

Esbós d'una proposta de protocol orientat a ràdio
cognitiva

Ramon Mato Sunyer

17 de maig de 2017

Agraïments

En primer lloc voldria agrair el tutor, **J. Oriol Sallent Roig** i la professora **Anna Umbert Juliana** per escoltar la meva idea, deixar'm-ho intentar i assistir-me en tot allò que han pogut, incloent contactes amb i oferiment de documents de projectistes anteriors.

En segon lloc voldria agrair la meva tutora pedagògica, **Paz Morillo Bosch**, per acompanyar-me i ajudar-me en tots aquests anys de formació sense excepcions i tots els favors fets.

Agraïments també per a en **Israel Perejil Sabaté**, predecessor meu en certa manera, per al seu treball anterior a [2], per haver preparat l'ecosistema del laboratori durant el seu projecte i per tutoritzar-me a mi i a altres projectistes i doctorands en la seva operació.

Finalment, voldria agrair la meva família, en especial la meva família nuclear, per no deixar mai de creure en mi durant tota la carrera i assistir financialment durant tot el recorregut.

Índex

1	Introducció	3
1.1	Problema a resoldre	3
1.2	Introducció a la ràdio cognitiva	5
1.2.1	Sensat de l'espectre	6
1.2.2	Control de canal	8
1.2.3	Estat de l'art	8
1.3	Ràdio definida per programari	9
1.3.1	Resum	9
1.3.2	Estat de l'art i plataformes destacades	11
1.4	Aspectes electrònics	13
1.5	Aspectes sobre antenes	15
1.5.1	Antenes de banda ampla	15
1.5.2	Antenes intel·ligents	17
2	Desenvolupament teòric del protocol	21
2.1	Necessitat	21
2.2	Requeriments i abast	21
2.3	Modes de funcionament	23
2.4	Canalització de control	24
2.4.1	Motivació	24
2.4.2	Requeriments físics	24
2.4.3	Estructura de trama	25
2.4.4	Ocupació	26
2.5	Descoberta	27
2.5.1	Modes de descoberta	27
2.5.2	Paquet de descoberta	28
2.5.3	Mecanismes de descoberta	28
2.5.4	Modulacions	29
2.6	Establiment de connexió	30
2.6.1	Cerca d'espai espectral	30
2.6.2	Establiment en mode <i>ad-hoc</i>	32
2.6.3	Establiment en mode cooperatiu	32
2.7	Transmissió i manteniment	33
2.8	Finalització de la connexió	35

2.9	Llista de missatges de control	36
3	Fase 1: Sensat de l'espectre	37
3.1	Proves de l'equipament	37
3.2	Desenvolupament	38
3.2.1	Modificació d'un bloc generat per GRC	39
3.2.2	Creació de mòdul fora d'arbre	40
3.2.3	Avaluació del funcionament del sistema d'escombrat	41
4	Cloenda	45
4.1	Conclusions	45
4.2	Fases pràctiques restants	46
4.2.1	Establiment de comunicació bàsica entre dos terminals en mode <i>ad-hoc</i>	46
4.2.2	Establiment de comunicació bàsica en mode cooperatiu centralitzat	46
4.2.3	Interfície amb capes superiors	47
4.3	Millores futures	47
4.3.1	Suport per a modulacions d'espectre compartit	47
4.3.2	Suport per a sistemes criptogràfics	47
4.3.3	Suport per a entrellaçat en cas mòbil	47
4.3.4	Suport per a prioritització de dispositius	47
4.3.5	Aprenentatge automàtic	48
A	GNU Radio	49
A.1	Introducció	49
A.2	Arquitectura	49
A.3	Funcionament	51
A.4	Extensió	51
B	Entorn de treball	53
C	Fitxers de codi	55
C.1	Codi Python d'una escombra espectral basada en un disseny gràfic previ	55
C.2	Codi en Python del mòdul fora d'arbre de l'escombra espectral basada en UHD	58
C.3	Fitxa XML per generar la interfície gràfica del mòdul de l'escombra espectral fora d'arbre	61
	Bibliografia	62
	Glossari d'inicials i abreviatures	65

Capítol 1

Introducció

1.1 Problema a resoldre

En el món d'avui dia les comunicacions ràdio són omnipresents i cobreixen gairebé tots els casos d'ús, a totes les mides de xarxa. Des de xarxes personals i de proximitat emprant protocols com Zigbee i Bluetooth, passant per xarxes locals emprant tot el bany d'estàndards IEEE 802.11, xarxes d'àrea ampla emprant les diferents generacions de protocols cel·lulars de GSM i ETSI, fins a enllaços satèl·lit suportant protocols com GPS.

Malgrat que l'espai radioelèctric és teòricament infinit, les limitacions físiques i tecnològiques fan que aquest esdevingui finit de fet i, per definició, un recurs. La responsabilitat de regular l'espai de ràdio recau en els governs dels estats i en les seves agències especialitzades, sovint en base a suggerències i acords amb els pertinents organismes internacionals com ara l'ITU. Aquests organismes assignen usos específics a diferents bandes de freqüència, podent-les destinar a grups de persones (per exemple radioaficionats), professions o protocols específics.

Les bandes assignades als protocols d'ús majoritari avui dia estan concentrades a la part alta del segment UHF de l'espectre radioelèctric (de 300 MHz a 3 GHz). Els motius de l'ús d'aquestes freqüències són un bon compromís entre abast i velocitat de dades, i facilitat d'implementació física de capçals en quant a dimensions dels components, destacant-ne les antenes, les línies de transmissió i els transistors.

D'aquesta situació se'n deriven dos problemes fonamentals:

- Saturació deguda a interferències cocanal causada per l'increment de la densitat d'aparells electrònics habilitats per comunicacions ràdio amb un conjunt reduït de protocols [4] [5].

- Estancament del volum de dades transmissible degut a la rigidesa dels límits de les bandes.

Respecte el segon problema, cal recordar que les comunicacions digitals van condicionades per la probabilitat d'error de símbol o de bit, si aquesta és massa alta la transmissió esdevé inútil per més mecanismes de control de canal que hi siguin presents. Els tres factors principals que determinen la probabilitat d'error són el període de símbol (directament equivalent a l'amplada de banda si s'empra optimització de Nyquist), el nombre de símbols¹ i l'amplitud del senyal. L'últim és el més significant amb proporció lineal mentre que els altres dos tenen una relació arrelquadràtica.

$$\epsilon_b = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_b}{n \cdot N_0}} \right) = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{2} \cdot A}{\sqrt{n \cdot BW \cdot N_0}} \right) \quad (1.1)$$

Figura 1.1: Fórmula generalitzada de la probabilitat d'error de bit en comunicacions digitals, on E_b [J] és l'energia de bit, N_0 [J] és la densitat espectral de soroll blanc, A [$\sqrt{\text{J/s}}$] és l'amplitud de símbol, n és el nombre de bits per símbol i BW [Hz] és l'amplada de banda assumint que s'empra un alfabet de símbols optimitzats.

D'altra banda, incrementar el nombre de símbols redueix l'abast efectiu de les comunicacions degut a les exigències més grans de qualitat de senyal degut a la disminució de la distància entre símbols² (dit amb altres paraules, la constel·lació de símbols esdevé massa densa) i augmentar l'amplitud pot empitjorar el problema d'interferències mútues, a banda del problema del consum energètic. En conclusió, la manera més fàcil d'incrementar el cabal de dades és incrementar l'amplada de banda del senyal.

La manera clàssica de solucionar aquesta mena de problemes és moure's en l'espectre radioelèctric, o bé canviant de protocol o bé reorganitzant les bandes usades actualment i/o assignant-ne de noves, especialment les freqüències més elevades. Això, però, pot portar a conflictes d'interessos i només soluciona el problema de curt a mitjà termini.

Cal trobar una solució que flexibilitzi l'ús de l'espectre radioelèctric i que sigui a llarg termini.

¹En modulacions digitals d'espectre eixamplat el nombre de codis d'usuari és equivalent a l'ídem de símbols.

²Si no hi ha increments d'amplitud.

1.2 Introducció a la ràdio cognitiva

S'anomena ràdio cognitiva o ràdio intel·ligent a un conjunt de tècniques destinades a fer servir un ús més racionat de l'espai radioelèctric.

El concepte va ser proposat per primer cop per l'enginyer nordamericà Joseph Mitola III a l'any 1998 com a una possibilitat futura, argumentant que amb les millores ràpides i constants de l'electrònica digital s'arribaria a un punt que es podria tractar senyals d'amplada de banda elevada en temps real emprant processadors, és a dir, que arribaria un moment en el qual la ràdio definida per programari seria viable [6].

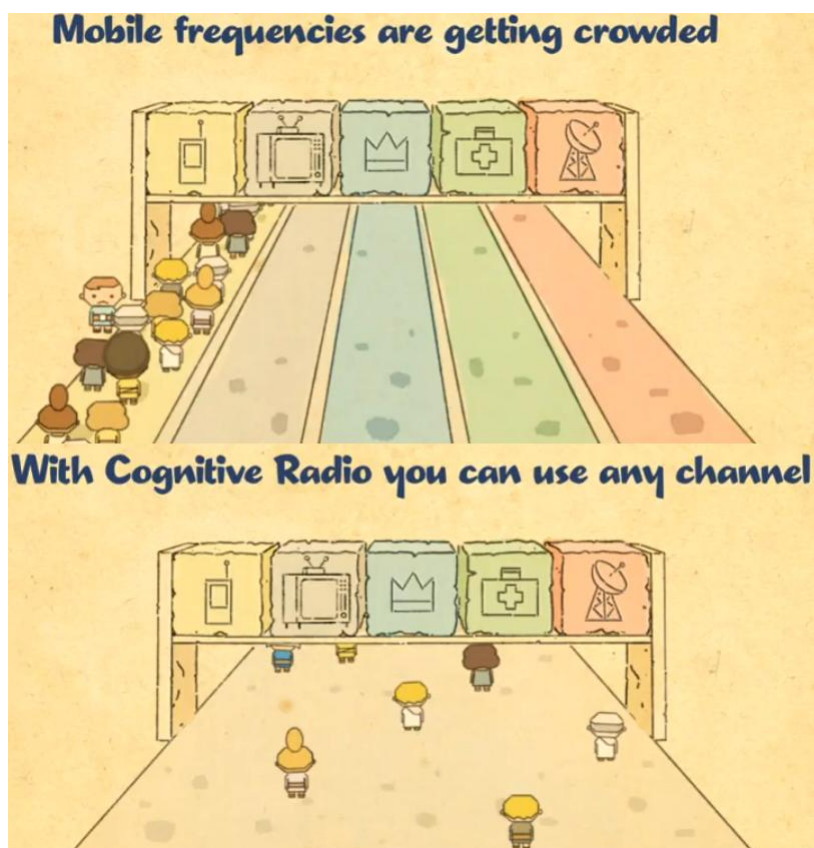


Figura 1.2: Il·lustració del problema de saturació de bandes (en particular les assignades a comunicacions mòbils) i la solució amb ràdio cognitiva. **Font:** Nokia Research Center

1.2.1 Sensat de l'espectre

El sensat de l'espectre és la tècnica fonamental de la ràdio cognitiva, sense la qual no es pot desenvolupar la resta. Convertint el capçal de radiofreqüència en un sensor, es poden observar les característiques dels senyals presents a l'espectre radioelèctric en la banda sintonitzable pel capçal en un moment donat.

A partir de les dades obtingudes del sensat, es pot escollir quina banda i quina mena de modulació fer servir donats certs prerequisits per la transmissió, principalment velocitat de dades i probabilitat d'error.

Els criteris emprats que es poden fer servir per determinar les característiques òptimes de la transmissió a realitzar són múltiples. Es pot establir aleshores una escala d'«intel·ligència» dels aparells de ràdio cognitiva segons la quantitat d'aquests criteris que tinguin presents en el seu programa. Un aparell de ràdio cognitiva que tingui en compte tots els factors possibles a l'hora de determinar quina mena de transmissió es realitzarà s'anomena completament cognitiu.

Les tècniques de sensat més destacades són [1][7]:

- Detecció d'energia en les freqüències de l'espectre.
- Temps d'ocupació (primàriament per analitzar ranures de temps).
- Detecció de senyals coneguts.
- Cicloestacionarietat de senyals.
- Identificació de protocols.

Sensat d'energia

El criteri d'energies en l'espectre és el més emprat degut a la seva facilitat d'implementació, el seu baix cost computacional relatiu i el fet que no cal tenir coneixment previ dels senyals a cercar.

$$E[f] = 20 \cdot \log_{10}(|DFT(x[t], n)|) \text{ [dB]} \quad (1.2)$$

Figura 1.3: Obtenció de l'energia espectral discreta a partir d'un conjunt de n mostres d'un senyal en domini temporal $x[t]$, sovint amb recorregut complex. La DFT s'acostuma a realitzar amb una FFT.

Per minvar els efectes dels pics espuris es pot passar un nombre d'iteracions d'energia espectral per un filtre de mitjana, encara que això incrementa el cost computacional total i en conseqüència el temps total de sensat.

Els desavantatges principals d'aquesta tècnica de sensat són el mal funcionament sota relacions senyal a soroll baixes i la gran dificultat de detecció de senyals modulats en espectre eixamplat, ja que aquests presenten una amplitud freqüencial molt baixa i per tant la seva SNR aparent resulta ser molt baixa, podent fins i tot restar amagats sota el terra de soroll.

Sensat de senyal específic

Si es coneix *a priori* la mena de senyals que es vol buscar aleshores es poden emprar filtres adaptats a aquests senyals emprant les tècniques usuals. Malgrat ser el mètode més fiable amb un cost computacional relativament baix, el fet que els filtres adaptats funcionen bé només pel tipus de senyal al qual són adaptats fa d'aquest mètode un d'inflexible, i mantenir un diccionari de senyals suposa elevar significativament el cost computacional de manera indirecta pel fet d'haver de sensar per cada entrada present al diccionari, a més a més de requerir una quantitat d'espai de memòria que alguns dispositius no es poden permetre.

$$y[t] = \frac{1}{N} \cdot \sum_{\tau=-N}^N x[t] \cdot s^*[t + \tau] \quad (1.3)$$

Figura 1.4: Correlació d'un senyal conegut $s[t]$ de N mostres amb el senyal obtingut $x[t]$ que realitza el filtre adaptatiu.

Sensat cicloestacionari

Tot senyal modulats té un component de periodicitat definit sobretot pel senyal portador. Aprofitant això, es pot calcular la correlació cíclica – també coneguda com a període de segon ordre – d'un conjunt de mostres i detectar així els senyals que presentin el component que se cerca.

$$R_x(x[t], e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot t}) = \sum_{\tau=0}^N x[t] \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot (t+\tau)} \quad (1.4)$$

Figura 1.5: Correlació cíclica d'un senyal $x[t]$ amb un to de freqüència f_r assumint que aquesta està normalitzada al domini discret.

Amb això es pot fer una escombrada del paràmetre de freqüència i detectar els pics. A més a més, el protocol pertinent pot assistir en el procés emetent de manera regular senyals de sincronització, sovint consistents en oscil·lacions estables en un període significant de temps, anomenats «-ambles»: preamble si es troben a l'inici de la trama i interamble si són al mig, podent haver-hi més d'un.

Identificació de protocols

Aquesta opció de sensat consisteix en analitzar un fragment prou llarg de senyal captat per tal de determinar si el patró es correspon amb cap protocol conegut. Aquesta tècnica de sensat presenta els mateixos problemes que el sensat de senyal específic, amb l'aggravant que cal extreure més informació a partir de l'adquisició d'un conjunt més gran de mostres.

L'ús d'aquesta tècnica és particularment analític: trobar quines bandes són emprades per protocols amb assignació espectral fixa i en conseqüència evitar-ne l'ús, incloent sensats futurs per tal d'estalviar temps. Aquest procés de sensat s'hauria de realitzar ocasionalment per tal d'evitar ralentitzar significativament el dispositiu de ràdio cognitiva.

1.2.2 Control de canal

Un altre factor a tenir en compte a l'hora d'escollir banda de freqüències és la resposta del canal, representada amb la funció de transferència pels fenòmens lineals. Aquesta determina paràmetres com ara l'atenuació, la distorsió lineal i la possibilitat de reverberacions. L'obtenció de la funció de transferència es pot realitzar de diverses maneres, ja sigui a través de la resposta impulsional escoltant l'eco d'un pols deltaforme o a través de la resposta freqüencial escoltant l'eco d'un soroll blanc en l'amplada de banda observada. També existeix la possibilitat complementària de compartir informació entre terminals sobre la situació del canal en les seves posicions respectives.

Fins i tot un cop establerta la comunicació cal una monitorització del canal en la durada de la transmissió, ja que les seves característiques són propenses a canviar d'un moment a l'altre. Responent a aquesta necessitat, es pot fer un control de les característiques dels senyals transmesos: potència, símbols, etc.

La monitorització de canal no és exclusiva dels sistemes de ràdio cognitiva – gairebé tots els protocols de comunicació ràdio moderns necessiten controlar al menys un paràmetre dels canals.

1.2.3 Estat de l'art

Des de que es va proposar el concepte de ràdio cognitiva s'han anat proposant tècniques per implementar aquest concepte, començant per les que han estat descrites per aquest mateix text. També s'han proposat solucions respecte la interacció dels terminals de ràdio cognitiva, que es veuran amb més detall al segon capítol.

A [8] es pot veure una llista comprensiva de la recerca realitzada i els seus autors fins l'any 2012.

En quant a aplicacions civils, comercials o domèstiques, no es coneix cap protocol actualment en ús que emprí tècniques de ràdio cognitiva.

1.3 Ràdio definida per programari

1.3.1 Resum

La ràdio definida per programari consisteix l'aplicació de tècniques de processament digital de senyals als de ràdio. Amb SDR els blocs d'un capçal de radiocomunicacions poden ser implementats amb algorismes executats en un processador en lloc de circuits electrònics específics, que gairebé sempre són analògics.

Al tractar-se d'una branca del processament del senyal digital, la SDR es fonamenta en el teorema del mostreig de Nyquist-Shannon, el qual enuncia que qualsevol senyal amb una amplada de banda donada és recuperable sense distorsió ni pèrdua d'informació si se n'agafen mostres al ritme de com a mínim el doble de freqüència que l'amplada de banda³.

$$BW = 2 \cdot f_s \quad (1.5)$$

Figura 1.6: Teorema de Nyquist-Shannon. f_s : freqüència de mostreig [Hz].

Aquest és el principal factor limitant de la SDR i, en conseqüència, de la ràdio cognitiva. Els conversors tant d'analogic a digital com *vice versa* no només requereixen un rellotge que oscil·li com a mínim a la freqüència de mostreig desitjada, sinó que el sistema ha de respondre prou ràpidament com per que no es perdin mostres ni se sol·lapin. També hi ha la qüestió que el processador ha de tenir prou capacitat de càlcul com per poder executar els algorismes sobre les mostres en temps real.

Per aquest propòsit existeix un tipus de processador orientat al tractament ràpid de dades numèriques anomenat Processador Digital de Senyal. Un parell de característiques destacades són l'ús d'instruccions vectoritzables implementades amb instruccions SIMD i l'ús de circuits digitals d'ús específic – també coneguts com a acceleradors – per tal de fer càlculs comuns com ara multiplicació de matrius més ràpidament, arribant fins al punt que alguns DSPs incorporen nuclis per a protocols específics.

Es pot compondre un sistema de ràdio cognitiva a partir d'un DSP i conversors ADC i DAC connectats a l'entrada i sortida de mostres, respectivament. Sovint tots aquests blocs van incorporats dins un mateix xip.

³Descartant les necessitats ocasionals de sobremostreig per contrarrestar efectes no lineals en qualsevol etapa.

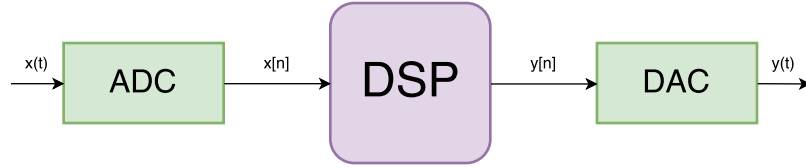


Figura 1.7: Diagrama de ràdio cognitiva ideal

El problema d'aquest plantejament és que, com s'ha escrit abans, en freqüències més altes es dona el cas que el ritme de com a mínim un dels blocs – més sovint el de tots a la vegada – és insuficient. Cal aleshores realitzar un tractament analògic de conversió previ i posterior al processament digital.

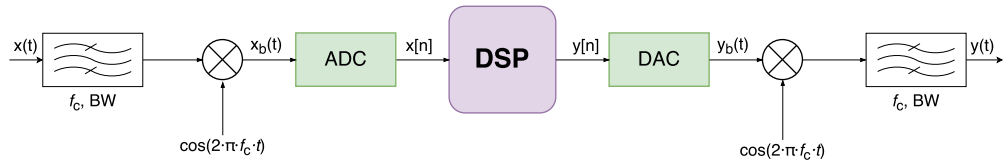


Figura 1.8: Diagrama de ràdio cognitiva més realista amb capçalera i cua analògiques emprant conversió homodina. Assumir que els filtres són actius. Si el rendiment dels amplificadors o mescladors és insuficient o es volgués fer un capçal sintonitzable es requeriria heterodinatge.

Un dels avantatges més importants del DSP és que, al contrari de com passa en els blocs analògics, no s'introdueix soroll ni distorsió addicional en cada etapa de processament successiva – assumint que els algorismes d'implementació dels blocs siguin correctes – a banda de les que es produeixen en el canvi de dominis, és a dir, en els conversors. Per això és important intentar que el capçal de preprocessament analògic tingui el mínim d'etapes possible.

Per donar més abast al sistema, es pot fer que el senyal de conversió descendent sigui sintonitzable, emprant un sintonitzador a passes – implementat per exemple amb un sintonitzador indirecte – amb interval igual a l'amplada de banda mostrejable, encara que això requeriria que la complexitat del preprocessament analògic incrementés encara més per la necessitat d'una conversió (super)heterodina.

Cal fer notar que en DSPs dissenyats per operar fora de banda base sovint es dona el cas que les mostres se separen en components d'infase i quadratura, que són els escalars que multipliquen al component cosinus i sinus respectivament d'un to qualsevol.

$$A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t + \phi) = A_I \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t) + A_Q \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t) \quad (1.6)$$

Figura 1.9: Descomposició d'un to real genèric en components I&Q. Extensió de la fórmula d'Euler. A : amplitud, f_c : freqüència de to, ϕ : fase.

1.3.2 Estat de l'art i plataformes destacades

A l'article [9] es pot veure una anàlisi i comparativa d'arquitectures de DSPs dissenyats per grans empreses d'electrònica integrada al 2011, encara que es focalitza en la seva utilitat per implementar protocols de radiocomunicació existents, no tant en usos experimentals.

Universal Software Radio Peripherals (USRP)

Aquesta gamma d'aparells de SDR la produeix l'empresa dels EUA Ettus Research, filial de National Instruments (no-res a veure amb Texas Instruments) i són dels aparells més potents d'aquest camp.

La seva sèrie de més alta gama, la X300, presenta les següents característiques destacades:

Amplada de banda sintonitzable	0 - 6 GHz
Freqüència de mostreig ADC	200 MHz
Bits de quantificació ADC	14
Freqüència de mostreig DAC	800 MHz
Bits de resolució DAC	16

Taula 1.1: Especificacions destacades de la gamma USRP X300 [13]

Addicionalment, els seus últims models funcionen tots amb el mateix *driver*, al qual anomenen *Universal Hardware Driver* (UHD), i permet interoperabilitat amb programes que treballen amb processament de senyal, com ara GNU Radio (especialitzat en SDR), Matlab o LabView.

Les prestacions que presenten els USRPs fan que els seus preus vagin dels centenars als milers d'euros per aparell, essent destinats per institucions de recerca, empreses o radioaficionats molt dedicats.

El laboratori de comunicacions ràdio del mòdul D4 del Campus Nord disposa de dos terminals USRP N200 [14].



Figura 1.10: USRP N200.

RTL-SDR

RTL-SDR és un grup de productes SDR de baix cost basada en DSPs de RealTek, més en concret el model RTL2832U, orientat per a usos en televisió digital. Aquests dispositius van sorgir quan es va descobrir que la sortida de mostres I&Q d'aquest DSP era directament accessible, i a partir d'aquí diferents empreses van començar a desenvolupar productes de SDR al voltant del RTL2832U.

L'inconvenient principal dels dispositius RTL-SDR és que el RTL2832U només té capacitats de recepció.

Els dispositius RTL-SDR poden operar amb freqüències de mostreig de fins a 3,2 MHz, encara que en aquest punt esdevenen poc fiables, essent els valors nominals d'operació al voltant de 2,4 MHz. Aquests valors són d'aproximadament un ordre de magnitud inferiors als USRP de Ettus.

Pàgina web: <http://www.rtl-sdr.com>.

1.4 Aspectes electrònics

Quan es va començar a plantejar el projecte ja es va preveure que un dels problemes fonamentals que caldria encarar és el disseny dels capçals de radiofreqüència que acompanyen el DSP. La gran majoria de circuits de ràdio actuals estan basats en metal·lúrgia de silici al voltant de transistors MOSFET, principalment perquè les tècniques de producció d'aquestes porten dècades de maduresa i perquè es poden integrar sistemes analògics i digitals en un mateix circuit amb pocs problemes.

Tot i això, els MOSFET tenen limitacions significatives per aplicacions de ràdio. Aquests transistors presenten una característica en especial que *a priori* els fan inconvenients per a aplicacions d'alta freqüència: la unió metall-òxid-semiconductor de la porta – que identifica els transistors – és una capacitat flagrant que els fa un dels tipus de transistor teòricament més lents. No obstant, els MOSFET són més proclius a l'escalabilitat i la millora de les tècniques de fabricació, que han permès una reducció de les dimensions dels MOSFET d'uns tres ordres de magnitud en tres dècades (veure la llei de Moore), ha tingut com a efecte secundari un increment de la seva velocitat pel fet de disminuir els efectes capacitius. D'aquí l'increment de la potència computacional dels circuits digitals integrats i la viabilitat sorgint dels MOSFET en aplicacions d'alta freqüència.

Malgrat tot això, en els últims anys sembla que s'està arribant a un topall mínim en quant a les dimensions dels transistors, a mesura que s'apropen a les unitats d'àtom de silici [10], cosa que dificulta les perspectives per a aplicacions en freqüències de desenes de gigahertz, per no parlar dels centenars de gigahertz i tot el buit d'aplicacions en la banda dels terahertz subòptics. Per aquest motiu, i també pel fet que es necessita electrònica de gran amplada de banda, s'ha plantejat cercar tecnologies alternatives.

Un apunt important abans de seguir: és vital que les tecnologies alternatives siguin integrables en circuits de gran escala. Haver d'emprar components discrets les farien menys atractives pel fet de posar traves a la miniaturització dels dispositius que les empresin.

Una primera idea seria estudiar l'ús de transistors bipolars, d'ús molt estès fins a aproximadament la meitat dels anys vuitanta. Els problemes dels BJT de qualsevol tipus com a alternativa són la baixa escalabilitat, per la qual les dimensions dels transistors bipolars rarament baixen del micròmetre, dificultant-ne així la integració a gran escala; i el consum energètic, degut a que s'actua sobre la base amb corrent, dissipant més energia per efectes resistius, mentre que en els FET s'actua sobre la porta amb voltatge, amb una impedància de porta a font molt alta. A més a més, amb la reducció de les dimensions dels MOSFET esmentada abans l'avantatge absolut dels BJT en amplada de banda ha desaparegut.

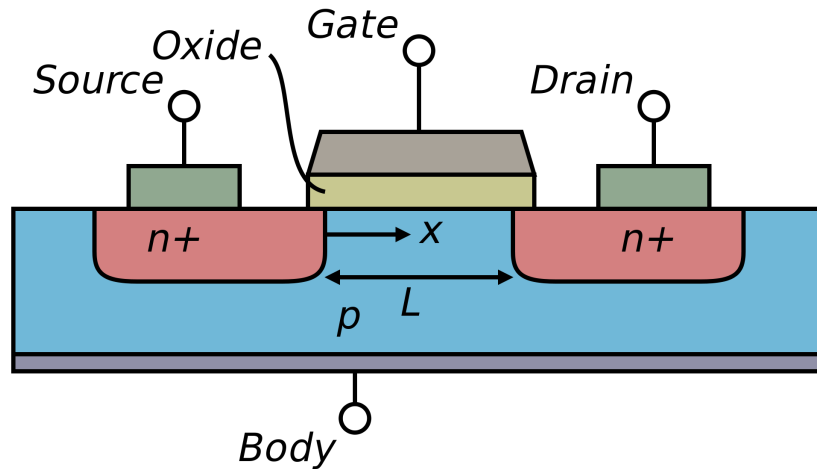


Figura 1.11: Secció d'un N-MOSFET (o simplement NMOS) planar. La construcció de JFET i MESFET involucra, simplificadament, substituir el contacte de porta de metall-òxid per un de semiconductor dopat complementàriament o de metall, respectivament. **Font:** Viquipèdia.

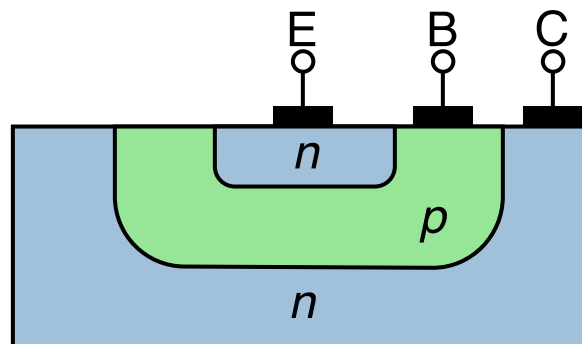


Figura 1.12: Secció d'un BJT NPN planar. És important fixar-se en el fet que la seva construcció involucra l'apilament de tres capes de semiconductor dopat, més la capa de substrat que no es mostra en aquest diagrama. **Font:** Viquipèdia.

Una altra alternativa és mirar altres transistors de la família FET, de la qual els MOSFET en formen part. Els transistors d'efecte de camp es poden dividir en dues categories: de contacte de porta directe o indirecte. Els MOSFET estan englobats dins la segona categoria, havent-hi una capa de dielèctric (òxid de silici, la O de MOSFET) entre els conductors. Al seu torn, dins dels FET de contacte directe se'n distingeixen dos tipus segons l'estructura de porta: JFET

(unió PN, un díode «normal») i MESFET (unió Schottky). Els primers destaquen per presentar una xifra de soroll molt baix i els segons per tenir l'amplada de banda teòric més elevat dels FET (excloent alguns dissenys heterogenis).

L'inconvenient principal a l'ús d'aquests transistors és la immaduresa de la tecnologia de fabricació, essent inconvenients secundari el fet que la impedància porta-font no és tant elevada com en els MOSFET (cal recordar que hi ha present una capa dielèctrica enmig) i que els FET de contacte directe no són simetritzables (font i drenatge intercanviables) com en els MOSFET.

Seria molt interessant fer recerca en un projecte a part sobre la viabilitat de la miniaturització i integració de JFET i MESFET conjuntament amb MOSFET, ja que seria un gran pas a l'hora de realitzar aplicacions que funcionin a freqüències per sobre de la desena de gigahertz.

Tipus de transistor	Avantatges	Desavantatges
BJT	Alta transconductància teòrica. Velocitat teòrica molt alta.	Difícil d'escalar. Consum energètic elevat.
MOSFET	Fàcilment escalable. Maduresa dels processos de fabricació.	Velocitat teòrica molt lenta.
MESFET	Transistors FET més ràpids. Escalables, encara que no tant com els MOSFET.	Tecnologia immadura. Impedància d'entrada no tant alta com en els MOSFET. Dificultats d'integració amb cristall de silici (s'acostumen a fabricar amb fosfur d'indi).
JFET	Xifra de soroll molt baixa. Escalables, encara que no tant com els MOSFET.	Tecnologia immadura. Molt alta capacitat de porta. Impedància d'entrada no tant alta com en els MOSFET.

Taula 1.2: Breu comparació dels tipus de transistor vistos.

1.5 Aspectes sobre antenes

1.5.1 Antenes de banda ampla

Les antenes són la interfície entre els camps electromagnètics guiats i radiats. Tant l'última etapa d'un emissor com la primera d'un receptor ràdio consisteixen en una antena.

Com qualsevol altre component electromagnètic les antenes presenten un comportament ressonant, actuant efectivament com a filtres passabanda. Les qualitats d'oscil·lació – freqüència de ressonància, amplada de banda – venen donades per les seves dimensions. Aquest comportament ressonant pot ser un problema a l'hora de transmetre senyals de gran amplada de banda.

Per aquest motiu s'han desenvolupat geometries d'antena que permeten incrementar la seva amplada de banda efectiva, en alguns casos anomenades (falsament) antenes independents de la freqüència. Els dissenys més interessants són aquells que puguin ser incorporats en dispositius de dimensions més petites, que sovint són de tipus de ranura planar, fàcilment implementables amb tècniques d'impressió de circuits.

Se'n destaquen tres tipus de disseny: autocomplementari, logperiòdic – que en dissenys planars sovint esdevé també autocomplementari – i fractal.

Una antena complementària és aquella el disseny de la qual forma la meitat d'un pla i és simètrica en rotació. Això elimina la dependència de la impedància de les dimensions físiques de l'antena a partir de la longitud d'ona del pla de referència, esdevenint $\eta/2 \simeq 188 \Omega$ al buit.

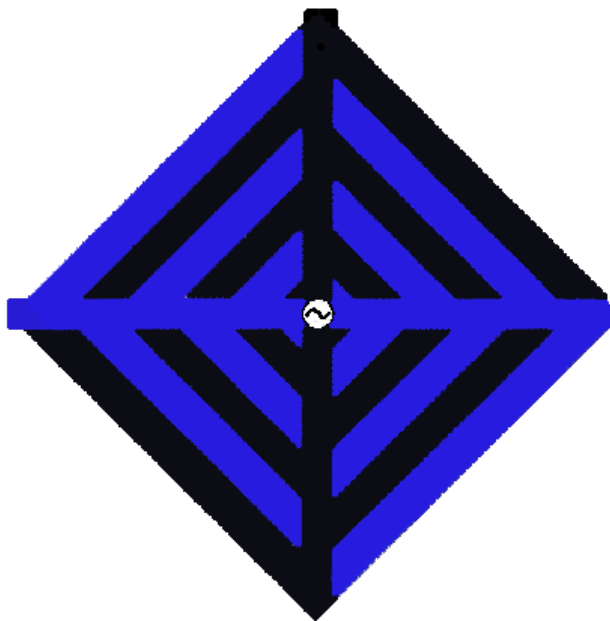


Figura 1.13: Antena autocomplementària (en negre) i el seu complementari (en blau). **Font:** Viquipèdia.

Les antenes logperiòdiques consisteixen en un conjunt d'elements separats a una distància que segueix una funció logarítmica, de tal forma que les seves llargàries formin un angle. S'ha observat que el comportament freqüencial de les antenes logperiòdiques no és degut a la seva configuració en sí sinó a la seva autocomplementarietat [12].

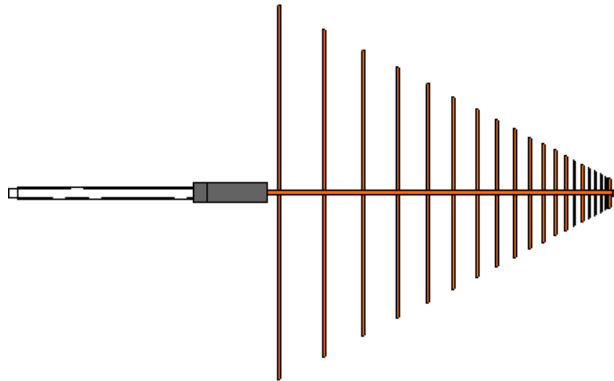


Figura 1.14: Antena logperiòdica polar. **Font:** <http://www.ramayes.com>.

Les antenes fractals són un tipus d'antena en forma de fractal, tal i com indica el nom. La seva recursivitat genera pols virtuals de longituds que varien amb el tipus de fractal. Quantes més iteracions tingui el fractal, més ampla és la banda resultant, essent marcada la freqüència mínima per les dimensions totals de l'antena.



Figura 1.15: Iteracions del triangle de Sierpinski, a partir del qual es poden fabricar antenes de ranura. **Font:** [11]

1.5.2 Antenes intel·ligents

Com a desenvolupament paral·lel i complementari a la ràdio cognitiva existeixen sistemes que permeten fer un ús més òptim de l'espai físic en el qual s'envien les ones de ràdio mitjançant control sobre les antenes. Aquests sistemes s'anomenen més sovint antenes intel·ligents (*smart antennas* en anglès). En aquest apartat es farà una breu explicació sobre els seus fonaments, malgrat

que el control d'antena queda fora de l'abast del protocol i, per tant, també del document.

Les tècniques més emprades per optimitzar l'ús de l'espai físic són la multiplexació espacial (allò que sovint s'anomena antenes MIMO, *Multiple Input, Multiple Output*) i el control de directivitat. De particular interès és la segona, ja que és la més flexible i fàcil de controlar.

La manera més òbvia d'implementar un control de directivitat és col·locant una antena molt directiva – principalment antenes parabòliques – sobre un suport mecànic que la mogui. Una altra manera menys òbvia d'aconseguir-ho és emprant agrupacions en fase.

Aprofitant la superposició d'ones en fases controlades partint d'antenes a distàncies ben escollides, es pot aconseguir modelar el patró de radiació resultant a voluntat segons les necessitats de l'aplicació. Pel fet que aquest efecte requereix superposició d'ones, es necessiten múltiples antenes unitat per obtenir una antena intel·ligent, per exemple fileres de monopols o graelles de plaques *microstrip*. Això rep en anglès el nom de *beamforming*.

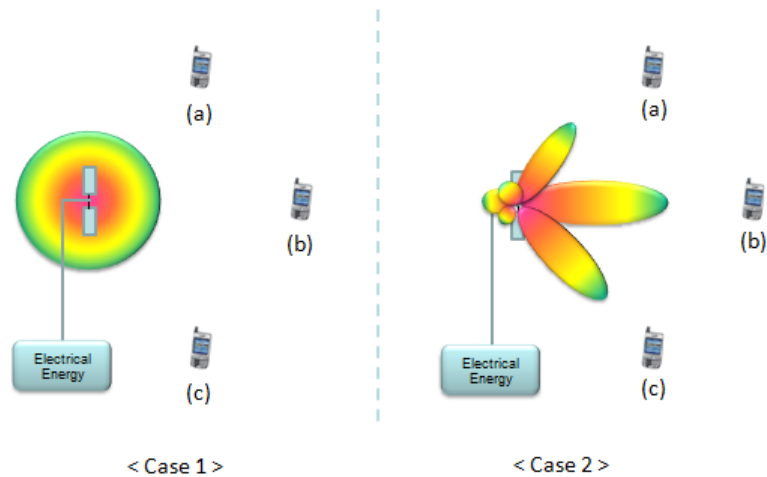


Figura 1.16: Exemple il·lustratiu de les possibilitats del *beamforming* o control per programari de patrons de radiació. A l'esquerra el patró isotròpic de referència i a la dreta el patró de radiació després d'aplicar superposició de fases. **Font:** http://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_BeamForming.html

Allò més rellevant en termes d'aquest document és que les fases de les antenes d'una agrupació també es poden controlar per programari a través de processament digital de senyal. Gràcies a això no només s'aprofita el guany

passiu de potència que confereix un feix directiu, sinó que a més a més es poden bloquejar senyals de terminals interferents situats al voltant de l'antena. Fins i tot es poden enfocar múltiples feixos cap a terminals diferents.

Capítol 2

Desenvolupament teòric del protocol

2.1 Necessitat

Primer de tot cal recordar una vegada més que el terme de «ràdio cognitiva» es refereix només a un conjunt de tècniques, que es podrien aplicar en una nova versió de qualsevol protocol existent avui dia. Per aprofitar al màxim els avantatges de la ràdio cognitiva, cal desenvolupar un protocol que hi estigui orientat per tal de treure'n el màxim rendiment.

El propòsit d'aquesta secció és determinar quines característiques hauria de presentar un protocol de comunicacions ràdio universal basat en ràdio cognitiva. La definició de «universal» d'aquest document és que el protocol pugui emprar-se a qualsevol banda de freqüències per qualsevol tipus de dispositiu. A més a més, per conveniència el protocol també hauria de ser escalable, cosa que significa que ha de poder assumir magnituds més grans en qualsevol dimensió.

2.2 Requeriments i abast

A l'hora de desenvolupar un protocol a nivells baixos cal tenir les següents etapes d'una sessió de comunicació especificades:

1. La cerca o descoberta dels terminals actius visibles en el rang de freqüències del dispositiu.
2. L'obtenció de les característiques de cada dispositiu, per exemple les bandes i les modulacions utilitzables.
3. La cerca d'un espai en l'espectre que s'ajusti a les característiques obtingudes abans.

4. L'establiment de la comunicació entre els dos punts.
5. La transmissió de dades en la durada de la sessió i el manteniment d'aquesta.
6. L'alliberament dels dispositius.

A la figura 2.1 es representa l'enumeració a dalt en un diagrama d'estats.

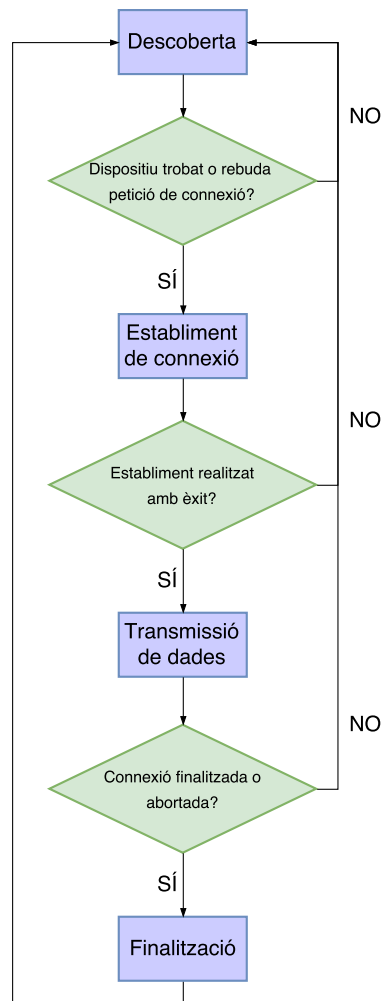


Figura 2.1: Diagrama d'estats d'una sessió de comunicació.

Els requeriments específics d'universalitat són els següents:

Universalitat en freqüència El protocol hauria de poder emprar-se sobre un rang molt gran de freqüències per poder deixar espai a una gran quantitat d'usuaris, i que aquests puguin transmetre amb amplades de banda considerablement elevats, al voltant de desenes i centenars de megahertz. Per tant, no només cal disposar d'un gran rang de freqüències sinó que a més a més la canalització hauria de ser flexible.

Universalitat d'usuaris El protocol hauria d'estar a l'abast a un bany ample de dispositius, fins i tot els més constrenyits, notablement els que entren dins la categoria de l'internet ubicu (en anglès *Internet of Things*). Això implica que els algorismes emprats no haurien de ser molt exigents computacionalment, cosa que no només repercuteix en la capacitat de processament demandada, sinó també en el consum energètic.

Universalitat d'aplicació L'ús del protocol hauria d'afectar el mínim possible a les infraestructures de xarxa i les aplicacions existents avui dia. Això implica que cal cobrir el mínim de capes de xarxa possible. Més en concret, el protocol hauria d'anar destinat a les dues capes més baixes del model OSI: física i enllaç de dades.

2.3 Modes de funcionament

El protocol presentarà dos modes principals d'enllaç, ambdós basats en els dos tipus de sensat (*ad-hoc*, cooperatiu) descrits per comunitat d'investigació en ràdio cognitiva (veure [1] [7] com a exemples d'articles que ho cobreixen).

- En el mode ***ad-hoc/peer-to-peer*** dos o més aparells realitzen transmissions en enllaç directe. En aquest mode tots els aparells que vulguin intercomunicar-se han de realitzar sensat de l'espectre.
- En el mode **cooperatiu/centralitzat** existeix un punt d'accés, que podria per exemple ser un enrutador domèstic o una estació base d'una xarxa cel·lular, que coordina tots els usuaris que es connecten a la seva xarxa local, podent o bé fer el sensat ell mateix o demanant aquestes dades als terminals.

A la taula 2.1 es poden veure avantatges i inconvenients de cada mode, complementaris els uns als altres.

Els usos del mode *ad-hoc* serien principalment per transmissions espúries entre dispositius propers, per exemple per controlar remotament un electrodomèstic o establir un cable virtual com es fa amb HDMI sense fil. Els usos pel mode cooperatiu serien per establir xarxes més complexes, des d'una xarxa LAN basada en un enrutador fins a una xarxa WAN basada en estacions base cel·lulars.

Mode	Avantatges	Desavantatges
Ad-hoc	Es pot establir ràpidament un enllaç entre dos terminals qualsevol.	Limitació de l'abast de sensat de cada dispositiu. Si hi ha més de dos terminals, poden interferir-se si no coneixen mútuament la seva presència. La latència incrementa quadràticament amb cada terminal que s'afegeix.
Cooperatiu	Permet incrementar l'abast de comunicació entre terminals. El punt d'accés pot coordinar els usuaris per evitar col·lisions.	Requereix un aparell que faci de punt d'accés.

Taula 2.1: Avantatges i desavantatges dels modes de funcionament.

Per simplificar el desenvolupament pràctic, el focus d'aquest document i del projecte serà en el mode *ad-hoc* un a un, encara que en circumstàncies regulars ambdós modes es farien servir de manera equitativa.

2.4 Canalització de control

2.4.1 Motivació

Degut a que aquest protocol requereix operar en un marge de freqüències molt elevat i no s'especifica *a priori* cap mena de canalització estàtica, la comunicació entre nodes pot esdevenir gairebé impossible si no hi ha cap consens sobre quines bandes de freqüència s'han d'emprar per aquest propòsit, especialment en l'estat de descoberta. Per tant caldrà trencar part d'un dels requeriments i destinar bandes de freqüència específiques per a funcionar com a canals de control. Aquests canals s'aprofitaran també per a controlar els altres processos del protocol.

2.4.2 Requeriments físics

Les característiques prioritàries per la transmissió dels paquets de control són màxima intel·ligibilitat – és a dir, probabilitat d'error de símbol la mínima possible – i mínima intrusió espectral. Per aconseguir ambdues es pot emprar un senyal amb símbols binaris conformats amb polsos optimitzats en amplada de banda i amb alt període de pols, per tant baixa velocitat de transmissió. La informació continguda en aquests paquets hauria de ser mínima, de l'ordre de desenes d'octets, per tant la baixa velocitat de transmissió resultant no hauria de ser un problema.

Una modulació que compliria amb aquestes característiques és una 2-ASK amb els polsos en forma acampanada¹. Per incrementar més la distància entre símbols, però, es podria emprar una modulació 2-PSK, emetent sengles símbols en contrafase.

Sabent tot això es pot procedir de tres maneres:

- Assignar bandes estretes repartides de manera regular al llarg de l'espectre utilitzable. Els inconvenients d'aquesta solució són que l'amplada de banda màxima emprable per una transmissió donada pot quedar limitada a la distància entre dos canals de control i que no tots els dispositius es podrien permetre observar-los tots si resulten estar molt estesos.
- Assignar una sola banda d'amplada gran per a tots els canals de control que es prevegin necessaris. L'inconvenient és que alguns aparells podrien necessitar més d'un capçal de radiofreqüència si el seu disseny està constrenyit per cap motiu.
- Consens entre les dues anteriors: grups de canals de control resultant en bandes de freqüències d'amplada mitjana i canalitzades entre elles distàncies elevades.

La primera queda descartada d'entrada pel fet que impedeix potencialment transmetre dades a grans velocitats, quedant per decidir entre les dues últimes a partir de resultats empírics.

Per tal de poder reduir encara més la quantitat d'espectre dedicada a canalització de control, la comunicació a través d'aquests canals es durà a terme de forma simplex, podent millorar-ho potencialment a semidúplex temporal.

2.4.3 Estructura de trama

D'entrada cal esmentar que totes les dades del protocol aniran alineades a l'octet, per tal de fer més fàcil el processament per part del programari, ja que gairebé tots els processadors tenen l'octet com a unitat mínima de dades. Entre d'altres coses, això implica que les dades de tipus booleà hauran de ser agrupats en grups de banderes de $\lceil n/8 \rceil$, $n \in \mathbb{N}$ octets.

Preamble	Etiqueta	Long.	Contingut de paquet	CRC16
n_p	1	1	$n_l - 2$	2

Figura 2.2: Format del paquet de control. Longituds en octets.

¹Cal recordar que els senyals acampanats són funcions (quasi) pròpies de la transformació de Fourier.

Pels paquets de control es podria emprar una estructura tipus TLV, amb l'etiqueta identificant cada tipus de paquet de control. No obstant, com que cada paquet de control tindrà una estructura fixa es podria prescindir del camp de longitud, encara que es perdria un primer mecanisme de control d'integritat. Addicionalment, s'afegirà a la cua un camp de codificació de canal CRC-16 per incrementar la seguretat contra errors.

Amb una etiqueta d'un octet es poden tenir fins a $2^8 = 256$ tipus diferents de missatges de control, que es considerarà més que suficient pels propòsits d'aquest protocol i a més a més permet reservar intervals de valors per a usos propietaris. El camp de longitud també tindrà mida d'un octet, prou com per tenir fins a 253 octets al camp de dades, seguits dels dos del CRC-16.

El preamble al cap de la trama serveix per alertar al node recipient que entrarà un missatge de control i per sincronitzar-se amb el to portador. Com a senyal de preamble es pot fer servir un tren de n_p uns o un to d'amplitud constant, encara que així seria més difícil distingir quan comença i quan acaba. El preamble serà present en tots els tipus de missatges d'aquest protocol amb la mateixa senyalització.

2.4.4 Ocupació

Cada dispositiu actiu disposarà d'un canal de control propi el qual ocuparà durant el seu temps de funcionament. La qüestió a resoldre és aleshores el mecanisme de cerca d'un canal de control buit en el moment d'inicialització. Una primera aproximació a una solució és fer un escombrat dels canals de control visibles pel dispositiu, detectant si s'està transmetent pel canal iterat en un moment donat. En certa manera, això també és un mecanisme de descoberta.

El problema rau en que un canal no sempre està perceptiblement actiu, tenint en compte que els propis dispositius no han d'emprar el canal de control tota l'estona, que en les escales temporals en les quals treballen els sistemes la propagació electromagnètica no es pot considerar instantània i que poden haver-hi presents terminals ocults – dos o més terminals intentant comunicar-se amb el mateix receptor sense visibilitat entre ells. Una manera de solucionar les dues primeres qüestions és definir un missatge de control d'enquesta ràpida, definint al seu torn un altre missatge de resposta a aquesta. Cadascun es definirà per la seva etiqueta identificadora i la seva longitud serà nul · la.

Durant l'escombrada de canals, si no es detecta transmissions en un canal, es procedeix a enviar un missatge d'enquesta ràpida. Si no hi ha contestació després d'un interval de temps donat, s'ocupa el canal. A partir d'aquí caldrà que el dispositiu estigui pendent del canal esperant algun missatge de descoberta o d'inicialització de connexió.

Els canals de control seran enumerats per ajudar la identificació de nodes en una sessió donada, definint el nombre de canals amb un natural de quatre octets (32 bits), disposant així d'aproximadament més de $4,7 \cdot 10^9$ canals. La numeració hauria de ser triada en comitè.

2.5 Descoberta

Aquesta etapa consisteix en trobar els dispositius disponibles per establir una sessió de connexió. Addicionalment, en aquesta mateixa etapa s'enviarà la informació sobre les característiques de cada dispositiu: identificació, característiques, etc.

2.5.1 Modes de descoberta

En qualsevol sistema de comunicació en que no hi ha informació completa sobre el medi hi ha dues maneres de procedir per descobrir els terminals actius:

Enquesta Els terminals candidats escolten periòdicament o constant a un o més canals determinats, esperant senyals de descoberta. Quan un arriba, el terminal respon amb un missatge indicant la seva presència, podent incloure-hi més informació sobre ell mateix.

Balisa Tots els terminals disponibles emeten periòdicament senyals d'identificació en canals específics, que són recollits pels terminals que estiguin en procés de descoberta.

La taula 2.2 posa en relleu avantatges i desavantatges de cada mode de descoberta.

Mode	Avantatges	Desavantatges
Enquesta	La informació només es transmet quan es demana. No contamina tant l'espectre radioelèctric.	Consum energètic global més gran si l'escolta és indefinida. Si l'escolta no és indefinida, pot donar-se el cas que es perdi una petició d'identificació.
Balisa	Informació de terminals disponible en qualsevol moment, amb una finestra de temps suficientment elevada.	Possible contaminació de l'espectre radioelèctric per haver d'emetre senyals de manera periòdica.

Taula 2.2: Avantatges i desavantatges dels modes de descoberta.

Allò millor seria poder suportar potencialment ambdós modes a través dels canals de control. La preferència final per un o l'altre dependrà dels resultats empírics.

2.5.2 Paquet de descoberta

En la descoberta no és suficient que cada usuari senyali la seva existència. També cal donar informació rellevant sobre el terminal, principalment les seves dades d'identificació i les seves capacitats de comunicació. Per això es definirà un tipus de missatge de control que inclogui aquesta informació.

Es pot veure una mostra en pseudocodi de com seria l'estructura de dades a la figura 2.3 i la seva serialització a la figura 2.4, ambdós subjectes a modificacions. Addicionalment, el dispositiu que fa descoberta haurà d'associar internament cada dispositiu descobert amb l'identificador de canal de control a on l'ha trobat.

```
struct discoveryInfo {
    ulong macAddr; \\ Adreça MAC
    char[16] devName; \\ Nom del dispositiu
    uint minFreq; \\ Freqüència mínima emprable en kHz
    uint maxFreq; \\ Freqüència màxima emprable en kHz
    bool centralNode; \\ Indica si el terminal és el node central
                    \\ d'una xarxa cooperativa.
    short supportMods; \\ Banderes amb modulacions suportades
                    \\(16 en total)
}
```

Figura 2.3: Estructura de dades del paquet d'identificació en pseudocodi.

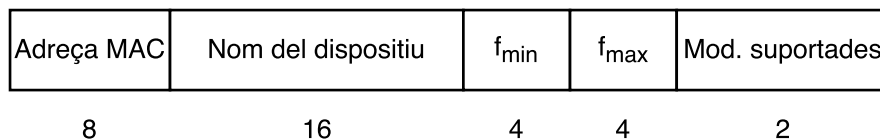


Figura 2.4: Format del paquet d'identificació. Llargàries en octets.

Seria necessari establir un conjunt de característiques mínimes requerides per participar en el protocol per tal d'evitar la incomunicació per qualsevol parell de dispositius.

2.5.3 Mecanismes de descoberta

Enquesta

Pel mode d'enquesta caldrà definir un altre tipus de missatge de control el qual s'anomenarà d'enquesta completa. Aquest missatge vindrà identificat només pel seu identificador, és a dir, no tindrà contingut addicional.

El dispositiu que fa l'enquesta realitzarà una escombrada per tots els canals de control amb els quals es pugui comunicar, enviant un missatge d'enquesta completa a cadascun. Tots els dispositius actius que rebin aquest missatge de control hauran de contestar amb un de descoberta. El temps d'espera a la resposta durarà una quantitat T_{wd} donada. Si no es rep cap resposta en aquest interval, s'assumeix el canal buit i es passa al següent canal.

Balisa

En mode balisa cada dispositiu emet el seu missatge d'identificació periòdicament en un interval determinat que s'anomenarà temps de balisa T_b , el qual cobreix el temps de transmissió del paquet i el temps d'inactivitat. Per tal d'assegurar que el dispositiu descobrint pugui detectar tots els dispositius a les seves rodalies de manera fiable cal que la finestra de descoberta T_d sigui més gran que el temps de balisa ($T_d > T_b$).

Per cobrir les necessitats energètiques dels dispositius més constrenyits, es pot fer que el temps de balisa pugui prendre diferents valors, esdevenint així la condició anterior $T_d > T_{bmax}$.

De manera similar al mode d'enquesta, caldrà escombrar els canals de control visibles en intervals T_d , esperant el missatge de descoberta. Si no es rep res, es passa al següent canal.

2.5.4 Modulacions

Entre els camps presents a la informació de descoberta d'un dispositiu hi ha un de dos octets consistent en un conjunt de banderes que indica quines modulacions suportades pel protocol pot emprar el dispositiu concret. Amb dos octets es poden indicar fins a setze tipus de modulació diferents, un per cada bit de bandera, amb possibilitat d'ampliació en iteracions futures.

Les modulacions que se suportaran en aquesta versió seran totes digitals passabanda basades en l'espai de senyals bidimensional I&Q (cosinus i sinus). Les modulacions suportades pel protocol són, en concret:

- 2-ASK
- 2-PSK
- 4-PSK
- 8-PSK
- 16-PSK
- 4-QAM

- 16-QAM
- 64-QAM
- 256-QAM

Qualsevol dispositiu hauria de suportar com a mínim les dues primeres. Les banderes restants es reserven per a usos futurs.

Es considera que no val la pena fer servir una ASK amb més símbols al ser essencialment una PAM modulada amb una portadora, i d'afegir més nivells a una PAM no se'n treu gaire profit.

La característica principal de les modulacions PSK en aquest document és que els símbols són isoenergètics, formant els símbols una circumferència de radi l'energia de símbol a la constel·lació, podent-se emprar en sistemes que necessitin fer un compromís entre informació per símbol i consum energètic. Com es pot imaginar, l'inconvenient que en sorgeix és que a més símbols menys distància entre ells i per tant més probabilitat d'errors. Per això no se suporten PSKs de més de setze símbols

Per contra, la característica de les modulacions QAM és que els símbols propers són equidistants a cada eix, formant els símbols una constel·lació de graella quadrilateral, que es va fent més gran a mida que s'afegeixen més símbols. L'inconvenient d'aquesta modulació és que a més símbols, més consum energètic mitjà, reservant-se per a dispositius d'alt rendiment en els quals el consum energètic no sigui tant important.

2.6 Establiment de connexió

L'establiment de connexió presenta dues fases: cerca de l'espai espectral pel qual transmetre i l'acord (en anglès *handshake*) amb els dispositius amb els quals es desitgi comunicar.

2.6.1 Cerca d'espai espectral

Per determinar quina banda de l'espectre (amplada de banda i freqüència central) s'emprarà, primer cal tenir en compte les capacitats de tots els dispositius involucrats, informació que s'obté en el procés de descoberta. Amb aquesta informació s'establiran els requisits de la banda espectral de transmissió, essent la primera prioritat la màxima velocitat de transmissió.

$$\alpha = \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{c^2}{4 \cdot \pi \cdot (r \cdot f)^2} \quad (2.1)$$

Figura 2.5: Atenuació de la potència d'una ona electromagnètica per dispersió esfèrica, també coneguda com la llei del quadrat invers. λ : longitud d'ona [m], r : radi de propagació [m], c : velocitat de la llum en el medi [m / s], f : freqüència [Hz].

L'altre criteri per acabar de determinar quina banda s'emprarà finalment és quin tram buit de l'espectre compleix aquests requisits, part on intervé el senyal de l'espectre. Idealment s'hauria de mirar d'emprar les bandes de freqüència la més baixa possible, degut a que la dispersió del senyal de ràdio acostuma a incrementar amb la freqüència. Per exemple, en un model de dispersió esfèrica aquesta incrementa a raó de f^2 .

El metode emprat per sensar l'espectre dependrà finalment del dispositiu individual, ja que no tots els dispositius disposen de les mateixes capacitats computacionals i sensorials. No obstant, cal especificar algun sistema i alguns criteris de mínims que qualsevol dispositiu pugui implementar per tenir un mínim de coordinació.

Qualsevol dispositiu que empri el protocol hauria d'implementar com a mínim un detector d'energia per avaluar la potència present a cada bin.

En quant al criteri de decisió de presència de senyal, una primera aproximació, encara que relativament poc sofisticada, és establir llimdars de potència absoluts fixos establint d'aquesta manera una «sensibilitat de protocol». De fet, així es fa en la majoria de protocols de comunicacions ràdio digitals, en els quals el llindar de potència mínimament útil s'estableix al voltant dels -110 als -90 dBm. Un llindar fix semblant es podria establir per determinar si en un conjunt d'harmònics s'hi està transmetent un senyal proper que pugui interferir en una hipotètica transmissió.

Una altra proposta de criteri més sofisticat que l'anterior seria basar-se en llimdars de potència per sobre del terra del soroll del sistema de ràdio. No obstant, aquest criteri presenta dos inconvenients: el fet que el terra de soroll serà diferent en cada dispositiu, fins i tot entre unitats d'un mateix model, i que el terra de soroll pot presentar diferents valors en diferents bandes freqüencials per qüestions de disseny dels components analògics del capçal.

S'establiran per tant llimdars absoluts de potència mínima de senyal present, sobretot pel fet que el criteri del terra de soroll és relatiu i diferent per cada dispositiu.

2.6.2 Establiment en mode *ad-hoc*

Per iniciar la connexió, el terminal que pren la iniciativa envia un missatge de petició al canal de control assignat al node destinatari, afegint-hi al contingut l'adreça MAC del destinatari, després la de l'iniciant, l'identificador del canal de control de l'iniciant i finalment el tipus de transmissió que s'emprarà. La resposta s'envia pel mateix canal, incloent en el paquet l'adreça MAC de l'iniciant i el codi de resposta indicant si accepta la connexió o el motiu de rebuig. Si no es rep cap resposta passat un temps d'espera determinat, es reintenta la connexió fins a un nombre de reintents determinat pel propi dispositiu iniciant.

El protocol suportarà dos modes de transmissió de dades: *síplex* (només de l'iniciant al destinatari) o *dúplex* (ambdues parts transmeten dades). Les utilitats d'una connexió *síplex* serien sobretot per control remot i per emissió difusa (en anglès *broadcasting*).

Si el dispositiu accepta la connexió, s'inicia la fase de negociació de canal. El dispositiu iniciant envia una proposta en forma de missatge de control incloent-hi la freqüència central, l'amplada de banda i la modulació a emprar, i el destinatari ha d'acceptar o rebutjar la proposta basant-se en les seves capacitats, emprant sempre el criteri de màxima velocitat de dades assolible. Si es rebutja la proposta, l'iniciant en calcula i forma una altra. Si la proposta es rebutja massa cops, s'aborta l'intent de connexió.

En el cas d'una connexió *dúplex*, el destinatari ha de realitzar un sensat de l'entorn i una negociació pròpia amb l'iniciant (sense incloure-hi el camp de mode de connexió), a través del seu canal de control, per establir el seu canal de dades.

Amb la connexió establerta es continuarà emprant els canals de control de cada dispositiu per enviar missatges de manteniment de connexió.

Si s'estableix una connexió *ad-hoc* entre més de dos dispositius – cosa molt poc recomanada – cal emprar mecanismes de vigilància dels canals de control per evitar col·lisions. Tenint en compte que el canal sobre el qual funciona el protocol és el d'ones propagades i que la distància entre nodes no hauria de ser excessivament gran, els mecanismes adients a emprar serien el que entren dins la categoria de CSMA/CA.

2.6.3 Establiment en mode cooperatiu

Es pot considerar aquest mode de connexió com un conjunt de connexions *ad-hoc* en estrella, és a dir, múltiples terminals connectant-se a un mateix node que regula les interaccions entre tots i que, a més a més, sovint tindrà un rol de punt d'accés a xarxes més esteses sobre medis diferents. Totes les connexions a una xarxa cooperativa seran *dúplex*.

La diferència principal amb el mode *ad-hoc* és que el node central mantindrà una taula interna contenint la informació sobre tots els terminals registrats a la seva xarxa, més concretament:

- Nombre de canal de control
- Adreça MAC
- Banda descendent (f_c i BW)
- Banda ascendent (f_c i BW)

Per tant cal definir un altre tipus de missatge de control per registrar-se a una xarxa cooperativa per enviar al node central, incloent-hi adreça MAC i la banda utilitzable. El procés de registre inclourà la negociació dels canals. Conseqüentment, també hi haurà un missatge per desregistrar-se d'un node central, tal que aquest últim pugui esborrar l'entrada corresponent de la seva taula de terminals.

D'altra banda, caldrà que hi hagi una interrogació periòdica entre node central i extrems per tal d'indicar si la connexió es manté, cosa que requeriria els seus missatges de control corresponents. El sentit d'aquest mecanisme és ambivalent. Si el node central no rep més missatges de control, ni de manteniment ni d'establiment de connexió, en un temps determinat, s'eliminarà automàticament el terminal de la taula.

Un cop estigui registrat un node extrem al node central, es podrà iniciar una transmissió de dades en qualsevol moment per part d'ambdós nodes, emprant les bandes acordades.

El problema principal que cal enfrontar-se és les col·lisions al canal de control del node central, ja que serà utilitzat per múltiples dispositius. Un mecanisme CSMA/CA pot ajudar a alleujar el problema.

2.7 Transmissió i manteniment

La transmissió de dades útils es realitza a través del canal escollit en el procés d'establiment de connexió, amb les dades de monitorització i manteniment enviades a través dels canals de control.

Es mostra una estructura temptativa dels paquets de dades a les figures 2.6 i 2.7.

```

struct dataPacket{
    ulong originMacAddr \\ Adreça MAC d'origen .
    ulong destMacAddr \\ Adreça MAC de destinació .
    bool continue; \\ Indica si continua la transmissió
                    \\ amb un altre paquet .
    ushort length; \\ Llargària en octets de les dades .
    byte[65536] data; \\ Dades útils amb llargària variable .
    int crc32; \\ Codi de redundància cíclica de 32 bits .
}

```

Figura 2.6: Estructura d'un paquet de dades en pseudocodi.

Preamble	MAC Origen	MAC Dest.	Band.	Long.	Dades	CRC32
η_p	8	8	1	2	η_l	4

Figura 2.7: Trama d'un paquet de dades. Longituds en octets.

Amb aquesta estructura de paquet les eficiències màxima i mínima de protocol en transmissió són les següents:

$$\eta_{pmax} = \frac{B_u}{B_t} = \frac{65536}{65560} = 99,96\% \quad (2.2)$$

$$\eta_{pmin} = \frac{B_u}{B_t} = \frac{1}{25} = 4\% \quad (2.3)$$

Cal dir que en la gran majoria de casos d'ús es tendria a fer servir tot l'espai del paquet per enviar fragments d'un conjunt més gran de dades.

Cada paquet de dades hauria d'anar respost per un petit paquet pel canal de control indicant si la transmissió ha anat bé (ACK) o s'han produït errors de trama o d'integritat (NAK).

Cada cert nombre de missatges de dades caldria monitoritzar el canal per si han canviat les condicions d'aquest o per si algun dispositiu amb més prioritat demana accedir a part o a la totalitat de la banda de freqüències emprada². Totes les parts de la sessió s'enviaran les dades de monitorització des dels seus punts de vista.

El paràmetres a monitoritzar són els següents:

²A implementar en versions futures.

- Potència del senyal rebut, quantificat amb un indicador de qualitat de senyal.
- Nombre de trames de dades errònies.

Qualsevol de les següents variables pot canviar com a resultat d'una monitorització en el qual es conclouï que el canal actual no és adequat:

- Potència del senyal.
- Temps de símbol/amplada de banda.
- Freqüència central.
- Modulació (emprar més o menys símbols).

Cal recordar que el criteri sempre és intentar obtenir la màxima velocitat de dades possible. Si la situació del canal no ho permet, cal mantenir l'estat actual o fins i tot ajustar algun dels paràmetres, per exemple augmentant la potència o emprant una modulació menys densa, per millorar la qualitat de la transmissió.

Les modificacions d'amplitud de senyal no cal informar-les. Les modificacions de modulació s'han d'informar però sense renegociar el canal. Si cal modificar l'amplada de banda o la freqüència central s'ha de tornar a realitzar el procés de negociació de canal descrit a l'apartat d'establiment de comunicació.

Per acabar, cal indicar que no està previst afegir funcionalitats criptogràfiques ni de codificació de font a la transmissió de dades degut a que s'està treballant en capes baixes i per tant cal obtenir el màxim rendiment possible. S'espera que aquestes funcionalitats siguin cobertes per les capes superiors.

2.8 Finalització de la connexió

La comunicació pot finalitzar per qualsevol de les següents causes bàsiques:

- Alguna de les parts envia un missatge de control per tallar la comunicació (Desconnexió suau).
- Alguna de les parts deixa d'enviar missatges (Desconnexió dura).

En el segon cas, la comunicació acaba automàticament. En el primer cas, en algun moment qualsevol de les dues parts senyalitza amb un missatge de control que abortarà la connexió. Sempre és millor fer una desconnexió suau per evitar que l'altra part gastí energia inútilment esperant missatges que no arribaran mai.

El missatge de desconnexió incorporarà en el camp de dades un octet per a afegir en forma de codi numèric la raó concreta de la desconnexió.

Un cas especial és el desregistre d'una xarxa cooperativa, en el qual s'envia un altre tipus de missatge de control al node central indicant-lo que esborri la referència al terminal sortint de la seva taula, incloent l'alliberament de les bandes que s'estiguessin emprant per transmetre dades.

2.9 Llista de missatges de control

Heus aquí una llista de tots els tipus de missatge de control que s'han hagut de crear en aquesta iteració de la proposta. Cal recordar que cadascun té el seu identificador/etiqueta únic.

1. Petició de presència
2. Resposta de presència
3. Informació de dispositiu en descoberta (veure figura 2.3)
4. Petició de descoberta (mode enquesta)
5. Petició de connexió *ad-hoc* (+ 8 octets MAC destinatari, 8 octets MAC iniciant, 4 octets canal d'iniciant, 1 octet mode)
6. Resposta a connexió *ad-hoc* (+ 1 octet codi de resposta)
7. Proposta de canal (+ 8 octets freq. central, 4 octets amplada de banda, 1 octet tipus de modulació)
8. Resposta a proposta (+ 1 octet codi de resposta)
9. Petició de registre a xarxa cooperativa (+ 8 octets MAC terminal, 4 octets canal de terminal)
10. Resposta a registre a xarxa cooperativa (+ 1 octet codi de resposta)
11. Inici de transmissió de dades en xarxa cooperativa (+ 8 octets MAC destinació, 8 octets MAC origen)
12. Manteniment de transmissió de dades (+ 2 octets potència rebuda, 2 octets nombre d'errors)
13. Petició de canvi de modulació
14. Petició de canvi de banda
15. Resposta a petició de canvi de transmissió
16. Desconnexió en mode *ad-hoc*
17. Desregistre del node central en xarxa cooperativa

Capítol 3

Fase 1: Sensat de l'espectre

El primer pas a l'hora d'implementar un sistema de ràdio cognitiva és tenir un sistema de sensat de l'espectre. Segons els requeriments del protocol, cal que la banda sensada sigui la més ampla possible.

El primer problema que cal superar és el fet que amb la tecnologia actual la majoria de radiocapçals presenta una amplada de banda massa limitada per complir aquest requisit, fitada per la seva freqüència de mostreig. En el cas pràctic d'aquest projecte, el radiotransmissor USRP N200 presenta una freqüència de mostreig màxima de 100 megamostres per segon en recepció, que equival a una amplada de banda observable de 50 megahertz pel teorema de Nyquist, i 400 Mmostres/s en emissió, equivalent a 200 MHz d'amplada de banda. No obstant, a l'hora de transmetre mostres entre ordinador i USRP a través de la connexió IEEE 802.3 (Ethernet) la velocitat de mostreig màxima efectiva és de 50 Mmostres/s, 25 MHz d'amplada de banda [14].

Segons [14], l'USRP N200 pot sintonitzar des de contínua¹ fins a sis gigahertz. Una estratègia per superar la limitació d'amplada de banda donada per la freqüència de mostreig pot ser, aleshores, realitzar un escombrat de l'espectre sintonitzant el radiocapçal a intervals regulars de valor $BW = f_s/2$ hertz.

Aquest primer objectiu consisteix essencialment en obtenir un analitzador d'espectre similar en funcionament als aparells del mateix nom digitals.

3.1 Proves de l'equipament

El primer pas a realitzar és comprovar les funcionalitats de l'USRP. Per això es dissenya un mòdul senzill amb GNU Radio que envii les mostres recollides per l'aparell a una pica que en realitza la DFT i la mostra en pantalla.

¹Segurament com a ínfim, no com a mínim, degut a que no es pot rebre senyal continu a través de ràdio.

Amb aquestes proves s'ha observat que la freqüència màxima sintonitzable pel radiocapçal de l'USRP del laboratori és de 2,2 GHz, que no arriba a tocar la primera banda ISM de 2,4 GHz, emprada per la majoria de sistemes IEEE 802.11 actuals.

$$2,2 \cdot 10^9 + \frac{50 \cdot 10^6}{2 \cdot 2} = 2,2 \cdot 10^9 + 12,5 \cdot 10^6 = 2,2125 \text{GHz} < 2,4 \text{GHz} \quad (3.1)$$

També s'han realitzat proves d'emissió emprant els dos USRP, un com a emissor i l'altre com a receptor, emetent un to a diferents freqüències. Fent això s'ha observat que la freqüència portadora màxima emissible també és de 2,2 GHz.

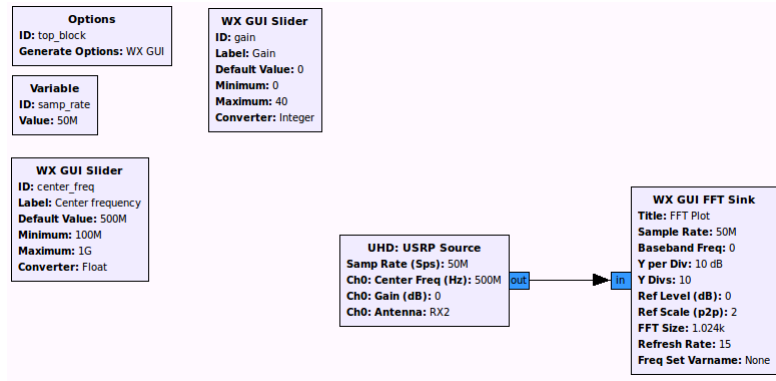


Figura 3.1: Sistema bàsic dissenyat amb GRC per provar l'entrada dels USRPs.

3.2 Desenvolupament

L'aproximació més evident a l'hora de resoldre aquest problema és anar incrementant la freqüència central en intervals de BW hertz i concatenar les mostres obtingudes a cada FFT en un sol vector. El problema rau en que GRC, al contrari que d'altres programes de disseny gràfic de sistemes com LabView, no disposa de blocs lògics ni cap altra manera d'implementar algorismes en el seu sí. A més a més, els blocs d'interfície amb UHD (el controlador pels USRPs) provistos per defecte a GNU Radio són massa bàsics: una font (entrada) i una pica (sortida). Per això caldrà anar més a fons i crear un mòdul propi per GRC.

Les funcions que ha de realitzar aquest bloc són les següents:

1. Agafar un nombre de mostres donat de l'USRP tal que $\log_2(n_s) \in \mathbb{N}$.
2. Enfinestrar aquestes mostres (multiplicar mostra per mostra per una seqüència de finestra).

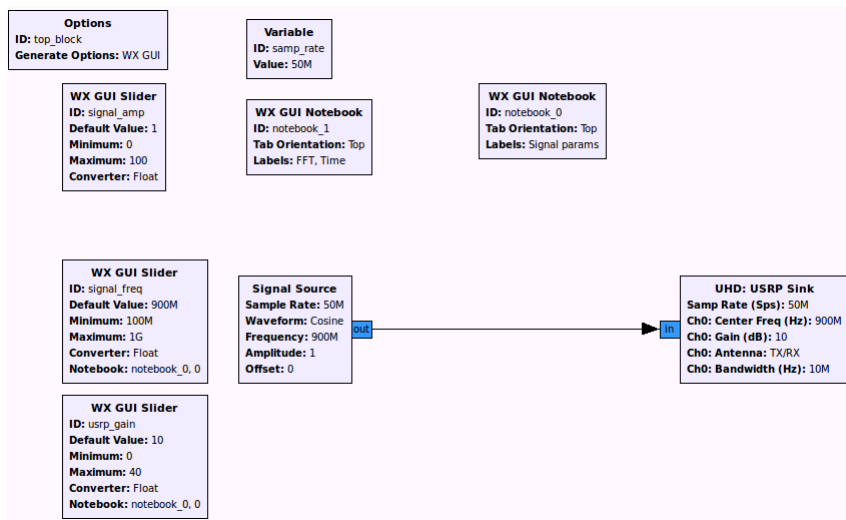


Figura 3.2: Sistema bàsic dissenyat amb GRC per provar la sortida dels USRPs.

3. Realitzar la FFT sobre les mostres.
4. Calcular la potència de cada freqüència de la DFT resultant en decibels al mil · liwatt ($10 \cdot \log_{10}(X[n]) + 30$).
5. Amplificar, es a dir, afegir un valor escalar en espai logarítmic anomenat guany a cada freqüència, ja que ara treballem en dBm. Si no, el guany hauria de ser multiplicatiu i en espai real.

3.2.1 Modificació d'un bloc generat per GRC

La primera aproximació feta per crear aquest bloc és basar-se en un disseny creat amb GRC i modificar-ne el seu codi font en Python, afegint una nova funció per tal de realitzar l'escombrat freqüencial. Es pot veure el codi resultant a l'annex C.1.

El problema d'aquesta aproximació és que no és utilitzable com a bloc en d'altres dissenys de GNU Radio, ja que la lògica està implementada a un lloc on no està previst fer-hi interfície. Sí que funcionaria, però, com a *script* executable autònom. Seria possible entrelaçar l'execució de scripts a través de *scripts* de consola, tal i com s'ha fet a ??, però es considera menys pràctic pel fet d'afegir més eines.

Caldrà, aleshores, crear un bloc bàsic, en concret una font. Això és possible a través del programa de la suite de GNU Radio `gr_modtool`, emprat per crear mòduls fora d'arbre i integrar-los a GNU Radio, podent-los fer servir per exemple a GRC.

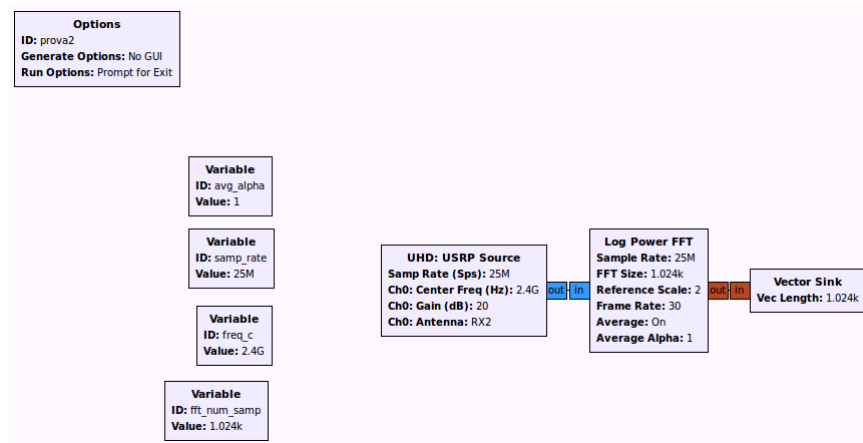


Figura 3.3: Disseny emprat com a base pel sistema d'escombrat freqüencial

3.2.2 Creació de mòdul fora d'arbre

El primer pas consisteix en crear el propi mòdul. El procés per fer-ho s'ha derivat de ??.

```
gr_modtool newmod UHD
```

Després es crea el bloc dins d'aquest mòdul, de tipus font i emprant Python com a llenguatge de desenvolupament.

```
cd gr-UHD
gr_modtool add usrp_source_sweep_fft_c.uhd -t source -l python
```

A continuació el programa demana la llista d'arguments del bloc, que seran les seves variables externes. En aquest cas es necessita:

- Freqüència inicial (Hz).
- Freqüència final (Hz).
- Velocitat de mostreig (mostres/s).
- Mida de bloc (tal que $\log_2(bs) \in \mathbb{Z}$).
- Guany (dB).
- Antena de recepció.
- Tipus de finestra.

Es completa la plantilla de codi generada per `gr_modtool`. Com que aquesta classe no està preparada per emprar altres mòduls de GNU Radio, caldrà proveir les funcions de processament de senyal d'una altra forma. Per ser Python un llenguatge interpretat, implementar els algorismes en el propi llenguatge seria extremadament ineficient. Per sort, una de les biblioteques més populars de l'entorn Python és una de càlcul numèric, anomenada NumPy. Aquesta biblioteca crida a funcions en biblioteques generades amb codi compilat, cosa que malgrat no sigui idealment eficient és molt millor que l'escenari anterior.

El codi final del *script* es pot veure a C.2.

Com a penúltim pas cal emplenar el fitxer `.xml` que proveeix la interfície del bloc per GRC. El resultat final es pot veure a l'annex C.3.

Finalment s'instal·la el mòdul a GNU Radio, havent entrat prèviament a la carpeta de *build*.

```
cmake ../
make
sudo make install
sudo ldconfig (Obligatori per a sistemes basats en Debian.)
```

Els problemes a l'hora d'implementar aquest bloc han vingut principalment pel tractament dels tipus de dades. Python no fa distincions de tipus l'hora d'operar amb dades i les incompatibilitats no es detecten fins que no s'executa el *script* del bloc, ja sigui amb el programa de test o intentant fent-lo servir a GRC. En el mateix àmbit, també ha estat difícil trobar els tipus de dades específics a l'hora de configurar la representació del bloc a GRC.

Un altre problema que ha sorgit és que no s'ha trobat la manera de canviar el tipus de finestra en GRC. Per tant, aquesta s'ha d'establir de manera estàtica abans d'instal·lar el bloc.

3.2.3 Avaluació del funcionament del sistema d'escombrat

Finalment s'ha aconseguit fer funcionar el bloc amb GRC, podent observar així bandes d'espectre molt més grans del que permetria l'USRP per si mateix. Es pot veure una captura de la sortida del disseny mostrat a la figura 3.4 a la figura 3.5 per una amplada de banda de 100 MHz a 1 GHz.

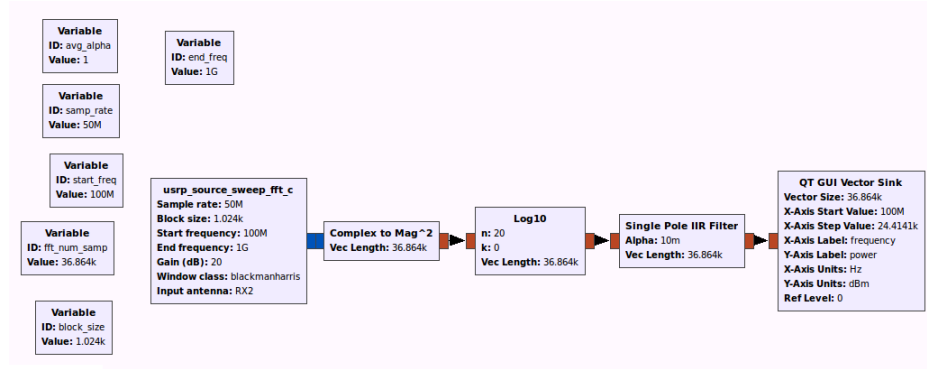


Figura 3.4: Diagrama del sistema receptor basat en el sistema d'escombrat.

En primer lloc cal destacar que el rendiment del sistema, particularment en quant a la velocitat de refresc de captures, ha resultat molt millor del que s'esperava, sobretot tenint en compte que el USRP canvia la freqüència central molt sovint i que el codi del bloc està fet en Python que, tal i com s'ha escrit abans, no és indicat per aplicacions que requereixen un elevat nombre d'operacions en temps, malgrat fer servir biblioteques especials.

Es pot veure com la representació de l'espectre obtinguda fa turons amb amplada de banda $f_s/2$ (Cal recordar que en aquest escenari no es té en compte la possibilitat de sobre mostrejar i per tant freqüència de mostreig i amplada de banda capturada estan directament relacionats). Aquest fenomen és segurament degut a l'enfinestrament que es realitza en cada captura de mostres, el qual distorsiona l'espectre freqüencial. Cal no oblidar que els efectes de l'enfinestrament són sempre presents pel fet de partir d'un interval de temps finit. Això, però, redueix la certesa de les dades obtingudes, esdevenint-ho cada cop menys quant més s'allunya de les freqüències centrals de bloc.

Un altre fenomen a observar és la variabilitat de la potència mínima a través de l'espectre observat, essent més alta a la banda de ràdio FM i descendent a partir d'allà. Això pot ser degut a un nombre de causes. La primera és la variabilitat de les potències rebudes de cada senyal, causant-se l'elevació de la potència mínima per la combinació dels efectes de l'enfinestrament i la multiplexació imperfecte d'alguns senyals, resultant en ambdós casos en lòbuls secundaris significants que s'acumulen. La segona és la variabilitat en freqüència de les xifres de soroll dels components analògics del capçal de l'USRP, especialment els no lineals, resultant en una potència de soroll variable en funció de la freqüència.

Un altre fenomen que podria causar problemes és el desfasament temporal entre lectures freqüencials, causada pel fet que no s'agafen mostres de tota la

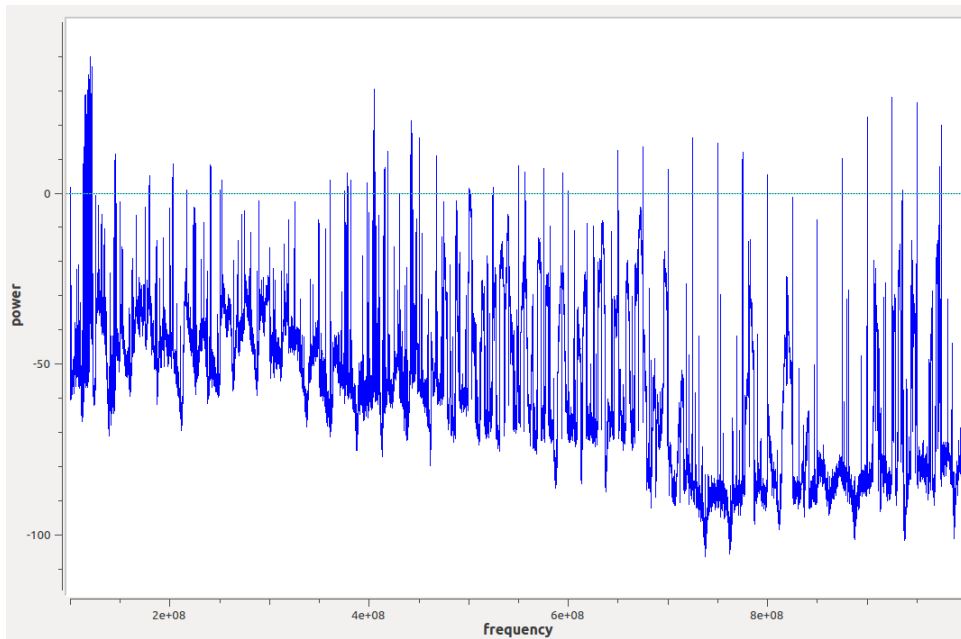


Figura 3.5: Captura de la sortida de l'escombrador espectral. Abscisses en Hz, ordenades en dBm.

banda a la vegada, sinó en intervals capturats en instants de temps diferents, creant-se una mena d'efecte «onada». Aquest efecte pot ser mitigat pel fet que cada bloc freqüencial es captura en mil · lisegons, encara que caldrà constatar-ho amb resultats experimentals.

Capítol 4

Cloenda

4.1 Conclusions

Per raons diverses, no s'ha arribat tant lluny en la part pràctica com estava previst en el moment de començar el projecte. També cal reconèixer que segurament s'ha estat massa ambiciós a l'hora d'emprendre un projecte d'aquesta mena, dissenyar un protocol de comunicació general basat en una tecnologia encara poc madura, sobretot tenint en compte que s'ha treballat sol i hi havia un límit de temps fort imposat pel termini d'extinció dels estudis. I en un principi es pretenia afegir-hi una part de disseny electrònic experimental per obtenir capçals de gran amplada de banda i de més alta freqüència, més enllà dels deu gigahertz, per tal d'encabir-hi els estudis d'enginyeria electrònica.

Certament, aquest projecte requeriria de grups de treball per poder avançar amb garanties. Tot i les dificultats, aquest document pot servir com una base per desenvolupar un sistema més sofisticat, proposant solucions als problemes més significants que cal tractar.

En el disseny del protocol físic basat en ràdio cognitiva s'han trobat un conjunt de temes fonamentals als quals s'ha intentat donar una solució:

- Com detectar els dispositius actius (descoberta).
- Com comunicar-se entre ells sense haver establert una negociació prèvia.
- Quins tipus de connexió suportar, i com implementar-los.
- Com escollir la banda a emprar per a un transmissió en qualsevol moment donat a través del sensat espectral.

Un dels motius pels quals s'ha emprès aquest projecte és que, malgrat que ja hi ha un cos de recerca al voltant de la ràdio cognitiva (encara que de moment immadur), de moment no hi ha hagut cap proposta de cara al públic de muntar

tot un sistema, un protocol, al voltant d'aquest concepte. L'autor considera que avançar cap a la desregularització i democratització de l'espectre a través d'un ús intel·ligent i més exhaustiu del radioespectre és una prioritat a curt termini, que a més a més pot tenir com a efecte secundari unes velocitats de transmissió de dades per ràdio més elevades per a la majoria de dispositius habilitats que avui dia.

Cal tenir també en compte que, per poder extreure'n el màxim de profit, cal ser capaç d'explotar rangs de freqüències més grans que avui dia, d'aquí la necessitat d'una part electrònica al projecte.

4.2 Fases pràctiques restants

4.2.1 Establiment de comunicació bàsica entre dos terminals en mode *ad-hoc*

Un cop s'és capaç d'observar l'espectre en bandes prou amples, es procedirà a implementar tota la part de la comunicació *ad-hoc*, emprant els dos USRP N200 disponibles al laboratori. Això inclou la tria de bandes de freqüència que s'empraran com a canals de control.

Per a realitzar aquesta part es proposa crear un altre mòdul fora d'arbre de tipus general que rebí com a entrada la sortida de l'escombrat espectral i pugui operar sobre aquest. Addicionalment, si el bloc és emissor, tindrà una altra entrada amb les dades que calgui enviar. Com a sortides hi haurà les accions a realitzar sobre l'espectre i el corrent de dades rebudes en una transmissió. Això primer pot requerir la creació d'un bloc de pica anàlog a la font que s'ha programat en aquest projecte.

L'objectiu d'aquesta fase seria poder realitzar una transmissió d'un volum no trivial de dades emprant les especificacions del protocol actuals, canviant-les si els resultats experimentals ho regissin.

4.2.2 Establiment de comunicació bàsica en mode cooperatiu centralitzat

Semblant a la fase anterior, l'objectiu és realitzar una transmissió de dades no trivial emprant el mode cooperatiu del protocol. El problema principal és que es necessiten més de dos terminals per verificar de debò el funcionament del mode cooperatiu.

En aquesta fase s'ampliaran les funcionalitats del bloc de protocol creat a la fase anterior per incorporar-hi la possibilitat d'establir connexions en mode cooperatiu, incloent-hi la taula de nodes extrems de l'ídem central.

4.2.3 Interfície amb capes superiors

En aquesta fase se substituiria les entrades i sortides de dades per fonts i piques, respectivament, procedents de protocols a nivells de xarxa superiors, en aquest cas TCP/IP. Molt probablement calgués adaptar ARP, el qual realitza la interfície entre la capa d'enllaç i la d'IP, per saber a quin node transmetre les dades, particularment en mode cooperatiu.

4.3 Millores futures

4.3.1 Suport per a modulacions d'espectre compartit

Les modulacions a suportar en un principi serien les passabanda «tradicional», com ara n-PSK o n-QAM. Tot i això, pot resultar convenient poder suportar aquest tipus de modulacions, com ara CDMA i OFDMA, per les seves qualitats d'eficiència espectral amb múltiples usuaris i resistència a interferències cocanal orientades a casos d'ús que no tinguin com a prioritat la velocitat de dades o necessitin aquesta resistència, per exemple entorns amb poca cobertura.

4.3.2 Suport per a sistemes criptogràfics

Una de les especificacions del protocol és evitar l'ús de sistemes criptogràfics pel seu cost computacional, delegant-lo a capes de xarxa superiors. Tot i això, durant la realització del projecte s'ha vist la necessitat l'ús d'aquests sistemes com a mínim en el moment d'establir connexió per tal d'evitar connexions no autoritzades, requerint aleshores mecanismes d'autenticació que s'han d'implementar amb criptografia asimètrica sí o sí, estudiant maneres d'evitar atacs criptoanalítics elementals.

Cal remarcar que qualsevol mecanisme criptogràfic que s'afegeixi al protocol no és en cap cas substituït dels sistemes més complexos i provats que s'empren a capes superiors, com ara TLS.

4.3.3 Suport per a entrellaçat en cas mòbil

Cal estudiar com afegir funcions d'entrellaçat de dades en el cas que un o ambdós nodes d'una transmissió s'estigui movent a una velocitat significant, escenari en el qual un simple control de potència pot esdevenir insuficient. Més en concret, cal detallar els criteris sota els quals es començarà o acabarà d'entrellaçar les dades transmeses i la negociació de les dimensions de la matriu d'entrellaçat si fos possible.

4.3.4 Suport per a priorització de dispositius

Tal i com indica el cos de recerca actual en ràdio cognitiva (vegi's [?] i [7]), es requeririen mecanismes per prioritzar l'ús de les bandes espectrals més pri-

vilegiades per a conjunts d'usuaris que ho necessitin, per exemple els associats a serveis estatals com ara sanitat i bombers. Aquesta funcionalitat va directament relacionada amb l'anterior, ja que calen sí o sí mecanismes d'autenticació basats en certificats per evitar atacs de suplantació bàsics.

4.3.5 Aprentatge automàtic

L'aprenentatge automàtic està esdevenint un dels camps cap els quals s'està abocant el desenvolupament de programari, sobre tot a mesura que la miniaturització electrònica arriba a la seva assíptota. Aquest camp està actualment fora de l'abast del projectista, però seria molt interessant poder aconseguir que els dispositius amb més capacitat computacional puguin recordar l'ús de l'espectre en el temps i basar-se en aquestes dades per a fer més ràpid el procés de cerca de banda lliure. Amb això el sistema podria fer completament l'honor al terme de «ràdio cognitiva».

Apèndix A

GNU Radio

A.1 Introducció

GNU Radio és una *suite*, un conjunt de programes, per construir sistemes de ràdio definida per programari. Tal i com el seu nom indica, forma part de l'entorn GNU i per tant està coberta per la GPL, que en dicta la condició de programari lliure.

El projecte va començar l'any 2001, partint a l'origen d'un projecte del MIT anomenat Pspectra, encara que posteriorment es va haver de fer una refactorització del codi per eliminar qualsevol referència a aquest últim projecte. GNU Radio compta amb la col·laboració i patrocini d'Ettus Research, proveïnt-hi també suport per la seva gama de dispositius SDR, els USRPs.

El lloc web de GNU Radio és a <https://www.GNURadio.org/>, i la seva wiki a <https://wiki.GNURadio.org/>.

A.2 Arquitectura

GNU Radio permet implementar algorismes de processament de senyal de manera relativament senzilla a través de la interconnexió d'elements algorísmics més senzills anomenats blocs, agrupats en mòduls.

A nivell de programari, GNU Radio està dividit en dues capes:

1. La capa baixa, en la qual s'implementen els algorismes que requereixin més rendiment, principalment de càlcul numèric. En aquesta capa s'empra el llenguatge de programació C++, el qual compila a ensamblador. Els fitxers que es generen per aquesta capa són biblioteques de codi.

- La capa alta, en la qual s'implementa lògica més lleugera i les interconnexions entre blocs. En aquesta capa s'empra el llenguatge Python, un llenguatge interpretat. Els fitxers que es generen en aquesta capa són *scripts* de Python, en alguns casos autoexecutables.

La interfície entre les dues capes es realitza a través de crides a les biblioteques nadiues per part dels *scripts*.

Adicionalment, GNU Radio proveeix una eina per generar *scripts* de manera gràfica, anomenada GNU Radio Companion. Es tracta d'un dissenyador de grafs de fluxe, similar a LabView i Simulink, que permet dissenyar sistemes de SDR de manera relativament senzilla enllaçant blocs més simples. GRC podria considerar-se com una tercera capa de l'arquitectura, una de gràfica.

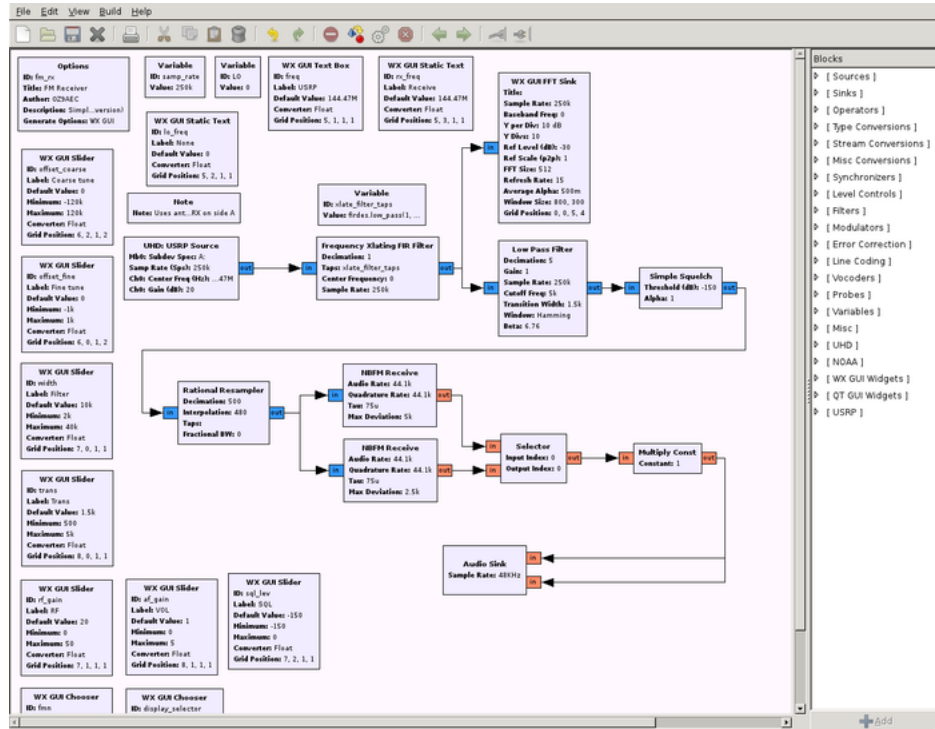


Figura A.1: Exemple d'aplicació dissenyada amb GRC: un receptor FM. **Font:** <http://oz9aec.net/radios/gnu-radio/grc-examples>

A.3 Funcionament

GNU Radio presenta dues maneres de crear sistemes: gràficament (amb GRC) o manualment (escrivint els *scripts* Python corresponents).

En realitat, GRC simplement és una eina per fer més fàcil el procés de creació de *scripts* Python, el qual els genera automàticament. Al contrari que programes com LabView, GRC no té per si mateix capacitats executives. Un cop generats, els *scripts* també es poden editar manualment per afegir o treure funcionalitats.

Molt important a tenir en compte és que malgrat que Python no fa un tractament diferenciat dels diferents tipus de dades en la seva lògica, GNU Radio sí que ho fa. Connectar dos blocs amb tipus de sortida i entrada diferents resultarà en un error en execució. Un dels avantatges de GRC és que aquest permet preveure aquest tipus d'errades abans que això passi.

Els tipus de dades de GNU Radio es diferencien segons els criteris següents:

Tipus qualitatiu Numèric, booleà o missatge.

Tipus de nombre Enter o decimal de coma flotant. Només aplica als tipus numèrics.

Mida de dades 8, 16, 32, 64 octets. Només aplica als tipus numèrics.

Dimensió Escalar o n-vector. Vectors de diferent mida acostumen a no ser compatibles.

A.4 Extensió

GNU Radio és un sistema modular, és a dir, se li poden afegir noves funcionalitats de manera discreta. Es poden afegir nous blocs al sistema, que poden anar agrupats en mòduls.

GNU Radio distingeix entre dos tipus de blocs: jeràrquics (o dins d'arbre) i fora d'arbre. Els primers han d'estar compostats de connexions entre d'altres blocs, tant dins com fora de l'arbre. Els segons poden existir de manera independent i s'empren per afegir funcionalitats que no cobreixin cap dels blocs instal·lats.

Els mòduls jeràrquics s'acostumen a crear amb GRC, essent possible editar el fitxer de *script* Python generat posteriorment.

Complex Float 64
Complex Float 32
Complex Integer 64
Complex Integer 32
Complex Integer 16
Complex Integer 8
Float 64
Float 32
Integer 64
Integer 32
Integer 16
Integer 8
Message Queue
Async Message
Bus Connection
Wildcard

Figura A.2: Tipus de dades tractables per GNU Radio i els seus colors corresponents vistos a GRC.

Per crear blocs fora d'arbre cal seguir un procediment de construcció i disseny específic guiat pel programa `gr_modtool`. Aquest programa també es pot fer servir per crear mòduls jeràrquics de manera manual.

Els mòduls fora d'arbre es poden implementar o bé amb Python o bé amb C++, depenent de les necessitats. Això sí, cal especificar-ho a l'hora de crear el nou bloc dins del mòdul.

El creador de blocs `gr_modtool` genera també plantilles per a tests d'unitat si així s'especifica. Aquests tests permeten avaluar el funcionament correcte del bloc de manera aïllada abans de provar-lo en el món exterior.

`gr_modtool` també genera els fitxers de compilació automàtica (emprant `make` i `cmake`) per tal de fer més fàcil el procés de compilació i acoblament amb la biblioteca de GNU Radio, podent aleshores emprar-lo en GRC. Per a fer això últim cal també indicar quina serà l'estructura del bloc gràfic (paràmetres, entrades i sortides) en un fitxer de tipus XML la plantilla del qual també genera `gr_modtool`.

Apèndix B

Entorn de treball

La labor experimental del projecte s'ha realitzat en el laboratori de comunicacions ràdio (D4-112). Aquest laboratori està equipat amb un conjunt d'ordinadors de sobretaula amb sistema operatiu Ubuntu 12 i aparells de radiocomunicació, més en concret, diferents models de USRPs, alguns d'aquests emprats en projectes passats com ara [3].

Específicament, per aquest projecte s'han emprat dos dels ordinadors, cadascun dels quals connectat a un USRP N200 a través d'una connexió IEEE 802.3 (Ethernet). Els ordinadors també es connecten a Internet a través de Ethernet. Tal i com estan configurats ambdós ordinadors actualment cal comutar entre perfils de xarxa per poder comunicar-se amb l'USRP i Internet, cosa que podria millorar-se per tal de fer possible el seu ús simultani amb canvis pertinents a la taula de rutes.

La instal·lació i configuració dels ordinadors, tant del controlador UHD per comunicar-se amb els USRPs com del programa GNU Radio, ja va ser feta abans de l'inici d'aquest projecte. Els detalls sobre aquests procediments poden veure's a [2].

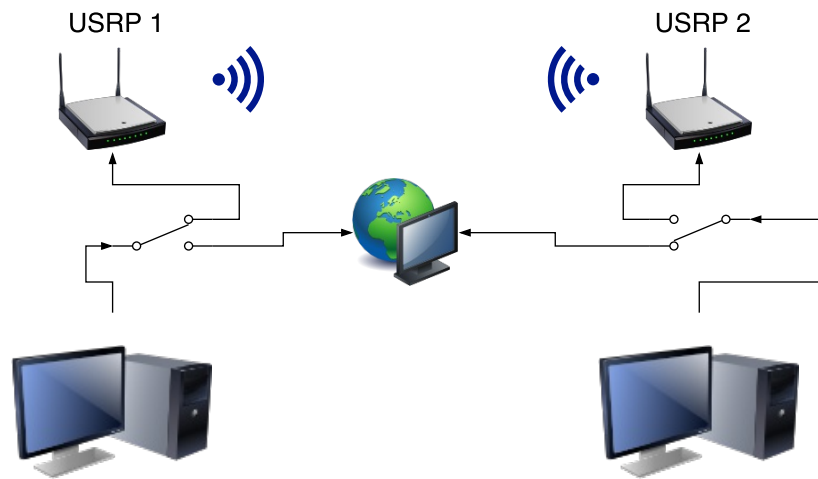


Figura B.1: Esquema de l'entorn de treball.

Apèndix C

Fitxers de codi

C.1 Codi Python d'una escombra espectral basada en un disseny gràfic previ

```
#!/usr/bin/env python2
#####
# GNU Radio Python Flow Graph
# Title: Prova2
# Generated: Fri Jul 15 14:18:05 2016
#####

from ctypes import c_size_t
from GNU Radio import blocks
from GNU Radio import eng_notation
from GNU Radio import gr
from GNU Radio import uhd
from GNU Radio.eng_option import eng_option
from GNU Radio.fft import logpwrfft
from GNU Radio.filter import firdes
from optparse import OptionParser
import pmt
import time
import math

class prova2(gr.top_block):

    def __init__(self):
        gr.top_block.__init__(self, "Prova2")

        #####
        # Variables
```

```

#####
self.samp_rate = samp_rate = 25e6
self.num_samp = num_samp = 1024
self.freq_c = freq_c = 500e6

#####
# Blocks
#####
self.uhd_usrp_source_0 = uhd.usrp_source(
    ", ".join((" ", " ")),
    uhd.stream_args(
        cpu_format="fc32",
        channels=range(1),
    ),
)
self.uhd_usrp_source_0.set_samp_rate(samp_rate)
self.uhd_usrp_source_0.set_center_freq(freq_c, 0)
self.uhd_usrp_source_0.set_gain(20, 0)
self.uhd_usrp_source_0.set_antenna("RX2", 0)
self.logpwrfft_x_0 = logpwrfft.logpwrfft_c(
    sample_rate=samp_rate,
    fft_size=num_samp,
    ref_scale=2,
    frame_rate=30,
    avg_alpha=1.0,
    average=False,
)
self.log_fft_out = blocks.vector_sink_f(num_samp)

#####
# Connections
#####
self.connect((self.logpwrfft_x_0, 0), (self.log_fft_out, 0))
self.connect((self.uhd_usrp_source_0, 0), (self.logpwrfft_x_0, 0))

def get_samp_rate(self):
    return self.samp_rate

def set_samp_rate(self, samp_rate):
    self.samp_rate = samp_rate
    self.uhd_usrp_source_0.set_samp_rate(self.samp_rate)
    self.logpwrfft_x_0.set_sample_rate(self.samp_rate)

def get_num_samp(self):
    return self.num_samp

```

C.1. CODI PYTHON D'UNA ESCOMBRA ESPECTRAL BASADA EN UN DISSENY GRÀFIC PREVI57

```
def set_num_samp(self , num_samp):
    self.num_samp = num_samp

def get_freq_c(self):
    return self.freq_c

def set_freq_c(self , freq_c):
    self.freq_c = freq_c
    self.uhd_usrp_source_0.set_center_freq(self.freq_c , 0)

def get_fft(self , start_freq , end_freq):
    if (start_freq > end_freq):
        raise ValueError("La frecuencia inicial no hauria de ser mes gran que la
steps = int(math.ceil((end_freq - start_freq) / self.samp_rate))
result = list()
for index in range(0, steps):
    self.set_freq_c(start_freq + self.samp_rate * (index + 0.5))
    while (len(self.log_fft_out.data()) < self.num_samp):
        pass
    result += list(self.log_fft_out.data())
    print(str(len(result)) + " samples taken")
return result

if __name__ == '__main__':
    # Test
    parser = OptionParser(option_class=eng_option , usage="%prog: [options]")
    (options , args) = parser.parse_args()
    tb = prova2()
    tb.start()
    result = tb.get_fft(100e6 , 1e9)
    print(len(result))
    try:
        raw_input('Press Enter to quit: ')
    except EOFError:
        pass
    tb.stop()
    tb.wait()
```

C.2 Codi en Python del mòdul fora d'arbre de l'escombra espectral basada en UHD

```
#!/usr/bin/env python
# -*- coding: utf-8 -*-
#
# Copyright 2016 <+YOU OR YOUR COMPANY+>.
#
# This is free software; you can redistribute it and/or modify
# it under the terms of the GNU General Public License as published by
# the Free Software Foundation; either version 3, or (at your option)
# any later version.
#
# This software is distributed in the hope that it will be useful,
# but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
# MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
# GNU General Public License for more details.
#
# You should have received a copy of the GNU General Public License
# along with this software; see the file COPYING. If not, write to
# the Free Software Foundation, Inc., 51 Franklin Street,
# Boston, MA 02110-1301, USA.
#

import math
import numpy
from GNU Radio import gr
from GNU Radio import fft
from GNU Radio import uhd

class usrp_source_sweep_fft_c(gr.sync_block):
    """
    docstring for block usrp_source_sweep_fft_c
    """
    def __init__(self, sample_rate=25e6, block_size=1024, start_freq=1e8, end_
        # Inicialització d'atributs
        self.sample_rate = sample_rate
        self.bandwidth = self.sample_rate / 2
        self.block_size = block_size
        self.start_freq = start_freq
        self.end_freq = end_freq
        self.gain = gain
        self.window = self.select_window(window)
        self.antenna = antenna
        self.num_steps = usrp_source_sweep_fft_c.calculate_steps(self.bandwidth)
```

C.2. CODI EN PYTHON DEL MÒDUL FORA D'ARBRE DE L'ESCOMBRA ESPECTRAL BASADA EN UHD59

```
# Inicialització de l'USRP
self.usrp_source = uhd.usrp_source(
    ",".join((" ", " ")),# -*- coding: utf-8 -*-
    uhd.stream_args(
        cpu_format="fc32",
        channels=range(1),
    ),
)
self.usrp_source.set_samp_rate(self.sample_rate)
self.usrp_source.set_gain(self.gain, 0)
self.usrp_source.set_antenna(self.antenna, 0)
# Inicialització del bloc
gr.sync_block.__init__(self,
    name="usrp_source_sweep_c",
    in_sig=None,
    out_sig=[(numpy.complex64, self.num_steps * self.block_size)])

@staticmethod
def calculate_steps(bandwidth, start_freq, end_freq):
    if (end_freq <= start_freq):
        raise ValueError("El valor de freqüència inicial no pot ser més gran que
            return int(math.ceil((end_freq - start_freq) / bandwidth))

def select_window(self, window_type):
    window_select = {
        "rectangular": fft.window.rectangular(self.block_size),
        "hamming": fft.window.hamming(self.block_size),
        "hanning": fft.window.hanning(self.block_size),
        "parzen": fft.window.parzen(self.block_size),
        "blackmanharris": fft.window.blackmanharris(self.block_size),
    }
    return window_select.get(window_type, fft.window.blackmanharris(self.block_size))

def calculate_center_freq(self, index):
    return self.start_freq + self.bandwidth / 2 + index * self.bandwidth

def get_total_samples(self):
    return self.num_steps * self.block_size

def get_window_power(self):
    return sum(map(lambda x: x*x, self.window))

def collect_samples(self, index):
    current_freq_c = self.calculate_center_freq(index)
    self.usrp_source.set_center_freq(current_freq_c, 0)
    result = self.usrp_source.finite_acquisition(self.block_size)
```

```
        return result

def do_fft(self, sample_block):
    windowed_block = numpy.multiply(sample_block, self.window) # Enfines
    result = numpy.fft.fft(windowed_block)
    return result

def work(self, input_items, output_items):
    out = numpy.array([], numpy.complex64)
    for index in range(0, self.num_steps):
        time_data = self.collect_samples(index)
        freq_data = self.do_fft(time_data)
        out = numpy.concatenate((out, freq_data))
    output_items[0][:] = out
    return len(output_items[0])
```


C.3 Fitxa XML per generar la interfície gràfica del mòdul de l'escombra espectral fora d'arbre

```

<?xml version="1.0"?>
<block>
  <name>usrp_source_sweep_fft_c</name>
  <key>UHD_usrp_source_sweep_fft_c</key>
  <category>UHD</category>
  <import>import UHD</import>
  <make>UHD.usrp_source_sweep_fft_c($sample_rate, $block_size, $start_freq, $end_freq)
  <!-- Make one 'param' node for every Parameter you want settable from the GUI.
  Sub-nodes:
    * name
    * key (makes the value accessible as $keyname, e.g. in the make node)
    * type -->
  <param>
    <name>Sample rate</name>
    <key>sample_rate</key>
    <type>real</type>
  </param>
  <param>
    <name>Block size</name>
    <key>block_size</key>
    <type>int</type>
  </param>
  <param>
    <name>Start frequency</name>
    <key>start_freq</key>
    <type>real</type>
  </param>
  <param>
    <name>End frequency</name>
    <key>end_freq</key>
    <type>real</type>
  </param>
  <param>
    <name>Gain (dB)</name>
    <key>gain</key>
    <type>real</type>
  </param>
  <param>
    <name>Window class</name>
    <key>window</key>

```

```

    <type>string </type>
</param>
<param>
  <name>Input antenna</name>
  <key>antenna</key>
  <type>string </type>
</param>

<!-- Make one 'source' node per output. Sub-nodes:
      * name (an identifier for the GUI)
      * type
      * vlen
      * optional (set to 1 for optional inputs) -->
<source>
  <name>out</name>
  <type>complex</type>
  <vlen>2 * $block_size * ($end_freq - $start_freq) / $sample_rate</vlen>
</source>
</block>

```

Bibliografia

- [1] Tevfik Yüçek, Hüseyin Arslan: *A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications*, IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 11, no. 1, 1r quart del 2009.
- [2] Israel Perejil: *Implementación de terminales de Radio Cognitiva en la banda de TV*, ETSE Telecomunicació Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Febrer 2016.
- [3] Alessandro Raschellà, *Cognitive Management Frameworks and Spectrum Management Strategies exploiting Cognitive Radio Paradigm*, ETSE Telecomunicació Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Maig 2015.
- [4] S.A. Hook: *Allocation of the Radio Spectrum: Is the Sky the Limit?*, Universitat d'Indiana (EUA), 1993.
- [5] Karlin Lillington: *Overcrowded airwaves mean it's time to hop ahead*, The Guardian, 16 Febrer 2006.
<https://www.theguardian.com/technology/2006/mar/02/newmedia.guardianweeklytechnologysection1>
- [6] Joseph Mitola III, Gerald Q. Maguire: *Cognitive Radio: making software radios more personal*, Institut Reial de Tecnologia de Suècia.
- [7] Erik Axell, Geert Leus, Erik G. Larsson, H. Vincent Poor, *Spectrum Sensing for Cognitive Radio : State-of-the-Art and Recent Advances*, IEEE Signal Processing Magazine
- [8] Jacques Palicot, Joseph Mitola III, Zhongding Lei, Friedrich K. Jondral: *Special issue on 10 years of cognitive radio: state-of-the-art and perspectives*, EURASIP Journal on Iereless Communications and Networking.
- [9] Omer Anjum, Tapani Ahonen, Fabio Garzia et al.: *State of the art base-band DSP platforms for Software Defined Radio: A survey*, Universitat de Tampere (Finlàndia), Desembre 2011.
- [10] Tom Simonite: *Moore's Law Is Dead. Now What?*, MIT Technology Review, 13 Maig 2016.
<https://www.technologyreview.com/s/601441/moores-law-is-dead-now-what/>

- [11] Sebastián Blanch, Ángel Cardama, Miguel Ferrando, Lluís Jofre, Juan M. Rius, Jordi Romeu: *Antenes*, Universitat Politècnica de Catalunya, segona edició, Setembre 2002.
- [12] Y. Mushiake: *Log-Periodic Structure Provides No Broad-Band Property for Antennas*, Journal of The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Vol. 82, No. 5, pp. 510-511, Maig 1999.
- [13] Full d'especificacions de la gamma USRP X300, Ettus Research.
https://www.ettus.com/content/files/X300_X310_Spec_Sheet.pdf
- [14] Lloc web de l'USRP N200, incloent-hi el full d'especificacions.
<https://www.ettus.com/product/details/UN200-KIT>
- [15] Wiki de GNU Radio: *Out of Tree Modules*.
<https://wiki.GNURadio.org/index.php/OutOfTreeModules>
- [16] Wiki de GNU Radio: *Blocks Coding Guide*.
<https://wiki.GNURadio.org/index.php/BlocksCodingGuide>

Glossari d'inicials i abreviatures

- ACK** ACKnowledged (Admès)
- ADC** Analog to Digital Converter (Conversor analògic a digital)
- CSMA/CA** Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance (Múltiple accés per sensat de portador / prevenció de col·lisions)
- DAC** Digital to Analog Converter (Conversor digital a analògic)
- DFT** Discrete Fourier Transform (Transformació discreta de Fourier)
- DSP** Digital Signal Processing/Processor (Processament/Processador digital del senyal)
- ETSI** European Telecommunications Standards Institute (Institut europeu d'estàndards de telecomunicació)
- FFT** Fast Fourier Transform (Transformació Ràpida de Fourier)
- GRC** GNU Radio Companion (Programa gràfic de disseny de mòduls de SDR)
- GPL** General Public License (Llicència pública general)
- GSM(C)A** Global System for Mobile Communications Association (Associació per sistema global de comunicacions mòbils)
- IEEE** Institute of Electrical and Electronic Engineering (Institut d'enginyeries elèctrica i electrònica)
- I&Q** Infase i Quadratura
- ISM** Industry, Science and Medicine (Indústria, ciència i medicina)
- ITU** International Telecommunications Union (Unió internacional de telecomunicacions)
- JFET** Junction gate Field Effect Transistor (Transistor d'efecte de camp amb porta d'unió)

- MAC** Machine Access Control (Control d'accés a màquina)
- MESFET** MEtal-Semiconductor Field Effect Transistor (Transistor d'efecte de camp metall-semiconductor)
- MIT** Massachussets Institute of Technology (Institut tecnològic de Massachussets)
- MOSFET** Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor (Transistor d'efecte de camp metall-òxid-semiconductor)
- NAK** Not AcKnowledgeed (No admès)
- OSI** Open Systems Interconnect (Interconnexió de sistemes oberta)
- SDR** Software Defined Radio (Ràdio definida per programari)
- SIMD** Single Instruction, Multiple Data (Instrucció única, múltiples dades)
- SNR** Signal to Noise Ratio (Relació senyal a soroll)
- TLV** Tag, Length and Value (Etiqueta, longitud i valor)
- UHD** Universal Hardware Driver (Controlador de maquinari universal)
- UHF** Ultra High Frequency (Freqüència ultraalta)