

MĂSURĂRI ALE OCUPĂRII SPECTRALE ÎN DIFERITE GAME DE FRECVENȚE

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat inginerie electronică, telecomunicații și tehnologii informaționale

autor ing. Teodor-Octavian PĂCURAR

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Aldo De SABATA

luna Aprilie anul 2025

Teza de doctorat este structurată în 6 capitole: Capitolul 1 sublinează importanța gestionării spectrului electromagnetic, acesta fiind o resursă finită, a cărui utilizare eficientă este esențială pentru societatea modernă. Capitolul al doilea conține aspecte importante ale standardelor de măsurare din domeniul ocupării spectrale, indicând metode de măsurare eficientă a zgomotului radio, precum și soluții tehnice pentru problemele comune apărute în cadrul procesului de măsurare. Capitolul al treilea prezintă studii și investigații experimentale realizate într-un laborator de Compatibilitate Electromagnetică. Capitolul al patrulea analizează interferențele electromagnetice identificate în cadrul investigațiilor realizate, oferind soluții tehnice de optimizare a ocupării spectrului electromagnetic și de îmbunătățire a tehnicilor de măsurare a zgomotului. Capitolul al 5-lea abordează aplicații ale metamaterialelor și suprafețelor selective în frecvență (metasuprafețe), utilizate în general în controlul și manipularea undelor electromagnetice, la ecranarea spațiilor față de perturbațiile de natură electromagnetică. Concluziile și contribuțiile studiilor realizate sunt sintetizate în capitolul 6.

1. Introducere

Acest capitol constituie o introducere în contextul general al cercetării, în care este abordată problematica complexă a evaluării și gestionării spectrului electromagnetic, fiind analizate standardele și metodele de măsurare, precum și provocările practice asociate acestora din diverse domenii de activitate.

2. Generalități asupra standardelor din domeniul măsurării ocupării spectrale

Evoluția sistemelor de comunicații fără fir din ultimele două decenii a determinat o modificare radicală a modului de viață al oamenilor, sistemele wireless fiind implicate în mod direct în dezvoltarea socială și economică a umanității. Progresul tehnologic, exprimat în toate domeniile societății informaționale, a condus către o cerere tot mai ridicată pentru rate mari de transfer a datelor, exercitând astfel o presiune sporită asupra spectrului de radio-frecvențe.

În vederea stabilirii unor reguli de gestionare și utilizare a spectrului de radio-frecvențe, au fost redactate și publicate numeroase recomandări grupate în standarde internaționale. Domeniul radiocomunicațiilor are rolul de a asigura o utilizare rațională, echitabilă, eficientă și economică a spectrului de radio-frecvențe de către toate serviciile de radiocomunicații.

Acest capitol prezintă și comentează aspecte ale standardului internațional ITU (International Telecommunication Union), utilizate în cadrul cercetării din domeniul

radiocomunicațiilor, stabilite cu scopul prevenirii interferențelor radio ce pot apărea între utilizatori. Sunt abordate recomandările standardului cu privire la metodele de măsurare a zgomotului de radiofrecvență, ITU-R SM.1753 [ITU SM1753, 2012], ITU-R SM.2155 [ITU SM2155, 2009], sau al măsurărilor de ocupare spectrală, ITU-R SM. 2256 [ITU SM2256, 2016].

Standardul ITU-R SM.1753 oferă metodologii uniforme și precise pentru măsurarea zgomotului de radiofrecvență, cu accent pe determinarea surselor de zgomot, precum și a caracteristicilor și metodelor de măsurare. Principala sursă de interferențe este zgomotul produs de activitățile umane (Man Made Noise), diferit de zgomotul natural prin variațiile sale mai greu de prevăzut. Acest tip de zgomot este dominant în spectrul radio urban și rezidențial. Prin clasificarea tipurilor de zgomot, utilizarea echipamentelor de măsurare și a procedurilor adecvate se poate obține o evaluare precisă a mediului electromagnetic. Alegerea corespunzătoare a locațiilor de măsurare, adaptarea la tipurile de zgomot și includerea factorilor de corecție pentru incertitudinea de măsurare contribuie decisiv la prevenirea și optimizarea utilizării spectrului electromagnetic, reprezentând aspecte cruciale pentru evoluția comunicațiilor moderne.

Standardul ITU-R SM.2155 identifică o serie de potențiale probleme comune ce apar în procesul de măsurare a ocupării spectrale în domeniul frecvențelor înalte (3 - 30 MHz) și oferă soluții tehnice de evitare a acestora sau de ameliorare a efectului produs.

Procesul de măsurare presupune o scanare preliminară în scopul identificării frecvențelor libere, folosind aceeași rezoluție a lățimii de bandă (RBW) precum cea utilizată în măsurarea principală și aplicarea unui detector de valoare efectivă (RMS) [ITU SM2155, 2009]. Frecvența măsurată cu cel mai mic nivel al intensității semnalului este considerată frecvența de interes pentru măsurările ulterioare. Pentru obținerea unei evaluări precise a zgomotului în spectrul electromagnetic din domeniul frecvențelor înalte, standardul recomandă ca măsurările să fie repetate la fiecare 5 minute.

Standardul ITU-R SM.2256 propune metode de evaluare a gradului de ocupare spectrală, definind parametri esențiali ai măsurării, precum pragul de măsurare, parametru care stabilește dacă un canal de comunicații este liber sau ocupat. Se consideră faptul că un canal de frecvență este ocupat, dacă nivelul semnalului măsurat depășește nivelul de prag.

Un alt parametru important în evaluarea gradului de ocupare spectrală îl reprezintă ocuparea resurselor de spectru (SRO), parametru ce indică raportul dintre numărul de canale utilizate și numărul total de canale disponibile într-o bandă de frecvențe. Dacă se efectuează măsurarea unui singur canal de frecvențe, atunci ocuparea resurselor de spectru va fi egală cu frecvența ocupării canalului. Frecvența ocupării canalului (FCO) se determină pentru fiecare canal în parte. Canalul de frecvențe se consideră ocupat atunci când oricare dintre eșantioanele din interiorul canalului respectiv se situează peste pragul determinat.

Unul din cele mai importante aspecte atunci când se măsoară mai multe canale sau benzi întregi de frecvențe îl constituie separarea emisiilor provenite de la canalele adiacente, cu toate că nivelul lor este diferit. În cazul utilizării unei lățimi de bandă de măsurare prea mare, o emisie puternică va determina canalele învecinate să fie ocupate [ITU SM2256, 2016].

3. Măsurări și aplicații în compatibilitate electromagnetică

Compatibilitatea electromagnetică a sistemelor electronice din componența vehiculelor moderne a dobândit o importanță deosebită, cauzată de tendința mondială din domeniul Automotive de înlocuire a vehiculelor cu funcționalitate pe bază de combustibili fosili cu vehiculele de tip electrice. Odată cu evoluția tehnologică ce intervine în mod direct asupra funcționalității vehiculelor apar și noi posibile probleme atât în ceea ce privește emisiile radiate care duc la o ocupare a spectrului cu zgomot de tip MMN, cât și în testarea dispozitivelor ce

alcătuiesc sistemele din interiorul automobilului în vederea limitării emisiilor radiate.

În acest capitol am prezentat rezultatele unor studii efectuate într-un laborator de Compatibilitate Electromagnetică (CEM) asupra emisiilor generate de autovehicule. Obiectivul de referință a constat în identificarea benzilor de frecvențe și a intensității semnalelor electromagnetice emise, utilizând teste de compatibilitate electromagnetică, pentru a evalua impactul acestora asupra nivelului de zgomot electromagnetic de fond.

Validarea compatibilității electromagnetice a autovehiculelor presupune trecerea cu succes a testelor de imunitate și de emisii electromagnetice. În contextul dezvoltării sistemelor electronice din interiorul autovehiculelor, testarea imunității are scopul de a asigura un grad ridicat de siguranță atât pentru șofer și pasageri, cât și pentru ceilalți participanți la traficul ce se desfășoară în mediul electromagnetic comun [Silaghi, 2016, 1].

În sub-capitolul 3.2 am efectuat un studiu de caz asupra testării imunității electromagnetice la radiații, în industria automobilelor. Pe baza investigației realizate am demonstrat necesitatea cunoașterii cu exactitate a parametrilor aparaturii de măsurare, susceptibili de a varia în timp din cauza îmbătrânirii și a supra-utilizării, pentru a avea o precizie corespunzătoare a măsurărilor de câmp electromagnetic prin intermediul unor teste de imunitate radiată.

Variația parametrului VSWR al antenelor elicoidale implicate în procesul de măsurare, în intervalul de frecvențe cuprins între 26 MHz și 360 MHz, a determinat implementarea unor soluții pentru îmbunătățirea fiabilității testelor de imunitate radiată într-un laborator de compatibilitate electromagnetică.

Într-o primă soluție am aplicat un conector de tip I, interpus între cablul de măsurare din configurația de testare și planul de masă al antenei, însă aceasta nu a furnizat rezultate satisfăcătoare în raport cu limitele maxime de măsurare de 3:1, impuse pentru antenele elicoidale, fiind necesară implementarea unei alte soluții. Prin utilizarea cuplorului direcțional, produs de Werlatone, cu rol de conector pe calea sa directă am adus îmbunătățiri asupra valorilor parametrului VSWR. Am propus o a treia soluție bazată pe utilizarea kit-ului de calibrare produs de către Rohde-Schwarz cu rol de conector între planul de masă al antenei și cablu. Influența conectorilor asupra rezultatelor obținute prin cele trei soluții propuse am prezentat-o în Figura 1, în care se poate observa faptul că utilizarea cuplorului direcțional pe post de conector furnizează cele mai mici valori ale parametrului VSWR.

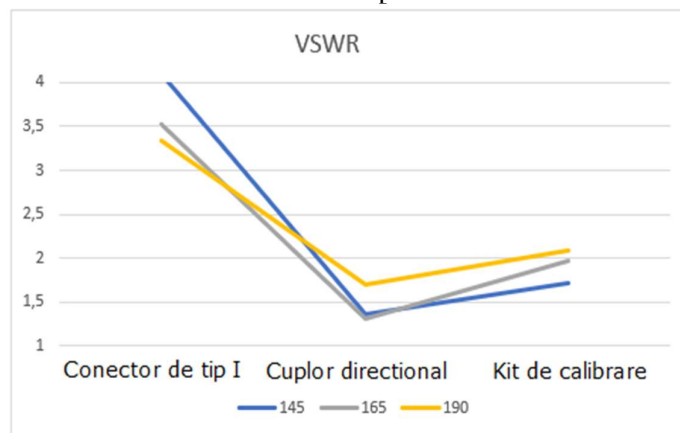


Figura 1. Variația parametrului VSWR utilizând conectori de tip diferit[Neiconi, 2020]

În Figura 2 am prezentat diagrama Smith pentru coeficientul de reflexie la intrare al antenei NMHA 145 MHz. Impedanța antenei raportată în acest grafic am utilizat-o ulterior în proiectarea rețelilor de adaptare.

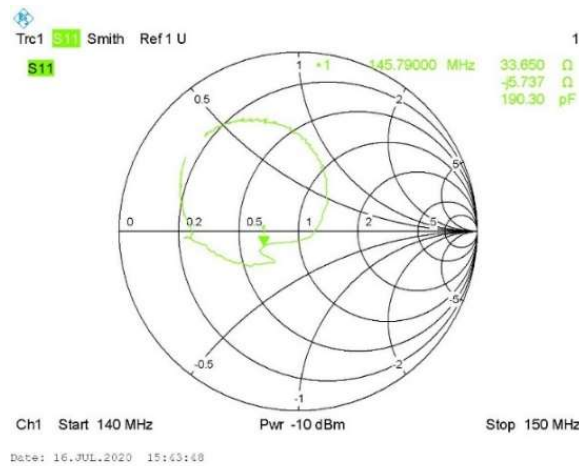


Figura 2. Diagrama Smith pentru antenna NMHA 145 MHz, [Neiconi, 2020]

Testele de compatibilitate electromagnetică realizate în industria automobilelor implică determinarea emisiilor generate de fiecare din echipamentele dezvoltate numite DUT ("Device Under Test). Pentru a efectua aceste experimente, sunt necesare și alte echipamente precum module de comunicații, alte echipamente folosite în automobil sau cabluri de legătură care trebuie să simuleze cât mai bine comportarea din interiorul acestuia. În condițiile date, ceea ce se măsoară corespunde emisiilor întregului sistem, nu doar DUT-ului. Emisiile generate corespund în general unor frecvențe de rezonanță. De aceea este important să se găsească frecvențele de rezonanță ale întregului sistem.

În sub-capitolul 3.3.1 am redat o procedură experimentală de determinare a frecvențelor de rezonanță în cablurile folosite cu scopul evaluării emisiilor generate de fiecare dispozitiv supus încercărilor. Am ilustrat standul experimental folosit pentru măsurarea rezonanței în cabluri în Figura 3, în timp ce rezultatul măsurării cu analizorul de spectru, după implementarea soluției propuse, l-am prezentat în Figura 4.

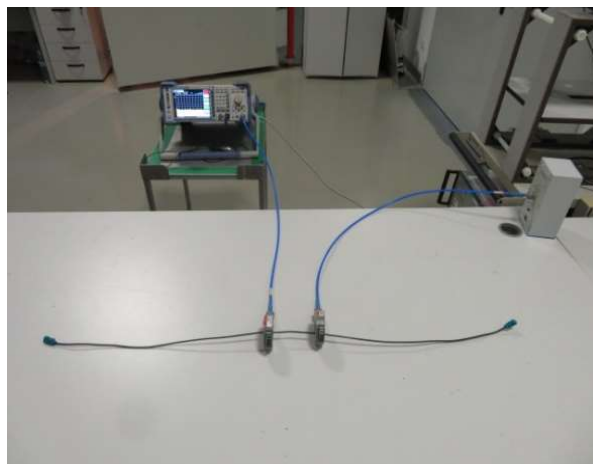


Figura 3. Standul experimental pentru măsurarea rezonanței în cabluri

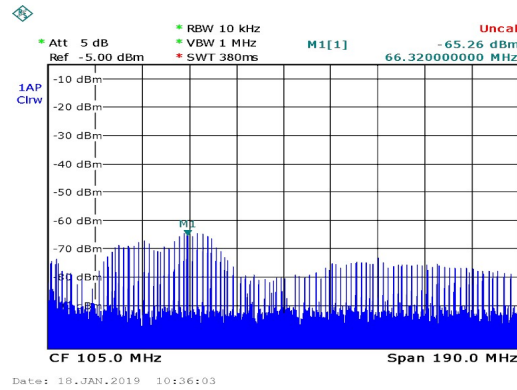


Figura 4. Rezultatul măsurării cu analizorul de spectru. Pe abscisă: frecvența(MHz); pe ordonată: intensitatea câmpului electric (dBm)

Pentru măsurarea radiațiilor emise în intervalul 100 kHz - 30 MHz am folosit o antenă monopol, rezultatul măsurării fiind prezentat în Figura 5. Am aplicat metoda de determinare a frecvențelor de rezonanță în cabluri, folosind sonde de curent conectate la cablu de măsurare și am măsurat semnalele induse. Aceasta metodă a permis corectarea abaterilor observate în procesul de măsurare, iar rezultatul măsurării demonstrează că nu există depășiri de limite pe cele trei detectoare: negru (valori de vârf), albastru (valori de cvasi-vârf) și roșu (valori medii).

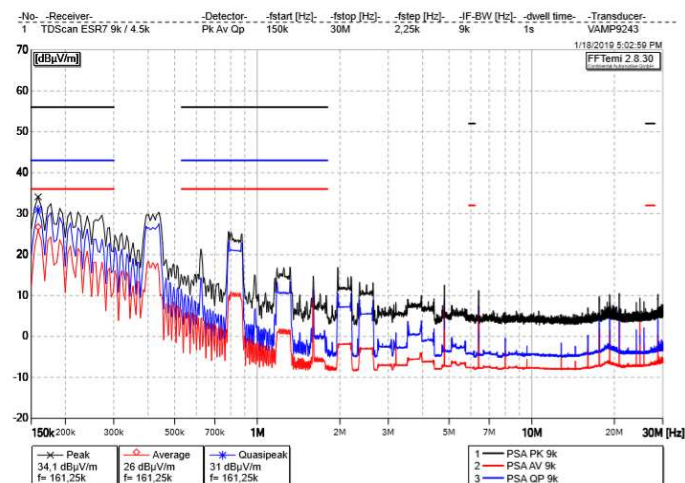


Figura 5. Rezultatul emisiilor radiate cu antena monopol. Pe abscisă: frecvența(Hz); pe ordonată: intensitatea câmpului electric (dBμV/m)

În sub-capitolul 3.3.2 am propus și investigat unele metode privind îmbunătățirea repetabilității testării emisiilor radiate (RE) pentru frecvențe sub 30 MHz. Propunerile sunt făcute în contextul anexei J a standardului CISPR 25 [CISPR25, 2016] și sunt concepute pentru îmbunătățirea activității de testare în industria Automotive.

Anexa J a standardului CISPR intitulată „Validarea performanțelor camerelor ALSE (Absorber Lined Shielded Enclosure) 150 kHz - 1 GHz” specifică cerințele pentru validarea ALSE utilizate pentru testele de componente [CISPR25, 2016]. Validarea încăperii de tip ALSE este efectuată întrucât, în multe cazuri, rezultatele testelor obținute în diferite camere semi-anecoice variază din cauza dimensiunilor camerelor, dimensiunilor maselor și ale împământării, respectiv ale materialului absorbant.

Am realizat o măsurare inițială, făcută înainte de aplicarea oricăror metode de îmbunătățire a rezultatelor, care a relevat multe puncte dincolo de limitele de toleranță, aspect evidențiat în Figura 6. Aceste rezultate reprezintă intensitatea echivalentă a câmpului electric

care ia în considerare factorul de antenă (antena monopol) și câmpul emis de radiator. Valorile trebuie să fie situate între limitele + 6dB și -6 dB (o cerință din anexa J CISPR 25) [CISPR25, 2016].

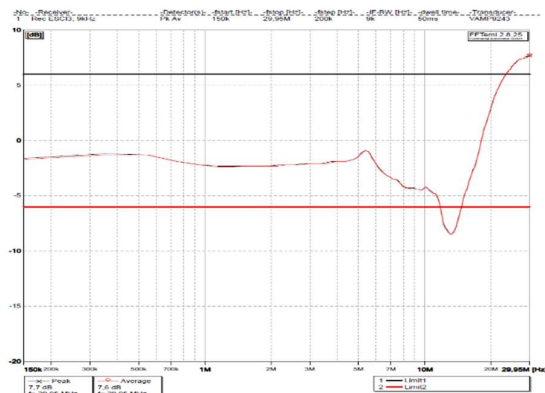


Figura 6. Măsurătoare inițială [Silaghi, 2019]. Pe abscisă: frecvența(Hz); pe ordonată: intensitatea câmpului electric echivalent (dB)

Problema a fost identificată ca provenind din rezonanța planului la masă al antenei monopol [Uno, 2018]. Conform [Uno, 2018] și [Carobbi, 2018], au fost luate următoarele măsuri: plasarea piramidelor absorbante RF sub antena monopol, realizarea unui plan de masă mai mare pentru antena monopol, consolidarea conexiunii la masă de la contragreutate la masă.

Rezultatele raportate în Figura 7 sunt cele mai bune obținute și indică faptul că problema a fost rezolvată prin aplicarea fâșiilor metalice pe contragreutate, ceea ce a îmbunătățit reproductibilitatea măsurărilor.

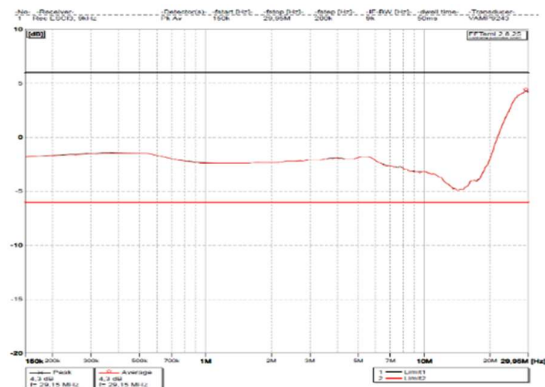


Figura 7. Rezultatul măsurării cu fâșii metalice adăugate la contragreutatea antenei [Silaghi, 2019]. Pe abscisă: frecvența(Hz); pe ordonată: intensitatea câmpului electric echivalent (dB)

În cele din urmă, am aplicat această soluție la un test normal de măsurare a emisiilor radiate și am redus nivelurile vârfurilor de intensitate a câmpului electric în timpul testării emisiilor radiate, eliminând astfel erorile de testare apărute din cauza incintei în care se desfășoară testul. Soluția propusă este aplicată în mod curent în prezent în activitatea laboratorului de Compatibilitate Electromagnetică.

În sub-capitolul 3.4 am evaluat nivelul emisiilor electromagnetice radiate produse de un dispozitiv de tip head-up display din domeniul vehiculelor rutiere, pe baza unor măsurări ale câmpului electromagnetic realizate în câmp îndepărtat, respectiv în câmp apropiat.

În cadrul acestui studiu am realizat mai multe sesiuni de investigații. În prima etapă a cercetărilor am efectuat un test inițial constând într-o măsurare a emisiilor radiate în câmp îndepărtat, Figura 8. Ulterior, în scopul identificării originii surselor de radiații am trecut la scanarea în câmp apropiat, Figura 9, iar apoi am aplicat o tehnică de ecranare cu rolul de a reduce emisiile radiate din măsurările asupra câmpului apropiat, Figura 10.

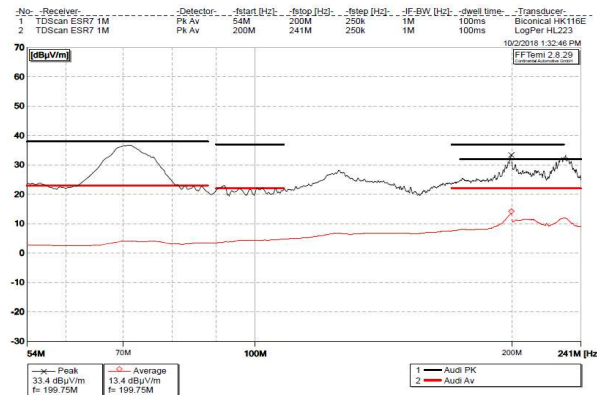


Figura 8. Măsurarea inițială a emisiilor radiate în câmp îndepărtat[Pacurar, 2019]. Pe abscisă: frecvența(Hz); pe ordonată: intensitatea câmpului electric (dBμV/m)

Scanarea în câmp apropiat, cu ajutorul sistemului de măsurare EMSCAN, a permis identificarea zonelor de emisie de perturbații ale cablajului imprimat investigat. Primul pas spre localizarea zonei de emisie a fost suprapunerea dispozitivului în configurația superioară și inferioară.

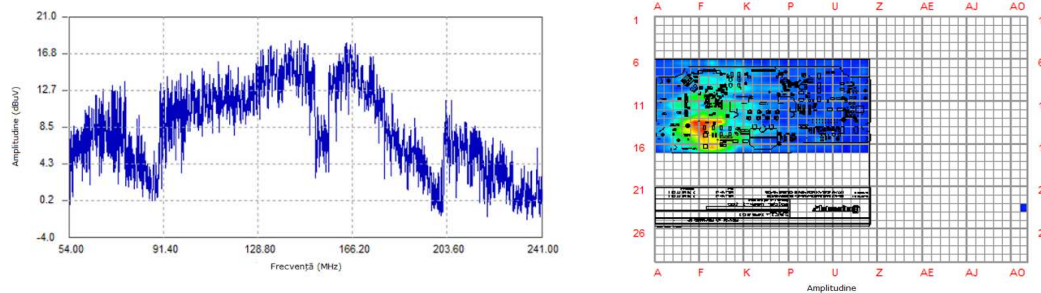
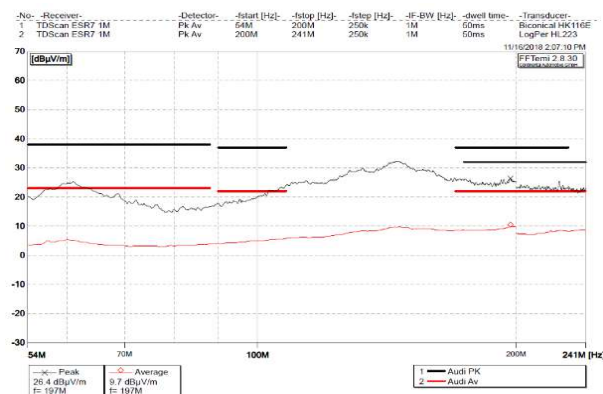


Figura 9. Scanare spectrală și spațială în câmp apropiat [Pacurar, 2019].

Rezultatul final al măsurării în câmp îndepărtat l-am ilustrat în Figura 10, unde se pot observa nivelurile semnalului achiziționat cu ajutorul detectorului de vârf și de valoare medie, care se află sub valorile impuse ale limitei de măsurare, determinând marcarea testului cu statut de conformitate.

Aplicarea ecranului pe convertorul DC-DC al sursei de alimentare a afișajului constituie o soluție cu rezultate verificate, așa cum reiese din scanările în câmp îndepărtat și în câmp apropiat. Practica ecranării ca soluție de reducere a radiațiilor electromagnetice este o soluție utilizată la scară largă, datorită eficienței crescute și a costurilor de implementare reduse. Ideea utilizării scanării în câmp apropiat a DUT permite reducerea timpului necesar identificării erorilor de proiectare.



În sub-capitolul 4.2 am raportat o serie de măsurări efectuate în interiorul unui laborator de compatibilitate electromagnetică în domeniul de frecvențe cuprins între 200 și 3000 MHz. Am validat diferențele remarcate între diferitele încăperi în care s-au realizat măsurările din interiorul laboratorului, pe baza evaluării densității de putere a zgomotului. În Figura 12 am analizat și redat configurația experimentală de măsurare a zgomotului, influențele antenei, a cablului și a preamplificatorului fiind luate în considerare.

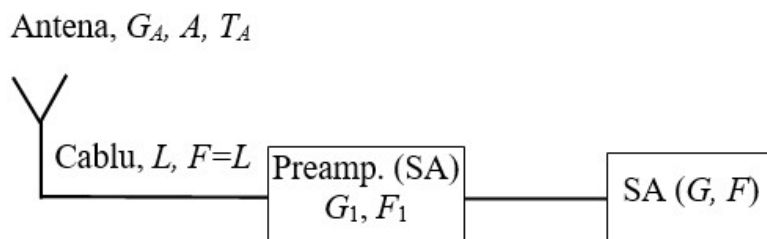


Figura 12. Configurația de măsurare a zgomotului [Pacurar, 2020, 2]

În Figura 13 este redat rezultatul aplicării unei metode alternative de determinare a zgomotului din spectrul semnalului de interes, constând în sortarea eşantioanelor de semnal.

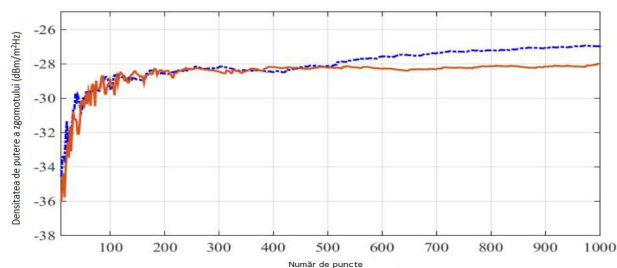


Figura 13. Nivelul de zgomot în funcție de numărul de puncte măsurate [Pacurar, 2020, 2]

În sub-capitolul 4.3 am prezentat și detaliat un echipament de măsurare construit pe o platformă SDR (Software-Defined Radio) și echipat cu o antenă log periodică de tip PCB. Acest sistem a fost conceput pentru efectuarea măsurărilor de intensitate a câmpului electric, precum și pentru evaluarea gradului de ocupare a spectrului electromagnetic în intervalul de frecvențe cuprins între 2.4 și 2.5 GHz, aferent comunicațiilor de tip Wi-Fi. Am simulat comportamentul antenei folosind un pachet software specializat și, pe baza parametrilor antenei obținuți prin simulare, am calibrat receptorul pentru creșterea preciziei măsurărilor de intensitate a câmpului electric.

Am calculat ocuparea spectrului de frecvențe pe baza criteriul de detectare a pragului de energie, în conformitate cu regula 3-Sigma. Această regulă prevede că un interval $\pm 3\sigma$ centrat pe media distribuției zgomotului acoperă majoritatea valorilor eşantioanelor de zgomot: 99.7% pentru o distribuție de tip Gaussian și cel puțin 90 % pentru oricare altă distribuție, aspect evidențiat în Figura 14.

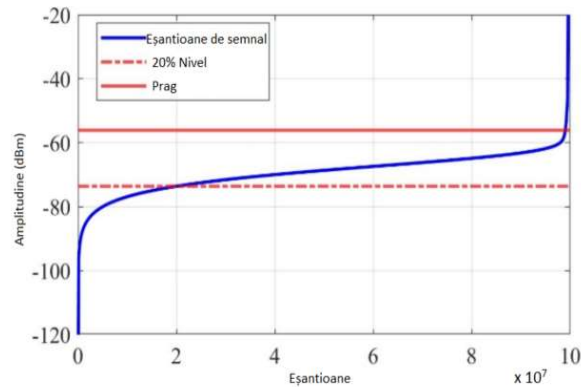


Figura 14. Sortarea eșantioanelor achiziționate și detectarea nivelului de prag [Pacurar, 2020, 1]

Am demonstrat funcționarea echipamentului de recepție prin raportarea reprezentărilor timp-frecvență, Figura 15, respectiv a spectrelor semnalelor achiziționate din diverse direcții și la polarizări diferite (ortogonale), Figura 16.

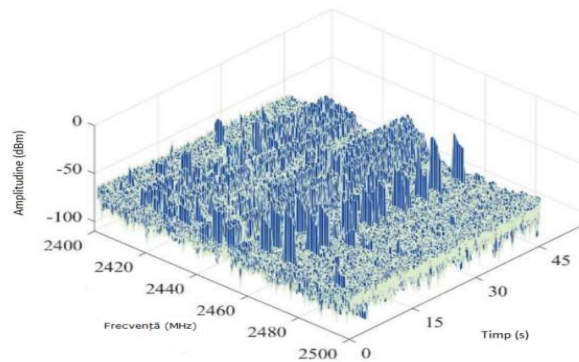


Figura 15 . Caracteristica timp-frecvență [Pacurar, 2020, 1]

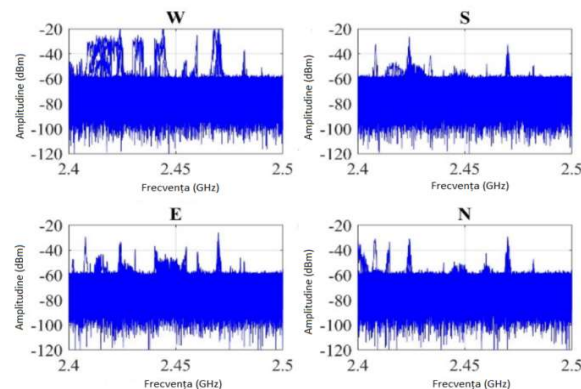


Figura 16. Spectrul semnalului recepționat din cele patru direcții geografice [Pacurar, 2020, 1]

Aplicarea conceptelor ținând de radio cognitiv sistemelor de comunicații din banda frecvențelor înalte necesită cunoștințe empirice despre nivelul de zgomot din intervalul de frecvențe 3 – 30 MHz [Fockens, 2019], precum și construirea unor modele de ocupare a spectrului (SO) sau de disponibilitate a acestuia. Procedurile de măsurare a ocupării spectrale au fost propuse, evaluate și discutate pe larg în literatura de specialitate [Wellens, 2010], fiind efectuate diverse campanii de măsurare extinse în diferite locații din lume [Mostafa, 2017], [Haralambous, 2017], [Percival, 1997].

Rezultatele prezentate în sub-capitolul 4.4 confirmă capacitatea de a modela starea de ocupare a unui canal radio într-un anumit punct îndepărtat, pe baza măsurărilor locale, utilizând modele Markov.

În cadrul investigației am definit două probabilități condiționate distincte, în domeniul timpului și în domeniul frecvenței. Am realizat validarea rezultatelor propuse prin compararea cu datele obținute din măsurări reale, în regim sincronizat prin GPS, efectuate în două locații separate, Timișoara și Sibiu, folosind echipamente de măsurare identice, Figura 17.

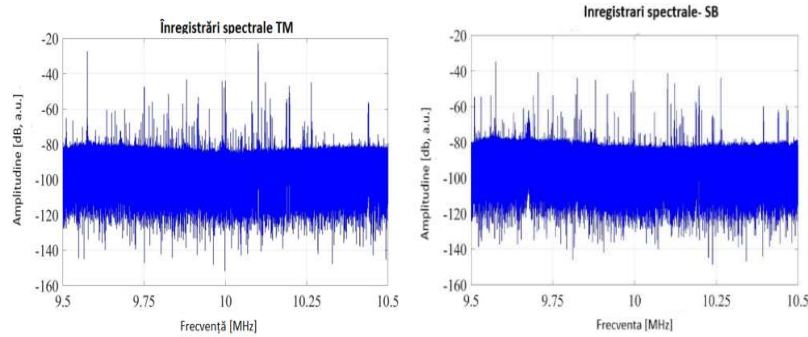


Figura 17. Spectrul simultan în cele două locații [Balint, 2020]

În Figura 18 am prezentat probabilitatea condiționată în domeniul frecvenței pentru două benzi diferite. În scopul comparației, această figură redă și probabilitatea condiționată în domeniul timpului. Se poate observa că cele două probabilități sunt foarte apropiate și ar putea permite caracterizarea unui canal la un punct îndepărtat, în domeniul temporal și la diferite frecvențe, pe baza valorilor măsurate local.

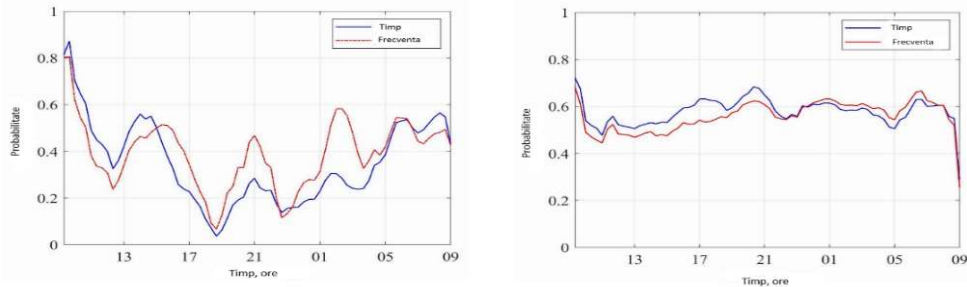


Figura 18. Comparația probabilității condiționale în domeniul frecvenței și al timpului pentru două benzi de frecvențe [Balint, 2020]

5. Ecrane electromagnetice cu suprafețe selective în frecvență

Capitolul 5 explorează evoluția metamaterialelor și a structurilor electromagnetice periodice volumetrice (3D), precum și paradigma suprafețelor selective în frecvență, evidențiind câteva dintre cele mai notabile realizări din acest domeniu de cercetare.

În subcapitolul 5.1 am dezvoltat o soluție pentru un absorbant pe bază de lichid, implementat ca o suprafață selectivă în frecvență (FSS) complet dielectrică, cu excepția planului de masă. O primă soluție utilizează apa datorită valorilor mari ale părților reale și imaginare ale permitivității, făcând posibilă atât miniaturizarea, cât și absorbția ridicată. O a doua soluție este inovatoare și investighează utilizarea metanolului ca lichid absorbant. Pentru ambele soluții investigate, am optimizat dimensiunile geometrice ale celei unitare [Dsa, 2024].

Designul absorbantului pe bază de lichid l-am redat în Figura 19. În partea stângă a imaginii, Figura 19 a), am ilustrat imaginea CAD a celei unitare a absorbantelor pe bază de

apă, în timp ce în partea dreapta, Figura 25 b) am redat celula unitară a absorbantelor pe bază de metanol. Dimensiunile celulei unitare au fost obținute prin optimizare. Dimensiunile mai mari ale celulei unitare pe bază de metanol comparativ cu cea pe bază de apă se datorează constantei dielectrice mai mari a apei în raport cu metanolul. Absorbantul este format prin repetarea infinită a celulei unitare în planul xy .

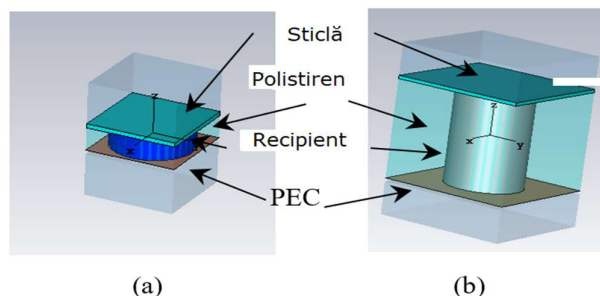


Figura 19. Modelul CAD al celulei unitare a absorbantului pe bază de lichid:
a) apă ; b) metanol [Dsa, 2024]

În Figura 20 am prezentat partea reală și partea imaginară a permitivității apei și a metanolului la o temperatură de 20 °C, obținute prin aplicarea unui model Debye. Partea reală a constantei dielectrice relative a apei prezintă o scădere de la valoare de 80 la cea de 74, pe măsură ce frecvența crește de la 1 GHz la 5 GHz. În contrast, partea imaginară crește de la 4.5 la 20.5 pentru același interval de frecvențe. În cazul metanolului, modelul prezintă o tendință similară, partea reală scăzând de la 30.5 la 12.4, în timp ce partea imaginară crește de la 9 la 12. Metanolul înregistrează pierderi mai mari decât apa până la o frecvență aproximativă de 3 GHz, în timp ce pentru frecvențele mai mari, apa prezintă pierderi mai mari decât metanolul. Acest lucru deschide calea către posibilitatea ajustării comportamentului în frecvență ale absorbantelor [Dsa, 2024].

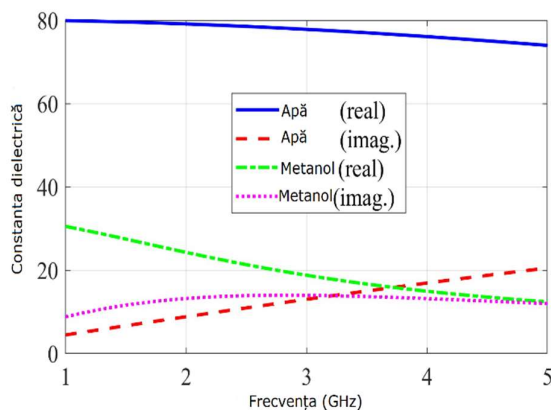


Figura 20. Constanta dielectrică a apei și a metanolului la temperatura de 20 °C [Dsa, 2024]

În scopul înțelegerii mecanismului de funcționare al absorbantului pe bază de apă, respectiv al absorbantului pe bază de metanol dintr-o perspectivă electromagnetică este necesar să se apeleze la simulări. Am efectuat o analiza utilizând un model Debye de ordinul întâi pentru ambele substanțe, conform [CST, 2023]. Am realizat o simulare suplimentară în [HFSS, 2023] pentru incidența normală asupra absorbantelor pe bază de apă și metanol la temperatura de 20°C.

Modelele Debye pentru apă și metanol din [CST, 2023] utilizează ca parametri permitivitatea statică, permitivitatea optică și timpul de relaxare. În schimb, cu simulatorul

HFSS [HFSS, 2023], dependența de frecvență a materialului este setată diferit. Spre deosebire de simulatorul electromagnetic CST, simulatorul HFSS nu necesită un timp de relaxare, dar impune specificarea frecvențelor minime și maxime, definirea permitivității relative la aceste frecvențe, precum și tangenta unghiului de pierderi la aceleași frecvențe. Permitivitatea relativă este calculată în funcție de frecvență și temperatură, formula putând fi modificată în funcție de fiecare material.

În conformitate cu Figura 21, celula unitară bazată pe apă nu prezintă diferențe semnificative între cele două metode de calcul. Unitățile pe bază de metanol indică diferențe minore la frecvențe mai mari. Aceste variații pot fi atribuite diferențelor de implementare a modelului Debye între cele două simulatoare, în special coeficienților ecuației utilizați pentru extrapolarea datelor privind permitivitatea relativă.

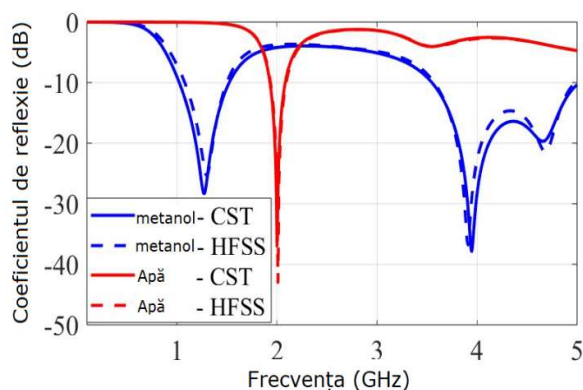


Figura 21. Reprezentarea comună a coeficientului de reflexie obținut prin două pachete software de simulare diferite, CST și HFSS [Dsa, 2024]

Am demonstrat, prin simulări, că soluțiile propuse de absorbante selective în frecvență prezintă o bună stabilitate a coeficientului de reflexie în raport cu polarizarea undelor incidente, în domenii largi de unghiuri de incidență și temperatură.

6. Contribuții proprii

În cadrul programului doctoral am studiat un număr de 106 titluri bibliografice și de asemenea am publicat 1 articol în revistă cotate ISI-WoS, 5 articole la conferințe indexate ISI Proceedings și 1 articol la o conferință indexată BDI. Principalele contribuții proprii aduse în această teză se regăsesc enumerate mai jos.

În capitolul 2:

- Am prezentat și comentat aspecte relevante ale standardelor de măsurare din domeniul radiocomunicațiilor, în special ținând de ocuparea spectrală;
- Am prezentat și explicat o metodă practică adecvată în scopul determinării nivelului de zgomot captat de o antenă, în prezența semnalelor de origine antropică, criteriul 20% (sub-capitolul 2.2). Pe baza acestei metode, semnalele nedorite ce apar în spectrul de frecvențe pot fi eliminate, cele mai mici 20% dintre eșantioane fiind considerate valori ale zgomotului de fond;
- Am sintetizat o serie de probleme comune ce apar în procesul de măsurare a ocupării spectrale din domeniul frecvențelor înalte, prezentând soluțiile tehnice de evitare a efectului produs de acestea, furnizate de standardul ITU-R SM 2155 (sub-capitolul 2.3);
- Am evidențiat dificultatea gestionării spectrului electromagnetic, prezentând parametri tehnici de măsurare, sugerați de standardul ITU-R SM.2256 pentru determinarea gradului de ocupare a spectrului (sub-capitolul 2.4).

În capitolul 3:

- Am efectuat investigații practice, realizate într-un laborator de compatibilitate electromagnetică asupra măsurărilor de ocupare spectrală în scopul analizării emisiilor generate de autovehicule. Prin intermediul testelor de compatibilitate electromagnetică executate, am demonstrat impactul autovehiculelor asupra creșterii zgomotului electromagnetic de fond;
- În subcapitolul 3.2 am realizat studii experimentale pentru a evalua influența aparaturii de măsurare și a dispozitivelor utilizate în testele de compatibilitate electromagnetică asupra validității rezultatelor obținute prin metoda testării imunității radiate cu ajutorul antenelor elicoidale. Pe baza experimentelor executate, am identificat o deteriorare a conectorilor de tip I cauzată de îmbătrânirea și utilizarea repetată a acestora;
- Am propus soluții alternative de înlocuire a conectorilor susceptibili de degradare, constând în utilizarea cuplorului direcțional Werlatone conectat între planul de masă al antenei investigate și cablul prin care se transmite semnalul de la amplificator. Am validat prin măsurări practice aplicabilitatea soluției propuse, care a condus la obținerea unor rezultate favorabile ale raportului de undă staționară în tensiune, corectând astfel defectele apărute din cauza aparaturii;
- Am făcut o comparație între valorile nominale ale parametrilor de măsurare pentru antenele elicoidale și valorile reale obținute prin procesul de testare, prin care am arătat abateri față de valorile recomandate de producătorul antenelor, demonstrând astfel necesitatea măsurării parametrilor echipamentelor utilizate în testare;
- În subcapitolul 3.3 am prezentat un studiu privind influența frecvențelor de rezonanță asupra testelor de măsurare a emisiilor radiate din domeniul automobilelor, în urma căruia am propus utilizarea unei metode experimentale pentru identificarea frecvențelor de rezonanță în cabluri. Am utilizat sonde de curent conectate la cabluri pentru măsurarea semnalelor induse și am demonstrat prin această metodă că emisiile radiate pot fi influențate de cablurile și echipamentele de interconectare, nu doar de dispozitivul supus testării;
- Am aplicat metoda "modelled long wire", recomandată de Anexa J a standardului de măsurare CISPR25, realizând o comparație între valorile obținute prin simulare din standard și valorile reale obținute prin măsurare pentru a verifica conformitatea testelor de măsurare a emisiilor radiate.
- În domeniul frecvențelor 150 kHz – 30 MHz am observat abateri semnificative ale valorilor măsurate față de limitele impuse de standardul de măsurare și am propus soluții pentru îmbunătățirea reproductivității testelor. Prin aplicarea metodei de adăugare de curele de împământare la o contragreutate a unei antene monopoli am redus nivelul vârfurilor de intensitate a câmpului electric în timpul testării emisiilor radiate, asigurând conformitatea cu limitele impuse de standardul de măsurare; soluția este în continuare utilizată în testele de compatibilitate electromagnetică;
- În subcapitolul 3.4 am prezentat tehnologia EMSCAN utilizată pentru scanarea emisiilor radiate în câmp apropiat. Prin aplicarea metodei de scanare în câmp apropiat am identificat cu precizie sursele de emisii perturbatoare, efectuând o scanare spectrală și spațială;
- Am propus și implementat o soluție practică de ecranare a circuitului imprimat al dispozitivului investigat, prin aplicarea unui ecran din aluminiu asupra a circuitului de alimentare al dispozitivului. Prin intermediul metodei de ecranare am redus nivelul emisiilor perturbatoare radiate în intervalul frecvențelor 54- 241 MHz cu aproximativ 10 dB;

- Am validat soluția de ecranare propusă prin repetarea măsurărilor inițiale realizate în câmp îndepărtat și am obținut rezultate conforme cu limitele de măsurare impuse de standardul CISPR25, certificând dispozitivul pentru producția de serie; am demonstrat astfel că scanarea în câmp apropiat este o soluție pentru reducerea timpului necesar identificării erorilor de proiectare care duc la emisii radiate peste limitele admise;
- În subcapitolul 3.5 am comparat performanțele a două tipuri de antene utilizate în compatibilitatea electromagnetică în același domeniu de frecvențe, 9 kHz- 30 MHz și am prezentat avantajele și limitările fiecărei antene în funcție de scenariile de testare;
- Am prezentat potențiale probleme de interferență electromagnetică între sistemele de comunicații de tip NFC, care operează la frecvența de 13.56 MHz și alte module electrice din interiorul automobilului cu funcționalitate în același interval de frecvențe, precum modulul de încărcare wireless pentru telefonul mobil. Am arătat efectele interferențelor electromagnetice reflectate de podeaua metalică a camerei semi-anechoice asupra configurației de măsurare

În capitolul 4:

- Am analizat impactul evoluției tehnologice asupra spectrului electromagnetic și am evidențiat creșterea exponențială a interferențelor cauzate de surse de zgomot electromagnetic produse de om (MMN). Aceste interferențe electromagnetice cauzează probleme utilizatorilor comunicațiilor radio, prin degradarea semnalului rețelelor mobile și de tip Wi-Fi, scăderea performanței GPS-ului în zonele urbane aglomerate sau perturbarea comunicațiilor în benzile utilizate de echipamentele de siguranță, precum serviciile de urgență;
- În subcapitolul 4.2 am dezvoltat o configurație experimentală complexă, incluzând utilizarea unei antene log-periodice și a unui analizor de spectru performant, pentru investigarea spectrului electromagnetic în intervalul de frecvențe 200- 3000 MHz. Metoda propusă de măsurare a fost optimizată prin utilizarea preamplificatoarelor interne și a corecțiilor aferente pierderilor de putere introduse de cablurile de măsurare;
- Am implementat o procedură pentru măsurarea densității spectrale a zgomotului, pe baza unui model matematic bazat pe luarea în considerare a factorilor de zgomot, a câștigului antenei și a temperaturii de zgomot. Cu ajutorul acestei proceduri de măsurare, am demonstrat posibilitatea determinării nivelului de zgomot radio pentru implementarea tehnicilor de acces dinamic și control al spectrului electromagnetic, folosite în sistemele de radio cognitive;
- În sub-capitolul 4.3 am prezentat un sistem inovator de scanare spectrală cu ajutorul SDR HackRF One, care folosește tehnica de reglare rapidă a tactului radio pentru scanarea eficientă a frecvențelor, reducând timpul de baleiaj la 0.75 s pe întreg domeniul de 6 GHz;
- Am propus o metodă eficientă de detecție a pragului de energie, aplicând regula 3-Sigma și sortarea eşantioanelor cu metoda celor mai mici 20% pentru evaluarea zgomotului produs de om și ocuparea spectrului. Am validat metoda propusă prin analiza grafică a valorilor spectrale și compararea valorilor măsurate cu cele estimate;
- Am realizat o analiză a gradului de congestie în canalele aferente comunicațiilor de tip Wi-Fi, prin calcularea ciclului de funcționare și a factorului de umplere pentru canalele de interes. Am redat imagini grafice detaliate, prin care am evidențiat zonele de activitate intensă;
- În sub-capitolul 4.4 am prezentat un model Markov extins pentru analiza statistică a spectrului comun în domeniul frecvențelor înalte în locații geografice

îndeprătat, Timișoara și Sibiu, considerând simultan parametri de timp, frecvență și poziție geografică;

- Am creat un cadru experimental sincronizat pentru măsurări spectrale, folosind echipamente SDR sincronizate prin GPS pentru achiziția simultană de date spectrale din locații diferite. Am dezvoltat un script Python pentru procesarea și organizarea automată a datelor spectrale în sub-înregistrări, optimizând colectarea și analiza datelor;
- Am introdus un model bidimensional pentru ocuparea spectrului electromagnetic comun prin calcularea probabilității ocupării unui canal de frecvențe bazat pe starea canalelor adiacente. Am validat modelul prin comparații între rezultatele obținute în locații diferite.

În capitolul 5:

- Am discutat despre metamateriale, suprafețe selective în frecvență și metasuprafețe, evidențiind cele mai importante aplicații ale acestora;
- În sub-capitolul 5.2 am dezvoltat un absorbant selectiv în frecvență, pe bază de lichid, în concret apă și metanol, în care am aplicat o topologie FSS complet dielectrică (cu excepția planului de masă), utilizată la ecranarea selectivă a unor spații;
- Am realizat simulări detaliate ale absorbantului pe bază de lichid, cu ajutorul mediului de simulare CST Microwave Studio și am validat rezultatele prin intermediul altui instrument electromagnetic, prin care am demonstrat astfel corectitudinea rezultatelor obținute;
- Am efectuat studii parametrice asupra dimensiunii celulei unitate, grosimii substratului și a razei cilindrului pentru a maximiza performanțele absorbantului, inclusiv analiza sensibilității la unghiul de incidență și polarizare;
- Am analizat efectele temperaturii asupra frecvenței de rezonanță și coeficientului de reflexie și am arătat stabilitatea performanțelor absorbantului în intervale de temperatură variate;
- Am investigat mecanismele de rezonanță din interiorul structurii, construind imagini de câmp electromagnetic, pentru a înțelege interacțiunile câmpurile electromagnetice cu substanțele componente și absorbția în regiunile lichide ale structurilor.

7. Referințe bibliografice

[Angskog, 2010] P. Angskog, C. Karlsson, J. F. Coll, J. Chilo, and P. F. Stenumgaard, "Sources of disturbances on wireless communication in industrial and factory environments," in *Proc. Asia-Pac. Int. Symp. Electromagn. Compat.*, Beijing, China, Apr. 2010, pp. 281–284,

[Balint, 2020] C. Balint, A. De Sabata, **O. Pacurar**, P. Bechet, „Markov Model for HF Joint Spectrum Occupancy at Two Distant Locations”, The 26th International Conference

Knowledge-Based Organization (KBO 2020), 11-13 June 2020, Sibiu, Romania, 2020

[Carobbi, 2018] C. Carobbi, D. Izzo, "Evaluation and improvement of the Reproducibility of CISPR 25 ALSE Test Method", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 60, issue 4, pp. 1069-1077, 2018.

[CISPR25, 2016] International Standard CISPR 25, "Vehicles, boats and internal combustion engines - Radio disturbance characteristics ", 4.0 ed. 2016

[CST,2023] CST Microwave Studio, v. 2023

[Dsa, 2024] A. De Sabata, A. Silaghi, C. Ionica, O. Pacurar, "Design of Liquid Based Frequency Selective Surfaces Operating as Absorbers," *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol.24, no.4, pp.75-82, 2024

[Fockens, 2019] T. Fockens, A. Zwamborn and F. Leferink, "Measurement Methodology and Results of Measurements of the Man-Made Noise Floor on HF in The Netherlands", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 61, Nr. 2, April 2019, pp. 337-343, 2019

[Haralambous, 2017] H. Haralambous, H. Papadopoulos, 24-h HF spectral occupancy characteristics and neural network modeling over Northern Europe, *IEEE Trans. Electromagn. Compat*, vol. 59, no. 6, pp. 1817-1825, Dec., 2017.

[HFSS,2023] High Frequency Structure Simulator (HFSS), www.ansys.com.

[ITU SM1753, 2012] Recommendation ITU-R SM.1753-2 Methods for measurements of radio noise, ITU-R 2012.

[ITU SM2155, 2009] ITU R-SM 2155 09/2009 Man made noise in the HF range

[ITU SM2256, 2016] ITU-R SM.2256-1 Spectrum occupancy measurements and evaluation

[Leferink, 2010] F. Leferink, F. Silva, J. Catrysse, S. Batteman, V. Beauvois, and A. Roc'h, "Man-made noise in our living environments," *URSI Radio Sci. Bull.*, vol. 83, no. 3. pp. 49–57, Sep. 2010.

[Mostafa, 2017] Md.M. Mostafa, E. Tsolaki, H. Haralambous, HF spectral occupancy Time Series models over the Eastern Mediterranean Region, *IEEE Trans. Electromagn. Compat*, vol. 59, no. 1, pp. 240-248, Feb., 2017.

[Neiconi, 2020] A. Neiconi, **O. PACURAR**, A. De Sabata, „EMC Parameters used for Helical Antennas in Automotive EMC Testing”, 5-6 November 2020, Timisoara, Romania

[Pacurar, 2022] **O. Pacurar**, A. Silaghi, C.Balan, A.De Sabata, C.Balint, "Study regarding the configuration setup used inside an EMC Laboratory for NFC Communication Measurement", 2022 IEEE 28th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 26-29 October 2022, Bucharest, Romania

[Pacurar, 2020,1] **O. Pacurar**, C. Balint, C. Iftode, A. Silaghi, A. De Sabata, "Spectrum Occupancy Measurements in the Wi-Fi Band with a PCB Antenna", 2020 14th International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC 2020), 5-6 November 2020, Timisoara, Romania, pp. 1-4, 2020

[Pacurar, 2020,2] **O. Pacurar**, A. Silaghi, C. Balint, A. De Sabata, Adrian Graur, "Experiments Concerning the Spectrum Structure Inside an Automotive EMC Laboratory", 2020 International Conference on Development and Application Systems (DAS 2020), 21-23 May 2020, Suceava, Romania, pp. 133-136, 2020

[Pacurar, 2019] **O. Pacurar**, A. Silaghi, A. De Sabata, „Aspects regarding radiated emissions produced by a head up display”, 2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME 2019), 23-26 October 2019, Cluj, Romania, pp. 30-33, 2019

[Mostafa, 2017] **Md.M. Mostafa**, E. Tsolaki, H. Haralambous, HF spectral occupancy Time Series models over the Eastern Mediterranean Region, IEEE Trans. Electromagn. Compat, vol. 59, no. 1, pp. 240-248, Feb., 2017.

[Silaghi,2016,1] A. Silaghi, A. De Sabata, A. M. Silaghi, “Testing Immunity to Portable Transmitters with Helical Antennas: Key concepts”, SIITME 2016, 20-23 Oct2016, Baile Felix (Romania), pp. 270-273, 2016

[Uno, 2018] T. Uno, K. Maeda, T. Tanaka, Y. Okuda, O. Wada, “A study on characteristics of 10 MHz to 30 MHz in CISPR 25 ALSE method: CISPR 25 Annex J reference data verification of long-wire method”, 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC), 14-18 May 2018, Singapore (Singapore), pp.584-589, 2018.