

CONTRIBUȚII LA PROIECTAREA SUPRAFETELOR SELECTIVE ÎN FRECVENȚĂ CU APLICAȚII ÎN COMPATIBILITATE ELECTROMAGNETICĂ

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat inginerie electronică, telecomunicații și tehnologii informaționale

autor ing. Petru – Adrian BUTA

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

luna noiembrie anul 2022

Teza de doctorat este structurată în 6 capitole. Capitolul 1 prezintă o evoluție a structurilor periodice planare și a metamaterialelor; capitolul 2 prezintă un studiu bibliografic și progresele realizate în cercetare în legătură cu suprafețele selective în frecvență; capitolul 3 prezintă o structură metalo-dielectrică periodică, construită în tehnologia stripline și efectul pe care îl are modulația geometrică a acesteia asupra proprietăților de conducție a undelor electromagnetice; în capitolul 4, sunt prezentate diverse aplicații concepute cu scopul de a filtra selectiv undele electromagnetice utilizând suprafețe selective în frecvență; în capitolul 5 sunt de asemenea prezentate aplicații ale suprafețelor selective în frecvență, dar cu motiv fractal în celula unitate, concepute cu scopul de filtrare și miniaturizare, iar în capitolul 6 sunt prezentate concluziile și contribuțiile.

1. Introducere

Acest capitol reprezintă o introducere în conținutul lucrării. Sunt prezentate evoluția structurilor electromagnetice planare, a metamaterialelor, structurile electromagnetice periodice volumetrice (3D) și fenomenul de apariție a suprafețelor selective în frecvență, prezentându-se etapizat realizările cele mai notabile din acest domeniu de cercetare.

2. Suprafețe selective în frecvență

În acest capitol s-a realizat un studiu bibliografic vast legat de metamateriale în general și, în particular, de suprafețele selective în frecvență (FSS). Au fost prezentate progresele realizate în cercetările efectuate asupra FSS în ultimii ani pe plan mondial, în domeniile cele mai importante, cu aplicabilitate în miniaturizare, ecranare selectivă împotriva interferențelor electromagnetice, pornind de la geometrii simple și ajungând la structuri complexe [1, 2].

Au fost subliniate importanța și impactul pe care îl are elementul metalic de bază al celulei unitate. În acest sens s-a prezentat și o clasificare în funcție de structura dipolilor rezonanți pe baza căruia se compune celula unitate și s-au prezentat cele mai importante proprietăți ale FSS, dintre care se amintesc: reducerea dimensiunilor structurilor prin miniaturizare, filtrarea și ecranarea selectivă în funcție de frecvență și unghi de incidență, oferirea unui răspuns corespunzător în dublă polarizare etc. De asemenea, s-a prezentat conceptul de metasuprafață, structură convolută, tehnica de miniaturizare bazată pe convoluția elementelor geometrice și tehnica de miniaturizare bazată pe fractalizarea elementelor de bază ale celulelor unitate în scopul reducerii dimensiunilor structurilor [3, 4, 5].

3. Efectul modulației geometrice asupra diagramei de dispersie a unei structuri periodice 2D construită în tehnologia stripline

În acest capitol a fost prezentat impactul pe care îl are modulația geometrică asupra unei structuri metalice periodice, modul în care sunt modificate lățimile benzilor interzise, proprietățile de dirijare a undelor și viteza de grup asociate unor moduri de propagare [6]. De asemenea, a fost realizat un studiu bibliografic la începutul capitolului legat de suprafețe electromagnetice cu impedanță ridicată, respectiv suprafețe care prezintă benzi interzise.

În locul unei prezentări teoretice generale, ușor de găsit în literatura de specialitate, s-a ales descrierea și comentarea simulărilor pe baza unui software CAD de simulare electromagnetică [7], precum și evaluarea lor din perspectiva analizei aferente teoriei metamaterialor.

De asemenea, au fost prezentate contribuțiile proprii aduse până în prezent în legătură cu această problemă prin descrierea geometriei structurii stripline propuse: celula unitate considerată nefiind una omogenă, a fost realizată dintr-o metalizare de formă eliptică, conectată la planul inferior metalic prin patru cilindri cu pereții metalici după cum se poate observa în fig. 1 [6].

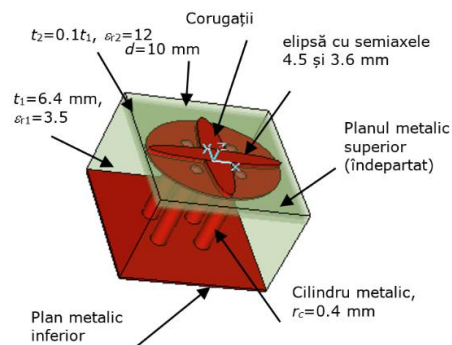


Fig. 1 Geometria celulei unitate a structurii [6]

Utilizând modul de calcul eigenmode solver al programului CAD de simulare, a fost realizată diagrama de dispersie 2D pentru această structură pentru primele 5 moduri de propagare, obținând o EGB de bandă largă (între modurile 1 și 2) și alte EGB mai mici (între modurile 2 și 3, respectiv 3 și 4) după cum se poate vedea în fig. 2.

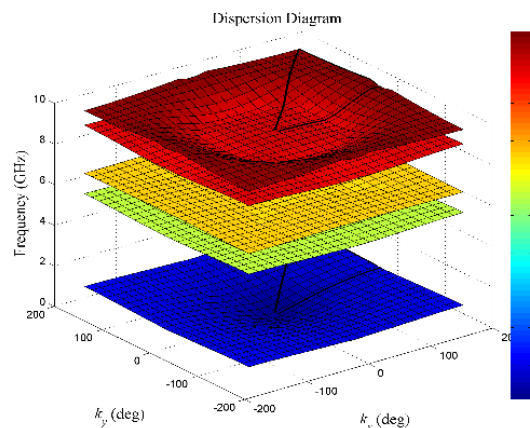


Fig. 2 Diagrama de dispersie pentru primele 5 moduri [6]

O caracteristică importantă care a fost luată în considerare în urma modulației, a fost și viteza de grup a undelor și impactul semnificativ al acestora. Pentru aceasta s-au folosit două reprezentări bazate pe gradientul suprafețelor de dispersie și s-a constatat că în ambele ea este pozitivă în raport cu viteza de fază pentru structura nemodulată. S-a demonstrat că în urma aplicării unei modulații geometrice, atât proprietățile de conducție a undelor cât și viteza de grup asociate unor moduri de propagare și-au schimbat direcția. În fig. 3 se poate observa că regiunile de izotropie ale diagramei de dispersie (DD) au rezultat mai mari pentru structura modulată decât pentru cea nemodulată [6].

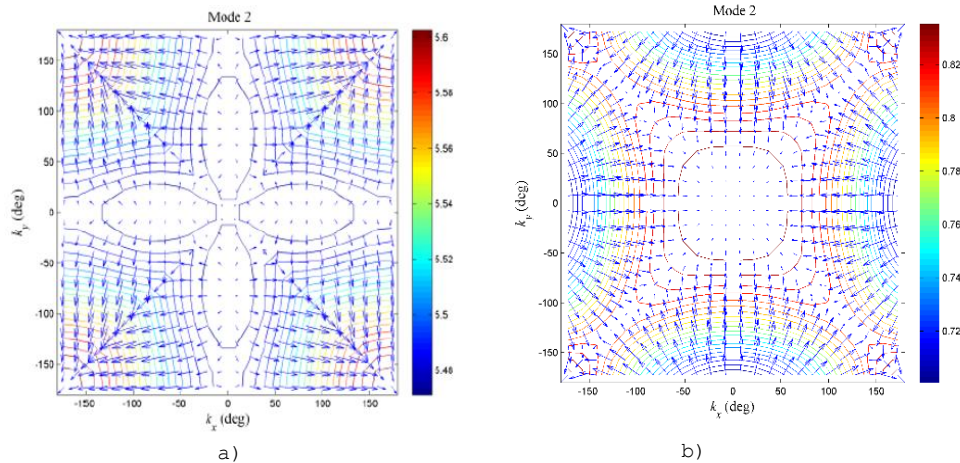


Fig. 3 Viteza de grup a modurilor de propagare; a) structura nemodulată; b) structură modulată [6]

4. Aplicații ale suprafețelor selective în frecvență

În acest capitol s-au prezentat aplicații cu structuri electromagnetice periodice, proiectate cu scopul de a filtra și ecrana selectiv undele electromagnetice în cadrul anumitor domenii specifice de frecvență, semnalele traversând nemodificate structura în cadrul altor benzi de frecvență, acestea având aplicabilitate în domeniul de testare a autovehiculelor din punct de vedere al compatibilității electromagnetice. Aplicațiile proiectate au fost construite pe un substrat de tip FR4, iar modul de funcționare și comportamentul lor a fost analizat prin efectuarea de diverse studii parametrice cu ajutorul unui program de simulare electromagnetică [7] dar și confirmat prin măsurări experimentale în unele cazuri.

În subcapitolul 4.2 au fost comentate concepte cheie legate FSS, realizând și un studiu bibliografic legat de aplicațiile lor în diverse domenii de activitate.

Urmărind obținerea unor structuri care să permită filtrarea în benzi precum WLAN sau X, în subcapitolul 4.3 a fost introdusă o structură complexă, realizată dintr-o cruce de tip Jerusalem și un inel circular, după cum se poate vedea în fig. 4 [8].

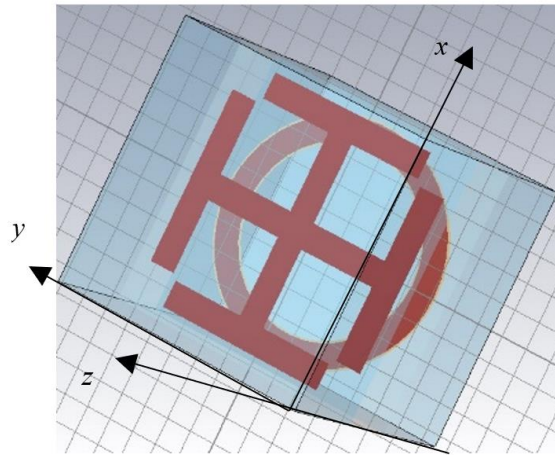


Fig. 4 Geometria celulei unitate, vedere tridimensională [8]

În cadrul acestui subcapitol, a fost descrisă geometria structurii proiectate cu dimensiunile implicate și au fost prezentate rezultatele obținute prin simulare a coeficientului de transmisie a unei unde plane polarizate liniar, în incidență normală. În fig. 5 se poate observa că această structură se comportă ca una de bandă largă, ce prezintă o bandă interzisă care se întinde de la 4.7 GHz la 16.6 GHz, având o lățime de bandă de 11.9 GHz (determinată de dimensiunile geometrice ale elementelor ce fac parte din celula unitate).

Utilizând un mediu de simulare electromagnetică [7] au fost testate diverse combinații de dimensiuni geometrice pentru a obține: un filtru de bandă largă, un filtru în banda X și un filtru în banda WLAN. Anterior, au fost simulate cele două structuri în mod separat (mai întâi inelul circular și apoi crucea Jerusalem) pentru a elucida proveniența exactă a rezonanțelor care determină existența benzilor filtrate.

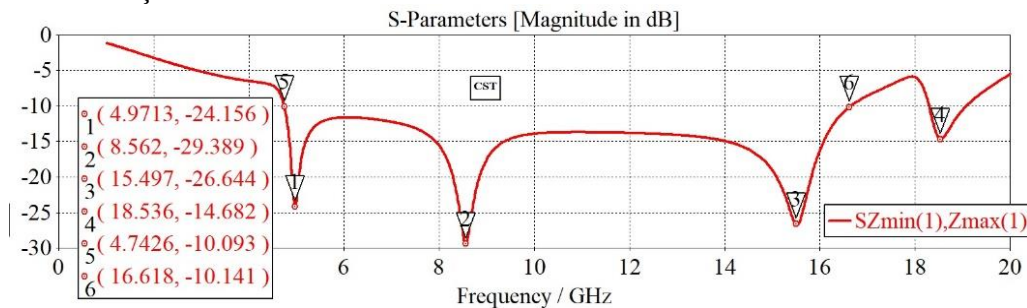


Fig. 5 Coeficientul de transmisie pentru incidență normală [8]

În final au fost realizate studii parametrice legate de unghiul de incidență θ pentru structurile propuse și s-a concluzionat că: pentru filtrul de bandă largă acest comportament se menține până la un unghi de incidență de 30 de grade, iar pentru filtrele din banda X respectiv WLAN până la un unghi de incidență de 45 de grade.

În subcapitolul 4.4, a fost proiectată o structură cu rezonatoare multiple pentru a răspunde unei probleme practice cu scopul de a proiecta o soluție de filtrare a benzilor Wi-Fi, Bluetooth și banda X, benzi utilizate frecvent în industria autovehiculelor [9].

De aceasta data, au fost folosite inele pătrate metalice în componența celulei unitate, structura fiind construită pe o singură parte a substratului. A fost propusă o prezentare etapizată a evoluției modelului metalic pentru obținerea proprietăților de transmisie dorite, iar în final o filtrare de bandă largă.

S-a început prin a calcula coeficientul de transmisie al structurii cu un singur inel pătratic pe o singură parte a substratului, obținând filtrare în benzile Wi-Fi și Bluetooth (frecvența centrală fiind 2.1 GHz). Ulterior, obținerea celui de-al doilea rezonator (centrat pe 7.8GHz) a fost posibilă prin introducerea unui inel pătratic suplimentar, iar prin modificarea

dimensiunilor celulei unitate s-au obținut trei și patru rezonanțe.

În fig. 6 se poate vedea celula unitate cu parametrii modificați pentru a obține 4 benzi interzise, iar în fig. 7 este afișat răspunsul în frecvență.

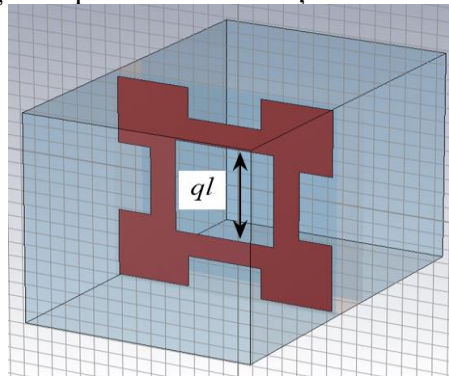


Fig. 6 Structura inelară pătratică [9]

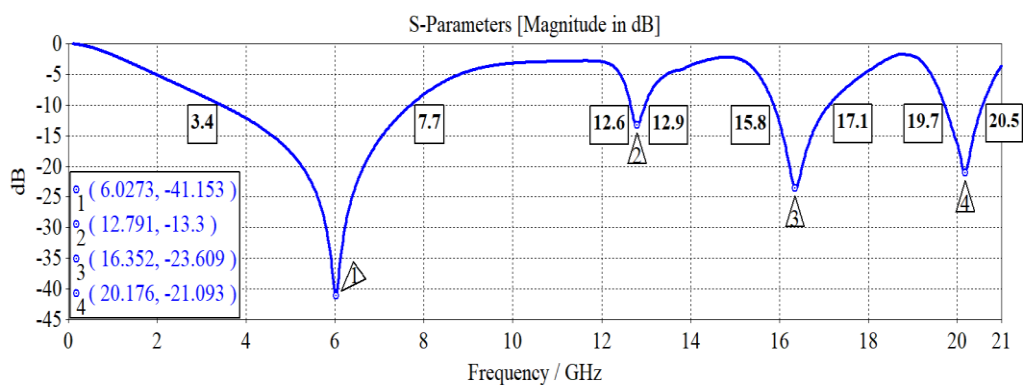


Fig. 7 Răspunsul în frecvență – incidență normală [9]

S-a realizat un studiu parametric detaliat legat de grosimea substratului dielectric FR4, obținând astfel posibilitatea de deplasare în frecvență a rezonanțelor. Filtrarea în banda X a fost realizată prin duplicarea modelului metalic pe partea opusă a substratului dielectric (fig. 8), iar variația unghiului de incidență θ a demonstrat o bună eficiență a filtrării de bandă până la un unghi de incidență de 45 de grade, când modelul metalizat a fost duplicat și pe partea opusă după cum este prezentat în fig. 9 [9].

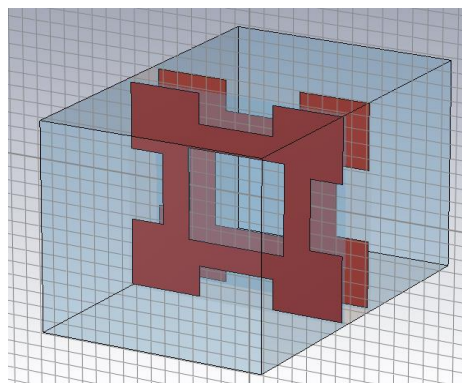


Fig. 8 Celula unitate cu metalizare pe ambele părți [9]

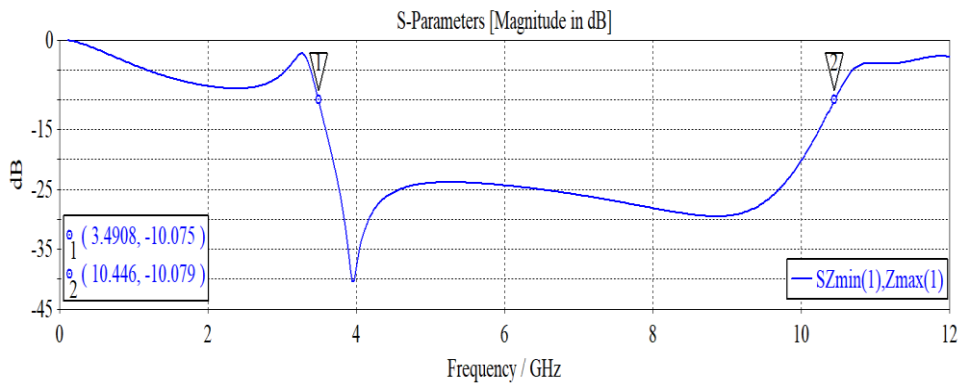


Fig. 9 Răspunsul în frecvență pentru celula unitate cu metalizare pe ambele părți – incidență normală [9]

În subcapitolul 4.5 se prezintă o suprafață selectivă în frecvență care funcționează ca un filtru spațial, concepută cu scopul de a filtra semnalele electromagnetice în domeniul de frecvență standardizat pentru banda UWB (3.1 – 10.6 GHz) [10]. Structura propusă este capabilă de filtrare cu atenuare de peste 10dB pentru o lățime de bandă de peste 14 GHz între 1.59 GHz și 15.76 GHz (soluția prezintă o bandă de oprire mult mai mare decât cele existente în literatură).

S-a început cu descrierea structurii folosind modele metalice pe ambele părți ale substratului, iar mai apoi prin imagini de câmp ale densității curentului de suprafață s-a demonstrat modul în care fiecare față prezintă frecvențe de rezonanță.

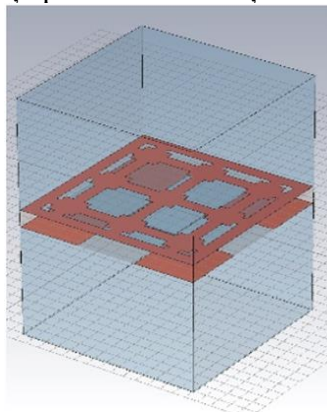


Fig. 10 Geometria celulei unitate – model CAD fără substrat [10]

Folosind modele de circuit s-a explicat funcționarea acestui FSS. Unda incidentă a fost modelată printr-un generator de tensiune adaptat conectat la terminalele de intrare, având o impedanță internă egală cu impedanța de undă a spațiului liber. Efectul spațiului liber asupra structurii a fost modelat printr-o impedanță de sarcină egală cu cea a spațiului liber. Substratul a fost modelat ca o linie cu pierderi, iar metalizările au fost modelate ca circuite selective serie conectate în paralel la intrarea liniei [10].

Structura simulată a fost și realizată practic pe un suport dielectric de tip FR4 dublu-strat cu o grosime de 1.6mm. Celula unitate a ocupat astfel o suprafață de 15x15mm². Pentru a se asigura o funcționare corectă, structura realizată practic oferă o lățime mai mare a benzii de oprire, față de domeniul vizat. Aceasta a fost inițial evaluată prin simulare numerică, iar mai apoi măsurată practic într-o cameră anecoică după cum se poate observa în fig. 11.

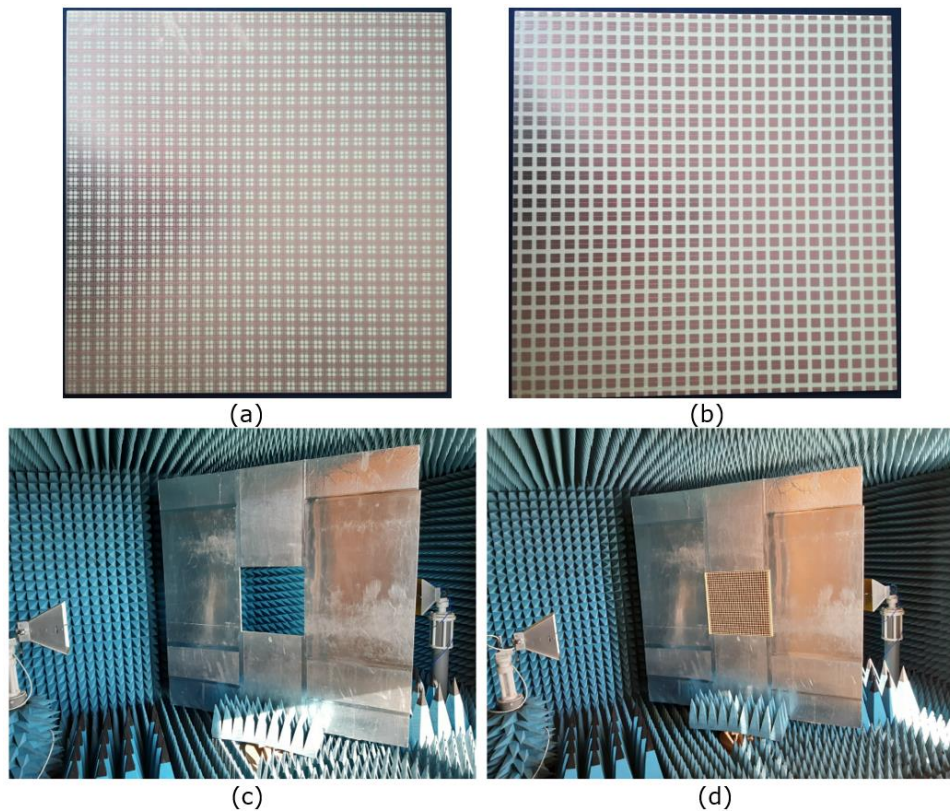


Fig. 11 Validarea experimentală: cablaj imprimat prototip Față 1 (a), Față 2 (b); setup-ul de măsurare fără prototip (c) și cu prototipul montat (d) [10]

Au fost efectuate teste de funcționare la incidență oblică și s-a obținut o insensibilitate unghiulară la peste 60° pentru undele TE, și la peste 50° pentru undele TM, în gama de frecvențe UWB. Rezultatele obținute au demonstrat o bună corelare a teoriei cu experimentele.

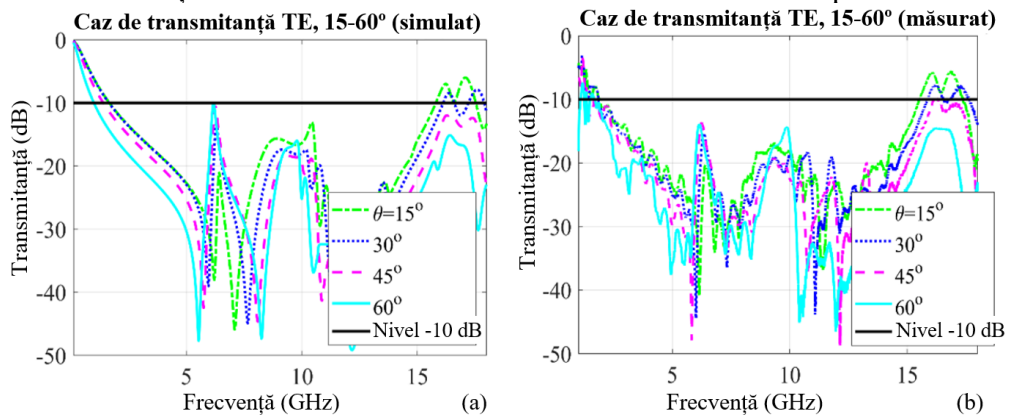


Fig. 12 Transmitanța la incidență oblică a undelor TE: (a) simulată; (b) măsurată [10]

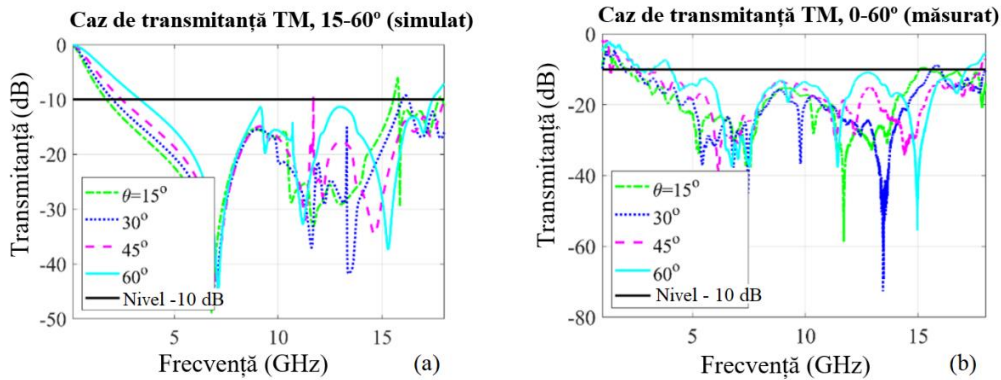


Fig. 13 Transmitanța la incidența oblică a undelor TM: (a) simulată; (b) măsurată [10]

În subcapitolul 4.6 este prezentată construirea unei suprafețe selective în frecvență pe un substrat FR4 care să realizeze o polarizare liniară diferită față de undele electromagnetice incidente transmise, concret undele plane de intrare sunt filtrate în unde polarizate liniar ortogonal în două benzi de frecvență adiacente [11]. A fost luat în considerare domeniul de frecvențe de sub 10 GHz, domeniu care reprezintă interes pentru aplicațiile din industria autovehiculelor.

Inițial s-a pornit de la un model pe o singură față a cablajului imprimat, având o comportare de bandă îngustă, care a fost transformat ulterior într-una de bandă largă replicând modelul metalic și pe cealaltă parte a substratului de susținere, după cum se poate observa în fig. 14.

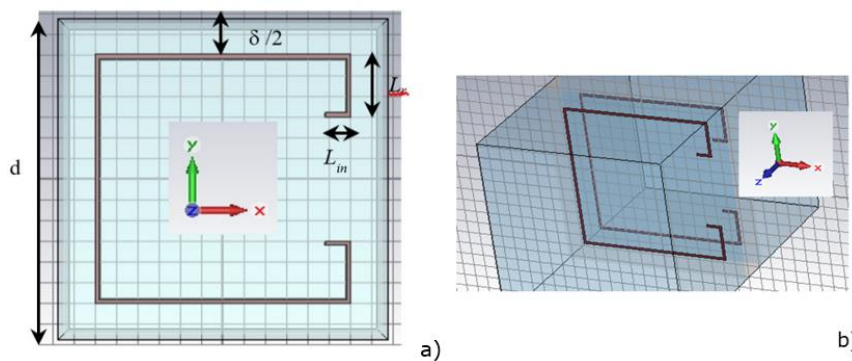


Fig. 14 Celula unitate: a) vedere frontală; b) vedere tridimensională (substratul eliminat pentru asigurarea vizibilității) [11]

Proprietățile electromagnetice ale FSS propuse au fost evaluate prin intermediul unui program de simulare numerică, iar în fig. 15 se poate vedea transmitanța suprafeței selective în frecvență. Transmitanța obținută a arătat apariția fenomenului de polarizare în incidență normală: în cazul în care vectorul câmp electric E este paralel cu axa x se poate observa o bandă de oprire cu limita de -10 dB la o frecvență centrală $f_c = 4.78$ GHz (o undă plană incidentă pe suprafața structurii, polarizată în mod arbitrar, în această bandă de frecvență, va părăsi suprafața (în direcția opusă față de cea incidentă) polarizată în mod normal cu $E||y$), iar în cazul în care vectorul câmp electric E este paralel cu axa y , sunt prezente două frecvențe centrale: $f_{c1} = 2.34$ GHz și $f_{c2} = 6.31$ GHz (de această dată o undă plană incidentă pe această structură, polarizată în mod arbitrar în această bandă de frecvență, va fi transmisă fiind caracterizată printr-o polarizare ortogonală față de primul caz, adică $E||x$).

În continuare, dorindu-se obținerea pentru acest polarizor a unei funcționări de bandă largă, a fost duplicat modelul metalic și pe cealaltă parte a substratului, iar în fig. 16 este reprezentată transmitanța obținută [11].

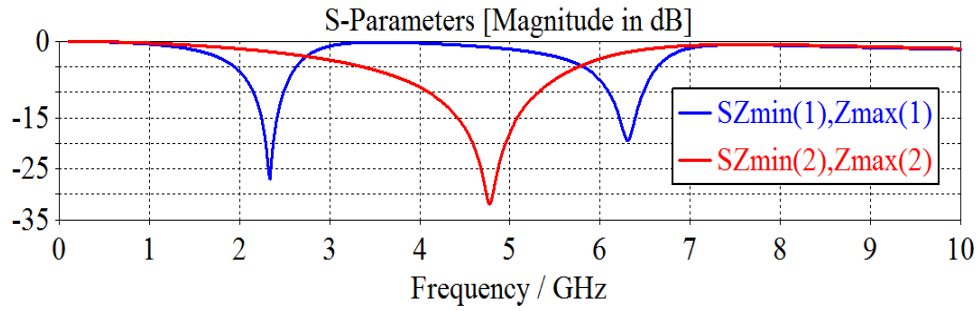


Fig. 15 Transmitanța suprafeței selective în frecvență având modelul metalic pe o singură față [11]

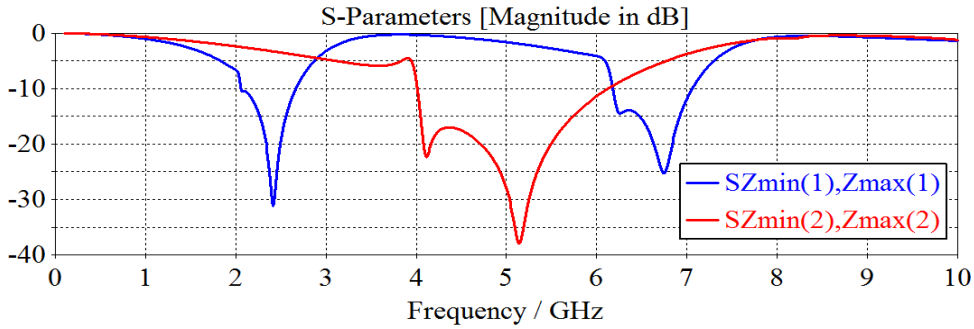


Fig. 16 Transmitanța suprafeței selective în frecvență având modelul metalic pe ambele suprafețe ale celei unitate [11]

De asemenea, a fost realizat un studiu parametric legat de dimensiunile celei unitate (lungime și lățime), care a demonstrat posibilitatea folosirii structurii în diverse benzi de frecvență. În finalul subcapitolului, s-a realizat un alt studiu parametric, de data aceasta în funcție de unghiul de incidență θ (variat între 0 și 45 de grade), punând unghiul azimutal $\varphi = 0$ sau 90 grade (structura nefiind simetrică). Astfel, au rezultat patru combinații posibile pentru cele două moduri de propagare TE și TM, toate demonstrând o bună stabilitate a structurii propuse.

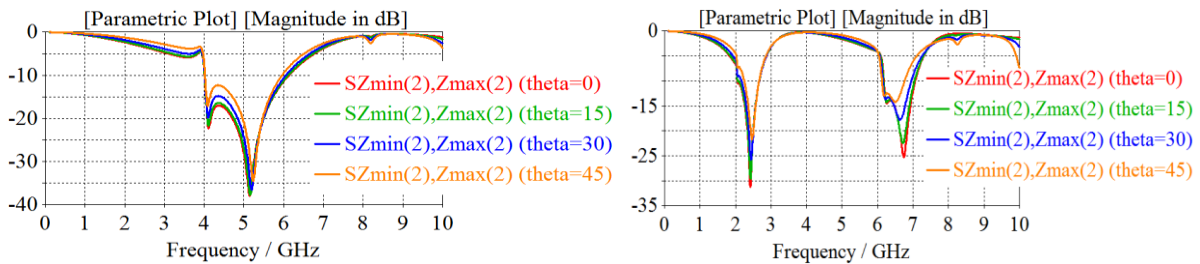


Fig. 17 Transmitanța parametrizată după theta, cu $\phi=0$ (stânga) și $\phi=90$ (dreapta), incidență $E||x$ [11]

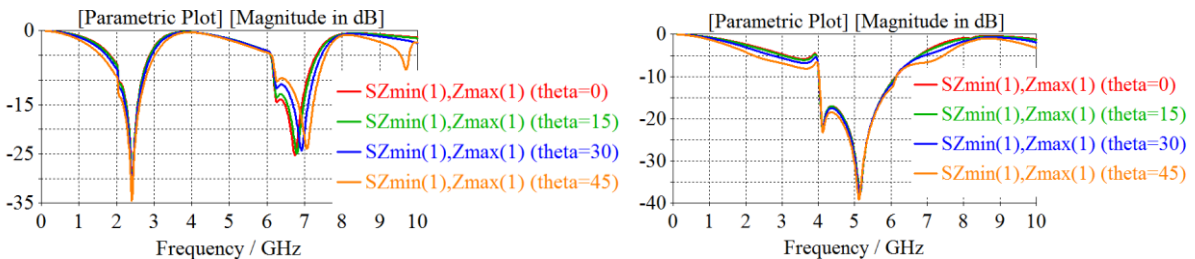


Fig. 18 Transmitanța parametrizată după theta, cu $\phi=0$ (stânga) și $\phi=90$ (dreapta), incidență $E||y$ [11]

5. Aplicații ale suprafețelor selective în frecvență cu motiv fractal

În acest capitol sunt prezentate câteva soluții convenabile pentru aplicațiile care necesită miniaturizare, filtrare și ecranare selectivă în domeniul de frecvențe 1 – 12 GHz. Soluțiile prezentate au fost implementate cu ajutorul unor structuri fractale periodice și au vizat filtrarea benzilor Wi-Fi, LTE, banda C și banda X. Este urmărit controlul în frecvență al benzilor interzise, iterațiile succesive ale fractalilor, răspunsul în frecvență în urma cascaderii de geometrii metalice de ambele părți ale celulei unitate și, de asemenea, sunt efectuate simulări parametrice asupra unor cazuri particulare și sunt analizați diverși parametri de interes utilizând CST Microwave Studio [7].

În subcapitolul 5.2 s-a realizat un studiu bibliografic despre suprafețe selective în frecvență cu accent asupra paradigmei de fractal.

În subcapitolul 5.3 a fost proiectată o structură pentru fractalizare și anume un dipol încrucișat situat pe diagonalele unei celule unitate pătratice după cum este reprezentat în fig. 19. Au fost descriși parametrii și dimensiunile structurii proiectate și, pentru fiecare caz în parte, a fost reprezentat coeficientul de transmisie al unei unde plane polarizate liniar cu incidență normală.

Primul rezultat a ilustrat obținerea unei rezonanțe centrate pe 9 GHz având o atenuare de aproape 20dB. Pentru a mări atenuarea, s-a trecut la fractalizarea structurii, reușindu-se o deplasare a banzii interzise la frecvențe mai mici (la 5.8 GHz) și cu o atenuare mărită de aproape 32 dB după cum este reprezentat în fig. 21. În continuare s-a dorit modificarea structurii pentru a prezenta o bandă de oprire largă (wide-band), reușind acest lucru printr-o a doua iterație a fractalizării a metalizării. Astfel, a apărut o a doua bandă interzisă, ceea ce a deschis calea spre posibilitatea transformării structurii într-un filtru de bandă largă [12].

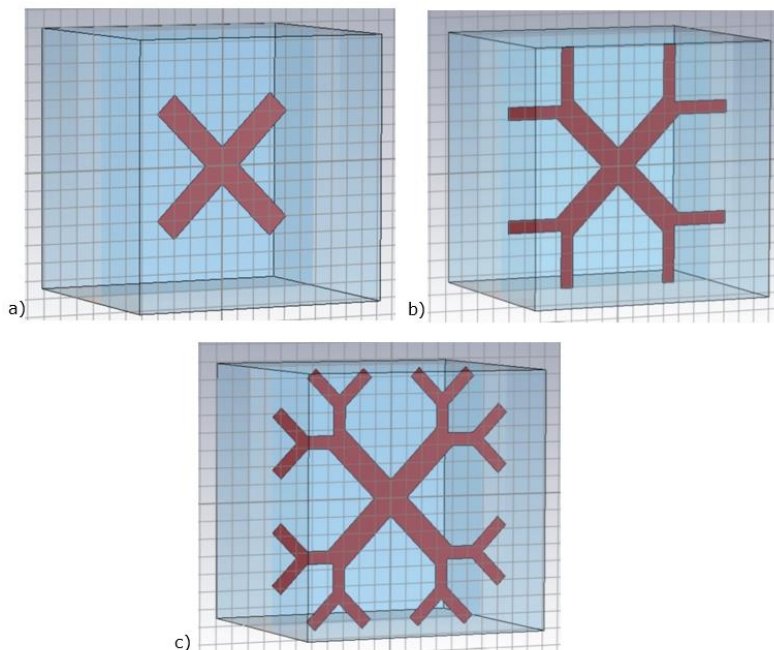


Fig. 19 Modelul CAD pentru celula unitate: a) inițială; b) prima iterație; c) a doua iterație [12]

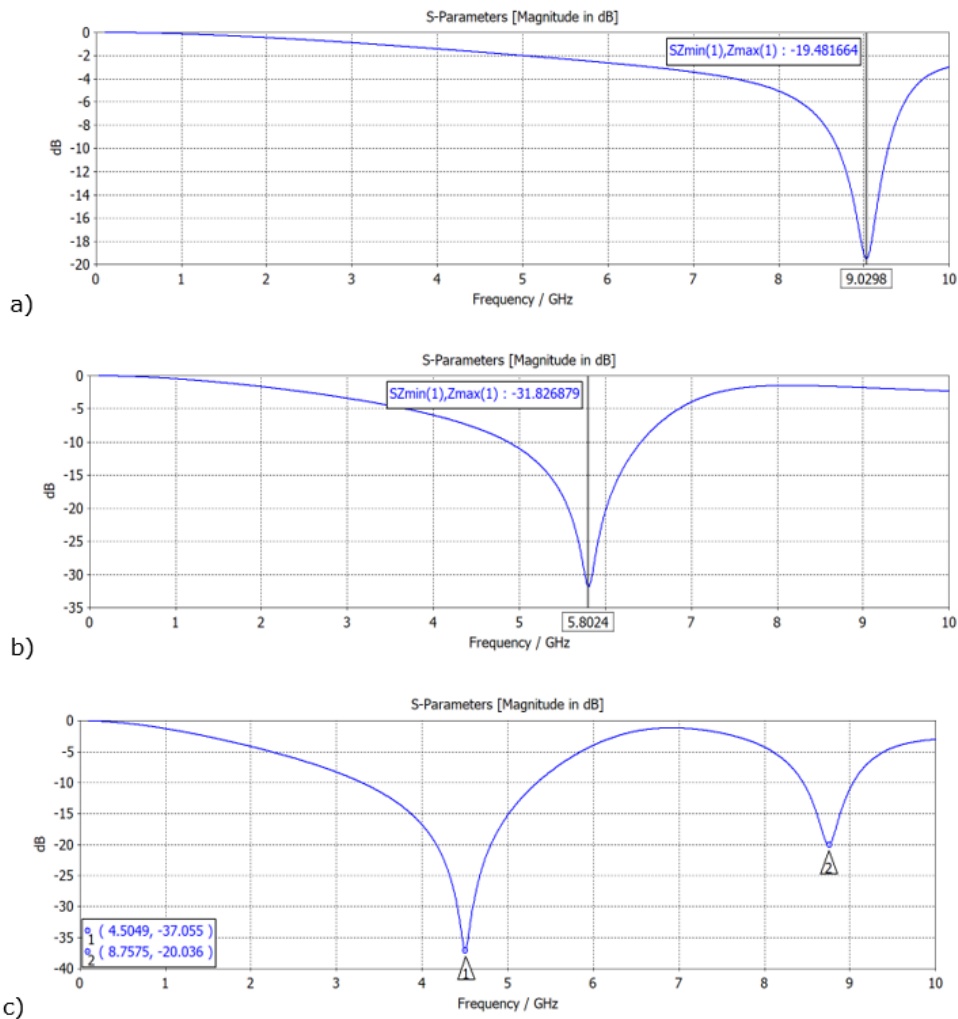


Fig. 20 Răspunsul în frecvență pentru structurile din Fig. 10. Notația subfigurilor este în corespondență [12]

În cele din urmă, a fost conceput un ecran de bandă largă, dar având motive geometrice diferite de o parte și de cealaltă a substratului dielectric, una dintre aceste geometrii fiind concepută prin iterare fractalică, astfel obținându-se o bandă de oprire de aproape 3.5 GHz, în domeniul de frecvență 4.1 – 7.5 GHz.

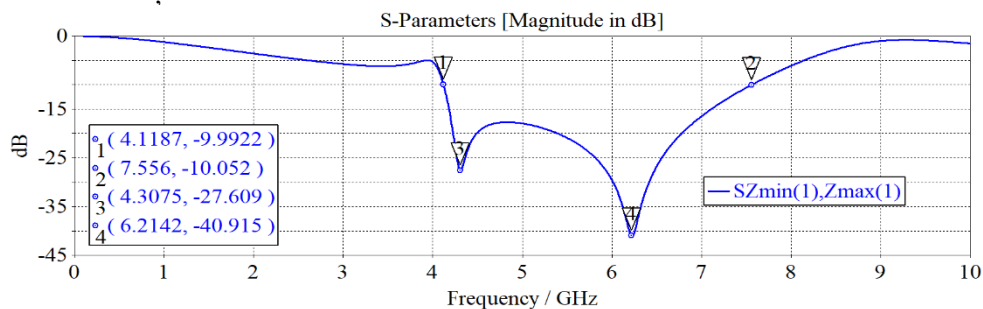


Fig. 21 Răspunsul în frecvență pentru celula unitate ce conține un fractal două iterații și o cruce metalică pe partea opusă [12]

De asemenea, s-au efectuat studii parametrice pentru structura de bandă largă demonstrând astfel că structura este insensibilă la modificările unghiulare ale direcției de incidență a undei electromagnetice (direcțiile testate au fost de data aceasta cuprinse între 0 și 60 de grade). Rezultatele studiilor parametrice au demonstrat că pozițiile marginilor benzii de oprire pot fi controlate prin geometrie, aceasta soluție fiind convenabilă în aplicațiile care

necesită filtrare și ecranare selectivă.

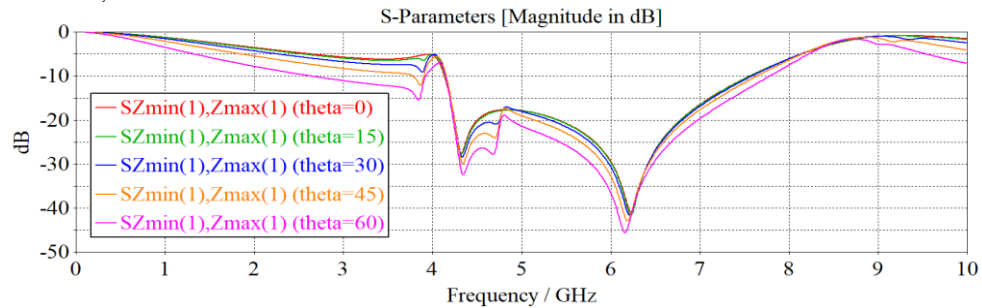


Fig. 22 Coeficientul de transmisie la diferite unghiuri de colatitudine theta (modul TE) [12]

În subcapitolul 5.4 am prezentat modul prin care poziția benzii de oprire a unui filtru spațial bazat pe o FSS poate fi deplasată către frecvențe inferioare prin fractalizare și cum prin duplicarea modelului metallic pe ambele părți ale substratului este mărită lățimea de bandă a benzii interzise. S-a demonstrat faptul că structura propusă poate funcționa ca un filtru spațial pentru banda X, Wi-Fi și banda LTE [13].

Inițial, pentru construcția structurii s-a început prin modelarea unui pătrat de cupru pe un substrat dielectric simplu strat de tip FR4 cu scopul de a obține un filtru acordat pe banda LTE, structură care ulterior a fost fractalizată după cum se poate vedea mai jos (fig. 23).

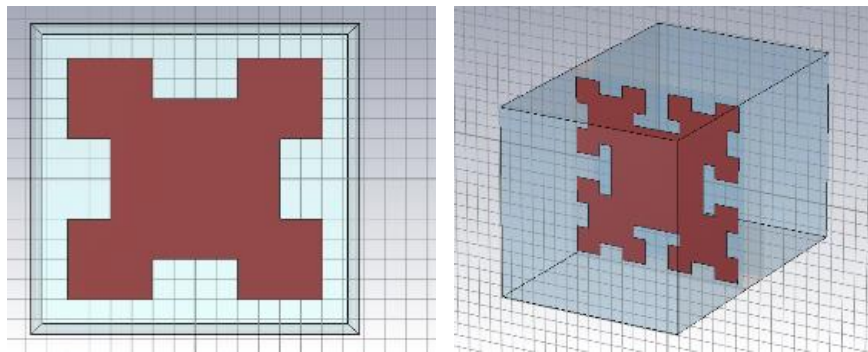


Fig. 23 Fractal cu o singură iterație (stânga), fractal cu două iterații (dreapta) - un singur strat [13]

Prin iterare geometrică succesivă a modelului metallic, s-a obținut o structură prefractală care prezintă o bandă interzisă ce acoperă parțial banda C și banda X, iar mai apoi prin duplicarea modelului metallic și pe cealaltă parte a dielectricului s-a obținut un filtru de bandă largă, cuprinsă în intervalul de frecvență 5.29 – 12.17 GHz și două frecvențe de rezonanță la 5.72 GHz, respectiv 11.48 GHz (cu o lățime de bandă de aproximativ 7 GHz), rezultatul fiind raportat în fig. 24. În acest domeniu de frecvențe intră aplicațiile ce vizează comunicația fără fir de tip WI-FI, dar și sisteme radar de supraveghere a vremii, aplicații de comunicație cu sateliții, aplicații asociate TLPR (aplicații de radiolocație, radiodetecție, radionavigație, aeronautice, de explorare a pământului prin satelit) atât civil cât și militar.

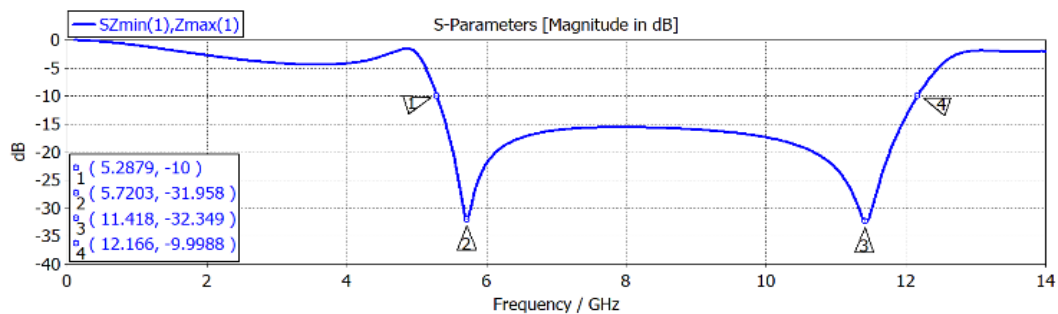


Fig. 24 Coeficientul de transmisie pentru fractalul cu o singură iterație, geometrie metallică pe ambele fețe ale FSS [13]

Pentru a evalua sensibilitatea răspunsului în frecvență la variația parametrilor de interes, a fost efectuat un studiu parametric pe două structuri fractale, fractalul cu o singură iterație, respectiv fractalul cu două iterații dublu-strat. Rezultatele obținute în urma analizelor numerice obținute cu ajutorul unui pachet CAD de simulare electromagnetică [7] demonstrează clar că fractalizarea unei celule unitate reprezintă o excelentă soluție de miniaturizare, prin deplasarea benzilor de filtrare relevante spre frecvențe mai mici păstrând aceleași perioade spațiale ale celulei unitate (prin urmare, prin creșterea lungimii electrice a metalizării), iar duplicarea modelului pe ambele părți ale dielectricului introduce frecvențe de rezonanță suplimentare care contribuie la mărirea benzilor de oprire.

De asemenea, s-a demonstrat că reducerea grosimii substratului are ca efect creșterea gradului de cuplaj dintre metalizările de pe cele două fețe ale celulei unitate, ceea ce poate duce la o atenuare superioară în banda de lucru și soluția poate fi folosită pentru poziționarea acestei benzi conform unor cerințe ale aplicației concrete avute în vedere [13].

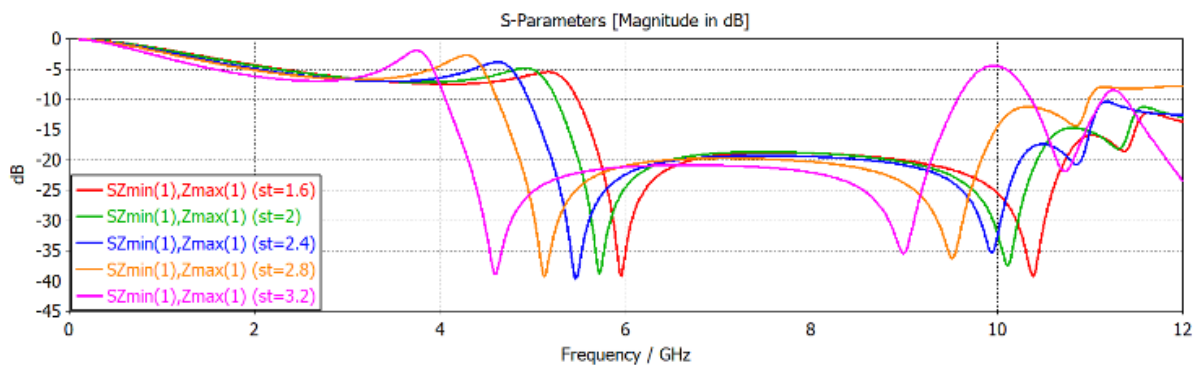


Fig. 25 Studiul parametric pentru grosimea substratului relativ la fractalul cu două iterații cu motiv metallic pe ambele fețe al FSS [13]

6. Contribuții proprii

În cadrul programului doctoral am studiat 85 titluri bibliografice și de asemenea am publicat 1 articol în revistă ISI (la o revistă ISI Q2 – MDPI Sensors), 10 articole la conferințe indexate ISI Proceedings, și 4 articole la conferințe indexate BDI. Doresc să remarc faptul că un articol din cadrul tezei a fost citat în IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (revistă ISI indexată Q3). Enumăr mai jos contribuțiile proprii aduse în această teză.

În capitolul 2:

- Am prezentat și comentat un studiu bibliografic vast legat de metamateriale în general și de suprafețele selective în frecvență în particular.
- Am prezentat conceptele de metasuprafață, suprafața selectivă în frecvență, am realizat o clasificare după importanța funcționalităților și aplicațiilor existente, punând accent pe parametrii de funcționare și ai răspunsurilor în frecvență.
- Am evidențiat cele mai importante avantaje ale FSS: filtrarea și ecranarea selectivă a semnalelor în funcție de frecvență și la unghiuri de incidență ridicate, precum și prelucrarea polarizării undelor electromagnetice plane.
- Am prezentat conceptul de structură convolută și cea de fractal pentru aplicațiile care necesită reducerea dimensiunilor structurilor.

În capitolul 3:

- Am prezentat și comentat subiectul particular al unei structuri periodice planare: și anume impactul folosirii unei modulații geometrice asupra diagramei de dispersie a structurii respective.
- De asemenea, am realizat un studiu bibliografic la începutul capitolului, legat de suprafețe electromagnetice cu impedanță ridicată, respectiv suprafețe care prezintă benzi interzise.
- În locul unei prezentări teoretice generale, ușor de găsit în literatura de specialitate, am ales descrierea și comentarea simulărilor pe bază unui software CAD de simulare electromagnetică la care am luat parte, precum și evaluarea lor din perspectiva analizei aferente teoriei metamaterialor.

Am prezentat totodată contribuțiile proprii aduse până în prezent în legătură cu această problematică:

- Am descris geometria structurii stripline propuse: celula unitate considerată nefiind una omogenă, a fost realizată dintr-o metalizare de formă eliptică, conectată la planul inferior metalic prin patru cilindri cu pereții metalici.
- Am realizat, folosind un mediu de simulare electromagnetică, diagrama de dispersie a acelei structuri pentru primele 5 moduri de propagare, obținând un EBG de bandă mare și două EBG de benzi mici (folosind modul de calcul eigenmode solver al programului CAD de simulare electromagnetică).
- Am calculat vitezele de grup pentru primele două moduri de propagare.
- Apoi, am efectuat modulația structurii stripline (cu un indice de modulație de 50%), acest lucru fiind vizibil și în cadrul noii diagrame de dispersie, fiecare mod al structurii nedomulate împărțindu-se în patru moduri după modulare.

În capitolul 4:

- În acest capitol am prezentat structuri periodice selective în frecvență (FSS), proiectate cu scopul de a filtra și ecrana undele electromagnetice în cadrul anumitor domenii de frecvență, având aplicabilitate în domeniul de testare a autovehiculelor din punctul de vedere al compatibilității electromagnetice.
- În sub-capitolul 4.2 am comentat concepte-cheie legate de FSS, realizând și un studiu

bibliografic legat de aplicațiile lor în diverse domenii.

- Legat de contribuția proprie adusă în acest capitol, am început în subcapitolul 4.3 cu prezentarea unei structuri formate dintr-un inel circular și o cruce Jerusalem. Am continuat cu detalierea geometriei și dimensiunilor celulei unitate, adaptate pentru a filtra în banda de frecvență 1-12 GHz.
- Folosind un mediu de simulare electromagnetică am proiectat diverse combinații de structuri pentru a obține: un filtru de bandă largă, un filtru în banda X și un filtru în banda WLAN.
- Anterior am simulat cele două structuri în mod separat (mai întâi inelul circular și apoi crucea Jerusalem) pentru a elucida proveniența exactă a rezonanțelor care determină existența benzilor filtrate.
- În subcapitolul 4.4, am trecut la realizarea unei structuri cu rezonatoare multiple. Am obținut astfel filtrări în benzi folosite intensiv în domeniul Automotive: Wi-Fi, Bluetooth și banda X.
- Din nou, am început cu descrierea celulei unitate inițiale (dimensiuni și materiale folosite în simulare) și cu calcularea coeficientului de transmisie corespunzător unei unde plane polarizate liniar, în incidență normală.
- De data aceasta, am ales ca formă a metalizării în celula unitate un inel pătratic, cu dimensiuni diferite de cele existente în literatură, obținând astfel un element rezonator. Prin introducerea unui nou inel pătratic în interiorul celui existent inițial am reușit creșterea numărului de elemente rezonatoare (2,3,4 elemente).
- De asemenea, am realizat și un studiu parametric legat de grosimea substratului dielectric și am duplicat modelul metalic pe cealaltă parte a acestui substrat obținând o filtrare de bandă largă.
- În sub-capitolul 4.5 am propus, simulat și realizat practic o suprafață selectivă în frecvență de bandă ultra largă. Astfel, am realizat o filtrare cu atenuare de peste 10dB pentru o lățime de bandă de peste 14 GHz între 1.59 GHz și 15.76 GHz (soluția prezintă o bandă de oprire mult mai mare decât cele existente în literatură).
- Am prezentat totodată contribuțiile proprii aduse până în prezent în legătură cu acest subiect:
 - Am propus modele de circuit pentru a explica în detaliu răspunsul în frecvență al FSS propuse;
 - Am demonstrat stabilitatea structurii la variația unghiului de incidență: în modul TE peste 60 de grade, iar în TM peste 50 grade;
 - Am realizat practic această structură și am testat-o într-o cameră anecoică demonstrând o bună similaritate între simulare și rezultatele experimentale.
- În subcapitolul final al capitolului 4 (4.6) am realizat și demonstrat prin simulare electromagnetică o structură de tip polarizor liniar de bandă largă.
- Contribuțiile proprii pot fi sintetizate astfel:
 - Proiectarea prin simulare a unei structuri FSS construite pe un substrat FR4, la care undele plane de intrare au fost filtrate în unde polarizate liniar, cu polarizare ortogonală în două benzi de frecvențe diferite;
 - Pentru cazul în care vectorul câmp electric este paralel cu axa x am obținut o bandă de oprire cu frecvență centrală de 4.78 GHz, iar pentru cazul în care vectorul câmp electric este paralel cu axa y, am remarcat prezența a două benzi de oprire centrate pe 2.34 GHz, respectiv pe 6.31 GHz;
 - Pentru a obține o funcționare de bandă largă, am reprodus modelul metalic și pe cealaltă parte a suprafeței selective în frecvență;
 - Am realizat și un studiu parametric legat de dimensiunile celulei unitate, prin care structura poate fi adaptată pentru diferite aplicații;
 - În final am testat stabilitatea structurii la diverse unghiuri de incidență, obținând un

comportament adecvat până la un unghi de 45 de grade.

În capitolul 5:

- Am prezentat și comentat altfel de aplicații pentru FSS și anume folosirea paradigmei fractalice.
- Conform cerințelor, am început expunerea subiectului, în subcapitolul 5.2, printr-un studiu bibliografic, legat de folosirea fractalizării în domeniul suprafețelor selective în frecvență.
- În subcapitolul 5.3 am urmărit obținerea unei FSS de bandă largă printr-o structură fractalizată, modelul folosind o cruce pe o parte a substratului, cealaltă parte rămânând inițial goală (brațele crucii fiind rotite cu 45 de grade în raport cu laturile celulei unitate pentru a asigura posibilități de dimensionare corespunzătoare).
- Cu structura inițială am obținut astfel o frecvență de rezonanță centrată pe 9 GHz. Am arătat că folosind o primă iterație a fractalului putem deplasa rezonanța la frecvențe mai mici (sub 6 GHz) iar prin folosirea celei de-a doua iterații a fost introdusă o nouă rezonanță.
- Structuri de bandă largă au fost obținute folosind una sau două iterații replicate pe partea opusă a substratului dielectric, iar prin studiile parametrice efectuate asupra dimensiunilor porțiunilor metalizate am demonstrat posibilitate modificării în frecvență a rezonanțelor.
- În subcapitolul 5.4, am propus structuri fractalizate diferite cu scopul de a filtra semnale în benzile LTE, C și X; structura inițială folosită a fost una de tip „T-square”, reușind o primă filtrare între 7 și 9 GHz (o parte din banda X).
- Am obținut și în cazul structurii FSS fractalizate un filtru de bandă largă (aproximativ între 5 – 12 GHz), replicând modelul pe partea opusă a substratului.
- Continuând procedeul fractalizării, am obținut rejecții în benzile C și LTE.
- În finalul subcapitolului am realizat studii parametrice pentru grosimea substratului și pentru a testa stabilitatea structurii la diverse unghiuri de incidență, în cazurile expuse anterior.

7. Referințe bibliografice

1. B.A. Munk, Frequency-Selective Surfaces – Theory and Design, Wiley, New York (2000), [R.S. Anwar, L. Mao, H. Ning, “Frequency selective surfaces: a review”, Appl. Sci., 8, 1689, 47 pp., 2018.
2. Vardaxoglou, J.C. Frequency Selective Surfaces: Analysis and Design; Research Studies Press: Boston, MA, USA, 1997.
3. Glybovski, S.B.;Tretyakov, S.A.;Belov, P.A.;Kivshar, Y.S.;Simovski, C.R. Metasurfaces: From microwaves to visible. Phys.Rep.2016, 634, 1-72.
4. Panwar, R.; Lee, J.R. Progress in frequency selective surface-based smart electromagnetic structures: A critical review. Aerosp. Sci. Technol. 2017, 66, 216–234.
5. J. A. Mackay, B. Sanz-Izquierdo, E.A. Parker, “Evolution of Frequency Selective Surfaces”, Forum for Electromagnetic Research Methods and Application Technologies (FERMAT), vol. 2, pp. 1-7, Mar-Apr. 2014.
6. L. Matekovits, A. De Sabata, O. Lipan, A. Silaghi, S. Baderca, **A. BUTA**, "Effect of geometry modulation on the Full Dispersion Diagram of a 2D Periodic Structure built Stripline Technology", 2016 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (AP-S/URSI 2016), 26 June -1 July 2016, Fajardo, Puerto Rico, pp. 1961-1962, 2016.
7. Computer Simulation Technology, Microwave Studio.
8. **A. BUTA**, A. De Sabata, A. Silaghi, C. Iftode, L. Matekovits, „Applications of a Frequency

Selective Surface based on a Combination of the Jerusalem cross and circular ring”, 2018 International Conference on Communications (COMM 2018), 14-16 June 2018, Bucharest, Romania, pp. 239-242, 2018.

9. **A. BUTA**, Andrei Silaghi, Aldo De Sabata, Ladislau Matekovits, “Multiple-Notch Frequency Selective Surface for Automotive Applications”, 2020 International Conference on Communication (COMM 2020), 18-20 June 2020, Bucharest, Romania, pp. 439-442, 2020.

10. A. De Sabata, L. Matekovits, **A. BUTA**, G. Dassano, A. Silaghi, „Frequency Selective Surfaces for UWB Filtering and Shielding”, MDPI Sensors, 22(5), 1896, pp. 1-16, February 2022 (FI 3.847, revistă indexată Q2, WOS:000773637200001).

11. A. De Sabata, L. Matekovits, A. Silaghi, **A. BUTA**, “Wide-Band Linear Polarizer Based on a Frequency Selective Surface”, URSI 2021, 28 August - 4 September 2021, Rome, Italy, pp. 1-4, 2021 (Scopus).

12. **A. Buta**, A. Silaghi, A. De Sabata, L. Matekovits, “Fractal Based Frequency Selective Surface with Broadband Characteristics”, 2019 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS), 11-13 July 2019, Iasi (Romania), 2019.

13. **A. BUTA**, A. Silaghi, A. De Sabata, L. Matekovits, “LTE Band Filtering Applications of a Fractal based Frequency Selective Surface”, 2020 14th International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC 2020), 5-6 November 2020, Timisoara, Romania, pp. 1-4, 2020.