

# Multiplexació i sistemes d'accés múltiple

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

<b>Introducció</b> .....	5
<b>Objectius</b> .....	7
<b>1. Conceptes bàsics</b> .....	9
<b>2. Divisió en temps (TDM/A)</b> .....	15
<b>3. Divisió en freqüència (FDM/A)</b> .....	22
<b>4. Divisió en codi (CDM/A)</b> .....	28
4.1. Síncron o quasisíncron CDM/A (Qs-CDM/A) .....	33
4.2. Asíncron CDMA (A-CDMA) .....	34
4.3. <i>Frequency-Hopping</i> CDMA (FH-CDMA) .....	34
<b>5. Divisió en espai (SDM/A)</b> .....	38
<b>6. Divisió en polarització (PDM/A)</b> .....	41
<b>7. Divisió en freqüències ortogonals (OFDM/A)</b> .....	44
<b>8. Mecanismes d'accés al medi per contesa: ALOHA (i variants)</b>	48
<b>9. Mecanismes d'accés al medi per contesa: CSMA (i variants)</b> ...	51
<b>Resum</b> .....	53
<b>Activitats</b> .....	57
<b>Bibliografia</b> .....	59



## Introducció

La majoria dels serveis de comunicacions s'ofereixen a gran quantitat d'usuaris que s'abonen al servei i l'utilitzen quan el necessiten; per aquesta raó serà important trobar mecanismes que gestionin l'accés als recursos de comunicacions. Penseu, per exemple, en els serveis de telefonia fixa o mòbil, en els quals els abonats sovint estan una gran part del temps sense utilitzar el servei; però quan ho volen fer hauran d'establir comunicacions de manera simultània a altres usuaris que també estan utilitzant el mateix servei. Aquesta situació ens condueix al fet que, perquè l'explotació d'un servei resulti rendible, sol ser necessari que els usuaris comparteixin el medi de comunicacions.

El medi es pot caracteritzar com un recurs que s'ofereix al llarg del temps i en tot un conjunt de bandes de freqüències, i en què els usuaris poden establir la comunicació desitjada utilitzant el medi durant una part del temps i en un subconjunt de bandes de freqüència. Així doncs, compartir el medi significarà que s'hauran d'establir criteris per a definir els intervals de temps i les bandes de freqüència que els usuaris puguin fer servir per a enviar els senyals que contenen la informació. Apareix, per tant, el concepte de *recurs de comunicacions*, que representa l'interval temporal i la banda de freqüències que un usuari pot fer servir per a establir la comunicació.

Un bon disseny del sistema ha de tenir en compte que els recursos es reparteixin entre els usuaris d'una manera òptima. Si el sistema se sobredimensiona, no s'utilitzarà tota la capacitat del medi, sinó que hi haurà instants de temps o bandes de freqüència que cap usuari utilitzarà. En canvi, si el sistema se subdimensiona, no podrem donar servei a tots els usuaris i hauran d'esperar per a poder iniciar la comunicació.

Analitzarem les diferents possibilitats que hi ha per a compartir un medi, centrant-nos principalment en els conceptes de divisió en freqüència (FD) i divisió en temps (TD), però tractant també altres mecanismes per a compartir els recursos i que s'utilitzen en un ampli ventall de sistemes de telecomunicacions.

Les tècniques utilitzades per a assignar el medi de comunicacions als diferents usuaris són molt importants, ja que determinen l'eficiència del sistema de comunicacions complet i l'aprofitament correcte dels recursos. Aquestes tècniques es coneixen amb el nom de *multiplexació* o *sistemes d'accés múltiple*. Hi ha diferències subtils entre aquests dos últims conceptes que intentarem aclarir mitjançant alguns exemples. En qualsevol cas, l'objectiu de la multiplexació o l'accés múltiple és sempre un millor aprofitament del medi, intentant maximitzar la taxa de bits transmesa.

Aquest mòdul didàctic comença amb un apartat en què es presenten els conceptes generals de multiplexació amb definicions que resultaran útils en altres apartats. Posteriorment, es presenten els sistemes de multiplexació de freqüència, amb alguns exemples sobre sistemes de telefonia i la multiplexació dels diferents canals de televisió. En l'apartat següent s'analitza amb detall el concepte de multiplexació per divisió en temps, que s'il·lustra amb un exemple del sistema de multiplexació de diversos programes de televisió en un canal de TDT. Seguirem amb altres apartats més breus dedicats als conceptes de *divisió per codi*, *espai* i *polarització*. Al final del mòdul tractarem també alguns dels mecanismes de contesa (mecanismes que els usuaris han de competir per a accedir al medi sense interferir-se) que també es poden plantejar per a establir criteris d'accés al medi. Aquest últim apartat és purament descriptiu i només pretén donar a conèixer una visió dels diferents mecanismes existents.

## Objectius

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

- 1.** Comprendre la necessitat que diversos usuaris d'un sistema de comunicació comparteixin recursos del medi físic.
- 2.** Identificar els mecanismes i procediments que permeten establir estratègies per a multiplexar diversos usuaris.
- 3.** Entendre la necessitat d'establir normatives precises de multiplexació per tal de minimitzar les interferències.
- 4.** Comprendre els principis de multiplexació de senyals per divisió en temps, divisió en freqüència i divisió en codi.
- 5.** Identificar les diferències entre els sistemes de multiplexació i els sistemes d'accés múltiple.
- 6.** Comprendre els mecanismes bàsics per a la senyalització de trames que s'utilitzen per a facilitar la multiplexació.





## 1. Conceptes bàsics

Compartir els recursos de comunicacions constitueix un dels aspectes clau per a la viabilitat pràctica dels diferents serveis de comunicacions. En els primers sistemes de telègraf i telèfon, cada comunicació requeria un parell de cables. Això significava que per a establir la connexió entre dues centrals de telefonia que, per exemple, havien de suportar 100 comunicacions, era necessari estendre 100 parells de cables entre les dues centrals. Ens podem imaginar l'impacte visual i el cost econòmic que tindria actualment interconnectar dues ciutats com Barcelona i Madrid.

A la primera dècada del segle xx apareixen els primers sistemes de multiplexació de senyals que permeten fer simultàniament diverses comunicacions per un únic parell de cables. Actualment bona part d'aquest cables s'han substituït per fibra òptica, que, en permetre elevades velocitats de transmissió, pot suportar un nombre elevat de comunicacions simultànies pel mateix medi, que cal multiplexar de manera eficient.

La multiplexació de diverses comunicacions en un únic medi representa, doncs, una estratègia per a augmentar la quantitat total d'informació que es pot enviar a través del medi, ja que facilita que diverses comunicacions es puguin fer simultàniament aprofitant el mateix recurs. És interessant observar que el cost d'instal·lar un cablatge entre dues centrals que permeti fer la comunicació entre un gran nombre d'usuaris és aproximadament igual al cost d'instal·lar un únic parell de cables que connecten només un usuari. En efecte, el cost real és degut en la pràctica al cost de soterrar el cable, i no al cost mateix del cable.

No solament en un cable/fibra resulta útil la reutilització del medi per més d'un usuari. Altres mitjans de comunicacions també utilitzen tècniques que permetin a múltiples usuaris compartir el mateix recurs. Així, per exemple, en l'espai radioelèctric també podem trobar una evidència de multiplexació i accés múltiple. Diferents serveis com són la ràdio, la televisió, la telefonia mòbil o els emissors privades de comunicacions (policia, serveis d'emergència, taxi...) utilitzen de manera compartida l'espai radioelèctric dividit en bandes de freqüències i canals. Un altre exemple de compartició física de recursos el trobem en les estacions base de telefonia o en els satèl·lits de comunicacions. El cost d'instal·lació (posada en òrbita en el cas de satèl·lits) d'aquestes infraestructures és elevat i només es pot rendibilitzar si el nombre d'usuaris que utilitzen el recurs és elevat. Tots els serveis de comunicacions utilitzen d'una o altra manera la possibilitat de compartir els recursos.

### La ràdio i la televisió comercials

Exemples típics de compartició de recursos són la ràdio i la televisió comercials, en què els diferents canals de televisió utilitzen bandes de freqüències diferents, les comunicacions telefòniques entre centrals, les comunicacions via satèl·lit, etc.

Les estratègies per a compartir un medi entre diversos usuaris reben els noms genèrics de *multiplexació* o *sistemes d'accés múltiple*. Encara que a vegades, per un abús del llenguatge, en alguns textos s'intercanvien els dos noms, hi ha una diferència entre aquests que intentarem aclarir a continuació.

El terme **multiplexació**<sup>1</sup> fa referència al procés mitjançant el qual diferents missatges d'informació (converses telefòniques, transmissió simultània d'àudio + vídeo + dades, diferents canals d'àudio...) generats típicament en una mateixa ubicació física, es combinen en un únic senyal amb la finalitat de compartir un recurs de comunicacions.

El terme **accés múltiple**<sup>2</sup> fa referència al procés mitjançant el qual diferents usuaris, típicament allotjats físicament en diferents llocs (amb diferents missatges per transmetre) accedeixen al mateix medi, bé sigui de manera simultània o no simultània, amb la finalitat de compartir el recurs de comunicacions.

Com es pot veure, tot i que la finalitat en tots dos casos és compartir el medi, hi ha una diferència conceptual (aparentment subtil) entre els dos termes. En termes generals, i sense gaire rigor tècnic, podríem dir que, mentre que la multiplexació es pot fer amb un únic mòdul transmissor i, per tant, es pot desenvolupar de manera local, l'accés múltiple involucra diferents transmissors o terminals d'usuari que comparteixen el mateix medi sovint de manera remota i dispersa. En termes més tècnics, direm que la multiplexació es fa a escala de capa física (nivell 1 del model OSI), mentre que l'accés al medi pot requerir protocols de control d'accés al medi, i per tant es fa en part en el nivell d'enllaç (nivell 2 del model OSI).

En alguns sistemes de comunicacions com la telefonia mòbil o les comunicacions per satèl·lit, el model del sistema seguirà un esquema amb múltiples usuaris terminals geogràficament dispersos connectats a una estació receptora (estació base o satèl·lit). L'enllaç entre els usuaris terminals i l'estació receptora l'anomenarem *enllaç de pujada* i requerirà una tècnica d'accés múltiple per a permetre als diferents usuaris poder accedir al medi compartint recursos. Per altra banda, l'enllaç entre l'estació receptora i els usuaris l'anomenarem *enllaç de baixada* i requerirà una tècnica de multiplexació per a permetre que els diferents senyals es facin arribar als usuaris respectius.

<sup>(1)</sup>En anglès, *multiplex*.

#### Exemple de multiplexació

En el cas d'una línia telefònica + ADSL, la veu analògica es multiplexa amb el senyal de dades (Internet) per a compartir la línia telefònica, utilitzant diferents bandes de freqüència per a la veu i per a les dades.

<sup>(2)</sup>En anglès, *multiple access*.

#### Exemples d'accés múltiple

En el cas de la telefonia mòbil, els diferents usuaris connectats a una mateixa estació base han de compartir el recurs ràdio i l'estació base alhora de mantenir una conversa telefònica, utilitzant diferents canals i transmetent en diferents instants de temps. En el cas d'accés múltiple parlarem d'*usuari* per a referir-nos a cadascuna de les fons de dades independents que es volen transmetre.

## La televisió digital terrestre

Per concloure la discussió entre la diferència entre multiplexació i accés múltiple posarem l'exemple de la televisió digital terrestre (TDT).

La banda d'UHF assignada a la televisió comercial terrestre està dividida en diferents canals (canals de TV). En una zona geogràfica concreta, cadascun dels proveïdors de serveis de TDT té assignat un canal en el qual poden transmetre. Així, per exemple, podrem dir que Televisión Española transmet en el canal 64, mentre que Televisió de Catalunya ho fa en el canal 62. En aquest cas parlem d'*accés múltiple*, ja que els diferents proveïdors del servei envien al medi senyals de TV independents des d'ubicacions diferents i a diferents freqüències amb la finalitat de compartir l'espai radioelèctric.

Per la naturalesa del senyal de TV digital, en un mateix canal es poden multiplexar fins a 4 canals de TV diferents, cadascun amb el seu àudio, el seu vídeo i les seves dades (teletext, dades de programació...). Per aquesta raó, en el canal 62 assignat a Televisió de Catalunya trobarem 4 programes de TV (TV3, K33, 3/24, 300) i algunes emissores de ràdio. En aquest cas parlem de *multiplexació*, ja que els missatges d'àudio, vídeo i dades dels quatre canals, més les emissores de ràdio es combinen (multiplexen) en temps en el centre emissor (estudis de Televisió de Catalunya) amb la finalitat de compartir un únic senyal/canal de TV.

Per a distingir entre els sistemes de multiplexació i els sistemes d'accés múltiple, s'utilitzen abreviacions diferents. Així, FDM<sup>3</sup> o TDM<sup>4</sup> es refereixen a sistemes de multiplexació, mentre que FDMA<sup>5</sup> o TDMA<sup>6</sup> es refereixen a sistemes d'accés múltiple. Com sovint el mateix mecanisme es pot aplicar per a multiplexació i accés múltiple, i a fi d'evitar duplicitats en la notació, utilitzarem en aquest mòdul didàctic la notació FDM/A o TDM/A (amb barra) per a referir-nos simultàniament i indistintament als sistemes de multiplexació i accés múltiple, mentre que utilitzarem les abreviacions FDMA o TDMA (sense barra) quan vulguem denotar exclusivament les tècniques d'accés múltiple.

Hi ha diferents mecanismes per a poder dur a terme els processos de multiplexació o d'accés múltiple encarregats de compartir els recursos de comunicacions. Quan la necessitat de recursos és coneguda *a priori*, l'assignació podrà ser fixa i preestablerta, i es parlarà d'*assignació fixa de recursos* i, tot i que no aquest ús no està gaire estès, de vegades s'utilitza l'acrònim FAMA<sup>7</sup> per a referir-se a aquest mecanisme. Per contra, quan la necessitat de recursos no es conegui per avançat, l'assignació de recursos es podrà fer de manera dinàmica i sota demanda en funció de les necessitats i les circumstàncies que concorrin en el moment de fer la comunicació. En aquest cas es parla d'*assignació dinàmica sota demanda* i s'utilitza l'acrònim DAMA<sup>8</sup> per a referir-se a aquest mecanisme d'accés múltiple. Els dos mecanismes anteriors tindran les mateixes solucions, independentment que l'assignació sigui fixa o dinàmica. L'única diferència serà que, per a poder fer assignacions dinàmiques del recurs, serà necessari que el sistema inclogui un gestor de recursos, que serà l'encarregat de distribuir de manera òptima el recurs entre els usuaris que els sol·licitin.

En sistemes de comunicacions d'última generació, aquest gestor de recursos pot fins i tot determinar la qualitat del senyal rebut i enviar als usuaris terminals ordres perquè configurin el senyal transmès a fi d'optimitzar alguns

<sup>(3)</sup> FDM és la sigla de l'expressió anglesa *frequency division multiplex*.

<sup>(4)</sup> TDM és la sigla de l'expressió anglesa *time division multiplex*.

<sup>(5)</sup> FDMA és la sigla de l'expressió anglesa *frequency division multiple acces*.

<sup>(6)</sup> TDMA és la sigla de l'expressió anglesa *time division multiple acces*.

<sup>(7)</sup> FAMA és la sigla de l'expressió anglesa *fixed assigned multiple acces*.

<sup>(8)</sup> DAMA és la sigla de l'expressió anglesa *demand assigned multiple acces*.

dels paràmetres de comunicacions dels diferents usuaris (velocitat mitjana de transmissió, velocitat màxima de transmissió d'un usuari, qualitat de senyal rebut, nivell d'interferències, retard en la comunicació...).

Una gestió eficient del sistema d'accés i de la multiplexació és clau per a augmentar el rendiment global del sistema de comunicacions. Hem de pensar que si el repartiment dels recursos entre els usuaris és equitatiu i està ben dimensionat és possible augmentar el volum d'informació que es pot transmetre pel medi. El disseny eficient d'un sistema de multiplexació i accés múltiple d'usuaris implica que el gestor és capaç de determinar en cada moment quins usuaris s'han d'assignar a cada recurs, mantenir el sistema inactiu durant el mínim de temps possible, i reduir al màxim el nombre d'usuaris sense accés al recurs.

En el cas de comunicacions digitals, una bona gestió del múltiplex pot resultar equivalent, des del punt de vista de la qualitat del sistema de comunicacions, a un augment de l'energia per bit o a un augment de l'amplada de banda del sistema de comunicacions, ja que els tres aspectes incideixen de manera directa en el flux total de bits que es poden transmetre. El principal problema de la gestió de recursos és el retard en l'espera fins que el recurs és assignat, i també la complexitat en el control, que comporta un gran cost computacional, tant del gestor de recursos com dels possibles usuaris terminals.

Quan no es té coneixement *a priori* de la necessitat de recursos, una alternativa a la problemàtica dels mecanismes DAMA és accedir al medi de manera aleatòria i sense avís previ. Aquest accés per contesa assumeix el risc d'incórrer en col·lisions entre usuaris i pèrdua de missatges. En aquest cas no hi haurà cap gestor que reguli l'accés al medi i els usuaris mateixos hauran d'establir protocols de control per a garantir que els missatges arriben al destinatari de manera satisfactòria. Tot i que *a priori* aquests mecanismes poden semblar ineficients a causa de la possibilitat de col·lisió, i per tant de la possibilitat d'haver de retransmetre els missatges fins que puguin ser rebuts pel destinatari, com es veurà més endavant, poden resultar adequats quan hi ha poc usuaris o quan els recursos es necessiten només durant un curt període de temps i de manera esporàdica, ja que estalvien els mecanismes de control i sincronització entre usuaris, i també els protocols per a sol·licitar accés al medi i disposar-ne, o l'existència d'un gestor de recursos.

No hi ha un mecanisme que sigui preferible enfront dels altres i la decisió de quin és el més adequat sempre estarà lligada a les característiques del trànsit (naturalesa i durada dels missatges que es volen enviar) i també del nombre de missatges/usuaris que volen transmetre simultàniament. A fi d'entendre la problemàtica plantejem un símil a mode d'exemple.

### Quin mecanisme d'assignació cal escollir?

Un grup de 8 persones es reuneixen per a intercanviar una informació.

Si cada usuari ha de fer una xerrada de 15 minuts, la manera més eficient de plantejar el problema seria preparar un seminari de presentacions reservant 15 minuts per a cada persona. Estaríem, en aquest cas, davant d'un mecanisme d'assignació fixa de recursos.

Si aquestes mateixes persones constitueixen una comunitat de veïns que es reuneixen per a discutir sobre les millores de l'escala, la manera més eficient de plantejar el problema seria que les vuit persones es reunixin i vagin intercanviant opinions i discutint sobre els acords, participant de manera aleatòria i no ordenada de la discussió amb la possibilitat que dos participants comencin a parlar alhora i que algú hagi de repetir el que ha dit perquè no ha estat escoltat per tothom. Estaríem, en aquest cas, davant d'un mecanisme d'assignació aleatòria amb possibilitat de col·lisions i retransmissions.

Finalment, si aquesta assemblea de veïns no està formada per 8 persones sinó per 800 persones, per raons obviés resultarà completament inviable procedir de la manera anterior. S'hauria d'establir un mode d'assemblea amb torns de paraula i s'hauria d'introduir la figura del moderador de l'assemblea que vagi donant la paraula als participants. Estaríem, en aquest tercer cas, davant d'un mecanisme d'assignació dinàmica de recursos sota demanda amb la figura d'un gestor de recursos.

Les estratègies naturals per a resoldre el problema tant de l'assignació fixa com l'assignació dinàmica de recursos són la divisió en temps (TDM/A) i la divisió en freqüència (FDM/A), tot i que hi ha altres mecanismes per a compartir el canal de comunicacions, que també analitzarem en aquest mòdul, com són la divisió en codi (CDM/A), la divisió en espai (SDM/A) o la divisió en polarització (PDM/A). Entre els mecanismes d'accés aleatori s'analitzaran la tècnica ALOHA, incloent-hi algunes de les seves variants més utilitzades, i la tècnica d'accés al medi mitjançant sensat de canal CSMA.

Quan diferents usuaris accedeixen simultàniament al sistema sobre un mateix medi, és habitual pensar que aquestes comunicacions es puguin interferir. D'aquesta interferència entre usuaris inherent als mecanismes d'accés múltiple en direm *interferència d'accés múltiple*, i s'utilitza l'acrònim MAI<sup>9</sup>. El resultat de la MAI és que es redueix la qualitat final del sistema de comunicacions, i en alguns casos limita el nombre màxim d'usuaris que poden accedir simultàniament al sistema. En altres casos els sistemes de multiplexació o d'accés múltiple introduiran mecanismes perquè cadascun dels usuaris transmeti els seus senyals de manera controlada i preestablerta pel sistema (per exemple, introduint temps de guarda o bandes de guarda entre usuaris) a fi que les interferències que es produeixen entre els usuaris es puguin considerar pràcticament nul·les. Amb l'expressió "pràcticament nul·les" volem dir que el fet que un usuari estigui o no transmetent informació no tingui efectes sobre la qualitat del senyal d'un altre usuari. Des d'un punt de vista matemàtic, això es pot expressar dient que dos usuaris diferents transmeten senyals ortogonals.

Representant com a  $x_i(t)$  el senyal transmès per l'usuari  $i$ -èsim, i com a  $x_j(t)$  el senyal transmès per l'usuari  $j$ -èsim, direm que els dos senyals són ortogonals si el seu producte escalar és nul (excepte per a cas trivial en el qual  $i = j$ , és a dir, quan comparem un usuari amb ell mateix):

#### Vegeu també

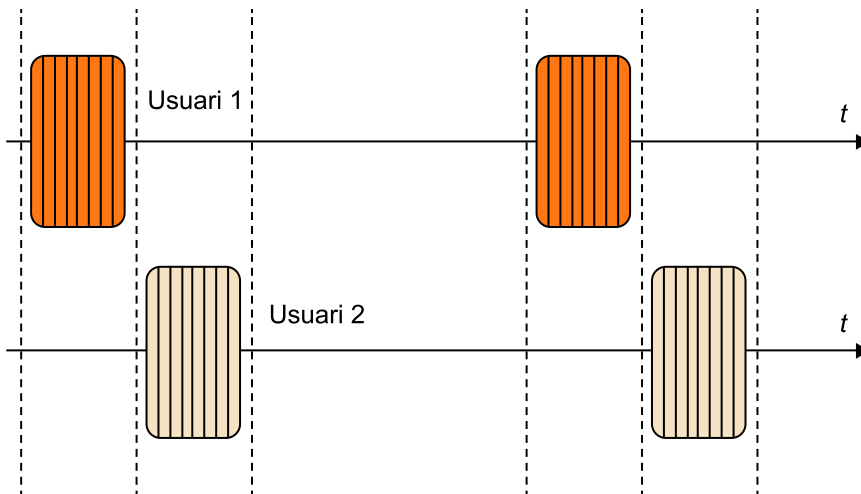
Al llarg del mòdul didàctic es presentaran els diferents mecanismes d'accés múltiple (TDMA) que en resumiran els avantatges i inconvenients de cadascun. Al final d'aquest mòdul, en el resum, es presentarà una breu síntesi comparativa de les diferents tècniques i s'indicarà en cada cas quin o quins poden ser els mecanismes més adequats.

<sup>(9)</sup>MAI és la sigla de l'expressió anglesa *multiple access interference*.

$$\int_{-\infty}^{\infty} x_i(t) \cdot x_j(t) \cdot dt = \begin{cases} \gamma & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (1)$$

A mode d'exemple, és fàcil pensar en el principi d'ortogonalitat de l'equació 1 plantejant un sistema de divisió en temps. En efecte, quan dos usuaris estan multiplexats en el temps, un d'ells només transmet quan l'altre no ho fa i a l'inrevés, per la qual cosa el producte entre els dos senyals sempre serà zero. Aquesta circumstància s'il·lustra esquemàticament en la figura 1, en la qual observem que els dos usuaris transmeten en intervals disjunts i, per tant, el producte dels dos senyals serà nul.

Figura 1. Exemple d'ortogonalitat entre dos usuaris multiplexats en el temps

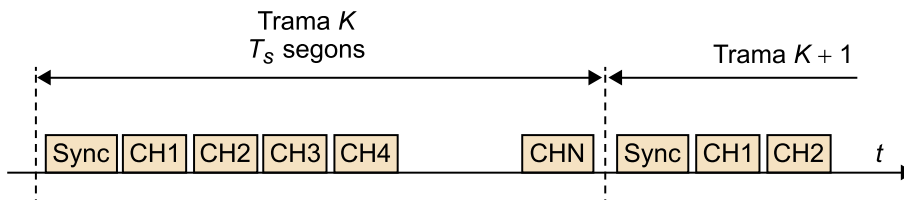


## 2. Divisió en temps (TDM/A)

En la tècnica de multiplexació (TDM) o d'accés múltiple per divisió en temps (TDMA) el temps es divideix en ranures o intervals de temps (que anomenarem *slots* seguint la bibliografia anglosaxona) i cada usuari transmet la seva informació de manera seqüencial durant certes ranures de temps utilitzant tota l'amplada de banda disponible, i deixa el canal lliure la resta del temps. La decisió de quin o quins són els intervals de temps en què es pot transmetre depèn del sistema de comunicacions, i està predefinit en el cas d'assignació fixa de recursos, o és competència del gestor de recursos segons les demandes rebudes en el cas DAMA.

La figura 2 representa esquemàticament l'estructura general d'un sistema de multiplexació o d'accés múltiple per divisió en el temps TDM/A. Com es pot veure, l'eix temporal es divideix en trames (*frames*) d'una certa durada ( $T_s$  segons) i cadascuna d'aquestes trames es subdivideix en  $N$  fragments de temps denominats *slots*, que generalment tenen la mateixa durada. Aquesta estructura es repeteix periòdicament i cada usuari disposa d'un dels *slots* per a poder accedir periòdicament al canal i transmetre la seva informació (en certs casos pot disposar de més d'un *slot* segons els requisits i la disponibilitat del sistema de comunicacions).

Figura 2. Esquema de multiplexació/accés múltiple TDM/A



És important observar que moltes vegades l'operació de multiplexació/accés múltiple s'ha de desenvolupar en temps real i l'usuari no s'ha d'adonar que s'estan produint interrupcions en el nivell de la capa física de la comunicació degudes al mecanisme d'accés al medi, que implica que la informació s'envii a ràfegues. Això obliga que tant el transmissor com el receptor disposin de prou memòria per a emmagatzemar temporalment el flux d'informació produït mentre no es pot accedir al canal, i esperar a transmetre'ls quan es disposi d'accés al medi. El període de la trama determinarà la mida del *buffer* de memòria que hauran de tenir tant el transmissor com el receptor per a passar d'un flux de dades continu a un de ràfegues o al contrari. Per una altra banda, si hi ha  $N$  usuaris (o flux d'informació) accedint al medi, la velocitat de transmissió pel medi haurà de ser  $N$  vegades superior a la que tindriem en el cas que hi hagués un únic usuari.

Suposem que una font ha de transmetre a una taxa de dades de  $R$  bits/s i només disposa d'un dels  $N$  slots (fragments temporals) en cada trama. Si la durada de la trama és de  $T_s$  segons, haurà d'enviar durant  $T_s/N$  segons tota la informació que ha anat generant (i emmagatzemat en memòria) al llarg dels  $T_s$  segons en els quals no ha pogut transmetre. O dit d'una altra manera, haurà de transmetre els  $R \cdot T_s$  bits en aquest fragment de temps de durada  $T_s/N$  segons que té assignat. Si suposem que tots els usuaris tenen assignat el mateix temps per a la transmissió, la velocitat a la qual s'han de transmetre les dades durant el fragment temporal assignat és la següent:

$$R_{TDM/A} = \frac{R \cdot T_s}{T_s/N} = R \cdot N \quad (2)$$

Resumint, en el numerador tenim el nombre total de bits que l'usuari vol transmetre en aquesta trama, que s'obté com el producte entre la seva taxa de transmissió i el temps de trama, i en el denominador tenim el temps assignat a aquest usuari per a la transmissió, que és només una fracció de la trama. El resultat, com s'anunciava anteriorment, és que la velocitat de transmissió haurà de ser  $N$  vegades superior a la de cadascun dels usuaris. Aquest resultat no ens hauria de sorprendre massa. Indica que si hi ha  $N$  usuaris transmetent a una taxa de bits  $R$ , la velocitat del canal necessària per a multiplexar-los haurà de ser  $N$  vegades superior.

Atesa la seva naturalesa, els mecanismes de TDM/A només es poden utilitzar en comunicacions digitals. Observeu que per a implementar un mecanisme TDM/A cal disposar d'una memòria que emmagatzemi la informació (bits) mentre no es disposa d'accés al canal. Aquesta memòria és tècnicament irrealitzable per senyals analògics, mentre que no presenta cap inconvenient per a ser implementada per senyals digitals.

### Multiplexatge TDM

Suposem que disposem d'un multiplexor TDM que rep dos fluxos de bits corresponents als canals dret i esquerre d'un senyal àudio estèreo, i que els ha de multiplexar en un únic flux de bits enviant de manera seqüencial un bit del canal dret i un bit del canal esquerre. Si la velocitat de cadascun dels canals d'àudio és de  $R = 768$  kbits/s, quina haurà de ser la velocitat de transmissió a la sortida del multiplexor?

Observem primer de tot que el temps de bit per a cadascun dels canals és de  $1/768 \cdot 10^{-3} = 1,3 \mu\text{s}$ , i que com que el flux d'entrada al multiplexor ha de ser el mateix que el de sortida, el temps necessari per a enviar dos bits (els corresponents als canals dret i esquerre) ha de ser exactament de  $1,3 \mu\text{s}$ . Per tant, si en  $1,3 \mu\text{s}$  s'envien 2 bits, la velocitat de transmissió a la sortida del multiplexor serà  $R_{TDM} = 2 \text{ bits}/1,3 \mu\text{s} = 1.536 \text{ kbits/s}$ , que, com s'ha comentat anteriorment, és el doble de la velocitat a l'entrada del multiplexor.

En un sistema TDM/A és molt importat que tant transmissor com receptor estiguin perfectament sincronitzats en temps a fi de poder garantir que el transmissor pugui inserir la informació en el moment adequat, i el receptor pugui interpretar correctament les posicions dels slots en què transmeten els usuaris. Amb aquesta finalitat, s'han de tenir en compte dos aspectes importants: les capçaleres (o slots de sincronisme) i els temps de guarda.



Generalment, en cada trama el primer *slot* no conté informació de cap usuari, sinó que correspon a una capçalera o paraula única que ens indica que som al començament de la trama. Aquesta capçalera correspon a una seqüència de bits coneguda que garantirà que tots els usuaris es puguin sincronitzar amb la xarxa i puguin saber en quin moment cal transmetre o rebre la informació. Per aquest motiu aquesta capçalera s'acostuma a anomenar *slot de sincronisme*. La resta de *slots* de la trama es destinen a inserir la informació dels usuaris, tot i que s'ha de tenir en compte que alguns protocols també poden requerir que cada usuari insereixi alguns bits de capçalera a l'inici de l'*slot* assignat, que es poden utilitzar per a identificar el número de canal, l'usuari, o per a millorar la sincronització del sistema amb cada un dels usuaris.

En alguns sistemes pràctics, aquestes informacions de capçalera es coneixen amb el nom de *senyalització* i s'utilitzen per a identificar els canals, el seu contingut i, fins i tot, en alguns sistemes complexos que utilitzen trames amb diversos ordres jeràrquics, faciliten dades útils sobre l'estructura del múltiple com són la identificació del tipus de trama i el seu ordre dins l'estructura.

Malgrat que s'insereixin periòdicament seqüències de sincronisme, sempre hi pot haver un error de sincronisme entre usuaris, que provocarà que un usuari cregui que l'*slot* comença abans o després del que realment comença. En cas de produir-se aquest error de sincronisme es produïrien interferències entre usuaris, ja que un usuari podria accedir al canal abans del que li correspon i col·lidir amb l'usuari anterior, o bé podria accedir al canal més tard del que li toca i col·lidir amb l'usuari posterior. A fi que no es produeixen aquestes col·lisions, i per a poder assumir certes toleràncies o errors de sincronisme amb la xarxa, s'introdueixen els temps de guarda, que corresponen a intervals de temps entre *slots* en els quals no es transmet cap tipus d'informació. L'existència d'aquest temps de guarda és opcional, i la seva durada variable, però la seva presència relaxa les especificacions de sincronisme dels equips de transmissió i recepció.

És interessant remarcar que les capçaleres i bandes de guarda poden resultar més o menys útils segons les característiques del sistema. En el cas de mecanismes de multiplexació en què la multiplexació se centralitza en un dispositiu que té tots els canals a la seva disposició, com que la seqüència de dades es processa de manera local, els problemes de sincronisme no seran tan crítics i es pot reduir (o fins i tot eliminar) la durada dels temps de guarda i dels *slots* de sincronisme (els bits corresponents als diferents canals es poden inserir consecutivament i sense pauses). Al contrari, en cas de mecanismes d'accés múltiple, com que els usuaris es troben geogràficament dispersos, serà crític mantenir un sincronisme de xarxa que obligarà a introduir temps de guarda i seqüències de sincronisme de més durada.

Tot i que les capçaleres i temps de guarda ajuden a desenvolupar la tasca de multiplexació o accés múltiple, s'ha de tenir en compte que en tots dos casos es reduirà l'eficiència del sistema. En el cas de la inserció de capçaleres en el canal, apareixerà una càrrega addicional de bits, que pot significar un

augment significatiu de la velocitat de transmissió final  $R_{TDM/A}$ . De la mateixa manera, la inserció de temps de guarda comportarà una reducció del temps total disponible per a la transmissió de la informació útil, cosa que obligarà novament a augmentar la taxa de transmissió del múltiplex. Apareixerà, per tant, un compromís entre complexitat del sistema (per a garantir una sincronització correcta) i eficiència del sistema, de manera que si es relaxa la complexitat (menys exigència de sincronisme) serà a canvi de reduir l'eficiència (menys velocitat de transmissió o menys nombre d'usuaris que poden accedir al sistema). La solució més adequada dependrà en cada cas de les característiques i requisits del sistema.

Hi ha algunes aplicacions de TDMA en què el problema del sincronisme entre usuaris es veu agreujat pel fet que els usuaris hauran d'inserir la informació dins del canal i fer-la arribar a una estació receptora des de llocs físics geogràficament diferents. En aquest casos s'haurà de tenir en compte que la distància entre cadascun dels usuaris i l'estació receptora serà diferent, i per tant els temps de propagació dels missatges des dels usuaris fins al receptor. Sota aquestes condicions caldrà garantir que els missatges arribin sincronitzats (dins de l'*slot* assignat) a l'estació receptora compensant la diferència en els temps de propagació mitjançant un ajust en l'instant de sortida dels missatges. Dit d'una altra manera, s'haurà de garantir un sincronisme en el temps d'arribada dels missatges a l'estació receptora actuant sobre el temps de sortida dels missatges.

Com que els temps de propagació són *a priori* desconeguts pels usuaris i en entorns mòbils poden anar variant en el temps en funció de la ubicació del transmissor dins de la zona de cobertura, serà necessari desenvolupar mecanismes per a corregir els desajustos en els temps d'arribada i garantir que aquests siguin inferiors als temps de guarda. Aquest problema es resol desenvolupant en l'estació receptora un mecanisme de control del temps d'arribada i realimentació envers els usuaris terminals que vagi adaptant els instants de sortida dels missatges per a evitar així col·lisions en recepció.

### **Sincronisme TDMA en un sistema de telefonia mòbil GSM**

Troblem aquest mecanisme, denominat en anglès *time advance*, per exemple, en un sistema de telefonia mòbil GSM en què cada canal de 200 kHz d'amplada de banda està dividit en el temps i és compartit entre 8 usuaris. El protocol s'inicialitza durant el procés d'accés a la xarxa, i es gestiona de la manera següent:

- 1) L'usuari sol·licita accés a la xarxa mitjançant el canal assignat per a aquesta finalitat.
- 2) La xarxa identifica l'usuari i li assigna una ranura (o *slot*) de temps en funció de la disponibilitat de la xarxa.
- 3) L'usuari envia un paquet dins de la ranura de temps assignada.
- 4) L'estació base rep el paquet, mesura l'error de sincronisme i determina l'ajust (*time-advance*) que el transmissor ha d'aplicar sobre l'instant de sortida a fi que el paquet es rebi sincronitzat correctament.
- 5) S'envia el paràmetre *time-advance* a l'usuari i aquest l'aplica per a quedar ben sincronitzat amb la xarxa.
- 6) Com que l'usuari es pot moure al llarg de la conversa, i per tant, se'n pot modificar el valor de *time-advance*, l'estació base monitora periòdicament aquest paràmetre i el realimenta al transmissor a fi de mantenir el sincronisme de temps.

### **Sincronisme TDMA en un sistema de comunicacions per satèl·lit**

Un altre exemple en què podem trobar la situació anterior és un sistema de comunicacions per satèl·lit en el qual des de diferents ubicacions geogràfiques diferents proveïdors de servei envien els seus missatges (per exemple, canals de TV, converses telefòniques) cap al satèl·lit perquè aquest concateni els missatges rebuts i formi una trama de dades que s'enviarà cap a la Terra. Novament, a causa de la diferent ubicació geogràfica dels usuaris caldrà replicar un mecanisme similar al descrit anteriorment per a mantenir el sincronisme de temps de la xarxa i compensar els diferents temps de propagació de cadascun dels usuaris.

A continuació resumim els principals avantatges i inconvenients del sistema TDM/A, a més de ressenyar les pèrdues d'eficiència.

#### **1) Pel que fa als avantatges:**

- Tecnologia madura: tècniques molt conegudes i tecnològicament proves.
- Com que cada usuari quan transmet ho fa ocupant tota la banda disponible, permet que el senyal multiplexat es pugui introduir en un dispositiu no lineal sense que apareguin interferències entre usuaris a causa de productes d'intermodulació. Això farà que els amplificadors puguin treballar en saturació i, per tant, fer un ús més eficient de la potència.
- No cal ajustar la potència transmesa per les diferents estacions terrestres.
- En treballar tots els equips a la mateixa freqüència se simplifica el circuit sintonitzador de la cadena de radiofreqüència (RF).
- Dissenyant adequadament els temps de guarda aconseguim ortogonalitat entre usuaris i, per tant, és una tècnica lliure de MAI.

- Permet una elevada flexibilitat a l'hora de canviar els *slots* de temps assignats a cada usuari (només cal reajustar l'instant de temps en què l'usuari transmet) i la quantitat de recursos assignats (a cada usuari se li pot assignar un, dos, o més *slots*, i s'aconsegueix adaptar la velocitat de transmissió segons les necessitats).
- Permet una elevada flexibilitat a l'hora de decidir quin usuari cal descodificar. Hi ha prou que el receptor ajusti l'*slot* de temps que vol desmodular per a commutar entre usuaris.

## 2) Pel que fa als **inconvenients**:

- En tractar-se d'una tècnica síncrona en temps, és bàsic garantir una sincronització temporal entre usuaris. En el cas de TDMA s'han d'incloure en els algorismes de sincronisme les possibles diferències en el temps de propagació del senyal quan els usuaris es troben geogràficament dispersos, fet que complica encara més la tasca de sincronització.
- Només es poden aplicar a comunicacions digitals, en requerir blocs de memòria (no realitzables sobre senyals analògics) per a emmagatzemar la informació mentre no es pot transmetre.
- Tots els usuaris que operen en el sistema han de disposar de memòries intermèdies en transmissió i recepció, ja que la transmissió es fa a ràfegues.
- Com que la xarxa no requereix un sincronisme de portadora, cada usuari s'haurà de sincronitzar de manera independent amb el senyal rebut abans de desmodular el senyal, i s'introdueix la necessitat de preàmbuls per a cada usuari.
- En TDMA, com l'usuari accedeix al medi a ràfegues, les cadenes de radiofreqüència (i especialment els amplificadors) han d'estar commutant en temps (entre transmetre i no transmetre), aspecte tecnològicament complex que, entre altres coses, redueix l'eficiència en potència.
- Durant la fracció de temps en la qual un usuari transmet, a fi no degradar les prestacions, ha d'enviar la mateixa energia que enviaria si estigués transmetent tot el temps (cal mantenir l'energia de bit). Això obliga la que potència instantània mentre es transmet sigui  $N$  vegades més gran que la que hi hauria amb qualsevol altra tècnica de transmissió contínua (per exemple, FDMA o CDMA) en què  $N$  és el nombre de *slots* en una trama.

## 3) Pel que fa a les **pèrdues d'eficiència**:

- Les capçaleres utilitzades per a sincronitzar la xarxa en temps, i també les bandes de guarda necessàries per a "absorbir" els errors de sincronització i eliminar la MAI, comporten una pèrdua d'eficiència espectral (definida

en bits/s/Hz) en reduir-se la velocitat de transmissió d'informació útil, o el que és el mateix, en haver de destinar alguna fracció del temps per a enviar bits que no porten dades d'informació.

### 3. Divisió en freqüència (FDM/A)

En la tècnica de multiplexació (FDM) o d'accés múltiple per divisió en freqüència (FDMA) cada usuari modula la informació que vol transmetre a una banda de freqüències diferents i sense encavalcament espectral transmetent de manera continuada durant tot el temps. En aquest cas, els diferents usuaris se superposaran en temps però de manera que els seus espectres es mantindran separats perquè els moduladors utilitzen diferents freqüències portadores calculades degudament. Per a poder recuperar la informació de cada usuari, el receptor se sintonitzarà a la banda de freqüències de l'usuari del qual vol rebre la informació, i ajudat d'una operació de filtratge desmodularà l'usuari d'interès sense veure's interferit per la resta d'usuaris.

En resum, per a obtenir la divisió en freqüència és necessari desplaçar l'espectre del senyal original a una banda d'alta freqüència. Les tècniques utilitzades per a fer aquest desplaçament es basen en les tècniques de modulació de senyals que ja coneixeu. Com en el cas de divisió en temps, la decisió de quina freqüència cal utilitzar depèn del sistema de comunicacions i està predefinida, en el cas d'assignació fixa de recursos, o és competència del gestor de recursos segons les demandes rebudes, en el cas DAMA.

Una variant de la tècnica FDM/A és la multiplexació per divisió en longitud d'ona, WDM/A,<sup>10</sup> que conceptualment és el mateix, tot i que tècnicament s'aplica a transmissions per fibra òptica. Una altra variant de la tècnica FDM/A és la multiplexació per divisió en freqüències ortogonals, OFDM/A,<sup>11</sup> que conceptualment és el mateix en el sentit que l'espectre es divideix en bandes (anomenades *subportadores*), tot i que la finalitat i la manera d'implementació tècnica són completament diferents.

#### Estructura general d'un sistema de multiplexació o d'accés múltiple per divisió en freqüència FDM/A

La figura 3 representa, esquemàticament, l'estructura general d'un sistema de multiplexació o d'accés múltiple per divisió en freqüència FDM/A.

Com es pot veure en l'exemple, es multiplexen 3 senyals de veu utilitzant mescladors amb freqüències portadores diferents. Les freqüències portadores són de 20 kHz, 25 kHz i 30 kHz. Se suposa que el senyal de veu té contingut espectral des d'aproximadament els 300 Hz fins als 3.400 Hz.

Si prenem com a exemple el primer modulador (20 kHz), el mesclador desplaça el senyal en banda base, de manera que tot l'espectre (la part positiva i la negativa) quedarà centrat en la freqüència portadora de 20 kHz. El filtre passabanda situat després del mesclador únicament pren la banda lateral superior, ja que a causa de la simetria de l'espectre només serà necessària aquesta informació per a poder reproduir tot el senyal original. Els senyals multiplexats estan separats per freqüències portadores de 5 kHz, per la qual cosa l'amplada de banda de cada canal és de 5 kHz.

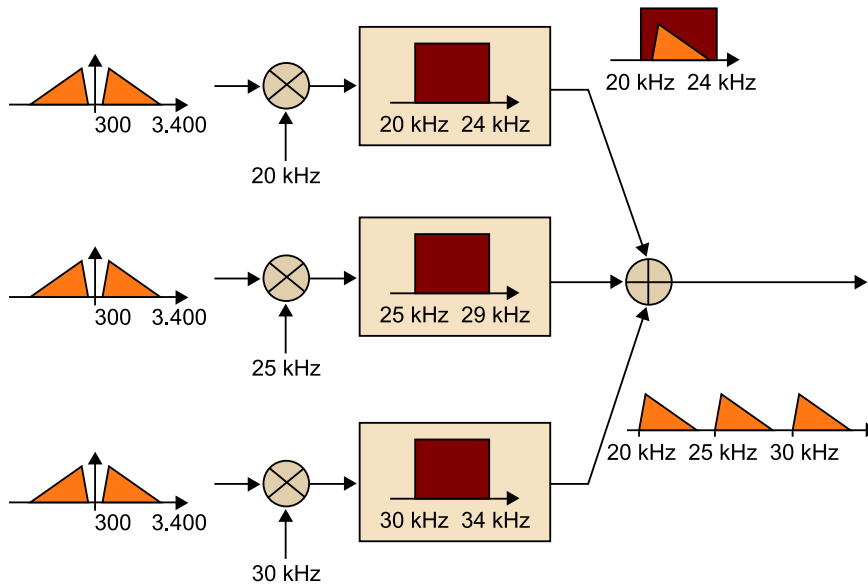
<sup>(10)</sup> WDM/A fa referència a les expressions angleses *wavelength division multiplex* i *wavelength division multiple access*.

<sup>(11)</sup> OFDM/A fa referència a les expressions angleses *orthogonal frequency division multiplexing* i *orthogonal frequency division multiple access*.

#### Vegeu també

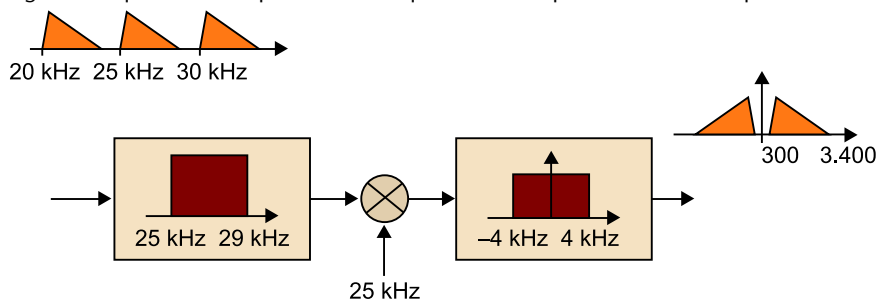
Al final d'aquest mòdul didàctic dedicarem un breu apartat a comentar la tècnica de multiplexació per divisió en freqüències ortogonals (OFDM/A).

Figura 3. Esquema de multiplexació/accés múltiple FDM/A



Per a recuperar els senyals originals una vegada ja s'han multiplexat, podem utilitzar un esquema com el de la figura 4. En aquest cas, el sistema recuperarà el senyal existent en el segon canal del sistema de la figura 3 (canal de 25 kHz a 30 kHz, tal com s'indica).

Figura 4. Esquema de recuperació d'un esquema de multiplexació/accés múltiple FDM/A



A diferència del cas de divisió en temps, en què el fet de combinar el senyal provinent de  $N$  usuaris obligava a incrementar la velocitat de transmissió en aquest factor, en el cas de divisió en freqüència, el fet de tenir de manera simultània  $N$  usuaris transmetent a una taxa de  $R$  bits/s, obligarà que l'amplada de banda del sistema complet sigui  $N$  vegades més gran:

$$Bw_{FDM/A} = Bw \cdot N \quad (3)$$

En un sistema FDM/A, com es pot intuir a partir de l'exemple de les figures 3 i 4, és molt important que tant transmissor com receptor tinguin perfectament sincronitzats els oscil·ladors encarregats de fer els desplaçaments de l'espectre. En cas contrari, es produïrien interferències sobre els usuaris adjacents en el moment de modular el senyal, o interferències dels usuaris adjacents en el moment de desmodular el senyal. Amb aquesta finalitat, s'han de tenir en compte dos aspectes importants: els mecanismes de sincronisme i recuperació de portadora, i les bandes de guarda.

Pel que fa als mecanismes de sincronisme i recuperació de portadora, no ens hi dedicarem en aquest mòdul, per quedar fora dels objectius d'aquest mòdul, i simplement direm que es tractarà de mecanismes que hauran de desenvolupar tant equips transmissors com receptors a fi que les diferències entre els diferents oscil·ladors estiguin dins d'unes toleràncies predefinides.

La manera més senzilla de dur a terme aquests mecanismes és que un dels nodes de la xarxa envii un to pilot que serà utilitzat com a referència per la resta d'usuaris a fi d'ajustar els oscil·ladors respectius. Cal observar que aquest mètode (dual a la inserció de capçaleres en el cas de divisió en temps) implicarà una pèrdua d'eficiència, ja que s'haurà de destinar part de l'espectre i part de l'energia a l'enviament d'aquest to pilot de referència.

Hi ha altres mecanismes de sincronització molt més complexos que poden aconseguir sincronitzar els oscil·ladors d'una xarxa sense necessitat de senyals de referència, només escoltant-se els equips mútuament. El problema d'aquests mecanismes és, però, que el temps necessari perquè tots els equips estiguin sincronitzats és molt més gran.

Respecte a les bandes de guarda, són la solució dual als temps de guarda per a poder compensar errors en el sincronisme en els oscil·ladors dels diferents usuaris. Les bandes de guarda, com el seu nom indica, són bandes en què no es transmet cap energia. A diferència dels temps de guarda (que podien ser opcionals en alguns casos), les bandes de guarda sempre són necessàries, ja que, tot i tenir perfectament sincronitzats els oscil·ladors dels diferents usuaris, caldrà disposar d'unes bandes de transició per fer el filtratge del senyal amb filtres implementables (els filtres ideals, infinitament abruptes, són tècnicament impossibles de fer).

Observeu en l'exemple de la figura 3 que la banda que va des dels 23.400 Hz fins als 25.300 Hz no conté informació útil. Aquesta banda de guarda se sol utilitzar per a simplificar el disseny dels filtres que hauran de separar els senyals, ja que d'aquesta manera no es requereixen bandes de transició tan abruptes. Dit d'una altra manera: els filtres no han de ser de tanta qualitat.

Novament, la introducció de bandes de guarda implicarà una pèrdua en l'eficiència del sistema a causa de l'ús ineficient de part de l'espectre destinat a les bandes de guarda. Com en el cas de la divisió en temps, apareixerà un compromís entre complexitat del sistema (per a garantir una sincronització correcta) i eficiència del sistema, i la solució més adequada dependrà en cada cas del sistema concret.



A diferència dels mecanismes TDM/A, que només es poden utilitzar en comunicacions digitals pel fet de requerir memòries, els mecanismes d'FDM/A s'han utilitzat històricament sobre senyals analògics, atès que els moduladors i desmoduladors permeten implementar desplaçaments del senyal en freqüència independentment de la naturalesa analògica o digital del senyal.

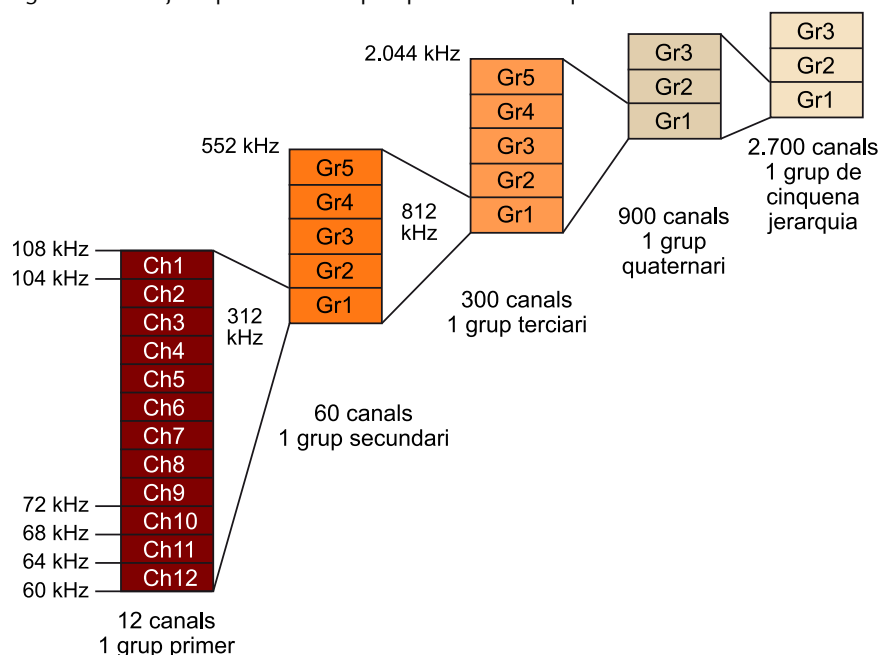
Hi ha la possibilitat de combinar les tècniques de multiplexació o accés múltiple TDM/A i FDM/A per a donar lloc a la tècnica anomenada MF-TDM/A<sup>12</sup>, que es caracteritza per un desenvolupament híbrid que divideix l'espectre en bandes de freqüència, i alhora cada banda la divideix en diferents *slots*, de manera que a cada usuari se li assigna una combinació de banda i *slot* de temps per a transmetre.

### Nivells jeràrquics d'un múltiplex per divisió en freqüència

El múltiplex de 3 senyals de veu que hem utilitzat en l'exemple de la figura 3 es pot considerar com un nou senyal, l'amplada de banda del qual està situada entre 20 kHz i 35 kHz. Suposem que hi ha diversos sistemes que multiplexen 3 senyals de veu en un únic canal, de manera anàloga a la que hem utilitzat en aquest exemple. Podem establir una jerarquia superior que faci la multiplexació dels múltiplex de 3 senyals d'àudio, aplicant aquesta idea de manera recursiva durant diversos nivells jeràrquics.

La situació descrita en el paràgraf anterior es correspon amb la idea de nivells jeràrquics de múltiplex que s'utilitzen en telefonia analògica. En la pràctica, en telefonia analògica es prenen 12 canals de veu per a formar un grup múltiplex, que rep el nom de grup primari. Els canals multiplexats estan separats per 4 kHz que cobreixen una banda de freqüències que va des dels 60 kHz fins als 108 kHz (vegeu la figura 5). El nivell jeràrquic superior es denomina *grup secundari* i està format per 5 grups primaris, amb un total de 60 canals de veu. En aquest cas, la banda de freqüències utilitzada és 312-552 kHz, tal com es mostra en la figura 5. La jerarquia del múltiplex continua fins a grups terciaris (cadascun format per 5 grups secundaris –300 canals–), grups quaternaris (com a agrupació de 3 grups terciaris –900 canals–) i, finalment, grups del cinquè nivell jeràrquic (formats per 3 grups quaternaris –2.700 canals–).

Figura 5. Nivells jeràrquics d'un múltiplex per divisió en freqüència



Aquesta agrupació dels canals segons diferents nivells resulta útil en telefonia per a fer la commutació a diferents nivells sense haver de desmultiplexar tots els senyals. És possible que diversos grups primaris representin comunicacions telefòniques entre Barcelona i Madrid, i Barcelona i Toledo. Tots formen un grup secundari que s'envia entre les centrals

<sup>(12)</sup>MF-TDM/A és la sigla de l'expressió anglesa *multi-frequency time division multiplex/multiple access*.

### Tècnica MF-TDM/A

Un exemple típic d'aquesta tècnica la trobem en el sistema de telefonia mòbil GSM (de l'anglès, *global system to mobile communication*). En aquest sistema s'utilitzen dues bandes de freqüència, cada una de les quals se subdivideix en un total de 125 canals, amb 200 kHz d'amplada de banda per a cada canal. Cada un dels canals està dividit en el temps i és compartit per 8 usuaris. L'assignació d'un usuari a un d'aquests 8 *slots* és dinàmica i s'ha de senyalitzar convenientment, ja que el terminal no la coneix per avançat.

de Barcelona i Madrid. A la central de Madrid, el grup primari resultant es pot ajuntar amb d'altres per a enviar-lo a Toledo sense necessitat d'haver de desmodular els canals en el nivell de senyal de veu.

### Freqüències dels canals de televisió UHF

Un altre exemple de senyals multiplexats en freqüència són els canals de televisió que es transmeten en la banda d'UHF (de l'anglès *ultra high frequency*). Aquesta banda cobreix des dels 470 MHz fins als 860 MHz, i s'utilitza per a la transmissió de senyals de televisió terrestre, tant en el seu format analògic com digital. Hem de remarcar aquí que les bandes de freqüència per a televisió en UHF són les mateixes tant per a la televisió analògica i per a la digital.

A Europa occidental la banda de freqüències està dividida en un total de 49 canals, que estan numerats del 21 al 69. Cada canal té una amplada de banda de 8 MHz, la qual cosa inclou les bandes de guarda. En televisió analògica el senyal PAL de vídeo compost es modula en banda lateral vestigial (una modulació en AM, en la qual es filtra parcialment la part inferior de l'espectre). La freqüència portadora del senyal de vídeo per al canal  $c$  està definida per l'equació següent:

$$f_k = (8 \cdot (c - 21) + 471,25) \text{ MHz}$$

Així, per exemple, per al canal 40, la freqüència portadora del senyal de vídeo serà de 623,25 MHz. En aquest canal es pot transmetre una portadora analògica o una portadora digital. En el cas de transmetre una portadora analògica, el canal té un únic programa de televisió. Anàlogament, la freqüència portadora del senyal d'àudio està centrada en la freqüència següent:

$$f_k = (8 \cdot (c - 21) + 476,75) \text{ MHz}$$

Aquests mateixos canals s'utilitzen per a la transmissió de la televisió digital terrestre (TDT). No obstant això, aquesta és pràcticament l'única semblança que hi ha entre els dos sistemes de televisió, ja que la modulació utilitzada en el cas digital és OFDM.

A continuació resumim els principals avantatges i inconvenients del sistema FDM/A, a més de ressenyar les pèrdues d'eficiència.

#### 1) Quant als **avantatges**:

- Tecnologia madura: tècniques molt conegudes i tecnològicament provades.
- Es poden aplicar a comunicacions analògiques o digitals.
- En tractar-se d'una tècnica asíncrona en temps, no cal sincronització temporal entre usuaris.
- Com que tots els usuaris transmeten simultàniament i sense pausa, les cadenes d'RF (especialment els amplificadors), estan treballant de manera contínua, cosa que permet eficiències millors en potència.
- Dissenyant adequadament les bandes de guarda, aconseguim ortogonalitat entre usuaris i, per tant, és una tècnica lliure de MAI.

#### 2) Quant als **inconvenients**:

#### Vegeu també

El format OFDM es tracta més endavant en aquest mòdul didàctic.

- Cal un sincronisme entre les portadores de tots els equips que operen en el sistema.
- Si el senyal multiplexat s'aplica a un amplificador no lineal, es produiran interferències entre els usuaris a causa dels efectes de la no-linealitat de l'amplificador. Cal, per tant, tenir una cura especial amb els components no lineals de la cadena de comunicacions i introduir, si cal, circuits linealitzadors (per a compensar les no-linealitats de l'amplificador) o treballar amb una potència inferior a la màxima permesa (*back-off*).
- És menys flexible que TDM/A a l'hora de canviar les freqüències assignades a cadascun dels usuaris. Comporta disposar d'oscil·ladors variables i bancs de filtres que puguin filtrar diferents bandes.
- Necessitat de control de la potència rebuda per tal que totes les portadores accedeixin amb la mateixa potència i no es produeixin bloquejos o emmascaraments dels usuaris més potents enfront dels més febles.

### 3) Pel que fa a les pèrdues d'eficiència:

- Els tons pilot utilitzats per a sincronitzar la xarxa, i també les bandes de guarda necessàries per a "absorbir" els errors de sincronització i eliminar la MAI, comporten una pèrdua d'eficiència espectral (definida en bits/s/Hz) en estar utilitzant espectre per a altres finalitats que no són la de transmetre informació útil.

## 4. Divisió en codi (CDM/A)

En els apartats anteriors hem analitzat els principis de funcionament dels sistemes de multiplexació per divisió en freqüència i per divisió en temps, que són històricament els més utilitzats en els sistemes de comunicacions. Hem vist que per a aconseguir l'ortogonalitat entre usuaris (i per tant, per a eliminar la MAI) el principi de funcionament és el de la no-simultaneïtat temps-freqüència entre els usuaris. És a dir, en la multiplexació en freqüència, els usuaris transmeten durant el mateix temps però utilitzant freqüències diferents, mentre que per a la multiplexació en temps, els usuaris tenen fragments de temps assignats diferents per a enviar o rebre les seves dades.

Hi ha una altra alternativa de multiplexació de dades en la qual els usuaris comparteixen temps i freqüència, que es coneix amb el nom de *multiplexació per divisió en codi*. Els principis de funcionament dels sistemes anomenats d'espectre eixamplat, que són la base d'aquesta tècnica, van més enllà dels objectius d'aquest mòdul i es deixen per a una assignatura de sistemes de comunicació avançats.

Això no obstant, com la multiplexació i l'accés múltiple per divisió en codi s'utilitza en alguns sistemes de comunicació molt populars com ara el sistema de telefonia mòbil de tercera generació, dedicarem aquest apartat a descriure les característiques principals d'aquests sistemes. Aquest apartat és, per tant, descriptiu, s'enuncien algunes de les propietats i característiques de la divisió en codi i no es pretén que es compreguin els principis de funcionament d'aquests sistemes.

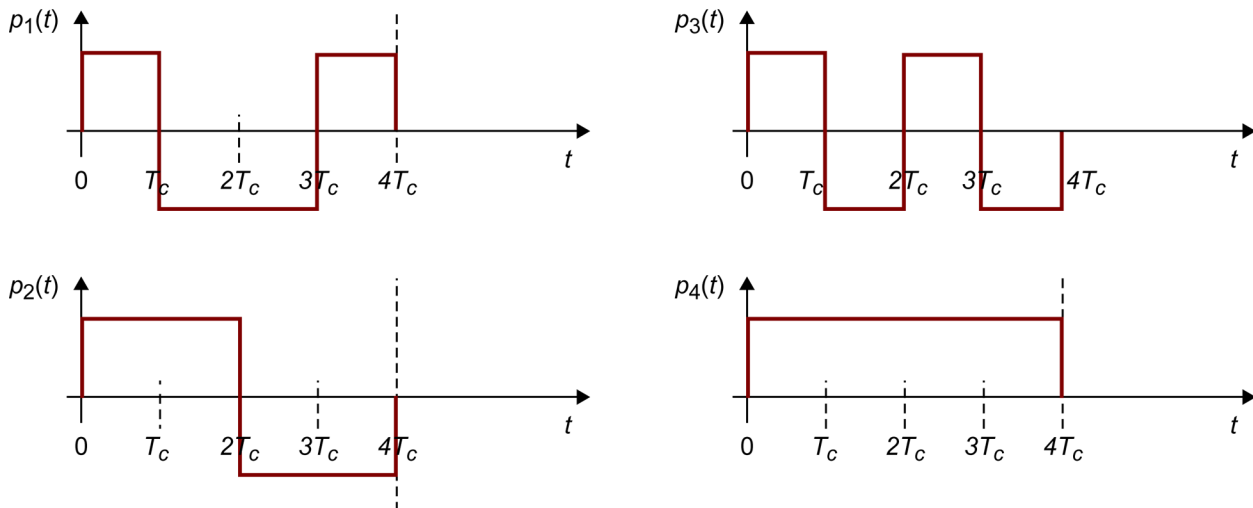
Comencem presentant la tècnica de multiplexació per divisió en codi a partir d'un exemple numèric. Cal observar que les quatre seqüències de la figura 6 mantenen el principi d'ortogonalitat enunciat en l'equació (1):

En efecte, agafant dues seqüències qualssevol (per exemple, les seqüències 1 i 2) s'acompleix:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_1(t) \cdot p_2(t) dt = T_c \sum_{i=1}^4 c_1(i) \cdot c_2(i) = T_c(1 - 1 + 1 - 1) = 0 \quad (4)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_2(t) \cdot p_2(t) dt = T_c \sum_{i=1}^4 c_2(i) \cdot c_2(i) = T_c(1 + 1 + 1 + 1) = 4 \cdot T_c \quad (5)$$

Figura 6. Exemple de seqüències ortogonals per a CDM/A



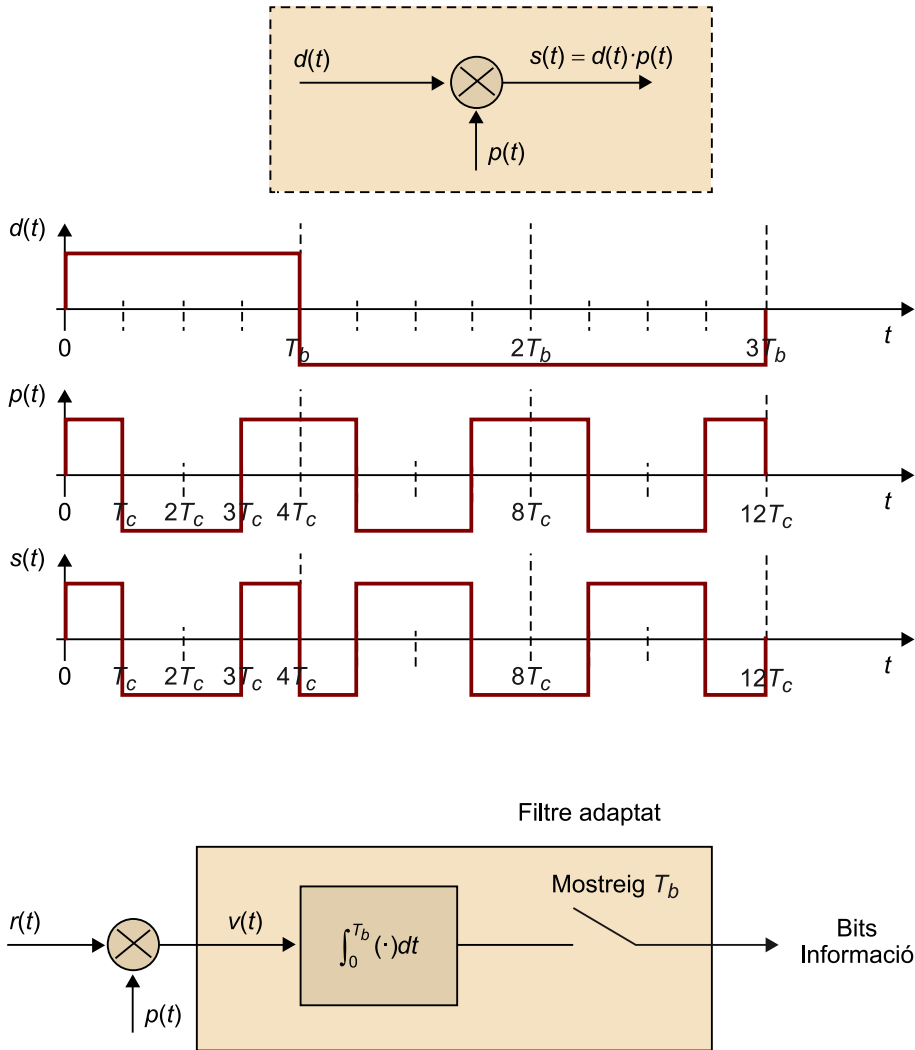
Explotant aquesta ortogonalitat veurem que, utilitzant com a base aquestes seqüències, podrem transmetre simultàniament dos senyals d'informació  $d(t)$ , que podran ser separats en el receptor. La figura 7 il·lustra el principi de funcionament del transmissor (a dalt) i del receptor (a baix) que implementa el mecanisme CDM/A.

En la figura 7 s'observa que la seqüència binària que conté la informació  $d(t)$  està modulada per una de les seqüències binàries ortogonals  $p(t)$ . És important observar que la velocitat de transmissió de la informació és més petita que la velocitat de la seqüència  $p(t)$ , és a dir,  $T_b$ , que representa el temps de bit, és més gran que  $T_c$ , que correspon a la durada del pols de la seqüència ortogonal, que anomenarem *temps de xip*.

El resultat del producte és una seqüència binària que varia a la mateixa velocitat que la seqüència ortogonal. D'això es deduirà que l'amplada de banda del senyal transmès  $Bw_{CDM/A} = 1/T_c$  serà molt més gran que l'amplada de banda del senyal d'informació  $Bw_d = 1/T_b$ . Per aquest motiu parlarem de *senyals d'espectre eixamplat* per a referir-nos a aquests mecanismes d'accés múltiple/multiplexació. Aquest increment en l'amplada de banda és el que permetrà que, de manera controlada, diversos usuaris puguin transmetre simultàniament compartint temps i freqüència mitjançant codis ortogonals.

En la mateixa figura 7 es mostra l'esquema del receptor. En aquest cas, el senyal rebut es multiplica per una rèplica de la seqüència  $p(t)$ , que s'haurà de generar en el receptor i que suposarem perfectament sincronitzada amb el senyal rebut. En aquestes condicions, tenint en compte el principi d'ortogonalitat observat anteriorment, l'efecte serà el de recuperar la informació del senyal desitjat cancel·lant alhora els senyals transmesos per la resta d'usuaris, ja que tots els productes creuats de  $p_i(t) \cdot p_j(t)$  s'anul·laran excepte el de l'usuari d'interès  $i = j$ .

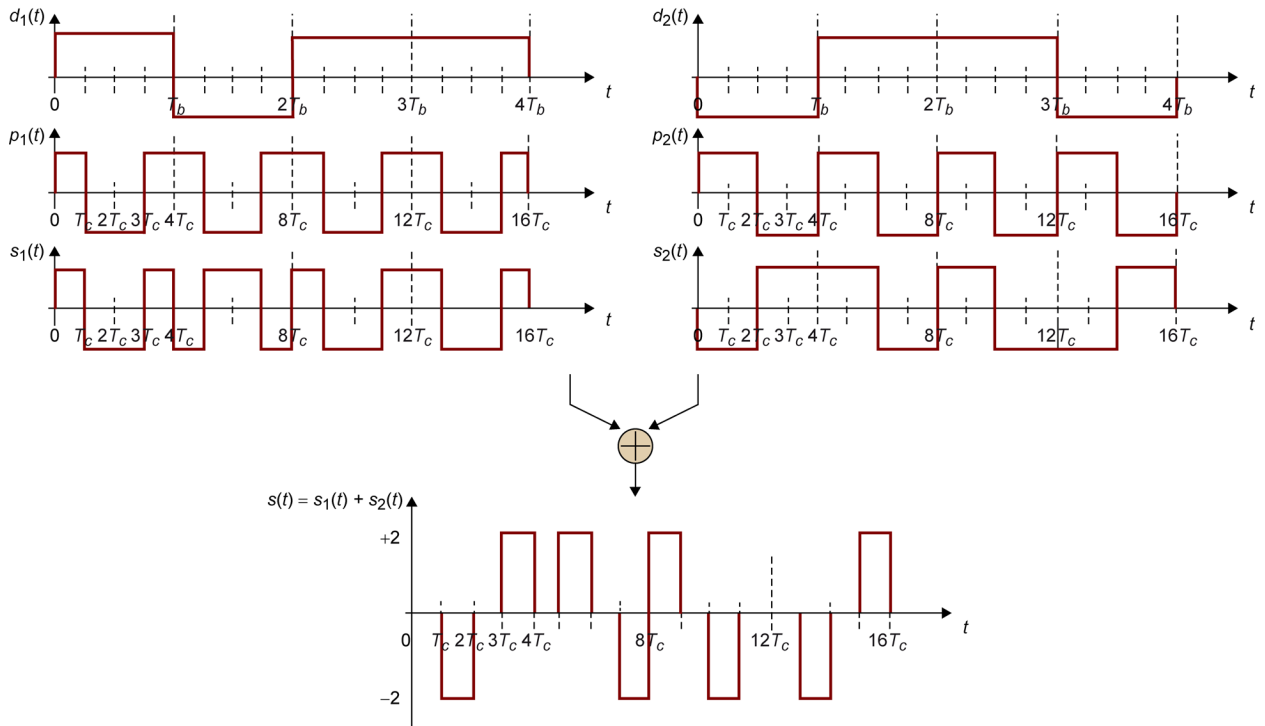
Figura 7. Diagrama bàsic d'un transmissor (a dalt) i receptor (a baix) per a CDM/A



**Multiplexació per divisió en codi**

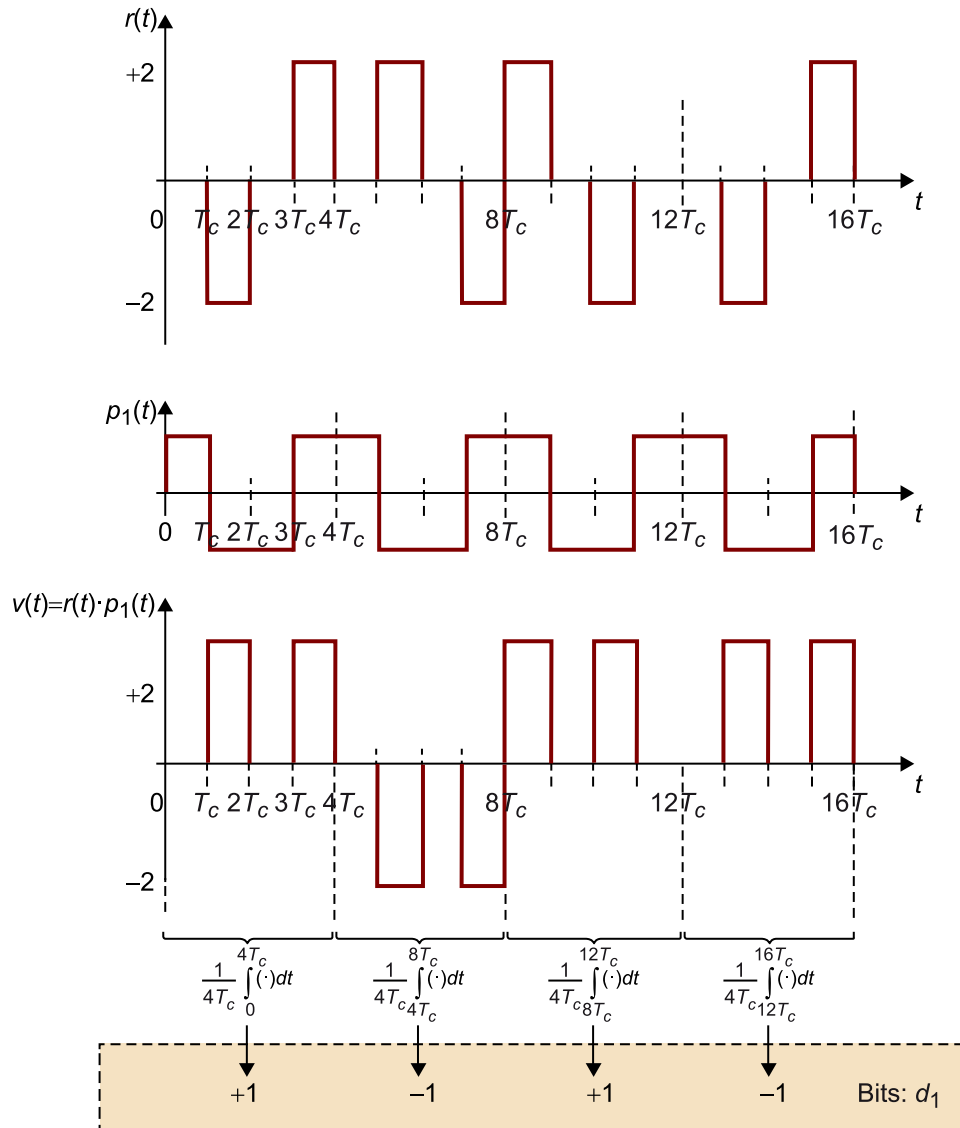
A continuació desenvolupem l'exemple numèric que il·lustra el funcionament del sistema. Partint del fet que es volen transmetre els bits d'informació  $d_1 = \{+1, -1, +1, +1, \dots\}$  i  $d_2 = \{-1, +1, +1, -1, \dots\}$ , i per a fer-ho s'utilitzen les seqüències codi  $c_1 = \{+1, -1, -1, +1\}$  i  $c_2 = \{+1, +1, -1, -1\}$ , el senyal transmès  $s(t)$  resultat de combinar els senyals generats per cadascun del senyals d'informació, tindrà la forma d'ona següent:

Figura 8. Exemple numèric de multiplexació/accés múltiple CDM/A



En el receptor comprovem que es podrà recuperar la seqüència de bits de l'usuari 1 si utilitzem l'esquema receptor de la figura 7 amb el codi  $c_1 = \{+1, -1, -1, +1\}$ . A partir del principi d'ortogonalitat de les seqüències codi escollides, tots els productes creuats de  $p_1(t) \cdot p_2(t)$  s'anul·laren i aconseguirem un sistema en el qual anul·larem completament l'usuari 2 i es descodifica l'1.

Figura 9. Exemple numèric de recuperació d'un senyal amb multiplexació/accés múltiple CDM/A



Deixem que comproveu que si en lloc d'utilitzar la seqüència  $c_1 = \{+1, -1, -1, +1\}$  en el receptor s'utilitza la seqüència  $c_2 = \{+1, +1, -1, -1\}$  tindríem un receptor que recuperaria els bits d'informació del segon usuari.

Com es pot imaginar, la importància d'aquesta tècnica es troba en les seqüències codi utilitzades. El nombre total de seqüències que es poden utilitzar és finit, a fi de garantir que les seqüències són ortogonals. Aquest nombre depèn, entre d'altres factors, de la longitud de la seqüència: com més llarga és la seqüència, més gran serà l'eixamplament espectral provocat, més gran és el nombre de seqüències possibles i, per tant, més gran el nombre de senyals que es poden multiplexar o el nombre d'usuaris que pot utilitzar el sistema. A continuació resumim molt breument les diferents variants que podem trobar en tècniques de multiplexació/accés múltiple per divisió en codi.



#### 4.1. Síncron o quasisíncron CDM/A (Qs-CDM/A)

Un sistema síncron CDM/A requereix que les seqüències moduladores de tots els usuaris del sistema estiguin perfectament sincronitzades. La necessitat d'aquest sincronisme recau en el fet que s'utilitzen seqüències moduladores que són perfectament ortogonals (com s'ha vist en l'exemple anterior) només quan estan perfectament sincronitzades. Si hi ha un error de sincronització entre el senyal rebut i la seqüència utilitzada en el receptor, es perd aquesta ortogonalitat i el resultat és que no serà possible separar correctament els usuaris.

##### Sistema síncron CDM/A

Plantegem-ho amb un exemple concret. S'ha vist anteriorment que els codis  $c_1 = \{+1, -1, -1, +1\}$  i  $c_2 = \{+1, +1, -1, -1\}$  són perfectament ortogonals i permeten separar la informació dels dos usuaris. Cal observar, però, què passaria si en el receptor hi hagués un error de sincronisme de  $T_c$  segons (un xip). Aquest efecte seria equivalent a tenir un codi  $c_1' = \{+1, +1, -1, -1\}$  a l'hora de multiplicar per la seqüència aquest codi  $c_1'$  s'obté a partir del codi  $c_1$  però amb un desplaçament circular a la dreta d'un xip. Cal observar que el codi  $c_1'$  coincideix amb el codi  $c_2$ . Per tant, si en l'esquema de la figura 9 el receptor que multiplica per la seqüència  $p_1(t)$  tingués un retard de  $T_c$  segons seria impossible separar la informació dels usuaris 1 i 2. Ho podeu provar vosaltres mateixos.

En casos de multiplexació, o quan l'accés múltiple tingui com a objectiu transmetre simultàniament diferents senyals que es generen físicament en un mateix lloc, com pot ser en el cas de telefonia mòbil el canal des de l'estació base fins als usuaris, resultarà factible garantir un sincronisme (alineament) perfecte entre les diferents seqüències moduladores. Ara bé, quan l'accés múltiple tingui com a objectiu transmetre simultàniament diferents senyals de diferents usuaris que es generen físicament en llocs separats, tot i que s'implementi un sistema de sincronisme entre usuaris, resultarà impossible garantir un sincronisme perfecte i sempre quedarà un error de sincronisme entre usuaris. Diem en aquest cas que el sistema és *quasisíncron* i parlarem d'un sistema *quasisíncron CDMA* (Qs-CDMA<sup>13</sup>).

Quan el sincronisme sigui excessivament costós de garantir caldrà pensar en una alternativa que pugui obviar aquest sincronisme, que descriurem a continuació.

Un possible conjunt de seqüències utilitzat pels sistema Qs-CDMA són les seqüències de Walsh-Hadamard generades a partir de les files de la matriu ortogonal de Walsh-Hadamard.

<sup>(13)</sup> Qs-CDMA és la sigla de l'expressió anglesa *quasi-synchronous code division multiple access*.

## 4.2. Asíncron CDMA (A-CDMA)

Un sistema **asíncron CDMA** no requereix cap tipus de sincronisme entre les seqüències moduladores dels diferents usuaris del sistema. El fet de relaxar el requisit de sincronisme entre usuaris implicarà que s'hagin d'utilitzar seqüències que no seran completament ortogonals però que garantiran que els errors de sincronisme afectin poc el resultat.

Com que no cal un sincronisme entre els usuaris podria semblar que es tracta d'una tècnica més eficient. El preu que cal pagar, però, per relaxar el sincronisme, és que les seqüències no seran completament ortogonals i, per tant, hi haurà interferència d'accés múltiple MAI.

### Sistema A-CDMA

Entre els codis utilitzats per A-CDMA trobem el codi de Gold i els codis de Kasami, que estableixen famílies de codis vàlids per a aquest tipus d'esquemes. Veiem a continuació el comportament d'aquests codis amb un exemple. Dos possible seqüències obtingudes a partir de codis de Gold serien:  $c_1 = \{+1, -1, -1, +1, +1, +1, -1\}$ ,  $c_2 = \{-1, +1, +1, -1, +1, +1, -1\}$ . Anàlitzem l'ortogonalitat de dues seqüències  $p_1(t)$  i  $p_2(t)$  generades a partir dels codis anteriors:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_1(t) \cdot p_2(t) dt = T_c \sum_{i=1}^7 c_1(i) \cdot c_2(i) = T_c (-1 - 1 - 1 - 1 + 1 + 1 + 1) = -T_c \quad (6)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_2(t) \cdot p_2(t) dt = T_c \sum_{i=0}^3 c_2(i) \cdot c_2(i) = T_c (1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1) = 7 \cdot T_c \quad (7)$$

Com es veu, la seqüència no és completament ortogonal, ja que queda un residu en calcular el producte creuat de seqüències. A canvi de suportar aquest valor, que no és zero, veurem que el comportament és acceptable quan les seqüències no estan sincronitzades. Anàlitzem què succeeix si hi ha un error de sincronisme de  $T_c$  segons (un xip):

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_1(t) \cdot p_2(t - T_c) dt = T_c \sum_{i=1}^7 c_1(i) \cdot c_2(i - 1 \text{ mòdul } 7) = T_c (-1 + 1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1) = -T_c$$

Veiem que continuem obtenint el mateix valor, cosa que implica que tenim el mateix nivell d'interferència MAI i, per tant, mantenim la capacitat de cancel·lar els usuaris no desitjats.

## 4.3. Frequency-Hopping CDMA (FH-CDMA)

Una altre mecanisme d'accedir al medi per divisió en codi però completament diferent al presentat a la figura 7 és l'accés al medi per salts de freqüència.

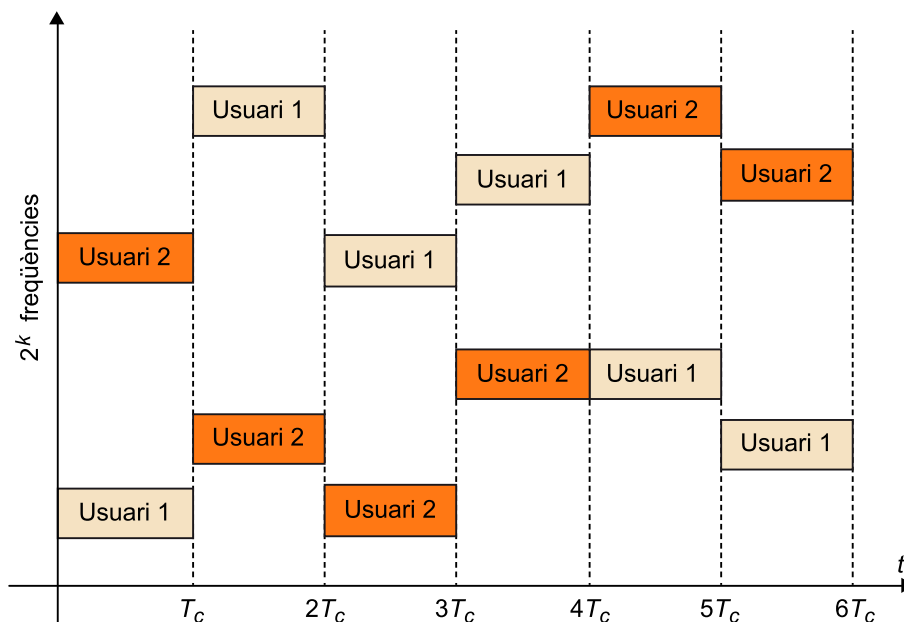
El principi de funcionament del sistema d'**accés múltiple per salts de freqüència** (FH-CDMA<sup>14</sup>) consisteix a variar la freqüència portadora del senyal transmès segons una seqüència preestablerta (codi) entre el transmissor i el receptor.

<sup>(14)</sup> FH-CDMA és la sigla de l'expressió anglesa *frequency-hopping code division multiple access*.

Com es veu en la figura 10, diferents usuaris segueixen patrons de salt diferents, de manera que, si en el receptor se segueix el patró de salts d'un usuari concret, anirem seguint les dades d'aquest usuari com si es transmetessin de manera contínua sense salts de freqüència. La resta d'usuaris no seran rebuts quan transmeten a freqüències diferents.

Si el nombre d'usuaris és elevat, podrà passar amb una certa probabilitat que dos (o més) usuaris transmetin simultàniament a la mateixa freqüència. En aquell cas es produiria una interferència entre els usuaris que "bloquejaria" la comunicació durant un breu instant de temps. Com que en els salts de freqüència anteriors i posteriors no es produïrien interferències entre aquests usuaris la comunicació a llarg termini estaria garantida i la col·lisió seria tractada com una interferència (MAI) que degradaria lleugerament les prestacions.

Figura 10. Exemple d'un sistema d'accés múltiple per salts de freqüència FH-CDMA



A continuació resumim els principals avantatges i inconvenients del sistema CDM/A, a més de ressenyar les pèrdues d'eficiència.

#### 1) Pel que fa als **avantatges**:

- Tot i que històricament no ha estat una tecnologia gaire utilitzada, actualment ja podem parlar de tecnologia madura: hi ha alguns sistemes de

telefonía mòbil i de comunicacions per satèl·lit que operen amb aquesta tècnica.

- Es poden aplicar a comunicacions analògiques o digitals.
- Com que tots els usuaris transmeten simultàniament i sense pausa, les cadenes d'RF (especialment els amplificadors) treballen de manera continuada, cosa que permet millors eficiències en potència.
- La tècnica A-CDMA, en tractar-se d'una tècnica asíncrona en temps, no requereix una sincronització, temporal entre usuaris.
- Amb la tècnica Qs-CDM/A, dissenyant adequadament els algoritmes de sincronització, aconseguim ortogonalitat entre usuaris i, per tant, és una tècnica lliure de MAI.
- Permet una elevada flexibilitat a l'hora de canviar els codis assignats a cada usuari i la quantitat de recursos assignats (a cada usuari se li pot assignar un, dos, o més codis, i s'aconsegueix adaptar la velocitat de transmissió segons les necessitats).
- Permet una elevada flexibilitat a l'hora de decidir quin usuari cal descodificar. Hi ha prou que el receptor seleccioni el codi de l'usuari que vol desmodular per a commutar entre usuaris.

## 2) Pel que fa als **inconvenients**:

- Amb la tècnica Qs-CDMA cal una sincronització de la xarxa per a tenir sincronitzats tots els codis.
- Amb la tècnica A-CDMA el sincronisme de la xarxa no és necessari, però el preu per pagar és que els codis no són perfectament ortogonals i, per tant, apareix MAI en forma d'interferència entre usuaris, que redueix el nombre màxims d'usuaris que pot accedir al sistema.
- En totes dues tècniques d'accés múltiple A-CDMA i Qs-CDMA (especialment en A-CDMA) cal un control de potència en els transmissors per a evitar l'efecte prop-lluny<sup>15</sup>, que consisteix que els usuaris més propers al receptor es reben amb més potència i bloquegen els més allunyats del receptor, que arriben amb un nivell de senyal més feble.

<sup>(15)</sup>En anglès, *near-far effect*.

3) Pel que fa a les **pèrdues d'eficiència**: en termes d'eficiència espectral (definida en bits/s/Hz) CDM/A no és en principi ni més ni menys eficient que TDM/A o FDM/A (obviant les pèrdues d'eficiència espectral provocades pels temps de guarda o les bandes de guarda). Si l'amplada de banda s'incrementa en un factor  $L$ , potencialment podem transmetre fins a  $L$  senyals simultàniament,

fet que compensa l'increment d'espectre utilitzat. Com en els casos anteriors de TDM/A i FDM/A veurem, però, que tenim una reducció de l'eficiència espectral per diferents motius:

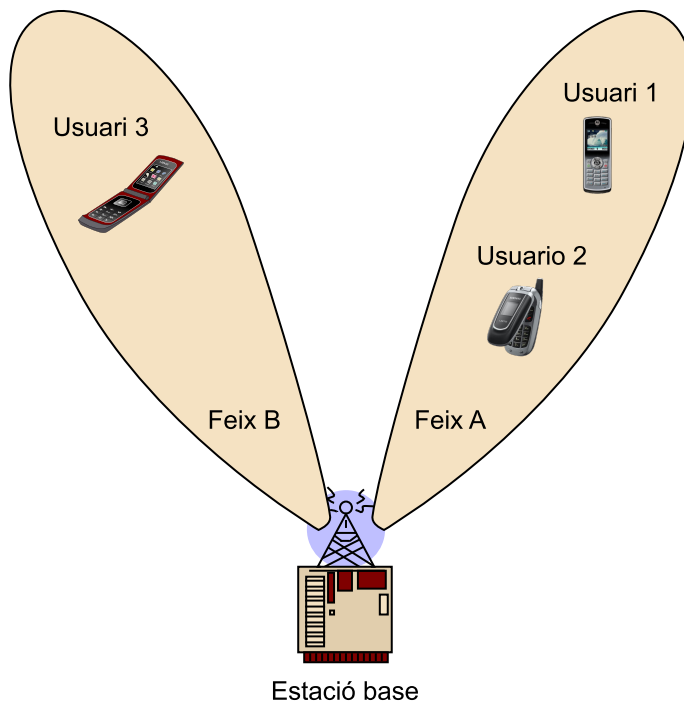
- En el cas de Qs-CDMA, els pilots i seqüències que s'han d'enviar per la xarxa per aconseguir sincronitzar els codis de tots els usuaris comporten una pèrdua d'eficiència espectral (definida en bits/s/Hz) en utilitzar un espectre o intervals de temps per a enviar dades que no corresponen a informació útil.
- En el cas d'A-CDMA, no cal un sincronisme de xarxa, i per tant aparentment podria semblar una tècnica més eficient. Malgrat això, com ja s'ha comentat, aquesta tècnica, a diferència, de les anteriors (TDMA, FDMA o Qs-CDMA) no garanteix l'ortogonalitat entre usuaris i, per tant, presenta MAI. Aquesta interferència reduirà el nombre màxim d'usuaris que poden accedir al sistema, fet que comportarà una pèrdua en l'eficiència espectral (definida en bits/s/Hz) similar a la resta de tècniques: si s'incrementa l'amplada de banda en un factor  $L$  però el nombre d'usuaris que transmeten és inferior a  $L$ , es produeix una reducció en l'eficiència espectral, en ocupar una banda superior a l'estrictament necessària.

## 5. Divisió en espai (SDM/A)

Una altra possibilitat per a compartir el medi és la **multiplexació o accés múltiple en espai**, en la qual antenes directives orientades cap a certes regions de l'espai permeten separar un usuari (o conjunt d'usuaris) segons la seva posició geogràfica i discriminar-lo d'altres usuaris possibles.

Per a cobrir només certes regions de l'espai es poden utilitzar antenes sectoritzades o antenes multifeix. Les antenes sectoritzades són antenes que només cobreixen una part de l'espai i divideixen l'espai en sectors (terme que utilitzarem per a referir-nos a cadascuna de les regions en què es divideix l'espai). Les antenes multifeix, utilitzant agrupacions d'antenes elementals, constitueixen les anomenades matrius d'antenes, que, ajustades electrònicament, permeten configurar els diferents feixos que generen l'espai de cobertura. En el cas d'aquest tipus d'antenes, utilitzarem el terme *feix* per a referir-nos a cadascuna de les regions en què es divideix l'espai.

Figura 11. Esquema de multiplexació/accés múltiple SDM/A



La figura 11 representa esquemàticament l'estructura general d'un sistema de multiplexació o d'accés múltiple per divisió en espai SDM/A. Com es pot veure, l'estació receptora pot configurar feixos d'antena diferents per a usuaris que estan en posicions espacials diferents. En la situació que es presenta en la figura, "l'usuari 1" i "l'usuari 3" estan coberts per feixos diferents, i per tant

podrien accedir simultàniament al sistema amb les mateixes freqüències, codis o intervals de temps que fan servir. Observeu, en canvi, que "l'usuari 1" i "l'usuari 2" estan coberts pel mateix feix d'antena, per la qual cosa hauran de compartir el recurs mitjançant qualsevol de les altres tècniques de multiplexació o accés múltiple.

### Antenes sectorials en telefonia mòbil

El ús d'antenes sectorials es troba molt estès en les estacions base de telefonia mòbil. Típicament s'utilitzen antenes sectorials de 90°, que divideixen l'espai en quatre sectors, o antenes sectorials de 120° que divideixen l'espai en tres sectors. En la figura 12 es veu un exemple d'antena sectorial de 120°. Cadascun dels tres sectors és cobert amb una matriu d'antenes, de manera que permet triplicar el nombre d'usuaris coberts amb l'estació base. Com s'ha comentat anteriorment, els usuaris coberts per cadascun dels sectors segueix un esquema MF-TDM/A. Per a minimitzar l'efecte de les interferències entre sectors, els sectors adjacents utilitzen bandes de freqüència diferents, de manera que dos usuaris propers coberts per sectors diferents estan separats per espai i freqüència. Una freqüència utilitzada en un sector es torna a utilitzar en un altre sector suficientment allunyat perquè la MAI sigui prou petita. La distància de reutilització, el patró de reutilització i el factor de reutilització (nombre de freqüències diferents utilitzades en el sistema) dependran de diferents paràmetres com són el radi de cobertura de l'estació base, el nombre d'usuaris...

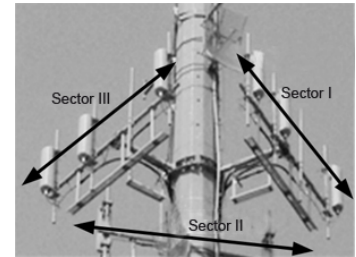


Figura 12. Antena sectorial utilitzada en telefonia mòbil. Exemple SDM/A 3 en sectors

### Cobertura multifeix en comunicacions per satèl·lit

Un exemple de cobertura amb múltiples feixos el trobem en els sistemes de comunicacions per satèl·lit, en què des d'un satèl·lit es dona cobertura a una gran àrea geogràfica i emprant una antena amb diferents feixos es pot incrementar el nombre total d'usuaris als quals es dona cobertura de manera simultània.

A continuació resumim els principals avantatges i inconvenients del sistema SDM/A, a més de ressenyar les pèrdues d'eficiència.

#### 1) Pel que fa als **avantatges**:

- Mecanisme fàcil d'implementar amb antenes sectoritzades o antenes amb múltiples feixos.
- Permet incrementar de manera lineal el nombre d'usuaris del sistema en funció del nombre de sectors o feixos implementats.

#### 2) Pel que fa als **inconvenients**:

- Aquest mecanisme de multiplexació o d'accés múltiple permet separar usuaris ubicats en diferents posicions geogràfiques (coberts per diferents feixos o antenes) però requereix un altre format de multiplexació o d'accés múltiple per a separar els usuaris geogràficament propers (coberts pel mateix feix o antena).
- Aquest mecanisme no està lliure de MAI. Dos usuaris geogràficament propers però coberts per feixos diferents es poden interferir si no treballen a freqüències diferents. Cal dissenyar un pla de reutilització de freqüències que minimitzi l'efecte de la MAI entre feixos (interferència entre feixos<sup>16</sup>).
- Cal replicar part de la cadena d'RF.

<sup>(16)</sup>En anglès, *interbeam interference*.

### 3) Pel que fa a les pèrdues d'eficiència:

- Com no és una tècnica lliure de MAI, cal en molts casos utilitzar bandes diferents entre feixos adjacents, fet que redueix l'eficiència del sistema complet (definida en bits/s/Hz, considerant Hz l'amplada de banda assignada al sistema complet) ja que en una determinada àrea geogràfica no es pot utilitzar tot l'espectre disponible pel sistema sinó només una part.



## 6. Divisió en polarització (PDM/A)

Una característica de les ones electromagnètiques és la polarització que, com veurem a continuació, es pot explotar per a duplicar la capacitat d'un canal de comunicacions.

La **polarització** es defineix com la direcció del vector camp elèctric respecte a la superfície de la Terra. La polarització dependrà bàsicament de l'orientació de l'antena transmissora i es podrà classificar en polarització lineal (horitzontal o vertical) o polarització circular (a dretes o a esquerres), dependent del tipus d'antena.

En el cas de polarització lineal es parla de polarització horitzontal quan el camp elèctric és perpendicular a la superfície de la Terra, i de polarització vertical quan aquest camp és paral·lel a aquesta. En el cas de polarització circular parlarem de polarització circular a dretes o a esquerres dependent de direcció en què giri el vector de camp elèctric respecte a la direcció de propagació. La polarització de l'antena transmissora es defineix segons la polarització de l'ona que transmet, i l'antena receptora ha d'estar alineada amb la polarització del senyal que rep a fi que la transferència de potència en el circuit receptor sigui màxima. Al contrari, si l'antena receptora es troba en posició ortogonal respecte a la polarització del senyal que rep, la transferència de potència seria nul·la. És precisament en aquest principi en el qual es basarà el mecanisme de multiplexació (o d'accés múltiple) en polarització PDM/A<sup>17</sup>. Utilitzant dues antenes transmissores orientades de manera ortogonal una respecte a l'altra podrem enviar simultàniament, i a la mateixa freqüència, dos senyals independents, que podran ser rebuts de manera separada en recepció orientant adequadament l'antena receptora. D'aquesta manera, o bé podrem multiplexar dos senyals en transmissió, o bé podrem permetre que dos usuaris (que poden estar en ubicacions diferents) accedeixin simultàniament al medi.

<sup>(17)</sup>PDM/A és la sigla de l'expressió anglesa *polarization division multiplex/multiple access*.

Tot i que les dues polaritzacions són teòricament ortogonals, i per tant la tècnica PDM/A hauria d'estar lliure de MAI, dos fenòmens provoquen interferències creuades entre els senyals de les dues polaritzacions, que anomenarem *interferència de polarització creuada*<sup>18</sup>. Per una banda, les antenes no són ideals i en la pràctica no tenen la capacitat de bloquejar la polarització ortogonal. Això provoca que sempre es rebi part de la potència del senyal que s'envia en la polarització ortogonal en la qual es vol rebre. Per una altra banda, en propagar-se el senyal des del transmissor fins al receptor es pot alterar la polarització

<sup>(18)</sup>En anglès *cross-polarization*.

del senyal, de manera que es transfereixi una petita fracció de la potència d'un senyal a la polarització ortogonal. Aquest fenomen, típic de les comunicacions per satèl·lit que operen a freqüències elevades, rep el nom de *despolarització*.

### PDMA aplicat a radiodifusió de senyal de TV terrestre

La figura 13 mostra dues antenes de recepció de TV orientades amb polaritzacions ortogonals. Aquesta imatge, que es pot veure en alguns llocs de la geografia, és un exemple quotidià d'accés múltiple per divisió en polarització. Dos repetidors de TV geogràficament propers, que potencialment es podrien interferir mútuament, transmeten en polaritzacions ortogonals a fi de poder accedir simultàniament al medi amb el mateix canal (o canals propers) de TV. En recepció, depenent de per quin repetidor volem rebre el nostre senyal de TV, orientarem l'antena en polarització horitzontal o vertical. En el cas de la figura tenim dues antenes que reben senyal dels dos repetidors (suposadament perquè en aquesta ubicació geogràfica un conjunt de canals de TV es reben en millors condicions des d'un repetidor i un altre conjunt de canals es rep millor des d'un altre repetidor).

### PDM aplicat a radiodifusió de senyal de TV per satèl·lit

Un altre exemple quotidià de multiplexació en polarització el trobem en els senyal de TV per satèl·lit. A fi de poder duplicar la capacitat del satèl·lit, i per tant, poder rebre quasi el doble de canals amb els mateixos recursos (un sol satèl·lit i sense duplicar l'amplada de banda assignada) es transmeten serveis de TV en les dues polaritzacions (circular a dretes i circular a esquerres) i l'usuari des del desmodulador de satèl·lit mateix podrà seleccionar quina polarització vol descodificar (el desmodulador mateix configurarà l'antena per a rebre la polarització desitjada).

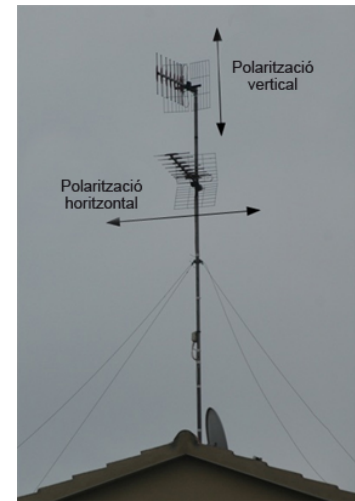


Figura 13. Antenes amb polarització horitzontal i vertical. Exemple de PDMA lineal

A continuació resumim els principals avantatges i inconvenients del sistema PDM/A, a més de ressenyar les pèrdues d'eficiència.

#### 1) Pel que fa als **avantatges**:

- Permet duplicar el flux d'informació que es pot transmetre sense incrementar l'amplada de banda necessària.

#### 2) Pel que fa als **inconvenients**:

- Només hi ha dues polaritzacions ortogonals, i per tant només es pot duplicar el flux d'informació. No resulta útil com a tècnica d'accés múltiple amb més de dos usuaris (habitualment sempre hi haurà més de dos usuaris) ni per a multiplexar més de dues seqüències de dades.
- Sempre hi ha un terme de polarització creuada que provocarà una interferència entre polaritzacions, fet que obligarà a reduir lleugerament la velocitat de transmissió, i per tant, en la pràctica no es podrà duplicar el flux d'informació.

#### 3) Pel que fa a les **pèrdues d'eficiència**:

- El fet de poder duplicar la velocitat de transmissió sense fer ús de més amplada de banda permet duplicar l'eficiència espectral (definida en bits/s/Hz). En la pràctica l'efecte de polarització creuada provocarà un increment en el nivell d'interferències que obligarà a reduir la velocitat de transmissió per a mantenir la qualitat de la comunicació. En conseqüència,

L'increment en l'eficiència espectral serà inferior a un factor de dos, tot i que es produirà increment en l'eficiència respecte al cas de no fer ús de la doble polarització. El preu per pagar serà el d'haver de duplicar les cadenes d'RF si es vol transmetre/rebre simultàniament amb doble polarització.

## 7. Divisió en freqüències ortogonals (OFDM/A)

Com ja s'ha comentat en presentar la tècnica d'FDM/A, el mecanisme d'OFDM/A es pot veure com una variant de la divisió en freqüència. Malgrat això, com que tant tecnològicament com a escala d'aplicació la implementació de les dues tècniques és completament diferent, mereix un tractament especial dins de les tècniques de multiplexació i accés múltiple. En aquest mòdul només farem menció a la tècnica ja que, a causa de la seva importància i complexitat, se li dedicarà un mòdul didàctic complet en una assignatura futura dedicada a les modulacions avançades. L'únic objectiu és presentar el concepte i els acrònims a fi de completar la llista de tècniques d'accés múltiple i poder presentar des de les més clàssiques fins a les més modernes.

Segons el concepte de multiplexació introduït al principi d'aquest mòdul, la multiplexació OFDM<sup>19</sup> no és, estrictament parlant, una tècnica de multiplexació. Dèiem que una tècnica de multiplexació combina diferents missatges o seqüències de dades en un únic senyal amb la finalitat de compartir un recurs únic. Al contrari, OFDM no està pensada per a combinar (multiplexar) diferent missatges, sinó que es presenta com a alternativa a les modulacions clàssiques vistes en altres mòduls d'aquest curs. Per aquest motiu, abusant del llenguatge, es parla sovint de modulació OFDM en lloc de multiplexació OFDM, ja que, conceptualment, OFDM està més a prop de la idea de modulació que de la idea de multiplexació. La figura 14 pretén il·lustrar les diferències entre FDM i OFDM i alhora esquematitzar OFDM.

Com es veu en la figura, en FDM es divideix la freqüència en diferents bandes (3 bandes) i en cada banda s'envia una informació diferent. Al contrari, OFDM actua sobre un conjunt de símbols (o bits) que, en lloc d'enviar-se de manera seqüencial, com es faria en una modulació clàssica, s'agrupen en blocs de  $N$  símbols que es transmeten simultàniament a diferents freqüències anomenades *subportadores*. Tot i que en termes de velocitat de transmissió i amplada de banda no hi ha diferències respecte a una modulació clàssica, organitzar l'enviament dels símbols amb una multiplexació OFDM presenta millores, especialment quan hi ha un canal de propagació que introdueix multicamí (ecos i reflexions en la propagació). Aquest motiu, juntament amb el fet que tecnològicament és senzill d'implementar, fa que OFDM sigui àmpliament utilitzada en els sistemes més moderns. Per exemple, està estandarditzada en l'estàndard DVB-T de difusió de senyal de TV digital, utilitzat en l'enviament del senyal de TDT.

<sup>(19)</sup> OFDM és la sigla de l'expressió anglesa *orthogonal frequency division multiplexing*.

### Vegeu també

Aquestes modulacions clàssiques han estat tractades al mòdul "Comunicacions digitals passabanda" d'aquest curs.

### El nombre $N$

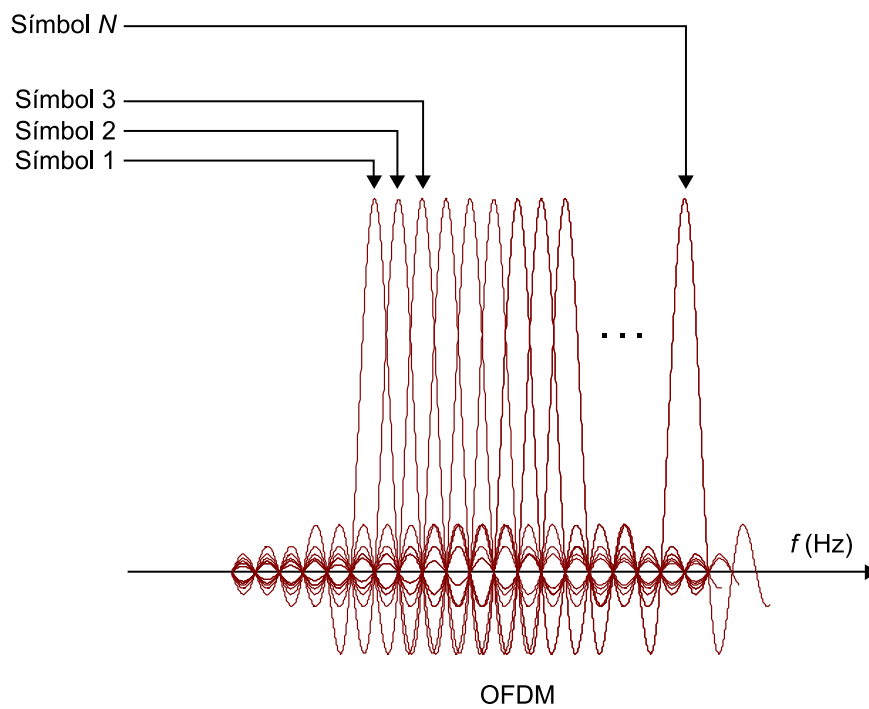
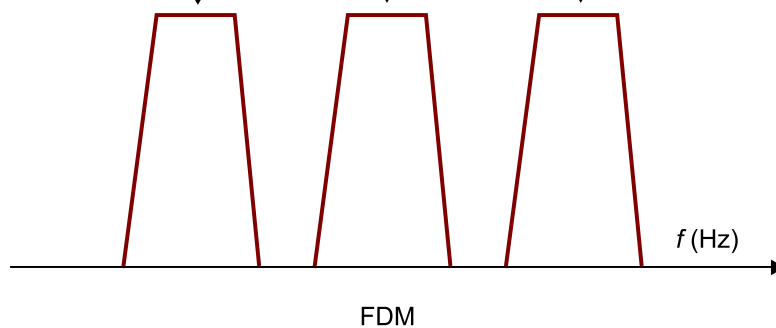
Típicament  $N$  és un nombre gran i potència de 2; alguns valors per a  $N$  utilitzats en alguns estàndards són  $N = 64$ ,  $N = 2.048$ ,  $N = 8.192$ .

Figura 14. Comparativa d'FDM enfront d'OFDM

Missatge de dades

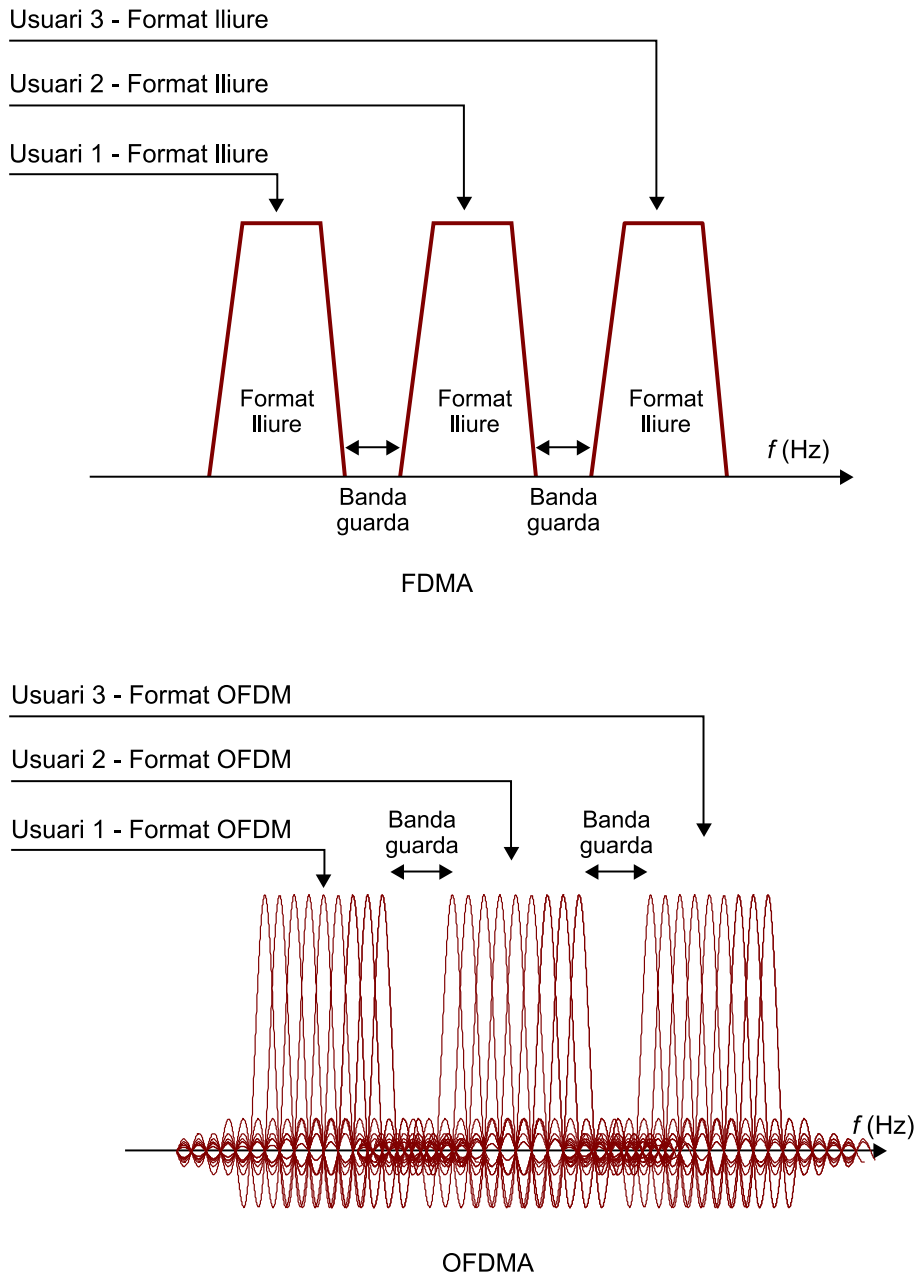
Missatge d'àudio

Missatge de veu



Respecte al mecanisme associat d'accés múltiple OFDMA, sí que podem dir que en aquest cas es tracta d'una tècnica d'accés múltiple en el sentit que diversos usuaris ubicats en posicions geogràfiques diferents accedeixen simultàniament al canal compartint el medi. Com s'il·lustra en la figura 15, que compara FDMA i OFDMA, la tècnica OFDMA és més restrictiva pel que fa al format de dades que cada usuari ha d'utilitzar. En FDMA l'espectre es divideix en bandes i cada usuari utilitza una de les bandes i és lliure d'utilitzar el format de senyal que vulgui mentre transmeti dins de la banda i no interfereixi amb els usuaris adjacents. En OFDMA el que es fa és dividir l'espectre en un nombre elevat de subportadores i a cada usuari se li n'assigna un subconjunt i, per tant, està obligat a utilitzar OFDM per a enviar els símbols d'informació.

Figura 15. Comparativa d'FDMA enfront d'OFDMA



Cal observar que OFDMA es podria entendre com un gran senyal OFDM en què la seqüència de símbols per enviar no està físicament en un terminal sinó que es troba distribuïda entre diferents terminals geogràficament separats. Per aquest motiu el sincronisme de freqüència entre usuaris ha de ser molt precís perquè la interferència entre usuaris (MAI) sigui mínima. Aquesta és la principal raó que limita l'ús d'OFDMA com a tècnica d'accés múltiple quan no es pot garantir un bon sincronisme entre usuaris. Pocs inconvenients més es poden trobar a aquesta tècnica, que si aconseguix un sincronisme quasi perfecte entre usuaris pot ser més eficient que FDMA, ja que les bandes de guarda poden ser més petites. La tècnica d'accés múltiple OFDMA està estandaritzada en l'estàndard IEEE 802.16 per a xarxes sense fil d'àrea metropolitana, utilitzat en WiMAX.

A continuació resumim els principals avantatges i inconvenients del sistema OFDM/A, a més de ressenyar les pèrdues d'eficiència.

1) Pel que fa als **avantatges**:

- OFDM és una tecnologia prou madura: els sistemes de televisió digital terrestre actuals i alguns models de Wi-Fi operen amb aquesta tècnica.
- Quan el canal de comunicacions introdueix multicamí (ecos i reflexions en la propagació) l'ús d'OFDM/A estalvia la necessitat d'introduir un equalitzador en recepció que corregeixi la distorsió provocada pel canal (necessari en altres tècniques com TDMA, FDMA o CDMA).
- OFDMA permet una elevada flexibilitat a l'hora d'assignar més o menys subportadores a cada usuari i, en conseqüència, a l'hora de variar la quantitat de recursos assignats, i aconsegueix adaptar la velocitat de transmissió segons les necessitats. Molt més flexible que FDMA.

1) Pel que fa als **inconvenients**:

- OFDM/A és una tecnologia poc madura.
- En OFDMA cal un sincronisme en freqüència per a aconseguir que els diferents usuaris insereixin la informació sense interferir amb la resta d'usuaris. Un error de sincronisme pot ser més crític que en FDMA i més difícil de minimitzar amb bandes de guarda.

3) Pel que fa a les **pèrdues d'eficiència**:

- Si els problemes de sincronisme entre usuaris estan resolts, OFDMA presenta millor eficiència espectral quan es compara amb FDMA, ja que es fa un ús més eficient de l'espectre i es poden reduir les bandes de guarda.

## 8. Mecanismes d'accés al medi per contesa: ALOHA (i variants)

Tots els mecanismes presentats anteriorment estan lliures de col·lisió, i per tant garanteixen que totes les transmissions que s'estableixen estan garantides. Al contrari, en els mecanismes d'accés al medi basats en contesa, com que l'accés al medi és aleatori, no es garanteix per avançat l'èxit de la transmissió. Els usuaris decideixen accedir al medi de manera unilateral i sense l'existència d'un centre que gestioni i controli les comunicacions, per la qual cosa es podran produir col·lisions entre usuaris que accedeixin de manera simultània al medi. Tot i que *a priori* pugui semblar ineficient, aquestes tècniques d'accés al canal resulten interessants pel fet que estalvien l'existència d'un centre de gestor i del control sobre els usuaris associats. Malgrat això, i com es veurà a continuació, només es podran implementar quan el volum de trànsit sigui reduït. En cas contrari el sistema es veuria bloquejat per l'excés de col·lisions.

El mecanisme d'ALOHA va ser un dels primers protocols d'accés al medi per contesa i es va aplicar a un sistema de transmissió de paquets utilitzant un satèl·lit com a repetidor. La xarxa, implementada al principi dels anys setanta, tenia per objectiu connectar diferents ordinadors dels diferents campus de la Universitat de Hawaii ubicats en diferents illes del Pacífic.

El més senzill dels protocols ALOHA, anomenat *Pure ALOHA*, va ser el primer que es va implementar i el seu funcionament és molt simple. Si un equip té un paquet de dades per transmetre accedeix al canal i el transmet sense cap demora. L'equip que ha enviat el missatge es posa en mode escolta per a detectar si el paquet s'ha enviat correctament o si ha sofert una col·lisió amb el paquet d'un altre usuari que ha accedit al canal al mateix temps. En cas que s'hagi produït una col·lisió, l'usuari esperarà un temps aleatori i tornarà a enviar el paquet (com que els temps d'espera per a retransmetre el paquet seran diferents per a cada usuari la probabilitat que es torni a produir una col·lisió serà baixa). En la implementació original del protocol ALOHA, en utilitzar un satèl·lit com a repetidor, el mecanisme per a detectar si s'havien produït col·lisions era molt simple: el transmissor mateix esperava a escoltar del satèl·lit el missatge enviat, i en cas de no escoltar-lo entenia que s'havia produït una col·lisió. En altres sistemes en què no hi ha un repetidor és necessari l'enviament d'un missatge ACK<sup>20</sup> de confirmació per part del receptor per a informar que el missatge s'ha rebut correctament. En cas que no es rebi aquest missatge, el transmissor entendre que ha hi hagut una col·lisió i reenviarà el missatge.

<sup>(20)</sup> ACK és l'acrònim de l'expressió anglesa *acknowledgement*.

Per a avaluar les prestacions del protocol ALOHA representarem amb  $\lambda$  el flux de paquets que es volen enviar per segon, paquets/s (aquest terme inclou les retransmissions degudes a col·lisions prèvies), i representarem amb  $T$  la durada d'un paquet en segons. A partir d'aquests dos termes podem definir  $G = \lambda \cdot$



$T$ , el trànsit ofert a la xarxa en paquets per temps de paquet. Assumint que l'estadística d'arribada de paquets (probabilitat que en un cert temps es vulguin enviar un nombre determinat de missatges) segueix un procés de Poisson, la probabilitat que un paquet es pugui enviar amb èxit (sense col·lisió) s'obté calculant la probabilitat que en un cert temps  $2T$  no arribi cap altre paquet (només s'envia el paquet d'interès). El factor de 2 és degut al fet que cal considerar possibles solapaments parcials entre paquets que també donaran lloc a error. Aquesta probabilitat està determinada per l'expressió:

$$P_{No\ col·lisió} = e^{-2T\lambda} = e^{-2G} \quad (8)$$

A partir de l'expressió anterior es pot calcular el nombre de paquets per segon que es podran cursar amb èxit  $\lambda'$ , i el trànsit real que es podrà cursar per la xarxa  $S$ :

$$\begin{aligned} \lambda' &= \lambda \cdot e^{-2G} \\ S &= G \cdot e^{-2G} \end{aligned} \quad (9)$$

Una evolució del protocol *Pure ALOHA* és el protocol *Slotted ALOHA* (o *ALOHA ranurat*). Aquesta variant del protocol aconsegueix doblar el nombre de paquets que es poden enviar amb èxit introduint una mínima coordinació entre usuaris. Requereix un sincronisme de xarxa que ranura el temps en intervals de durada del temps de paquet, i obliga que quan un usuari vol transmetre, en lloc de fer-ho en qualsevol moment hagi d'esperar el principi d'una ranura per a iniciar la transmissió. El principal avantatge en aquest cas és que com que hi ha un mínim sincronisme entre usuaris només es produirà una col·lisió si dos usuaris inicien la transmissió alhora. Així doncs, la probabilitat de no-col·lisió estarà determinada per la probabilitat que en un cert temps  $T$  no arribi cap altre paquet (cal observar que ha desaparegut el factor 2 que apareix en el *Pure ALOHA*):

$$P_{No\ col·lisió} = e^{-T\lambda} = e^{-G} \quad (10)$$

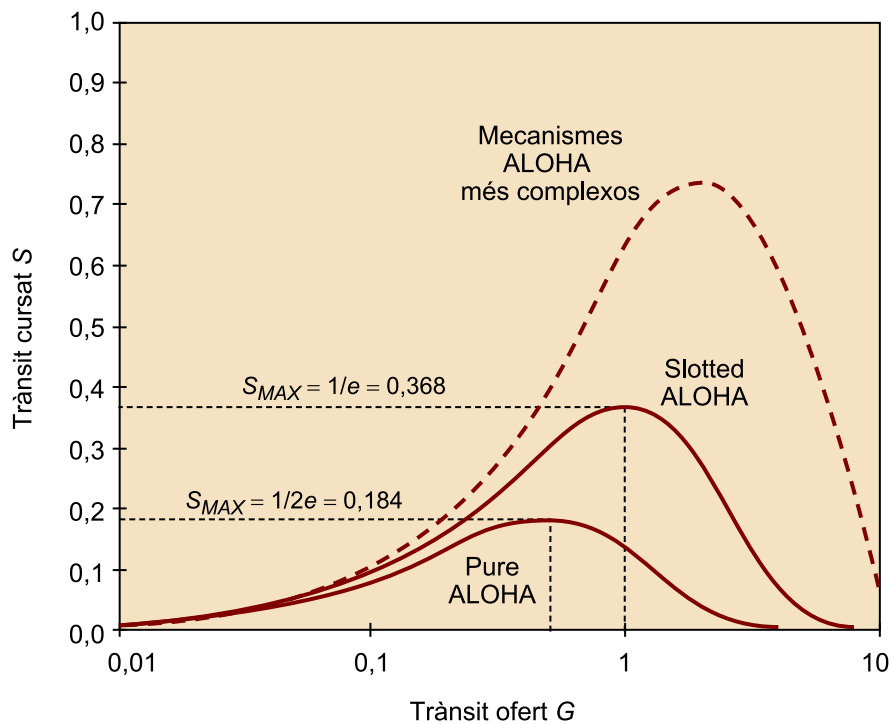
A partir de l'expressió anterior es pot calcular el nombre de paquets per segon que es podran cursar amb èxit  $\lambda'$ , i el trànsit real que es podrà cursar per la xarxa  $S$ :

$$\begin{aligned} \lambda' &= \lambda \cdot e^{-G} \\ S &= G \cdot e^{-G} \end{aligned} \quad (11)$$

La figura 16 il·lustra la relació entre el trànsit ofert en la xarxa  $G$  i el trànsit cursat (amb èxit) per la xarxa  $S$  per als dos protocols ALOHA. Com es pot observar, hi ha un màxim en el trànsit que es pot cursar, que és el doble per al protocol *Slotted ALOHA*. El màxim en el cas de *Pure ALOHA* és produït per a  $G = 0,5$  i és igual a  $S = 1/2e = 0,184$ , mentre que el màxim per a *Slotted ALOHA* es dona per a  $G = 1$  i permet un trànsit de xarxa de  $S = 1/e = 0,368$ . Cal observar que aquests mecanismes només es poden aplicar quan el trànsit

ofert a la xarxa és reduït. Per a valors de trànsit per sobre del llindar el protocol col·lapsa ràpidament, ja que el nombre de col·lisions creix de manera ràpida. Observeu que el trànsit de la xarxa és un paràmetre que depèn tant del nombre de paquets que es volen transmetre com de la durada d'aquests. Així doncs, si el nombre de missatges que es volen enviar és elevat caldrà que els missatges siguin de curta durada, o al contrari, si els missatges són llargs només es podran aplicar aquests mecanismes quan el nombre de paquets per segon sigui reduït.

Figura 16. Trànsit ofert i trànsit cursat en mecanismes basats en ALOHA



Des dels orígens s'han estudiat i desenvolupat altres variants del protocol amb la finalitat de millorar les prestacions i permetre més trànsit de xarxa. Bàsicament totes les tècniques busquen poder transmetre de manera simultània més d'un missatge, fet que redueix el nombre de col·lisions. Algunes tècniques impliquen combinar ALOHA amb tècniques d'espectre eixamplat (per exemple, *Spread ALOHA*), o introduir complexos mecanismes de cancel·lació d'interferències en el receptor per a poder descodificar més d'un missatge simultàniament quan s'ha produït un nombre reduït de col·lisions (per exemple, esquemes SIC<sup>21</sup> o PIC<sup>22</sup>).

<sup>(21)</sup> SIC és la sigla de l'expressió anglesa *successive interference cancellation*.

<sup>(22)</sup> PIC és la sigla de l'expressió anglesa *parallel interference cancellation*.

## 9. Mecanismes d'accés al medi per contesa: CSMA (i variants)

Com s'ha vist anteriorment, els protocols basats en ALOHA només poden assolir taxes de transmissió reduïdes i només es poden implementar en situacions en les quals el trànsit d'entrada és reduït: pocs missatges per segon o longituds de paquet curts. Si es vol incrementar la taxa de transmissió (per exemple, amb *Slotted ALOHA*) cal una sincronització de la xarxa, la qual cosa va en contra de la filosofia d'aquestes tècniques d'accés al medi. Com a alternativa apareixen els mecanismes d'accés al medi basats en sensat de canal, que analitzen l'estat del canal abans de transmetre. Entre els protocols més populars es troba el protocol CSMA<sup>23</sup> i les seves variants, molt estesos en les xarxes d'àrea local.

<sup>(23)</sup>CSMA és la sigla de l'expressió anglesa *carrier sense multiple access*.

En una xarxa en què tots els usuaris tenen capacitat per a escoltar, i en què el retard de propagació és reduït, la probabilitat de col·lisió en les transmissions es pot reduir de manera substancial si a cada usuari se li demana que escolti el canal abans de transmetre per a detectar la presència d'altres usuaris que estan transmetent. Si la xarxa està lliure iniciarà la transmissió, mentre que si la xarxa està ocupada esperarà a iniciar la transmissió més tard. D'aquesta manera només es produirà una col·lisió si dos usuaris detecten el canal lliure i es posen a transmetre alhora. Depenent de la manera de procedir del transmissor es definiran els protocols CSMA no persistent, CSMA 1-persistent o CSMA *p*-persistent.

En el primer cas, si la xarxa està lliure es transmetrà, i si està ocupada, el transmissor esperarà un cert temps aleatori, passat el qual tornarà a iniciar el procediment escoltant de nou el canal. El problema d'aquest mecanisme és que la xarxa pot quedar lliure abans del temps d'espera, i per tant s'incrementa innecessàriament la latència en la comunicació. Com a alternativa, en el cas del protocol *CSMA 1-persistent*, si el canal està lliure es transmetrà, i si està ocupat, el transmissor esperarà que estigui lliure (escoltant contínuament o a intervals de temps molt petits) i iniciarà la transmissió amb probabilitat 1 un cop estigui lliure.

El principal problema d'aquest mecanisme és que es produiran col·lisions si, mentre el canal està ocupat, més d'un usuari vol transmetre i està en espera. Per a evitar aquestes col·lisions, el protocol *CSMA p-persistent* transmet, amb probabilitat  $p < 1$  quan el canal està lliure, i esperarà a fer-ho més tard amb probabilitat  $1 - p$  (quan el canal estigui ocupat esperarà que estigui lliure i procedirà segons s'ha descrit quan el canal està lliure). D'aquesta manera es reduirà la probabilitat que dos usuaris iniciïn la transmissió alhora, i es redueix la probabilitat de col·lisió.

Si el transmissor, a més de tenir la capacitat d'escoltar el canal abans de transmetre, també té les capacitats de detectar col·lisions (escoltant el canal mentre transmet), i d'avortar la transmissió en cas de detectar una col·lisió, es pot fer un ús més eficient del canal i dels recursos d'energia. El fet d'aturar la transmissió quan el que s'envia no podrà ser descodificat pel receptor deixarà abans el canal lliure i permetrà incrementar el flux de dades útils per al canal. Aquest protocol s'anomena CSMA/CD<sup>24</sup> i és utilitzat de manera estàndard en el protocol Ethernet (IEEE 802.3).

<sup>(24)</sup> CSMA/CD és la sigla de l'expressió anglesa *carrier sense multiple access/collision detection*.

Quan per la naturalesa del transmissor no és possible transmetre i escoltar alhora, el mecanisme CSMA/CD no es pot implementar. Tampoc no es pot implementar en xarxes amb nodes ocults, en les quals no podem assegurar que tots els usuaris escolten a tots els usuaris, ja que podria passar que un usuari cregui que la xarxa està lliure quan de fet no ho està. Aquests problemes els trobem, per exemple, en comunicacions sense fil, en què els terminals no tenen capacitat dúplex (transmetre i rebre alhora), i en què podem trobar dos terminals pertanyents a la mateixa xarxa que no es poden veure entre ells si no hi ha cobertura directa entre tots dos. Com a alternativa al mecanisme CSMA/CD apareix el mecanisme CSMA/CA<sup>25</sup>.

<sup>(25)</sup> CSMA/CA és la sigla de l'expressió anglesa *carrier sense multiple access/collision avoidance*.

Entre les solucions d'aquest mecanisme trobem, en primer lloc, la introducció de polítiques d'espera (d'un temps aleatori anomenat *període d'endarreriment*) abans de transmetre a fi de reduir la probabilitat de col·lisions. A més, per a resoldre el problema de nodes ocults també introdueixen mecanismes d'enviament de dos paquets curts, un de sol·licitud (RTS<sup>26</sup>) i l'altre d'acceptació (CTS<sup>27</sup>), entre transmissor i receptor abans d'iniciar l'enviament de dades a fi d'informar al màxim nombre d'usuaris que el canal està ocupat. Aquest mecanisme els trobem, per exemple, en l'estàndard IEEE 802.11 emprat en les xarxes Wi-Fi.

<sup>(26)</sup> RTS és la sigla de l'expressió anglesa *request to send*.

<sup>(27)</sup> CTS és la sigla de l'expressió anglesa *clear to send*.

## Resum

En aquest mòdul hem estat veient diferents mecanismes de multiplexació/acces per a compartir els recursos d'un canal de comunicacions. Com ja es va discutir en la secció de concepte bàsics, no hi ha un mecanisme que sigui millor o preferible davant de la resta i en cada cas caldrà trobar la solució més adequada. A l'hora de determinar quina és la millor tècnica hi ha una sèrie de figures de mèrit per valorar que podran donar suport a la decisió. A continuació enumerem, i resumim breument, alguns dels paràmetres per tenir en compte a l'hora de prendre una decisió sobre la tècnica de multiplexació/acces múltiple més adequada.

1) **Ortogonalitat/MAI.** Com ja es va descriure al principi del mòdul, l'objectiu de qualsevol tècnica de multiplexació o d'accés múltiple és aconseguir l'ortogonalitat entre els senyals que s'envien simultàniament al canal a fi de minimitzar la interferència d'accés múltiple entre usuaris. Com s'ha anat veient, algunes de les tècniques són completament ortogonals o quasiortogonals (TDM/A, FDM/A, Qs-CDM/A); altres presenten un cert grau d'interferència que degradarà les prestacions o obligarà a reduir el nombre total d'usuaris (A-CDMA, SDM/A o PDM/A), i altres presentaran col·lisions entre usuaris que obligaran a retransmetre repetidament els missatges fins que siguin rebuts amb èxit (tècniques basades en contesa).

2) **Throughput/eficiència espectral.** La manera de mesurar objectivament l'ús eficient que es fa dels recursos de comunicacions serà per mitjà de la màxima velocitat de transmissió útil (bits d'informació) que es pot assolir. Com que en alguns casos la comparativa entre tècniques no es farà a igual amplada de banda, la comparativa en termes de velocitat de transmissió no seria justa. En aquest cas serà més just normalitzar el flux d'informació per l'amplada de banda utilitzada i calcular l'eficiència espectral definida en bits/s/Hz.

3) **Latència.** De vegades la latència, o retard en la comunicació, serà una especificació del servei que es vol oferir i, per tant, podrà ser determinant a l'hora de decidir el mecanisme més adequat. Per exemple, si es vol oferir un servei d'enviament de missatges, la latència no serà crítica, mentre que si es vol oferir un servei de videoconferència, el retard en la comunicació serà determinant a l'hora de fixar la qualitat del servei. Una comparació de *throughput* enfront de latència és sovint utilitzada per a comparar diferents tècniques d'accés al medi.

4) **Equitat entre usuaris.** Quan hi ha diversos usuaris que volen accedir al sistema caldrà tenir en compte l'equitat entre els usuaris, i les prestacions en termes de *throughput* o latència. Caldrà vetllar per garantir unes prestacions similars i justes a tots els usuaris. El concepte *just* pot dependre del servei, de l'homogeneïtat de la xarxa i de les característiques de les demandes dels

usuaris. Per exemple, quan hi hagi usuaris amb una demanda de recursos molt superior a la resta, o amb uns requisits de latència molt inferiors, caldrà regular que aquest usuaris no agafin tots els recursos i bloquegin la resta.

**5) Cicle de treball.** Com ja s'ha comentat en presentar la tècnica TDM/A, cal tenir en compte el cicle de treball dels transmissors. En alguns casos el transmissor accedirà al medi de manera continuada en temps, mentre que en altres casos ho farà només en determinats instants de temps. El cicle de treball estarà directament relacionat amb la potència mitjana i la potència instantània del transmissor, que serà important en casos en què el recurs energètic sigui crític (per exemple, terminals mòbils amb bateries).

Al llarg del mòdul s'han classificat els mecanismes de multiplexació/accés múltiple en tres grans grups: mecanismes amb assignació fixa de recursos (FAMA), mecanismes amb assignació dinàmica de recursos (DAMA) i mecanismes basats en contesa. Com s'ha anat discutint en alguns punts, les prestacions o la conveniència dels diferents mecanismes depenen del tipus de trànsit i del nombre d'usuaris. En general, alguns mecanismes resulten més adequats que altres per a certs tipus de trànsits.

Els mecanismes de contesa ofereixen bons resultats quan s'han d'enviar missatges curts de manera esporàdica i que no tenen exigències de retard en la comunicació. Quan els usuaris el que volen és enviar missatges llargs, hem vist que, a causa de l'increment del trànsit, els mecanismes de contesa no són els més apropiats. En aquest segon cas resultarà més interessant recórrer a mecanismes DAMA, que estan lliures de col·lisió. En els mecanismes DAMA hi ha dos temes que cal resoldre. El primer és com cal establir el canal de reserva, utilitzat pels usuaris per a sol·licitar accés al medi i per a assignar els recursos als usuaris. El segon és determinar quines polítiques haurà de seguir el centre de control a l'hora d'assignar els recursos per tal de garantir l'equitat entre els usuaris. Del segon tema, que es resol mitjançant complexos algoritmes d'optimització, no ens hem ocupat en aquest mòdul didàctic, mentre que del primer tema només direm que el canal de reserva, com ja es pot intuir, s'haurà d'organitzar segons algun mecanisme d'accés múltiple que permeti als usuaris accedir-hi per demanar recursos quan tinguin necessitat de transmetre. L'accés al canal de reserva es pot resoldre mitjançant mecanismes d'accés per contesa o mecanismes d'assignació fixa.

Quan el nombre d'usuaris és reduït, es pot dissenyar un mecanisme TDMA, per exemple, amb assignació fixa de recursos, en el qual cada usuari disposi de manera periòdica d'un breu interval de temps per a enviar uns pocs bits demanant accés a la xarxa (en mecanismes senzills un sol bit posat a '0' o a '1' seria suficient per a senyalitzar si hi ha paquets pendents d'enviar; en un mecanisme una mica més complex es podria algun bit més amb informació del volum de dades que es vol enviar per a poder sol·licitar més o menys recursos). Quan el nombre d'usuaris és elevat resultaria ineficient tenir refixat per a cada

usuari un interval de temps per a demanar accés a la xarxa. Com a alternativa, en aquests casos, serà preferible disposar d'un mecanisme de contesa per a resoldre aquest tema.

A continuació teniu, a mode de resum final per a aquest mòdul, una classificació dels diferents mecanismes presentats en funció de les característiques del servei:

**1) Cas 1: volum de trànsit fix.** Mecanismes d'assignació fixa FAMA (per exemple, TDMA, FDMA, MF-TDMA o CDMA).

**2) Cas 2: trànsit a ràfegues.** Tècniques de contesa o DAMA, depenent de la durada dels paquets que s'han d'enviar. El compromís entre la latència pròpia dels mecanismes DAMA (la necessitat d'establir protocols addicionals per a sol·licitar/assignar recursos incrementa el retard en la comunicació) i la reducció del *throughput* dels mecanismes de contesa a causa de les col·lisions (les col·lisions obliguen a retransmetre paquets amb la conseqüent pèrdua d'eficiència espectral i la reducció de la velocitat efectiva de transmissió) condicionaran la decisió del mecanisme més adequat.

**a) Amb paquets curts i pocs usuaris (trànsit reduït):**

- Mecanismes de contesa.
- Mecanisme basats en ALOHA o CSMA, que permeten optimitzar el compromís *throughput*/latència.
- Mecanismes més avançats que permeten incrementar la velocitat de transmissió.

**b) Amb paquets llargs: mecanismes DAMA.**

- Si el nombre d'usuaris és reduït el canal de reserva per a DAMA pot ser utilitzant un canal reservat per usuari.
- Si el nombre d'usuaris és elevat el canal de reserva per a DAMA és més eficient si es fa mitjançant un canal de contesa.





## Activitats

1. Suposeu un sistema de multiplexació per divisió en freqüència en el qual un total de dotze usuaris comparteixen el recurs de comunicacions. Cada un dels dotze usuaris transmet a una taxa  $R$  de 500 kbps i utilitzen un sistema de modulació que requereix una amplada de banda de 200 kHz per a transmetre aquest flux d'informació. Els usuaris es multiplexen en freqüència deixant bandes de guarda de 50 kHz. La freqüència portadora de l'usuari situat en la banda de menys freqüència és de 40 MHz.

a) Creeu una fórmula que permeti determinar la freqüència portadora de cada usuari en funció del nombre d'usuaris ( $N = 1, \dots, 12$ ).

b) Quina és l'amplada de banda total que ocupa el múltiplex?

c) Si s'utilitzés tota aquesta amplada de banda amb el mateix tipus de modulació que utilitza cada un dels usuaris, quin seria el flux total d'informació que podem transmetre?

d) Compareu el flux obtingut en l'apartat c amb el que realment estan enviant els dotze usuaris. A què es deuen les diferències?

2. Suposeu que utilitzem el múltiplex primari del problema anterior per a formar un grup secundari, que consta de 7 grups primaris. Suposeu que la freqüència més baixa en la qual es transmet la informació d'un usuari és de 100 MHz i que les bandes de guarda entre dos grups primaris continuen essent de 50 kHz.

a) Quants usuaris comparteixen el grup secundari?

b) Determineu una fórmula per a la freqüència més baixa de cada un dels grups primaris.

c) Quina és l'amplada de banda de tot el múltiplex de grup secundari?

d) Quina seria la taxa de bits que es podria transmetre en aquesta amplada de banda utilitzant una modulació que tingüés la mateixa eficiència que la que utilitzen cada un dels usuaris?

3. Un grup de vint usuaris comparteix un múltiplex per divisió en el temps. Els usuaris han de transmetre la informació a una taxa de 250 kbps. Es construeix una trama formada per 24 paquets, tots amb la mateixa durada, i en la qual tots els bits tenen la mateixa velocitat. La durada d'una trama és de 0,1 ms. El primer paquet de la trama conté una paraula única per a facilitar el sincronisme. El segon paquet conté informació útil perquè l'exploador del servei pugui senyalitzar els usuaris del múltiplex. Posteriorment vénen els 20 intervals d'usuari. En cada un d'aquests paquets s'utilitzen 5 bits per a indicar el número de canal. Finalment, s'utilitzen 2 paquets per a enviar codis de paritat que permetin detectar errors.

a) Quants bits formen una trama?

b) Quina és la taxa de bit de la trama (incloent-hi, és clar, tots els bits de sincronisme, codis de protecció, senyalització, etc.)?

c) Compareu aquesta taxa de dades amb la de la informació útil que realment s'està enviant. Determineu quin percentatge dels bits són deguts a sincronització, detecció d'errors, senyalització, etc.

d) Com es modifiquen els apartats anteriors si els paquets se separen per un temps de guarda de 100 ns?

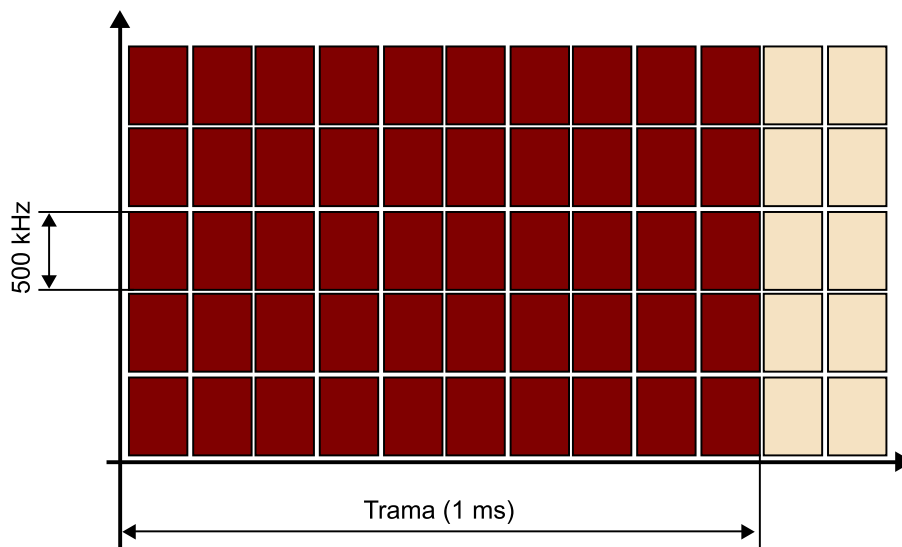
4. Suposeu un sistema de telefonia cel·lular en el qual hi pot haver un total de 100 usuaris multiplexats en una cèl·lula, utilitzant un sistema d'accés per multiplexació en temps i freqüència mixt. Per a augmentar la capacitat del sistema, es proposa instal·lar antenes que tenen un feix principal amb un angle d'aproximadament  $45^\circ$ . Estimeu el nombre màxim d'usuaris que es podrien tenir en aquesta cèl·lula suposant que les condicions d'amplada de feix de l'antena són ideals.

5. En la figura següent es mostra un esquema d'accés múltiple mixt, que utilitza tant la multiplexació en freqüència com la multiplexació en temps. En l'eix temporal la trama està dividida en 10 segments, cada un dels quals té una durada de 0,095 ms, amb un interval de guarda de 0,005 ms, la qual cosa dona lloc a una durada de trama d'1 ms. La part freqüencial està dividida en 5 bandes, cada una amb una amplada de banda de 500 kHz. S'utilitza una modulació que permet ubicar una taxa de bits d'1 MHz en l'amplada de banda de 500 kHz. Els elements que formen aquesta estructura en què es divideix l'eix temps-freqüència es denominen *blocs*.

Mitjançant aquest sistema es vol ubicar un total de 45 usuaris més 5 canals d'enginyeria, que s'utilitzaran per a propòsits d'identificació de continguts, correcció d'errors, gestió del múltiplex, etc. Els 5 canals d'enginyeria es transmeten durant el primer fragment temporal de la trama. A més, en cada un dels canals es transmeten dades de capçalera i de correcció d'errors per a cada canal. El nombre total de bits assignats a capçalera i a correcció de canal per cada bloc és de 128.

- a) Determineu la taxa total de bits que es transmet en aquest múltiplex (incloent-hi tots els bits, és a dir, els d'informació original dels usuaris, els de sincronisme, detecció d'errors, senyalització, etc.).
- b) Determineu la taxa de bits útils que està a disposició dels usuaris. Quina és la taxa de bits màxima que pot transmetre un usuari? Supposeu que tots els usuaris es reparteixen el recurs equitativament.

Distribució de temps/freqüència



6. Un sistema de multiplexació vol transmetre simultàniament tres senyals d'informació  $d_1 = \{+1, -1, +1, -1, \dots\}$ ,  $d_2 = \{+1, -1, -1, -1, \dots\}$  i  $d_3 = \{+1, +1, +1, +1, \dots\}$ . Per a fer-ho utilitza una tècnica CDMA amb les seqüències de codi  $c_1 = \{+1, -1, -1, +1, +1, +1, -1\}$ ,  $c_2 = \{-1, +1, +1, -1, +1, +1, -1\}$  i  $c_3 = \{+1, +1, -1, -1, +1, -1, +1\}$ .

- a) Trobeu la forma d'ona del senyal transmès.
- b) Descodifiqueu el senyal per a l'usuari 1 i comproveu que es pot descodificar correctament.
- c) A partir del resultat de l'apartat b, raoneu si hi ha interferència d'accés múltiple (MAI). Confirmeu el resultat comprovant l'ortogonalitat dels tres codis.

7. Un sistema de comunicacions vol gestionar la demanda d'accés al sistema dels seus usuaris mitjançant un sistema ALOHA ranurat (*slotted ALOHA*). Per a fer-ho, quan un sistema vol transmetre envia un paquet d'informació de 50 bits que sol·licita accés mitjançant una xarxa que funciona a 100 kbps. Si els usuaris envien un paquet de sol·licitud d'accés cada 10 segons ( $l = 0,1$ ), calculeu el nombre d'usuaris màxim que pot hi haver en el sistema perquè el mecanisme d'accés mitjançant ALOHA ranurat treballi en l'òptim de les seves prestacions ( $G = 1$ ).

## Bibliografia

### Bibliografia bàsica

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

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

**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.

**Jamalipour, A.; Wada, T.; Yamazato, T.** (2005, febrer). "A tutorial on multiple access technologies for beyond 3g mobile networks". *IEEE Communications Magazine*.

**Peyravi, H.** (1999, març). "Medium access control protocols performance in satellite communications". *IEEE Communications Magazine*.

