

# Teoria de la codificació i modulacions avançades

Margarita Cabrera  
Francesc Rey  
Francesc Tarrés

Revisió a càrrec de:  
Francesc Tarrés  
Francesc Rey

PID\_00185012


**Margarita Cabrera**

Enginyera de Telecomunicacions per l'Escola Tècnica Superior de Telecomunicacions de Barcelona (ETSETB) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) el 1986. Doctora en Telecomunicacions per la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) el 1991. És professora titular d'universitat del Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions (TSC) de la UPC. Des del 1990 imparteix docència en els estudis de Telecomunicacions de l'ETSETB en les temàtiques de comunicacions analògiques i digitals, processament de senyal i matemàtiques orientades a les comunicacions. Té una llarga experiència en participació en projectes d'innovació docent basats en l'ús de noves tecnologies. Actualment és responsable del projecte COMWEB (Comunicacions al web), patrocinat per AGAUR i per la UPC i que es desenvolupa en el Departament de TSC de la UPC. Web del grup, que inclou la pàgina personal: <http://gps-tsc.upc.es/comm2>


**Francesc Rey**

Enginyer de Telecomunicacions per l'Escola Tècnica Superior de Telecomunicacions de Barcelona (ETSETB) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) el 1997 i doctor en Telecomunicacions per la UPC el 2006. Actualment és professor agregat en el Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions (TSC) de la UPC. Des del 2009 ha impartit docència en el estudis de telecomunicacions a l'Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú (EPSVG), a l'Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeroespacial de Castelldefels (EETAC) i a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicacions de Barcelona (ETSETB). La seva experiència docent està centrada en les temàtiques de processament del senyal, comunicacions digitals i comunicacions espacials. Els seus interessos en recerca s'emmarquen també en l'àrea de processament del senyal aplicat a comunicacions. Té una llarga experiència en projectes de recerca nacionals i internacionals, i també contractes amb empreses nacional i amb l'Agència Espacial Europea. Pàgina personal: <http://gps-tsc.upc.es/comm/frey/>


**Francesc Tarrés**

Professor a la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), on actualment és responsable de les assignatures de Processament digital de senyal i de Sistemes audiovisuals a l'Escola Politècnica Superior de Castelldefels (EPSC). Ha col·laborat en el disseny de plans d'estudi i de continguts d'assignatures en diverses titulacions i escoles del sector de les telecomunicacions, com Enginyeria la Salle, l'Escola Politècnica del Baix Llobregat i l'EUEITT, centrant-se en les temàtiques de processament d'imatge i sistemes de difusió de continguts audiovisuals. També ha organitzat i participat en cursos de postgrau i màsters per a diferents empreses com SONY, Televisió de Catalunya, Panasonic, Mitsubishi Electric, Fundación Vodafone, Centro de la Imagen y Tecnología Multimedia, etc. Ha publicat llibres de text en les àrees de processament digital de senyal, sistemes de televisió analògica i digital i sistemes multimèdia. Pàgina personal a: [http://gps-tsc.upc.es/GTAV/Tarres/Members\\_Tarres.htm](http://gps-tsc.upc.es/GTAV/Tarres/Members_Tarres.htm)

La revisió d'aquest material docent ha estat coordinada per la professora: Eugènia Santamaría (2012).

Primera edició: setembre 2012  
 © Margarita Cabrera, Francesc Rey, Francesc Tarrés  
 Tots els drets reservats  
 © d'aquesta edició, FUOC, 2012  
 Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona  
 Disseny: Manel Andreu  
 Realització editorial: Eureka Media, SL  
 Dipòsit legal: B-20.492-2012

*Cap part d'aquesta publicació, inclòs el disseny general i de la coberta, no es pot copiar, reproduir, emmagatzemar o transmetre de cap manera ni per cap mitjà, tant si és elèctric com químic, mecànic, òptic, de gravació, de fotocòpia, o per altres mètodes, sense l'autorització prèvia per escrit dels titulars del copyright.*

## Introducció

Els continguts d'aquesta assignatura corresponen a la continuació dels continguts de l'assignatura *Sistemes de comunicació I*, per la qual cosa desenvoluparem els conceptes importants de la capa física d'un sistema de comunicacions que no es van estudiar en profunditat en aquella assignatura, entre altres raons, per la limitació de temps d'un curs. Entre totes les possibles matèries que es podrien incloure per a ampliar els coneixements de sistemes de comunicacions digital, hem seleccionat aquelles que en general s'especifiquen en els documents d'estandardització de la capa física dels sistemes de comunicacions digitals. Sens dubte, hi hauria molts més temes que s'hi podrien incloure, com, per exemple, temes de recuperació de sincronisme, tipus de canal i efecte dels canals, equalització, disseny de mòdems, etc. Deixem tots aquests aspectes per a una altra assignatura, *Sistemes de comunicació II*. Considerem que els temes tractats aquí són una bona elecció per a continuar l'estudi iniciat amb l'assignatura de *Sistemes de comunicació I* i esperem que després d'aquesta assignatura adquireu motivació i curiositat per aprofundir, pel vostre compte, en tots aquells aspectes que complementen els que ja s'han inclòs en el text.

L'assignatura està estructurada en dues parts ben diferenciades. Una primera part treballa els aspectes de codificació de font i canal, i una segona part aprofundeix en tècniques de modulació o transmissió avançades, en concret tècniques d'espectre eixamplat, multiplexació OFDM i modulacions digitals de fase contínua.

Com a pas previ a l'estudi del programa de l'assignatura, es proposa repassar els continguts de l'assignatura *Sistemes de comunicació I*, i en especial els relacionats amb les comunicacions digitals: esquema general d'un sistema de comunicacions digitals, modulacions digitals en banda base i modulacions digitals QAM.

En el **mòdul 1**, "Codificació de font", estudiarem el procés mitjançant el qual es converteix una informació de naturalesa analògica a una seqüència de bits i, posteriorment, analitzarem diverses tècniques per a representar de manera compacta aquesta seqüència de bits. Per verificar que la nostra representació de la informació és l'adequada, haurem d'establir mecanismes per a "mesurar" la quantitat d'informació proporcionada per un missatge. Amb aquest objectiu introduïm alguns conceptes elementals de la teoria de la informació com la definició formal d'*informació*, l'*entropia* (o informació mitjana proporcionada per una font) i la representació dels missatges mitjançant codis de longitud variable. Finalment, s'introdueixen alguns exemples senzills de sistemes de compressió d'informació per a senyals d'àudio i vídeo.

En els **mòduls 2 i 3**, “Codificació de canal I: introducció i codis bloc” i “Codificació de canal II: codis convolucional”, s’estudia el procés de codificació de canal analitzant primer els codis bloc i a continuació els codis convolucional. En el mòdul 2 després d’una introducció a la codificació de canal en què s’introdueixen els principis bàsics de la generació de redundància en el senyal de manera controlada, amb l’objectiu de detectar els errors o de corregir-los, es presenten els codis de Hamming i els codis cíclics, amb èmfasi especial en les característiques dels codis de Reed-Solomon pel seu ús ampli en diferents aplicacions. En el mòdul 3 ens centrem en els codis convolucional, i especialment en la representació d’un codificador en diagrames d’estat i diagrames de Trellis i en un dels algorismes més utilitzats per a la descodificació d’aquestes seqüències: l’algorisme de Viterbi. També es presenten els conceptes de concatenació de codis, *puncturing* i alguns conceptes generals sobre els turbocodis.

En el primer apartat del **mòdul 4**, “Tècniques de comunicacions d’espectre eixamplat”, presentarem els conceptes bàsics dels sistemes de modulació per seqüència directa (DS), de manera molt intuïtiva i sense excessiu rigor. Aquesta presentació ens permetrà tenir una idea general dels sistemes DS, els seus principis de funcionament i els mecanismes que utilitzen per a protegir-se de les interferències. En apartats posteriors estudiarem amb cert detall el sistema d’espectre eixamplat per seqüència directa, i veurem com és possible generar seqüències pseudoaleatòries i diferents subsistemes per a l’adquisició i el seguiment del sincronisme en aquests sistemes. Veurem que l’adquisició i el seguiment del sincronisme és un dels aspectes més crítics dels sistemes d’espectre eixamplat i que, en la majoria d’aplicacions pràctiques, es requereixen sistemes complexos. Posteriorment, analitzarem els sistemes de DS amb més rigor i detall matemàtic, derivant les equacions que permeten obtenir la probabilitat d’error. Finalment veurem amb detall una de les aplicacions dels sistemes d’espectre eixamplat, el seu ús com a tècnica d’accés múltiple. Analitzarem el nombre d’usuaris en els sistemes de DS i definirem el marge d’interferències, un paràmetre que resulta útil en el disseny i dimensionament d’aquests sistemes.

En el **mòdul 5**, “Multiplexació per divisió en freqüències ortogonals (OFDM)”, es presenta la modulació OFDM com una alternativa enfront de la modulació de portadora única o QAM. Després d’analitzar el format de senyal OFDM, s’introdueix la utilització dels algorismes IFFT i FFT com a modulador i desmodulador pràctics d’esquemes OFDM, respectivament. S’analitza l’efecte del canal sobre el senyal OFDM i es presenta la finalitat del prefix cíclic i del temps de guarda com a estratègies per a combatre l’ISI i mantenir l’ortogonalitat entre les diferents freqüències utilitzades. Posteriorment, es detallen alguns aspectes pràctics com, per exemple, l’ocupació espectral i l’adaptació del senyal a una determinada màscara o plantilla espectral. El mòdul acaba amb la presentació dels estàndards de comunicacions de ràdio basats en OFDM i la definició dels seus paràmetres particulars.

Finalment, en el **mòdul 6** presentem les modulacions digitals de fase contínua. Es motivarà la necessitat d'aquest tipus de modulacions especialment quan el senyal transmès es troba fortament no-linealitat, provocades, per exemple, per la presència d'amplificadors no lineals. La resta del mòdul està estructurat com una evolució natural des de la modulació lineal més simple QPSK fins a modulacions CPM més complexes, com la GMSK, passant per les modulacions OQPSK, CPFSK i MSK. Destaquem la importància d'aquestes modulacions que, per exemple, es troben en estàndards comercials com el sistema de telefonia mòbil GSM i del sistema de telefonia sense fils DECT.

## 1. Introducció als sistemes de comunicacions digitals

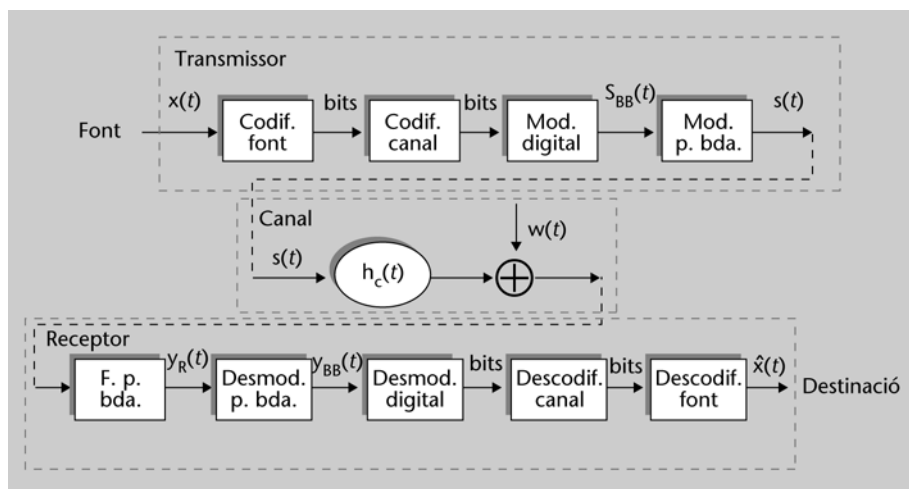
En aquest apartat revisarem, a mode d'introducció a l'assignatura, els elements bàsics que constitueixen un sistema de comunicacions i que es poden descompondre en el transmissor, el canal de comunicacions i el receptor. S'analitza especialment el processament o transformació que experimenten els senyals a través d'aquests blocs bàsics.

El missatge que es transmet entre una font i un destinatari es representa mitjançant un senyal que es descriu en termes probabilístics, ja que és de naturalesa aleatòria. A continuació us recordem els tres grans blocs que formen un sistema de comunicacions.

- El **transmissor** processa el senyal missatge generat per la font d'informació i proporciona el senyal transmès adequat al canal o medi de transmissió. Al seu torn, inclou diferents subsistemes, entre els quals destaquen les etapes de codificació i de modulació.
- El **canal** de transmissió és el medi elèctric que cobreix la distància entre el transmissor i el receptor. Pot estar format per un cable, un raig làser o una ona electromagnètica (ràdio). Una de les característiques inherents al canal de comunicacions és que el senyal transmès es degrada en ser propagat pel medi.
- El **receptor** opera sobre el senyal resultant a la sortida del canal de comunicacions. Té una missió doble. D'una banda s'encarrega d'eliminar, en la mesura possible, els efectes produïts pel canal. De l'altra, ha d'adequar el senyal rebut al destinatari fent les operacions inverses del transmissor, per la qual cosa inclourà etapes de descodificació i de desmodulació.

En la figura 1 es presenta un diagrama de blocs funcional, amb el qual sens dubte ja estareu familiaritzats. En aquesta representació podem observar que el transmissor està format per quatre blocs elementals, les funcions dels quals es detallen en els apartats següents. En la gràfica també s'indica de manera específica que el canal presenta una resposta impulsional, que pot introduir distorsions sobre el senyal transmès, a les quals es poden afegir altres efectes no desitjats com la presència d'interferències i de soroll. Finalment, es detallen els elements que constitueixen el receptor, que essencialment fan les funcions recíproques a les que feia el transmissor.

Figura 1. Diagrama de blocs funcional de cada un dels tres subsistemes que formen un sistema de transmissió



El bloc de transmissió és el que s'encarrega de processar la font que volem enviar al receptor i condicionar-la perquè pugui ser rebuda amb fiabilitat. El transmissor està constituït per quatre blocs, que fan funcions conceptualment diferents i la funció global dels quals és la de condicionar el flux de bits binari que volem transmetre al medi de transmissió. A més, el tractament de les dades que es fa en cada bloc no és únic, sinó que admet un gran nombre d'alternatives tecnològiques la selecció de les quals per a un determinat sistema de comunicacions no resulta evident.

### 1.1. Codificació de font

La funció del codificador de font és obtenir una seqüència de bits que representi de manera eficient la informació que volem transmetre. En general, la informació que volem transmetre pot provenir d'una font analògica o digital. Una font analògica pot ser la tensió obtinguda a la sortida d'un micròfon, convenientment amplificada, per la qual cosa es pot representar com una funció real (la tensió) de variable real (el temps). Les fonts digitals només poden prendre uns valors predeterminats, i per això la seva conversió a una seqüència de bits és més o menys directa.

El codificador de font ha de ser capaç d'establir una representació eficient de la informació. Entenem per una representació eficient quan la quantitat total de bits transmesos és tan reduïda com sigui possible, evidentment amb la restricció que el receptor pugui recuperar el senyal original amb prou precisió. La codificació de font tracta, per tant, de mètodes que permetin comprimir la informació, extraient tota la redundància existent en les dades originals.

En aquest sentit, apareixen dos tipus diferents de codificadors de font:

- En els codificadors sense pèrdues, la seqüència de bits que s'envia al canal ha de permetre recuperar de manera exacta la seqüència de bits de la

informació original. En cas que la informació original procedeixi d'una font analògica, entendrem que podem recuperar de manera exacta els bits que representen el senyal analògic a la sortida del procés de conversió a digital. Els sistemes sense pèrdues se solen utilitzar en sistemes de comunicació que transmeten informació associada a taules de dades, text, documents o programes en què resulta crucial recuperar de manera totalment exacta la informació original. Com a exemples de sistemes de compressió sense pèrdues, es poden considerar totes les aplicacions informàtiques de compressió de dades: WinRAR, WinZip, etc. També hi ha algorismes de compressió sense pèrdues per a senyals d'àudio i vídeo (APE, TIFF sense pèrdues, etc.).

- Els codificadors amb pèrdues s'apliquen a la transmissió de senyals d'àudio i de vídeo. En aquest cas, n'hi ha prou que el sistema visual o auditiu humà sigui incapaç de distingir entre la informació original i la que recuperem de manera aproximada. Si recuperar la informació només de manera aproximada permet comprimir molt més el flux de bits, aquesta reducció pot compensar la possible pèrdua de qualitat, sobretot si aquesta pèrdua no pot ser apreciada per l'usuari. Com a exemples de compressió amb pèrdues, es poden esmentar el JPEG (que s'aplica a la codificació de fotografies), l'MP3 (que s'utilitza per a comprimir àudio) o els sistemes de compressió MPEG-2 i MPEG-4 (que corresponen a la compressió de senyals d'àudio i vídeo en equips domèstics com DVD de vídeo, iPod, PSP, etc.).

#### Resum

La funció del codificador de font és extreure la redundància existent en la font original, reduint tant com es pugui el nombre de bits necessaris que s'han de transmetre. Hi ha sistemes de compressió sense pèrdues, en què la informació original es recupera de manera exacta, i sistemes amb pèrdues, en què només es pot recuperar el senyal original de manera aproximada.

## 1.2. Codificació de canal

La codificació de canal transforma els bits a fi de protegir la informació davant degradacions eventuais del senyal que puguin produir la pèrdua d'alguns bits en el receptor. Evidentment, l'estratègia per a protegir la informació exigeix la introducció de certa redundància en les dades, de manera que el volum de bits a la sortida és sempre més gran que el nombre de bits a l'entrada.

La introducció de la redundància addicional es pot utilitzar amb dues estratègies diferents: la detecció d'errors i la correcció d'errors. En el primer cas, l'objectiu és que el receptor pugui detectar que les dades que està rebent no són correctes, per la qual cosa pot sol·licitar al transmissor que els torni a transmetre. És un sistema adequat per a aquelles aplicacions en què el temps real no és crític, com la transferència de fitxers. El principal avantatge dels sistemes de detecció d'error és que requereixen pocs bits addicionals de redundància.

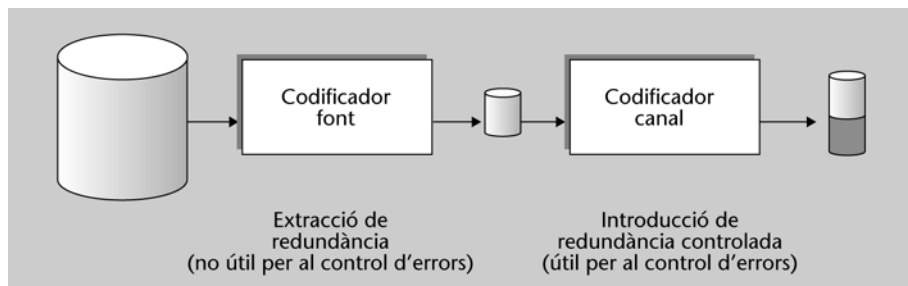
Si s'utilitzen estratègies de correcció d'errors, el receptor haurà de ser capaç, no solament de detectar que la informació és incorrecta, sinó que, a més, ha de ser capaç de detectar quins són els bits que s'han rebut de manera incorrecta i corregir-los. Evidentment, aquestes estratègies requereixen que s'introdueixi una quantitat més gran de redundància en la seqüència de dades original.



Es pot observar un aparent caràcter contradictori entre els blocs de codificació de font i de canal, ja que si un d'ells intenta extreure al màxim la redundància existent en les dades originals, l'altre introdueix redundància per a poder detectar o corregir la presència d'errors en els bits rebuts. És important distingir que els dos processos són necessaris i que de cap manera són recíprocs l'un de l'altre. És a dir, la redundància que s'extreu en el codificador de font és una redundància inherent a les mateixes dades, que encara que estigués present, no permetria que el receptor pogués corregir o detectar la presència d'errors en la informació rebuda. És, per tant, una redundància que no resulta útil per al control d'errors i que és aconsellable eliminar. En canvi, en el codificador de canal, la redundància s'introdueix de manera "controlada" i precisa. Cada un dels bits de redundància que s'introdueixen té una relació matemàtica clara amb la resta de bits de la seqüència d'informació. Aquesta relació matemàtica precisa permet que el receptor comprovi les dades rebudes i, si no coincideixen amb allò que s'esperava, les pot intentar corregir o, com a mínim, detectar.

Des del punt de vista pràctic, un codificador de font amb pèrdues per a senyals d'àudio o vídeo pot comprimir la informació en un factor de 10 vegades (àudio) o 100 vegades (vídeo) aproximadament. És a dir, el volum de les dades comprimides en un codificador MPEG de vídeo pot ser 100 vegades més petita que el de les dades originals. En un codificador de font sense pèrdues, la reducció de dades és més petita però pot prendre valors situats entre 2 i 4. Al contrari, la redundància controlada que s'introdueix en el codificador de canal és, en la majoria de les aplicacions pràctiques, inferior a 2. En la figura 2 es mostra de manera esquemàtica com els blocs de codificació de font i de canal extreuen i introdueixen redundància en les dades. La figura indica de manera explícita que el codificador de font redueix la mida de l'arxiu i que el codificador de canal introdueix redundància de manera controlada, amb la qual cosa la mida de l'arxiu torna a augmentar. En general, la codificació de font significa una reducció del nombre de bits considerablement més gran que la redundància que introdueix el codificador de canal.

Figura 2. Extracció i inserció de redundància en les dades per als codificadors de font i de canal



#### Resum

El codificador de canal introdueix redundància controlada en la informació que s'ha de transmetre per a facilitar la detecció o correcció d'errors en el receptor en cas que es deteriori el senyal transmès. La redundància que s'extreu en el codificador de font no és útil per a controlar errors en el receptor, ja que no hi ha relacions matemàtiques precises entre els bits.

### 1.3. Modulador digital

El modulador digital és un altre dels components clau en el diagrama de blocs del transmissor que hem mostrat en la figura 1. Aquest bloc té com a missió transformar la seqüència de bits resultant del codificador de canal i convertir-

la en un senyal continu en temps que es manifesta com un senyal elèctric o diferència de tensió entre dos punts i que va variant en el temps.

El modulador digital en “banda base” genera modulacions de polsos per amplitud (PAM) a partir d’una seqüència de bits i es denomina de *banda base* perquè el contingut freqüencial del senyal modulat de sortida es distribueix entorn de la freqüència zero.

El paràmetre més significatiu de la seqüència de bits és la velocitat a la qual es transmeten i el paràmetre més significatiu del senyal continu modulat és l’amplada de banda que ocupa entorn de la freqüència zero. Tots dos paràmetres estan relacionats de manera lineal. A continuació es recorden els paràmetres d’interès que s’han de considerar en l’estudi d’un senyal modulat digitalment:

- **Velocitat de bit o taxa de transmissió ( $R_b$ ).** És el nombre de bits per segon que es transmeten a través del sistema de transmissió. Les seves unitats són bits per segon o, abreujadament, bps.
- **Temps de bit ( $T_b$ ).** És el temps transcorregut entre cada dos bits consecutius a l’entrada del modulador digital i es defineix com l’invers de la velocitat de bit.
- **Velocitat de símbol ( $R_s$ ).** És el nombre de símbols per segon que es transmeten pel sistema de transmissió. Atès que cada símbol transporta  $b$  bits, es relaciona amb la taxa de transmissió segons la relació:  $R_s = R_b/b$ . Les unitats d’aquest paràmetre es denominen bauds. Un baud equival a un símbol per segon.
- **Temps de símbol ( $T_s$ ).** És el temps transcorregut entre cada dos símbols consecutius a l’entrada del conformador de pols  $T = b \cdot T_b$ .

Un altre aspecte important en l’estudi de les modulacions digitals consisteix en l’obtenció de la probabilitat d’error que ofereix el sistema com una funció del quocient de l’energia mitjana del senyal útil rebut per bit i la densitat espectral de soroll. Aquest quocient es representa, en general, com  $E_b/N_0$ . En l’apartat següent recordarem el valor obtingut per a la probabilitat d’error en algunes modulacions digitals.

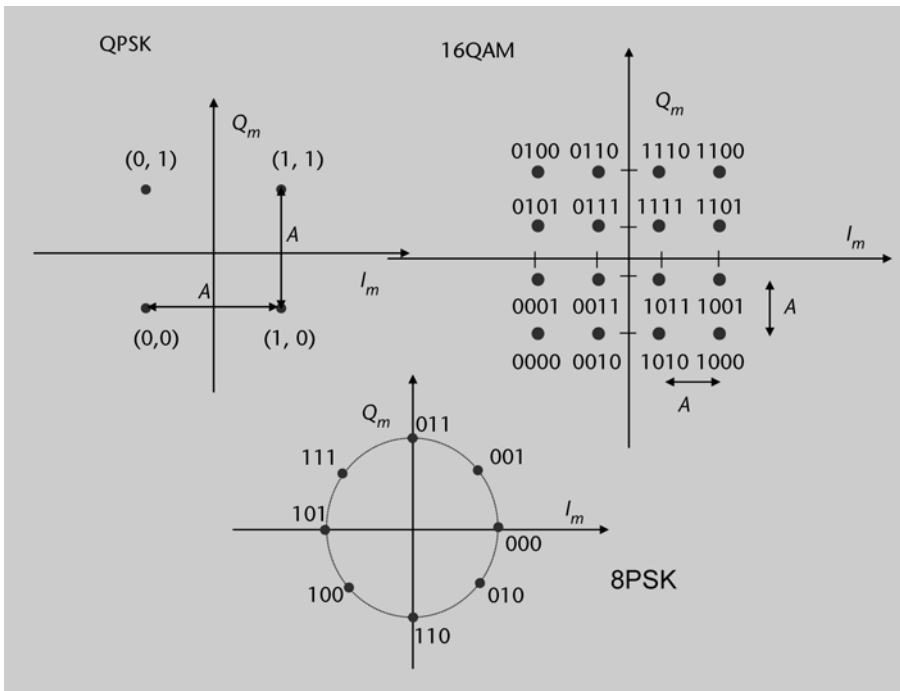
#### 1.4. Modulador passabanda

Una vegada feta la modulació digital de tipus PAM, disposem d’un senyal la forma d’ona del qual s’ha condicionat perquè el receptor pugui identificar de manera fiable els bits que formen el missatge. El modulador passabanda, representat com a part del transmissor de la figura 1, és l’encarregat de traslladar el senyal en banda base a una ocupació espectral entorn d’una freqüència determinada i, en general, molt més alta que l’amplada de banda que ocupa el

senyal en banda base. Les modulacions digitals passabanda es divideixen en modulacions digitals lineals de tipus QAM i en modulacions no lineals com, per exemple, la modulació GMSK.

Les modulacions QAM són similars a les modulacions digitals banda base de tipus PAM. La diferència entre totes dues es troba en el marge de freqüències que ocupen. Mentre que les modulacions PAM s'utilitzen en comunicacions per cable, amb recorreguts curts i punt a punt, les modulacions QAM s'utilitzen en freqüències portadores de MHz i GHz, i ocupen amplades de banda que són regulades dins els diferents estàndards per a assignar un determinat marge freqüencial a cada senyal de tipus QAM. Recordeu que una modulació QAM és una modulació passabanda en què tant el component en fase com el component en quadratura de la modulació s'expressen com una modulació de tipus PAM. En combinar els símbols o nivells del component en fase amb els símbols o nivells del component en quadratura, s'obté el denominat *espai de senyal* o *constel·lació de senyal*. En la figura 3 es representa l'espai de senyal de les modulacions QPSK, 16QAM i 8PSK, per recordar-ne algunes. Així mateix, en la taula 1 es recorda per a cada una el valor de la probabilitat d'error expressat en funció del quocient d'energies  $E_b/N_0$ .

Figura 3. Espai de senyal de les modulacions QPSK, 16QAM i 8PSK



Taula 1. Probabilitat d'error de bit (BER) de les modulacions QPSK, 16QAM i 8PSK. S'ha considerat transmissió sobre canal ideal de soroll additiu blanc i gaussià

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

En l'estudi de les modulacions d'espectre eixamplat (mòdul 4) i de les modulacions OFDM (mòdul 5), convé tenir presents les modulacions QAM i les seves propietats, ja que al seu torn constitueixen la base de tots dos tipus de tècniques de modulació. Les modulacions CPM, que es veuran en el mòdul 6, són modulacions angulars relativament complexes d'implementar i de desmodular, especialment en comparar-les amb les modulacions lineals de tipus QAM. Sens dubte la modulació CPM més popular és la modulació GMSK, utilitzada en el sistema de telefonia cel·lular GSM.

## 1.5. Receptor

El receptor és la part del sistema situada físicament en el punt de destinació, i la seva missió consisteix a recuperar el senyal missatge a partir del senyal rebut. Per a fer aquesta funció amb les millors garanties de qualitat, s'han de fer les operacions inverses a les executades en el transmissor, però a més, s'han d'efectuar funcions addicionals per a combatre aquells efectes no desitjats que el canal ha provocat sobre el senyal transmès.

En un sistema de desmodulació digital bàsic, s'han de dur a terme les funcions indicades en la figura 1:

- **Filtre passabanda.** Aquest filtre es troba centrat en la freqüència portadora de la transmissió, i ha de tenir prou amplada de banda per a donar cabuda al senyal modulad, si bé no l'ha d'excedir en la mesura que sigui possible, a fi d'evitar interferències i soroll fora de la banda del senyal útil.
- **Desmodulador passabanda.** Aquest bloc fa la conversió des d'alta freqüència fins a banda base. El senyal d'entrada al transmissor ocupa la banda de freqüències entorn de la freqüència portadora, i el senyal de sortida es troba centrat entorn de la freqüència zero.
- **Desmodulador digital.** El desmodulador digital processa la forma d'ona a l'entrada d'aquest i la redueix a una seqüència binària. El senyal de sortida és una seqüència de bits, que es processa a una determinada velocitat i que es pot emmagatzemar en un dispositiu de tipus memòria.
- **Descodificador de canal.** Fa l'operació inversa al codificador de canal, i elimina la redundància introduïda per aquest codificador. El senyal d'entrada al descodificador de canal és una seqüència de bits que, en els sistemes que operen en temps real, es processa a una determinada velocitat de bits per segon. El senyal de sortida del descodificador de canal és també una seqüència de bits, la velocitat binària de la qual és inferior a la de la seqüència d'entrada a causa de l'eliminació de la redundància. L'operació d'eliminar redundància sobre la seqüència de bits processada es fa de manera intel·ligent, ja que en recepció es coneixen els algorismes utilitzats

en el codificador de canal. Si a causa dels efectes del canal alguns dels bits s'han detectat erròniament en el desmodulador digital, canviant de 0 a 1 o viceversa, en el bloc descodificador de canal es poden corregir, sempre que el nombre d'errors no superi un determinat percentatge.

- **Descodificador de font.** És l'etapa final del receptor. Si el missatge transmès és un senyal analògic, com per exemple un senyal d'àudio, l'entrada a aquell és una seqüència binària i la sortida és contínua en el temps. Fins i tot en cas que el descodificador de canal lliurés al descodificador de font una seqüència totalment lliure d'errors, la reconstrucció d'un senyal analògic en recepció no coincideix de manera exacta amb el senyal missatge del transmissor. Un codificador de font comprimeix la informació i, encara que ho fa amb criteris de produir la mínima distorsió sobre el senyal processat, els efectes de la compressió són, en principi, irrecuperables en el receptor.

## Objectius

L'objectiu general de l'assignatura consisteix a proporcionar a l'estudiant una visió de tècniques de modulació avançades i una introducció als aspectes de codificació de font i canal. Aquest objectiu es desglossa en els següents:

1. Conèixer la finalitat del blocs de codificació de font i de canal, ubicar-los dins de la cadena d'un sistema de comunicacions digitals, i aclarir les diferències entre tots dos.
2. Entendre els mecanismes bàsics del codificador de font i els aspectes teòrics que hi intervenen: redundància, entropia, predicció...
3. Entendre els mecanismes bàsics del codificador de canal: redundància, capacitat correctora, capacitat detectora.
4. Distingir entre codis bloc i convolucional, i mecanismes de descodificació en cadascun dels casos.
5. Tenir nocions de codis correctors d'errors avançats: turbocodis i codis LDPC.
6. Comprendre els principis de funcionament dels sistemes de comunicacions d'espectre eixamplat, les diferents estratègies per a generar senyals d'espectre eixamplat i finalitat d'aquests sistemes.
7. Conèixer la modulació OFDM i identificar els avantatges i els inconvenients d'aquesta modulació enfront de la modulació de portadora única.
8. Conèixer l'estructura de les modulacions de fase contínua (CPM), i argumentar les principals raons que justifiquen l'ús de modulacions d'envolupant constant i modulacions CPM.

## Continguts

### Unitat didàctica 1

#### **Codificació de font**

Margarita Cabrera, Francesc Tarrés

1. Fonts de missatges i codificació de font
2. Codificació de font i codificació de canal
3. Codificació PCM de fonts analògiques
4. Compresió de fonts. Necessitat i conceptes bàsics
5. Mesura de la informació
6. Codis de longitud variable. Conceptes bàsics
7. Codis de Huffman
8. Transformacions de dades
9. Codificació de veu en telefonia mòbil GSM

### Unitat didàctica 2

#### **Codificació de canal I: introducció i codis de bloc**

Margarita Cabrera, Francesc Tarrés

1. Redundància estructurada: conceptes bàsics
2. Estratègies per al control d'errors
3. Per a què serveixen els codis de protecció d'errors?
4. Decisions toves i decisions dures
5. Codis de bloc
6. Descodificació de codis de bloc lineals
7. Codis cíclics

### Unitat didàctica 3

#### **Codificació de canal II: codis convolucionals**

Margarita Cabrera, Francesc Tarrés

1. Codis convolucionals
2. Concatenació de codis
3. Turbocodis

### Unitat didàctica 4

#### **Tècniques de comunicacions d'espectre eixamplat**

Margarita Cabrera, Francesc Rey, Francesc Tarrés

1. Introducció als sistemes d'espectre eixamplat
2. Sistemes d'espectre eixamplat per seqüència directa
3. Seqüències pseudoaleatòries: generació
4. Seqüències pseudoaleatòries: sincronització
5. Càlcul de la probabilitat d'error en sistemes DS
6. Accés múltiple per divisió en codi (CDMA)

Unitat didàctica 5

### **Multiplexació per divisió en freqüències ortogonals (OFDM)**

Margarita Cabrera, Francesc Tarrés

1. OFDM enfront de portadora única
2. Ortogonalització de portadores
3. Canal de comunicacions en OFDM
4. Probabilitat d'error en condicions ideals
5. Estratègies addicionals en OFDM
6. Espectre d'OFDM
7. Estàndards basats en OFDM

Unitat didàctica 6

### **Modulacions digitals de fase contínua (CPM)**

Francesc Rey, Francesc Tarrés

1. Conceptes bàsics
2. Modulació *offset*-QPSK (OQPSK)
3. Modulacions CPFSK (*constant phase FSK*)
4. Modulació MSK (*minimum shift keying*)
5. Modulació GMSK (*Gaussian MSK*)



## Glossari

- 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:** *funció de densitat de probabilitat.*
- 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 i en quadratura.*

**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 multiplex.*

**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:** *radiofreqüència.*

**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:** *transmission 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.*

## Bibliografia

### Bibliografia bàsica

**Benedetto S.; Biglieri, E.** (1999). *Principles of Digital Transmission*. Kluwer Academic Press / Plenum publishers.

**Proakis, J.** (2003). *Digital Communications* (4a. ed.). McGraw-Hill.

**Sklar, B.** (2003). *Digital Communications: Fundamentals and Applications* (2a. ed.). Prentice Hall.

### Bibliografia complementària

**Carlson, A. B.** (2001). *Communication Systems: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication* (4a. ed.). McGraw-Hill.