



**Universitatea Națională de Știință și
Tehnologie Politehnica București**



**Școala Doctorală de Electronică, Telecomunicații
și Tehnologia Informației**

**CONTRIBUȚII PRIVIND
DEZVOLTAREA DE ANTENE PE
SUBSTRAT FLEXIBIL ȘI SISTEME DE
MĂSURARE BAZATE PE
RADIOFRECVENȚĂ**

Ing. Mircea-Alexandru CĂLIN

Conducător de doctorat:

**Prof. Dr. Ing. Paul SVASTA
UNSTPB**

BUCUREȘTI 2025

1.Introducere

Această teză de doctorat explorează frontierele tehnologiei antenelor wearable, o ramură emergentă a ingineriei electronice care se intersectează cu domenii precum materialele inovatoare, tehnologia textilelor și interfețele om-mașină. În contextul în care societatea noastră devine tot mai conectată, nevoia de soluții de comunicare eficiente, durabile și, mai ales, integrate confortabil în viața cotidiană este mai presantă ca niciodată. Prin urmare, această cercetare își propune să adreseze provocările cheie ale designului, fabricației și implementării antenelor wearable, cu un accent deosebit pe inovație și aplicabilitate practică.

1.1 Context și relevanță

În era tehnologiei omniprezente, integrarea armonioasă a soluțiilor electronice în viața de zi cu zi a devenit o prioritate atât pentru cercetători, cât și pentru industrie. Antenele wearable, ca elemente cheie în această integrare, reprezintă o punte vitală între progresul tehnologic și aplicabilitatea sa în contexte cotidiene. Contextul și relevanța acestei lucrări derivă din creșterea exponențială a nevoii de dispozitive comunicante portabile, care să faciliteze o varietate de funcționalități, de la monitorizarea sănătății și activității sportive până la conectivitatea îmbunătățită și experiențele imersive în realitate augmentată și virtuală.

Prin abordarea acestei teme, îmi propun studiul în detaliu, simularea și realizarea practică a unor experimente în vederea proiectării antenelor radio și a circuitelor de radio frecvență. Obiectivul acestor studii este inovarea unor noi arhitecturi de antene radio pasive având dimensiuni reduse, realizate special pentru a fi integrate în cadrul unor sistem radio de comunicații mobile, perfecționarea metodelor cunoscute de adaptare în impedanță și a modului de lucru în vederea realizării de măsurători electrice pentru antene radio.

1.2 Obiectivele cercetării

Obiectivele cercetării din cadrul acestei teze de doctorat se înscriu într-o viziune ambițioasă, având ca scop nu doar avansarea cunoștințelor tehnice în domeniul antenelor wearable, dar și încurajarea unui spirit inovator care să împingă limitele posibilului. Într-un domeniu în care progresul este adesea limitat de constrângerile tehnologice și materiale, această cercetare își propune să exploreze noi orizonturi, să testeze barierele existente și să propună soluții care să redefinească modul în care antenele wearable pot fi integrate și utilizate în viața cotidiană. Unul dintre obiectivele principale este dezvoltarea de antene wearable cu performanțe superioare, care să ofere o lățime de bandă extinsă și o eficiență îmbunătățită, în timp ce se integrează armonios cu purtătorul, asigurând confort și discreție.

1.3 Scopul și obiectivele tezei

Scopul acestei teze de doctorat este de a redefini paradigma antenelor wearable prin explorarea și implementarea unor soluții inovatoare care să adreseze atât provocările tehnice actuale, cât și nevoile emergente ale societății digitale în continuă expansiune. Obiectivele tezei se concentrează pe inovare și împingerea granițelor cunoașterii prin dezvoltarea de antene wearable capabile să opereze într-un spectru larg de frecvențe, să se adapteze la diverse medii de utilizare și să se integreze fără efort cu dispozitivele mobile și platformele IoT.

1.4 Contribuții și noutate

Contribuțiile și noutatea tezei doctorale în domeniul antenelor wearable sunt multidimensionale, abordând provocări existente și deschizând noi direcții în proiectare, fabricație și integrare.

Prima contribuție majoră este dezvoltarea unei metodologii avansate de proiectare și simulare care integrează materiale noi și tehnici inovatoare de fabricație, rezultând antene cu performanțe îmbunătățite, lățimi de bandă mai largi și adaptabilitate sporită.

A doua contribuție constă în identificarea și caracterizarea materialelor sustenabile pentru fabricația antenelor wearable, evaluând proprietățile electromagnetice ale materialelor textile și plastice și dezvoltând compozite cu performanțe superioare chiar și în condiții ambientale variabile.

A treia contribuție este implementarea unor noi tehnici de testare și evaluare a performanțelor în scenarii reale, asigurând că antenele sunt nu doar teoretic eficiente, ci și practic viabile și ergonomic acceptabile.

În plus, teza explorează integrarea antenelor wearable cu tehnologii emergente precum realitatea augmentată/virtuală, sistemele de monitorizare a sănătății și platformele IoT, deschizând astfel noi orizonturi de aplicabilitate în diverse domenii.

2. Fundamentele Antenelor Wearable

Utilizarea frecventă a antenelor în aplicații electronice moderne a creat o nevoie tot mai mare pentru studiu și optimizare a procesului de adaptare în impedanță, care va contribui în cele din urmă la îmbunătățirea performanței sistemului RF prin minimizarea pierderilor. Adaptarea în impedanță a unei antene se consideră a fi un proces complex, cu multe mistere pentru majoritatea inginerilor ce activează în domeniul aplicațiilor practice. O parte din problemele întâmpinate în acest proces de adaptare, sunt greu de estimat cu un model teoretic simplu și sunt aproape imposibil de perceput intuitiv.

2.1 Eficientizarea transferului de energie

Conceptul de adaptare a impedanței reprezintă un proces tehnic care permite proiectantului să optimizeze performanța circuitului RF prin minimizarea pierderilor de energie și creșterea eficienței transferului de la sursă către sarcină - reprezentată de antenă în cazul nostru. Acest lucru se face prin măsurarea și modificarea unor parametri sau componente ce influențează profilul de impedanță a antenei și în mod ideal se va obține o potrivire perfectă a impedanței între componentele ce alcătuiesc sistemul radio. Teoria de obținere a transferului maxim de putere este descrisă de regulă în doar două maniere: prin obținerea unei impedanțe la sursă egală cu complex conjugatul impedanței de sarcină sau prin crearea de impedanțe complexe care au o parte imaginară nulă, atât pentru sursă, cât și pentru sarcină.

2.2 Pierderile în liniile de transmisie

Problemele introduse de circuitele radio tind să fie mai complexe pe măsură ce frecvența de lucru este mai mare, astfel în cazul semnalelor ce corespund benzii radio UHF (300MHz – 3GHz), lungimea liniei de transmisie, calitatea cablajului imprimat PCB și carcasa dispozitivului vor avea o puternică influență asupra valorii impedanței complexe. Reflexiile semnalului sunt datorate în cea mai mare parte discontinuităților de la nivelul liniei de transmisie, așa cum este reprezentat în figura 2.1. Aceste discontinuități sunt cauza principală a pierderilor de putere, a variației profilului de impedanță cu frecvența și de neliniarități.

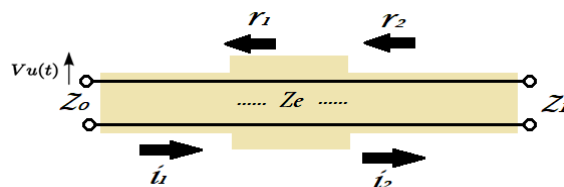


Figura 2.1 Reflexii ale semnalului cauzate de discontinuități în linie

Dispozitivele electronice care sunt fabricate sub formă de cipuri discrete sau integrate, în tehnologii SMT sau THT, trebuie să fie montate pe un PCB sau pe un alt tip de material de suport înainte de a fi conectate la sistemul de măsurare. Aceasta reprezintă și situația pentru majoritatea antenelor realizate pe substrat ceramic, produse actualmente într-o varietate mare de capsule, însă necesită o formă specială de adaptare atunci când sunt conectate la porturile coaxiale ale unui analizor de rețele vectoriale (VNA). Exemplul prezentat în Figura 2.1 notează semnalul incidentului cu i_1 și i_2 , semnalul reflectat cu r_1 și r_2 , Z_0 fiind impedanța inițială, iar Z_1 impedanța rezultată la capătul îndepărtat al liniei, așa cum ar fi măsurată de VNA conectat la capătul unde avem Z_0 .

2.3 Adaptarea impedanței

2.3.1 Calibrarea planului de referință pentru măsurătoare

Pentru calibrarea precisă a portului VNA în vederea efectuării de măsurători, se utilizează o serie de dispozitive cunoscute sub numele de standarde de calibrare. Acestea vor fi conectate în conformitate cu procedura recomandată de producătorul aparatului [4].

Aici intervine noutatea acestei proceduri: vom efectua o verificare suplimentară a calibrării și o ajustare a planului de referință folosind întregul dispozitiv DUT. În caz contrar, fără o configurare precisă a planului de referință, reprezentarea impedanței complexe pe diagrama Smith va fi eronată și utilizatorul nu va putea efectua un proces corect de adaptare în impedanță.

Configurația de testare, utilizată în experimentele prezentate în continuare, a fost concepută din componentele reprezentate în figura. 2.2. Fiind compusă din VNA, o linie de transmisie sau un cablu coaxial (C), conector de adaptare (B) și dispozitiv DUT (A). Planurile fizice de terminare a fiecărei componente sunt reprezentate cu o linie punctată verticală.

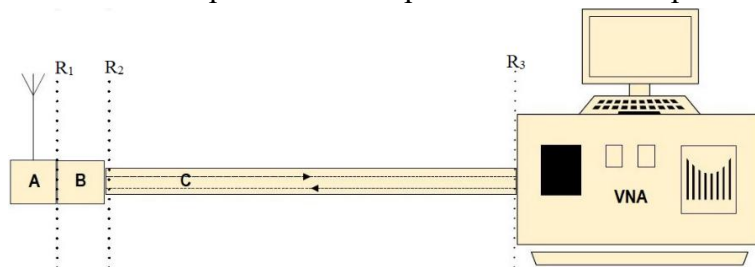


Figura 2.2 Reprezentare simplificată a sistemului de măsură

Cu ajutorul acestei reprezentări, putem observa că planul de referință după calibrarea unui port este situat la limita dintre adaptor și dispozitiv, adică planul notat R1. De fapt, planul de referință este măsurat ca fiind în interiorul sarcinilor de calibrare sau conectorilor adaptorului.

2.4 Proceduri de adaptare în impedanță

În procesul de adaptare a impedanței, majoritatea măsurărilor vor avea ca scop reprezentarea impedanței complexe în formatul cartezian ($R+jX$), trasată de VNA pe o diagramă Smith și suplimentar, coeficientul de reflexie $|S_{11}|$ măsurat la unul din porturi. Coeficientul de reflexie prezintă utilitate prin faptul că realizează o cuantificare a procentului de putere reflectată din totalul puterii injectate de analizorul de rețea, datorată de regulă unei discontinuități de impedanță în linia de transmisie și DUT.

Un dezavantaj al acestui stil de lucru este reprezentat de limitările de frecvență introduse de componentele LC disponibile în comerț. Din acest motiv, de cele mai multe ori sistemul ce utilizează o astfel de soluție va fi limitat la capătul superior al benzii UHF – echivalent cu un maxim de 3GHz. Dincolo de această bandă de frecvență, capacitatea și inductanța parazite introduse de capsula componentei încep să domine valoarea nominală a componentelor, această situație sugerează necesitatea utilizării altor tipuri de circuite.

2.5 Rezultatele obținute

Circuitul de testare a fost realizat fizic sub forma unui PCB cu două straturi, ce utilizează dielectric FR4 TG 130-140, cu o permitivitate relativă de 4.3, grosime de 1.6 mm și placat cu cupru de 30 μ m. O atenție deosebită a fost acordată proiectării planului de masă pentru acest PCB pentru a se crea o zonă în jurul antenei unde să nu avem structuri metalice și pentru minimizarea capacităților parazitare introduse. Pentru a minimiza pierderea puterii RF, linia de transmisie ce face legătura între conectorul SMA și antenă a fost proiectată pentru a se obține o impedanță caracteristică de 50 ohmi. Cu toate acestea, multe din modificările fizice ce aduc un impact asupra profilului de impedanță pot fi anulate în timpul procesului de adaptare. Rezultatele obținute după optimizarea antenei Johansson de 433 MHz sunt reprezentate grafic pe diagrama Smith pe baza punctelor de date obținute din măsurătorile efectuate cu VNA. Graficul coeficientului de reflexie obținut după experimentele de adaptare în impedanță, este prezentat în figura 2.9 și confirmă un transfer foarte bun de putere către antenă într-o lățime de bandă de 8MHz. Banda de frecvență utilă a fost determinată luând în considerare un coeficient de reflexie mai bun de -10dB și o frecvență centrală de 433MHz. Cea mai bună performanță se obține la frecvența de rezonanță de 433MHz, unde $|S_{11}|$ atinge o valoare de -15dB, ce corespunde unei eficiențe de transmisie de peste 96%.

3.Stadiul Tehnologiei Antenelor Wearable

În prezent, tehnologia comunicațiilor fără fir necesită antene planare miniaturizate de bandă largă pentru a fi utilizate în proiectarea numeroaselor dispozitive fără fir. Așadar vor fi utilizate cu precădere în benzile utilizate pentru ISM (Industrial Scientific Medical), WLAN (Wireless Local Area Network), Bluetooth și telefonie mobilă [15]. Aceste tehnologii de comunicații fără fir, necesită din partea antenei performanțe ridicate și un nivel cât mai bun de miniaturizare care pot fi obținute prin sisteme de antene compacte [16].

3.1 Evoluția tehnologiei

Industria producătoare de echipamente electronice înregistrează o cerere crescândă pentru dispozitive „wearable” - sisteme electronice atașabile corpului utilizatorilor. Progresul tehnic global a permis miniaturizarea avansată, transformând dispozitivele electronice în componente integrate în obiecte cotidiene sau chiar în corpul uman prin implanturi. Un exemplu relevant sunt pantofii cu senzori biomedicali care măsoară parametri vitali precum tensiunea arterială sau ritmul cardiac, transmițând datele instantaneu către telefoane mobile pentru procesare.

Avansurile din nanotehnologie, electronică aplicată și Internet of Things (IoT) au creat noi posibilități pentru dispozitivele de comunicație corporale, utilizate în monitorizarea sănătății și integrarea în sisteme complexe cu acoperire globală. Componentele de comunicație sunt esențiale pentru valorificarea datelor colectate de senzori și facilitarea operațiunilor medicale de îngrijire, diagnosticare sau administrare de medicamente.

3.2 Cerințe și probleme impuse de antenele wearable

Subiectul dezvoltării de antene pentru sisteme *wearable* a fost dificil de abordat de către cercetători și este în plină fază de dezvoltare, dovada fiind numeroasele modele de antenă propuse în literatura de specialitate.

Instalarea antenei integrate direct pe corpul uman, într-un sistem de tip *wearable*, va da naștere la o serie de probleme. Antena va fi îndoită în jurul corpului, va urma mișcările acestuia și se poate deforma permanent. În anumite aplicații, apare și problema realizării unei antene rezistente la apă sau la spălat. Se vor produce de asemenea o serie de interacțiuni între antenă și corp, ce vor duce la modificarea parametrilor electrici ai antenei, a directivității și la absorbția unei părți din energia radiată. De interes este, de asemenea, rata de absorbție specifice (SAR) în organism a energiei electromagnetice.

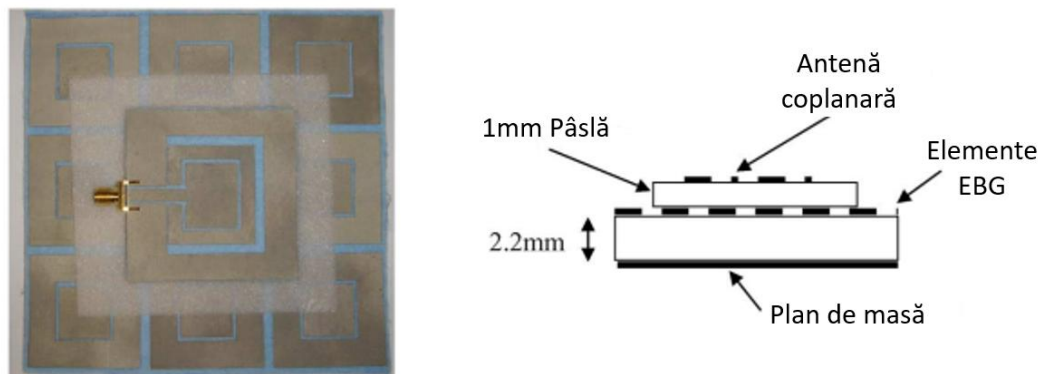


Figura 3.3 Antenă textilă coplanară cu plan EBG [24]

Au fost realizate proiecte pentru antene care încorporează un material care blochează câmpul electromagnetic pentru o anumită bandă de frecvențe, acestea vor fi numite în continuare EBG (*Electromagnetic band-gap*) iar proiectarea lor a fost raportată în [20] și [24]. Stratul EBG, prezentat în figura 3.3, oferă avantajul reducerii nivelului de radiație emisă de la antenă către corpul uman și prin urmare, o reducere a radiațiilor absorbite de organism.

3.3 Modelarea corpului uman

Proprietățile electromagnetice ale corpului uman variază semnificativ în funcție de tipul de țesut și de frecvența radiației electromagnetice la care este expus. Interacțiunea depinde, de asemenea, de forma suprafeței corpului uman deoarece influențează gradul de cuplare și transmitere a energiei. Din cauza complexității și varietății mari, se realizează o simplificare prin care se consideră că există două tipuri de suprafețe: plane și curbate. Cu toate acestea, în realitate suprafețele considerate plate au totuși o anumită curbură, care poate fi neglijată având în vedere punctul de vedere practic. Pentru a explora proprietățile acestor variații de suprafață și pentru a permite proiectarea și testarea antenelor și a transceiverului pentru comunicațiile direct de pe corp, trebuie găsit un model de aproximare pentru corpul uman.

3.4 Antene pe substrat textil

În zilele noastre, antenele ce pot fi purtate pe haine sau pe corpul uman („wearable”) prezintă mare interes pentru industria din domeniul IoT (internetul lucrurilor) datorită posibilităților oferite de a integra funcționalitatea completă a sistemului electronic în îmbrăcăminte. Se manifestă interese tot mai mari în cercetarea tehnologiei ce stă la baza producției antenelor destinate unor aplicații vestimentare inteligente [34].

Adaptarea de impedanță a antenei cu sistemul radio poate fi realizată în principal prin două modalități: prin obținerea unei impedanțe a sursei egală cu conjugatul complex al impedanței sarcinii sau prin crearea de impedanțe complexe care au o parte imaginară nulă,

atât pentru sursă, cât și pentru sarcină. Prima metodă este utilizată în cea mai mare parte atunci când se realizează adaptare amplificatoarelor de putere cu alte etape RF [38], dar în cazul antenelor și liniilor de transmisie este de preferat să se realizeze adaptarea la impedanța caracteristică a liniei, care în general are o valoare pur rezistivă standard (50, 75, 300 ohmi) [38].

Performanța radio în banda de frecvență UHF depinde de lungimea liniei de transmisie, de dispunerea circuitului, de obiectele din proximitatea antenei, de corpul uman de temperatură și umiditate. Aceștia sunt principalii factori care vor avea o influență asupra impedanței și pot reduce foarte mult performanța dacă nu sunt luați în considerare.

3.5 Proiectarea antenei planare

Modul de realizare și forma antenei, au o mare influență asupra performanței electrice și compatibilității cu anumite aplicații. Antenele planare sunt preferate în multe sisteme moderne pentru comunicații datorită dimensiunilor compacte, greutății reduse, costului redus, fabricării simple și a frecvenței de operare ușor de stabilit [42].

Pentru straturile conductoare ale antenei, am ales să folosim un material produs de compania 3M™ sub numele de *Fabric Tape CN-3190*. Acesta este realizat sub forma unei benzi adezivă acrilice cu rol de ecranare, ce are o grosime de doar 0,1 mm. Banda produsă de 3M este recomandată pentru aplicații precum împământarea și ecranarea EMI a echipamentelor, componentelor și camerelor ecranate. Banda are aplicat un material adeziv pe o singură parte și este acoperită de o folie detașabilă ce permite tăierea și manipularea ușoară utilizând o matriță. [41]

În cercetarea noastră, s-a realizat o variație pentru aria de trunchiere la două colțuri cu scopul de a găsi dimensiunile potrivite pentru care se vor obține cele mai bune performanțe electrice. De asemenea, regiunea punctului de alimentare a fost modificată pentru reglarea fină a impedanței de intrare a antenei și a coeficientului de reflexie.

3.6 Rezultate simulare

Analiza prin simulare a fost realizată folosind Ansys HFSS, un software multifuncțional de simulare electromagnetică 3D care permite proiectarea circuitelor RF prin simularea comportamentului înainte de fabricarea prototipului.

Mediul complex al corpului uman influențează semnificativ impedanța de intrare a antenei, convertind o parte din energie în căldură și generând pierderi observabile prin variația coeficientului de reflexie.

În simulări, s-a implementat un model personalizat pentru țesutul uman, format din trei straturi suprapuse: piele, grăsime și mușchi, fiecare cu parametri și grosimi specifice. Modelul consideră efectele corpului uman până la o grosime de 20mm, deoarece la frecvențe

ridicate și putere redusă, radiația este absorbită majoritar de straturile superioare. Structurile osoase și organele, fiind situate la adâncimi mai mari, au fost neglijate. Simulările realizate cu acest model au produs rezultate concordante cu măsurătorile reale.

Pentru optimizarea performanțelor, s-au utilizat instrumente de simulare care permit variații parametrice ale dimensiunilor fizice ale antenei. Deși dimensiunile suprafeței de radiație pot fi calculate teoretic cu precizie, parametrii geometrici mai mici au necesitat o abordare experimentală pentru determinarea valorilor optime.

3.7 Rezultate obținute prin măsurători

Pentru a valida modelul propus, au fost fabricate mai multe prototipuri de antenă, pe care au fost efectuate o serie de măsurători și experimente pentru a dovedi validitatea procesului. Experimentele s-au axat pe banda de radiofrecvență UHF, cu ajutorul antenelor de 2.4 GHz având material textil de substrat. În experimentele noastre, performanța a fost evaluată prin măsurarea coeficientului de reflexie a semnalului la intrare în antenă, a factorului VSWR, variația impedanței față de frecvență, a lățimii de bandă și prin testarea tuturor acestor factori de performanță în apropierea unui corp uman.

În experimentul prezentat aici, performanța proiectată a antenei a fost evaluată prin măsurarea variației performanțelor electrice, într-o bandă largă de frecvențe, astfel încât să fie cuprinsă banda de 2.4 GHz utilizată comercial pentru Wi-Fi, Bluetooth și alte tipuri de comunicații. Implementarea antenei reale este reprezentată în figura 3.14. Aceasta a fost asamblată fizic pe un material de bază din bumbac 100%, cu o grosime de 0,8 mm și o permeabilitate relativă de 2.6. O atenție deosebită a fost acordată pentru a se realiza alinierea precisă a suprafeței radiante și a planului de masă ce formează antena. Pentru a minimiza pierderea de putere, traseul de alimentare de la conectorul SMA la antenă este implementată folosind o linie coaxială de 50ohm cu o lungime de 10cm și terminale de lipire foarte scurte.

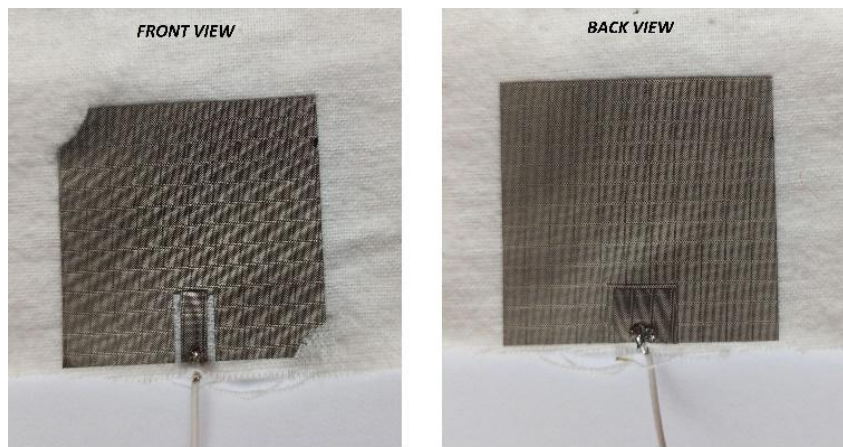


Figura 3.14 Realizarea practică a antenei pe mediu textil

4. Materiale Inovatoare pentru Antene Wearable

Sursele de energie regenerabilă includ antene integrate în îmbrăcăminte sau în diverse obiecte, care captează energia emisiilor radio pentru a fi ulterior convertită și stocată, oferind astfel o soluție inovatoare și sustenabilă pentru alimentarea dispozitivelor electronice. În domeniul aplicațiilor medicale, antenele și electrozii sunt esențiali pentru măsurători electrice precise, permițând conectarea mai multor senzori pe corp, cum ar fi electrozii ECG și EEG, senzori de conductivitate electrică a pielii sau electro-stimulatoare musculare, contribuind astfel la monitorizarea și îmbunătățirea stării de sănătate a pacienților.

4.1 Domenii de utilizare pentru materiale textile electroconductoare

Antenele RFID sunt utilizate în diverse aplicații pentru uz casnic, wearable sau industrial, facilitând identificarea automată a utilizatorului, urmărirea și numărarea obiectelor, oferind astfel soluții avansate pentru gestionarea resurselor și securitatea datelor. Circuitele electronice organice, cum ar fi OLED, OFET și celulele solare, pot fi integrate în materialele textile utilizate în mod curent pentru îmbrăcăminte sau alte obiecte uzuale, aducând astfel tehnologia de vârf în viața de zi cu zi. În activitățile sportive, aceste tehnologii permit monitorizarea activității, măsurarea performanțelor, stimularea musculară și monitorizarea somnului, contribuind la optimizarea antrenamentelor și la îmbunătățirea stării generale de sănătate a sportivilor.

4.2 Caracterizarea electrică

Materialele substratului au în principal rolul de a susține partea conductoare electrică a unei antene și de a îmbunătăți proprietățile de radiație. Deci și aceste materiale vor influența proprietățile antenei wearable. În plus, majoritatea materialelor flexibile au un factor de permeabilitate mare iar tangenta unghiului de pierderi are valori reduse, ceea ce crește și mai mult performanța antenelor wearable. În studiile realizate până acum, au fost cercetate performanțele pentru numeroase tipuri de substraturi flexibile pentru antene wearable, câteva exemple ar fi mătasea, lâna, denim, Cordura, lână sintetică, pâsla și altele [55, 56].

Diverse materiale polimerice, precum poliamida, PET, PDMS [54] sau polimeri lichizi (LP) [57] au fost utilizate pentru antene flexibile și transparente, deoarece au oferit flexibilitate ridicată, pierderi scăzute și grosimi reduse. În plus, materialele polimerice prezintă proprietăți electrice și mecanice bune, care garantează un comportament bun la deformare, condiție absolut necesară pentru acest tip de antene [58-59]. Se remarcă în studii

utilizarea substraturilor polimerice pentru antene wearable sau alte proiecte complexe precum antenele metalice lichide [49].

4.3 Materiale flexibile

Tehnologia țesăturilor electrice conductoare este cunoscută deja de ceva timp, astfel de țesături au fost pentru prima dată fabricate prin amestecarea unei pulberi conductoare cu materiale polimerice în stare topită, înainte de a fi extrudate fibrele din care se face materialul. Astfel de pulberi pot include, de exemplu, particule de carbon, particule de argint sau chiar particule acoperite cu argint sau aur. În mod curent, doar trei clase de materiale sunt utilizate în combinație cu alte materiale pentru a produce proprietăți conductoare: metale, alotropi de carbon și polimeri conductivi intrinseci (ICP). Iar pentru aplicații semiconductoare și antistatice, se pot utiliza ionomeri și siliconi.

4.4 Materiale conductoare

Antena wearable este de obicei compusă din două suprafețe conductoare aflate în opoziție de fază din punct de vedere electric. Evaluarea materialelor conductoare se poate face urmărind caracteristici precum rezistivitatea electrică, conductivitatea, elasticitatea, rezistența la rupere, rezistența la tracțiune și posibilitatea de integrare cu alte materiale flexibile. Există numeroase exemple în care au fost utilizate diverse materiale conductoare rigide pentru realizarea antenelor wearable. Acest tipuri de materiale au conductivitate ridicată, prezintă costuri reduse și pot fi integrate împreună cu substraturi textile folosind materiale laminate adezive fără a se utiliza prinderi mecanice sau tehnici de coasere.

În plus, caracteristicile unice ale polimerilor conductivi, precum proprietățile electrice, mecanice, dar și posibilitatea de a fi utilizate ca materiale biodegradabile, reciclabile și hidrofobe, le-au permis să fie utilizate în diverse aplicații, precum senzori, diode emițătoare de lumină, pile electrice și acumulatori etc. [58]. În plus, polimerii sunt materiale ce prezintă un nivel redus de pierderi, au stabilitate ridicată în condiții umede datorită ratei scăzute de absorbție a umidității, ceea ce le face o alegere potrivită pentru aplicații wearable [59].

4.5 Adezivi și paste electroconductoare

Prin acest studiu mi-am propus să abordez influența adezivilor electroconductori asupra proprietăților electrice și mecanice ale circuitului în care sunt utilizate, realizarea unor comparații între diverse tipuri de pasta electroconductoare, studiul compoziției acestora raportat la performanțele electromecanice.

Industria pastele electroconductoare s-a dezvoltat foarte mult de când se utilizează preponderent aliaje fără plumb în industria de producție electronică. S-a constatat repede că

tehnica de interconectare bazată pe aliaje fără plumb a crescut stresul termic al cablajului imprimat și al componentelor electronice dar în același timp a păstrat toate problemele bine cunoscute legate de lipirea cu aliaje *SnPb* (reziduuri, goluri, scurtcircuitate etc.).

În acest studiu ne vom concentra asupra adezivilor conductori ce prezintă o distribuție izotropă, adică sunt buni conductori electrici în toate direcțiile și sunt cei mai potriviți pentru lipirea plachetelor de siliciu, lipirea cipurilor, atașarea componentelor SMD sau realizarea de trasee electrice. Adezivii conductori anizotropi, conduc curentul electric preponderent într-o singură direcție, astfel încât acestea pot fi utilizate pentru componente electronice foarte sensibile, așa cum este cazul dispozitivelor LED, afișajelor LCD și a circuitelor dedicate pentru RFID.

4.6 Metode de fabricație

Metodele de fabricație joacă un rol cheie în proiectarea antenelor *wearable* deoarece sunt cele care determină precizia de realizare, costul și durata de execuție ale produsului. Cele mai recente metode de fabricație pentru antenele flexibile utilizează tehnologii precum jetul de cerneală 3D, tăierea cu laser în infraroșu și prin instrumente de mână. Vom realiza acum o scurtă trecere în revistă a acestor metode de fabricație:

4.6.1 Imprimarea cu șablon

Reprezintă o metodă simplă, care a fost utilizată de industria electronică în mai multe aplicații [62]. În această metodă, o lamă elastică, de obicei din silicon, este dirijată cu o mișcare liniară ce va presa șablonul să intre în contact cu materialul pe care se realizează imprimarea. Cerneala va fi presată prin zonele expuse ale șablonului și va ajunge astfel pe substrat, în acest fel proiectând o imagine a șablonului [63]. Această metodă poate fi utilizată și în cazul poliesterului sau a materialelor din oțel inoxidabil. În mod uzual, se folosesc trei tehnici standard de imprimare cu șablon, există astfel metode: rotativă, cu platformă sau cu cilindru.

4.6.2 Flexografia

Reprezintă un procedeu de imprimare similar cu cel de imprimare tipografică, așadar utilizează un clișeu tipografic reliefat din material flexibil. Utilizând această metodă, o imagine este generată utilizând procesul de imprimare, așa cum se arată în figura 4.5a.

Suprafața de protuberanță a matricei plăcii de imprimare este umplută cu cerneală, în timp ce zona încastrată nu are cerneală. Pentru imprimarea imaginii, suprafața matricei proeminente conține cerneală și ia contact cu materialul de substrat [68]. Cu această metodă se poate obține un debit ridicat, rezoluție clară și costuri reduse. Necesită o cerneală conductoare cu vâscozitate scăzută și a fost utilizată cu succes în cazul antenelor RFID.

Tabelul 6 prezintă o comparație succintă între principalele procedee de imprimare.

4.6.3 Imprimare cu jet de cerneală

Dacă se utilizează această metodă de imprimare, caracteristicile electrice ale antenei și a circuitelor RF vor depinde de proprietățile cernelurilor conductoare. Imprimantele cu jet de cerneală funcționează prin aplicarea unei mici picături de cerneală, fiind necesară o cantitate de ordinul pico litrilor pentru a produce forme clare și precise. Această metodă utilizează cerneluri conductoare, ce conțin de obicei nanoparticulele de argint.

Metoda de imprimare cu jet de cerneală poate fi realizată prin două metode, cu jet continu de cerneală sau cu picături comandate. Atunci când primesc impulsuri de comandă, capetele jetului de cerneală aplică pulsuri de presiune pe cerneală utilizând un actuator piezoceramic sau un termoelement, pentru eliberarea unei picături de cerneală printr-o duză.

4.6.4 Coaserea și brodarea

Procesul de coasere reprezintă o metodă simplă dar eficientă de realizare a unei antene pe suport textil, compatibilă cu cerințele domeniului wearable. Pe lângă realizarea efectivă a sistemului radiant, procedeele de coasere și brodare pot fi utilizate pentru a proiecta diverse componente metalice auxiliare precum conexiunile „via”, transformatoare sferice de undă, linii de transmisie sau interconexiuni folosind țesături conductoare și fire [70].

În [71] tehnica de cusut a fost utilizată pentru a conecta suprafețe de cupru pe o țesătură conductoare poliester-taffeta, cu rol de substrat, pentru a realiza antenă planară de tip F inversat (PIFA). În alt studiu [73], firele conductoare au fost folosite pentru a forma trasee conductoare pe țesături, sau broderii cu cusături încrucișate, așa cum este exemplificat în figura 4.6a.

Similar coaserii și cu această metodă se poate realiza un design de antenă pe materiale textile folosind firele conductoare. Odată cu evoluția tehnologiei, mașinile de brodat asistate de calculator sunt acum disponibile pentru producția antenelor prin broderie, după se arată în figura 4.6b [75].

5. Studiu materiale pentru realizarea structurilor de radiofrecvență

Pentru a aduce îmbunătățiri în ceea ce privește ergonomia îmbrăcăminte, există numeroase studii ce privesc realizarea de linii de transmisie textile[86] și antene realizate pe substrat textil. Noul domeniu științific care se ocupă cu implementarea acestor tipuri de linii de transmisie și a diferitelor tipuri de sisteme electronice moderne pentru textile a fost numit *Textronics* [87] în unele lucrări.

5.1 Caracterizarea electrică a materialelor

În ceea ce privește modalitatea de implementare a unei linii de transmisie într-un substrat textil, există mai multe tipuri constructive [87]:

1. Aplicarea directă a liniilor de transmisie conductoare sub formă de fire conductoare (izolate individual) sau fire electroconductoare la nivelul procesului de producție rezultând produse textile plate precum țesături și tricotaje;
2. Tipărirea pe suprafața materialului textil a unui mediu electroconductor;
3. Pulverizarea sau depunerea unui mediu electroconductor pe un material textil planar;
4. Încorporarea materialelor electroconductoare folosind metode de cusut sau brodat;
5. Lipirea unor suprafețe conductive, realizate din metale;

5.2 Analiza experimentală și simularea

În prima fază am utilizat în măsurători metoda condensatorului planar deoarece permite realizarea unor structuri simple și stabile mecanic. Experimentele inițiale au fost realizate prin construirea a 5 condensatoare pe baza unor materiale dielectrice diferite: 3 materiale textile și două tipuri de plastic utilizate cu precădere la imprimarea 3D. Materialele textile P1, P2 și P3 au în compoziție tipuri diverse de țesături, sintetice și naturale în proporțiile prezentate în tabelul 9. Astfel materialul P1 este realizat integral din bumbac natural, iar mostrele P2 și P3 sunt materiale sintetice [87].

Materialul P4 nu a putut fi utilizat în aceste experimente deoarece conține trasee conductive cu fire din argint, ceea ce nu îl face nepotrivit în aplicații unde este necesar un material cu conductivitate electrică mică. Am ținut totuși să menționez acest material deoarece merită studiat cu alte metode și ar putea să facă obiectul unor aplicații de linii de transmisie, protecție ESD sau pentru transportul unor curenți electrici mari la nivelul unor suprafețe textile.

În acest raport se compară performanțele electrice ale mai multor materiale utilizate în linii de transmisie, respectiv P1, P2, P3, ABS și PLA. Materialul P3, realizat pe baza de *Kermel*, se evidențiază prin performanțe bune la frecvențe mari, având un nivel mai mic de pierderi față de P1 și P2, iar coeficientul de reflexie indică o funcționare foarte bună până la frecvențe de 2.5GHz.

Materialul ABS are performanțe inferioare celorlalte materiale, nivelul pierderilor de transmisie fiind foarte mare, iar coeficientul S21 crește aproape liniar cu frecvența. Pentru linia de transmisie realizată pe un substrat de tip P2, coeficientul de reflexie indică o funcționare foarte bună până la frecvențe de 2.7GHz, dar pierderile de transmisie cresc proporțional cu frecvența și sunt ușor mai mari decât cele obținute la materialul P1. Pe de altă parte, materialul de tip plastic PLA are un comportament bun până la aproape 3GHz, ceea ce îl face o opțiune mai bună decât varianta de plastic ABS, folosită de asemenea la imprimarea suprafețelor 3D.

Materialul P1, realizat integral din bumbac, se evidențiază prin un nivel scăzut de pierderi și coeficientul de reflexie indică o funcționare foarte bună până la frecvențe de 3GHz. Coeficientul S11 crește liniar, ceea ce reprezintă un comportament normal pentru un astfel de material și indică faptul că nu se înregistrează pierderi introduse de alte componente ale sistemului de măsură.

Mai departe am continuat investigațiile privind performanțele acestor materiale prin evaluarea unor structuri de antene realizate pe substraturi de piele, plastic sau materiale textile. Simulările au fost realizate utilizând programul HFSS produs de compania Ansys, acesta fiind o unealtă specializată pentru simularea comportamentului structurilor complexe la înaltă frecvență.

Pentru a studia influența unor mici modificări geometrice ale modului în care sunt realizate structurile, am realizat o comparație între rezultatele de simulare pentru o structura de antena cu margini drepte și cu margini rotunjite. Diferențele se vad în special din performanțele numerice, acolo iese în evidență o îmbunătățire la varianta ce utilizează colțuri rotunjite.

6. Studii de caz

6.1 Proiectarea și simularea unui model de antenă „wearable”

În acest studiu, este simulată, construită și măsurată o antenă compact, special concepută pentru a fi complet integrată într-o curea din piele. Ne-am propus realizarea unui concept de antenă cu bandă triplă de funcționare, astfel încât să fie utilă pentru aplicații Wi-Fi. Arhitectura elementului radiant este realizată dintr-o serie de arii circulare, iar planul de la masă va conține mai multe structuri cu decupaje, cunoscute în literatura de specialitate sub numele de DGS (*defected ground structures*).

6.1.1 Topologia propusă

Cel mai adesea, antenele care au dimensiuni reduse din punct de vedere electric îngustează lățimea de bandă în care avem adaptare de impedanță, reduc performanțele legate de câștig sau directivitate. Situația este similară și pentru un model de antenă planară, care deși oferă un profil mecanic de dimensiuni reduse și sunt preferate pentru comunicațiile mobile, introduc o provocare în ceea ce privește îmbunătățirea lățimii de bandă.

În arhitectura propusă, am optat pentru o matrice de antene planare care utilizează o singură linie de transmisie de tip microstrip, situată în același plan cu elementele radiante. Teoria de funcționare și metodele de calcul sunt prezentate deja în alte lucrări publicate [93], astfel că ne vom concentra pe optimizarea pentru cea mai bună performanță și pe introducerea unui concept inedit care poate fi realizat pe o curea din piele.

6.1.2 Rezultate obținute prin simulare

În experimentele simulate, s-a pus accent pe reprezentarea grafică a coeficientului de reflexie pentru diferite variații ale parametrilor mecanici pentru a optimiza forma și dimensiunile elementelor ce alcătuiesc antena. Cu ajutorul acestei tehnici de optimizare, simularea parametrică a fost efectuată pentru raza cercurilor, lungimea liniei de transmisie către punctul de alimentare, lungimea și poziția structurilor DGS. Pentru a investiga efectul introdus de prezența mai multor structuri DGS în planul antenei la sol, am studiat distribuția curentului la frecvențe diferite, fiecare din benzi diferite de frecvență, dar în aceeași poziție a fazei.

Pentru a putea optimiza performanțele, au fost create scenarii de simulare suplimentare, în care lungimea structurii DGS este variată de la 23 mm la 27 mm. Rezultate similare au fost obținute în urma simulării parametrice pentru punctul de amplasare al structurilor DGS, cu pași mici, de la 5 mm la 7 mm. Se poate observa că variațiile punctului

de amplasare al DGS poate avea influențe asupra proprietăților electrice, în principal asupra frecvenței de rezonanță pentru benzile de frecvență peste 5GHz. Performanța optimă în toate cele trei benzi de frecvență dorite a fost obținută pentru o valoare de 5 mm a punctului de amplasare.

6.1.3 Rezultate obținute prin măsurători

Prototipul acestei antene a fost fabricat pe o curea din piele naturală 100%, ce are o grosime de 3,5 mm, o permitivitate relativă de 1.8 și un coeficient de pierderi egal cu 0.05. Straturile conductoare sunt realizate folosind banda de ecranare folie de cupru 3M 1181, care are o grosime de 36μm și o conductivitate electrică de doar 8 μΩ / cm².

Acest proiect de antenă prezintă o performanță foarte bună a impedanței, având un coeficient de reflexie de cel mult -10 dB în benzile WLAN 2.4GHz/Bluetooth (2.4 – 2.48GHz), banda inferioară de 5GHz (5.15 – 5.35GHz) și banda superioară de 5GHz (5.725 – 5.825GHz). În experimentele noastre, performanța a fost evaluată prin măsurarea pierderilor de putere cauzate de reflexii la intrarea semnalului în antenă. Acestea reprezintă practic variația impedanței față de frecvență, lățimea de bandă utilizabilă și pot de asemenea verifica stabilitatea performanțelor electrice sub influența temperaturii sau în prezența altor corpuri conductive.

Curba de variație a coeficientului de reflexie, scoate în evidență două puncte principale de rezonanță, care compun benzile de 2.4 GHz și 5GHz - înalte și joase. Nivelul de putere reflectat coboară la un minim de -14dB, ceea ce corespunde unei eficiențe foarte bune în ceea ce privește transferul de putere, dacă luăm în considerare un coeficient acceptabil de reflexie mai bun de -10dB. Lățimea de bandă măsurată are o valoare de aproximativ 110MHz pentru banda de 2.4GHz și 750MHz în cazul benzilor de 5GHz. Aceste rezultate prezintă performanțe similare cu cele obținute în simulare fără să existe diferențe notabile pentru dimensiunile mecanice ale elementelor ce constituie antena.

Studiul a fost realizat prin simulări electromagnetice în Ansys HFSS pentru optimizarea parametrilor antenei, urmate de implementarea unui prototip real utilizând materiale conductoare standard și piele naturală ca substrat. Performanțele au fost evaluate atât prin simulări, cât și prin măsurători experimentale, cu antena amplasată pe un corp uman. Rezultatele confirmă aplicabilitatea acestora în domenii precum IoT, electrocasnice, aplicații medicale și militare, în special pentru comunicații WLAN.

O contribuție importantă a fost proiectarea unei antene compacte cu bandă triplă, integrabilă într-o curea din piele, destinată rețelelor WBAN (Wireless Body Area Networks) și aplicațiilor Wi-Fi. Designul a inclus structuri circulare plane și utilizarea tehnologiei DGS (Defected Ground Structures) pentru îmbunătățirea lățimii de bandă și optimizarea caracteristicilor electromagnetice. Simulările parametrice au permis ajustarea dimensiunilor antenei și selectarea configurației optime pentru frecvențele de operare, îmbunătățind coeficientul de reflexie și adaptarea de impedanță.

6.2 Definirea și importanța pH-ului în studiul lichidelor

Măsurarea pH-ului este una dintre cele mai frecvente și semnificative evaluări efectuate în diverse domenii, inclusiv în industrie și în monitorizarea calității apei potabile. Măsurarea pH-ului poate furniza informații esențiale despre caracteristicile chimice și fizice ale unui lichid, având un impact semnificativ asupra evaluării sale calitative și a potențialelor sale utilizări. Relația dintre pH și potențialul electric produs de o sondă de pH este reprezentată în figura 6.15.

Valoarea pH-ului este printre puținii parametri chimici, omniprezent în măsurătorile de calitate a apei și în același timp, unul dintre cei mai importanți parametrii fundamentali care dictează rezultatul unei largi game de reacții chimice și biologice. Parametrul pH prezintă importanță și la guvernarea a funcției normale a organismului uman sau pentru a controla anumite procese industriale.

6.2.1 Tehnici actuale de măsurare a pH-ului

Sondele de pH optice utilizează în general materiale sensibile la pH care își schimbă absorbția UV și își optimizează proprietățile optice în funcție de nivelurile de pH, precum indicele de refracție, polarizarea, absorbția [102], iar într-un studiu [103] s-a injectat un indicator fluorescent dependent de pH într-o serpentină micro fluidică. Acest semnal fluorescent a fost înregistrat în intervalul de pH 2,5-9; totuși, sensibilitatea nu este stabilă, dar crește de la 6 mV/pH la bazic până la 43 mV/pH la nivelul de pH acid.

6.2.2 Sistem electronic pentru măsurarea pH-ului în lichide

Pentru a realiza verificări asupra substanțelor de test, am utilizat un aparat de măsură comercial, specializat pentru apă, dar am ales să produc și propriul instrument, realizat pe baza unui senzor comercial (similar cu cel din figura 6.16), împreună cu un microcontroler cu arhitectură pe 8 biți. Programul software a fost conceput pentru a facilita funcționarea și citirea unui senzor de pH, modelul SEN-0161, care este un senzor analogic de pH.

Frecvența de taieră este suficient de joasă astfel încât să elimine zgomotul și să permită actualizarea datelor suficient de rapid. Protecția, ecranarea, și izolația față de celelalte componente reprezintă alte bune practici ce trebuie utilizate pentru a minimiza curenții paraziți, ce pot influența intrarea de înaltă impedanță a amplificatorului AD8603. Valorile tipice și modul de variație a tensiunii generate de electrodul de pH sunt prezentate în figura 6.1. Pe baza ecuației Nernst, tensiunea totală de la sonda poate varia de la ± 414 mV ($\pm 59,14$ mV/pH) la 25°C la ± 490 mV (± 70 mV/pH) la 80°C.

6.2.3 Sonde RF de măsurare a pH-ului în soluții lichide

Ideea principală prezentată în această lucrare este stimularea electrozilor senzorului prin scufundarea în soluții standard, cu valori cunoscute de pH ce vor permite cuantizarea rezultatelor pe baza valorilor deja cunoscute pentru pH. Prezența lichidului va duce la modificarea constantei dielectrice a senzorului și produc o schimbare în frecvența de rezonanță a acestuia.

Senzorul prezintă în primul rând o schimbare a frecvenței de rezonanță de circa 50 MHz între apa distilată și soluția standard cu cel mai mare pH (puternic bazică), atunci când senzorul este scufundat complet și o deviație de circa 100 MHz între cea mai acidă soluție și cea mai alcalină soluție. Pentru teste se poate utiliza o cantitate redusă de soluție și conține mai mult înălțimea lichidului decât volumul în sine. Astfel un volum de 50ml, preparat într-un recipient de sticlă, este suficient pentru a permite scufundarea senzorului și de a obține rezultate stabile.

Acest studiu compară performanța unei sonde tradiționale de pH cu electrozi de Ag/AgCl și a unei metode inovative bazate pe unde radio pentru măsurarea pH-ului unui lichid. Măsurarea precisă a pH-ului este esențială în diverse domenii, precum chimia analitică, medicina, tehnologiile de mediu și agricultura.

Sonda de pH cu electrozi Ag/AgCl este un standard electrochimic datorită stabilității și sensibilității sale, bazându-se pe diferența de potențial formată la interfața electrodului cu soluția analizată. Avantajele sale includ robustețea și precizia ridicată, însă poate fi afectată de interferențe chimice, necesită recalibrări frecvente și are un timp de răspuns mai lent.

În schimb, metoda bazată pe unde radio utilizează o structură rezonantă imersată în soluție, înregistrând variații ale parametrilor S11 și S21 pentru a determina nivelul de pH. Aceasta oferă un timp de răspuns mai rapid și este mai puțin influențată de interferențele chimice, dar poate fi afectată de interferențe electromagnetice și necesită echipamente mai complexe. Alegerea metodei optime depinde de cerințele specifice ale aplicației.

6.3 Antene flexibile pentru dispozitive embedded

Odată cu dezvoltarea tehnologiei realității virtuale (RV) și a îmbunătățirii modului în care se realizează interacțiunea om-calculator, utilizarea metodelor naturale și eficiente de interacțiune în mediile virtuale a devenit un subiect intens de cercetare. Se dorește ca dispozitivele HCI să poată captura mișcările corpului uman prin cât mai multe grade de libertate posibile și să le asocieze în mod direct cu cele din jocurile video.

6.3.1 Modelarea CAD pentru dispozitiv și antenă

Prin aceasta lucrare am dezvoltat un design care permite manipularea și interpretarea gesturilor de la o singură mână, astfel am creat o formă circulară mică și ușoară, asemănătoare unei mingi.

Având în vedere dimensiunile interne reduse ale dispozitivului și forma specifică, nu am putut utiliza o antenă externă standard. În acest caz, a fost proiectată o antenă integrată în plastic, simulată, produsă și plasată în jumătatea superioară a carcasei.

Conexiunea între antenă și microcontroler este realizată printr-un cablu coaxial cu diametru mic, utilizând un conector U.FL către PCB-ul microcontrolerului. Pentru substratul antenei a fost utilizată o bandă subțire de Kapton, material cunoscut pentru proprietățile sale dielectrice, mecanice și termice foarte bune. Kapton-ul este un material utilizat în numeroase domenii, inclusiv în realizarea antenelor RF flexibile, datorită unei serii de proprietăți remarcabile.

În măsurătorile prezentate aici, putem observa că antena încorporată în PCB este destul de limitată în ceea ce privește distanța maximă de comunicație, iar designul nostru propus încorporat în plastic a avut performanțe mai bune decât antena omnidirecțională comercială, nu doar la distanțe scurte, ci și la distanțe lungi, astfel că am determinat că este potrivit pentru comunicare la distanțe medii-lungi.

În acest subcapitol am propus un dispozitiv HCI imprimat 3D, realizat din materiale PLA/ABS și echipat cu componente electronice accesibile, ceea ce îl face ușor de construit și potrivit pentru multiple aplicații, precum jocuri video, realitate virtuală și controlul brațelor robotice cu patru grade de libertate.

Un avantaj major al designului este eliminarea conexiunilor fizice între utilizator și computer, datorită unei antene încorporate în plastic și a unei baterii Li-Ion. Experimentele au confirmat optimizarea designului antenei, iar măsurătorile RSSI indică o comunicare eficientă pe distanțe mari prin Bluetooth. Dispozitivul furnizează date fiabile, fiind ideal pentru interacțiunea cu aplicații de realitate virtuală și augmentată.

7. Contribuții și concluzii

Această teză de doctorat explorează tehnologia antenelor wearable, abordând aspecte esențiale precum designul, materialele și integrarea acestora în viața cotidiană. O contribuție fundamentală a fost realizată în etapa inițială a cercetării, unde s-a definit clar metodologia de investigare, direcțiile de studiu și obiectivele strategice. Printr-o analiză riguroasă a literaturii de specialitate, au fost identificate lacunele tehnologice și provocările actuale, stabilind astfel o bază solidă pentru dezvoltarea unor soluții inovatoare.

În plus, procesul de cercetare a fost structurat eficient prin selectarea metodelor adecvate de simulare, proiectare și testare, asigurând o abordare sistematică și reproductibilă. S-au elaborat modele teoretice pentru optimizarea performanței antenelor, iar planificarea experimentală a inclus dezvoltarea de prototipuri și evaluarea acestora în condiții reale de utilizare. Astfel, această contribuție a permis nu doar o gestionare eficientă a etapelor cercetării, ci și validarea unor soluții tehnologice aplicabile, relevante pentru progresul domeniului.

7.1 Contribuții

Capitolul al doilea aduce contribuții semnificative în domeniul ingineriei RF, concentrându-se pe optimizarea transferului de energie și adaptarea impedanței pentru antenele wearable, un subiect de actualitate în contextul creșterii exponențiale a dispozitivelor portabile în aplicațiile moderne.

Această secțiune explică în detaliu provocările și soluțiile asociate adaptării impedanței, un proces esențial pentru maximizarea transferului de energie și minimizarea pierderilor. Prin această lucrare am propus câteva metode practice, adresând limitările teoretice și erorile comune întâlnite în calibrările reale. Prin analiza meticuloasă a factorilor care influențează procesul de adaptare a impedanței, această lucrare contribuie la îmbunătățirea performanței dispozitivelor portabile printr-o mai bună înțelegere și implementare a tehnicilor de adaptare.

Studiile experimentale descrise evidențiază efectul frecvențelor înalte (UHF) asupra parametrilor liniilor și subliniază importanța utilizării unor sisteme de măsură precise, cum ar fi analiza vectorială a rețelelor. Prin tratarea detaliată a relației dintre lungimea electrică și variația impedanței, această secțiune ajută la reducerea erorilor și îmbunătățirea calității semnalului în dispozitivele wearable.

Una dintre contribuțiile cheie este introducerea unei metode validate pentru calibrarea precisă a planului de referință al dispozitivelor testate (DUT). Capitolul dezvoltă o procedură care include verificări suplimentare ale calibrării folosind întregul dispozitiv, reducând astfel erorile ce apar din conectica adițională. Această abordare extinde

metodologiile existente printr-o perspectivă practică, aplicabilă în mod direct ingineriei antenelor wearable, și umple un gol identificat în literatura de specialitate.

În ceea ce privește adaptarea de impedanță, se propune o metodologie structurată pentru reprezentarea și ajustarea impedanței complexe folosind diagrama Smith și componente LC, punând accent pe scenariile întâlnite la frecvențe înalte. Contribuția constă în detalierea metodelor de lucru și a influenței parazite a componentelor, oferind soluții pentru optimizarea adaptării în cazuri speciale și frecvențe critice, peste limita de 3 GHz. Această secțiune este deosebit de valoroasă pentru proiectanții de antene care doresc să minimizeze pierderile și să extindă aplicabilitatea soluțiilor la dispozitivele de nouă generație.

Studiul realizat în capitolul al treilea a avut ca scop principal efectuarea de simulări folosind *Ansys HFSS* pentru procesul de optimizare a parametrilor antenei iar ulterior de a implementa proiectul rezultat din simulări într-un scenariu real. Am propus o metodă simplă de construcție, prin utilizarea țesăturii conductoare standard pe un substrat realizat pe baza unor materiale din bumbac normal, utilizate în general pentru îmbrăcăminte. Această metodă constructivă nu necesită neapărat o mașină de cusut, rezultând astfel o implementare eficientă din punct de vedere al costurilor, care poate fi utilizată pe o mare varietate de circuite de antenă de mici dimensiuni. Performanța a fost evaluată prin simulare, măsurători în condiții ideale și scenarii din viața reală. Rezultatele obținute în experimentele confirmă că acest tip de antenă este potrivită pentru IoT, electrocasnice, aplicații medicale sau militare care necesită comunicații radio în benzile libere de 433MHz și 2.4GHz.

Pentru a pune în evidență comportamentul unora din materialele prezentate în aceste studii, a fost realizată o secțiune de linie de transmisie în topologie microstrip. Conductorii folosiți pentru suprafețe au fost idealizați din punct de vedere al conductivității electrice deoarece s-a urmărit doar influența materialul utilizat pentru realizarea substratului. Un aspect central al cercetării mele a fost evaluarea și optimizarea performanțelor antenelor utilizând substraturi textile și materiale neconvenționale. Am proiectat o linie de transmisie în topologie microstrip pentru a analiza comportamentul diferitelor materiale utilizate ca substrat.

În simulări au fost modelate mai multe tipuri de materiale și au fost comparate performanțele prin măsurare și reprezentare grafică a parametrilor S_{11}/S_{22} și S_{12}/S_{21} , aceste perechi de mărimi vor avea aceeași variație deoarece linia de transmisie și porturile sunt simetrice. Coeficientul de reflexie, reprezentat de parametrul S_{11} și S_{22} , indică gradul de adaptare între impedanța ideală a generatorului și impedanța caracteristică a liniei.

Parametrii S_{12} și S_{21} , ce reprezintă coeficienții de transmisie, vor indica nivelul de pierderi la transportul energiei prin linia de transmisie, fiind corelat cu tangenta unghiului de pierderi, specifică fiecărui material. Am propus utilizarea unor materiale textile cu straturi EBG integrate, care reduc semnificativ SAR-ul (Specific Absorption Rate) – o problemă crucială pentru siguranța antenelor purtabile. Studiile mele arată că un strat EBG poate reduce SAR-ul cu până la 97%, îmbunătățind în același timp câștigul antenei. În plus, am

detaliat metode de optimizare a dimensiunilor liniei microstrip pentru a obține impedanțe precise la frecvențe specifice (2.4 GHz), relevante pentru aplicații WiFi și Bluetooth.

Având proprietăți dielectrice diferite, dimensiunile liniei microstrip au fost recalculat pentru fiecare tip de material astfel încât să obțină o valoare standard de 50 de ohmi la frecvența de lucru de 2.4GHz. A fost aleasă o frecvență destul de ridicată pentru a putea evalua performanțele pentru o viitoare antenă realizată pentru tehnologiile de comunicații din această bandă, în special Wi-Fi și Bluetooth. Apar probleme de proiectare legat de grosimea materialului atunci când se utilizează materiale ce au o constanta dielectrică de valoare redusă, astfel vor rezulta valori mari pentru lățimea traseului. Rezolvarea constă în reducerea grosimii pentru material, astfel încât să se obțină valoarea dorită pentru impedanță iar lățimea traseului să rămână într-un interval de valori practice, de până la 2-3 mm.

În cercetările, am luat în considerare efectele complexe ale interacțiunii antenă-corp, utilizând atât modele numerice (fantome voxel), cât și fizice. S-a demonstrat că interacțiunea electromagnetică poate fi controlată prin utilizarea unor straturi de izolație și materiale dielectrice optimizate, reducând pierderi. Din simulările realizate, se observă o corelație între coeficientul de transmisie și tangenta unghiului de pierderi. Astfel pentru materialele deja cunoscute pentru performanțele lor dielectrice, se obțin performanțe mai bune în ceea ce privește nivelul de pierderi introdus de linie. În schimb, nu a rezultat o variație a profilului de variație a impedanței în funcție de pierderi, acesta depinzând mai mult de dimensiunile geometrice și amplasarea suprafețelor componente ale liniei.

Contribuțiile capitolului cinci constau în dezvoltarea unei metode inovative pentru măsurarea caracteristicilor dielectrice ale materialelor textile și plastice, utilizând condensatoare plane ca tehnică principală de evaluare. Această metodă permite obținerea unor date precise și eficiente referitoare la comportamentul materialelor sub influența câmpurilor electromagnetice, având aplicabilitate în diverse domenii, precum comunicațiile radiofrecvență, tehnologiile de imprimare 3D sau protecția electromagnetică. Tehnica propusă se bazează pe măsurători simple, dar extrem de relevante, permițând stabilirea unor relații clare între geometria materialului, permitivitatea sa și factorul de pierdere. Prin aplicarea acestui model, cercetătorii și inginerii pot evalua rapid performanțele materialelor fără a fi nevoie de echipamente de măsură sofisticate sau de costuri suplimentare.

De asemenea, un alt aport important al lucrării constă în compararea și analiza detaliată a caracteristicilor dielectrice ale diverselor tipuri de materiale textile și plastice, ceea ce furnizează o bază solidă pentru selecția materialelor în aplicațiile de radiofrecvență. În cadrul experimentului, au fost studiate trei materiale textile cu compoziții diferite – bumbac natural și fibre sintetice – și două tipuri de plastic, iar rezultatele obținute au fost comparate cu valorile teoretice pentru permitivitate și factorul de pierdere. Aceste comparații permit identificarea unor tipuri de materiale care pot fi utilizate cu succes în domenii specifice, dar și în optimizarea proceselor de fabricație ale echipamentelor electronice și de telecomunicații.

Un alt aspect inovativ este aplicarea acestui model pentru materiale plastice imprimate 3D, o tehnologie aflată în continuă expansiune. Imprimarea 3D oferă o mare flexibilitate în producerea de structuri complexe, iar cercetările din acest domeniu sunt esențiale pentru adaptarea materialelor la cerințele tot mai diverse ale pieței.

De asemenea, lucrările efectuate în cadrul acestui studiu oferă o înțelegere aprofundată a modului în care diversele tipuri de materiale, naturale sau sintetice, influențează performanțele sistemelor de comunicații de frecvență joasă și medie. Aceasta constituie un pas important în direcția dezvoltării unor soluții mai eficiente pentru materialele folosite în domeniul telecomunicațiilor, iar cercetările viitoare vor putea extinde aceste observații la frecvențe mai mari, relevante pentru comunicațiile moderne.

Studiul realizat în capitolul șase a utilizat în primul rând prin simulare electromagnetică folosind programul *Ansys HFSS*, în scopul optimizării parametrilor fizici ai antenei urmărind creșterea performanțelor electrice. În faza a doua, a fost implementat un prototip real, folosind materiale conductoare standard și un substrat realizat din piele naturală, așa cum este utilizată la fabricarea curelelor vestimentare. Performanța a fost evaluată prin simulare iar măsurătorile au fost realizate cu prototipul amplasat pe un corp uman. Rezultatele obținute în urma experimentelor noastre indică faptul că acest model de antenă poate prezenta utilitate pentru domeniul IoT, electrocasnice, aplicații medicale sau militare, care realizează comunicații WLAN sau în benzi similare. În cadrul cercetării descrise în acest capitol, am adus contribuții în mai multe etape ale procesului de dezvoltare a antenei, de la concepție până la realizarea prototipurilor și evaluarea acestora prin simulare și măsurători experimentale.

Scopul meu a fost de a dezvolta o antenă funcțională pentru Wi-Fi, care să aibă performanțe ridicate, adaptate cerințelor moderne de lățime de bandă și de versatilitate în utilizarea diferitelor benzi de frecvență. În ceea ce privește proiectarea antenei, am propus o arhitectură bazată pe structuri circulare plane și am utilizat structuri defectate de tip DGS (Defected Ground Structures) pentru a îmbunătăți lățimea de bandă și a optimiza caracteristicile electromagnetice ale antenei. Aceste alegeri s-au dovedit esențiale pentru îmbunătățirea performanței antenei, având în vedere că cerințele moderne impun antene de bandă largă, capabile să funcționeze pe mai multe benzi de frecvență. Datorită acestui design inovativ, am reușit să extind lățimea de bandă a antenei și să îmbunătățesc adaptarea de impedanță, obținând rezultate bune în toate cele trei benzi de frecvență specifice aplicațiilor Wi-Fi.

Un aspect important al cercetării a fost realizarea simulărilor pentru optimizarea geometriei antenei. Am efectuat simulări parametrice detaliate, variind dimensiunile elementelor radiante, precum și structura DGS, pentru a ajusta eficient performanțele antenei în funcție de frecvențele de operare. Aceste simulări m-au ajutat să identific cele mai bune configurații de dimensiuni, astfel încât să obțin performanțe optime, în special în ceea ce privește coeficientul de reflexie și lățimea de bandă. De asemenea, am testat diverse combinații de materiale și am selectat folie de cupru conductivă pentru realizarea straturilor radiante și a planului de masă, ceea ce a simplificat procesul de fabricație și a redus costurile prototipurilor.

În ceea ce privește măsurătorile experimentale, am evaluat performanța antenei construite, măsurând coeficientul de reflexie și lățimea de bandă la diferite frecvențe. Rezultatele experimentale au confirmat validitatea simulărilor și au demonstrat că prototipul construit îndeplinește cerințele de performanță pentru aplicațiile Wi-Fi, cu un coeficient de reflexie foarte scăzut (-10 dB sau mai mic) în benzile de frecvență dorite. Aceste măsurători au fost esențiale pentru validarea conceptului și pentru a asigura că antena poate fi utilizată eficient în condițiile reale. De asemenea, au fost realizate măsurători suplimentare pentru a verifica comportamentul electric al materialelor utilizate, cum ar fi substratul din piele, și am obținut valori precise ale permitivității efective, care au fost utilizate pentru a corecta datele măsurate și pentru a îmbunătăți predicțiile teoretice. Contribuțiile în realizarea acestei cercetări au fost esențiale pentru dezvoltarea unui produs funcțional, inovativ și bine optimizat, capabil să răspundă cerințelor moderne ale rețelelor wireless și aplicațiilor wearable.

Sonda de pH cu electrozi de Ag/AgCl a fost un punct de referință în domeniul electrochimiei de mult timp datorită stabilității și sensibilității sale. Aceasta funcționează pe baza diferenței de potențial care se formează la interfața electrodului cu o soluție a cărei pH trebuie măsurat. Avantajele acestei metode includ robustețea, precizia și sensibilitatea relativ mare. În contrast, sonda de pH bazată pe unde radio injectează semnale radiofrecvență pentru a înregistra variațiile parametrilor S11 (coeficientul de reflexie) și S21 (coeficientul de transmisie). Acest lucru se realizează prin imersarea unei structuri rezonante în soluție și monitorizarea schimbărilor de parametri S. Metoda este în mare măsură independentă de interferențe chimice și poate avea un timp de răspuns mai rapid decât metodele ce măsoară potențialul electric, fără a necesita recalibrări frecvente. Cu toate acestea, acest tip de sondă poate fi sensibil la alte tipuri de interferențe, cum ar fi cele electromagnetice, și poate necesita un echipament de măsurare mai sofisticat. Alegerea între cele două metode de măsură depinde în mare măsură de cerințele specifice ale aplicației.

Am propus un dispozitiv HCI bazat pe o construcție simplă la o imprimată 3D, utilizând materiale PLA/ABS convenționale și componente electronice accesibile, rezultând astfel un dispozitiv ușor de realizare, dar care poate fi utilizat într-o gamă largă de aplicații, precum jocuri video, realitate virtuală sau chiar manipularea brațelor robotice cu patru grade de libertate. Un mare avantaj al designului nostru este faptul că nu necesită niciun fel de conexiuni fizice între utilizator și computer sau terminalul mobil, datorită comunicării fără fir implementate pe baza antenei încorporate în plastic și a bateriei Li-Ion incluse. Rezultatele obținute din experimentul de antenă efectuat certifică faptul că designul nostru este bine optimizat pentru utilizarea în dispozitivul HCI, iar valorile RSSI măsurate obținute indică faptul că modulul de comunicație funcționează eficient și la distanțe mari, raportat la performanțele protocolului Bluetooth.

7.2 Concluzii și perspective de dezvoltare

Perspectivile de dezvoltare ulterioară a cercetării îl reprezintă optimizarea tehnologiilor de fabricație și integrarea unor noi materiale avansate. Studiile realizate au demonstrat că materialele textile și plastice pot fi utilizate cu succes pentru realizarea substraturilor antenelor, însă explorarea unor materiale hibride sau compozite cu proprietăți dielectrice îmbunătățite poate duce la obținerea unor performanțe superioare. De asemenea, integrarea nanomaterialelor, cum ar fi grafenul sau nanoparticulele metalice, ar putea îmbunătăți conductivitatea și flexibilitatea antenelor, permițând dezvoltarea unor dispozitive mai eficiente și mai durabile.

Un alt aspect esențial constă în dezvoltarea unor metode avansate de modelare și simulare pentru analiza interacțiunii antenă-corp. Cercetările actuale au utilizat modele numerice și fantome voxel pentru a evalua impactul corpului uman asupra performanței antenelor wearable. O direcție viitoare de cercetare ar putea include utilizarea tehnicilor bazate pe inteligență artificială și machine learning pentru optimizarea automată a geometriei antenelor, reducând astfel timpul și costurile asociate procesului de proiectare și testare.

În ceea ce privește adaptarea impedanței și optimizarea transferului de energie, studiile experimentale au demonstrat importanța utilizării unor metode precise de calibrare și măsurare. Cercetările viitoare ar putea explora tehnici de ajustare automată a impedanței în timp real, utilizând circuite adaptive și algoritmi de reglaj dinamic, astfel încât circuitele care primesc energia de înaltă frecvență să își poată adapta performanțele în funcție de mediul de utilizare și de parametri de funcționare.

Extinderea aplicabilității antenelor wearable în domenii precum sănătatea, industria medicală sau comunicațiile de nouă generație reprezintă o altă direcție de interes. De exemplu, integrarea acestor antene în dispozitive medicale portabile pentru monitorizarea continuă a pacienților ar putea contribui la dezvoltarea unor sisteme avansate de telemedicină. Totodată, explorarea compatibilității antenelor wearable cu rețelele 5G și 6G ar putea deschide noi perspective pentru aplicații în domeniul comunicațiilor mobile și al Internetului lucrurilor (IoT).

În final, un aspect inovator de investigat este optimizarea antenelor pentru reducerea impactului asupra utilizatorilor, prin reducerea absorbției specifice de radiații (SAR). Cercetările preliminare au arătat că utilizarea structurilor EBG integrate poate reduce semnificativ SAR-ul, însă o explorare mai detaliată a diferitelor configurații și a materialelor ar putea conduce la soluții mai eficiente pentru siguranța utilizatorilor.

