



UNIVERSITATEA “POLITEHNICA” DIN BUCUREȘTI
FACULTATEA DE ELECTRONICĂ, TELECOMUNICAȚII ȘI
TEHNOLOGIA INFORMAȚIEI
DEPARTAMENTUL DE TELECOMUNICAȚII

TEZA DE DOCTORAT

-REZUMAT-

*Utilizarea eficientă a spectrului RF folosind tehnologia
radio cognitiv*

*Efficient Use of Spectrum based on the Cognitive Radio
Technology*

Autor
As. ing. Alexandru Marțian

Conducător doctorat
Prof. dr. ing. Ion Marghescu

BUCUREȘTI

Cuprins

1. INTRODUCERE.....	1
1.1 NECESITATEA EXISTENȚEI UNOR TERMINALE RADIO INTELIGENTE.....	1
1.2 ARHITECTURA GENERICĂ A UNUI ECHIPAMENT RADIO DEFINIT PRIN SOFTWARE	2
1.3 STRUCTURA ȘI OBIECTIVELE LUCRĂRII	3
2. TEHNOLOGIA RADIO COGNITIV	5
2.1 DEFINIȚIA CONCEPTULUI DE RADIO COGNITIV	5
2.2 ARHITECTURA GENERICĂ A UNUI ECHIPAMENT CR	5
2.3 STANDARDE CARE ÎNGLOBEAZĂ ELEMENTE SPECIFICE TEHNOLOGIEI RADIO COGNITIV.....	6
2.4 APLICAȚII ALE TEHNOLOGIEI RADIO COGNITIV	7
3. SOLUȚII DE DETECȚIE SPECTRALĂ.....	10
3.1 DETECȚIA DE ENERGIE	10
3.2 DETECȚIA PE BAZA FILTRĂRII ADAPTATE	12
3.3 DETECȚIA PE BAZA TRANSFORMATEI WAVELET	12
3.4 DETECȚIA PE BAZA EXPLOATĂRII CARACTERISTICILOR DE CICLOSTAȚIONARITATE	13
3.5 DETECȚIA PE BAZA VALORILOR PROPRII ALE MATRICII DE COVARIANȚĂ	15
3.6 CONCLUZII	16
4. CAMPANIE DE MĂSURĂTORI PENTRU DETERMINAREA GRADULUI DE OCUPARE SPECTRALĂ PENTRU ZONE URBANE ȘI RURALE DIN ROMÂNIA. 17	17
4.1 CONFIGURAȚIA DE MĂSURĂ UTILIZATĂ.....	17
4.2 METODOLOGIA UTILIZATĂ PENTRU DETERMINAREA GRADULUI DE OCUPARE SPECTRALĂ	18
4.3 ANALIZA REZULTATELOR EXPERIMENTALE OBTINUTE	21
4.4 CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE DE CONTINUARE A MĂSURĂTORILOR	25
5. ALEGEREA UNEI PLATFORME EXPERIMENTALE PENTRU IMPLEMENTAREA UNUI SENZOR DE DETECȚIE SPECTRALĂ	26
6. PLATFORMA SDR USRP-N210	28
7. IMPLEMENTAREA UNUI SENZOR DE DETECȚIE SPECTRALĂ FOLOSIND PLATFORMA USRP N210.....	30
7.1 DESCRIEREA SOLUȚIEI UTILIZATE	30
7.2 APLICAȚIA GNU RADIO FOLOSITĂ PENTRU ACHIZIȚIA DATELOR 31	
7.3 INTERFAȚA GRAFICĂ MATLAB.....	33
7.4 ELIMINAREA SEMNALELOR PARAZITE INTRODUSE DE MODULUL DE RADIOFRECVENȚĂ.....	36
7.5 ALEGEREA RATEI DE DECIMARE	38
7.6 CONCLUZII	39
8. CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI PERSPECTIVE DE CONTINUARE A CERCETĂRII	40
8.1 CONCLUZII GENERALE.....	40
8.2 CONTRIBUȚII PERSONALE.....	42
8.3 PERSPECTIVE DE CONTINUARE A CERCETĂRII	44
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ.....	45

LISTĂ SELECTIVĂ DE ABREVIERI

ARFCN	Absolute Radio Frequency Channel Number	Număr absolut al canalului de radiofrecvență
BPSK	Binary Phase Shift Keying	Modulație prin deplasarea fazei binară
CAF	Cyclic Autocorrelation Function	Funcție de autocorelație ciclică
CF	Cycle Frequency	Frecvență ciclică
CIC Filter	Cascaded Integrator Comb Filter	Filtru cascadat integrator-pieptene
CMSR	Commercial Mobile Radio Services	Servicii radio mobile comerciale
CogNeA	Cognitive Networking Alliance	Alianța pentru rețele cognitive
CORDIC	COordinate Rotation DIgital Compute	Calcul numeric al rotației coordonatelor
CR	Cognitive Radio	Radio cognitiv
DDC	Digital Down Converter	Schimbător descendent de frecvență
DFS	Dynamic Frequency Selection	Selecție dinamică a frecvenței
DSA	Dynamic Spectrum Access	Alocare Dinamică a Spectrului
DSP	Digital Signal Processor	Procesor digital de semnal
DUC	Digital Up Converter	Schimbător ascendent de frecvență
DVB-T	Digital Video Broadcasting - Terrestrial	Sisteme de televiziune digitală terestră
DySPAN	Dynamic Spectrum Access Networks	Rețele cu acces dinamic la spectru
FAM	FFT Accumulation Method	Metodă de acumulare a transformatei FFT
FCC	U.S. Federal Communications Commission	Comisia Federală pentru Comunicații din SUA
FFT	Fast Fourier Transform	Transformata Fourier rapidă
FFTW	Fastest Fourier Transform in the West	Algoritmul vestic pentru transformata Fourier rapidă
FM	Frequency Modulation	Modulație de frecvență
FPGA	Field Programmable Gate Array	Arie programabilă de porți logice

GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying	Modulație cu deplasare de frecvență minima gaussiană
GPP	General Purpose Processor	Procesoare de uz general
HB FIR	Halfband Finite Impulse Response Filter	Filtru cu răspuns finit la impuls de tip jumătate de bandă
ISM Band	Industrial, Scientific and Medical band	Bandă de frecvență rezervată aplicațiilor de tip industrial, științific și medical
MAC	Medium Access Control	Control al accesului la mediu
MPSK	Minimum Phase Shift Keying	Modulație cu deplasare de fază minimă
MSK	Minimum Shift Keying	Modulație cu deplasare de frecvență minimă
OQPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying	Modulație prin deplasarea fazei în cuadratură decalată
PAMR	Public Access Mobile Radio	Rețele radio mobile publice de acces
PLMSR	Public Land Mobile Radio Services	Servicii radio mobile publice terestre
PMR	Private Mobile Radio	Rețele radio mobile private
PSD	Power Spectral Density	Densitate spectrală de putere
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Modulație prin deplasarea fazei în cuadratură
RMT	Random Matrix Theory	Teoria matricelor aleatoare
SDR	Software Defined Radio	Echipament radio definit prin software
SR	Software Radio	Echipament radio software
TPC	Transmit Power Control	Control al puterii de emisie
UHD	USRP Hardware Driver	Driver hardware pentru USRP
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System	Sistem de universal de comunicații mobile
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access	Acces multiplu cu diviziune în cod de bandă largă

1. INTRODUCERE

1.1 NECESITATEA EXISTENȚEI UNOR TERMINALE RADIO INTELIGENTE

Dezvoltarea exponențială a sistemelor de comunicații fără fir în ultimele decenii ale secolului trecut și primul deceniu al acestui secol a condus la necesitatea reconsiderării unor anumite aspecte legate de administrarea resurselor limitate pe care astfel de sisteme le au la dispoziție. Astfel, dacă în domenii cum ar fi microelectronica limitările sunt legate de miniaturizarea la care se poate ajunge în ceea ce privește tehnologiile semiconductoare, în domeniul comunicațiilor fără fir una dintre resursele esențiale care introduce limitări este chiar spectrul de frecvență.

Având în vedere progresul tehnologic în toate domeniile societății informaționale, cererea pentru rate de transfer din ce în ce mai ridicate a venit firesc și a exercitat o presiune din ce în ce mai mare asupra spectrului limitat de frecvență. În mod tradițional, alocarea spectrului de frecvență este făcută în mod static, ceea ce presupune acordarea de licențe pentru accesul diferitelor tipuri de sisteme de comunicație fără fir în anumite benzi de frecvență pentru diferite zone geografice. În urma campaniilor de măsurători realizate în diverse zone ale globului, ale căror rezultate vor fi analizate în cadrul capitolului 4, s-a constatat că gradul de ocupare a spectrului de radiofrecvență ca urmare a alocării statice este pe alocuri extrem de redus, mergând până la procente de sub 10%. Una dintre alternativele care ar putea duce la îmbunătățirea gradului de ocupare a spectrului de frecvență este accesul dinamic la spectrului (DSA), ceea ce ar presupune ”împrumutarea” de resurse de la sistemele licențiate, în condițiile în care acestea nu utilizează o anumită bandă de frecvență la un anumit moment de timp și într-o anumită zonă geografică. Pentru a putea funcționa într-o astfel de abordare sunt necesare echipamente care să fie extrem de flexibile din punctul de vedere al benzii de frecvență folosite.

Un prim pas în vederea flexibilizării echipamentelor radio clasice a fost făcut odată cu apariția termenului de radio software (SR – Software Radio), folosit pentru prima dată în Statele Unite ale Americii în anul 1984 de către o echipă de cercetători de la divizia din Garland, Texas, a firmei E-Systems (astăzi Raytheon) [1].

Termenul de echipament radio definit prin software (SDR – Software Defined Radio) a fost folosit pentru prima dată de Joseph Mitola III în anul 1991, un prim articol pe această temă fiind publicat de acesta în anul 1992 [2].

Un echipament radio definit prin software este un echipament care permite emisia și recepția semnalelor de radiofrecvență și în cadrul căruia componentele care în mod tradițional erau implementate prin hardware (de exemplu filtre, mixere, amplificatoare, modulate/demodulate) sunt implementate folosind module software.

O evoluție naturală a echipamentelor radio definite prin software a dus la apariția termenului de echipament radio cognitiv (CR – Cognitive Radio), termen folosit pentru prima dată de același Joseph Mitola III în cadrul unui seminar în anul 1998 și explicat într-un articol publicat în anul 1999 [3]. Un echipament radio cognitiv reprezintă un echipament care este capabil să își modifice parametrii de emisie și recepție în mod automat, pentru a comunica într-un mod cât mai eficient, evitând în același timp interferențele cu alte echipamente licențiate sau nelicențiate.

1.2 ARHITECTURA GENERICĂ A UNUI ECHIPAMENT RADIO DEFINIT PRIN SOFTWARE

Arhitectura hardware fundamentală pentru un echipament radio definit prin software modern este prezentată în figura 1.1 [4]. Se observă prezența a suficiente resurse pentru a permite definirea frecvenței purtătoare, banda de frecvență, modulația, precum și orice tip de criptare. Aceste resurse pot consta în diverse combinații între procesoare de uz general (GPP), procesoare digitale de semnal (DSP), circuite programabile de tip FPGA și alte resurse de calcul, suficiente pentru a permite obținerea unui număr cât mai mare de tipuri de modulație.

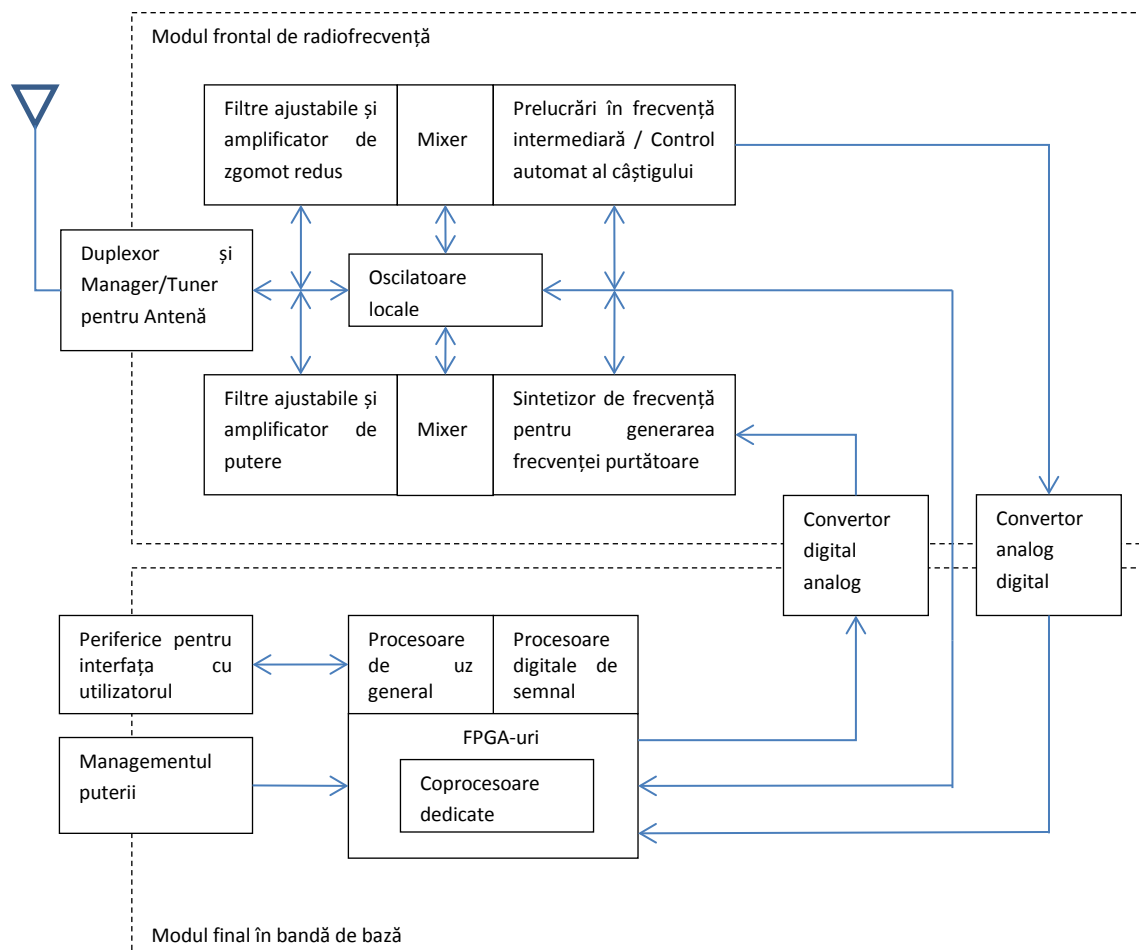


Fig. 1.1 - Arhitectura hardware pentru un modem de tip SDR

Un echipament radio definit prin software trebuie să cuprindă un modul frontal de radiofrecvență, un modul modem, precum și funcții pentru realizarea criptării și pentru nivelul de aplicație. Este, de asemenea, posibilă existența unor funcții de control a elementelor analogice din partea de radiofrecvență, cum ar fi antena, elemente de comutare, amplificatoare de putere sau filtre. Arhitectura hardware și software trebuie să permită adăugarea de noi funcții în domeniul de radiofrecvență în cazul unor anumite situații.

Pentru cazul recepției, modulul RF front-end trebuie să cuprindă următoarele funcții: bloc de adaptare a antenei, amplificator de zgomot redus, filtre, oscilatoare locale și convertoare analog-digital care să permită captura optimă a semnalului dorit și să suprimă cât mai bine semnalele nedorite. În acest fel este maximizată gama dinamică a convertorului analog-digital disponibil.

Pentru cazul emisie, în cadrul modului frontal de radiofrecvență trebuie să existe convertoare digital-analog, oscilatoare locale, filtre, amplificatoare de putere, precum și circuite de adaptare pentru antenă. Rolul circuitelor în acest caz este de a realiza sinteza semnalului de radiofrecvență fără a introduce zgomot sau perturbații pe alte frecvențe, care ar putea interfera cu alți utilizatori.

Rolul modului modem este de a procesa semnalul recepționat sau de a produce semnalul care urmează a fi emis, lucrând în mod full duplex. În cazul recepției, modemul va transla frecvența purtătoare a semnalului dorit pe o anumită frecvență, pentru a permite realizarea operațiilor de filtrare în domeniul digital cu ajutorul procesoarelor digitale de semnal. Operația de filtrare digitală oferă performanțe superioare față de filtrarea analogică, permițând obținerea unui nivel ridicat de suprimare a interferențelor care nu sunt situate în banda de frecvență a semnalului dorit. Ulterior, modemul realizează alinierea semnalului în domeniul timp și dezîmprăștierea, acesta fiind refiltrat pentru a se încadra în lățimea de bandă necesară. În cazul emisie, modemul realizează operațiile complementare celor de la recepție în ordine inversă. Biții de informație care urmează a fi transmiși sunt grupați în pachete, este adăugată informația redundantă care să permită corecția erorilor la recepție, este realizată maparea biților pe simboluri. Fiecare dintre simboluri este reprezentat printr-o anumită formă de undă care este sintetizată și ulterior filtrată astfel încât să se încadreze din punct de vedere spectral în banda de frecvență care îi este alocată. Modemul trebuie, de asemenea, să controleze amplificatorul de putere și oscilatoarele locale pentru a produce frecvența purtătoare necesară.

Procesorul cu ajutorul căruia va fi implementat nivelul aplicație va conține în mod uzual un vocoder, un codor video și un codor de date, precum și anumite funcții pentru navigarea pe internet. Pentru fiecare dintre diferitele aplicații, se încearcă folosirea informațiilor disponibile legate de reprezentarea în domeniul digital a informației respective pentru a comprima datele astfel încât rata de transfer să ajungă la un nivel cât mai scăzut, care să permită transmisia.

1.3 STRUCTURA ȘI OBIECTIVELE LUCRĂRII

Teza de doctorat își propune să evalueze gradul de ocupare a spectrului de radiofrecvență în prezent și să analizeze posibilitățile de îmbunătățire a eficienței de folosire a spectrului prin intermediul accesului dinamic la spectru, folosind principii caracteristice conceptului radio cognitiv.

În primul capitol este justificată necesitatea existenței unor echipamente radio reconfigurabile și este prezentat un scurt istoric al proiectelor care au avut ca scop dezvoltarea de echipamente radio definite prin software. Este, de asemenea, prezentată arhitectura generică a unui astfel de echipament, atât din punct de vedere hardware, cât și din punct de vedere software, iar în final este discutată problema alocării resurselor disponibile în cadrul unei platforme SDR.

Capitolul 2 tratează subiectul tehnologiei radio cognitiv (CR), fiind definit conceptul și schițată evoluția echipamentelor CR, punându-se accent pe platforme de acest tip dezvoltate până în prezent în diverse centre universitare și în industrie. O arhitectură generică pentru un echipament CR, precum și o multitudine de aplicații în care astfel de echipamente ar putea fi utilizate sunt prezentate în continuare. Este realizată, de asemenea, o sinteză a standardelor în

care sunt înglobate elemente specifice tehnologiei radio cognitiv, cu accentul pus pe procesul de detecție spectrală, care va fi detaliat în continuare.

Diferitele metode de detecție spectrală sunt prezentate pe larg în cadrul capitolului 3. Pentru fiecare dintre metodele enumerate sunt detaliate elementele teoretice care stau la baza respectivei metode, o schemă de principiu a unui detector bazat pe respectiva metodă, precum și avantajele și dezavantajele metodei. În finalul capitolului sunt prezentate metode mixte de detecție, care încearcă să profite de avantajele oferite de multiple metode clasice, pentru a oferi performanțe superioare, necesitând în același timp un număr redus de resurse de calcul.

Capitolul 4 prezintă rezultatele unor campanii de măsurători efectuate în vederea evaluării gradului de ocupare a spectrului de radiofrecvență în România, folosind metoda detecției de energie. Măsurătorile au fost realizate atât într-un mediu urban (București), cât și într-un mediu rural (Măneciu), pentru intervale de timp de 48 ore, atât în zile lucrătoare, cât și în zile de sfârșit de săptămână. Este descrisă configurația setului de măsură, cât și metodologia utilizată pentru obținerea rezultatelor, acestea fiind analizate din perspectiva utilizării spectrului disponibil de către echipamente radio cognitiv.

O trecere în revistă a diferitelor platforme SDR care au fost luate în considerare în momentul alegerii unei platforme pentru implementarea aplicației de detecție spectrală este realizată în capitolul 5. Sunt analizate avantajele și dezavantajele fiecărei variante, fiind prezentat și un tabel comparativ cu caracteristicile acestora. Având în vedere alegerea unei platforme din familia USRP (Universal Software Radio Peripheral), este realizată o descriere a produselor din cele trei serii ale familiei. În final este justificată alegerea platformei USRP-N210 prin prisma satisfacerii criteriilor de performanță necesare pentru aplicația specificată.

În cadrul capitolului 6 este prezentată, în detaliu, platforma USRP-N210. Descrierea este efectuată la nivel de schemă bloc, fiind enumerate diferitele posibilități de interconectare ale modulului. Sunt enumerate o serie de module de radiofrecvență compatibile cu modulul USRP folosit, iar pentru modulele WBX și XCVR2450 sunt date detalii legate de arhitectură și performanțe. Este prezentată modalitatea de prelucrare a semnalului recepționat în interiorul plăcii de bază din cadrul platformei, fiind specificate limitările introduse de interfața cu calculatorul gazdă. Având în vedere faptul că un aspect deosebit de important în momentul alegerii unei anumite platforme de tip SDR este suportul software existent, este realizată o prezentare a mediului de dezvoltare GNU Radio, unul dintre cele mai populare instrumente disponibile pentru implementarea de soluții SDR. În finalul capitolului sunt expuse principalele caracteristici ale driverului universal folosit pentru modulele USRP (UHD).

Capitolul 7 cuprinde o descriere detaliată a unui senzor de detecție spectrală implementat cu ajutorul platformei USRP-N210. Este prezentată structura aplicației, precum și a diferitelor elemente care o compun, cum ar fi aplicația GNU Radio folosită pentru captarea informațiilor și interfața grafică MATLAB utilizată pentru afișarea rezultatelor obținute. Sunt discutate, de asemenea, aspecte legate de optimizarea implementării, cum ar fi eliminarea componentelor parazite introduse de modulul de radiofrecvență și alegerea unei valori optime pentru rata de decimare.

În ultimul capitol sunt prezentate concluziile generale rezultate în urma activității de cercetare desfășurată pe parcursul stagiului de pregătire doctorală, sunt enumerate contribuțiile personale ale autorului și sunt descrise diferite posibile direcții de continuare a cercetării.

2. TEHNOLOGIA RADIO COGNITIV

2.1 DEFINIȚIA CONCEPTULUI DE RADIO COGNITIV

După cum a fost prezentat în capitolul introductiv, apariția și dezvoltarea echipamentele radio definite prin software a reprezentat etapa premergătoare pentru apariția tehnologiei radio cognitiv. Un echipament radio definit prin software este capabil să funcționeze folosind diverse tehnologii de acces radio și poate să opereze în diferite benzi de frecvență, însă configurația unui astfel de echipament trebuie realizată manual, prin intermediul utilizatorului. Echipamentele SDR nu sunt capabile să se reconfigureze automat, fără o intervenție din exterior.

Introducerea termenului de radio cognitiv a fost făcută de către J. Mitola în anul 1999 în [3] și în alte publicații. Conceptul inițial era cel al unui echipament radio auto-configurabil, realizat prin intermediul adăugării unor funcții de raționament unui echipament radio definit prin software, permițând astfel obținerea nu numai a unui echipament programabil, ci chiar a unuia "educabil".

O definiție exactă pentru conceptul de radio cognitiv este dificil de stabilit, termenul fiind folosit în prezent pentru o largă varietate de tehnologii care permit echipamentelor radio diverse grade de auto-configurabilitate. Comisia Federală pentru Comunicații (FCC) din SUA definește un echipament radio cognitiv ca un echipament radio care își poate schimba parametrii de emisie în funcție de interacțiunea cu mediul în care operează. În [5] S. Haykin oferă o definiție mai generală, echipamentul CR fiind definit ca un echipament radio care este conștient de mediul înconjurător și printr-un proces de învățare își modifică în mod adaptiv parametrii cu scopul de a asigura o comunicație sigură și eficientă din punct de vedere spectral.

Având în vedere cele menționate anterior, rezultă că din punctul de vedere funcțional un echipament radio cognitiv trebuie să posede cel puțin următoarele caracteristici [6]:

- *Flexibilitate și agilitate*, capacitatea de a schimba tehnologia de acces radio precum și alți parametri pe parcursul funcționării; acest aspect este asigurat având în vedere că echipamentele CR sunt construite în jurul unui nucleu de tip SDR;
- *Detecție spectrală*, abilitatea de a monitoriza și măsura starea spectrului de radiofrecvență, incluzând gradul de ocupare spectrală;
- *Capacitate de învățare și adaptare*, abilitatea de a analiza informațiile primite prin intermediul a diverși senzori, de a recunoaște structuri tipice și de a-și modifica comportamentul pe baza unei analize a unei noi situații, nu numai pe baza unor algoritmi standard, ci și ca rezultat al unui proces de învățare.

2.2 ARHITECTURA GENERICĂ A UNUI ECHIPAMENT CR

După cum a fost specificat în paragraful 2.1, din punctul de vedere funcțional un echipament radio cognitiv trebuie să aibă capacitatea de a suporta multiple tehnologii de acces radio, trebuie să monitorizeze permanent starea spectrului de radiofrecvență și trebuie să aibă capacitatea de a învăța și de a se adapta schimbărilor care intervin în mediul înconjurător.

Unul dintre cele mai simple modele pentru a descrie un astfel de echipament, model care descrie în același timp și relația dintre un echipament CR și un echipament SDR, este prezentat în figura 2.1 [7].

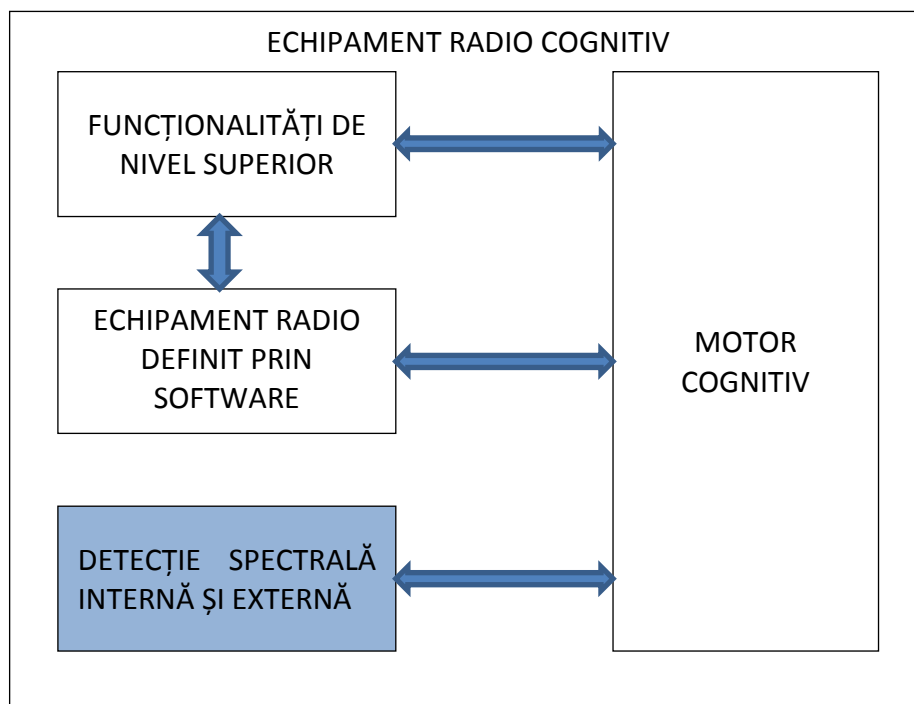


Fig. 2.1 - Arhitectura unui echipament radio cognitiv [7]

Analizând figura se poate observa că echipamentul CR este construit în jurul unui nucleu constituit de către echipamentul SDR, la care este adăugat un motor cognitiv, precum și funcționalități suplimentare necesare pentru luarea deciziilor, cum ar fi blocul de detecție spectrală.

Nucleul SDR reprezintă o platformă radio generică extrem de flexibilă, capabilă să funcționeze într-o gamă largă de benzi de frecvență și să folosească numeroase tipuri diferite de modulație, prin urmare asigură compatibilitatea echipamentului CR cu multiple sisteme de comunicații și tehnologii de acces multiplu.

Motorul cognitiv are rolul de a controla și optimiza nucleul SDR pe baza unor parametri, cum ar fi informațiile furnizate de blocul de detecție spectrală, elemente învățate legate de mediul radio înconjurător, starea rețelei sau necesitățile utilizatorului. Motorul cognitiv este conștient de resursele hardware și de capabilitățile nucleului SDR și pe baza informațiilor pe care le are la dispoziție încercă să satisfacă cerințele venite de la nivelele superioare cu resursele pe care echipamentul le are la dispoziție.

2.3 STANDARDE CARE ÎNGLOBEAZĂ ELEMENTE SPECIFICE TEHNOLOGIEI RADIO COGNITIV

Odată cu dezvoltarea conceptului de radio cognitiv și a elementelor specifice care îl caracterizează, au existat eforturi în direcția standardizării acestora. În continuare sunt prezentate diferite standarde care conțin elemente specifice tehnologiei radio cognitiv.

Standardul IEEE 802.22 [8] a fost creat în urma reglementărilor propuse de Comisia Federală de Comunicații (FCC) din SUA, ce menționau posibilitatea de a oferi acces utilizatorilor secundari la spectrul alocat serviciilor de televiziune, prin utilizarea de elemente specifice tehnologiei radio cognitiv. În afara serviciului TV, numit și serviciu primar, FCC a permis operarea în canalele TV libere și a altor servicii precum microfoane fără fir, PLMSR (Public Land Mobile Radio Services) și CMSR (Commercial Mobile Radio Services), cu condiția evitării interferențelor.

Standardul IEEE 802.11h [9], elaborat de către IEEE 802.11 Working Group în anul 2003 și integrat ulterior în standardul complet IEEE 802.11-2007, prevede adăugarea peste funcționalitățile 802.11 standard pentru nivelele fizic și MAC [10] a două mecanisme suplimentare, selecția dinamică a frecvenței (DFS) și controlul puterii de emisie (TPC). Cele două mecanisme sunt impuse pentru echipamentele 802.11 care operează în banda de 5 GHz, în vederea coexistenței acestora cu sisteme radar și de satelit care operează în aceleași benzi de frecvență.

Standardul IEEE 802.11h-2010 [11] reprezintă o extensie a standardului 802.16 care definește rețelele de tip WiMax, în vederea definirii pentru astfel de rețele a unor capacități specifice tehnologiei radio cognitiv care să permită operarea rețelelor 802.16 în benzi nelicențiate.

Interesul manifestat de IEEE în direcția tehnologiei radio cognitiv a fost materializată prin inițierea în anul 2005 a unui set de proiecte de standardizare legate de această tehnologie denumite IEEE 1900, care a evoluat în anul 2006 în IEEE Standards Coordinating Committee 41 (IEEE SCC41) pentru rețele cu acces dinamic la spectru, cunoscut azi sub numele IEEE DySPAN-SC [12]. IEEE DySPAN-SC este structurat în cinci grupuri de lucru, fiecare fiind responsabil pentru elaborarea unui standard cu privire la un alt subiect.

În decembrie 2008, a fost format un grup numit Cognitive Networking Alliance (CogNeA), format din Philips, Samsung, HP, ETRI, GeorgiaTech și Motorola. Scopul grupului este de a urmări definirea și adoptarea de standarde cu o largă recunoaștere în industrie pentru echipamente portabile personale cu consum redus de energie care să opereze în benzile de frecvență libere din spectrul alocat emisiilor TV (TVWS). În acest scop, un nou standard a fost creat în cadrul European Computer Manufacturers Association (ECMA), numit ECMA-392 [13]. Standardul acoperă nivelele fizic și MAC și își propune permiterea de aplicații cum ar fi transfer video de mare viteză și acces internet pentru diferite tipuri de terminale. O primă versiune a standardului a fost publicată în decembrie 2009.

Standardul 802.11af care va permite extinderea rețelelor fără fir de tip 802.11 în benzile de frecvență libere din zona de spectru licențiată pentru emisia de programe TV [14]. Cu toate că cerințele impuse unui astfel de sistem sunt deja stabilite și se cunoaște faptul că standardul va folosi elemente specifice tehnologiei radio cognitiv, procesul de standardizare nu este încă încheiat.

2.4 APLICAȚII ALE TEHNOLOGIEI RADIO COGNITIV

Ținând cont de caracteristicile enumerate în paragrafele anterioare, cum ar fi posibilitatea de a suporta diferite tehnologii de acces radio, de a opera în diverse benzi de frecvență, și mai ales capacitatea de a lua decizii autonome în timp real pentru optimizarea calității comunicației și evitarea interferențelor, echipamentele CR ar putea fi folosite în

aplicații din domenii extrem de numeroase. În continuare sunt prezentate câteva dintre posibilele situații și domenii în care astfel de echipamente ar putea aduce progrese semnificative [7].

- **Interoperabilitatea**

Societatea informațională actuală presupune existența unei multitudini de standarde în ceea ce privește terminalele wireless, precum și o diversitate sporită a aplicațiilor și serviciilor care sunt oferite utilizatorilor din cadrul diverselor segmente ale societății (siguranță publică, armată, etc.). În cazul în care este necesară interconectarea terminalelor care folosesc diferite standarde de comunicații în cazul unei situații care impune acest lucru, există probleme legate de incompatibilitatea între aceste standarde, ceea ce conduce la îngreunarea sau chiar imposibilitatea realizării unor legături operaționale. Situațiile cele mai sugestive sunt cele care apar în urma unor calamități naturale de proporții, cazuri în care, datorită avariilor care pot afecta rețelele de alimentare, terminalele care nu pot folosi decât anumite standarde devin practic de multe ori inutilizabile.

Datorită abilității lor de a descoperi și de a se adapta la diverse tipuri de configurații radio disponibile, echipamentele de tip radio cognitiv pot fi folosite cu succes și în astfel de situații extreme. Capabilitatea acestor echipamente de a comunica între ele și cu alte terminale radio tradiționale folosind diferite protocoale și standarde poate fi definită sub termenul generic de interoperabilitate [15]. Mai mult, astfel de echipamente se pot reconfigura automat astfel încât să faciliteze comunicația între două terminale non-cognitive care folosesc standarde diferite. Datorită caracteristicilor de inteligență artificială disponibile în cadrul echipamentelor de tip radio cognitiv, ele pot sesiza prezența terminalelor care folosesc diferite tipuri de standarde de comunicație, chiar și în absența nodurilor de control centralizat necesare în cazul sistemelor care folosesc standardele respective.

- **Optimizarea utilizării resurselor și îmbunătățirea calității comunicațiilor**

Abordarea tradițională de alocare statică a resurselor de radiofrecvență a condus la o eficiență scăzută de utilizare a spectrului. Odată cu dezvoltarea accelerată a tehnologiei și apariția unui număr din ce în ce mai mare de sisteme de comunicații fără fir și tehnologii de acces radio, spectrul de radiofrecvență a devenit suprapopulat și a condus la necesitatea alocării dinamice a resurselor în acest domeniu. Echipamentele de tip radio cognitiv pot conduce la progrese semnificative în acest domeniu.

Printre resursele de radiofrecvență care pot fi valorificate în cazul unei alocări dinamice a spectrului pot fi enumerate:

- Benzi de frecvență licențiate pentru sisteme de comunicații celulare care folosesc multiplexarea în domeniul frecvență (de exemplu sistemele GSM);
- Benzi de frecvență licențiate pentru servicii de siguranță publică sau posturi de televiziune, care nu sunt folosite;
- Benzi de frecvență nelicențiate, cum ar fi benzile ISM.

Utilizarea acestor resurse ‘suplimentare’ de radiofrecvență se poate dovedi dificilă. De exemplu, accesul la benzi de frecvență licențiate sau nelicențiate în timp ce acestea sunt deja folosite poate fi făcut doar într-o altă dimensiune (de exemplu spațiu, timp, cod, polarizare,

etc.). Utilizarea benzilor de frecvență licențiate la momente de timp când acestea nu sunt folosite presupune eliberarea imediată a acestora în momentul în care un utilizator licențiat își face apariția.

Echipamentele radio cognitiv permit utilizarea acestor resurse alternative de radiofrecvență utilizând mecanisme precum:

- **Detecția dinamică a spectrului**
- **Accesul dinamic la spectru**
- **Managementul dinamic al spectrului**

Optimizarea puterii consumate de către terminale a fost un aspect important încă de la apariția sistemelor de comunicații fără fir. Echipamentele radio cognitiv pot aduce progrese semnificative în acest domeniu, principalele aspecte fiind:

- **Controlul adaptiv al puterii**
 - **Optimizarea consumului de putere prin auto-dezactivare**
 - **Transmisia informațiilor doar în cazul unor modificări**
-
- **Aplicații specifice diverselor sectoare de activitate**

➤ *Domeniul privat*

Unul dintre primele concepte cognitive apărute a fost *interacțiunea autonomă dintre un echipament de comunicații și utilizatorul său*, propusă de J. Mitola în [16]. Prin utilizatori se pot înțelege nu numai ființe umane, ci și animale ca de exemplu o pasăre care are atașat un senzor, sau chiar plante pentru care se dorește monitorizarea unor anumite aspecte legate de condițiile de mediu. Printre aplicațiile care implică în mod direct utilizatorul pot fi enumerate:

- Autentificarea utilizatorului
- Starea emoțională a utilizatorului
- Obiceiurile utilizatorului
- Percepția utilizatorului

➤ *Domeniul medical*

Echipamentele radio cognitiv pot aduce beneficii semnificative în diferite aspecte legate de domeniile medical și biomedical.

În cazul unei maternități, trebuie realizată o *identificare a nou-născutului* în raport cu mama. În cazul în care personalul medical realizează această identificare în mod eronat, există posibilitatea de a asocia un nou-născut unei alte mame. Situațiile de acest gen ar putea fi evitate prin asocierea unui senzor radio cognitiv cu fiecare nou născut, un al doilea senzor fiind asociat mamei.

În cazul *pacienților adulți*, fiecare dintre aceștia ar putea primi câte un senzor radio cognitiv, senzor care ar putea înregistra diferiți parametri legați de starea pacientului, în funcție de afecțiunea de care acesta suferă.

Asistarea orbilor ar fi un alt domeniu în care echipamentele radio cognitiv ar putea juca un rol esențial. Aceste echipamente ar putea de exemplu să găsească zone sigure de deplasare pentru persoana respectivă, ar putea determina momentul optim pentru traversarea unei străzi sau schița traseul de acasă până la un magazin.

3. SOLUȚII DE DETECȚIE SPECTRALĂ

După cum a fost subliniat în cadrul capitolului 2, unul dintre elementele fundamentale necesare în vederea unei funcționări optime a unui echipament radio cognitiv este capacitatea sa de a sonda mediul înconjurător în vederea optimizării comunicației și creșterii gradului de eficiență a utilizarea spectrului. Informațiile referitoare la această resursă esențială care este spectrul radio sunt obținute în urma unui proces de detecție a benzilor de frecvență disponibile la un anumit moment de timp. În cadrul acestui capitol vor fi prezentate diferite metode de detecție spectrală, punând în evidență avantajele și dezavantajele oferite de fiecare dintre metode, precum și modalități uzuale de implementare.

Indiferent de metoda folosită, scopul procesului de detecție este acela de a decide între următoarele două ipoteze:

$$y[n] = \begin{cases} w[n] & : H_0 \\ hs[n] + w[n] & : H_1 \end{cases} \text{ pentru } n = 1, \dots, N \quad (3.1)$$

unde $y[n]$ reprezintă semnalul complex recepționat de echipamentul radio cognitiv, $s[n]$ reprezintă semnalul emis de utilizatorul primar (licențiat), $w[n]$ reprezintă un zgomot aditiv gaussian alb (AWGN), h reprezintă câștigul complex al unui canal ideal și N este intervalul de observație. În cazul în care canalul nu este ideal, între h și $s[n]$ va fi efectuată o operație de convoluție în loc de operația de înmulțire. Ipoteza H_0 reprezintă situația în care nici un utilizator primar nu este prezent, în timp ce ipoteza H_1 reprezintă cazul în care un astfel de utilizator există.

3.1 DETECȚIA DE ENERGIE

Metoda detecției de energie este bazată pe principiul că, la recepție, energia unui semnal care urmează a fi detectat este întotdeauna mai mare decât energia zgomotului [17].

Energia recepționată este comparată cu un prag, ν , la stabilirea căruia se ține seama de densitatea spectrală de putere a zgomotului, N_0 , pentru a obține o anumită probabilitate de detecție, P_d , pentru o probabilitate de alarmă falsă dată, P_{fa} .

Dacă se va considera așa cum a fost specificat anterior că echipamentul radio cognitiv a recepționat un semnal complex $y[n]$, pentru un numărul de eșantioane N , $n = 1, \dots, N$, atunci decizia care urmează a fi luată va fi de forma:

$$\begin{cases} H_0, \text{ dacă } \varepsilon < \nu \\ H_1, \text{ dacă } \varepsilon \geq \nu \end{cases} \quad (3.2)$$

unde $\varepsilon = E[|y[n]|^2]$ reprezintă estimatul energiei semnalului recepționat, iar pragul de detecție ν este ales ca fiind egal cu varianța zgomotului, notată cu σ^2 .

Având în vedere că în practică nu este disponibilă valoarea reală a energiei semnalului recepționat, va fi folosită o aproximare a acestei valori, notată cu $\hat{\varepsilon}$ și egală cu:

$$\hat{\varepsilon} \triangleq \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y[n]|^2. \quad (3.3)$$

În momentul în care numărul de eşantioane folosite devine foarte mare, $\hat{\varepsilon}$ va tinde către ε .

În ceea ce priveşte implementarea unui detector bazat pe această metodă de detecţie există mai multe variante, în funcţie de domeniul (analogic sau digital) în care sunt realizate prelucrările de semnal. Varianta în care detecţia este realizată în domeniul analogic presupune necesitatea existenţei unui filtru preliminar trece bandă cu lăţime de bandă fixă, ceea ce ridică probleme în ceea ce priveşte flexibilitatea schemei în momentul în care se doreşte detecţia simultană a semnalelor de bandă îngustă şi a celor de bandă largă. Variantele digitale de implementare oferă o flexibilitate mai bună folosind estimarea spectrală pe baza calculului transformatei FFT, ceea ce permite detectarea simultană a mai multor tipuri de semnale, indiferent de lăţimea de bandă a acestora. În figura 3.1 este prezentată o variantă de implementare a detectorului de energie pentru cazul în care prelucrările de semnal se realizează în domeniul digital.

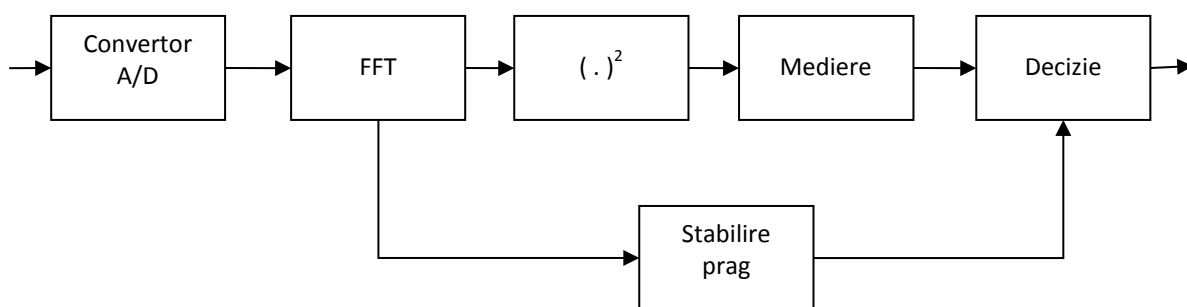


Fig. 3.1 - Variantă digitală de implementare a unui detector de energie

Principalele avantaje ale metodei de detecţie de energie sunt aplicabilitatea universală, relativa simplitate a operaţiilor de calcul necesare, precum şi nivelul redus de informaţii necesare apriori legate de tipul de semnal care urmează a fi detectat.

Dezavantajul principal al acestei metode de detecţie este reprezentat de performanţele reduse în cazul în care raportul semnal zgomot pentru semnalul care urmează a fi detectat este scăzut. Alegerea pragului de detecţie prezintă o importanţă deosebită, având o influenţă directă asupra valorilor obţinute pentru probabilitatea de detecţie şi probabilitatea de alarmă falsă. În cazul în care valoarea aleasă pentru prag este prea ridicată, semnalele al căror nivel este apropiat de nivelul zgomotului vor fi ignorate, ceea ce va duce la o scădere a valorii obţinute pentru probabilitatea de detecţie şi implicit la o subevaluare a gradului de ocupare spectrală. În cazul în care valoarea aleasă pentru prag este prea scăzută, există posibilitatea ca anumite eşantioane ale zgomotului să fie interpretate ca semnal util, ceea ce va duce la o creştere a valorii obţinute pentru probabilitatea de alarmă falsă şi implicit la o supraevaluare a gradului de ocupare spectrală. Ajustarea valorii alese pentru pragul de detecţie trebuie făcută în corelaţie cu schimbările care pot apărea în ceea ce priveşte nivelul zgomotului şi al interferenţelor existente în banda semnalului care urmează a fi detectat.

O altă problemă care apare în cazul în care detecţia spectrală este realizată folosind metoda detecţiei de energie este imposibilitatea de a face distincţia între utilizatorii primari şi cei secundari, în cazul în care aceştia folosesc aceeaşi bandă de frecvenţă.

3.2 DETECȚIA PE BAZA FILTRĂRII ADAPTATE

Un filtru care este adaptat la un semnal $x[n]$ asigură un răspuns la impuls egal cu versiunea complex conjugată și inversată în domeniul timp a semnalului $x[n]$. Acest filtru reprezintă o metodă optimală de detecție spectrală datorită faptului că maximizează raportul semnal-zgomot al semnalului de intrare, atunci când peste acest semnal este suprapus un zgomot alb gaussian [18] [19]. Ieșirea filtrului este comparată cu un prag de detecție η pentru a stabili dacă semnalul este prezent sau nu, decizia care urmează a fi luată fiind de forma:

$$\begin{cases} H_0, \text{dacă } \sum_{n=1}^N y[n]x[n]^* \leq \eta \\ H_1, \text{dacă } \sum_{n=1}^N y[n]x[n]^* > \eta \end{cases} \quad (3.4)$$

unde $y[n]$ reprezintă semnalul necunoscut recepționat și $x[n]$ reprezintă semnalul căutat.

Printre avantajele filtrării adaptate se numără simplitatea operațiilor de calcul necesare, performanțele optime în cazul canalelor afectate de ZAGA, precum și faptul că este aplicabilă pentru suficient de multe tipuri de sisteme de comunicații.

Principalele dezavantaje ale acestei metode sunt performanțele slabe în cazul canalelor non-ZAGA, precum și în cazul în care sincronizarea este imperfectă. Acest ultim dezavantaj conduce la anularea ieșirii filtrului adaptiv chiar și în cazul întârzierii optime corecte (când componenta semnalului este aliniată temporal perfect cu răspunsul la impuls al filtrului), în cazul în care offset-ul rezidual al purtătoarei după operația de schimbare a frecvenței este nenul. În această situație, pentru a putea folosi filtrarea adaptată va fi necesară o căutare atât după parametrul offset al purtătoarei, cât și după întârziere.

Un alt dezavantaj este reprezentat de necesitatea de a cunoaște apriori informații de la nivelele fizic și MAC referitoare la semnalul care urmează a fi detectat.

3.3 DETECȚIA PE BAZA TRANSFORMATEI WAVELET

În cazul în care este necesară detecția semnalelor de bandă largă, folosirea transformatei Wavelet oferă avantaje atât din punctul de vedere al costului de implementare cât și în ceea ce privește flexibilitatea, permițând adaptarea la caracteristicile semnalului ce urmează a fi detectat, spre deosebire de soluția convențională care presupune existența mai multor filtre trece bandă de bandă îngustă [20][21].

Pentru a identifica zonele de frecvență libere, bandă de frecvență care urmează a fi monitorizată poate fi modelată ca o înlănțuire de sub-benzi consecutive, caz în care din punctul de vedere al caracteristicii spectrale a puterii există o variație lentă în interiorul fiecărei sub-benzi și o variație bruscă la granița dintre două sub-benzi consecutive. Prin aplicarea transformatei Wavelet asupra densității spectrale de putere (PSD) a semnalului observat $x[n]$, pot fi localizate singularitățile funcției PSD $S(f)$ și pot fi astfel identificate benzile de frecvență neocupate.

Principala dificultate care apare în cazul implementării unui detector spectral folosind transformata Wavelet este reprezentată de ratele foarte mari de eșantionare necesare pentru conversia semnalelor de bandă largă. În cazul în care în banda de frecvență care urmează a fi analizată coexistă mai multe tipuri de sisteme, acest tip de detector nu va fi capabil să detecteze fiecare tip de sistem în parte, ci va furniza doar informații legate de zonele de frecvență în care nici unul dintre aceste sisteme nu acționează.

3.4 DETECȚIA PE BAZA EXPLOATĂRII CARACTERISTICILOR DE CICLOSTAȚIONARITATE

Ideea care stă la baza metodei de detecție pe baza caracteristicilor de ciclostaționare este de a exploata periodicitatea intrinsecă a semnalelor modulate folosite în sistemele de comunicații, cum ar fi purtătoarele sinusoidale, trenurile de impulsuri, secvențele de împrăștiere sau prefixurile ciclice [18] [19] [22]-[24].

Pentru semnale nestaționare, invarianța în timp a mediei și a funcției de autocorelație nu sunt respectate. Pentru aproape toate semnalele de acest tip, structura acestor două funcții este de natură să nu permită măsurarea prin alegerea blocurilor de observație de lungimi arbitrare (natură statistică variabilă în timp ar fi îndepărtată prin mediere). Cu toate acestea, există un tip de comportament variabil în timp care este persistent și regulat: variația periodică în timp, ceea ce este exact ce este pus în evidență de clasa semnalelor nestaționare cunoscute sub numele de *semnale ciclostaționare*.

Pentru semnalele ciclostaționare, momentul de ordin 2 poate fi reprezentat ca o serie Fourier,

$$R_x(t, \tau) = \sum_{\alpha} R_x^{\alpha}(\tau) e^{i2\pi\alpha t} \quad (3.5)$$

unde termenul α este denumit *frecvență ciclică* (CF). Dacă funcția de autocorelație este periodică, atunci suma este efectuată după $\alpha = k/T_0$ pentru toate valorile k întregi, unde T_0 reprezintă perioada.

Coeficientul Fourier $R_x^{\alpha}(\tau)$ este numit *funcție de autocorelație ciclică* (CAF) și este egal cu funcția convențională de autocorelație din ecuația (3.5) pentru $\alpha = 0$. Expresia funcției de autocorelație ciclică este reprezentată de coeficientul Fourier uzual,

$$R_x^{\alpha}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} R_x(t, \tau) e^{-i2\pi\alpha t} dt \quad (3.6)$$

expresie în care limita este necesară pentru un semnal ciclostaționar aproape periodic, dar poate fi înlocuită printr-o integrare peste o singură perioadă pentru toate celelalte semnale ciclostaționare. Autocorelația ciclică poate fi, de asemenea, calculată din însuși semnalul $x(t)$,

$$R_x^{\alpha}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) e^{-i2\pi\alpha t} dt \quad (3.7)$$

Prin analogie cu relația Fourier dintre funcția de autocorelație și densitatea spectrală de putere pentru semnalele staționare, *funcția de corelație spectrală* (SCF) poate fi definită ca transformata Fourier a funcției de autocorelație ciclică,

$$S_x^{\alpha}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x^{\alpha}(\tau) e^{-i2\pi\alpha\tau} d\tau \quad (3.8)$$

Formularea ipotezelor de detecție în cazul acestei metode este:

$$\begin{aligned} H_1 : S_x^{\alpha}(f) &\neq 0 \\ H_0 : S_x^{\alpha}(f) &\equiv 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Pentru a pune în evidență avantajele oferite de această metodă de detecție au fost realizate în mediul MATLAB aplicații pentru calculul funcției de corelație spectrală și au fost aplicate la intrarea detectorului diferite tipuri de semnale modulate des întâlnite în cadrul sistemelor moderne de comunicații (BPSK, QPSK, MSK) pentru a evidenția caracteristicile

particulare de ciclostăționăritate ale fiecărui tip de semnal. În figura 3.2 este reprezentat modulul funcției de corelație spectrală $|\hat{S}_x^\alpha(f)|$ pe axa z într-o reprezentare tridimensională, în planul orizontal fiind reprezentate frecvența f și frecvența ciclică α , în valori normate la frecvența de eșantionare f_s . Dacă se realizează o secțiune prin figură pentru o valoare a frecvenței ciclice $\alpha = 0$ se va obține densitatea spectrală de putere a semnalului modulat. Cele trei cazuri din figură corespund celor trei tipuri de semnale modulate folosite: BPSK, QPSK și MSK.

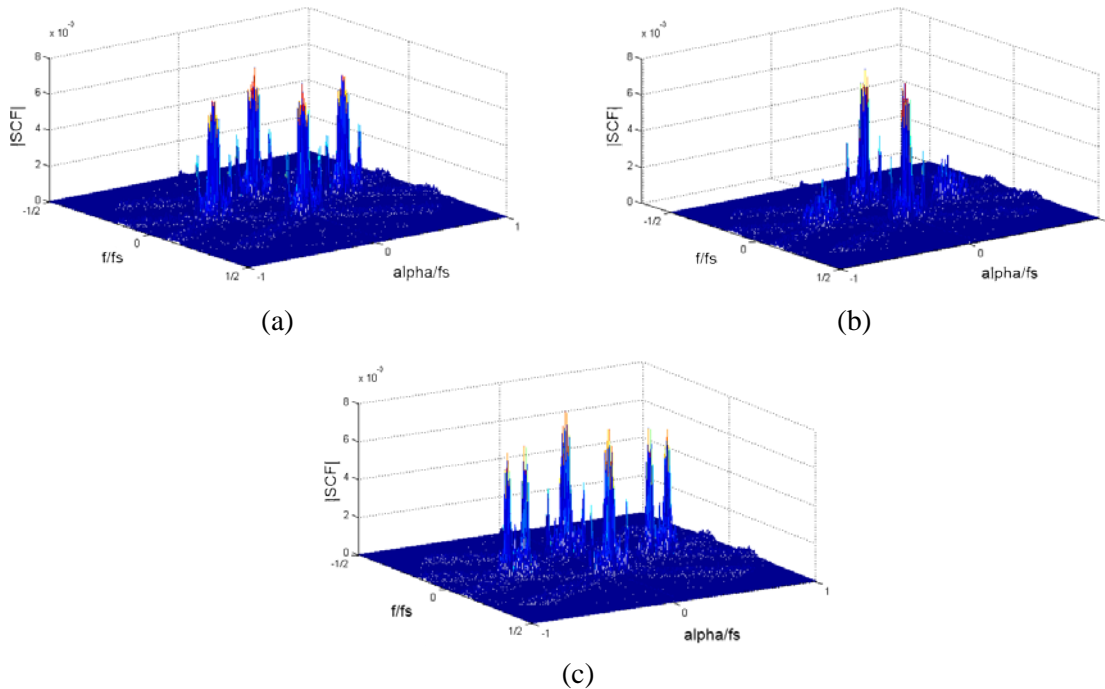


Fig. 3.2 – Modulul funcției de corelație spectrală pentru semnale modulate (a) BPSK (b) QPSK (c) MSK pentru un RSZ = 10dB folosind o reprezentare tridimensională

Cu toate că densitatea spectrală de putere a semnalului în cele trei cazuri nu permite o deosebire a celor trei tipuri diferite de semnale modulate, sunt clar vizibile caracteristicile diferite de ciclostăționăritate, cu un astfel de detector fiind deci posibilă diferențierea semnalelor detectate în funcție de tipul de modulație folosit.

În figura 3.2 a) se pot observa caracteristicile de ciclostăționăritate ale semnalului BPSK : $\hat{S}_x^\alpha(f) \neq 0$ doar pentru $\alpha = kf_b$ și $\alpha = \pm 2f_c + kf_b$, pentru orice valori întregi ale lui k .

În figura 3.2 b) este reprezentat cazul semnalului modulat QPSK, caz în care $\hat{S}_x^\alpha(f) \neq 0$ doar pentru $\alpha = kf_b$, pentru orice valori întregi ale lui k .

În figura 3.2 c) sunt vizibile caracteristicile de ciclostăționăritate ale semnalului modulat MSK : $\hat{S}_x^\alpha(f) \neq 0$ doar pentru $\alpha = kf_b$ pentru valori pare ale lui k și pentru $\alpha = \pm 2f_c + kf_b$ pentru valori impare ale lui k .

Detectoarele bazate pe exploatarea caracteristicilor de ciclostăționăritate sunt în cele mai multe cazuri implementate în domeniul digital. Algoritmii care permit identificarea acestor caracteristici folosesc transformata FFT pentru calculul componentelor spectrale ale semnalului, după care realizează corelația spectrală direct asupra componentelor spectrale

calculate anterior. Un detector bazat pe un astfel de algoritm este prezentat în figura 3.3.

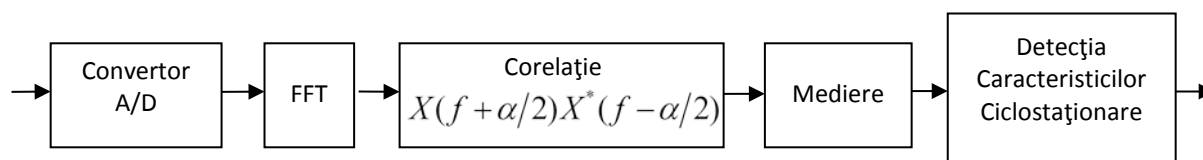


Fig. 3.3 - Variantă digitală de implementare a unui detector bazat pe exploatarea caracteristicilor de ciclostacionaritate

Principalul avantaj al metodelor de detecție bazate pe exploatarea caracteristicilor de ciclostacionaritate este reprezentat de posibilitatea de a realiza o distincție între energia zgomotului și energia semnalelor utile care urmează a fi detectate, ceea ce permite obținerea unor *performanțe superioare față de alte tipuri de detecție în condiții de raport semnal zgomot scăzut*. Distincția menționată anterior poate fi realizată datorită faptului că zgomotul nu prezintă corelație spectrală, în timp ce semnalele modulate sunt de obicei semnale ciclostacionare și posedă corelație spectrală datorită redundanței intrinseci date de periodicitățile semnalelor. Un detector de acest tip este, de asemenea, mai puțin influențat de eventualele variații ale nivelului palierului de zgomot decât detectoarele de energie.

Un alt avantaj oferit de detecția pe baza caracteristicilor de ciclostacionaritate este aplicabilitatea aproape universală, având în vedere că printre tipurile de modulație care prezintă funcții de corelație spectrală nenule putem enumera GMSK, OQPSK, MPAM, MQAM, MPSK, CPFSK, FH, DSSS, și multe altele. De asemenea, pe baza acestei metode pot fi obținute și detectoare care să permită *clasificarea semnalelor detectate în funcție de tipul de modulație folosit*, astfel fiind eventual posibilă și diferențierea între utilizatorii primari și utilizatorii secundari în cazul în care în cele două sisteme sunt folosite tipuri diferite de modulație.

Printre dezavantajele care pot fi menționate în ceea ce privește detecția pe baza exploatării caracteristicilor de ciclostacionaritate pot fi menționate complexitatea mai ridicată necesară pentru implementare comparativ cu alte metode de detecție, precum și necesitatea unui interval de timp de observare mai lung decât de exemplu în cazul detecției de energie. Acest ultim dezavantaj poate conduce la inabilitatea exploatării eficiente a benzilor de frecvență care sunt detectate ca libere doar pentru intervale scurte de timp.

3.5 DETECȚIA PE BAZA VALORILOR PROPRII ALE MATRICII DE COVARIANȚĂ

O metodă de detecție care păstrează un grad destul de redus de complexitate de calcul, evitând în același timp problemele legate de incertitudinile existente la determinarea nivelului de zgomot este metoda bazată pe valorile proprii ale matricii de covarianță a semnalului recepționat [25][26]. Pe baza elementelor din teoria matricelor aleatoare (RMT), poate fi cuantizat raportul dintre valoarea minimă și cea maximă pentru valorile proprii ale acestei matrici, și evaluând acest raport poate fi detectată existența semnalului recepționat. Probabilitatea de alarmă falsă poate fi, de asemenea, determinată folosind elemente din RMT.

Această metodă de detecție poate fi folosită pentru semnale de diferite tipuri, fără a avea informații apriori referitoare la semnal, canalul de comunicație sau puterea zgomotului.

3.6 CONCLUZII

Blocul de detecție spectrală este un element esențial în cadrul unui echipament radio cognitiv. În cadrul capitolului de față au fost descrise și analizate principalele metode de detecție spectrală studiate în literatura de specialitate. În cadrul tabelul 3.1 este realizată o comparație între diferitele metode prezentate anterior, ținând cont de avantajele și dezavantajele fiecărei metode, precum și de gradul de complexitate al calculelor necesare în cazul fiecărei metode în parte.

Tabelul 3.1 – Comparație între diferite metode de detecție spectrală

Metoda de detecție	Avantaje	Dezavantaje	Abilitatea de a diferenția tipul de semnale	Gradul de complexitate
Detecția de energie	Nu necesită informații despre semnalele detectate	Performanțe reduse pentru valori scăzute ale RSZ	Nu	Scăzut
Detecția pe baza filtrării adaptate	Detecție precisă, robustețe la variații ale nivelului de zgomot	Necesită informații exacte despre semnalele detectate	Da	Scăzut
Detecția pe baza caracteristicilor de ciclostacionaritate	Performanțe bune pentru valori scăzute ale RSZ, robustețe la variații ale nivelului de zgomot	Necesită informații suplimentare despre semnalele detectate	Da	Crescut
Detecția pe baza transformatei Wavelet	Funcționează eficient pentru semnale de bandă largă	Nu poate fi folosit pentru semnale DSSS	Nu	Mediu
Detecția pe baza valorilor proprii ale matricei de covarianță	Nu necesită informații despre semnalele detectate și despre nivelul de zgomot	Alegere dificilă pentru pragul de detecție	Nu	Mediu

Pentru aplicațiile prezentate în capitolele 4 și 7 a fost aleasă ca metodă de detecție metoda detecției de energie, datorită avantajelor oferite de aceasta: complexitate redusă de calcul, timp de detecție relativ scurt necesar și faptul că nu necesită informații apriori despre semnalele care urmează a fi detectate.

4. CAMPANIE DE MĂSURĂTORI PENTRU DETERMINAREA GRADULUI DE OCUPARE SPECTRALĂ PENTRU ZONE URBANE ȘI RURALE DIN ROMÂNIA

4.1 CONFIGURAȚIA DE MĂSURĂ UTILIZATĂ

Măsurătorile efectuate pentru cazul unei zone urbane au realizate folosind o antenă plasată pe terasa corpului A al Facultății ETTI (coordonate geografice: latitudine 44°26'01" N, longitudine 26°03'27" E, altitudine 150m față de nivelul mării, altitudine relativă 30m). Locația aleasă este potrivită pentru obținerea unor rezultate relevante, având în vedere existența condițiilor de vizibilitate directă cu mai multe emițătoare de FM, televiziune analogică și digitală, cu stații de bază GSM și UMTS. De asemenea, sediul Serviciului de Telecomunicații Speciale (STS) este situat în imediată apropiere, ceea ce permite eventualelor semnale prezente în benzile de frecvență rezervate pentru comunicații militare.

Antena folosită în cadrul campaniilor de măsurători este o antenă de bandă largă de tip *discone*, Sirio SD3000N, proiectată pentru aplicații de scanare a unui interval extrem de larg de frecvență.

Antena folosită prezintă o caracteristică omnidirecțională în planul H (orizontal în cazul montării verticale a antenei), și un câștig de 0 dBd (2,15 dBi). Antena a fost conectată prin intermediul unui cablu de radiofrecvență cu pierderi reduse la analizorul de spectru Anritsu MS2690A (50 Hz până la 6 GHz).

Pentru evaluarea gradului de ocupare spectrală în zone rurale, măsurătorile au fost efectuate în localitatea Măneciu, situată într-o regiune deluroasă, la o altitudine de 584 m față de nivelul mării (coordonate geografice: latitudine 45°18'49" N, longitudine 25°59'38" E). Localitatea se găsește la o distanță de aproximativ 100 km față de București, 50 km față de Brașov și 40 km față de Ploiești, distanțe suficient de mari, astfel încât locația aleasă este potrivită pentru evaluarea gradului de ocupare spectrală în mediu rural.

Aceeași antenă care a fost folosită pentru măsurătorile realizate în București a fost utilizată și în acest caz, antena fiind plasată la o înălțime de aproximativ 8 metri deasupra solului.

Măsurătorile au fost efectuate astfel încât să fie acoperit întreg spectrul de frecvență între 25 MHz și 3400 MHz, acest interval fiind împărțit în 14 sub-benzi în funcție de tipurile de servicii și benzile alocate diferitelor sisteme de comunicații.

Pentru colectarea seturilor de eșantioane necesare pentru estimarea ocupării spectrale în cele 14 sub-benzi de frecvență, analizorul de spectru a fost controlat prin intermediul unui laptop conectat prin interfața de rețea a analizorului. Pentru colectarea, procesarea și analiza informațiilor colectate pe parcursul campaniilor de măsurători a fost folosit mediul de calcul Mathworks MATLAB.

Prin comenzi transmise analizorului sunt setate pe rând capătul inferior și capătul superior al benzii de frecvență monitorizate și odată la fiecare 5 secunde este stocat un set de eșantioane pe suportul de memorie intern al analizorului, în format CSV (Comma Separated Values). Având în vedere numărul de 14 sub-benzi pentru care este necesară monitorizarea, rezultă că între două măsurători consecutive efectuate pentru aceeași bandă de frecvență există un interval de aproximativ 70 secunde. Având în vedere că intervalele de timp

considerate pentru evaluarea rezultatelor au fost de 8 ore, rezultă că în acest interval pentru fiecare bandă de frecvență au fost colectate aproximativ 400 de seturi de eşantioane.

4.2 METODOLOGIA UTILIZATĂ PENTRU DETERMINAREA GRADULUI DE OCUPARE SPECTRALĂ

Dintre diferitele soluții care pot fi utilizate pentru determinarea gradului de ocupare spectrală prezentate în cadrul capitolului 3, a fost aleasă soluția detecției de energie. Așa cum a fost arătat anterior, în cazul acestei soluții nu sunt necesare informații suplimentare cunoscute apriori legate de tipul semnalelor care urmează a fi detectate. De asemenea, soluția este aplicabilă pentru un număr foarte larg de tipuri de semnale, iar complexitatea de calcul necesară pentru prelucrarea măsurătorilor este relativ redusă.

O primă etapă deosebit de importantă în cazul evaluării gradului de ocupare spectrală folosind metoda detecției de energie este reprezentată de determinarea nivelului de zgomot și a pragului de decizie pentru fiecare bandă de frecvență care urmează a fi analizată. Există mai multe metode care pot fi folosite, ele fiind detaliate în cele ce urmează.

Una dintre cele mai uzuale metode este cea în care este montată o *sarcină adaptată* (de 50Ω în cazul configurației folosite) în locul antenei care a fost utilizată pentru realizarea măsurătorilor, pentru determinarea nivelului de zgomot existent în cadrul sistemului de măsură. Cu sarcina adaptată conectată la analizor sunt efectuate măsurători pentru fiecare dintre benzile de frecvență analizate, folosind intervale suficient de lungi de timp, pentru a permite o ulterioară analiză statistică suficient de concludentă. Pragul de decizie η pentru fiecare dintre benzile de frecvență care sunt analizate este fixat astfel încât numai un anumit procent p dintre eşantioanele măsurate ale zgomotului să fie situate peste nivelul pragului, ceea ce corespunde unei probabilități de alarmă falsă egală cu procentul respectiv. Dezavantajul principal al acestei metode este acela că evaluarea nivelului de zgomot și stabilirea pragului de decizie sunt realizate la un moment de timp anterior celui în care se realizează măsurătorile efective, iar valorile obținute nu mai sunt actualizate dinamic în funcție de schimbările care pot apare pe parcursul efectuării măsurătorilor. Mai mult, în cazul măsurătorilor care ar fi realizate în cadrul echipamentelor CR mobile, prin schimbarea poziției și eventual a tipului de mediu (în interiorul/exteriorul clădirilor), variațiile nivelului de zgomot pot fi semnificative, ceea ce impune o actualizare dinamică a acestui nivel.

O a doua metodă, care este și metoda care a fost folosită pentru obținerea rezultatelor care sunt prezentate în continuare, presupune folosirea unei *ferestre glisante* în domeniul frecvență pentru determinarea nivelului de zgomot N_0 și a pragului de detecție η în funcție de o anumită probabilitate de alarmă falsă P_{FA} impusă, pentru fiecare dintre benzile de frecvență care sunt analizate. Prin intermediul unui algoritm se determină cel mai larg interval de frecvență din banda analizată în care nu sunt prezente semnale utile. Analizând eşantioanele zgomotului din acest interval se determină pragul de detecție η astfel încât un procent de eşantioane egal cu probabilitatea de alarmă falsă impusă să se regăsească deasupra acestui prag. Avantajul acestei metode este că permite determinarea automată a pragului de detecție indiferent de banda analizată și permite actualizarea dinamică a acestei valori în cazul în care nivelul zgomotului se modifică pe parcursul efectuării măsurătorilor. Metoda poate fi implementată și pe o platformă de tip radio definit prin software, astfel încât detecția spectrală

să poată fi realizată și în timp real și nu numai offline, așa cum a fost cazul pentru seturile de măsurători realizate cu ajutorul analizorului de spectru Anritsu MS2690A.

Pentru a limita valoarea probabilității de alarmă falsă cauzată de eșantioanele de zgomot cu putere crescută, a fost folosită o a doua fereastră glisantă cu o pentru a estompa prin mediere astfel de eșantioane. Lățimea acestei ferestre a fost aleasă în funcție de lățimea de bandă minimă a semnalelor licențiate.

Un alt element de o deosebită importanță în stabilirea gradului de ocupare spectrală este alegerea pragului de decizie. În cazul determinării nivelului de zgomot folosind metoda ferestrei glisante, pragul de detecție este stabilit relativ la nivelul determinat pentru zgomot în fiecare dintre benzile de frecvență.

Dacă valoarea aleasă pentru pragul de detecție este prea ridicată, semnalele utile cu un nivel scăzut vor fi ignorate și tratate ca zgomot, ceea ce va avea ca rezultat o subestimare a valorii reale a gradului de ocupare spectrală (figura 4.1 a)). Valoarea medie a zgomotului este reprezentată printr-o linie de culoare verde, iar valoarea aleasă pentru pragul de detecție este reprezentată printr-o linie de culoare roșie. Se observă că pentru o alegere a nivelului pragului de detecție cu 10 dB peste nivelul zgomotului, mai multe semnale utile de putere redusă sunt ignorate în momentul determinării gradului de ocupare spectrală.

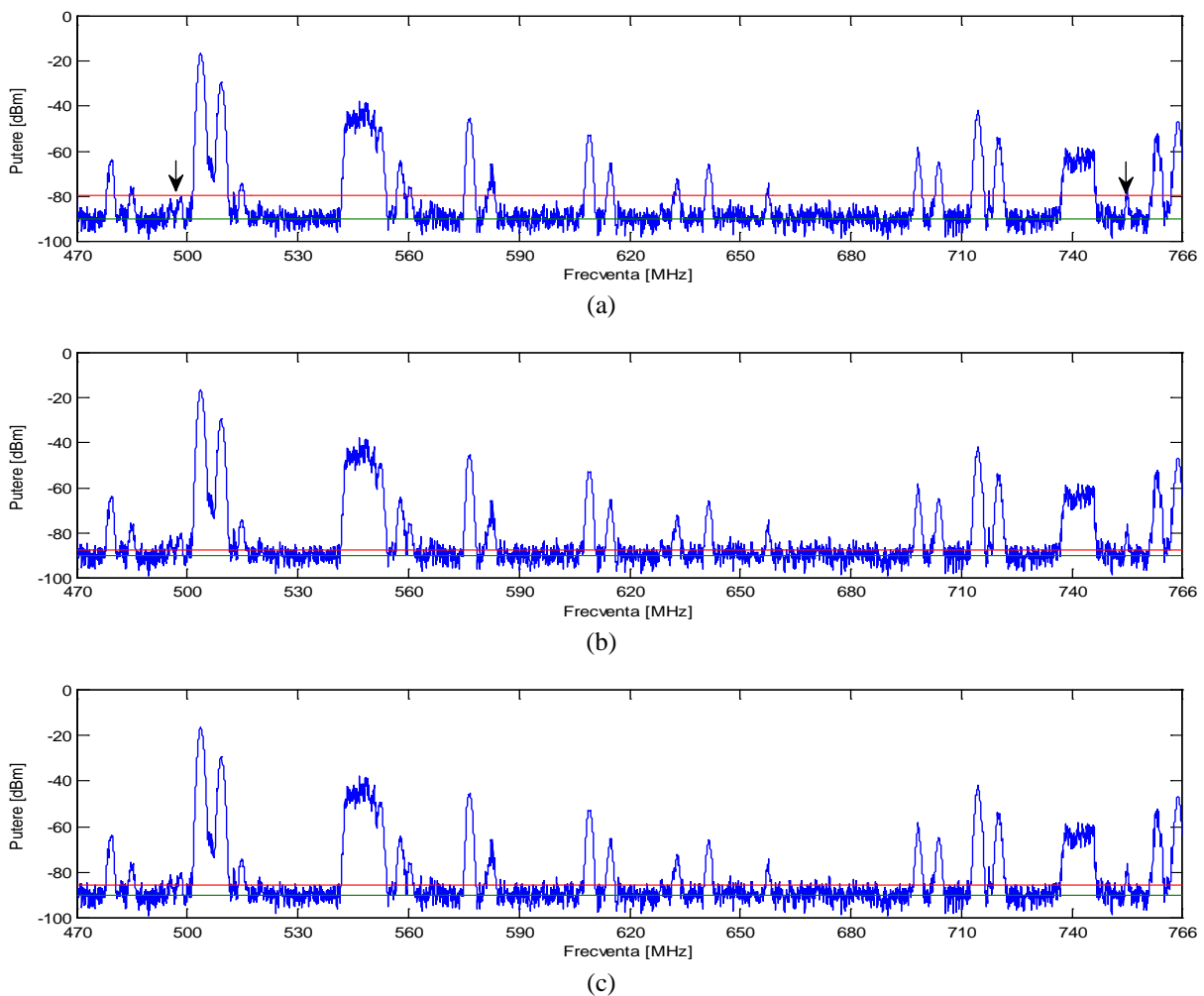


Fig. 4.1 - Gradul de ocupare spectrală în banda de frecvență 470-766 MHz pentru trei valori diferite ale pragului de detecție: (a) 10 dB (b) 2 dB și (c) 3,29 dB peste nivelul de zgomot.

Pe de altă parte, dacă valoarea aleasă pentru pragul de detecție este prea scăzută, atunci valoarea probabilității de alarmă falsă va crește datorită eșantioanelor de putere ridicată din cadrul zgomotului. După cum se observă în figura 4.1 b), dacă pentru pragul de detecție a fost aleasă o valoare de doar 2 dB peste nivelul zgomotului pot fi observate mai multe cazuri în care eșantioanele corespunzătoare zgomotului se ridică peste nivelul pragului de detecție.

Pentru setul de capturi obținute pe parcursul campaniei de măsurători a fost impusă o valoare a probabilității de alarmă falsă de 10%, ceea ce în cazul benzii 470-766 MHz a dus la o valoare a pragului de detecție cu 3,29 dB peste nivelul de zgomot, ceea ce a dus la un bun compromis între detecția semnalelor utile de nivel redus și păstrarea unei valori scăzute pentru probabilitatea de alarmă falsă. Această situație este ilustrată în figura 4.1 (c).

În tabelul 4.1 sunt prezentate valorile obținute pentru gradul de ocupare spectrală pentru toate cele 14 sub-benzi de frecvență analizate, impunând o valoare de 10% pentru probabilitatea de alarmă falsă. Măsurătorile au fost efectuate pe parcursul a două zile, dintre care o zi a fost lucrătoare și o zi a fost de la sfârșitul săptămânii.

Tabelul 4.1 - Gradul de ocupare spectrală pentru zone urbane și rurale, pentru banda de frecvență 25-3400 MHz, pe durata unui interval de timp de 48 de ore

Banda de frecvență (MHz)	Aplicații licențiate conform TNABF [52]	Gradul de ocupare spectrală (%)		Gradul mediu de ocupare spectrală (%)			
		Mediu urban	Mediu rural	Mediu urban	Mediu rural	Mediu urban	Mediu rural
25 - 230	Radiodifuziune FM, Aplicații aeronautice/maritime, Sisteme PMR/PAMR, Aplicații militare, altele	48,64	28,67	37,23	19,19	21,00	14,19
230 - 400	Aplicații militare, Servicii de urgență	17,82	13,25				
400 - 470	Sisteme de comunicații mobile analogice/digitale, Meteorologie, altele	42,83	23,43				
470 - 766	Televiziune analogică, Televiziune digitală DVB-T	43,06	11,42				
766 - 880	Aplicații militare, Televiziune analogică, Televiziune digitală DVB-T, Sisteme cordless, altele	17,63	11,10				
880 - 960	Sisteme de comunicații mobile GSM, E-GSM, Aplicații militare	50,85	44,19	15,89	11,15	21,00	14,19
960 - 1525	Aplicații aeronautice/maritime, Sisteme de radionavigație /radiolocație, Aplicații militare, Radar, Radioastronomie	10,89	10,11				
1525 - 1710	Aplicații mobile prin satelit, Aplicații militare, Meteorologie	10,91	10,83				
1710 - 1880	Sisteme de comunicații mobile GSM 1800, altele	28,58	14,64				
1880 - 2200	Sisteme de comunicații mobile UMTS/IMT 2000, DECT, altele	20,87	11,34	13,64	13,44	21,00	14,19
2200 - 2400	Aplicații SAP/SAB, Aplicații militare	17,26	17,04				
2400 - 2500	Bandă ISM, Aplicații RFID, altele	17,66	15,90				
2500 - 2690	Sisteme de comunicații mobile UMTS/IMT 2000, Aplicații militare	21,13	21,01				
2690 - 3400	Aplicații militare, Radar, Sisteme de radionavigație, Meteorologie, altele	10,05	10,06				

4.3 ANALIZA REZULTATELOR EXPERIMENTALE OBȚINUTE

Cu toate că pentru marea majoritate a spectrului de frecvență dintre 25 MHz și 1 GHz a fost determinat un grad relativ ridicat de ocupare spectrală, există și benzi de frecvență situate în acest interval care prezintă potențial pentru a fi folosite în aplicații de tip radio cognitiv.

Pentru banda de frecvență 25 – 230 MHz gradul de ocupare spectrală măsurat a fost destul de ridicat (48,64% pentru zona urbană, 28,67% pentru zona rurală), în special datorită emisiilor de radio din banda de unde ultracurte (FM) prezente în zona în care au fost realizate măsurătorile. Se observă că diferența între valorile obținute pentru gradul de ocupare spectrală în zonele urbană și rurală este semnificativă (aproape 20%), în special datorită numărului mai mic de posturi de radio FM și datorită absenței sau prezenței mult mai reduse a semnalelor din benzile sistemelor de comunicații aeronautice (108 – 137 MHz) și a sistemelor de comunicații PMR/PAMR (146 – 156 MHz).

Se observă, de asemenea, chiar și pentru semnalele care sunt prezente și în zona rurală, nivele mult mai mici ale nivelului de semnal recepționat.

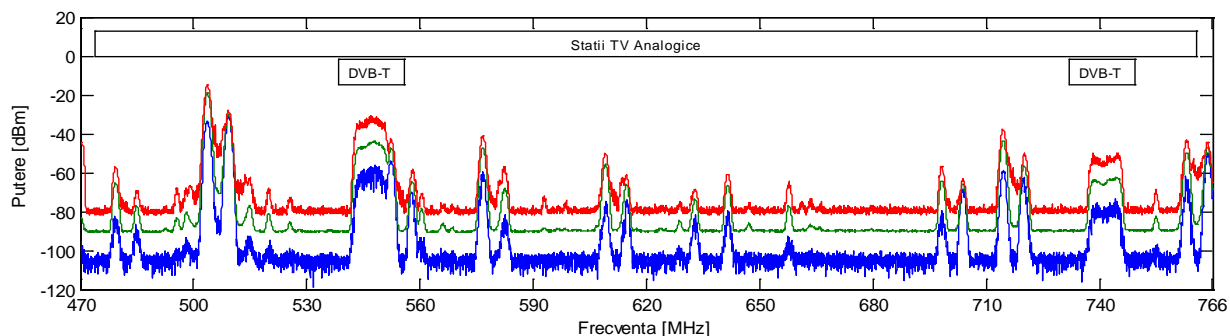
Pentru banda de frecvență 400 – 470 MHz gradul de ocupare este aproape dublu pentru zona urbană comparativ cu zona rurală (42,83% față de 23,43%). Gradul destul de mare de ocupare măsurat în București este datorat în special rețelelor de comunicații mobile cu spectru împrăștiat care operează în această zonă în benzile de 410 – 415 MHz (legătura ascendentă) și 420 – 425 MHz (legătura descendentă). Atât în zona urbană, cât și în zona rurală, se observă prezența permanentă a semnalelor în banda 453-467,5 MHz, alocată pentru rețele publice celulare.

În figura 4.2 sunt detaliate rezultatele obținute pentru banda de frecvență 470 – 766, folosind trei metrici diferite. În primul caz, sunt trasate cu verde, roșu, respectiv albastru valorile medie, maximă, respectiv minimă pentru densitatea spectrală de putere a semnalului măsurat, pentru un interval de observație de 8 ore. În cea de-a doua reprezentare este figurat gradul de ocupare spectrală pentru același interval de 8 ore, o valoare de 100% semnificând o ocupare permanentă a frecvenței respective pentru întreg intervalul de timp. Cea de-a treia reprezentare reprezintă o hartă a nivelului de semnal pentru întreg intervalul de timp de 8 ore.

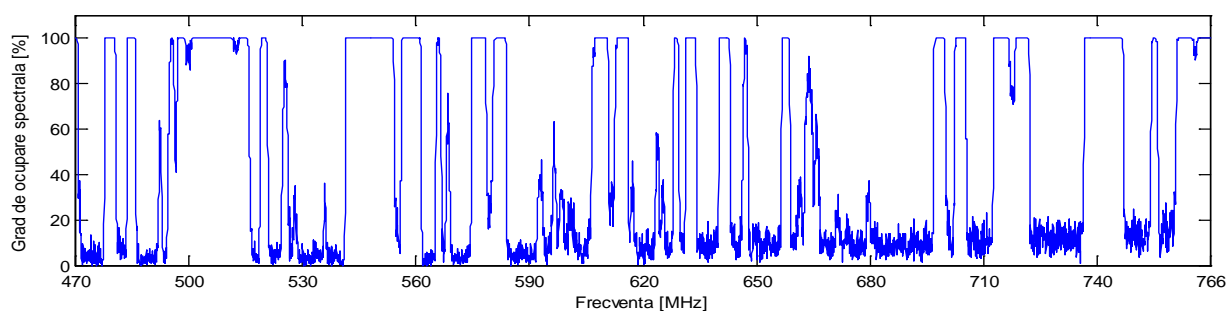
Această bandă de frecvență este în prezent folosită în special pentru emisiile de televiziune în format analogic. Mai multe stații de emisie pentru posturi TV pot fi observate în figura 4.2 (pentru măsurătorile în zona urbană, nivelul semnalului pentru stația care emite pe frecvența de 506 MHz este mai ridicat decât nivelul celorlalte posturi, având în vedere faptul că antena de emisie este situată chiar pe clădirea de unde au fost realizate măsurătorile). Valoarea obținută în prezent pentru gradul de ocupare spectrală în această bandă este destul de mare numai în cazul zonei urbane (43,06%), pentru zona rurală gradul de ocupare măsurat fiind extrem de redus (11,42%), cu doar mai puțin de 2 procente peste valoarea probabilității de alarmă falsă. Situația s-ar putea schimba semnificativ în viitorul apropiat, odată cu introducerea emițătoarelor de televiziune digitală DVB-T. Emisiile DVB-T experimentale sunt deja efectuate în zona Bucureștiului, semnalele corespunzătoare putând fi observate în figura 4.2 pe frecvențele de 564 MHz (canalul 30), respectiv 738 MHz (canalul 54). În momentul în care emisiile digitale TV în format DVB-T va înlocui complet emisiile de televiziune analogice existente în prezent (emisiile acestora în România fiind permise)

conform normativelor europene numai până la data de 1 Ianuarie 2012), vor trebui efectuate noi măsurători pentru această bandă de frecvență.

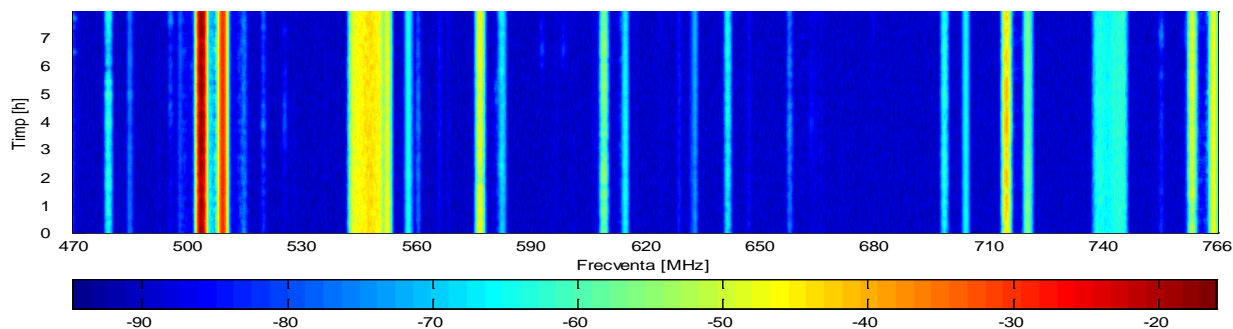
Diferența de peste 30% este datorată numărului mult mai mic de posturi TV analogice care emit în cazul zonei rurale, precum și absenței emisiilor DVB-T, care acoperă doar o zonă de ordinul zecilor de kilometri în jurul Bucureștiului.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.2 - Gradul de ocupare spectrală în banda de frecvență 470 MHz - 766 MHz folosind diferite metrice (București, 14:00-22:00, zi de lucru)

- (a) Valorile **medie**, **minimă** și **maximă** ale semnalului
- (b) Gradul de ocupare spectrală
- (c) Harta ocupării spectrale instantanee

Gradul cel mai redus de ocupare spectrală pentru zona de frecvență de sub 1 GHz a fost obținut pentru banda de frecvență 766 – 880 MHz, însă marea majoritate a acestei benzi

este licențiată momentan pentru aplicații militare. Cu toate că în Tabelul Național de Alocare a Benzilor de Frecvență (TNABF) [27] și în Tabelul European de Alocare a Benzilor de Frecvență [28] există și alte sisteme care ar avea drept de emisie în această bandă, singurul semnal care a fost identificat în zona urbană este un al treilea emițător experimental DVB-T (pe frecvența de 778 MHz, canalul 59).

Cele mai ridicate valori pentru gradul de ocupare spectrală dintre cele 14 sub-benzi analizate (50,85% pentru zona urbană, respectiv 44,19% pentru zona rurală) au fost obținute pentru banda de frecvență 880 – 960 MHz, reprezentată în figura 4.3 și licențiată pentru sistemele de comunicații mobile GSM-900. În banda de frecvență corespunzătoare legăturii descendente (925 – 960 MHz) au fost recepționate semnale cu un nivel crescut de putere pe parcursul întregului interval de timp în care au fost realizate măsurătorile. Explicația poate fi dată de prezența în imediata apropiere a locației de unde au fost realizate măsurătorile a unor stații de bază GSM și de faptul că puterea de emisie folosită de acestea este mai mare decât cea folosită de către stațiile mobile. De asemenea, stațiile de bază emit în permanență, spre deosebire de stațiile mobile, care emit doar intermitent în cazul în care nu au o convorbire activă în desfășurare.

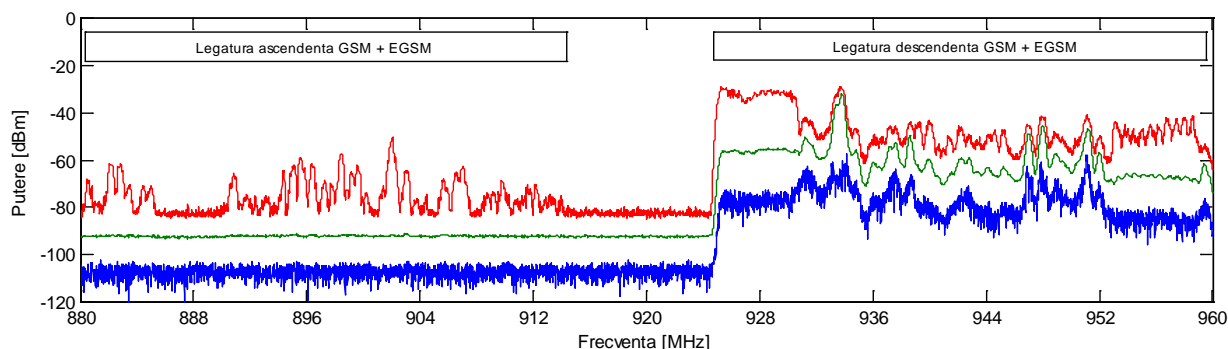


Fig. 4.3 - Valorile medie, minimă și maximă ale semnalului recepționat pentru banda de frecvență 880 MHz - 960 MHz (București, 14:00-22:00, zi de lucru)

Pentru banda de frecvență corespunzătoare legăturii ascendente (880 – 915 MHz) gradul mediu de ocupare spectrală măsurat a fost extrem de scăzut. Cu toate acestea, trebuie remarcat că datorită locației de unde au fost realizate măsurătorile, precum și a puterii reduse de emisie folosită de către stațiile mobile, gradul de ocupare spectrală în cazul acestor benzi poate fi subestimat. În figura 4.3 se poate observa că, în ciuda faptului că valoarea medie a densității spectrale de putere este practic constantă pentru întreaga bandă corespunzătoare legăturii ascendente, valorile maxime înregistrate pentru această bandă pot fi chiar și cu peste 30 dB mai ridicate decât valoarea medie, pentru situațiile în care o stație mobilă activă emite în apropierea locației de măsură. Echipamentele de tip radio cognitiv care ar putea activa în aceste benzi de frecvență ar trebui să fie capabile să detecteze semnale de putere redusă, al căror nivel este apropiat de cel al zgomotului, astfel încât să evite interferențele cu utilizatorii ai sistemelor licențiate, în momentul în care aceștia devin activi.

Se pot remarca diferențele mici între gradul de măsurare spectrală măsurat în cele două zone în cazul acestor benzi (în jur de 5%), cu toate că puterea recepționată în cazul legăturii descendente pentru zona rurală este mai redusă decât în cazul zonei urbane.

Pentru măsurătorile realizate în zona rurală a fost remarcată o variație semnificativă a gradului de ocupare spectrală măsurat (peste 6%), în funcție de intervalul de observație, după cum se observă din tabelul 4.2.

Tabelul 4.2 - Influența intervalului de observație asupra gradului de ocupare spectrală măsurat în zona rurală pentru banda de frecvență 880 - 960 MHz

Intervalul de observație (ore : minute)	Gradul de ocupare spectrală măsurat (%)
06:00 – 14:00 (zi de week-end)	47,22
14:00 – 22:00 (zi de week-end)	43,98
22:00 – 06:00 (zi de week-end)	40,60

După cum se observă din figura 4.4, explicația acestor variații constă în faptul că anumite ARFCN-uri dintre cele folosite în zona în care au fost realizate măsurătorile sunt active doar în intervalul de timp aproximativ 04-18, corespunzător perioadei în care necesitățile pentru trafic sunt mai ridicate. În consecință, pentru intervalele de timp 14-22 și 22-06 valorile obținute pentru gradul de ocupare spectrală au fost mai scăzute.

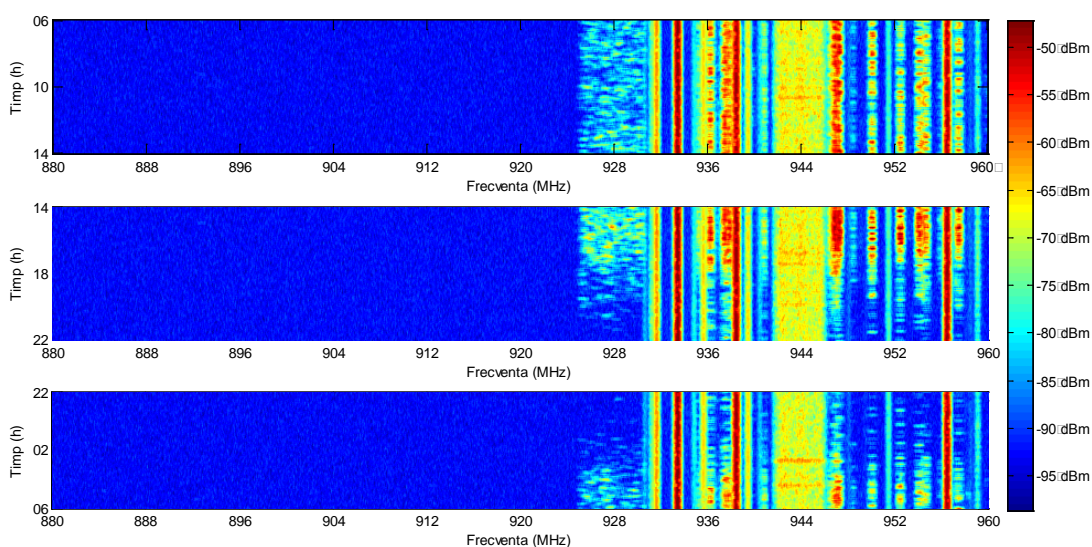


Fig. 4.4 - Reprezentarea densității spectrale de putere măsurate în Măneciu pentru banda de frecvență 880-960 MHz, pentru 3 intervale de timp a câte 8 ore

Dacă pentru intervalul de frecvență de până la 1 GHz valoarea medie obținută pentru gradul de ocupare spectrală a fost de aproape 30 % (29,04 %), pentru intervalul de frecvență de peste 1 GHz valoarea acestuia este cu mult mai mică (sub 15 %), existând chiar și benzi pentru care valoarea este de sub 10 %. Având în vedere aceste aspecte, marea majoritate dintre aceste benzi de frecvență reprezintă soluții pentru aplicații folosind echipamente CR.

Observațiile care au fost făcute în cazul benzii de frecvență 880 – 960 MHz sunt valabile și pentru banda de frecvență 1710 – 1880 MHz, licențiată pentru sisteme de comunicații mobile GSM-1800. Diferența constatată în cazul acestei benzi între gradul de ocupare spectrală măsurat în cele două zone este mai mare decât în cazul benzii corespunzătoare sistemului GSM-900 (28,58% pentru zona urbană, respectiv 14,64% pentru zona rurală). Explicația este dată de faptul că în cazul zonei rurale traficul estimat de către operatorii de telefonie mobilă este mai redus, din această cauză pentru această zonă sunt

folosite mai puține frecvențe decât în cazul zonei urbane. Ca și în cazul sistemului GSM-900, gradul de ocupare măsurat este extrem de redus în cazul benzii corespunzătoare legăturii ascendente (1710 – 1785 MHz) și ridicat în cazul benzii corespunzătoare legăturii descendente (1805–1880 MHz).

Cel mai mare grad de ocupare spectrală pentru benzile situate peste 1 GHz, cu excepția benzii licențiate pentru GSM-1800, este regăsit pentru banda de frecvență 1880 – 2200 MHz. În această bandă sunt licențiate sistemele de comunicații mobile din generația a 3-a (UMTS), sisteme care folosesc principiul comunicațiilor cu spectru împrăștiat (W-CDMA). Se observă din această cauză că, spre deosebire de cazul benzilor descendente corespunzătoare sistemelor de tip GSM, unde nivelul semnalului recepționat era diferit în funcție de frecvențele (ARFCN) care erau folosite de către stațiile de bază situate în apropiere, nivelul semnalului recepționat este constant pentru întreaga bandă de frecvență corespunzătoare legăturii descendente pentru sisteme de tip UMTS.

În cazul benzilor corespunzătoare legăturii ascendente pentru astfel de sisteme, datorită folosirii comunicației cu spectru împrăștiat și a puterii reduse de emisie folosite de către stațiile mobile, gradul de ocupare spectrală măsurat este aproape nul. În [PR4] au fost discutate posibile strategii care să permită folosirea acestor benzi de frecvență de către echipamentele de tip radio cognitiv.

O altă bandă de frecvență care prezintă un interes deosebit este banda 2400 – 2500 MHz (ISM), având în vedere că în această bandă este permis accesul diferitelor echipamente, fără a exista nevoia licențierii. Gradul de ocupare spectrală măsurat a fost suficient de redus pentru ambele zone analizate (17,66% pentru zona urbană, respectiv 15,90% pentru zona urbană) și datorită locațiilor folosite pentru realizarea măsurătorilor.

Principalul avantaj oferit de această bandă de frecvență constă în multitudinea de echipamente existente pe piață care operează în această bandă, ceea ce permite o dezvoltare mai rapidă a echipamentelor prototip de tip radio cognitiv.

4.4 CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE DE CONTINUARE A MĂSURĂTORILOR

Rezultatele obținute prin prelucrarea măsurătorilor efectuate pe parcursul campaniei au arătat că gradul de utilizare a spectrului de radiofrecvență pentru benzile de frecvență analizate este de cele mai multe ori extrem de redus. Valorile medii obținute pentru gradul de ocupare spectrală măsurat pentru întregul interval de frecvență în care au fost realizate măsurătorile (25 MHz – 3.4 GHz) în cele două zone a fost de 21,00% pentru zona urbană, respectiv 14,19% pentru zona rurală. Pentru o creștere a eficienței de folosire a spectrului de radiofrecvență, una dintre soluțiile cele mai promițătoare este accesul dinamic la spectru.

Cu toate că pentru anumite benzi de frecvență gradul de ocupare spectrală pare la prima vedere extrem de redus (cazul benzilor corespunzătoare legăturilor ascendente pentru sistemele de tip GSM-900 și GSM-1800), trebuie să existe o deosebită atenție la proiectarea echipamentelor de tip radio cognitiv care ar putea să opereze în aceste benzi de frecvență, pentru a evita producerea de interferențe cu sistemele de comunicații mobile licențiate.

Pentru benzile de frecvență în care sunt încă prezente emițătoare pentru distribuția posturilor de televiziune în format analogic va fi necesară o reevaluare a gradului de ocupare spectrală în momentul în care aceste emițătoare vor înceta să funcționeze, fiind înlocuite prin emițătoare de televiziune digitală DVB-T.

5. ALEGEREA UNEI PLATFORME EXPERIMENTALE PENTRU IMPLEMENTAREA UNUI SENZOR DE DETECȚIE SPECTRALĂ

În cadrul acestui capitol sunt prezentate o serie de platforme de tip SDR care au fost considerate în momentul alegerii unei platforme pentru implementarea unui senzor de detecție spectrală. Pentru a putea fi folosită în acest scop, o astfel de platformă trebuie să satisfacă o serie de criterii de performanță, care sunt enumerate în cele ce urmează:

- Acoperirea, prin intermediul unuia sau mai multor module de radiofrecvență, unei *game cât mai largi de frecvență*, astfel fiind posibilă analiza unui interval spectral care să includă o gamă cât mai largă de sisteme de comunicații;
- Capacitatea de a capta și prelucra o *bandă cât mai largă de frecvență*, astfel încât latența în momentul implementării algoritmilor de detecție spectrală să fie cât mai mică;
- Existența unui *mediu de dezvoltare cât mai flexibil*, care să permită adaptarea platformei la necesitățile impuse de sistemul de detecție proiectat;
- *Preț suficient de mic* pentru a putea achiziționa un număr suficient de platforme.

În tabelul 5.1 sunt prezentate comparativ caracteristicile diferitelor platforme SDR care au fost luate în considerare.

Tabelul 5.1 - Parametri ai diferitelor platforme SDR considerate pentru implementarea unui sistem de detecție spectrală

Platforma SDR	Microsoft Research SORA	Datasoft Thunder SDR	Lyrtech SFF SDR	CRC-Coral WIFI CR Networking Kit	Sundance SMT 8036E	Ettus Research USRP-N210
Gama de frecvență suportată	2,4 GHz; 5 GHz	400 MHz – 4 GHz	200 MHz – 1 GHz; 1,6 – 2,7 GHz; 3,3 – 3,8 GHz	2,4 GHz; 5,8 GHz	2,4 – 2,5 GHz	50 MHz – 2,2 GHz; 2,4 – 2,5 GHz; 4,9 – 5,9 GHz
Resurse de calcul	GPP (toate procesările relizate de un calculator multi-core)	Xilinx Spartan-6 FPGA; OMAP 37x; TI C64x DSP	Virtex-4 SX35 FPGA; DM6446 DSP	FPGA	TI C6416 DSP; Xilinx Virtex-II FPGAs	FPGA Xilinx Spartan 3A-DSP3400
Lățimea de bandă maximă suportată	20 MHz	20 MHz	22 MHz	20 MHz		50 MHz (8 bit) 25 MHz (16 bit)
Sisteme de operare suportate	Windows XP	Linux; VxWorks; Android	Linux	Linux Fedora Core or equivalent	Windows	Linux; Windows; MAC OS X
Platforme software suportate	SORA SDK	GNU Radio	MATLAB; Simulink; Real-Time Workshop	Linux-OpenWRT cu driver MadWIFI personalizat	3L Diamond IDE; TI CCS	GNU Radio; Simulink; LabView
Preț	\$5000	\$10000	\$14000	\$6000	\$10000	\$2000

Motivele care au dus la alegerea modelului USRP N210, produs de Ettus Research, ca platformă experimentală se suprapun în mare parte peste cerințele care au fost enumerate anterior.

După cum se observă și din tabelul 5.1, din punctul de vedere al performanțelor care sunt de interes pentru aplicația de detecție spectrală (în principal lățimea de bandă maximă care poate fi suportată și gama de frecvență care poate fi acoperită), platforma USRP N210 are caracteristicile cele mai bune. Mai mult, domeniul de frecvență care apare trecut în tabel poate fi extins în funcție de necesități, fiind disponibile module de RF care pot acoperi și alte domenii de frecvență.

Din punctul de vedere al sistemelor de operare suportate, se observă că există suport pentru toate cele trei mari familii de produse existente pe piață (Linux, Windows și Mac OSX), cu observația că în special pentru aplicațiile care presupun un nivel ridicat de flexibilitate, sistemul de operare Linux rămâne alegerea optimă.

Platformele software care pot fi folosite pentru dezvoltarea de aplicații folosind modulele USRP sunt, de asemenea, extrem de diverse. Mediul de dezvoltare GNU Radio prezintă avantajele gratuității și a multitudinii de blocuri de procesare de semnal disponibile, ceea ce permite dezvoltarea rapidă a aplicațiilor. Există și posibilitatea interfațării cu mediile de dezvoltare Mathworks Simulink și National Instruments LabView.

Din punctul de vedere al prețului de achiziție se observă din nou avantajul oferit de seria de produse USRP față de toate celelalte platforme analizate, practic prețul fiind mai mic de jumătate față de oricare dintre celelalte platforme.

Nu în ultimul rând, produsele din seria USRP sunt de departe cele mai populare platforme de dezvoltare SDR, atât în mediul academic de cercetare, cât și în cadrul comunităților de entuziaști, ceea ce a dus la existența unui număr însemnat de resurse de informație legate de acestea.

6. PLATFORMA SDR USRP-N210

Pentru implementarea aplicației de detecție spectrală a fost aleasă o platformă din cadrul seriei *Networked* a familiei de produse USRP, și anume USRP-N210 [29]. În cadrul acestui capitol vor fi prezentate principalele caracteristici și aspecte legate de arhitectura hardware a acestui modul.

Platforma USRP-N210 reprezintă modulul cu caracteristicile cele mai performante dintre modulele din seria *Networked* a familiei USRP, circuitul FPGA prezent pe acest modul (Xilinx Spartan 3SD3400A) având suficiente resurse libere pentru a permite utilizatorului implementarea de funcții suplimentare. În cazul în care circuitul FPGA este programat folosind versiunea standard oferită de producător, care asigură o serie de funcții necesare, cum ar fi blocurile DDC/DUC, driverul UHD și un nucleu de procesor RISC pe 32 de biți, rămân disponibile pentru utilizator 63% din resursele de logică generală, 66% din resursele de memorie și 88% din resursele de procesare digitală de semnal.

În figura 6.1 este prezentată o schemă bloc a platformei USRP-N210.

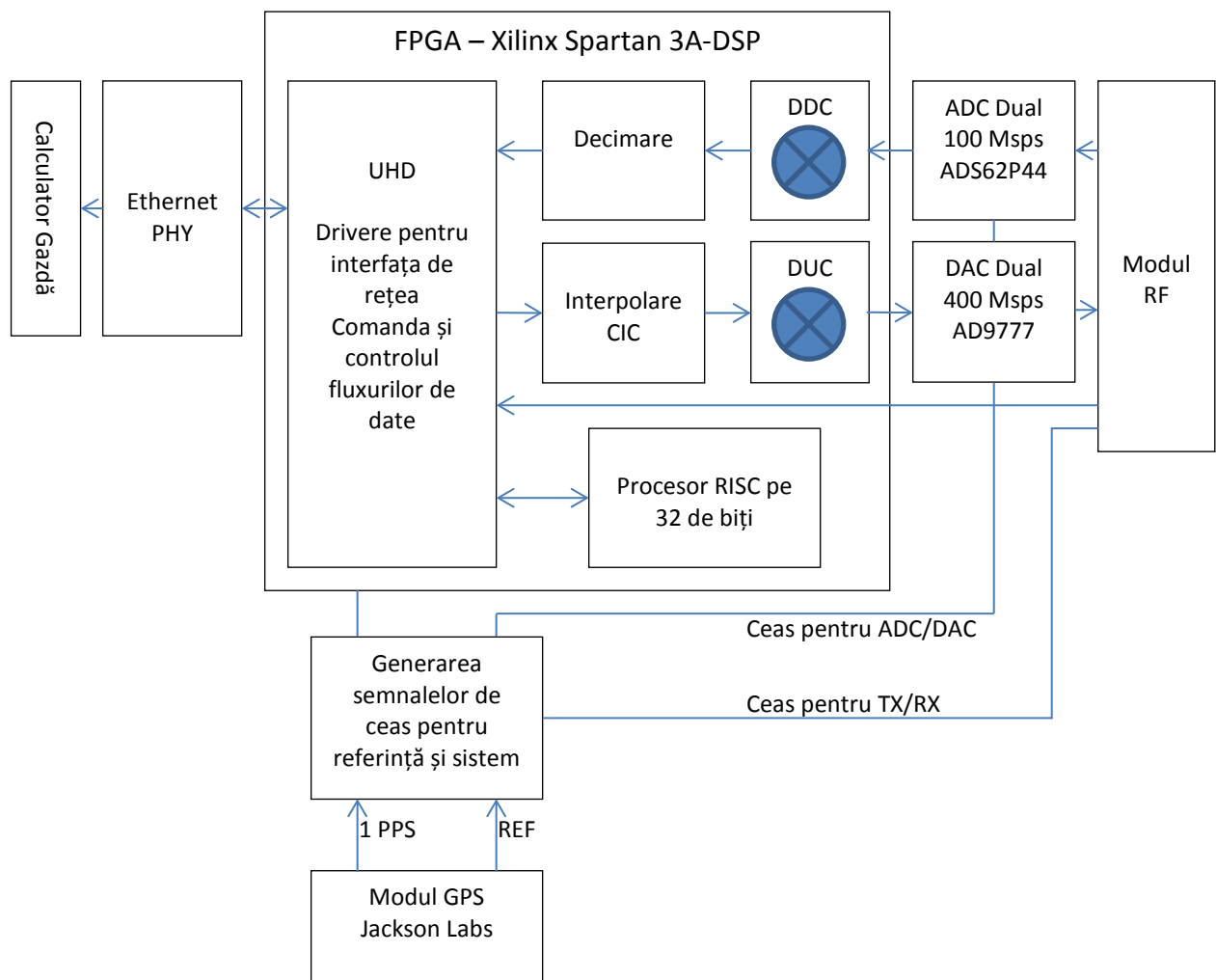


Fig. 6.1 - Schema bloc a platformei USRP-N210

Firma Ettus Research produce o gamă largă de module de radiofrecvență, ceea ce permite acoperirea, în funcție de necesități, a majorității benzilor de frecvență în care operează sistemele moderne de comunicații, până la valori de frecvență de 6 GHz. În cadrul aplicației de detecție spectrală prezentată în cadrul capitolului 4 a fost utilizat modulul full-duplex WBX, care folosește o arhitectură de conversie directă și acoperă banda de frecvență 50 MHz – 2.2 GHz.

Una dintre principalele provocări din punctul de vedere software a fost dezvoltarea unui mediu de dezvoltare suficient de flexibil pentru a permite compatibilitatea cu multiple platforme hardware. GNU Radio [30] reprezintă un mediu de dezvoltare open-source care poate fi folosit sub diferite sisteme de operare și care permite proiectarea blocurilor de procesare de semnal necesare pentru implementarea echipamentelor radio definite prin software.

Mediul de dezvoltare GNU Radio reprezintă un pachet software care asigură *blocuri de procesare de semnal*, ce pot fi văzute sub forma unor componente discrete necesare pentru realizarea unor anumite sarcini. Fiecare dintre aceste componente reprezintă o clasă C++ care poate fi conectată de către dezvoltatorul unei aplicații la alte blocuri pentru a crea un *graf de semnal*.

Fiecare dintre aceste blocuri individuale de procesare de semnal care presupun de cele mai multe ori elemente critice din punctul de vedere al performanței sunt implementate folosind limbajul C++ și sunt grupate într-o librărie. Limbajul de programare de nivel înalt Python [31] este folosit ulterior ca limbaj de legătură pentru a conecta între ele blocurile de procesare de semnal din librăria C++.

Unul dintre principalele aspecte luate în considerare în momentul alegerii unei platforme SDR a fost posibilitatea de a utiliza o gamă cât mai largă de sisteme de operare și medii de dezvoltare software. Familia USRP satisface o astfel de cerință prin intermediul *driverului hardware pentru USRP (UHD)*, dezvoltat de firma Ettus Research

Driverul UHD [32] permite comunicația între platforma USRP și calculatorul gazdă prin intermediul unei interfețe care poate diferi în funcție de familia de produse (Gigabit Ethernet pentru familia *Networked*, USB 2.0 pentru familia *Bus*).

7. IMPLEMENTAREA UNUI SENZOR DE DETECȚIE SPECTRALĂ FOLOSIND PLATFORMA USRP N210

În cadrul acestui capitol va fi prezentat modul de implementare a unui senzor de detecție spectrală folosind ca suport hardware platforma USRP N210 și ca suport software mediul de dezvoltare GNU Radio și Mathworks MATLAB.

7.1 DESCRIREA SOLUȚIEI UTILIZATE

În figura 7.1 este prezentată schema de principiu folosită pentru implementarea unui senzor de detecție spectrală cu ajutorul platformei USRP-N210.

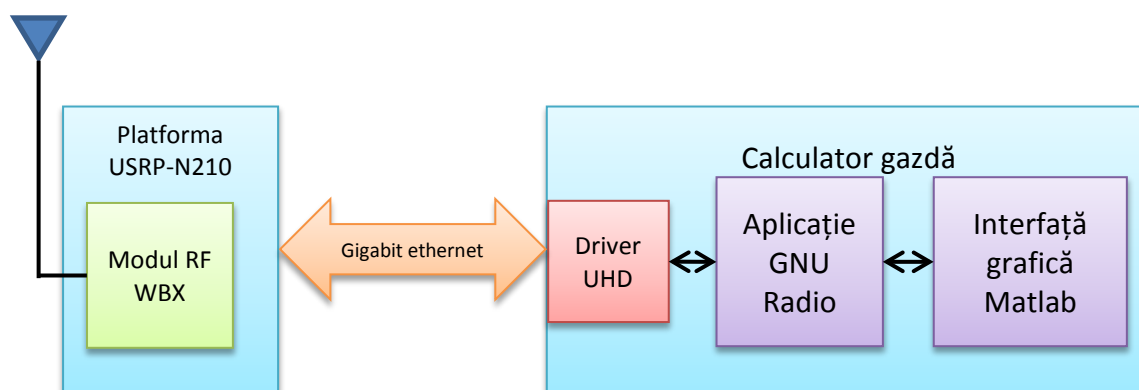


Fig. 7.1 - Schema de principiu folosită pentru implementarea unui nod de detecție spectrală

Pentru achiziția semnalului de radiofrecvență a fost conectată o antenă de bandă largă de tip *discone* (Sirio SD-3000N) la intrarea RF2 a modului USRP-N210. Antena prezintă o caracteristică omnidirecțională în plan orizontal în cazul unei montări verticale și este utilizată în mod uzual pentru aplicații de monitorizare spectrală, fiind capabilă să acopere o bandă de frecvență de la 300 MHz până la 3 GHz.

Modulul de radiofrecvență folosit în cadrul platformei USRP a fost modulul WBX (50 MHz – 2,2 GHz), ale cărui caracteristici au fost prezentate în capitolul anterior. Folosind o schemă cu conversie directă, în cadrul modului de radiofrecvență se realizează translatarea semnalului de radiofrecvență recepționat direct în banda de bază sau pe o frecvență intermediară cu o valoare extrem de scăzută, detalii legate de alegerea valorii pentru această frecvență fiind prezentate ulterior în cadrul subcapitolului 5.4.

Semnalul astfel obținut este transformat din domeniul analogic în domeniul digital prin intermediul unui convertor analogic-digital de mare viteză (Texas Instruments ADS62P44, Dual 100Msps, 14 biți), situat pe placa de bază a modului USRP-N210.

Pentru a aduce semnalul în banda de bază și a realiza o adaptare a ratei de eșantionare astfel încât semnalul să poată fi transmis prin interfața gigabit ethernet către calculatorul gazdă, în circuitul FPGA (Xilinx Spartan 3A-DSP) este implementat un bloc de conversie a frecvenței care realizează operațiile descrise anterior. Detalii legate de adaptarea ratei de eșantionare sunt prezentate în subcapitolul 5.3, iar o schemă bloc și detalii legate de implementarea blocului DDC sunt prezentate ulterior în subcapitolul 7.5.

Semnalul furnizat de blocul DDC este împachetat ulterior folosind driverul UHD în pachete folosind protocoalele UDP și IP, această operație fiind, de asemenea, efectuată în cadrul circuitului FPGA de pe placa de bază a modului USRP. Pachetele astfel obținute sunt transmise prin interfața gigabit ethernet către calculatorul gazdă pentru a fi prelucrate ulterior în vederea determinării gradului de ocupare spectrală.

Calculatorul gazdă folosit în cadrul aplicației rulează sistemul de operare Linux (Ubuntu 12.04, 32-biți) și prin intermediul driverului UHD va recepționa pachetele furnizate de modulul USRP și recepționate prin interfața gigabit ethernet.

Schema bloc a aplicației de detecție spectrală care este descrisă detaliat în paragrafele următoare este prezentată în figura 7.2.

Aplicația presupune folosirea metodei de detecție de energie pentru a analiza datele furnizate de USRP.

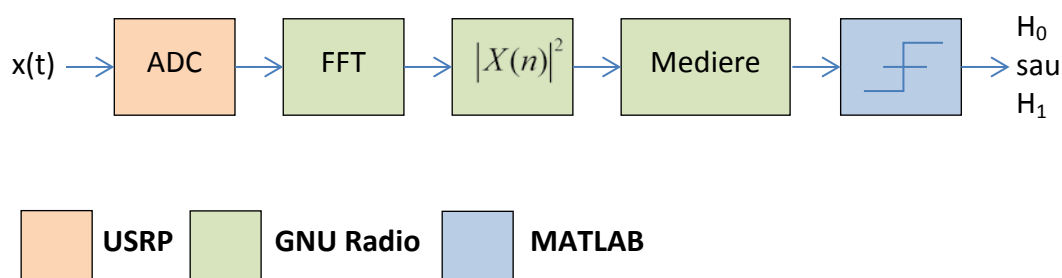


Fig. 7.2 - Schema bloc a unui detector folosind metoda detecției de energie și modalitatea de implementare în cadrul aplicației prezentate

În cadrul modului USRP se realizează translatarea semnalului de radiofrecvență în banda de bază și conversia semnalului din domeniul analogic în domeniul digital. Semnalul astfel obținut este prelucrat prin intermediul unei aplicații GNU Radio, descrisă în detaliu în paragraful următor, iar calculul gradului de acoperire spectrală și prezentarea rezultatelor obținute sunt realizate cu ajutorul unei interfețe grafice MATLAB, descrisă detaliat în paragraful 7.3.

7.2 APLICAȚIA GNU RADIO FOLOSITĂ PENTRU ACHIZIȚIA DATELOR

Aplicația GNU Radio folosește datele furnizate de USRP și recepționate prin intermediul driverului UHD cu scopul de a oferi informații despre spectrul de radiofrecvență pentru o bandă de frecvență specificată de utilizator. Având în vedere că, după cum a fost discutat în capitolul 6, interfața dintre USRP și calculator limitează lățimea de bandă maximă a semnalului analizat la 25 MHz (I și Q), rezultă că dacă se dorește analiza unei benzi mai largi de frecvență acesta trebuie segmentat în intervale de maxim 25 MHz.

În figura 7.3 este prezentată structura aplicației GNU Radio utilizată pentru achiziția datelor, fiind menționate obiectele care intervin pe parcursul lanțului de procesare a semnalului.

La baza aplicației a stat scriptul *usrp_spectrum_sense.py*, disponibil în cadrul programelor utilitare furnizate la instalarea mediului GNU Radio.

Driverul UHD furnizează fluxul de date în format serial prin intermediul obiectului *uhd.usrp_source*, obiect care permite configurarea modului USRP, stabilind valorile unor parametri esențiali pentru realizarea capturii, cum ar fi:

- Rata de eșantionare;
- Frecvența centrală de acord;
- Câștigul pentru lanțul de recepție;
- Antena selecționată pentru recepție.

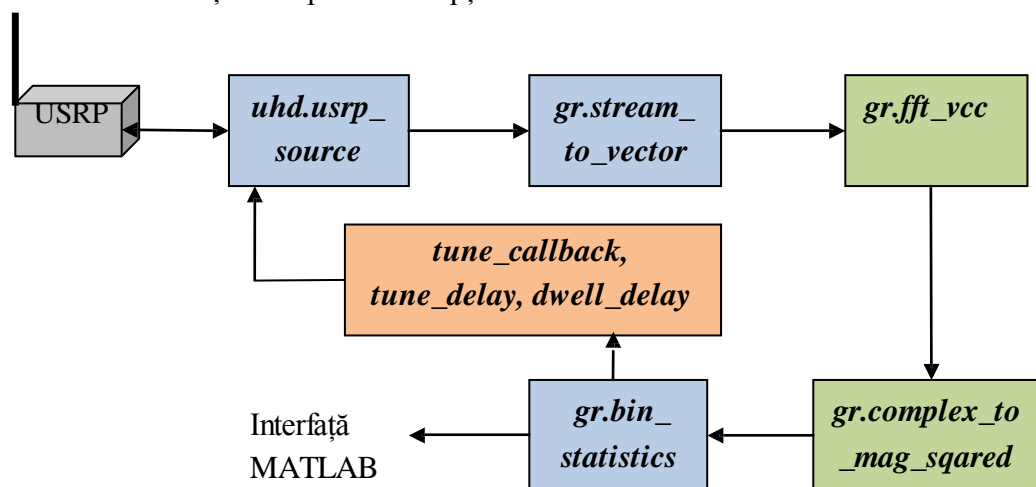


Fig. 7.3 - Structura aplicației GNU Radio folosită pentru captura și prelucrarea semnalului de radiofrecvență

Având în vedere că datele furnizate vor fi prelucrate folosind transformata Fourier rapidă (FFT), este necesară crearea unor vectori care să conțină eșantioanele semnalului, vectori a căror lungime trebuie să fie egală cu dimensiunea aleasă pentru FFT (în cazul interfeței MATLAB care va fi prezentată în paragraful următor, dimensiunea implicită care a fost aleasă pentru FFT este de 2048 puncte). Obiectul care realizează conversia fluxului de date de intrare în vectori de valori complexe este *gr.stream_to_vector*.

Următorul obiect din lanțul de procesare de semnal este *gr.fft_vcc*, obiect prin intermediul căruia este extrasă din vectorul de eșantioane ale semnalului în domeniul timp informația referitoare la spectrul de frecvență al acestuia. Pentru implementarea transformatei Fourier rapide în GNU Radio a fost folosită librăria C FFTW (Fastest Fourier Transform in the West) [33], dezvoltată de un grup de cercetători de la Massachusetts Institute of Technology (MIT). Avantajele oferite de FFTW, cea mai rapidă soluție gratuită de calcul pentru transformata Fourier rapidă, sunt legate de capacitatea de a își optimiza rutinele de calcul în mod automat în funcție de platforma hardware pe care rulează, obținându-se astfel performanțe deosebite pe o varietate foarte largă de arhitecturi hardware. Pentru a minimiza efectele de scurgere spectrală la realizarea transformatei Fourier semnalul este prelucrat folosind o fereastră de tip Blackman-Harris.

Pentru a determina amplitudinea semnalului obținut la ieșirea blocului FFT este folosit obiectul *gr.complex_to_mag_squared*, obiect prin intermediul căruia este obținut modulul pătrat pentru fiecare dintre elementele complexe ale vectorului aplicat la intrare.

Obiectul *gr.bin_statistics* are rolul de a colecta rezultatele furnizate de blocul menționat anterior și de a stoca aceste rezultate în vederea prelucrării lor ulterioare în aplicații

externe mediului GNU Radio. În cazul aplicație descrise în teză, stocarea datelor este realizată într-un fișier text, fișier care conține un vector de valori reale a cărui lungime variază în funcție de parametri care vor fi discutați în paragraful următor.

În vederea obținerii unor valori corecte pentru semnalele analizate, în cadrul acestui bloc sunt folosite două intervale de timp de întârziere, *tune_delay* și *dwell_delay*. Intervalul de timp *tune_delay* reprezintă intervalul de timp în care valorile obținute la ieșire vor fi ignorate după schimbarea frecvenței centrale de acord a platformei USRP. Acest interval de timp de întârziere este necesar pentru ca diferitele circuite situate pe parcursul lanțului de recepție, cum ar fi circuitele de tip PLL, să intre într-un regim de funcționare stabil. Intervalul de timp *dwell_delay* reprezintă intervalul cât modulul USRP va rămâne acordat pe o anumită frecvență înainte de a fi re acordat.

În momentul în care intervalul de timp *dwell_delay* este scurs, obiectul *gr.bin_statistics* trimite o comandă *tune_callback* pentru a reaccorda modulul USRP pe următoarea frecvență.

Pentru realizarea operațiilor aritmetice a fost folosită librăria NumPy (Numerical Python) [34], avantajele oferite fiind o viteză de execuție sporită la operațiile asupra vectorilor și matricelor de dimensiuni mari, precum și în cazul calculelor logaritmice.

Pentru a permite o monitorizare continuă a spectrului, rutina principală a aplicației este conținută într-o buclă infinită. Lățimea de bandă maximă care poate fi capturată într-o singură iterație este dată de:

$$B_{\max} = 0.8 * 100 / R_{dec} \quad (7.1)$$

Această valoare este obținută pornind de la frecvența de 100 de MHz la care operează convertor analogic digital de pe placa de bază a modulului USRP, divizată la rata de decimare folosită în cadrul circuitului FPGA. Având în vedere caracteristica filtrelor cu care este realizată decimarea, care nu este perfect plată în cadrul benzii de interes, va fi folosit doar un procent de 80% din această bandă, marginile de câte 10% în fiecare parte fiind ignorate. Detalii legate de caracteristicile filtrelor cu care este realizată decimare sunt prezentate în cadrul paragrafului 5.5.

Dacă banda care se dorește a fi monitorizată are o lățime de bandă mai mare decât B_{\max} , atunci monitorizarea va fi făcută concatenând informațiile obținute secvențial folosind mai multe benzi de frecvență adiacente, de lățime egală cu B_{\max} . Pentru a reduce probabilitatea de alarmă falsă, captura semnalului pentru întreaga bandă de frecvență este realizată de N_{baleieri} ori, rezultatul final reprezentând o mediere a acestor măsurători.

Un exemplu concret pentru cazul în care banda care se dorește a fi monitorizată este banda 900 MHz – 1 GHz și rata de decimare este egală cu 8 este:

$$N_{\text{subbenzi}} = B_{\text{totala}} / B_{\max} = B_{\text{totala}} / 0,8 * 100 / R_{dec} = 10 \quad (7.2)$$

deci pentru acoperirea întregii benzi este necesară împărțirea în 10 subbenzi.

7.3 INTERFAȚA GRAFICĂ MATLAB

Pentru calculul gradului de ocupare spectrală și pentru afișarea informațiilor către utilizator, rezultatele furnizate de aplicația GNU Radio au fost utilizate folosind mediul MATLAB.

În figura 7.4 este prezentată o captură a interfeței grafice MATLAB folosită pentru afișarea informațiilor furnizate de modulul USRP-N210.

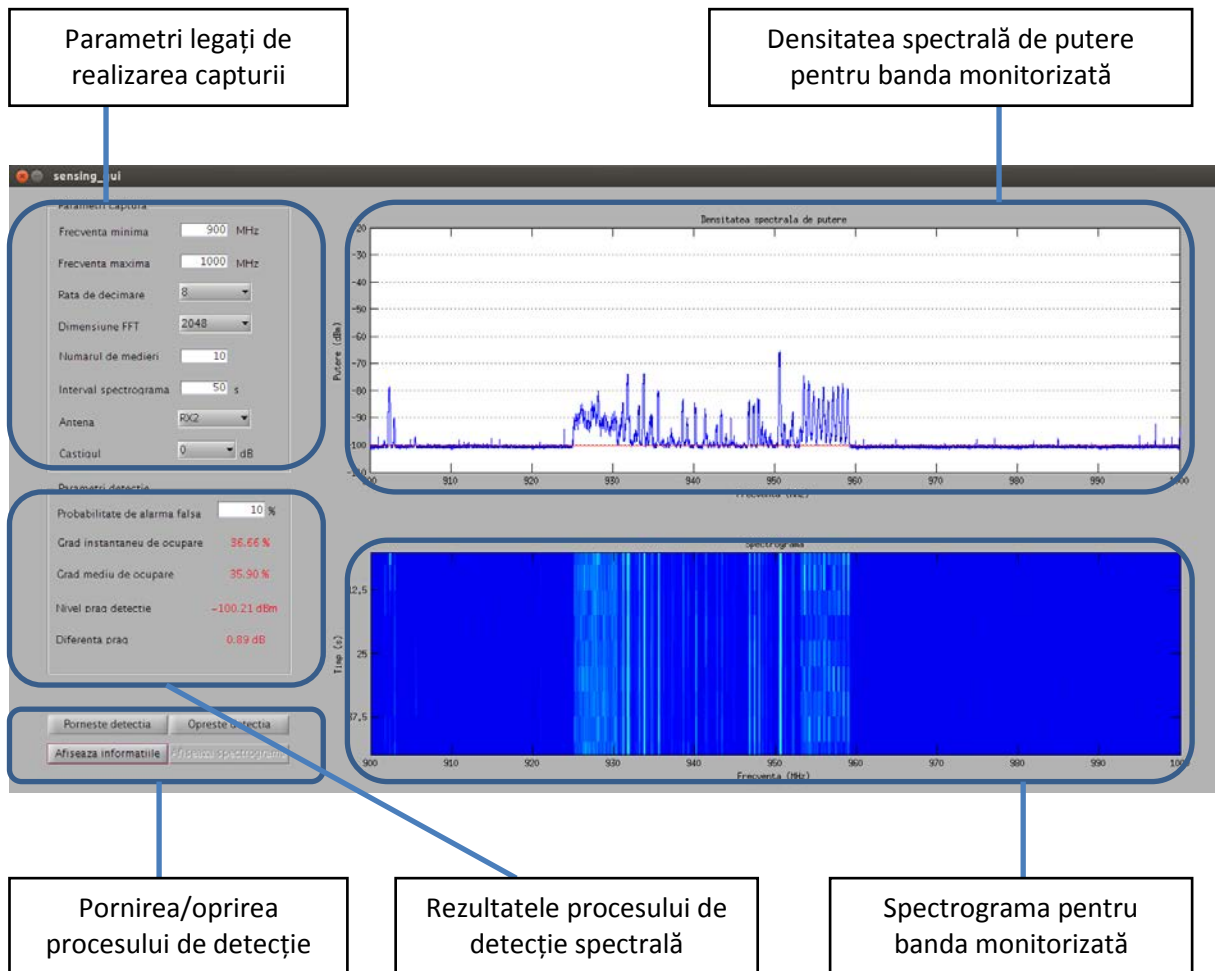


Fig. 7.4 - Interfața grafică MATLAB pentru vizualizarea informațiilor furnizate de modulul USRP-N210

În partea stângă a ferestrei se regăesc două grupuri de informații, unul care conține parametri legați de realizarea capturii, care pot fi introduși de către utilizator, și unul care conține parametri legați de procesul de detecție spectrală obținuți în urma calculelor efectuate asupra datelor primite de la aplicația GNU Radio.

Parametrii legați de captura semnalului, care urmează a fi comunicați aplicației GNU Radio și mai departe modulului USRP, sunt:

- *Frecvența minimă și frecvența maximă*; reprezintă capetele intervalului de frecvență care se dorește a fi monitorizat. În cazul folosirii modulului de radiofrecvență WBX, frecvența minimă trebuie să fie mai mare de 50 MHz, iar frecvența maximă trebuie să fie cel mult 2,2 GHz;
- *Câștigul*, reprezintă valoarea câștigului în decibeli setată pentru ramura de recepție din cadrul modulului de radiofrecvență WBX. Valorile care pot fi alese variază între 0 dB și 38 dB, valoarea implicită fiind de 0 dB;

- *Antena*, reprezintă portul din cadrul modulului de radiofrecvență WBX care este folosit pentru conectarea antenei de recepție. Ambele porturi din cadrul modulului WBX, RX2, respectiv TX/RX pot fi folosite ca porturi de recepție, valoarea implicită fiind portul RX2;
- *Rata de decimare*, valoare care este transmisă modulului USRP și stabilește cu cât va fi decimat în cadrul circuitului FPGA de pe placa de bază a modulului semnalul provenit de la ADC. Valorile care pot fi alese pentru rata de decimare sunt de minim 4 și de maxim 10, valoarea implicită fiind de 8;
- *Dimensiunea FFT*, reprezintă numărul de puncte în care va fi calculată transformata Fourier în cadrul aplicației GNU Radio, stabilind implicit și rezoluția în frecvență. Valorile care pot fi alese sunt de minim 128 și de maxim 2048, valoarea implicită fiind de 2048;
- *Numărul de capturi* mediate pentru calculul densității spectrale de putere, reprezintă numărul de măsurători care vor fi efectuate în cadrul aplicației GNU Radio pentru întreaga bandă de frecvență specificată;
- *Intervalul de timp folosit pentru afișarea spectrogramei*, reprezintă intervalul de timp dorit pentru afișată spectrograma pentru banda de frecvență specificată.

În momentul în care utilizatorul a fixat toți parametrii legați de captură la valorile dorite, prin apăsarea butonului *Pornește detecția* este declanșată captura prin apelarea aplicației GNU Radio folosind comanda Unix:

```
./detectie.py -s %fe6 -N %d -L %de6 -F %d %dM %dM
```

Odată cu rularea aplicației GNU Radio, aceasta va furniza periodic informațiile legate de spectrul semnalului solicitat prin generarea unui fișier text *Y_dB.txt* care conține un vector a cărui lungime poate fi calculată ca:

$$\lfloor N_{FFT} * 0,8 * N_{subbenzi} \rfloor \quad (7.3)$$

Aplicația GNU Radio semnaleză interfeței grafice MATLAB existența unor rezultate prin generarea unui al doilea fișier *text flag.txt*, fișier șters de aplicația MATLAB după preluarea datelor.

Utilizatorul are posibilitatea de a introduce valoarea probabilității de alarmă falsă impusă în momentul determinării gradului de ocupare spectrală.

Rezultatele procesului de detecția spectrală care sunt afișate în partea de stânga jos a interfeței grafice sunt:

- *Gradul instantaneu de ocupare spectrală*, reprezintă procentajul din banda de frecvență monitorizată în care au fost sesizate semnale active;
- *Gradul mediu de ocupare spectrală*, reprezintă valoare medie a gradului de ocupare spectrală, măsurată din momentul în care procesul de detecție a fost declanșat;
- *Nivelul pragului de detecție*, reprezintă nivelul în dBm la care a fost fixat pragul de detecție pe baza căruia a fost estimat gradul de ocupare spectrală. Valoarea pragului este influențată atât de valoarea semnalelor recepționate, cât și de valoarea probabilității de alarmă falsă, impusă de utilizator;
- *Valoarea diferenței de prag*, reprezintă diferența în dB între nivelul pragului de detecție și nivelul mediu al zgomotului pentru banda de frecvență monitorizată.

7.4 ELIMINAREA SEMNALELOR PARAZITE INTRODUSE DE MODULUL DE RADIOFRECVENȚĂ

Alegerea unei arhitecturi de conversie directă pentru modulele de radiofrecvență oferă avantajul unei flexibilități sporite, importantă în cazul sistemelor reconfigurabile cum sunt cele SDR. Cu toate acestea, există și dezavantaje introduse de acest tip de schemă, unul dintre cele mai importante fiind reprezentat de apariția unei componente continue parazite, datorată scurgerii semnalului din oscilatorul local prezent în cadrul modulului de radiofrecvență și implicit mixarea acestui semnal parazit ajuns la intrarea receptorului cu un semnal pe aceeași frecvență.

În figura 7.5 a) se poate observa acest efect nedorit în jurul fiecăreia dintre cele zece frecvențe pe care a fost acordat receptorul pentru a obține banda de frecvență 900 MHz – 1 GHz (905 MHz, 915 MHz, etc.), pentru cazul în care pentru oscilatorul local din cadrul modulului WBX nu este folosit un offset de frecvență.

Aceste componente nedorite pot fi eliminate prin intermediul modului avansat de acord disponibil în cadrul platformei USRP.

În cadrul modulului USRP există două etaje cu ajutorul cărora este realizat acordul, după cum urmează:

- Mixerul existent în circuitul de demodulare (ADL5387) din cadrul modului de radiofrecvență WBX, care realizează translatarea semnalului din domeniul de radiofrecvență pe o frecvență intermediară;
- Un al doilea mixer implementat în cadrul circuitului FPGA situat pe placa de bază a modulului USRP, care realizează translatarea semnalului de pe frecvența intermediară în banda de bază.

În mod uzual, utilizatorul specifică doar frecvența centrală care urmează a fi recepționată, folosind funcția *set_rx_freq(valoarea_frecvenței_în_hz)*. Modulul de radiofrecvență va fi acordat în acest caz cât mai aproape posibil de frecvența specificată, rămânând ca mixerul din cadrul circuitului FPGA să corecteze eventuala eroare de acord a mixerului din cadrul modulului de radiofrecvență.

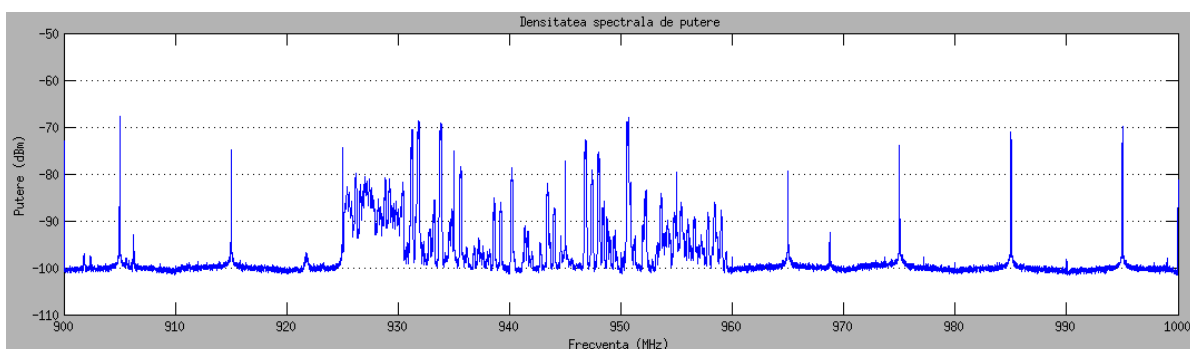
Pentru a evita apariția componentelor continue parazite poate fi folosit modul avansat de acord, care presupune apelarea funcției *set_rx_freq* folosind ca argument parametrul *tune_request_t(valoarea_frecvenței_în_hz, valoarea_offsetului_ol)*, parametru care permite atât specificarea frecvenței de acord, cât și specificarea unui offset de frecvență pentru oscilatorul local din cadrul modulului de RF. Prin stabilirea unei valori convenabile pentru acest offset se poate transla componenta continuă parazită în afara benzii de interes.

Un exemplu de situație întâlnită în cazul aplicației de detecție spectrală prezentată în cadrul paragrafelor anterioare, este cea în care este folosită o rată de decimare egală cu 8, rezultând o bandă recepționată de 12,5 MHz. Având în vedere că banda utilă folosită este egală cu doar 80% din banda recepționată, deci 10 MHz, rezultă că orice valoare a offset-ului de frecvență de peste 5 MHz va transla componentele perturbatoare în afara benzii utile.

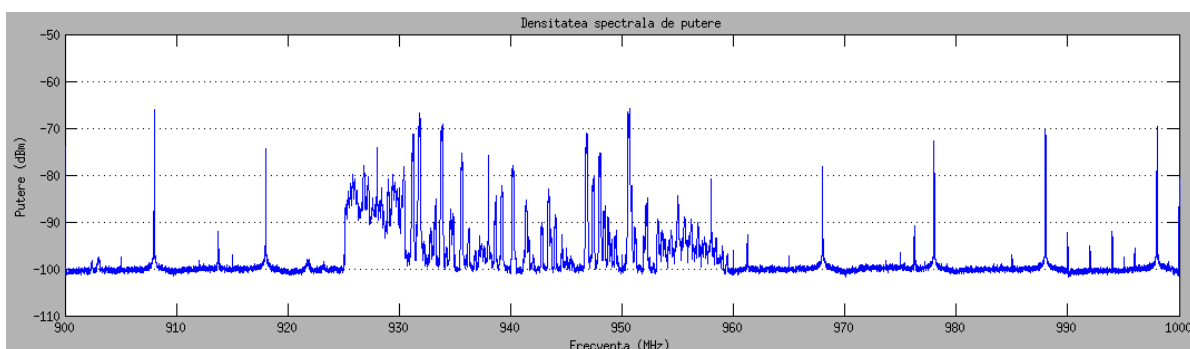
În figura 7.5 b) se observă efectul asupra benzii de frecvență monitorizate pentru cazul în care pentru offset-ul de frecvență al oscilatorului local a fost aleasă o valoare de 3 MHz, mai mică decât limita de 5 MHz. Se observă o translatare a componentelor nedorite față de poziția centrală pe care erau plasate în cazul unei valori zero a offset-ului, însă ele sunt în

continuare vizibile și influențează gradul de ocupare spectrală calculat pentru banda monitorizată.

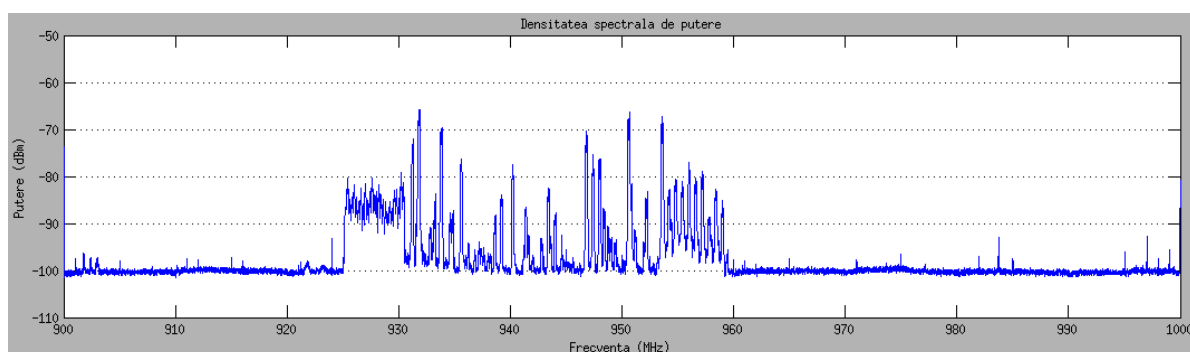
În figura 7.5 c) este prezentată aceeași bandă de frecvență (900 MHz – 1 GHz) pentru cazul în care pentru offset-ul de frecvență al oscilatorului local a fost folosită o valoare de 6 MHz, mai mare decât limita de 5 MHz calculată anterior. Se observă dispariția componentelor perturbatoare datorită translatării acestora în afara benzii de interes.



a)



b)



c)

Fig 7.5 - Banda de frecvență 900 MHz – 1 GHz recepționată folosind trei valori diferite ale offset-ului pentru oscilatorul local: a) 0 MHz ; b) 3 MHz ; c) 6 MHz

În cazul aplicației de detecție spectrală prezentată în paragrafele anterioare, valoarea offset-ului de frecvență folosit pentru oscilatorul local din cadrul modulului de radiofrecvență a fost reglată automat în funcție de valoarea aleasă pentru rata de decimare, folosind relația de calcul:

$$f_{offset_LO} = \lfloor (100 * 0,4 / R_{dec}) + 1 \rfloor MHz \quad (7.4)$$

7.5 ALEGEREA RATEI DE DECIMARE

Pentru aplicația de detecție spectrală care este urmărită în cadrul tezei, alegerea ratei de decimare prezintă o importanță deosebită datorită structurii blocului DDC, implementat în circuitul FPGA din cadrul plăcii de bază a modulului USRP N210.

Semnalul complex provenit de la convertorul analog-digital și eșantionat la o rată de 100 Msps este aplicat la intrarea unui multiplicator complex, necesar în eventualitatea în care există eventuale erori de frecvență datorate sintetizorului PLL folosit în cadrul modulului de radiofrecvență. Ulterior, pentru fiecare dintre cele două ramuri (I și Q) semnalul este aplicat unei succesiuni de trei filtre prin intermediul cărora este realizată decimarea efectivă, un filtru decimator de tip CIC (care poate decima cu rate de decimare între 1 și 128) și două filtre de tip HB (fiecare dintre ele realizând o decimare cu o rată egală cu 2).

Cu toate că rata totală de decimare poate varia între 4 și 512 din considerentele prezentate anterior, există trei situații distincte în funcție de valoarea aleasă pentru această rată, după cum urmează:

- Dacă valoarea aleasă pentru rata de decimare este un număr întreg impar, atunci decimarea este realizată numai prin intermediul filtrului CIC. Având în vedere gama de variație a ratei de decimare pentru filtrul CIC, rezultă că cea mai mare rată de decimare impară care poate fi folosită este de 127;

- Dacă valoarea aleasă pentru rata de decimare este un număr întreg multiplu de 2, atunci decimarea este realizată prin intermediul filtrului CIC și a filtrului HB1. În această situație, cea mai mare rată de decimare care poate fi obținută este de $128 \times 2 = 256$;

- Dacă valoarea aleasă pentru rata de decimare este un număr întreg multiplu de 4, atunci decimarea este realizată prin intermediul filtrului CIC și a celorlalte 2 filtre HB1 și HB2. În această situație, cea mai mare rată de decimare care poate fi obținută este de $128 \times 2 \times 2 = 512$.

În figura 7.6 sunt prezentate capturi cu spectrul de frecvență recepționat pentru intervalul de frecvență 900 MHz – 1 GHz, pentru trei rate de decimare, de la 6 până la 8.

Se poate observa că în cazul ratei de decimare multiplu de 4 (8, figura 7.6 c)) caracteristica recepționată este cel mai puțin deformată, iar situația cea mai defavorabilă este întâlnită în cazul ratei de decimare impară (7, figura 7.6 b)), caz în care datorită caracteristicii filtrului CIC deformarea suferită este evidentă.

Acest fenomen poate fi explicat prin prisma faptului că în circuitul blocului DDC nu este prevăzut nici un filtru de compensare a caracteristicii filtrului CIC. Având în vedere acest aspect, alegerea unei rate de decimare impare pentru aplicații de detecție spectrală este contraindicată, spectrul recepționat în acest caz în banda de interes prezentând variații inacceptabile.

Având în vedere aspectele discutate mai sus, pentru aplicația de detecție spectrală prezentată anterior este indicată alegerea unei rate de decimare egală cu un multiplu de 4, cele două valori care asigură o lățime de bandă maximă fiind 4, respectiv 8.

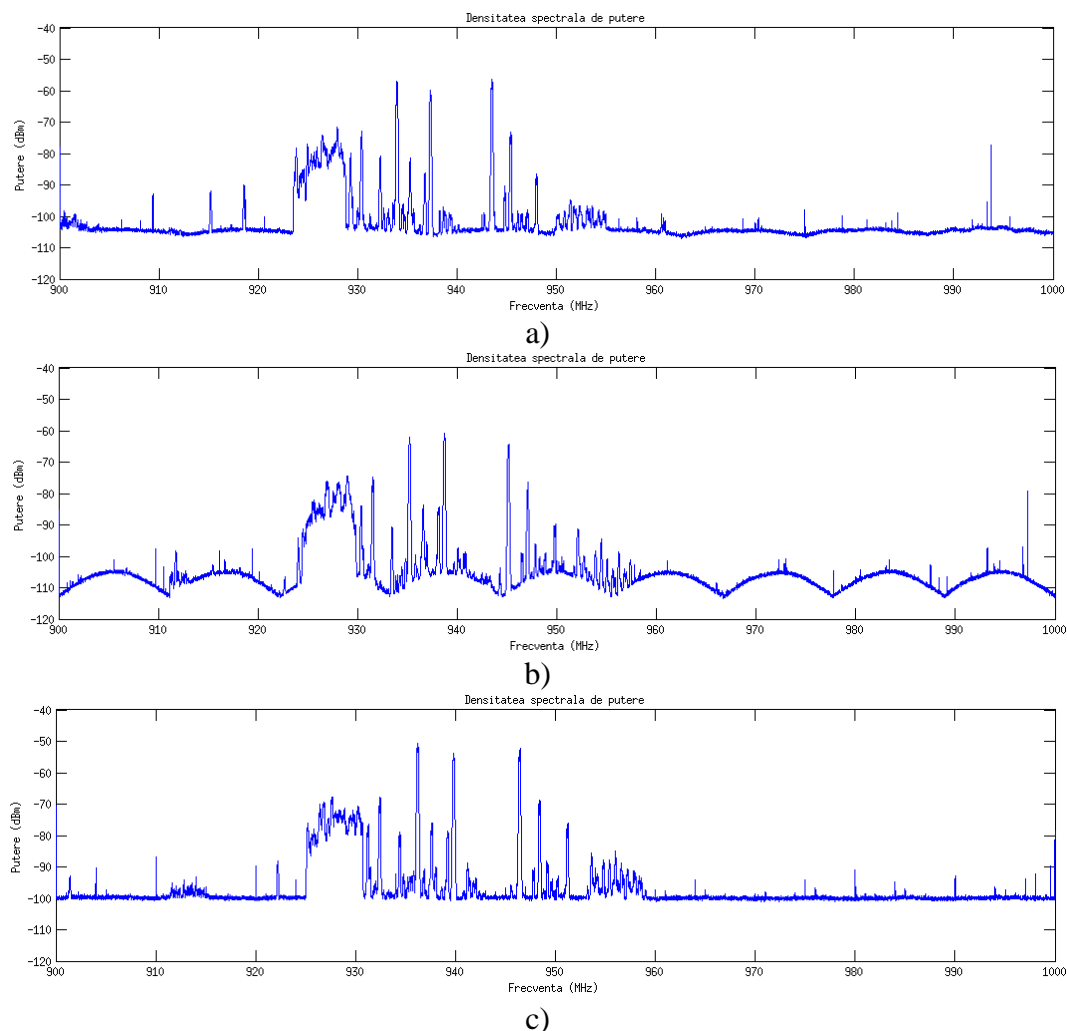


Fig. 7.6 - Banda de frecvență 900 MHz – 1 GHz, recepționată pentru diferite rate de decimare folosite: a) 6 ; b) 7 ; c) 8.

7.6 CONCLUZII

Pentru implementarea unui nod de detecție spectrală, modulul USRP-N210 a fost echipat cu modulul de radiofrecvență WBX, care permite acoperirea unei benzi de frecvență între 50 de MHz și 2,2 GHz. La intrarea RF2 a modului WBX a fost conectată o antenă de bandă largă de tip discone (Sirio SD-300N), iar modulul USRP a fost conectat prin intermediul interfeței gigabit ethernet la un calculator gazdă rulând sistemul de operare Linux.

Fluxul de date provenit de la USRP este preluat de calculator prin intermediul driverului UHD și este furnizat unei aplicații GNU Radio care are rolul de a realiza prelucrarea semnalului în vederea estimării gradului de ocupare spectrală folosind metoda detecției de energie. Având în vedere că lățimea maximă de bandă care poate fi transmisă prin interfața USRP-calculator este de 25 MHz, din care doar 80% este utilizată pentru a evita efectele de deformare spectrală introduse în cadrul prelucrărilor realizate în cadrul modului USRP, dacă se dorește monitorizarea unei zone mai largi de spectru aplicația GNU Radio va concatena mai multe sub-benzi de frecvență adiacente pentru a obține întreaga bandă.

Datele prelucrate de aplicația GNU Radio sunt furnizate unei aplicații MATLAB care determină gradul de ocupare spectrală și asigură prin intermediul unei interfețe grafice prezentarea informațiilor către utilizator.

8. CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI PERSPECTIVE DE CONTINUARE A CERCETĂRII

8.1 CONCLUZII GENERALE

În cadrul tezei de doctorat a fost tratată problema folosirii eficiente a spectrului de radiofrecvență, cu accent pe tehnologia radio cognitiv și beneficiile pe care accesul dinamic la spectru le-ar putea aduce în acest domeniu. Procesul de detecție spectrală, element necesar în vederea accesului la benzi de frecvență nefolosite de sistemele de comunicații licențiate, este discutat în detaliu, fiind prezentate din punct de vedere teoretic diferite metode de detecție, precum și rezultate experimentale.

În cadrul primului capitol au fost expuse motivele care au dus la apariția echipamentelor radio reconfigurabile și au fost trecute în revistă proiectele care au avut ca scop dezvoltarea de echipamente radio definite prin software (SDR). A fost prezentată arhitectura generică a unui astfel de echipament, atât din punct de vedere hardware, cât și din punct de vedere software. Având în vedere complexitatea sporită a sistemelor moderne de comunicații, cerințele impuse unui echipament de tip SDR conduc la necesitatea folosirii unui număr însemnat de resurse de calcul, în finalul capitolului fiind discutată problema alocării acestor resurse în cadrul unei astfel de platforme.

În capitolul 2 a fost definită noțiunea de echipament radio cognitiv (CR), acest tip de echipamente fiind capabile să se reconfigureze în mod automat în vederea optimizării parametrilor de comunicație. Este prezentată o arhitectură generică a unui astfel de echipament și fost schițată evoluția echipamentelor CR, punându-se accentul pe exemple concrete de astfel de platforme dezvoltate până în prezent în diverse centre de cercetare din domeniul academic și din industrie. A fost realizată, de asemenea, o sinteză a standardelor în care sunt înglobate elemente specifice tehnologiei radio cognitiv, cu accentul pus pe procesul de detecție spectrală, care va fi detaliat în următorul capitol. În final sunt prezentate o serie de aplicații din diverse domenii de activitate în care astfel de echipamente ar putea fi utilizate.

Diferitele metode de detecție spectrală au fost analizate pe larg în cadrul capitolului 3. Pentru fiecare dintre metodele enumerate au fost detaliate: elementele teoretice care stau la baza respectivei metode, o schemă de principiu a unui detector bazat pe respectiva metodă, precum și avantajele și dezavantajele metodei. Pentru metoda detecției de energie au fost discutați și parametrii de performanță pentru cazul unui canal afectat de zgomot aditiv gaussian alb și pentru cazul canalelor afectate de fading. În cazul metodei de detecție pe baza caracteristicilor de ciclostacionaritate au fost implementate diferite variante de detecție și au fost realizate simulări care să evidențieze proprietățile distincte ale diferitelor tipuri de semnale modulate (BPSK, QPSK, MSK), precum și comportarea detectorului în condiții de raport semnal-zgomot scăzut. În finalul capitolului au fost discutate metode mixte de detecție, care încearcă să profite de avantajele oferite de mai multe metode clasice, pentru a oferi performanțe superioare, necesitând în același timp un număr redus de resurse de calcul.

Pe parcursul capitolului 4 au fost prezentate rezultatele unor campanii de măsurători efectuate de autor în vederea evaluării gradului de ocupare a spectrului de radiofrecvență în România, folosind metoda detecției de energie. Măsurătorile au fost realizate atât într-un mediu urban (București), cât și într-un mediu rural (Măneciu), pentru intervale de timp de 48

ore, atât în zile lucrătoare, cât și în zile de sfârșit de săptămână. A fost descrisă configurația de măsură folosită, precum și metodologia utilizată pentru obținerea rezultatelor, acestea fiind analizate din perspectiva utilizării spectrului disponibil de către echipamente radio cognitiv. Pentru determinarea nivelului de zgomot a fost folosit o metodă originală, care permite o evaluare dinamică a acestuia în scopul îmbunătățirii performanțelor procesului de detecție. Gradul de ocupare a spectrului de radiofrecvență este evaluat atât din punct de vedere numeric, cât și grafic folosind diferite metrici relevante. Sunt prezentate, de asemenea, rezultate obținute de diferite alte campanii de măsurători realizate în diverse zone geografice. S-a ajuns la concluzia că gradul de ocupare al spectrului este extrem de redus în condițiile folosirii unei abordări clasice (statice) de alocare a spectrului, atât în zone urbane (valoare medie de 21%) cât și în zone rurale (valoare medie 14,19%). În aceste condiții, o alocare dinamică a spectrului propusă în cadrul tehnologiei radio cognitiv ar putea crește semnificativ gradul de eficiență în folosirea acestei resurse fundamentale care este spectrul de radiofrecvență.

În capitolul 5 au fost trecute în revistă o serie de platforme SDR care au fost luate în considerare în momentul alegerii unei platforme pentru implementarea aplicației de detecție spectrală. Au fost analizate și prezentate avantajele și dezavantajele fiecărei variante din punctul de vedere al implementării aplicației menționate anterior, fiind realizat și un tabel comparativ cu caracteristicile acestora. Având în vedere alegerea unei platforme din familia USRP produsă de Ettus Research, este realizată o descriere detaliată a produselor din cele trei serii ale familiei. În final este justificată alegerea platformei USRP-N210 prin prisma satisfacerii criteriilor de performanță necesare pentru aplicația specificată.

O prezentare detaliată a platformei USRP-N210 din punct de vedere hardware și software a fost realizată în capitolul 6. Descrierea a fost efectuată la nivel de schemă bloc, fiind analizată arhitectura folosită pentru implementarea diferitelor elemente ale modulului și fiind enumerate diferitele posibilități de interconectare ale modulului. Au fost trecute în revistă diferitele module de radiofrecvență compatibile cu USRP-ul folosit, iar pentru modulele WBX și XCRV2450 au fost date detalii legate de arhitectură și performanțe. A fost prezentată modalitatea de prelucrare a semnalului recepționat în interiorul plăcii de bază din cadrul platformei, fiind specificate limitările introduse de interfața cu calculatorul gazdă. Având în vedere că un aspect deosebit de important în momentul alegerii unei anumite platforme de dezvoltare SDR este suportul existent din punctul de vedere software, a fost analizat în continuare suportul existent din acest punct de vedere pentru platforma USRP. A fost realizată o prezentare a mediului de dezvoltare GNU Radio, unul dintre cele mai populare instrumente disponibile pentru implementarea de soluții SDR. Au fost enumerate diferitele categorii de componente de procesare de semnal disponibile, a fost descrisă structura unui graf de semnal, precum și interfața grafică GNU Radio Companion (GRC). Au fost expuse, de asemenea, principalele caracteristici ale driverului universal USRP (UHD).

Pe parcursul capitolului 8 a fost realizată o descriere implementării a unui senzor de detecție spectrală cu ajutorul platformei USRP-N210. A fost prezentată o schemă de principiu a elementelor hardware și software care au fost folosite, fiind detaliată structura diferitelor module cu ajutorul cărora a fost construită aplicația. În cazul modulului GNU Radio folosit pentru captura și prelucrarea informațiilor legate de spectrul de radiofrecvență a fost prezentată o schemă logică și au fost enumerate blocurile necesare pentru obținerea datelor

necesare. În continuare a fost prezentată interfața grafică MATLAB utilizată pentru determinarea gradului de ocupare spectrală folosind metoda detecției de energie, precum și pentru afișarea rezultatelor obținute. În final au fost discutate aspecte legate de optimizarea implementării, cum ar fi eliminarea componentelor parazite introduse de modulul de radiofrecvență și alegerea unei valori optime pentru rata de decimare.

8.2 CONTRIBUȚII PERSONALE

1. O primă contribuție personală constă în realizarea în capitolul 2 a unei *sinteze amănunțite cu privire la diferitele standarde care includ elemente specifice tehnologiei radio cognitiv legate de accesul dinamic la spectru*, aspect care poate conduce la o îmbunătățire a eficienței de utilizare a spectrului de radiofrecvență. Au fost studiate atât standardele elaborate de diferite organizații atât din Europa, cât și din restul lumii, precum și numeroase lucrări de specialitate. Din fiecare standard au fost extrase cu precădere aspectele referitoare la procesul de detecție spectrală, subiect tratat în detaliu pe parcursul tezei, fiind evidențiate mecanismele propuse pentru detectarea benzilor de frecvențe nefolosite și pentru utilizarea acestora.

2. În capitolul 3 a fost realizată o *sinteză a metodelor de detecție spectrală care pot fi utilizate în vederea identificării benzilor de frecvență neutilizate și implicit a oportunităților pe care echipamente de tip radio cognitiv le pot avea pentru acces în spectrul de radiofrecvență*. Subiectul fiind unul de mare interes și actualitate, există în literatura de specialitate numeroase lucrări care îl tratează. În urma studiului unui număr însemnat de cărți și articole au putut fi trase concluzii legate de situațiile în care se pretează folosirea unei anumite metode particulare de detecție. A fost realizată și o *comparație între diferitele metode, fiind evidențiate avantajele și dezavantajele fiecărei metode*. Au fost, de asemenea, prezentate variante hibride de realizare a procesului de detecție spectrală, variante prin care pot fi aduse îmbunătățiri din punctul de vedere al performanțelor care pot fi obținute.

3. În vederea demonstrării performanțelor care pot fi obținute prin folosirea metodei de detecție pe baza caracteristicilor de ciclostacionaritate a fost realizată *testarea în mediul de simulare Matlab a unui număr de variante ale acestei metode*. Prin aplicarea la intrarea detectorului a diferitelor tipuri de semnale modulate (BPSK; QPSK; MSK) au fost evidențiate principalele avantaje pe care această metodă de detecție le aduce: posibilitatea de a diferenția pe parcursul procesului de detecție spectrală diferite tipuri de semnale în funcție de modulația folosită, precum și performanțele deosebite în situații în care raportul semnal-zgomot are valori scăzute. A fost, de asemenea, *implementată o metodă eficientă de calcul a funcției de corelație spectrală (FAM)*, metodă care datorită volumului redus de calcul permite folosirea unui astfel de detector și în cazul echipamentelor radio cognitiv în care este necesară o detecție spectrală în timp real.

4. A fost *studiat un număr însemnat (28) de campanii de măsurători efectuate în vederea evaluării gradului de ocupare a spectrului de radiofrecvență*, în capitolul 4 fiind realizată o *sinteză a rezultatelor obținute*. Concluzia este că alocarea statică a resurselor de frecvență este una extrem de ineficientă, gradul de ocupare spectrală fiind pentru cele mai multe benzi de frecvență și în cele mai multe zone geografice unul extrem de scăzut.

5. Autorul a desfășurat *două campanii proprii de măsurători*, pentru evaluarea gradului de ocupare a spectrului de radiofrecvență din România, în banda de frecvență 25 MHz – 3400 MHz. Măsurătorile au fost realizate într-un interval de timp de 48 de ore atât

într-un mediu urban (București), cât și într-un mediu rural (Măneciu), pentru a obține o imagine cât mai completă a fenomenului. Măsurătorile au fost efectuate folosind un analizor spectral de înaltă performanță și antene de bandă largă, datele capturate fiind prelucrate ulterior folosind mediul de calcul MATLAB, folosind metoda detecției de energie. Gradul mediu de ocupare spectrală pentru întreaga bandă de frecvență rezultat în urma măsurătorilor a fost unul extrem de scăzut, 21% pentru cazul mediului urban și doar 14,19% pentru cazul mediului rural. Au fost prezentate rezultatele sub formă grafică folosind mai multe metrice, fiind analizate diferențele obținute în funcție de perioada de timp analizată.

6. Un element deosebit de important în detecției spectrale folosind metoda detecției de energie îl reprezintă alegerea valorii pentru pragul de detecție, această alegere influențând în mod direct performanțele detectorului (valorile probabilității de detecție P_d și probabilității de alarmă falsă P_{fa}). În campaniile de măsurători menționate anterior a fost folosită o *metodă originală pentru determinarea în mod dinamic a nivelului de zgomot* prin folosirea unei ferestre glisante în domeniul frecvență. În acest mod este combătut unul dintre principalele dezavantaje ale acestei metode de detecție, și anume degradarea performanței datorită incertitudinii legate de determinarea exactă a nivelului de zgomot.

7. În vederea implementării unui senzor de detecție în timp real, autorul a analizat diferite variante de platforme de dezvoltare de tip radio definit prin software (SDR). În capitolul 5 a fost realizată o *comparație a diferitelor variante considerând multiple aspecte legate atât de performanță, cât și de suport din punct de vedere software, flexibilitate sau preț*. A fost stabilită o listă de criterii pe care o astfel de platformă este necesar să le îndeplinească în vederea folosirii acesteia pentru aplicația menționată anterior, concluzia trasă fiind că la momentul la care a fost luată decizia cea mai potrivită platformă pentru implementarea unui senzor de detecție spectrală a fost o platformă din familia USRP, produsă de firma Ettus Research, și anume USRP-N210.

8. *Implementarea unei aplicații GNU Radio pentru captarea și prelucrarea informațiilor legate de spectrul de radiofrecvență*. Având în vedere banda de frecvență limitată care poate fi transmisă între modulul USRP și calculator datorită capacității limitate a interfeței de rețea, în aplicație este divizată banda de frecvență care se dorește a fi monitorizată în mai multe sub-benzi care sunt ulterior concatenate. Este prezentată o schemă logică a aplicației și sunt descrise blocurile GNU Radio care au fost folosite.

9. *Implementarea unei aplicații MATLAB prin intermediul căreia a fost determinat în timp real gradul de ocupare a spectrului de radiofrecvență pentru o bandă de frecvență stabilită de către utilizator*. Aplicația permite utilizatorului să selecteze diferiți parametri de care depinde procesul de detecție, cum ar fi rata de decimare, câștigul global pe calea de recepție a modulului USRP, dimensiunea transformatei FFT folosită pentru captura informațiilor spectrale, numărul de medieri în domeniul timp folosite pentru determinarea gradului de ocupare spectrală. Informațiile procesului de detecție depind de probabilitatea de alarmă falsă impusă, valoare care poate fi, de asemenea, aleasă de către utilizator. Rezultatele procesului de detecție sunt prezentate și sub formă grafică, prin intermediul unei reprezentări a densității spectrale de putere instantanee a semnalului pentru banda de frecvență selectată, precum și prin intermediul unei spectrograme care prezintă evoluția în timp a nivelului de semnal pentru un interval de timp selectat de către utilizator.

10. A fost propus și implementat un *mecanism de sincronizare între aplicația GNU Radio și aplicația Matlab*, mecanism care permite obținerea unei latențe reduse a procesului de detecție.

11. Eliminarea semnalelor parazite introduse de către modul de radiofrecvență folosit (WBX). Datorită arhitecturii cu conversie directă folosită în acest modul, se constată apariția unei componente continue parazite, datorată scurgerii semnalului din oscilatorul local prezent în cadrul modulului de radiofrecvență. Autorul a propus o *soluție automată de rezolvare a acestui neajuns prin introducerea unui offset de frecvență a cărui valoare este ajustată în mod dinamic pe parcursul rulării aplicației*, în funcție de banda de frecvență care urmează a fi monitorizată și de rata de decimare aleasă.

12. A fost studiat *efectul pe care îl are alegerea unei anumite valori pentru rata de decimare* folosită în blocul de conversie al frecvenței din cadrul platformei USRP. A fost demonstrat că este esențială o alegere convenabilă a acestei rate, a fost implementată o structură similară celei existente în circuitul FPGA de pe placa de bază a modulului USRP folosind mediul de simulare MATLAB și au fost evidențiate efectele nedorite care apar pentru valori inconvenabile alese ale acestei rate.

8.3 PERSPECTIVE DE CONTINUARE A CERCETĂRII

- Folosirea modulului USRP pentru implementarea unei platforme de detecție spectrală care să combine mai multe metode de detecție spectrală, în vederea obținerii unor performanțe superioare, chiar și în condiții de raport semnal-zgomot scăzut.

- Implementarea unui sistem cooperativ de detecție spectrală folosind ca noduri de detecție mai multe module USRP. Prin colectarea și prelucrarea informațiilor provenite de la mai multe astfel de surse pe baza unor algoritmi de fuziune va fi posibilă creșterea performanțelor obținute în cadrul procesului de detecție.

- Campania de măsurători prezentată în capitolul 4 a fost limitată la doar 2 locații și la un interval de frecvență de până la 3400 MHz. Pentru obținerea unei imagini cât mai exactă asupra gradului de utilizare al spectrului de radiofrecvență, vor fi efectuate măsurători în locații cât mai diverse și pentru intervale de frecvență extinse până la 6 GHz. În cazul benzilor de frecvență ocupate în prezent prin emisiile posturilor de televiziune în format analogic, care conform unor directive europene vor trebui sistate în viitorul apropiat, va fi necesară o reevaluare a gradului de ocupare spectrală.

- În majoritatea standardelor care conțin elemente specifice tehnologiei radio cognitiv, în speță accesul dinamic la spectrul de radiofrecvență, este menționat un mecanism dual de detecție spectrală, folosind atât informații furnizate local de către echipament pe baza unei metode de detecție, cât și informații obținute prin accesul la o bază de date de geolocație. Construirea unei astfel de baze de date de geolocație cu informații legate de benzile de frecvență disponibile pentru zona orașului București este unul dintre obiectivele propuse.

- În referința [42] este prezentat un algoritm îmbunătățit pentru implementarea metodei detecției de energie, cu ajutorul căruia au fost obținute performanțe superioare față de cazul variantei clasice. Va fi avută în vedere adăugarea unor îmbunătățiri suplimentare, pentru creșterea performanțelor acestui algoritm.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] *P. Johnson*, “New Research Lab Leads to Unique Radio Receiver,” E-Systems Team, May 1985, Vol. 5, No. 4, pp 6-7.
- [2] *J. Mitola III*, “The Software Radio,” IEEE National Telesystems Conference, Digital Object Identifier 10.1109/NTC.1992.267870, 1992.
- [3] *J. Mitola III*, “Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications,” in Proc. IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications, pp. 3-10, 1999.
- [4] *B. Fette*, “Cognitive Radio Technology,” Second Edition, Academic Press, 2009.
- [5] *S. Haykin*, “Cognitive radio: brain-empowered wireless communications,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.23, no.2, pp. 201- 220, Feb 2005.
- [6] *A.M. Wyglinski, M. Nekovee, T. Hou*, “Cognitive Radio Communications and Networks,” Academic Press, 2009.
- [7] *H.Arslan*, “Cognitive Radio, Software Defined Radio and Adaptive Wireless Systems,” Springer, 2007.
- [8] “IEEE 802.22-2011 Standard for Cognitive Wireless Regional Area Networks (RAN) for Operation in TV Bands,” IEEE, July 2011.
- [9] “IEEE 802.11h, Amendment to Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Spectrum and Transmit Power Management extensions in the 5 GHz band in Europe,” IEEE Std 802.11h-2003, October 2003.
- [10] “IEEE 802.11a, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band, Supplement to IEEE 802.11 Standard,” September 1999.
- [11] “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Improved Coexistence Mechanisms for License-Exempt Operation,” IEEE Std 802.16h-2010 (Amendment to IEEE Std 802.16-2009), pp.1-223, July 2010.
- [12] IEEE DySPAN-SC: <http://www.dyspan-sc.org>.
- [13] Ecma/TC48-TG1/2009/129, Ecma/TC48/2009/061, “Final Draft Standard ECMA-392 — MAC and PHY for Operation in TV White Space,” ECMA, 2009: <http://www.ecmainternational.org/publications/files/drafts/tc48-2009-061.doc>.
- [14] “IEEE P802.11af/D1.02 Draft Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 3: TV White Spaces Operation U.S.,” June 2011.
- [15] *J. Mitola*, “Cognitive Radio Architecture: The Engineering Foundations of Radio XML,” John Wiley & Sons Ltd., 2006.
- [16] *J. Mitola III*, “Cognitive INFOSEC,” în Proceedings IEEE Int. Microwave Symp. Digest (MTT-S), vol. 2, Philadelphia, SUA, June 2003, pp. 1051–1054.

- [17] Y. Zhang, J. Zheng, H.-H. Chen, "Cognitive Radio Networks: Architectures, Protocols and Standards," CRC Press, 2010.
- [18] B. Fette,, "Cognitive Radio Technology," Second Edition, Academic Press, 2009.
- [19] K.C. Chen, R. Prasad, "Cognitive Radio Networks," John Wiley & Sons Ltd., 2009.
- [20] Z. Tian, G. Giannakis, "A Wavelet Approach to Wideband Spectrum Sensing for Cognitive Radios," în IEEE 1st Int. Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), pp. 1-5, 2006.
- [21] E.P.L. de Almeida, P.H.P. de Carvalho, P.A.B. Cordeiro, R.D. Vieira, "Experimental study of a Wavelet-based spectrum sensing technique, " 2008 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, pp.1552-1556, 26-29 October 2008.
- [22] W. A. Gardner, "The spectral correlation theory of cyclostationary time-series," Signal Processing, Volume 11, Issue 1, Pages 13-36, July 1986.
- [23] W. A. Gardner, "Statistical Spectral Analysis," Prentice-Hall, 1987.
- [24] W. A. Gardner, "Exploitation of spectral redundancy in cyclostationary signals," IEEE Signal Processing Magazine, vol.8, no.2, pp.14-36, April 1991.
- [25] Y. Zeng, Y.-C. Liang, "Maximum-Minimum Eigenvalue Detection for Cognitive Radio," IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications PIMRC 2007, pp.1-5, 3-7 September 2007.
- [26] P. Weili, W. Haiquan, S. Lei, "Covariance matrix based spectrum sensing for OFDM based cognitive radio," 2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAD), pp.1426-1430, 19-20 May 2012.
- [27] *Autoritatea Națională pentru Administrare și Reglementare în Comunicații*, "Tabelul Național de Atribuire a Benzilor de Frecvență, ediția 2009," disponibil online la: http://www.ancom.org.ro/uploads/links_files/TNABF_2009+modif-2010_2011.pdf, Februarie 2012.
- [28] *Electronic Communications Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT)*, "The European Table of Frequency Allocations and Utilisations," disponibil online la www.eroocdb.dk/Docs/doc98/official/pdf/ERCREP025.PDF, Februarie 2012.
- [29] *Familia de produse USRP*, disponibil online la: <https://www.ettus.com/product>, accesat în August 2012.
- [30] *Free Software Foundation, GNU Radio*, disponibil online la: <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki>, accesat în August 2012.
- [31] *Limbajul de programare Python*, disponibil online la: <http://python.org>, accesat în August 2012.
- [32] *Driverul UHD*, disponibil online la: <http://code.ettus.com/redmine/ettus/projects/uhd/wiki>, accesat în August 2012.
- [33] *Fastest Fourier Transform in the West (FFTW)*, disponibil online la: <http://www.fftw.org>, accesat în August 2012.
- [34] *Numerical Python package (NumPy)*, disponibil online la: <http://numpy.scipy.org>, accesat în August 2012.

- [PR1] *A. Marțian, I. Marcu, I. Marghescu*, “Analysis of Frequency Spectrum Usage from a Cognitive Radio Perspective” în Proc. 6th Advanced International Conference on Telecommunications, AICT 2010, ISBN 978-1-4244-6748-8, Barcelona, Spania, Mai 2010, pp 25-29.
- [PR2] *A. Marțian, C. Vlădeanu, I. Marcu, I. Marghescu*, “Evaluation of Spectrum Occupancy in an Urban Environment in a Cognitive Radio Context”, în International Journal On Advances in Telecommunications, ISSN 1942-2601, vol 3 nr 3&4, 2010, pp 172-181.
- [PR3] *A. Marțian, A. Achim, O. Fratu, I. Marghescu*, “Spectrum Occupancy in an Urban Environment: A Cognitive Radio Approach”, la 3rd International Workshop on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management, COGART 2010, ISBN 978-1-4244-8131-6, Roma, Italia, Noiembrie 2010.
- [PR4] *O. Fratu, S. Halunga, C. Perju, A. Marțian, I. M. Marcu*, “On the Availability of CDMA Channels for Secondary Users”, la 3rd International Workshop on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management, COGART 2010, ISBN 978-1-4244-8131-6, Roma, Italia, Noiembrie 2010.
- [PR5] *A.F. Păun, C. Vlădeanu, I. Marghescu, S. El Assad, A. Marțian*, “On the QAM Parallel Turbo-TCM Schemes using Recursive Convolutional GF(2N) Encoders”, la 18th European Signal Proc. Conf., EUSIPCO 2010, Aalborg, Danemarca, August 2010.
- [PR6] *A. Marțian, C. Vlădeanu, I. Marghescu*, “RF Transceiver Architecture in Cognitive Radio Systems”, la 7th International Conference COMMUNICATIONS 2008, Cognitive Radio Technology and Reconfigurable Communication Systems Workshop, București, Iunie 2008, pp. 17-20.
- [PR7] *C. Vlădeanu, A. Marțian*, “Spectrum Sensing Algorithms Used in Cognitive Radio Systems – An Overview”, la 7th International Conference COMMUNICATIONS 2008, Cognitive Radio Technology and Reconfigurable Communication Systems Workshop, București, Iunie 2008, pp. 21-26.
- [PR8] *I. Marcu, S. Halunga, I. Pirnog, A. Marțian, C. Oprea*, “Convolutional Turbo Encoding Improvements For Different Multiuser Detection Algorithms In Unperfect Reception Conditions”, Scientific Bulletin UPB, Seria C, vol.4, 2011, ISSN 1454-234x.
- [PR9] *C. Vlădeanu, A. Marțian, S. El Assad*, “EXIT Charts Analysis for Turbo-TCM Schemes Using Non-Binary RSC Encoders”, The 8th Advanced International Conference on Telecommunications (AICT 2012), Stuttgart, Germania, May 2012, pp. 150-155, ISBN: 978-1-61208-199-1.
- [PR10] *C. Vlădeanu, A. Marțian, A.F. Păun, S. El Assad*, “A New ML Detector for Trellis-Coded Spatial Modulation Using Hard and Soft Estimates”, 10th International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC12), Timișoara, Noiembrie 2012, pp. 143-147, ISBN: 978-1-4673-1175-5.
- [PR11] *E. Zainea, A. Marțian, I. Marcu, O. Fratu*, “Transition from Analog to Digital Broadcasting: A spectral efficiency review”, 10th International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC12), Timișoara, Noiembrie 2012, pp. 171-175, ISBN: 978-1-4673-1175-5.