

Introducció als sistemes de comunicacions digitals

Francesc Rey Micolau
Francesc Tarrés Ruiz

PID_00184980



Els textos i imatges publicats en aquesta obra estan subjectes –llevat que s'indiqui el contrari– a una llicència de Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 Espanya de Creative Commons. Podeu copiar-los, distribuir-los i transmetre'ls públicament sempre que en citeu l'autor i la font (FUOC. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya), no en feu un ús comercial i no en feu obra derivada. La llicència completa es pot consultar a <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.ca>

Índex

Introducció	5
Objectius	6
1. Introducció als sistemes de comunicacions digitals	7
2. Transmissor digital	12
2.1. Codificació de font	12
2.2. Codificació de canal	13
2.3. Modulador digital	14
2.4. Modulador passabanda	16
3. Receptor digital	17
3.1. Processat invers	17
3.2. Compensació dels efectes provocats pel canal	18
3.3. Funcions de sincronisme	18
3.4. Mesures de qualitat	19
Bibliografia	21

Introducció

Aquest mòdul d'introducció a les comunicacions digitals s'ha redactat com a ampliació del primer mòdul d'aquest curs, "Introducció a les comunicacions". En concret es detallen les particularitats d'un sistema de comunicacions digitals que no es troben en els sistemes de comunicacions analògics vistos en altres mòduls.

El primer apartat correspon a una introducció al sistema complet de comunicacions digitals, en què es presenta una figura completa amb tots els blocs funcionals que es poden trobar en aquest tipus de sistemes de comunicacions.

El segon apartat se centra en els elements funcionals d'un transmissor digital, i en detalla les quatre funcions bàsiques, com són la codificació de font, la codificació de canal, la modulació digital i la modulació passabanda. L'objectiu d'aquest apartat és diferenciar correctament les funcions de cada un dels blocs i comprendre la necessitat dels quatre elements. Posarem especial èmfasi en els blocs de codificació de font i codificació de canal, ja que seran dos elements funcionals de la cadena d'un transmissor digital que no tractarem en aquest curs i la descripció quedarà limitada al que se'n comenti en aquest mòdul d'introducció.

Finalment, en el tercer apartat es descriurà el receptor. El receptor es pot veure com un procés invers al del transmissor, i per tant, haurem de comprendre com es fan les operacions inverses a les del transmissor, bàsicament les de decodificació de canal i de font. També detallarem la importància del sincronisme i la compensació de canal.

Objectius

En acabar l'estudi d'aquest mòdul, haureu assolit els objectius següents:

- 1.** Identificar els elements bàsics d'un sistema de comunicacions digitals i les seves funcions.
- 2.** Identificar els blocs bàsics que constitueixen un transmissor digital i les seves funcions.
- 3.** Definir els conceptes i aclarir les diferències entre codificació de font i codificació de canal.
- 4.** Definir els conceptes i aclarir les diferències entre el modulador digital i el modulador passabanda.
- 5.** Identificar els blocs que constitueixen un receptor digital i les seves funcions.

1. Introducció als sistemes de comunicacions digitals

En aquest apartat farem una introducció als sistemes de comunicacions digitals. El lector ja és coneixedor de la importància i transcendència dels sistemes digitals. Actualment tothom conviu de manera quotidiana amb sistemes de comunicacions digitals: la música dels discos compactes, l'MP3 o les comunicacions entre ordinadors són exemples corrents d'aquest tipus de sistemes. Un dels fenòmens de digitalització del qual tothom ha parlat de manera generalitzada ha estat la denominada *apagada analògica*, feta a Espanya l'any 2010, i que va consistir a deixar d'utilitzar els últims sistemes de radiodifusió o *broadcasting* analògics de televisió i migrar envers un sistema digital, comunament conegut com a TDT¹. En aquest mòdul comentarem breument els avantatges d'aquest tipus de sistemes, que, com podeu intuir, han de ser prou consistents per a justificar la migració de la gran majoria de sistemes de comunicacions analògics envers els digitals, i també descriurem el diagrama de blocs per a aquest tipus de sistemes.

⁽¹⁾TDT és la sigla de televisió digital terrestre.

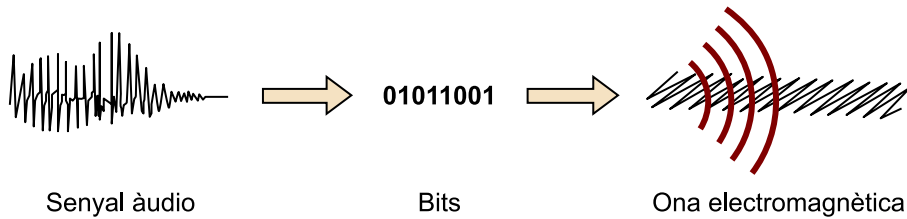
Quan diem que una **informació és digital** volem dir, en essència, que sigui quina sigui la naturalesa del missatge (una imatge, una cançó, la temperatura, humitat, pressió... d'una estació meteorològica, una conversa telefònica, una fotocòpia, etc.), aquest es representa mitjançant una seqüència de bits. Una seqüència de bits és un conjunt de zeros i uns (0100101101) ordenats d'acord amb un criteri que coneixen tant el transmissor com el receptor i que tots dos saben interpretar correctament.

Així, per exemple, en la figura 1 es mostra de manera esquemàtica un senyal d'àudio (que podria procedir d'un micròfon) que es converteix en una seqüència de bits. Aquesta seqüència de bits representa el senyal d'àudio en format digital. Posteriorment, aquests bits es converteixen en una ona electromagnètica i es transmeten. El pas del senyal d'àudio a una seqüència de bits es coneix amb el nom de **digitalització**, i ha de ser dissenyat perquè el receptor pugui obtenir, a partir de la seqüència de bits que rep, un senyal de tensió semblant al que tenia el transmissor. En aquest procés de conversió de la informació a seqüències de bits, es pot acceptar l'aparició d'algunes pèrdues, que no seran especialment importants sempre que el receptor pugui recuperar l'essència de la informació que s'ha volgut transmetre.

Digitalització i modulació

Són les dues transformacions bàsiques que es produeixen en un senyal per a transmetre'l digitalment. La digitalització està caracteritzada per la velocitat de transmissió, que es mesura en bits per segon (bps), mentre que la modulació es caracteritza mitjançant l'ocupació espectral, que es mesura en hertzs.

Figura 1



La informació transmesa per un sistema de comunicacions digitals es codifica a binària com a pas previ a la modulació.

En transmetre la seqüència de bits en qualsevol sistema de comunicacions, una de les característiques determinants del sistema és la velocitat a la qual s'envien aquests bits, que es mesura en bits (o quilobits, o megabits, o gigabits) transmesos per segon (bps, kbps, Mbps o Gbps).

A partir de la figura 1 s'interpreta que en tot sistema de comunicacions digitals es fan dues funcions importants de processat que transformen els senyals. La primera, la **digitalització del senyal**, ja ha estat comentada breument. La segona transformació converteix la informació binària en un senyal continu en el temps, la qual cosa es denomina habitualment **modulació**. El senyal obtingut a la sortida d'aquesta transformació es manifesta físicament mitjançant una diferència de tensió entre dos punts.

Tal com la velocitat de transmissió dels bits és el paràmetre fonamental que caracteritza la primera de les dues transformacions, l'ocupació espectral és el paràmetre que caracteritza el senyal resultant del procés de modulació. Per *ocupació espectral* s'entén la freqüència central a què es transmet el senyal i l'amplada de banda que s'ocupa al voltant d'aquesta freqüència central. Tots dos paràmetres es mesuren en hertzs (o múltiples: kHz, MHz, GHz...). L'amplada de banda es troba directament relacionada amb la velocitat de transmissió dels bits.

A diferència dels sistemes de comunicacions digitals, els sistemes de comunicacions analògics no fan el procés de "digitalització" de la informació. En aquests, el senyal d'informació és continu en el temps i constitueix directament l'entrada al modulador.

Són bastants els avantatges que ofereixen els sistemes de comunicacions digitals davant els sistemes de comunicacions analògics. L'avenç de la tecnologia ha facilitat enormement el desenvolupament dels sistemes de comunicacions digitals, i ha fet que, en general, siguin menys costosos que els analògics. Es destaquen a continuació altres avantatges importants dels sistemes de comunicacions digitals:

- **Capacitat de multiplexació.** El fet de codificar els senyals mitjançant una seqüència de bits repercuteix en el fet que senyals de naturalesa molt diferent tenen una representació com una seqüència de bits. És possible entrelaçar els bits que provenen de molts senyals diferents com un únic sistema, mitjançant el qual es poden transmetre simultàniament bits que

provenen de diferents tipus d'informació. Aquesta propietat es denomina *multiplexació temporal*.

- **Protecció dels continguts.** La informació en format digital es pot xifrar de manera molt eficient, per a dificultar o impedir l'accés a la informació a aquells usuaris que no estiguin autoritzats. Els continguts es poden protegir per a preservar la confidencialitat, autenticar l'autoria o proporcionar serveis de pagament mitjançant un accés condicional.
- **Processament digital de la informació.** En tractar-se d'informació digital, pot ser transformada directament mitjançant processadors digitals avançats, que poden executar un elevat nombre d'operacions per segon per a adaptar els senyals a les característiques del canal o estimar els senyals que han estat enviats. A més, aquests algoritmes són molt flexibles, en el sentit que es poden modificar amb facilitat, únicament canviant el programari del processador.
- **Capacitat de regeneració.** Les modulacions digitals són més robustes davant els efectes no desitjats que pateix el senyal en ser transmès pel canal. En efecte, en tractar-se de missatges digitals, només s'admetrà un nombre finit de possibles formes d'ona, per la qual cosa el receptor pot intentar calcular la forma d'ona original que s'ha transmès, encara que el senyal rebut estigui degradat. Observeu que en el cas més simple només es transmeten dues formes d'ona possibles, les que es corresponen amb cada un dels nivells lògics.

Però, com gairebé sempre, aquests avantatges impliquen també alguns inconvenients. En efecte, en igualtat de condicions, quan un senyal continu es transmet mitjançant una modulació digital, sempre ocupa una amplada de banda més gran que el mateix senyal transmès per un sistema de modulació analògica. Si prenem com a exemple un senyal d'àudio, la versió digital sol requerir per a la transmissió una amplada de banda deu vegades més gran que l'original analògic (el nombre exacte de vegades depèn del sistema de modulació, però per tenir una primera idea aquesta aproximació pot servir). En els senyals de vídeo l'augment de l'amplada de banda és encara més espectacular, i arriba a valors entorn de 100. Aquest seriós inconvenient segurament ens pot desanimar. No obstant això, és just comentar que la capacitat de processar digitalment la informació i la velocitat dels processadors moderns permet reduir el nombre de bits que s'han de transmetre de manera tan espectacular que compensen àmpliament aquest problema. De fet, en els sistemes de comunicació actuals, en els quals es fa compressió dels bits originals, els canals digitals d'àudio i vídeo ocupen menys que la seva contrapartida analògica.

Per acabar aquesta introducció, es pot comentar de quina manera estan relacionats els sistemes de comunicació que tractarem en aquest text amb el model d'OSI de les xarxes de dades i aplicacions telemàtiques. Actualment, les xarxes de dades constitueixen un mecanisme complex en el qual s'utilitzen simultà-

niament diferents aplicacions en què s'inclouen serveis de transferències de fitxers, programes, gràfics i arxius multimèdia. La complexitat de les xarxes de dades és tal que per a estudiar-les se solen utilitzar els models de referència que bàsicament consisteixen a fer diferents abstraccions en l'àmbit de la xarxa que simplifiquen el disseny i la valoració de la qualitat en cada un dels seus elements constituents.

És habitual utilitzar protocols a diferents nivells, que encapsulen i oculten les propietats, i paràmetres de la comunicació, que s'utilitzen en altres nivells d'abstracció. Així, un encaminador² no té en compte la naturalesa de les dades que transporta un paquet determinat i només en té en compte la capçalera per a adreçar-lo correctament cap a la seva destinació. El paquet que transmet pot contenir indistintament taules de dades, documents, o senyals d'àudio o vídeo. Els models de referència inclouen diferents capes d'abstracció de les comunicacions, com la capa física, la capa d'enllaç, la de xarxa, la de transport i les de sessió, presentació i aplicació segons el model de l'OSI. En aquest text ens concentrem de manera exclusiva en la capa física, l'objectiu de la qual és establir els procediments i tecnologies per a la transmissió fiable dels bits a través dels diferents canals de comunicacions. No considerarem, per tant, cap tipus de protocols d'enllaç o de xarxa, que es tracten específicament en altres assignatures.

⁽²⁾En anglès, *router*.

Figura 2

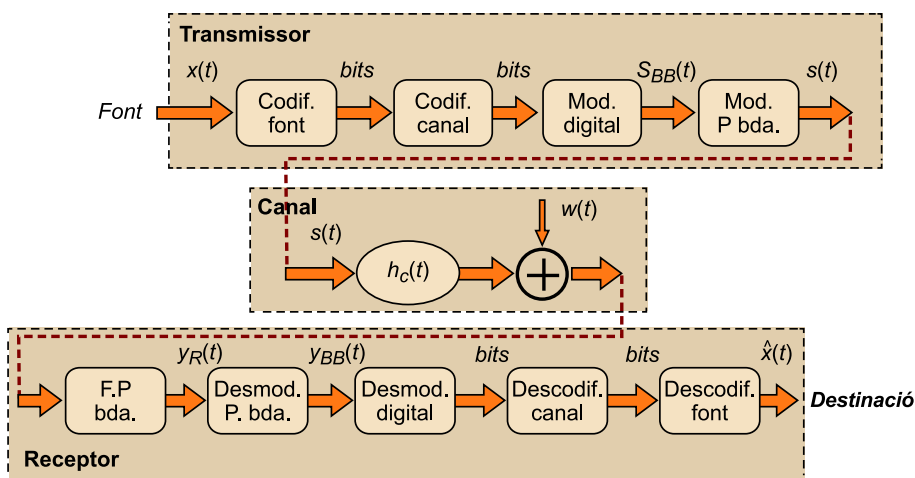


Diagrama de blocs funcional de cada un dels tres subsistemes que formen un sistema de transmissió

Els sistemes de comunicació digitals, independentment de la naturalesa del missatge, representen la informació mitjançant una seqüència de bits. En els apartats que segueixen es descriuen amb més detall cada un dels tres blocs principals per a un sistema de comunicacions digitals. En la figura 2 es presenta un diagrama de blocs funcional. En aquesta representació podem observar que el transmissor està format per quatre blocs elementals, les funcions dels quals també detallarem a continuació. En la gràfica també s'indica de manera específica que el canal té una resposta impulsional, que pot introduir distorsions en el senyal transmès, i que es poden afegir altres efectes no desitjats,

com la presència d'interferències i de soroll. Finalment, es detallen els mòduls que constitueixen el receptor, que essencialment fan les funcions recíproques de les que feia el transmissor.

2. Transmissor digital

En aquest apartat ens centrarem en el bloc de transmissió del sistema de comunicacions.

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.

Hem vist a la figura 2 que 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. Cada un d'aquests blocs serà tractat amb detall en els diferents subapartats d'aquest apartat. 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. De fet, cada un dels blocs, tractat rigorosament, sol ser objecte d'assignatures d'especialització en sistemes de comunicacions.

2.1. 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, suposarem que 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, per la qual cosa la 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 representació eficient que la quantitat total de bits transmesos sigui al més reduïda 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:

La funció del codificador de font

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) **Els codificadors de font sense pèrdues.** La seqüència de bits que s'envien al canal ha de permetre recuperar exactament la seqüència de bits de la informació original. En el 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 els quals resulta crucial recuperar de manera totalment exacta la informació original.

Codificadors sense pèrdues

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.).

2) **Els codificadors de font amb pèrdues.** Aquests codificadors se solen aplicar 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. En recuperar la informació només de manera aproximada podem 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.

Codificadors amb pèrdues

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 s'usen per a la compressió de senyals d'àudio i vídeo en equips domèstics (DVD-Video, iPod, PSP, etc.).

2.2. Codificació de canal

La **codificació de canal** fa una transformació dels bits amb l'objectiu de protegir la informació davant eventuais degradacions del senyal que podrien 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 les torni a transmetre. És un sistema adequat per a aquelles aplicacions en les quals el temps real no és crític, com la transferència de fitxers. El principal avantatge dels sistemes de detecció d'errors 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 quins són els bits que s'han rebut de manera incorrecta i corregir-los. Evidentment, aquestes estratègies requereixen que s'introdueixi més quantitat de redundància en la seqüència de dades original.

Potser observareu un aparent caràcter contradictori entre els blocs de codificació de font i de canal, ja que si un 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 obser-

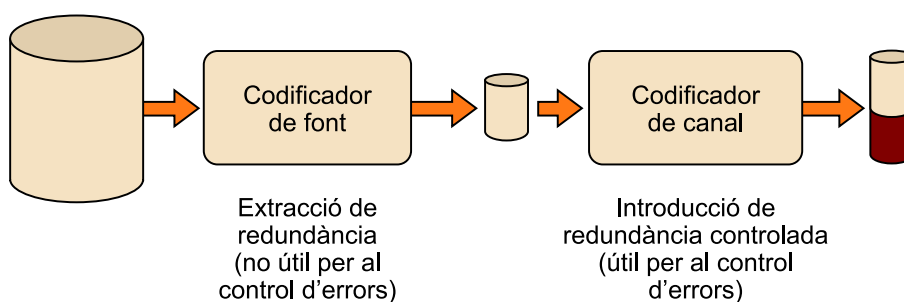
var que tots dos processos són necessaris i que de cap manera no són l'un el recíproc de l'altre. És a dir, la redundància que s'extreu en el codificador de font és una redundància inherent a les dades mateixes, que encara que estigués present, no permetria que el receptor pogués corregir o detectar 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 font 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 faci comprovacions sobre les dades rebudes i, si no coincideixen amb el que s'espera, les pugui 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 d'aproximadament 10 vegades (àudio) o 100 vegades (vídeo). És a dir, el volum de les dades comprimides en un codificador MPEG de vídeo pot ser 100 vegades més petit 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 entorn de 2-4. Per contra, la redundància controlada que s'introdueix en el codificador de canal és inferior a 2 en la majoria de les aplicacions pràctiques. En la figura 3 es mostra esquemàticament com els blocs de codificació de font i de canal extreuen i introdueixen redundància en les dades. La figura indica explícitament 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.

La funció del codificador de canal

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.

Figura 3. Extracció i inserció de redundància en les dades per als codificadors de font i de canal



2.3. Modulador digital

El modulador digital és un altre dels components clau en el diagrama de blocs del transmissor que hem mostrat en la figura 2.

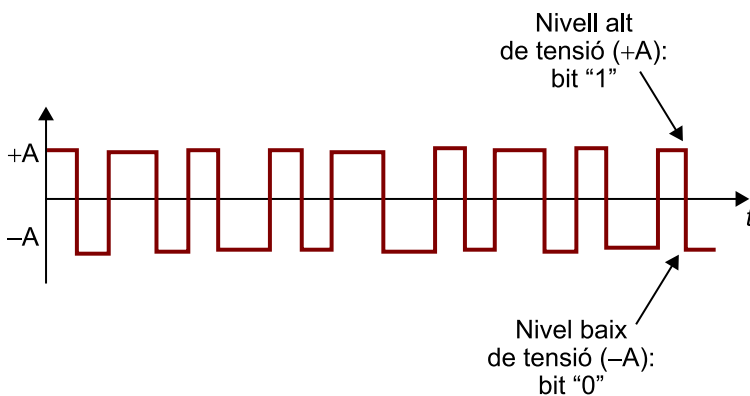
El **modulador digital** té com a missió mapar la seqüència de bits resultant del codificador de canal i convertir-la en un senyal continu en el temps, que es manifesta com un senyal elèctric, o diferència de tensió entre dos punts, i que va variant en el temps.

Implícitament, de la descripció donada s'intueix que un dels components d'un modulador digital és un convertidor D/A, ja que l'entrada al sistema és una seqüència de bits, emmagatzemable en memòria i tractable mitjançant un processador digital de senyal, i el senyal de sortida es pot representar mitjançant una funció contínua en el temps i es manifesta físicament com una diferència de tensió entre dos punts.

Tal com s'ha simbolitzat, el modulador digital de la figura 2 és un modulador digital en banda base, també denominat *codificador de línia*. Hi ha diferents tipus de moduladors digitals en banda base. En la figura 4 se'n mostra un exemple senzill, en el qual el senyal resultant a la sortida del modulador digital té dos nivells de tensió: $-A$ i $+A$. Els dos nivells de sortida es denominen *símbols binaris*. Si els bits s'agrupen en conjunts de 2, 3, etc., s'obtenen senyals de més de dos nivells, també denominats *símbols multinivell*.

Figura 4

Sortida modulador digital: senyal continu



Entrada modulador digital: seqüència de bits

1 0 1 1 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0 1 0 0 1 0

Exemple de modulació digital

El modulador digital representat es denomina *modulador en banda base*, ja que el contingut freqüencial del senyal modulat de sortida es distribueix al voltant de la freqüència zero. L'ocupació espectral de la modulació en banda base és el que es denomina *amplada de banda del senyal*. En general, aquesta ocupació espectral es troba relacionada linealment amb la velocitat a què es transmeten els bits. Com més velocitat de bit, més amplada de banda ocupa el senyal modulat digitalment. Col·loquialment, en parlar d'un dispositiu de comunicacions no se sol distingir entre tots dos termes, especialment en la compra de targetes i de punts d'accés per a connectar ordinadors a Internet. En parlar

Convertidor D/A

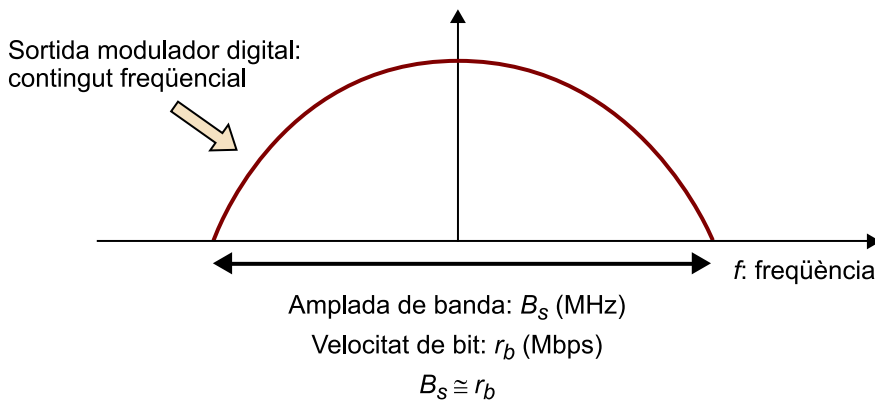
Un convertidor D/A converteix els nivells lògics (bits) d'un senyal digital a nivells de tensió analògics.

Amplada de banda i velocitat de transmissió

L'amplada de banda i la velocitat de transmissió constitueixen el paràmetres més significatius del modulador digital. Com es veurà, hi ha una relació lineal entre tots dos paràmetres.

de banda ampla, aquest terme es mesura amb els megabits o milions de bits per segon a què es transmeten els bits, suportats per una modulació digital i modulació passabanda.

Figura 5. Ocupació espectral en banda base d'una modulació digital



2.4. Modulador passabanda

Una vegada feta la modulació digital, 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 pas següent serà fer el trasllat del senyal des de la banda base cap a una freqüència determinada mitjançant el modulador passabanda. Conceptualment, aquest procés de modulació passabanda és el mateix tant si el senyal per modular és analògic com si és digital. Per aquesta raó els detalls d'aquest apartat serien els mateixos que ja es van comentar en el mòdul "Introducció als sistemes de comunicació".

De la mateixa manera que en altres mòduls hem vist que la modulació de senyals analògics es pot fer bé en amplitud o bé en freqüència, veurem que de manera anàloga podem parlar de modulacions digitals d'amplitud, de freqüència o de fase.

Freqüència portadora

La freqüència portadora constitueix el paràmetre més significatiu del modulador passabanda, ja que simbolitza la ubicació espectral del senyal modulat transmès.

Vegeu també

Podeu veure la modulació/desmodulació del senyal en els apartats 4 i 5 del mòdul "Introducció als sistemes de comunicacions" d'aquesta assignatura.

3. Receptor digital

El **receptor**, com el seu nom indica, 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, a més de dur a terme les operacions inverses a les executades en el transmissor, en el receptor es duen a terme funcions addicionals per a combatre els efectes no desitjats que el canal ha provocat sobre el senyal transmès.

3.1. Processat invers

En un sistema de desmodulació digital bàsic, s'han de fer les funcions indicades en la figura 2:

1) **Filtratge 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.

2) **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 al voltant de la freqüència portadora, i el senyal de sortida es troba centrat al voltant de la freqüència zero.

3) **Desmodulador digital.** El desmodulador digital processa la forma d'ona en l'entrada d'aquest i la redueix a una seqüència binària. L'operació es pot denominar *mapatge de senyals*. L'entrada a un desmodulador digital és un senyal continu en el temps i materialitzat mitjançant una tensió elèctrica. El senyal de sortida és una seqüència de bits que es processa a una determinada velocitat i emmagatzemable en un dispositiu de tipus memòria. Implícitament, es dedueix de l'anterior que algun dels components que integren el desmodulador digital és un convertidor A/D.

4) **Descodificador de canal.** Com el seu nom indica, fa l'operació inversa al codificador de canal. S'elimina la redundància introduïda pel codificador de canal. 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 velocitat determinada de bits per segon. El senyal de sortida del descodificador de canal és també una seqüència de bits, la velocitat binària dels quals 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 la recepció es coneixen els algoritmes utilitzats en el codificador de canal. Si a causa dels efectes del canal alguns dels bits s'han detectat erròniament en el desmodulador digital, i han canviat de 0 a 1 o viceversa, en el bloc descodificador de canal es poden corregir, sempre que el nombre d'errors no superi un percentatge determinat.

5) 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 aquest 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 la recepció no coincideix exactament amb el senyal missatge del transmissor. Un codificador de font comprimeix la informació i, encara que ho fa amb criteris de provocar la mínima distorsió sobre el senyal processat, els efectes de la compressió són, en principi, irrecuperables en el receptor.

3.2. Compensació dels efectes provocats pel canal

Una de les funcions del receptor serà mitigar, en la mesura del possible, els efectes provocats pel canal. La manera de fer-ho serà la mateixa que la que hem vist per al cas de senyals analògics. En el cas de comunicacions digitals pren importància el bloc d'equalitzador, que intentarà compensar la dispersió temporal de l'energia provocada pel canal. En el cas de comunicacions digitals la formulació de l'efecte dispersiu en temps del canal (anomenat *multicamí*), i també la formulació de l'equalitzador, seran més senzilles i fàcils d'entendre. Així mateix, la implementació física d'un equalitzador digital resultarà molt més factible que la implementació analògica (basada en components analògics).

3.3. Funcions de sincronisme

Les funcions de sincronisme són necessàries en tots els receptors per a permetre desmodular en senyal i descodificar-lo de manera correcta.

En el cas de comunicacions analògiques comentàvem la necessitat de disposar d'un sincronisme de portadora, que consisteix a disposar en recepció d'una rèplica del senyal portador amb els valors exactes, la freqüència i fase de la portadora per a poder traslladar de nou el senyal a banda base. En comunicacions digitals, a part d'aquest sincronisme de portadora, el subsistema de desmodulador requereix conèixer amb exactitud el senyal de referència que marca la velocitat de símbol i les seves transicions. Se sol denominar *senyal de relotge* i, en definitiva, a partir de les seves transicions se sincronitza l'operació de mostreig implícita en el convertidor A/D del desmodulador digital. Per a obtenir aquest senyal, es fa la funció corresponent d'extracció de sincronisme de símbol.

Vegeu també

Les funcions del receptor es tracten en el mòdul didàctic "Introducció als sistemes de comunicacions" d'aquesta assignatura.

Hi ha altres operacions de sincronisme que s'efectuen directament sobre les seqüències de bits i que depenen al seu torn d'operacions d'empaquetatge i d'etiquetatge que es fan sobre la mateixa seqüència.

3.4. Mesures de qualitat

L'objectiu final de tot sistema de comunicacions consisteix a reproduir en la destinació una rèplica tan fidel com sigui possible del senyal missatge. Quan la modulació és digital, atesa la naturalesa discreta de la informació per transmetre, la mesura de qualitat utilitzada serà la probabilitat d'error de la seqüència de bits, com ja sabem. Hi ha, però, altres mesures que poden determinar la qualitat d'un sistema i que s'utilitzaran depenent del tipus de servei. Així, per exemple, la latència o el retard de propagació, la velocitat de transmissió màxima permesa, la probabilitat de poder disposar del sistema, el nombre de comunicacions simultànies que poden fer... podrien ser altres mesures que determinarien la bondat d'un sistema.

Vegeu també

La probabilitat d'error de la seqüència de bits com a mesura de qualitat es tracta en el mòdul didàctic "Introducció als sistemes de comunicacions" d'aquesta assignatura.

Bibliografia

Bibliografia bàsica

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.

