



UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCURE?TI ȘCOALA DOCTORALĂ ETTI-B

Decizia Nr. 534 din 28.07.2020

TEZĂ DE DOCTORAT -REZUMAT-

Măsurarea suprafeței echivalente radar într-un mediu real

Radar Cross Section Measurements in a Real Environment

Doctorand: Mihai Ilie-Valentin

Președinte	Prof. Gheorghe	de la	Universitatea PO-
	Brezeanu		LITEHNICA din
			București
Co-îndrumător	Prof. Răzvan Tamaș	de la	Universitatea PO-
			LITEHNICA din
			București
Co-îndrumător	Prof. Ala Sharaiha	de la	Université de Rennes1
Examinator	Prof. Claire Migliac-	de la	Université Côte
	cio		d'Azur
Examinator	Prof. Tudor Palade	de la	Universitatea Tehnică
			din Cluj-Napoca
Examinator	Prof. Ioan Nicolaescu	de la	Academia Tehnică
			Militară Ferdinand I
Examinator	Conf. Alina Bădescu	de la	Universitatea PO-
			LITEHNICA din
			București

JURIUL

București 2020

Abstract

Română

Măsurătorile suprafeței echivalente radar (SER) sunt, în general, efectuate în camere anecoide sau într-o zonă deschisă, în condiții de câmp îndepărtat. Țintele mari, precum avioanele, navele maritime și alte vehicule nu pot fi plasate în interiorul unei camere anecoide sau costurile configurației de măsură devin prohibitive. Mai mult decât atât, transformările clasice din câmp apropiat în câmp îndepărtat sunt complexe, consumatoare de timp și costisitoare pentru a fi implementate la scară largă și, prin urmare, nu sunt adecvate într-un scenariu în timp real. Pentru a depăși aceste dezavantaje, în această teză propunem o nouă tehnică de evaluare a suprafeței echivalente radar în regiunea Fresnel și într-un mediu real.

Un factor analitic de extrapolare a zonei de câmp este derivat; apoi este dezvoltată o tehnică de calcul rapid cu integrale Fresnel, iar rezultatele experimentale sunt obținute folosind trei sisteme de antene diferite: Vivaldi, log-periodice și horn. Măsurătorile SER-ului sunt efectuate pe ținte simple și complexe plasate într-un mediu real. Pentru a reduce efectele mediului real, sunt propuse tehnica medierii în distanță, reducerea cuplajului mutual și ferestruirea în domeniul timp. SER-ul este evaluat și la unghiuri de incidență ridicate, luând în considerare efectele difracției.

English

Radar cross section (RCS) measurements are generally performed in anechoic chambers or in an open area test site, under far-field conditions. Large targets, such as aircrafts, ships, and other large vehicles cannot be placed inside an anechoic chamber, or the cost of such a measuring site would be prohibitive. Moreover, classical near-field to far-field transformations are complex, time-consuming and expensive to be implemented at a large scale, and therefore not suitable for processing data in a real-time scenario. To overcome these drawbacks, we propose a technique to evaluate the RCS in the Fresnel region in a multipath environment.

An analytical field-zone extrapolation factor is derived; a computing time saving technique with Fresnel integrals is then developed and experimental results are provided by using three different antenna systems: vivaldi, log-periodic and horn antennas. The RCS measurements are performed over simple and complex targets placed in real environment. The distance averaging technique, coupling subtraction and time gating are proposed in order to reduce the effects of the environment. The RCS is evaluated also at high incidence agles by taking into account the effects of the diffraction.

Sumar

	Abs	tract	ii
1	Int 1.1 1.2 1.3	roducere Prezentarea domeniului de doctorat	1 1 1
2	Pri	ncipiile suprafetei echivalente radar	3
	2.1	Introducere	3
	2.2	Ecuația radiolocației	3
	2.3	Fenomenul suprafeței echivalente radar	3
	2.4	Tehnici de predicție ale SER-ului	4
	2.5	Analiza SER-ului în zona Fresnel	4
3	O t regi log-	tehnică nouă de măsurare a suprafeței echivalente radar în Junea Fresnel și într-un mediu real utilizând antene Vivaldi, periodice si horn	5
	3.1	Introducere	5
	3.2	Evaluarea analitică a SER-ului în regiunea Fresnel	5
	3.3	Evaluarea analitică a SER-ului în câmp îndepărtat	7
	3.4	Factorul de extrapolare a zonei de câmp	7
	3.5	Calibrare	$\overline{7}$
	3.6	Protocolul de măsură	7
	3.7	Parametrii antenelor	8
	3.8	Rezultate experimentale	8
4	Mă uri	surarea suprafeței echivalente radar a țintelor complexe la unghi- de incidență oblice	10
	4.1	Introducere	10
	4.2	Evaluarea analitică a SER-ului la unghiuri de incidență oblică	10
		4.2.1 Cazul unei plăci dreptunghiulare	10
		4.2.2 Cazul unei ținte circulare	11
		4.2.3 Cazul unui model la scară, simplificat al unei rulote	12
		4.2.4 Cazul unui model la scară, simplificat al unei fregate	13
		4.2.5 Cazul unui model la scară al unei case dintr-un container	13
	4.3	Protocolul de măsură	14
	4.4	Ferestruirea în domeniul timp	14
	4.5	Rezultate experimentale	14

5	Evaluarea suprafeței echivalente radar la unghiuri de incidență ridi-				
	cate		16		
	5.1	Introducere	16		
	5.2	Metodologie	16		
	5.3	Cazul unei ținte dreptunghiulare	17		
		5.3.1 Determinarea raportului dintre câmpul difractat și câmpul in-			
		$\operatorname{cident} \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots $	17		
		5.3.2 Factorul de extrapolare pentru câmpul difractat	18		
	5.4	Cazul unei tinte complexe	18		
	5.5	Protocolul de măsură	18		
	5.6	Rezultate experimentale	18		
6	Con	cluzii	20		
	6.1	Rezultate	20		
	6.2	Contribuții originale	20		
	6.3	Publicații	21		
	6.4	Perspective viitoare de cercetare	23		
Bi	Bibliografie selectată				

1. Introducere

1.1 Prezentarea domeniului de doctorat

Evaluarea suprafeței echivalente radar (SER) se efectuează, de regulă, în camere anecoide sau într-un loc de testare în zonă deschisă, în condiții de câmp îndepărtat. Țintele de dimensiuni mari, cum sunt aeronavele, fregatele și alte vehicule nu pot fi introduse în interiorul unei camere anecoide sau costurile unui astfel de loc de măsurare ar deveni prohibitiv. În schimb, măsurătorile SER-ului la distanțe specifice zonei de câmp îndepărtat sunt susceptibile la reflexiile produse la nivelul solului, precum și la un raport semnal-zgomot scăzut. Mai mult decât atât, transformările clasice din câmp apropiat în câmp îndepărtat sunt complexe, consumatoare de timp și costisitoare pentru a fi implementate la scară largă și într-un scenariu în timp real. În acest caz, este nevoie de tehnici pentru evaluarea SER-ului la distanțe radar-țintă din regiunea Fresnel și într-un mediu real.

1.2 Scopul tezei

Măsurătorile suprafeței echivalente radar (SER) sunt efectuate în general în camere anecoide, dar dimensiunile camerelor trebuie să depășească limita zonei de câmp îndepărtat, iar absorbanții trebuie să devină eficienți până la limita inferioară a gamei de frecvențe de interes. Aceste constrângeri sunt dificil de respectat pentru o țintă mare și/sau atunci când SER-ul trebuie evaluat la frecvențe joase. Cercetările actuale despre SER-ul țintelor mari în câmp real iau în considerare reducerea efectelor propagării multi-cale; un caz tipic de interes reprezintă măsurarea SER-ului unei nave într-un mediu de propagare multi-cale (suprafața mării). Pentru calibrarea măsurătorilor, pe navă sunt atașate reflectoare cu semnătură electromagnetică cunoscută. Cu toate acestea, o astfel de metodă este destul de costisitoare, deoarece măsurătorile sunt efectuate dintr-un elicopter. O potențială soluție de reducere a propagării multi-cale reprezintă tehnica de mediere în distanță.

1.3 Conținutul tezei

Teza este organizată în 6 capitole; conținutul tezei poate fi sumarizat după cum urmează:

Capitolul 1 conține introducerea generală a tezei, prezentarea generală a domeniului de doctorat precum și scopul tezei de doctorat.

Capitolul 2 prezintă o imagine de ansamblu asupra principiilor suprafeței echivalente radar precum și a bibliografiei asociate acestui domeniu. Capitolul începe cu ecuațiile de bază care guvernează ecuația radiolocației. De asemenea, sunt explicate fenomenele suprafeței echivalente radar și metodele de predicție a acesteia împreună cu o revizuire a literaturii de specialitate. In capitolul 3, este prezentată o nouă tehnică de evaluare a SER-ului unei ținte dreptunghiulare în zona Fresnel și câmp îndepărtat și de asemenea este derivat un factor analitic de extrapolare a zonei de câmp; apoi este dezvoltată o tehnică rapidă de calcul cu ajutorul integralelor Fresnel, iar rezultatele experimentale sunt obținute prin utilizarea a trei sisteme de antene diferite: Vivaldi, log-periodice și horn. Măsurătorile SER sunt efectuate în mediu real, iar tehnica de mediere în distanță și reducerea cuplajului mutual sunt propuse pentru a elimina efectele mediului și efectele propagării multi-cale.

In capitolul 4, pe baza aproximărilor din fizica optică, tehnica este extinsă pentru măsurarea SER-ul în zona Fresnel a unor ținte complexe aflate la unghiuri de incidență non-normale. În primul rând, un model matematic robust este dezvoltat pentru a evalua SER-ul unei ținte dreptunghiulare cât și al unei ținte circulare. Apoi, modelul matematic este îmbunătățit pentru a evalua SER-ul unui model la scară, simplificat al unei rulote, al unei fregate și al unei case dintr-un container. Mai mult decât atât, tehnica ferestruirii în domeniul timp este propusă, de asemenea, pentru a reduce reflexiile și efectele mediului real. Sunt prezentate protocolul de măsură și rezultatele experimentale obținute cu antenele horn.

O îmbunătățire suplimentară a metodei este prezentată în capitolul 5, în care efectele difracției la marginile țintelor sunt luate în considerare. Modelul matematic prezentat în capitolele 3 și 4 este extins la unghiuri de incidență oblice ridicate, folosind teoria uniformă a difracției. Rezultate experimentale sunt furnizate pentru o țintă dreptunghiulară și pentru o țintă complexă.

In capitolul 6 sunt prezentate rezultatele obținute, contribuțiile originale precum și perspectivele viitoare de dezvoltare.

2. Principiile suprafeței echivalente radar

2.1 Introducere

In acest capitol este efectuată o scurtă trecere în revistă a teoriei suprafeței echivalente radar și a metodelor de analiză corespunzătoare acesteia. Explicațiile de bază ale acestor metode sunt prezentate. De asemenea, literatura de specialitate referitoare la diferitele aplicații ale SER-ului în câmp îndepărtat și în regiunea Fresnel este analizată.

2.2 Ecuația radiolocației

Ecuația radiolocației este cea mai utilizată relație matematică în analiza suprafeței echivalente radar.

În cazul simplu de detecție al unei ținte, se poate defini un raport semnal-zgomot minim necesar, pe baza probabilității de detecție a caracteristicilor țintei și ale radarului. Deoarece zgomotul receptorului poate avea o putere medie constantă, raportul minim semnal-zgomot definește nivelul minim al semnalului primit, P_{rmin} , care poate fi tolerat. Prin urmare, intervalul maxim de detecție este dat de ecuația următoare:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{rmin}}} \qquad [m], \qquad (2.1)$$

unde P_t este puterea transmisă, λ este lungimea de undă, G este câștigul antenelor radarului, R_{max} este distanța dintre radar și țintă, iar σ este suprafața echivalentă radar a țintei.

2.3 Fenomenul suprafeței echivalente radar

IEEE definește SER-ul ca o măsură a puterii reflectate de o țintă și anume de 4π ori raportul dintre puterea reflectată pe unitatea de unghi într-o direcție specificată și puterea pe unitatea de suprafață. Mai precis, este limita acestui raport pe măsură ce distanța dintre radar și țintă se apropie de infinit:

$$\sigma = \lim_{x \to \infty} 4\pi r^2 \frac{|\mathbf{E}_r|^2}{|\mathbf{E}_i|^2} = \lim_{x \to \infty} 4\pi r^2 \frac{|\mathbf{H}_r|^2}{|\mathbf{H}_i|^2},$$
(2.2)

unde \mathbf{E}_r și \mathbf{H}_r este câmpul electric și magnetic reflectat, iar \mathbf{E}_i și \mathbf{H}_i este câmpul electric și magnetic incident la suprafața țintei.

2.4 Tehnici de predicție ale SER-ului

Poate cea mai veche și ușoară tehnică de evaluare a SER-ul este metoda opticii geometrice, care a fost introdusă în studiile de propagare a luminii cu mulți ani în urmă. Chiar și în configurații bistice, SER-ul este dat de o formulă foarte simplă, care include doar razele de curbură la nivelul direcției normale. Cu toate acestea, această tehnică nu reușește să evalueze corect SER-ul când una sau ambele raze de curbură, ca în cazul unui cilindru sau a unei suprafețe plane, devin infinite. În acest caz putem utiliza tehnica fizicii ondulatorii. Raza de curbură a suprafeței poate fi infinită, dar fizica ondulatorie prezice rezultatul corect dacă ținta nu este prea mică.

De asemenea, metoda fizicii ondulatorii nu reușește să prezică SER-ul la unghiuri de incidență ridicate. Răspunsul pentru care fizica ondulatorie eșuează este că acele contribuții ale marginilor sunt neglijate, iar în acest caz ar trebui aplicată teoria geometrică a difracției (GTD) a lui Keller [1]. GTD abordează difracția la marginile țintelor în mod standard, iar acestă tehnică prezice rezultate foarte bune pentru o gamă largă de unghiuri de incidență. Chiar dacă este o metodă care oferă rezultate bune la unghiuri largi, ea se încadrează, totuși, în limita marginilor de umbră și reflecție. Prin urmare, a fost dezvoltată teoria uniformă a difracției (UTD) pentru a rezolva aceste dificultăți [2], însă nu și problemele caustice ale GTD.

Metoda curenților echivalenți (MEC) a fost introdusă pentru a rezolva problemele caustice ale GTD [3], dar tehnica nu rezolvă singularitățile coeficienților de difracție. De asemenea, Ufimtsev a formulat teoria fizică a difracției (PTD) pentru analiza marginilor țintelor [4].

2.5 Analiza SER-ului în zona Fresnel

Măsurarea SER-ului în câmp îndepărtat este posibilă într-un spațiu vast care îndeplinește condițiile de câmp îndepărtat sau într-o cameră de măsură compactă, unde o unda cvasi-plană este generată și iluminează ținta. Un dezavantaj al limitelor de câmp îndepărtat este lungimea acestora, care devin foarte mari odată ce aperturile antenelor radar cresc. Dimensiunile camerelor de măsură compacte sunt de asemenea mari, mai ales dacă țintele sunt foarte mari. Toate variantele de măsură menționate mai sus necesită o infrastructură destul de costisitoare, care nu este întotdeauna disponibilă. O soluție este măsurarea SER-ului în zona regiunii Fresnel la câteva lungimi de undă distanță de apertura antenei radarului. În literatura de specialitate există o mulțime de metode pentru a analiza SER-ul în regiunea Fresnel.

In acest capitol a fost prezentată teoria suprafeței echivalente radar și metodele de determinare asociate acesteia. De asemenea, a fost revizuită literatura de specialitate privind aplicarea RCS în domeniul militar și civil, arătând că SER-ul în regiunea Fresnel a devenit o alternativă foarte utilă în multe scenarii reale. 3. O tehnică nouă de măsurare a suprafeței echivalente radar în regiunea Fresnel și într-un mediu real utilizând antene Vivaldi, logperiodice și horn

3.1 Introducere

Măsurătorile SER-ului în câmp îndepărtat sunt afectate de reflexiile produse la nivelul solului sau de un raport semnal-zgomot redus al undei reflectate [5], iar configurația de măsură poate fi adesea foarte complexă [6]. De asemenea, transformările din câmp apropiat în câmpul îndepărtat sunt complexe, consumatoare de timp și costisitoare pentru a fi implementate la scară largă și, prin urmare, nu sunt adecvate pentru un scenariu în timp real [7].

Pentru a găsi soluții pentru aceste neajunsuri, metode de determinare a SERului în regiunea Fresnel au fost dezvoltate recent și prezentate în capitolul anterior [8, 9, 10, 11].

Unele dintre primele studii despre estimarea suprafeței echivalente radar a țintelor simple au fost publicate în 1965 în [12, 13, 14, 15]. Alte metode de evaluare a SER-ului a țintelor militare, avioanelor și rachetelor au fost prezentate în [16, 17, 18, 19, 20].

3.2 Evaluarea analitică a SER-ului în regiunea Fresnel

SER-ul poate fi definit după cum urmează

$$\sigma = 4\pi r^2 \frac{|\mathbf{H}_r|^2}{|\mathbf{H}_i|^2},\tag{3.1}$$

unde r este distanța dintre țintă și radar, \mathbf{H}_i și \mathbf{H}_r sunt câmpul magnetic incident și reflectat.

Câmpul magnetic reflectat de o placă dreptunghiulară cu dimensiunile a și b poate fi exprimat cu următoarea expresie:

$$H_r = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} j \frac{k J_S}{4\pi r} \exp[-jk(r+\Delta r)] dx' dz', \qquad (3.2)$$

unde Δr este diferența de cale din termenul de fază, iar k este numărul de undă. Densitatea de curent J_S la suprafața plăcii dreptunghiulare dintr-o configurație radar ca și în fig. 3.1 poate fi aproximată utilizând fizica ondulatorie:

$$\mathbf{J}_{S} = \begin{cases} 2\mathbf{n} \times \mathbf{H}_{i}, & \text{în zona de incidență normală} \\ 0, & \text{în zona de umbră.} \end{cases}$$
(3.3)



Figure 3.1: Configurație de măsură radar cu antene Vivaldi (a) reprezentare schematică (b) reprezentare reală.

Luând în considerare toate sursele punctiforme de câmp de pe apertura antenei de transmisie de lungime h_1 și toate punctele de recepție de pe apertura antenei de recepție de lungime h_1 , se poate calcula o medie pe ambele aperturi, iar SER-ul unei ținte dreptunghiulare în regiunea Fresnel ar putea fi exprimat după cum urmează:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \frac{1}{(2h_1)^2} \int_{-h_1}^{h_1} \int_{-h_1}^{h_2} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \exp(-jk\Delta r) \mathrm{d}x' \mathrm{d}z' \mathrm{d}z \mathrm{d}z'' \right|^2.$$
(3.4)

Integralele rezultate de tipul următor:

$$\int \exp\left(-jk_0 \frac{x\prime^2}{d}\right) \mathrm{d}x\prime = \int \exp\left[-j\left(\sqrt{\frac{k_0}{d}}x\prime\right)^2\right] \mathrm{d}x\prime \tag{3.5}$$

sunt de fapt integrale Fresnel: $f(w)=\int_w^\infty \exp(-ju^2)\mathrm{d} u.$ Expresia finală a SER-ului este:

$$\sigma_{Fr} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left\{ \sqrt{\frac{d}{k_0}} \left| f\left(-\frac{a}{2}\sqrt{\frac{k_0}{d}} \right) - f\left(\frac{a}{2}\sqrt{\frac{k_0}{d}} \right) \right| \frac{1}{(2h_1)^2} \frac{2d}{k_0} \left| \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \left[f\left(-h_1\sqrt{\frac{k_0}{d}} - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{k_0}{d}} \right) - f\left(h_1\sqrt{\frac{k_0}{d}} - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{k_0}{d}} \right) \right]^2 dz' \right| \right\}^2 = \frac{4\pi Q^2}{\lambda^2}.$$
(3.6)

Utilizând expresia SER-ului determinată în (3.6) în loc de forma cu patru integrale (3.4), efortul timpului de calcul poate fi redus de la câteva ore la câteva milisecunde.

Reducerea timpului de calcul provine atât din reducerea ordinului de integrare, cât și din utilizarea unei forme asimptotice pentru calcularea integralelor Fresnel.

3.3 Evaluarea analitică a SER-ului în câmp îndepărtat

La distanțe specifice câmpului îndepărtat, când $d = r \text{ si } d \to \infty$, SER-ul exprimat cu (3.6) devine

$$\sigma_{ff} = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2}.\tag{3.7}$$

3.4 Factorul de extrapolare a zonei de câmp

Un factor de extrapolare a zonei de câmp F dintre regiunea Fresnel și câmpul îndepărtat poate fi definit ca raportul dintre SER-ul din regiunea Fresnel (3.6) și SER-ul din câmp îndepărtat (3.7)):

$$F = \frac{\sigma_{Fr}}{\sigma_{ff}} = \frac{Q^2}{a^2 b^2}.$$
(3.8)

3.5 Calibrare

In această secțiune sunt propuse 3 tehnici de calibrare pentru configurațiile de tip radar: întârzierea de grup, câștig-ul antenelor și reducerea cuplajului mutual.

Într-o configurație practică de măsurare a SER-ului trebuie găsită întârzierea de grup introdusă de cele două antene. Astfel, putem evalua cu exactitate distanța dintre radar si antene modelând configurația reală de măsură printr-o configurație echivalentă, cu antene izotrope plasate în originea întârzierii de grup a antenelor efective.

O calibrare a câștigului antenelor trebuie, de asemenea, să fie efectuată înaintea măsurătorilor SER-ului, în cazul în care antene slab direcționale sunt utilizate în general la frecvențe joase (cum ar fi banda L). În acest caz, poziția unei antene aproape de cealaltă nu numai că duce la un cuplaj mutual ridicat, dar are impact și asupra câștigului acestora.

In cazul antenelor cu directivitate scăzută, cum ar fi antenele Vivaldi, într-o configurație cvasi-monostatică ca în fig. 3.1 există un cuplaj mutual puternic între antene. Scăzând cuplajul mutual, se pot reduce și efectele mediului real.

3.6 Protocolul de măsură

Raportul $\frac{P_r}{P_t}$ din ecuația radiolocației poate fi extras cu ajutorul parametrului S_{21} . În plus, dezadaptările de impedanță pot fi incluse în expresia raportului de putere. Cuplajul mutual dintre antene poate fi redus scăzând parametrul S_{21} măsurat fără țintă din parametrii S_{21} măsurați cu ținta plasată la diverse distanțe. Prin urmare,

$$\sigma_{far-field} = \frac{(4\pi)^3}{FG^2\lambda^2} \frac{|S_{21_{Fr}}^{total} - S_{21}^{coupling}|^2}{|1 - S_{22}|^2} \frac{R_0}{R_a(1 - |S_{11}|^2)},\tag{3.9}$$

unde, F este factorul de extrapolare a zonei de câmp, R_0 este impedanța de normalizare (50 ohm), R_a este rezistența de radiație a antenei de recepție, G este câștigul fiecărei antene radar, $S_{21}^{coupling}$ este parametrul S_{21} măsurat fără țintă și $S_{21_{Fr}}^{total}$ este funcția de transfer normalizată calculată ca o medie la distanțe d_n din regiunea Fresnel.

Funcția de transfer mediată în distanță și normalizată $S_{21_{Fr}}^{total}$ este utilizată pentru a compensa efectele propagării multicale din mediul real [21]:

$$S_{21_{Fr}}^{total} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \left(\frac{d_n}{d_0} \right)^2 \left| S_{21,n} \exp(2jkd_n) \right|,$$
(3.10)

unde d_0 este distanța de referință de obicei setată la 1 m.

3.7 Parametrii antenelor

In această secțiune sunt prezentați și măsurați parametrii antenelor și anume dezadaptările de impedanță și câștigul acestora.

3.8 Rezultate experimentale

Pentru validarea metodei, au fost efectuate simulări și măsurători la frecvențe cuprinse între 1 și 3 GHz. A fost utilizată ca țintă o placă dreptunghiulară, metalică, de 22 cm pe 36 cm. Au fost utilizate două antene Vivaldi identice, cu dimensiunile de 17,8 cm pe 21,04 cm.

Un analizor vectorial de rețea a fost utilizat pentru măsurarea parametrilor S_{21} ai sistemului de măsură într-un mediu real. Măsurătorile au fost efectuate într-o cameră de birouri obișnuită în interiorul unei clădiri. Pentru a găsi SER-ul cu ajutorul (3.9), trebuie măsurați parametrii S_{21} , S_{11} , S_{22} . Parametrul S_{21} a fost măsurat la șapte distanțe radar-țintă (40 cm, 50 cm, 60 cm, 70 cm, 80 cm, 90 cm și 100 cm), distanțe aflate la limita superioară a regiunii Fresnel. De asemenea, a fost calculată o medie normalizată a setului de parametri S_{21} ca în (3.10), pentru a reduce efectele propagării multi-cale.

In fig. 3.2a găsim rezultatele SER-ului unei plăci dreptunghiulare, iar fig. 3.2b prezintă vectorul de eroare.

In acest capitol, o metodă nouă pentru estimarea SER-ului unei plăci dreptunghiulare în zona Fresnel pentru cazul particular în care antena și dimensiunile țintei sunt în același ordin de măsură este propusă. Medierea peste aperturile antenelor radarului rezultă în valori de SER precise, atâta timp cât antena de recepție este iluminată aproape uniform de țintă, iar distribuția de curent peste antena de transmisie poate fi asumată ca fiind constantă. Eroarea dintre SER-ul obținut și SER-ul teoretic din câmp îndepărtat, depășește rar 2 dB pentru măsurătorile cu antenele Vivaldi.



Figure 3.2: Rezultatele SER-ului obținute cu antenele Vivaldi în câmp real (a) și vectorul de eroare (b)

4. Măsurarea suprafeței echivalente radar a țintelor complexe la unghiuri de incidență oblice

4.1 Introducere

Deviația de fază generată de contribuțiile diferitelor puncte sursă la câmpul reflectat trebuie calculată, pentru a găsi SER-ul unei ținte utilizând fizica ondulatorie. O astfel de evaluare este mai dificilă de efectuat în regiunea Fresnel datorită componentelor reactive ale câmpului, precum și al complexității integrelor de suprafață care trebuie calculate. Au fost propuse mai multe tehnici pentru a depăși aceste neajunsuri atunci când se calculează deviația de fază la distanțe scurte printre care funcții Green modificate [22] sau efectiv aproximări în termenul de fază [23].

4.2 Evaluarea analitică a SER-ului la unghiuri de incidență oblică

4.2.1 Cazul unei plăci dreptunghiulare

Regiunea Fresnel

Suprafața echivalentă radar a unei plăci dreptunghiulare plasată în zona Fresnel la unghiuri de incidență oblică poate fi obținută prin medierea distribuției câmpului pe aperturile antenelor radar astfel:

$$\sigma_{Fr} = \frac{4\pi\cos^2\theta}{\lambda^2} \left| \frac{1}{(2h_1)^4} \int_{-h_1}^{h_1} \int_{-h_1}^{h_1} \int_{-h_1}^{h_1} \int_{-h_1}^{h_1} \int_{-h_1}^{h_2} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{a}{2}} \exp\left[-jk\left(\frac{(z-z')^2}{2d} + \frac{(z''-z')^2}{2d} + \frac{(z')^2}{2d} + \frac{(z''-z')^2}{2d} + \frac{(z'-z')^2}{2d} + \frac{(z'-z'$$

Câmp îndepărtat

Expresia SER-ului unei plăci dreptunghiulare poziționată în câmp îndepărtat σ_{ff} se poate obține cu ajutorul (4.1) când $d \to \infty$:

$$\sigma_{ff} = \frac{4\pi\cos^2\theta}{\lambda^2} \left| \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \exp(-2jkz'\sin\theta) \mathrm{d}x'\mathrm{d}z' \right|^2 = \frac{4\pi a^2 b^2 \cos^2\theta}{\lambda^2} \left[\frac{\sin(kb\sin\theta)}{kb\sin\theta} \right]^2.$$
(4.2)

Factorul de extrapolare a zonei de câmp

Un factor de extrapolare a zonei de câmp F dintre regiunea Fresnel și câmpul îndepărtat poate fi definit după cum urmează:

$$F = \frac{\sigma_{Fr}}{\sigma_{ff}} = \frac{Q_{Fr_{plate}}^2}{a^2 b^2 \left[\frac{\sin(kb\sin\theta)}{kb\sin\theta}\right]^2}.$$
(4.3)

4.2.2 Cazul unei tinte circulare

Regiunea Fresnel

Calculând diferența de cale din termenul de fază Δr și efectuând o mediere pe aperturile celor două antene radar, SER-ul din regiunea Fresnel al unei ținte circulare poate fi exprimat în felul următor:

$$\sigma_{Fr} = \frac{4\pi\cos^{2}\theta}{\lambda^{2}} \left| \frac{1}{(2h_{1})^{4}} \int_{-h_{1}}^{h_{1}} \int_{-h_{1}}^{h_{1}} \int_{-h_{1}}^{h_{1}} \int_{-h_{1}}^{h_{1}} \int_{0}^{a} \int_{0}^{2\pi} a_{r} \exp\left[-jk\left(\frac{(z-a_{r}\sin\alpha)^{2}}{2d} + \frac{(z''-a_{r}\sin\alpha)^{2}}{2d} + \frac{(a_{r}\sin\alpha)^{2}}{2d} + \frac{(a_{r}\cos\alpha - (x''+h_{1}))^{2}}{2d} + \frac{(a_{r}\cos\alpha - (x-h_{1}))^{2}}{2d} + \frac{2a_{r}\sin\alpha\sin\theta}{2d}\right] d\alpha da_{r} dz dz'' dx dx'' \right|^{2} = \frac{4\pi\cos^{2}\theta Q_{Fr}^{2}}{\lambda^{2}}.$$

$$(4.4)$$

Câmp îndepărtat

Expresia SER-ului unei plăci circulare poziționată în câmp îndepărtat σ_{ff} se poate obține când $d \to \infty$:

$$\sigma_{ff} = \frac{4\pi \cos^2\theta}{\lambda^2} \left| \int_0^a \int_0^{2\pi} a_r \exp(-2jka_r \sin\alpha \sin\theta) d\alpha da_r \right|^2.$$
(4.5)

Factorul de extrapolare a zonei de câmp

Un factor de extrapolare a zonei de câmp F dintre regiunea Fresnel și câmp îndepărtat poate fi definit după cum urmează:

$$F = \frac{\sigma_{Fr}}{\sigma_{ff}} = \frac{Q_{Fr}^2}{\left|\int_0^a \int_0^{2\pi} a_r \exp(-2jka_r \sin\alpha \sin\theta) \mathrm{d}\alpha \mathrm{d}a_r\right|^2},\tag{4.6}$$

ca raport între SER-ul în regiunea Fresnel (4.4) și SER-ul în câmp îndepărtat (4.5).

4.2.3 Cazul unui model la scară, simplificat al unei rulote

Regiunea Fresnel

Modelul la scara, simplificat al unei rulote a fost aproximat prin structuri de plăci dreptunghiulare; câmpul magnetic total reflectat de modelul la scară, simplificat al unei rulote se obține prin scăderea contribuțiilor câmpului unor plăci dreptunghiulare asociate suprafețelor non-reflective (geamuri și roți) din câmpul magnetic reflectat de o placă dreptunghiulară. Astfel, câmpul magnetic total reflectat $H_{r_{c-c}}$ de un model la scară, simplificat al unei rulote (fig. 4.1) la o distanță d poate fi exprimat după cum urmează:

$$H_{r_{c-c}} = H_r - H_{r_1} - H_{r_2} - H_{r_3} - H_{r_4} - H_{r_5} = j \frac{k \exp(-jkd)}{4\pi d} J_S \cos\theta Q_{FR_{c-c}}, \quad (4.7)$$

unde H_r este câmpul magnetic reflectat de placa dreptunghulară mare, iar H_{r1} , H_{r2} , H_{r3} , H_{r4} , H_{r5} este câmpul magnetic care ar fi reflectat de placile dreptunghiulare care înlocuiesc suprafețele non-reflective ale geamurilor și roților.



Figure 4.1: Modelul la scară, simplificat al unei rulote: (a) realitate (b) macheta fabricată

Prin urmare, SER-ul unui model la scară, simplificat al unei rulote poziționate în regiunea Fresnel poate fi scris după cum urmează:

$$\sigma_{Fr} = 4\pi d^2 \left| \frac{H_{r_{c-c}}}{H_i} \right|^2 = \frac{4\pi \cos^2\theta}{\lambda^2} \left| \frac{1}{(2h_1)^4} \int_{-h_1}^{h_1} \int_{-h_1}^{h_1} \int_{-h_1}^{h_1} \int_{-h_1}^{h_1} Q_{FR_{c-c}} \mathrm{d}x \mathrm{d}z \mathrm{d}x'' \mathrm{d}z'' \right|^2.$$
(4.8)

Când $d \to \infty$, SER-ul modelului simplificat, la scară al unei rulote în câmp îndepărtat σ_{ff} este:

$$\sigma_{ff} = \frac{4\pi \cos^2\theta (a^2b^2 - S_1)}{\lambda^2},$$
(4.9)

unde S_1 se poate scrie

$$S_{1} = (b/2 - b_{11})^{2} (a_{1} - a_{11})^{2} + (b_{2} - b_{22})^{2} (a_{2} - a_{22})^{2} + (b_{3} - b_{33})^{2} (a_{3} - a/2)^{2} + (b_{4} - b_{44})^{2} (a_{4} - a/2)^{2} + (b_{5} - b_{55})^{2} (a_{5} - a_{55})^{2},$$

$$(4.10)$$

iar a_i, a_{ii} și b_i, b_{ii} cu $i \leq 5$ sunt dimensiunile ferestrelor și ale locașului roților.

Factorul de extrapolare a zonei de câmp

Un factor de extrapolare a zonei de câmp F dintre regiunea Fresnel și câmp îndepărtat poate fi definit după cum urmează:

$$F = \frac{\sigma_{Fr}}{\sigma_{ff}}.$$
(4.11)

4.2.4 Cazul unui model la scară, simplificat al unei fregate

Pentru a analiza SER-ul unei fregate, un model simplificat, la scară, a fost proiectat în CST din 17 placi dreptunghiulare. Câmpul magnetic total reflectat de model este obținut prin însumarea câmpului magnetic reflectat de fiecare placă dreptunghiulară.

Când distanța dintre antenele radarului și țintă este foarte mare, putem obține SER-ul modelului de fregată în câmp îndepărtat σ_{ff} , iar apoi putem determina factorul de extrapolare a zonei de câmp ca și raport între SER-ul din zona Fresnel și SER-ul din zona de câmp îndepărtat:

$$F = \frac{\sigma_{Fr}}{\sigma_{ff}}.$$
(4.12)

4.2.5 Cazul unui model la scară al unei case dintr-un container

Pentru a analiza SER-ul unei case dintr-un container (fig.4.2b), a fost proiectat un model la scară în CST. Câmpul magnetic total reflectat de model este obținut prin scăderea câmpului magnetic reflectat de 5 placi dreptunghiulare corespunzătoare suprafeței ferestrelor și a ușii din câmpul magnetic reflectat de două plăci dreptunghiulare mari corespunzători peretelui frontal și acoperișului.



Figure 4.2: Modelul la scară, simplificat al unei fregate (a) și modelul la scară al unei case dintr-un container (b).

Câmp îndepărtat

Când distanța dintre antenele radarului și țintă este foarte mare, putem obține SERul modelului de fregată în câmp îndepărtat σ_{ff} , iar apoi putem determina factorul de extrapolare a zonei de câmp ca și raport între SER-ul din zona Fresnel și SER-ul din zona de câmp îndepărtat:

$$F = \frac{\sigma_{Fr}}{\sigma_{ff}}.$$
(4.13)

4.3 Protocolul de măsură

Metoda a fost validată la incidență normală ($\theta = 0^{\circ}$) și la unghiuri de incidență oblică care se încadrează în limitele aproximărilor din fizica ondulatorie ($\theta \leq 20^{\circ}$).

A fost aleasă o placă dreptunghiulară de dimensiuni a = 36 și b = 22 cm, un disc cu raza de 15 cm, un model la scară, simplificat al unei rulote, un model la scară, simplificat al unei fregate și un model la scară al unei case dintr-un container.

Țintele au fost măsurate în câmp real la frecvențe cuprinse într 2 GHz și 10 GHz. Un set de două antene horn identice cu dimensiunea aperturii de 15 cm pe 15 cm au fost utilizate pentru a măsura parametrul S_{21} la distanțe antene-țintă cuprinse între d = 40 cm și 100 cm.

4.4 Ferestruirea în domeniul timp

Unele studii au introdus ferestruirea în domeniul timp ca pe o tehnică alternativă pentru a reduce influența efectelor câmpului real precum și a reducerii cuplajului mutual dintre antenele Tx și Rx.

În această secțiune a fost introdusă ferestruirea în domeniul timp pentru a reduce efectele reflexiilor întârziate provenite de la alte obiecte din mediul real.

Parametrii S_{21} măsurați au fost transformați în domeniu timp prin aplicarea unei transformări Fourier inverse:

$$s_{21}(t) = \mathcal{F}^{-1} \{ S_{21}(\omega) \} \,. \tag{4.14}$$

In domeniul timp, se poate distinge reflexia directă provenită de la țintă precum și reflexiile întârziate provenite de la alte obiecte din zonă. În acest caz, se poate ferestrui doar reflexia directă de la țintă și apoi semnalul obținut se poate transforma din nou în domeniul frecvență pentru a fi utilizat în ecuația radiolocației.

$$\{S_{21}(\omega)\} = \mathcal{F}(s_{21}(t)). \tag{4.15}$$

4.5 Rezultate experimentale

Figurile 4.3 afișează o comparație între SER-ul simulat în CST și măsurat la distanțe din gama regiunii Fresnel cu și fără corectarea zonei de câmp cu factorul de extrapolare F (după reducerea cuplajului mutual sau după aplicarea ferestruirii în domeniul timp).



Figure 4.3: O comparație între rezultatele SER obținute pentru o placă dreptunghiulară la un unghi de incidență de $\theta = 20^{\circ}$ (a) și pentru un model la scară, simplificat al unui camping-car la un unghi de incidență de $\theta = 20^{\circ}$ (b)

În acest capitol am propus o tehnică de măsură a SER-ului unor ținte simple și complexe din zona Fresnel, atât la unghiuri de incidență normală, cât și la unghiuri de incidență oblică.

Problema zonei de câmp a fost abordată prin definirea unui factor de extrapolare a zonei de câmp. Țintele complexe au fost aproximate prin structuri de plăci dreptunghiulare; prin urmare, am propus o metodă de evaluare a SER-ului bazată pe însumarea contribuțiilor câmpului plăcilor dreptunghiulare la câmpul total și, respectiv, la scăderea contribuțiilor câmpului unor plăci dreptunghiulare asociate suprafețelor non-reflective.

5. Evaluarea suprafeței echivalente radar la unghiuri de incidență ridicate

5.1 Introducere

Pentru a depăși limitările fizicii ondulatorii, trebuie luate în considerare efectele difracției de la marginile țintei. Conform ipotezelor din teoria geometrică a difracției (GTD), Keller [1] a calculat doi coeficienți de difracție pentru o margine perfect conductoare, iluminată de o undă plană, cilindrică, conică și sferică. Mai târziu, aplicând teoria uniformă a difracției (UTD), Kouyoumjian [2] a dezvoltat coeficienți de difracție care rămân valabili în regiunile de tranziție adiacente limitelor de umbră și de reflexie, unde coeficienții de difracție determinați de Keller eșuează. Prin definirea curenților echivalenți [24], câmpul difractat poate fi calculat pentru direcții de împrăștiere și în afara conului lui Keller.

5.2 Metodologie

Figura 5.1 afișează distribuția curenților atunci când o undă incidentă polarizată pe direcția z iluminează o placă dreptunghiulară. Dacă r este distanța dintre radar și țintă și $r \to \infty$, SER-ul obținut cu ajutorul fizicii ondulatorii poate fi scris după cum urmează:

$$\sigma_{PO} = 4\pi r^2 \left| \frac{H_r}{H_i} \right|^2,\tag{5.1}$$

unde H_r este câmpul magnetic reflecat, iar H_i este câmpul magnetic incident. Luand în considerare și efectele difracției la marginile țintei, SER-ul mai poate fi definit și sub forma:

$$\sigma_{difr} = 4\pi r^2 \left| \frac{H_r + H_d}{H_i} \right|^2.$$
(5.2)

În fig.5.1, $\mathbf{S}_i \ \mathbf{S}_r$ sunt vectorii Poynting, \mathbf{E}_i^z este câmpul electric incident, \mathbf{E}_r este câmpul electric reflectat, \mathbf{H}_d^x este câmpul magnetic difractat, \mathbf{E}_d^z este câmpul electric difractat, \mathbf{n} este vectorul normal la suprafața țintei, iar θ este unghiul de incidență.



Figure 5.1: Distribuția de curenți pe o placă dreptunghiulară

$$\sigma_{difr} = \left(\sqrt{\sigma_{PO}} + \left|\frac{H_d}{H_i}\right|\sqrt{4\pi r^2}\right)^2,\tag{5.3}$$

unde H_d ieste câmpul magnetic difractat.

Dacă distanța r se află în gama regiunii Fresnel, atunci

$$\sigma_{difr_{Fr}} = \left(\sqrt{\sigma_{PO}}_{Fr} + \left|\frac{H_d}{H_i}\right|_{Fr}\sqrt{4\pi r^2}\right)^2.$$
(5.4)

5.3 Cazul unei ținte dreptunghiulare

5.3.1 Determinarea raportului dintre câmpul difractat și câmpul incident

Regiunea Fresnel

Utilizând teoria curenților echivalenți și teoria UTD, raportul necunoscut dintre câmpul difractat și câmpul incident ar putea fi exprimată după cum urmează:

$$\frac{H_d}{H_i}\Big|_{Fr} = -2\sqrt{\frac{k_0}{4\pi}} \frac{\exp\left[-j(k_0r - \pi/4)\right]}{r} \left\{\cos\theta D_h \sqrt{\frac{2r}{k_0}} \left[f\left(-\frac{a}{2}\sqrt{\frac{k_0}{2r}}\right) - f\left(\frac{a}{2}\sqrt{\frac{k_0}{2r}}\right)\right] + D_s \sqrt{\frac{2r}{k_0}} \left[f\left(-\frac{b}{2}\sqrt{\frac{k_0}{2r}}\right) - f\left(\frac{b}{2}\sqrt{\frac{k_0}{2r}}\right)\right]\right\}.$$
(5.5)

Câmp îndepărtat

In câmp îndepărtat, expresia raportului dintre câmpul difractat și câmpul incident ar putea fi scrisă astfel:

$$\left. \frac{H_d}{H_i} \right|_{ff} = \frac{2(H_{dh}|_{ff} + H_{ds}|_{ff})}{H_i},\tag{5.6}$$

unde H_{dh} este câmpul magnetic difractat hard, iar H_{ds} este câmpul magnetic difractat soft.

5.3.2 Factorul de extrapolare pentru câmpul difractat

Factorul de extrapolare pentru câmpul difractat între zona Fresnel și câmp îndepărtat poate fi definit după cum urmează:

$$\sqrt{F} = \frac{\sqrt{\sigma_{PO}}_{Fr} + \left|\frac{H_d}{H_i}\right|_{Fr} \sqrt{4\pi r^2}}{\sqrt{\sigma_{PO}}_{ff} + \left|\frac{H_d}{H_i}\right|_{ff} \sqrt{4\pi r^2}}.$$
(5.7)

5.4 Cazul unei ținte complexe

Pentru a lua în considerare efectele difracției la marginile unui model la scară al unui camping-car, raportul $\frac{H_d}{H_i}$ asociat acestei ținte complexe va fi aproximat cu raportul obținut în cazul țintei dreptunghiulare analizate mai sus. Trebuie menționat că lungimea și lățimea modelului la scară al camping-carului corespunde cu lungimea și lățimea plăcii dreptunghiulare analizate mai sus.

5.5 Protocolul de măsură

Măsurătorile au fost efectuate în aceleași condiții ca și în capitolele anterioare. Metoda a fost validată prin măsurători la unghiuri de incidență ridicate care depășesc limita de 20° acceptată în general în fizica optică, și anume $\theta = 30^{\circ}, 35^{\circ}, 40^{\circ}$ și 45°. Am ales ca și țintă o placă dreptunghiulară cu dimensiune de a = 36 cm pe b = 22 cm și un model la scară, simplificat a unui camping-car. Ținta a fost plasată într-un mediu real și măsurătorile au fost efectuate la frecvențe cuprinse între 2 și 10 GHz.

5.6 Rezultate experimentale

Figurile 5.2a și 5.3a afișează parametrii S_{21} în domeniul timp, iar 5.2b și 5.3b afișează o comparație între SER-ul obținut din simulări, măsurători la distanțele din regiunea Fresnel și măsurători la distanțele din regiunea Fresnel corectate cu factorul de extrapolare pentru câmpul difractat F după reducerea cuplajului mutual (CS) sau după aplicarea ferestruirii în domeniul timp (TG) la $\theta = 45^{\circ}$ pentru o placă dreptunghiulară și $\theta = 45^{\circ}$ pentru un model la scară, simplificat al unui camping-car.



Figure 5.2: Reprezentarea în domeniul timp a parametrilor S_{21} măsurați la un unghi de incidență de $\theta = 45^{\circ}$ (placă dreptunghiulară) (a) și o comparație între rezultatele SER obținute la un unghi de incidență de $\theta = 45^{\circ}$ (placă dreptunghiulară) (b).



Figure 5.3: Reprezentarea în domeniul timp a parametrilor S_{21} măsurați la un unghi de incidență de $\theta = 45^{\circ}$ (camping-car) (a) și o comparație între rezultatele SER obținute la un unghi de incidență de $\theta = 45^{\circ}$ (camping-car) (b)

In acest capitol, ne-am propus să extindem aria de aplicare a fizicii ondulatorii pentru măsurarea SER-ului la distanțe din regiunea Fresnel și unghiuri de incidență mai mari de 20 °.

Am definit un factor de extrapolare pentru câmpul difractat pentru a putea corecta SER-ul măsurat în zona Fresnel.

Combinația dintre tehnica de mediere în distanță și ferestruirea în domeniul timp a parametrilor S_{21} a fost validată cu succes pentru măsurătorile SER într-un mediu real.

6. Concluzii

6.1 Rezultate

Măsurătorile SER-ului în câmp îndepărtat sunt afectate de reflexiile produse la nivelul solului sau de raportul semnal-zgomot redus al undei reflectate. Configurația radarului poate fi adesea foarte complexă și transformările din câmp apropiat în câmp îndepărtat sunt complexe, consumatoare de timp și costisitoare pentru a fi implementate la scară largă sau pentru start-up-uri și, prin urmare, nu sunt potrivite pentru un scenariu în timp real. Pentru a depăși aceste neajunsuri, în această teză a fost dezvoltată o metodă nouă de determinare a SER-ului în regiunea Fresnel.

Un model matematic a fost dezvoltat pentru a evalua SER-ul în regiunea Fresnel și în câmp îndepărtat și de asemenea a fost calculat un factor de extrapolare a zonei de câmp între regiunea Fresnel și câmpul îndepărtat. Mai mult decât atât, integrând tehnica noastră cu tehnica de mediere în distanță, ferestruirea în domeniul timp și reducerea cuplajului mutual, metoda poate fi aplicată cu succes într-un mediu real.

O tehnică diferențială, împreună cu o calibrare a câștigului antenelor radar și a întârzierii de grup a antenelor a făcut posibilă validarea metodei noastre la frecvențele din banda L și cu o pereche de antene cu directivitate scăzută (Vivaldi și logperiodice). Tehnica propusă este evaluată și cu antene horn, însă în toate cazurile aceasta se bazează pe: 1. medierea contribuțiilor punctelor sursă de pe apertura antenei de transmisie; 2. medierea contribuțiilor radiatorilor elementari corespunzători de pe apertura antenei de recepție. Pentru cazul particular în care dimensiunile aperturilor antenelor și ale țintelor sunt comparabile cu distanța dintre ținte și antene, expresiile SER-ului cu patru integrale (pentru antenele Vivaldi și log-periodice) și șase integrale (cu antene horn) ar putea fi reformulate cu ajutorul integralelor Fresnel. În acest fel, timpul de calcul va fi redus, cu condiția ca integralele Fresnel să fie calculate într-o manieră asimptotică.

6.2 Contribuții originale

- OC1. Am propus o tehnică de calibrare a sistemului de antene al unui radar din punct de vedere al întârzierii de grup și al câștigului [C1, C2, C3, C8, C9], pentru a efectua măsurarea SER-ului în zona Fresnel.
- OC2. În cadrul tezei propunem o nouă formă a tehnicii de mediere în distanță pentru o configurație radar [J1].
- OC3. Am combinat noua formă a tehnicii de mediere în distanță cu alte tehnici de reducere a efectelor mediului real precum ferestruirea în domeniul timp sau reducerea cuplajului mutual dintre antene [C6, C7, J2].
- OC4. A fost dezvoltată o nouă formă de evaluare a SER-ului în zona Fresnel, bazată pe aproximări care duc la integrale de tip Fresnel. Astfel, numărul de integrale

în expresiile SER-ului a fost redus și, în consecință, timpul de calcul este scăzut dramatic [J1].

- OC5. O alternativă la transformările din zona Fresnel în câmp îndepărtat este propusă, pe baza dezvoltării unui factor de extrapolare a zonei de câmp [J2, C4].
- OC6. A fost propusă o tehnică pentru evaluarea SER-ului unei ținte complexe, bazată pe modele simplificate la scară mică. Această tehnică ne-a permis să validăm tehnica pentru măsurătorile SER-ului la distanțe din zona Fresnel pe modele la scară mică ale unei rulote, ale unei fregate sau ale unei case dintr-un container [J2].
- OC7. Am extins aplicabilitatea PO pentru evaluarea SER-ului la unghiuri de incidență ridicate, luând în considerare inclusiv efectul difracției pe marginile țintei [C6, C7]
- OC8. A fost dezvoltat de asemenea un nou factor de corecțe de câmp pentru unghiuri de incidență ridicate luând în considerare efectele difracției [J2, C6, C7]

6.3 Publicații

Articole de jurnal Q1

- J1. I. V. Mihai, R. D. Tamas and A. Sharaiha, "A Technique for Radar Cross Section Measurements in the Fresnel Region," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 18, no. 6, pp. 1149-1153, June 2019.
- J2. I. V. Mihai, R. Tamas, and A. Sharaiha, "An UWB Physical Optics Approach for Fresnel-Zone RCS Measurements on a Complex Target at Non-Normal Incidence," Sensors, vol. 19, no. 24, p. 5454, Dec. 2019.

Conferințe internaționale

- C1. I. V. Mihai, L. Anchidin, R. D. Tamas and A. Sharaiha, "The effect of the antenna group delay on RCS measurements in the L-band," 2018 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), Vasteras, 2018, pp. 1-2.
- C2. V. Mihai, R. Tamas and A. Sharaiha, "A comparison between Vivaldi and logperiodic antenna systems for radar cross section measurements in the Fresnel region," 2019 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), Miami, FL, USA, 2019, pp. 95-98.
- C3. V. Mihai, R. Tamas and A. Sharaiha, "A Bistatic Method for Radar Cross Section Measurements in the Fresnel Region," 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Krakow, Poland, 2019, pp. 1-5.

- C4. I. V. Mihai, A. Sharaiha and R. Tamas, "UWB-Radar Cross Section Measurements in the Fresnel Region and Real Environment," 2019 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Xi'an, China, 2019, pp. 1-3.
- C5. I. V. Mihai, A. Sharaiha and R. Tamas, "Radar Cross Section of a Slightly Tilted Disk in the Fresnel Region and Real Environment," 2019 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), Kuta, Bali, Indonesia, 2019, pp. 109-112.
- C6. I. V. Mihai, R. Tamas and A. Sharaiha, "A Modified Physical Optics Approach for Extrapolating Fresnel Region RCS Measurements at High Incidence Angles," 2020 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), Bucharest, Romania, 2020.
- C7. I. V. Mihai, R. Tamas and A. Sharaiha, "A Technique for Including Edge Diffraction Effects on RCS Evaluation at Fresnel Region Ranges," 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 2020.

Conferințe naționale

- C8. Valentin Ilie Mihai, Liliana Anchidin, Razvan Tamas, and Ala Sharaiha "Improvement of setup calibration for radar cross section measurements", Proc. SPIE 10977, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies IX, 109772S (31 December 2018);
- C9. I. V. Mihai, A. Sharaiha and R. Tamas, "Mesures de la Surface Equivalente Radar dans la zone de Fresnel en environnement reeel," 21emes Journees Nationales Micro-Ondes, Caen, France, 2019, May.

Premii

- P1. Câștigător al Best student paper la The International Workshop on Antenna Technology (iWAT), Miami, SUA. Titlul articolului: "A comparison between Vivaldi and log-periodic antenna systems for radar cross section measurements in the Fresnel region".
- P2. Câștigător al **Best student paper** la *Conference on Antenna Measurement* and *Applications (CAMA)*, Bali, Indonezia. Titlul articolului: "Radar Cross Section of a Slightly Tilted Disk in the Fresnel Region and Real Environment".
- P3. Câștigător al Best poster presentation la International Conference Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies (ATOM-N), Constanța, România. Titlul articolului: "Improvement of setup calibration for radar cross section measurements".

Rapoarte științifice susținute pe parcursul stagiului de doctorat

- R1. Raportul științific nr.1/2018, Studiu privind timpul de întârziere de grup al antenelor din sistemele de măsurare a ariei efective a țintelor;
- R2. Raportul științific nr.2/2019, O nouă metodă de m ăsurare a suprafeței echivalente radar în zona Fresnel;
- R3. Raportul științific nr.3/2019, Studiu comparativ privind sistemul de antene utilizat la măsurarea suprafeței echivalente radar în zona Fresnel;
- R4. Raportul științific nr.4/2019, Măsurarea ariei echivalente unei ținte radar complexe la incidență oblică, utilizând o formă modificată a opticii ondulatorii;
- R5. Raportul științific nr.5/2020, Extrapolarea valorii ariei echivalente a unei ținte radar din zona Fresnel în zona de câmp îndepărtat, la unghiuri de incidență ridicate;

6.4 Perspective viitoare de cercetare

In această teză a fost dezvoltată o tehnică nouă pentru analiza și măsurarea SER-ului mai multor ținte plasate în regiunea Fresnel. În toate cazurile, dimensiunile țintelor sunt similare cu dimensiunile aperturilor sistemelor de antene (antene Vivaldi, antene log-periodice și antene horn). Pe viitor, ar trebui identificată o soluție de măsurare a SER-ului unor ținte mai mari cu antene cu aperturi mici. De asemenea, ar trebui efectuat un studiu suplimentar cu privire la limitările metodei în ceea ce privește complexitatea țintelor versus aproximarea fizicii ondulatorii. Într-un scenariu în timp real este obligatoriu să se țină seama și de distribuția densității de curent pe alte fețe ale țintei, nu doar în partea normală de reflexie. Pe de altă parte, ar fi interesant să se optimizeze metoda și modelul matematic, luând în considerare alte efecte care contribuie la reflexie, cum ar fi efectul creeping wave, ecoul undei emise, ecoul de interacțiune etc.

Bibliografie selectată

- J. B. Keller, "Diffraction by an aperture," *Journal of Applied Physics*, vol. 28, no. 4, pp. 426–444, 1957.
- [2] R. G. Kouyoumjian and P. H. Pathak, "A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface," *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, pp. 1448–1461, Nov 1974.
- [3] A. Michaeli, "Equivalent edge currents for arbitrary aspects of observation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 32, pp. 252–258, March 1984.
- [4] U. P., "Approximate computation of the diffraction of plane electromagnetic waves at certain metal bodies," Zh. Tekhn. Fiz., vol. 27, no. 8, pp. 1708–1718, 1957.
- [5] E. F. Knott, "A progression of high-frequency rcs prediction techniques," Proceedings of the IEEE, vol. 73, pp. 252–264, Feb 1985.
- [6] T. T. Moon and P. W. Taliana, "Rcs measurements in multipath environments," in AMPC Asia-Pacific Microwave Conference, vol. 2, pp. 799–801, Aug 1992.
- [7] S. Li, B. Zhu, and H. Sun, "Nufft-based near-field imaging technique for farfield radar cross section calculation," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 550–553, 2010.
- [8] S. Scherr, R. Afroz, S. Ayhan, S. Thomas, T. Jaeschke, S. Marahrens, A. Bhutani, M. Pauli, N. Pohl, and T. Zwick, "Influence of radar targets on the accuracy of fmcw radar distance measurements," *IEEE Transactions on Microwave Theory* and Techniques, vol. 65, pp. 3640–3647, Oct 2017.
- [9] R. Ross, "Radar cross section of rectangular flat plates as a function of aspect angle," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, pp. 329–335, May 1966.
- [10] J. W. Crispin and A. L. Maffett, "Radar cross-section estimation for simple shapes," *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, pp. 833–848, Aug 1965.
- [11] T. B. A. Senior, "A survey of analytical techniques for cross-section estimation," *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, pp. 822–833, Aug 1965.
- [12] M. E. Bechtel, "Application of geometric diffraction theory to scattering from cones and disks," *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, pp. 877–882, Aug 1965.

- [13] G. Thiele and T. Newhouse, "A hybrid technique for combining moment methods with the geometrical theory of diffraction," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 23, pp. 62–69, January 1975.
- [14] Shung-Wu Lee, "Comparison of uniform asymptotic theory and ufimtsev's theory of electromagnetic edge diffraction," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 25, pp. 162–170, March 1977.
- [15] T. Griesser and C. Balanis, "Backscatter analysis of dihedral corner reflectors using physical optics and the physical theory of diffraction," *IEEE Transactions* on Antennas and Propagation, vol. 35, pp. 1137–1147, October 1987.
- [16] S. K. Wong, E. Riseborough, G. Duff, and K. K. Chan, "Radar cross-section measurements of a full-scale aircraft duct/engine structure," *IEEE Transactions* on Antennas and Propagation, vol. 54, pp. 2436–2441, Aug 2006.
- [17] A. Schroder, M. Renker, U. Aulenbacher, A. Murk, U. Boniger, R. Oechslin, and P. Wellig, "Numerical and experimental radar cross section analysis of the quadrocopter dji phantom 2," in 2015 IEEE Radar Conference, pp. 463–468, Oct 2015.
- [18] T. Dogaru and C. Kenyon, "Numeric computation of the radar cross section of in-flight projectiles," tech. rep., US Army Research Laboratory, 11 2016.
- [19] Y.-K. K. Yi-Ru Jeong, Chan-Sun Park and J.-G. Yook, "Analysis of rcs of low observable aircraft in vhf band," *International Journal of Antennas and Propa*gation,, pp. 1–10, 2018.
- [20] D. W. Richardson, R. P. Ortega, and S. N. Tabet, "Monostatic rcs for general aviation aircraft," in 2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES), pp. 1–2, March 2018.
- [21] R. D. Tamas, D. Deacu, G. Vasile, and C. Ioana, "A method for antenna gain measurements in nonanechoic sites," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 56, no. 7, pp. 1553–1557, 2014.
- [22] L. Corucci, E. Giusti, M. Martorella, and F. Berizzi, "Near field physical optics modelling for concealed weapon detection," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, pp. 6052–6057, Dec 2012.
- [23] C. Bourlier and P. Pouliguen, "Useful analytical formulae for near-field monostatic radar cross section under the physical optics: Far-field criterion," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, pp. 205–214, Jan 2009.
- [24] R. F. Millar, "An approximate theory of the diffraction of an electromagnetic wave by an aperture in a plane screen," *Proceedings of the IEE - Part C: Mono*graphs, vol. 103, pp. 177–185, March 1956.