



**Universitat Ramon Llull**

## TESI DOCTORAL

Títol Comunicacions avançades d'HF entre la Base Antàrtica Espanyola i l'Observatori de l'Ebre: caracterització de canal i transmissió de dades

Realitzada per Carles Vilella i Parra

en el Centre ETSEEI La Salle

i en el Departament Comunicacions i Teoria del Senyal

Dirigida per Joan Lluís Pijoan i Vidal

**Comunicacions avançades d'HF entre la Base  
Antàrtica Espanyola i l'Observatori de l'Ebre:  
caracterització de canal i transmissió de dades**

Realitzada per: Carles Vilella i Parra

Director de la tesi: Joan Lluís Pijoan i Vidal



Departament de Comunicacions i Teoria del Senyal  
Enginyeria i Arquitectura La Salle  
Universitat Ramon Llull

Barcelona 2007

Carles Vilella i Parra

Comunicacions avançades d'HF entre la Base Antàrtica Espanyola i l'Observatori de l'Ebre: caracterització de canal i transmissió de dades

Grup de Recerca en Comunicacions i Electromagnetisme (GRECO)  
Departament de Comunicacions i Teoria del Senyal  
Enginyeria i Arquitectura La Salle  
Universitat Ramon Llull  
Passeig Bonanova, 8  
08022 Barcelona, Espanya

Telèfon: + 34 93 290 2426  
E-mail: carlesv@salle.url.edu

# Abstract

En els darrers quinze anys la velocitat de bit dels sistemes de comunicació ionosfèrica s'ha incrementat significativament, passant dels 75 bps als 14400 bps en un ample de banda de 3 KHz. Les millores experimentades en el modelatge i simulació de canal, el desenvolupament dels sistemes ALE i l'aplicació de tècniques digitals (*software radio*, modulacions de banda ampla, etc.) són, entre altres, alguns dels motius que han permès aquest increment en les prestacions dels equips, fent-los aptes per comunicacions de llarga distància amb requeriments de velocitat de bit moderada.

En particular, la propagació ionosfèrica és una tècnica especialment interessant per enllaços des de l'Antàrtida, on la comunicació amb satèl·lits geostacionaris no és sempre possible.

El Departament de Comunicacions i Teoria del Senyal de l'Escola d'Enginyeria La Salle (Universitat Ramon Llull) està involucrat, juntament amb l'Observatori de L'Ebre, en un projecte de recerca que té per objectiu l'estudi de l'enllaç ionosfèric que s'estableix entre la Base Antàrtica Espanyola i Roquetes. L'enllaç, que té una longitud de més de 12700 quilòmetres, ha de servir per transmetre les dades procedents d'un sensor geomagnètic situat a la Base, cap a l'Observatori.

Aquesta tesi estudia diversos aspectes d'aquest projecte, principalment pel que fa a la caracterització de canal i al disseny de la capa física adaptada per transmissió eficient de dades.

En referència a la caracterització de canal es mostren els resultats d'una campanya de 60 dies de sondeig duta a terme durant l'estiu austral 2006/07 en la que s'han realitzat proves de banda estreta i banda ampla per tal d'obtenir, entre altres, la disponibilitat de l'enllaç, relació senyal a soroll i dispersió temporal i freqüencial.

En l'àmbit de la transmissió de dades es proposa, justifica i verifica experimentalment una part d'una capa física basada en espectre eixamplat per seqüència directa especialment adaptada a enllaços a llocs remots: (i) Sense atribució de freqüències; (ii) Amb potència de transmissió relativament baixa; (iii) Infraestructura de radiació limitada. La proposta contempla el funcionament amb relacions SNR negatives, dispersió temporal i freqüencial moderada, robustesa a la interferència i baixa densitat espectral de potència.

**Paraules clau:** comunicació ionosfèrica, sondeig i caracterització de canal, espectre eixamplat, senyalització de forma d'ona



# Presentació

En aquesta presentació es descriu el context d'aquest treball en l'àmbit d'estudi i dins el grup de recerca en el que s'ha realitzat així com els projectes d'investigació amb els quals està relacionada. Seguidament s'enumeren els objectius de la tesi i s'introdueix l'organització de la memòria.

Aquesta tesi s'emmarca en l'àmbit de les comunicacions ionosfèriques. Des que Marconi obtingué les primeres proves empíriques de l'existència de la ionosfera a principis del segle XX la ionosfera ha estat un mitjà de comunicació de llarga distància vastament usat en els àmbits diplomàtic, militar, afeccionat, accés a llocs remots, etc. Amb la introducció dels satèl·lits la rellevància de la comunicació ionosfèrica experimentà un retrocés, però recentment amb l'adveniment de la tecnologia digital aplicada a la ràdio s'observa un interès creixent del sector empresarial i científic en el desenvolupament d'aquest tipus d'enllaços.

Aquest treball ha estat desenvolupat en el Grup de Recerca en Electromagnetisme i Comunicacions (GRECO) del Departament de Comunicacions i Teoria del Senyal (DCTS) d'Enginyeria La Salle. El GRECO ha tingut una activitat íntimament lligada a la propagació ionosfèrica. La investigació duta a terme durant diversos projectes (enumerats més endavant), des de 1997 fins a l'actualitat, ha estat centrada en el coneixement del canal ionosfèric (sondeig i modelat) i en l'aplicació de tècniques digitals avançades a aquest tipus d'enllaços (estimació de canal, espectre eixamplat, sistemes multiusuari, modulacions multiportadora OFDM, etc).

A continuació es descriuen breument el projectes científics més rellevants duts a terme pel GRECO en l'àmbit de les comunicacions ionosfèriques durant els darrers deu anys:

- TIC97/0787-C02: “Enlace Ionosférico de Comunicaciones con espectro ensanchado INTA (El Arenosillo) - La Salle (Universidad Ramon Llull)” i la subsegüent acció especial CICYT TIC 99/1284-E. Els objectius principals d'aquest projecte foren l'establiment d'un enllaç símplex a la banda d'HF, per rebot ionosfèric, entre l'estació de sondeig de l'INTA (El Arenosillo - Huelva) i La Salle (Barcelona), usant tècniques d'espectre eixamplat i *hardware* DSP.
- REN2003-08376-C02-01: “Caracterización y modelado del canal ionosférico en la Antártida: Comunicaciones HF avanzadas” i la subsegüent acció especial CGL2005-24213-E. Els objectius d'aquest projecte han estat: (i) Sondeig i caracterització del canal de comunicacions ionosfèric que s'estableix entre la Base Antàrtica Espanyola (BAE) i l'Observatori de l'Ebre; (ii) Disseny d'un nivell físic adequat per transmissió de dades en aquest enllaç; (iii) Implantació del sistema; (iv) Anàlisi del comportament ionosfèric a la regió Antàrtica i establiment de relacions amb l'activitat geomagnètica.

- CGL2006-12437-C02-01: “Estudio de la variabilidad del canal de comunicaciones ionosférico y optimización de la transmisión de datos en HF entre Isla Livingston y el Observatorio del Ebro”. Els objectius d’aquest projecte són: (i) Manteniment de la sèrie històrica de sondeig del canal ionosfèric entre la Base Antàrtica Espanyola (BAE) i l’Observatori de l’Ebre; (ii) Caracterització i posta en funcionament d’un sistema de transmissió de dades de baix consum i alta velocitat a la banda d’HF per l’estació geomagnètica; (iii) Actualització i millora de l’estació geomagnètica a la BAE; (iv) Aplicació de tècniques d’aprenentatge artificial per a la detecció de fenòmens magnètics.

Els dos darrers projectes proposen, entre altres aspectes, l’estudi des del punt de vista de la radiocomunicació de l’enllaç ionosfèric de 12700 Km. de longitud que s’estableix entre la Base Antàrtica Espanyola i l’Observatori de l’Ebre amb l’objectiu final d’establir una comunicació digital de dades que s’usarà com a alternativa al satèl·lit. Les dades a transmetre són les procedents d’un sensor geomagnètic que opera de forma contínua els 365 dies de l’any.

En el marc d’aquests darrers projectes de recerca, els objectius concrets d’aquesta tesi són:

- Sondeig i caracterització del canal ionosfèric que s’estableix entre la Base Antàrtica Espanyola i l’Observatori de l’Ebre. La caracterització inclou els aspectes següents:
  - Una mesura de la disponibilitat de l’enllaç.
  - Una mesura de la dispersió temporal.
  - Una mesura de la dispersió freqüencial.
  - Una mesura de la SNR , obtinguda amb el mateix equipament (inclosos els elements radiants) usat per establir l’enllaç de dades.
  - Una estimació de les freqüències que maximitzen la disponibilitat a cada hora.

La caracterització del canal es realitza amb un doble propòsit:

- Científic. No hem trobat precedents de mesures sistemàtiques sobre canals ionosfèrics amb característiques similars, que simultàniament siguin de molt llarga distància (12700 Km.) i travessin l’equador i quatre fusos horaris.
- Tècnic. El disseny del nivell físic de la comunicació requereix la caracterització del canal en termes de dispersió, soroll i interferència. El nivell d’enllaç necessita, com a mínim, informació respecte a les millors freqüències i hores per establir-lo. Per tant, convé sondejar el canal per obtenir una estimació d’aquests paràmetres.
- Disseny d’un nivell físic basat en espectre eixamplat per seqüència directa adequat per a la transmissió de dades unidireccionals en l’enllaç entre la Base Antàrtica Espanyola i l’Observatori de l’Ebre donades les limitacions que s’estableixen tant pel que fa al consum de potència com a les antenes. Concretament s’estudiaran els aspectes següents:
  - Generals: (i) Freqüència de xip; (ii) Modulació.
  - Relacionats amb la senyalització DSSS: (i) Nombre d’usuaris; (ii) Guany de procés; (iii) Nombre de bits per seqüència; (iv) Tipus d’eixamplament: *biphase* o *quadrifase*.

La memòria s'organitza en dues parts. En la primera part s'introdueixen breument algunes característiques rellevants de la ionosfera pel seu ús en comunicacions (capítol 1), un estat de l'art de les comunicacions ionosfèriques (capítol 2) i una descripció general de la realització del projecte REN2003-08376-C02-01 (capítol 3). Aquesta primera part té per objectiu contextualitzar la tesi en l'entorn i àmbit en els que s'ha desenvolupat.

La segona part conté les contribucions de la tesi i està dividida en dos capítols: en el capítol 4 es mostren els resultats de l'estudi de l'enllaç ionosfèric entre la Base Antàrtica Espanyola i l'Observatori de l'Ebre, i al capítol 5 es proposa i verifica experimentalment una part d'un nivell físic per transmissió de dades en aquest enllaç usant tècniques d'espectre eixamplat. Ambdós capítols estan organitzats per tal que sigui possible llegir-los de forma independent: contenen els objectius, metodologia, base teòrica, algorismes i resultats corresponents.





# Índex

Abstract	i
Presentació	iii
Continguts	vii
Acrònims	xi
<b>I Introducció</b>	<b>1</b>
<b>1 La ionosfera</b>	<b>3</b>
1.1 Introducció	3
1.2 La ionosfera	3
1.2.1 El Sol en repòs ( <i>The quiet Sun</i> )	4
1.2.2 El medi interplanetari	5
1.2.3 El camp magnètic terrestre	5
1.3 Morfologia	5
1.3.1 Variabilitat geogràfica, intradiària i estacional	6
1.4 Pertorbacions	7
1.5 Fonaments de propagació ionosfèrica	8
1.5.1 Introducció	9
1.5.2 La ionosfera en absència de camp magnètic terrestre	11
1.5.3 Efecte del camp magnètic terrestre	12
Referències	12
<b>2 Estat de l'art de les comunicacions ionosfèriques</b>	<b>15</b>
2.1 La ionosfera com a canal de comunicació	16
2.1.1 Caracterització del canal	16
2.1.2 Estudi del canal	19
2.1.3 Sondeig oblic	21
2.1.4 Modelat	23
2.1.5 Predicció	24
2.1.6 Simulació	25
2.1.7 Conclusions	25
2.2 Disseny i implementació de transceptors	26
2.2.1 Software Radio	27

2.2.2	Tècniques digitals . . . . .	28
2.3	Estandarització . . . . .	30
2.3.1	ALE . . . . .	31
2.4	Aplicacions . . . . .	32
	Referències . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Enllaç d'HF entre l'Antàrtida i l'Observatori de l'Ebre</b>	<b>41</b>
3.1	Introducció . . . . .	41
3.2	Consideracions generals . . . . .	42
3.2.1	Estudi de viabilitat . . . . .	44
3.3	Disseny del transceptor . . . . .	47
3.3.1	Disseny de la plataforma digital . . . . .	49
3.3.2	Disseny de la part analògica . . . . .	50
3.3.3	Disseny del <i>software</i> de l'emissor . . . . .	53
3.3.4	Disseny del <i>software</i> del receptor . . . . .	54
3.3.5	Control automàtic de guany . . . . .	55
	Referències . . . . .	55
<b>II</b>	<b>Contribucions</b>	<b>57</b>
<b>4</b>	<b>Estudi d'un enllaç ionosfèric entre la Base Antàrtica Espanyola i l'Observatori de l'Ebre</b>	<b>59</b>
4.1	Introducció . . . . .	59
4.2	Objectius . . . . .	60
4.3	Metodologia . . . . .	61
4.4	Algunes dades d'interès sobre l'enllaç . . . . .	62
4.5	Fonaments teòrics . . . . .	64
4.5.1	Introducció . . . . .	64
4.5.2	Introducció a la caracterització de canal de banda ampla . . . . .	66
4.5.3	Introducció al sondeig de canal de banda ampla . . . . .	69
4.6	Estructura del sondeig . . . . .	71
4.7	Descripció dels experiments (sondeig) . . . . .	73
4.8	Algorismes de processament del senyal de sondeig . . . . .	74
4.8.1	Banda estreta . . . . .	74
4.8.2	Banda ampla . . . . .	78
4.9	Disponibilitat. Definicions i notació . . . . .	86
4.10	Resultats . . . . .	88
4.10.1	Disponibilitat . . . . .	89
4.10.2	Influència del receptor en la mesura de disponibilitat . . . . .	93
4.10.3	Relació senyal soroll . . . . .	102
4.10.4	Freqüències amb màxima disponibilitat a cada hora . . . . .	106
4.10.5	Dispersió temporal . . . . .	110
4.10.6	Dispersió freqüencial . . . . .	112
4.11	Conclusions . . . . .	124
4.11.1	Banda estreta . . . . .	124
4.11.2	Banda ampla . . . . .	126

4.11.3	Taula resum . . . . .	127
	Referències . . . . .	129
<b>5</b>	<b>Transmissió de dades usant tècniques d'espectre eixamplat</b>	<b>131</b>
5.1	Introducció . . . . .	131
5.1.1	Marc del treball . . . . .	131
5.1.2	Objectius . . . . .	131
5.1.3	Plantejament del treball . . . . .	132
5.1.4	Organització del capítol . . . . .	136
5.2	Característiques i aplicació de DSSS . . . . .	136
5.2.1	Robustesa contra la interferència . . . . .	137
5.2.2	Robustesa al multicamí . . . . .	139
5.2.3	Transmissió amb baixa densitat espectral de potència . . . . .	140
5.2.4	Flexibilitat respecte a l'eficiència espectral . . . . .	141
5.2.5	Disseny del sistema basat en DSSS . . . . .	154
5.2.6	Codificació de canal . . . . .	156
5.2.7	Inconvenients de l'espectre eixamplat . . . . .	156
5.3	Experimentació . . . . .	158
5.3.1	Objectius concrets . . . . .	158
5.3.2	Metodologia . . . . .	160
5.3.3	Banc de proves . . . . .	160
5.3.4	Descripció dels experiments . . . . .	168
5.3.5	Experimentació . . . . .	170
5.4	Conclusions . . . . .	178
	Referències . . . . .	180
	<b>Conclusions i línies de futur</b>	<b>183</b>



# Acrònims

ALE:	<i>Automatic Link Establishment</i>
ALM:	<i>Automatic Link Maintenance</i>
ARCS:	<i>Automatic Radio Control System</i>
ARQ:	<i>Automatic Repeat-reQuest</i>
ASIC:	<i>Application Specific Integrated Circuit</i>
BAE:	<i>Base Antártica Española</i>
BER:	<i>Bit Error Rate</i>
BPF:	<i>Band Pass Filter</i>
BPSK:	<i>Bi-Phase Shift Keying</i>
CCIR:	<i>Comité Consultiu Internacional de Radiocomunicacions</i>
CDMA:	<i>Code Division Multiple Access</i>
CNAF:	<i>Cuadro Nacional de Atribución de frecuencias</i>
CIC:	<i>Cascaded Integrator-Comb</i>
CPLD:	<i>Complex Programmable Logic Device</i>
DDC:	<i>Digital Down Converter</i>
DFE:	<i>Decision Feedback Equalizer</i>
DRM:	<i>Digital Radio Mondiale</i>
DSP:	<i>Digital Signal Processor</i>
DUC:	<i>Digital Up Converter</i>
ETSI:	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FFT:	<i>Fast Fourier Transform</i>
FIR:	<i>Finite Impulse Response</i>
FHSS:	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
FOT:	<i>Frecuency of Optimum Traffic</i>

FPGA:	<i>Field Programmable Gate Array</i>
FSR:	<i>Full Scale Range</i>
HAL:	<i>Hardware Abstraction Layer</i>
HMTP:	<i>Hypertext Mail Transport Protocol</i>
ITU:	<i>International Telecommunication Union</i>
GFLOPS:	<i>Giga-Floating-Point Operations per Second</i>
GPS:	<i>Global Positioning System</i>
GRECO:	Grup de Recerca en Electromagnetisme i Comunicacions
HF:	<i>High Frequency (3-30 MHz)</i>
HMTF:	<i>HF Mail Transfer Protocol</i>
ISI:	<i>Inter-Symbol Interference</i>
KSPS:	<i>Kilo-Samples Per Second</i>
LNA:	<i>Low Noise Amplifier</i>
LPF:	<i>Low Pass Filter</i>
LQA:	<i>Link Quality Analysis</i>
LSB:	<i>Least Significant Bit</i>
LUF:	<i>Lowest Usable Frequency</i>
MAC:	<i>Multiply and Accumulate</i>
MD:	Marge Dinàmic
MLSE:	<i>Minimum Least Square Error</i>
MMHS:	<i>Military Message Handling System</i>
MSPS:	<i>Mega-Samples Per Second</i>
MUF:	<i>Maximum Usable Frequency</i>
NTIA:	<i>National Telecommunications and Information Administration</i>
OFDM:	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
PLC:	<i>Power Line Communications</i>
QAM:	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QN:	<i>Quantization Noise</i>
QPSK:	<i>Quadri-Phase Shift Keying</i>
ROE:	<i>Relación de Onda Estacionaria</i>

SAW:	<i>Surface Acoustic Wave</i>
SMTP:	<i>Simple Mail Transfer Protocol</i>
STANAG:	<i>STANdarization AGreement</i>
SNR:	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SSN:	<i>SunSpot Number</i>
UTC:	<i>Universal Time, Coordinated</i>
VGA:	<i>Variable Gain Amplifier</i>
VHDL:	<i>Very high speed integrated circuit Hardware Description Language</i>
WSSUS:	<i>Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering</i>





# Part I

## Introducció



# Capítol 1

## La ionosfera

### 1.1 Introducció

Des del punt de vista de la radiocomunicació, la ionosfera és la part de l'atmosfera amb suficient ionització per tal d'afectar a la propagació d'ones electromagnètiques [2]. Tot i que les primeres conjectures sobre l'existència de capes electrificades a l'atmosfera es remunta al segle XIX [4] no fou fins a principis del segle XX a ran dels primers experiments de comunicació transatlàntica duts a terme per Marconi el 1901 que s'obtingueren proves empíriques de l'existència de la ionosfera. Foren Kennely [6] i Heaviside [3] qui, independentment, s'adonaren que un enllaç de tan llarga distància com el que havia demostrat Marconi no era possible per visió directa entre emissor i receptor degut a la curvatura de la Terra i que, per tant, les ones electromagnètiques havien d'haver estat reflectides per una capa ionitzada de l'atmosfera, que posteriorment Watson-Watt batejà amb el nom d'ionosfera.

El capítol s'organitza de la forma següent. A l'apartat 1.2 es revisa el procés d'ionització que l'atmosfera experimenta per acció de la radiació solar per sobre dels 50 Km d'alçada, i la influència del camp magnètic terrestre i del medi interplanetari en les seves característiques. La morfologia de la ionosfera, estratificada en capes anomenades D, E i F, s'explica a l'apartat 1.3. La radiació solar i el camp geomagnètic no afecten de la mateixa forma a totes les latituds terrestres ni amb independència de l'hora del dia, estació de l'any o cicle solar. Les variacions espacials i temporals així produïdes de les propietats de les capes de la ionosfera es tracten a 1.3.1. A més d'aquestes variacions, la ionosfera es veu sotmesa a pertorbacions que modifiquen el seu comportament. Aquestes pertorbacions, que tenen l'origen en alteracions en la radiació solar o en el camp magnètic terrestre normals, s'expliquen a l'apartat 1.4. Finalment, a l'apartat 1.5 s'introdueixen alguns paràmetres que caracteritzen la ionosfera pel seu ús en radiocomunicacions: màxima freqüència usable, absorció, etc. Aquest darrer apartat s'ampliarà al capítol 2, on s'aprofundeix en l'estudi d'aquesta part de l'atmosfera com a canal de comunicació de llarga distància.

### 1.2 La ionosfera

L'atmosfera terrestre està formada per diferents gasos, la composició i densitat dels quals varia en funció de diferents paràmetres com ara l'alçada i el temps.

Durant el dia la radiació solar incident és suficientment intensa com per a modificar l'estructura molecular d'algunes capes de l'atmosfera [5]. Concretament alguns electrons poden guanyar suficient energia com per desfer el lligam que els manté units al nucli molecular, esdevenint així lliures. El gas resultant, format en part per electrons carregats negativament i molècules positivament (ionitzades), rep el nom de plasma. El fenomen de la ionització dóna nom a la capa de l'atmosfera anomenada ionosfera.

Aquest procés ara descrit no és l'únic efecte de la radiació solar sobre l'estructura de l'atmosfera. L'energia procedent del sol és també responsable del trencament d'algunes molècules di-atòmiques en els seus àtoms components en un fenomen anomenat fotodissociació. Per exemple, la radiació de longitud d'ona compresa entre 102.7 i 175.9 nm pot fotodissociar molècules  $O_2$  en àtoms  $O$ , que a la vegada poden ser ionitzats formant ions  $O^+$  i electrons lliures.

En alçada la incidència dels efectes d'aquests processos varia de forma significativa. Per exemple, pel que fa a la fotodissociació de la molècula  $O_2$ , es pot establir que la concentració d'àtoms d'oxigen comença a ser rellevant a partir dels 90 quilòmetres; a 125 quilòmetres la concentració de molècules i d'àtoms d'oxigen és similar, i per sobre d'aquesta altitud la concentració d'àtoms  $O$  és superior a la de molècules  $O_2$ .

El plasma és un gas dinàmic, en el sentit que la seva estructura canvia contínuament degut als processos d'ionització i fotodissociació per una banda i recombinacions per una altra. Durant la nit, la dràstica disminució de la radiació solar provoca que les recombinacions predominin, de manera que la zona de l'atmosfera significativament ionitzada es redueix. Així, se sol considerar que la ionosfera comença al voltant de 50 quilòmetres d'altitud durant el dia, mentre que per la nit aquest llindar inferior puja fins als 100 quilòmetres. En general, es defineix la ionosfera com aquella capa de l'atmosfera amb una concentració d'ions per centímetre cúbic superior als 100. La menor concentració es produeix a les capes baixes, arribant a valors superiors a  $10^6$  ions per  $cm^3$  en alçades superiors als 300 quilòmetres, i decreixent per altures encara majors.

### 1.2.1 El Sol en repòs (*The quiet Sun*)

La radiació solar és el fenomen desencadenant de la formació de la ionosfera (sobretot a latituds mitges). No és d'estranyar, doncs, que les variacions en el comportament de l'astre influèncin directament sobre les característiques d'aquesta capa de l'atmosfera. En aquest apartat descriurem un fenomen cíclic vinculat a l'estructura del Sol que afecta de forma determinant en la constitució de la ionosfera: les taques solars.

El Sol és una estrella de 696.000 quilòmetres de radi (més de 100 vegades major al de la Terra) situada aproximadament a 150 milions de quilòmetres de distància de la Terra. El flux d'energia solar visible que arriba a la Terra canvia molt poc de dia a dia, o d'any en any (menys del 0.5 %). La ionització de l'atmosfera, però, no depèn tant de la radiació visible com d'aquella que es produeix a altres longituds d'ona (raigs X i ultraviolats). S'observa que aquesta radiació ionitzant pot variar en diversos ordres de magnituds en funció, principalment, d'una paràmetre anomenat SSN (*SunSpot Number*: nombre de taques solars).

Les taques solars (*sunspots* en anglès) són zones sobre la superfície de l'estrella, fosques a la vista, que estan a una temperatura d'uns 3000 °K (aproximadament la meitat de la temperatura de la resta de la superfície). Les taques solars apareixen i desapareixen. El seu temps de vida pot variar des d'hores fins a mesos. El SSN compta el nombre de grups de

taques sobre la superfície solar. Els observatoris corresponents en donen mesures diàries i mitjanes mensuals i anuals [10]. El SSN té una periodicitat mitjana de 10.7 anys, tot i que s'han observat cicles mínims d'uns 7 anys i màxims propers als 17. La magnitud del SSN varia des de pràcticament zero fins a gairebé dos cents. El valor del SSN afecta sensiblement a l'emissió de radiacions ionitzants per part del Sol i, per tant, a les propietats de la ionosfera.

## 1.2.2 El medi interplanetari

El medi interplanetari és l'espai comprés entre el Sol i la Terra. En aquest medi hi tenen lloc fenòmens que afecten a la formació de la ionosfera. En destacarem un: el vent solar.

El vent solar és el principal mitjà pel qual les característiques de l'activitat solar (fenòmens de radiació al marge) es transmeten cap a la Terra. Està constituït per plasma que s'ha separat del Sol seguint línies de camp magnètic que se n'escapen. El vent solar s'expandeix formant trajectòries en forma d'espitals d'Arquímedes (degut a la rotació del Sol), allunyant-se de l'astre a velocitats de l'ordre de 400 quilòmetres per segon, i amb densitats típiques de 5 protons per centímetre cúbic (tot i que variacions de densitat d'un ordre de magnitud poden ocórrer en períodes de minuts o hores) [2]. Quan arriba a la Terra el vent solar interacciona amb el camp magnètic terrestre, deformant-lo i confinant-lo en un entorn limitat del planeta. Aquesta interacció provoca que el vent solar, indirectament a través de la modificació de les característiques del camp magnètic terrestre, afecti a les propietats de la ionosfera pel que fa a la propagació d'ones electromagnètiques en ella.

## 1.2.3 El camp magnètic terrestre

De forma molt simplificada, el camp magnètic terrestre correspon al d'una esfera uniformement magnetitzada en la direcció de l'eix magnètic, que està uns  $11^\circ$  desplaçat respecte l'eix de rotació de la Terra. En realitat, però, el camp magnètic terrestre presenta variacions intradiàries, estacionals i, tal i com s'ha vist a 1.2.2, amb l'activitat solar.

El camp magnètic terrestre interacciona amb el gas ionitzat (plasma) que forma la ionosfera donant lloc al magnetoplasma. Els electrons i ions que formen part del magnetoplasma es veuen sotmesos a la força de Lorentz que provoca en ells una oscil·lació a una freqüència característica anomenada girofreqüència. La girofreqüència d'un ió és inversament proporcional a la seva massa; pels protons a la ionosfera és de l'ordre de centenars d'Hz [2] i conseqüentment influeix poc a la propagació d'ones a freqüències de l'ordre de MHz; pels electrons, però, la girofreqüència cau entre 1 i 2 MHz i, per tant, afecta significativament a la propagació electromagnètica a la banda d'HF.

## 1.3 Morfologia

La composició de la ionosfera, és a dir, els gasos i molècules que la formen, varia en alçada (a partir de senzilles consideracions físiques Chapman [1] obtingué un model que li va permetre predir la densitat electrònica en funció de l'alçada). Les partícules més pesades es troben amb major freqüència en zones més properes a la Terra en comparació amb les més lleugeres,

que són més abundants a major distància del planeta. Com que cada tipus de partícula té unes característiques d'ionització i temps de recombinació diferents, no és d'estranyar que les característiques de la ionosfera no siguin homogènies. Concretament, la ionosfera se sol dividir en diferents capes en alçada en funció dels processos físics que hi dominen.

Les regions més importants de la ionosfera reben el nom D, E, F1 i F2 [9]. Cronològicament, la primera capa descoberta fou batejada amb el nom de E, ja que Sir Edward Appleton anomenava amb aquesta lletra el vector elèctric de l'ona reflectida. Posteriorment es descobrí que durant el dia la zona ionitzada s'estenia a menors alçades. Per raons de continuïtat s'anomenà aquesta capa D. Igualment s'anomena capa F a la zona amb suficient densitat d'ionització situada per sobre de la capa E. Posteriorment la capa F es subdividí en la F1 i la F2 degut a les diferents característiques que mostraven segons la latitud o hora d'observació. Les alçades i densitats d'ionització de cadascuna de les capes varien significativament segons la latitud i l'hora. Típicament per latituds mitjanes i durant el dia,

- La capa D se sol considerar situada entre els 50 i els 90 quilòmetres, amb densitats d'ionització entre 100 i 10.000 electrons per centímetre cúbic.
- La capa E s'estén a continuació fins als 150 quilòmetres aproximadament, amb una densitat d'electrons de l'ordre de  $10^5 \text{ cm}^{-3}$ .
- La capa F1 des dels 150 als 200 quilòmetres, amb densitats creixents fins a  $10^6 \text{ cm}^{-3}$ .
- La capa F2 s'assoleixen els màxims d'ionització amb valors que superen els  $10^6$  electrons per centímetre cúbic en alçades compreses entre els 200 i 500 quilòmetres, decreixent per altures majors fins a arribar a valors inferiors als  $10^2 \text{ cm}^{-3}$  a altures properes als 1000 quilòmetres.

Tot i que la classificació i nomenclatura explicades són les més comunament trobades a la literatura, observacions posteriors han posat de relleu fenòmens que han dut a precisar la morfologia de la ionosfera. Així de vegades es distingeix la capa C (corresponent a la part baixa de la capa D), es subdivideix la E en E1 i E2 i s'afegeixen capes de transició entre la E i la F (F0.5) i entre la F1 i F2 (F1.5).

### 1.3.1 Variabilitat geogràfica, intradiària i estacional

La intensitat de la radiació solar, causa de la formació de la ionosfera, varia durant el dia, desapareixent durant la nit, i afecta de forma diferent en funció de la latitud considerada. A més el SSN és un factor que influeix de forma determinant en la distribució electrònica a la ionosfera. Tot plegat provoca fluctuacions intradiàries, estacionals i geogràfiques en la morfologia de la ionosfera, variants a llarg termini amb un període mitjà aproximat d'onze anys. A continuació destaquem algunes d'aquestes inhomogeneïtats:

- La capa D s'observa a totes les latituds durant el dia, desapareixent ràpidament a la posta del Sol. Els màxims d'ionització s'assoleixen quan el Sol està més alt, i a l'estiu més que a l'hivern.
- La capa E no acaba de desaparèixer per la nit, tot i que la seva densitat electrònica sol disminuir en dos ordres de magnitud.
- La capa F assoleix el màxim d'ionització poc després de migdia, decaient lentament a partir de la posta del Sol fins just abans de l'alba.

- La capa F durant la nit sol estar situada a altures majors a l'estiu que a l'hivern, especialment a latituds properes a l'equador.
- En general, la màxima densitat electrònica de la capa F és major a l'estiu que a l'hivern, excepte a latituds mitges on ocorre justament al contrari (aquest darrer fenomen rep el nom d'anomalia estacional)
- La subdivisió de la capa F en les subcapes F1 i F2 es dona sobretot a latituds mitges i a l'estiu:
  - La capa F1 s'observa durant el dia, només a latituds mitges (i no sempre). És més pronunciada a l'estiu i per SSN baixos i, per contra, no apareix mai durant els hiverns de SSN alt.
  - La capa F2 s'observa a totes les latituds, a latituds mitges no desapareix durant la nit i a la zona equatorial és més gruixuda.

A més de l'acció del Sol, també l'acció del camp magnètic terrestre influeix en la variabilitat geogràfica de la ionosfera. Per exemple a latituds altes (per sobre de  $60^\circ$ ) la forma del camp geomagnètic indueix una major influència de la magnetosfera i altres partícules procedents del Sol sobre la ionosfera, afectant sensiblement la seva estructura i dinàmica.

## 1.4 Pertorbacions

La ionosfera tal i com ha estat descrita en els apartats anteriors es correspon amb un medi induït per la radiació solar, alterat pel medi interplanetari i el camp geomagnètic, amb unes determinades característiques particulars en cada zona geogràfica i amb una variació intra-diària i estacional ben establertes. Aquestes característiques experimenten, a més, canvis lents, com per exemple els deguts a la variació amb el SSN (amb un cicle associat d'onze anys). Quan els únics efectes rellevants en la formació i propietats de la ionosfera són els ara enumerats, es diu que la ionosfera presenta un comportament benigne.

En aquest apartat descriurem altres fenòmens, sovint imprevedibles, que no s'engloben entre els esmentats i que quan apareixen influeixen significativament en les característiques de la ionosfera, pertorbant-la. En destacarem set: les flamarades solars (*solar flares*), les tempestes magnètiques (*magnetic storms*), l'expulsió de massa de la corona solar (*coronal mass ejection*), l'aparició esporàdica de la capa E (*sporadic-E*), la dispersió anòmala associada a les capes E i F (*spread-E*, *spread-F*), les pertorbacions ionosfèriques en moviment (*Travelling ionospheric disturbances*) i l'expulsió de protons solars (*Solar proton event*):

- *Solar flares*. Les flamarades solars [7] són explosions que ocorren al Sol degudes a l'alliberament d'energia magnètica generada a l'atmosfera de l'estrella. Són de naturalesa similar al vent solar, però repentines i de més intensitat. Des de la Terra es poden percebre mitjançant telescopis com un increment ràpid i intens de la intensitat lumínica en una zona de la superfície del Sol. Les flamarades solars solen produir-se a prop de taques solars, sobretot durant els màxims del cicle de SSN i amb una durada que sol estar compresa entre minuts i hores. Afecten significativament a la propagació ràdio a la banda d'HF ja que:



- Poden provocar un increment de la densitat electrònica en un ordre de magnitud a la capa D.
  - Contenen radiació pràcticament en tot l'espectre radioelèctric, des dels pocs MHz fins a diversos THz.
- *Coronal Mass Ejection*. Aquest fenomen consisteix en l'expulsió de la superfície del Sol de grans bombolles de gas i partícules carregades durant un període de temps que pot arribar a hores. Acostuma a produir-se simultàniament a les flamarades solars, i igual que aquestes, la seva freqüència d'aparició varia amb el cicle de SSN. En arribar a la Terra interaccionen amb l'atmosfera i el camp magnètic terrestre donant lloc a un fenomen visible anomenat aurora. Les de més intensitat poden arribar a causar danys en satèl·lits.
  - *Magnetic storms*. Una tempesta magnètica és una variació temporal ràpida del camp magnètic terrestre. Acostuma a estar causada per l'increment de partícules que arriben procedents del Sol que, un cop en les proximitats de la Terra, generen corrents addicionals que contribueixen de forma anòmala al camp magnètic terrestre. L'arribada extraordinària de partícules procedents del Sol es pot deure, per exemple, a flamarades solars o a l'expulsió de massa de la corona solar.
  - *Sporadic-E*. A la capa E de la ionosfera apareixen transitòriament i de forma localitzada zones de densitat electrònica relativa elevada que afecten de forma important a la propagació electromagnètica, permetent enllaços que d'altra manera no serien possibles. No hi ha unanimitat en les causes d'aquest fenomen, tot i que se solen relacionar amb tormentes meteorològiques, ionització provocada per l'entrada de meteòrits a l'atmosfera, i activitat solar i geomagnètica. La capa E-espòradica pot aparèixer tant de dia com de nit, és més freqüent a l'estiu que a l'hivern i es produeix més sovint en latituds properes a l'equador.
  - *Spread-E, spread-F*. La densitat electrònica normalment varia de forma suau en alçada. De vegades, però, apareixen zones d'ionització irregular que donen lloc als fenòmens *spread-E* si ocorren a la capa E i *spread-F* si ho fan a la capa F.  
A la zona equatorial són molt comuns les zones d'*spread-F* en moviment d'est a oest, seguint la posta de Sol. A latituds mitges el fenomen ocorre principalment de nit.
  - *Travelling ionospheric disturbances*. Són també irregularitats en la densitat electrònica de la ionosfera, que viatgen des de les zones polars cap a l'equador. Sovint apareixen simultàniament a les flamarades solars o a les tempestes magnètiques.
  - *Solar Proton Event (SPE)*. De vegades el Sol expulsa grans quantitats de protons que en arribar a la Terra són desplaçats cap als pols degut al camp magnètic terrestre. Un cop als pols entren a l'atmosfera provocant un increment substancial d'ionització a la capa D.

## 1.5 Fonaments de propagació ionosfèrica

La ionosfera, sota determinades condicions, actua com un mirall per les ones electromagnètiques, permetent establir comunicacions de llarga distància entre llocs sense visió directa. Aquest

fenomen fou el que permeté a Marconi a principis del segle XX establir un enllaç de comunicació transatlàntic. Precisament fou a ran d'aquest experiment que aparegueren diverses conjectures sobre l'existència d'una capa de l'atmosfera carregada elèctricament, conjectures que esdevingueren fermes anys més tard. Avançat el segle XX la ionosfera adquirí molta importància en les radiocomunicacions, ja que permetia establir enllaços de llarga distància (fins i tot al voltant de la Terra) usant equipament relativament barat i amb un cost d'explotació gratuït. Posteriorment amb l'adveniment dels satèl·lits aquest tipus de comunicacions quedaren relegades a un segon pla, ja que el nou sistema permetia, entre altres, una molt major velocitat de dades. Així i tot, diversos àmbits entre els que destaquen el militar, diplomàtic, aeronàutic, marina i aficionat continuaren usant la comunicació per propagació ionosfèrica. Durant els darrers anys l'aplicació de noves tècniques entre les que destaquen el processat digital del senyal i l'establiment automàtic de trucada (ALE) han obert noves expectatives pel que fa a la millora de la disponibilitat i velocitat assolibles, provocant un resorgiment d'aquesta tecnologia i un interès creixent per part de la comunitat científica.

En aquest apartat es descriuen els fonaments de la propagació per ona ionosfèrica. En primer lloc es considera la ionosfera com un medi caracteritzat per la presència d'una determinada densitat electrònica i s'estudien els efectes a que es veu sotmesa una ona electromagnètica en passar a través d'ella. A continuació es completa aquesta anàlisi afegint-hi els efectes del camp magnètic terrestre.

### 1.5.1 Introducció

Com hem vist, la ionosfera és un medi inhomogeni i anisotròpic, amb una determinada densitat electrònica ( $N_p(h)$ ) que depèn de l'alçada ( $h$ ). Els paràmetres més importants que influeixen en una ona electromagnètica incidint en aquest medi són la variació de l'índex de refracció i la interacció energètica entre l'ona i les partícules carregades del medi.

En tota l'explicació suposarem un model de Terra plana. A més, d'acord amb la teoria de rajos, considerarem una ona electromagnètica com un raig, perpendicular al front d'ona, marcant la direcció de propagació de la mateixa.

#### L'índex de refracció en absència de camp magnètic terrestre

Menyspreant l'efecte del camp magnètic terrestre i en absència de col·lisions l'índex de refracció ( $n(h)$ ) d'una capa de la ionosfera situada a una alçada  $h$  ve determinat per [8]:

$$n(h) = \sqrt{1 - \left(\frac{f_p(h)}{f}\right)^2} \quad (1.1)$$

on,

$f_p(h)$  és la freqüència pròpia del plasma. Està relacionada amb la densitat electrònica del medi  $N_p(h)$  (en  $cm^{-3}$ ) segons la fórmula:

$$f_p(h) = 9000\sqrt{N_p(h)} \quad (1.2)$$

$f$  és la freqüència de l'ona electromagnètica incident en el medi

Definim  $\theta_0$  com l'angle d'incidència d'una ona electromagnètica a un canvi de medi, mesurat respecte a la perpendicular al pla que separa els dos medis. L'angle d'incidència és, doncs, el complementari de l'angle d'elevació mesurat respecte a la superfície terrestre.

Per incidència vertical ( $\theta_0 = 0$ ), es produirà reflexió total quan l'índex de refracció sigui imaginari ( $f < f_p(h)$ ), mentre que l'ona atravesarà la capa quan  $f > f_p(h)$ . Així, es defineix  $f_p(h)$  com la freqüència crítica del medi a una alçada  $h$ . La freqüència crítica marca el límit entre reflexió i transmissió per incidència vertical.

Per incidència oblíqua ( $\theta_0 > 0$ ) s'aplica la llei de Snell:

$$n_0 \sin(\theta_0) = n_1 \sin(\theta_1) \quad (1.3)$$

on,

$n_0$  és l'índex de refracció del medi origen

$\theta_0$  és l'angle d'incidència

$n_1$  és l'índex de refracció del medi destí

$\theta_1$  és l'angle refractat

En general, partint de les capes més baixes de la ionosfera en incrementar l'alçada la densitat electrònica augmenta, i per tant l'índex de refracció (1.1) disminueix si mantenim constant la freqüència de l'ona electromagnètica incident ( $f$ ). Si  $n_0 > n_1$ , per (1.3) caldrà que  $\sin(\theta_0) < \sin(\theta_1)$ , i per tant el raig es corbarà en direcció cap a la Terra.

Aplicant l'equació (1.3) successivament a capes de la ionosfera situades a alçades majors trobem que:

$$n_0 \sin(\theta_0) = n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) = \dots = n_k \sin(\theta_k) \quad (1.4)$$

Si l'ona incident parteix d'un medi amb índex de refracció unitari (capes baixes de l'atmosfera properes a la superfície terrestre), la condició de reflexió per incidència oblíqua i, per tant, retorn de l'ona electromagnètica cap a la Terra força a que per alguna alçada l'angle de refracció  $\theta_k$  sigui  $90^\circ$ . Per tant, aplicant (1.4):

$$\sin(\theta_0) = n_k \rightarrow \sin(\theta_0) = \sqrt{1 - \left(\frac{f_p(h)}{f}\right)^2} \quad (1.5)$$

on, recordem,  $f_p(h)$  és la freqüència crítica per incidència vertical a l'alçada  $h$ , que a partir d'ara anomenarem  $f_v$ .

Aïllant  $f$  de (1.5) s'obté la relació entre la freqüència crítica de reflexió per incidència vertical ( $f_v$ ) a una alçada  $h$  i la màxima freqüència per incidència oblíqua ( $f_{ob}$ ) que es reflexaria a aquella alçada, fixat l'angle d'incidència. L'equació resultant rep el nom de *Llei de la secant*:

$$f_{ob} = f_v \sec(\theta_0) \quad (1.6)$$

Considerem a continuació un determinat enllaç i preguntem-nos respecte la màxima freqüència oblíqua que es pot usar per tal d'establir-lo. L'equació (1.6) té un grau de llibertat: l'alçada a la qual es pot produir la reflexió. Fixem-nos que a major alçada, major és la densitat electrònica i, per tant,  $f_v$  és més gran. Simultàniament, però, l'angle d'incidència disminueix i, per tant, el terme  $\sec(\theta_0)$  disminueix. En conseqüència tots dos paràmetres presenten variacions oposades respecte a l'alçada. Es pot demostrar [8] que existeix una altura òptima per

la qual el producte expressat per (1.6) és màxim. La freqüència oblíqua resultant s'anomena  $f_{MUF}$  (*Maximum Usable Frequency*), i correspon a la màxima freqüència que es pot usar per tal d'establir un determinat enllaç.

La densitat electrònica no és uniforme per tota la ionosfera terrestre ni independent del temps, sinó que  $N_p$  depèn de quatre variables:  $N_p(x, y, h, t)$ . A la pràctica, per una determinada posició  $(x_0, y_0)$  s'obté en diferents instants temporals  $t_0$  per sondeig vertical ionosfèric, de forma que la dependència  $N_p(x_0, y_0, h, t_0)$  es dibuixa en una gràfica anomenada ionograma. L'aplicació de la Llei de la secant sobre un ionograma, amb  $f_{ob}$  com a paràmetre permet obtenir la  $f_{MUF}$  per aquell instant de temps i per aquella zona de la ionosfera.

La màxima freqüència usable fixa el límit superior del rang de freqüències que es poden triar per establir un enllaç. Les mesures mostren que la  $f_{MUF}$  està pràcticament sempre inclosa dins de la banda d'HF (de 3 a 30 MHz). És per aquest motiu que sovint s'associen les comunicacions per propagació ionosfèrica amb les comunicacions a la banda d'HF.

## Intercanvi d'energia entre l'ona i el medi

En general la presència de càrregues elèctriques (electrons i ions positius) en la trajectòria d'una ona electromagnètica provoca una transferència energètica d'aquesta cap a aquelles, que es tradueix en una oscil·lació de les partícules a la freqüència de l'ona ( $f$ ). Donat que la massa dels electrons és molt menor que la dels ions, es pot considerar que les úniques càrregues que es mouen són els electrons. Llavors aquesta oscil·lació dels electrons té dos efectes: part de l'energia es reradia i part es dissipa en forma de calor degut a les col·lisions. Per densitats electròniques baixes l'efecte de dissipació de l'energia degut a les col·lisions sol ser el predominant, mentre que per densitats altes la major part de l'energia traspasada a les partícules carregades es reradia.

### 1.5.2 La ionosfera en absència de camp magnètic terrestre

A l'apartat anterior s'han descrit els fenòmens de refracció, absorció i reradiació que ocorren en un medi ionitzat quan hi incideix una ona electromagnètica. En aquest apartat aplicarem aquests conceptes a la morfologia concreta de la ionosfera, en absència de camp magnètic terrestre, indicant en cada cas els efectes predominants.

Suposem, doncs, que una antena emet una ona amb un angle d'elevació  $\frac{\pi}{2} - \theta_0$ , amb  $\theta_0$  mesurat respecte a la perpendicular a la superfície terrestre. Mentre aquesta ona viatja per la zona de l'atmosfera més propera a la Terra, elèctricament neutra, l'únic efecte a què es veu sotmesa és al de dispersió de la potència en un factor  $R^{-2}$  (on  $R$  és la distància recorreguda). Cap als 50 Km. d'alçada aproximadament, però, comença la capa D de la ionosfera, caracteritzada per una densitat electrònica baixa, a partir dels 100 electrons per  $cm^{-3}$ . En les condicions de baixa ionització de la capa D s'observa que el canvi de l'índex de refracció del medi és poc rellevant ( $n \rightarrow 1$ ), i que l'efecte predominant derivat de l'oscil·lació de les partícules carregades és el de dissipació de l'energia per col·lisió dels electrons amb una majoria de partícules neutres presents en el medi. Tot plegat es tradueix en una curvatura inapreciable del raig però un increment substancial de l'atenuació de l'ona electromagnètica, proporcional a la radiació solar (per tant, major a migdia i per SSN alt). La combinació d'aquests dos efectes rep el nom de *nondeviative absorption*, i és característica dels medis ionitzats amb baixa densitat electrònica.

L'atenuació introduïda per la capa D provoca que les comunicacions ionosfèriques siguin difícils durant el dia. Per això mateix durant la nit, en absència d'aquesta capa (veure 1.3.1), és quan més proliferen els enllaços que usen aquesta tecnologia. A més, aquesta atenuació és major com menor és la freqüència de l'ona electromagnètica. Això comporta que:

- L'atenuació de la capa D sigui el factor que més influeix en el paràmetre  $f_{LUF}$  (*Lowest Usable Frequency*), que correspon a la mínima freqüència a la qual es pot establir un determinat enllaç.
- Per tal de maximitzar la relació SNR en recepció convé usar la màxima freqüència possible (propera a la  $f_{MUF}$ ). La  $f_{FOT}$  (*Frequency of Optimum Traffic*), per exemple, se sol calcular com el 85 % de la  $f_{MUF}$  mitjana mensual. Correspon a una freqüència suficientment propera a la  $f_{MUF}$  per tal que l'atenuació sigui mínima, però alhora raonablement llunyana per tal de fer front a les variacions instantànies de la  $f_{MUF}$  respecte a la predicció mensual.

L'atenuació normal associada a la capa D serà molt major durant els *solar flares* i, si la comunicació atravesa els pols, degut a l'efecte de *polar cap absorption* conseqüència dels *solar proton events*.

En augmentar la distància a la Terra, la ionosfera esdevé més densa en partícules carregades. Se sol considerar que a partir dels 120 quilòmetres aproximadament la densitat electrònica és suficient com per a que la refracció introduïda pel medi sigui rellevant i l'efecte predominant degut a la interacció energètica entre ona i partícules sigui el de reradiació. Tots dos efectes conjuntament reben el nom de *deviative absorption*, caracteritzat per una desviació significativa de la trajectòria del raig juntament amb una absorció baixa associada a un predomini de l'efecte de reradiació.

A mesura que augmenta l'alçada, la densitat electrònica s'incrementa suaument fins a assolir el màxim a la capa F2. Donades les característiques de la transmissió ( $f, \theta_0$ ), si es compleix (1.5) per alguna alçada, es produirà una reflexió cap a Terra; en cas contrari, l'ona electromagnètica atravesarà la ionosfera. Recordem, però, que l'alçada normal de reflexió que correspondria en una situació d'ionosfera benigna pot variar degut als efectes de les pertorbacions (per exemple, l'*sporadic-E*).

### 1.5.3 Efecte del camp magnètic terrestre

El camp magnètic terrestre converteix la ionosfera en un medi anisòtrop [2], provocant la divisió de l'ona electromagnètica incident en dues ones: una polaritzada a esquerres respecte al camp magnètic, anomenada ordinària, i una altra polaritzada a dretes, anomenada extraordinària. Algunes conseqüències rellevants d'aquest efecte són: (i) Les dues ones viatgen a través de trajectòries diferents i es refracten a alçades també diferents. Per tant, arriben al receptor separades en temps, contribuint així al *multipath spread* del canal; (ii) La *nondeviative absorption* que experimenta l'ona extraordinària és major que la de l'ona ordinària.

# Bibliografía

- [1] S. Chapman, “The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating earth,” *Proceedings of the Physical Society*, vol. 43, no. 1, pp. 26–45, Jan 1931.
- [2] K. Davies, *Ionospheric radio*. Peter Peregrinus, 1996.
- [3] O. Heaviside, *Encyclopedia Britannica (10th edition)*, vol. 33, p. 213, 1902.
- [4] R. Hunsucker and J. Hargreaves, *The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation*. Cambridge University Press, 2003.
- [5] E. E. Johnson, R. I. Desourdis, G. Earle, J. C. Ostergaard, and S. Cook, *Advanced high-frequency radio communications*. Artech House Telecommunications Library, 1997.
- [6] A. E. Kennely, *Elect. World and Eng.*, vol. 15, p. 473, 1902.
- [7] “Solar flare theory web pages,” Laboratory for Astronomy and Solar Physics, Mar 2006. [Online]. Available: <http://hesperia.gsfc.nasa.gov/sftheory/index.htm>
- [8] J. M. H. Rábanos, *Transmisión por radio*. Centro de Estudios Ramón Areces, 1998.
- [9] R. Silberstein, “The origin of the current nomenclature of the ionospheric layers,” *J. Atmos. Terrest. Phys.*, vol. 13, 1959.
- [10] “International Sunspot Number,” Sunspot Index Data Center, Mar 2006. [Online]. Available: <http://sidc.oma.be>



# Capítol 2

## Estat de l'art de les comunicacions ionosfèriques

En aquest capítol es descriu l'estat de l'art de les comunicacions ionosfèriques. Ja des de ben aviat la recerca en aquest àmbit es dividí en dues línies, sovint amb punts en comú. Per una banda la científica, on la ionosfera és l'objecte final de les investigacions. Els processos químics que intervenen en la formació d'aquesta capa i la influència que el Sol i el camp magnètic terrestre hi tenen són alguns dels conceptes sota estudi. Per una altra banda, els enginyers de comunicacions estaven més interessats en la influència de la ionosfera sobre la propagació d'ones electromagnètiques a la banda d'HF. En aquest cas paràmetres com ara les millors freqüències i hores a usar per un determinat enllaç, o bé les característiques dels transceptors per tal d'optimitzar la disponibilitat i prestacions de les comunicacions són alguns dels conceptes estudiats en aquest àmbit. En aquest capítol ens centrarem sobretot en aquest segon grup d'investigacions.

El capítol està organitzat de la forma següent. L'obtenció de dades referents al comportament de la ionosfera és el punt de partida de l'estudi d'aquesta capa de l'atmosfera com a medi per a la propagació d'ones electromagnètiques. A l'apartat 2.1 s'expliquen els nous requeriments sorgits durant els darrers anys pel que fa al sondeig de canal, associats a la necessitat d'ocupar amples de banda majors per satisfer la creixent demanda de velocitat de dades. També s'explica com a partir de les dades de sondeig s'han elaborat models de canal cada cop més complexos, usats per predir els millors paràmetres a l'hora d'establir una comunicació i per simular els efectes de la ionosfera en laboratori i poder així testejar els equips i els algorismes. Seguidament es fa èmfasi en els nous avanços en l'àmbit del disseny d'equips transceptors i mòdems d'HF. A l'apartat 2.2 es revisen conceptes com ara el *Software Radio* aplicat a l'HF, així com les experiències més recents en la utilització de modulacions digitals avançades com ara CDMA i OFDM que, juntament amb l'aplicació de tècniques adaptatives, estan permetent millorar significativament les prestacions dels equips.

L'aparició dels primers mòdems, desenvolupats de forma independent pels fabricants, dificultà la interoperabilitat entre equips, fet que posà de relleu la necessitat d'estandarització dels protocols. A partir d'aquí el tràfic de dades s'incrementà, només frenat per la dificultat en l'establiment eficient dels enllaços, tasca encara en mans dels operadors. Aquests eren qui aglutinaven l'experiència d'anys pel que fa al coneixement de les millors freqüències i hores per establir un enllaç. Per superar aquest inconvenient es desenvolupà una tecnologia que té per objecte l'establiment automàtic de la comunicació (ALE, de l'anglès *Automatic*



*Link Establishment*) que comporta una millora en l'eficiència d'ús de l'espectre. Tot plegat s'explica a l'apartat 2.3.

L'increment de la velocitat de dades i qualitat de servei en les comunicacions d'HF han obert les portes a noves aplicacions que es revisen a l'apartat 2.4. Així, a més de l'ús que tradicionalment s'ha fet de la comunicació ionosfèrica (militar, aficionat, marina, ...) recentment s'estan introduint conceptes com ara les xarxes d'HF, els serveis de correu electrònic i internet, etc.

## 2.1 La ionosfera com a canal de comunicació

A continuació s'enumeren i expliquen breument els aspectes més rellevants que fan referència a l'estudi de la ionosfera com a medi de comunicació per transmissió de dades digitals. Els apartats 2.1.1 i 2.1.2 introdueixen, respectivament: (i) Els paràmetres que caracteritzen qualsevol canal de comunicació, i la ionosfera en particular; (ii) Les aproximacions a l'estudi d'aquest canal: sondeig, modelat, predicció i simulació. Des de 2.1.3 fins a 2.1.6 s'aprofundeix en aquests darrers quatre conceptes.

### 2.1.1 Caracterització del canal

Des del punt de vista de la radiocomunicació, la ionosfera és un canal que es pot caracteritzar en funció de la dispersió temporal, la dispersió freqüencial, el soroll, la interferència i la disponibilitat. A continuació revisem cadascun d'aquests aspectes.

#### Dispersió temporal

La dispersió temporal ( $T_m$ ) és una mesura de l'eixamplament total que un pols experimenta en viatjar a través del medi. Concretament correspon a l'interval de retards pel qual la funció d'autocorrelació de la resposta impulsional del canal és diferent de zero [72] o, a la pràctica, és superior a un determinat lllindar. Si l'ample de banda del senyal transmès  $B$  és significativament menor que l'invers de la dispersió temporal, el senyal veurà un canal pla en el domini freqüencial; en cas contrari el canal es comportarà selectivament en freqüència, fet que temporalment es manifesta en forma d'interferència intersimbòlica (ISI).

En caracteritzar la ionosfera [17] és convenient distingir dues causes de dispersió temporal:

- *Multipath spread*. En un enllaç ionosfèric entre l'emissor i el receptor es poden establir diverses trajectòries (*paths*) de comunicació (anomenades modes) degut, entre altres, a que:
  - Un senyal incidint obliquament a la ionosfera pot ser refractat a més d'una capa. Els diferents rajos, havent recorregut distàncies diferents, arribaran al receptor en instants diferents, introduint dispersió temporal.
  - En presència de camp magnètic terrestre, les components ordinària i extraordinària d'una ona incidint a la ionosfera es propaguen a velocitats diferents i segueixen trajectòries diferents arribant, per tant, en instants diferents al receptor.

- *Delay spread* dins de cada *path*. L'equació (1.1) ens diu que la ionosfera és un medi dispersiu, amb un índex de refracció diferent per cada freqüència. Quan el senyal transmès té un ample de banda suficientment gran les diferents components freqüencials es propaguen a velocitats i a través de trajectòries apreciablement diferents. Llavors, en recepció s'observen diferents rèpliques del pols transmès (degut al *multipath*), on cada rèplica ha estat temporalment eixamplada degut a la dispersió del medi. Aquest darrer eixamplament rep el nom de *delay spread* associat a cada *path*. A més de l'índex de refracció dispersiu, l'*spread-F* també pot ser causa de *delay spread*.

Sovint utilitzarem ambdós termes per referir-nos, indistintament, a l'eixamplament temporal introduït pel canal.

## Dispersió freqüencial

La dispersió freqüencial (*doppler spread* i *doppler shift*) és una mesura de la variabilitat temporal ràpida del canal. Si admetem que la resposta impulsional del canal varia en el temps, el *doppler spread* ( $B_d$ ) correspon a l'interval de freqüències pel qual la transformada de Fourier respecte al temps de la funció d'autocorrelació de la resposta impulsional del canal és diferent de zero (o, a la pràctica, supera un determinat llindar). L'invers de  $B_d$  és una mesura de l'estacionarietat del canal que rep el nom de temps de coherència  $(\Delta_t)_c$ .

En el canal ionosfèric el *doppler spread* té les causes següents:

- Variacions en l'absorció. Solen ser variacions relativament lentes, amb cicles que poden arribar fins als deu minuts.
- Canvis en les longituds de les trajectòries de les diferents components del senyal, deguts potser a moviments de capes o variacions en les densitats electròniques.
- Canvis de polarització deguts, per exemple, a la rotació de Faraday.
- El fenomen d'*spread-F*.

Per altra banda, el *doppler shift* és una mesura del desplaçament de la freqüència rebuda respecte a la freqüència transmesa. En la ionosfera una possible causa de *doppler shift* és el moviment de les zones amb densitat electrònica irregular (*spread-F*) a l'equador, que pot arribar a centenars de quilòmetres per hora.

## Soroll

Les prestacions d'un sistema de comunicacions vénen limitades per la màxima SNR que es pot obtenir. A la banda d'HF hi influeixen diferents tipus de sorolls [50]:

- El soroll tèrmic, generat per l'agitació natural dels electrons a una determinada temperatura, de potència  $KT_0B$ , essent  $K$  la constant de Boltzman,  $T_0$  la temperatura de soroll (normalment considerada 290°K) i  $B$  l'ample de banda del receptor. En general, el soroll tèrmic no és el que limita les prestacions d'un sistema d'HF.
- El soroll galàctic, procedent de l'espai. És major a freqüències menors, i resulta rellevant especialment quan el receptor està situat en zones rurals molt tranquil·les i l'enllaç s'estableix a la banda alta d'HF.

- El soroll atmosfèric, causat principalment pels llamps associats a les tempestes tropicals que es propaguen a través de la ionosfera, afectant a vastes zones de la Terra. Es manifesta en forma de ràfegues curtes que ocorren aleatòriament en el temps però de forma recurrent durant períodes d'aproximadament una hora, i simultàniament a diverses regions del Planeta. És el soroll que limita en zones rurals, durant les estacions tropicals plujoses i, sobretot, quan l'enllaç s'estableix per sota de 20 MHz.
- El soroll produït per l'home, procedent de màquines, línies d'alta tensió, etc. Decreix en augmentar la freqüència, i sol ser molt dependent de la zona. Concretament, en entorns urbans i industrials és el soroll que més importància té.

Les característiques i influència dels diferents tipus de soroll en funció de la freqüència es poden consultar a la recomanació ITU-R P.372 [48].

## Interferència

La interferència es correspon amb als senyals d'altres usuaris que impedeixen o dificulten l'establiment d'un enllaç propi o bé en degraden les prestacions. Les causes principals de l'abundància d'interferència a la banda d'HF són:

- Sovint el nombre de canals disponibles a cada país és petit en comparació amb la necessitat de comunicació que hi existeix, havent-se de reutilitzar causant interferència.
- Donat que a la banda d'HF hi ha cobertura mundial, els usuaris de diferents zones o països s'interfereixen entre sí en major o menor mesura segons l'estat de la ionosfera (zona geogràfica, estació de l'any, moment del dia, ...)
- El desenvolupament de la tecnologia PLC (*Power Line Comunicacions*) operant a la banda d'HF sobre línies elèctriques pot produir emissions no desitjades que es propaguen més enllà de l'horitzó, per rebot ionosfèric, causant interferència [97].
- Prolifereixen els usuaris que utilitzen la banda d'HF sense disposar de llicència per fer-ho.

## Disponibilitat

Com ja s'intueix a ran de les explicacions del capítol 1, un enllaç per propagació ionosfèrica entre dos punts determinats del planeta no es podrà establir en qualsevol moment ni a qualsevol freqüència. En general, i de forma molt simplificada, podem afirmar que:

- Durant el dia les freqüències baixes no es propaguen bé ja que experimenten molta absorció a la capa D. A mesura que s'augmenta la freqüència, la disponibilitat i l'abast augmenta.
- Durant la nit les freqüències baixes i mitges són les que millor es propaguen, permetent establir enllaços d'abast mundial.
- Quan l'activitat solar és menor les freqüències baixes i mitges són les úniques disponibles. Quan l'activitat solar és gran (SSN elevat), les freqüències altes permeten enllaços de llarg abast amb potències de transmissió baixes.

## Conclusions

Comparant el canal ionosfèric amb altres canals de comunicació observem que el soroll i la dispersió temporal i freqüencial són paràmetres comuns a altres medis de propagació, entre els quals, per exemple, el de la telefonia mòbil. Tot i que la possibilitat de ser interferit dins el canal en ús és menys comú, és també possible en altres sistemes com els que operen en bandes lliures (standard 802.11: *Wireless LAN*, *Bluetooth*, ...). Potser la dependència temporal i freqüencial de la disponibilitat és el paràmetre més característic respecte a altres canals. En qualsevol cas, la coincidència de tants fenòmens distorsionadors i variants fa de la ionosfera un dels canals més complicats per l'ús en radiocomunicació.

### 2.1.2 Estudi del canal

L'estudi d'un enllaç de comunicacions a la banda d'HF per propagació ionosfèrica involucra, en major o menor mesura, els aspectes següents [17], [16]:

#### Sondeig

El sondeig consisteix en l'obtenció de mesures indicatives de l'estat de la ionosfera. Distingirem dos casos:

- Des d'un punt de vista físic, mesures que permeten obtenir paràmetres que descriuen la composició de la ionosfera. N'hi ha de diferents i s'obtenen per diferents mitjans. Destaca el sondeig amb incidència vertical [22]. Arreu del món hi ha estacions sondejadores que regularment emeten polsos d'ones electromagnètiques a diferents freqüències que incideixen verticalment a la ionosfera. A partir de la reflexió d'aquestes ones s'obtenen els ionogrames, indicatius de les freqüències crítiques de les diferents capes de la ionosferes. S'ha establert a (1.2) que la freqüència crítica està relacionada amb la densitat electrònica, per tant el sondeig vertical permet determinar la quantitat d'ionització present a la ionosfera en un moment determinat.
- Sondeig de canal: des d'un punt de vista de l'enginyeria de comunicació, mesures que permeten caracteritzar la ionosfera com a medi per la propagació d'ones electromagnètiques. Aquestes mesures se solen obtenir per sondeig oblic, amb un emissor i un receptor sincronitzats i desplaçats normalment diversos centenars de quilòmetres. Els senyals de prova se solen enviar regularment, a diferents freqüències i ocupant diferents amples de banda. Els resultats caracteritzen la ionosfera en funció de paràmetres com ara la disponibilitat de l'enllaç, les dispersions temporals i freqüencials, la SNR, el temps de propagació, etc.

Els dos tipus de mesures aquí classificats tenen punts en comú. Per exemple, a 1.5 hem vist com a partir dels ionogrames es pot obtenir la  $f_{MUF}$  per incidència obliqua, que correspon a la màxima freqüència a la qual es pot establir un enllaç tal que la refracció ionosfèrica es produeixi en un entorn del punt mesurat per la ionosonda.

A 2.1.3 ens ocuparem sobretot de les mesures que caracteritzen la ionosfera pel seu ús en comunicacions digitals.

## Modelat

El modelat de la ionosfera consisteix en la descripció d'aquesta capa de l'atmosfera en funció d'un conjunt de variables interrelacionades entre sí per un conjunt de regles. Existeixen diversos enfocaments a l'hora de modelar la ionosfera. Proposem una classificació basada en el mateix criteri que hem emprat per distingir els mètodes de mesura: models físics i models d'ús per a la comunicació de dades per rebot ionosfèric:

- Models físics de distribució de densitat electrònica a les capes E i F. N'hi ha de diferents tipus:
  - Empírics, basats en la interpolació de les dades obtingudes per la xarxa mundial d'ionosondes. Dins de la seva categoria són els més usats (per exemple, la recomanació ITU-R, Rec P1239), tot i que estan limitats per la insuficiència de dades, ja que en molts llocs de la Terra la ionosfera no està suficientment mostrejada.
  - Físics, fonamentats en les solucions matemàtiques de les equacions que regeixen al plasma, en funció de la radiació solar incident i altres condicions de contorn. A la pràctica, la gran complexitat computacional que requereixen en limita el seu ús.
  - Paramètrics, consistents en la parametrització dels models físics segons la zona geogràfica, el camp magnètic terrestre o l'activitat solar (veure, per exemple, el PIM [21]).

Des d'un punt de vista de l'enginyeria de comunicacions, els models de densitat electrònica són útils ja que permeten predir la disponibilitat de l'enllaç (la  $f_{MUF}$ , o variants com la M(3000)F2) a un determinat temps vista (completarem aquesta idea a 2.1.5).

- Models de canal. Fan èmfasis en la caracterització de la ionosfera com a canal de comunicacions digitals [86]. A diferència dels models físics, els models de canal no pretenen reproduir les característiques de la ionosfera en cap moment en concret, sinó que el seu objectiu és reproduir-ne un comportament que sigui estadísticament representatiu. L'únic model unànimement acceptat fins al moment és el proposat per Watterson [96] el 1970, tot i que les limitacions que presenta per amples de banda grans està generant recentment molta activitat en la comunitat de científics. A 2.1.4 farem més èmfasis en aquest tipus de models.

## Predicció

La predicció de l'estat de la ionosfera està basada en la disponibilitat d'unes mesures físiques (històriques i actuals) de paràmetres relacionats amb la ionosfera de forma directa (per exemple, freqüències crítiques) o indirecta (per exemple, activitat solar), analitzades estadísticament i/o aplicades a un model físic de distribució de densitat electrònica (sovint empíric o parametritzat). Des del punt de vista de l'enginyeria de comunicació es poden obtenir dos tipus de prediccions:

- Mitjanes mensuals de la  $f_{MUF}$  (o paràmetres similars). Se solen usar per tal de planificar la disponibilitat de freqüències, normalment associada a un sistema *broadcast*. La variabilitat intramensual d'aquest paràmetre, que pot arribar en determinades situacions als 2 MHz, la fa inadequada per altres propòsits més ambiciosos.

- Prediccions a curt termini (*forecast*) i especificació de l'estat actual de la ionosfera (*nowcast*). La descripció 4-D de la ionosfera és possible gràcies a l'execució de models de predicció sobre mesures procedents d'ionosondes, satèl·lits, radars, ... incorporades pràcticament a temps real. En aquests casos és crítica la capacitat d'integrar aquesta informació i distribuir els resultats de forma ràpida [35]. La tecnologia *forecast* pot servir per ajustar amb poques hores d'antelació la freqüència d'operació dels sistemes *broadcast*.

A l'apartat 2.1.5 descriurem amb més detall aquests aspectes.

## Simulació

La simulació consisteix en la implementació d'un model de canal ajustat per tal de reproduir en sentit estadístic unes determinades condicions de la ionosfera (per exemple, les especificades a [46]). Considerarem dues situacions:

- Simulació *off-line*, útil per testejar o comparar algorismes de comunicacions en fase de disseny.
- Simulació a temps real, normalment utilitzada per verificar i comparar les prestacions d'equips acabats.

A 2.1.6 s'aprofundeix en els aspectes relacionats amb la simulació.

### 2.1.3 Sondeig oblic

El sondeig oblic de canal consisteix en la caracterització de la ionosfera mitjançant l'enviament i recepció d'ones electromagnètiques des d'ubicacions llunyanes entre sí (típicament majors a centenars de quilòmetres). L'estat actual de la tecnologia digital (amb conversors A/D de fins a 16 bits i 100 MSPS [3]) permet la conversió de senyals analògics i el processat digital de tot l'espectre d'HF simultàniament. Recentment s'han proposat un conjunt d'arquitectures i mètodes (WHISPER [25], DAMSON [15], SCIPION [78]) basats en aquesta tecnologia que permeten l'obtenció d'una gran varietat de paràmetres, entre els que destaquen:

- Funció d'*scattering*, que inclou la dispersió temporal i freqüencial.
- Temps de propagació.
- Balanç de potència de l'enllaç.
- Relació senyal soroll (SNR).
- Estabilitat de la fase.
- Angle d'arribada.
- Mesures independents pel raig ordinari i l'extraordinari.

Les mesures es duen a terme mitjançant l'enviament repetitiu dins el marge de freqüències escollit de seqüències amb característiques especials ocupant un ample de banda seleccionable. Les seqüències solen ser pseudo-aleatòries (del tipus Barker, M o similars) que presenten molt bones propietats d'autocorrelació, de forma que en el receptor és possible obtenir diverses

rèpliques temporalment consecutives de la resposta impulsional del canal, a partir de les quals és possible caracteritzar-lo mitjançant la funció d'*scattering* (representació simultània de la dispersió temporal i freqüencial [37]). Els següents paràmetres solen determinar les prestacions dels sistemes que usen aquesta tècnica de mesura:

- Resolució de la dispersió temporal, determinada per l'invers del temps de xip, que a la vegada està relacionat amb l'ample de banda de mesura.
- Màxima dispersió temporal mesurable, limitada pel període de la seqüència de sondeig.
- Resolució del *doppler spread*, determinada per l'invers del temps d'anàlisi.
- Màxim *doppler spread*, limitat per l'invers del període de la seqüència de sondeig.

Per altra banda, la mesura del temps de propagació requereix una sincronia temporal fina entre l'emissor i el receptor, que se sol obtenir mitjançant el sistema GPS. Per determinar l'angle d'arribada és necessari disposar d'una configuració de diversitat d'antena en recepció, i per mesurar de forma independent els rajos ordinari i extraordinari cal, a més, diversitat de polarització a l'estació receptora.

La majoria de sondejos oblics de canal s'han realitzat històricament a latituds mitges. Es per aquest motiu que cal destacar les campanyes dutes a terme pel projecte DAMSON, fruit de la col·laboració d'institucions pertanyents al Regne Unit, Canadà, Noruega i Suècia. A ran d'aquest projecte s'han realitzat mesures sistemàtiques de la ionosfera a latituds altes (per sobre del paral·lel 60, a l'hemisferi nord). Els resultats mostren dispersions temporals fins a 11 mseg. i *doppler spread* fins a 73 Hz [15].

Al capítol 4 es descriu la línia de recerca d'aquesta tesi consistent en la caracterització del canal ionosfèric que s'estableix entre la Base Antàrtica Espanyola i l'Observatori de l'Ebre a partir de sondeig oblic.

## Mesura de soroll i interferència

El soroll i la interferència limiten les prestacions dels sistemes d'HF.

S'han dut a terme diverses campanyes de mesura de les característiques del soroll que afecta a la propagació ionosfèrica de senyals, a diferents zones del planeta [54], [83], en diferents entorns (rural, urbà, etc.) [84], etc. Les conclusions de moltes d'aquestes campanyes de mesura han estat recollides en diversos informes del CCIR [44], [45], que mostren mapes de soroll per tot el Planeta i per diferents estacions de l'any. Una de les conclusions importants a què s'ha arribat és que el soroll mesurat a la banda d'HF no segueix una distribució gaussiana, de la que se n'allunya sobretot per una major probabilitat de nivells de soroll elevat de naturalesa impulsional.

La interferència en una comunicació prové d'altres comunicacions que s'estableixen arreu del món a aquella mateixa freqüència. La quantitat d'interferència depèn de les condicions de propagació de la ionosfera, que a la vegada depenen de l'hora del dia, l'estació de l'any, l'activitat solar, etc. A diversos llocs del món es duen a terme diverses campanyes de sondeig [14], [40], [38] amb l'objectiu de caracteritzar estadísticament l'ocupació espectral [60] i poder així modelar-la i incorporar-la a simuladors.

A [94] s'expliquen els mètodes i les mesures d'ocupació espectral realitzats a l'Observatori de l'Ebre per tal de dissenyar, ajustar i testejar el receptor i el pla de freqüències usats en el sondeig i la transmissió de dades en el marc d'aquesta tesi.

## 2.1.4 Modelat

Els models de canal caracteritzen la ionosfera des del punt de vista de la propagació d'ones electromagnètiques. L'objectiu d'aquests models no és predir el comportament de la ionosfera, sinó replicar-ne les condicions típiques i així poder dissenyar, verificar i comparar el funcionament i les prestacions d'algorismes i sistemes.

De totes les característiques de la ionosfera descrites a 2.1.1, els models de canal haurien d'incorporar, com a mínim, la simulació de la dispersió temporal i freqüencial, la SNR i la interferència. La disponibilitat, per altra banda, és un paràmetre binari que afecta a la possibilitat d'establir l'enllaç, però no és rellevant pel que fa al disseny dels algorismes que determinen la capacitat d'adaptació del sistema i les seves prestacions (la gestió de la disponibilitat s'estudia a 2.1.5)

En funció del modelat de la dispersió temporal, distingirem:

- Els models de banda estreta. Quan l'ample de banda del senyal transmès és petit l'efecte del *delay spread* (degut a la dependència freqüencial de l'índex de refracció) és menyspreable. Llavors cada *path* es simula amb un únic coeficient complex, modelat normalment seguint una distribució Rayleigh. A aquest tipus de canals correspon l'únic model unànimement acceptat en l'àmbit de l'HF: el Watterson [96].
- Els models de banda ampla [57], [59]. Quan l'ample de banda del senyal transmès és suficientment gran es modela el *delay spread* per cada *path* com un filtre de resposta impulsional finita, amb uns coeficients que se solen especificar a partir de la mesura d'un *Delay Power Profile*.

En general quan l'ample de banda ocupat pel senyal és de l'ordre de pocs KHz els models de banda estreta són suficients. En cas contrari, però, calen models de canal de banda ampla (a [34], per exemple, es descriuen alternatives que operen ocupant fins a 1 MHz).

Per altra banda, segons si el model incorpora la simulació de la dispersió freqüencial, classifiquem:

- Els models estàtics no consideren el *doppler spread*, de forma que només serveixen per simular un estat determinat, invariant, de la ionosfera.
- Els models dinàmics tenen en compte la dispersió freqüencial. Distingirem dos casos:
  - En els models de banda estreta, cada coeficient complex de cada *path* canvia segons una distribució normalment Rayleigh, amb una variança que depèn del *doppler spread*.
  - En els models de banda ampla, els *taps* de cada filtre FIR evolucionen segons un conjunt de variables aleatòries, sovint gaussianes, correlades en temps (amb una memòria que depèn del *doppler spread*) i incorrelades en retard.

### Modelat de soroll i interferència

Les fonts de soroll que afecten a les comunicacions ionosfèriques són diverses. Les mesures realitzades mostren que la distribució estadística d'aquest soroll no és gaussiana ni estacionària. Tant el soroll atmosfèric com l'humà tenen una naturalesa manifestament impulsional, i són sovint els que més limiten les prestacions dels sistemes d'HF. Per tal de poder dur a terme simulacions fidedignes s'han desenvolupat models basats en mesures pels diferents tipus de



sorolls. Vegeu, per exemple, [56] per un model de soroll atmosfèric, i [55] per un model d'interferència i soroll provocat pels humans.

### 2.1.5 Predicció

La variabilitat de la disponibilitat del canal ionosfèric dificulta l'establiment d'enllaços sense un coneixement previ d'alguns paràmetres, principalment la  $f_{MUF}$ . Abans de la proliferació dels sistemes informàtics s'usaven taules que especificaven la millor freqüència per un determinat enllaç en funció de l'estació de l'any, l'hora del dia, i altres variables. La figura de l'operador amb experiència era també un factor a tenir en compte. Ja fa uns anys que el gran desenvolupament de la capacitat computacional dels ordinadors ha facilitat la implementació de models de distribució de densitat electrònica, del camp geomagnètic terrestre, etc. ajustats per diferents zones de la Terra incloent latituds mitges, aurorals, equatorials i polars. Aquests models, juntament amb complexes tècniques de *ray tracing* han donat lloc a diversos simuladors que permeten predir la millor freqüència, la SNR esperada, l'angle d'elevació i, en alguns casos, una estimació del *multipath spread*.

Destaquen per una banda l'IONCAP [88] i variants (VOACAP, ICEPAC [71]) i l'ASAPS [49]. Tots ells usen geometria virtual (model de Terra pla, ionosfera laminar, ...) per reduir el temps de càlcul, a costa d'uns resultats en què les prediccions poden no ser precises si les trajectòries sota estudi presenten irregularitats (s'allunyen de les latituds mitjanes). Aquests simuladors estan orientats a l'avaluació d'un enllaç de comunicació d'HF, permetent especificar paràmetres del transmissor i receptor com ara el tipus d'antena, el marge de freqüències permès pels transceptors, etc. S'usen sovint per obtenir una primera aproximació de la millor freqüència per establir un enllaç punt a punt quan no hi ha disponible un ALE.

Per una altra banda, AMBCOM [42], IONORAY i SKYCOM són simuladors que incorporen models i tècniques més refinats no basats en geometria virtual. En general requereixen capacitats computacionals molt majors però ofereixen prediccions més acurades. IONORAY, per exemple, permet avaluar enllaços punt a punt, considera el camp magnètic terrestre i usa una tècnica *ray tracing* tridimensional que li permet obtenir resultats acurats en enllaços amb irregularitats. Un altre dels simuladors, SKYCOM, és capaç de generar mapes de cobertura per sistemes *broadcast*, amb previsió de SNR i dispersió temporal a cada punt.

En general, els paràmetres físics que usen els models anteriors per especificar l'estat de la ionosfera (SSN, índex d'activitat auroral, etc.) o el camp magnètic terrestre acostumen a ser valors promig mensuals, diaris en el millor dels casos. Les prediccions de  $f_{MUF}$  així obtingudes poden variar fins a un vint per cent respecte al millor valor instantani [61]. Per tal d'obtenir millors prediccions a curt termini (hores) s'han desenvolupat dues tècniques anomenades *nowcast* [35] i *forecast* [61]:

- El *nowcast* consisteix en la descripció de l'estat actual de la ionosfera (4-D) a partir de l'aplicació a algun model de mesures incorporades pràcticament a temps real procedents de fonts diverses: ionosondes verticals i obliqües, satèl·lits, radars, etc. Aquests models actualitzats gairebé a temps real permeten, doncs, el càlcul de la  $f_{MUF}$  instantània.
- El *forecast* és un servei que busca predir un valor acurat de la  $f_{MUF}$  a poques hores vista mitjançant la predicció de perturbacions (veure 1.4) a partir de mesures instantànies provinents de la monitorització de l'activitat solar o geomagnètica.

Els dos nivells de predicció explicats es complementen. Així les prediccions a mig termini (amitjanades) s'usen per planificar l'ús de l'espectre radioelèctric i limitar el marge de cerca

de les millors freqüències a l'hora d'establir un enllaç, mentre que la predicció a curt termini permet optimitzar de forma efectiva la freqüència concreta on iniciar i continuar una comunicació.

### 2.1.6 Simulació

Els simuladors de canal [33], [47] permeten desenvolupar, verificar i comparar el funcionament d'algorismes i sistemes localment en un entorn controlat i repetitiu. Una simulació de canal sol incloure els aspectes següents:

- Un model de canal.
- Un model de soroll.
- Un model d'interferència.
- Unes determinades condicions ionosfèriques.
- Aspectes d'implementació.

Els conceptes relatius als models de canal, el soroll i la interferència han estat descrits en apartats anteriors. Les condicions ionosfèriques defineixen els paràmetres dels models de canal, de soroll i d'interferència en diferents situacions. La recomanació CCIR 520-1 [46], per exemple, estableix tres possibles situacions a simular: canal bo, canal moderat i canal pobre, cadascun amb diferents paràmetres de *time spread* (entre 0.5 i 2 ms) i *doppler spread* (entre 0.1 i 1 Hz).

A l'hora d'implementar el simulador hi ha un conjunt d'aspectes que influeixen en els resultats obtinguts, com per exemple la freqüència d'actualització dels coeficients del canal, la longitud de la resposta impulsional del filtre gaussià que sol modelar el *doppler*, la tècnica d'interpolació (que inclou la resposta dels filtres corresponents), etc. L'especificació d'aquests aspectes és necessària per tal que simuladors diferents reproduïxin condicions idèntiques.

La implementació dels simuladors es pot realitzar a dos nivells:

- *Off-line*, usats per verificar i comparar les prestacions d'algorismes que intervenen en els processos d'emissió i/o recepció d'equips d'HF, usant el model pas baix de senyal. Solen estar programats sobre ordinadors personals, amb el suport de *software* especialitzat (e.g. Matlab).
- A temps real, usats per verificar i comparar equips complets [59], [26]. Solen estar implementats sobre un *hardware* especialitzat i usar tècniques de *software radio* (veure apartat 2.2.1). No requereixen cap modificació ni adaptació de l'equip sota prova. A més dels efectes del canal pel que fa a dispersió, soroll, etc. també solen permetre simular efectes d'atenuació, de forma que és possible testejar els paràmetres ràdio del transceptor (e.g. sensibilitat).

### 2.1.7 Conclusions

A la taula 2.1 es resumeixen els conceptes que s'han introduït en aquest apartat.

Es de destacar que la disciplina de l'enginyeria que té per objectiu modelar la ionosfera com a canal de comunicacions per dades és tal que per dur a terme aquesta tasca es nodreix, a més

	Enfoc físic	Enfoc de l'enginyeria de comunicació
<b>Mesura</b>	Sondeig vertical (entre altres)	Sondeig oblic
<b>Model</b>	Distribució de densitat electrònica (empíric, físics, ...)	Canal
<b>Aplicació a les comunicacions</b>	Predicció $f_{MUF}$ (mitjanes, <i>Nowcast</i> i <i>Forecast</i> )	Simulació ( <i>off-line</i> o temps real)

Taula 2.1: Mesura, modelat, predicció i simulació ionosfèriques

dels experiments propis realitzats a tal efecte, també del treball realitzat en l'àmbit de la física pel que fa a l'observació i modelat d'aquesta capa ionitzada de l'atmosfera. L'estat actual de la recerca deixa entreveure que les dues línies de treball (indicades a la taula: vessant física i la d'enginyeria de comunicació) tenen cada cop més punts en comú. Per una banda els darrers sistemes de predicció *forecast* i *nowcast* incorporen previsions de dispersió temporal i freqüencial, i a la inversa aquests models es nodreixen cada cop més de mesures procedents d'enllaços de comunicacions oblics amb les quals és possible refinar-los i adaptar-los.

## 2.2 Disseny i implementació de transceptors

Històricament les comunicacions a la banda d'HF s'han caracteritzat per ésser poc robustes, fortament sotmeses al soroll, de disponibilitat moderada i baixa taxa de bit [7]. La causa de les poques prestacions dels enllaços ionosfèrics cal buscar-la en primer lloc en les nombroses dificultats que aquest canal presenta: forta variabilitat, dispersió, soroll, etc. Anys endarrera, quan els transceptors eren totalment analògics, la mancança d'eines per mitigar aquests efectes duia sovint a la resignació dels usuaris i operadors. Hi havia la sensació general que per establir un enllaç n'hi havia prou amb equips de ràdio senzills i antenes poc optimitzades, ja que els nivells de qualitat assolibles venien determinats i limitats pel canal, sense que s'hi pogués fer res per millorar-los.

Recentment, però, el desenvolupament de la tecnologia digital aplicada a la ràdio ha obert noves expectatives. Pel que fa al *hardware* destaquen els convertors A/D d'alta velocitat, resolució i linealitat [3], processadors DSP que permeten l'execució de més d'1 GFLOPS (veure, per exemple, *TigerSharc* [4] i *C6x* [89]) i dispositius de lògica programable amb capacitat lògica, memòria i velocitat creixents dia a dia (veure, per exemple, Virtex-4 [98] i Stratix-II [2]). El substancial increment de la capacitat computacional a temps real que aquests dispositius ofereixen ha incentivat el desenvolupament de diverses tècniques de processat digital del senyal aplicat a comunicacions (espectre eixamplat, OFDM, antenes intel·ligents, etc) que han de permetre millorar de forma important la imatge i la realitat dels sistemes basats en propagació ionosfèrica.

Pel que fa a equips comercials destaquen, entre altres, la sèrie FALCON-II de Harris [41], el mòdem MDM Q9604 de Rockwell Collins [77] que permet fins a 16000 bps per canal (fins a 4 canals), els equips per aviació AN/ARC-220 de Rockwell Collins, etc.

A continuació revisarem els principals avanços experimentats en l'àmbit de les tecnologies digitals aplicades a les comunicacions d'HF. En primer lloc tractarem aspectes relacionats amb el disseny de transceptors reconfigurables que permetin l'execució eficient d'algorismes adaptatius. En segon lloc descriurem les experiències recents en l'aplicació de tècniques de modulació, codificació, ... a l'àmbit de la propagació per enllaç ionosfèric.

### 2.2.1 Software Radio

El *Software Radio* és un concepte encunyat per Joe Mitola (vegeu, per exemple, [62]) referent a la tecnologia digital que ha de permetre el disseny de ràdios flexibles, multiservei, multiestàndard i reconfigurables per *software*. Un ràdio així dissenyada requereix, entre altres:

- A/D/A d'alta velocitat, resolució i linealitat. Els convertors que actualment millor assoleixen aquest conjunt de restriccions ofereixen fins a 100 MSPS, 16 bits i una *INL* (*Integral Non Linearity*) de l'ordre de 3 *LSB*. Els sistemes d'HF són privilegiats en aquest sentit, ja que aquests A/D/A permeten la digitalització de tota la banda amb una SNR superior a 80 dB. Així, és possible plantejar arquitectures transceptores minimitzant el nombre de components analògics: cap mesclador i un nombre mínim d'amplificadors i filtres.
- Dispositius de processat digital del senyal a temps real amb elevada capacitat computacional, eficiència i reconfigurabilitat. Destaquen els processadors digitals del senyal (DSP) i els dispositius de lògica programable (FPGA i CPLD). En general, els primers són més fàcils de programar, mentre que els segons són més eficients des d'un punt de vista energètic i permeten majors velocitats de procés gràcies a la possibilitat de paral·lelitzar l'execució d'algorismes [20]. Precisem, però, que quan l'eficiència energètica i el cost no són requeriments importants, els ordinadors personals són també una alternativa als DSP i FPGA, permetent un desenvolupament ràpid en un entorn conegut.
- Una capa d'abstracció del *hardware* (HAL) que permeti la programació d'algorismes de processat digital del senyal amb independència del maquinari i la seva execució eficient a temps real oferint serveis de reconfigurabilitat dinàmica [75]. Tot i que l'ús de capes HAL és molt comú, per exemple, en sistemes operatius d'ordinadors personals, en l'àmbit de la ràdio digital encara proliferen poc. En conseqüència, els dissenys *software radio* actuals són, sovint, poc portables i limitats en reconfigurabilitat.

Durant els darrers anys diversos grups de recerca apliquen aquestes tècniques al desenvolupament de nous equips basats en sistemes que en algun o diversos dels aspectes anteriors poden ser considerats *software radio*. A [23] s'estudia l'aplicació d'aquesta tecnologia a l'HF, a [26] i [24] es proposen arquitectures digitals que implementen simuladors de canal a temps real i a [12] es proposa un *hardware* per implementar receptors DRM (*Digital Radio Mondiale*). A [95] s'explica el disseny de l'arquitectura del transceptor utilitzat en l'enllaç entre la Base Antàrtica i l'Observatori de l'Ebre així com algunes particularitats de la implementació del *Digital Down Converter*.

## 2.2.2 Tècniques digitals

La introducció de la tecnologia digital a l'àmbit de la radiocomunicació ha permès el desenvolupament i aplicació de nous algorismes que permeten millorar l'eficiència i prestacions dels enllaços d'HF. Hem classificat aquests avanços en tres categories: modulació, codificació, equalització.

- Modulació. L'ús de modulacions complexes permet incrementar el nombre de bits per segon transmesos en un determinat ample de banda. S'han proposat diverses aproximacions per incrementar l'eficiència espectral:
  - Modulacions monoportadora amb constel·lacions de diversos punts. A [52], per exemple, es proposen formes d'ona de fins a 48 punts (5.5 bits per símbol, de mitjana, aproximadament) en un ample de banda de 25 KHz per assolir una taxa de fins a 96 Kbps. El principal inconvenient de les modulacions monoportadora rau en la necessitat d'usar equalitzadors per compensar la ISI introduïda pel canal. Com major és el *baudrate* de la modulació, major és el nombre de coeficients de l'equalitzador i, consegüentment, major és la dificultat de convergència i el cost computacional associat.
  - Modulacions multiportadora OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [18]. OFDM és una tècnica que proposa l'enviament d'informació a través de diverses portadores simultànies, ortogonals entre sí. L'ample de banda de cada portadora es tria inferior a l'ample de banda de coherència del canal, evitant així l'ús de llargs i costosos equalitzadors. OFDM és una tècnica robusta al multicamí i amb una acceptable eficiència computacional derivada de l'ús de la FFT en el procés de modulació i demodulació. La sensibilitat al *doppler* (ICI: *Inter Carrier Interference*), per contra, és un dels seus principals desavantatges. El fet que DRM faci ús d'aquesta tècnica [85] ha provocat molt interès en l'ús d'OFDM sobre HF (vegeu, per exemple, [64], [29], [73]).
  - Espectre eixamplat. L'espectre eixamplat és una tècnica que consisteix en l'enviament d'informació usant un ample de banda molt superior al mínim requerit. Aquest eixamplament de l'espectre permet resoldre el multicamí mitjançant receptors RAKE [72] i ofereix robustesa a la interferència. Per contra, el cost computacional de la implementació s'incrementa substancialment. Quan diverses transmissions conviuen simultàniament en temps i freqüència usant seqüències d'eixamplament diferents, la tècnica resultant rep el nom de CDMA (*Code Division Multiple Access*). Algunes experiències en l'ús d'espectre eixamplant i CDMA en HF estan descrites a [8], [80], [5].
  - Combinació de les dues tècniques anteriors (OFDM+CDMA). Per tal de millorar les prestacions d'OFDM en presència de *fading* pla s'han proposat esquemes que combinen aquesta modulació multiportadora amb espectre eixamplat. Una anàlisi detallada de les possibilitats d'aquesta tècnica a la banda d'HF es pot trobar a [64], [63].
- Equalització. L'equalització és un algorisme que s'usa en recepció per compensar la distorsió introduïda pel canal [72]. Distingirem dos casos:

- Quan el període de símbol ( $T_b$ ) d'una modulació és inferior a la dispersió temporal del canal ( $T_m$ ) es produeix interferència intersimbòlica (ISI). En aquest cas l'equalitzador és l'encarregat de llevar la ISI. Com major sigui el quocient  $\frac{T_m}{T_b}$  major és el nombre de símbols previs que afecten al símbol actual, i major la complexitat de l'equalitzador corresponent. En conseqüència, donat un determinat canal, en incrementar el *simbol rate* usant modulacions monoportadora major serà la complexitat de l'equalitzador. A la pràctica la longitud màxima de l'equalitzador capaç d'eliminar de forma efectiva la ISI limita el màxim *simbol rate* usable amb modulacions monoportadora en un determinat canal.
- Quan el període de símbol ( $T_b$ ) d'una modulació és superior a la dispersió temporal del canal ( $T_m$ ) la ISI és menyspreable. Llavors n'hi ha prou amb un equalitzador d'un únic coeficient que corregeixi la distorsió de mòdul i fase introduïda pel canal. Aquest sol ser el cas de les modulacions multiportadora com OFDM, on precisament el criteri de disseny per fixar l'ample de banda de cada subportadora és precisament que  $T_b \gg T_m$ . En aquest cas, però, la dispersió temporal del canal es tradueix en *fading* pla a nivell de subportadora, que pot ser resolt combinant la tècnica d'OFDM amb CDMA [64].

Existeixen diverses tècniques d'equalització (MLSE, *Peak Distortion*, MSE, DFE, ... [72]). A [1], per exemple, es revisen i s'avaluen les prestacions, limitacions i conveniència de l'equalització per modulacions multiportadora.

- Codificació. La codificació és una tècnica que s'usa per tal reduir els errors provocats pel soroll introduït pel canal [72]. Es basa en generar redundància que en recepció permeti detectar i corregir errors. Existeixen dos grups de codis:
  - Els codis de bloc ( $n, k$ ) generen  $n - k$  bits de redundància per cada  $k$  bits d'informació. Per tant, la informació i la redundància estan codificats en bits diferents. N'hi ha de diferents tipus: Hamming, Hadamar, Golay, Reed-Solomon, etc.
  - Els codis convolucional de *rate*  $r$  generen un flux de  $\frac{f_b}{r}$  bps a partir d'una font d'informació que genera  $f_b$  bps. En aquest cas cada bit a la sortida del codificador conté part d'informació i part de redundància. Un paràmetre important d'aquest tipus de codis és la *constraint length* ( $K$ ). Valors grans de  $K$  generen codis més potents, però per contra la descodificació usant l'algorisme de Viterbi és més costosa.

Els millors resultats sovint s'obtenen combinant ambdues tècniques, juntament amb l'aplicació d'un algorisme per desordenar la informació (*interleaver*) i evitar així les ràfegues d'errors. Per exemple, una configuració que s'ha demostrat efectiva oferint resultats propers al límit de capacitat de Shannon consisteix en mesclar un codi Reed-Solomon amb un convolucional (vegeu [13] per una aplicació a l'HF).

La codificació s'usa en HF des de fa molts anys (vegeu, per exemple, [53]). Recentment ha sorgit un nou tipus de codis, els turbo codis [11], que ofereixen capacitats properes a les predites pel límit de Shannon. Els darrers anys s'està investigant l'aplicació d'aquesta nova tècnica als estàndards d'HF (vegeu [19], [74], [28]). Els primers resultats són satisfactoris pel que fa a la capacitat de correcció d'errors, però mostren també alguns inconvenients a investigar, com ara l'increment de la latència que pot afectar a

sistemes que usin la codificació conjuntament amb mètodes ARQ (*Automatic Repeat-reQuest*).

Al capítol 5 s'explica una línia de treball de la tesi en aquest àmbit, consistent en el l'aplicació de tècniques d'espectre eixamplat per la transmissió de dades en l'enllaç entre la Base Antàrtica i Roquetes.

## 2.3 Estandarització

Amb la proliferació dels mòdems en l'àmbit de l'HF la interoperabilitat entre equips de diferents fabricants esdevingué un problema [70]. Sorgí llavors la necessitat d'estandaritzar els protocols de comunicació. A nivell mundial hi ha tres organismes que proposen estàndards en aquest sentit:

- El Departament de Defensa del Estats Units emet els MIL-STD (*Military Standard*)
- El ITS (*Institute for Telecommunications Science*), que depèn de la NTIA (*National Telecommunications and Information Administration*), que depèn a la vegada del Departament de Comerç dels Estats Units, redacta els FED-STD (*Federal Standard*).
- L'OTAN proposa els STANAG (*Standardization Agreement*).

Les recomanacions emeses en aquests estàndards es poden classificar en les categories següents:

- Nivell físic. Solen especificar paràmetres referents a la modulació, codificació de canal, seqüències d'entrenament, formats de trama, etc. Cada estàndard acostuma a incloure diferents modes de funcionament que responen a un diferent compromís entre velocitat assolible i robustesa.

A principis de la dècada dels 80 sorgí el primer estàndard rellevant en aquest sentit: MIL-STD-188-110A [90]. Opera fins a 2400 bauds, amb modulació 8-PSK, obtenint una velocitat de bit de 7200 bps, dels quals una tercera part corresponen a senyalització, i amb els 4800 bps restants es pot obtenir fins a 2400 bps útils usant un codi convolucional de *rate*  $\frac{1}{2}$  o bé 4800 bps sense codificar.

Altres estàndards que especifiquen nivell físic són, per exemple, STANAG 4539 [69], que permet entre 75 i 9600 bps codificants i fins a 12800 bps sense codificar, STANAG 4415 [65], per comunicacions a 75 bps en canals amb SNR molt baixes, MIL-STD-188-110B [92], que inclou modulacions QAM i fins a 9600 bps codificats i 12800 sense codificar, FED-STD-1052 [32], STANAG 4538 [68], ...

- Nivell d'enllaç. Distingirem dos grups de recomanacions:
  - Mecanismes per assegurar una transmissió d'informació lliure d'errors, usant protocols ARQ (per exemple, STANAG 5066 [67]).
  - Protocols d'establiment automàtic d'enllaç (ALE), dels quals en parlarem més endavant en aquest mateix apartat.

- Nivell d'aplicació. Tot i que els protocols d'aplicació solen ser els mateixos que per altres sistemes, de vegades s'inclouen adaptacions específiques per HF. Per exemple, STANAG 5066 especifica a l'annex F un protocol de correu electrònic (HMTP: *HF Mail Transfer Protocol*) basat en SMTP. En altres casos, però, els requeriments associats a serveis pròpiament militar requereixen protocols específics, com ara el MMHS *Military Message Handling System* estandaritzat a l'STANAG 4406 [66]

Sovint els estàndards abarquen més d'una categoria de les ara esmentades. S'observa, per exemple, que STANAG 5066 especifica una recomanació per nivell d'enllaç (ARQ) i una aportació d'aplicació (HMTP). Igualment, STANAG 4538 inclou aspectes de nivell físic, ALE i ARQ.

Actualment els protocols d'HF se solen classificar en tres generacions. La primera generació sol fer referència a sistemes propietaris, la segona generació inclou els primers estàndards emesos per les organitzacions abans esmentades (STANAG 5066, MIL-STD-188-110A, FED-STD-1052, etc.) i la tercera generació correspon a les darreres contribucions que permeten majors velocitats de dades i/o protocols ALE avançats (STANAG 4538, MIL-STD-188-110B, MIL-STD-188-141B, etc.)

A continuació aprofundirem en un aspecte característic de les comunicacions ionosfèriques que ha contribuït de forma decisiva al resorgiment de l'HF: els protocols ALE.

### 2.3.1 ALE

Els protocols ALE (*Automatic Link Establishment*) s'utilitzen en enllaços ionosfèrics per tal d'establir una comunicació de forma automàtica en base a informació referent a la qualitat esperada de l'enllaç (LQA, de l'anglès *Link Quality Analysis*). Aquesta informació a priori se sol obtenir mitjançant sondejos entre estacions ALE els resultats dels quals (BER, SNR, ...) s'emmagatzemen en taules que són consultades en el moment d'establir l'enllaç. Un cop la comunicació ha estat iniciada, l'ALE és també el responsable de mantenir-ne la qualitat, canviant de canal si s'escau. Algunes de les funcions dels protocols ALE són:

- Establir, mantenir i finalitzar una comunicació escollint el millor canal dels disponibles. Alguns estàndards tenen també en compte informació sobre la càrrega de la xarxa i el tràfic desitjat.
- Sondejar, enviant tons de senyalització que permeten a totes les estacions receptores actualitzar la seva taula LQA.
- Establir i confirmar trucades selectives.
- Escanejar, síncronament o asíncronament, un conjunt de canals explorant possibles peticions d'establiment d'enllaç.
- Compartir les taules LQA.
- Enrutar trucades.

La primera generació de protocols ALE (també anomenada *Adaptive HF systems*) sorgí a principis de la dècada dels 80 per iniciativa de fabricants d'equips d'HF [6] (per exemple, RF-7110 de Harris) per tractar d'automatitzar l'establiment d'enllaços. Tot i que els resultats foren molt prometedors, la manca d'interoperabilitat i flexibilitat motivà l'aparició del



primer estàndard el 1988: el MIL-STD-188-141A [91] emès pel Departament de Defensa dels Estats Units.

El MIL-STD-188-141A és un ALE de segona generació que millora els anteriors protocols incrementant la robustesa de la senyalització i proposant una arquitectura oberta que permet la implementació de funcions de xarxa i l'escalabilitat del protocol i de l'adreçament. A principis dels 90 aparegueren la versió civil del protocol (FED-STD-1045A [31]) i dues revisions del militar (CN1 i CN2).

A finals de la dècada dels 90 es publicà MIL-STD-188-141B [93] (posteriorment ampliat amb una CN1), considerat el primer protocol ALE de tercera generació. Inclou importants millores, com ara la possibilitat d'operar un conjunt d'estacions síncronament amb protocol d'accés al medi tipus CSMA que permet l'accés al canal només quan no hi ha interferència, assignació de subgrups de canals a grups d'usuaris per minimitzar les col·lisions quan hi ha molt tràfic, etc.

Paral·lelament als estàndards desenvolupats als Estats Units, la OTAN publica la sèrie STANAG per interoperabilitat en les comunicacions dels diferents membres de l'associació. La OTAN sovint fa seus els estàndards MIL-FED (és el cas de MIL-STD-188-141A per 2G ALE), mentre que altres vegades redacta una norma pròpia. Per exemple l'STANAG 4538 [68], també anomenat ARCS (*Automatic Radio Control System*), és l'equivalent ALE de 3G. Detalla el sistema a tres nivells: l'ACS (*Automatic Channel Selection*) és l'encarregat d'escollir les millors freqüències, tenint en compte aspectes de propagació, de càrrega de la xarxa i de tràfic desitjat, l'ALE (*Automatic Link Establishment*) és l'encarregat d'establir la comunicació i l'ALM (*Automatic Link Maintenance*) de monitoritzar els paràmetres de la comunicació i prendre les accions oportunes si s'escau.

Existeixen diverses xarxes d'HF en funcionament, moltes d'elles promogudes pels Estats Units (*The HF global communications system air/ground/air network* [43], *SHARES* [79], *FEMA National Radio System (FNARS)*, etc.). En general, totes elles estan formades per equips diversos, pertanyents a diferents fabricants. El funcionament d'aquestes xarxes demostra l'èxit de l'estandarització dels protocols d'HF i, més concretament, dels grans avanços en eficiència i interoperabilitat assolits a ran del desenvolupament dels sistemes ALE.

## 2.4 Aplicacions

L'increment substancial de velocitat de bit ofertada pels sistemes actuals d'HF, que ha passat en pocs anys dels 300 bps als 9600 bps, juntament amb la possibilitat de crear xarxes d'equips amb establiments automàtics de l'enllaç mitjançant els estàndards d'ALE 3G, han obert la porta a la investigació de noves aplicacions altre temps inviables. Estadístiques recents [51] mostren un canvi de tendència en l'ús de l'HF. Així el 2004 el 60% del tràfic corresponia ja a aplicacions digitals, mentre que la veu analògica representava només el 18% i el Morse el 9%. A continuació revisarem algunes contribucions recents en la innovació d'aplicacions sobre enllaços ionosfèrics.

L'ús de l'HF per a la transmissió de veu ha experimentat millores importants [81]. Els antics enllaços punt a punt de veu analògica estant essent substituïts per transmissions de veu digital codificada i encriptada, amb els equips d'HF integrats a la xarxa de telefonia [76], fent de l'HF un mitjà alternatiu de comunicació com ho és el cable i el satèl·lit. A més de la veu, altres grups de recerca investiguen la transmissió eficient d'imatges per HF. A [58], per exemple, es descriu una experiència en aquest sentit, basada en l'ús de sistemes radiants

millorats (veure també [27]) que permeten assolir fins a 30 Kbps sobre un ample de banda de 9 KHz i un enllaç de 780 Km.

Destaquen, per altra banda, els estudis sobre les xarxes d'HF. A [87] es discuteixen les possibilitats i limitacions d'una topologia de xarxa formada per diferents nodes, on cada node disposa de diferents transmissors i receptors. S'aconsegueix així major capacitat, redundància, diversitat i qualitat de servei, etc. Les xarxes així formades poden integrar-se en xarxes IP ja existents [10] per, en un primer moment, funcionar com a enllaç de *backup*, i més endavant plenament integrades dins de la xarxa. En aquest cas, paràmetres com ara l'elevada latència i baixa velocitat dels enllaços d'HF en comparació amb les xarxes IP existents han de ser avaluats [39]. La interconnexió d'equips d'HF en xarxa i la integració d'aquestes xarxes en altres xarxes IP heterogènies ha motivat el sorgiment de noves aplicacions com ara el correu electrònic *HMTP mail* [9] i el *HF-Messenger* [82] (desenvolupat per Rockwell-Collins) que permet la transmissió de fitxers de text, fax, imatges, correu, etc. Tot i que molts d'aquests serveis estan disponibles només per ús militar o governamental, hi ha també aplicacions comercials destinades altres sectors. La companyia *Bushmail*, per exemple, ofereix servei de correu electrònic a tota l'Àfrica basat en enllaços d'HF de baix consum, mentre que Arinc, a través de la solució GLOBALink, ofereix cobertura en zones polars usant tecnologia d'HF per comunicacions entre aeronaus.

La integració de veu i dades sense costures (*seamless*), amb els diferents requeriments que ambdós serveis exigeixen, és també un tema de recerca candent en HF. A tall d'exemple, a [36] es descriuen l'actualització de la topologia, protocols i serveis d'una xarxa d'HF operativa des de 1980, instal·lada per *Marconi Communications*, que integra tràfic de dades i veu. Menció a part mereix la iniciativa *Digital Radio Mondiale* [85]. DRM sorgeix per substituir els vells sistemes de ràdio AM situats a les bandes de LF, MF i HF amb l'objectiu d'incrementar substancialment la qualitat del so. Aquest sistema ha estat desenvolupat gràcies a la col·laboració de diversos estaments (fabricants, grups de recerca, ràdios, etc.) i estandaritzat en el sí de la ETSI [30] i reconegut per la ITU. Des del punt de vista tècnic, DRM està basat en l'ús de la tecnologia OFDM combinada amb tècniques de codificació i correcció d'errors, que li confereixen robustesa al soroll, a la interferència i a la dispersió temporal del canal.

# Bibliografia

- [1] A. Ahrens, "Equalizer design for multicarrier transmission systems," in *Proc. Nordic HF conference*, 2004.
- [2] Altera, Mar 2006. [Online]. Available: <http://www.altera.com>
- [3] "AD9461 16-bit, 130 MSPS A/D Converter datasheet," Analog Devices, Apr 2006. [Online]. Available: <http://www.analog.com>
- [4] "Embedded processing and DSP," Analog Devices, Mar 2006. [Online]. Available: <http://www.analog.com/processors/>
- [5] G. Andersson, "Performance comparison of spread spectrum methods in HF interference environment," in *Proc. Nordic HF conference*, 1995.
- [6] M. Baker, W. Beamish, and M. Turner, "The use of MIL-STD-188-141A in HF data networks," in *Proc. IEEE Military Communications Conference*, vol. 1, Oct 1989, pp. 75–79.
- [7] L. Barclay, "Ionospheric effects and communication systems performance," in *Proc. International Ionospheric Effects Symposium*, 2002, pp. 1–10.
- [8] G. Bark, "Performance comparison of spread-spectrum methods on an interference-limited HF channel," *IEE Proceedings-Communications*, vol. 146, no. 1, pp. 23–28, Feb 1999.
- [9] W. L. Beamish, "Performance of HMTF based email using second and third generation HF data links," in *Proc. Nordic HF conference*, 2001.
- [10] H. Bergzen, "Integrating automated HF systems in IP based networks," in *Proc. Nordic HF conference*, 2001.
- [11] C. Berrou and A. Glavieux, "Near optimum error correcting coding and decoding: turbo-codes," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 44, no. 10, pp. 1261–1271, Oct 1996.
- [12] M. J. Bradley, "Digital Radio Mondiale: system and receivers," in *Proc. of International Conference on HF Radio Systems and Techniques*, Jul 2003, pp. 198–202.
- [13] A. Brakemeier and J. Lindner, "Single-tone HF data transmission with 2.4 kbps and 4.8 kbps," in *Proc. of International Conference on HF Radio Systems and Techniques*, Apr 1988, pp. 339–343.

- [14] M. Bröms, “Results from measurements of occupancy in Sweden,” in *Proc. Nordic HF conference*, 1989.
- [15] P. S. Cannon, M. J. Angling, N. C. Davies, T. Wilink, V. Jodalen, B. Jacobson, B. Lundborg, and M. M. Broms, “Damson HF channel characterisation-a review,” in *Proc. IEEE Military Communications Conference*, vol. 1, Oct 2000, pp. 59–64.
- [16] P. S. Cannon, “Ionospheric models and measurements required for HF communication system designers and operators,” in *Proc. IEE Colloquium on Propagation Characteristics and Related System Techniques for Beyond Line-of-Sight Radio*, nov 1997, pp. 1–4.
- [17] —, “Ionospheric propagation and modelling for modern HF communication systems,” in *Proc. Nordic HF conference*, 1998.
- [18] R. Chang, “Orthogonal frequency division multiplexing,” U.S. Patent, Jan, 1970.
- [19] P. Coulton, B. Honary, M. Darnell, and S. B. Wicker, “Application of turbo codes to HF data transmission,” in *Proc. of International Conference on HF Radio Systems and Techniques*, Jul 1997, pp. 95–99.
- [20] M. Cummings and S. Haruyama, “FPGA in the software radio,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, no. 2, pp. 108–112, Feb 1999.
- [21] R. E. Daniell, “A global ionospheric parameterisation based on first principles models,” *Radio Science*, no. 30, pp. 1499–1510, 1995.
- [22] K. Davies, *Ionospheric radio*. Peter Peregrinus, 1996.
- [23] N. C. Davies, “A high performance HF software radio,” in *Proc. of International Conference on HF Radio Systems and Techniques*, Jul 2000, pp. 249–256.
- [24] —, “A radio frequency HF channel simulator employing software radio techniques,” in *Proc. Nordic HF conference*, 2004.
- [25] N. C. Davies, T. Wilink, and P. S. Cannon, “Initial results from WHISPER; a wideband HF ionospheric sounder for propagation environment research,” in *Proc. of International Conference on HF Radio Systems and Techniques*, 2001.
- [26] A. Ehrck and A. Heuberger, “Understanding HF channel simulator requirements in order to reduce HF modem performance measurement variability,” in *Proc. Nordic HF conference*, 2004.
- [27] Y. M. Erhel, C. Perrine, D. Lemur, and A. Bourdillon, “Image transmission through ionospheric channel,” *IEE Electronics Letters*, vol. 41, no. 2, pp. 80–82, Jan 2005.
- [28] J. Escher, “A real time implementation of STANAG 4539 high data rate waveform using turbo equalization techniques,” in *Proc. Nordic HF conference*, 2004.
- [29] I. S. et al., “On COFDM performance of digital radio systems in AM in HF bands over multipath ionospheric channels,” in *Proc. Nordic HF conference*, 2001.
- [30] *Digital Radio Mondiale*, ETSI Std. TS-101-980, sep 2001.

- [31] *Telecommunications. HF radio automatic link establishment*, Federal Telecommunications Standards Committee Std. FED-STD-1045A, 1993.
- [32] *Telecommunications. HF radio modems*, Federal Telecommunications Standards Committee Std. FED-STD-1052, 1996.
- [33] W. N. Furman and J. W. Nieto, "Understanding HF channel simulator requirements in order to reduce HF modem performance measurement variability," in *Proc. Nordic HF conference*, 2001.
- [34] S. Ganguly, A. Jovancevic, and A. Brown, "High data rate hf communication system," in *Proc. International Ionospheric Effects Symposium*, May 2002, pp. 300–307.
- [35] S. Ganguly and A. Brown, "Real-time ionospheric characterization and modelling," in *Proc. International Ionospheric Effects Symposium*, may 2002.
- [36] D. Gauld and N. Arthur, "Implementation of an integrated HF voice and data network," in *Proc. Nordic HF conference*, 2004.
- [37] V. E. Gherm, N. N. Zernov, H. J. Strangeways, and M. Darnell, "Scattering functions for wideband HF channels," in *Proc. of International Conference on HF Radio Systems and Techniques*, Jul 2000, pp. 341–345.
- [38] A. J. Gibson and L. Arnett, "Measurements and statistical modelling of spectrum occupancy," in *Proc. of International Conference on HF Radio Systems and Techniques*, Jul 1994, pp. 150–154.
- [39] W. E. Glase, "Advances in IP data transfer over HF channels," in *Proc. Nordic HF conference*, 2001.
- [40] G. F. Gott, C. R. Poole, P. J. Laycock, S. K. Chan, and A. R. Ray, "Spectral occupancy - measurement system and mathematical models," in *Proc. of International Conference on HF Radio Systems and Techniques*, Jul 1991, pp. 332–336.
- [41] "Harris rf communications home page," Harris, Apr 2006. [Online]. Available: <http://www.rfcomm.harris.com/>
- [42] V. E. Hatfield, "HF communications predictions - ambcom," in *Proc. of Solar-Terrestrial Predictions*, vol. 4, 1980, pp. 1–15.
- [43] "High frequency global communications system home page," High frequency Global Communications System (HFGCS), Sep 2007. [Online]. Available: <http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/systems/hfgcs.htm>
- [44] *Characteristics and applications of atmospheric radio noise data*, International Telecommunication Union Std. CCIR-322-3, 1983.
- [45] *Man-made radio noise*, International Telecommunication Union Std. CCIR-258-3, 1986.
- [46] *Use of high frequency ionospheric channel simulators*, International Telecommunication Union Std. CCIR-520-1, 1986.

- [47] *Testing of HF modems with bandwidth of up to about 12 KHz using ionospheric channel simulators*, International Telecommunication Union Std. ITU-R F.1487, 2000.
- [48] *Radio noise*, International Telecommunication Union Std. CCIR-372-8, 04 2003.
- [49] “ASAPS: Advanced stand-alone prediction system,” Ionospheric Prediction System, Radio and Space Services, P.O. Box 1548, Chatswood, NSW 2057, Australia, Feb 2006.
- [50] E. E. Johnson, R. I. Desourdis, G. Earle, J. C. Ostergaard, and S. Cook, *Advanced high-frequency radio communications*. Artech House Telecommunications Library, 1997.
- [51] J. Kilgallen, “A demography of worldwide HF communications,” in *Proc. Nordic HF conference*, 2004.
- [52] A. Kotlowski, “High data rate 64 kbps waveform for a multiband software defined radio,” in *Proc. Nordic HF conference*, 2001.
- [53] S. Kuba and R. Lowry, “Estimating the performance of error-correcting codes on the HF channel,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 19, no. 5, pp. 802–806, Oct 1971.
- [54] W. R. Lauber, “Radio noise surveys at canadian HF communication sites,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 19, May 1977.
- [55] J. J. Lemmon, “Wideband model of man-made HF noise and interference,” *Radio Science*, vol. 32, no. 2, pp. 525–539, Mar-Apr 1997.
- [56] —, “Wideband model of HF atmospheric radio noise,” *Radio Science*, vol. 36, no. 6, pp. 1385–1391, Nov-Dec 2001.
- [57] R. Lindström, “Wideband modelling of the ionospheric channel,” in *Proc. Nordic HF conference*, 1992.
- [58] F. Marie, L. B. Y. Erhel, D. Lemur, and M. Oger, “Beam-forming techniques operating on HF collocated antennas,” *IEE Electronics Letters*, vol. 41, no. 23, pp. 1261–1262, Nov 2005.
- [59] J. F. Mastrangelo, J. J. Lemmon, and L. E. Vogler, “A new wideband high frequency channel simulation system,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 45, no. 1, pp. 26–34, Jan 1997.
- [60] D. Middleton, “Statistical-physical models of electromagnetic interference,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 19, no. 3, 1977.
- [61] J. D. Milsom, L. W. Barclay, and N. S. Wheadon, “The evolution of an ionospheric forecasting service,” in *Proc. of International Conference on HF Radio Systems and Techniques*, Jul 2000, pp. 181–185.
- [62] J. Mitola, “The software radio architecture,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 33, no. 5, pp. 26–38, May 1995.
- [63] J. W. Nieto, “Higher data rates over HF: current issues and waveform design choices,” in *Proc. Nordic HF conference*, 2004.

- [64] —, “Improving the performance of OFDM in HF multipath/fading channels by the addition of in-band frequency diversity,” in *Proc. Nordic HF conference*, 2004.
- [65] *Characteristics of a robust, non-hopping, serial-tone modulator/demodulator for severely degraded HF radio link*, North Atlantic Treaty Organization Std. STANAG-4415, 1997.
- [66] *Military message handling system (MMHS)*, North Atlantic Treaty Organization Std. STANAG-4406, 1999.
- [67] *Profile for high frequency (HF) radio data communications*, North Atlantic Treaty Organization Std. STANAG-5066, 2000.
- [68] *Technical standards for an automatic radio control system (ARCS) for HF links*, North Atlantic Treaty Organization Std. STANAG-4538, 2000.
- [69] *Technical standards for non-hopping HF communications waveforms*, North Atlantic Treaty Organization Std. STANAG-4539, 2000.
- [70] NTIA, “High frequency radio automatic link establishment (ALE) application handbook,” in *NTIA handbook*, 1998.
- [71] “VOACAP quick guide,” NTIA, Feb 2006. [Online]. Available: <http://www.voacap.com>
- [72] J. G. Proakis, *Digital communications*. McGraw-Hill, 1995.
- [73] I. Raos, A. D. Cacho, I. Pérez-Alvarez, S. Z. E. Mendieta-Otero, H. Santana-Sosa, and J. J.M. Páez-Borralló, “Performance of an OFDM-CDMA HF modem,” in *Proc. of International Conference on HF Radio Systems and Techniques*, Jul 2003, pp. 198–202.
- [74] A. C. G. C. Reis, W. A. Finamore, and P. R. R. L. Nunes, “Improving the performance of HF data link protocol using turbo codes,” in *Proc. IEEE Military Communications Conference*, vol. 1, Oct 2002, pp. 105–108.
- [75] X. Reves, V. Marojevic, R. Ferrus, and A. Gelonch, “FPGA’s middleware for software defined radio applications,” in *Proc. of the International Conference on Field Programmable Logic and Applications*, Aug 2005, pp. 598–601.
- [76] G. Robertson, “Secure digital telephony over HF,” in *Proc. Nordic HF conference*, 2004.
- [77] “Rockwell collins home page,” Rockwell Collins, Sep 2007. [Online]. Available: <http://www.rockwellcollins.com/>
- [78] Y. M. L. Roux, J. Menard, J. P. Jolivet, P. Davy, and A. Bourdillon, “SCIPION: a flexible ionospheric digital sounder. illustration of its capabilities for spatial coherence studies of Es and F regions,” in *Proc. of International Conference on HF Radio Systems and Techniques*, Jul 1997, pp. 25–29.
- [79] “Shares home page,” SHARED RESOURCES (SHARES) High Frequency, Sep 2007. [Online]. Available: <http://www.ncs.gov/shares/>
- [80] J. C. Socoró, J. A. Moran, J. L. Pijoan, and F. Tarres, “A blind joint channel and data estimation algorithm for DS-SS ionospheric radiolink,” in *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, May 2001.

- [81] H. S. Sosa, L. P. Alvarez, S. Z. Bello, E. M. Otero, L. Raos, and J. Lopez-Perez, "Performance over a real link of a hf software radio modem for interactive digital voice communications," in *Proc. Ionospheric Radio Systems and Techniques*, July 2006, pp. 207–211.
- [82] L. Soyer, "HF MESSENGER: european trials and research and development efforts," in *Proc. Nordic HF conference*, 2001.
- [83] A. D. Spaulding, , and J. S. Washburn, "Atmospheric radio noise: worldwide levels and other characteristics," in *NTIA Report*, 1985.
- [84] A. D. Spaulding and R. T. Disney, "Man-made radio noise, part 1: estimates for business, residential, and rural areas," in *Office of Telecommunications Report*, 1974.
- [85] J. Stott, "Digital Radio Mondiale: key technical features," *Journal on Electronics and Communication engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 4–14, Feb 2002.
- [86] J. P. Sudworth, "Approaches to simulation of broadband ionospheric channels and some preliminary results," in *Proc. of International Conference on HF Radio Systems and Techniques*, 1997.
- [87] I. D. Taylor, "Multi-station HF network - challenges and solution," in *Proc. Nordic HF conference*, 2004.
- [88] L. R. Teters, J. L. Lloyd, G. W. Haydon, and D. L. Lucas, "Estimating the performance of telecommunication systems using the ionospheric transmission channel-ionospheric communications analysis and prediction program user's manual," in *NTIA Report*, 1983.
- [89] Texas Instruments, Mar 2006. [Online]. Available: <http://www.ti.com>
- [90] *Interoperability and performance standards for data modems*, U.S. Department of Defense Std. MIL-STD-188-110A, 1991.
- [91] *Interoperability and performance standards for medium and high frequency radio equipment*, U.S. Department of Defense Std. MIL-STD-188-141A, 1991.
- [92] *Interoperability and performance standards for data modems*, U.S. Department of Defense Std. MIL-STD-188-110B, 2000.
- [93] *Interoperability and performance standards for medium and high frequency radio equipment*, U.S. Department of Defense Std. MIL-STD-188-141B, 2001.
- [94] C. Vilella, D. Badia, J. L. Pijoan, M. Deumal, M. Ribó, and J. R. Regué, "On site receiver testing. Application to long distance HF links," in *Proc. International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC Europe 2006*, Sept. 2006.
- [95] C. Vilella, P. Bergadà, M. Deumal, J. L. Pijoan, and R. Aquilué, "Transceiver architecture and Digital Down Converter design for long distance, low power HF ionospheric links," in *Proc. Ionospheric Radio Systems and Techniques*, July 2006, pp. 95–99.
- [96] C. C. Watterson, J. R. Juroshek, and W. D. Bensema, "Experimental confirmation of an HF channel model," *IEEE Transactions on Communication Technology*, vol. 18, no. 6, pp. 792–803, Dec 1970.



- [97] H. Widmer, "On the global EMC aspect of broadband Power Line communications using the HF frequency band," in *Proc. International Seminar on Broadband Communications*, 1998.
- [98] Xilinx, Mar 2006. [Online]. Available: <http://www.xilinx.com>

# Capítol 3

## Enllaç d'HF entre l'Antàrtida i l'Observatori de l'Ebre

### 3.1 Introducció

El treball dut a terme s'emmarca dins els projectes REN2003-08376-C02-01 i CGL2006-12437-C02-01 finançats per l'estat espanyol i desenvolupats de forma conjunta per l'Escola d'Enginyers La Salle (Barcelona) i l'Observatori de l'Ebre (Roquetes), ambdues institucions pertanyents a la Universitat Ramon Llull.

Els objectius del projecte REN2003-08376-C02-01 són: (i) Sondeig i caracterització del canal de comunicacions ionosfèric que s'estableix entre la Base Antàrtica Espanyola (BAE) i l'Observatori de l'Ebre; (ii) Disseny d'un nivell físic adequat per transmissió de dades en aquest enllaç; (iii) Implantació del sistema; (iv) Anàlisi del comportament ionosfèric a la regió Antàrtica i establiment de relacions amb l'activitat geomagnètica. El present treball dóna resposta a diferents aspectes relacionats amb els objectius (i) i (ii) (i en menor mesura (iii)). A més, l'objectiu (i) referent al sondeig de canal té continuïtat en el projecte subsegüent CGL2006-12437-C02-01 amb la intenció de disposar d'una sèrie històrica de dades suficient.

L'Observatori de l'Ebre està present a la Base Antàrtica Espanyola des de la campanya 1995/96, quan s'inicià la instal·lació d'un observatori geomagnètic que ha estat funcionant ininterrompudament fins a l'actualitat (excepte en algunes aturades puntuals degudes a fallades en el subministrament elèctric). Des de 1998 aquestes mesures s'envien cada hora via satèl·lit Meteosat o GOES fins a Roquetes. La comunicació via satèl·lit, però, té un cost elevat. A més la transmissió des de latituds polars presenta dificultats d'apuntament de l'antena cap a òrbites equatorials. En conseqüència, una de les motivacions principals del projecte REN2003-08376-C02-01 és proposar una alternativa a la comunicació via satèl·lit de les dades provinents del sensor geomagnètic, establint un enllaç directe, per rebot ionosfèric, entre la Base Antàrtica Espanyola i l'Observatori de l'Ebre.

Els principals beneficis que se n'obtidrien són: (i) Disposar d'un enllaç de *backup*; (ii) Alternativa de comunicació que no depèn de tercers; (iii) Cost d'explotació gratuït.

Els requeriments mínims que s'estableixen pel que fa a les dades del sensor geomagnètic a transmetre des de la BAE fins a Roquetes són: (i) Tenint en compte que en una fase inicial el sistema ionosfèric funcionaria en paral·lel al sistema via satèl·lit, el flux de dades suportat hauria de ser de 7560 bits per hora quan s'usa GOES o 5040 bits per hora quan

s'usa Meteosat. Aquestes dades les subministra el sensor en paquets cada 12 minuts i un ordinador les formata; (ii) Retard màxim d'enviament de les dades de l'ordre de 24 hores. Per tal d'assolir els objectius (i), (ii) i (iii) del projecte s'estableix un pla de treball a tres anys amb les fites següents: (i) Estudi de la viabilitat de l'enllaç; (ii) Mesures d'interferència en recepció. Determinació del pla de freqüències de sondeig. (veure [11]); (iii) Disseny del transceptor (veure apartat 3.3 i [12]); (iv) Mesures de canal (veure capítol 4); (v) Disseny i optimització de la capa física per la transmissió de dades (veure capítol 5).

Els apartats compresos entre l'actual i 3.3 estan dedicats a la descripció d'aspectes rellevants relacionats amb la consecució dels objectius del projecte REN2003-08376-C02-01. A continuació als capítols 4 i 5 s'expliquen les contribucions d'aquesta tesi a l'assoliment dels objectius esmentats.

Pel que fa a la situació i característiques de la ubicació de l'emissor i el receptor, convé esmentar que la Base Antàrtica Espanyola està situada a l'illa Livingstone (62.6S, 60.4W) (veure mapes de la figura 4.2 a l'apartat 4.4), fus horari UTC-3. Està formada per diversos mòduls (habitabilitat, laboratoris, magatzems, etc.) situats a ran de mar. La Base només està operativa coincidint amb l'estiu austral, des de principis de novembre fins a principis de març. En aquest període està habitada per tècnics de la UTM<sup>1</sup> (muntanya, manteniment, etc.) que conviuen amb científics de diferents àmbits (geòlegs, biòlegs, físics, enginyers, etc.). Per altra banda l'Observatori de l'Ebre està ubicat a Roquetes (40.8N, 0.5E), fus horari UTC+1. Les seves àrees d'expertesa inclouen la ionosfera, el geomagnetisme, la sísmica i la meteorologia, clima i activitat solars.

L'enllaç unidireccional s'estableix entre la Base i l'Observatori, essent l'angle d'azimut de sortida de 45.5 graus (nord-est) i l'angle d'azimut d'arribada de 206.2 (sud-oest). Els angles d'elevació previstos són sempre inferiors a 10 graus. La distància total de l'enllaç sobre la superfície de la Terra és aproximadament de 12700 quilòmetres. Per tant, les pèrdues per espai lliure esperades són de 135 dB a 10 MHz. Referent a aquesta dada, i en relació amb les pèrdues reals de l'enllaç, cal tenir en compte que: (i) La velocitat de propagació de l'ona dins el medi ionitzat serà inferior a la del buit, de forma que l'atenuació s'incrementarà; (ii) Es produiran pèrdues addicionals per absorció a la ionosfera i per reflexió. A l'apartat 4.4 es completa aquesta informació.

## 3.2 Consideracions generals

Abans de posar en context el treball de recerca i descriure les seves contribucions precisarem l'ús que d'alguns conceptes es fa d'ara en endavant així com alguns aspectes generals a tenir en compte.

Amb el terme *radiomodem* ens referirem al dispositiu que en emissió s'encarrega de generar el senyal banda base a enviar a partir dels bits a transmetre i en recepció duu a terme la funció inversa. Són tasques associades al radiomodem la modulació i demodulació, codificació i descodificació, equalització, sincronització de temps i freqüència, etc.

Amb el terme *emissor* farem referència al dispositiu encarregat de traslladar el senyal banda base a la freqüència i potència a la que s'haurà de transmetre. Les funcions més importants

---

<sup>1</sup>Unidad de Tecnología Marina [10], adscrita al CMIMA (*Centro Mediterráneo de Investigaciones Marinas y Ambientales*), que forma part de l'àrea de recursos naturals del CSIC (*Consejo Superior de Investigaciones Científicas*)

de l'emissor es poden dividir en mescla, filtratge i amplificació. L'amplificació és una tasca reservada a l'àmbit analògic, mentre que la mescla i el filtratge es realitzen de vegades en analògic i altres en digital. Quan la mescla es realitza totalment o en part en digital, l'emissor ha d'incrementar la freqüència de mostreig del senyal generat pel radiomodem, de forma que la interpolació esdevé una tasca necessària per l'emissor així dissenyat. El *receptor* és el dispositiu anàleg a l'*emissor*, encarregat d'amplificar, filtrar i mesclar el senyal rebut per antena cap a la banda base. En cas d'implementar mescla en digital, el receptor haurà d'incloure etapes delmadores. Anomenarem *transceptor* al conjunt format per l'*emissor*, el *receptor* i les antenes.

L'enllaç a establir entre l'Antàrtida i Roquetes no disposa d'una assignació exclusiva d'ample de banda per realitzar-lo. Cal tenir en compte que la transmissió per rebot ionosfèric a la banda d'HF té abast mundial i marge de freqüències escàs. La ITU a nivell internacional, i el CNAF [8] a Espanya, són els encarregats de regular l'ús de l'espectre. A tal efecte la Terra està dividida en tres regions, i a cada regió l'espectre està fraccionat en bandes, cadascuna de les quals destinada a usos més o menys concrets: amateur, aeronàutic, *broadcast*, marítim, etc. El projecte de recerca que ens ocupa no s'hauria de limitar a una o poques freqüències ja que és objectiu del mateix caracteritzar el canal i la seva disponibilitat. Per tal de fer compatible aquest objectiu amb les recomanacions de la ITU s'han pres un conjunt de mesures que tenen per objectiu minimitzar la interferència produïda sobre altres sistemes: (i) Potència de transmissió baixa; (ii) Modulacions d'ample de banda elevat i de densitat espectral de potència reduïda; (iii) Limitació en el temps d'ocupació d'una freqüència; (iv) Limitació en el mínim període d'ús d'una freqüència. Per altra banda, el nivell físic a dissenyar haurà de tenir com a objectiu prioritari la robustesa enfront les interferències (ja siguin dins o fora de l'ample de banda de transmissió). A l'apartat 5.1.3 s'aprofundeix en aquestes idees.

A l'hora d'establir un enllaç per rebot ionosfèric cal tenir en compte els aspectes següents:

- La *disponibilitat* de l'enllaç és el conjunt de freqüències a les quals és físicament possible establir la comunicació. Ve determinada per la ionosfera, essent la LUF i la MUF les freqüències mínima i màxima disponibles respectivament.
- L'*atenuació* de l'enllaç és funció de la distància entre l'emissor i el receptor, de l'absorció de la ionosfera, de les pèrdues per reflexió, etc.
- La *dispersió* introduïda pel canal, ja sigui temporal (*multipath* i *delay spread*) o freqüencial (*Doppler spread*), depèn de l'estructura i moviment de les capes de la ionosfera que l'ona travessa en el seu camí des de l'emissor al receptor.
- El *soroll* i la *interferència* són paràmetres que depenen en gran mesura de la ubicació del receptor. En general considerarem soroll aquells senyals que no transmeten informació (soroll tèrmic, atmosfèric, humà, etc.), mentre que la interferència prové de comunicacions entre altres usuaris. En una comunicació la interferència es pot manifestar: (i) Dins de l'ample de banda de transmissió, degradant la SNR; (ii) Fora de l'ample de banda de transmissió en freqüències adjacents; (iii) Fora de l'ample de banda de transmissió, en freqüències llunyanes.

Quan un enllaç està disponible a una determinada freqüència, la possibilitat d'establir-lo o no dependrà de: (i) L'atenuació; (ii) Les característiques dels elements radiants (antenes);

(iii) Les prestacions de l'emissor, principalment la potència de sortida; (iv) Les prestacions del receptor, principalment en aquells aspectes relacionats amb l'amplificació i el filtratge; (v) La capacitat del radiomodem per obtenir un BER baix (en transmissió de dades) o una estimació de canal bona (en sondeig de canal), donades les característiques de dispersió del canal i SNR dins de la banda de transmissió.

Els paràmetres més rellevants per tal de caracteritzar les prestacions del receptor i el radiomodem són: (i) La *sensibilitat* és una mesura de la robustesa enfront el soroll; (ii) La *selectivitat en relació a canals adjacents* és una mesura de la robustesa enfront de la interferència situada fora de l'ample de banda de transmissió, a freqüències properes; (iii) El *bloqueig* és una mesura de la robustesa enfront la interferència situada fora de l'ample de banda de transmissió, a freqüències llunyanes. Els estàndards de comunicacions, a més d'especificar el nivell físic de la transmissió (ample de banda, canalització, modulació, etc.), inclouen valors límit per la *sensibilitat*, *selectivitat* i *bloqueig* que els equips han d'assegurar per ser homologats. Donat que el projecte de recerca vinculat a l'enllaç entre l'Antàrtida i Roquetes pretén dissenyar un nivell físic ad hoc, les proves de qualitat no poden ser mesurades fins que les característiques de la transmissió hagin estat definides.

En general, l'establiment de l'enllaç pot tenir dos objectius: (i) Sondejar la ionosfera per tal de verificar-ne la disponibilitat, i obtenir informació de dispersió i SNR (entre altres); (ii) Transmetre dades a una velocitat màxima amb el mínim BER. Tal i com s'ha indicat anteriorment, la disponibilitat de l'enllaç és condició necessària però no suficient per l'establiment d'un enllaç, de forma que el sondeig de canal només podrà assegurar la disponibilitat de l'enllaç (mai la no disponibilitat).

El *pla de freqüències* és el conjunt de freqüències que s'usen per transmetre dades o sondejar el canal. En relació amb el pla de freqüències cal tenir en compte que: (i) Haurà d'estar contingut dins el marge de disponibilitat de l'enllaç; (ii) Està condicionat pel marge de funcionament òptim del transceptor, especialment de les antenes; (iii) Les freqüències contingudes en el pla han de ser tals que en recepció continguin estadísticament interferència i soroll baixos dins de l'ample de banda de transmissió.

### 3.2.1 Estudi de viabilitat

Per tal d'estudiar la viabilitat de l'enllaç per rebot ionosfèric entre la Base Antàrtica Espanyola i Roquetes es proposà una bateria de proves de sondeig per obtenir resultats preliminars pel que fa a la possibilitat d'establir l'enllaç i a les característiques del canal. Aquest treball es va dur a terme durant la campanya 2003/04.

En aquesta primera fase d'estudi de viabilitat de l'enllaç es decideix usar l'arquitectura transceptora basada en equips comercials mostrada a la figura 3.2. Destaquem que:

- L'antena escollida tant en emissió com en recepció és un monopol. Es tria pels motius següents: (i) Amb un sintonitzador d'antena permet abastar una banda de freqüències gran; (ii) És fàcil d'instal·lar ja que no requereix grans estructures. Aquest factor és determinant a l'Antàrtida, on és prioritari conservar l'entorn evitant obres que puguin degradar-lo.
- El transceptor utilitzat és un equip comercial Kenwood TS-870S. Les seves característiques més rellevants són: (i) Cobreix tota la banda d'HF; (ii) Permet canals de fins a 3 KHz d'ample de banda en emissió i fins a 6 KHz en recepció; (iii) Potència d'emissió de 100 watts.



Figura 3.1: Ubicació de l'antena a la Base Antàrtica Espanyola

- En emissió, un ordinador telecomanda el transceptor i genera el senyal de sondeig (àudio) des de l'entorn *software* Matlab.
- En recepció, a més del transceptor l'ordinador telecomanda un analitzador d'espectres configurat en mode *zero span* amb un *resolution bandwidth* reduït (entre 30 i 100 Hz) per tal de determinar de forma ràpida la disponibilitat de l'enllaç durant l'interval de sondeig mitjançant un to no modulad (veure a continuació)
- Emissor i receptor estan sincronitzats en temps mitjançant un GPS.

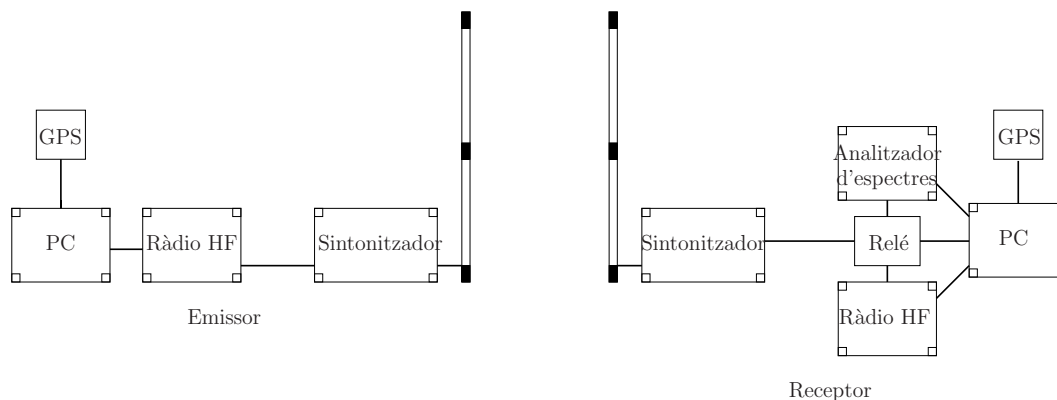


Figura 3.2: Arquitectura transceptora per la fase d'estudi de la viabilitat de l'enllaç

L'avaluació de l'enllaç es duu a terme enviant senyals de prova a diferents freqüències segons el pla següent (veure capítol 4):

- Cada hora se sondejen fins a 56 freqüències preseleccionades.
- Cada freqüència s'usa durant un minut.
- A cada minut s'estableixen els intervals configurables següents: (i) Adaptació d'antena mitjançant un to de baixa potència; (ii) Sondeig mitjançant un to no modulats; (iii) Sondeig mitjançant seqüències.

A l'Observatori de l'Ebre s'emmagatzemen al PC els senyals rebuts per un anàlisi posterior. El sondeig a partir de l'enviament d'un to no modulats permet captar l'envolupant del senyal rebut. El sondeig mitjançant seqüències permet obtenir les característiques del canal en un determinat ample de banda en termes de *delay* i *Doppler spread*.

Les principals limitacions d'aquesta arquitectura es poden agrupar en:

- Heterogeneïtat del sistema: (i) Elevada complexitat i cost de l'arquitectura, formada per diversos equips comercials no especialitzats interconnectats entre sí mitjançant interfícies dissenyades ad hoc que sovint s'han d'ajustar manualment; (ii) La robustesa del sistema en campanyes de sondeig llargues està limitada per l'estabilitat dels ordinadors i del software corresponent. S'observa durant aquesta fase preliminar que aquest inconvenient és especialment greu en emissió, degut probablement a problemes d'autointerferència per la proximitat de l'antena a l'emissor.
- Poca flexibilitat i prestacions limitades: (i) L'ample de banda màxim de sondeig està fixat en emissió a 3 KHz; (ii) En recepció no es pot governar ni obtenir informació del guany aplicat pel transceptor i, en conseqüència, no és possible el càlcul de les pèrdues de l'enllaç a partir del sondeig per seqüència.

Aquesta plataforma s'instal·la tant a la Base Antàrtica Espanyola com a Roquetes durant el mes de desembre de 2003. A l'Antàrtida el sistema s'ubica en un turó anomenat *Pico radio* (veure figures 3.3 i 3.4) pels motius següents:

- Està elevat uns 100 metres per sobre del nivell del mar. En la direcció de Roquetes (azimut de 46.5 nord-est) a l'illa hi ha dos obstacles orogràfics rellevants: (i) Pic d'uns 200 metres d'alçada situat a 2.5 Km, entre *Punta Hespérides* i *Monte Charrúa*; (ii) Alçades d'uns 300 metres a uns 7 Km., corresponents a les faldilles del *Pico Burdick*. Per tant, instal·lant el sistema a *Pico radio* l'enllaç està lliure d'obstacles per angles d'elevació superiors a 1.5 graus.
- Prop del cim del turó hi ha una esplanada d'uns 1000 metres quadrats aproximadament, adient per la instal·lació del monopòl i els equips corresponents.
- La distància entre *Pico radio* i la Base (uns 500 metres en línia recta) no és excessiva, de forma que: (i) El manteniment de la instal·lació es pot fer diàriament sense requerir desplaçaments llargs ni la intervenció de tècnics de muntanya; (ii) La secció dels cables d'alimentació elèctrica de corrent altern monofàsic que s'hi ha de fer arribar per garantir una pèrdua de tensió baixa (inferior a 10 volts) per un consum esperat de l'ordre de 1 Kw és de 12 mm<sup>2</sup>, assumible donades les limitacions logístiques a la Base.
- La distància entre *Pico radio* i la localització dels sensors geomagnètics situats a prop de *Punta Polaca* (menys de 400 metres en línia recta) no és excessiva, de forma que les pèrdues esperades del cable de RF que haurà d'unir ambdues ubicacions serà de l'ordre de 8 dB a la freqüència de 10 MHz.

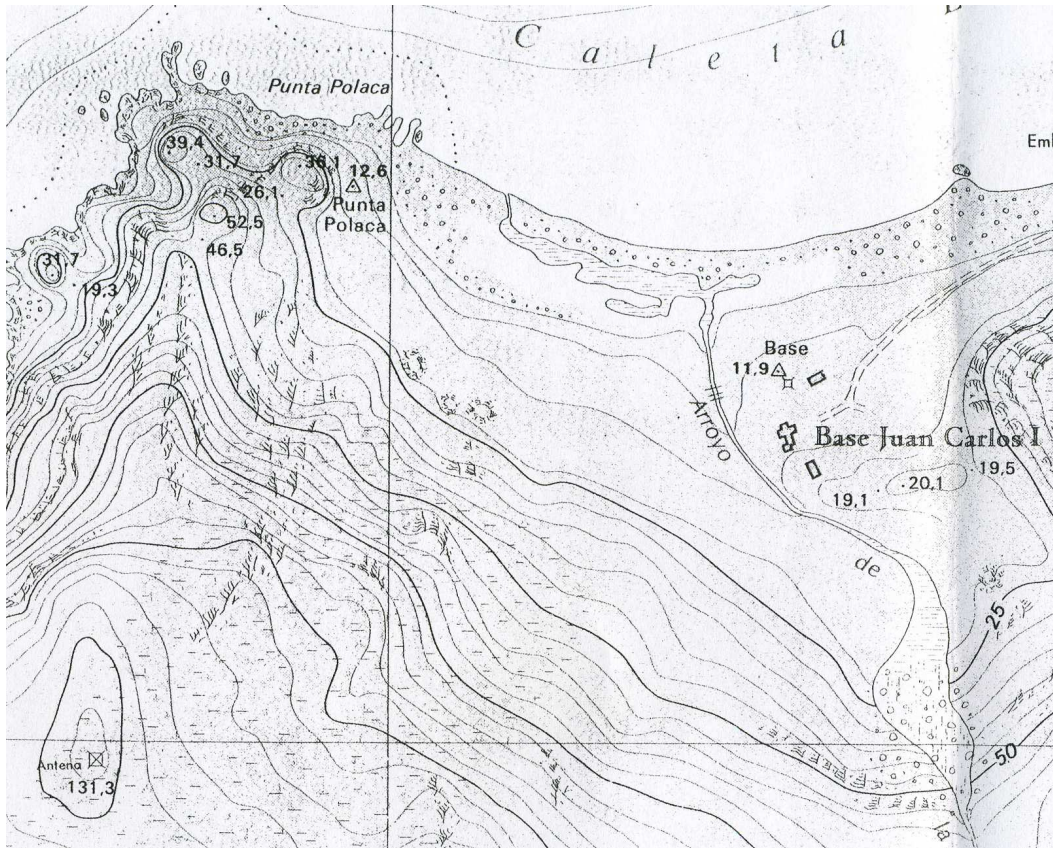


Figura 3.3: Mapa de l'entorn on està situada la Base Antàrtica Espanyola a l'Illa Livingston. Destaquem la ubicació de la *Base Antártica Española*, *Punta Polaca* i *Antenas (Pico Radio)*

El sistema descrit estigué en funcionament durant 9 dies pertanyents als mesos de desembre del 2003 i gener del 2004. Els resultats dels anàlisis (veure [13]) mostren un *delay spread* entre 1.5 i 6 ms i un *Doppler spread* entre 0.4 i 2 Hz en un ample de banda sondejat de 3 KHz.

### 3.3 Disseny del transceptor

Per tal de superar els inconvenients de la plataforma preliminar descrita a l'apartat anterior es proposa el disseny d'un transceptor basat en una plataforma digital flexible amb les característiques següents:

- Alt grau de configurabilitat, que permeti (i) Funcionament en mode de sondeig o transmissió de dades; (ii) Qualsevol tipus de modulació, a qualsevol freqüència de la banda d'HF i amplex de banda elevats (majors a 3 KHz); (iii) Experimentar amb diferents arquitectures transceptores: incorporant ASICs, VHDL, conversió directa, heterodinatge, ...
- Capacitat computacional suficient per tal de en un futur permetre la implementació a





Figura 3.4: Ubicació aproximada de l'antena a *Pico Radio* - Base Antàrtica Espanyola

temps real de la capa física per transmissió i recepció de dades.

- En emissió: (i) Potència transmesa al voltant de 200 watts; (ii) Funcionament autònom (sense PC) per tal d'evitar problemes d'autointerferència
- En recepció: (i) Connectivitat d'alta velocitat amb un PC per tal d'emmagatzemar les proves de sondeig a disc i analitzar-les amb posterioritat; (ii) En analògic, amplificadors de guany variable control·lables digitalment; (iii) En analògic, filtre pas banda sintonitzable digitalment per tal de millorar les prestacions de bloqueig.

La situació tecnològica del moment (any 2003) ja permetia afrontar la implementació de les arquitectures emissora i receptora basada principalment en tecnologia digital, ja que: (i) Hi ha disponibles conversors A/D i D/A que permeten freqüències de mostreig per sobre de 60 MSPS i nombre de bits elevat (fins a 14); (ii) Hi ha dispositius ASIC mescladors i delmadors / interpoladors capaços de treballar a aquestes freqüències oferint alhora eficiència energètica; (iii) Hi ha dispositius de lògica programable (principalment FPGA) amb capacitat elevada (evaluada en nombre de recursos lògics) i velocitat suficient per afrontar la implementació basada en aquesta tecnologia. S'opta, doncs, per experimentar amb una arquitectura digital generant i rebent el senyal de RF directament en aquest domini, atribuint a la part analògica únicament funcions d'amplificació i filtratge.

Els principals beneficis d'aquesta arquitectura en què les prestacions vénen determinades principalment pel *software* són: (i) Configurabilitat, des dels paràmetres banda base (formes d'ona, algorísmica de codificació, detecció, etc.) fins als de ràdio freqüència (ample de

banda, freqüència central, etc.); (ii) Reprogramabilitat, que permet afegir, canviar i treure funcionalitat segons la fase del disseny o les prestacions desitjades sense haver de retocar el *hardware*; (iii) Facilitat a l'hora de replicar el disseny; (iv) Possibilitat de migrar el sistema a altres plataformes més avançades amb un nombre mínim de canvis; (v) Determinisme en l'execució, estabilitat enfront la temperatura i/o humitat, reducció de la necessitat d'ajustos, major immunitat al soroll, etc.

Per altra banda, es detecta que el principal inconvenient d'aquesta arquitectura és la limitada dinàmica de potència que ofereix. Concretament l'any 2003 d'entre els convertors A/D que permeten freqüències de mostreig per sobre de 60 MSPS, el màxim nombre de bits està limitat a 14 (no fou fins a finals de 2005 que es van començar a comercialitzar convertors de 16 bits). En conseqüència, la màxima relació de potències entre el màxim senyal no desitjat i el mínim senyal d'interès esperat a l'entrada del convertor A/D està teòricament limitat a uns 80 dB, suposant: (i) Marge dinàmic ideal del convertor de 84 dB; (ii) Màxima potència a l'entrada de l'A/D 3 dB per sota del fons d'escala; (iii) Senyal esperat quantificat al nivell del soroll de quantificació. A la pràctica, però, degut a que les prestacions reals dels convertors són inferiors a les teòriques (no-linearitats, soroll, etc.) i a la necessitat de codificar el senyal amb una mínima relació senyal a soroll de quantificació (SQNR), la màxima diferència admissible de potència entre el senyal útil i qualsevol altre senyal interferent serà menor a 80 dB.

La implementació del transceptor s'ha dut a terme en cinc fases: (i) Disseny de la plataforma digital (*hardware*), finalitzada l'any 2003; (ii) Disseny de la part analògica del transceptor, realitzada durant l'any 2004; (iii) Disseny del *software* de l'emissor (VHDL), enllestit per la campanya 2004/05; (iv) Disseny del *software* del receptor (VHDL), posat en funcionament durant la campanya 2005/06; (v) Incorporació d'un control automàtic de guany en recepció, operatiu a partir de la campanya 2006/07. A continuació es descriuen breument cadascuna d'aquestes fases. A [12] s'amplia part d'aquesta informació fent èmfasi en les contribucions realitzades en l'àmbit del disseny del *software* del receptor.

### 3.3.1 Disseny de la plataforma digital

A la figura 3.5 s'aprecia una fotografia de la plataforma digital [6] sobre la que s'ha implementat el transceptor usat per sondejar i transmetre dades en l'enllaç Antàrtida - Roquetes. L'arquitectura per emissió i recepció és dual, on l'element central de cada part és un dispositiu de lògica programable FPGA Virtex de Xilinx.

A més, en recepció:

- S'escull el convertor A/D AD6644 d'Analog Devices [3], amb les característiques següents: (i) Velocitat de mostreig fins a 65 MSPS, que en teoria permet mostrejar directament tota la banda d'HF; (ii) 14 bits de resolució (marge dinàmic de 84 dB), SNR de 74 dB i pitjor espuri per sota dels 100 dBFS. L'AD6644 és el millor convertor A/D del moment pel que fa al conjunt de les característiques esmentades.
- S'inclou el *Digital Down Converter* AD6620 d'Analog Devices [1], que permet: (i) Freqüència de mostreig a la seva entrada fins a 67 MSPS; (ii) Factor de delmació configurable fins a 16384; (iii) Arquitectura basada en dos filtres *comb* (CIC2 i CIC5) i un FIR programable de 256 coeficients que permet assegurar rebuigs d'*aliasing* elevats, segons les necessitats del disseny.

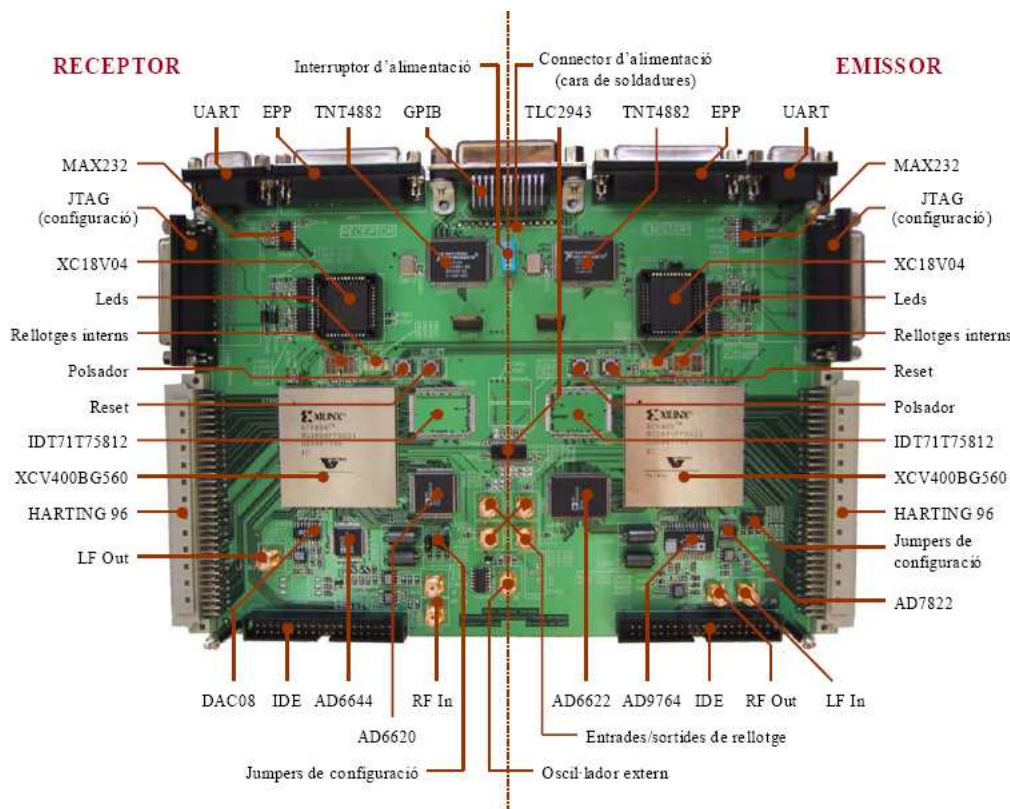


Figura 3.5: Fotografia de la plataforma digital usada per transmissió i recepció de dades

Per altra banda, en emissió s'escullen: (i) El convertor D/A AD9764 [5], de 14 bits i 100 MSPS, (ii) El *Digital Up Converter* AD6622 [2], amb prestacions homòlogues i arquitectura dual al dispositiu de recepció.

La plataforma disposa de diverses interfícies que permeten ampliar-ne la funcionalitat. Els connectors Harting, per exemple, s'usen per dotar a l'arquitectura de memòria *flash* per emmagatzemar paràmetres de la sessió (intervalls de sondeig, formes d'ona, etc.). El connector sèrie DB-9, per altra banda, s'usa per tal d'obtenir l'hora UTC d'un GPS i aconseguir així la sincronia de temps entre emissor i receptor.

Cal destacar que tots els dispositius i interfícies estan directament connectats (en configuració d'estrella) a la FPGA de forma que la configurabilitat pel que fa a l'arquitectura d'emissió i recepció és màxima. Les dues FPGA (corresponents a emissió i recepció) estan també connectades entre sí a través d'un bus directe, de forma que la compartició de capacitat computacional entre ambdós dispositius és possible.

### 3.3.2 Disseny de la part analògica

A la figura 3.6 es pot observar el diagrama de blocs de l'emissor. El filtre pas baix (LPF) té una banda de pas fins a 22 MHz i a 32 MHz introdueix més de 20 dB d'atenuació. S'usa per a reduir les components d'alta freqüència generades pel convertor D/A. L'amplificador de potència (BONN BLWA0103-250) genera fins a 250 watts. El sintonitzador d'antena (SGC-

235) assegura una ROE inferior a 2 a totes les freqüències de treball. El monopòl té una llargada de 7.5 metres. A la figura 3.7 s'inclouen les mesures de resposta en freqüència de la plataforma digital, del filtre pas baix, de l'amplificador de potència i la resposta global. El guany de l'amplificador s'ha mesurat per la potència d'entrada tal que a la sortida genera 250 watts a la freqüència més baixa. La mesura de radiació del monopòl en emissió, en la direcció aproximadament de l'Observatori de l'Ebre, es mostra a la figura 3.8.

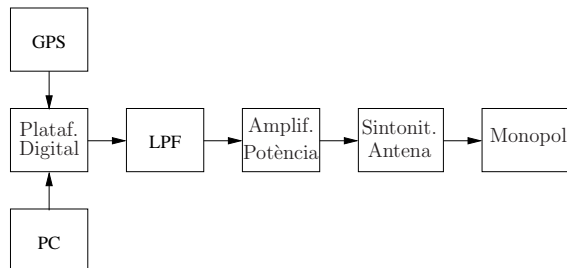


Figura 3.6: Diagrama de blocs de l'emissor

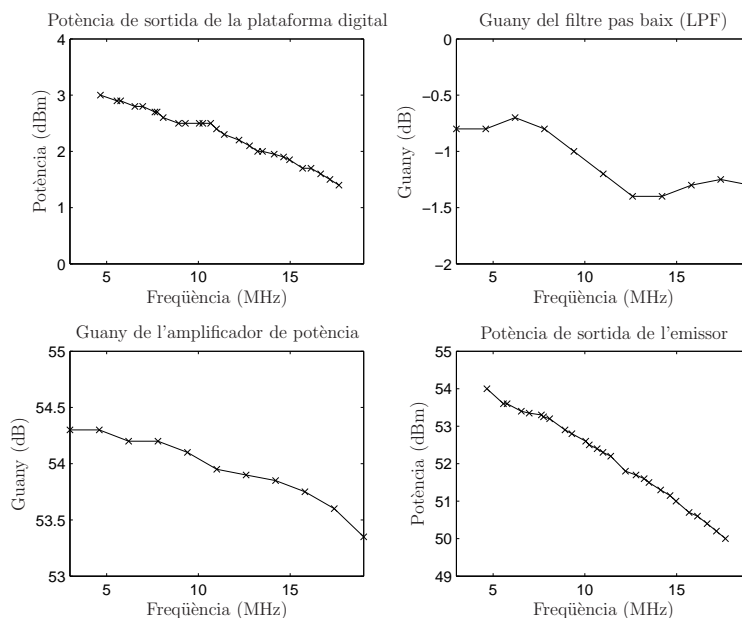


Figura 3.7: Resposta en freqüència de l'emissor

A la figura 3.9 es pot observar el diagrama de blocs del receptor. Després del monopòl (idèntic al d'emissió) i del sintonitzador d'antena (model SGC-230 [9]), a peu d'antena s'amplifica el senyal amb un amplificador de baix soroll (LNA AR-P1-30) de 20 dB de guany, punt de compressió 1 dB a 22 dBm i figura de soroll 2.5 dB. El filtre pas banda (BPF ICE1001 de *Pole Zero* [7]) té una freqüència central configurable digitalment a tota la banda d'HF, un ample de banda 3 dB del 3% respecte a la freqüència central, i un factor de forma (relació d'amplès de banda a 3 dB i a 30 dB) aproximadament igual a 20. Seguidament un amplificador

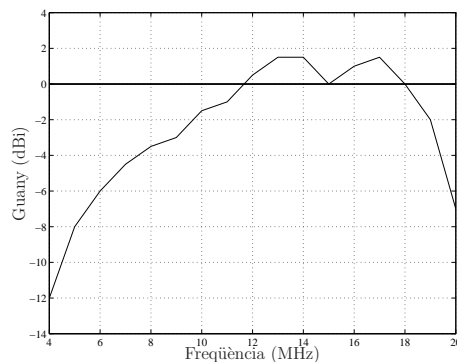


Figura 3.8: Guany del monopòl (emissor)

de guany variable (VGA AD8369 d'*Analog Devices* [4]) que permet configurar digitalment un guany entre -13 dB i 32 dB, en salts de 3 dB. El filtre pas baix (idèntic al d'emissió) té funcions anti-aliasing.

A la figura 3.10 es mostra el guany del monopòl situat a l'Observatori de l'Ebre, mesurat mitjançant una sonda de camp proper.

S'observa que en recepció cal sintonitzar també el monopòl emetent, abans de rebre, un to de baixa potència durant el període d'adaptació d'antena. Per tal de separar la cadena d'emissió i recepció s'usa un *switch* de ràdio freqüència.

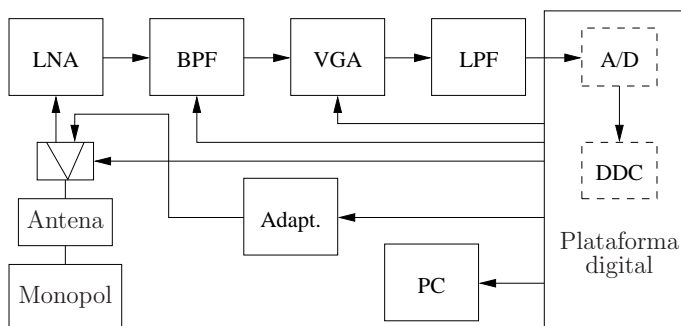


Figura 3.9: Diagrama de blocs del receptor

Destaquen els aspectes de disseny següents:

- El BPF s'encarrega d'atenuar els senyals captats per l'antena situats més enllà de la banda de pas del filtre (e.g. 60 KHz quan la freqüència usada és 4 MHz, però 225 KHz quan la freqüència usada és 15 MHz). Aquells senyals situats dins de la banda de pas del filtre, entre ells el senyal d'interès, seran convertits a digital per l'A/D. En aquesta situació, la màxima relació de potències entre el màxim senyal no desitjat i el mínim senyal d'interès esperat no hauria de superar una certa quantitat de dBs. En cas contrari, o bé el convertidor A/D treballarà saturat o bé el senyal d'interès estarà dèbilment quantificat.
- El guany del VGA es fixa en primera instància estàtic per cada freqüència, en funció de

mesures de pitjor cas de potència rebuda promitjada per diversos dies a l'Observatori de l'Ebre (veure apartat 3.3.5).

La planura del guany del LNA és millor a 0.5 dB en el rang comprès entre 1 i 30 MHz.

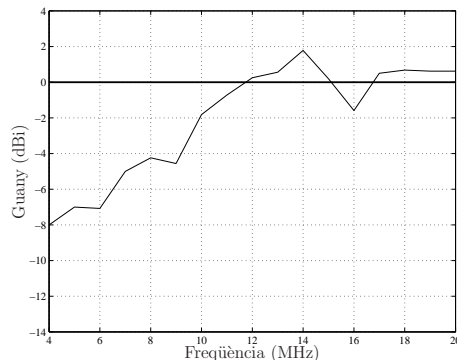


Figura 3.10: Guany del monopol (receptor)

Durant totes les campanyes, el sondeig s'ha limitat de 4 a 18 MHz ja que més enllà d'aquest rang els dispositius que intervenen en el procés presenten una no-linealitat de la resposta en freqüència més acusada.

### 3.3.3 Disseny del *software* de l'emissor

A la figura 3.11 es mostra el diagrama de blocs del *software* de l'emissor. La configuració de la sessió (formes d'ona, intervals i freqüències de sondeig, etc.) s'emmagatzema a la flash. Una màquina d'estats síncrona governa el procés d'emissió en funció de l'hora UTC adquirida d'un GPS. El senyal de ràdio freqüència digital es genera mitjançant el DUC AD6622, a continuació s'ajusta la seva amplitud per tal de compensar la distorsió en freqüència dels dispositius analògics i finalment es lliura al D/A AD9756. El PC es necessita únicament per reconfigurar la sessió, mentre que en règim de funcionament normal l'emissor és autònom.

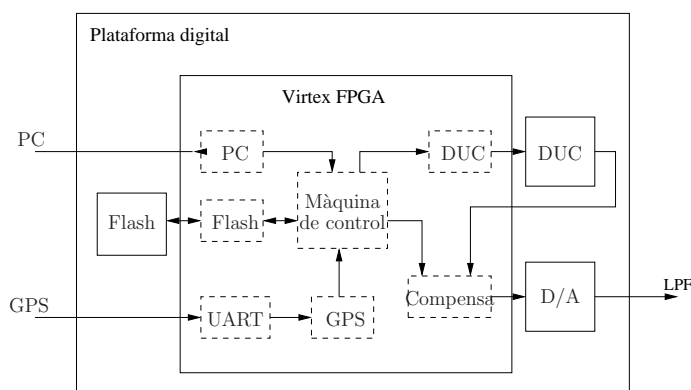


Figura 3.11: Diagrama de blocs del *software* de l'emissor

A tall d'exemple es detalla la configuració de transmissió usada durant la campanya 2005/06

(s'explicarà amb detall al capítol 4):

- Intervals de transmissió: (i) Des de 18:00 UTC d'un dia fins a les 13:00 UTC del dia següent; (ii) Adaptació d'antena des del segon 5 al 15; (iii) Sondeig mitjançant un to no modulad des del segon 21 a 26; (iv) Sondeig per seqüència des del segon 25 al 50.
- Freqüències usades: 24 freqüències entre 4 i 18 MHz.
- Freqüència de mostreig del senyal banda base: (i) 150 KSPS per sondeig; (ii) 37.5 KSPS per dades.
- Freqüència de mostreig del senyal de ràdio freqüència: 60 MSPS. Per tant, el DUC aplica una interpolació de: (i) 400 per sondeig; (ii) 1600 per dades.
- Configuració del DUC: (i) Per sondeig, RCF interpolant 25 mitjançant un filtre interpolador d'ordre 1 i 49 coeficients i etapes CIC5 i CIC2 aplicant factors de canvi de mostreig de 4 cadascun; (ii) Per dades, RCF interpolant 50 mitjançant un filtre interpolador d'ordre 1 i 99 coeficients i etapes CIC5 i CIC2 aplicant factors de canvi de mostreig de 8 i 4 respectivament.

### 3.3.4 Disseny del *software* del receptor

A la figura 3.12 es mostra el diagrama de blocs del *software* del receptor. Les principals diferències amb l'emissor són: (i) El DDC s'ha implementat en VHDL i s'ha executat sobre la FPGA. Per tant, el DDC AD6620 no s'ha usat. A [12] es justifica aquesta decisió; (ii) Es necessari un PC per emmagatzemar les formes d'ona rebudes a disc; (iii) A cada sondeig és necessari programar el filtre pas banda, l'amplificador de guany variable i commutar adequadament el *switch* de ràdio freqüència per alternar entre el període d'adaptació d'antena (emissió de baixa potència) i la recepció del to no modulad i de la seqüència de sondeig.

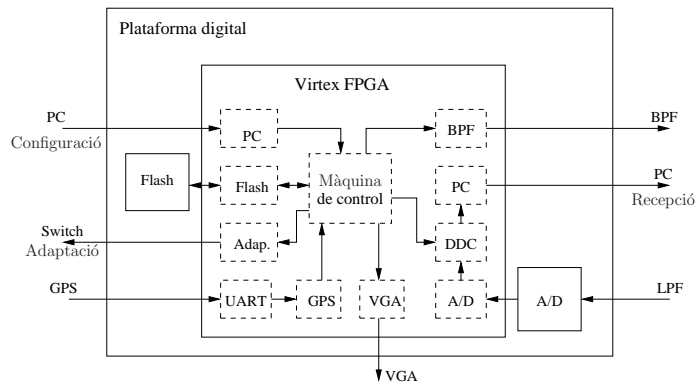


Figura 3.12: Diagrama de blocs del *software* del receptor

A tall d'exemple es detalla la configuració durant la campanya 2005/06 en aquells aspectes propis del receptor:

- Freqüència de mostreig del senyal de ràdio freqüència: 60 MSPS. Freqüència de mostreig del senyal banda base: 50 KSPS, mostres complexes.

- Arquitectura del DDC: 7 etapes delmadores implementades usant estructures de filtres FIR de resposta impulsional curta, en cascada, tal i com s'explica amb detall a [12],
- El pla de freqüències es detalla al capítol 4,

### 3.3.5 Control automàtic de guany

Fins a la campanya 2005/06 (inclosa) l'amplificador de guany variable (VGA a la figura 3.9) s'ajustava estàtic per cada freqüència en funció de mesures del nivell de potència interferent i soroll realitzades a l'Observatori de l'Ebre durant diverses nits. Aquest mètode presenta diferents inconvenients, ja que l'ocupació espectral varia en funció de l'hora, del dia, de l'època de l'any, etc. En conseqüència la quantitat de mesures exitoses disponibles fins a la campanya 2005/06 no és la millor possible ja que tant pot ocórrer que s'apliqui un guany excessiu que saturi el convertidor A/D com que el guany sigui massa baix i el senyal estigui per sota del soroll de quantificació del convertidor.

Durant la campanya 2006/07 es posa en funcionament un detector de potència i un algorisme d'ajust del VGA, implementats en el domini digital, que fixa el guany de l'amplificador a cada minut en base a mesures d'ocupació espectral. Concretament el detector opera just després del convertidor A/D i realitza una mesura de la potència rebuda, amitjanada durant diversos segons, en els instants compresos entre l'adaptació d'antena i l'inici de la transmissió. L'ample de banda de mesura coincideix aproximadament amb el del filtre BPF (veure figura 3.9) i és, per tant, de l'ordre de pocs centenars de KHz. En aquestes condicions la contribució de la potència del senyal transmès a la lectura de la potència total mesurada seria menyspreable, i per aquest motiu la detecció de potència es realitza en absència de senyal transmès. Seguidament un algorisme ajusta el guany del VGA per tal que a l'entrada del convertidor A/D la potència total se situï al voltant de 9 dB per sota de fons d'escala. Aquesta guany queda fix durant tot el minut, fins al nou canvi de freqüència, i per aquest motiu s'ha escollit un marge relativament elevat (fins a 9 dB) a l'hora ajustar la potència del senyal respecte al fons d'escala del convertidor.



# Bibliografia

- [1] “AD6620 67 MSPS digital Receive Signal Processor datasheet,” Analog Devices, Mar 2006. [Online]. Available: <http://www.analog.com>
- [2] “AD6622 65 MSPS, Quad Transmit Signal Processor (TSP) datasheet,” Analog Devices, Mar 2006. [Online]. Available: <http://www.analog.com>
- [3] “AD6644 14-bit, 65 MSPS Wideband Analog-to-Digital Converter datasheet,” Analog Devices, Mar 2006. [Online]. Available: <http://www.analog.com>
- [4] “AD8369 600 MHz, 45 dB Digitally Controlled Variable Gain Amplifier datasheet,” Analog Devices, Mar 2006. [Online]. Available: <http://www.analog.com>
- [5] “AD9764 14-bit, 100 MSPS TxDAC D/A Converter datasheet,” Analog Devices, Mar 2006. [Online]. Available: <http://www.analog.com>
- [6] M. Deumal, “Plataforma software radio,” Communications and Signal Theory Department, E.T.S.E.E.I. La Salle, Ramon Llull University, Barcelona, Tech. Rep., 2003.
- [7] “ICE-1001 preselector datasheet,” Pole Zero, Mar 2006. [Online]. Available: <http://www.polezero.com>
- [8] “Cuadro nacional de atribución de frecuencias,” Secretaría de Estado de Telecomunicaciones, Mar 2006. [Online]. Available: <http://www.mityc.es/Telecomunicaciones/Secciones/Espectro/cnaf/>
- [9] “SG-230 Smartuner datasheet,” SGC, Mar 2006. [Online]. Available: <http://www.sgcworld.com>
- [10] “Utm home page,” Unidad de tecnología marina, Mar 2006. [Online]. Available: <http://www.utm.csic.es/>
- [11] C. Vilella, D. Badia, J. L. Pijoan, M. Deumal, M. Ribó, and J. R. Regué, “On site receiver testing. Application to long distance HF links,” in *Proc. International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC Europe 2006*, Sept. 2006.
- [12] C. Vilella, P. Bergadà, M. Deumal, J. L. Pijoan, and R. Aquilué, “Transceiver architecture and Digital Down Converter design for long distance, low power HF ionospheric links,” in *Proc. Ionospheric Radio Systems and Techniques*, July 2006, pp. 95–99.
- [13] C. Vilella, D. Miralles, J. C. Socoró, J. L. Pijoan, and R. Aquilué, “A new sounding system for HF digital communications from Antarctica,” in *Proc. International Symposium on Antennas and Propagation*, Aug. 2005.