

Sistemes de comunicacions II

Francesc Rey Micolau
Javier Villares Piera

PID_00197089

Material docent de la UOC


Francesc Rey Micolau

Enginyer de Telecomunicacions per l'Escola Tècnica Superior de Telecomunicacions de Barcelona (ETSETB) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) el 1997 i doctor en Telecomunicacions per la UPC el 2006. Actualment, professor agregat en el Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions (TSC) de la UPC. Des del 1999 ha impartit docència en els Estudis de Telecomunicacions a l'Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú (EPSVG), a l'Escola d'Enginyeria de Telecomunicacions i Aeroespacial de Castelldefels (EETAC) i a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicacions de Barcelona (ETSETB). La seva experiència docent està centrada en les temàtiques de processament del senyal, comunicacions digitals i comunicacions espacials. Els seus interessos en recerca s'emmarquen també en l'àrea de processament del senyal aplicat a comunicacions. Té una llarga experiència en projectes de recerca nacionals i internacionals, i també contractes amb empreses nacionals i amb l'Agència Espacial Europea. Pàgina personal: <http://gps-tsc.upc.es/comm/frey/>


Javier Villares Piera

Enginyer de Telecomunicacions per l'Escola Tècnica Superior de Telecomunicacions de Barcelona (ETSETB) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) el 1999 i doctor en Telecomunicacions per la UPC el 2005. Actualment, professor agregat en el Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions (TSC) de la UPC. Des del 2003 ha impartit docència en els estudis de Telecomunicacions a l'Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeroespacial de Castelldefels (EETAC) i a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicacions de Barcelona (ETSETB). La seva experiència docent està centrada en les temàtiques de processament del senyal, comunicacions digitals i comunicacions espacials. Els seus interessos en recerca s'emmarquen també en l'àrea de processament del senyal aplicat a comunicacions. Té una llarga experiència en projectes de recerca nacionals i internacionals, i també contractes amb empreses nacionals i amb l'Agència Espacial Europea. La web del grup de recerca, que inclou la pàgina personal, és la següent: <http://spcom.upc.edu>

L'encàrrec i la creació d'aquest material docent han estat coordinats per la professora: Eugènia Santamaría Pérez (2014)

Primera edició: febrer 2014

© Francesc Rey Micolau, Javier Villares Piera

Tots els drets reservats

© d'aquesta edició, FUOC, 2014

Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona

Disseny: Manel Andreu

Realització editorial: Oberta UOC Publishing, SL

Dipòsit legal: B-2-2014



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>

Introducció

En l'assignatura *Sistemes de comunicacions I* (SC1) s'explica l'esquema general d'un sistema de comunicacions digital, format per un transmissor, el canal i un receptor. En aquella assignatura ja s'anuncien alguns dels temes que estudiarem amb detall a *Sistemes de comunicacions II* (SC2) i que en aquells materials s'obvien per tal de fer més entenedora l'explicació. Aquests temes són la **sincronització del receptor** i la compensació de la dispersió temporal introduïda pel canal de comunicacions, que s'anomena **equalització**.

A més a més, en aquesta assignatura introduïrem un concepte nou que és molt important en comunicacions sense fil: la **diversitat**. Per a facilitar el salt d'SC1 a SC2, a continuació recordem breument com és el sistema de comunicacions que s'estudia a SC1 i quines són les peces noves que afegirem al trencaclosques en aquesta assignatura.

1) Resum previ

En l'assignatura *Sistemes de comunicacions I* es presenten les principals modulacions digitals i se n'avaluen les prestacions (probabilitat d'error), suposant dues coses:

- Canal ideal.
- Sincronisme perfecte.

El fet que el canal sigui ideal significa que el senyal rebut és com el senyal transmès però té menys amplitud (atenuació del canal), ens arriba més tard (retard del canal) i està afectat pel soroll tèrmic que afegeix l'electrònica del receptor. Com es veu a SC1, el soroll generat en el receptor té una amplitud aleatòria de mitjana zero i distribució gaussiana, i espectralment és blanc (constant) en tota la banda de senyal útil. Aquest soroll apareix en tots els sistemes de comunicacions i es denota amb la sigla *AWGN* (de l'anglès: *additive white gaussian noise*). Per tant, direm que el canal és ideal si el senyal que es rep respon a l'expressió següent, en què α és l'atenuació del canal, t_0 el retard de propagació i $n(t)$ el terme de soroll AWGN:

Senyal transmès: $s(t)$

Senyal rebut: $z(t) = \alpha \cdot s(t - t_0) + n(t)$

El primer que constatem és que si el canal és ideal, la part útil del senyal rebut $\alpha \cdot s(t - t_0)$ manté la mateixa forma que tenia el senyal transmès. És a dir, si es transmet un pols amb forma rectangular, el pols rebut serà també un pols

amb forma rectangular que només haurà estat atenuat i retardat pel canal. Quan el canal no distorsiona la forma del senyal, és possible dissenyar el senyal transmès $s(t)$ de manera que el receptor pugui decidir la seqüència de símbols transmesos sense que es produeixi interferència intersimbòlica (ISI).

Com es veu a SC1, la condició perquè no hi hagi ISI és que en els instants de mostreig escollits, només el pols corresponent al símbol d'interès sigui diferent de zero. Perquè això sigui possible s'ha de dissenyar amb molta cura el pols que s'utilitzarà (criteri de Nyquist), el canal no ha de distorsionar la forma dels polsos transmesos (canal ideal) i s'han d'escollir amb molta precisió els instants de mostreig. L'elecció dels instants de mostreigs per a evitar l'ISI i minimitzar la probabilitat d'error és part del sincronisme del receptor, que estudiarem en el mòdul didàctic "Sincronització".

A SC1 es calcula la probabilitat d'error de les diferents modulacions digitals considerant que el canal és ideal i el sincronisme, perfecte. En les situacions en què el canal distorsiona, els polsos transmesos i/o el sincronisme del receptor no dona els instants de mostreig òptims, apareix un terme d'ISI que fa augmentar la probabilitat d'error del sistema. Si volem que aquesta degradació sigui petita, el receptor ha de fer dues coses:

1) **Garantir un sincronisme precís**, malgrat que el receptor hagi de sincronitzar-se fent servir com a referència un senyal que és sorollós: el senyal rebut. La manera de fer-ho s'estudia en el mòdul didàctic "Sincronització".

2) **Reduir la distorsió** introduïda pel canal tant com sigui possible. Per fer-ho, el receptor haurà de compensar la distorsió del canal mitjançant un **equalitzador**. En el mòdul didàctic "Canal de comunicacions" explicarem com distorsiona el canal els polsos transmesos, i en el mòdul didàctic "Equalització de canal", com hem de dissenyar l'equalitzador per a combatre la distorsió generada pel canal de comunicacions.

2) Sincronisme

A més a més del sincronisme explicat anteriorment, l'objectiu del qual és mostrejar el senyal rebut en els instants adequats, el receptor ha de sincronitzar altres paràmetres abans que es puguin decidir amb fiabilitat els símbols d'informació transmesos. En concret, si es fa una transmissió passabanda, cal que el receptor sincronitzi la fase i freqüència del seu oscil·lador local amb la fase i freqüència de la portadora sinusoidal rebuda. Per fer-ho, el receptor ha de processar el senyal d'entrada per tal d'estimar la fase i la freqüència de la portadora. Com que el senyal rebut és sorollós, la sincronització que s'aconseguirà no serà perfecta i els errors de sincronisme de fase i freqüència incrementaran la probabilitat d'error de les modulacions passabanda estudiades a SC1.

Reflexió

Hi ha canals de comunicacions que són pràcticament ideals; en aquests casos, no caldrà equalitzar el canal. Dos exemples importants són les comunicacions fixes per satèl·lit i les comunicacions per cable a baixa velocitat. No obstant això, encara que el canal sigui ideal, sempre és necessari que el receptor se sincronitzi amb el senyal rebut abans de decidir quines dades són transmeses. Quan el canal no és ideal, la tasca del sincronitzador la fa el mateix equalitzador, que no solament redueix la distorsió del canal, sinó que també cerca els instants de mostreig òptims.

En el mòdul didàctic “Sincronització” estudiarem en detall quins són els paràmetres que el receptor ha de sincronitzar i analitzarem com es degrada la probabilitat d’error quan hi ha errors de sincronisme. Així mateix, explicarem breument la teoria matemàtica amb què es dissenyen els algorismes de sincronització més utilitzats, i presentarem alguns exemples d’esquemes de sincronització pràctics.

3) Canal de comunicacions

Encara que el model de canal ideal estudiat a SC1 és vàlid en alguns casos importants com ara les comunicacions fixes per satèl·lit, en molts altres sistemes de comunicacions digitals, el canal imposa importants dificultats a la transmissió de la informació, dificultats que encara no hem estudiat. Entre d’altres, en aquesta assignatura estudiarem les dues que considerem més importants, que són la distorsió i els esvaïments o fàdings:

a) Distorsió. Com hem explicat anteriorment, quan el canal distorsiona els polsos transmesos, apareix interferència intersimbòlica (ISI) en el receptor i la probabilitat d’error augmenta. En molts sistemes de comunicacions, l’origen d’aquesta distorsió és l’anomenada *propagació multicamí* (o *multipath*). La propagació multicamí provoca la dispersió temporal del senyal transmès perquè fa que en recepció se superposin múltiples rèpliques del senyal transmès que arriben amb diferent retard i amplitud. Per aquesta raó, els polsos rebuts duren més temps i s’interfereixen els uns amb els altres en els instants de mostreig, i generen ISI.

En el domini de la freqüència, un canal dispersiu es pot modelitzar com un filtre que deixa passar unes freqüències més bé que unes altres. Per aquesta raó, els canals dispersius en el temps també s’anomenen *canals selectius en freqüència*. En el mòdul didàctic “Canal de comunicacions” s’explicaran tots aquests conceptes a poc a poc i amb més rigor matemàtic. Així mateix, en el mòdul didàctic “Equalització de canal” s’explicaran algunes maneres de contrarestar la distorsió del canal mitjançant un equalitzador. S’anomena *equalitzador* perquè idealment hauria d’invertir l’efecte del canal de manera que el canal resultant tingui una resposta freqüencial igual per a totes les freqüències.

b) Fàdings. A causa de la propagació multicamí i els obstacles que es puguin interposar entre el transmissor i el receptor, el nivell del senyal rebut pot ser molt més baix que el nivell que hi hauria si el senyal es propagués per un canal ideal. Quan el nivell del senyal rebut es redueix considerablement, es parla d’un fàding, o esvaïment, i quan això passa, és molt difícil que es pugui desmodular correctament el senyal. Pitjor encara, si aquest fàding afecta totes les freqüències del senyal, no es podrà fer altra cosa que esperar que el nivell del senyal es recuperi després de moure’ns uns quants metres o després de deixar passar un cert temps. En el mòdul didàctic “Canal de comunicacions” estudiarem la variabilitat temporal i espacial del canal i aprendrem quant ens hem

de moure en el temps o l'espai perquè el canal s'hagi recuperat d'un fàding. Aquest plantejament ens portarà al concepte de *diversitat*, que desenvoluparem en el mòdul didàctic "Comunicacions amb diversitat".

D'altra banda, si el fàding és selectiu en freqüència, apareixerà ISI, i haurem d'eliminar aquesta ISI mitjançant un equalitzador (mòdul didàctic "Equalització de canal") o mitjançant altres esquemes que explotin la diversitat freqüencial del canal (mòdul didàctic "Comunicacions amb diversitat"). En tots aquests casos ens interessa que la resposta del canal variï lentament per a tenir temps d'estimar amb prou exactitud la distorsió i així poder-la contrarestar.

4) Interferència intersimbòlica i equalització

Aturem-nos ara un moment en el problema de la distorsió que es produeix quan el canal és dispersiu en el temps, o equivalentment, selectiu en freqüència. Considerem així mateix que el canal varia lentament i és, per tant, factible dissenyar un filtre equalitzador que compensi la distorsió del canal i redueixi l'efecte de l'ISI. La pregunta que se'ns planteja llavors és com hem de dissenyar aquest filtre equalitzador.

En el mòdul didàctic "Equalització de canal" s'estudien dos criteris per al disseny dels coeficients del filtre equalitzador. El primer dels criteris s'anomena *forçador de zeros*, i pretén eliminar tota l'ISI que es pugui. El problema d'aquest criteri és que pot acabar amplificant massa el terme de soroll si el canal té components freqüencials molt atenuats. Per a evitar l'amplificació del soroll, convé dissenyar els coeficients del filtre equalitzador fent servir un criteri que tingui en compte quin és el nivell de soroll del receptor. Aquest criteri es denota per la sigla *MMSE* (de l'anglès: *minimum mean squared error*) i s'explicarà en el mòdul didàctic "Equalització de canal".

Els dos esquemes presentats fins ara són molt senzills perquè es poden implementar mitjançant un filtre digital que redueixi la distorsió i a continuació un circuit decisor que funcioni símbol a símbol. En escenaris complicats, si es vol aconseguir la mínima probabilitat d'error, s'ha de fer servir l'esquema d'equalització òptim anomenat *MLSE* (de l'anglès: *maximum likelihood sequence estimation*). Com el seu nom indica, l'equalització no es fa a part, sinó que forma part del procés de decisió. A més a més, els símbols no es decideixen un a un, sinó que es decideix tota la seqüència de símbols alhora fent servir l'algorisme de Viterbi.

Tots aquests algorismes d'equalització, i algun altre, s'explicaran fil per randa en el mòdul didàctic "Equalització de canal".

5) Fàdings i diversitat

Per acabar, dedicarem una estona a parlar dels esvaïments i de com els podem combatre. Per simplificar al màxim l'explicació, considereu que el canal no és selectiu en freqüència. Això vol dir que no hi ha distorsió, i per tant, que no ens cal equalitzar el canal. En aquesta situació, quan es produeix un fàding, l'*SNR* del receptor es redueix enormement i no és possible prendre cap decisió fiable sobre el valor dels símbols d'informació transmesos.

Abans de buscar una solució contra els fàdings, hem de saber per què es produeixen. Si el fàding es deu al fet que un receptor de radiofreqüència es troba darrere d'un obstacle que li impedeix veure el transmissor, l'única solució és esperar que el transmissor, el receptor o l'obstacle mateix es moguin i tornem a tenir visió directa entre el transmissor i el receptor. El problema és que això pot trigar una bona estona.

En canvi, si el fàding s'ha produït perquè els diferents components del multicamí s'han sumat en contrafase, només que el receptor es desplaci una petita distància, aquesta suma deixarà de ser destructiva i l'*SNR* del receptor tornarà a ser acceptable. Fins i tot, no cal ni que el receptor es mogui; si el receptor té dues antenes prou separades, és molt poc probable que totes dues experimentin al mateix temps el fàding.

En els dos casos, el que hem après és que, si ens desplacem una petita distància en el temps o en l'espai, el més probable és que sortim del fàding. Per tant, per lluitar contra els fàdings podem transmetre cada símbol diverses vegades amb l'esperança que alguna de les còpies del símbol es rebi sense fàding. Aquesta estratègia de transmissió rep el nom de *diversitat* i serà explicada en el mòdul didàctic "Comunicacions amb diversitat" amb molt més de detall.

En el paràgraf anterior, hem considerat dues formes de diversitat diferents: la temporal i l'espacial. Encara que parlem del mateix canal físic, en el primer cas disposem d'una sola antena i hem d'esperar un cert temps per abandonar el fàding. En canvi, en el segon cas disposem de dues antenes, que veuen simultàniament atenuacions independents. Aquesta segona forma de diversitat és molt interessant en escenaris amb poca mobilitat i és una de les solucions adoptades en l'estàndard IEEE 802.11n (wi-fi) per a aconseguir diversitat espacial en xarxes d'àrea local sense fil.

La tecnologia utilitzada en aquest estàndard IEEE 802.11n es coneix per la sigla *MIMO* (de l'anglès: *multiple input - multiple output*) i ha estat la gran revolució dels últims decennis en el disseny de la capa física dels sistemes de comunicacions digitals. Només a tall d'introducció, en el nostre context, la paraula *MIMO* vol dir que el transmissor i el receptor disposen de múltiples antenes. Tal com demostrarem en el mòdul didàctic "Comunicacions amb diversitat", l'ús de múltiples antenes en transmissió i recepció no permet només aconse-

guir diversitat espacial per a combatre els fàdings, sinó que també permet augmentar la velocitat de transmissió del sistema sense necessitat d'incrementar-ne l'amplada de banda.

Objectius

L'objectiu general de l'assignatura és aprofundir en la comprensió del funcionament dels sistemes de comunicacions digitals actuals prenent com a punt de partida els coneixements bàsics adquirits en l'assignatura *Sistemes de comunicacions I*. Aquest objectiu general es desglossa en els objectius següents, cadascun associat principalment a un mòdul didàctic:

- 1.** Entendre la necessitat de sincronitzar el receptor abans d'establir la comunicació amb el transmissor. Conèixer quins paràmetres s'han de sincronitzar i quina és la degradació en la comunicació quan aquesta sincronització no es fa prou bé.
- 2.** Conèixer com es modelitza matemàticament el canal de comunicacions. En concret, entendre que el canal de comunicacions pot introduir esvaïments (*fadings*) en el nivell del senyal rebut. Comprendre que la resposta del canal pot variar en el temps i donar lloc a fadings variants en el temps. De la mateixa manera, entendre que aquests esvaïments poden afectar tota l'amplada de banda del senyal, o només algunes freqüències (canal selectiu en freqüència).
- 3.** Entendre que, quan el canal és selectiu en freqüència, apareix interferència intersimbòlica (ISI) en el receptor que aquest ha d'intentar eliminar mitjançant un equalitzador si es vol mantenir certa fiabilitat en la comunicació. És objectiu de l'assignatura conèixer també els esquemes d'equalització més habituals.
- 4.** Entendre el concepte de *diversitat* i com es pot fer servir per a millorar la fiabilitat d'un sistema de comunicacions quan el canal de comunicacions introdueix fadings. Conèixer els diferents tipus de diversitat: temporal, freqüencial i espacial (MIMO).

Continguts

Mòdul didàctic 1

Sincronització

Francesc Rey Micolau i Javier Villares Piera

1. Motivació
2. Tècniques de sincronització
3. Sincronisme de freqüència de portadora
4. Sincronisme de símbol
5. Sincronisme de fase de portadora
6. Sincronisme de trama
7. Conclusions

Mòdul didàctic 2

Canal de comunicacions

Francesc Rey Micolau i Javier Villares Piera

1. Resposta impulsional i resposta freqüencial del canal
2. Canals variants en el temps
3. Característiques dels canals variants en el temps
4. Modelització dels canals variants en el temps
5. Mitigació de la distorsió del canal (equalització i diversitat)

Mòdul didàctic 3

Equalització de canal

Francesc Rey Micolau i Javier Villares Piera

1. Equalització i tipus d'equalitzadors
2. Equalitzadors lineals
3. Equalitzadors no lineals

Mòdul didàctic 4

Comunicacions amb diversitat

Francesc Rey Micolau i Javier Villares Piera

1. Motivació
2. Diversitat de temps
3. Diversitat de freqüència
4. Diversitat d'espai
5. Conclusions

Bibliografia

Mengali, U.; Andrea, A. N. d' (1997). *Synchronization techniques for digital receivers*. Nova York, etc.: Plenum Press.

Proakis, J. G.; Salehi, M. (2002). *Communication systems engineering* (2a. ed.). Upper Saddle River: Prentice Hall.

Proakis, J. (2008). *Digital communications* (5a. ed.). Boston, etc.: McGraw-Hill.

Steele, R. (1999). *Mobile radio communications* (2a. ed.). Chichester: John Wiley & Sons.

Tse, D.; Viswanath, P. (2005). *Fundamentals of wireless communications*. Cambridge: Cambridge University Press.

