

Samogradnja radarskega trirobnika s kvadratno stranico in meritev njegove odmevne površine

Peter Nimac, Peter Miklavčič, Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: nimac.peter@protonmail.com

Handmaking of a radar square trihedral corner reflector and measurement of its radar cross section

Radar cross section (RCS) represents an effective surface of an object viewed by a radar. Objects with small physical footprint and large RCS are extremely practical for testing radar capabilities in either home or lab environment. One of such objects is a square trihedral corner reflector. Benefits of square trihedrals are their simple and practical geometry and they are easily made at home using only cardboard and thin aluminum film. That can be either in the form of kitchen aluminum foil or aluminum tape. Measurements proved metalized cardboard trihedrals to be just as useful as their counterparts made from industrial aluminum sheet with only a minor difference in RCS. On the other hand there were noticeable differences between the calculations, full-wave and ray-tracing simulations and measurements.

1 Odmevna površina

Odmevna površina oziroma radarska površina predmeta (angl. *radar cross section* – RCS) predstavlja efektivno površino predmeta, od katerega se odbija radijsko valovanje. Odmevna površina ni odvisna le od fizičnih dimenzij opazovanega predmeta, ampak tudi od valovne dolžine valovanja, snovi, iz katere je predmet, smeri vpadnega valovanja in smeri, v kateri opazujemo odbito valovanje ter polarizacije vpadnega in odbitega radijskega valovanja. Odmevna površina je tako lahko ali večja ali manjša od dejanskih fizičnih izmer predmeta. V ožjem pomenu pa predstavlja razmerje gostote moči radijskega signala, ki se od predmeta odbije nazaj proti izvoru moči (torej proti radarju), kot prikazuje slika 1.

V primeru radarja, odmevna površina predstavlja radarsko vidljivost predmeta. Predmeti z večjo odmevno površino nazaj proti radarju odbijejo več moči, zato so za radar vidni tudi na daljših razdaljah. Tabela 1 prikazuje značilne vrednosti odmevnih površin.

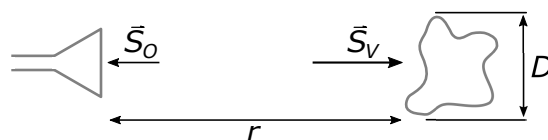
Odmevno površino matematično opišemo z enačbo [1]:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{S_o}{S_v}, \quad (1)$$

kjer je r razdalja med radarjem in tarčo, S_o gostota moči, odbita nazaj proti izvoru valovanja in S_v gostota

moči vpadnega valovanja na tarčo. Oziroma izražena v decibelih kvadratnega metra [dBsm] [2]:

$$\sigma = 10 \log_{10}(\sigma [\text{m}^2]) \quad (2)$$



Slika 1: Odmevna površina tarče, kot je vidna s strani antene.

Tabela 1: Značilnih vrednosti odmevne površine pogostih tarč [3].

Tarča	Odmevna površina	Odmevna površina
ptica;	0,001 m ²	-30 dBsm
raketni izstrelek;	0,01 m ²	-20 dBsm
oseba; majhno plovilo; majhno letalo;	1 m ²	0 dBsm
čoln za križarjenje; lovski bombnik;	12 m ²	10 dBsm
potniško letalo;	100 m ²	20 dBsm
tanker; križarka;	1000 m ²	30 dBsm

Za mnoge preproste geometrijske oblike se odmevno površino lahko zapiše v poenostavljeni obliki.

Za primer krogle s polmerom R je odmevna površina [4]:

$$\sigma = \pi R^2 \quad (3)$$

Ravna kovinska plošča s površino A ima odmevno površino [5]:

$$\sigma_{max} = \frac{4\pi}{\lambda^2} A^2, \quad (4)$$

kjer je A geometrijska površina plošče in λ valovna dolžina. Trirobnik s trikotno stranico (angl. *trihedral corner reflector*) je odsevnik s stranico roba a [4]:

$$\sigma_{max} = \frac{4\pi a^4}{3\lambda^2} \quad (5)$$

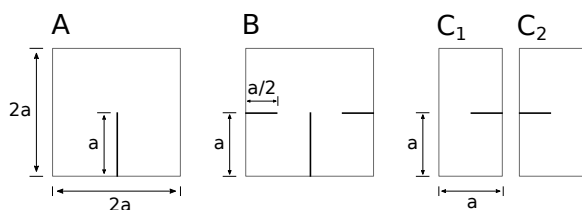
Triobnik s kvadratno stranico (angl. *square trihedral corner reflector*) je odsevník s stranico roba a [4]:

$$\sigma_{max} = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2} \quad (6)$$

2 Načrtovanje odsevníka

Pri samogradnji smo se odločili za izdelavo kotnega odsevníka, sestavljenega iz osmih triobnikov s kvadratno stranico. Taka konstrukcija zelo poenostavi izdelavo (približka) kotnega triobnega odsevníka. Hkrati ima konstrukcija iz osmih triobnikov proti konstrukciji enega samega triobnika še dodatne prednosti: boljša strukturna trdnost, povraten odboj v več smereh, hkrati pa lahko osemkratni triobnik stabilno postavimo nagnjenega pod kotom brez uporabe klančine. To je v smeri, ko je smer vpadnega valovanja pod elevacijskim kotom $\theta = 35,26^\circ$ (v krogelnem koordinatnem sistemu).

Za konstrukcijo osemkratnega triobnika potrebujemo le tri enako velike kvadratne ploskve s stranico dolžine $2a$, pri čemer eno od ploskev razpolovimo na dve manjši dimenziji $a \times 2a$. Da ploskve sestavimo skupaj v samostojno konstrukcijo, jim na primernih mestih naredimo še zareze dolžin a in $a/2$, kot to prikazuje načrt razreza na sliki 2.



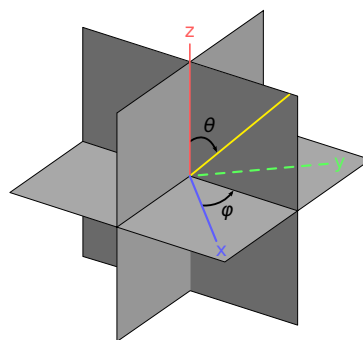
Slika 2: Načrt razreza plošč.

Osemkratne triobnike smo izdelali v treh različnih velikostih, kjer je dolžina stranice posameznega triobnika dimenzij $a_{05} = 5$ cm, $a_{10} = 10$ cm in $a_{15} = 15$ cm. Oznaka b_x označuje osemkratno različico triobnika s stranico a_x . En tak triobnik ima, glede na enačbo (6), pri izbranih dimenzijah in frekvenci $f = 10,5$ GHz največjo odmevno površino $\sigma_{05,max} = 0,29$ m², $\sigma_{10,max} = 4,62$ m² in $\sigma_{15,max} = 23,41$ m².

3 Postopek simulacije

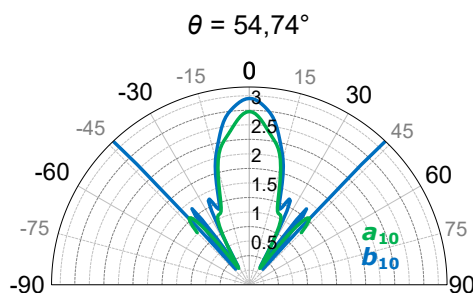
Z enačbo (6) lahko izvemo le teoretično največjo vrednost odmevne površine v najbolj ugodni smeri. Za pridobitev informacije o smernem diagramu odmevne površine smo odmevno površino triobnikov dodatno simulirali s simulatorjem elektromagnetnega valovanja Altair FEKO [6]. Triobnik smo opisali kot geometrijsko strukturo iz treh idealno električno prevodnih, enakih in medsebojno pravokotnih stikajočih se električnih plošč. Vir elektromagnetnega valovanja smo opisali kot vpadni ravninski val pri frekvenci $f = 10,5$ GHz, kjer valovna dolžina v praznem prostoru znaša $\lambda \approx 28,6$ mm. Vpadno valovanje smo po azimutu omejili na območje od $\varphi = -45^\circ$ do $\varphi = 45^\circ$ in elevaciji od $\theta = 0^\circ$ do $\theta = 90^\circ$. Slika

3 prikazuje postavitev simulacijskega modela osemkratnega triobnika v koordinatnem sistemu.



Slika 3: Postavitev modela osemkratnega triobnika v koordinatnem sistemu.

Slika 4 prikazuje rezultat simulacije osemkratnega triobnika b_{10} . Odmevna površina, opisana v krogelnih koordinatah, doseže maksimalno vrednost $3,2$ m² pri azimutu $\varphi = 0^\circ$ in elevaciji $\theta = 54,74^\circ$.



Slika 4: Simulacija odmevnih površin z rigorozno momentno metodo po azimutu na linearni skali v m².

Pri azimutih $\varphi = -30^\circ$ in $\varphi = 30^\circ$ opazimo minimum odmevne površine. V teh primerih triobnik nazaj proti izvoru odbije le manjši del vpadnega valovanja, saj so vidni deli ploskev večinoma orientirani tako, da se preostali del vpadnega valovanja razprši v prostor, stran od izvora. Na mejah azimuta (pri $\varphi = -45^\circ$ in $\varphi = 45^\circ$) opazimo nenadno povečanje odmevne površine, saj takrat vidimo odboj pod pravim kotom od štirih koplanarnih ravnih kovinskih plošč (s skupno ploščino $4a^2$).

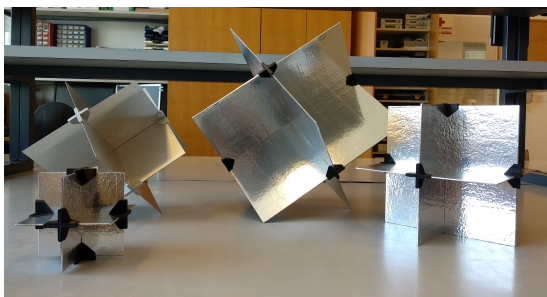
4 Gradnja odsevníka

V razmerah, kjer je otežen dostop do primernih materialov, orodja in prostora za izdelavo, se lahko znajdemo po navdihu Angusa MacGyverja. Za izdelavo prototipa nam ni potrebno uporabiti kovinskih plošč, uporabimo lahko katerikoli trd material, ki ga oblečemo v aluminijasto folijo ali ga kako drugače okovimo.

Eden izmed načinov izdelave kotnega odsevníka je varjenje posameznih kovinskih plošč. Odsevníka tako doma ne moremo izdelati, če nimamo dostopa do varilnega aparata. Varjenja takega izdelka je povrh vsega zelo zahtevno, saj moramo med sabo zvariti tanke ploščice, ki morajo medsebojno stati pod pravim kotom.

V izogib varjenju in za poenostavitev izdelave lahko odsevnik sestavimo iz tesno prilegajočih se ravnih plošč s profili (slika 2). Za izdelavo se lahko uporabi tudi navadno lepenko. Za zagotavljanje strukturne trdnosti vsak del odsevnika odrežemo iz enega ravnega in ne-prepognjenega kosa kartona. Kartonske plošče pred sestavljanjem okovino tako da jih oblepimo z aluminijastim lepilnim trakom ali aluminijasto (kuhinjsko) folijo.

Postopek smo ponovili pri izdelavi dveh odsevnikov iz trdega kartona z debelino 2 mm. Te smo primerjali z odsevnikom, ki smo ju kasneje sestavili iz strojno odrezanih aluminijastih plošč. Za dodatno stabilnost in boljše zagotavljanje pravokotnosti smo vse odsevnike na križnih stičiščih plošč opremili s plastičnimi distančniki, natisnjenih v ta namen (slika 5).



Slika 5: Izdelani trirobniki iz okovinjene kartona in aluminijastih plošč.

5 Meritev odmevne površine

Odmevno površino smo merili v frekvenčnem pasu med 9 GHz in 12 GHz. S povprečenjem meritev znotraj pasovne širine $B = 3$ GHz smo v grobem izločili vpliv neidealnega merilnega mesta. Za merjenje smo uporabil dve popolnoma enaki rebrasti (korugirani) lijakasti anteni, usmerjeni proti tarči oziroma merjencu (trirobnik). Anteni sta bili priklopljeni na vektorski analizator vezij Rohde & Schwarz ZVA67, vsaka na svoj kanal. VNA je hkrati deloval kot širokopasoven (preleten) izvor oziroma oddajnik ter na drugem merilnem kanalu kot sprejemnik. Da smo kar se da izločili vpliv geometrije postavitve obeh merilnih anten in rezultirajoče prostorske odvisnosti, je vektorski analizator izmenično meril prenosno funkcijo v obe smeri (meritev s_{12} in s_{21}). Pred začetkom merjenja smo preverili, da sta moč odboja od samega merilnega mesta (brez merjenca) ter presluh med oddajno in sprejemno anteno zanemarljiva (-65,2 dB).

Posamezen trirobnik je bil med meritvijo postavljen na vrtiljaku, ki je merjenca pri vsaki meritvi zavrtil za 360°. Razlog, da smo trirobnik zavrteli okoli celotne osi je, da smo s tem preprosto dosegli štirikratno ponovitev meritve in hkrati preverili, da simetrična struktura daje smiseln rezultat. Vsak trirobnik smo izmerili pri dveh polarizacijah sprejemne antene (vertikalni in horizontalni). Oddajna antena je bila pri vseh meritvah polarizirana vertikalno. Okoli trirobnika so bili postavljeni mikrovalovni absorberji, da smo z njimi omejili neželene odboje. Slika 6 prikazuje merilno postavitve.



Slika 6: Merilna postavitve.

Pri merjenju smo morali upoštevati Fraunhoferjev pogoj za daljno polje. Meja med bližnjim in daljnim poljem je pri Rayleighjevi razdalji r_R , zapisana z enačbo:

$$r_R = \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (7)$$

kjer je D največji premer antene ali tarče. V primeru trirobnika s kvadratno stranico je to tridimenzionalna diagonalna kocka z robom a in dolžino diagonale $D = a\sqrt{3}$. Pri določanju najkrajše potrebne razdalje lahko upoštevamo enega izmed več različnih pogojev [7], ki se med seboj razlikujejo po strogosti zahtev po najkrajši razdalji. Najmanj strog pogoj je upoštevanje samo daljše izmed obeh Rayleighjevih razdalj (anten ali tarče). V našem primeru je to Rayleighjeva razdalja merjenega trirobnika. Pri meritvah smo upoštevali še strožji pogoj, kjer najkrajša razdalja med anteno in tarčo ne sme biti krajša od vsote Rayleighjevih razdalj antene in tarče [5].

V izogib velikim prostorskim zahtevam zaradi merjenja v daljnem polju, imamo na voljo tri rešitve. Prva možna rešitev je sprememba dimenzij tarče. Druga možna rešitev je zmanjšanje sevalne ploskve merilne antene, ampak tako izgubimo njeno smernost, z izgubo smernosti pa dobimo več destruktivnih odbojev v prostoru. Tretja rešitev pa je sprememba frekvence radarja, saj nam to dovoljuje teorem o podobnosti [8]. Odmevno površino pri želeni (polni) frekvenci z valovno dolžino λ_1 lahko normiramo na delovno frekvenco pri valovni dolžini λ_2 . Delovna frekvenca se od polne frekvence razlikuje za linearni faktor k . Za isti faktor pa se tudi poveča ali zmanjša zahtevana Rayleighjeva razdalja tarče. Pri uporabljenih trirobnikih Rayleighjeva razdalja znašajo $r_{05} = 0,5$ m, $r_{10} = 2,1$ m in $r_{15} = 4,7$ m. Rayleighjeva razdalja merilne antene znaša $r_{ant} = 0,5$ m. Zaradi omejenosti s prostorom smo meritve izvedli na razdalji 3,03 m, ki izbranemu Fraunhoferjevemu pogoju zadošča le pri trirobnikih s stranico velikosti 5 cm in 10 cm. Pri trirobnikih s stranico velikosti 15 cm sta doseženi približno dve tretjini Rayleighjeve razdalje, kjer vpliv bližnjega polja ni več popolnoma prevladujoč.

Za izračun odmevne površine posameznega trirobnika smo upoštevali Friisovo oziroma radarsko enačbo [9]:

$$\sigma = \frac{P_o}{P_v} \frac{(4\pi)^3 r^4}{(G\lambda)^2}, \quad (8)$$

v kateri P_o/P_v predstavlja razmerje moči med močjo vpadnega valovanja in močjo odbito od trirobnika (meritev s_{21}), r predstavlja razdaljo med anteno in trirobnikom, G predstavlja dobiček uporabljenih anten in λ predsta-

Tabela 2: Primerjava odmevnih površin trirobnikov pri frekvenci 10,5 GHz. Rezultati simulacij in meritev so pri kotu $\theta = 35, 26^\circ$, rezultati po enačbi (6) pa so na ta kot preskalirani s pomočjo razmerja vrednosti žarčne simulacije*.

Trirobnik		a_{05} [m ²]	b_{05} [m ²]	a_{10} [m ²]	b_{10} [m ²]	a_{15} [m ²]	b_{15} [m ²]	a_{50} [m ²]
Odmevna površina	Enačba (6)*	0,12	/	2,02	/	10,42	/	1287,30
	RL-GO	0,12	0,10	2,00	1,10	10,29	5,06	1269,97
	MoM	0,11	0,10	1,38	1,03	8,19	5,60	1006,72
	Meritve	/	0,05	/	0,66	/	3,74	/

vlja osrednjo valovno dolžino 28,6 mm. Pri izračunu odmevne površine smo za razmerje moči P_o/P_v upoštevali vsoto povprečne vrednosti razmerij moči pri obeh polarizacijah sprejemne antene na celotnem merjenem frekvenčnem področju. Od tega smo odšteli izgube zaradi kalibracije sistema (uporabljenih visokofrekvenčnih vodov), izmerjene pri 3,3 dB. Uporabljeni oddajna in sprejemna antena imata vsaka smernost $D = 19,9$ dB in dobitek $G = 18,8$ dB. Za izračun dobitka smo upoštevali izkoristek osvetlitve odprtine 85 %, sevalni izkoristek 95 % in faktor sklopa polarizacije 95 %. Dodatno smo zaradi meritve delno v bližnjem polju pri velikem trirobniku upoštevali kvadratno napako faze 20 %.

6 Analiza rezultatov

Tabela 2 prikazuje primerjavo različnih vrednosti odmevne površine. Prva vrstica prikazuje rezultat, pridobljen z enačbo (6). Druga vrstica prikazuje rezultate simulacije odmevne površine z integralsko metodo s sledenjem žarkov oz. žarčno metodo (angl. *ray launching - geometrical optics* - RL-GO). Tretja vrstica prikazuje rezultate simulacije odmevne površine z rigorozno momentno metodo (angl. *method of moments* - MoM). Opazimo lahko, da so rezultati integralske metode bližji analitičnim rezultatom, pridobljenim z enačbo 6. Večja razlika do rezultatov z rigorozno metodo se manjša pri električno velikih dimenzijah trirobnikov, ko je razmerje med velikostjo trirobnika in valovno dolžino visoko.

Pri samih meritvah smo se z vsemi trirobniki (kovinskimi in kartonskimi) uspeli približati na 50 % do 72 % teoretične maksimalne odmevne površine. Za slednjo smo upoštevali rezultat simulacije z rigorozno momentno metodo pod ustreznim kotom $\theta = 35, 26^\circ$, katerega smo za upoštevanje nekaj stopinj napake realne geometrije povprečili okoli točke maksimuma. Teoretični odmevni površini se bolj nismo zmogli približati zaradi neidealnosti prostora, v katerem smo izvajali meritve. Te neidealnosti so povzročili parazitni odboji, ki so valovanju, odbitemu od trirobnika, doprinesli nekaj destruktivne interference. Izdelani trirobniki niso idealni, imajo nekaj dodatnih izgub zaradi razlike v prevodnosti, hrapavosti in odbojnosti materiala. Prav tako geometrija izdelanih odbojnikov ni idealna, predvsem na račun debeline kovinskih plošč in dosegljivih toleranc pri ročni izdelavi. Dobljeni rezultati meritev za vsak izdelani osemkratni trirobnik se nahajajo v območju med povprečno odmevno površino navadnega trirobnika, izračunano po enačbi (4) in maksimalno, izračunano po enačbi (6). Najslabše ujemanje smo dosegli

pri najmanjšem trirobniku, kjer sta odboj od merilnega mesta in presluh med antenama primerljiva z merjenim (približno 4 dB razlike).

7 Zaključek

V članku smo na kratko predstavili možnost enostavne izdelave trirobnikov, ki so primerni za preizkušanje zmogljivosti radarja. Z meritvami smo potrdili, da so trirobniki, izdelani iz okovinjnih kartonskih plošč, podobno učinkoviti pri odbujanju vpadnega radijskega valovanja, kot so trirobniki iz aluminijastih plošč. Kot stacionarne radarske tarče so se kartonski trirobniki izkazali kot strukturno stabilni pri večji debelini sestavnih plošč. Kljub temu sklepamo, da bi se aluminijasti trirobniki odrezali bolje na višjih frekvencah, saj je hrapavost površine aluminijastih plošč nižja od kartonskih. Izdelane trirobnike smo namreč merili na dovolj nizki frekvenci, kjer je bila hrapavost površine kartona zanemarljiva proti valovni dolžini vpadnega radijskega valovanja.

Literatura

- [1] C. A. Balanis, "Advanced engineering electromagnetics", 2. izd. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012, str. 548.
- [2] N. A. W. C. W. D., "Electronic warfare & radar systems engineering handbook", 4. izd. California: Lulu Com, 2013, pogl. Radar Cross Section.
- [3] S. Kingsley in S. Quegan, "Understanding radar systems", 1. izd. Mendham, NJ: SciTech Pub, 1999, str. 35, 38.
- [4] "The electrical engineering handbook", W.-K. Chen, ur., 1. izd. Amsterdam; Boston: Elsevier Academic Press, 2005, str. 673.
- [5] M. Vidmar, "Antene in razširjanje valov", 1. el. izd. Ljubljana: Založba FE, 2020, str. 5.6, 15.15, 15.16.
- [6] Altair, FEKO, Dosegljivo: <https://www.altair.com/feko>, Dostopano: 13. 7. 2021, jul. 2021.
- [7] R. Kouyoumjian in L. Peters, "Range requirements in radar cross-section measurements", *Proceedings of the IEEE*, zv. 53, 1965, str. 920–928.
- [8] R. B. Dybdal, "Radar cross section measurements", *Proceedings of the IEEE*, zv. 75, 1987, str. 498–516.
- [9] *Merjenje odmevne (radarske) površine predmetov*, laboratorijska vaja pri predmetu Antene in razširjanje valov, Laboratorij za sevanje in optiko, Fakulteta za elektrotehniko UL.