
Radiocomunicaciones

PID_00247329

Jesús Alonso-Zárate

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 4 horas



Universitat
Oberta
de Catalunya

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño general y la cubierta, puede ser copiada, reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea éste eléctrico, químico, mecánico, óptico, grabación, fotocopia, o cualquier otro, sin la previa autorización escrita de los titulares del copyright.

Índice

Introducción	5
Objetivos	6
1. Introducción a la transmisión por radio	7
2. Principios de propagación radio	8
2.1. Introducción	8
2.2. Las pérdidas de propagación	9
2.3. El <i>shadowing</i> : desvanecimientos lentos	10
2.4. El <i>Fast-fading</i> : desvanecimientos rápidos	12
2.4.1. Descripción	12
2.4.2. El tiempo de coherencia del canal	13
2.4.3. La estadística de la envolvente de la señal recibida	13
2.5. El efecto <i>Doppler</i>	14
2.6. Transmisiones de banda estrecha o de banda ancha	15
3. El concepto de cobertura	17
4. La diversidad en la comunicación por radio	18
5. Modulaciones digitales	20
5.1. Introducción	20
5.2. El muestreo y el criterio de Nyquist	22
5.3. Modulación de dos niveles: BPSK	23
5.4. Modulaciones multinivel: M-QAM	24
5.5. Modulaciones de frecuencia: FSK	24
6. Técnicas de acceso múltiple	26
6.1. Introducción	26
6.2. División en frecuencia: FDMA	31
6.2.1. Descripción	31
6.2.2. Sincronización	31
6.2.3. Sincronización: mecanismos de sincronismo y recuperación de portadora	32
6.2.4. Sincronización: bandas de guarda	32
6.2.5. Sincronización: consideraciones prácticas	33
6.2.6. Fortalezas de FDMA	33
6.2.7. Debilidades de FDMA	33
6.3. División en tiempo: TDMA	34
6.3.1. Descripción	34

6.3.2.	Sincronización: justificación	35
6.3.3.	Sincronización: cabeceras y señales de control	35
6.3.4.	Sincronización: tiempos de guarda	36
6.3.5.	Sincronización: consideraciones prácticas	36
6.3.6.	Fortalezas de TDMA	37
6.3.7.	Debilidades de TDMA	38
6.4.	División en código: CDMA	39
6.4.1.	Descripción	39
6.4.2.	CDMA síncrono	40
6.4.3.	CDMA asíncrono	41
6.4.4.	CDMA con saltos de frecuencia (FH-CDMA)	41
6.4.5.	Consideraciones prácticas: eficiencia espectral	42
6.4.6.	Fortalezas de los sistemas CDMA	42
6.4.7.	Debilidades de los sistemas CDMA	43
6.5.	División en tiempo y frecuencia: OFDMA	43
6.5.1.	Descripción	43
6.5.2.	Fortalezas de OFDMA	44
6.5.3.	Debilidades de OFDMA	44
6.6.	Técnicas de acceso aleatorio	45
6.6.1.	Introducción	45
6.6.2.	ALOHA y sus variantes	46
6.6.3.	CSMA y sus variantes	49
Resumen	51

Introducción

En los dos materiales anteriores, «Fundamentos de comunicaciones» y «Redes de comunicación», se han presentado los fundamentos de los sistemas y las redes de comunicaciones.

Como se ha presentado, las comunicaciones, ya sean punto a punto o en una red, necesitan un medio de comunicación por el que transmitir la información.

Existen canales guiados, principalmente basados en cables (aunque no únicamente), y canales no guiados, generalmente, el aire, a través del que se puede transmitir información usando ondas electromagnéticas.

La posibilidad de usar el canal radio como canal de comunicaciones ofrece muchas ventajas, tales como **flexibilidad, facilidad de instalación o movilidad**, entre otras.

Por este motivo, las comunicaciones sin cables, *comunicaciones wireless*, juegan un papel fundamental en el despliegue de soluciones profesionales de conectividad. En el contexto de los sistemas ciberfísicos y la industria 4.0, no hay la más mínima duda de que las soluciones *wireless* van a jugar un papel protagonista como soluciones de conectividad.

En próximos materiales, se describirán las principales tecnologías de conectividad existentes; todas ellas se basan en sistemas radio. Por lo tanto, para poder entender su operativa, sus ventajas e inconvenientes, es necesario dedicar este material a describir las particularidades de las transmisiones vía radio. El hecho de transmitir a través de ondas de radio implica que el diseño del sistema de comunicaciones debe estar especialmente diseñado para ello.

Objetivos

Los objetivos de este material son:

- 1) Conocer los principios de la propagación de señales radioeléctricas y su uso para la transmisión de datos.
- 2) Entender conceptos fundamentales aplicados a los sistemas radio, tales como los conceptos de cobertura radio y técnicas de diversidad.
- 3) Familiarizarse con las modulaciones digitales principales usadas para comunicaciones vía radio.
- 4) Conocer las técnicas de acceso múltiple más utilizadas en los sistemas comerciales de comunicación por radio, tales como FDMA, TDMA, CDMA, OFDMA, y las técnicas de acceso aleatorio basadas en contienda.

1. Introducción a la transmisión por radio

La comunicación entre un transmisor y un receptor puede hacerse usando el aire como medio físico de comunicación.

Para ello, se usan ondas electromagnéticas que pueden propagarse a través del aire. Si estas ondas se modulan adecuadamente, pueden transmitir información desde uno o varios destinos.

La comunicación radio es un campo complejo de la tecnología de comunicación, y existen cursos y másteres especializados en este tipo de comunicaciones. Por lo tanto, el objetivo de este material no es ofrecer una descripción detallada de todos los elementos de los sistemas radio y todas sus variantes y posibilidades, sino presentar fundamentos básicos que se consideran necesarios para entender las comunicaciones radio dentro del ámbito de su uso en la industria 4.0 y, en particular, sus puntos fuertes y débiles, y tener criterios para elegir un sistema u otro según las necesidades particulares de cada aplicación.

En particular, en este material, vamos a describir los siguientes aspectos generales básicos cuando hablamos de comunicaciones sin cables (*wireless*):

- 1) Los factores que influyen en la **propagación de las ondas** en el entorno radio, que son diferentes de los que se presentan en comunicaciones guiadas por cable. Estos factores tienen una afectación directa en el modo en el que se diseñan, seleccionan y configuran los sistemas de comunicaciones.
- 2) Las **técnicas de diversidad** que permiten hacer más robusta la comunicación y acercar, dentro de la medida de lo posible, la robustez de las comunicaciones por radio a las comunicaciones por cable.
- 3) Los principios fundamentales de las **modulaciones digitales**; el modo en el que la información digital se prepara para ser transmitida por el canal radio y poder ser detectada e interpretada en un receptor.
- 4) Dado que el aire es un medio físico compartido por todos aquellos que quieran usarlo para la transmisión a distancia de información, es necesario usar **técnicas de acceso múltiple** para que diferentes usuarios puedan compartir este medio de manera simultánea.

2. Principios de propagación radio

2.1. Introducción

Las comunicaciones vía radio se pueden llevar a la práctica gracias a la propagación de las señales electromagnéticas que pueden ser radiadas desde una o varias antenas en transmisión, y recibidas desde una o varias antenas en recepción.

Las condiciones de propagación de las ondas electromagnéticas se rigen por las leyes de Maxwell. Usando un complejo conjunto de ecuaciones matemáticas, es posible calcular el comportamiento exacto de la propagación que sufre una onda entre el emisor y el receptor.

Sin embargo, el conocimiento exacto de dicho comportamiento carece de interés práctico. En la práctica, lo que interesa para el diseño de sistemas de comunicaciones es entender y caracterizar de manera empírica qué es lo que le sucede a una señal radio desde que la transmitimos en el emisor hasta que la recibimos en el receptor. Si conocemos los efectos adversos a los que esa señal se va a enfrentar, seremos capaces de diseñar (o elegir) los sistemas de comunicación más adecuados a los entornos en los que queremos trabajar.

Si medimos el nivel de potencia recibido en un receptor que se aleja de la antena transmisora, se puede observar una continua y rápida fluctuación del nivel de potencia recibida. Esta variación de potencia se debe a:

- 1) La **distancia** relativa entre el transmisor y el receptor.
- 2) El **movimiento** relativo entre el transmisor y el receptor.
- 3) Los **obstáculos** en el camino entre el transmisor y el receptor que pueden dificultar la visión directa entre las antenas de transmisión y recepción.
- 4) Los **rebotes** que se pueden dar en los objetos cercanos al receptor, lo que da lugar a lo que conocemos como propagación multicamino.

En los próximos apartados, elaboramos estos conceptos y sus implicaciones en el diseño o elección de un sistema de comunicaciones u otro para nuestra aplicación en la industria 4.0.

2.2. Las pérdidas de propagación

En el espacio libre (sin obstáculos ni propagación multicamino), el valor de la potencia media recibida en un receptor se puede expresar como:

$$P_R = P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (1)$$

donde P_T es la potencia transmitida, G_T y G_R son las ganancias de las antenas en transmisión y en recepción, λ es la longitud de onda de la frecuencia portadora, y d es la distancia entre transmisor y receptor. La relación entre la longitud de onda y la frecuencia se determina por $f\lambda = c$, donde c es la velocidad de la luz y f es la frecuencia portadora.

A partir de esta ecuación, es posible calcular las pérdidas de propagación como el valor de

$$L = \frac{c^2}{(4\pi df)^2}. \quad (2)$$

Es decir, **la potencia recibida es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia respecto al transmisor**. Por ejemplo, cada vez que se duplica la distancia, se divide por 4 la potencia, lo que se traduce en una atenuación de 6 dB.

El decibelio

El decibelio (dB) es una unidad muy utilizada para caracterizar muchos de los parámetros de los sistemas de comunicación.

El decibelio representa una relación entre dos cantidades; es una unidad relativa, no absoluta. Se expresa como $dB = 10 \cdot \log(P_1/P_2)$ si se comparan potencias, donde \log es el logaritmo en base 10.

Los decibelios siguen una escala logarítmica: así, por ejemplo, una atenuación de 9 dB implica que la potencia se divide por 8; una atenuación de 6 dB implica que la potencia se divide por 4; una atenuación de 3 dB implica que la potencia se divide por 2.

Los decibelios se usan, por ejemplo, para definir las pérdidas del canal (definidas como relación de potencia recibida respecto a la transmitida); la relación entre las potencias de señal y potencia de ruido en un receptor; así como otros parámetros de los sistemas de comunicación en los que interesa comparar dos cantidades para conocer no tanto sus valores absolutos, sino los relativos.

De todos modos, aunque los decibelios son unidades adimensionales y relativas, en telecomunicaciones se usan valores con unidades referidas a un valor de referencia para poder usar los decibelios también como valores absolutos. Por ejemplo, los estándares de comunicaciones o la normativa de uso de bandas de frecuencia a veces definen la potencia máxima de transmisión en dBm. Si por ejemplo esta potencia máxima se define como 20 dBm, quiere decir que la potencia máxima es 20 dB mayor que la de referencia, que en el caso de los dBm es la de 1 mW; por lo tanto, la potencia máxima es de 100 mW (0,1 vatios).

Trabajar con decibelios permite sumar y restar en lugar de multiplicar y dividir; por lo tanto, los cálculos de, por ejemplo, el *link budget* de un sistema, que definimos en el módulo 1 de introducción a los sistemas de comunicación, resultan sumamente intuitivos y sencillos de manipular.

Como regla práctica y comúnmente utilizada, sumar 3 dB a un nivel de potencia expresado en dB es multiplicar la potencia por 2.

Es importante tener en cuenta que para mayores frecuencias, menores valores de λ y, por lo tanto, mayor es la atenuación a una distancia determinada.

Las frecuencias bajas se propagan mejor (más lejos) que las señales de alta frecuencia.

Sin embargo, este modelo de propagación libre no es adecuado en la gran mayoría de las aplicaciones reales. En la mayoría de los casos reales, la propagación se ve alterada por efectos como los rebotes en el suelo o en otros objetos, así como la presencia de obstáculos fijos entre transmisor y emisor. Por ello, existen modelos de propagación que añaden, a la ecuación de las pérdidas de propagación en espacio libre, el efecto de la altura de las antenas, así como otros factores. Estos modelos suelen basarse en medidas empíricas que permiten calcular de un modo aproximado las pérdidas de propagación.

En la práctica, resulta conveniente utilizar el modelo de pérdidas de propagación en espacios libres, pero cambiando el exponente de valor 2 del denominador, por un exponente de valor más elevado: 3, 4 o incluso 5. Dependiendo del entorno, se puede adoptar un modelo de pérdidas más agresivas o más discretas. En general, la atenuación suele escribirse como

$$L = L_e + 10n \log(d) + 20 \log(f), \quad (3)$$

donde L_e son las pérdidas asociadas al entorno, y se expresan en decibelios (dB).

2.3. El *shadowing*: desvanecimientos lentos

Si un receptor se desplaza alrededor de una antena transmisora omnidireccional (que transmite con la misma potencia en los 360° alrededor de su eje) describiendo una circunferencia perfecta, el valor medio de la potencia recibida varía a medida que cambia su posición.

Esta variación se denomina *desvanecimiento lento* y se produce por la ondulación del terreno y la interposición de objetos entre las antenas. La variación se produce alrededor del nivel medio de potencia que nos proporcionan los modelos de propagación.

El efecto del *shadowing* se superpone a las pérdidas de propagación como un efecto «independiente».

A partir de numerosas medidas, se ha establecido un modelo estadístico de distribución que representa la **función densidad de probabilidad** de potencia de los desvanecimientos lentos basada en la función log-normal, y que se puede expresar como:

$$f(P_R) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(P - P_T)^2}{2\sigma_y^2}\right), \quad (4)$$

donde P es el valor medio de la potencia dado por el modelo de propagación, y σ_y es la desviación estándar del proceso de *shadowing* que depende del entorno de propagación. Valores típicos de esta desviación son 6 dB, para entornos con pocos obstáculos, y 12 dB para entornos con muchos obstáculos, como en zonas con muchos edificios.

Por otro lado, es necesario caracterizar la **velocidad de la variación** del nivel de señal.

Esta cambia a medida que el receptor, o su entorno, se mueven. Además, el nivel de potencia de la señal no varía de forma instantánea, puesto que un receptor no se oculta detrás de un obstáculo de forma instantánea, sino que existe una **correlación temporal** entre los valores de potencia.

Claramente, la velocidad de variación del nivel de señal depende de la velocidad a la que se desplaza el terminal móvil (o su entorno), pero en cualquier caso, se trata de variaciones relativamente lentas en la medida en que están originadas por objetos del entorno de tamaño considerable.

El valor de la correlación temporal depende nuevamente del tipo de entorno y la velocidad de desplazamiento del terminal móvil o el entorno. Generalmente, se adopta una función de correlación temporal exponencial tal que

$$R(\tau) = e^{(-\alpha\tau)} \quad (5)$$

El valor de α modula la mayor o menor variabilidad de la señal y depende de la velocidad del receptor. A mayor velocidad, la señal varía de forma más rápida y, por lo tanto, el valor de α también es mayor.

2.4. El *Fast-fading*: desvanecimientos rápidos

2.4.1. Descripción

En un entorno de comunicaciones radio, el nivel de potencia recibida en una antena receptora se ve alterado por la multitud de rebotes que la señal sufre en distintos objetos y en el entorno, y que se reciben como «copias alteradas» de la señal original. Estos efectos varían con el tiempo, debido al movimiento tanto del receptor como de los objetos de su entorno.

Cada uno de los rebotes incide en la antena en recepción con una amplitud y fase distintas. Los valores concretos dependen del **coeficiente de reflectividad** de cada objeto. Además, cada rebote se recibe con un retardo distinto.

Al transmitir la señal modulada en una portadora de alta frecuencia, el efecto de los distintos retardos en recepción, siempre que estos sean menores que el tiempo de símbolo de la señal útil, implica que las señales que inciden en la antena en recepción se reciban con fases totalmente distintas.

¿Qué efecto tiene esto en la señal recibida? Estas diferentes copias de la señal con fases y retardos diferentes se sumarán en recepción, lo que dará instantes de **interferencia constructiva** (señales sumadas con la misma fase) e **interferencia destructiva** (señales sumadas, pero con fase contraria), así como todos los valores intermedios.

Por lo tanto, la señal recibida está compuesta por la suma de distintas componentes de amplitud y fase y, de este modo, la suma de las diferentes componentes puede resultar en una atenuación de hasta 40 dB respecto al valor medio de la señal en escenarios reales. El valor medio de la señal es el que se obtiene según el modelo pérdidas de propagación y los desvanecimientos lentos.

Además, se ha demostrado empíricamente que la variación temporal de los desvanecimientos rápidos de la señal recibida en un **receptor móvil** tiene una función de autocorrelación que presenta un valor de un 10 % a una distancia de $0,5\lambda$ respecto al punto de máximo nivel de señal.

La aplicación práctica de este fenómeno es que dos antenas receptoras separadas a una distancia mayor que la mitad de la longitud de onda de la señal portadora recibirán versiones prácticamente incorreladas, es decir, niveles de señal independientes.

Este efecto tiene implicaciones prácticas muy grandes, ya que justifica la instalación de múltiples antenas en transmisión y recepción para aumentar la fiabilidad y prestaciones de las comunicaciones radio. Este es el principio que justifica el diseño de sistemas MIMO de múltiples antenas en transmisión y recepción (*multiple input multiple output*) y el uso de técnicas de diversidad espacial, como se detalla más adelante.

En el caso de las estaciones base de sistemas celulares, se ha comprobado que esta distancia entre antenas debe ser mayor para asegurar la independencia entre señales recibidas. Como referencia, en una estación base o punto de acceso, la separación entre antenas debe ser del orden de las decenas de longitudes de onda de la frecuencia portadora a la que trabaja el sistema de comunicación.

2.4.2. El tiempo de coherencia del canal

Desde el punto de vista temporal, se define el *tiempo de coherencia* como el tiempo necesario para que el canal móvil cambie de forma significativa.

Como criterio práctico para obtener el orden de magnitud del tiempo de coherencia, se toma como valor de referencia el tiempo necesario para que la función de autocorrelación de la envolvente de la señal recibida disminuya a la mitad desde su valor máximo.

Ejemplo

Para una señal a 900 MHz y una velocidad de receptor móvil de 90 km/h, el tiempo de coherencia es de 3,2 ms. En términos prácticos, si medimos la potencia recibida en dos instantes separados 1 ms, la potencia recibida será la misma. Si tomamos las medidas con 10 ms de separación, tanto la amplitud como la fase serán completamente diferentes.

2.4.3. La estadística de la envolvente de la señal recibida

Hasta ahora hemos descrito el concepto de desvanecimiento rápido, hemos visto a qué se debe, y que la velocidad de los desvanecimientos está vinculada al concepto de **tiempo de coherencia** del canal. La incógnita que queda por resolver es la distribución estadística de esta variación de la potencia recibida.

Como se ha descrito antes, la suma de los rayos **multicamino** tiene un efecto que puede ser constructivo o destructivo. Los niveles de señal son aleatorios, puesto que dependen de la distribución de los retardos de las diferentes trayectorias, así como

de los coeficientes de *reflectividad* de los objetos en los que se producen. A partir de distintas observaciones empíricas, se han llevado a cabo estudios estadísticos que permiten distinguir entre dos casos claramente diferenciados según escenarios:

- 1) Con visibilidad directa entre antenas (**LOS**, *line of sight*).
- 2) Sin visibilidad entre las antenas (**NLOS**, *non line of sight*).

En el caso NLOS, se considera que el número de reflexiones que inciden en la antena receptora es muy grande. En este caso, la densidad de probabilidad de la envolvente de la señal sigue una función de *Rayleigh*. La implicación práctica de esta densidad de probabilidad es que la estadística de la potencia instantánea recibida (P_i) tiene media P_R y distribución exponencial calculada como:

$$f_{P_i|P_R}(P_i|P_R) = \frac{1}{P_R} e^{-\left(\frac{P_i}{P_R}\right)}. \quad (6)$$

Es importante recordar que P_R es, a su vez, una variable aleatoria sujeta a los desvanecimientos lentos y a las pérdidas de propagación, que se caracteriza con una distribución log-normal, y que por tanto irá variando a lo largo del tiempo a medida que el receptor se vaya desplazando y/o cambie el entorno (edificios, montañas, etc.).

Los efectos de los desvanecimientos rápidos se superponen a las pérdidas de propagación y los desvanecimientos lentos.

En el caso LOS, la distribución, en lugar de ser *Rayleigh*, sigue una función densidad de probabilidad llamada *Nakagami-Rice*. A efectos prácticos, la potencia recibida tiene una estadística similar al caso NLOS, pero con niveles de potencia mayores, en media. En este caso, la probabilidad de tener valores de envolvente de señal pequeños es mucho menor cuando existe visibilidad directa entre las antenas. Esto se debe a que el rayo directo presenta niveles de señal muy mayores respecto a los reflejados. Por lo tanto, para que se produzca una disminución significativa en el nivel de señal, es necesario que los rayos reflejados en los objetos próximos sumen sus contribuciones de señal en contrafase respecto al rayo directo para afectar severamente al nivel de señal recibida.

2.5. El efecto *Doppler*

La movilidad relativa entre el transmisor y un receptor, además de provocar variaciones en el nivel de señal recibido, como hemos visto anteriormente, provoca que la

frecuencia portadora se vea desplazada en mayor o menor medida en función de la velocidad relativa entre ellos. Este efecto es conocido como *efecto Doppler*.

Aunque la propagación del sonido sea diferente a la propagación radio, el efecto *Doppler* también se da con las ondas de presión acústica y resulta más sencillo plantear un ejemplo didáctico que en el caso de ondas radioeléctricas. Efectivamente, el efecto *Doppler* se puede apreciar con el sonido de una sirena cuando una ambulancia se acerca o se aleja de nosotros; al acercarse hacia nosotros, el sonido de la sirena lo percibimos con una frecuencia mayor a la que realmente emite la ambulancia (escuchamos el sonido más agudo). Al alejarse, escuchamos el sonido de la sirena con una frecuencia menor de la que realmente se está transmitiendo (escuchamos el sonido más grave).

Este efecto tiene implicaciones en el diseño de sistemas de comunicaciones, ya que la señal recibida estará desplazada en frecuencia (respecto a la frecuencia a la que se transmitió), lo que hará que la cadena de recepción no esté bien configurada (si no tuviésemos el efecto en cuenta). Además, en el caso de señales de banda ancha, la señal puede «ensancharse» y se puede modificar su comportamiento frecuencial.

La solución a este problema físico e inevitable es diseñar el receptor de tal modo que pueda tolerar un desplazamiento de la frecuencia portadora de una señal, debido al movimiento relativo entre transmisor y receptor.

No todos los sistemas de comunicación existentes toleran del mismo modo el efecto *Doppler* y, por lo tanto, en aplicaciones con movilidad, este es un aspecto muy importante que hay que considerar.

2.6. Transmisiones de banda estrecha o de banda ancha

Hasta este punto, hemos estado considerando canales que afectan únicamente al nivel de señal; a su amplitud. Esto es válido cuando, o bien solo existe una trayectoria entre las antenas, o bien cuando los retardos entre las diferentes trayectorias respecto a la duración del tiempo de símbolo son muy pequeños. Sin embargo, cuando los retardos entre las trayectorias multicamino son grandes, cuando hay objetos que provocan reflexiones lejanas, la respuesta del canal provoca lo que se conoce como *dispersividad temporal del canal*.

Desde el punto de vista de análisis frecuencial, un canal dispersivo en el tiempo indica que en el dominio transformado de la frecuencia el canal presenta desvanecimientos selectivos en frecuencia. Esto quiere decir que la respuesta en frecuencia no es igual en todas las componentes de la señal, lo que da lugar a distorsiones de la señal transmitida.

Con el fin de caracterizar el canal, y puesto que la respuesta del canal es variante con el tiempo, se calcula el promedio de las respuestas y se define el *power delay profile*

(PDP). También llamado perfil de potencia respecto al retardo, este concepto se usa para definir el *delay spread* del canal (D_S), que permite cuantificar la dispersividad temporal del canal.

Esta definición permite distinguir entre **transmisión de banda ancha** o **transmisión de banda estrecha**. Cuando el *delay spread* sea superior a $0,1/T_S$, siendo T_S el tiempo de símbolo del sistema, se habla de un sistema de banda ancha. Cuando el *delay spread* sea inferior a $0,1/T_S$, hablaremos de un sistema de banda estrecha.

En el dominio de la frecuencia se define el **ancho de banda de coherencia** del canal, B_C , que se calcula como:

$$B_C = \frac{1}{2\pi D_S} \quad (7)$$

Es decir, si el *delay spread* es muy grande, el ancho de banda de coherencia será muy pequeño, lo que dará lugar a un canal que afecta de manera diferente a las distintas frecuencias.

Los conceptos de *delay spread* y de **ancho de banda de coherencia** tienen implicaciones prácticas muy relevantes en sistemas de comunicación en los que las distancias entre transmisor y receptor pueden ser muy grandes. Un ejemplo pueden ser las redes LPWA o redes NB-IoT, pensadas para comunicaciones a larga distancia para dispositivos IoT. En estos casos, los sistemas de banda estrecha no sufrirán la dispersividad temporal del canal, mientras que los sistemas de banda ancha sufrirán la dispersividad temporal y respuesta frecuencial no uniforme, lo que dará lugar a distorsión en la señal recibida. Esta distorsión debe ser compensada en el receptor.

3. El concepto de cobertura

Se denomina *cobertura de un sistema de comunicación radio* a la zona geográfica alrededor de un transmisor en la que un receptor puede recibir una señal de información con un nivel de potencia suficiente que permita los mensajes transmitidos con una calidad determinada.

Los *parámetros de calidad* que se utilizan habitualmente para establecer si una zona está en el área de cobertura son:

- 1) Relación señal a ruido (**SNR**, *signal to noise ratio*).
- 2) Relación señal a interferencia (**SNIR**, *signal to noise plus interference ratio*).
- 3) Probabilidad de error (**BER**, *bit error rate*, o **PER**, *packet error rate*).
- 4) Nivel de potencia de la señal recibida (**RSSI**, *received signal strength indicator*).

Dada la variabilidad temporal, frecuencial y espacial de la propagación radio debida a las pérdidas de propagación y los desvanecimientos lentos y rápidos, es estadísticamente imposible garantizar el 100 % de cobertura en un sistema radio. Para asegurar unos porcentajes cercanos al 100 %, sería necesario transmitir con unos niveles de potencia muy elevados. Hemos visto antes cómo las fluctuaciones de la señal debidas a los desvanecimientos lentos y rápidos pueden provocar que el nivel de potencia de la señal pueda tener fluctuaciones aleatorias de hasta 40 dB de atenuación sobre su nivel medio.

Para el cálculo de la cobertura, se tienen en cuenta las pérdidas de propagación y los desvanecimientos lentos. Los desvanecimientos rápidos se tienen en cuenta a través de la probabilidad de error que depende de la potencia media de la señal recibida, así como de las distintas técnicas que se utilizan para compensar en la medida de lo posible los desvanecimientos rápidos (codificación, entrelazado, ecualización, etc.).

El criterio para establecer cobertura es asegurar que los umbrales de calidad de cobertura se cumplen de forma porcentual en función de la distancia o del tiempo. Por tanto, hablaremos de que en una determinada zona podemos asegurar que el nivel de señal se encontrará por encima de un determinado nivel medio de referencia en el 90 % de los emplazamientos, o que en una determinada ubicación tendrá cobertura durante el 95 % del tiempo.

4. La diversidad en la comunicación por radio

En comunicaciones móviles el canal es un medio hostil, que cambia con el tiempo; puede cambiar tanto porque el dispositivo móvil se mueve, como porque el medio cambia sus propiedades (obstáculos en el camino, lluvia, etc.).

Las técnicas de diversidad pretenden obtener dos o más caminos diferentes de propagación e intentar que la respuesta del canal en estos caminos diferentes sea completamente independiente. De este modo, se aumenta la posibilidad de que la transmisión pueda hacerse, al asegurar los criterios de calidad necesarios.

Las técnicas de diversidad juegan un papel muy importante en los sistemas de comunicación por radio, y pueden ser, al menos, de tres tipos:

- 1) En **frecuencia**: se transmite la misma información en n frecuencias distintas ocupando, por lo tanto, un ancho de banda n veces mayor que el necesario para transmitir sin diversidad. Otra opción de explotar la diversidad frecuencial se da con técnicas de *frequency hopping*. La idea es que se puede dividir la banda de frecuencia disponible en canales más estrechos, y saltar de canal frecuencial, siguiendo un patrón definido y conocido por transmisores y receptor, cada cierto tiempo, de manera que se puedan evitar los periodos de tiempo en los que un canal puede estar en malas condiciones para la comunicación.
- 2) En **tiempo**: consiste en transmitir la información repetida n veces en n instantes de tiempo diferentes. De este modo, los recursos se ocupan n veces el tiempo ocupado para una única transmisión.
- 3) En **espacio**: consiste en disponer de dos (o más) antenas convenientemente separadas en el receptor para lograr recibir la señal transmitida por dos caminos diferentes de propagación desde el transmisor. Esta técnica encarece el receptor, pero permite no aumentar el ancho de banda requerido ni ocupar más tiempo del necesario el canal radio.

Como hemos visto antes, cuando describíamos los efectos de los desvanecimientos rápidos del canal radio, si hacemos el experimento de instalar dos antenas en un receptor y evaluamos la relación señal a ruido (SNR) instantánea, observamos que para un instante concreto, los valores recibidos en cada una de las antenas son completamente diferentes, independientes. Esto permite que tratemos la señal para maximizar el rendimiento de nuestro sistema.

En el caso de la diversidad en espacio, por poner un ejemplo, existen tres técnicas en función de cómo procesamos las señales recibidas en las antenas:

- 1) **Conmutación:** se usa un único receptor, se mide constantemente el nivel de señal recibido en cada antena de recepción y se selecciona en todo momento la antena con mejor SNR, usando un criterio de selección por umbral (habitualmente, usando histéresis para evitar conmutaciones continuas cuando el nivel de señal es bajo).
- 2) **Selección:** se usan varios receptores simultáneamente y se elige en cada momento el que obtiene mejor calidad. A costa de encarecer el receptor, se mantiene la sincronización en los distintos receptores y permite aumentar la velocidad de conmutación respecto al método de diversidad por conmutación.
- 3) Por **combinación de máxima ganancia (MRC):** se usan dos receptores y se combina la información obtenida por cada uno de ellos. Este sistema es el más eficiente, pero también más complejo de implementar y más caro. La complejidad tiene implicaciones en el consumo de energía de los dispositivos y, por lo tanto, es una estrategia que suele usarse en el enlace ascendente y no en el descendente.

Encontramos gran variedad de técnicas para aprovechar la diversidad en tiempo, frecuencia y espacio, y mejorar el rendimiento de los sistemas de comunicación por radio.

5. Modulaciones digitales

5.1. Introducción

Como ya vimos en el material «Fundamentos de comunicaciones», el proceso denominado *modulación* consiste en transformar el mensaje de información en una forma de onda que permita su transmisión eficiente en un sistema de comunicaciones.

La modulación digital es el proceso por el cual los símbolos digitales, *bits*, se transforman en formas de onda compatibles con el medio de transmisión o, lo que es lo mismo, con las características del canal. Estas formas de onda son analógicas (continuas en el tiempo) en todos los casos.

En el caso de las modulaciones banda base, estas formas de onda son pulsos; sin embargo, cuando se trata de una transmisión a través de un canal paso banda, como en los sistemas radio, la información deseada modula una señal sinusoidal denominada *portadora*.

Los criterios para elegir una modulación u otra deben intentar conseguir:

- Máxima velocidad de transmisión.
- Mínima probabilidad de error.
- Mínima potencia transmitida.
- Mínimo ancho de banda del canal ocupado.
- Máxima inmunidad a interferencias.
- Mínima distorsión frente a no linealidades de los amplificadores.
- Mínima complejidad circuital para reducir el coste del terminal.

La consecución simultánea de estos objetivos no es, en general, posible. Es necesario evaluar, para cada sistema, los compromisos que existen entre los diferentes parámetros y tomar decisiones de compromiso al respecto.

Para llevar a cabo este proceso de modulación, es necesario seleccionar un **pulso conformador**. Este pulso conformador define la «forma» que tendrá la envolvente de la señal sinusoidal portadora en el dominio del tiempo y la frecuencia. Por ejemplo, el uso de un **pulso rectangular** en tiempo con duración de tiempo de símbolo T_S dará lugar a una *sync* en el dominio frecuencia, con un ancho de banda de lóbulo principal igual a $2/T_S$ y una relación entre amplitud de lóbulo principal y secundario de 13 dB. Cabe aclarar que este tipo de pulsos rectangulares, aunque pueden ser adecuados para transmisiones por cable, no lo son para transmisiones por radio. Esto se debe a que el

espectro frecuencial de la *sync* es infinito en el eje de frecuencias, y no permite el uso compartido de los recursos frecuenciales con otros usuarios simultáneos.

Según cómo se defina la relación entre cada símbolo (bit o conjunto de bits) y la modulación de la señal analógica, las modulaciones digitales pueden clasificarse en los siguientes tipos:

- **ASK (*amplitude shift keying*)**: los símbolos se distinguen por el uso de amplitudes diferentes. La versión más simple de la modulación ASK es la modulación **OOK** (*on-off keying*), mediante la cual se modula información con la presencia (*on*) o ausencia (*off*) de amplitud.
- **PSK (*phase shift keying*)**: los símbolos se distinguen por el uso de fases diferentes.
- **FSK (*frequency shift keying*)**: los símbolos se distinguen por el uso de frecuencias diferentes.
- **QAM (*quadrature amplitude modulation*)**, también llamada **APK**, del inglés, *amplitude and phase keying*; los símbolos se distinguen por el uso de combinaciones de fase y amplitudes diferentes.

Como vimos en el apartado dedicado a los fundamentos de telecomunicaciones, vale la pena recordar las ventajas que las modulaciones digitales presentan respecto a las modulaciones analógicas:

- Mayor inmunidad frente a ruido e interferencias.
- Posibilidad de aplicar técnicas de procesado digital, tales como filtrado adaptativo o ecualización de canal.
- Posibilidad de transmitir señales de distintas fuentes de datos simultáneamente a través del mismo canal de comunicaciones.
- Posibilidad de aplicar técnicas de compresión de datos sin perder información o con pérdidas controladas.
- Posibilidad de aplicar técnicas de encriptado para mejorar la seguridad e integridad de los mensajes transmitidos.

Una señal modulada de manera digital y transmitida por el canal radio debe demodularse en recepción.

Posteriormente, se deben detectar los símbolos que se transmitieron en transmisión. Aunque en comunicaciones digitales los términos *demodulación* y *detección* se usan a menudo indistintamente, el proceso de demodulación se refiere a la eliminación de

la portadora, y el proceso de detección se refiere al proceso de la decisión del símbolo transmitido.

5.2. El muestreo y el criterio de Nyquist

En el proceso de modulación, los bits se transforman en símbolos analógicos en el dominio del tiempo, con una duración de símbolo igual a T_S .

Durante este tiempo de símbolo, la frecuencia portadora se multiplica por un pulso conformador que da forma a la envolvente de la señal que se transmitirá por el canal radio.

En el proceso de demodulación, una vez se elimina la portadora y se trabaja en banda base, es necesario detectar los símbolos que se han transmitido. Para ello, se muestrea la señal cada tiempo de símbolo, T_S .

Dependiendo de qué forma tenga el pulso conformador en el dominio temporal, podría darse lo que se conoce como *interferencia intersimbólica* (ISI); esto no es más que la interferencia que se genera si la señal de un símbolo transmitido en un instante k tiene un valor de amplitud mayor que cero en un instante $k + T_S$, en el que se esperará detectar el símbolo siguiente con información.

Para evitar esta ISI, el pulso conformador en transmisión debe cumplir el **criterio de Nyquist**. Evitando formalidades que no son el objetivo de este módulo, este criterio explica que el pulso conformador debe tener un máximo en el instante de muestreo de cada símbolo, y debe ser cero en todos los tiempos múltiplos del tiempo de símbolo. Si el proceso de muestreo se hace cada tiempo de símbolo, no habrá ISI en recepción. En la práctica esto no es tan sencillo, ya que el canal radio introduce alteraciones temporales en la señal. Por lo tanto, el objetivo de un sistema de comunicaciones bien diseñado es lograr que la ISI no se produzca en recepción. En algunos casos, puede ser conveniente transmitir con ISI, buscando que la respuesta del canal produzca una señal sin ISI en la antena del receptor.

Un pulso conformador que tiene unas buenas propiedades, según el criterio de minimización de la ISI, es el **coseno alzado** o **realzado**. Este pulso se caracteriza por un parámetro llamado factor de *roll-off*, que define el ancho de banda de la transmisión y la forma del pulso en el dominio temporal. Si este parámetro es 0, el filtro ocuparía el mínimo ancho de banda posible ideal (en particular, este caso límite es irrealizable). Si este parámetro se acerca a 1, el ancho de banda aumenta, pero también se simplifica su implementación real.

Por otro lado, cuanto menor sea el valor del *roll-off*, menor será la ocupación espectral, pero mayor resultará la sensibilidad a variaciones en el instante de muestreo, lo que generará una mayor probabilidad de error.

Debido a esto, valores típicos de este factor de *roll-off* oscilan entre 0,35 y 0,5. El ancho de banda ocupado, en banda trasladada, por un pulso de este tipo es igual a

$$B_T = 2 \cdot \frac{(1 + \beta)}{2T_S}. \quad (8)$$

El coseno alzado o realzado se utiliza en algunos sistemas de comunicación. Sin embargo, su realización no genera una señal de envolvente constante. Esto implica que no es posible el uso de amplificadores de potencia no lineales y, por lo tanto, su uso viene aparejado con la utilización de amplificadores lineales o de complejas técnicas de linealización.

5.3. Modulación de dos niveles: BPSK

Una de las modulaciones más sencillas es la *modulación en fase binaria*.

En esta modulación, el parámetro de la portadora que varía en función de la información binaria de fuente es la fase, con cambios de 180° . De este modo, la señal generada sería:

$$s(t) = A \sum_{k=0}^{\infty} d_k h_e(t - kT_s) \cos(2\pi f_c t) \quad (9)$$

donde A es la amplitud de la señal; d_k son los valores binarios de los símbolos de entrada, que en este caso son $+1$ o -1 (proporcionando una fase de 0° o 180°); h_e es la respuesta del filtro transmisor; f_c es la frecuencia portadora; y T_s es el tiempo de símbolo que, por ser modulación binaria, coincide con el tiempo de bit, T_b .

En cuanto al proceso de recuperación de la información digital transmitida, existen dos tipos de demodulación, denominados *detección coherente* y *detección no coherente*.

Cuando el receptor conoce la fase de la señal portadora recibida y la utiliza en la demodulación, la detección se denomina *coherente*. Si, por el contrario, el receptor desconoce la fase de la portadora, el proceso se denomina *no coherente*.

La ventaja de la demodulación no coherente es que no necesita estimar el valor de la fase de la señal recibida, lo que redundaría en una mayor sencillez de implementación. Esto se logra a costa de un incremento en la probabilidad de error. El conocimiento de la fase de llegada de la portadora de la señal recibida, necesario para poder llevar a cabo una demodulación coherente, requiere el uso de un circuito de estimación de dicha fase.

5.4. Modulaciones multinivel: M-QAM

Como hemos visto en apartados anteriores, el ancho de banda de una señal en el dominio frecuencial es proporcional al inverso del tiempo de símbolo.

Por lo tanto, una manera de reducir el ancho de banda de un sistema es mediante el uso de modulaciones multinivel. Estas modulaciones son modulaciones digitales en las que cada símbolo incluye información de varios bits. De este modo, el tiempo de símbolo es $T_S = n \cdot T_b$, y la información viaja en la fase y la amplitud de la señal.

Usando estas técnicas, las señales transmitidas pueden tener una duración mayor y, por tanto, la densidad espectral de potencia ocupa un menor ancho de banda. Son, por lo tanto, modulaciones que proporcionan una eficiencia espectral mayor que las modulaciones binarias. **Dicho de otro modo, se pueden transmitir más bits por segundo con las modulaciones multinivel.**

Además, la información puede ser transmitida por el canal mediante una portadora coseno y portadora seno de forma simultánea, en lo que constituyen las **componentes en fase y cuadratura**, respectivamente.

Las modulaciones multinivel pueden ser de fase (M-PSK), de amplitud y fase (MAPK o M-QAM), e incluso de frecuencia, aunque estas últimas no se suelen utilizar en sistemas radio.

Las modulaciones más comunes, en la práctica, son la BPSK (1 bit por símbolo) y la QPSK (2 bits por símbolo), que son modulaciones de fase, y las modulaciones 16-QAM (4 bits por símbolo), 32-QAM (6 bits por símbolo) y 64-QAM (8 bits por símbolo), en las que se modulan fase y cuadratura.

Modulaciones de orden superior también se pueden usar, pero la probabilidad de error es mucho mayor y, por lo tanto, su aplicación está limitada a comunicaciones a corta distancia con canales radio muy fiables. Los últimos estándares de Wi-Fi que prometen velocidades de transmisión de decenas de Gbps aplican modulaciones de hasta 1024-QAM (10 bits por símbolo).

5.5. Modulaciones de frecuencia: FSK

Las modulaciones digitales de fase y/o amplitud no tienen envolvente constante.

Debido a esto, no se pueden usar con amplificadores de elevado rendimiento cuya característica señal de salida respecto a la señal de entrada no es lineal. Estas no linealidades provocan distorsiones en el espectro de frecuencia y en la señal temporal, por

lo que si la información viaja en la amplitud o la fase, la información se altera debido a las no linealidades.

Para combatir estos efectos de las no linealidades, las **modulaciones de frecuencia** son más adecuadas, ya que estas **sí tienen envolvente constante**.

La modulación binaria de frecuencia se denomina BFSK (*binary FSK*) o 2-FSK. En esta modulación, los dígitos binarios 1 y 0 varían el valor de la frecuencia portadora transmitiendo $f_0 + f_d$ o $f_0 - f_d$, siendo f_0 la frecuencia portadora. Sin embargo, para que la señal resultante sea espectralmente eficiente y ocupe poco ancho de banda, es conveniente que la fase de la señal modulada sea una función continua en el tiempo que no presente saltos de fase bruscos. La modulación GMSK (*gaussian minimum shift keying*), utilizada en sistemas GSM, por ejemplo, es un caso particular de las modulaciones de frecuencia, con la característica de ser espectralmente más eficiente y lograr envolvente constante sin forzar saltos bruscos de fase.

Dada su extrema sencillez, estas modulaciones son usadas en algunos sistemas de comunicación para sensores y actuadores en el ámbito de la industria 4.0.

6. Técnicas de acceso múltiple

6.1. Introducción

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 llevar a cabo 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 llevar a cabo 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.

En el caso de los sistemas de comunicación por radio, la multiplexación es imperativa, ya que el aire es único y común para todos.

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.**

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** 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** 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 protocolos de control de acceso al medio y, por lo tanto, se hace 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 una técnica de **acceso múltiple** para permitir a los diferentes usuarios acceder al medio compartiendo recursos. Por otro lado, denominaremos al enlace entre la estación receptora y los usuarios **enlace de bajada**, y requerirá una técnica de **multiplexado** para permitir que las diferentes señales se hagan llegar a los respectivos usuarios.

Para distinguir entre los sistemas de multiplexación y los sistemas de acceso múltiple, se utilizan abreviaciones diferentes. Así, FDM (*frequency division multiplex*) o

TDM (*time division multiplex*) se refieren a **sistemas de multiplexación**, mientras que FDMA (*frequency division multiple access*) o TDMA (*time division multiple access*) se refieren a sistemas de **acceso múltiple**. Dado que 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 material 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.

1) Cuando la necesidad de recursos es conocida *a priori*, la asignación podrá ser fija y preestablecida y se hablará de **asignación fija de recursos**. A pesar de que su uso no está muy extendido, en ocasiones se utiliza el acrónimo FAMA (*fixed assigned multiple access*) para referirse a este mecanismo.

2) Por el contrario, cuando la necesidad de recursos no se conozca por avanzado, 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 DAMA (*demand assigned multiple access*) 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 hacer 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 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 *multiplex* 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 pocos 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.

Distintas tecnologías actuales como las basadas en 802.15.4 (Zigbee), 802.11 (Wi-Fi), Bluetooth, o la gran mayoría de las LPWA (Sigfox, LoRa, etc.) utilizan técnicas de acceso aleatorio basado en contienda.

En general, no existe un mecanismo que sea preferible frente a los otros, y la decisión de cuál es el más adecuado siempre estará vinculada a las características del tráfico de datos (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.

Imaginemos que un grupo de ocho personas se reúnen para intercambiar una información. Si cada persona tiene que impartir una charla de 15 minutos, la forma más eficiente de plantear el problema sería preparar un seminario de presentaciones en el que se reserven 15 minutos para cada persona. Esto sería un **mecanismo de asignación fija de recursos**. Si estas mismas personas constituyen una comunidad de vecinos que se reúnen 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. Este sería 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 invia-

ble proceder de la forma anterior. Habría que establecer un modo de asamblea con turnos de palabra e 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 principales técnicas existentes para resolver el problema tanto de la asignación fija como de la asignación dinámica de recursos son:

- División en tiempo (**TDMA**).
- División en frecuencia (**FDMA**).
- División en código (**CDMA**).
- División en espacio (**SDMA**).
- División en polarización (**PDMA**).
- División en frecuencias ortogonales (**OFDMA**).
- Técnicas de acceso aleatorio: **ALOHA**, **CSMA**, etc.

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 **MAI** (*multiple access interference*).

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 tiene 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**.

En las próximas subsecciones, se introducen las técnicas de acceso múltiple predominantes en los sistemas de comunicación relevantes para la industria 4.0. Estos son:

- División en frecuencia (**FDMA**).
- División en tiempo (**TDMA**).
- División en código (**CDMA**).
- División en frecuencias ortogonales (**OFDMA**).
- Técnicas de acceso aleatorio: **ALOHA**, **CSMA**, etc.

6.2. División en frecuencia: FDMA

6.2.1. Descripción

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 superponen en tiempo, pero de forma que sus espectros se mantienen ortogonales porque usan diferentes canales frecuenciales. Para poder recuperar la información de cada usuario, el receptor se sintoniza a la banda de frecuencias del usuario del que quiere recibir la información y, ayudado de una operación de filtrado, demodula el usuario de interés sin verse interferido por el resto de los usuarios.

La decisión de qué frecuencia utilizar depende del sistema de comunicaciones y está predefinida, en el caso de la asignación fija de recursos (FAMA); o es competencia del gestor de recursos, *scheduler*, en el caso de asignación dinámica de recursos por demanda (DAMA).

Una variante de la técnica FDM/A es el multiplexado por división en longitud de onda, WDM/A que, aunque conceptualmente es lo mismo, 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. Aunque conceptualmente es el mismo principio que FDM/A, como se ha explicado, en este caso el espectro se divide en bandas estrechas (llamadas subportadoras) que se modulan de manera independiente. Además, la forma de implementación técnica es completamente distinta.

En el caso de división en frecuencia, el hecho de tener de forma simultánea N usuarios transmitiendo a una tasa de R bits/s obliga a que el ancho de banda del sistema completo sea N veces mayor que el que necesitaría un usuario aislado o un sistema operando en división de tiempo, como veremos más adelante.

6.2.2. Sincronización

En un sistema FDM/A, 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**.

6.2.3. Sincronización: mecanismos de sincronismo y recuperación de portadora

Los mecanismos de sincronismo y recuperación de portadora se tienen que implementar tanto en equipos transmisores como en equipos receptores para que las diferencias entre los distintos 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 los usuarios para ajustar los osciladores respectivos. Este método (análogo a la inserción de cabeceras de sincronización en el caso de la división en tiempo, como se explica más adelante) implica una pérdida de eficiencia; efectivamente, se tendrá que destinar parte del espectro y parte de la energía disponible a la transmisión 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.

6.2.4. Sincronización: bandas de guarda

Las bandas de guarda son la solución análoga a los **tiempos de guarda** de sistemas por división en tiempo 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 pueden ser opcionales en algunos casos), las bandas de guarda en frecuencia **siempre son necesarias**. Aunque se tengan perfectamente sincronizados los osciladores de los diferentes usuarios compartiendo una banda de frecuencias, es necesario disponer de unas bandas de transición para llevar a cabo el filtrado de la señal con filtros realizables; los filtros ideales, infinitamente abruptos, son técnicamente imposibles de realizar.

Las bandas de guarda permiten simplificar el diseño de los filtros que se usan en demodulación para separar las señales y discriminar la señal de interés del resto de las posibles señales. Con estas bandas de guarda, los filtros de recepción no tienen que ser de elevada calidad y complejidad, de modo que se simplifica el diseño del terminal y se reduce su coste.

6.2.5. Sincronización: consideraciones prácticas

La introducción de pilotos de sincronización y de bandas de guarda implica una pérdida en la eficiencia del sistema. Efectivamente, parte del espectro radioeléctrico se usa para tareas que no son meramente el intercambio de información útil.

Existe, por lo tanto, 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.

Es relativamente habitual combinar las técnicas por división en frecuencia con técnicas por división en tiempo. Esta técnica, llamada MF-TDM (*multi-frequency time division multiplex / multiple access*), se caracteriza por dividir el espectro en bandas de frecuencia y, a su vez, dividir cada banda en diferentes *slots*. A cada usuario se le asigna una combinación de banda y *slot* de tiempo para transmitir. Esta es, por ejemplo, la técnica de acceso compartido usada en los sistemas GSM y GPRS de telefonía móvil.

6.2.6. Fortalezas de FDMA

Las principales fortalezas del acceso múltiple por división en frecuencia son:

- **Tecnología madura:** las técnicas por división en frecuencia son muy conocidas y han sido tecnológicamente probadas en distintos sistemas comerciales.
- **Asincronismo temporal:** al tratarse de una técnica asíncrona en el tiempo, no se necesita sincronización temporal entre usuarios.
- **Transmisión continua:** 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.
- **Ortogonalidad:** diseñando adecuadamente las bandas de guarda, es posible lograr ortogonalidad entre usuarios y, por lo tanto, evitar la interferencia entre usuarios del mismo sistema.

6.2.7. Debilidades de FDMA

Las principales debilidades del acceso múltiple por división en frecuencia son:

- **Sincronismo frecuencial:** se necesita un sincronismo entre las portadoras de todos los equipos que operan en el sistema.

- **Sensibilidad a los efectos de amplificadores no linealidades:** si la señal multiplexada se aplica a través de 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*).
- **Flexibilidad:** para poder dotar al sistema de flexibilidad en el cambio de recursos a los usuarios, es necesario cambiar las frecuencias asignadas a cada uno de ellos. Esto comporta disponer de osciladores variables y bancos de filtros que puedan filtrar en diferentes bandas y cambiar de una a otra de manera dinámica.

6.3. División en tiempo: TDMA

6.3.1. Descripción

En la técnica de multiplexado (TDM) o de acceso múltiple por división en tiempo (TDMA), el tiempo se divide en ranuras o intervalos de tiempo (que denominaremos *slots*). Cada usuario transmite su información de forma secuencial durante ciertas ranuras de tiempo, utilizando todo el ancho de banda disponible en el sistema, 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 (FAMA) o es competencia del **gestor de recursos** (en inglés, *scheduler*) según las demandas recibidas en el caso DAMA.

La estructura general de un sistema de multiplexación o de acceso múltiple por división en el tiempo TDM/A suele dividir el eje temporal en **tramas** (*frames*) de una cierta duración (T_S segundos); además, cada una de estas tramas se subdivide en N fragmentos de tiempo denominados *slots* que, por lo general, tienen todos la misma duración para facilitar la implementación práctica. 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). En algunos sistemas, un número determinado de tramas consecutivas se agrupan lógicamente, lo que da lugar al concepto de **supertrama**. La asignación de recursos se puede dar a nivel de *slot*, trama, supertrama, o cualquier otra entidad lógica que se defina según esta estructura temporal establecida.

En muchos casos, la operación de multiplexado / acceso múltiple se tiene que desarrollar **en tiempo real** y la aplicación no debe darse cuenta de que se están produciendo interrupciones en la capa física de la comunicación debidas al mecanismo de acceso al medio. En estos casos, la información se envía 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 almacenando 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 deben transmitir los datos durante el fragmento temporal asignado es la siguiente:

$$R_{TDM/A} = \frac{R \cdot T_S}{T_S/N} = R \cdot N. \quad (10)$$

6.3.2. Sincronización: justificación

En un sistema TDM/A es muy importante que tanto el transmisor como el receptor estén perfectamente **sincronizados** en tiempo, con el objetivo 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**.

6.3.3. Sincronización: cabeceras y señales de control

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 al intercambio de información entre los usuarios. Hay que aclarar 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 de control** 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 *multiplex* como son la identificación del tipo de trama y su orden dentro de la estructura.

6.3.4. Sincronización: tiempos de guarda

A pesar de que 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; 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 estos tiempos de guarda es opcional y su duración es variable, pero su presencia relaja las especificaciones de sincronismo de los equipos de transmisión y recepción, lo cual permite abaratar los costes de implementación de sistemas de comunicación con necesidad de sincronismo temporal.

6.3.5. Sincronización: consideraciones prácticas

Es interesante destacar que las cabeceras y bandas de guarda pueden resultar más o menos útiles según las características del sistema y tienen sus implicaciones en términos de rendimiento del sistema de comunicaciones.

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 encuentran geográficamente dispersos y tendrán diferentes tiempos de propagación de

las señales radio, será crítico mantener un sincronismo de red que obligará a introducir tiempo de guarda y secuencias de sincronismo de mayor duración.

Por otro lado, 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 los dos casos se **reducirá la eficiencia del sistema**. En el caso de la inserción de cabeceras en el canal, aparecerá una carga adicional de bits de control que deben añadirse a cada trama y dejan de usarse para la transmisión de información útil.

Del mismo modo, la inserción de tiempo de guarda comportará una reducción del tiempo total disponible para la transmisión de la información útil.

Por lo tanto, existe un compromiso entre **complejidad del sistema** (para garantizar una correcta sincronización) y la **eficiencia del sistema**. 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 particulares de TDMA en las que el problema del sincronismo entre usuarios se ve agravado por el hecho de que los usuarios que tienen que transmitir lo hacen desde lugares físicos geográficamente dispersos y con gran variedad de distancias respecto al receptor (o estación base). En estos casos, se deberá tener en cuenta que las distancias entre cada uno de los usuarios y la estación receptora serán diferentes y, por lo tanto, también los tiempos de propagación de los mensajes desde los usuarios hasta el receptor. Bajo estas condiciones, hay que garantizar que los mensajes lleguen sincronizados (dentro del *slot* asignado) a la estación receptora y es necesario compensar 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, es 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.

6.3.6. Fortalezas de TDMA

- **Tecnología madura:** las técnicas TDMA son muy conocidas y han sido tecnológicamente probadas en distintas aplicaciones.

- **Uso eficiente de la potencia:** 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 y la energía disponible en los dispositivos.
- **Potencia constante:** en estos sistemas, no es necesario ajustar la potencia transmitida por las diferentes estaciones terrestres, lo que simplifica la implementación práctica.
- **Simplicidad:** al trabajar todos los equipos en la misma frecuencia, se simplifica el circuito sintonizador de la cadena de radiofrecuencia (RF).
- **Libre de interferencias:** diseñando adecuadamente los tiempos de guarda, es posible asegurar la total ortogonalidad entre usuarios y, por lo tanto, evitar interferencias.
- **Flexibilidad:** las técnicas TDM/A ofrecen una elevada flexibilidad para reasignar los *slots* de tiempo a cada usuario (solo hay que reajustar el instante de tiempo al usuario que transmite), así como la cantidad de recursos asignados (a cada usuario se le puede asignar uno, dos o más *slots*, adaptando así la velocidad de transmisión según las necesidades). Además, estos sistemas ofrecen también una gran flexibilidad a la hora de decidir qué usuario hay que decodificar. Solo es necesario que el receptor ajuste el *slot* de tiempo que quiere demodular para conmutar entre usuarios.

6.3.7. Debilidades de TDMA

- **Sincronización:** al tratarse de una técnica síncrona en tiempo, es necesario 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. La señalización de sincronización implica pérdidas de eficiencia, al tener que dedicar recursos radio a información de control del sistema y no de datos.
- **Memoria:** todos los usuarios que operan en el sistema tienen que disponer de *buffers* en transmisión y recepción, puesto que la transmisión se hace a ráfagas.
- **Transmisión discontinua en tiempo:** debido a que los dispositivos acceden al medio a ráfagas, las cadenas de radiofrecuencia (y en especial, los amplificadores) deben estar conmutando (entre transmisión y silencio) en tiempo. Esta conmutación reduce la eficiencia del consumo de energía e introduce retardos que hay que tener en cuenta en el diseño del sistema.

- **Alta potencia de transmisión:** para no degradar las prestaciones del sistema, en comparación con otras alternativas, el dispositivo que transmite en cada *slot* debe hacerlo con la misma energía que consumiría si estuviera transmitiendo todo el tiempo (es necesario mantener la energía por bit). Esto implica 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.

6.4. División en código: CDMA

6.4.1. Descripción

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-interferencia), 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.

Una alternativa de multiplexación de datos en la que los usuarios comparten tiempos y frecuencia se conoce con el nombre de multiplexación **por división en código**. Estas técnicas se basan en los principios de funcionamiento de los sistemas denominados de **espectro ensanchado**.

Los principios de funcionamiento se basan en la existencia de secuencias pseudoaleatorias de 1 y 0 ortogonales que presentan unas excelentes propiedades de **autocorrelación**, y una **nula correlación mutua entre ellas**. Llamamos **código** a cada una de las secuencias pseudoaleatorias de un conjunto de secuencias que cumplan las características de gran autocorrelación y nula correlación mutua. Dada una longitud de secuencia, el número de códigos ortogonales es finito.

El principio de funcionamiento, explicado de modo sencillo, consiste en que se transmite la señal de cada usuario por uno de estos códigos, implementado en forma de tren de pulsos (*chips*). Si la velocidad de chip es mayor que la velocidad de bits de la señal original, la señal se ensancha en el dominio espectral, conservando la densidad de potencia de la señal original, pero repartiéndola en un ancho de banda muy superior. En recepción, todas las señales ensanchadas de usuarios, cada una con su código independiente, se reciben repartidas en el ancho de banda del sistema. En este punto, es posible implementar un banco de correladores para cada uno de los códigos. Dadas las propiedades de ortogonalidad entre códigos, la multiplicación de códigos ortogonales dará como resultado cero. Todas, excepto la multiplicación de un código con el

código usado para la señal de interés. Es decir, al multiplicar en el dominio temporal en recepción una señal ensanchada por el mismo código con el que fue ensanchada, es posible recuperar la señal original, observando el resto de las señales ensanchadas de otros usuarios como ruido. Si la diferencia de potencia entre la señal útil y el agregado de interferentes es adecuado, es posible decodificar la señal de interés.

Para que este sistema funcione, es necesario que todas las transmisiones se reciban con el mismo nivel de potencia en el receptor. Esto obliga a implementar control de potencia en lazo cerrado, lo que implica una continua sincronización entre el receptor y los dispositivos transmisores. Debido a esta complejidad, los sistemas CDMA tienen poca aplicación en el contexto de la industria 4.0.

Otro tema es que las técnicas de espectro ensanchado sí se utilicen en dos entornos:

- 1) En entornos donde la potencia recibida es igual para todos los dispositivos de manera natural; un claro ejemplo son las comunicaciones por satélite, en las que todos los dispositivos están a la misma distancia (en términos prácticos, desde el punto de vista radioeléctrico) del receptor en el satélite.
- 2) En entornos donde se use el ensanchado no para separar usuarios, sino para separar sistemas en bandas compartidas sin licencia. Este es el caso de las técnicas usadas por LoRa para operar en las bandas ISM y evitar la interferencia con otros sistemas.

6.4.2. CDMA síncrono

Un sistema síncrono CDM/A requiere que las secuencias moduladoras de todos los usuarios del sistema, **los códigos**, estén perfectamente sincronizadas temporalmente. La necesidad de este sincronismo recae en el hecho de que se utilizan secuencias moduladoras que son perfectamente ortogonales 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.

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 distintas 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-CDMA).

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 sistemas Qs-CDMA son las secuencias de Walsh-Hadamard generadas a partir de las filas de la matriz ortogonal de Walsh-Hadamard.

6.4.3. CDMA asíncrono

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.

6.4.4. CDMA con saltos de frecuencia (FH-CDMA)

Otro mecanismo para acceder al medio por división en código es el acceso al medio por saltos de frecuencia.

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

En esta variante, los diferentes usuarios siguen patrones de salto diferentes de forma que, si en el receptor se sigue el patrón de saltos de un usuario concreto, se consigue «seguir» los datos de este usuario como si se transmitieran de forma continua sin saltos de frecuencia. El resto de los usuarios no serán recibidos cuando transmiten a frecuencias diferentes.

Si el número de usuarios es elevado, podría 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.

En sistemas radio, esta técnica ofrece la ventaja de aportar, además del propio ensanchado de la señal, robustez frente a las injerencias del canal radio, así como diversidad en el dominio de la frecuencia.

6.4.5. Consideraciones prácticas: eficiencia espectral

En términos de eficiencia espectral (definida en bits/s/Hz), las técnicas CDM/A no son, en principio, ni más ni menos eficiente que las TDM/A o las 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 se pueden transmitir hasta L señales simultáneamente, compensando el incremento de espectro utilizado. Sin embargo, como en los casos anteriores de TDM/A y FDM/A, se genera 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 supondrá una pérdida en la eficiencia espectral (definida en bits/s/Hz) similar al resto de las 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.

6.4.6. Fortalezas de los sistemas CDMA

- Aunque históricamente no ha sido una tecnología muy utilizada, en la actualidad ya podemos hablar de tecnología madura: los sistemas de telefonía móvil (3G) y algunos sistemas de comunicaciones por satélite operan con esta técnica.
- 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, es posible lograr ortogonalidad entre usuarios y, por lo tanto, es una técnica libre de MAI.
- Permiten 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).
- Permiten una elevada flexibilidad al decidir qué usuario decodificar. Basta con que el receptor seleccione el código del usuario que quiere demodular para conmutar entre usuarios.

6.4.7. Debilidades de los sistemas CDMA

- 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-lejos. Este efecto 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.

6.5. División en tiempo y frecuencia: OFDMA

6.5.1. Descripción

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 el FDM/A, 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. Sin embargo, con 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. En función de las condiciones del canal aire

y las necesidades de los usuarios, se puede cambiar la asignación de subportadoras a cada usuario y la modulación que se usa en cada una de las subportadoras.

Este sistema es robusto a la propagación multicamino, ya que la duración de los símbolos que hay que transmitir es mayor que si no dividiésemos el ancho de banda disponible.

Hoy día, este sistema de transmisión es usado por la gran mayoría de los sistemas de comunicación que necesitan grandes velocidades de transmisión. Las tecnologías 4G y 5G, así como las últimas generaciones de Wi-Fi (802.11xx), se han desarrollado a partir de las técnicas OFDMA para compartir el acceso al medio radioeléctrico compartido.

6.5.2. Fortalezas de OFDMA

- La tecnología OFDM es muy madura: los actuales sistemas de televisión digital terrestre (TDT), algunas modalidades de Wi-Fi, y tanto la 4G como la 5G de comunicaciones móviles operan con esta técnica.
- Cuando el canal de comunicaciones introduce propagación 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, variar la cantidad de recursos asignados, lo que logra adaptar la velocidad de transmisión en función de las necesidades. Resulta mucho más flexible que FDMA y tanto o más que TDMA, al ofrecer un grado más de libertad, asignación de recursos en tiempo y en frecuencia.

6.5.3. Debilidades de OFDMA

Usando OFDMA, es necesario garantizar un sincronismo en frecuencia para conseguir que los diferentes usuarios transmitan la información en sus recursos tiempo/frecuencia asignados, sin interferir al resto de los usuarios. Un error de sincronismo puede ser más crítico que en el FDMA, y más difícil de minimizar con bandas de guarda.

6.6. Técnicas de acceso aleatorio

6.6.1. Introducción

Todos los mecanismos de acceso compartido presentados hasta ahora ofrecen técnicas libres de colisión entre usuarios y, por lo tanto, aseguran que todas las transmisiones que se establecen están garantizadas. Sin embargo, necesitan:

- 1) Asignar recursos a los usuarios de manera fija (FAMA).
- 2) O bien, asignar recursos a los usuarios de manera dinámica (DAMA), a través de un gestor de recursos centralizado.

La primera opción ofrece poca flexibilidad, y la segunda se puede volver inmanejable con gran cantidad de dispositivos, o cuando las condiciones del sistema de comunicación son altamente variantes. En estos casos, es conveniente usar técnicas de acceso aleatorio basadas en contienda. Aunque su rendimiento es peor que los sistemas sin aleatoriedad, ofrecen:

- 1) **Retardos muy bajos:** el acceso al canal compartido puede ser muy rápido desde el momento en el que se necesita acceder al medio.
- 2) **Ejecución distribuida:** no existe la figura de un planificador de red o de un coordinador centralizado, sino que el acceso se hace de manera autónoma y distribuida.
- 3) **Extrema flexibilidad:** para añadir o eliminar dispositivos en una red de comunicaciones. No es necesario conocer la red para ponerla en marcha, aceptando la adición de nuevos terminales, o posibles fallos en algunos nodos de comunicación.
- 4) **Gran rendimiento:** en algunos escenarios de aplicación, pueden llegar a ofrecer mejor rendimiento que las técnicas estáticas (FAMA) o dinámicas centralizadas (DAMA), dada su enorme capacidad de adaptación distribuida.

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 avanzado 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.

Existen gran variedad de técnicas de acceso aleatorio en la literatura técnica y científica. En este material, tan solo presentamos dos de las principales técnicas que han servido de inspiración para el gran número de variaciones que se pueden encontrar. Estas son ALOHA y CSMA, y se describen a continuación.

6.6.2. ALOHA y sus variantes

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 los setenta, tenía por objetivo conectar diferentes ordenadores de los distintos campus de la Universidad de Hawai 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 ACK (*acknowledgment*) explícito 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.

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 quiera 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:

$$P_{nocolision} = e^{(-2 \cdot T \cdot \lambda)} = e^{(-2 \cdot G)}. \quad (11)$$

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 :

$$\lambda' = \lambda \cdot e^{(-2 \cdot G)}, S = G \cdot e^{(-2 \cdot G)}. \quad (12)$$

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 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 ningún otro paquete (observad que ha desaparecido el factor 2 que aparece en el Pure ALOHA):

$$P_{nocolision} = e^{(-T \cdot \lambda)} = e^{(-G)}. \quad (13)$$

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 :

$$\lambda' = \lambda \cdot e^{(-G)}, S = G \cdot e^{(-G)}. \quad (14)$$

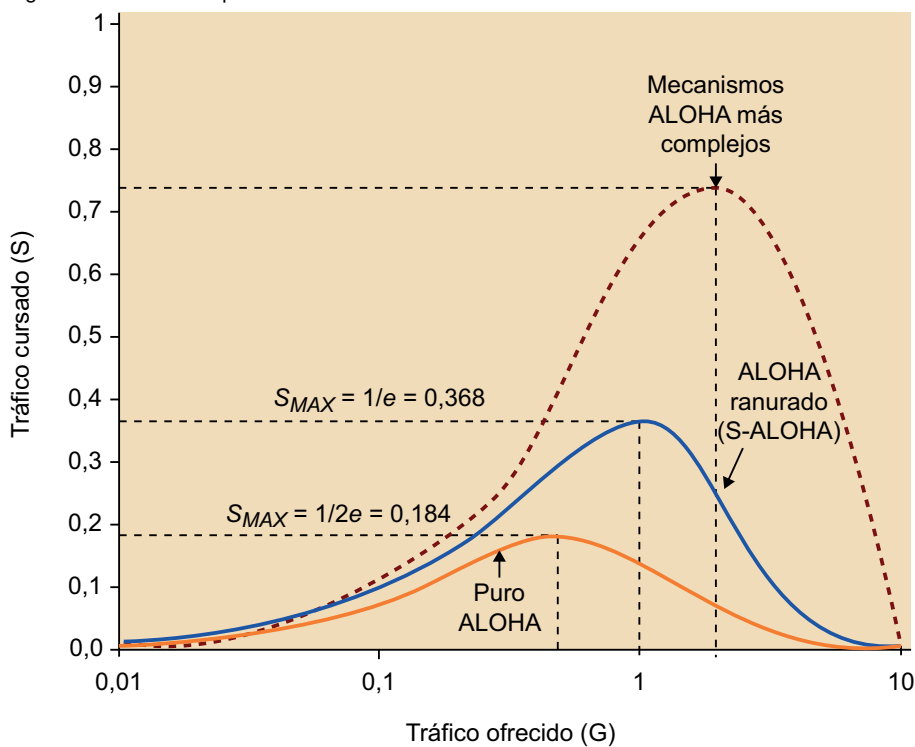
La figura 1 ilustra la relación entre el tráfico ofrecido en la red G y el tráfico cursado (con éxito) por la red S para los dos protocolos: ALOHA y S-ALOHA.

Tal y como se puede observar, hay un máximo en el tráfico que se puede cursar en ALOHA 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 $S = 1/e = 0,368$.

Es interesante observar que estos mecanismos solo pueden aplicarse cuando el tráfico ofrecido en la red es pequeño. Para valores de tráfico por encima del umbral, **el protocolo se colapsa rápidamente**, puesto que el número de colisiones crece de forma rápida.

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 1. Rendimiento protocolos ALOHA



Desde hace muchos años se han estudiado, y todavía se estudian y se desarrollan, otras variantes del protocolo ALOHA 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 decodificar más de un mensaje simultáneamente cuando se ha producido un número reducido de colisiones. Este es el ejemplo de **esquemas de cancelación sucesiva de interferencias (SIC)**, o **esquemas de cancelación paralela de interferencias (PIC)**.

6.6.3. CSMA y sus variantes

Los protocolos basados en ALOHA solo pueden lograr reducidas tasas de transmisión y solo se pueden implementar en situaciones en las que el tráfico ofrecido al sistema es reducido: pocos mensajes por segundo, longitudes de paquete cortas, y bajo número de dispositivos simultáneos.

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 (escucha del canal antes de transmitir). Estas técnicas escuchan y analizan el estado del canal antes de transmitir. Si el canal está libre, se transmite. Si el canal está ocupado, se espera antes de intentar transmitir.

Entre los protocolos más populares se encuentra el protocolo CSMA, del inglés *carrier sensing multiple access*, y sus variantes, muy extendidas en las redes de área local. A modo de ejemplo, el medio de acceso en las redes Wi-Fi sigue la filosofía de la técnica CSMA.

En una red donde todos los usuarios tienen capacidad para escuchar el canal, **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, **CSMA no persistente**, 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/CD (CSMA con detección de colisiones), y se utiliza de forma estándar en el protocolo Ethernet (IEEE 802.3).

En comunicaciones por radio, debido a la naturaleza del transmisor, no es posible transmitir y escuchar a la vez, por lo que 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. Como alternativa al mecanismo CSMA/CD, aparece el mecanismo CSMA/CA (CSMA con evasión *-avoidance-* de colisiones).

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 el 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 (RTS, *request to send*) y el otro de aceptación (CTS, *clear to send*) 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.

Resumen

En este material, nos hemos centrado en estudiar las comunicaciones vía radio. Hemos visto que los canales radio son diferentes a los canales cableados y, por lo tanto, requieren un estudio particularizado.

De entrada, la propagación de las ondas radioeléctricas implica que la potencia de señal que se recibe en un receptor varía en función del tiempo y la distancia respecto del transmisor. Esto se debe a las pérdidas de propagación por el medio, a los desvanecimientos lentos (*shadowing*) y al *fast-fading* (desvanecimientos rápidos). Además, en escenarios donde hay movimiento se produce el efecto *Doppler*, que requiere un tratamiento específico en el diseño de los sistemas de comunicaciones; no todos los sistemas de comunicación toleran del mismo modo el movimiento.

Además de las pérdidas de propagación, el canal introduce ruido, interferencias, y distorsión en la señal.

La distorsión introduce dispersión temporal y frecuencial. En función de cómo se dé esta distorsión y dispersión, los canales se pueden clasificar según canales de banda ancha o de banda estrecha. Las características de los sistemas de banda ancha de y de banda estrecha son diferentes.

Además, hemos introducido los conceptos de **cobertura**, **link budget**, y **diversidad**, ya que son conceptos ampliamente utilizados para comparar tecnologías de comunicación por radio.

En este material, hemos visto también las principales modulaciones digitales que se usan en sistemas de comunicación por radio: BPSK, M-QAM, y FSK.

Finalmente, hemos introducido las técnicas de acceso múltiple al canal radio; siendo el aire un medio compartido por todas las comunicaciones por radio, es necesario disponer de técnicas que permitan separar sistemas, aplicaciones y usuarios en el medio físico. En este módulo hemos introducido los principios de la división en frecuencia (FDMA), tiempo (TDMA), código (CDMA), división en tiempo y frecuencias ortogonales (OFDMA), y técnicas de acceso aleatorio (ALOHA, CSMA, y otras opciones).

En este material hemos introducido, por lo tanto, muchos conceptos que se usarán en los próximos materiales para describir las tecnologías de comunicación por radio existentes, y para poder compararlas, entendiendo las bondades y debilidades de todas ellas. El objetivo, de nuevo, no es entender los detalles técnicos de todas las tecnologías, sino adquirir un criterio para poder comparar entre ellas, y poder seleccionar las mejores alternativas para nuestras soluciones para la industria 4.0.