

Multiplexación y sistemas de acceso múltiple

Francesc Rey Micolau
Francesc Tarrés Ruiz

PID_00195479



Los textos e imágenes publicados en esta obra están sujetos –excepto que se indique lo contrario– a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 España de Creative Commons. Podéis copiarlos, distribuirlos y transmitirlos públicamente siempre que citéis el autor y la fuente (FUOC. Fundació para la Universitat Oberta de Catalunya), no hagáis de ellos un uso comercial y ni obra derivada. La licencia completa se puede consultar en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.es>

Índice

Introducción	5
Objetivos	7
1. Conceptos básicos	9
2. La división en tiempo (TDM/A)	15
3. La división en frecuencia (FDM/A)	22
4. La división en código (CDM/A)	28
4.1. Síncrono o casi síncrono CDM/A (Qs-CDM/A)	33
4.2. Asíncrono CDMA (A-CDMA)	34
4.3. <i>Frequency-Hopping</i> CDMA (FH-CDMA)	34
5. La división en espacio (SDM/A)	38
6. La división en polarización (PDM/A)	41
7. La división en frecuencias ortogonales (OFDM/A)	44
8. Mecanismos de acceso al medio por contienda: ALOHA (y variantes)	48
9. Mecanismos de acceso al medio por contienda: CSMA (y variantes)	51
Resumen	53
Actividades	57
Bibliografía	59

Introducción

La mayoría de los servicios de comunicaciones se ofrecen a gran cantidad de usuarios que se abonan al servicio y lo utilizan cuando lo necesitan; por esta razón será importante encontrar mecanismos que gestionen el acceso a los recursos de comunicaciones. Pensad, por ejemplo, en los servicios de telefonía fija o móvil, en los que los abonados suelen estar una gran parte del tiempo sin utilizar el servicio, pero cuando lo quieren hacer deberán establecer comunicaciones de forma simultánea con otros usuarios que también utilizan el mismo servicio. Esta situación nos conduce al hecho de que, para que la explotación de un servicio resulte rentable, suele ser necesario que los usuarios compartan el medio de comunicaciones.

El medio se puede caracterizar como un recurso que se ofrece a lo largo del tiempo y en todo un conjunto de bandas de frecuencias y donde los usuarios pueden establecer la comunicación deseada utilizando el medio durante una parte del tiempo y en un subconjunto de bandas de frecuencia. Así pues, compartir el medio significará que tendrán que establecerse criterios para definir los intervalos de tiempo y las bandas de frecuencia que los usuarios puedan usar para enviar las señales que contienen la información. Por lo tanto, aparece el concepto de *recurso de comunicaciones*, que representa el intervalo temporal y la banda de frecuencias que un usuario puede usar para establecer la comunicación.

Un buen diseño del sistema debe tener en cuenta que los recursos se repartan entre los usuarios de una forma óptima. Si el sistema se sobredimensiona, significa que no se utilizará toda la capacidad del medio, que habrá instantes de tiempos o bandas de frecuencia que ningún usuario utilice. En cambio, si el sistema se subdimensiona, no podremos dar servicio a todos los usuarios y tendrán que esperar para poder iniciar la comunicación.

Analizaremos las diferentes posibilidades que existen para compartir un medio, centrándonos principalmente en los conceptos de *división en frecuencia* (FD) y *división en tiempo* (TD), pero tratando también otros mecanismos para compartir los recursos y que se utilizan en un amplio abanico de sistemas de telecomunicaciones.

Las técnicas utilizadas para asignar el medio de comunicaciones a los diferentes usuarios son muy importantes, puesto que determinan la eficiencia del sistema de comunicaciones completo y el aprovechamiento correcto de los recursos. Estas técnicas se conocen con el nombre de *multiplexación* o *sistemas de acceso múltiple*. Existen diferencias sutiles entre estos dos últimos conceptos,

que intentaremos aclarar mediante algunos ejemplos. En cualquier caso, el objetivo de la multiplexación o el acceso múltiple es siempre un mejor aprovechamiento del medio, intentando maximizar la tasa de bits transmitida.

Este módulo didáctico empieza con un apartado en el que se presentan los conceptos generales de la multiplexación con definiciones que resultarán útiles en otros apartados. Con posterioridad, se presentan los sistemas de multiplexación de frecuencia, con algunos ejemplos sobre sistemas de telefonía y la multiplexación de los diferentes canales de televisión. En el apartado siguiente se analiza con detalle el concepto de *multiplexación por división en tiempo*, que se ilustra con un ejemplo del sistema de multiplexación de varios programas de televisión en un canal de TDT. Seguiremos con otros apartados más breves dedicados a los conceptos de *división por código, espacio y polarización*. Al final del módulo, trataremos también algunos de los mecanismos de contienda (mecanismos en los que los usuarios tienen que competir para acceder al medio sin interferirse) que también se pueden plantear para establecer criterios de acceso al medio. Este último apartado es puramente descriptivo y solo pretende dar a conocer una visión de los diferentes mecanismos existentes.

Objetivos

Al terminar el estudio de este módulo didáctico, habréis alcanzado los objetivos siguientes:

- 1.** Comprender la necesidad de que varios usuarios de un sistema de comunicación compartan recursos del medio físico.
- 2.** Identificar los mecanismos y procedimientos que permiten establecer estrategias para multiplexar varios usuarios.
- 3.** Entender la necesidad de establecer normativas precisas de multiplexación para minimizar las interferencias.
- 4.** Comprender los principios de multiplexación de señales por división en tiempo, división en frecuencia y división en código.
- 5.** Identificar las diferencias entre los sistemas de multiplexación y los sistemas de acceso múltiple.
- 6.** Comprender los mecanismos básicos para la señalización de tramas que se utilizan para facilitar la multiplexación.

1. Conceptos básicos

Compartir los recursos de comunicaciones constituye uno de los aspectos clave para la viabilidad práctica de los diferentes servicios de comunicaciones. En los primeros sistemas de telégrafo y teléfono, cada comunicación requería un par de cables. Esto significaba que para establecer la conexión entre dos centrales de telefonía que, por ejemplo, tenían que soportar cien comunicaciones, era necesario tirar cien pares de cables entre las dos centrales. Podemos imaginar el impacto visual y el coste económico que tendría actualmente interconectar dos ciudades como Barcelona y Madrid.

En la primera década del siglo xx, aparecen los primeros sistemas de multiplexación de señales que permiten realizar simultáneamente varias comunicaciones por un único par de cables. En la actualidad, buena parte de estos cables se han sustituido por fibra óptica que, al permitir elevadas velocidades de transmisión, pueden soportar un número elevado de comunicaciones simultáneas por el mismo medio, que es necesario multiplexar de manera eficiente.

La multiplexación de varias comunicaciones en un único medio representa, pues, una estrategia para aumentar la cantidad total de información que se puede enviar a través del medio, puesto que facilita que varias comunicaciones se puedan realizar simultáneamente aprovechando el mismo recurso. Es interesante observar que el coste de instalar un cableado entre dos centrales que permita establecer la comunicación entre un gran número de usuarios es aproximadamente igual al coste de instalar un único par de cables que conectan solo a un usuario. En efecto, el coste real se debe en la práctica al coste de soterrar el cable, y no al coste del cable en sí.

No solo en un cable/fibra resulta útil la reutilización del medio por más de un usuario. Otros medios de comunicaciones también utilizan técnicas que permiten a múltiples usuarios compartir el mismo recurso. Así, por ejemplo, en el espacio radioeléctrico también podemos encontrar una evidencia de multiplexación y acceso múltiple. Diferentes servicios como son la radio, la televisión, la telefonía móvil o las emisoras privadas de comunicaciones (como policía, servicios de emergencia o taxi) utilizan de forma compartida el espacio radioeléctrico dividido en bandas de frecuencias y canales. Otro ejemplo de compartición física de recursos lo encontramos en las estaciones base de telefonía o en los satélites de comunicaciones. El coste de la instalación (puesta en órbita en el caso de satélites) de estas infraestructuras es elevado y solo se puede rentabilizar si el número de usuarios que utilizan el recurso es elevado. Todos los servicios de comunicaciones utilizan de una forma u otra la posibilidad de compartir los recursos.

La radio y la televisión comerciales

Ejemplos típicos de compartición de recursos son la radio y la televisión comerciales, donde los diferentes canales de televisión utilizan bandas de frecuencias diferentes, las comunicaciones telefónicas entre centrales, las comunicaciones vía satélite, entre otros.

Las estrategias para compartir un medio entre varios usuarios reciben los nombres genéricos de *multiplexación* o *sistemas de acceso múltiple*. Aunque a veces, por un abuso del lenguaje, en algunos textos se intercambian los dos nombres, existe una diferencia entre ellos que intentamos aclarar a continuación.

El término **multiplexación**¹ hace referencia al proceso mediante el cual diferentes mensajes de información (como conversaciones telefónicas, transmisión simultánea de audio + vídeo + datos o diferentes canales de audio) generados típicamente en una misma ubicación física, se combinan en una única señal con el fin de compartir un recurso de comunicaciones.

El término **acceso múltiple**² hace referencia al proceso mediante el cual diferentes usuarios, típicamente alojados de modo físico en diferentes lugares (con diferentes mensajes para transmitir) acceden al mismo medio, bien sea de forma simultánea o no simultánea, con el fin de compartir el recurso de comunicaciones.

Tal como se puede ver, a pesar de que la finalidad en los dos casos es compartir el medio, hay una diferencia conceptual (aparentemente sutil) entre ambos términos. En términos generales, y sin mucho rigor técnico, podríamos decir que mientras que el multiplexado se puede llevar a cabo con un único módulo transmisor y por lo tanto se puede desarrollar de forma local, el acceso múltiple involucra diferentes transmisores o terminales de usuario que comparten el mismo medio a menudo de forma remota y dispersa. En términos más técnicos, diremos que el multiplexado se ejecuta en el ámbito de la capa física (nivel 1 del modelo OSI), mientras que el acceso al medio puede requerir de protocolos de control de acceso al medio y, por lo tanto, se realiza en parte a escala de enlace (nivel 2 del modelo OSI).

En algunos sistemas de comunicaciones como la telefonía móvil o las comunicaciones por satélite, el modelo del sistema seguirá un esquema con múltiples usuarios terminales geográficamente dispersos conectados a una estación receptora (estación base o satélite). El enlace entre los usuarios terminales y la estación receptora se denomina *enlace de subida*, y requerirá de una técnica de acceso múltiple para permitir a los diferentes usuarios poder acceder al medio compartiendo recursos. Por otro lado, denominaremos al enlace entre la estación receptora y los usuarios *enlace de bajada*, y requerirá de una técnica de multiplexado para permitir que las diferentes señales se hagan llegar a los respectivos usuarios.

⁽¹⁾En inglés, *multiplex*.

Multiplexación

En el caso de una línea telefónica + ADSL, la voz analógica se multiplexa con la señal de datos (Internet) para compartir la línea telefónica y utilizan diferentes bandas de frecuencia para la voz y para los datos.

⁽²⁾En inglés, *multiple access*.

Ejemplos de acceso múltiple

En el caso de la telefonía móvil, los diferentes usuarios conectados a una misma estación base tienen que compartir el recurso de radio y la estación base en el momento de mantener una conversación telefónica, para la que utilizan diferentes canales y transmiten en diferentes instantes de tiempo. En el caso del acceso múltiple, hablaremos de *usuario* para referirnos a cada una de las fuentes de datos independientes que se quieren transmitir.

La televisión digital terrestre

Para concluir la discusión entre la diferencia entre multiplexado y acceso múltiple pondremos el ejemplo de la televisión digital terrestre (TDT).

La banda de UHF asignada a la televisión comercial terrestre está dividida en diferentes canales (canales de televisión). En una zona geográfica concreta, cada uno de los proveedores de servicios de TDT tiene asignado un canal en el que puede transmitir. Así, por ejemplo, podremos decir que Televisión Española transmite en el canal 64 mientras que Televisión de Cataluña lo hace en el canal 62. En este caso, hablamos de *acceso múltiple*, ya que los diferentes proveedores del servicio envían al medio señales de televisión independientes desde ubicaciones diferentes y a diferentes frecuencias con el fin de compartir el espacio radioeléctrico.

Por la naturaleza de la señal de televisión digital, en un mismo canal se pueden multiplexar hasta cuatro canales de televisión diferentes, cada uno de ellos con su audio, su vídeo y sus datos (teletexto, datos de programación). Por esta razón, en el canal 62 asignado a Televisión de Cataluña encontraremos cuatro programas de televisión (TV3, K33, 3/24, 300) y algunas emisoras de radio. En este caso, hablamos de *multiplexación*, puesto que los mensajes de audio, vídeo y datos de los cuatro canales más las emisoras de radio se combinan (multiplexan) en tiempo en el centro emisor (los estudios de Televisión de Cataluña) con el fin de compartir una única señal/canal de televisión.

Para distinguir entre los sistemas de multiplexación y los sistemas de acceso múltiple, se utilizan abreviaciones diferentes. Así, FDM³ o TDM⁴ se refieren a sistemas de multiplexación, mientras que FDMA⁵ o TDMA⁶ se refieren a sistemas de acceso múltiple. Como a menudo el mismo mecanismo se puede aplicar por multiplexación y por acceso múltiple, y con objeto de evitar duplicidades en la notación, en este módulo didáctico utilizaremos la notación FDM/A o TDM/A (con barra) para referirnos simultánea e indistintamente a los sistemas de multiplexación y acceso múltiple, mientras que utilizaremos las abreviaciones FDMA o TDMA (sin la barra) cuando queramos denotar exclusivamente las técnicas de acceso múltiple.

Existen diferentes mecanismos para poder llevar a cabo los procesos de multiplexación o de acceso múltiple encargados de compartir los recursos de comunicaciones. Cuando la necesidad de recursos es conocida a priori, la asignación podrá ser fija y preestablecida y se hablará de *asignación fija de recursos* y, a pesar de que su uso no está muy extendido, en ocasiones se utiliza el acrónimo FAMA⁷ para referirse a este mecanismo. Por el contrario, cuando la necesidad de recursos no se conozca por adelantado, la asignación de recursos se podrá establecer de manera dinámica y bajo demanda en función de las necesidades y las circunstancias que concurran en el momento de llevar a cabo la comunicación. En este caso, se habla de *asignación dinámica bajo demanda* y se utiliza el acrónimo DAMA⁸ para referirse a este mecanismo de acceso múltiple. Los dos mecanismos anteriores tendrán las mismas soluciones, independientemente de que la asignación sea fija o dinámica. La única diferencia será que, para poder realizar asignaciones dinámicas del recurso, será necesario que el sistema incluya un gestor de recursos, que será el encargado de distribuir de forma óptima los recursos entre los usuarios que los soliciten.

En sistemas de comunicaciones de última generación, este gestor de recursos puede incluso determinar la calidad de la señal recibida y enviar a los usuarios terminales órdenes para que configuren la señal transmitida con el fin

⁽³⁾FDM es la sigla de la expresión inglesa *frequency division multiplex*.

⁽⁴⁾TDM es la sigla de la expresión inglesa *time division multiplex*.

⁽⁵⁾FDMA es la sigla de la expresión inglesa *frequency division multiple access*.

⁽⁶⁾TDMA es la sigla de la expresión inglesa *time division multiple access*.

⁽⁷⁾FAMA es la sigla de la expresión inglesa *fixed assigned multiple access*.

⁽⁸⁾DAMA es la sigla de la expresión inglesa *demand assigned multiple access*.

de optimizar algunos de los parámetros de comunicaciones de los diferentes usuarios (velocidad media de transmisión, velocidad máxima de transmisión de un usuario, calidad de la señal recibida, nivel de interferencias, retraso en la comunicación).

Una gestión eficiente del sistema de acceso y de la multiplexación es clave para aumentar el rendimiento global del sistema de comunicaciones. Tenemos que pensar que si el reparto de los recursos entre los usuarios es equitativo y está bien dimensionado, es posible aumentar el volumen de información que se puede transmitir por el medio. El diseño eficiente de un sistema de multiplexación y acceso múltiple de usuarios supone que el gestor es capaz de determinar en cada momento qué usuarios se han de asignar a cada recurso, mantener el sistema inactivo durante el mínimo de tiempo posible y reducir al máximo el número de usuarios sin acceso al recurso.

En el caso de las comunicaciones digitales, una buena gestión del múltiplex puede resultar equivalente, desde el punto de vista de la calidad del sistema de comunicaciones, a un aumento de la energía por bit o a un aumento del ancho de banda del sistema de comunicaciones, puesto que los tres aspectos inciden de manera directa en el flujo total de bits que se pueden transmitir. El principal problema de la gestión de recursos es el retardo en la espera hasta que el recurso es asignado, así como la complejidad en su control que comporta un gran coste computacional, tanto del gestor de recursos como de los posibles usuarios terminales.

Cuando no se tiene conocimiento a priori de la necesidad de recursos, una alternativa a la problemática de los mecanismos DAMA es acceder al medio de forma aleatoria y sin previo aviso. Este acceso por contienda asume el riesgo de incurrir en colisiones entre usuarios y pérdida de mensajes. En este caso, no existirá ningún gestor que regule el acceso al medio y los propios usuarios deberán establecer protocolos de control para garantizar que los mensajes lleguen al destinatario de manera satisfactoria. A pesar de que estos mecanismos pueden parecer a priori ineficientes debido a la posibilidad de colisión, y por lo tanto a la posibilidad de tener que retransmitir los mensajes hasta que sean recibidos por el destinatario, como se verá más adelante, pueden resultar adecuados cuando hay poco usuarios o cuando los recursos se necesitan solo durante un corto periodo de tiempo y de manera esporádica, puesto que se ahorran los mecanismos de control y sincronización entre usuarios, así como los protocolos para solicitar y disponer de acceso al medio, o la existencia de un gestor de recursos.

No existe un mecanismo que sea preferible frente a los otros y la decisión de cuál es el más adecuado siempre estará ligada a las características del tráfico (naturaleza y duración de los mensajes que se quieren enviar) así como del número de mensajes/usuarios que quieren transmitir simultáneamente. Con el fin de entender la problemática, planteamos un símil a modo de ejemplo.

¿Qué mecanismo de asignación escoger?

Un grupo de ocho personas se reúnen para intercambiar una información.

Si cada usuario ha de impartir una charla de quince minutos, la forma más eficiente de plantear el problema sería preparar un seminario de presentaciones en el que se reserve quince minutos para cada persona. Estaríamos, en este caso, ante un mecanismo de asignación fija de recursos.

Si estas mismas personas constituyen una comunidad de vecinos que se reúne para tratar las mejoras de la escalera, la forma más eficiente de plantear el problema sería que las ocho personas se reúnan y vayan intercambiando opiniones y discutiendo sobre los acuerdos, participando de forma aleatoria y no ordenada en la discusión con la posibilidad de que dos participantes empiecen a hablar a la vez y que alguien tenga que repetir lo que ha dicho porque no le ha oído todo el mundo. Estaríamos, en este caso, ante un mecanismo de asignación aleatoria con posibilidad de colisiones y retransmisiones.

Finalmente, si esta asamblea de vecinos no está formada por ocho personas sino por 800 personas, por razones obvias resultará completamente inviable proceder de la forma anterior. Habría que establecer un modo de asamblea con turnos de palabra y habría que introducir la figura del moderador de la asamblea que vaya dando la palabra a los participantes. Estaríamos, en este tercer caso, ante un mecanismo de asignación dinámica de recursos bajo demanda con la figura de un gestor de recursos.

Las estrategias naturales para resolver el problema tanto de la asignación fija como de la asignación dinámica de recursos son la división en tiempo (TDM/A) y la división en frecuencia (FDM/A) aunque hay otros mecanismos para compartir el canal de comunicaciones y que también analizaremos en este módulo como son la división en código (CDM/A), la división en espacio (SDM/A) o la división en polarización (PDM/A). Entre los mecanismos de acceso aleatorio, se analizarán la técnica ALOHA, incluyendo algunas de sus variantes más utilizadas, y la técnica de acceso al medio mediante detección de canal CSMA.

Cuando diferentes usuarios acceden simultáneamente al sistema sobre un mismo medio, es habitual pensar que estas comunicaciones puedan interferirse entre ellas. A esta interferencia entre usuarios inherente a los mecanismos de acceso múltiple la llamaremos *interferencia de acceso múltiple* y se utiliza el acrónimo MAI⁹. El resultado de la MAI es que se reduce la calidad final del sistema de comunicaciones y, en algunos casos, limita el número máximo de usuarios que pueden acceder simultáneamente al sistema. En otros casos, los sistemas de multiplexación o de acceso múltiple introducirán mecanismos para que cada uno de los usuarios transmita sus señales de manera controlada y preestablecida por el sistema (por ejemplo, introduciendo tiempos de guarda o bandas de guarda entre usuarios) para que las interferencias que se producen entre los usuarios se puedan considerar prácticamente nulas. Con la expresión "prácticamente nulas" queremos decir que el hecho de que un usuario esté o no transmitiendo información no tenga efectos sobre la calidad de la señal de otro usuario. Desde un punto de vista matemático, esto se puede expresar diciendo que dos usuarios diferentes transmiten señales ortogonales.

Ved también

A lo largo del módulo didáctico se presentarán los diferentes mecanismos de acceso múltiple que resumirán las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. Al final de este módulo, en el resumen, se presentará una breve síntesis comparativa de las diferentes técnicas indicando en cada caso cuál o cuáles pueden ser los mecanismos más adecuados.

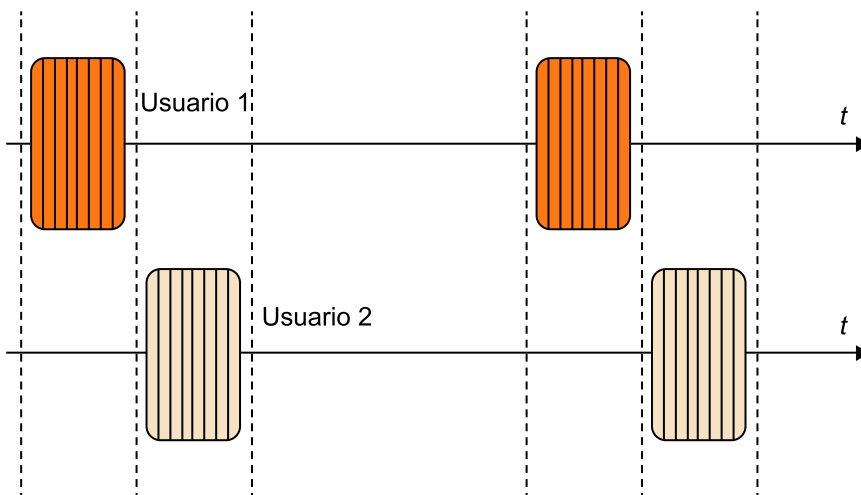
⁽⁹⁾MAI es la sigla de la expresión inglesa *multiple access interference*.

Denotando $x_i(t)$ la señal transmitida por el usuario i -ésimo y $x_j(t)$ la señal transmitida por el usuario j -ésimo, diremos que las dos señales son ortogonales si su producto escalar es nulo (salvo para el caso trivial en que $i = j$, es decir, cuando comparamos un usuario consigo mismo):

$$\int_{-\infty}^{\infty} x_i(t) \cdot x_j(t) \cdot dt = \begin{cases} \gamma & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (1)$$

A modo de ejemplo, es fácil pensar en el principio de ortogonalidad de la ecuación anterior planteando un sistema de división en tiempo. En efecto, cuando dos usuarios están multiplexados en el tiempo, uno de ellos solo transmite cuando el otro no lo hace y al revés, por lo que el producto entre ambas señales siempre será cero. Esta circunstancia se ilustra esquemáticamente en la figura 1, en la que observamos que ambos usuarios transmiten en intervalos disjuntos y, por lo tanto, el producto de las dos señales será nulo.

Figura 1. Ejemplo de ortogonalidad entre dos usuarios multiplexados en el tiempo

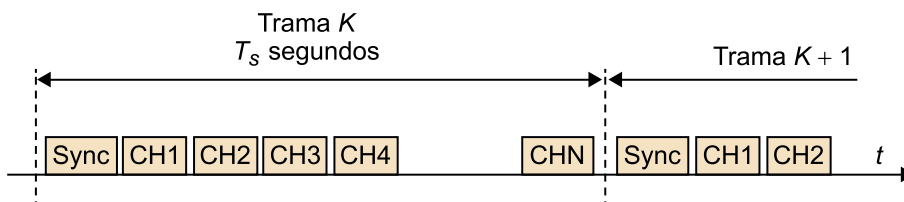


2. La división en tiempo (TDM/A)

En la técnica de multiplexado (TDM) o de acceso múltiple (TDMA) por división en tiempo (TDMA), el tiempo se divide en ranuras o intervalos de tiempo (que denominaremos *slots* siguiendo la bibliografía anglosajona) y cada usuario transmite su información de forma secuencial durante ciertas ranuras de tiempo utilizando todo el ancho de banda disponible y deja el canal libre el resto del tiempo. La decisión de cuál o cuáles son los intervalos de tiempo en los que se puede transmitir depende del sistema de comunicaciones y está predefinido en el caso de asignación fija de recursos o es competencia del gestor de recursos según las demandas recibidas en el caso DAMA.

La figura 2 representa esquemáticamente la estructura general de un sistema de multiplexación o de acceso múltiple por división en el tiempo TDM/A. Tal como se puede ver, el eje temporal se divide en tramas (*frames*) de una cierta duración (T_s segundos) y cada una de estas tramas se subdivide en N fragmentos de tiempo denominados *slots*, que por lo general tienen la misma duración. Esta estructura se repite periódicamente y cada usuario dispone de uno de los *slots* para poder acceder con periodicidad al canal y transmitir su información (en ciertos casos puede disponer de más de un *slot* según los requerimientos y disponibilidad del sistema de comunicaciones).

Figura 2. Esquema de multiplexado/acceso múltiple TDM/A



Es importante observar que en muchas ocasiones la operación de multiplexado/acceso múltiple se tiene que desarrollar en tiempo real y que el usuario no debe darse cuenta de que se están produciendo interrupciones en la capa física de la comunicación debidas al mecanismo de acceso al medio, lo que implica que la información se envíe a ráfagas. Esto obliga a que tanto el transmisor como el receptor dispongan de suficiente memoria para almacenar temporalmente el flujo de información producido mientras no se puede acceder al canal y esperar a transmitirlo cuando se disponga de acceso al medio. El periodo de la trama determinará el tamaño del *buffer* de memoria que deberán tener tanto el transmisor como el receptor para pasar de un flujo de datos continuo a uno de ráfagas o al contrario. Por otro lado, si hay N usuarios (o flujo de información) accediendo al medio, la velocidad de transmisión por el medio tendrá que ser N veces superior a la que tendríamos en el caso de que hubiera un único usuario.

Supongamos que una fuente tiene que transmitir a una tasa de datos de R bits/s y solo dispone de uno de los N slots (fragmentos temporales) en cada trama. Si la duración de la trama es de T_s segundos, tendrá que enviar durante T_s/N segundos toda la información que ha ido generando (y almacenado en la memoria) a lo largo de los T_s segundos en los que no ha podido transmitir. O dicho de otro modo, tendrá que transmitir los $R \cdot T_s$ bits en este fragmento de tiempo de duración T_s/N segundos que tiene asignado. Si suponemos que todos los usuarios tienen asignado el mismo tiempo para la transmisión, la velocidad a la que se tienen que transmitir los datos durante el fragmento temporal asignado es de la siguiente:

$$R_{TDM/A} = \frac{R \cdot T_s}{T_s/N} = R \cdot N \quad (2)$$

Resumiendo, en el numerador tenemos el número total de bits que el usuario quiere transmitir en esta trama, que se obtiene como el producto entre su tasa de transmisión y el tiempo de trama, y en el denominador tenemos el tiempo asignado a este usuario para la transmisión, que es solo una fracción de la trama. El resultado, como se anunciaba antes, es que la velocidad de transmisión tendrá que ser N veces superior a la de cada uno de los usuarios. Este resultado no nos tendría que sorprender demasiado. Indica que si hay N usuarios transmitiendo a una tasa de bits R , la velocidad del canal necesario para multiplexarlos tendrá que ser N veces superior.

Dada su naturaleza, los mecanismos de TDM/A solo se pueden utilizar en comunicaciones digitales. Observad que para implementar un mecanismo TDM/A hay que disponer de una memoria que almacene la información (bits) mientras no se dispone de acceso al canal. Esta memoria es técnicamente irrealizable por señales analógicas, mientras que no presenta ningún inconveniente al ser implementada por señales digitales.

Multiplexación TDM

Supongamos que disponemos de un multiplexación TDM que recibe dos flujos de bits que corresponden a los canales derecho e izquierdo de una señal audio estéreo y que los tiene que multiplexar en un único flujo de bits enviando de forma secuencial un bit del canal derecho y un bit del canal izquierdo. Si la velocidad de cada uno de los canales de audio es de $R = 768$ Kbits/s, ¿cuál tendrá que ser la velocidad de transmisión a la salida del multiplexor?

Observamos antes que nada que el tiempo de bit para cada uno de los canales es de $1/768 \cdot 10^{-3} = 1,3 \mu\text{s}$ y que, dado que el flujo de entrada al multiplexor tiene que ser el mismo que a la salida, el tiempo necesario para enviar dos bits (los correspondientes a los canales derecho e izquierdo) debe ser de exactamente $1,3 \mu\text{s}$. Por lo tanto, si en $1,3 \mu\text{s}$ se envían 2 bits, la velocidad de transmisión a la salida del multiplexor será $R_{TDM} = 2 \text{ bits}/1,3 \mu\text{s} = 1.536 \text{ Kbits/s}$ que, como se ha indicado antes, es el doble de la velocidad a la entrada del multiplexor.

En un sistema TDM/A es muy importante que tanto el transmisor como el receptor estén perfectamente sincronizados en tiempo con objeto de poder garantizar que el transmisor pueda insertar la información en el momento adecuado y que el receptor pueda interpretar correctamente las posiciones de los

slots en los que transmiten los usuarios. Con esta finalidad, se deben tener en cuenta dos aspectos importantes, como son las cabeceras (o *slots* de sincronismo) y los tiempos de guarda.

Por lo general, en cada trama el primer *slot* no contiene información de ningún usuario, sino que corresponde a una cabecera o palabra única que nos indica que estamos al principio de la trama. Esta cabecera corresponde a una secuencia de bits conocida que garantizará que todos los usuarios se puedan sincronizar con la red y saber en qué momento transmitir o recibir la información. Por este motivo, se acostumbra a denominar *slot* de sincronismo a esta cabecera. El resto de *slots* de la trama se destinan a insertar la información de los usuarios, a pesar de que se debe tener en cuenta que algunos protocolos también pueden requerir que cada usuario inserte algunos bits de cabecera al inicio del *slot* asignado que se pueden utilizar para identificar el número de canal, el usuario o para mejorar la sincronización del sistema con cada uno de los usuarios.

En algunos sistemas prácticos, estas informaciones de cabecera se conocen con el nombre de *señalización* y se utilizan para identificar los canales, su contenido e incluso, en algunos sistemas complejos que utilizan tramas con varios órdenes jerárquicos, facilitan datos útiles sobre la estructura del múltiplex como son la identificación del tipo de trama y su orden dentro de la estructura.

Aunque se inserten periódicamente secuencias de sincronismo, siempre puede existir un error de sincronismo entre usuarios que provocará que un usuario crea que el *slot* empieza antes o después de lo que realmente empieza. En el caso de producirse este error de sincronismo, se producirían interferencias entre usuarios, ya que un usuario podría acceder al canal antes de lo que le corresponde y colisionar con el usuario anterior, o bien podría acceder al canal más tarde de lo que le toca y colisionar con el usuario posterior. Con el fin de que no se produzcan estas colisiones, y para poder asumir ciertas tolerancias o errores de sincronismo con la red, se introducen los tiempos de guarda, que corresponden a intervalos de tiempo entre *slots* en los que no se transmite ningún tipo de información. La existencia de ese tiempo de guarda es opcional y su duración es variable, pero su presencia relaja las especificaciones de sincronismo de los equipos de transmisión y recepción.

Es interesante destacar que las cabeceras y bandas de guarda pueden resultar más o menos útiles según las características del sistema. En el caso de mecanismos de multiplexado en los que la multiplexación se centraliza en un dispositivo que tiene todos los canales a su disposición, dado que la secuencia de datos se procesa de forma local, los problemas de sincronismo no serán tan críticos y se puede reducir (o incluso eliminar) la duración de los tiempos de guarda y de los *slots* de sincronismo (los bits correspondientes a los diferentes canales se pueden insertar consecutivamente y sin pausas). Por el contrario, en el caso de mecanismos de acceso múltiple, dado que los usuarios se encuen-

tran geográficamente dispersos, será crítico mantener un sincronismo de red que obligará a introducir tiempo de guarda y secuencias de sincronismo de mayor duración.

A pesar de que las cabeceras y tiempos de guarda ayudan a desarrollar la tarea de multiplexación o acceso múltiple, se debe tener en cuenta que en ambos casos se reducirá la eficiencia del sistema. En el caso de la inserción de cabeceras en el canal, aparecerá una carga adicional de bits, que puede significar un aumento significativo de la velocidad de transmisión final $R_{TDM/A}$. Del mismo modo, la inserción de tiempo de guarda comportará una reducción del tiempo total disponible para la transmisión de la información útil, cosa que obligará de nuevo a aumentar la tasa de transmisión del múltiplex. Por lo tanto, aparecerá un compromiso entre complejidad del sistema (para garantizar una correcta sincronización) y eficiencia del sistema, de forma que si se relaja la complejidad (menor exigencia de sincronismo) será a cambio de reducir la eficiencia (menor velocidad de transmisión o menor número de usuarios que pueden acceder al sistema). La solución más adecuada dependerá en cada caso de las características y requerimientos del sistema.

Existen algunas aplicaciones de TDMA en las que el problema del sincronismo entre usuarios se ve agravado por el hecho de que los usuarios tendrán que insertar la información dentro del canal y hacerla llegar a una estación receptora desde lugares físicos geográficamente diferentes. En estos casos, se deberá tener en cuenta que las distancias entre cada uno de los usuarios y la estación receptora será diferente y, por lo tanto, los tiempos de propagación de los mensajes desde los usuarios hasta el receptor. Bajo estas condiciones, habrá que garantizar que los mensajes lleguen sincronizados (dentro del *slot* asignado) a la estación receptora y compensen la diferencia en los tiempos de propagación mediante un ajuste en el instante de salida de los mensajes. Dicho de otro modo, se tendrá que garantizar un sincronismo en el tiempo de llegada de los mensajes a la estación receptora actuando sobre el tiempo de salida de los mensajes.

Dado que los tiempos de propagación son a priori desconocidos por los usuarios y en entornos móviles pueden ir variando en el tiempo en función de la ubicación del transmisor dentro de la zona de cobertura, será necesario desarrollar mecanismos para corregir los desajustes en los tiempos de llegada y garantizar que estos sean inferiores a los tiempos de guarda. Este problema se resuelve desarrollando en la estación receptora un mecanismo de control del tiempo de llegada y realimentación hacia los usuarios terminales que vaya adaptando los instantes de salida de los mensajes para así evitar colisiones en la recepción.

Sincronismo TDMA en un sistema de telefonía móvil GSM

Encontramos este mecanismo, denominado en inglés *time advance*, por ejemplo, en un sistema de telefonía móvil GSM en el que cada canal de 200 kHz de ancho de banda está dividido en el tiempo y es compartido entre ocho usuarios. El protocolo se inicializa durante el proceso de acceso a la red y se gestiona de la siguiente manera:

- 1) El usuario solicita acceso a la red mediante el canal asignado para esta finalidad.
- 2) La red identifica al usuario y le asigna una ranura (o *slot*) de tiempo en función de la disponibilidad de la red.
- 3) El usuario envía un paquete dentro de la ranura de tiempo asignada.
- 4) La estación base recibe el paquete, mide el error de sincronismo y determina el ajuste (*time-advance*) que el transmisor ha de aplicar sobre el instante de salida para que el paquete se reciba correctamente sincronizado.
- 5) Se envía el parámetro *time advance* al usuario y este lo aplica para quedar bien sincronizado con la red.
- 6) Dado que el usuario se puede mover durante de la conversación y, por lo tanto, modificarse el valor del *time advance*, la estación base monitoriza periódicamente este parámetro y lo realimenta en el transmisor con objeto de mantener el sincronismo de tiempo.

Sincronismo TDMA en un sistema de comunicaciones por satélite

Otro ejemplo donde podemos encontrar la situación anterior es en un sistema de comunicaciones por satélite en el que desde diversas ubicaciones geográficas diferentes proveedores de servicio envían sus mensajes (por ejemplo, canales de televisión o conversaciones telefónicas) hacia el satélite para que este concatene los mensajes recibidos y forme una trama de datos que se enviará hacia la Tierra. De nuevo, debido a la diferente ubicación geográfica de los usuarios habrá que replicar un mecanismo similar al anteriormente descrito para mantener el sincronismo de tiempo de la red y compensar los diferentes tiempos de propagación de cada uno de los usuarios.

A continuación, resumimos las principales ventajas e inconvenientes del sistema TDM/A, además de reseñar las pérdidas de eficiencia.

1) En cuanto a las ventajas:

- Tecnología madura: técnicas muy conocidas y tecnológicamente probadas.
- Debido a que cada usuario cuando transmite lo hace ocupando toda la banda disponible, permite que la señal multiplexada se pueda introducir en un dispositivo no lineal sin que aparezcan interferencias entre usuarios debido a productos de intermodulación. Esto hará que los amplificadores puedan trabajar en saturación, y por lo tanto, lograr un uso más eficiente de la potencia.
- No hay que ajustar la potencia transmitida por las diferentes estaciones terrestres.
- Al trabajar todos los equipos en la misma frecuencia se simplifica el circuito sintonizador de la cadena de radiofrecuencia (RF).

- Diseñando adecuadamente los tiempos de guarda conseguimos ortogonalidad entre usuarios y, por lo tanto, es una técnica libre de MAI.
- Permite una elevada flexibilidad en el momento de cambiar los *slots* de tiempo asignados a cada usuario (solo hay que reajustar el instante de tiempo al usuario que transmite) y la cantidad de recursos asignados (a cada usuario se le puede asignado uno, dos o más *slots*, lo que consigue adaptar la velocidad de transmisión según las necesidades).
- Permite una elevada flexibilidad a la hora de decidir qué usuario hay que decodificar. Basta con que el receptor ajuste el *slot* de tiempo que quiere demodular para conmutar entre usuarios.

2) En cuanto a los **inconvenientes**:

- Al tratarse de una técnica síncrona en tiempo, es básico garantizar una sincronización temporal entre usuarios. En el caso de TDMA, hay que incluir en los algoritmos de sincronismo las posibles diferencias en el tiempo de propagación de la señal cuando los usuarios se encuentran geográficamente dispersos, hecho que complica todavía más la tarea de sincronización.
- Solo pueden aplicarse a comunicaciones digitales al requerir bloques de memoria (no realizables sobre señales analógicas) para almacenar la información mientras no se puede transmitir.
- Todos los usuarios que operan en el sistema tienen que disponer de *buffers* en transmisión y recepción, puesto que la transmisión se realiza a ráfagas.
- Dado que la red no requiere un sincronismo de portadora, cada usuario se tendrá que sincronizar de forma independiente con la señal recibida antes de demodular la señal, lo que introduce la necesidad de preámbulos en cada usuario.
- En TDMA, como el usuario accede al medio a ráfagas, las cadenas de radiofrecuencia (y en especial los amplificadores), deben estar conmutando (entre transmisión y silencio) en tiempo, aspecto tecnológicamente complejo que, entre otras cosas, reduce la eficiencia en potencia.
- Durante la fracción de tiempo en la que un usuario transmite, para no degradar las prestaciones, tiene que enviar la misma energía que enviaría si estuviera transmitiendo todo el tiempo (hay que mantener la energía de bit). Esto obliga a que la potencia instantánea mientras se transmite sea N veces mayor a la que habría con cualquier otra técnica de transmisión continua (por ejemplo, FDMA o CDMA) donde N es el número de *slots* en una trama.

3) En cuanto a las **pérdidas de eficiencia**:

- Las cabeceras utilizadas para sincronizar la red en tiempo, así como las bandas de guarda necesarias para absorber los errores de sincronización y eliminar la MAI, comportan una pérdida de eficiencia espectral (definida en bits/s/Hz) al reducirse la velocidad de transmisión de información útil o, lo que es lo mismo, al tener que destinar alguna fracción del tiempo para enviar bits que no llevan datos de información.

3. La división en frecuencia (FDM/A)

En la técnica de multiplexado (FDM) o de acceso múltiple por división en frecuencia (FDMA), cada usuario modula la información que quiere transmitir a una banda de frecuencias diferentes y sin solapamiento espectral transmitiendo de forma continua durante todo el tiempo. En este caso, los diferentes usuarios se superpondrán en tiempo, pero de forma que sus espectros se mantendrán separados debido a que los moduladores utilizan diferentes frecuencias portadoras debidamente calculadas. Para poder recuperar la información de cada usuario, el receptor se sintonizará a la banda de frecuencias del usuario del que quiere recibir la información y, ayudado de una operación de filtrado, demodulará el usuario de interés sin verse interferido por el resto de usuarios.

En resumen, para obtener la división en frecuencia es necesario desplazar el espectro de la señal original a una banda de alta frecuencia. Las técnicas utilizadas para realizar este desplazamiento se basan en las técnicas de modulación de señales que ya conocéis. Como en el caso de la división en tiempo, la decisión de qué frecuencia utilizar depende del sistema de comunicaciones y está predefinida, en el caso de la asignación fija de recursos, o es competencia del gestor de recursos en función de las demandas recibidas, en el caso DAMA.

Una variante de la técnica FDM/A es el multiplexado por división en longitud de onda, WDM/A¹⁰ que conceptualmente es el mismo aunque desde el aspecto técnico se aplica a transmisiones por fibra óptica. Otra variante de la técnica FDM/A es el multiplexado por división en frecuencias ortogonales, OFDM/A¹¹ que conceptualmente es el mismo en el sentido de que el espectro se divide en bandas (llamadas *subportadoras*) aunque la finalidad y la forma de implementación técnica son completamente diferentes.

Estructura general de un sistema de multiplexación o de acceso múltiple por división en frecuencia FDM/A

La figura 3 representa, de modo esquemático, la estructura general de un sistema de multiplexación o de acceso múltiple por división en frecuencia FDM/A.

Tal y como se puede ver en el ejemplo, se multiplexan tres señales de voz utilizando mezcladores con frecuencias portadoras diferentes. Las frecuencias portadoras son de 20 kHz, 25 kHz y 30 kHz. Se supone que la señal de voz tiene contenido espectral desde aproximadamente los 300 Hz hasta los 3.400 Hz.

Si tomamos como ejemplo el primer modulador (20 kHz), el mezclador desplaza la señal en banda base, de forma que todo el espectro (la parte positiva y la negativa) quedará centrado en la frecuencia portadora de 20 kHz. El filtro pasa banda situado después del mezclador únicamente toma la banda lateral superior, puesto que debido a la simetría del espectro solo será necesaria esta información para poder reproducir toda la señal original. Las señales multiplexadas están separadas por frecuencias portadoras de 5 kHz, por lo que el ancho de banda de cada canal es de 5 kHz.

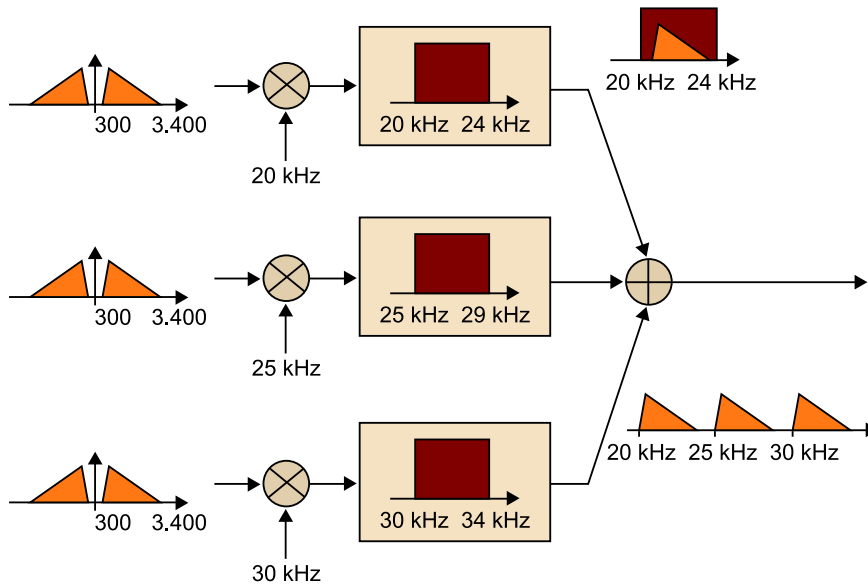
⁽¹⁰⁾WDM/A hace referencia a las expresiones inglesas *wavelength division multiplex* y *wavelength division multiple access*.

⁽¹¹⁾OFDM/A hace referencia a las expresiones inglesas *orthogonal frequency division multiplexing* y *orthogonal frequency division multiple access*.

Ved también

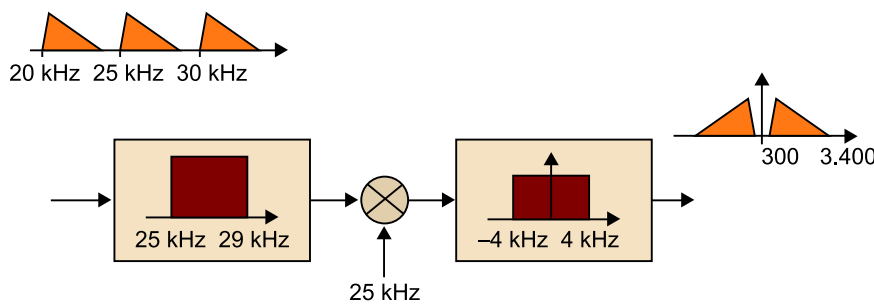
Al final de este módulo didáctico, dedicaremos un breve apartado a comentar la técnica de multiplexado por división en frecuencias ortogonales (OFDM/A).

Figura 3. Esquema de multiplexado/acceso múltiple FDM/A



Para recuperar las señales originales una vez ya se han multiplexado, podemos utilizar un esquema como el de la figura 4. En este caso, el sistema recuperará la señal existente en el segundo canal del sistema de la figura 3 (canal de 25 kHz a 30 kHz tal y como se indica).

Figura 4. Esquema de recuperación de un esquema de multiplexado/acceso múltiple FDM/A



A diferencia del caso de la división en tiempo, donde el hecho de combinar la señal procedente de N usuarios obligaba a incrementar la velocidad de transmisión en este factor, en el caso de división en frecuencia, el hecho de tener de forma simultánea N usuarios transmitiendo a una tasa de R bits/s obligará a que el ancho de banda del sistema completo sea N veces mayor:

$$Bw_{FDM/A} = Bw \cdot N \quad (3)$$

En un sistema FDM/A, como se puede intuir a partir del ejemplo de las figuras 3 y 4, es muy importante que tanto el transmisor como el receptor tengan perfectamente sincronizados los osciladores encargados de llevar a cabo los desplazamientos del espectro. En caso contrario, se producirían interferencias sobre los usuarios adyacentes en el momento de modular la señal, o interferencias de los usuarios adyacentes en el momento de demodular la señal. Con esta finalidad, se deben tener en cuenta dos aspectos importantes: los mecanismos de sincronismo y recuperación de portadora, y las bandas de guarda.

Respecto a los mecanismos de sincronismo y recuperación de portadora, no los vamos a tratar en este módulo por quedar fuera de los objetivos del módulo, y simplemente diremos que se tratará de mecanismos que tendrán que desarrollar tanto equipos transmisores como receptores para que las diferencias entre los diversos osciladores estén dentro de unas tolerancias predefinidas.

La forma más sencilla de llevar a cabo estos mecanismos es que uno de los nodos de la red envíe un tono piloto que será utilizado como referencia por el resto de usuarios para ajustar los osciladores respectivos. Observad que este método (dual en la inserción de cabeceras en el caso de la división en tiempo) implicará una pérdida de eficiencia, puesto que se tendrá que destinar parte del espectro y parte de la energía al envío de este tono piloto de referencia.

Existen otros mecanismos de sincronización mucho más complejos que pueden conseguir sincronizar los osciladores de una red sin necesidad de señales de referencia, solo escuchándose los equipos mutuamente. El problema de estos mecanismos es, sin embargo, que el tiempo que se necesita para que todos los equipos estén sincronizados es mucho mayor.

En cuanto a las bandas de guarda, son la solución dual a los tiempos de guarda para poder compensar errores en el sincronismo en los osciladores de los diferentes usuarios. Las bandas de guarda, como su nombre indica, son bandas en las que no se transmite ninguna energía. A diferencia de los tiempos de guarda (que podían ser opcionales en algunos casos), las bandas de guarda siempre son necesarias, puesto que aunque tienen perfectamente sincronizados los osciladores de los diferentes usuarios, habrá que disponer de unas bandas de transición para llevar a cabo el filtrado de la señal con filtros implementables (los filtros ideales, infinitamente abruptos, son técnicamente imposibles de realizar).

Observad en el ejemplo de la figura 3 que la banda que va desde los 23.400 Hz hasta los 25.300 Hz no contiene información útil. Esta banda de guarda se suele utilizar para simplificar el diseño de los filtros que deberán separar las señales, puesto que de este modo no se requieren bandas de transición tan abruptas. Dicho de otro modo, los filtros no tienen que ser de tanta calidad.

De nuevo, la introducción de bandas de guarda implicará una pérdida en la eficiencia del sistema debido al uso ineficiente de parte del espectro destinado a las bandas de guarda. Como en el caso de la división en tiempo, aparecerá un compromiso entre la complejidad del sistema (para garantizar una correcta sincronización) y la eficiencia del sistema; la solución más adecuada dependerá en cada caso del sistema concreto.

A diferencia de los mecanismos TDM/A, que solo se pueden utilizar en comunicaciones digitales por el hecho de requerir memorias, los mecanismos de FDM/A se han utilizado históricamente sobre señales analógicas, dado que los

moduladores y demoduladores permiten implementar desplazamientos de la señal en frecuencia independientemente de la naturaleza analógica o digital de la señal.

Existe la posibilidad de combinar las técnicas de multiplexado o acceso múltiple TDM/A y FDM/A para dar lugar a la técnica llamada MF-TDM/A¹², que se caracteriza por un desarrollo híbrido que divide el espectro en bandas de frecuencia y, a su vez divide cada banda en diferentes *slots*, de forma que a cada usuario se le asigna una combinación de banda y *slot* de tiempo para transmitir.

⁽¹²⁾MF-TDM/A es la sigla de la expresión inglesa *multi-frequency time division multiplex/multiple access*.

Técnica MF-TDM/A

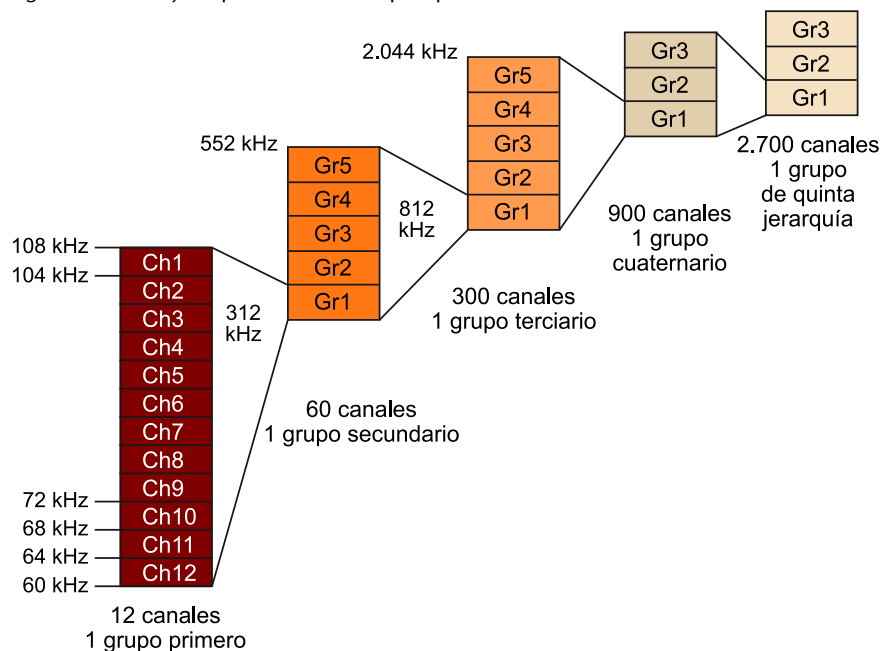
Un ejemplo típico de esta técnica lo encontramos en el sistema de telefonía móvil GSM (del inglés *global system to mobile communication*). En este sistema, se utilizan dos bandas de frecuencia, cada una de las cuales se subdivide en un total de 125 canales, con 200 kHz de ancho de banda para cada canal. Cada uno de los canales está dividido en el tiempo y es compartido por ocho usuarios. La asignación de un usuario a uno de estos ocho *slots* es dinámica y se tiene que señalar convenientemente, ya que el terminal no la conoce por adelantado.

Niveles jerárquicos de un múltiplex por división en frecuencia

El múltiplex de tres señales de voz que hemos utilizado en el ejemplo de la figura 3 se puede considerar como una nueva señal, cuyo ancho de banda está situado entre los 20 y los 35 kHz. Suponemos que existen varios sistemas que multiplexan tres señales de voz en un único canal, de manera análoga a la que hemos utilizado en este ejemplo. Podemos establecer una jerarquía superior que realice la multiplexación de los múltiplex de tres señales de audio, aplicando esta idea de manera recursiva durante varios niveles jerárquicos.

La situación descrita en el párrafo anterior se corresponde con la idea de niveles jerárquicos de múltiplex que se utilizan en telefonía analógica. En la práctica, en telefonía analógica se toman doce canales de voz para formar un grupo múltiplex que recibe el nombre de *grupo primario*. Los canales multiplexados están separados por 4 kHz que cubren una banda de frecuencias que va desde los 60 kHz hasta los 108 kHz (ved la figura 5). El nivel jerárquico superior se denomina *grupo secundario* y está formado por cinco grupos primarios, con un total de sesenta canales de voz. En este caso, la banda de frecuencias utilizada es 312-552 kHz, tal como se muestra en la figura 5. La jerarquía del múltiplex continúa hasta grupos terciarios (cada uno formado por cinco grupos secundarios –300 canales–), grupos cuaternarios (como agrupación de tres grupos terciarios –900 canales–) y, finalmente, grupos de quinto nivel jerárquico (formados por tres grupos cuaternarios –2.700 canales–).

Figura 5. Niveles jerárquicos de un múltiplex por división en frecuencia



Esta agrupación de los canales según diferentes niveles resulta útil en telefonía para realizar la conmutación a diferentes niveles sin tener que desmultiplexar todas las señales. Es posible que varios grupos primarios representen comunicaciones telefónicas entre Barcelona y Madrid y Barcelona y Toledo. Todos ellos forman un grupo secundario que se envía entre las centrales de Barcelona y Madrid. En la central de Madrid, el grupo primario

resultante se puede juntar con otros para enviarlo a Toledo sin necesidad de tener que demodular los canales en la señal de voz.

Frecuencias de los canales de televisión UHF

Otro ejemplo de señales multiplexadas en frecuencia son los canales de televisión que se transmiten en la banda de UHF (del inglés, *ultra high frequency*). Esta banda cubre desde los 470 MHz hasta los 860 MHz y se utiliza para la transmisión de señales de televisión terrestre, tanto en el formato analógico como en el digital. Debemos destacar aquí que las bandas de frecuencia para televisión en UHF son las mismas tanto para la televisión analógica como para la digital.

En la Europa occidental, la banda de frecuencias está dividida en un total de 49 canales, que están numeradas del 21 al 69. Cada canal tiene un ancho de banda de 8 MHz, lo que incluye las bandas de guarda. En televisión analógica, la señal PAL de vídeo compuesto se modula en banda lateral vestigial (una modulación en AM, en la que se filtra parcialmente la parte inferior del espectro). La frecuencia portadora de la señal de vídeo para el canal c está definida por la ecuación siguiente:

$$f_k = (8 \cdot (c - 21) + 471,25) \text{ MHz}$$

Así, por ejemplo, para el canal 40, la frecuencia portadora de la señal de vídeo será 623,25 MHz. En este canal, se puede transmitir una portadora analógica o una portadora digital. En el caso de transmitir una portadora analógica, el canal tiene un único programa de televisión. Análogamente, la frecuencia portadora de la señal de audio está centrada en la frecuencia siguiente:

$$f_k = (8 \cdot (c - 21) + 476,75) \text{ MHz}$$

Estos mismos canales se utilizan para la transmisión de la televisión digital terrestre (TDT). Sin embargo, este es prácticamente el único parecido que existe entre los dos sistemas de televisión, puesto que la modulación utilizada en el caso digital es OFDM.

A continuación, resumimos las principales ventajas e inconvenientes del sistema FDM/A, además de reseñar las pérdidas de eficiencia.

1) En cuanto a las **ventajas**:

- Tecnología madura: técnicas muy conocidas y tecnológicamente probadas.
- Se pueden aplicar a comunicaciones analógicas o digitales.
- Al tratarse de una técnica asíncrona en el tiempo, no se necesita sincronización temporal entre usuarios.
- Dado que todos los usuarios transmiten simultáneamente y sin pausa, las cadenas de RF (en especial los amplificadores) están trabajando de forma continua, lo que permite mejores eficiencias en potencia.
- Diseñando adecuadamente las bandas de guarda, conseguimos ortogonalidad entre usuarios y por lo tanto es una técnica libre de MAI.

2) En cuanto a los **inconvenientes**:

Ved también

El formato OFDM se trata más adelante en este módulo didáctico.

- Se necesita un sincronismo entre las portadoras de todos los equipos que operan en el sistema.
- Si la señal multiplexada se aplica a un amplificador no lineal, se producirán interferencias entre los usuarios debido a los efectos de la no linealidad del amplificador. Por lo tanto, es necesario tener especial cuidado con los componentes no lineales de la cadena de comunicaciones e introducir, si hace falta, circuitos linealizadores (para compensar las no linealidades del amplificador) o trabajar con una potencia inferior a la máxima permitida (*back-off*).
- Es menos flexible que TDM/A, al tener que cambiar las frecuencias asignadas a cada uno de los usuarios. Comporta disponer de osciladores variables y bancos de filtros que puedan filtrar diferentes bandas.
- Necesidad de control de la potencia recibida para que todas las portadoras accedan con la misma potencia y no se produzcan bloqueos o enmascaramientos de los usuarios más potentes frente a los más débiles.

3) En cuanto a las **pérdidas de eficiencia**:

- Los tonos piloto utilizados para sincronizar la red, así como las bandas de guarda necesarias para absorber los errores de sincronización y eliminar la MAI comportan una pérdida de eficiencia espectral (definida en bits/s/Hz) al estar utilizando espectro para otras finalidades que no son la de transmitir información útil.

4. La división en código (CDM/A)

En los apartados anteriores, hemos analizado los principios de funcionamiento de los sistemas de multiplexación por división en frecuencia y por división en tiempo, que son históricamente los más utilizados en los sistemas de comunicaciones. Hemos visto que para conseguir la ortogonalidad entre usuarios (y por lo tanto para eliminar la MAI), el principio de funcionamiento es el de la no simultaneidad tiempo-frecuencia entre los usuarios. Es decir, en la multiplexación en frecuencia, los usuarios transmiten durante el mismo tiempo pero utilizando frecuencias diferentes; mientras que, para la multiplexación en tiempo, los usuarios tienen fragmentos de tiempo asignados diferentes para enviar o recibir sus datos.

Existe otra alternativa de multiplexación de datos en la que los usuarios comparten tiempos y frecuencia y que se conoce con el nombre de multiplexación por división en código. Los principios de funcionamiento de los sistemas denominados de espectro ensanchado, que son la base de esta técnica, van más allá de los objetivos de este módulo y se dejan para una asignatura de sistemas de comunicación avanzados.

Sin embargo, como la multiplexación y el acceso múltiple por división en código se utilizan en algunos sistemas de comunicación muy populares como el sistema de telefonía móvil de tercera generación, vamos a dedicar este apartado a describir las características principales de estos sistemas. Este apartado es, por lo tanto, descriptivo, en él se enuncian algunas de las propiedades y características de la división en código y no se pretende que se comprendan los principios de funcionamiento de estos sistemas.

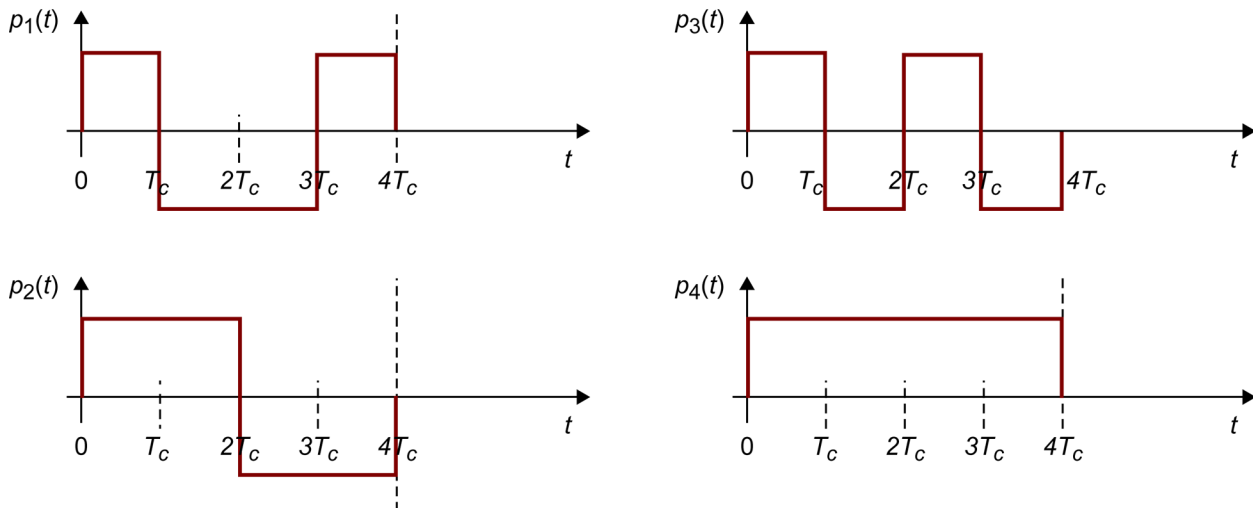
Empezamos presentando la técnica de multiplexado por división en código a partir de un ejemplo numérico. Observad que las cuatro secuencias de la figura 6 mantienen el principio de ortogonalidad enunciado en la ecuación (1):

En efecto, tomando dos secuencias cualesquiera (por ejemplo las secuencias 1 y 2), se cumple lo siguiente:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_1(t) \cdot p_2(t) dt = T_c \sum_{i=1}^4 c_1(i) \cdot c_2(i) = T_c(1 - 1 + 1 - 1) = 0 \quad (4)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_2(t) \cdot p_2(t) dt = T_c \sum_{i=1}^4 c_2(i) \cdot c_2(i) = T_c(1 + 1 + 1 + 1) = 4 \cdot T_c \quad (5)$$

Figura 6. Ejemplo de secuencias ortogonales por CDM/A



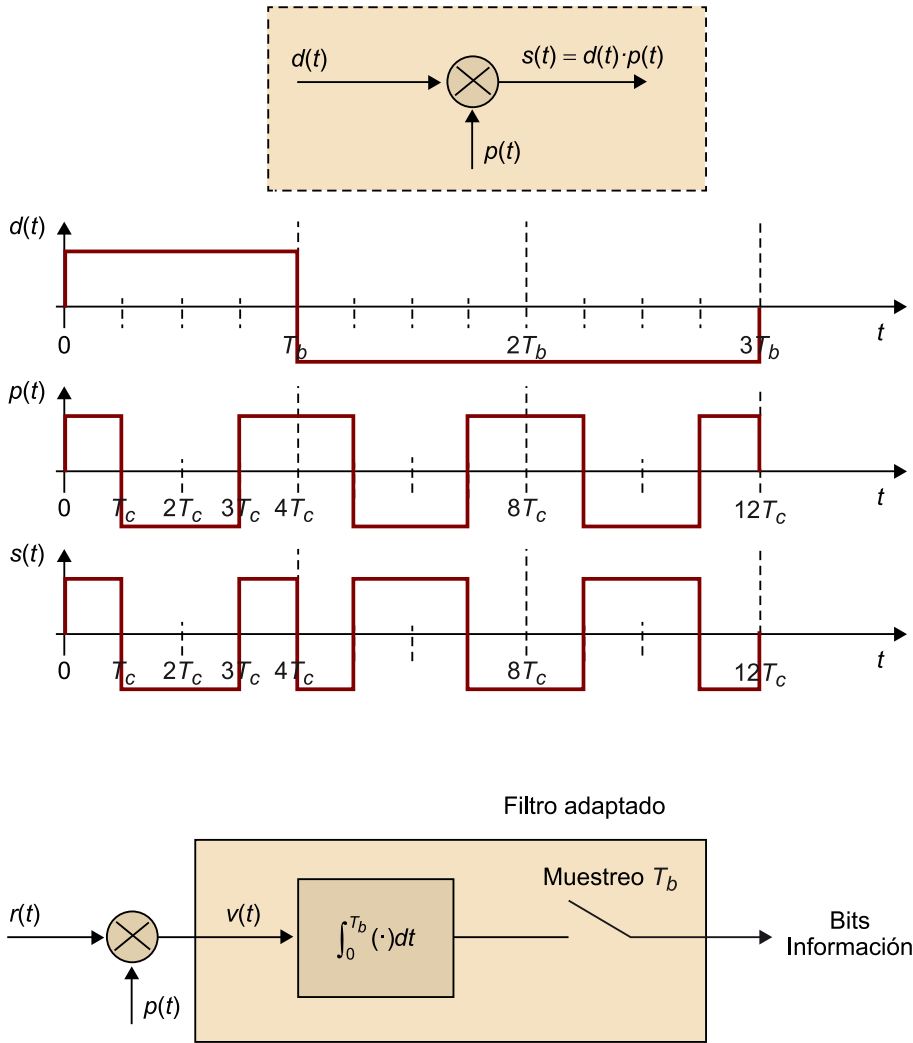
Explotando esta ortogonalidad veremos que, al utilizar como base estas secuencias, podremos transmitir simultáneamente dos señales de información $d(t)$ que se podrán separar en el receptor. La figura siguiente ilustra el principio de funcionamiento del transmisor (arriba) y del receptor (abajo) que implementa el mecanismo CDM/A.

En la figura 7, se observa que la secuencia binaria que contiene la información $d(t)$ está modulada por una de las secuencias binarias ortogonales $p(t)$. Es importante observar que la velocidad de transmisión de la información es menor que la velocidad de la secuencia $p(t)$, es decir, T_b , que denota el tiempo de bit, es mayor que T_c , que corresponde a la duración del polo de la secuencia ortogonal que llamaremos *tiempo de chip*.

El resultado del producto es una secuencia binaria que varía a la misma velocidad que la secuencia ortogonal. De aquí se deducirá que el ancho de banda de la señal transmitida $BW_{CDM/A} = 1/T_c$ será mucho mayor que el ancho de banda de la señal de información $Bw_d = 1/T_b$. Por este motivo, hablaremos de *señales de espectro ensanchado* para referirnos a estos mecanismos de acceso múltiple/multiplexado. Este incremento en el ancho de banda es el que permitirá que, de manera controlada, varios usuarios puedan transmitir simultáneamente compartiendo tiempos y frecuencia mediante códigos ortogonales.

En la misma figura 7, se muestra el esquema del receptor. En este caso, la señal recibida se multiplica por una réplica de la secuencia $p(t)$, que se tendrá que generar en el receptor y que supondremos perfectamente sincronizada con la señal recibida. En estas condiciones, teniendo en cuenta el principio de ortogonalidad observado antes, el efecto será el de recuperar la información de la señal deseada y cancelar a la vez las señales transmitidas por el resto de usuarios, dado que todos los productos cruzados de $p_i(t) \cdot p_j(t)$ se anularán excepto el del usuario de interés $i = j$.

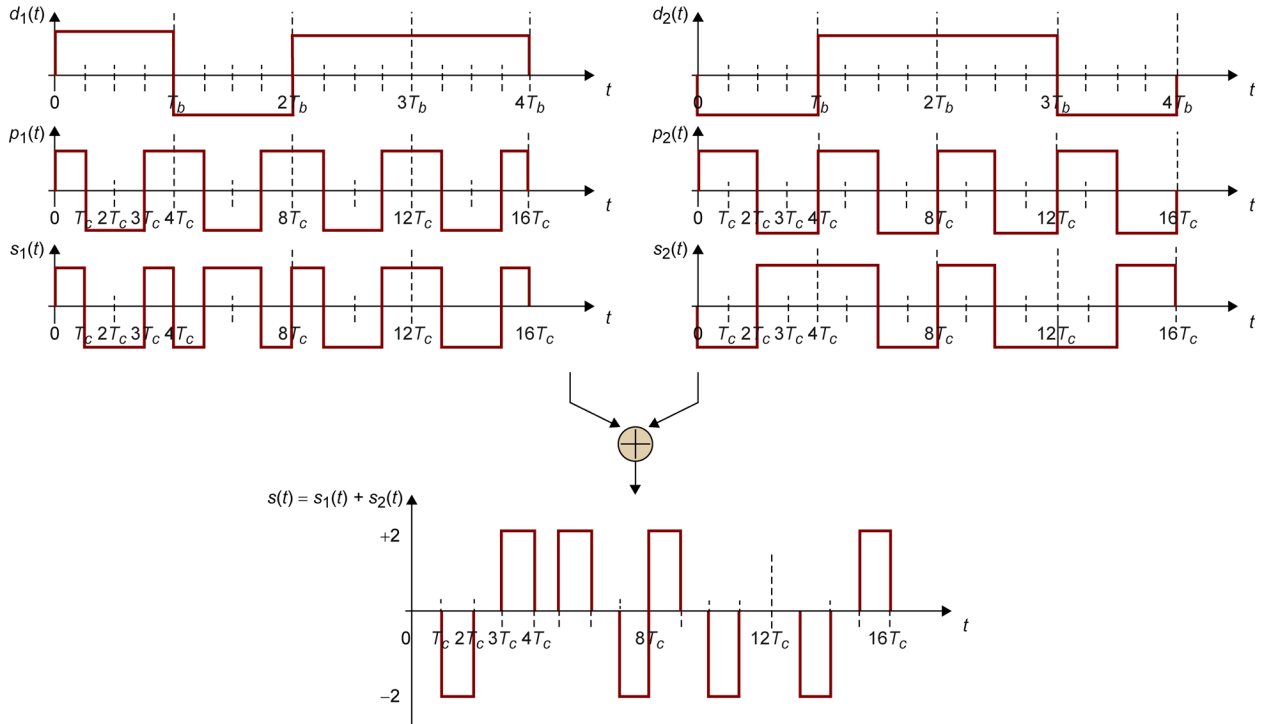
Figura 7. Diagrama básico de un transmisor (arriba) y un receptor (abajo) por CDM/A.



Multiplexación por división en código

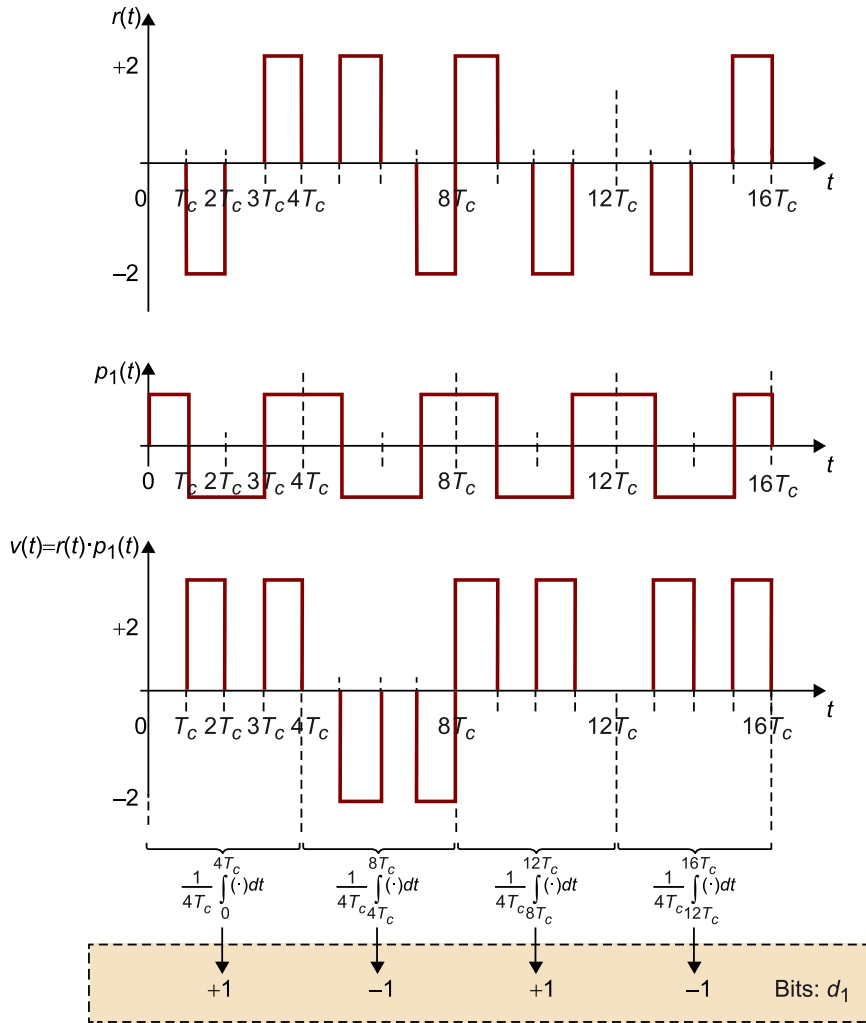
A continuación, desarrollamos el ejemplo numérico que ilustra el funcionamiento del sistema. Partiendo de que se quieren transmitir los siguientes bits de información $d_1 = \{+1, -1, +1, +1, \dots\}$ y $d_2 = \{-1, +1, +1, -1, \dots\}$ y que para hacerlo se utilizan las secuencias código $c_1 = \{+1, -1, -1, +1\}$ y $c_2 = \{+1, +1, -1, -1\}$ la señal transmitida $s(t)$ resultado de combinar las señales generadas por cada una de las señales de información tendrá la siguiente forma de onda:

Figura 8. Ejemplo numérico de multiplexado/acceso múltiple CDM/A



En el receptor, comprobamos que se podrá recuperar la secuencia de bits del usuario 1 si utilizamos el esquema receptor de la figura 7 con el código $c_1 = \{+1, -1, -1, +1\}$. A partir del principio de ortogonalidad de las secuencias código escogidas, todos los productos cruzados de $p_1(t) \cdot p_2(t)$ se anularán y se logrará un sistema en el que anulemos por completo al usuario 2 y se descodifica el 1.

Figura 9. Ejemplo numérico de recuperación de una señal con multiplexado/acceso múltiple CDM/A



Dejamos que comprobéis que si en lugar de utilizar la secuencia $c_1 = \{+1, -1, -1, +1\}$ en el receptor se utiliza la secuencia $c_2 = \{+1, +1, -1, -1\}$ tendríamos un receptor que recuperaría los bits de información del segundo usuario.

Como se puede imaginar, la importancia de esta técnica recae en las secuencias código utilizadas. El número total de secuencias que se pueden utilizar es finito con objeto de garantizar que las secuencias sean ortogonales. Este número depende, entre otros factores, de la longitud de la secuencia: cuanto más larga es la secuencia, mayor será el ensanchamiento espectral provocado, mayor el número de secuencias posibles, y por lo tanto, mayor el número de señales que se pueden multiplexar o mayor el número de usuarios que puede utilizar el sistema. A continuación, resumimos muy brevemente las diferentes variantes que podemos encontrar en técnicas de multiplexado/acceso múltiple por división en código.

4.1. Síncrono o casi síncrono CDM/A (Qs-CDM/A)

Un sistema síncrono CDM/A requiere que las secuencias moduladoras de todos los usuarios del sistema estén perfectamente sincronizadas. La necesidad de este sincronismo recae en el hecho de que se utilizan secuencias moduladoras que son perfectamente ortogonales (como se ha visto en el ejemplo anterior) solo cuando están perfectamente sincronizadas. Si existe un error de sincronización entre la señal recibida y la secuencia utilizada en el receptor, se pierde esta ortogonalidad y el resultado es que no será posible separar de forma correcta a los usuarios.

Sistema síncrono CDM/A

Planteémoslo con un ejemplo concreto. Se ha visto antes que los códigos $c_1 = \{+1, -1, -1, +1\}$ y $c_2 = \{+1, +1, -1, -1\}$ son perfectamente ortogonales y permiten separar la información de los dos usuarios. Sin embargo, observad qué pasaría si en el receptor hubiera un error de sincronismo de T_c segundos (un chip). Este efecto sería equivalente a tener un código c_1' a la hora de multiplicar por la secuencia; este código c_1' se obtiene a partir del código c_1 pero con un desplazamiento circular a la derecha de un chip. Observad que el código c_1' coincide con el código c_2 . Por lo tanto, si en el esquema de la figura 9 el receptor que multiplica por la secuencia $p_1(t)$ tuviera un retraso de T_c segundos sería imposible separar la información de los usuarios 1 y 2. Lo podéis probar vosotros mismos.

En casos de multiplexado, o cuando el acceso múltiple tenga como objetivo transmitir simultáneamente diferentes señales que se generan físicamente en un mismo lugar, como puede ser en el caso de la telefonía móvil el canal desde la estación base hasta los usuarios, resultará factible garantizar un sincronismo (alineamiento) perfecto entre las diferentes secuencias moduladoras. Ahora bien, cuando el acceso múltiple tenga como objetivo transmitir simultáneamente diferentes señales de diferentes usuarios que se generan físicamente en lugares separados, aunque se implemente un sistema de sincronismo entre usuarios, resultará imposible garantizar un sincronismo perfecto y siempre quedará un error de sincronismo entre usuarios. Diremos en este caso que el sistema es casi síncrono y hablaremos de un *sistema casi síncrono CDMA* (Qs-CDMA¹³).

⁽¹³⁾Qs-CDMA es la sigla de la expresión inglesa *quasi-synchronous code division multiple access*.

Cuando el sincronismo sea excesivamente costoso de garantizar habrá que pensar en una alternativa que pueda obviar este sincronismo y que vamos a describir a continuación.

Un posible conjunto de secuencias utilizado por los sistema Qs-CDMA son las secuencias de Walsh-Hadamard generadas a partir de las filas de la matriz ortogonal de Walsh-Hadamard.

4.2. Asíncrono CDMA (A-CDMA)

Un sistema asíncrono CDMA no requiere ningún tipo de sincronismo entre las secuencias moduladoras de los diferentes usuarios del sistema. El hecho de relajar el requerimiento de sincronismo entre usuarios implicará que se deban utilizar secuencias que no serán completamente ortogonales pero que garantizarán que errores de sincronismo afecten poco al resultado.

Dado que no es necesario un sincronismo entre los usuarios, podría parecer que se trata de una técnica más eficiente. Sin embargo, el precio que se paga por relajar el sincronismo es que las secuencias no serán completamente ortogonales y, por lo tanto, habrá interferencia de acceso múltiple MAI.

Sistema A-CDMA

Entre los códigos utilizados para A-CDMA encontramos los códigos de Gold y los códigos de Kasami que establecen familias de códigos válidos para este tipo de esquemas. Veamos a continuación el comportamiento de estos códigos con un ejemplo. Dos posibles secuencias obtenidas a partir de códigos de Gold serían $c_1 = \{+1, -1, -1, +1, +1, +1, -1\}$ y $c_2 = \{-1, +1, +1, -1, +1, +1, -1\}$. Analicemos la ortogonalidad de dos secuencias $p_1(t)$ y $p_2(t)$ generadas a partir de los códigos anteriores:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_1(t) \cdot p_2(t) dt = T_c \sum_{i=1}^7 c_1(i) \cdot c_2(i) = T_c (-1 - 1 - 1 - 1 + 1 + 1 + 1) = -T_c \quad (6)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_2(t) \cdot p_2(t) dt = T_c \sum_{i=0}^3 c_2(i) \cdot c_2(i) = T_c (1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1) = 7 \cdot T_c \quad (7)$$

Como se ve, la secuencia no es completamente ortogonal, ya que queda un residuo al calcular el producto cruzado de secuencias. A cambio de soportar este valor, que no es cero, veremos que el comportamiento es aceptable cuando las secuencias no están sincronizadas. Analicemos qué sucede si hay un error de sincronismo de T_c segundos (un chip):

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_1(t) \cdot p_2(t - T_c) dt = T_c \sum_{i=1}^7 c_1(i) \cdot c_2((i-1) \text{ módulo } 7) = T_c (-1 + 1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1) = -T_c \quad (8)$$

Vemos que seguimos obteniendo el mismo valor, lo que implica que tenemos el mismo nivel de interferencia MAI y, por lo tanto, mantenemos la capacidad de cancelar los usuarios no deseados.

4.3. Frequency-Hopping CDMA (FH-CDMA)

Otro mecanismo para acceder al medio por división en código, pero completamente diferente al presentado en la figura 7 es el acceso al medio por saltos de frecuencia.

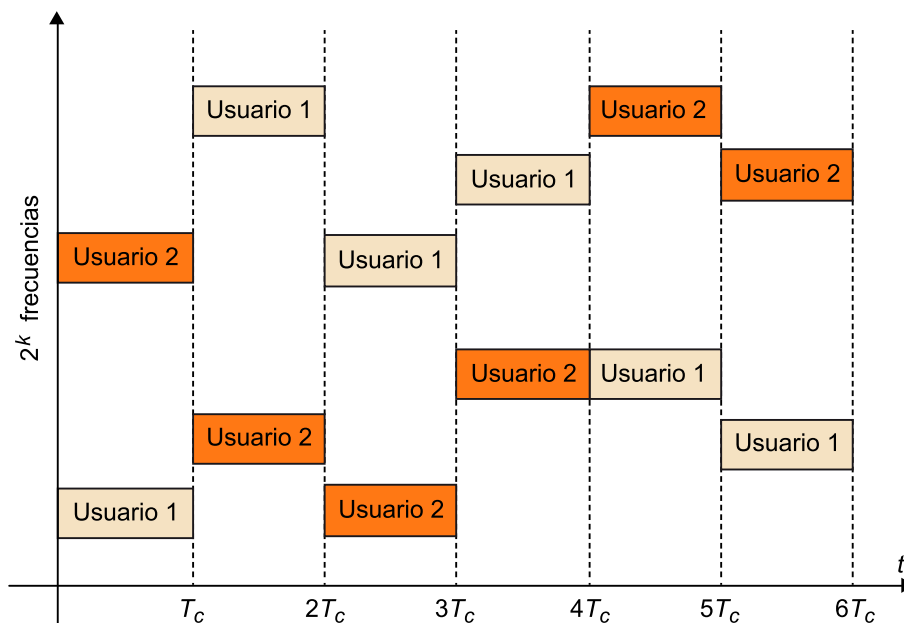
El principio de funcionamiento del sistema de **acceso múltiple por saltos de frecuencia** (FH-CDMA¹⁴) consiste en variar la frecuencia portadora de la señal transmitida según una secuencia preestablecida (código) entre el transmisor y el receptor.

⁽¹⁴⁾FH-CDMA es la sigla de la expresión inglesa *frequency-hopping code division multiple access*.

Tal como se ve en la figura 10, diferentes usuarios siguen patrones de salto diferentes de forma que, si en el receptor se sigue el patrón de saltos de un usuario concreto, vamos a ir siguiendo los datos de este usuario como si se transmitieran de forma continua sin saltos de frecuencia. El resto de usuarios no serán recibidos cuando transmiten a frecuencias diferentes.

Si el número de usuarios es elevado, podrá pasar con una cierta probabilidad que dos (o más) usuarios transmitan simultáneamente a la misma frecuencia. En tal caso, se produciría una interferencia entre los usuarios que "bloquearía" la comunicación durante un breve instante de tiempo. Dado que en los saltos de frecuencia anteriores y posteriores no se producirían interferencias entre estos usuarios, la comunicación a largo plazo estaría garantizada y la colisión sería tratada como una interferencia (MAI) que degradaría ligeramente las prestaciones.

Figura 10. Ejemplo de un sistema de acceso múltiple por saltos de frecuencia FH-CDMA



A continuación, resumimos las principales ventajas e inconvenientes del sistema CDM/A, además de reseñar las pérdidas de eficiencia.

1) En cuanto a las **ventajas**:

- Aunque históricamente no ha sido una tecnología muy utilizada, en la actualidad ya podemos hablar de tecnología madura: hay algunos sistemas

de telefonía móvil y de comunicaciones por satélite que operan con esta técnica.

- Pueden aplicarse a comunicaciones analógicas o digitales.
- Dado que todos los usuarios transmiten simultáneamente y sin pausa, las cadenas de RF (en especial los amplificadores) trabajan de forma continua, lo que permite mejores eficiencias en potencia.
- La técnica A-CDMA, al tratarse de una técnica asíncrona en tiempo, no requiere una sincronización temporal entre usuarios.
- Con la técnica Qs-CDM/A, diseñando adecuadamente los algoritmos de sincronización, conseguimos ortogonalidad entre usuarios y, por lo tanto, es una técnica libre de MAI.
- Permite una elevada flexibilidad en el momento de cambiar los códigos asignados a cada usuario y la cantidad de recursos asignados (a cada usuario se le puede asignar uno, dos o más códigos, así se logra adaptar la velocidad de transmisión en función de las necesidades).
- Permite una elevada flexibilidad al decidir qué usuario descodificar. Basta con que el receptor seleccione el código del usuario que quiere demodular para conmutar entre usuarios.

2) En cuanto a los **inconvenientes**:

- Con la técnica Qs-CDMA se necesita una sincronización de la red para tener sincronizados todos los códigos.
- Con la técnica A-CDMA, el sincronismo de la red no es necesario, pero el precio que se paga es que los códigos no son perfectamente ortogonales y por lo tanto aparece una MAI en forma de interferencia entre usuarios que reduce el número máximo de usuarios que pueden acceder al sistema.
- En las dos técnicas de acceso múltiple A-CDMA y Qs-CDMA (en especial la A-CDMA) se necesita un control de potencia en los transmisores para evitar el efecto cerca-lejos¹⁵, que consiste en que los usuarios más cercanos al receptor se reciben con más potencia y bloquean a los más alejados del receptor, que llegan con un nivel de señal más débil.

⁽¹⁵⁾En inglés, *near-far effect*.

3) En cuanto a las **pérdidas de eficiencia**, en términos de eficiencia espectral (definida en bits/s/Hz), la CDM/A no es en principio ni más ni menos eficiente que la TDM/A o la FDM/A (obviando las pérdidas de eficiencia espectral provocadas por los tiempos de guarda o las bandas de guarda). Si el ancho de banda se incrementa en un factor L , potencialmente podemos transmitir hasta L señales en simultáneo, hecho que compensa el incremento de espectro

utilizado. Sin embargo, como en los casos anteriores de TDM/A y FDM/A, vamos a ver que tenemos una reducción de la eficiencia espectral por diferentes motivos:

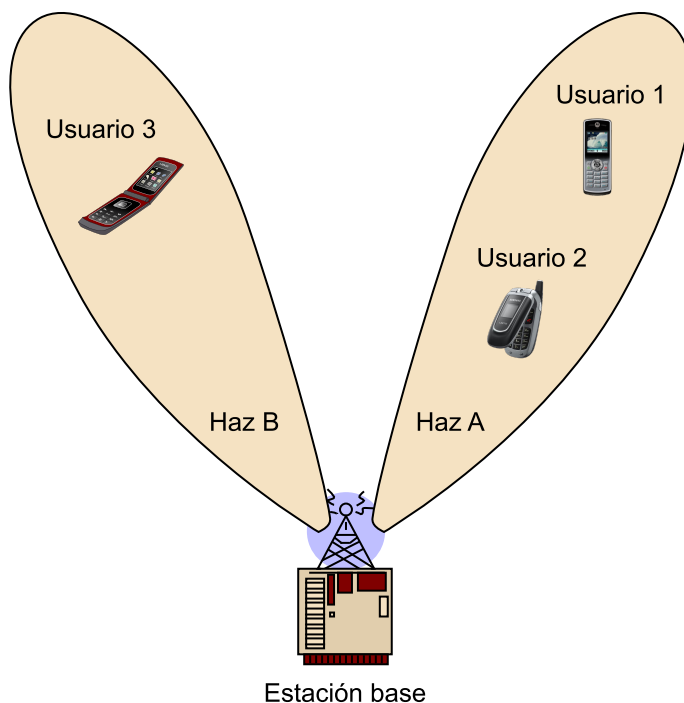
- En el caso del Qs-CDMA, los pilotos y secuencias que se deben enviar por la red para conseguir sincronizar los códigos de todos los usuarios comportan una pérdida de eficiencia espectral (definida en bits/s/Hz) al utilizar un espectro o intervalos de tiempos para enviar datos que no corresponden a información útil.
- En el caso de la A-CDMA, no es necesario un sincronismo de red y, por lo tanto, en apariencia podría parecer una técnica más eficiente. A pesar de esto, como ya se ha indicado, esta técnica, a diferencia de las anteriores (TDMA, FDMA o Qs-CDMA), no garantiza la ortogonalidad entre los usuarios y por lo tanto presenta MAI. Esta interferencia reducirá el número máximo de usuarios que pueden acceder al sistema, hecho que comportará una pérdida en la eficiencia espectral (definida en bits/s/Hz) similar al resto de técnicas: si se incrementa el ancho de banda en un factor L pero el número de usuarios que transmiten es inferior a L , se produce una reducción en la eficiencia espectral al ocupar una banda superior a la estrictamente necesaria.

5. La división en espacio (SDM/A)

Otra posibilidad para compartir el medio es la **multiplexación o acceso múltiple en espacio**, en la que antenas directivas orientadas hacia ciertas regiones del espacio permiten separar a un usuario (o conjunto de usuarios) según su posición geográfica y discriminarlo de otros posibles usuarios.

Para cubrir solo ciertas regiones del espacio se pueden utilizar antenas sectorizadas o antenas multihaz. Las antenas sectorizadas son antenas que solo cubren una parte del espacio y dividen el espacio en sectores (término que utilizaremos para referirnos a cada una de las regiones en las que se divide el espacio). Las antenas multihaz, utilizando agrupaciones de antenas elementales, constituyen los llamados *arrays* de antenas que, ajustados electrónicamente, permiten configurar los diferentes haces que generan el espacio de cobertura. En el caso de este tipo de antenas, utilizaremos el término haz para referirnos a cada una de las regiones en las que se divide el espacio.

Figura 11. Esquema de multiplexado/acceso múltiple SDM/A



La figura 11 representa esquemáticamente la estructura general de un sistema de multiplexación o de acceso múltiple por división en espacio SDM/A. Como se puede ver, la estación receptora puede configurar haces de antena diferentes para usuarios que están en posiciones espaciales diferentes. En la situación que se presenta en la figura, el usuario 1 y el usuario 3 están cubiertos por haces

diferentes y por lo tanto podrían acceder simultáneamente al sistema con las mismas frecuencias, códigos o intervalos de tiempos que usan. Observad, en cambio, que el usuario 1 y el usuario 2 están cubiertos por el mismo haz de antena, por lo que tendrán que compartir el recurso mediante cualquiera de las otras técnicas de multiplexación o acceso múltiple.

Antenas sectoriales en telefonía móvil

El uso de antenas sectoriales se encuentra muy extendido en las estaciones base de telefonía móvil. Típicamente se utilizan antenas sectoriales de 90° , que dividen el espacio en cuatro sectores, o antenas sectoriales de 120° , que dividen el espacio en tres sectores. En la figura 12, se ve un ejemplo de antena sectorial de 120° . Cada uno de los tres sectores se cubre con un *array* de antenas de forma que permite triplicar el número de usuarios cubiertos con la estación base. Como ya se ha indicado, los usuarios cubiertos por cada uno de los sectores sigue un esquema MF-TDM/A. Para minimizar el efecto de las interferencias entre sectores, los sectores adyacentes utilizan bandas de frecuencia diferentes, de forma que dos usuarios cercanos cubiertos por sectores diferentes están separados por espacio y frecuencia. Una frecuencia utilizada en un sector se vuelve a utilizar en otro sector suficientemente alejado para que la MAI sea suficientemente pequeña. La distancia de reuso, el patrón de reuso y el factor de reuso (número de frecuencias diferentes utilizadas en el sistema) dependerán de diferentes parámetros como son el radio de cobertura de la estación base o el número de usuarios.

Cobertura multihaz en comunicaciones por satélite

Un ejemplo de cobertura con múltiples haces lo encontramos en los sistemas de comunicaciones por satélite en los que, desde un satélite, se da cobertura a una gran área geográfica y empleando una antena con diferentes haces se puede incrementar el número total de usuarios a los que se da cobertura de manera simultánea.

A continuación, resumimos las principales ventajas e inconvenientes del sistema SDM/A, además de reseñar las pérdidas de eficiencia.

1) En cuanto a las **ventajas**:

- Mecanismo fácil de implementar con antenas sectorizadas o antenas con múltiples haces.
- Permite incrementar de forma lineal el número de usuarios del sistema en función del número de sectores o haces implementados.

2) En cuanto a los **inconvenientes**:

- Este mecanismo de multiplexado o de acceso múltiple permite separar usuarios ubicados en diferentes posiciones geográficas (cubiertos por diferentes haces o antenas) pero requiere otro formato de multiplexado o de acceso múltiple para separar a los usuarios geográficamente cercanos (cubiertos por el mismo haz o antena).
- Este mecanismo no está libre de MAI. Dos usuarios geográficamente cercanos pero cubiertos por haces diferentes pueden interferirse si no trabajan a frecuencias diferentes. Hay que diseñar un plan de reutilización de

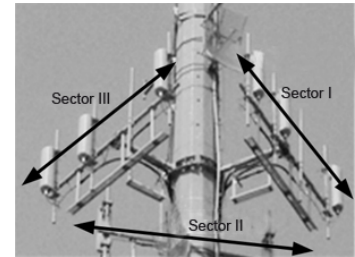


Figura 12. Antena sectorial utilizada en telefonía móvil; ejemplo SDM/A de tres sectores

⁽¹⁶⁾En inglés *interbeam interference*.

frecuencias que minimice el efecto de la MAI entre haces (interferencia entre haces¹⁶).

- Hay que replicar parte de la cadena de RF.

3) En cuanto a las **pérdidas de eficiencia**:

- Como no es una técnica libre de MAI, en muchos casos es necesario utilizar bandas diferentes entre haces adyacentes, hecho que reduce la eficiencia del sistema completo (definida en bits/s/Hz, considerando Hz el ancho de banda asignado al sistema completo) puesto que en una determinada área geográfica no se puede utilizar todo el espectro disponible por el sistema sino solo una parte del mismo.

6. La división en polarización (PDM/A)

Una característica de las ondas electromagnéticas es la polarización que, como veremos a continuación, se puede explotar para duplicar la capacidad de un canal de comunicaciones.

La polarización se define como la dirección del vector campo eléctrico respecto a la superficie de la Tierra. La polarización dependerá básicamente de la orientación de la antena transmisora y se podrá clasificar en polarización lineal (horizontal o vertical) o polarización circular (a la derecha o a la izquierda) dependiendo del tipo de antena.

En el caso de la polarización lineal, se habla de polarización horizontal cuando el campo eléctrico es perpendicular a la superficie de la Tierra y de polarización vertical cuando este campo es paralelo a la misma. En el caso de la polarización circular, hablaremos de polarización circular a la derecha o a la izquierda dependiendo de en qué dirección gire el vector de campo eléctrico respecto a la dirección de propagación. La polarización de la antena transmisora se define según la polarización de la onda que transmite y la antena receptora debe estar alineada con la polarización de la señal que recibe para que la transferencia de potencia al circuito receptor sea máxima. Por el contrario, si la antena receptora se encuentra en posición ortogonal respecto a la polarización de la señal que recibe, la transferencia de potencia sería nula. Precisamente en este principio se basará el mecanismo de multiplexado (o de acceso múltiple) en polarización PDM/A¹⁷. Utilizando dos antenas transmisoras orientadas de forma ortogonal una respecto a la otra podremos enviar simultáneamente, y a la misma frecuencia, dos señales independientes que podrán ser recibidas de forma separada en la recepción orientando adecuadamente la antena receptora. De este modo, o bien podremos multiplexar dos señales en transmisión, o bien podremos permitir que dos usuarios (que pueden estar en ubicaciones diferentes) accedan simultáneamente al medio.

⁽¹⁷⁾PDM/A es la sigla de la expresión inglesa *polarization division multiplex/multiple access*.

A pesar de que las dos polarizaciones son teóricamente ortogonales, y por lo tanto la técnica PDM/A tendría que estar libre de MAI, dos fenómenos provocan interferencias cruzadas entre las señales de las dos polarizaciones, que denominaremos interferencia de polarización cruzada¹⁸. Por un lado, las antenas no son ideales y en la práctica no tienen la capacidad de bloquear la polarización ortogonal. Esto provoca que siempre se reciba parte de la potencia de la señal que se envía a la polarización ortogonal en la que se quiere recibir. Por el otro lado, al propagarse la señal desde el transmisor hasta el receptor se puede alterar la polarización de la señal, de forma que se transfiera una pequeña frac-

⁽¹⁸⁾En inglés *cross-polarization*.

ción de la potencia de una señal a la polarización ortogonal. Este fenómeno, típico de las comunicaciones por satélite que operan a elevadas frecuencias, recibe el nombre de depolarización.

PDMA aplicado a radiodifusión de señal de televisión terrestre

La figura 13 muestra dos antenas de recepción de televisión orientadas con polarizaciones ortogonales. Esta imagen, que se puede ver en algunos lugares de la geografía, es un ejemplo cotidiano de acceso múltiple por división en polarización. Dos repetidores de televisión geográficamente cercanos, que en potencia se podrían interferir de forma mutua, transmiten en polarizaciones ortogonales con objeto de poder acceder en simultáneo al medio con el mismo canal (o canales cercanos) de televisión. En recepción, dependiendo de por qué repetidor queremos recibir la señal de televisión, orientaremos la antena en polarización horizontal o vertical. En el caso de la figura, tenemos dos antenas que reciben señal de los dos repetidores (supuestamente porque en esta ubicación geográfica un conjunto de canales de televisión se reciben en mejores condiciones de un repetidor y otro conjunto de canales se recibe mejor desde otro repetidor).

PDM aplicado a radiodifusión de señal de televisión por satélite

Otro ejemplo cotidiano de multiplexado en polarización lo encontramos en la señal de televisión por satélite. Con objeto de poder duplicar la capacidad del satélite, y por lo tanto poder recibir casi el doble de canales con los mismos recursos (un solo satélite y sin duplicar el ancho de banda asignado), se transmiten servicios de televisión en las dos polarizaciones (circular a la derecha y circular a la izquierda) y el usuario desde el propio demodulador de satélite podrá seleccionar qué polarización quiere descodificar (el propio demodulador configurará la antena para recibir la polarización deseada).



Figura 13. Antenas con polarización horizontal y vertical; ejemplo PDMA lineal

A continuación, resumimos las principales ventajas e inconvenientes del sistema PDM/A, además de reseñar las pérdidas de eficiencia.

1) En cuanto a las **ventajas**:

- Permite duplicar el flujo de información que se puede transmitir sin incrementar el ancho de banda necesario.

2) En cuanto a los **inconvenientes**:

- Solo existen dos polarizaciones ortogonales y por lo tanto solo se puede duplicar el flujo de información. No resulta útil como técnica de acceso múltiple con más de dos usuarios (habitualmente siempre habrá más de dos usuarios) ni para multiplexar más de dos secuencias de datos.
- Siempre existe un término de polarización cruzada que provocará una interferencia entre polarizaciones, hecho que obligará a reducir ligeramente la velocidad de transmisión y por lo tanto en la práctica no se podrá duplicar el flujo de información.

3) En cuanto a las **pérdidas de eficiencia**:

- El hecho de poder duplicar la velocidad de transmisión sin hacer uso de más ancho de banda permite duplicar la eficiencia espectral (definida en bits/s/Hz). En la práctica, el efecto de polarización cruzada provocará un incremento en el nivel de interferencias que obligará a reducir la velocidad

de transmisión para mantener la calidad de la comunicación. En consecuencia, el incremento en la eficiencia espectral será inferior a un factor de dos, a pesar de que se producirá un incremento en la eficiencia respecto al caso de no hacer uso de la doble polarización. El precio que se paga es el de tener que duplicar las cadenas de RF si se quiere transmitir/recibir simultáneamente con doble polarización.

7. La división en frecuencias ortogonales (OFDM/A)

Como ya se ha comentado al presentar la técnica de FDM/A, el mecanismo de OFDM/A se puede ver como una variante de la división en frecuencia. A pesar de ello, dado que tanto tecnológicamente como en la aplicación la implementación de las dos técnicas es diferente por completo, merece un tratamiento especial dentro de las técnicas de multiplexado y acceso múltiple. En este módulo, solo vamos a mencionar la técnica puesto que, debido a su importancia y complejidad, se le dedicará un módulo didáctico completo en una futura asignatura dedicada a las modulaciones avanzadas. El único objetivo es presentar el concepto y los acrónimos con objeto de completar la lista de técnicas de acceso múltiple y poder presentar desde las más clásicas hasta las más modernas.

Según el concepto de multiplexado introducido al principio de este módulo, la multiplexación OFDM¹⁹ no es, estrictamente hablando, una técnica de multiplexado. Decíamos que una técnica de multiplexado combina diferentes mensajes o secuencias de datos en una única señal con el fin de compartir un recurso único. Por el contrario, el OFDM no está pensado para combinar (multiplexar) diferentes mensajes, sino que se presenta como alternativa a las modulaciones clásicas vistas en otros módulos de este curso. Por este motivo, abusando del lenguaje, se habla a menudo de modulación OFDM en lugar de multiplexado OFDM puesto que, conceptualmente el OFDM está más cerca de la idea de modulación que de la idea de multiplexado. La figura 14 pretende ilustrar las diferencias entre FDM y OFDM y a la vez esquematizar el OFDM.

Tal como se ve en la figura, en FDM se divide la frecuencia en diferentes bandas (tres bandas) y en cada banda se envía una información diferente. Por el contrario, el OFDM actúa sobre un conjunto de símbolos (o bits) que, en lugar de enviarse de forma secuencial como se haría en una modulación clásica, los símbolos que se envían se agrupan en bloques de N símbolos que se transmiten simultáneamente a diferentes frecuencias llamadas subportadoras. A pesar de que en términos de velocidad de transmisión y ancho de banda no hay diferencias respecto a una modulación clásica, organizar el envío de los símbolos con un multiplexado OFDM presenta mejoras, en especial cuando hay un canal de propagación que introduce multicamino (ecos y reflexiones en la propagación). Este motivo, junto con el hecho de que tecnológicamente es sencillo de implementar, hace que el OFDM sea ampliamente utilizado en los sistemas más modernos. Por ejemplo, está estandarizado en el estándar DVB-T de difusión de señal de televisión digital, utilizado en el envío de la señal de TDT.

⁽¹⁹⁾OFDM es la sigla de la expresión inglesa *orthogonal frequency division multiplexing*.

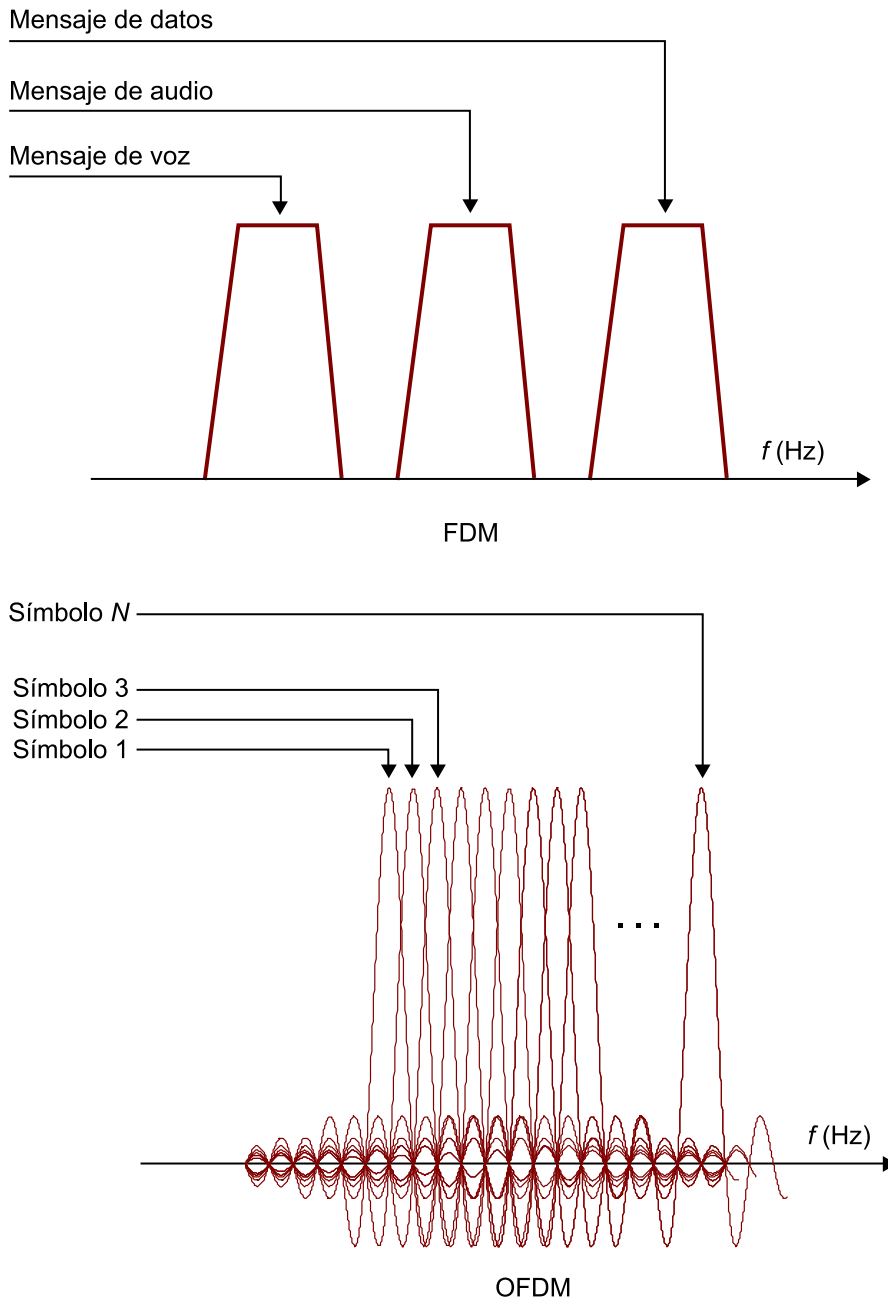
Ved también

Estas modulaciones clásicas se han tratado en el módulo "Comunicaciones digitales pasa banda" de este curso.

El número N

Típicamente N es un número grande y potencia de 2; algunos valores por N utilizados en algunos estándares son $N = 64$, $N = 2.048$, $N = 8.192$.

Figura 14. Comparativa de FDM frente a OFDM



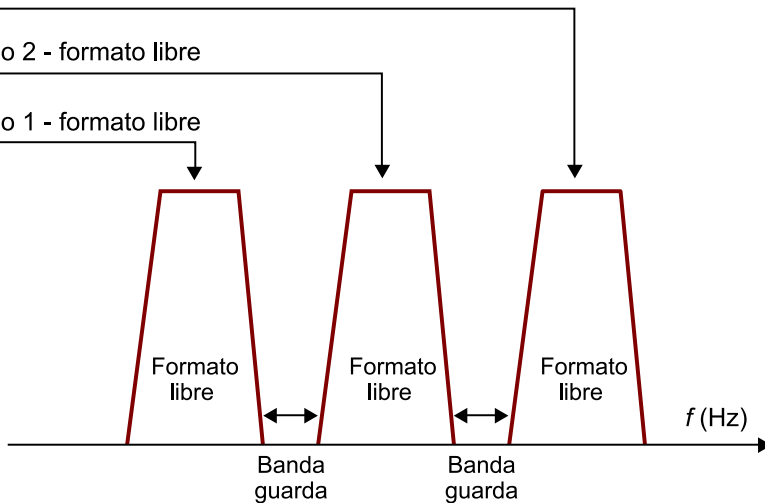
Respecto al mecanismo asociado de acceso múltiple OFDMA, sí podemos decir que en este caso se trata de una técnica de acceso múltiple en el sentido de que varios usuarios ubicados en posiciones geográficas diferentes acceden en simultáneo al canal compartiendo el medio. Tal como se ilustra en la figura 15, que compara FDMA y OFDMA, la técnica OFDMA es más restrictiva en cuanto al formato de datos que cada usuario debe utilizar. En el FDMA, el espectro se divide en bandas y cada usuario utiliza una de las bandas y es libre de utilizar el formato de señal que quiera mientras transmita dentro de la banda y no interfiera a los usuarios adyacentes. En el OFDMA, lo que se hace es dividir el espectro en un número elevado de subportadoras y a cada usuario se le asigna un subconjunto de las mismas y, por lo tanto, está obligado a utilizar OFDM para enviar los símbolos de información.

Figura 15. Comparativa de FDMA frente a OFDMA

Usuario 3 - formato libre

Usuario 2 - formato libre

Usuario 1 - formato libre

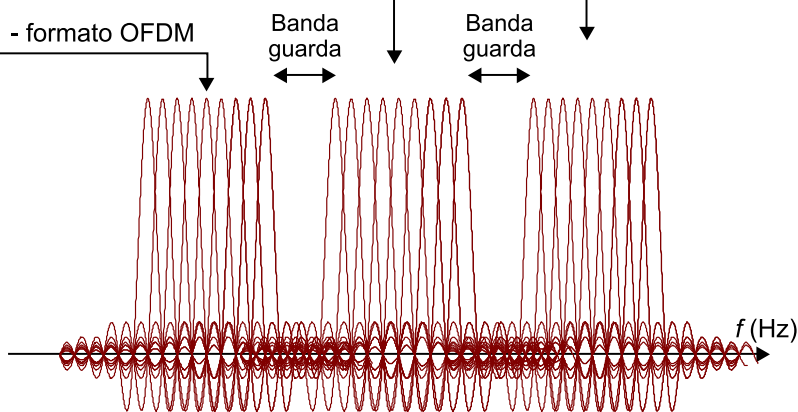


FDMA

Usuario 3 - formato OFDM

Usuario 2 - formato OFDM

Usuario 1 - formato OFDM



OFDMA

Observad que el OFDMA se podría entender como una gran señal OFDM donde la secuencia de símbolos no está físicamente en un terminal, sino que se encuentra distribuida entre diferentes terminales geográficamente separados. Por este motivo, el sincronismo de frecuencia entre usuarios tiene que ser muy preciso para que la interferencia entre usuarios (MAI) sea mínima. Esta es la razón principal que limita el uso de OFDMA como técnica de acceso múltiple cuando no se puede garantizar un buen sincronismo entre usuarios. Pocos inconvenientes más se le pueden encontrar esta técnica, que si consigue un sincronismo casi perfecto entre usuarios puede ser más eficiente que la FDMA, ya que las bandas de guarda pueden ser menores. La técnica de acceso múltiple OFDMA está estandarizada en el estándar IEEE 802.16 para redes inalámbricas de área metropolitana, utilizado en WiMAX.

A continuación, resumimos las principales ventajas e inconvenientes del sistema OFDM/A, además de reseñar las pérdidas de eficiencia.

1) En cuanto a las **ventajas**:

- La tecnología OFDM es bastante madura: los actuales sistemas de televisión digital terrestre y algunos modelos de Wi-Fi operan con esta técnica.
- Cuando el canal de comunicaciones introduce multicamino (ecos y reflexiones en la propagación), el uso de OFDM/A ahorra la necesidad de introducir un ecualizador en recepción que corrija la distorsión provocada por el canal (necesario en otras técnicas como TDMA, FDMA o CDMA).
- El OFDMA permite una elevada flexibilidad a la vez de asignar más o menos subportadoras a cada usuario y en consecuencia a variar la cantidad de recursos asignados, lo que logra adaptar la velocidad de transmisión en función de las necesidades. Mucho más flexible que FDMA.

2) En cuanto a los **inconvenientes**:

- El OFDM/A es una tecnología poco madura.
- En el OFDMA se necesita un sincronismo en frecuencia para conseguir que los diferentes usuarios inserten la información sin interferir en el resto de usuarios. Un error de sincronismo puede ser más crítico que en el FDMA y más difícil de minimizar con bandas de guarda.

3) En cuanto a las **pérdidas de eficiencia**:

- Si los problemas de sincronismo entre usuarios están resueltos, el OFDMA presenta mejor eficiencia espectral cuando se compara con el FDMA, ya que se hace un uso más eficiente del espectro y se pueden reducir las bandas de guarda.

8. Mecanismos de acceso al medio por contienda: ALOHA (y variantes)

Todos los mecanismos ya presentados están libres de colisión y, por lo tanto, aseguran que todas las transmisiones que se establecen están garantizadas. Por el contrario, en los mecanismos de acceso al medio basados en contienda, dado que el acceso al medio es aleatorio, no se garantiza por adelantado el éxito de la transmisión. Los usuarios deciden acceder al medio de forma unilateral y sin la existencia de un centro que gestione y controle las comunicaciones, por lo que se podrán producir colisiones entre usuarios que accedan de manera simultánea al medio. A pesar de que a priori puedan parecer ineficientes, estas técnicas de acceso al canal resultan interesantes por el hecho de que ahorran la existencia de un centro de gestor y del control sobre los usuarios. A pesar de esto, y como vamos a ver a continuación, solo se podrán implementar cuando el volumen de tráfico sea reducido. En caso contrario, el sistema se vería bloqueado por el exceso de colisiones.

El mecanismo de ALOHA fue uno de los primeros protocolos de acceso al medio por contienda y se aplicó a un sistema de transmisión de paquetes utilizando un satélite como repetidor. La red, implementada a principios de la década de 1970, tenía por objetivo conectar diferentes ordenadores de los diferentes campus de la Universidad de Hawái ubicados en diferentes islas del Pacífico.

El más sencillo de los protocolos ALOHA, llamado Pure ALOHA, fue el primero que se implementó y su funcionamiento es muy simple. Si un equipo tiene un paquete de datos para transmitir accede al canal y lo transmite sin ninguna demora. El equipo que ha enviado el mensaje se pone en modo escucha para detectar si el paquete se ha enviado correctamente o si ha sufrido una colisión con el paquete de otro usuario que ha accedido al canal al mismo tiempo. En el caso de que se haya producido una colisión, el usuario esperará un tiempo aleatorio y volverá a enviar el paquete (dado que los tiempos de espera para retransmitir el paquete serán diferentes para cada usuario, la probabilidad de que se vuelva a producir una colisión será baja). En la implementación original del protocolo ALOHA, al utilizar un satélite como repetidor, el mecanismo para detectar si se habían producido colisiones era muy simple: el propio transmisor esperaba a escuchar del satélite el mensaje enviado y, en caso de no escucharlo, entendía que se había producido una colisión. En otros sistemas donde no hay un repetidor es necesario el envío de un mensaje ACK²⁰ de confirmación por parte del receptor para informar de que el mensaje se ha recibido correctamente. En el caso de que no se reciba este mensaje, el transmisor entenderá que ha habido una colisión y reenviará el mensaje.

⁽²⁰⁾ACK es el acrónimo de la expresión inglesa *acknowledgement*.

Para evaluar las prestaciones del protocolo ALOHA denotaremos con λ el flujo de paquetes que se quieren enviar por segundo paquetes/s (este término incluye las retransmisiones debidas en colisiones previas) y denotaremos con T la duración de un paquete en segundos. A partir de estos dos términos podemos definir como $G = \lambda \cdot T$ el tráfico ofrecido en la red en paquetes por tiempos de paquete. Asumiendo que la estadística de llegada de paquetes (probabilidad de que en un cierto tiempo se quieran enviar un número determinado de mensajes) sigue un proceso de Poisson, la probabilidad de que un paquete se pueda enviar con éxito (sin colisión) se obtendrá calculando la probabilidad de que en un cierto tiempo $2T$ no llegue ningún otro paquete (solo se envía el paquete de interés). El factor de 2 se debe a que hay que considerar posibles solapamientos parciales entre paquetes que también darán lugar a error. Esta probabilidad viene dada por la expresión:

$$P_{No\ colisión} = e^{-2T\lambda} = e^{-2G} \quad (9)$$

A partir de la expresión anterior se puede calcular el número de paquetes por segundo que se podrán cursar con éxito λ' y el tráfico real que se podrá cursar por la red S :

$$\begin{aligned} \lambda' &= \lambda \cdot e^{-2G} \\ S &= G \cdot e^{-2G} \end{aligned} \quad (10)$$

Una evolución del protocolo Pure ALOHA es el protocolo Slotted ALOHA (o ALOHA ranurado). Esta variante del protocolo consigue doblar el número de paquetes que se pueden enviar con éxito introduciendo una mínima coordinación entre usuarios. Requiere un sincronismo de red que ranura el tiempo en intervalos de duración el tiempo de paquete y obliga a que, cuando un usuario quiere transmitir, en lugar de hacerlo en cualquier momento deba esperar el principio de una ranura para iniciar la transmisión. En este caso, la principal ventaja es que, dado que existe un mínimo sincronismo entre usuarios, solo se producirá una colisión si dos usuarios inician la transmisión a la vez. Así pues, la probabilidad de no colisión vendrá dada por la probabilidad de que en un cierto tiempo T no llegue ninguno otro paquete (observad que ha desaparecido el factor 2 que aparece en el Pure ALOHA):

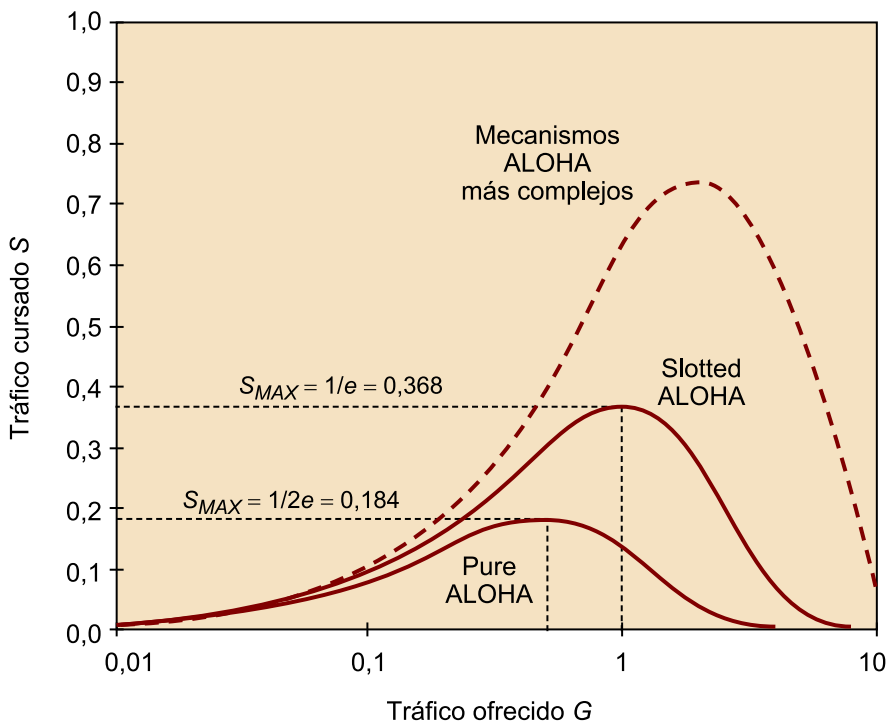
$$P_{No\ colisión} = e^{-T\lambda} = e^{-G} \quad (11)$$

A partir de la expresión anterior se puede calcular el número de paquetes por segundo que se podrán cursar con éxito λ' y el tráfico real que se podrá cursar por la red S :

$$\begin{aligned} \lambda' &= \lambda \cdot e^{-G} \\ S &= G \cdot e^{-G} \end{aligned}$$

La figura 16 ilustra la relación entre el tráfico ofrecido en la red G y el tráfico cursado (con éxito) por la red S para los dos protocolos ALOHA. Tal como se puede observar, hay un máximo en el tráfico que se puede cursar y que es del doble por el protocolo Slotted ALOHA. El máximo en el caso del Pure ALOHA se produce por $G = 0,5$ y es igual a $S = 1/2e = 0,184$, mientras que el máximo por Slotted ALOHA se da por $G = 1$ y permite un tráfico de red de $S = 1/e = 0,368$. Observad que estos mecanismos solo pueden aplicarse cuando el tráfico ofrecido en la red es reducido. Para valores de tráfico por encima del umbral, el protocolo se colapsa rápidamente, puesto que el número de colisiones crece de forma rápida. Observad que el tráfico de la red es un parámetro que depende tanto del número de paquetes que se quieren transmitir como de la duración de los mismos. Así pues, si el número de mensajes que se quieren enviar es elevado será necesario que los mensajes sean de corta duración o, por el contrario, si los mensajes son largos solo se podrá aplicar estos mecanismos cuando el número de paquetes por segundo sea reducido.

Figura 16. Tráfico ofrecido y tráfico cursado en mecanismos basados en ALOHA



Desde los orígenes se han estudiado y se han desarrollado otras variantes del protocolo con el fin de mejorar las prestaciones y permitir mayores tráficos de red. Básicamente, todas las técnicas buscan poder transmitir de forma simultánea más de un mensaje, hecho que reduce el número de colisiones. Algunas técnicas pasan por combinar ALOHA con técnicas de espectro ensanchado (por ejemplo, Spread ALOHA) o por introducir complejos mecanismos de cancelación de interferencias en el receptor para poder descodificar más de un mensaje simultáneamente cuando se ha producido un número reducido de colisiones (por ejemplo, esquemas SIC²¹ o PIC²²).

⁽²¹⁾SIC es la sigla de la expresión inglesa *successive interference cancellation*.

⁽²²⁾PIC es la sigla de la expresión inglesa *parallel interference cancellation*.

9. Mecanismos de acceso al medio por contienda: CSMA (y variantes)

Como ya hemos visto, los protocolos basados en ALOHA solo pueden lograr reducidas tasas de transmisión y solo se pueden implementar en situaciones en las que el tráfico de entrada es reducido: pocos mensajes por segundo o longitudes de paquete cortas. Si se quiere incrementar la tasa de transmisión (por ejemplo, con Slotted ALOHA) se necesita una sincronización de la red, lo que va en contra de la filosofía de estas técnicas de acceso al medio. Como alternativa aparecen los mecanismos de acceso al medio basados en sensado de canal, que analizan el estado del canal antes de transmitir. Entre los protocolos más populares se encuentra el protocolo CSMA²³ y sus variantes, muy extendidas en las redes de área local.

⁽²³⁾CSMA es la sigla de la expresión inglesa *carrier sense multiple access*.

En una red donde todos los usuarios tienen capacidad para escuchar, y donde el retraso de propagación es reducido, la probabilidad de colisión en las transmisiones se puede reducir de forma sustancial si se pide a cada usuario que escuche el canal antes de transmitir para detectar la presencia de otros usuarios que están transmitiendo. Si la red está libre iniciará la transmisión, mientras que si la red está ocupada esperará a iniciar la transmisión más tarde. De este modo, solo se producirá una colisión si dos usuarios detectan el canal libre y se ponen a transmitir a la vez. Dependiendo de la forma de proceder por el transmisor, se definirán los protocolos CSMA no persistente, CSMA 1-persistente o CSMA p -persistente.

En el primer caso, si la red está libre se transmitirá y, si está ocupada, el transmisor esperará un cierto tiempo aleatorio pasado el cual volverá a iniciar el procedimiento escuchando de nuevo el canal. El problema de este mecanismo es que la red puede quedar libre antes del tiempo de espera y por lo tanto se incrementa innecesariamente la latencia en la comunicación. Como alternativa, en el caso del protocolo CSMA 1-persistente, si el canal está libre se transmitirá y, si está ocupado, el transmisor esperará a que esté libre (escuchando continuamente o a intervalos de tiempo muy pequeños) e iniciará la transmisión con probabilidad 1 una vez esté libre.

El principal problema de este mecanismo es que se producirán colisiones si, mientras el canal está ocupado, más de un usuario quiere transmitir y está en espera. Para evitar estas colisiones, el protocolo CSMA p -persistente transmite, con probabilidad $p < 1$ cuando el canal está libre y esperará a hacerlo más tarde con probabilidad $1 - p$ (cuando el canal esté ocupado esperará a que esté libre y procederá según se ha descrito cuando el canal está libre). De este modo, se reducirá la probabilidad de que dos usuarios inicien la transmisión a la vez, lo que reducirá la probabilidad de colisión.

Si el transmisor, además de tener la capacidad de escuchar el canal antes de transmitir, también tiene las capacidades de detectar colisiones (escuchando el canal mientras transmite) y de abortar la transmisión en el caso de detectar una colisión, se puede hacer un uso más eficiente del canal y de los recursos de energía. El hecho de parar la transmisión cuando lo que se envía no podrá ser decodificado por el receptor dejará antes el canal libre y permitirá incrementar el flujo de datos útiles para el canal. Este protocolo se denomina CSMA/CD²⁴ y se utiliza de forma estándar en el protocolo Ethernet (IEEE 802.3).

⁽²⁴⁾CSMA/CD es la sigla de la expresión inglesa *carrier sense multiple access/collision detection*.

Cuando por la naturaleza del transmisor no es posible transmitir y escuchar a la vez, el mecanismo CSMA/CD no se puede implementar. Tampoco se puede implementar en redes con nodos ocultos, en las que no podemos asegurar que todos los usuarios escuchan a todos los usuarios, pues podría pasar que un usuario crea que la red está libre cuando de hecho no lo está. Estos problemas los encontramos, por ejemplo, en comunicaciones inalámbricas, donde los terminales no tienen capacidad *full-duplex* (transmitir y recibir a la vez) y donde podemos encontrar dos terminales pertenecientes a la misma red que no pueden verse entre ellos si no existe cobertura directa entre ambos. Como alternativa al mecanismo CSMA/CD, aparece el mecanismo CSMA/CA²⁵.

⁽²⁵⁾CSMA/CA es la sigla de la expresión inglesa *carrier sense multiple access/collision avoidance*.

Entre las soluciones de este mecanismo encontramos, en primer lugar, la introducción de políticas de espera (de un tiempo aleatorio llamado periodo de *backoff*) antes de transmitir con objeto de reducir la probabilidad de colisiones. Además, para resolver el problema de nodos ocultos también introducen mecanismos de envío de dos paquetes cortos uno de solicitud (RTS²⁶) y el otro de aceptación (CTS²⁷) entre transmisor y receptor antes de iniciar el envío de datos con el fin de informar al máximo número de usuarios de que el canal está ocupado. Estos mecanismos los encontramos, por ejemplo, en el estándar IEEE 802.11 empleado en las redes Wi-Fi.

⁽²⁶⁾RTS es la sigla de la expresión inglesa *request to send*.

⁽²⁷⁾CTS es la sigla de la expresión inglesa *clear to send*.

Resumen

En este módulo, hemos estado viendo diferentes mecanismos de multiplexado/acceso para compartir los recursos de un canal de comunicaciones. Como ya se habló en la sección de concepto básicos, no existe un mecanismo que sea mejor o preferible ante el resto y en cada caso habrá que encontrar la solución más adecuada. Al determinar cuál es la mejor técnica hay una serie de figuras de mérito para valorar que podrán apoyar la decisión. A continuación listamos, y resumimos brevemente, algunos de los parámetros que debemos tener en cuenta a la hora de tomar una decisión sobre la técnica de multiplexación/acceso múltiple más adecuada.

1) **Ortogonalidad/MAI.** Como ya se describió al principio del módulo, el objetivo de cualquier técnica de multiplexación o de acceso múltiple es conseguir la ortogonalidad entre las señales que se envían simultáneamente al canal con objeto de minimizar la interferencia de acceso múltiple entre usuarios. Como se ha ido viendo, algunas de las técnicas son completamente ortogonales o casi ortogonales (TDM/A, FDM/A, Qs-CDM/A), otras presentan un cierto grado de interferencia que degradará las prestaciones u obligará a reducir el número total de usuarios (A-CDMA, SDM/A o PDM/A) y otras presentarán colisiones entre usuarios que obligarán a retransmitir repetidamente los mensajes hasta que se sean recibidos con éxito (técnicas basadas en contienda).

2) **Throughput/eficiencia espectral.** La forma de medir objetivamente el uso eficiente que se hace de los recursos de comunicaciones será a través de la máxima velocidad de transmisión útil (bits de información) que se puede lograr. Dado que en algunos casos la comparativa entre técnicas no se hará a igual ancho de banda, la comparativa en términos de velocidad de transmisión no sería justa. En este caso, será más justo normalizar el flujo de información por el ancho de banda utilizado y calcular la eficiencia espectral definida en bits/s/Hz.

3) **Latencia.** En ocasiones la latencia, o retraso en la comunicación, será una especificación del servicio que se quiere ofrecer y, por lo tanto, podrá ser determinante a la hora de decidir el mecanismo más adecuado. Por ejemplo, si se quiere ofrecer un servicio de envío de mensajes, la latencia no será crítica, mientras que si se quiere ofrecer un servicio de videoconferencia, el retardo en la comunicación será determinante a la hora de fijar la calidad del servicio. Una comparación de *throughput* frente a latencia se utiliza a menudo para comparar diferentes técnicas de acceso al medio.

4) **Equidad entre usuarios.** Cuando haya varios usuarios que quieren acceder al sistema habrá que tener en cuenta la equidad entre los usuarios y las prestaciones en términos de *throughput* y latencia o ambos. Habrá que velar por

garantizar unas prestaciones similares y justas a todos los usuarios. El concepto justo puede depender del servicio, de la homogeneidad de la red y de las características de las demandas de los usuarios. Por ejemplo, cuando haya usuarios con una demanda de recursos muy superior al resto, o con unos requisitos de latencia mucho menores, habrá que regular que estos usuarios no capten todos los recursos y bloqueen al resto.

5) Ciclo de trabajo. Como ya se ha indicado al presentar la técnica TDM/A, hay que tener en cuenta el ciclo de trabajo de los transmisores. En algunos casos, el transmisor accederá al medio de forma continua en tiempo mientras que en otros casos lo hará solo en determinados instantes de tiempo. El ciclo de trabajo estará directamente relacionado con la potencia media y la potencia instantánea del transmisor, que será importante en casos donde el recurso energético sea crítico (por ejemplo en terminales móviles con baterías).

A lo largo del módulo se han clasificado los mecanismos de multiplexado/acceso múltiple en tres grandes grupos: mecanismos con asignación fija de recursos (FAMA), mecanismos con asignación dinámica de recursos (DAMA) y mecanismos basados en contienda. Como se ha ido tratando en algunos puntos, las prestaciones o conveniencia de los diferentes mecanismos depende del tipo de tráfico y del número de usuarios. En general, algunos mecanismos resultan más adecuados que otros para ciertos tipos de tráfico.

Los mecanismos de contienda ofrecen buenos resultados cuando se deben enviar mensajes cortos de forma esporádica y que no tienen exigencias de retardo en la comunicación. Cuando los usuarios lo que quieren es enviar mensajes largos, hemos visto que, debido al incremento del tráfico, los mecanismos de contienda no son los más apropiados. En este segundo caso, resultará más interesante recurrir a mecanismos DAMA, que están libres de colisión. En los mecanismos DAMA hay dos temas que debemos resolver. El primero es cómo establecer el canal de reserva, utilizado por los usuarios para solicitar acceso al medio y para asignar los recursos a los usuarios. El segundo es determinar qué políticas tendrá que seguir el centro de control a la hora de asignar los recursos para garantizar la equidad entre los usuarios. Del segundo tema, que se resuelve intermediando complejos algoritmos de optimización, no nos hemos ocupado en este módulo didáctico, mientras que del primer tema solo diremos que el canal de reserva, como ya se puede intuir, se tendrá que organizar según algún mecanismo de acceso múltiple que permita a los usuarios acceder al mismo para pedir recursos cuando tengan necesidad de transmitir. El acceso al canal de reserva se puede resolver mediante mecanismos de acceso por contienda o mecanismos de asignación fija.

Cuando el número de usuarios es reducido, se puede diseñar un mecanismo TDMA, por ejemplo, con asignación fija de recursos en el que cada usuario disponga de forma periódica de un breve intervalo de tiempo para enviar unos pocos bits pidiendo acceso a la red (en mecanismos sencillos un solo bit puesto a 0 o a 1 bastaría para señalar si hay paquetes pendientes de enviar; en

un mecanismo algo más complejo se pondría algún bit más con información del volumen de datos que se quiere enviar para poder solicitar más o menos recursos). Cuando el número de usuarios es elevado resultaría ineficiente tener prefijado para cada usuario un intervalo de tiempo para pedir acceso a la red. Como alternativa, en estos casos, será preferible disponer de un mecanismo de contienda para resolver este tema.

A continuación tenéis, a modo de resumen final para este módulo, una clasificación de los diferentes mecanismos presentados en función de las características del servicio:

1) Caso 1: volumen de tráfico fijo. Mecanismos de asignación fija FAMA (por ejemplo TDMA, FDMA, MF-TDMA o CDMA).

2) Caso 2: tráfico a ráfagas. Técnicas de contienda o DAMA dependiendo de la duración de los paquetes que se han de enviar. El compromiso entre la latencia propia de los mecanismos DAMA (la necesidad de establecer protocolos adicionales para solicitar/asignar recursos incrementa el retraso en la comunicación) y la reducción del *throughput* de los mecanismos de contienda debido a las colisiones (las colisiones obligan a retransmitir paquetes con la consecuente pérdida de eficiencia espectral y reducción de velocidad efectiva de transmisión) condicionarán la decisión del mecanismo más adecuado.

a) Con paquetes cortos y pocos usuarios (tráfico reducido):

- mecanismos de contienda;
- mecanismos basados en ALOHA o CSMA permiten optimizar el compromiso *throughput*/latencia; y
- mecanismos más avanzados permiten incrementar la velocidad de transmisión.

b) Con paquetes largos: mecanismos DAMA.

- Si el número de usuarios es reducido el canal de reserva por DAMA puede ser utilizando un canal reservado por usuario.
- Si el número de usuarios es elevado el canal de reserva por DAMA es más eficiente si se hace mediante un canal de contienda.

Actividades

1. Suponed un sistema de multiplexación por división en frecuencia en el que un total de doce usuarios comparten el recurso de comunicaciones. Cada uno de los doce usuarios transmite a una tasa R de 500 kbps y utiliza un sistema de modulación que requiere un ancho de banda de 200 kHz para transmitir este flujo de información. Los usuarios se multiplexan en frecuencia dejando bandas de guarda de 50 kHz. La frecuencia portadora del usuario situado en la banda de menor frecuencia es de 40 MHz.

a) Cread una fórmula que permita determinar la frecuencia portadora de cada usuario en función del número de usuarios ($N = 1, \dots, 12$).

b) ¿Cuál es el ancho de banda total que ocupa el múltiplex?

c) Si se utilizara todo este ancho de banda con el mismo tipo de modulación que utilizan cada uno de los usuarios, ¿cuál sería el flujo total de información que podemos transmitir?

d) Comparad el flujo obtenido en el apartado c con el que realmente están enviando los doce usuarios. ¿A qué se deben las diferencias?

2. Suponed que utilizamos el múltiplex primario del problema anterior para formar un grupo secundario, que consta de siete grupos primarios. Suponed que la frecuencia más baja a la que se transmite la información de un usuario es de 100 MHz y que las bandas de guarda entre dos grupos primarios siguen siendo de 50 kHz.

a) ¿Cuántos usuarios comparten el grupo secundario?

b) Determinad una fórmula para la frecuencia más baja de cada uno de los grupos primarios.

c) ¿Cuál es el ancho de banda de todo el múltiplex de grupo secundario?

d) ¿Cuál sería la tasa de bits que se podría transmitir en este ancho de banda utilizando una modulación que tuviera la misma eficiencia que la que utilizan cada uno de los usuarios?

3. Un grupo de veinte usuarios comparte un múltiplex por división en el tiempo. Los usuarios tienen que transmitir la información a una tasa de 250 kbps. Se construye una trama formada por 24 paquetes, todos ellos con la misma duración y en la que todos los bits tienen la misma velocidad. La duración de una trama es de 0,1 ms. El primer paquete de la trama contiene una palabra única para facilitar el sincronismo. El segundo paquete contiene información útil para que el explotador del servicio pueda señalar los usuarios del múltiplex. Con posterioridad, vienen los veinte intervalos de usuario. En cada uno de estos paquetes se utilizan 5 bits para indicar el número de canal. Finalmente, se utilizan dos paquetes para enviar códigos de paridad que permitan detectar errores.

a) ¿Cuántos bits forman una trama?

b) ¿Cuál es la tasa de bits de la trama (incluyendo, claro está, todos los bits de sincronismo, códigos de protección, señalización, etc.)?

c) Comparad esta tasa de datos con la de la información útil que realmente se está enviando. Determinad qué porcentaje de los bits se debe a sincronización, detección de errores, señalización, etc.

d) ¿Cómo se modifican los apartados anteriores si los paquetes se separan por un tiempo de guarda de 100 ns?

4. Suponed un sistema de telefonía celular en el que puede haber un total de 100 usuarios multiplexados en una célula utilizando un sistema de acceso por multiplexación en tiempo y frecuencia mixto. Para aumentar la capacidad del sistema, se propone instalar antenas que tienen un haz principal con un ángulo de aproximadamente 45° . Estimad el número máximo de usuarios que se podrían tener en esta célula suponiendo que las condiciones de ancho de haz de la antena son ideales.

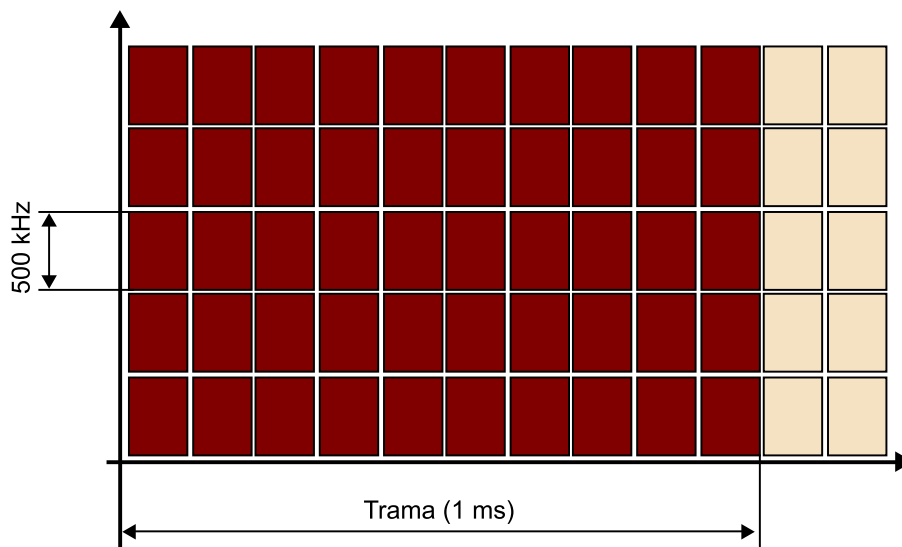
5. En la figura siguiente, se muestra un esquema de acceso múltiple mixto, que utiliza tanto la multiplexación en frecuencia como la multiplexación en tiempo. En el eje temporal, la trama está dividida en diez segmentos, cada uno de los cuales tiene una duración de 0,095 ms, con un intervalo de guarda de 0,005 ms, lo que da lugar a una duración de trama de 1 ms. La parte frecuencial está dividida en cinco bandas, cada una de ellas con un ancho de banda de 500 kHz. Se utiliza una modulación que permite ubicar una tasa de bits de 1 MHz en el ancho de banda de 500 kHz. Los elementos que forman esta estructura en la que se divide el eje tiempo-frecuencia se denominan bloques.

Mediante este sistema se quiere ubicar a un total de cuarenta y cinco usuarios más cinco canales de ingeniería que se utilizará para fines de identificación de contenidos, corrección de errores, gestión del múltiplex, etc. Los cinco canales de ingeniería se transmiten durante el primer fragmento temporal de la trama. Además, en cada uno de los canales se transmiten datos de cabecera y de corrección de errores para cada canal. El número total de bits asignados a cabecera y a corrección de canal por cada bloque es de 128.

a) Determinad la tasa total de bits que se transmite en este múltiplex (incluyendo todos los bits, es decir, los de información original de los usuarios, los de sincronismo, detección de errores, señalización y demás).

b) Determinad la tasa de bits útiles que están a disposición de los usuarios. ¿Cuál es la tasa de bits máxima que puede transmitir un usuario? Suponed que todos los usuarios se reparten el recurso equitativamente.

Distribución de tiempo/frecuencia



6. Un sistema de multiplexado quiere transmitir simultáneamente tres señales de información $d_1 = \{+1, -1, +1, -1, \dots\}$, $d_2 = \{+1, -1, -1, -1, \dots\}$ y $d_3 = \{+1, +1, +1, +1, \dots\}$. Para hacerlo utiliza una técnica CDMA con las siguientes secuencias de código $c_1 = \{+1, -1, -1, +1, +1, +1, -1\}$, $c_2 = \{-1, +1, +1, -1, +1, +1, -1\}$ y $c_3 = \{+1, +1, -1, -1, +1, -1, +1\}$.

a) Encontrad la forma de onda de la señal transmitida.

b) Descodificad la señal para el usuario 1 y comprobad que se puede descodificar correctamente.

c) A partir del resultado de la apartado b, razonad si existe interferencia de acceso múltiple (MAI). Confirmad el resultado comprobando la ortogonalidad de los tres códigos.

7. Un sistema de comunicaciones quiere gestionar la demanda de acceso al sistema de sus usuarios mediante un sistema ALOHA ranurado (Slotted ALOHA). Para hacerlo, cuando un sistema quiere transmitir envía un paquete de información de 50 bits que solicita acceso mediante una red que funciona a 100 Kbps. Si los usuarios envían un paquete de solicitud de acceso cada 10 segundos ($l = 0,1$), calculad el máximo número de usuarios que puede haber en el sistema para que el mecanismo de acceso mediante ALOHA ranurado trabaje en el óptimo de sus prestaciones ($G = 1$).

Bibliografía

Bibliografía básica

Proakis, J. (2003). *Digital communications* (4.^a ed.). McGraw Hill.

Proakis, J. G.; Salehi, M. (2002). *Communication systems engineering* (2.^a ed.). Prentice Hall.

Sklar, B. (2003). *Digital communications: fundamentals and applications* (2.^a ed.). Prentice Hall.

Bibliografía complementaria

Carlson, A. B. (2001). *Communication systems: an introduction to signals and noise in electrical communication* (4.^a ed.). McGraw Hill.

Jamalipour, A.; Wada, T.; Yamazato, T. (2005, febrero). "A tutorial on multiple access technologies for beyond 3G mobile networks". *IEEE Communications Magazine*.

Peyravi, H. (1999, marzo). "Medium access control protocols performance in satellite communications". *IEEE Communications Magazine*.

