

Introducció als sistemes de comunicacions

Margarita Cabrera
Francesc Tarrés Ruiz

Revisió a càrrec de
Francesc Rey Micolau
Francesc Tarrés Ruiz

PID_00184977



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	7
2. Transmissor, canal i receptor	9
3. Canal de comunicacions	12
3.1. El medi físic	12
3.1.1. Medis de transmissió guiats	13
3.1.2. Medis de transmissió no guiats: comunicacions sense fils	16
3.2. Degradació del senyal rebut	20
3.2.1. Soroll i interferències	20
3.2.2. La relació senyal a soroll	21
3.2.3. Distorsió	21
3.2.4. Model de canal lineal	22
3.2.5. Efectes no lineals al canal	23
4. Modulador (en el transmissor)	25
5. Desmodulador (en el receptor)	27
5.1. Processament invers	27
5.2. Compensació dels efectes provocats pel canal	28
5.3. Funcions de sincronisme	29
5.4. Mesures de qualitat	29
Annex: Una mica d'història	31
Bibliografia	34

Introducció

En aquest mòdul d'“Introducció als sistemes de comunicacions” ens centrem en l'estructura bàsica de tots els sistemes de comunicació i intentarem exposar les diferents funcionalitats que tenen cada un dels blocs de l'emissor i del receptor. Els tres elements bàsics d'un sistema de comunicacions són el transmissor, el mitjà de transmissió o canal, i el receptor i les seves característiques, que s'exposen amb detall en els diferents apartats d'aquest mòdul. Començarem, per tant, amb un esquema genèric de les funcionalitats i característiques de cada un d'aquests tres elements –transmissor, canal i receptor–, que es descriuen en el segon apartat.

Posteriorment, analitzarem amb més deteniment el canal, ja que és aquest el que ens determina com es degradarà el senyal transmès i, per tant, en quin grau l'haurèm de protegir o condicionar abans de transmetre'l perquè pugui ser rebut en la forma correcta. Observeu que si el canal no introduís cap distorsió sobre el senyal enviat, la recepció consistiria a identificar quin és el senyal transmès. No obstant això, en un sistema real els senyals es degraden, per la qual cosa el receptor obtindrà una versió degradada del senyal transmès. Estudiarem les característiques del canal i els diferents tipus de mitjans en l'apartat 3.

En els apartats 4 i 5 comentarem les funcions del modulador i desmodulador, ubicades físicament en el transmissor i receptor, respectivament. A més, en recepció és important valorar la qualitat del senyal rebut, per la qual cosa haurèm de definir mesures que ens permetin quantificar aquesta qualitat. Tots aquests elements de recepció també s'exposen en l'apartat 5.

Objectius

Aquest mòdul didàctic pretén que els estudiants, una vegada ho hagin estudiat, siguin capaços del següent:

- 1.** Identificar els elements bàsics d'un sistema de comunicacions i les seves funcions.
- 2.** Conèixer els diferents tipus de medis de transmissió i les seves característiques.
- 3.** Introduir els conceptes de soroll, interferències i distorsió. Identificar les causes que els poden produir.
- 4.** Definir diferents mesures que permetin valorar la qualitat d'un sistema de comunicacions.
- 5.** Identificar els blocs bàsics que constitueixen un modulador i les seves funcions.
- 6.** Identificar els blocs que constitueixen un desmodulador i les seves funcions.

1. Introducció als sistemes de comunicacions

En aquest text, es presenten els principis bàsics que suporten tant el disseny, com l'anàlisi dels sistemes de comunicació actuals. El disseny d'un sistema de comunicacions fa referència a la transmissió d'una determinada informació, i consisteix a determinar un conjunt de procediments que garanteixin la recepció correcta d'aquests missatges en un lloc remot. En funció de la naturalesa analògica o digital de la informació, parlarem de comunicacions analògiques o digitals, respectivament.

L'inici dels sistemes de comunicació data de finals del segle XIX amb la telegrafia, que és per si mateix un sistema de comunicacions digitals. Tanmateix, posteriorment, amb els inicis de la telefonia, la ràdio i la difusió de la televisió, s'estableixen els principals sistemes de telecomunicacions que predominen fins a la dècada dels seixanta i setanta (segle XX) que es basen en sistemes de comunicacions analògics. A partir d'aquests anys, amb l'avenç continu de la tecnologia s'han anat desenvolupant dispositius amb més possibilitats d'emmagatzematge de dades en superfícies cada vegada més petites, més possibilitats de càlcul d'operacions en coma flotant i en menys temps, millors tècniques de processament de senyal per a comprimir informació i combatre efectes no desitjats que sofreix el senyal en ser transmès i menys consums de potència. Totes aquestes característiques han permès el desenvolupament i establiment de sistemes de comunicacions basats en modulacions digitals que han transformat completament les comunicacions existents i han donat lloc a molts sistemes nous.

Una característica de particular importància en el disseny dels sistemes de comunicació és el canal o medi físic a través del qual es transmetrà la informació. Això significa que utilitzar un cable convencional, una fibra òptica o directament el medi aeri afecta directament el disseny dels diferents blocs que componen el sistema de comunicacions. En efecte, si la comunicació es realitza mitjançant cable, els efectes de les possibles interferències i sorolls sobre el senyal útil solen ser menors que quan la transmissió es realitza a través de xarxes de radioenllaços terrestres (medi aeri). De manera semblant, quan es realitza una comunicació via satèl·lit, el senyal transmès des de l'estació terrestre ha de recórrer un camí de 36.000 km sense cap tipus d'amplificació, fins a arribar al satèl·lit on es reenvia a la Terra. En definitiva, des que s'emet des del satèl·lit fins que el reben les antenes parabòliques de les nostres llars, el senyal ha recorregut un llarg camí, s'ha atenuat considerablement i ha estat exposat a diferents tipus de sorolls i interferències. Tot això significa que el disseny d'un sistema de comunicacions ha de tenir en compte les condicions en les quals es realitza aquesta comunicació. Aquestes condicions determinen el tipus de modulacions que s'utilitzen en cada cas i el processament que es realitza sobre

el senyal que es vol transmetre, per a protegir-lo de les possibles distorsions i sorolls que introduirà el medi. En definitiva, es tracta que el transmissor adapti el senyal al medi.

Si s'utilitza el medi aeri, la informació viatja entre el transmissor i el receptor en forma d'ona electromagnètica; si s'utilitza un cable, la informació es transmet com una diferència de tensió entre dos fils paral·lels. El mitjà que s'utilitza per a la comunicació estableix també una primera classificació dels sistemes de comunicació. Així, per exemple, és habitual referir-se als sistemes de televisió terrestre, per cable o per satèl·lit, fent menció específica del mitjà utilitzat per a la transmissió.

2. Transmissor, canal i receptor

En aquest apartat tractarem els elements bàsics que constitueixen un sistema de comunicacions i que es poden descompondre en el transmissor, el canal de comunicacions i el receptor.

Hi ha sistemes de comunicacions múltiples i diferents. En cap cas, no es considera com a objectiu d'aquest mòdul elaborar una descripció detallada de les parts individuals que componen un sistema en particular. Al contrari, es pretén donar una visió general de tots els elements bàsics que ha de contenir un sistema de comunicacions, emfatitzant la funció que fa cada un d'ells. Especialment, s'analitza el processament o transformació que experimenten els senyals a través de blocs bàsics, i es faciliten diferents criteris i estratègies per a analitzar i/o avaluar la qualitat dels senyals en cada un d'ells.

Des d'un punt de vista molt general, podem definir que sistema de comunicacions és el mecanisme pel qual s'envia la informació generada per una **font a un destinatari** situat a una determinada distància.

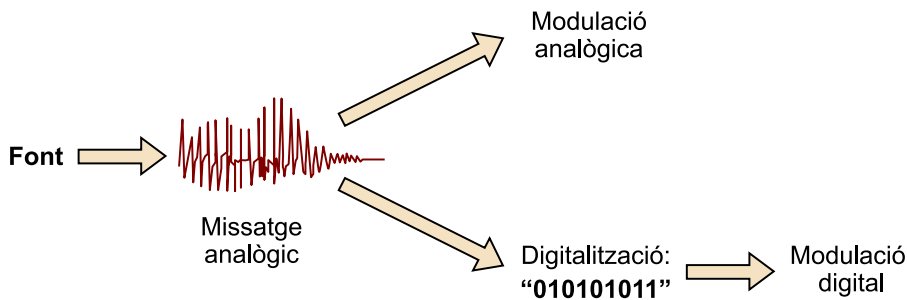
El **missatge** és la manifestació física generada per la font d'informació. L'objectiu final de la comunicació és que el destinatari reproduïxi una rèplica del missatge amb la fidelitat més gran possible respecte al generat per la font.

El missatge es representa mitjançant un senyal que es descriu en termes probabilístics, ja que és de naturalesa aleatòria. Per exemple, en una emissió de ràdio el missatge emès és un senyal d'àudio, però el contingut que transmet en particular una determinada emissora i a una hora concreta no queda determinat fins que no es produeix.

Les fonts d'informació es divideixen entre les que generen **missatges analògics** i les que generen **missatges digitals**. Un missatge analògic és una quantitat física que varia amb el temps de manera contínua. També se sol dir: "El missatge és un senyal continu en el temps". Exemples de missatges analògics són la pressió acústica d'un senyal d'àudio, la lluminositat d'un punt d'una imatge de televisió, etc. Un missatge digital consisteix en una seqüència ordenada de símbols. Cada símbol se selecciona d'entre un conjunt finit d'elements. Com a exemple de missatges digitals, es poden donar les lletres impreses d'una pàgina, una llista de temperatures mesurades sempre a la mateixa hora i amb una precisió de dècima de grau o un conjunt de contrasenyes bancàries, el nombre de cotxes que han passat per un peatge en un dia, el valor de tancament de les accions en borsa, etc.

Quan el missatge és de naturalesa digital, es transmet mitjançant una modulació digital. Quan és de naturalesa analògica, es tenen dues estratègies diferenciades per a transmetre'l: mitjançant una modulació analògica i mitjançant una modulació digital. Aquesta idea bàsica es representa en la figura 1, en la qual es distingeix que un missatge de naturalesa analògica pot ser transmès directament amb una modulació analògica, o pot ser digitalitzat prèviament i ser transmès mitjançant una modulació digital.

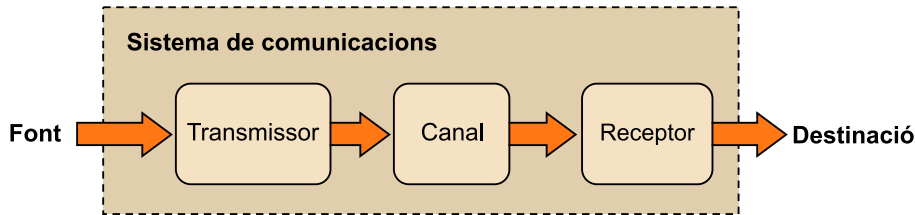
Figura 1. Alternatives de modulació quan el missatge que es transmet és analògic



Hem comentat que en general un sistema de comunicacions està format per tres components elementals, que són el transmissor, el canal de comunicacions i el receptor. Aquests tres components es representen mitjançant un diagrama de blocs, en l'esquema de la figura 2. Podem definir cadascun d'aquests elements:

- El **transmissor** processa el senyal del missatge generat per la font d'informació i proporciona el senyal transmès adequat al canal o medi de transmissió. Al seu torn, està format per diferents subsistemes, entre els quals destaquen les etapes de codificació i de modulació.
- El **canal** de transmissió és el mitjà elèctric que cobreix la distància entre el transmissor i el receptor. Pot estar format per un cable, una fibra òptica o l'espai radioelèctric (ona electromagnètica). Una característica inherent al canal de comunicacions és que el senyal transmès es degrada en ser propagat pel medi. Com més gran és la distància física entre el transmissor i el receptor, el senyal pateix una atenuació més gran. A més, apareixen altres efectes no desitjats com el soroll o la distorsió que es descriuen amb detall en el subapartat 3.2.
- El **receptor** opera sobre el senyal resultant a la sortida del canal de comunicacions i la seva missió és doble. D'una banda, és l'encarregat d'eliminar en la mesura possible els efectes produïts pel canal; de l'altra, ha d'adequar el senyal rebut al destinatari efectuant les operacions inverses al transmissor, per la qual cosa inclourà etapes de descodificació i de desmodulació.

Figura 2. Parts principals d'un sistema de comunicacions



Encara que no es descriuen en aquest mòdul, entre la font i el transmissor s'utilitza un transductor que converteix el senyal generat per la font en un senyal elèctric. Per exemple, si el missatge és d'àudio, aquest dispositiu és un micròfon i si el missatge és de vídeo, el dispositiu és una càmera de vídeo. Anàlogament, entre el receptor i el destinatari un altre transductor converteix el senyal elèctric resultant en la forma adequada perquè pugui ser captat pel destinatari, que normalment és un ésser humà. Per exemple, si el missatge és d'àudio, aquest dispositiu és un altaveu i si el missatge és de vídeo, el dispositiu és una pantalla de televisió.

Una forma d'establir una comunicació és fer-ho amb un sistema que funciona des d'un transmissor fins a un receptor i es denomina *punt a punt*. La telefonia és un exemple de comunicació punt a punt que normalment s'estableix en ambdós sentits. Una estratègia de comunicació diferent es desenvolupa mitjançant radiodifusió o *broadcasting*, com és el cas dels sistemes de ràdio i de televisió. En radiodifusió hi ha un únic transmissor i molts receptors independents que reben simultàniament el mateix senyal. És un exemple, per tant, de comunicació punt a multipunt.

En l'apartat següent ens concentrarem en el canal de comunicacions, ja que és l'element que defineix el grau de qualitat amb què es pot transmetre el senyal i, per tant, és un element clau en el disseny de la complexitat que haurem d'introduir en cada un dels mòduls del transmissor o del receptor per garantir una recepció correcta del senyal.

Els transductors

Un transductor és un component que s'encarrega de convertir una magnitud física en un senyal elèctric o viceversa. Així, un micròfon és un transductor d'ones de pressió a tensió i un altaveu, un transductor de tensió a ones de pressió.

3. Canal de comunicacions

Hem comentat que el canal de comunicacions determina la qualitat amb què podem transmetre i/o rebre els senyals. En aquest apartat estudiarem els diferents mitjans que es poden utilitzar per a la transmissió dels senyals i les causes que poden originar una pèrdua de qualitat en el senyal transmès.

Per a establir la comunicació entre un emissor i un receptor, és necessària l'existència d'un canal a través del qual es realitza l'intercanvi d'informació. El canal és, doncs, el medi físic que permet la tramesa de senyals entre els usuaris del sistema. Aquests senyals representen la informació que volem transmetre i es poden veure deteriorats per les característiques del medi físic que s'utilitza per a la transmissió i per la presència d'altres sistemes de comunicació.

En efecte, intuïtivament resulta evident que alguns medis de transmissió estaran més protegits que d'altres davant l'aparició d'efectes de degradació del senyal. Així, un sistema de transmissió de senyals per cable coaxial o fibra òptica sembla en principi més protegit, davant el soroll i les interferències, que un sistema de transmissió via ràdio. Per aquest motiu, el medi de transmissió condiona tot el disseny del sistema de comunicacions, ja que tant el transmissor com el receptor hauran d'adequar les característiques dels senyals a les del sistema. La modulació que utilitzarà un sistema de transmissió via ràdio haurà de ser més robusta que la d'un sistema per cable o per fibra òptica, ja que *a priori* els senyals enviats via ràdio experimentaran una degradació més gran (pensem en les múltiples reflexions i/o bloquejos que podrà patir el senyal electromagnètic).

En els subapartats següents considerarem els possibles medis físics per a la transmissió dels senyals (3.1), que dividirem en medis de transmissió guiats (3.1.1) i medis no guiats (3.1.2). Els primers es corresponen amb medis que utilitzen algun tipus de material diferent de l'aire com a suport físic de la comunicació (cable coaxial, fibra òptica), mentre que els medis no guiats utilitzen l'aire com a suport físic de la transmissió. Finalment, en el subapartat 3.2 detallarem les possibles causes que poden deteriorar la forma d'ona del senyal rebut.

3.1. El medi físic

L'elecció d'un medi físic o un altre per a l'establiment de les comunicacions depèn de diversos factors, entre els quals destaquen les raons històriques, les econòmiques, les tecnològiques i les mateixes característiques de l'aplicació. Podem considerar un exemple que il·lustra la incidència d'aquests factors a les xarxes i tecnologies de comunicació actuals. En efecte, la major part de connexions entre l'abonat al servei telefònic fix i la central telefònica són de

parell trenat. El parell trenat s'ha utilitzat històricament, ja que és econòmic i proporciona prou qualitat per a l'establiment de les comunicacions de veu. Una vegada existeix una connexió entre cada usuari i la central, resulta molt car modificar totes les infraestructures. Amb l'arribada dels nous sistemes de transmissió de dades i la necessitat de connectar ordinadors a les llars (aplicació), s'ha fet necessari recórrer a sofisticades solucions tecnològiques, com l'ADSL, amb la qual a través d'una sofisticació del sistema de modulació i desmodulació dels senyals s'aconsegueixen velocitats de transmissió que fa alguns anys, amb els mòdems convencionals, eren totalment impensables.

Els medis de transmissió es poden classificar en medis de transmissió guiats i medis de transmissió aeris (*wireless*: sense fils o no guiats). En general, els medis guiats ofereixen una protecció més gran del senyal. Els seus inconvenients principals són la necessitat d'instal·lar les infraestructures necessàries per a cobrir els diferents usuaris i que no poden ser utilitzats quan l'emissor i/o el receptor són mòbils.

3.1.1. Medis de transmissió guiats

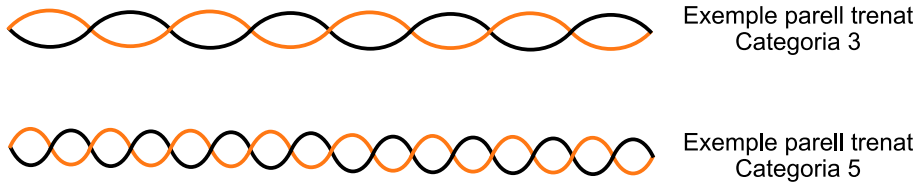
Els medis de transmissió guiats utilitzats amb més profusió són el parell trenat, el cable coaxial i la fibra òptica.

Parell trenat

El **parell trenat** està format per dos cables de coure, d'1 mm de diàmetre aproximadament, que estan trenats en una forma d'hèlix, semblant a una molècula d'ADN. La raó per la qual es realitza el trenat del cable és que els cables paral·lels es comporten com una antena, per la qual cosa són susceptibles de capturar senyals interferents i, a més, radien el senyal que circula per ells. En realitzar el trenat dels cables, es disminueixen aquests dos efectes amb la possibilitat de disposar de més cables que surten junts d'una central.

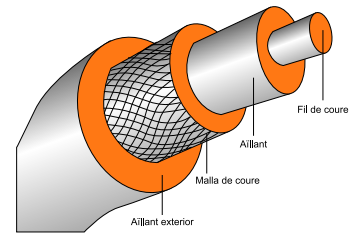
L'amplada de banda del parell trenat depèn de la grossària del cable i de la distància que s'hagi de cobrir sense amplificar. És típic que es puguin transmetre diversos Mbps (1-5 Mbps) per a distàncies d'1-3 km aproximadament. El cost del parell trenat sol ser baix i té excel·lents prestacions per a cobrir distàncies en interiors d'edificis. Els cables trenats més utilitzats es coneixen com a *categoria 5*. Aquests cables van ser introduïts el 1988 i tenen una amplada de banda de 100 MHz. També són cada vegada més populars els de la categoria 6 (250 MHz) i la categoria 7 (600 MHz). Essencialment, la diferència entre les diverses categories és la grossària del cable i sobretot el pas del trenat, tal com s'il·lustra en la figura 3.

Figura 3. Comparació entre el pas del trenat en cables de categoria 3 (16 MHz) i de categoria 5 (100 MHz)



Cable coaxial

El **cable coaxial** està format per un nucli central de coure recobert de material aïllant, que al seu torn està recobert per una malla metàl·lica. Tot això està protegit per una coberta aïllant de plàstic. Aquesta coberta aïllant està aplanallada per una malla de coure, que recobreix una altra coberta plàstica, que s'encarrega d'aïllar la malla del nucli central del cable de coure. El cable coaxial s'utilitza principalment en aplicacions de televisió per cable i per a xarxes d'àrea metropolitana o sistemes de telefonia per a llargues distàncies, encara que la tendència és la de substituir-los per cables de fibra òptica en la majoria d'aplicacions. Els coaxials actuals tenen una amplada de banda aproximada d'1 GHz.



Fibra òptica

La **fibra òptica** és el medi físic que actualment suporta més capacitat per a la transferència de dades, la qual cosa, juntament amb altres excel·lències com la seva protecció davant sorolls i interferències i el seu reduït pes i mida, fa que sigui el medi guiat més utilitzat. En la figura 5 es mostra una fotografia d'un cable de fibra òptica. En aquest exemple el cable està format per diversos fils de fibra, on cada un d'ells pot contenir diverses comunicacions simultàniament.

La fibra òptica es fabrica a partir de vidre, el qual és el medi a través del qual es propaga la llum que transporta la informació. Per a transmetre una seqüència de bits a través d'una fibra òptica, haurem d'introduir impulsos de llum en un dels seus extrems i detectar-los en l'altre. La presència de llum representarà el símbol lògic 1 i l'absència, el símbol 0. La distància en la qual es pot propagar el feix de llum a través de la fibra òptica depèn de la seva transparència, que al seu torn depèn de la qualitat del vidre.

Fabricació del vidre

La fabricació del vidre es fa mitjançant la fusió de silici i potassi i és coneguda des dels antics egipcis, que la fabricaven mitjançant la cocció en forns utilitzant sorra, materials alcalins i calç. Perquè el vidre tingués certa transparència, la seva espessor havia de ser inferior a 1 mm; en cas contrari, la llum quedava completament absorbida pel material. Al Renaixement es perfecciona la fabricació del vidre incolor, el qual es pot utilitzar per a la construcció de finestres.



Actualment, les fibres òptiques utilitzades per als sistemes de comunicació tenen una atenuació aproximada de 0,35 dBs per km, la qual cosa significa que la quantitat de llum només es redueix aproximadament a la meitat després de recórrer 10 km. Això significa que si es canviés l'aigua dels oceans pel material de fibra òptica, seria possible veure el fons marí des d'un avió.

L'atenuació de la fibra òptica depèn de la longitud d'ona de la llum. Si es representa en un gràfic l'atenuació per km en funció de la longitud d'ona, s'observa que existeixen unes regions en les quals l'atenuació és mínima. Aquestes regions es denominen *finestres* i determinen les longituds d'ona en les quals es treballa. Les longituds d'ona corresponents a les tres primeres finestres són 0,85 nm, 1,30 nm i 1,55 nm. L'amplada de banda teòrica que es pot obtenir en cada una d'aquestes bandes de freqüència oscil·la entre 25.000 GHz i 30.000 GHz.

No obstant això, amb la tecnologia actual no és possible assolir aquests límits teòrics a causa, principalment, de la velocitat dels dispositius transductors de senyal elèctric a llum i viceversa. L'ordre de magnitud que es pot aconseguir amb la tecnologia actual és entorn dels 50 Gbps en trams de 100 km de fibra òptica sense amplificar. Per a aconseguir trams de gran longitud, és necessari interconnectar fragments més petits de fibra. La connexió entre dos trams es pot realitzar mitjançant diferents tècniques basades en l'alineament dels acabaments o en la seva soldadura. En qualsevol cas, sempre apareixen algunes pèrdues per reflexió d'energia als punts de connexió.

La generació de la llum es pot fer mitjançant dispositius làser o mitjançant díodes electroluminiscents (LED). Els primers dispositius tenen una velocitat de commutació més gran, per la qual cosa poden oferir taxes de dades superiors i cobrir també longituds més grans que amb els LED. No obstant això, el làser és substancialment més car i té una vida útil més petita.

La fibra òptica ofereix múltiples avantatges respecte al coure, entre els quals destaca la seva immunitat davant les interferències produïdes per altres sistemes, la capacitat de cobrir distàncies més grans sense amplificació i, sobretot, el seu menor pes i volum. Un cable amb mil parells trenats d'un km de longitud té un pes aproximat de 8.000 kg, mentre que dues fibres que puguin suportar el mateix nombre de canals pesen només uns 100 kg. Aquest fet representa que totes les noves infraestructures de xarxes de cable es facin principalment en fibra òptica. A més, quan una xarxa ja existent ha de ser ampliada, també se sol substituir el coure per fibra, ja que a causa que el volum ocupat per la fibra és molt menor es poden aprofitar les canalitzacions existents augmentant el nombre efectiu de canals. D'altra banda, la fibra ofereix també comunicacions més segures a causa que és molt més complex "punxar" les comunicacions que amb els cables de coure.

Atenuació

Una atenuació de X dBs significa que la relació entre la potència de sortida i la d'entrada és de:

$$X = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}}$$

on P_{out} representa la potència a la sortida i P_{in} , la potència d'entrada. Segons aquesta equació, una atenuació de 0,35 dBs representa que la potència de sortida és la potència d'entrada multiplicada per un factor de 0,92257.

3.1.2. Medis de transmissió no guiats: comunicacions sense fils

Les comunicacions sense fils resulten indispensables en totes aquelles aplicacions en les quals el transmissor o el receptor han de tenir certa mobilitat. Els serveis de comunicacions a transports públics (radiotaxi, tren, etc.), la telefonia mòbil i les xarxes de dades sense fils per a ordinadors portàtils són exemples típics de sistemes de comunicació sense fils. Tanmateix, les comunicacions sense fils també poden ser competitives en aplicacions en què els terminals són fixos, especialment en aquells casos en què el cost de donar serveis de cobertura a l'usuari mitjançant infraestructures de cable és especialment elevat.

Els sistemes de transmissió sense fils es basen en el principi que en produir un moviment sobre els electrons es creen ones electromagnètiques que es poden propagar a través de l'espai. Aquest fenomen va ser previst pel físic anglès J. C. Maxwell el 1865 i confirmat experimentalment per H. Hertz el 1887. Quan una antena amb la mida i disseny apropiats es connecta a un circuit elèctric, es facilita la radiació de les ones electromagnètiques que poden ser rebudes per receptors amb les antenes adequades situades a certa distància. Totes les comunicacions sense fils es basen en aquest principi. Les distàncies que es poden cobrir, la mida de les antenes i la potència dels circuits elèctrics que s'han de connectar al transmissor i al receptor depenen de la freqüència i longitud d'ona del sistema de comunicacions.

En la figura 6 es representa una divisió de l'espectre radioelèctric que inclou una distribució de les seves bandes de freqüència i els seus usos en els sistemes de comunicació. Les bandes de freqüència més baixes es denominen *LF*¹, *MF*² i *HF*³. Històricament, aquestes tres bandes van ser les primeres a utilitzar-se.

Exemples

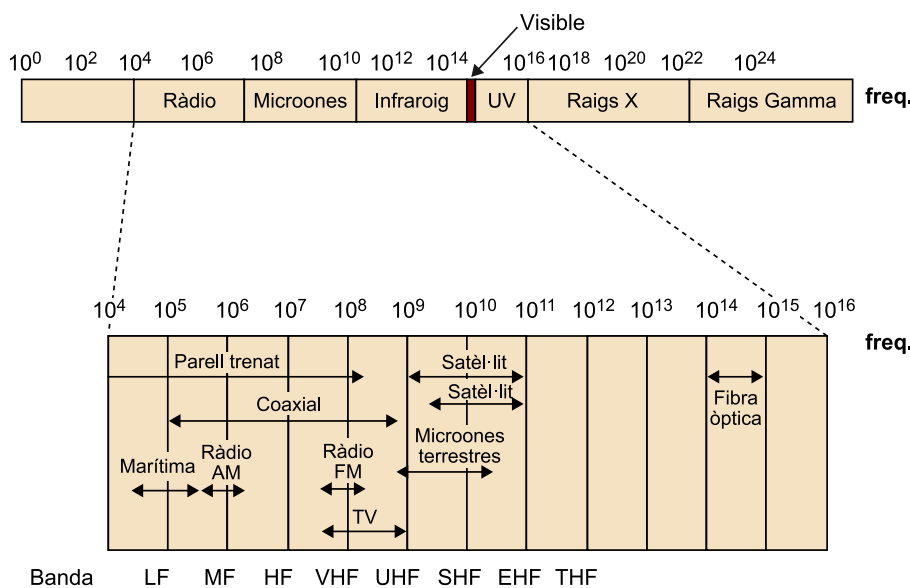
Exemples de sistemes de comunicació sense fils a usuaris fixos són els serveis de televisió per satèl·lit o per xarxes de radioenllaços terrestres.

⁽¹⁾De l'anglès, *low frequency*.

⁽²⁾De l'anglès, *medium frequency*.

⁽³⁾De l'anglès, *high frequency*.

Figura 6. Espectre electromagnètic i distribució en bandes



Banda LF MF HF VHF UHF SHF EHF THF

Posteriorment, quan es van començar a utilitzar serveis de comunicacions en bandes de més freqüència, els noms que es van utilitzar van ser superlatius cada vegada més “sofisticats”: VHF⁴, UHF⁵, SHF⁶, EHF⁷ i THF⁸. De moment no hi ha més denominacions per a les bandes més altes, la qual cosa probablement es deu a la falta d’imaginació per a utilitzar superlatius encara més sofisticats.

⁽⁴⁾De l’anglès, *very high frequency*.

⁽⁵⁾De l’anglès, *ultra high frequency*.

⁽⁶⁾De l’anglès, *super high frequency*.

⁽⁷⁾De l’anglès, *extra high frequency*.

⁽⁸⁾De l’anglès, *tremendously high frequency*.

En general, per a freqüències baixes, les ones de ràdio es propaguen sense dificultats a través dels obstacles com edificis o accidents geogràfics i la seva potència s’atenua en augmentar la distància amb la font de manera inversament proporcional al quadrat de la distància. En augmentar la freqüència, les ones electromagnètiques tendeixen a propagar-se en línia recta (com la llum), són bloquejades pels obstacles i són absorbides per fenòmens atmosfèrics com la pluja o la boira. A les bandes VLF, LF i MF, les ones es propaguen pròximes a la superfície de la Terra i poden assolir, a la banda VLF, distàncies de 1.000 km.

Per a freqüències més grans, les distàncies que es poden assolir són més petites. Així, això ens indica per què les emissores d’AM tenen més abast que les emissores d’FM. A les bandes d’HF i VHF, les ones tendeixen a ser absorbides per la Terra. No obstant això, en aquestes freqüències, si les ones assoleixen la ionosfera, les partícules elèctriques d’aquesta es comporten com un reflector de senyal que produeix un efecte de successives reflexions del senyal a la ionosfera i a la superfície de la Terra, amb la qual cosa poden arribar a cobrir tota la superfície d’aquesta. Aquestes són les bandes utilitzades pels radioaficionats i alguns sistemes militars. A totes les bandes de freqüències, les ones són susceptibles de sofrir interferències i sorolls, procedents d’altres sistemes de comunicacions o de radiacions electromagnètiques naturals.

En la taula següent es mostra la classificació de l’espectre en funció de les freqüències d’emissió, sia per a canals de tipus ràdio o per a canals a través d’un mitjà guiat, popularment també denominat *amb fils*.

Espectre	Canal alàmbic	Canal ràdio
Ultraviolat 750 THz: 20.000 THz	Fibra òptica	Raig làser
Visible 384 THz: 750 THz		
Infraroigs 300 GHz: 384 THz		
EHF (<i>extra high frequency</i>) 30 GHz: 100 GHz	Guia ones > 1 GHz	Ràdio de visió directa o microones > 100 MHz
SHF (<i>super high frequency</i>) 3GHz: 30 GHz		
UHF (<i>ultra high frequency</i>) 300 MHz: 3 GHz		
VHF (<i>very high frequency</i>) 30 MHz: 300 MHz	Cable coaxial	

Espectre	Canal alàmbic	Canal ràdio
HF (<i>high frequency</i>) 3 MHz: 30 MHz		Ràdio d'ona curta > 3 MHz
HF (<i>high frequency</i>) 3 MHz: 30 MHz		
MF (<i>medium frequency</i>) 300 kHz: 3 MHz	Parell de fils	Ràdio d'ona llarga > 10 kHz
LF (<i>low frequency</i>) 30 kHz: 300 KHz		
VLF (<i>very low frequency</i>) 3 kHz: 30 kHz		
Àudio > 10 kHz		

A causa de la capacitat de les ones ràdio de viatjar llargues distàncies, és evident que es poden produir interferències entre els mateixos usuaris dels sistemes de comunicacions. Per aquest motiu, els governs dels diferents països han de llicenciar l'ús de les transmissions i les aplicacions a les diferents bandes de freqüència, restringint i regulant el seu ús. Els governs nacionals s'encarreguen d'assignar els espectres i bandes de freqüència per a les aplicacions de ràdio AM i FM, la difusió de senyals de televisió, telefonia mòbil, transmissió de portadores en telefonia fixa, serveis marítics, policials, militars, etc. En l'àmbit internacional, l'organisme ITU-R (Internacional Telecommunications Union - Radio) tracta de coordinar aquestes assignacions amb l'objectiu que els equips de transmissió i recepció puguin ser compatibles a diversos països. No obstant això, aquest últim objectiu no sempre s'aconsegueix, ja que molts organismes nacionals no segueixen les especificacions marcades per l'ITU-R.

Les estratègies per a assignar portadores o bandes de freqüència a determinats serveis comercials poden resultar molt polèmiques i amb un contingut altament polític. En alguns casos, els governs organitzen concursos de propostes perquè els diferents candidats proposin la seva estratègia i model de negoci per explotar els serveis. La decisió de la concessió del servei es realitza tenint en compte la qualitat de les propostes. No obstant això, aquestes decisions solen resultar polèmiques i generalment estan marcades pels objectius polítics dels governs. La concessió d'una llicència de telefonia mòbil o d'un canal de televisió a una companyia o una altra és un tema molt important des del punt de vista econòmic i solen ser polèmiques per uns motius o uns altres. Altres possibles estratègies de concessió poden ser la presentació de candidatures a l'explotació dels serveis i el seu sorteig posterior. En aquest cas, la polèmica sorgeix quan el beneficiari decideix no explotar directament el servei i comercialitzar els drets d'explotació amb terceres companyies. Finalment, una altra possible estratègia és la de subhastar els serveis a la companyia o *holding* de companyies que més diners ofereixi. Aquesta última estratègia és el model que

s'ha seguit per a la concessió de llicències de sistemes de telefonia de tercera i quarta generació a molts països. Els alts preus assolits en les subhastes han provocat la fallida de moltes companyies de telefonia.

No tots els serveis de comunicacions estan regulats pel govern. En algunes aplicacions s'assignen bandes que els usuaris poden usar lliurement, sense necessitat de sol·licitar permisos especials. En aquests casos, les regulacions solen estar en les potències de transmissió i recepció dels equips terminals, que intenten garantir que els sistemes no s'interfereixin entre ells en distàncies llargues. Es poden trobar exemples d'aquest tipus de sistemes en aplicacions científiques, industrials, mèdiques, bandes ciutadanes, en les comunicacions entre terminals avançats mitjançant Bluetooth o xarxes Wifi 802.11, en els comandaments a distància dels equips de televisió, etc.

Finalment, es pot comentar que un tipus de sistemes de comunicacions no guiades són les comunicacions per satèl·lit. La primera idea per a millorar les comunicacions a distància va ser la de llançar globus amb elements metàl·lics que actuessin com a reflectors de senyal, intentant augmentar la distància en la qual es podia establir la comunicació. Aquests sistemes van ser poc estables i fiables, per la qual cosa es van descartar ràpidament. A la dècada dels cinquanta, els militars van utilitzar la Lluna com a satèl·lit natural en sistemes per a establir comunicacions entre la costa i els vaixells.

La primera proposta per a utilitzar satèl·lits de comunicació artificials es deu al físic, matemàtic i escriptor de ciència-ficció Arthur C. Clarke, que el 1945 va proposar utilitzar satèl·lits geostacionaris, és a dir, que no modifiquessin la seva posició relativa respecte a la Terra, de manera que no fos necessari efectuar-ne l'apuntament constantment. Arthur C. Clarke va calcular que els satèl·lits s'haurien de situar a 35.800 km de la Terra i va descriure amb detall els sistemes d'alimentació per plafons solars, les freqüències de ràdio que es podrien utilitzar i els possibles mecanismes per a llançar-los a l'espai. Clarke descartava l'aplicació pràctica d'aquesta idea a causa del gran pes que haurien de tenir els satèl·lits equipats amb vàlvules de buit. No obstant això, amb l'aparició del transistor aquestes condicions van canviar radicalment i el juliol de 1962 va ser possible llançar el primer satèl·lit de comunicacions. Els satèl·lits de comunicacions han estat una font de gran negoci per a empreses de comunicacions i centres d'investigació espacial, i s'ha creat una enorme competència entre països per la guerra de preus per al llançament a l'espai d'aquests satèl·lits.

La idea bàsica d'un satèl·lit de comunicacions és semblant a la d'un repetidor de microones convencional en una xarxa de radioenllaços terrena. En síntesi, es tracta de rebre el senyal procedent de la Terra, amplificar-lo, traslladar-lo de banda de freqüència i remetre'l cap a la Terra. L'estació terrestre que envia el senyal al satèl·lit utilitza, en general, antenes molt direccionals que apunten al satèl·lit dirigint tota l'energia cap a aquest. El satèl·lit rep el senyal i l'amplifica. El senyal rebut es trasllada a una altra banda de freqüència (*transponder*) per tal

de minimitzar les interferències entre els senyals de pujada i de baixada. Quan el senyal es retransmet cap a la Terra, sol cobrir una àrea molt important, de manera que amb uns quants satèl·lits és possible cobrir-la tota.

Les òrbites dels satèl·lits de comunicacions

El període orbital del satèl·lit depèn de la seva distància a la Terra: com més a prop, més ràpida és l'orbitació. A la pràctica només s'utilitzen tres òrbites. Els satèl·lits geoestacionaris (GEO) estan situats a 35.800 km i el seu període orbital coincideix amb la rotació de la Terra (24 hores). Amb tres satèl·lits GEO és possible donar cobertura a tota la Terra. Aquests satèl·lits s'usen per a moltes aplicacions de comunicacions, entre les quals destaquen els serveis de televisió i els de telefonia.

Els satèl·lits MEO (*medium earth orbit*) estan situats entre els 5.000 i els 15.000 km. El seu període orbital és d'unes sis hores i són necessaris uns deu satèl·lits per a cobrir la Terra completament. Aquest tipus de satèl·lits no s'utilitzen en aplicacions de comunicacions, sinó que la seva aplicació actual més important és el servei de posicionament global per satèl·lit (GPS, *global positioning system*). Finalment, els satèl·lits LEO (*low earth orbit*) estan situats a una distància aproximada (depèn del servei) d'uns 1.000 km i són necessaris uns cinquanta satèl·lits per a cobrir la Terra. Aquestes òrbites s'utilitzen en aplicacions de veu i serveis d'Internet. Les diferents òrbites estan ben diferenciades a causa de la presència dels cinturons de Van Allen, formats per conjunts de partícules elèctricament carregades i atrapades pel camp magnètic de la Terra que impedeixen posicionar satèl·lits artificials en aquestes zones (entre els 2.000 i 5.000 km i entre els 15.000 i els 20.000 km), ja que serien danyats i reduirien considerablement el seu període de vida útil.

3.2. Degradació del senyal rebut

Independentment del medi de transmissió utilitzat, el senyal enviat es pot veure afectat per diferents fenòmens físics, que degraden la seva forma d'ona i dificulten la seva recepció. Les causes que degraden la forma d'ona del senyal transmès es poden classificar, en funció de la naturalesa del fenomen físic que la produeix, en tres tipus: soroll, distorsió i interferències. Definirem breument cada una d'elles.

3.2.1. Soroll i interferències

En general, podem considerar com a **soroll** tota aquella energia no desitjada que obtenim al receptor i que procedeix d'altres fonts diferents del transmissor. En aquesta definició també s'inclourien com a soroll, per tant, tots els senyals procedents d'altres usuaris, que comparteixen part del nostre espectre o que treballen en regions espectrals pròximes. Aquest tipus de soroll, procedent d'altres sistemes de comunicacions, se sol distingir d'altres causes i es coneix amb el nom d'**interferències**.

Les interferències poden ser degudes a múltiples causes, en funció del medi de transmissió i el tipus de sistema de comunicació. Així, per exemple, en sistemes de cable trenat es pot produir encreuament de comunicacions (conegut com a *diafonia*) entre els senyals existents entre dos o més parells diferents. En sistemes de transmissió sense fils, la interferència pot aparèixer per sistemes que ocupen bandes de freqüència que s'encavalquen parcialment amb la utilitzada per la nostra.

A banda de les interferències, el soroll també es pot produir com a resultat del moviment aleatori dels electrons en un conductor, la qual cosa es coneix com a *soroll tèrmic*. El soroll còsmic és degut a la radiació dels cossos celestes i té unes característiques molt semblants al soroll tèrmic. Apareix en aplicacions de comunicacions amb freqüències superiors als 15 MHz, sobretot quan s'utilitzen antenes molt directives que apunten al Sol o altres regions de l'espai. El soroll tèrmic i el soroll còsmic se solen modelitzar com un senyal aleatori (procés estocàstic) amb un espectre de freqüència pla, és a dir, amb contingut en totes les freqüències.

Altres tipus de soroll són l'impulsional, que pot aparèixer per la presència d'impulsos a les línies d'alta tensió, per l'existència de motors que produeixen radiacions que afecten el nostre sistema, per descàrregues elèctriques atmosfèriques, etc.

3.2.2. La relació senyal a soroll

Un paràmetre important en qualsevol receptor és la relació senyal a soroll (SNR, *signal noise ratio*), que mesura la proporció entre la potència corresponent al senyal desitjat i la potència de soroll. Aquesta relació se sol expressar en decibels:

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_S}{P_N} \right) \quad (1)$$

on P_S representa la potència del senyal i P_N la potència de soroll.

Anàlogament, quan el receptor treballa en presència de soroll i d'interferències, es pot utilitzar la relació senyal a soroll més interferències (SNIR):

$$SNIR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_S}{P_N + P_I} \right) \quad (2)$$

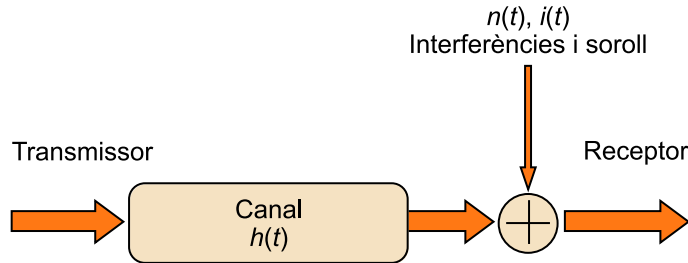
3.2.3. Distorsió

La **distorsió** és una altra de les causes que pot introduir degradació en la forma d'ona del senyal. La distorsió es pot deure a diferents causes, encara que totes elles tenen el factor comú que el canal no es comporta d'una manera ideal.

En moltes aplicacions podem interpretar que el canal de comunicacions es comporta com un filtre i, per tant, té associada una resposta impulsional i una resposta en freqüència. En la figura 7 s'indica gràficament que el canal es pot modelitzar mitjançant un sistema lineal en què el senyal d'entrada es correspon al senyal procedent del transmissor, i el senyal de sortida és el que obtenim a l'entrada del receptor. A l'entrada del receptor es poden considerar

també els efectes de soroll i interferències que hem discutit en el subapartat 3.2.2. En el subapartat 3.2.4 formalitzarem la idea de modelitzar el canal mitjançant un filtre i caracteritzarem el canal ideal.

Figura 7. Model d'un canal mitjançant un filtre lineal amb resposta impulsional $h(t)$ més l'addició de soroll i interferències



3.2.4. Model de canal lineal

En resum, els efectes de distorsió i de soroll i interferències es poden modelitzar en moltes aplicacions mitjançant un sistema lineal. Segons el diagrama de la figura 7, el senyal que obtindrem a la sortida del canal es pot expressar de la manera següent:

$$y(t) = h(t) * x(t) + w(t) \quad (3)$$

on $h(t)$ representa la resposta impulsional del sistema, $x(t)$, el senyal a la sortida del transmissor, $y(t)$, el senyal a l'entrada del receptor i $w(t)$, les interferències i soroll. Podem particularitzar l'equació anterior al cas en el qual el sistema treballa sense soroll ni interferències, de manera que obtenim la relació entre el senyal del transmissor i del receptor tenint en compte únicament els efectes del filtratge lineal introduït pel canal. En aquest cas, la relació entre els dos senyals estarà determinada per:

$$y(t) = h(t) * x(t) \quad (4)$$

cosa que ens indica que la forma d'ona del senyal que obtenim a l'entrada del receptor depèn del senyal transmès i de la resposta del canal. Així doncs, si coneixem la resposta impulsional del canal (o la resposta en freqüència), podrem intentar posar el sistema invers al receptor. Aquest sistema invers se sol denominar *filtre d'equalització* i en la majoria de les aplicacions només el podem determinar aproximadament. En l'exemple següent definim la resposta impulsional d'un canal ideal i comprovem que aquest tipus de canals només introdueix un factor d'atenuació i un retard.

Exemple. Canal ideal

Un canal ideal es defineix com aquell que no introdueix cap distorsió sobre la forma d'ona del senyal transmès i que només està afectat per un factor d'amplitud i un retard. El factor d'amplitud es coneix com a *atenuació del canal*. És fàcil comprovar que el canal ideal és un canal sense soroll ni interferències i la resposta impulsional del qual es pot expressar mitjançant:

$$h(t) = \alpha \cdot \delta(t - \tau) \quad (5)$$

En efecte, el senyal que obtindrem a la sortida del sistema serà:

$$y(t) = h(t) * x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\nu) \cdot x(t - \nu) \cdot d\nu = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha \cdot \delta(\nu - \tau) \cdot x(t - \nu) \cdot d\nu = \alpha \cdot x(t - \tau) \quad (6)$$

cosa que demostra que el senyal $y(t)$ és una rèplica del senyal $x(t)$ retardat un temps τ i afectat per un factor d'atenuació α .

3.2.5. Efectes no lineals al canal

La distorsió també pot ser originada pels efectes no lineals en els dispositius electrònics utilitzats. En efecte, considerem un canal de comunicacions la relació entrada sortida del qual és no lineal. Per simplicitat, suposarem que la relació entrada sortida es pot expressar com una combinació de diferents potències del senyal d'entrada:

$$y(t) = a \cdot x(t) + b(x^2(t)) + c(x^3(t)) + \dots \quad (7)$$

En aquesta equació els coeficients b , c , d , etc. tenen en compte les no-linealitats. Aquests coeficients solen ser molt més petits que el coeficient a . Noteu que en aquest model, si tots els coeficients b , c , d , etc. fossin igual a zero, obtindríem un canal ideal amb retard nul i atenuació (o amplificació) a .

Per a il·lustrar que un sistema no lineal pot introduir nous components de senyal, considerem únicament el component quadràtic. Suposem també, per a simplificar màxim el tractament numèric del problema, que el senyal a l'entrada del canal és un sinusoid perfecte, amb freqüència f_0 . Llavors, el component que obtenim a la sortida a causa de l'efecte quadràtic serà:

$$\left(\sin(2\pi f_0 t)\right)^2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \cos(2\pi(2f_0)t) \quad (8)$$

cosa que ens indica que apareix un senyal de freqüència doble com a conseqüència del terme no quadràtic del sistema no lineal.

En general, quan un senyal sinusoidal s'introdueix a l'entrada d'un sistema no lineal, apareixen a la sortida del sistema una sèrie de components sinusoidals les freqüències dels quals són múltiples de les freqüències d'entrada. Així, el terme *quadràtic* és responsable que aparegui un component sinusoidal de freqüència doble al senyal d'entrada. El terme *cúbic* serà el responsable que aparegui un component amb freqüència triple, i així successivament. Aquests components sinusoidals les freqüències dels quals són múltiples de la freqüència del senyal d'entrada es coneixen amb el nom d'**harmònics**. En general tenen valors petits a causa que les constants b , c , d , etc. solen ser també petites.

La distorsió se sol mesurar com una relació entre la potència deguda a l'aparició dels harmònics respecte a la freqüència fonamental del senyal. El factor es coneix com a *distorsió harmònica total (THD)*⁹:

⁹THD és la sigla de l'expressió anglesa *total harmonic distortion*.

$$TDH = \frac{P_2 + P_3 + P_4 + \dots + P_N}{P_1} \quad (9)$$

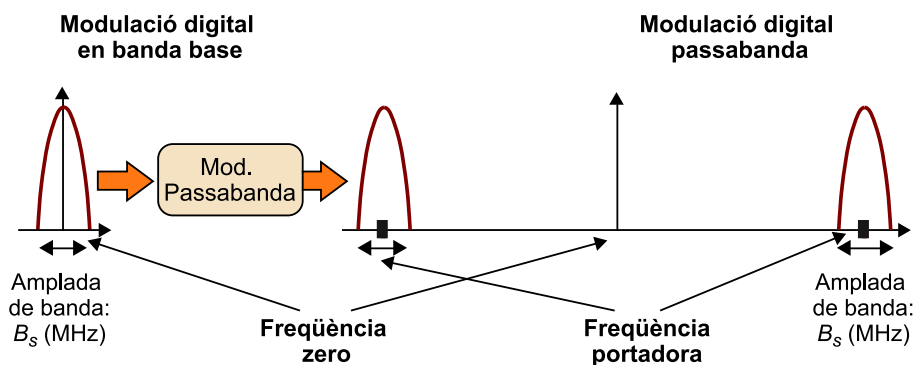
on P_1 representa la potència fonamental i P_k , la potència de cada un dels harmònics.

4. Modulador (en el transmissor)

Un cop es disposa del senyal d'informació obtingut de la font, ja s'està en condicions de transmetre'l. No obstant això, aquest senyal està centrat en l'origen de freqüències, per la qual cosa la seva transmissió a llargues distàncies serà poc eficient a la majoria de medis de transmissió.

El modulador passabanda 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. En l'àmbit d'operacions, aquesta operació és senzilla d'aconseguir. N'hi ha prou de multiplicar el senyal en banda base per una funció trigonomètrica de tipus cosinus. La freqüència de la funció trigonomètrica es denomina *freqüència portadora* i sovint el mateix senyal trigonomètric es denomina *portadora*.

Figura 8. Ocupació espectral d'una modulació passabanda



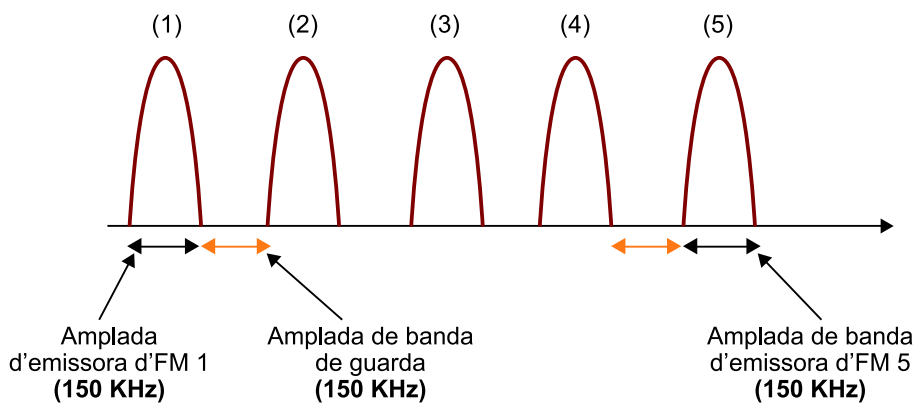
Els sistemes de comunicacions pràctics, com la televisió o la ràdio, estan estandaritzats per normatives internacionals, de manera que tant l'ocupació espectral com la potència dels senyals transmesos són recomanades en el corresponent estàndard i són regulades a cada país, especialment els sistemes de comunicacions sense fils o radioelèctrics. L'espectre és, per tant, un bé escàs i cada aplicació opera en una determinada banda de freqüències. Així, les transmissions de ràdio per FM cobreixen la banda de freqüències que va de 87,5 MHz a 108 MHz, coneguda com a *banda VHF*. Dins d'aquesta banda, està regulat que cada emissora ocupi una amplitud de banda de 150 kHz i, a més, que entre cada dues emissores de freqüències consecutives es deixin 150 kHz lliures d'amplitud de guarda. Per tant, als 20,5 MHz assignats al sistema de radiodifusió a FM, caben un total de $20,5/0,3 = 68$ emissores. A la pràctica no sempre es respecta l'assignació de freqüències regulades i, per exemple, en el cas d'FM, apareixen emissores locals que aprofiten els espais de guarda entre emissores veïnes i provoquen possibles interferències als senyals rebuts.

En la figura 9 es mostra un exemple d'assignació freqüencial a emissores de ràdio FM. En aquest exemple queda clar que l'espai radioelèctric està dividit en regions clarament definides, de manera que cada usuari (programa de ràdio FM) pot compartir i utilitzar simultàniament el medi (que en aquest cas és l'aire). Aquesta estratègia perquè diversos usuaris comparteixin un medi es coneix amb el nom de *multiplexació en freqüència*.

Vegeu també

En el mòdul "Multiplexació i sistemes d'accés múltiple" s'estudien aquesta i altres tècniques per a multiplexar els senyals.

Figura 9. Exemple d'assignació d'amplades de banda i temps de guarda per a cinc emissores d'FM



El senyal resultant a la sortida del modulador passa per etapes d'amplificació i d'adaptació al medi abans de ser transmès. En el cas de transmissions ràdio, l'adaptació al medi es fa mitjançant una antena transmissora.

Reflexió

Alguns sistemes de comunicacions transmeten directament el senyal en banda base. És el cas de comunicacions per cable punt a punt. Preneu com a exemple un perifèric d'un ordinador (ratolí, teclat, etc.) la comunicació en un porter automàtic o la línia telefònica (de telefonia fixa) entre casa vostra i la centraleta telefònica. En aquestes transmissions el canal és utilitzat únicament per un senyal que es transmet directament en banda base i, per tant, no és necessari traslladar-lo a una freqüència portadora.

El modulador passabanda trasllada un senyal de contingut freqüencial passabaix a una banda de freqüències al voltant d'una freqüència portadora.

El paràmetre més significatiu del modulador passabanda resulta la freqüència portadora, ja que simbolitza la ubicació espectral del senyal modulat i transmès.

Vegeu també

Els mòduls "Comunicacions analògiques: modulacions AM i FM" i "Comunicacions analògiques: senyals passabanda" estan dedicats a l'estudi dels moduladors analògics passabanda, i el mòdul "Comunicacions digitals passabanda" tracta l'estudi de les modulacions digitals passabanda.

5. Desmodulador (en el receptor)

El receptor, com el seu nom indica, és la part del sistema situat físicament al 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 al transmissor, al receptor es duen a terme funcions addicionals per a combatre els efectes no desitjats que el canal ha provocat sobre el senyal transmès.

A continuació es presenten cada una d'aquestes tres funcionalitats del receptor separatament i es defineixen les estratègies habituals utilitzades per a mesurar la qualitat del sistema.

5.1. Processament invers

En un sistema de desmodulació es realitzen les funcions següents:

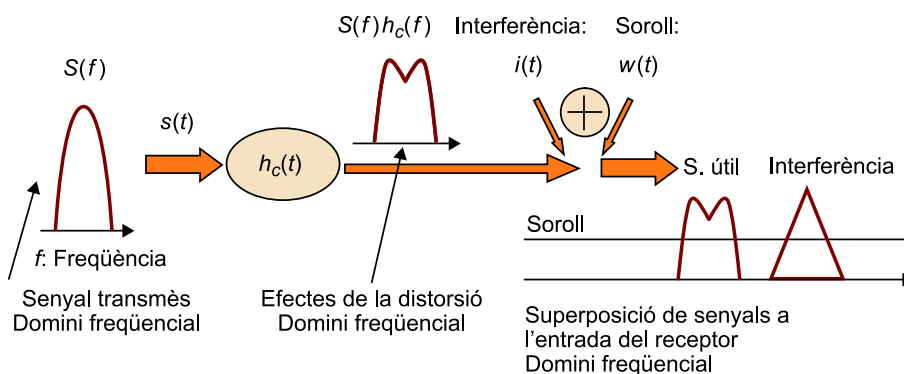
1) **Filtratge passabanda.** Aquest filtre s'adapta a la modulació esperada i transmesa i també denominada *senyal útil*. Es troba centrat a la freqüència portadora de la transmissió i ha de tenir prou amplada de banda per a donar cabuda al senyal modulad, si bé no l'ha de superar en la mesura que sigui possible, per tal d'evitar interferències i soroll fora de la banda del senyal útil. Si la modulació fos directament en banda base, aquest filtre és passabaix amb els mateixos requisits quant a l'amplada de banda. Si bé aquest element no és pròpiament de processament invers, ja que no es correspon amb cap de les funcions executades pel transmissor, sinó que la seva funció és precisament eliminar senyals presents al canal de transmissió, i que no ocupen la banda del senyal útil, es comenta en aquest subapartat per a seguir l'ordre de processament de les diferents funcions del receptor tal com operen en un sistema real.

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. En realitzar aquesta funció, a la recepció es requereix disposar d'una rèplica del senyal portador utilitzat en transmissió tan precisa com sigui possible. Hem comentat en l'apartat 4 que en la modulació passabanda s'utilitza un senyal portador de tipus cosinus. En el receptor, és necessari recuperar el senyal cosinus amb la màxima fidelitat respecte als paràmetres de freqüència i fase que la defineixen. Si el senyal transmès és directament el senyal en banda base, el desmodulador passabanda no s'implementa.

5.2. Compensació dels efectes provocats pel canal

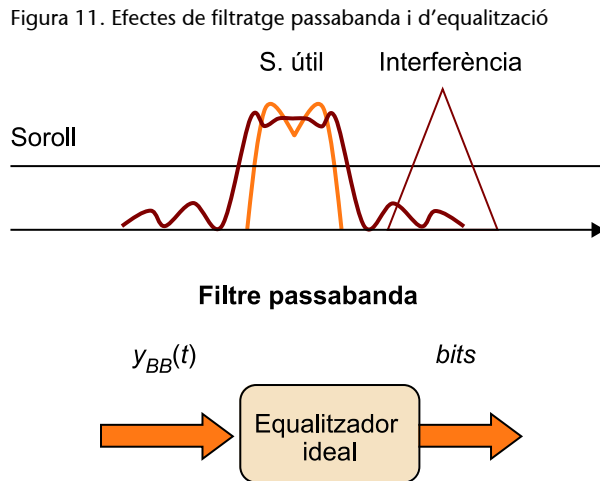
Tal com hem vist en el subapartat 3.2, els efectes que introdueix el canal sobre el senyal rebut es poden reduir al soroll additiu, els senyals interferents i la distorsió. En la figura 10 es mostra l'efecte que els tres fenòmens provoquen sobre el senyal en el domini freqüencial. S'hi mostra explícitament com l'espectre del senyal transmès es pot veure afectat per la resposta en freqüència del canal, modificant els valors relatius de les diferents freqüències. També es mostra l'aparició d'altres senyals, el contingut freqüencial dels quals és pròxim al del senyal transmès (interferència) o se superposa (soroll). La gràfica també mostra que la interferència té una amplada de banda semblant a la del nostre senyal, mentre que el component de soroll té una amplada de banda molt més gran.

Figura 10. Efectes produïts pel canal en el domini freqüencial



El filtre passabanda inclòs com a primer element al sistema receptor elimina les possibles interferències sumades al senyal útil a la recepció, així com el soroll de canal que es produeix a l'entrada del receptor i que ocupa els components freqüencials no ocupats pel senyal útil. La part de soroll que ocupa la banda de freqüències del senyal útil no es pot eliminar mitjançant filtratge, queda superposat al senyal i es troba present en la resta de les etapes del receptor.

L'efecte provocat per la distorsió del canal canvia la forma del senyal. Quan el canal admet el model de sistema lineal, invariant en el temps, i es pot caracteritzar mitjançant la seva resposta impulsional, l'efecte en teoria es pot eliminar i es pot restaurar la forma del senyal mitjançant un altre sistema lineal i invariant denominat *equalitzador*. És a dir, la solució teòrica per a eliminar la distorsió lineal que produeix el canal sobre el senyal existeix; tanmateix, la seva implementació pràctica és en si mateixa molt complicada si no impossible, i sempre s'acaba implantant un sistema la funció de transferència del qual és una aproximació de la ideal.



En un esquema receptor en el qual sigui necessari equalitzar el senyal útil, el subsistema equalitzador s'implementa en banda base i normalment com una funció afegida al desmodulador.

5.3. Funcions de sincronisme

Les funcions de sincronisme són necessàries en tots els receptors de comunicacions per a permetre desmodular el senyal de manera correcta.

En la desmodulació passabanda es requereix una rèplica del senyal portador a la recepció, amb els valors exactes que prenen els paràmetres de freqüència i fase de la funció de tipus cosinus. Per a obtenir aquest senyal, es fa la corresponent funció d'extracció de sincronisme de portadora.

5.4. Mesures de qualitat

L'objectiu final de tot sistema de comunicacions consisteix a reproduir a la destinació una rèplica tan fidel com sigui possible del senyal missatge. Per a mesurar la qualitat d'aquesta rèplica, s'utilitzen criteris consistents a minimitzar o maximitzar determinades funcions objectius.

Per a un senyal de naturalesa analògica detectat a la recepció, el criteri de mesura de qualitat consisteix a mesurar el quocient de potències entre el senyal útil detectat i el senyal de soroll (SNR). En la figura 11 es mostra l'operació de filtratge passabanda, en la qual la part de senyal de soroll que ocupa la mateixa banda que el senyal útil no es cancel·la mitjançant la funció de transferència del filtre i queda permanentment sumada al senyal útil a la recepció. Si el senyal útil no es troba distorsionat, és a dir, en cas que hagi sofert distorsió, s'ha equalitzat de manera perfecta i té sentit definir el quocient de potències SNR.

Observació

Per a no estendre excessivament el mòdul, no s'inclouen com a part de la teoria les tècniques de sincronització de senyals, encara que sí que s'han inclòs alguns exemples i alguns exercicis proposats que estudien els efectes que tenen sobre els senyals les tècniques de recepció amb errors de sincronisme, tant si són de portadora com de símbol.

Podeu consultar, si us interessen, les referències proposades per a ampliar els coneixements sobre aquest tema.

En comparar diferents sistemes de modulació analògica entre ells, se sol calcular per a cadascun el quocient de potències en detecció entre el senyal útil (numerador) i el senyal de soroll (denominador) en igualtat de condicions quant a nivells de soroll i de potència del senyal transmès. El sistema que produeix el quocient de potències més elevat és lògicament el de més qualitat.

Quan la modulació és digital, la mesura de qualitat àmpliament utilitzada és la probabilitat d'error de la seqüència de bits. Aquesta mesura es fa tant a la sortida del desmodulador digital, com a la sortida del descodificador de canal.

Els efectes que pateix el senyal en ser transmès pel canal de comunicacions són de naturalesa aleatòria: el soroll, les interferències, la distorsió, etc. Tots ells repercuteixen en el fet que el senyal a l'entrada del desmodulador digital al receptor sigui més o menys diferent que el senyal a la sortida del modulador digital al transmissor. A causa d'aquestes diferències, cada un dels bits transmesos es detectarà a la sortida del desmodulador digital amb una determinada probabilitat P d'error. És a dir:

- Si el bit transmès és un 1, el corresponent bit detectat en el receptor és igual a 0 amb probabilitat P i és igual a 1 amb probabilitat $1 - P$.
- Si el bit transmès és un 0, el corresponent bit detectat en el receptor és igual a 1 amb probabilitat P i és igual a 0 amb probabilitat $1 - P$.

Cosa que significa que si, per exemple, la probabilitat d'error és $P = 0,01$, de cada 100 bits transmesos de mitjana es detectaran 99 bits correctament i un bit erròniament.

En comparar diferents sistemes de modulació digital entre ells, se sol calcular per a cada un la probabilitat d'error en igualtat de condicions quant a nivells de soroll, velocitat de transmissió i de potència del senyal transmès. El sistema que produeix la probabilitat d'error més petita és lògicament el de més qualitat.

El quocient entre la potència del senyal útil i la potència del senyal de soroll és la funció objectiu que cal maximitzar per a transmetre un senyal continu amb la millor qualitat possible i fixades les condicions de potència transmesa i efectes del canal de comunicacions.

La probabilitat d'error és la funció objectiu que s'ha de minimitzar per a transmetre una seqüència de bits amb la millor qualitat possible i fixades les condicions de velocitat de transmissió, potència transmesa i efectes del canal de comunicacions.

Annex: Una mica d'història

Avui en dia, els sistemes de comunicació formen part de la nostra vida diària i els utilitzem per a realitzar des de les activitats més quotidianes fins a les més sofisticades. Des que ens aixequem fins que ens fiquem al llit, parlem per telèfon –fix o mòbil–, escoltem ràdio o veiem televisió, fer un xat, comprem per Internet, intercanviem correus, utilitzem un PC amb connexió sense fil a un punt d'accés, etc. Costa imaginar com seria la vida de cada dia sense poder utilitzar cap d'aquests sistemes.

Invent del telègraf i del telèfon

El sistema de comunicacions electrònic més pioner que es va desenvolupar cap al 1830 va ser la telegrafia. De fet, és el primer sistema de comunicacions digitals transmès a través d'un parell de cables. Es considera un sistema digital perquè els únics símbols que es transmetien mitjançant el codi Morse són el punt i el guió, i amb ells es representen totes les lletres de l'alfabet.

El 1870, Graham Bell va fer el mateix amb un sistema de comunicacions analògic en inventar el transductor acústic i d'aquesta manera convertir la veu directament en un senyal elèctric. A partir d'aquesta fita, ràpidament es va desenvolupar la telefonia analògica convencional.

1830	Telegrafia amb fils	Digital
1870	Telefonia amb fils	Analògic

Inici de les comunicacions de ràdio

Les primeres comunicacions de ràdio van començar amb el canvi de segle gràcies a Marconi, que va patentar el primer sistema de telegrafia sense fil. Ràpidament, van seguir demostracions de telefonia sense fil, és a dir, via ràdio. El 1918, Amstronng va inventar el receptor de ràdio superheterodí, que és un component tant del sistema de ràdio com de televisió moderns. En el mòdul "Modulacions passabanda" d'aquesta assignatura s'hi dedica un apartat.

1901	Telegrafia de ràdio	Digital
1905	Telefonia de ràdio	Analògica
1907	Sistema de ràdio <i>broadcasting</i>	Analògic (AM)
1918	Receptor superheterodí	Analògic Suporta sistemes digitals
1929	Sistema de TV <i>broadcasting</i>	Analògic

1933	Sistema de ràdio <i>broadcasting</i>	Analògic (FM)
------	--------------------------------------	---------------

Publicacions pioneres en comunicacions digitals

Encara que amb l'alfabet Morse es desenvolupa el primer sistema de comunicacions digitals elèctric (telegrafia), el suport o base teòrica de les comunicacions modernes s'inicia més tard i, de fet, són moltes les publicacions que han suposat demostracions teòriques sobre els possibles abastos dels sistemes quant a capacitat, qualitat i funcionament.

1924	Nyquist formula el teorema del mostreig
1928	Harley estableix la velocitat de transmissió en funció de determinats paràmetres
1930	Reeves proposa PCM
1942	Wiener proposa l'estimació òptima de senyal en medi sorollós
1948	Shanon estableix els fonaments de teoria de la informació i els límits fonamentals en sistemes de comunicacions digitals
1950	Hamming proposa codis detectors i correctors d'errors

El 1930, Reeves va proposar la primera modulació digital pròpiament dita – PCM o modulació de polsos codificats– i que encara és la base dels sistemes de comunicacions digitals vigents. En el mòdul “Modulacions digitals passa-banda” d'aquest material s'estudien les modulacions de polsos per amplitud (PAM).

Actualment, la majoria dels sistemes de comunicacions existents es basen en modulacions digitals. Els dos grans sistemes en què coexisteixen les versions analògiques amb les digitals són la radiodifusió i la televisió, i de fet, especialment a la ràdio, encara s'utilitzen més que les emissores analògiques.

1994	Televisió digital per satèl·lit (DVB-S)	Digital
1994	Televisió digital per cable (DVB-C)	Digital
1997	Televisió digital terrestre (DVB-T)	Digital
2003	Ràdio digital (DRM) Futur substituït d'AM	Digital
2005	Ràdio digital (DAB) Futur substituït d'FM	Digital

Evolució de la tecnologia

La Segona Guerra Mundial va suposar una empenta ràpida per al desenvolupament de moltes àrees, tant de l'enginyeria en general com de la tecnologia en particular. Desafortunadament, de vegades són les guerres les que provo-

quen aquest tipus d'avenços. L'electrònica i les comunicacions es van beneficiar molt amb aquest esdeveniment. Es van establir les tècniques de radar com una nova disciplina.

El 1945, Arthur G. Clarke va escriure el seu famós article en el qual proposa l'establiment de satèl·lits de comunicació geoestacionaris, i el 1963 es va llançar el primer d'aquests satèl·lits amb èxit. El 1966, Kao i Hockman van proposar un sistema de comunicacions per fibra òptica, que va coincidir en el temps amb l'establiment dels primers sistemes de telefonia basats en modulacions digitals.

La dècada dels setanta va suposar el desenvolupament de sistemes de comunicacions amb més volum de trànsit de tot tipus. Es van reduir les pèrdues o atenuacions de transmissió per fibra òptica i es va augmentar enormement la capacitat de transmissió dels satèl·lits.

A la dècada dels vuitanta es van digitalitzar completament les xarxes telefòniques de serveis integrats i a més es van començar a combinar amb xarxes cel·lulars o sense fils; si bé cap a 1978 es va desenvolupar el sistema de telefonia cel·lular analògic, també anomenat *de primera generació* perquè presenta més radis de cobertura que els sistemes cel·lulars digitals. La telefonia cel·lular de tipus GSM és completament digital, es denomina *de segona generació* i s'instaura a Europa el 1991. Amb la inclusió de serveis UMTS, s'inicia la telefonia cel·lular de tercera generació i cap a l'any 2000, es desenvolupa a Europa.

1978	Sistema de telefonia cel·lular de 1a. generació	Analògic
1991	Sistema de telefonia cel·lular de 2a. generació (GSM)	Digital
2000	Sistema de telefonia cel·lular de 3a. generació (UMTS)	Digital
2006	Sistema de telefonia cel·lular de 4a. generació (en vies d'estandardització).	Digital

El 1970 apareixia el primer sistema Internet (ARPANET) per tal de connectar ordinadors mundialment grans, i no és fins al 1995 quan es crea el World Wide Web, basat en la xarxa Internet i que apareix amb l'objectiu de compartir i difondre informació a escala mundial.

En l'última dècada, la proliferació de nous sistemes de comunicació ha continuat el seu ritme d'acceleració, per la qual cosa és pràcticament impossible esmentar tots els sistemes coexistents.

Bibliografia

Bibliografia bàsica

Proakis, J. G.; Salehi, M. (2002). *Communication Systems Engineering* (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.