

Teoría de la codificación y modulaciones avanzadas

Margarita Cabrera
Francesc Rey
Francesc Tarrés

Revisión a cargo de:
Francesc Tarrés
Francesc Rey

PID_00185030


Margarita Cabrera

Ingeniera en Telecomunicaciones por la Escuela Técnica Superior de Telecomunicaciones de Barcelona (ETSETB) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) en 1986. Doctora en Telecomunicaciones por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) en 1991. Es profesora titular de Universidad del departamento de Teoría de la señal y Comunicaciones (TSC) de la UPC. Desde 1990 imparte docencia en los estudios de Telecomunicaciones de la ETSETB en las temáticas de comunicaciones analógicas y digitales, procesamiento de señal y matemáticas orientadas a las comunicaciones. Tiene una larga experiencia en participación en proyectos de innovación docente basados en el uso de nuevas tecnologías. Actualmente es responsable del proyecto COMWEB (Comunicaciones en la web), patrocinado por AGAUR y por la UPC y que se desarrolla en el departamento de TSC de la UPC. Web del grupo, incluyendo la página personal: <http://gps-tsc.upc.es/comm2>


Francesc Rey

Ingeniero de Telecomunicaciones por la Escuela Técnica Superior de Telecomunicaciones de Barcelona (ETSETB) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) en 1997 y doctor en Telecomunicaciones por la UPC en el 2006. Actualmente es profesor agregado en el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones (TSC) de la UPC. Desde el 2009 ha impartido docencia en los estudios de Telecomunicaciones en la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Vilanova i la Geltrú (EPSVG), en la Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Aeroespacial de Castelldefels (EETAC) y en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicaciones de Barcelona (ETSETB). Su experiencia docente está centrada en las temáticas de procesamiento de la señal, comunicaciones digitales y comunicaciones espaciales. Sus intereses en investigación se enmarcan también en el área de procesamiento de la señal aplicado a comunicaciones. Tiene una larga experiencia en proyectos de investigación nacionales e internacionales, así como contratos con empresas nacionales y con la Agencia Espacial Europea. Página personal: <http://gps-tsc.upc.es/comm/frey/>.


Francesc Tarrés

Profesor en la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), donde actualmente es responsable de las asignaturas de Procesado Digital de Señal y de Sistemas Audiovisuales en la Escuela Politécnica Superior de Castelldefels (EPSC). Ha colaborado en el diseño de planes de estudio y de contenidos de asignaturas en diversas titulaciones y escuelas del sector de las Telecomunicaciones, como Ingeniería la Salle la Escuela Politécnica del Baix Llobregat y la EUEITT, centrándose en las temáticas de procesamiento de imagen y sistemas de difusión de contenidos audiovisuales. También ha organizado y participado en cursos de posgrado y másteres para diferentes empresas como SONY, Televisió de Catalunya, Panasonic, Mitsubishi Electric, Fundación Vodafone, Centro de la Imagen y Tecnología Multimedia, etc. Ha publicado libros de texto en las áreas de procesamiento digital de señal, sistemas de televisión analógica y digital y sistemas multimedia. Página personal en: http://gps-tsc.upc.es/GTAV/Tarres/Members_Tarres.htm

La revisión de este material docente ha sido coordinada por la profesora: Eugènia Santamaría (2012).

Primera edición: septiembre 2012
 © Margarita Cabrera, Francesc Rey, Francesc Tarrés
 Todos los derechos reservados
 © de esta edición, FUOC, 2012
 Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona
 Diseño: Manel Andreu
 Realización editorial: Eureka Media, SL
 Depósito legal: B-20.493-2012

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño general y de la cubierta, puede ser copiada, reproducida, almacenada o transmitido de ninguna manera ni por ningún medio, tanto eléctrico como químico, mecánico, óptico, de grabación, de fotocopia, o por otros métodos, sin la autorización previa por escrito de los titulares del copyright.

Introducción

Los contenidos de esta asignatura corresponden a la continuación de los contenidos de la asignatura *Sistemas de comunicación I*, por lo que desarrollaremos los conceptos importantes de la capa física de un sistema de comunicaciones que no se estudiaron en profundidad en aquella asignatura, entre otras razones, por la limitación de tiempo de un curso. De entre todas las posibles materias que se podrían incluir para ampliar los conocimientos de sistemas de comunicaciones digitales, hemos seleccionado aquellas que, en general, se especifican en los documentos de estandarización de la capa física de los sistemas de comunicaciones digitales. Sin duda, habría muchos más temas que se podrían incluir aquí, como por ejemplo, temas de recuperación de sincronismo, tipos de canal y efecto de los canales, ecualización, diseño de módems, etc. Dejamos todos estos aspectos para otra asignatura, *Sistemas de comunicación II*. Consideramos que los temas aquí tratados son una buena elección para continuar el estudio iniciado con la asignatura *Sistemas de comunicación I* y esperamos que después de esta asignatura, adquiriréis motivación y curiosidad para profundizar, por vuestra cuenta, en todos aquellos aspectos que complementan los que ya se han incluido en el texto.

La asignatura está estructurada en dos partes bien diferenciadas. La primera trabaja los aspectos de codificación de fuente y canal, y la segunda profundiza en técnicas de modulación y/o transmisión avanzadas, en concreto, técnicas de espectro ensanchado, multiplexación OFDM y modulaciones digitales de fase continua.

Como paso previo al estudio del programa de la asignatura, se propone repasar los contenidos de la asignatura *Sistemas de comunicación I* y, en especial, los relacionados con comunicaciones digitales: esquema general de un sistema de comunicaciones digitales, modulaciones digitales en banda base y modulaciones digitales QAM.

En el **módulo 1**, “Codificación de fuente”, estudiaremos el proceso mediante el cual se convierte una información de naturaleza analógica a una secuencia de bits y, posteriormente, analizaremos diversas técnicas para representar de forma compacta esta secuencia de bits. Para verificar que nuestra representación de la información es la adecuada deberemos establecer mecanismos para ‘medir’ la cantidad de información proporcionada por un mensaje. Con este objetivo introducimos algunos conceptos elementales de la teoría de la información como la definición formal de *información*, la *entropía* (o información media proporcionada por una fuente) y la representación de los mensajes mediante códigos de longitud variable. Finalmente, se introducen algunos ejemplos sencillos de sistemas de compresión de información para señales de audio y vídeo.

En los **módulos 2 y 3**, “Codificación de canal I: introducción y códigos bloque” y “Codificación de canal II: códigos convolucionales”, se estudia el proceso de codificación de canal analizando primero los códigos bloque y, a continuación, los códigos convolucionales. En el módulo 2, después de una introducción a la codificación de canal en la que se trata de los principios básicos de la generación de redundancia en la señal de forma controlada, con el objetivo de detectar los errores o de corregirlos, se presentan los códigos de Hamming y los códigos cíclicos, con especial énfasis en las características de los códigos de Reed-Solomon por su amplio uso en diferentes aplicaciones. En el módulo 3, nos centramos en los códigos convolucionales, y especialmente, en la representación de un codificador en diagramas de estados y diagramas de Trellis, y en uno de los algoritmos más utilizados para la descodificación de estas secuencias: el algoritmo de Viterbi. También se presentan los conceptos de *concatenación de códigos* y *puncturing*, y algunos conceptos generales sobre los turbo códigos.

En el primer apartado del **módulo 4**, “Técnicas de comunicaciones de espectro ensanchado”, presentaremos los conceptos básicos de los sistemas de modulación por secuencia directa (DS), de forma muy intuitiva y sin excesivo rigor. Esta presentación nos permitirá tener una idea general de los sistemas DS, sus principios de funcionamiento y los mecanismos que se utilizan para protegerse de las interferencias. En apartados posteriores estudiaremos con cierto detalle el sistema de espectro ensanchado por secuencia directa (DS), y veremos cómo es posible generar secuencias pseudoaleatorias y distintos subsistemas para la adquisición y el seguimiento del sincronismo en estos sistemas. Veremos que la adquisición y el seguimiento del sincronismo es uno de los aspectos más críticos de los sistemas de espectro ensanchado y que, en la mayoría de aplicaciones prácticas, se requieren sistemas complejos. Posteriormente, analizaremos los sistemas de DS con mayor rigor y detalle matemático, derivando las ecuaciones que permiten obtener la probabilidad de error. Por último, veremos con detalle una de las aplicaciones de los sistemas de espectro ensanchado, su uso como técnica de acceso múltiple. Analizaremos el número de usuarios en los sistemas de DS y definiremos el margen de interferencias, un parámetro que resulta útil en el diseño y el dimensionado de estos sistemas.

En el **módulo 5**, “Multiplexación por división en frecuencias ortogonales (OFDM)”, se presenta la modulación OFDM como una alternativa frente a la modulación de portadora única o QAM. Tras un análisis del formato de señal OFDM, se introduce la utilización de los algoritmos IFFT y FFT respectivamente como modulador y demodulador prácticos de esquemas OFDM. Se analiza el efecto del canal sobre la señal OFDM y se presenta la finalidad del prefijo cíclico y del tiempo de guarda como estrategias para combatir la ISI y mantener la ortogonalidad entre las diferentes frecuencias utilizadas. Posteriormente, se detallan algunos aspectos prácticos como, por ejemplo, la ocupación espectral y la adaptación de la señal a una determinada máscara o plantilla espectral. El módulo acaba con la presentación de los estándares de comunicaciones radio basados en OFDM y la definición de sus parámetros particulares.

Finalmente, el **módulo 6** presenta las modulaciones digitales de fase continua. Se justificará la necesidad de este tipo de modulaciones, especialmente cuando la señal transmitida se encuentra con fuertes no-linealidades provocadas, por ejemplo, por la presencia de amplificadores no lineales. El resto del módulo está estructurado como una evolución natural desde la modulación lineal más simple, las QPSK, hasta modulaciones CPM más complejas, la GMSK, pasando por las modulaciones OQPSK, CPFSK y MSK. Destacamos la importancia de esas modulaciones que, por ejemplo, se encuentran en estándares comerciales como el sistema de telefonía móvil GSM y el sistema de telefonía inalámbrica DECT.

1. Introducción a los sistemas de comunicaciones digitales

En este apartado revisaremos, a modo de introducción a la asignatura, los elementos básicos que constituyen un sistema de comunicaciones, que son el transmisor, el canal de comunicaciones y el receptor. Se analiza especialmente el procesamiento o transformación que experimentan las señales en estos bloques básicos.

El mensaje que se transmite entre una fuente y un destinatario se representa mediante una señal que se describe en términos probabilísticos, puesto que es de naturaleza aleatoria. A continuación, os recordamos los tres grandes bloques que forman un sistema de comunicaciones:

- El **transmisor** procesa la señal mensaje generada por la fuente de información y proporciona la señal transmitida adecuada al canal o medio de transmisión. A su vez, incluye diferentes subsistemas, entre los que destacan las etapas de codificación y de modulación.
- El **canal** de transmisión es el medio eléctrico que cubre la distancia entre el transmisor y el receptor. Puede estar constituido por un cable, un rayo láser o una onda electromagnética (radio). Una de las características inherentes al canal de comunicaciones es que la señal transmitida se degrada al ser propagada por el medio.
- El **receptor** opera sobre la señal resultante a la salida del canal de comunicaciones. Tiene una misión doble: por un lado, se encarga de eliminar, en la medida de lo posible, los efectos producidos por el canal; por otro lado, tiene que adecuar la señal recibida al destinatario realizando las operaciones inversas al transmisor, por lo que incluirá etapas de decodificación y de desmodulación.

En la figura 1 se presenta un diagrama de bloques funcional, con el que, sin duda, ya estaréis familiarizados. En esta representación, podemos observar que el transmisor está formado por cuatro bloques elementales, cuyas funciones se detallan en los apartados siguientes. En la gráfica, también se indica de manera específica que el canal presenta una respuesta al impulso que puede introducir distorsiones sobre la señal transmitida, a las que se pueden añadir otros efectos no deseados, como la presencia de interferencias y de ruido. Por último, se detallan los elementos que constituyen el receptor, que esencialmente realizan las funciones inversas a las que llevaba a cabo el transmisor.

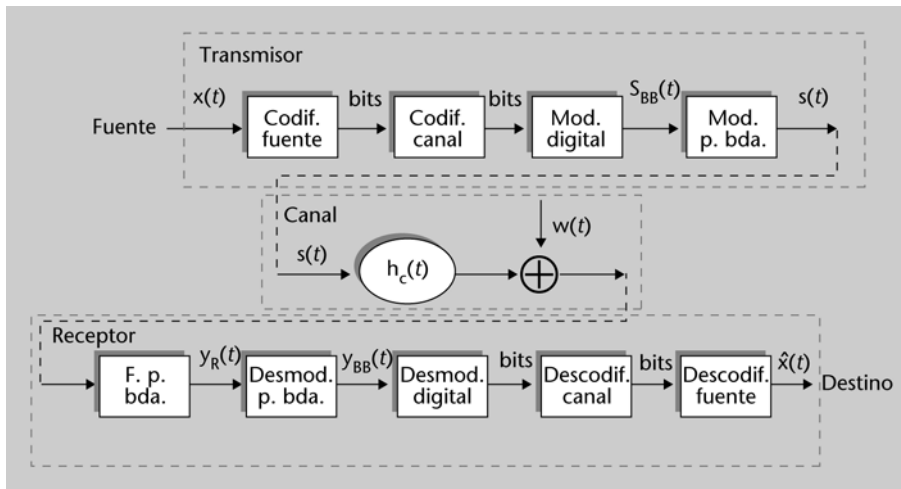


Figura 1. Diagrama de bloques funcional de cada uno de los tres subsistemas que forman un sistema de transmisión.

El bloque de transmisión es el que se encarga de procesar la fuente que queremos enviar al receptor y de acondicionarla para que pueda ser recibida con fiabilidad. El transmisor está constituido por cuatro bloques, que realizan funciones conceptualmente diferentes y cuya función global es la de acondicionar el flujo de bits binario que queremos transmitir al medio de transmisión. Además, el tratamiento de los datos que se realiza en cada bloque no es único, sino que admite un gran número de alternativas tecnológicas cuya selección para un determinado sistema de comunicaciones no resulta evidente.

1.1. Codificación de fuente

La función del codificador de fuente es la de obtener una secuencia de bits que represente de manera eficiente la información que queremos transmitir. En general, la información que queremos transmitir puede provenir de una fuente analógica o de una fuente digital. Una fuente analógica puede ser la tensión obtenida a la salida de un micrófono, convenientemente amplificada, por lo que se puede representar como una función real (la tensión) de variable real (el tiempo). Las fuentes digitales sólo pueden tomar unos valores predefinidos, por lo que su conversión a una secuencia de bits es más o menos directa.

El codificador de fuente tiene que ser capaz de establecer una representación eficiente de la información. Hablamos de “una representación eficiente” cuando la cantidad total de bits transmitidos es tan reducida como sea posible, evidentemente con la restricción de que el receptor pueda recuperar la señal original con suficiente precisión. La codificación de fuente trata, por lo tanto, de métodos que permiten comprimir la información, extrayendo toda la redundancia existente en los datos originales.

En este sentido, aparecen dos tipos diferentes de codificadores de fuente:

- En los codificadores sin pérdidas, la secuencia de bits que se envía al canal tiene que permitir recuperar de manera exacta la secuencia de bits de la in-

formación original. En el caso de que la información original proceda de una fuente analógica, entenderemos que podemos recuperar de manera exacta los bits que representan la señal analógica a la salida del proceso de conversión a digital. Los codificadores sin pérdidas se suelen utilizar en sistemas de comunicación que transmiten información asociada a tablas de datos, texto, documentos o programas en los que resulta crucial recuperar de manera totalmente exacta la información original. Como ejemplos de sistemas de compresión sin pérdidas, se pueden considerar todas las aplicaciones informáticas de compresión de datos: WinRar, Winzip, etc. También hay algoritmos de compresión sin pérdidas para señales de audio y vídeo (APE, TIFF sin pérdidas, etc.).

- Los codificadores con pérdidas se aplican a la transmisión de señales de audio y de vídeo. En este caso, basta con que el sistema visual o auditivo humano sea incapaz de distinguir entre la información original y la que recuperamos de manera aproximada. Si recuperar la información sólo de manera aproximada permite comprimir mucho más el flujo de bits, esta reducción puede compensar la posible pérdida de calidad, sobre todo si esta pérdida no puede ser apreciada por el usuario. Como ejemplos de compresión con pérdidas, se pueden mencionar el JPEG (que se aplica a la codificación de fotografías), el MP3 (que se utiliza para comprimir audio) o los sistemas de compresión MPEG-2 y MPEG-4 (que corresponden a la compresión de señales de audio y de vídeo en equipos domésticos como DVD de vídeo, iPod, PSP, etc.).

Resumen

La función del codificador de fuente es extraer la redundancia existente en la fuente original reduciendo tanto como se pueda el número de bits necesarios que se han de transmitir. Hay sistemas de compresión sin pérdidas, en los que la información original se recupera de manera exacta, y sistemas con pérdidas, en los que sólo se puede recuperar la señal original de manera aproximada.

1.2. Codificación de canal

La codificación de canal transforma los bits con objeto de proteger la información ante eventuales degradaciones de la señal que pudieran producir la pérdida de algunos bits en el receptor. Evidentemente, la estrategia para proteger la información exige la introducción de cierta redundancia en los datos, de forma que el volumen de bits a la salida es siempre más grande que el número de bits a la entrada.

La introducción de la redundancia adicional se puede utilizar con dos estrategias diferentes: la detección de errores y la corrección de errores. En el primer caso, el objetivo es que el receptor pueda detectar que los datos que está recibiendo no son correctos, por lo que puede solicitar al transmisor que los vuelva a transmitir. Es un sistema adecuado para aquellas aplicaciones en las que el tiempo real no es crítico, como la transferencia de ficheros. La principal ventaja de los sistemas de detección de errores es que requieren pocos bits adicionales de redundancia.

Si se utilizan estrategias de corrección de errores, el receptor tendrá que ser capaz de detectar no sólo que la información es incorrecta, sino también cuáles

son los bits que se han recibido de manera incorrecta y corregirlos. Evidentemente, estas estrategias requieren que se introduzca una mayor cantidad de redundancia en la secuencia de datos original.

Se puede observar un aparente carácter contradictorio entre los bloques de codificación de fuente y de canal, puesto que si uno de ellos intenta extraer al máximo la redundancia existente en los datos originales, el otro introduce redundancia para poder detectar o corregir la presencia de errores en los bits recibidos. Es importante reconocer que los dos procesos son necesarios y que de ninguna manera son recíprocos el uno del otro. Es decir, la redundancia que se extrae en el codificador de fuente es una redundancia inherente a los propios datos, que aunque estuviera presente, no permitiría que el receptor pudiera corregir o detectar la presencia de errores en la información recibida. Es, por tanto, una redundancia que no resulta útil para el control de errores y que es aconsejable eliminar. En cambio, en el codificador de canal, la redundancia se introduce de manera “controlada” y precisa. Cada uno de los bits de redundancia que se introducen tiene una relación matemática clara con el resto de bits de la secuencia de información. Esta relación matemática precisa permite que el receptor compruebe los datos recibidos y, si no coinciden con lo que se esperaba, puede intentar corregirlos o, como mínimo, detectar la existencia de errores.

Desde el punto de vista práctico, un codificador de fuente con pérdidas para señales de audio o vídeo puede comprimir la información en un factor de 10 veces (audio) o 100 veces (vídeo) aproximadamente. Es decir, el volumen de los datos comprimidos en un codificador MPEG de vídeo puede ser cien veces menor que el de los datos originales. En un codificador de fuente sin pérdidas, la reducción de datos es más pequeña, pero puede tomar valores situados entre 2 y 4. Al contrario, la redundancia controlada que se introduce en el codificador de canal es, en la mayoría de las aplicaciones prácticas, inferior a 2. En la figura 2 se muestra de manera esquemática cómo los bloques de codificación de fuente y de canal extraen e introducen redundancia en los datos. La figura indica de manera explícita que el codificador de fuente reduce la medida del archivo y que el codificador de canal introduce redundancia de manera controlada, con lo que la medida del archivo vuelve a aumentar. En general, la codificación de fuente significa una reducción del número de bits considerablemente mayor que la redundancia que introduce el codificador de canal.

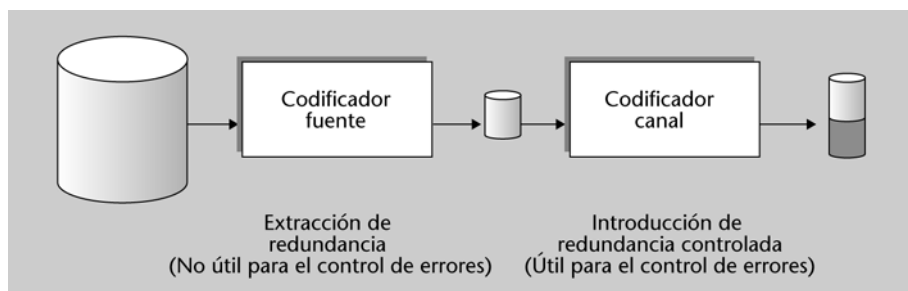


Figura 2. Extracción e inserción de redundancia en los datos para los codificadores de fuente y de canal.

Resumen

El codificador de canal introduce redundancia controlada en la información que se ha de transmitir para facilitar la detección o la corrección de errores en el receptor en caso de que se deteriore la señal transmitida. La redundancia que se extrae en el codificador de fuente no es útil para controlar errores en el receptor, puesto que no existen relaciones matemáticas precisas entre los bits.

1.3. Modulador digital

El modulador digital es otro de los componentes clave en el diagrama de bloques del transmisor que hemos mostrado en la figura 1. Este bloque tiene como misión transformar la secuencia de bits resultante del codificador de canal y convertirla en una señal continua en tiempo que se manifiesta como una señal eléctrica o diferencia de tensión entre dos puntos y que va variando en el tiempo.

El modulador digital en “banda base” genera modulaciones de impulsos por amplitud (PAM) a partir de una secuencia de bits y se denomina “en banda base” porque el contenido frecuencial de la señal modulada de salida se distribuye alrededor de la frecuencia cero.

El parámetro más significativo de la secuencia de bits es la velocidad a la que se transmiten, y el parámetro más significativo de la señal continua modulada es el ancho de banda que ocupa alrededor de la frecuencia cero. Ambos parámetros están relacionados de manera lineal. A continuación, se recuerdan los parámetros de interés que se han de considerar en el estudio de una señal modulada digitalmente:

- **Velocidad de bit o tasa de transmisión (R_b).** Es el número de bits por segundo que se transmiten por el sistema de transmisión. Sus unidades son bits por segundo o, abreviadamente, bps.
- **Tiempo de bit (T_b).** Es el tiempo transcurrido entre cada dos bits consecutivos a la entrada del modulador digital y se define como el inverso de la velocidad de bit.
- **Velocidad de símbolo (R_s).** Es el número de símbolos por segundo que se transmiten por el sistema de transmisión. Puesto que cada símbolo transporta b bits, se relaciona con la tasa de transmisión según la relación: $R_s = R_b / b$. Las unidades de este parámetro se denominan *baudios*. Un baudio equivale a un símbolo por segundo.
- **Tiempo de símbolo (T_s).** Es el tiempo transcurrido entre cada dos símbolos consecutivos a la entrada del conformador de impulsos, $T_s = b \cdot T_b$.

Otro aspecto importante en el estudio de las modulaciones digitales consiste en la obtención de la probabilidad de error que ofrece el sistema como una función del cociente de la energía media de la señal útil recibida por bit y la densidad espectral de ruido. Este cociente se representa, en general, como E_b / N_0 . En el apartado siguiente recordaremos el valor obtenido para la probabilidad de error en algunas modulaciones digitales.

1.4. Modulador paso banda

Una vez realizada la modulación digital de tipo PAM, disponemos de una señal cuya forma de onda se ha acondicionado para que el receptor pueda identificar de manera fiable los bits que forman el mensaje. El modulador paso banda, representado como parte del transmisor de la figura 1, es el encargado de trasladar la señal en banda base a una ocupación espectral alrededor de una frecuencia determinada y, en general, mucho más alta que el ancho de banda que ocupa la señal en banda base. Las modulaciones digitales paso banda se dividen en modulaciones digitales lineales de tipo QAM y modulaciones no lineales, como por ejemplo, la modulación GMSK.

Las modulaciones QAM son similares a las modulaciones digitales de banda base de tipo PAM. La diferencia entre las dos reside en el margen de frecuencias que ocupan. Mientras que las modulaciones PAM se utilizan en comunicaciones por cable, con recorridos cortos y punto a punto, las modulaciones QAM se usan en frecuencias portadoras de MHz y GHz, y ocupan anchos de banda que son regulados dentro de los diferentes estándares para asignar un determinado margen frecuencial a cada señal de tipo QAM. Recordad que una modulación QAM es una modulación paso banda en la que tanto la componente en fase como la componente en cuadratura de la modulación se expresan como una modulación de tipo PAM. Al combinar los símbolos o niveles de la componente en fase con los símbolos o niveles de la componente en cuadratura, se obtiene el denominado *espacio de señal* o *constelación de señal*. En la figura 3 se representa el espacio de señal de las modulaciones QPSK, 16QAM y 8PSK para recordar algunas de ellas. Asimismo, en la tabla 1 se recuerda para cada una el valor de la probabilidad de error expresado en función del cociente de energías E_b / N_0 .

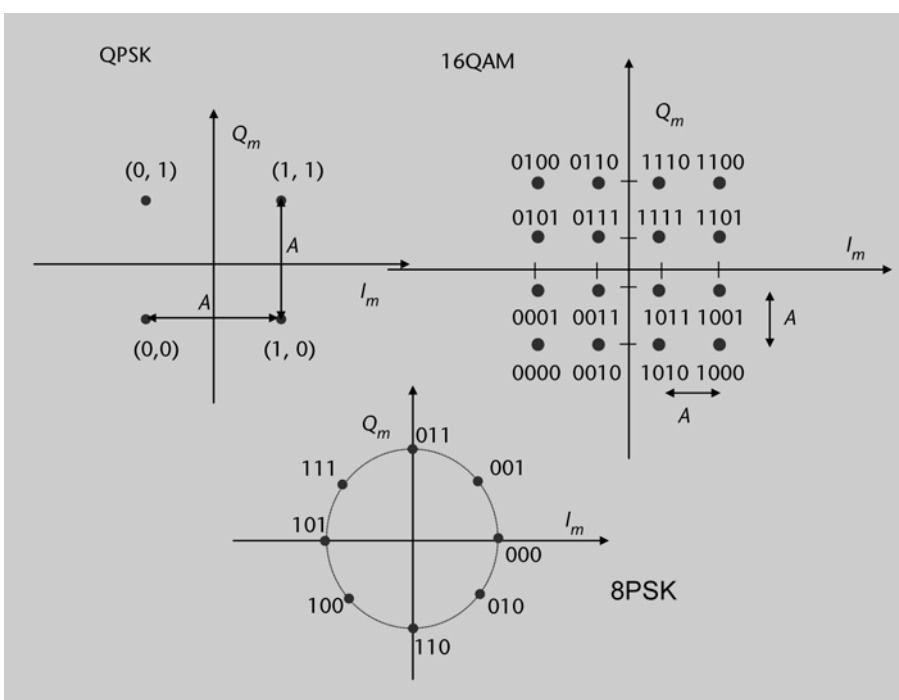


Figura 3. Espacio de señal de las modulaciones QPSK, 16QAM y 8PSK.

QPSK	16QAM	8PSK
$P_b = Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{N_0}}\right)$	$P_b = \frac{1}{2}P_e = \frac{3}{4}Q\left(\sqrt{\frac{4}{5}\frac{E_b}{N_0}}\right)$	$BER_{8PSK} \approx \frac{2}{3}Q\left(\sqrt{6\text{sen}^2\left(\frac{\pi}{8}\right)\frac{E_b}{N_0}}\right)$

Tabla 1. Probabilidad de error de bit (BER) de las modulaciones QPSK, 16QAM y 8PSK. Se ha considerado transmisión sobre canal ideal de ruido aditivo blanco gaussiano.

En el estudio de las modulaciones de espectro ensanchado (módulo 4) y de las modulaciones OFDM (módulo 5), conviene tener presentes las modulaciones QAM y sus propiedades, puesto que, a su vez, constituyen la base de los dos tipos de técnicas de modulación. Las modulaciones CPM, que se verán en el módulo 6, son modulaciones angulares relativamente complejas de implementar y de demodular, especialmente cuando se comparan con las modulaciones lineales de tipo QAM. Sin duda, la modulación CPM más popular es la modulación GMSK, utilizada en el sistema de telefonía celular GSM.

1.5. Receptor

El receptor es la parte del sistema situada físicamente en el punto de destino, y su misión consiste en recuperar la señal mensaje a partir de la señal recibida. Para realizar esta función con las mejores garantías de calidad, se tienen que realizar las operaciones inversas a las ejecutadas en el transmisor, pero además, se han de efectuar funciones adicionales para combatir aquellos efectos no deseados que el canal ha provocado sobre la señal transmitida.

En un sistema de demodulación digital básico, se deben realizar las funciones indicadas en la figura 1:

- **Filtro paso banda.** Este filtro se encuentra centrado en la frecuencia portadora de la transmisión, y tiene que tener suficiente ancho de banda como para dar cabida a la señal modulada, si bien no la debe exceder en la medida de lo posible para evitar interferencias y ruido fuera de la banda de la señal útil.
- **Demodulador paso banda.** Este bloque realiza la conversión desde alta frecuencia hasta banda base. La señal de entrada al transmisor ocupa la banda de frecuencias alrededor de la frecuencia portadora, y la señal de salida se halla centrada alrededor de la frecuencia cero.
- **Demodulador digital.** El demodulador digital procesa la forma de onda a la entrada de éste y la reduce a una secuencia binaria. La señal de salida es una secuencia de bits, que se procesa a una determinada velocidad y que se puede almacenar en un dispositivo de tipo memoria.
- **Descodificador de canal.** Realiza la operación inversa al codificador de canal eliminando la redundancia introducida por este codificador. La señal

de entrada al decodificador de canal es una secuencia de bits que, en los sistemas que operan en tiempo real, se procesa a una determinada velocidad de bits por segundo. La señal de salida del decodificador de canal es también una secuencia de bits, cuya velocidad binaria es inferior a la de la secuencia de entrada debido a la eliminación de la redundancia. La operación de eliminar redundancia sobre la secuencia de bits procesada se realiza de manera inteligente, puesto que en recepción se conocen los algoritmos utilizados en el codificador de canal. Si, a causa de los efectos del canal, algunos de los bits se han detectado erróneamente en el demodulador digital, cambiando de 0 a 1 o viceversa, en el bloque decodificador de canal se pueden corregir, siempre que el número de errores no supere un determinado porcentaje.

- **Decodificador de fuente.** Es la etapa final del receptor. Si el mensaje transmitido es una señal analógica, como por ejemplo una señal de audio, la entrada a aquél es una secuencia binaria y la salida es continua en el tiempo. Incluso en caso de que el decodificador de canal entregue al decodificador de fuente una secuencia totalmente libre de errores, la reconstrucción de una señal analógica en recepción no coincide de manera exacta con la señal mensaje del transmisor. Un codificador de fuente comprime la información y, aunque lo hace con criterios de producir la mínima distorsión sobre la señal procesada, los efectos de la compresión son, en principio, irrecuperables en el receptor.

Objetivos

El objetivo general de la asignatura consiste en proporcionar al estudiante una visión de técnicas de modulación avanzadas y una introducción a los aspectos de codificación de fuente y canal. Este objetivo se desglosa en los siguientes:

1. Conocer la finalidad de los bloques de codificación de fuente y de canal, ubicarlos en la cadena de un sistema de comunicaciones digitales y aclarar las diferencias entre ambos.
2. Entender los mecanismos básicos del codificador de fuente y los aspectos teóricos que intervienen en él: redundancia, entropía, predicción...
3. Entender los mecanismos básicos del codificador de canal: redundancia, capacidad correctora, capacidad detectora...
4. Distinguir entre códigos bloque y códigos convolucionales, y conocer los mecanismos de decodificación en cada uno de los casos.
5. Tener nociones de códigos correctores de errores avanzados: turbo códigos y códigos LDPC.
6. Comprender los principios de funcionamiento de los sistemas de comunicaciones de espectro ensanchado, las diferentes estrategias para generar señales de espectro ensanchado y la finalidad de estos sistemas.
7. Conocer la modulación OFDM e identificar las ventajas y los inconvenientes de esta modulación frente a la modulación de portadora única.
8. Conocer la estructura de las modulaciones de fase continua (CPM) y argumentar las principales razones que justifican el uso de modulaciones de envolvente constante y modulaciones CPM.

Contenidos

1.ª parte: Codificación de fuente y canal

Módulo didáctico 1

Codificación de fuente

Margarita Cabrera, Francesc Tarrés

1. Fuentes de mensajes y codificación de fuentes
2. Codificación de fuente y codificación de canal
3. Codificación PCM de fuentes analógicas
4. Compresión de fuentes. Necesidad y conceptos básicos
5. Medida de la información
6. Códigos de longitud variable. Conceptos básicos
7. Códigos de Huffman
8. Transformaciones de datos
9. Codificación de voz en telefonía móvil GSM

Módulo didáctico 2

Codificación de canal I: introducción y códigos de bloque

Margarita Cabrera, Francesc Tarrés

1. Redundancia estructurada: conceptos básicos
2. Estrategias para el control de errores
3. ¿Para qué sirven los códigos de protección de errores?
4. Decisiones blandas y decisiones firmes
5. Códigos de bloque
6. Descodificación de códigos de bloque lineales
7. Códigos cíclicos

Módulo didáctico 3

Codificación de canal II: códigos convolucionales

Margarita Cabrera, Francesc Tarrés

1. Códigos convolucionales
2. Concatenación de códigos
3. Turbocódigos

2.ª parte: Modulaciones avanzadas

Módulo didáctico 4

Técnicas de comunicaciones de espectro ensanchado

Margarita Cabrera, Francesc Rey, Francesc Tarrés

1. Introducción a los sistemas de espectro ensanchado
2. Sistemas de espectro ensanchado por secuencia directa
3. Secuencias pseudoaleatorias: Generación

4. Secuencias pseudoaleatorias: Sincronización
5. Cálculo de la probabilidad de error en sistemas DS
6. Acceso múltiple por división en código (CDMA)

Módulo didáctico 5

Multiplexación por división en frecuencias ortogonales (OFDM)

Margarita Cabrera, Francesc Tarrés

1. OFDM frente a portadora única
2. Ortogonalización de portadoras
3. Canal de comunicaciones
4. Probabilidad de error en condiciones ideales
5. Estrategias adicionales en OFDM
6. Espectro de OFDM
7. Estándares basados en OFDM

Módulo didáctico 6

Modulaciones digitales de fase continua (CPM)

Francesc Rey, Francesc Tarrés

1. Conceptos básicos
2. Modulación offset-QPSK (OQPSK)
3. Modulaciones CPFSK (*continuous phase FSK*)
4. Modulación MSK (*minimum shift keying*)
5. Modulación GMSK (*gaussian MSK*)

Glosario

ADPCM: *Adaptive Pulse Code Modulation.*

AM: *Amplitude Modulation.*

AMI: *Alternate Mark Inversion.*

APK: *Amplitude and Phase Keying.*

APSK: *Amplitude and Phase Shift Keying.*

AWGN: *Additive White Gaussian Noise.*

BCCH: *Broadcast Control CHannel.*

BPSK: *Binary PSK.*

CC: *Convolutional Code.*

CCCH: *Common Control CHannel.*

CDMA: *Code Division Multiple Access.*

COFDM: *Coded OFDM.*

CPCH: *Common Physical CHannel.*

CP: *Cyclic Prefix.*

CPFSK: *Continuous Phase Frequency Shift Keying.*

CPM: *Continuous Phase Modulation.*

CRC: *Cyclic Redundancy Checksum.*

DAB: *Digital Audio Broadcasting.*

DCCH: *Dedicated Control CHannel.*

DECT: *Digital Enhanced Cordless Telecommunications.*

DeIL: *DeInterLeaving.*

DL: *Down Link.*

DPCCH: *Dedicated Physical Control CHannel.*

DPCH: *Dedicated Physical CHannel.*

DPDCH: *Dedicated Physical Data CHannel.*

DPSK: *Differential PSK.*

DRM: *Digital Radio Mondiale.*

DS-CDMA: *Direct Sequence CDMA.*

DTX: *Discontinuous Transmission.*

DVB: *Digital Video Broadcasting.*

DSB: *Double Side Band.*

ETSI: *European Telecommunications Institute.*

FDD: *Full Duplex Division.*

fdp: *Función de densidad de probabilidad.*

FEC: *Forward Error Correction.*

FIR: *Finite Impulse Response.*

FM: *Frequency Modulation.*

FSK: *Frequency Shift Keying.*

GMSK: *Gaussian MSK.*

GSM: *Global System of Mobile communications.*

HDB3: *High Density Bipolar of order 3 code.*

ICI: *Inter Carrier Interference.*

IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

IIR: *Infinite Impulse Response.*

IL: *InterLeaving.*

ISDN: *Integrated Services Digital Network.*

ISI: *Inter Symbol Interference.*

I&Q: *En fase y en cuadratura.*

LTP: *Long Term Prediction.*

MAI: *Multiple Access Interference.*

MSK: *Minimum Shift Keying.*

NRZ: *Non Return to Zero.*

NRZI: *NRZ Inverted.*

N-CDMA: *Narrow CDMA.*

OFDM: *Orthogonal Frequency Division Multiplexing.*

OFDMA: *OFDM Access.*

OVSF: *Orthogonal Variable Spreading Factor.*

PAM: *Pulse Amplitude Modulation.*

PPM: *Pulse Position Modulation.*

PSK: *Phase Shift Keying.*

QAM: *Quadrature Amplitude Modulation.*

QoS: *Quality of Service.*

QPSK: *Quadrature and Phase Shift Keying.*

RF: *Radio Frecuencia.*

RPE: *Regular Pulse Excited.*

RRC: *Root Raised Cosinus.*

RS-232: *Recommended Standard 232.*

RZ: *Return to Zero.*

SC: *Single Carrier.*

SF: *Spreading Factor.*

SER: *Symbol Error Rate.*

SFN: *Single Frequency Network.*

SNR: *Signal to Noise Rate.*

SOFDMA: *Scalable OFDMA.*

TCH: *Traffic CHanel.*

TCH/FS: *TCH Full rate Speech.*

TDD: *Time Duplex Division.*

TDMA: *Time Division Multiple Access.*

TTI: *Transmisión Time Interval.*

UMTS: *Universal Mobile Telecommunication System.*

USB: *Universal Serial Bus.*

UTRA: *UMTS Terrestrial Radio Access.*

VAD: *Voice Activity Detector.*

VCO: *Voltage Control Oscillator.*

WIMAX: *Worldwide Interoperability for Microwave Access.*

WLAN: *Wireless Local Area Network.*

W-CDMA: *Wideband CDMA.*

ZF: *Zero Forcing.*

Bibliografía

Bibliografía básica

Benedetto, S.; Biglieri, E. (1999). *Principles of digital transmission*. Kluwer Academic Press / Plenum Publishers.

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

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

Bibliografía complementaria

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