

UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” din BUCUREȘTI

ȘCOALA DOCTORALĂ ETTI-B

Nr. Decizie ..... din .....

# REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

UTILIZAREA SUPRAFEȚELOR SELECTIVE ÎN  
FRECVENȚĂ PENTRU IDENTIFICAREA ȘI  
URMĂRIREA AUTOVEHICULELOR

APPLICATION OF FREQUENCY SELECTIVE  
SURFACES TO VEHICLE IDENTIFICATION AND  
TRACKING

Doctorand: **Ing. Adrian ANDRONE**

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	<b>Prof. Dr. Ing. Gheorghe Brezeanu</b>	de la	<b>Univ. Politehnica din București</b>
Conducător de doctorat	<b>Prof. Dr. Ing. Răzvan TAMAȘ</b>	de la	<b>Univ. Politehnica din București</b>
Referent	<b>Prof. Dr. Ing. Gheorghe GAVRILOAIA</b>	de la	<b>Univ. din Pitești</b>
Referent	<b>Conf. Dr. Ing. Alin DĂNIȘOR</b>	de la	<b>Univ. Maritimă din Constanța</b>
Referent	<b>Prof. Dr. Ing. Teodor PETRESCU</b>	de la	<b>Univ. Politehnica din București</b>

**BUCUREȘTI 2020**

---

## **Mulțumiri**

Finalizarea unei teze de doctorat după cele mai înalte standarde științifice nu se poate duce la bun sfârșit fără suport și îndrumare.

Pe toată perioada celor cinci ani de stagiul doctoral de pregătire am avut privilegiul să fiu îndrumat cu răbdare, multă meticulozitate și deosebită amabilitate, de către Dl. Prof. Univ. Dr. Ing. Răzvan TAMAȘ. Îi mulțumesc pentru suportul științific acordat în elaborarea contribuțiilor din această teză, pentru faptul că m-a ajutat și îndrumat atunci când am făcut măsurătorile plăcuței realizată practic, sau atunci când am analizat rezultatele și le-am prelucrat. Rezultatele simulărilor efectuate au fost publicate în articole pe care le-am scris tot sub îndrumarea domnului profesor, cu mare profesionalism. Îi mulțumesc foarte mult și pentru timpul dedicat și acordat revizuirii acestui manuscris.

Îi mulțumesc D-lui Prof. Univ. Dr. Ing. Teodor PETRESCU pentru sprijin și îndrumare, mai ales pentru sfaturile oferite la finalul fiecărui raport de cercetare susținut. Aceleași mulțumiri și pentru Conf. Univ. Dr. Ing. Alina BĂDESCU, Conf. Dr. Ing. Nicolae Militaru, Conf. Dr. Ing. Alin Dănișor care au avut întotdeauna cuvinte încurajatoare, precum și pentru observațiile constructive ce au dus la definitivarea contribuțiilor acestei teze.

Pe această cale, le mulțumesc colegilor din cadrul Colectivului de Cercetare în Antene, Propagare și Circuite de Radiofrecvență din Departamentul de Electronică și Telecomunicații, Universitatea Maritimă din Constanța care m-au susținut și încurajat pe toată perioada acestor ani de doctorat.

Nu în cele din urmă, îi mulțumesc familiei pentru încredere și răbdare, dar în special soției Florentina, fiului meu Alexandru-Mihai și fiicei mele Andreea-Raluca care m-au sprijinit necondiționat în luarea deciziilor în acest interval de timp.

## Cuprins

Introducere .....	3
1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat.....	3
1.2 Scopul tezei de doctorat .....	3
1.3 Conținutul tezei de doctorat .....	4
Capitolul 2 Structuri radiante periodice.....	5
Capitolul 3 Modelarea FSS.....	7
Capitolul 4 Influența unghiului de incidență și a caracteristicilor celulei unitate asupra răspunsului în domeniul frecvență al suprafețelor selective multirezonante.....	8
Capitolul 5 Aria efectivă a suprafețelor selective în frecvență cu celule multirezonante de tip buclă.....	9
Capitolul 6 Influența formei rezonatorilor asupra selectivității în frecvență.....	10
Capitolul 7 Influența dimensiunii celulei și a substratului asupra selectivității în frecvență.....	12
Capitolul 8 Concluzii .....	16
8.1. Rezultate obținute. Analiză comparativă .....	16
8.2. Contribuții originale .....	18
8.3. Lista lucrărilor originale.....	18
8.4. Perspective de dezvoltare ulterioară.....	20
Bibliografie .....	21

# Capitolul 1

## Introducere

Structurile radiante periodice permit obținerea unor caracteristici de radiație date, fie că este vorba de o distribuție spațială impusă pentru câmpul radiant sau de o variație dată a intensității câmpului radiat, în funcție de frecvență.

Rețelele de antene permit sintetizarea unei caracteristici de radiație dorite printr-o alegere corespunzătoare a așezării în spațiu a elementelor și respectiv, a excitațiilor acestora.

Termenul de suprafață selectivă în frecvență (FSS) desemnează o gamă largă de structuri electromagnetice proiectate să interacționeze și să moduleze radiația electromagnetică neghidată.

Astfel, suprafețele selective în frecvență pot fi considerate drept "filtre spațiale", în sensul că acestea filtrează undele electromagnetice distribuite spațial, determinând la anumite frecvențe transmiterea, reflectarea sau absorbția energiei.

### 1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat

Aplicațiile avute în vedere în această lucrare constau în utilizarea suprafețelor selective în frecvență (FSS) multirezonante pentru generarea unor coduri de identificare la iluminarea de către un radar.

Individualizarea acestor coduri se face în funcție de setul de frecvențe de rezonanță ales.

Astfel de aplicații includ atât identificarea vehiculelor cu ajutorul unor plăci de înmatriculare inteligente, cât și conducerea autonomă a unui convoi de vehicule (spre exemplu, coloane militare).

### 1.2 Scopul tezei de doctorat

În cazul identificării vehiculelor, utilizând plăci de înmatriculare inteligente, aceste plăci reprezintă, în realitate, suprafețe selective în frecvență care sunt "citite" lateral; prin urmare, radiația acestora la iluminarea de către un radar va fi monitorizată, în acest caz, în planul care conține structura radiantă.

Scopul tezei de doctorat îl constituie optimizarea structurilor FSS utilizate în astfel de aplicații de identificare prin maximizarea ariei efective pentru un set de frecvențe de rezonanță dat, optându-se pentru un studiu parametric.

### 1.3 Conținutul tezei de doctorat

Capitolul doi este dedicat noțiunilor teoretice legate de șirurile și ariile de antene.

În cel de-al treilea capitol sunt prezentate aspecte legate de modelarea și caracterizarea prin simulare a suprafețelor selective în frecvență.

În capitolul patru este analizată influența unghiului de incidență și a caracteristicilor celulei unitate asupra răspunsului în domeniul frecvență al suprafețelor selective multirezonante.

Capitolul cinci își propune să analizeze aria efectivă a suprafețelor selective în frecvență cu celule multirezonante de tip buclă.

În capitolul șase a fost analizată influența formei rezonatorilor asupra selectivității în frecvență.

Capitolul șapte analizează influența dimensiunii celulei și a substratului asupra selectivității în frecvență, influența substratului asupra ariei efective a unei celule FSS de dimensiune dată și se încheie cu măsurarea practică a ariei efective caracteristică unei suprafețe selective în frecvență cu bucle pătrate, pentru plăci de înmatriculare interogate de radar.

Capitolul opt este dedicat concluziilor și perspectivelor de continuare a cercetării.

## Capitolul 2

### Structuri radiante periodice

Rețelele de antene permit sintetizarea unei caracteristici de radiație dorite printr-o alegere corespunzătoare a așezării în spațiu a elementelor și respectiv, a excitațiilor acestora. Câmpul total al rețelei este egal cu câmpul produs de un singur element poziționat în origine, multiplicat cu un factor numit factor de rețea, dependent de geometria rețelei și de faza excitației. Prin modificarea spațiului de separație sau a defazajului dintre elemente, se poate controla factorul de rețea și câmpul total.

Factorul de rețea depinde de numărul elementelor, aranjamentul geometric, amplitudinile și fazele relative ale excitațiilor precum și de spațiere. Factorul de rețea are o formă mai simplă, dacă elementele sunt excitate cu aceeași amplitudine, fază și sunt echidistante. Deoarece factorul nu depinde de caracteristica de directivitate a elementelor radiante, acesta poate fi exprimat prin înlocuirea elementelor reale cu surse punctiforme, izotrope.

În multe aplicații, este de dorit ca radiația maximă a unei rețele de antene, să aibă loc normal pe axa șirului. Pentru a optimiza proiectarea, maximele de radiație ale fiecărui element în parte și cel al factorului șirului, ar trebui direcționate către  $\theta=90^\circ$ .

Pentru a avea maximul factorului de șir uniform orientat perpendicular pe axa șirului, este necesar ca toate elementele să aibă excitațiile în fază. Distanța dintre elemente poate avea orice valoare. Radiația maximă poate fi, practic, orientată către orice altă direcție, asigurându-se o baleiere a lobului principal. Prin controlarea diferenței de fază progresivă dintre elemente, radiația maximă poate fi orientată către orice direcție dorită, rezultând astfel o rețea cu baleiaj.

Alte aspecte importante sunt directivitatea, deschiderea lobului la -3dB și nivelul lobilor secundari.

Pe lângă plasarea elementelor longitudinal într-un șir, elementele radiante individuale pot fi poziționate într-o matrice, rezultând o arie de antene, care oferă variabile suplimentare ce pot fi utilizate pentru a controla și forma caracteristica de radiație.

Termenul de suprafață selectivă în frecvență (FSS) desemnează o gamă largă de structuri electromagnetice proiectate să interacționeze și să moduleze radiația electromagnetică (EM) neghidată, într-o anumită frecvență [1].

Astfel, suprafețele selective în frecvență pot fi considerate drept "filtre spațiale" [2], în sensul că acestea filtrează undele electromagnetice distribuite spațial, determinând la anumite frecvențe, transmiterea, reflectarea sau absorbția energiei.

O suprafață selectivă în frecvență (FSS) este în mod obișnuit reprezentată de un material plat compozit, proiectat astfel încât acesta să fie transparent pentru anumite benzi de frecvență, în timp ce va reflecta, absorbe sau redirecționa radiația în alte benzi de frecvență.

Din punct de vedere constructiv, FSS sunt fabricate sub formă de suprafețe plate și cuprind un număr mare de celule care acționează asupra câmpului electromagnetic, proiectate sub forma unui aranjament periodic. Celulele unitate sunt de obicei construite din materiale metalice și dielectrice, astfel încât celulele unitate să fie excitate numai la anumite frecvențe (de aici și noțiunea de selectivitate în frecvență). În mod normal, periodicitatea acestor celule unitate este bidimensională, iar celulele unitate sunt plane, fiind relativ subțiri în raport cu a treia dimensiune (de aici termenul de "suprafață"). Suprafețele selective în frecvență se prezintă sub o mare varietate de topologii și geometrii.

Structurile FSS sunt utilizate într-o gamă largă de aplicații care implică ferestre electromagnetice spațiale sau sinteza caracteristicilor de radiație. În primul caz, spectrul de frecvențe permise într-o regiune spațială specifică este controlat, în timp ce în cel de-al doilea caz, distribuția spațială a energiei radiată în spațiul liber este controlată (la fel cum lentilele optice pot focaliza lumina).

Un aspect foarte important, care influențează răspunsul unei suprafețe selective în frecvență îl reprezintă forma elementelor componente ale unei astfel de arii, în special aceea a suprafețelor metalice.

O altă categorie importantă de FSS este reprezentată de celulele unitate complementare. O celulă complementară este realizată prin reținerea aceleiași geometrii, dar prin inversarea zonei conductoare cu cea dielectrică.

De obicei este de dorit un grad cât mai ridicat de simetrie și o densitate cât mai mare a elementelor pentru ca lobi secundari să apară la frecvențe ridicate.

Se poate concluziona că rezonanța este dependentă de forma elementelor și dimensiunea acestora, în timp ce distanța dintre elemente și simetria structurii afectează robustețea la diferite unghiuri de incidență. Frecvențele la care apar lobi secundari depind numai de spațierea elementelor și de unghiul de incidență și nu de tipul elementelor utilizate.

O variantă îmbunătățită de FSS o reprezintă structurile reconfigurabile. În acest caz comportamentul său rezonant și răspunsul în frecvență pot fi rapid reconfigurate.

### Capitolul 3

#### Modelarea FSS

Caracterizarea FSS se poate face prin rezolvarea ecuațiilor lui Maxwell. O astfel de analiză este mai ușor de efectuat presupunând că FSS este de dimensiuni infinite. Această aproximare dă rezultate bune și în cazul suprafețelor selective de dimensiuni mari.

Cea mai răspândită metodă de analiză a FSS infinită este aplicarea teoriei Floquet pentru structurile periodice. Această abordare presupune rezolvarea ecuațiilor lui Maxwell pe o singură celulă unitate; întreaga FSS este caracterizată prin aplicarea unor condiții pe frontiera celulei. Metoda se bazează pe teorema lui Floquet, care afirmă că o ecuație diferențială cu coeficienți periodici și condiții limită periodice va avea o soluție care este de asemenea periodică.

În practică, determinarea coeficienților modurilor Floquet trebuie făcută numeric. Una dintre cele mai comune tehnici este metoda momentelor (MoM).

Aplicarea numerică a teoriei Floquet, fie prin software comercial de simulare, fie prin coduri dedicate, reprezintă de departe cea mai obișnuită metodă de analiză a suprafețelor selective în frecvență. Simulările din acest studiu au fost realizate utilizând Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio Suite, care este un software de simulare electromagnetică de înaltă performanță. Tehnica de integrare finită (FIT) este folosită ca tehnică de bază în CST, aceasta având la bază forma integrală a ecuațiilor lui Maxwell [3].

Structurile propuse în această lucrare sunt suprafețe selective în frecvență plane. Deoarece analiza în domeniul timp se poate realiza doar pentru o incidență normală a undei, s-a optat pentru modul de rezolvare în domeniul frecvență, care, deși implică o durată mai mare de analiză, poate fi utilizat pentru unghiuri de incidență diferite de  $90^\circ$ . Rezultatele se obțin sub forma unor parametri de repartiție.



## Capitolul 4

### **Influența unghiului de incidență și a caracteristicilor celulei unitate asupra răspunsului în domeniul frecvență al suprafețelor selective multirezonante**

În acest capitol, s-a studiat influența diferiților parametri dimensionali de material, precum și a unghiului de incidență al unde recepționate de la radar asupra frecvențelor de rezonanță ale celulelor unitate care compun suprafața selectivă în frecvență, optându-se pentru un studiu parametric cu ajutorul unui program specializat de simulare. Analiza răspunsului în frecvență s-a făcut pe baza coeficientului de reflexie la porturile Floquet.

În această secțiune, a fost considerată o celulă unitate tipică FSS, sub formă de bucle pătrate, circulare, respectiv hexagonale pentru a analiza modul în care unghiul de incidență influențează frecvența de rezonanță. Efectuând un studiu parametric prin simulări, au fost puse în evidență efectele aduse de modificarea parametrilor dimensionali, asupra frecvenței de rezonanță și răspunsului în frecvență. Materialul pentru elementele conductoare a fost ales inițial cuprul, iar materialul substratului a avut permitivitatea electrică 1, deoarece acest substrat are o influență redusă asupra răspunsului în frecvență. Celula unitate poate fi repetată la infinit cu o periodicitate depinzând de caracteristicile de radiație dorite.

Au fost analizate celulele unitate cu o buclă pătrată, cu trei bucle pătrate, cu o buclă circulară și cu trei bucle circulare, cu o buclă hexagonală și cu trei bucle hexagonale. Scopul cercetării a fost acela de a observa influența pe care o au dimensiunile geometrice și unghiul de incidență asupra frecvenței de rezonanță a unei arii selective în frecvență. Rezultatele obținute și discuțiile specifice fiecărui caz în parte, pot fi utilizate pentru optimizarea proiectării celulelor unitate FSS.

Au fost analizate efectele dimensiunilor rezonatorilor asupra răspunsului în frecvență: lungimea și lățimea buclei, grosimea stratului de cupru și a substratului. Pe lângă acești parametri geometrici, a mai fost analizată și dependența dintre frecvența de rezonanță și permitivitatea substratului utilizat, dar și influența unghiului de incidență sub care sunt aplicate undele electromagnetice asupra suprafeței selective în frecvență.

Valorile dimensiunilor geometrice inițiale pentru celulele unitate cu o singură buclă au fost alese astfel încât frecvența de rezonanță inițială să fie de 2 GHz, iar în cazul celulelor cu trei bucle concentrice, s-a urmărit doar modul de variație a frecvenței de rezonanță în funcție de grosimea traseelor buclelor.

Din studiul comparativ al celor trei tipuri de celule FSS cu buclă pătrată, circulară și, respectiv, hexagonală, se pot trage câteva concluzii privind alegerea optimă a formei geometrice, în contextul studiilor parametrice efectuate pentru fiecare formă de celulă în parte.

## Capitolul 5

### Aria efectivă a suprafețelor selective în frecvență cu celule multirezonante de tip buclă

Caracterizarea suprafețelor selective în frecvență din punct de vedere al radiației se poate face analizând aria efectivă a acestora. În acest mod, se poate analiza caracterul selectiv în frecvență în acele direcții care prezintă interes pentru aplicația avută în vedere. În cazul identificării vehiculelor utilizând plăci de înmatriculare inteligente, aceste plăci sunt, în realitate, suprafețe selective în frecvență care sunt "citite" lateral; prin urmare, radiația acestora la iluminarea de către un radar va fi monitorizată, în acest caz, în planul în care conține structura radiantă. Principiul de urmărire și identificare al vehiculelor aflate într-o coloană oficială, care utilizează plăci de înmatriculare FSS inteligente este prezentat în figura 5.1.



*Fig. 5. 1 Principiul de urmărire și identificare al autovehiculelor dintr-o coloană utilizând plăci de înmatriculare FSS inteligente*

După cum s-a arătat, setul de frecvențe de rezonanță (la care o structură prezintă arie efectivă maximă) constituie, practic, codul care trebuie citit în vederea identificării prin radio.

În cadrul acestui capitol au fost studiate comparativ, prin simulare, celulele unitate FSS cu bucle pătrate, circulare și hexagonale. A fost analizată variația frecvențelor de rezonanță în funcție de unghiul de incidență al undelor electromagnetice pe suprafața celulei FSS și variația spațială a ariei efective pentru diferite valori ale unghiului de incidență ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ), la fiecare dintre frecvențele de rezonanță.

Rezultatele obținute în urma simulărilor au fost comparate pentru tipuri similare de celule unitate, respectiv cu câte una, două sau trei bucle pătrate, circulare sau hexagonale. S-a observat că modificarea unghiului de incidență la  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ , a produs schimbări ale valorilor frecvențelor de rezonanță, cele mai accentuate fiind sesizate în cazul buclelor interioare. În ceea ce privește aria efectivă, s-a putut observa că valoarea acesteia este influențată de variația unghiului de incidență și că rezultatele obținute în urma simulărilor au valori diferite, pentru fiecare tip de buclă.

## Capitolul 6

### Influența formei rezonatorilor asupra selectivității în frecvență

În acest capitol, studiul s-a concentrat asupra analizei valorilor ariei efective obținute la iluminarea cu o undă plană a unor celulele unitate poligonale de tip buclă închisă, caracterizate printr-un număr diferit de laturi.

Scopul analizei comparative a fost acela de identificare a formei geometrice de tip buclă închisă care asigură cele mai ridicate valori ale ariei efective, exprimate în decibeli raportați la o suprafață de un metru pătrat [4], [8], [9]. Se dorește obținerea unor valori de vârf cât mai mari la frecvențele de rezonanță alese în capitolul anterior: 2 GHz, 2,5 GHz și 3 GHz. De asemenea, este de dorit ca nivelul vârfurilor ariei efective corespunzătoare celor trei frecvențe de rezonanță să fie cât mai apropiate. Un alt aspect care prezintă interes, este acela de a obține o diferență cât mai mare între vârfurile ariei efective și minimele dintre acestea [10]. Această diferență asigură o bună selectivitate în frecvență.

Spre deosebire de alte lucrări pe teme similare existente în literatura de specialitate, în această lucrare s-a impus ca obiectiv menținerea pe parcursul optimizărilor a frecvențelor de rezonanță 2 GHz, 2,5 GHz și 3 GHz, pentru toate formele geometrice studiate [5], [6], [7].

În acest sens, există o limitare a posibilităților de reglare a dimensiunilor buclelor propuse spre analiză, deoarece valorile alese pentru aceste frecvențe de rezonanță sunt suficient de apropiate, realizarea practică a buclelor devenind dificilă în unele cazuri. Dificultatea constă în faptul că spațiul dintre buclele vecine devine foarte redus, două bucle adiacente ajungând să se comporte din punct de vedere electromagnetic ca o singură buclă. În aceste cazuri, în locul celor două frecvențe distincte de rezonanță se obține o singură frecvență de rezonanță. În cel mai fericit caz, există două vârfuri ale ariei efective, însă selectivitatea este foarte redusă, făcând dificilă identificarea lor. Într-un capitol anterior a fost abordată reglarea frecvențelor de rezonanță prin modificarea lățimii traseului buclei, dar această tehnică nu este eficientă pentru lățimi de traseu de 1mm. O astfel de tehnică ar reduce spațiul dintre două bucle vecine, ceea ce ar putea conduce chiar la contopirea acestora și la un răspuns în frecvență necorespunzător.

Majoritatea lucrărilor referitoare la aria efectivă sunt orientate spre identificarea și dezvoltarea unor metode de reducere a acesteia [4], [8], [9], [10], [12-20].

Pentru aplicații de identificare radio, însă, este de dorit obținerea unor valori cât mai mari pentru aria efectivă la frecvențele de rezonanță, ceea ce face ca optimizarea să fie diferită față de abordările din literatura de specialitate. Așa cum s-a prezentat anterior, aplicațiile vizate în această lucrare se referă la plăci de înmatriculare auto care codifică informația printr-un cod de frecvențe de rezonanță.

În acest capitol, substratul utilizat a fost FR4, cu o permitivitate electrică de 4,3. Lățimea buclelor nu a permis o marjă satisfăcătoare de reglare, aceasta fiind menținută la 1 mm pentru toate formele geometrice analizate.

Materialul substratului și valorile utilizate pentru grosimea acestuia și a stratului de cupru corespund cu cele ale plăcuțelor de cablaj imprimat simplu sau dublu placat, existente pe piață. Latura celulelor unitate studiate a fost menținută la 40 mm, deoarece această valoare a permis o bună încadrare a buclelor concentrice pentru toate formele geometrice studiate.

Din compararea rezultatelor obținute rezultă că structura cu bucle pătrate concentrice orientate de-a lungul axei verticale a celulei, oferă cele mai bune valori ale ariei efective dintre toate formele geometrice studiate, acestea fiind situate în jurul valorii de  $-55 \text{ dBm}^2$ . Valori apropiate de aceste rezultate au fost obținute și pentru celula unitate cu bucle hexagonale concentrice. Celula unitate FSS cu bucle octogonale se evidențiază prin cea mai bună selectivitate. Aceasta asigură o bună selectivitate și facilitează separarea frecvențelor de rezonanță de către un echipament radar, deși valorile ariei efective nu sunt printre cele mai ridicate.

## Capitolul 7

### Influența dimensiunii celulei și a substratului asupra selectivității în frecvență

În cadrul acestui capitol, având ca punct de reper rezultatele obținute în capitolul anterior, se va studia influența perioadei spațiale a structurii selective în frecvență (latura celulei), respectiv a tipului de substrat asupra ariei efective radar.

A fost testată influența utilizării unui substrat FR4 cu permitivitate electrică de 4,3 și a unui substrat de alumină cu permitivitate electrică de 9,9 asupra valorilor ariei efective. Substratul de alumină permite o miniaturizare a structurii, permitivitatea acestuia fiind mai ridicată decât FR4. În schimb, pierderile substratului de alumină sunt mai ridicate, ceea ce afectează eficiența de radiație a unei suprafețe selective în frecvență realizată cu un astfel de material. Pentru ambele tipuri de substrat, analiza a fost realizată pentru două grosimi existente în practică, 1 mm și 2 mm.

În acest studiu au fost studiate și simulate celule unitate cu bucle hexagonale și pătrate, în cel de-al doilea caz, acestea fiind orientate după axa verticală a celulei unitate, sau la  $45^\circ$  față de această axă. În cazul substratului de alumină, pentru menținerea celor trei frecvențe de rezonanță la 2 GHz, 2,5 GHz și 3 GHz, a fost necesară reducerea lățimii traseelor de cupru de la 1 mm la 0,5 mm.

În urma studiului comparativ s-a putut constata că un substrat de alumină determină valori ale ariei efective considerabil mai bune și oferă posibilitatea reducerii dimensiunilor rezonatorilor.

O creștere a valorilor ariei efective se poate obține prin mărirea laturii celulei unitate, însă aceasta s-a dovedit a fi eficientă între anumite limite. Modificarea laturii în trepte de 1 mm nu are un efect uniform asupra celor trei frecvențe de rezonanță simultan, în sensul că au fost puține cazuri în care s-a putut obține un bun echilibru al valorilor de vârf ale ariei efective pentru toate cele trei frecvențe de rezonanță.

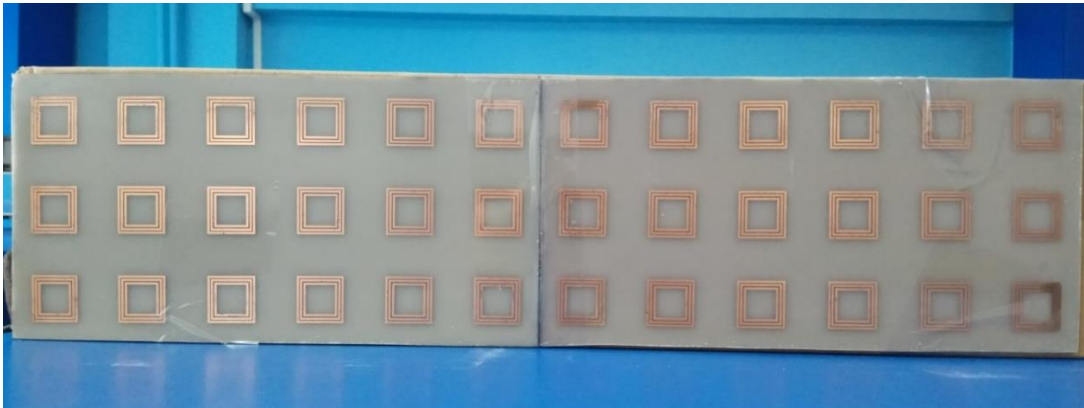
Lățimea traseelor de cupru pentru substratul FR4 a fost de 1 mm, iar pentru substratul de alumină, a fost necesară reducerea lățimii traseelor de la 1 mm la 0,5 mm.

Pentru studiul influenței substratului asupra ariei efective a unei celule FSS de dimensiune dată, au fost menținute dimensiunile celulei, respectiv latura celulei 42 mm, grosimea substratului 1 mm și a stratului de cupru 0,018 mm, precum și frecvențele de rezonanță la 2 GHz, 2,5 GHz și 3 GHz. Pentru menținerea acestor frecvențe au fost ajustate lungimile buclelor pătrate și eventual grosimea traseelor de cupru, dacă spațiul dintre acestea a fost prea mic sau dacă se suprapuneau. A fost aleasă celula FSS cu trei bucle concentrice pătrate, această formă geometrică oferind cele mai bune valori de vârf ale ariei efective dintre structurile geometrice studiate anterior.

Prin alegerea unui substrat corespunzător, valorile de vârf ale ariei efective pot fi crescute cu peste 10 dB în unele cazuri.

Dintre rezultatele obținute ies în evidență cele corespunzătoare substraturilor de mică cu o permitivitate relativă de 6 și Rogers RO3003 cu o permitivitate relativă de 3. Acestea au oferit valorile cele mai ridicate ale ariei efective.

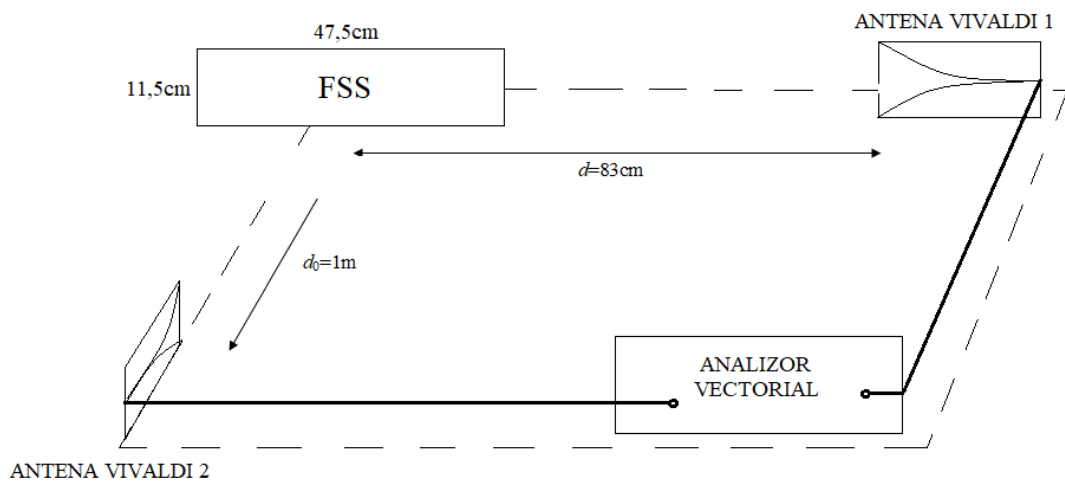
În cadrul aceluiași capitol a fost realizată măsurarea ariei efective a unei suprafețe selective în frecvență cu bucle pătrate, pentru plăci de înmatriculare interogate radar. În cazul aplicațiilor de tip placă de înmatriculare interogabilă prin radar, scenariul considerat este următorul: placa de înmatriculare, care conține o suprafață selectivă în frecvență este iluminată de către radarul vehiculului situat în spate, dar informația trebuie să poată fi citită de către un receptor situat în lateral, pe marginea drumului. Așadar, configurația radar va fi, în acest caz, una bistatică [21], [22]. În scopul efectuării determinărilor experimentale, a fost confecționată aria selectivă în frecvență, prezentată în figura 7.1.



**Fig. 7. 1** Aria efectivă caracterizată experimental, pe substrat FR4, grosime 1 mm.

Suprafața selectivă în frecvență caracterizată experimental constă din 36 de rezonatori pe un substrat FR4 de dimensiuni 47,5x11,5 cm (formatul unei plăci standard de înmatriculare). Rezonatorii au fost concepuți pentru a rezona la frecvențele alese pentru studiul prin simulare.

Configurația de tip radar bistatic utilizată pentru măsurare este prezentată în figura 7.2.



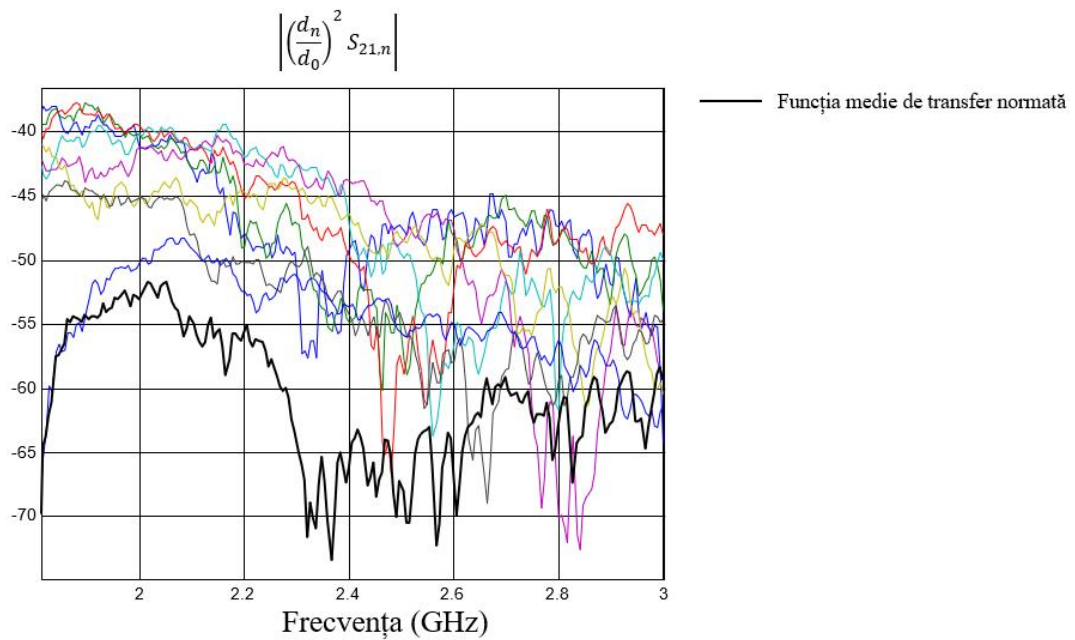
**Fig. 7. 2** Configurația sistemului de măsurare al ariei efective.

În figura 7.3 este prezentat sistemul practic de măsurare a ariei efective, în care se pot observa cele două antene Vivaldi și plăcuța selectivă în frecvență.



**Fig. 7. 3** Configurația practică a sistemului de măsurare pentru aria efectivă.

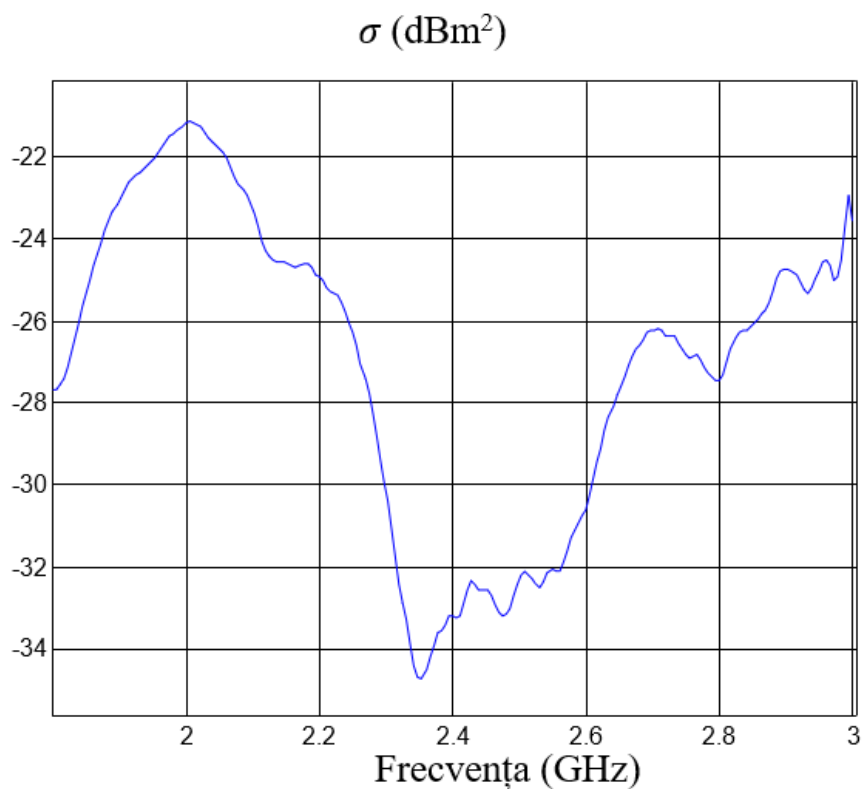
În figura 7.4 pot fi observate funcțiile de transfer normate și funcția medie de transfer.



**Fig. 7. 4** Funcțiile de transfer normate și funcția medie de transfer; corespunzătoare unei distanțe  $d_0=1$  m.

Măsurătorile au fost efectuate, în cazul de față, la opt distanțe cuprinse între 30 cm și 1 m.

În figura 7.5, a fost reprezentată variația ariei efective cu frecvența. Se poate constata o ușoară abatere pentru cea de-a doua frecvență de rezonanță (circa 200 MHz), în principal, din cauza preciziei limitate de fabricare a dispozitivului experimental.



**Fig. 7. 5** Variația ariei efective măsurate cu frecvența.

Deși numărul de celule este relativ redus, valorile de vârf ale ariei efective se încadrează între -26  $\text{dBm}^2$  și -22  $\text{dBm}^2$ .



## Capitolul 8

### Concluzii

Unul dintre scopurile cercetării a fost acela de a observa influența pe care o au dimensiunile geometrice și unghiul de incidență asupra frecvenței de rezonanță a unei arii selective în frecvență. Rezultatele obținute și discuțiile specifice fiecărui caz în parte, pot fi utilizate pentru optimizarea proiectării celulelor unitate FSS.

Au fost analizate efectele dimensiunilor rezonatorilor asupra răspunsului în frecvență: lungimea și lățimea buclei, grosimea stratului de cupru și a substratului. Pe lângă acești parametri geometrici, a mai fost analizată și dependența frecvenței de rezonanță de permitivitatea substratului utilizat, dar și de unghiul de incidență sub care sunt aplicate undele electromagnetice asupra suprafeței selective în frecvență. În cazul celulelor unitate FSS multirezonante, cu trei bucle circulare, a fost analizat efectul pe care îl produce variația lățimii traseelor de cupru asupra frecvențelor de rezonanță ale celor trei bucle concentrice și influența pe care o are spațierea dintre cele trei bucle.

Valorile dimensiunilor geometrice inițiale pentru celulele unitate cu o singură buclă au fost alese astfel încât frecvența de rezonanță inițială să fie de 2 GHz, iar în cazul celulelor cu trei bucle concentrice, s-a urmărit doar modul de variație a frecvenței de rezonanță în funcție de grosimea traseelor buclelor. Principiul de la care s-a pornit a fost acela că, pentru celulele FSS cu buclă închisă, o lungime a conturului buclei aproximativ egală cu lungimea de undă conduce la prima frecvență de rezonanță.

#### 8.1. Rezultate obținute. Analiză comparativă

Din studiul comparativ al celor trei tipuri de celule FSS, cu buclă pătrată, circular și, respectiv, hexagonal, se pot trage câteva concluzii privind alegerea optimă a formei geometrice, în contextul studiilor parametrice efectuate pentru fiecare formă de celulă în parte. De asemenea au fost studiate și analizate comparativ, prin simulare, celulele unitate FSS cu bucle pătrate, circulare și hexagonale. A fost analizată variația frecvențelor de rezonanță în funcție de unghiul de incidență al undelor electromagnetice pe suprafața celulei FSS.

Un alt parametru care a făcut obiectul studiului a fost variația spațială a ariei efective pentru diferite valori ale unghiului de incidență ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ), la fiecare dintre frecvențele de rezonanță. Rezultatele obținute în urma simulărilor au fost comparate pentru tipuri similare de celule unitate, respectiv cu câte una, două sau trei bucle pătrate, circulare sau hexagonale. S-a observat că modificarea unghiului de incidență la  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  a produs schimbări ale valorilor frecvențelor de rezonanță, cele mai accentuate fiind sesizate în cazul buclelor interioare.

În ceea ce privește aria efectivă, s-a putut observa că valoarea acesteia este influențată de variația unghiului de incidență și că rezultatele obținute în urma

simulărilor au valori diferite, pentru fiecare tip de buclă. Din compararea rezultatelor obținute se observă că structura cu bucle pătrate concentrice orientate de-a lungul axei verticale a celulei oferă cele mai bune valori ale ariei efective dintre toate formele geometrice studiate, acestea fiind situate în jurul valorii de  $-55 \text{ dBm}^2$ . Valori apropiate de aceste rezultate au fost obținute și pentru celula unitate cu bucle hexagonale concentrice. Celula unitate FSS cu bucle octogonale se evidențiază prin cea mai bună selectivitate, asigurând o bună separare a frecvențelor de rezonanță de către un echipament radar, deși valorile ariei efective nu sunt printre cele mai ridicate.

În urma studiului comparativ s-a putut constata că un substrat de alumina determină valori ale ariei efective considerabil mai bune și oferă posibilitatea reducerii dimensiunilor rezonatorilor.

O creștere a valorilor ariei efective se poate obține prin mărirea laturii celulei unitate, însă aceasta s-a dovedit a fi eficientă între anumite limite. Modificarea laturii în trepte de 1mm nu are un efect uniform asupra celor trei frecvențe de rezonanță simultan, în sensul că au fost puține cazuri în care s-a putut obține un bun echilibru al valorilor de vârf ale ariei efective pentru toate cele trei frecvențe de rezonanță.

Lățimea traseelor de cupru pentru substratul FR4 a fost de 1 mm, dar pentru substratul de alumina, a fost necesară reducerea lățimii traseelor de la 1 mm la 0,5 mm.

Așa cum au observat și alți autori [11], mărirea celulei (periodicitatea), influențează într-o oarecare măsură frecvența de rezonanță, dar are cu precădere efect asupra ariei efective.

Trecerea de la un substrat de FR4 la alumina cu o permitivitate electrică de 9,9 a determinat o reducere semnificativă a dimensiunii buclilor, ceea ce conduce implicit la o reducere a mărimii celulelor din care fac parte și, astfel, se poate utiliza un număr mai mare de celule pe o suprafață dată.

Din punct de vedere al valorilor de vârf ale ariei efective, s-a constatat că dintre structurile realizate pe un substrat de FR4, celula cu bucle pătrate poziționate paralel cu axa verticală a celulei determină cele mai bune valori, urmată de celula unitate FSS cu bucle hexagonale, ambele pe substrat cu grosimea de 1 mm și latura celulei de 40 mm.

În cazul în care a fost utilizat substrat de alumina, cele mai bune rezultate au fost înregistrate pentru celula unitate cu pătrate rotite cu  $45^\circ$  față de axa verticală a celulei, urmată de celula unitate cu bucle hexagonale, ambele pe un substrat cu grosimea de 2 mm și o lungime a laturii celulei de 40 mm.

Trebuie subliniat faptul că pentru toate formele de rezonator simulate pe substrat de alumina, valorile de vârf ale ariei efective au fost peste  $-55 \text{ dBm}^2$  (valoarea maximă obținută la celula unitate cu bucle pătrate pe suport de FR4). Per ansamblu, s-a constatat că valorile obținute în cazul substratului de alumina se situează între  $-45 \text{ dBm}^2$  și  $-40 \text{ dBm}^2$ , considerabil mai ridicate față de cele pentru substratul FR4. Totuși, așa cum se arată în alte studii, substratul de alumina conduce la o eficiență de radiație mai scăzută, având tangenta unghiului de pierderi mai ridicată decât FR4.

Prin alegerea unui substrat corespunzător, valorile de vârf ale ariei efective pot fi crescute cu peste 10 dB în unele cazuri.

Dintre rezultatele obținute, ies în evidență cele corespunzătoare substraturilor

de mică cu o permitivitate relativă de 6 și Rogers RO3003 cu o permitivitate relativă de 3. Acestea au oferit valorile cele mai ridicate ale ariei efective.

## 8.2. Contribuții originale

1. Analiza modului în care influențează unghiul de incidență și caracteristicile celulei unitate asupra răspunsului în domeniul frecvență al suprafețelor selective multirezonante, pentru celulele unitate cu o buclă și cu trei bucle pătrate, circulare și hexagonale [LO1].

2. Studiarea ariei efective a suprafețelor selective în frecvență cu celule multirezonante de tip buclă, pentru celulele unitate cu una, două și trei bucle concentrice, de formă geometrică pătrată, circulară și hexagonală [LO2].

3. Analiza influenței formei rezonatorilor asupra selectivității în frecvență și identificarea formelor geometrice din punct de vedere al valorilor de vârf ale ariei efective. Au fost simulate celule unitate cu trei bucle concentrice triunghiulare, pătrate, hexagonale, octogonale și respectiv decagonale [LO3].

4. Analiza influenței dimensiunii celulei și a substratului asupra selectivității în frecvență, fiind studiate valorile de vârf ale ariei efective pentru celulele unitate pătrate și hexagonale, pe substraturi de FR4 și alumina [LO4].

5. Studiarea influenței diferitelor materiale utilizate cu substratul asupra valorilor de vârf ale ariei efective a unei celule FSS de dimensiune dată, cu scopul de a optimiza alegerea substratului [LO5].

6. Măsurarea ariei efective a unei suprafețe selective în frecvență.

7. Măsurarea în configurație bistatică a ariei efective a unei suprafețe selective în frecvență cu bucle pătrate, pentru plăci de înmatriculare interogate de radar, cu ajutorul metodei medierii în distanță.

## 8.3. Lista lucrărilor originale

[LO1] Adrian Androne, Razvan D. Tamas, "Impact of the angle of arrival on the response of a multi-resonant frequency selective surface," Proceedings Volume 10977, 2018 SPIE Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies IX; 109772X (2018) <https://doi.org/10.1117/12.2324694>

[LO2] Adrian Androne, Razvan D. Tamas, "A parametric study on the frequency-domain response of multi-resonant frequency selective surfaces with loop-type unit cells," Proceedings Volume 10977, 2018 SPIE Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies IX; 109772Y <https://doi.org/10.1117/12.2324698>

[LO3] A. Androne and R. D. Tamas, "Comparative Analysis for Different Loop-Type Frequency Selective Unit Cells," 2019 IEEE International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS), Iasi, Romania, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISSCS.2019.8801766.

**[LO4]** A. Androne and R. D. Tamas, "Influence of the Substrate and Cell Dimensions on the Radar Cross Section of Closed Loop Type Frequency Selective Surface Unit Cells," 2019 IEEE International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS), Iasi, Romania, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISSCS.2019.8801817.

**[LO5]** A. Androne, R. D. Tamas and S. Tasu, "Influence of the Substrate Material on the Radar Cross Section of Square Loop Unit Cells for Frequency Selective Surfaces," 2020 IEEE International Workshop on Antenna Technology (iWAT), Bucharest, Romania, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/iWAT48004.2020.1570612531.

**[LO6]** L. Anchidin, R. D. Tamas, A. Androne and G. Caruntu, "Antenna gain evaluation based on weighting near-field measurements," 2017 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT), Athens, 2017, pp.78-81, doi:10.1109/IWAT.2017.7915322.

Proiecte de cercetare:

1) Holistica impactului surselor regenerabile de energie asupra mediului și climei (HORESEC), coordonator Universitatea Maritimă din Constanța, contract de cercetare nr. PN-III-P1-1.2-PCCDI-2017-0404/31PCCDI/2018. Acesta este finanțat în cadrul Planului Național de Cercetare, Dezvoltare și Inovare, programul Dezvoltarea Sistemului Național de Cercetare-Dezvoltare, subprogramul Performanță Instituțională, perioada: 2018-2020.

Rapoarte de cercetare:

1. A. ANDRONE, „Studiu privind principiile care stau la baza funcționării suprafețelor selective în frecvență. Arhitecturi de suprafețe selective în frecvență”, Raport de cercetare doctorat, Universitatea POLITEHNICA din București, uz intern.

2. A. ANDRONE, „Studiu parametric privind răspunsul în domeniul frecvență al suprafețelor selective multirezonante cu celule unitate de tip buclă”, Raport de cercetare doctorat, Universitatea POLITEHNICA din București, uz intern.

3. A. ANDRONE, „Influența unghiului de incidență asupra răspunsului în domeniul frecvență al suprafețelor selective multirezonante”, Raport de cercetare doctorat, Universitatea POLITEHNICA din București, uz intern.

4. A. ANDRONE, „Analiza comparativă a ariei efective pentru diferite celule unitate selective în frecvență cu o geometrie de tip buclă închisă”, Raport de cercetare doctorat, Universitatea POLITEHNICA din București, uz intern.

5. A. ANDRONE, „Influența dimensiunii celulei și a substratului asupra ariei efective a suprafețelor selective în frecvență cu bucle închise”, Raport de cercetare doctorat, Universitatea POLITEHNICA din București, uz intern.

#### **8.4. Perspectiva de dezvoltare ulterioară**

Cercetările referitoare la suprafețele selective în frecvență cu aplicabilitate în identificarea și în conducerea autonomă a vehiculelor pot fi continuate cu validarea experimentală a tuturor structurilor dezvoltate și optimizate în această lucrare.

O altă direcție de continuare a cercetărilor în acest domeniu o constituie studierea diverselor structuri selective în frecvență, rezonante la frecvențe mult mai mari, de ordinul zecilor de GHz, tipice radarelor pentru vehicule autonome.

De asemenea, este necesară o validare pe un vehicul real a unui astfel de sistem de identificare radar, echipat cu o suprafață selectivă în frecvență, pentru a observa calitatea răspunsului în condiții reale, inclusiv pentru deplasarea în cadrul unei coloane.

Un aspect foarte important este reprezentat și de securitatea informațiilor (codurilor) vehiculate între două autovehicule din coloană, luând în calcul metode de protecție împotriva perturbațiilor sau bruiajului.

Cercetarea poate fi continuată și în direcția elaborării unor forme mai complexe de rezonatori care să asigure o mai bună selectivitate în frecvență, dar și valori de vârf ale ariei mai ridicate.

## Bibliografie

- [1] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*, New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [2] A. E. Farahat and K. F. A. Hussein, *Spatial Filters for Linearly Polarized Antennas Using Free Standing Frequency Selective Surfaces*, *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 2, pp. 167-188, 2008.
- [3] De Jichun Li, Yunqing Huang, *Time-Domain Finite Element Methods for Maxwell's Equations in Metamaterials*, Vol. 43 Springer Series in Computational Mathematics, Springer Berlin Heidelberg, 2012
- [4] E. Martini, F. Caminita, M. Nannetti, S. Maci, *Fast analysis of FSS radome for antenna RCS reduction*, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2006
- [5] Mei Li, ShaoQiu Xiao, Yan-Ying Bai, Bing-Zhong Wang, *An Ultrathin and Broadband Radar Absorber Using Resistive FSS*, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* ( Volume: 11 ),748 - 751, 2012
- [6] Deng Shuhi, Ruan Yingzheng (University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054), *Radar Cross Section Analysis of Slot-Array Antennas*, *Acta Electronica Sinica*;1992-06
- [7] Deng Shuhui;Ruan Yingzheng(Dept.of Electromagnetic Fields Eng.), *Radar Cross Section of Reflector Antenna*, *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*;1990-05
- [8] Ruan Yingzheng,Feng Ling,Han Xiaoying(University of Electronic Science and Technology of China,Chengdu 610054), *FSS Reflector Antennas with Small RCS*, *Acta Electronica Sinica*;1993-09
- [9] H. Li, B.-Z. Wang, G. Zheng, W. Shao, and L. Guo, *A Reflectarray Antenna Backed on FSS for Low RCS and High Radiation Performances*, *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 15, 145-155, 2010
- [10] N. Misran, R. Cahill, V.F. Fusco, *RCS reduction technique for reflectarray antennas*, *Electronics Letters* , Volume: 39, Issue: 23, 13 Nov. 2003
- [11] Mohyuddin W, Kim DH, Choi HC, Kim KW, *Comparative Study of Square and Circular Loop Frequency Selective Surfaces for Millimeter-Wave Imaging Diagnostics Systems*, *Sensors* (Basel), 2018;18(9):3079
- [12] Costa, Filippo & Monorchio, Agostino, *Use of Frequency Selective Surfaces For Reduction of Radar Cross Section of Antennas and Scattering*, 2nd ESA Antenna Workshop on Antennas for Space Applications, January 2010, 882-885
- [13] Y. Li, H. Zhang, Y. Fu, and N. Yuan, *RCS Reduction of Ridged Waveguide Slot Antenna Array Using EBG Radar Absorbing Material*, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 7, pp.473-476, 2008.
- [14] J. L. Volakis, A. Alexanian, and J. M. Lin, *Broadband RCS reduction of rectangular patch by using distributed loading*, *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 25, pp. 2322-2323, 1992.

- [15] W.-T. Wang, S.-X Gong, X. Wang, H.-W. Yuan, J. Ling, and T.-T. Wan, *RCS Reduction of Array Antenna by Using Bandstop FSS Reflector*, Journal of Electrom. Waves and Appl., vol. 23, no. 11, pp. 1505-1514, 2009
- [16] Wang, Fuwei & Li, Ke & Ren, Yuhui & Zhang, Yunqi, *A novel reconfigurable FSS applied to the antenna radar cross section reduction*, International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, vol. 29, e21729
- [17] Jingjing Xue, Wen Jiang, and Shuxi Gong, *Wideband RCS Reduction of Microstrip Array Antenna Based on Absorptive Frequency Selective Surface and Microstrip Resonators*, International Journal of Antennas and Propagation Volume 2017, Article ID 1260973
- [18] Y. Zheng, J. Gao, X. Cao, Z. Yuan, and H. Yang, *Wideband RCS reduction of a microstrip antenna using artificial magnetic conductor structures*, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 14, pp. 1582–1585, 2015
- [19] M. Zahir Joozdani, M. Khalaj Amirhosseini, and A. Abdolali, *Wideband radar cross-section reduction of patch array antenna with miniaturised hexagonal loop frequency selective surface*, Electronics Letters, vol. 52, no. 9, pp. 767–768, 2016
- [20] C. Huang, W. Pan, X. Ma, and X. Luo, *Wideband radar cross-section reduction of a stacked patch array antenna using metasurface*, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 14, pp. 1369–1372, 2015
- [21] I. V. Mihai, R. D. Tamas and A. Sharaiha, *A Technique for Radar Cross Section Measurements in the Fresnel Region*, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 18, no. 6, pp. 1149-1153, June 2019.
- [22] R. D. Tamas, D. Deacu et al., *A method for antenna gain measurements in nonanechoic sites*, Microwave and Optical Technology Letters 56.7 (2014), pp. 1553–1557, doi: 10.1002/mop.28386