido a que FDMA es un esquema de transmisión continua, menos bits son necesarios para propósitos de encabezado (overhead) (tales como sincronización y trama) comparado con TDMA.

- ° Los sistemas FDMA tienen un costo por sitio más grande que los sistemas TDMA, debido al uso de una portadora por canal, y la necesidad de usar costosos filtros pasa banda para eliminar las radiaciones espurias en la estación base.
- ° La unidad móvil FDMA utiliza duplexer debido a que el transmisor y el receptor trabajan al mismo tiempo. Esto resulta en un incremento en el costo de la unidad del suscriptor y de la estación base.
- ° FDMA requiere de un estrecho filtrado de RF para minimizar la interferencia de canal adyacente.

**Efectos No Lineales en FDMA-** En un sistema FDMA, muchos canales comparten la misma antena en la estación base. Los amplificadores de potencia o los combinadores de potencia, cuando operan o están cerca de saturación para máxima eficiencia de potencia, son no-lineales. La no-linealidad causa dispersión de la señal en el dominio de la frecuencia y generan frecuencias de intermodulación. Intermodulación (IM) es una radiación de RF indeseada la cual puede interferir con otras señales en los sistemas FDMA. La dispersión del espectro resulta en una interferencia de canal adyacente. La intermodulación es la generación de armónicas indeseables. Las armónicas generadas fuera de la banda del móvil producirán interferencia a servicios adyacentes, mientras que aquellas que se presenten dentro de la banda causaran interferencia a otros usuarios del sistema.

### **Ejemplo.**

Encontraremos los productos de intermodulación que se producen si una estación base transmite dos frecuencias portadoras en 1930 Mhz. y 1932 Mhz., las cuales son amplificadas por un amplificador que trabaja saturado. Si la banda de radio móvil esta asignada desde 1920 a 1940 Mhz., determinaremos cuales caen dentro y fuera de la banda.

**Solución.**

Los productos de intermodulación ocurren en frecuencias  $mf_1 + nf_2$  para valores enteros de  $m$  y  $n$  que se encuentran en el rango de  $-\infty$  a  $+\infty$ . Algunos de los posibles productos de intermodulación que son producidos por un dispositivo no lineal son:

$$(2n + 1)f_1 - 2nf_2, (2n + 2)f_1 - (2n + 1)f_2, (2n + 1)f_1 - 2nf_2, (2n + 2)f_2 - (2n + 1)f_1, \text{ etc. para } n = 0, 1, 2, \dots$$

La tabla siguiente muestra una lista de productos de intermodulación.

n=0	n=1	n=2	n=3
1930	1926	1922	1918
1928	1924	1920	1916
1932	1936	1940	1944*
1934	1938	1942*	1946*

Las frecuencias en la tabla marcadas con un \* son aquellas que caen fuera de la banda de radio móvil.

---

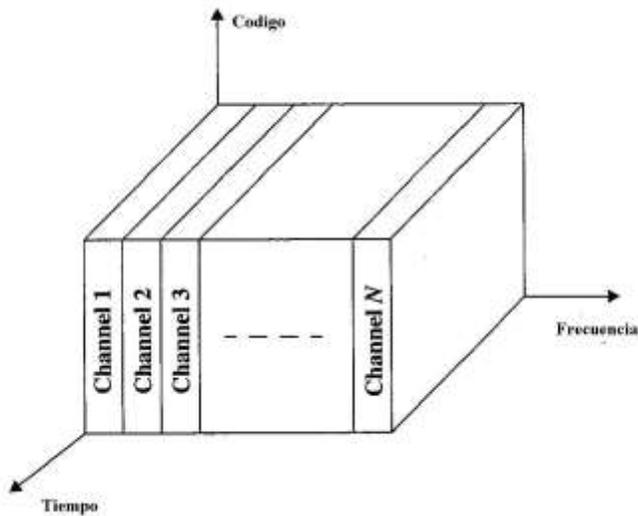
El primer sistema celular analógico en Estados Unidos, Advance Mobile Phone System por sus siglas en inglés AMPS, está basado en FDMA / FDD. Un usuario ocupa un canal mientras la llamada está en progreso, y este canal consiste de 2 frecuencias simplex las cuales son duplexadas con una separación de 45 Mhz. Cuando una llamada es completada, o cuando ocurre un cambio de célula, el canal es desocupado de tal forma que otro usuario puede utilizarlo. Múltiples o simultáneos usuarios son acomodados en AMPS dando a cada usuario un canal en particular. Las señales de voz son enviadas en el canal de ida (FORWARD) desde la estación base a la unidad móvil y en el canal de retorno (REVERSE) desde el móvil hacia la estación base. En AMPS, una modulación analógica

de banda angosta ( NBFM ) es utilizada para modular la portadora. El numero de canales que puede ser simultáneamente soportados en un sistema FDMA esta dado por.

$$N = \frac{B_t - 2B_{guard}}{B_c}$$

(1.1)

Donde  $B_t$  es la banda total asignada de espectro,  $B_{guard}$  es la banda de guarda asignada al final del espectro asignado, y  $B_c$  es el ancho de banda del canal.



**Figura 1.2**  
**FDMA donde diferentes canales son asignados a diferentes bandas de frecuencias**

### 1.3 Acceso Múltiple por División de Tiempo ( TDMA ).

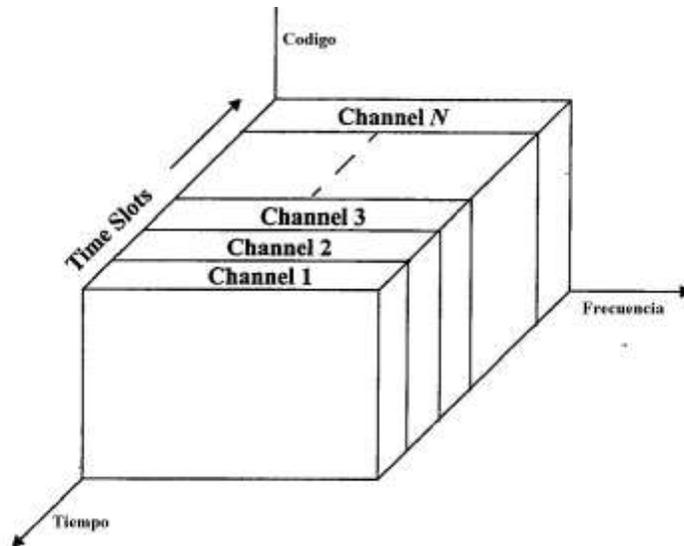
Los sistemas de acceso múltiple por división de tiempo dividen el espectro en ranuras o intervalos de tiempo, y en cada ranura únicamente un usuario es permitido para transmitir o recibir. Esto puede ser visualizado en la figura 1.3 en la cual cada usuario ocupa cíclicamente repitiendo una ranura de tiempo, de tal forma que cada canal puede ser

descrito como una ranura en un tiempo en particular que ocurrirá cada trama ( frame ) donde N ranuras de tiempo forman una trama o frame. Los sistemas TDMA transmiten datos en un método de almacenar-enviar, de esta forma la transmisión de cada usuario no es continua. Esto implica que, al contrario de los sistemas FDMA en los cuales se utilizan FM analógico, datos y modulaciones digitales deben ser utilizados en TDMA. Las transmisiones de varios usuarios son entrelazadas en una estructura de trama (frame) como se muestra en la figura 1.4. Ahí puede ser visto que una trama consiste de un cierto número de ranuras. Cada trama esta hecha de un preámbulo, un mensaje de información, y bits de cola. En TDMA / TDD la mitad de las ranuras de tiempo en la trama de mensaje de información serán utilizadas para los canales de ida y la otra mitad para los canales de retorno. En sistemas TDMA / FDD, una estructura similar o idéntica sería utilizada ya sea para transmisión de los canales de ida (FORWARD) y de retorno (REVERSE), pero las frecuencias portadoras serían diferentes para los canales de ida y de retorno. En general, los sistemas TDMA / FDD intencionalmente inducen varias ranuras de tiempo de retardo entre las ranuras de ida y de retorno de un usuario en particular, y así los duplexers no son necesarios en la unidad del suscriptor.

En una trama TDMA, el preámbulo contiene la información de dirección y sincronización que usan tanto la estación base y el suscriptor para identificar uno al otro. Tiempos de guarda son utilizados para permitir la sincronización de los receptores entre diferentes ranuras y tramas. Diferentes estándares TDMA inalámbricos tienen diferentes estructuras de trama, las características de TDMA incluyen lo siguiente.

- ° TDMA comparte un canal simple entre varios usuarios, donde cada uno hace uso de ranuras de tiempos que no se traslapan. El número de ranuras por trama depende de varios factores, tales como técnica de modulación, ancho de banda disponible, etc.

- ° La transmisión de datos para usuarios en un sistema TDMA no es continua, pero ocurre en ráfagas. Esto resulta en bajo consumo de batería, debido a que el transmisor del suscriptor puede ser apagado cuando no está en uso ( lo cual ocurre la mayoría del tiempo ).



**Figura 1.3**  
**Esquema de TDMA donde cada canal ocupa una ranura de tiempo cíclicamente repetitiva.**

° Debido a la discontinuidad de las transmisiones en TDMA, El cambio de célula ( handoff ) es mucho más simple para un suscriptor, debido a que es capaz de escuchar a otras estaciones base durante los tiempos muertos. Un aumentado o mejorado enlace de control, tal como cambio de célula asistido por el móvil ( por sus siglas en ingles, MAHO ) puede ser llevado a cabo por un suscriptor en una ranura de tiempo muerto en una trama de TDMA.

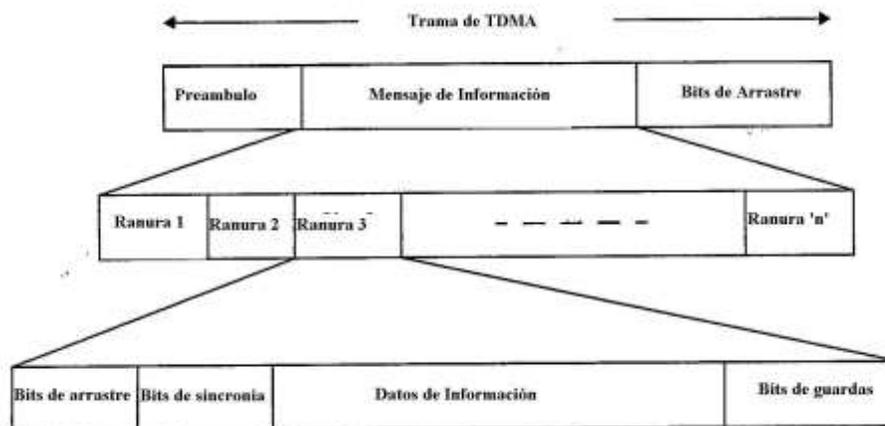
° TDMA utiliza diferentes ranuras de tiempo para transmisión y recepción, por lo tanto los duplexers no son necesarios. Aun si FDD es utilizado, un switch en lugar de un duplexer es todo lo necesario dentro de la unidad del suscriptor para cambiar entre transmisión y recepción.

° Ecuación adaptativa es comúnmente necesaria en sistemas TDMA, debido a que las tasas de transmisión son generalmente muy altas comparadas con canales FDMA.

◦ En TDMA, El tiempo de guarda debe ser minimizado. Si la señales transmitidas en los extremos de una ranura de tiempo son suprimidas abruptamente en orden para recortar el tiempo de guarda, el espectro transmitido se expandirá y causara interferencia en los canales adyacentes.

◦ Un encabezado de alta sincronía es requerido en sistemas TDMA debido a la transmisión de ráfagas. Las transmisiones en TDMA son en ranuras, y esto requiere que los receptores sean sincronizados en cada ráfaga de datos. En adición, las ranuras de guarda son necesarias para separar los usuarios, y esto resulta en sistemas TDMA que tienen encabezados grandes en comparación con FDMA.

◦ TDMA tiene la ventaja de que es posible asignar diferentes números de ranuras de tiempo por trama a diferentes usuarios. Por lo tanto el ancho de banda puede ser suministrado por demanda a diferentes usuarios reasignando ranuras de tiempo basados en prioridad.



**FIGURA 1.4 Estructura de una trama TDMA.**

**Eficiencia de TDMA-** La eficiencia de un sistema TDMA es una medida del porcentaje de datos transmitidos que contienen información contra los que forman los encabezados para el esquema de acceso. La eficiencia de la trama,  $n_f$ , es el porcentaje de bits por trama que contiene el dato transmitido. Note que el dato transmitido podría incluir bits de codificación

de la fuente y del canal, así que la eficiencia del usuario final de un sistema es generalmente menor que  $\eta_f$ . La eficiencia de la trama puede ser encontrada como sigue.

El numero de bits de encabezado por trama es,

$$b_{oh} = Nrbr + Ntibp + Ntbg + Nrbg \quad (1.2)$$

Donde,  $Nr$  es el numero de ráfagas de referencia por trama,  $Nt$  es el numero de ráfagas de trafico por trama,  $br$  es el numero de bits de encabezado por ráfaga de referencia,  $bp$  es el numero de bits de encabezado por preámbulo en cada ranura, y  $bg$  es el numero de bits equivalentes en cada tiempo de guarda, El numero total de bits por trama,  $bt$ , es

$$b_T = TtR \quad (1.3)$$

Donde  $Tt$  es la duración de la trama, y  $R$  es la velocidad del canal ( channel bit rate ). La eficiencia de la trama  $\eta_f$  esta dado por:

$$\eta_f = \left(1 - \frac{b_{OH}}{b_T}\right) \times 100\% \quad (1.4)$$

**Numero de canales en un sistema TDMA-** El numero de canales o ranuras de TDMA puede ser encontrado por multiplicar el numero de ranuras por canal, por el numero de canales disponibles y esto esta dado por,

$$N = \frac{m(B_{tot} - 2B_{guard})}{B_c} \quad (1.5)$$

Donde  $m$  es el numero máximo de usuarios en TDMA soportados en cada canal de radio. Note que las dos bandas de guarda, una en la parte baja de la frecuencia asignada y otra en la parte alta, son requeridas para asegurar que los usuarios en el extremo de la banda no se traslapen con otros servicios de radio adyacentes.

## **1.4 Acceso Múltiple por Espectro Disperso.**

Acceso múltiple por espectro disperso (SSMA) utiliza señales que tienen un ancho de banda el cual es varias veces más grande que el ancho de banda mínimo requerido.

Una secuencia de pseudo-ruido (PN) convierte una señal de banda angosta a una señal de banda ancha “como ruido” antes de la transmisión. SSMA también provee inmunidad a la interferencia por múltiple trayectoria y mejora o robustece la capacidad de acceso múltiple. SSMA no es muy eficiente en el uso de ancho de banda cuando es utilizado por un solo usuario. Sin embargo, debido a que muchos usuarios pueden compartir el mismo ancho de banda en espectro disperso sin interferir uno con otro, el sistema de espectro disperso llega a ser eficiente en ancho de banda en ambientes de múltiples usuarios. Es esta situación la que ha llamado la atención y el interés de los diseñadores de sistemas inalámbricos. Hay dos tipos de técnicas de acceso múltiple de espectro disperso; acceso múltiple por salto de frecuencia (FH) y acceso múltiple por secuencia directa (DS). Acceso múltiple por secuencia directa es también llamado acceso múltiple por división de código (CDMA).

### **1.4.1 Acceso Múltiple por Salto de Frecuencia. (FHMA).**

Acceso múltiple por salto de frecuencia (FHMA) es un sistema digital de acceso múltiple en el cual las frecuencias portadoras de usuarios individuales están variando en una forma “seudo al azar” en un canal de banda ancha. El dato digital es descompuesto en ráfagas de tamaño uniforme las cuales son transmitidas en diferentes frecuencias portadoras. El ancho de banda instantáneo de cualquier ráfaga de transmisión es mucho más pequeño que el ancho de banda total de dispersión. El cambio “seudo al azar” de las frecuencias portadoras del usuario hace que la ocupación de un canal específico sea al azar en un tiempo dado, permitiendo por eso el acceso múltiple sobre un amplio rango de frecuencias. En el receptor de FH, un código PN generado localmente es utilizado para sincronizar la frecuencia

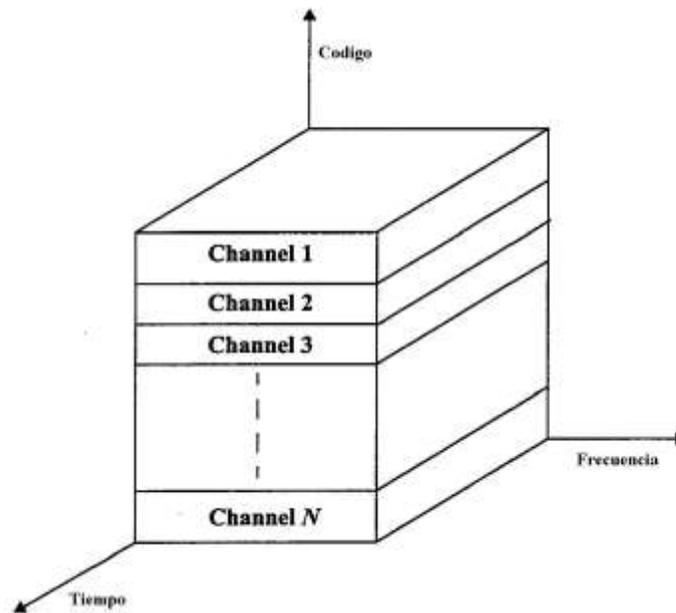
instantánea con la del transmisor. En cualquier momento dado, una señal de salto de frecuencia únicamente ocupa un canal de banda angosta debido a que FM o FSK de banda angosta es utilizado. La diferencia de FHMA y un tradicional FDMA es que la señal de salto de frecuencia cambia de canal en intervalos rápidos. Si la velocidad o tasa de cambio de la frecuencia portadora es mas grande que la velocidad del símbolo entonces al sistema se le llama sistema de salto de frecuencia rápido. Si el canal cambia a una velocidad menor o igual a la del símbolo, el sistema es llamado sistema de salto de frecuencia lento. Un sistema de salto de frecuencia rápido podría ser visto como un sistema FDMA el cual emplea diversidad de frecuencia. Los sistemas FHMA frecuentemente emplean modulación constante de envolvente eficiente de energía. Receptores de bajo costo pueden ser contruidos para dar detección no coherente de FHMA. Esto implica que la linealidad no es una cuestión, y que la potencia de usuarios múltiples en el receptor no degrada el funcionamiento de FHMA.

Un sistema de salto de frecuencia da un nivel de seguridad, especialmente cuando un gran numero de usuarios están presentes, debido a que un receptor que no conoce la secuencia “pseudo al azar “ de las ranuras de frecuencias debe resincronizarse rápidamente para buscar la señal que desea interceptar. Adicionalmente, la señal de FH es algo inmune al desvanecimiento, debido a que la codificación para control de error y los intervalos pueden ser utilizados para proteger la señal de FH contra grandes desvanecimientos los cuales pueden ocurrir durante la secuencia de salto. La codificación para control de errores y los intervalos pueden también ser combinados como guardas contra “borrados” los cuales pueden ocurrir cuando dos o más usuarios transmiten en el mismo canal al mismo tiempo.

#### **1.4.2 Acceso Múltiple por División de Código (CDMA).**

En sistemas de acceso múltiple por división de código (CDMA), la señal de mensaje de banda angosta es multiplicada por una señal de ancho de banda muy grande llamada señal de dispersión. La señal de dispersión es una secuencia de código de pseudoruido que tiene una velocidad de “chip” la cual es más grande que la velocidad de los datos del mensaje. Todos los usuarios en un sistema CDMA, como se puede ver en la figura 1.5, utilizan la

misma frecuencia portadora y pueden transmitir simultáneamente. Cada usuario tiene su propio código “pseudo al azar” el cual es aproximadamente ortogonal a todos los otros códigos. El receptor efectúa una operación correlación en tiempo para detectar únicamente el código deseado. Todos los otros códigos aparecen como ruido debido a la decorrelación. Para detección de la señal de mensaje el receptor necesita saber el código utilizado por el transmisor. Cada usuario opera independiente sin conocimiento de los otros usuarios.



**Figura 1.5**  
**CDMA en el cual cada canal es asignado a un único código PN el cual es ortogonal a los códigos PN utilizados por otros usuarios.**

En CDMA, la potencia de múltiples usuarios en un receptor determina el piso de ruido antes de la decorrelación. Si la potencia de cada usuario dentro de una célula no es controlada de tal forma que ella no llegue a la estación base en igual forma, el problema de “cerca- lejos” ocurrirá.

El problema de “cerca-lejos” ocurrirá cuando muchos usuarios móviles comparten el mismo canal. En general, la señal del móvil más fuerte recibida capturaría el demodulador en la estación base. En CDMA, los niveles más fuertes de señal recibida levantarían el piso de ruido en los demoduladores de la estación base para las señales más débiles, decrementando por eso la probabilidad que las señales más débiles sean recibidas. Para

combatir este problema, el control de potencia es utilizado en la mayoría de las implementaciones de CDMA. El control de la potencia es provisto por cada estación base en un sistema celular y asegura que cada móvil dentro de la cobertura de una estación base entregue el mismo nivel de señal al receptor en la estación base. Esto soluciona el problema de un suscriptor que se encuentra cerca y bloquea las señales de los suscriptores que se encuentran lejos. El control de potencia es implementado en la estación base por un muestreo rápido del nivel del indicador de la intensidad de la señal de radio (RSSI) de cada móvil y después enviando un comando de cambio de potencia vía el enlace de la base al móvil (FORWARD). A pesar del uso del control de potencia en cada célula, los móviles que estén fuera de la célula suministrarán interferencia la cual está fuera del control de la estación base. Las características de CDMA incluyen lo siguiente:

- ° Muchos usuarios de un sistema CDMA comparten la misma frecuencia, Ya sea que TDD o FDD sean utilizados.

- ° Contrario a TDMA o FDMA, CDMA tiene un límite de capacidad flexible. El incremento del número de usuarios en un sistema CDMA levanta el piso de ruido en una forma lineal. Por lo tanto, no hay un límite absoluto en el número de usuarios en CDMA. Mas bien, el funcionamiento del sistema gradualmente se degradará para todos los usuarios así como el número de usuarios incrementa, o mejorará si el número de usuarios disminuye.

- ° El desvanecimiento por multitrayectoria (Multipath) podría ser sustancialmente reducido porque la señal es dispersa en un espectro grande. Si el ancho de banda del espectro disperso es más grande que el ancho de banda coherente del canal, la inherente diversidad de frecuencia mitigará los efectos del desvanecimiento de pequeña escala.

- ° Las velocidades de los datos en el canal son muy altas en sistemas CDMA. Consecuentemente, la duración del símbolo (chip) es muy corta y usualmente mucho menor que el retardo de dispersión del canal. Desde que las secuencias PN tienen baja autocorrelación, la multitrayectoria (multipath) que sea retardada más de un chip aparecerá

como ruido. Un receptor RAKE puede ser utilizado para mejorar la recepción por recoger las versiones de retardo en tiempo de la señal requerida.

° Debido a que CDMA utiliza células en el mismo canal, este puede utilizar diversidad espacial macroscópica para proporcionar un cambio de célula suave. Este cambio suave es efectuado por el MSC o central celular, el cual puede simultáneamente monitorear un usuario desde dos o más estaciones base. El MSC puede escoger la mejor versión de la señal en cualquier tiempo sin cambio de frecuencias.

° La auto interferencia es un problema en sistemas CDMA. La auto interferencia emerge del hecho que las secuencias de dispersión de diferentes usuarios no son exactamente ortogonales, por lo tanto en la desdispersión de un código en particular PN, las contribuciones no-zero a la decisión estadística del receptor para un usuario deseado emergen de las transmisiones de los otros usuarios en el sistema.

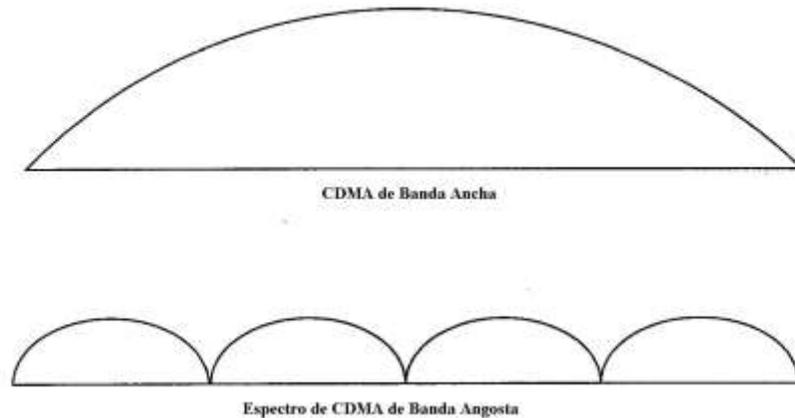
° El problema “cerca-lejos” ocurre en un receptor CDMA si un usuario indeseado tiene un nivel alto de potencia comparado con el usuario deseado.

### **1.4.3 Técnicas Híbridas de Espectro Disperso.**

En adición a las técnicas de acceso múltiple de espectro disperso como son salto de frecuencia y secuencia directa, existen ciertas combinaciones híbridas que dan ciertas ventajas. Estas técnicas son descritas a continuación.

**Híbrida FDMA / CDMA ( FCDMA )-** Esta técnica puede ser utilizada como una alternativa a la técnica DS-CDMA descrita anteriormente. La figura 1.6 muestra el espectro de este esquema híbrido. El ancho de banda disponible es dividido en un cierto número de subespectros con anchos de banda más pequeños. Cada uno de estos más pequeños subcanales llega a ser un sistema CDMA de banda angosta teniendo una ganancia de procesamiento más baja que el sistema CDMA original. Este sistema híbrido tiene la ventaja que el ancho de banda requerido no necesita ser contiguo y que diferentes usuarios

pueden ser asignados a diferentes anchos de banda o subespectros dependiendo de sus necesidades. La capacidad de un sistema FDMA/CDMA es calculada como la suma de las capacidades de un sistema trabajando en el subespectro.



**Figura 1.6**  
**Espectro de CDMA de banda ancha comparado con el espectro de un Acceso múltiple híbrido de división de frecuencia y secuencia directa.**

**Híbrido de Acceso Múltiple de Secuencia Directa / Salto de frecuencia ( DS / FHMA )**.- Esta técnica consiste de una señal modulada por secuencia directa la cual su frecuencia central es hecha saltar periódicamente en una forma pseudo al azar. La figura 1.7 muestra el espectro de frecuencia de tal señal. Estos sistemas tienen una ventaja y es que evitan el efecto de cerca lejos. Sin embargo, los sistemas CDMA de salto de frecuencia no son adaptables a un cambio suave de célula ( handoff) debido a su dificultad para sincronizarse al salto de frecuencia del receptor de la estación base.



**Figura 1.7**  
**Espectro de un sistema híbrido FH/DS**

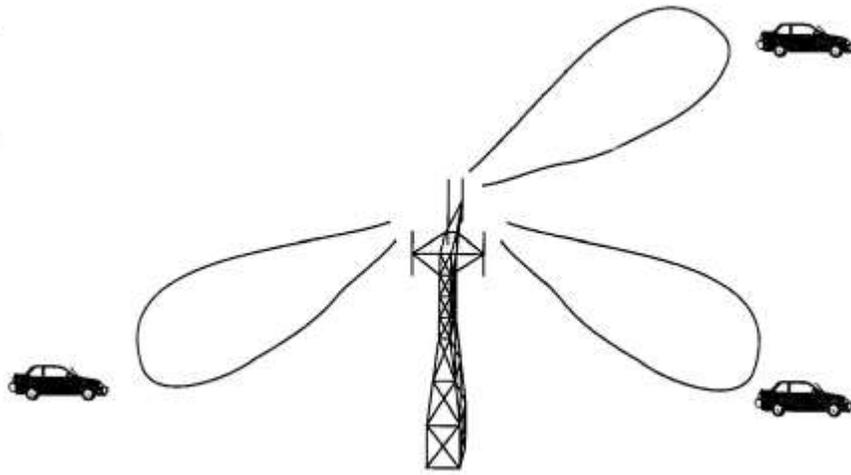
**Híbrido División en Tiempo CDMA (TCDMA)-** En un sistema TCDMA (también llamado TDMA / CDMA), diferentes códigos de dispersión son asignados a diferentes células. Dentro de cada célula, únicamente un usuario por célula es asignado a una ranura de tiempo. Entonces en cualquier tiempo, únicamente un usuario CDMA esta transmitiendo en cada célula. Cuando ocurre un proceso de cambio de célula (handoff), el código de dispersión del usuario es cambiado al de la nueva célula. Utilizando TCDMA se tiene la ventaja que se evita el efecto de cerca lejos debido a que únicamente un usuario transmite a la vez en una célula.

**Híbrido División en Tiempo, Salto de frecuencia( TDFH)-** Esta técnica de acceso múltiple tiene una ventaja cuando una fuerte interferencia por multitrayectoria o por co-canal ocurre. El suscriptor puede saltar a una nueva frecuencia al principio de una trama de TDMA, evitando así un fuerte desvanecimiento o un evento de borrado en un canal en particular. Esta técnica a sido adoptada por el estándar **GSM**, donde la secuencia de salto esta predefinida y el suscriptor es permitido únicamente saltar en ciertas frecuencias las cuales están asignadas a una célula. Este esquema también evita interferencias en co-canal entre células vecinas si dos transmisores son hechos transmitir en diferentes frecuencias a tiempos diferentes. El uso de TDFH puede incrementar la capacidad de GSM por varias veces.

### **1.5 Acceso Múltiple por División de Espacio.**

Acceso múltiple por división de espacio controla la energía radiada para cada usuario en el espacio. Esto puede ser visto en la figura 1.8 en la cual SDMA sirve a diferentes usuarios por el uso de antenas de “spot beam” o haz angosto. Estas diferentes áreas cubiertas por el haz de la antena pueden ser servidas en la misma frecuencia ( en TDMA o CDMA ) o en diferentes frecuencias ( en FDMA ). Las antenas sectorizadas pueden ser vistas como una aplicación primitiva de SDMA. En el futuro, las antenas adaptivas serán comúnmente

utilizadas para radiar energía en la dirección de muchos usuarios a la vez y serán mas cómodas para aplicaciones en arquitecturas de TDMA y CDMA.



**Figura 1.8 Antena de Estación Base espacialmente filtrada sirviendo a diferentes usuarios utilizando haces angostos**

El enlace de retorno ( del usuario a la estación base ) presenta la mayor dificultad en los sistemas celulares por varias razones. Primero, la estación base tiene el control total sobre la potencia de todas las señales transmitidas en el enlace de ida ( de la estación base hacia el suscriptor ). Sin embargo, debido a los diferentes caminos de propagación de cada usuario a la estación base, la potencia transmitida de cada unidad de suscriptor debe ser dinámicamente controlada para prevenir que cualquier usuario eleve el nivel de interferencia a todos los demás usuarios. Segundo, la potencia transmitida esta limitada por el consumo de batería en la unidad del suscriptor, por lo tanto hay limites en el grado en el cual la potencia puede ser controlada en el enlace de retorno. Si la estación base esta hecha para espacialmente filtrar cada usuario deseado, más energía es detectada desde cada suscriptor, entonces el enlace de retorno para cada usuario es mejorado y menos potencia es requerida.

Las antenas adaptivas utilizadas en la estación base ( y eventualmente en las unidades del suscriptor ) prometen mitigar algunos problemas en el enlace de retorno. En el caso limitante de ancho de haz infinitesimal y la habilidad de rastreo rápido infinito, las antenas

adaptivas implementaran SDMA optimo, dando así un canal único que este libre de interferencias de todos los otros usuarios en la célula. Con SDMA, todos los usuarios dentro del sistema serán capaces de comunicarse al mismo tiempo utilizando el mismo canal. En adición, un sistema perfecto de antena adaptiva seria capaz de rastrear componentes de multitrayectorias individuales de cada usuario y combinarlas de una forma optima para juntar toda la energía de la señal disponible de cada usuario. El sistema de antena adaptiva perfecto no es factible debido a que requiere antenas infinitamente grandes. Sin embargo, la sección 1.7.2 ilustra que ganancia debe ser lograda utilizando arreglos de tamaño razonables con directividades moderadas.

## **1.6 Radio Paquetizado**

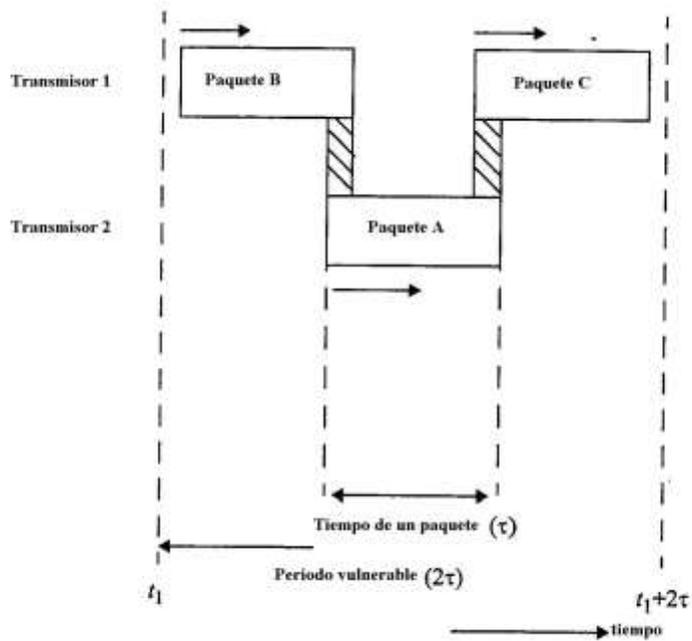
En las técnicas de radio paquetizado, muchos suscriptores intentan acceder un canal simple de radio en una forma desordenada ( o mínimamente coordinada ) . Las transmisiones son hechas utilizando ráfagas de datos. Las colisiones por transmisiones simultaneas de múltiples transmisores son detectadas en el receptor de la estación base, en cuyo caso una señal de certificación o certificación negativa ( ACK o NACK ) es transmitida por la estación base para avisar al usuario deseado de la transmisión recibida. La señal ACK indica una certificación de una ráfaga recibida por la estación base desde un usuario en particular, y una señal NACK indica que la ráfaga previa no fue recibida correctamente por la estación base. Por el uso de las señales ACK y NACK, un sistema de radio paquetizado implementa una perfecta retroalimentación, aun y cuando el retardo debido al trafico por colisiones puede ser alto.

El acceso múltiple por radio paquetizado es muy fácil implementarlo pero tiene una baja eficiencia espectral y puede inducir retardos. Los suscriptores utilizan una técnica de contención para transmitir en un canal común. Los protocolos ALOHA, desarrollados para los primeros sistemas de satélite, son los mejores ejemplos de técnicas de contención. ALOHA permite a cada suscriptor transmitir cuando tienen datos para enviar. Los suscriptores que transmiten escuchan la retroalimentación de certificación para determinar si la transmisión fue o no exitosa. Si una colisión ocurre, el suscriptor espera un tiempo al

azar, y retransmite el paquete de datos. La ventaja de las técnicas de contención de paquetización es la habilidad de servir a un gran número de usuarios con virtualmente ningún encabezado. El funcionamiento de las técnicas de contención puede ser evaluado por el desempeño (T), el cual es definido como el número promedio de mensajes exitosos transmitidos por unidad de tiempo, y por el retardo promedio (D) experimentado por una ráfaga de datos típica.

### **1.6.1 Protocolos para Radio Paquetizado.**

En orden para determinar el desempeño, es importante determinar el periodo vulnerable,  $V_p$ , el cual es definido como el intervalo de tiempo durante el cual los paquetes son susceptibles a colisiones con transmisores de otros usuarios. La figura 1.9 muestra el periodo vulnerable de un paquete utilizando ALOHA. El paquete A sufrirá una colisión si otro usuario transmite paquetes durante el periodo  $t_1$  a  $t_1 + 2T$ . Aun si una pequeña porción del paquete A sufre una colisión, la interferencia podría hacer que todo el paquete fuera inutilizable.



Paquete A colisionara con los paquetes B y C debido a el traslape en el tiempo de transmisión

### FIGURA 1.9 Periodo vulnerable para un paquete utilizando el protocolo ALOHA

Para estudiar los protocolos de radio paquetizado, es asumido que todos los paquetes enviados por todos los usuarios tienen una longitud constante y fija la velocidad del canal, y todos los otros usuarios pueden generar nuevos paquetes en intervalos de tiempo al azar. Además es asumido que las transmisiones de paquetes ocurren con una distribución de Poisson teniendo una tasa de llegada de  $\lambda$  paquetes por segundo. Si  $\tau$  es la duración del paquete en segundos, entonces el tráfico o desempeño  $\mathbf{R}$  de una red de radio paquetizado está dado por

$$\mathbf{R} = \lambda\tau \quad (1.6)$$

En la ecuación 1.6,  $\mathbf{R}$  es el tráfico normalizado del canal en Erlangs, debido a la llegada de paquetes, y es una medida relativa del uso del canal. Si  $\mathbf{R} > 1$ , entonces el paquete generado por los usuarios excede la velocidad de transmisión máxima del canal. Por lo tanto, para obtener un desempeño razonable, la velocidad a la cual nuevos paquetes son generados deben estar en el rango de  $0 < \mathbf{R} < 1$ . Bajo condiciones de carga normal, el desempeño  $\mathbf{T}$  es el mismo de la carga total ofrecida,  $\mathbf{L}$ . La carga  $\mathbf{L}$  es la suma de los paquetes nuevamente

generados y los paquetes retransmitidos que sufrieron colisiones en transmisiones previas. El desempeño normalizado siempre es menor o igual a la unidad y puede ser o tener valor de una fracción de tiempo ( fracción de un Erlang ) que un canal es utilizado. El desempeño normalizado esta dado como los tiempos de carga total ofrecida de la probabilidad de transmisiones exitosas, por ejemplo

$$T = RP_r (\text{sin colisión} ) = \lambda \tau Pr (\text{sin colisión} ) \quad (1.7)$$

Donde  $P_r$  (**sin colisión**) es la probabilidad de un usuario de hacer una transmisión exitosa. La probabilidad que  $n$  paquetes que son generados por el usuario durante el tiempo de duración de un paquete es asumida ser o tener una distribución en Poisson y esta dado por.

$$Pr(n) = \frac{R^n e^{-R}}{n!} \quad (1.8)$$

Un paquete se asume exitosamente transmitido si no son transmitidos otros paquetes durante la duración del paquete. La probabilidad de que cero paquetes sean generados durante este tiempo es.

$$Pr(0) = e^{-R} \quad (1.9)$$

Basado en el tipo de acceso, los protocolos de contención son clasificados como **(1) de acceso al azar, (2) de acceso registrado y (3) de acceso híbrido**. En acceso al azar, no hay coordinación entre los usuarios y los mensajes son transmitidos desde los usuarios como van llegando. El acceso registrado esta basado en un acceso coordinado de los usuarios al canal, y los usuarios transmiten mensajes en ranuras asignadas o intervalos de tiempo. El acceso híbrido es una combinación de ambos.

#### **1.6.1.1 ALOHA Puro.**

El protocolo ALOHA puro es un protocolo de acceso al azar utilizado para transferir datos. Un usuario accesa un canal tan pronto como un mensaje esta listo para transmitirse.

Después de la transmisión, el usuario espera por una certificación ya sea en el mismo canal o en el canal de retroalimentación. En caso de una colisión ( por ejemplo de un NACK ), la terminal espera un periodo o tiempo al azar y retransmite el mensaje. Como el numero de usuarios aumenta, un retardo más grande ocurrirá debido a que la probabilidad de colisiones aumentara.

Para el protocolo ALOHA, el periodo vulnerable es del doble de la duración del paquete ( ver figura 1.9 ). Por lo tanto, la probabilidad de no colisiones durante el intervalo de  $2\tau$  es encontrado evaluando  $\Pr(n)$  dado por.

$$\Pr(n) = \frac{(2R)^n e^{-2R}}{n!} \text{ en } n = 0 \quad (1.10)$$

Uno puede evaluar el significado de la ecuación 1.10 para determinar el numero promedio de paquetes enviados durante  $2\tau$  ( Esto es útil en determinar el promedio de trafico ofrecido ). La probabilidad de ninguna colisión es  $\Pr(0) = e^{-2R}$ . El desempeño del protocolo ALOHA es encontrado utilizando la ecuación 1.7.

$$T = R e^{-2R} \quad (1.11)$$

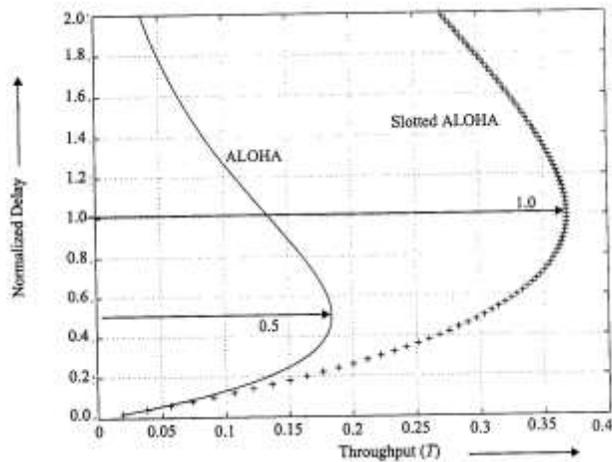
### 1.6.1.2 ALOHA Ranurado.

En ALOHA ranurado, el tiempo es dividido en ranuras de tiempo de longitud más grande que la duración del paquete  $\tau$ . Los suscriptores cada uno tiene relojes sincronizados y transmiten un mensaje unicamente al principio de una nueva ranura, resultando esto en una distribución discreta de los paquetes. Esto previene colisiones parciales, donde un paquete colinda con una porción de otro. Como se incrementa el numero de usuarios, un retardo más grande ocurrirá debido a colisiones y a las retransmisiones que producirá esto. El numero de ranuras que un transmisor espera para retransmitir también determina las características del retardo del trafico. El periodo vulnerable de ALOHA ranurado es

únicamente de la duración del paquete, debido a que las colisiones parciales son prevenidas por la sincronización. La probabilidad que ningunos otros paquetes sean generados durante el periodo vulnerable es  $e^{-R}$ . El desempeño para el caso de ALOHA ranurado estará dado por.

$$T = Re^{-R} \quad (1.12)$$

La figura 1.10 ilustra como ALOHA y ALOHA ranurado negocian el desempeño por retardo.



**Figura 1.10 Relación entre desempeño y retardo para los protocolos ALOHA y ALOHA ranurado.**

### 8.6.2 Protocolos de Acceso Múltiple por Detección de Portadora ( CSMA ).

Los protocolos ALOHA no verifican o escuchan el canal antes de transmitir, y por lo tanto no explotan la información acerca de los otros usuarios. Escuchar el canal antes de empezar a transmitir, mejora la eficiencia del canal. Los protocolos CSMA están basados en el hecho de que cada terminal en la red es capaz de monitorear el estado del canal antes de transmitir información. Si el canal está desocupado ( ninguna portadora es detectada ), entonces el usuario tiene permiso para transmitir un paquete, todo esto basado en un algoritmo el cual es común para todos los transmisores en la red.

En los protocolos CSMA, el retardo de detección y el retardo de propagación son dos importantes parámetros. El retardo de detección es una función del hardware del receptor y es el tiempo requerido por una terminal para sentir si el canal está o no desocupado. El retardo de propagación es una medida relativa de que tan rápido un paquete viaja desde la estación base hasta la terminal móvil. Con un pequeño tiempo de detección, una terminal detecta un canal libre o desocupado rápidamente, y un pequeño retardo de propagación significa que un paquete es transmitido a través del canal en un intervalo de tiempo pequeño relativo a la duración del paquete.

El retardo de propagación es importante, debido a que hasta después de que un usuario ha enviado un paquete, otro usuario podría estar listo para enviar un paquete una vez que halla sentido el canal. Si el paquete que se está transmitiendo no ha llegado al usuario deseado, el siguiente usuario sentirá un canal desocupado o libre y también enviará su paquete, resultando en una colisión entre dos paquetes. El retardo por propagación impacta en el funcionamiento de los protocolos CSMA. Si  $t_p$  es el tiempo de propagación en segundos,  $R_b$  es la velocidad del canal en bits, y  $m$  es el número esperado de bits en un paquete de datos, entonces el retardo de propagación  $t_d$  ( en unidades de transmisión de paquetes ) puede ser expresado como:

$$t_d = t_p R_b / m \quad (1.13)$$

Existen varias versiones de la estrategia de CSMA.

° **CSMA 1-persistente** – La terminal escucha al canal y espera para transmitir hasta que el canal esté vacío o libre. Tan pronto como el canal esté libre, la terminal transmite su mensaje con probabilidad uno.

° **CSMA no persistente** – En este tipo de estrategia, después de recibir una certificación negativa ( NACK ) la terminal espera un tiempo al azar antes de retransmitir el paquete. Esto es muy popular en aplicaciones de redes de área local inalámbrica, donde el intervalo de transmisión del paquete es mucho más grande que el retardo de propagación para el peor de los usuarios.

° **CSMA p-persistente** – Este tipo de CSMA es aplicado a canales ranurados. Cuando un canal es encontrado libre, el paquete es transmitido en la primer ranura disponible con probabilidad  $p$  o en la siguiente ranura con probabilidad  $1-p$ .

° **CSMA / CD** – En CSMA con detección de colisión ( CD ), un usuario monitorea su transmisión de colisiones. Si dos o más terminales empiezan una transmisión al mismo tiempo, una colisión es detectada, y la transmisión es abortada a mitad de la trama. Esto es manipulado por el usuario que tiene la capacidad de escuchar mientras habla. Para un canal de radio sencillo, esto es hecho por interrumpir la transmisión para sensor el canal. Para sistemas duplex, un transreceptor full-duplex es utilizado.

° **Acceso Múltiple por Sensor Datos. ( DSMA )** – DSMA es un tipo especial de CSMA que resulta de demodular exitosamente un canal de control desde la base hacia la unidad móvil (FORWARD) antes de transmitir datos en el canal desde la unidad móvil hacia la base (REVERSE). Cada usuario intenta detectar un mensaje de ocupado-desocupado el cual es esparcido en el canal de control (FORWARD). Cuando un mensaje de ocupado-desocupado indica que ningún usuario esta transmitiendo en el canal de retorno (REVERSE), un usuario es libre de enviar un paquete. Esta técnica es utilizada en el sistema celular digital de datos paquetizados (CDPD).

### **1.6.3 Protocolos de Reservación.**

#### **1.6.3.1 Reservación ALOHA.**

Reservación ALOHA es un esquema de acceso de paquetes basado en multiplexaje por división de tiempo. En este protocolo, ciertas ranuras de paquetes son asignadas con prioridad y es posible para los usuarios **reservar** ranuras para la transmisión de paquetes. Las ranuras pueden ser reservadas permanentemente o bajo demanda. Para condiciones de alto trafico, las reservaciones bajo demanda tienen mejor desempeño. En un tipo de reservación ALOHA, la terminal que hace una transmisión exitosa reserva una ranura

permanentemente hasta que su transmisión este completa, aunque las transmisiones de muy larga duración pueden ser interrumpidas. Otro esquema permite al usuario transmitir una petición en una subranura la cual es reservada en cada trama. Si la transmisión es exitosa ( por ejemplo ninguna colisión es detectada ), la terminal es asignada a la siguiente ranura regular en la trama para transmisión de datos.

#### **1.6.3.2 Acceso Múltiple por Reservación de Paquetes (PRMA).**

PRMA utiliza una técnica discreta de tiempo de paquete similar a la reservación ALOHA y combina una estructura de la trama cíclica de TDMA en una forma que permite a cada ranura de tiempo de TDMA llevar voz o datos, donde la voz tiene la prioridad. PRMA fue propuesta como una respuesta a la integración de ráfagas de voz y datos. PRMA define una estructura de la trama, similar a la utilizada en los sistemas TDMA. Dentro de cada trama, hay un numero fijo de ranuras de tiempo las cuales pueden ser designadas ya sea como reservada o como disponible, dependiendo del trafico, el cual es determinado por el controlador de la estación base.

#### **1.6.4 Efecto de captura en Radio Paquetizado.**

Las técnicas de acceso múltiple de radio paquetizado están basadas en contención dentro de un canal. Cuando se usan con FM o modulación de espectro disperso, es posible para el usuario mas fuerte exitosamente capturar el receptor previsto, aun y cuando muchos otros usuarios estén también transmitiendo. Frecuentemente, el transmisor más cercano es capaz de capturar un receptor debido a lo pequeño de las perdidas de propagación. Esto es llamado efecto **cerca-lejos**. El efecto de captura ofrece ventajas y desventajas en sistemas prácticos. Debido a que un transmisor en particular puede capturar un receptor deseado, muchos paquetes podrían sobrevivir a pesar de las colisiones en el canal. Sin embargo, un transmisor fuerte puede hacer imposible que un receptor detecte un transmisor mucho más débil el cual esta intentando comunicarse con el mismo receptor. Este problema es conocido como “**El Transmisor Oculto**”.

Un parámetro útil para analizar el efecto de captura en protocolos de radio paquetizado es la razón mínima de potencia de un paquete que llega, relativo a otros paquetes colindantes, que también son recibidos. Esta razón es llamada razón de captura, y depende del receptor y la modulación utilizada.

En resumen, las técnicas de radio paquetizado soportan transmisores móviles enviando ráfagas de tráfico en la forma de paquetes de datos, utilizando acceso al azar. El desempeño ideal del canal puede ser incrementado si las terminales sincronizan sus transmisiones en ranuras comunes de tiempo, de tal forma que el traslape parcial de paquetes sea evitada. Con altas cargas de tráfico, los protocolos ALOHA ranurado y sin ranurar llegan a ser ineficientes, debido a que la contención entre todos los paquetes transmitidos expone a la mayoría de ellos a colisiones, y esto resulta en múltiples retransmisiones e incrementos en los retardos. Para reducir esta situación CSMA puede ser utilizado donde el transmisor primero escucha el canal de radio común o bien un canal dedicado desde la estación base. En un sistema móvil del mundo real, Los protocolos CSMA podrían fallar en detectar radio transmisiones de paquetes sujetos a grandes desvanecimientos en el canal de retorno (REVERSE). La utilización de un canal ALOHA puede ser mejorada por deliberadamente introducir diferencias entre las potencias de transmisión de múltiples usuarios compitiendo por el receptor de la estación base. La tabla 1.2 muestra las técnicas de acceso múltiple que deben ser utilizadas para diferentes condiciones de tráfico.

<b>Tipo de tráfico</b>	<b>Técnica de acceso múltiple</b>
En ráfagas, mensajes cortos	Protocolos de contención
En ráfagas, mensajes largos, gran numero de usuarios	Protocolos de reservación
En ráfagas, mensajes largos, pequeño numero de usuarios	Protocolos de reservación con reservación fija de canal TDMA
De chorro o deterministico	FDMA, TDMA, CDMA

**Tabla 1.2 Técnicas de Acceso Múltiple para diferentes tipos de tráfico.**

## 1.7 Capacidad de los Sistemas Celulares.

La capacidad del canal en un sistema de radio puede ser definida como el número máximo de canales o usuarios que pueden ser atendidos en una banda de frecuencias. La capacidad de radio es un parámetro el cual mide la eficiencia del espectro en un sistema inalámbrico. Este parámetro es determinado por la razón de portadora a interferencia requerida  $C/I$  y el ancho de banda del canal  $B_c$ .

En un sistema celular la interferencia en el receptor de la estación base vendrá de la unidad del suscriptor en las células adyacentes. Esto es llamado interferencia en el canal de retorno. Para una unidad de suscriptor en particular, la estación base deseada dará el deseado canal de ida mientras que las estaciones base alrededor en el mismo canal darán la interferencia en el canal de ida. Considerando el problema de interferencia en el canal de ida, si  $D$  es la distancia entre dos células en el mismo canal y  $R$  es el radio de la célula. Entonces la mínima razón  $D/R$  que es requerida para proveer un nivel tolerable de interferencia en el mismo canal es llamada la razón de reuso en el mismo canal y esta dada por:

$$Q = D/R \quad (1.14)$$

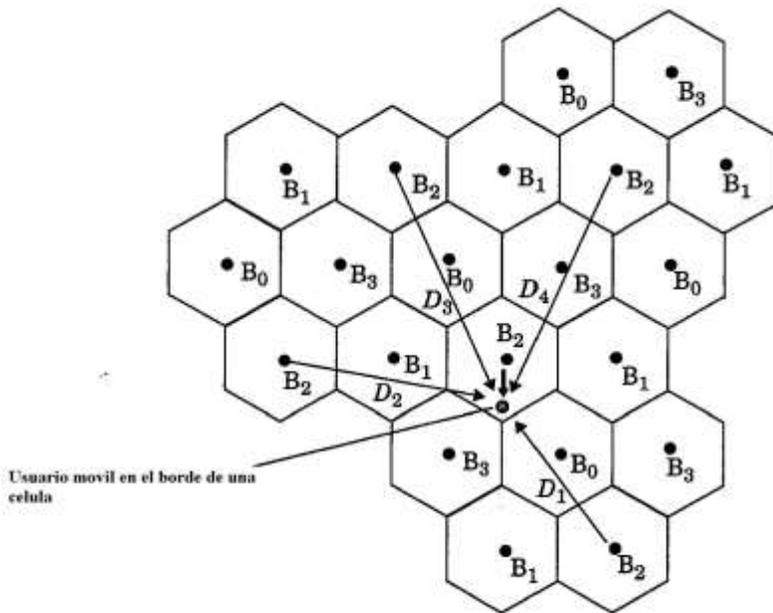
Las características de radio propagación determinan la razón de portadora a interferencia  $C/I$  en un cierto lugar, y pueden ser utilizados varios modelos para encontrar valores sensibles de  $C/I$ . Como se muestra en la figura 1.11, las  $M$  células más cercanas en el mismo canal podrían ser consideradas como la interferencia de primer orden en cuyo caso  $C/I$  esta dado por:

$$\frac{C}{I} = \frac{D_0^{-n_0}}{\sum_{k=1}^M D_k^{-nk}} \quad (1.15)$$

Donde  $n_0$  es el exponente de pérdidas por propagación en la célula deseada,  $D_0$  es la distancia desde la estación base deseada hasta el móvil,  $D_k$  es la distancia de la  $k$ 's célula

desde el móvil, y  $n_k$  es el exponente de pérdidas por propagación a la  $k$ 's estación base interferente. Si únicamente las seis más cercanas células interferentes son consideradas, y todas están aproximadamente a la misma distancia  $D$  y tienen similares exponentes por pérdidas por propagación igual a la célula deseada, entonces  $C/I$  esta dado por:

$$\frac{C}{I} = \frac{D_0^{-n}}{6D^{-n}} \quad (1.16)$$



**Figura 1.11 Ilustración de una interferencia en el canal de ida (FORWARD) para un tamaño de grupo de  $N=4$ . Lo que aquí se muestra son cuatro estaciones base en el mismo canal interfiriendo con la estación base que proporciona el servicio. La distancia desde la estación base que proporciona el servicio al usuario es  $D_0$ , y las interferentes están a una distancia  $D_k$  del usuario.**

Ahora, si se asume que la máxima interferencia ocurre cuando el móvil esta en el contorno de la célula o cuando  $D_0 = R$ , y si la razón  $C/I$  para cada usuario es requerida que sea mas grande que algún mínimo  $C/I_{\min}$ , la cual es la mínima razón portadora a interferencia que aun da una calidad de señal aceptable en el receptor, entonces la siguiente ecuación debe asegurar un funcionamiento aceptable.

$$\frac{1}{6} \left( \frac{R}{D} \right)^{-n} \geq \left( \frac{C}{I} \right)_{\min} \quad (1.17)$$

Por lo tanto, de la ecuación 1.14 el factor de reuso en el mismo canal es:

$$Q = \left( 6 \left( \frac{C}{I} \right)_{\min} \right)^{1/n} \quad (1.18)$$

La capacidad de radio de un sistema celular esta definido como

$$m = \frac{B_t}{B_c N} \text{ radiocanales / celula} \quad (1.19)$$

Donde **m** es la capacidad de radio métrica, **B<sub>t</sub>** es el total de espectro asignado para el sistema, **B<sub>c</sub>** es el ancho de banda del canal, y **N** es el numero de células en un patrón de reuso de frecuencias. Como se muestra a continuación, **N** esta relacionado con el factor de reuso en el mismo canal Q por:

$$Q = \sqrt{3N} \quad (1.20)$$

De las ecuaciones 1.18, 1.19 y 1.20 la capacidad de radio esta dada por:

$$m = \frac{B_t}{B_c \frac{Q^2}{3}} = \frac{B_t}{B_c \left( \frac{6}{3^{n/2}} \left( \frac{C}{I} \right)_{\min} \right)^{2/n}} \quad (1.21)$$

Como lo muestra Lee, cuando n=4, la capacidad de radio esta dada por:

$$m = \frac{B_t}{B_c \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \frac{C}{I} \right)_{\min}} \text{ radiocanales / celula} \quad (1.22)$$

En orden para proveer la misma calidad de voz,  $C/I_{\min}$  podría ser mas baja en sistemas digitales que en los sistemas analógicos. Típicamente, la razón mínima requerida C/I es de

12 db en sistemas digitales de banda angosta y 18 db. en sistemas FM analógicos de banda angosta, aunque los valores exactos son determinados por pruebas de escuchar subjetivas en condiciones de propagación reales. Cada estándar digital inalámbrico tiene una diferente  $C/I_{\min}$ , y en orden para comparar diferentes sistemas, una equivalente  $C/I$  debe ser utilizada. Si  $B_t$  y  $m$  se conservan constantes en la ecuación 1.22, entonces esta claro que  $B_c$  y  $C/I_{\min}$  están relacionadas por:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{eq} = \left(\frac{C}{I}\right)_{\min} \left(\frac{B_c}{B_c'}\right)^2 \quad (1.23)$$

Donde  $B_c$  es el ancho de banda de un sistema en particular,  $C/I_{\min}$  es el valor tolerable para el mismo sistema,  $B_c'$  es el ancho de banda del canal de un sistema diferente, y  $C/I_{eq}$  es el mínimo valor para el sistema diferente cuando es comparado a la  $C/I_{\min}$  para un sistema en particular. Note que para un numero constante de usuarios por canal, la misma calidad de voz debe ser mantenida en diferentes sistemas sí  $C/I_{\min}$  se incrementa por un factor de cuatro cuando el ancho de banda es partido a la mitad. La ecuación 1.22 indica que la máxima capacidad de radio ocurre cuando  $C/I_{\min}$  y  $B_c$  son minimizados, aun cuando la ecuación 1.23 muestra que  $C/I_{\min}$  y  $B_c$  esta inversamente relacionados.

En un sistema digital celular,  $C/I$  puede ser expresada como

$$\frac{C}{I} = \frac{E_b R_b}{I} = \frac{E_c R_c}{I} \quad (1.24)$$

Donde  $R_b$  es la velocidad del canal,  $E_b$  es la energía por bit,  $R_c$  es la velocidad del código del canal y  $E_c$  es la energía por símbolo de código. De las ecuaciones 1.23 y 1.24 la razón de  $C/I$  a  $C/I_{eq}$  esta dada por:

$$\frac{\left(\frac{C}{I}\right)}{\left(\frac{C}{I}\right)_{eq}} = \frac{\frac{E_c R_c}{I}}{\frac{E_c' R_c'}{I'}} = \left(\frac{B_c'}{B_c}\right)^2 \quad (1.25)$$

La relación entre  $R_c$  y  $B_c$  es siempre lineal, y si el nivel de interferencia  $I$  es el mismo en el ambiente móvil para dos sistemas digitales diferentes, entonces la ecuación 1.25 puede ser reescrita como:

$$\frac{E_c}{E_c'} = \left(\frac{B_c'}{B_c}\right)^3 \quad (1.26)$$

Esta ecuación muestra que si  $B_c$  es reducida a la mitad, entonces la energía del símbolo de código se incrementa ocho veces. Esto da la relación entre  $E_b/N_o$  y  $B_c$  en un sistema celular digital.

Una comparación puede ser ahora hecha entre la eficiencia de espectro para FDMA y TDMA. En FDMA,  $B_t$  está dividido en  $M$  canales, cada uno con un ancho de banda  $B_c$ . Por lo tanto la capacidad de radio para FDMA está dado por:

$$m = \frac{B_t}{\frac{B_t}{M} \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{C}{I}\right)}} \quad (1.27)$$

Considerando el caso donde un sistema multicanal FDMA ocupa el mismo espectro que un sistema de canal simple TDMA con múltiples ranuras de tiempo. Los términos de portadora e interferencia para FDMA pueden ser escritos como,  $C = E_b R_b$ ,  $I = I_o B_c$ , mientras que en TDMA los términos de portadora e interferencia son  $C' = E_b R_b'$ ,  $I' = I_o B_c'$ , donde  $R_b$  y  $R_b'$  son las velocidades de radiotransmisión de dos sistemas digitales,  $E_b$  es la energía por bit, y

$I_0$  representa la potencia por hertz de la interferencia. Los términos  $C'$  e  $I'$  son los parámetros para los canales TDMA y los términos  $C$  e  $I$  aplican para los canales FDMA.

**Capacidad de TDMA Celular Digital-** En la practica, los sistemas TDMA mejoran la capacidad por un factor de 3 a 6 veces comparado con los sistemas celulares analógicos. Un poderoso control de errores y codificación de la voz habilitan un mejor funcionamiento del enlace en ambientes de alta interferencia. Explotando la actividad de la voz, algunos sistemas TDMA son capaces de utilizar mejor cada canal de radio. El cambio de célula asistido por el móvil ( MAHO) permite al suscriptor monitorear las estaciones base vecinas y puede ser elegidas la mejor estación base por cada suscriptor. MAHO permite el desarrollo de microcelulas densamente empacadas, dando sustancialmente ganancias de capacidad en un sistema. TDMA también hace posible introducir Asignación Adaptiva de Canal ( ACA). ACA elimina la planeación del sistema debido a que no es requerido planear frecuencias para las células. Varios estándares propuestos tales como GSM, U.S. Digital Cellular (USDC), y Pacific Digital Cellular (PDC) han adoptado a TDMA por su alta capacidad. La tabla 1.3 compara el sistema analógico AMPS basado en FM con otros sistemas digitales basados en TDMA.

Parámetro	AMPS	GSM	USDC	PDC
Ancho de Banda (Mhz)	25	25	25	25
Canales de Voz	833	1000	2500	3000
Reuso de Frecuencias( tamaños de grupos)	7	4 o 3	7 o 4	7 o 4
Canales / sitio	119	250 o 333	357 o 625	429 o 750
Trafico (Erlangs/ Km cuadrado)	11.9	27.7 o 40	41 o 74.8	50 o 90.8
Ganancia de Capacidad	1	2.3 o 3.4	3.5 o 6.3	4.2 o 7.6

**Tabla 1.3 Comparación entre AMPS y distintos sistemas digitales celulares basados en TDMA**

### 1.7.1 Capacidad de CDMA Celular.

La capacidad de los sistemas CDMA esta limitada por la interferencia, mientras que en FDMA y TDMA esta limitada por el ancho de banda. Por lo tanto, cualquier reducción en

la interferencia provocara un incremento lineal en la capacidad de CDMA. Visto de otra forma, en un sistema CDMA, el desempeño del enlace se incrementa como el numero de usuarios se decrementa. Una forma sencilla de reducir la interferencia es utilizando antenas multisectorizadas, las cuales resultan en aislamiento espacial de los usuarios. Las antenas direccionales reciben señales de unicamente una fraccion de los usuarios, logrando una reduccion de la interferencia. Otra forma de incrementar la capacidad de CDMA es operar en un modo de transmisión discontinua ( DTX ), en el cual se toma ventaja de la naturaleza intermitente de la voz. En DTX, el transmisor es apagado durante los periodos de silencio de la voz. Ha sido observado que las señales de la voz tienen un ciclo de trabajo de alrededor de  $3/8$  en líneas alambicas y de  $1/2$  en sistemas móviles, donde el ruido de fondo y la vibración puede disparar los detectores de actividad de la voz. De esta manera, la capacidad promedio de un sistema CDMA puede ser incrementado por un factor que es inversamente proporcional al ciclo de trabajo. Mientras que FDMA y TDMA reutilizan las frecuencias dependiendo del aislamiento entre células dado por las perdidas de propagación, CDMA puede reutilizar todo el espectro para todas las células, resultando esto en un incremento de capacidad en un porcentaje muy grande sobre el factor normal de reuso de frecuencias.

Para evaluar la capacidad de un sistema CDMA, primero consideraremos un sistema con una sola célula. La red celular consiste de un gran numero de usuarios móviles comunicándose con una estación base ( En un sistema de múltiple células, todas las estaciones base están interconectadas por el Centro de Conmutación Móvil, MSO o Central Celular). El transmisor del sitio celular consiste de un combinador lineal el cual añade las señales dispersas de los usuarios individuales y también utiliza un factor de peso para cada señal para propósitos del control de potencia. Para un sistema de una sola célula, estos factores de peso pueden ser asumidos para ser iguales. Una señal piloto es también incluida en el transmisor del sitio celular y es utilizada por cada móvil para poner su propio control de potencia para el enlace de retorno. Para un sistema de una sola célula con control de potencia, todas las señales en el canal de retorno son recibidas con el mismo nivel de potencia en la estación base.

Supongamos un número  $N$  de usuarios, entonces, cada demodulador en el sitio celular recibe una forma de onda compuesta que contiene la señal deseada de potencia  $S$  y  $(N-1)$  usuarios interfiriendo, cada uno de los cuales tiene una potencia  $S$ . Entonces, la relación de señal a ruido es:

$$SNR = \frac{S}{(N-1)S} = \frac{1}{(N-1)} \quad (1.28)$$

En adición a la SNR, la razón Energía de Bit-Ruido es un parámetro importante en sistemas de comunicación. Este es obtenido por dividir la potencia de la señal entre la velocidad de información de banda base,  $R$ , y la potencia de la interferencia por el ancho de banda total de RF,  $W$ . La SNR en el receptor de la estación base puede ser representada en términos de  $E_b/N_o$  dado por:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{S/R}{(N-1)(S/W)} = \frac{W/R}{N-1} \quad (1.29)$$

Esta ecuación no toma en cuenta el ruido térmico de fondo,  $\eta$ , en el ancho de banda disperso. Para tomar en consideración este ruido,  $E_b/N_o$  puede ser representado por:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{W/R}{(N-1) + (\eta/S)} \quad (1.30)$$

El número de usuarios que puede acceder al sistema estará dado por

$$N = 1 + \frac{W/R}{E_b/N_o} - (\eta/S) \quad (1.31)$$

Donde  $W/R$  es llamada la ganancia de procesamiento. El ruido de fondo determina el radio de la célula para una determinada potencia de transmisión.

Para lograr un incremento en la capacidad, la interferencia debido a otros usuarios debe ser reducida. Esto puede ser logrado decrementando el denominador de las ecuaciones 1.28 y 1.29. La primer técnica para reducir la interferencia es la sectorización de la antena. Como ejemplo, un sitio celular con tres antenas, cada una tiene un ancho de haz de  $120^\circ$ , tiene interferencia  $N_o'$ , la cual es una tercera parte de la interferencia recibida por una antena omnidireccional. Esto incrementa la capacidad por un factor de 3 debido a que 3 mas usuarios pueden ser atendidos por un sector con un nivel igual de funcionamiento del sistema con antena omnidireccional. Viéndolo de otra forma, el mismo numero de usuarios en un sistema con antena omnidireccional pueden ser ahora atendidos en 1/3 del área. La segunda técnica envuelve el monitoreo de la actividad de la voz de tal forma que cada transmisor es apagado durante los periodos en los que no hay actividad de la voz. La actividad de la voz es representada por un factor  $\alpha$ , y el termino de interferencia en la ecuación 1.29 es  $(N_s-1)\alpha$ , donde  $N_s$  es el numero de usuarios por sector. Con el uso de estas dos técnicas, El nuevo valor promedio de  $E_b/N_o'$  en un sector esta dado por:

$$\frac{E_b}{N_o'} = \frac{W/R}{(N_s-1)\alpha + (\eta/S)} \quad (1.32)$$

Cuando el numero de usuarios es grande y el sistema es limitado por interferencia en lugar de limitado por ruido, el numero de usuarios puede ser mostrado por:

$$N_s = 1 + \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{W/R}{\frac{E_b}{N_o'}} \right] \quad (1.33)$$

Si el factor de actividad de la voz es asumido a tener un valor de 3/8, y tres sectores por célula son utilizados, la ecuación 1.33 demuestra que la SNR se incrementa por un factor de 8, el cual permite un incremento de 8 en el numero de usuarios comparado con un sistema con antena omnidireccional sin detección de actividad de voz.

**Control de Potencia en CDMA-** En CDMA, la capacidad del sistema es maximizada si el nivel de potencia en cada móvil es controlada de tal forma que cada señal llegue a la estación base con la mínima necesaria relación señal-interferencia. Si la señales de potencia de todos los transmisores móviles dentro de una area cubierta por una célula son controladas, entonces la potencia total recibida en un sitio celular será igual a la potencia promedio recibida por el numero de móviles trabajando en la región de cobertura. Un acuerdo debe ser hecho si una señal de un móvil llega al sitio celular con una señal que es tan débil, y frecuentemente el usuario débil será tumbado. Si la potencia recibida de un usuario móvil es muy grande el funcionamiento de esta unidad será aceptable, pero esto agrega interferencia indeseada a todos los demás usuarios en la célula.

### **1.7.2 Capacidad en CDMA con múltiple células.**

En el sistema actual CDMA que emplea enlaces de ida y de retorno por separado, las células vecinas comparten las mismas frecuencias, y cada estación base controla la potencia transmitida por cada usuario en su célula. Sin embargo, una estación base en particular es incapaz de controlar la potencia de los usuarios en las células vecinas, y estos usuarios se suman al piso de ruido y decrementan la capacidad en el enlace de retorno de la célula de interés. La figura 1.12 ilustra un ejemplo de cómo los usuarios en células adyacentes podrían ser distribuidos en el área de cobertura. La potencia transmitida de cada usuario fuera de la célula se sumara a la interferencia dentro de la célula ( donde los usuarios están bajo control de potencia ) en el receptor de la estación base. La cantidad de interferencia fuera de la célula determina el factor de reuso de frecuencia,  $f$ , de un sistema celular CDMA. Idealmente, cada célula comparte la misma frecuencia y el valor máximo posible de  $f$  ( $f=1$ ) es logrado. En la practica, sin embargo, la interferencia fuera de la célula reduce  $f$  significativamente. En contraste a los sistemas CDMA los cuales utilizan las mismas frecuencias para cada célula, los sistemas de banda angosta FDMA / FDD típicamente reusan los canales cada siete células, en cuyo caso  $f$  es simplemente  $1/7$ .

El factor de reuso de frecuencia para un sistema CDMA en el enlace de retorno puede ser definido como:

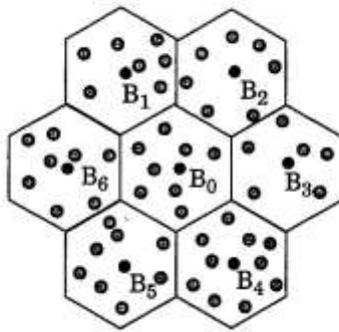
$$f = \frac{N_o}{N_o + \sum_i U_i N_{ai}}$$

(1.34)

Y la eficiencia en el reuso de la frecuencia, F, esta definido por:

$$F = f \times 100 \%$$

(1.35)



**Figura 1.12 Ilustración de usuarios dentro de un sistema CDMA. Cada estación base reutiliza la misma frecuencia. Los puntos grises representan usuarios dentro del sistema, los cuales tienen potencia de transmisión controlada por sus propias estaciones bases.**

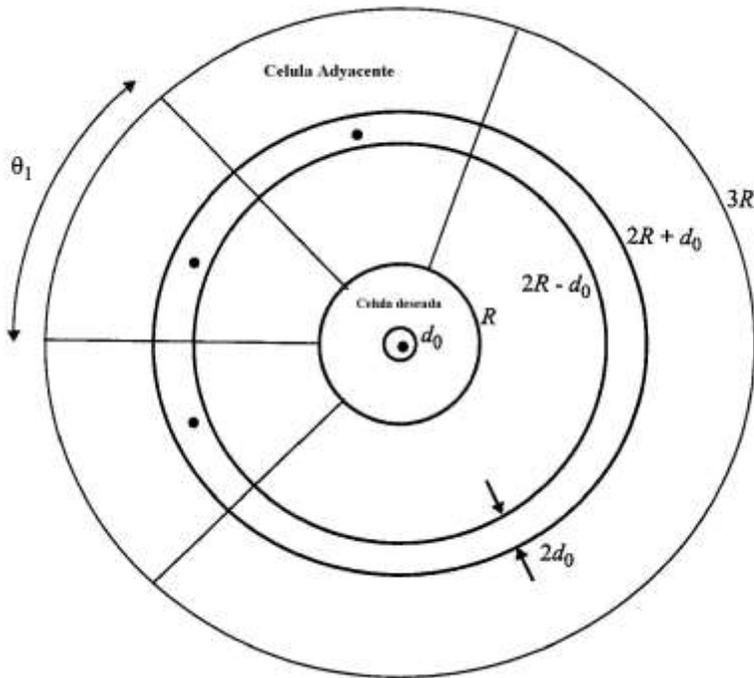
En la ecuación 1.34,  $N_o$  es la potencia total de la interferencia recibida desde  $N-1$  usuarios dentro de la célula,  $U_i$  es el numero de usuarios en la  $i$ 'esima célula adyacente, y  $N_{ai}$  es la potencia promedio de la interferencia para un usuario localizado en la  $i$ 'esima célula adyacente. Dentro de la célula de interés, el usuario deseado tendrá la misma potencia recibida como los  $N-1$  usuarios indeseados cuando el control de potencia es utilizado, y la potencia promedio recibida desde los usuarios en una célula adyacente puede ser encontrada por:

$$N_{ai} = \sum_j N_{ij} / U_i$$

(1.36)

Donde  $N_{ij}$  es la potencia recibida en la estación base de interés desde el  $j$ 'ésimo usuario en la  $i$ 'ésima célula. Cada célula adyacente podría tener un número diferente de usuarios, y cada usuario fuera de la célula producirá un nivel diferente de interferencia dependiendo de su potencia transmitida y su localización relativa a la estación base de interés. La variación de  $N_{ai}$  puede ser calculada utilizando técnicas estadísticas estándares para una célula en particular.

Un análisis descrito por Liberti, Rappaport y Milstein utiliza una técnica recursiva geométrica para determinar como afectan las pérdidas de propagación el reuso de frecuencias de un sistema CDMA considerando la interferencia de los usuarios dentro y fuera de la célula. La técnica geométrica, llamada **Geometría Celular de Círculos Concéntricos**, considera que todas las células tienen igual área geográfica y especifica que la célula de interés es una célula circular, la cual está localizada en el centro de todas las células vecinas. Las células interfiriendo tienen forma de cuña y están en capas alrededor del centro de la célula de interés. La figura 1.13 ilustra el arreglo geométrico de círculos concéntricos para una sola capa de células adyacentes.



**Figura 1.13 Geometría de círculos concéntricos propuesta por Rappaport y Milstein. Note que la célula central es circular, y las células que la rodean tienen forma de cuña. Cada célula, sin embargo, cubre la misma área.**

Si hacemos que la célula de interés tiene un radio  $R$ , y asumimos que hay una distancia  $d_0$  de tal forma que los usuarios en la célula central están al menos a  $d_0$  de la estación base y que todos los usuarios están a una distancia  $d$  que va desde  $d_0$  hasta  $R$  tal que  $d_0 < d < R$ . Entonces, una primer capa de células adyacentes interfiriendo se encuentra en  $R < d < 3R$ , y una segunda capa esta localizada en  $3R < d < 5R$ , y la  $i$ 'ésima capa interfiriendo esta localizada en  $(2i-1)R < d < (2i+1)R$ . En cada capa, hay  $M_i$  células adyacentes, donde  $i$  representa el numero de capa. Si  $d_0$  es asumido que es mucho menor que  $R$ , entonces el área  $A$  de la célula del centro de interés es

$$A = \pi R^2 - \pi d_0^2 \approx \pi R^2 \quad (1.37)$$

Dentro de la primer capa de células,  $A_1$  representa el área entera de la región. Si cada célula en la primer capa tiene la misma área  $A$ , entonces ahí deben estar  $M_1$  células con forma de

cuña que cada una intersecta con un ángulo  $\theta_1$ . Despreciando  $d_0$ , esta claro que para la primer capa.

$$A_1 = \pi(3R)^2 - \pi R^2 = M_1 A \quad (1.38)$$

$$\theta = 2\pi / M_1 \quad (1.39)$$

Resolviendo 1.38 y 1.39, con  $M_1=8$  y  $\theta_1 = 45^\circ$ . En otras palabras, hay ocho células con forma de cuña en la primer capa, cada célula cubriendo un ángulo de  $45^\circ$ . Por repetición, puede ser mostrado que para la segunda, y todas las subsecuentes capas, el área de la  $i$ 'esima capa esta relacionada al numero de células dentro de la capa por:

$$A_i = M_i A = i M_1 A = i 8 A \quad i \geq 1 \quad (1.40)$$

$$\theta_i = \theta_1 / i = \pi / 4i \quad (1.41)$$

La geometría de círculos concéntricos es atractiva porque, una vez que el área de la célula de interés es especificada, llega a ser fácil especificar un sistema completo de células que cada una de ellas ocupa la misma área de cobertura. Además, debido a que cada célula adyacente tiene la misma geometría y distribución angular que cualquier otra célula en la capa, y debido a que cada célula en una capa en particular tiene la misma geometría radial a la célula central de interés. Llega a ser posible considerar los efectos de la interferencia con una sola célula en una capa. Uno puede simplemente multiplicar los efectos de solo una célula por el numero de células en la capa que la rodea.

### **Factores de Peso.**

Es frecuentemente útil considerar los efectos de interferencia por células adyacentes por varias distribuciones de usuarios dentro de las células interfiriendo. Esto permite a uno

determinar el peor caso de reuso de frecuencia y da flexibilidad para determinar un rango de posibles valores de  $f$  para varias distribuciones de usuarios. La geometría de círculos concéntricos permite a las capas interfiriendo ser divididas en dos subcapas, una capa interior que esta en  $(2i-1)R < d < 2iR$ , y la subcapa exterior que esta en  $2iR < d < (2i+1)R$ . Esta partición es mostrada en la figura 1.13 (como se describe subsecuentemente, hay una pequeña zona prohibida alrededor de la estación base de las células adyacentes). La partición de capas da dos sectores dentro de cada célula en una capa dada: el sector interior (el cual contiene una fracción más pequeña del área de la célula) y el sector exterior (el cual contiene la fracción más grande del área de la célula). Debido a que cada célula contiene la misma área que la célula central, es claro que para una distribución uniforme de usuarios en una célula adyacente, el sector interior contendrá menos usuarios que el sector exterior, y esto ciertamente impactara la potencia de la interferencia recibida en la estación base de la célula central. Para contar con un amplio rango de distribuciones de usuarios en las capas interfiriendo, factores de peso son utilizados para redistribuir usuarios en los sectores interior y exterior de una célula adyacente.

Si  $K$  es la densidad de usuarios (el numero de usuarios por unidad de área), entonces el numero total de usuarios dentro de la célula del centro esta dado por  $U=KA$ . Si asumimos que todas las células tienen el mismo numero de usuarios, entonces en la primera capa que la rodea habrá también  $KA$  usuarios. Los factores de peso pueden ser utilizados para romper la distribución de usuarios en células adyacentes entre los sectores interior y exterior. En la primer capa que lo rodea, los sectores interior y exterior de cada célula tienen áreas que están dadas por

$$A_{in} / M_1 = \left( \pi(2R)^2 - \pi R^2 \right) / 8 = 3A / 8 \quad (1.42)$$

y

$$A_{out} / M_1 = \left( \pi(3R)^2 - \pi(2R)^2 \right) / 8 = 5A / 8 \quad (1.43)$$

Para cada célula en la primer capa que tiene  $U=KA$  usuarios, los factores de peso para la densidad de usuarios dentro de los sectores interior y exterior podría ser aplicados de tal forma que:

$$U = KA = (KW_{1in}A_{1in}) / M_1 + (KW_{1out}A_{1out}) / M_1 \quad (1.44)$$

Y

$$U = KA = KA[3 / 8W_{1in} + 5 / 8W_{1out}] \quad (1.45)$$

Utilizando la ecuación 1.45, puede ser visto que si  $W_{1in} = 1$  y  $W_{1out} = 1$ , entonces 3/8 de los usuarios estarán en el sector interior y 5/8 de los usuarios estarán en el sector exterior. Aunque esto puede ser una condición optimista para reuso de frecuencia, debido a que ni la mitad de los interferentes están a menos de  $2R$  de la estación base, y 5/8 de los usuarios están mas lejos que  $2R$  y ofrecerán más pequeños niveles de interferencia al centro de la célula. Sin embargo, si  $W_{1in} = 4/3$  y  $W_{1out} = 4/5$ , entonces la mitad de los usuarios en las células de la primer capa estarán más cercanos de  $2R$  y la mitad estará mas lejos de  $2R$  de la estación base (esto corresponde al caso de las células hexagonales, donde la mitad de los usuarios estarían más cercanos a la estación base de interés, y la mitad estarían mas lejos de la estación base de interés). Para el peor caso de interferencia, todos los  $U$  usuarios en cada una de las células de la primer capa estarían localizados en el sector interior (produciendo mas interferencia a la célula central debido a la distancia mas corta o las menores pérdidas de propagación). Los factores de peso para este peor caso resultan de poner  $W_{1in} = 8/3$  y  $W_{1out} = 0$ .

El área de las células central y las de forma de cuña en la geometría de círculos concéntricos excede el área de una célula hexagonal tradicional. Así como una célula hexagonal ocupa un área de  $A_{hex} = 2.598R^2$ , las células en la geometría de círculos concéntricos cada una posee un área de  $\pi R^2$ . Entonces, la célula central ocupa una área de 1.21 veces mas que una célula hexagonal y la primera capa de ocho células en forma de cuña mostradas en la figura 1.13 ocupa una área de 9.666 células hexagonales. Debido a

que el reuso de frecuencias esta basado en la cantidad relativa de interferencia de las células vecinas, como también en el numero de usuarios y el área de cobertura puede ser representada a escala en forma precisa, la geometría particular no impacta dramáticamente en las predicciones de capacidad. Entonces, la geometría de círculos concéntricos ofrece ventajas para analizar los efectos de células en el mismo canal.

### **Utilizando la Geometría de Círculos Concéntricos para Encontrar la Capacidad en CDMA.**

Para encontrar la capacidad de un sistema multi-celular CDMA, la geometría de círculos concéntricos puede ser utilizada en unión con el modelo de perdidas de propagación para determinar la interferencia de usuarios en células adyacentes. Entonces, utilizando la ecuación 1.34, el factor de reuso de frecuencia puede ser encontrado. Note que la potencia de la interferencia dentro de la célula  $N_0$  esta simplemente dada por:

$$N_0 = P_0(U - 1) \approx P_0U = P_0KA \quad (1.46)$$

Donde  $P_0$  es la potencia recibida desde cualquiera de los  $U$  usuarios en el centro de la célula (debido a que todos los usuarios están bajo control de potencia y entonces darán la misma potencia recibida en el receptor de la estación base). En general, es practico asumir que cualquier célula adyacente tendrá  $U$  usuarios y recibirá una potencia de  $P_0$  de cada uno de sus propios usuarios. En las células adyacentes, cada usuario esta bajo control de potencia en su propia célula, y esta a una distancia de  $d'$  de su propia estación base. Debido a que las leyes para analizar perdidas de propagación están basadas en que a toda distancia más grande de  $d_0$ , una pequeña zona prohibida teniendo  $2d_0$  de ancho existirá en todos los aros o anillos rodeantes. La zona prohibida es un poco anulada en cada capa que se asume no contiene usuarios, así que cualquier modelo de propagación podría ser usado en el análisis sin tener que  $d' < d_0$ . Es fácil mostrar que cuando  $d_0 < R$ , la pequeña área prohibida ocupa un área insignificante y da virtualmente los mismos resultados de interferencia si se considera o no.

Una pequeña aproximación para  $d'$  es hecha cuando se procesa la potencia de los usuarios en las células adyacentes y los de su propia estación base. La figura 1.14 ilustra como se procesan las distancias para los usuarios en los sectores interior y exterior dentro de una primer capa de células interfiriendo. Utilizando la ley de los cosenos, puede ser mostrado que dentro de cualquier célula en la  $i$ 'ésima capa.

$$d' = \sqrt{d^2 \sin^2 \theta + (2R_i - d_o - d \cos \theta)^2} \quad \text{para } (2i-1)R \leq d \leq (2i)R - d_o \quad (1.47)$$

$$d' = \sqrt{d^2 \sin^2 \theta + (d \cos \theta - 2R_i - d_o)^2} \quad \text{para } (2i)R + d_o \leq d \leq (2i+1)R \quad (1.48)$$

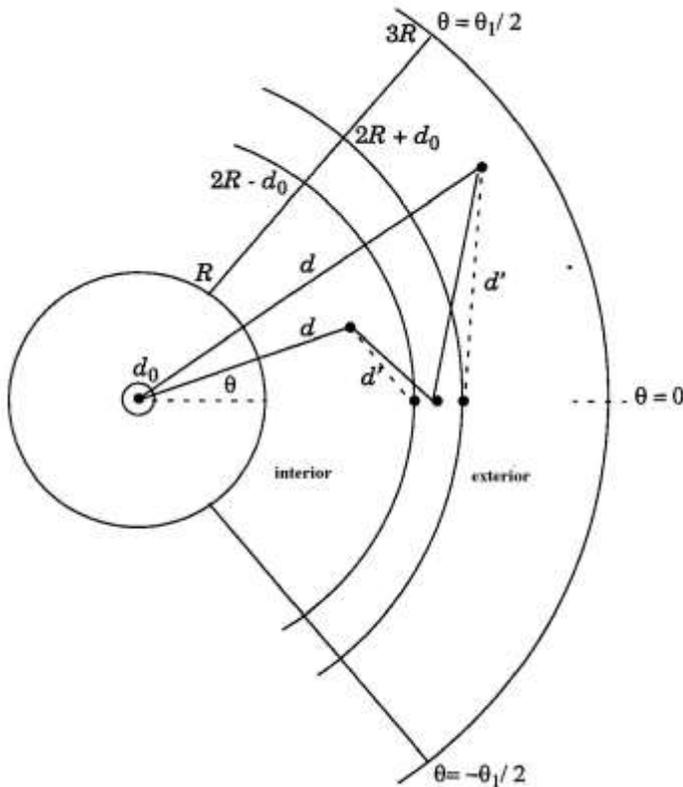
Entonces, utilizando  $d'$  y  $d$ , la potencia de la interferencia  $P_{o,i,j}$  en la célula central del  $j$ 'ésimo usuario en la  $i$ 'ésima célula interfiriendo puede estar dada por.

$$P_{o,i,j}(r, \theta, d_o) = N_{i,j} = P_o(d'/d_o)^n (d_o/d)^n \quad (1.49)$$

Donde  $n$  es el exponente de las pérdidas de propagación y  $d'$  es una función de  $\theta$  como se da en las ecuaciones 1.47 y 1.48. Los dos factores en el lado derecho de la ecuación 1.49 representan la actual potencia radiada por el transmisor del  $j$ 'ésimo suscriptor en la  $i$ 'ésima célula, multiplicada por las pérdidas de propagación de ese suscriptor al centro del receptor de la estación base. Evaluando la ecuación 1.49 para cada usuario en una célula adyacente, es posible calcular  $N_{ai}$  utilizando la ecuación 1.36 y aplicando la ecuación 1.34 para determinar  $f$ .

Simulaciones en las cuales se consideraron varios factores de peso de usuarios, como también exponentes de pérdidas de propagación de  $n=2,3$  y  $4$ , y variando el tamaño de la célula fueron llevadas a cabo por Rappaport y Milstein. La tabla 1.4 indica resultados típicos, los cuales muestran que  $f$  puede estar en el rango de  $0.316$  y  $0.707$ , dependiendo del exponente de pérdidas de propagación y la distribución de usuarios. De esta forma, mientras que un sistema de CDMA de una sola célula ofrece un factor ideal de reuso de

frecuencia ( $f=1$ ), el actual reuso de frecuencia es una función muy relacionada con la distribución de usuarios y de las pérdidas de propagación.



**Figura 1.14**  
**Geometría para calcular la distancia entre usuarios adyacentes y la estación base central de interés. Debido a la división de las células adyacentes en sectores interior y exterior, la distribución de los usuarios en células vecinas puede variar**  
**8.7.3 Capacidad de Acceso Múltiple por División de Espacio.**

Para CDMA limitado por la interferencia operando en un canal AWGN, con un control de potencia perfecto sin interferencia de células adyacentes y con antenas omnidireccionales utilizadas en las estaciones base, la tasa de errores de bit (BER) promedio,  $P_b$ , para un usuario puede ser encontrado por una aproximación gaussiana definida por.

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{3N}{K-1}}\right)$$

**(1.50)**

d (kms.)	n	Eficiencia de Reuso de Frecuencia	Hex	Limite mas alto
		Limite mas Bajo		
		$W_1=3.0$ $W_2=0.0$	$W_1=1.38$ $W_2=0.78$	$W_1=1.0$ $W_2=1.0$
2	2	0.316	0.425	0.462
2	3	0.408	0.558	0.613
2	4	0.479	0.646	0.707
10	2	0.308	0.419	0.455
10	3	0.396	0.550	0.603
10	4	0.462	0.634	0.695

**Tabla 1.4**

**Factor de Reuso de frecuencia para canal de retorno en sistemas celulares CDMA, como una función de n para implementaciones de dos sistemas.**

### 8.7.3 Capacidad de Acceso Múltiple por División de Espacio.

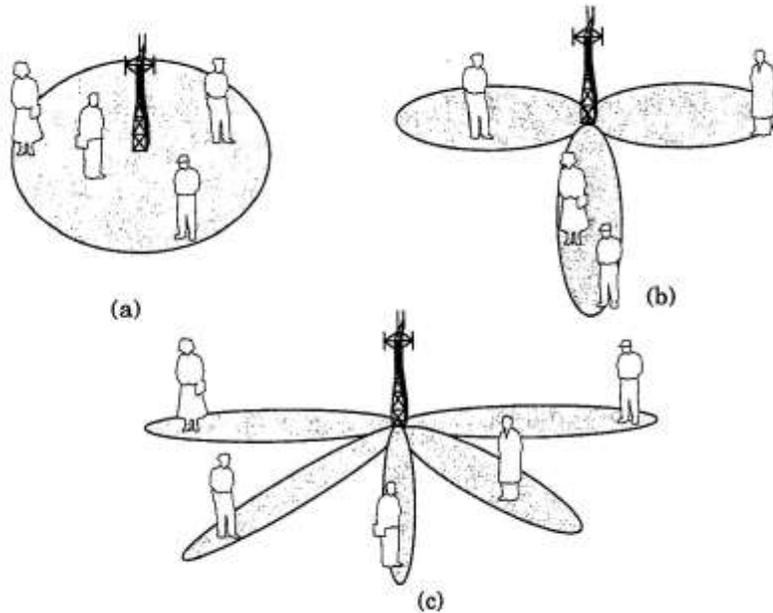
Donde  $K$  es el numero de usuarios en una célula y  $N$  es el factor de dispersión.  $Q(x)$  es la función estándar  $Q$ . La ecuación 1.35 asume que las secuencias de firma son al azar y que  $K$  es suficientemente grande para permitir que la aproximación gaussiana sea valida.

Para ilustrar como las antenas directivas pueden mejorar el enlace de retorno (REVERSE) en un sistema de una sola célula CDMA. Considere la figura 1.15, la cual ilustra tres posibles configuraciones de antena para la estación base. La antena omnidireccional detectara las señales de todos los usuarios en el sistema, y de esta forma recibirá la cantidad más grande de ruido. La antena sectorizada dividirá el ruido recibido en un valor más pequeño e incrementara el numero de usuarios en el sistema CDMA. La antena adaptiva mostrada en el inciso (c) da un haz dirigido a cada usuario, y es esta implementación la forma más poderosa de SDMA. Una antena adaptiva ideal es capaz de formar un haz para cada usuario en la célula de interés, y la estación base rastrea a cada usuario en la célula como este se mueva. Asumiendo que un patrón de haz,  $G(\phi)$  este hecho de tal forma que el patrón tiene una máxima ganancia en la dirección del usuario deseado. Ese patrón directivo puede ser formado en la estación base utilizando una antena de arreglo adaptivo de  $N$

elementos. Asumimos que un patrón de haz,  $G(\phi)$ , sin variaciones en el plano de elevación, como se muestra en la figura 1.16, puede ser formado por un arreglo. El patrón,  $G(\phi)$ , puede ser dirigido en los  $360^\circ$  en el plano horizontal de tal forma que el usuario deseado este siempre en el haz principal del patrón. Suponiendo que  $K$  usuarios en un sistema CDMA de una sola célula están uniformemente distribuidos a través de una célula en dos dimensiones, y que la antena de la estación base es capaz de simultáneamente proveer un patrón para cada usuario en la célula. En el enlace de retorno, la potencia recibida desde el móvil deseado es  $P_{r,0}$ . Las potencias de la señal incidente en la antena de la estación base desde  $K-1$  usuarios interferentes estarán dadas por  $P_{r,i}$  para  $i=1, \dots, k-1$ . La potencia total promedio de la interferencia,  $I$ , vista por un simple usuario, (medida en la señal recibida en el arreglo de la antena de la estación base, la cual es dirigida al usuario 0), esta dada por.

$$I = E \left\{ \sum_{i=1}^{K-1} G(\phi_i) P_{r,i} \right\} \quad (1.51)$$

Donde  $\phi_i$  es la dirección del  $i$ 'esimo usuario en el plano horizontal, medido en el eje  $x$ , y  $E$  es el operador esperado. Ninguna interferencia de células adyacentes contribuye a la interferencia total recibida de la ecuación 1.51. Si un control perfecto de potencia es aplicado de tal forma que la potencia incidente en la antena de la estación base por cada usuario es la misma, entonces  $P_{r,i} = P_c$  para cada uno de los  $K$  usuarios, y la potencia promedio de la interferencia vista por el usuario 0 esta dada por.



**Figura 1.15**

La ilustración muestra diferentes patrones de antena.

(a) Una antena de estación base con patrón omnidireccional.

(b) Una antena de estación base con patrón sectorizado.

(c) Un patrón de antena adaptiva el cual da haces angostos individuales para cada usuario en la célula.

$$I = P_c E \left\{ \sum_{i=1}^{K-1} G(\phi_i) \right\}$$

(1.52)

Suponiendo que los usuarios están independientes e idénticamente distribuidos a través de la célula, la interferencia total promedio vista por un usuario en la célula central esta dada por.

$$I = \frac{D}{B^c(K-1)}$$

(1.53)

Donde **D** es la directividad de la antena, dada por  $(G(\phi))_{\max}$ . En instalaciones celulares típicas, **D** esta en el rango de 3 db a 10 db. Como el haz es hecho mas angosto, **D** se incrementa, y la interferencia recibida se reduce proporcionalmente. El BER promedio para el usuario 0 entonces puede estar dado por.

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{3DN}{K-1}}\right) \quad (1.54)$$

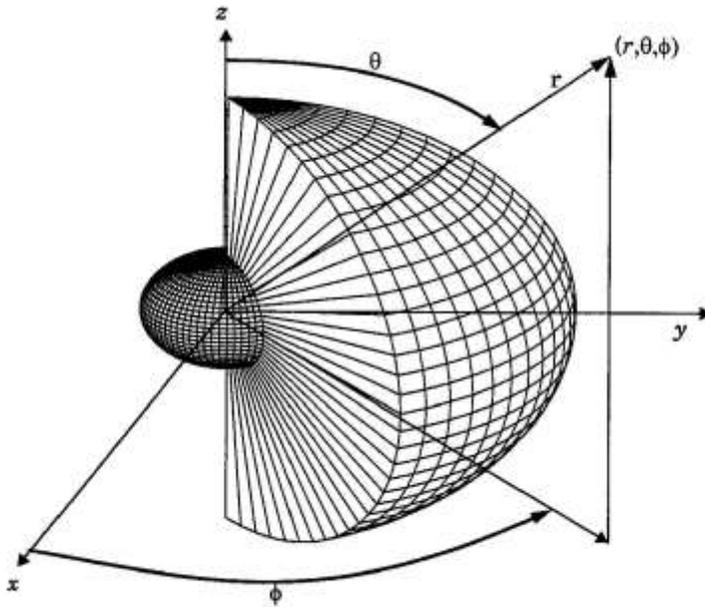
Entonces puede ser visto que la probabilidad de error de bit es dependiente del haz del receptor, y hay una considerable mejora que es lograda utilizando antenas adaptivas de alta ganancia en la estación base.

Tomando en cuenta el hecho de que la interferencia adicional de células adyacentes simplemente se suma al nivel de interferencia, la probabilidad promedio de error de un usuario particular utilizando antenas directivas en un ambiente de múltiples células esta dada por.

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{3fDN}{K-1}}\right) \quad (1.55)$$

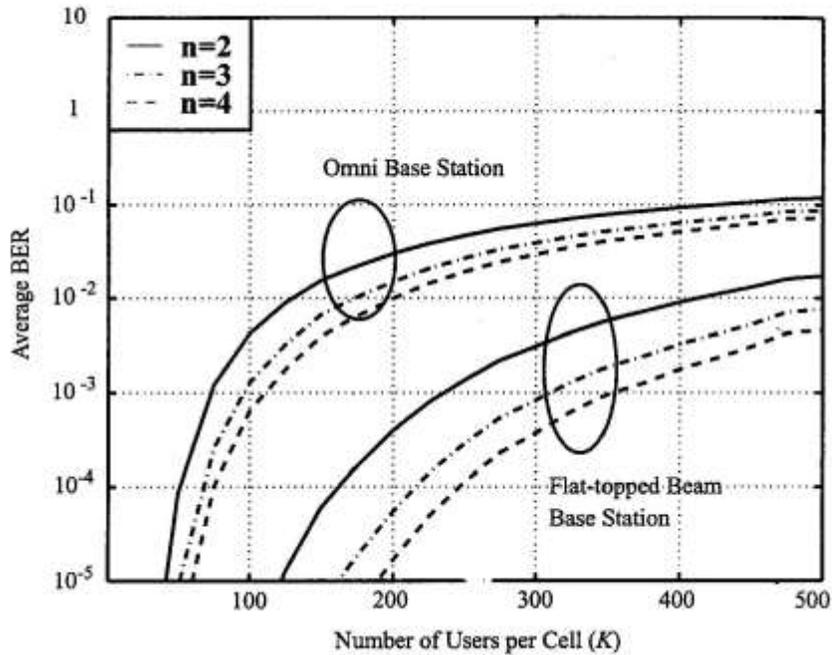
Donde  $f$  es el factor de reuso de frecuencia descrito por la ecuación 1.34. La figura 1.17 ilustra la probabilidad promedio de error para diferentes exponentes de pérdidas de propagación, donde dos diferentes tipos de antenas de la estación base son comparadas utilizando simulaciones las cuales consideran una sola capa de células interferentes utilizando la geometría de círculos concéntricos descrita en secciones anteriores. En la figura, un grupo de curvas de probabilidad promedio de error es encontrada para una antena estándar de estación base omnidireccional, y otro grupo de curvas es encontrado para un haz flat-top teniendo una directividad de alrededor 5.1 db. Este haz es supuesto tener un lóbulo de ganancia constante máxima abarcando un azimuth de  $30^\circ$ , y un nivel de lóbulo lateral el cual esta 6 db. debajo de la máxima ganancia. Además, es asumido que  $K$  haces separados pueden ser formados por la estación base y apuntados a cada uno de los  $K$  usuarios dentro de la célula de interés. Note que para una probabilidad promedio de error de 0.001 en un ambiente de pérdidas de propagación de  $n=4$ , el sistema de haz flat-top soportara 350 usuarios, donde una antena omni-direccional soportara únicamente 100 usuarios. Este incremento en el numero de usuarios es aproximadamente igual a la

directividad ofrecida por el sistema de haz flat-top, e ilustra la promesa que SDMA ofrece para mejorar la capacidad en los sistemas inalámbricos. Nótese que multitrayectoria no es considerado. El impacto de esparcir y difundir multitrayectoria en el funcionamiento de SDMA es actualmente un tópico de investigación y es cierto que impactará el funcionamiento e implementación de estrategias para técnicas emergentes de SDMA.



**Figura 1.16**

**Patrón idealizado flat-topped con un ancho de haz de  $60^\circ$  y un nivel de lóbulo lateral de  $-6$  db. El patrón no tiene variación en el eje de elevación para contar con los usuarios que están muy cercanos y muy lejanos a la estación base.**



**Figura 1.17**

Probabilidad promedio de error para un usuario en un sistema CDMA con una capa de células en el mismo canal interferentes. La antena de la estación base de interés utiliza (a) Una antena omnidireccional (b) SDMA con haz flat-top teniendo  $D=5.1$  db y apuntado a cada uno de los  $K$  usuarios dentro de la célula de interés. Nótese que SDMA ofrece una ganancia significativa en capacidad para una probabilidad promedio de error dada.