

Krožni valovod z zelo veliko smernostjo in izkoristkom osvetlitve odprtine

Adam Raspor, Matjaž Vidmar

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: adam.raspor@gmail.com

Povzetek. V članku je predstavljen krožni valovod z zelo veliko smernostjo in izkoristkom osvetlitve odprtine. Krožni valovod je ena najpogosteje uporabljenih anten zaradi njene zelo preproste konstrukcije, nizkih stroškov izdelave in razmeroma dobrih lastnosti. Glavni problem takšne antene sta njen dobitek in smernost, ki sta omejena na največjo vrednost okrog 8 dBi. Do zdaj je bilo predlaganih veliko rešitev za povečanje te številke. Glavni problem predlaganih rešitev je v tem, da večinoma naredijo konstrukcijo antene zapleteno, povečajo stroške izdelave ali pa povečajo njene dimenzije. V tem članku je predstavljena nova rešitev, ki je zelo preprosta, ohranja originalne dimenzije antene, stroški izdelave pa se tako rekoč ne spreminjajo. To je mogoče doseči z uporabo velike elipsaste in majhne krožne zaslonke, ki sta pritrjeni na zaščitni pokrov antene. Največja smernost antene doseže 10.2 dBi, njen izkoristek osvetlitve odprtine pa doseže maksimalno vrednost 210 %. Uporabi se lahko kakor samostojna antena, če potrebujemo večjo smernost/dobitek, pa lahko sestavimo polje takih anten. Nadomesti lahko tudi žarilce na paraboličnih zrcalih.

Ključne besede: krožni valovod, izkoristek osvetlitve odprtine, smernost, zaščitni pokrov, zaslonka

Circular waveguide horn with high directivity and aperture efficiency

Extended abstract. The paper presents a new method enabling an increased directivity and aperture efficiency of the circular-waveguide horn. Circular waveguide horn is one of the most widely used antennas because of its simple construction, low cost, small size, etc.. The biggest problem with this type of the antenna is its limited gain/directivity of approximately 8 dBi.

Over the years, there have been many solutions proposed towards increasing this figure. The problem with the proposed solutions are the antennas which are either too large, complicated to build or expensive.

In this paper we present a new, simple way of increasing the antenna directivity by 1.5-2dB. This figure is comparable with other more complicated solutions. It keeps the manufacturing cost low and simplifies the manufacturing process. This can be achieved by using two reflectors mounted on the antenna radome. Although a large part of antenna aperture is shaded with by reflectors, it is still possible to achieve a very high aperture efficiency, reaching the peak with 210%. It can be used either as a stand-alone antenna, an illuminator for parabolic-dish reflectors or an array element.

Keywords: circular horn, aperture efficiency, directivity, radome, reflector

1 Uvod

Krožni valovod je ena najpogosteje uporabljenih anten zaradi njenih razmeroma dobrih karakteristik in preproste konstrukcije. Njene karakteristike sevanja

[1,2], polarizacije [3] in druge podrobnosti [4,5] so bile področje velikega zanimanja od njenega nastanka. Klasična antena je pravzaprav krožni votliniski resonator, ki ima eno stranico odprto. Največji dobitek, ki ga taka antena lahko doseže, je dan z enačbo (1).

$$G_{\max} = 0.209 (ka)^2 \frac{k}{\beta} \left(1 + \frac{\beta}{k}\right)^2 \quad (1)$$

V enačbi (1) je radij antene predstavljen z a ,

$$k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (2)$$

$$\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2} \quad (3)$$

$$k_c a = 1.841 \quad (4)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (5)$$

Kakor je mogoče videti iz enačbe (1), dobitek narašča z večanjem radija odprtega konca antene in z naraščanjem frekvence. Osnovni rod krožnega valovoda je TE_{11} [6]. Da antena pravilno deluje, je treba izbrati radij antene tako, da je dovolj velik, da se lahko širi osnovni rod (TE_{11}) in dovolj majhen, da se ne morejo širiti višji rodovi. Okvirne mere premera krožnega valovoda, ki ustrezajo opisu so med 0,6 in 0,7 valovne dolžine v praznem prostoru [12].

Dobitek narašča s frekvenco, vse dokler se ne pojavijo višji rodovi. Pojav višjih rodov povzroči počasno padanje dobitka. Največji dobitek, ki ga lahko

dosežemo na ta način, je okrog 8 dBi. To je ena od glavnih slabosti take antene.

Do zdaj je bilo vložena veliko dela na področju povečanja smernosti klasične antene. Rešitve, ki so bile predlagane do zdaj vključujejo: dodajanje dielektričnih plasti [7], uporaba korugacije na površini antene [8], uporaba pasovno-zaponih struktur [9], uporaba končnih vzdolžnih korugiranih sekcij na koncu antene [10], uporaba metamaterialov za boljše usmerjanje žarkov [14] itd.

V tem članku je predstavljena nova metoda za povečanje smernosti antene za okrog 1,5-2 dB glede na klasično anteno. Glavna prednost predstavljene metode v članku je v njeni preprostosti in nizkih stroških izdelave. Čeprav je metoda preprosta, pa je povečanje smernosti z njo primerljivo z drugimi predlaganimi metodami.

2 Princip delovanja

2.1 TE rodovi

Pri obravnavi rodov TE izhajamo iz splošne rešitve valovne enačbe za vzdolžno komponento magnetne poljske jakosti [13]. Za transversalno funkcijo vzdolžne komponente magnetne poljske jakosti izberemo:

$$H_z(r, \varphi) = H_{z0} J_m(k_r r) \cos(m \varphi). \quad (6)$$

Končen rezultat izpeljave za električno in magnetno poljsko jakost za TE rodove je prikazan na spodnjih enačbah. Polje za rodove TE_{mn} nad kritično frekvenco je definirano s spodnjimi enačbami:

$$E_r(r, \varphi, z) = jH_{z0} \frac{\omega \mu a^2 m}{y_{mn}^2 r} J_m\left(\frac{y_{mn}}{a} r\right) \sin(m \varphi) e^{-j\beta_z z} \quad (7)$$

$$E_\varphi(r, \varphi, z) = jH_{z0} \frac{\omega \mu a}{y_{mn}} J_m'\left(\frac{y_{mn}}{a} r\right) \cos(m \varphi) e^{-j\beta_z z} \quad (8)$$

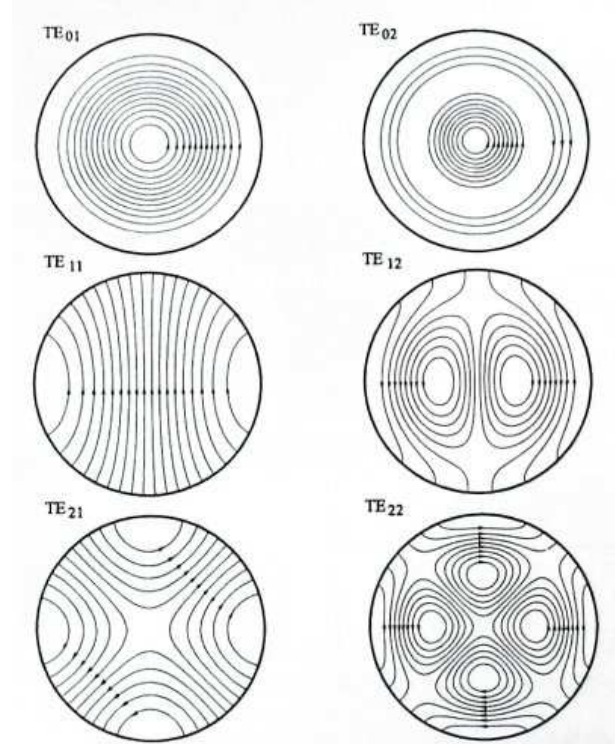
$$E_z(r, \varphi, z) = 0 \quad (9)$$

$$H_r(r, \varphi, z) = -jH_{z0} \frac{\beta_z a}{y_{mn}} J_m'\left(\frac{y_{mn}}{a} r\right) \cos(m \varphi) e^{-j\beta_z z} \quad (10)$$

$$H_\varphi(r, \varphi, z) = jH_{z0} \frac{\beta_z a^2 m}{y_{mn}^2 r} J_m\left(\frac{y_{mn}}{a} r\right) \sin(m \varphi) e^{-j\beta_z z} \quad (11)$$

$$H_z(r, \varphi, z) = H_{z0} J_m\left(\frac{y_{mn}}{a} r\right) \cos(m \varphi) e^{-j\beta_z z} \quad (12)$$

Da bi si lahko lažje predstavljali porazdelitev električnega polja v krožnem valovodu, jo ponazorimo s silnicami, ki jih v transversalnem preseku za električno poljsko jakost prikazuje slika 1.



Slika 1: TE Rodovi krožnega valovoda
Figure 1. TE modes of the circular waveguide horn

2.2 TM rodovi

Pri tej vrsti antene TM rodovi niso zanimivi, saj si želimo, da se širi samo en rod, TE_{11} . Tudi preostali TE rodovi niso zaželeni.

2.3 Klasična antena

Polje v resonatorju vzbudimo z malo $\lambda/4$ sondo v steni cevi, resonator pa sam poskrbi, da se polje pravilno izoblikuje. V ta namen mora biti cev dovolj dolga. Da antena deluje kakor resonator, mora biti dolžina med vzbujevalno sondo in koncem cevi vsaj polovico valovne dolžine.

Polarizacija opisane antene je linearna, v smeri vzbujevalne sonde znotraj resonatorja. Na želeno frekvenco jo uglasimo predvsem z dolžino vzbujevalne sonde. Prilagoditev antene nato popravimo z uglaševalnim vijakom, ki ga pritrdimo v cev, točno na nasprotni strani vzbujevalne sonde. To je razvidno iz slike 2.

2.4 Izboljšava klasične antene z zaslonkami

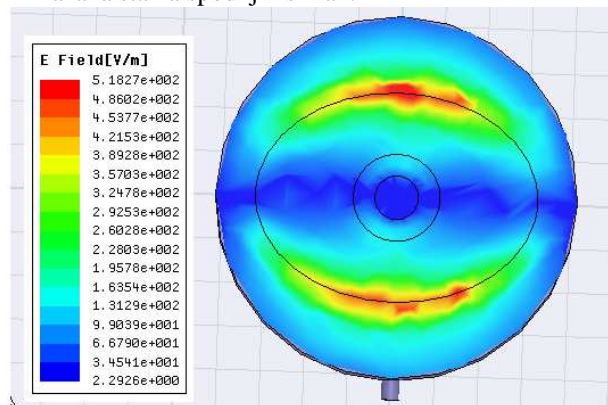
Antena je bila razvita s pomočjo več simulacijskih 3D orodij. Simulirali smo veliko različnih oblik antene. Struktura z uporabo majhne in velike krožne zaslonke v obliki obroča je kazala zelo obetavne rezultate. Pozneje smo ugotovili, da je mogoče smernost še dodatno povečati z uporabo elipsaste zaslonke. Vzrok za to je, ker osnovni rod TE_{11} ni čisto simetričen po

odprtini antene, kakor je razvidno iz slike 1. Veliko anten smo preizkusili tudi praktično in nazadnje izbrali najboljši prototip za objavo v članku.

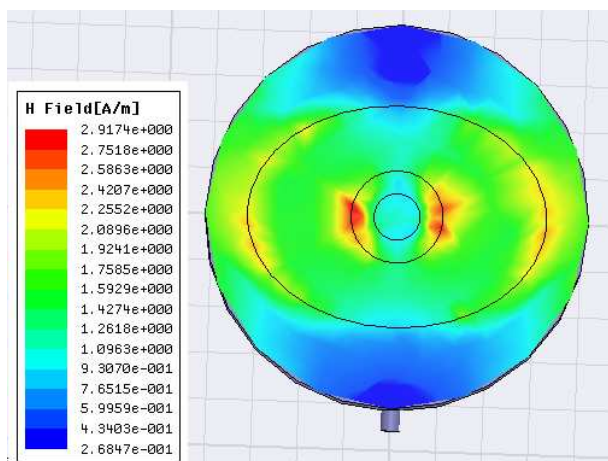
Obnavnavana antena ima enako sestavo kakor klasična antena, dodani ima le dve zaslonki. Rabita za odboj določenih snopov nazaj v anteno. Ti snopi se potem spet odbijejo nazaj od kovinske notranjosti antene in se seštejejo v fazi skupaj z drugimi snopi.

Antena seva na nezaslonjenem delu odprtine. Ohranja linearno polarizacijo, kakor klasična antena. Glede na rezultate simulacij ima osno razmerje okrog 40 dB. Podano osno razmerje je dano za točko največjega sevanja antene.

Električno polje E in magnetno polje H se zaradi dodanih obročev razširita glede na klasično anteno. Prikazana sta na spodnjih slikah.

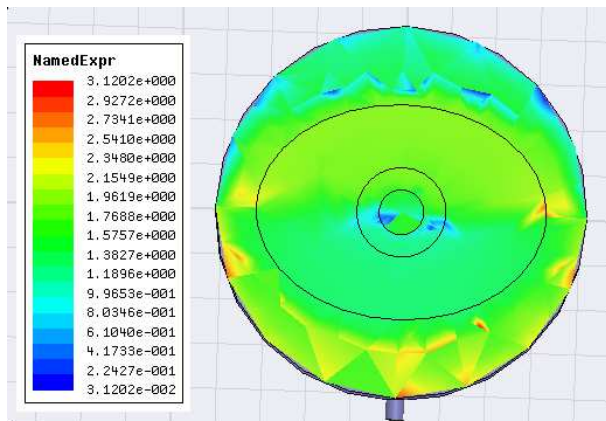


Slika 2: Porazdelitev električnega polja
Figure 2. Electric-field distribution



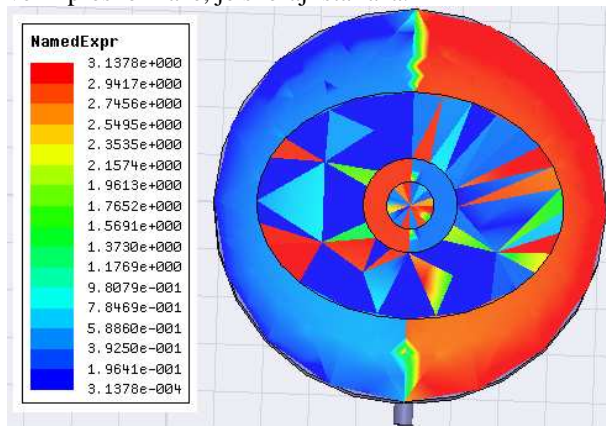
Slika 3: Porazdelitev magnetnega polja
Figure 3. Magnetic-field distribution

Obroči naredijo tudi fazo električnega in magnetnega polja bolj enakomerno po površini, kjer seva antena. Rezultati simulacij so prikazani na slikah 4 in 5.



Slika 4: Porazdelitev faze električnega polja
Figure 4. E-field phase distribution

V simulacijskem programu je mogoče izbrati le tole barvno skalo. Temno rdeča in temno modra barva pomenita skoraj isto fazo. Kar je iz slike videti kakor velik preskok faze, je skoraj ista faza.



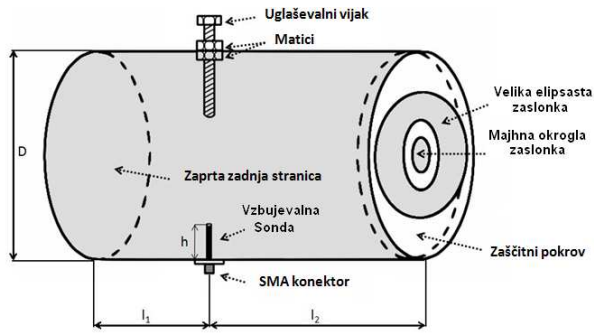
Slika 5: Porazdelitev faze magnetnega polja
Figure 5. H-field phase distribution

3 Praktična izdelava antene in izmerjeni rezultati

3.1 Dimenzije antene

Konstrukcija antene je prikazana na sliki 2. Izmere za frekvenco okrog 2,5 GHz so: $D=83$ mm ($0,69\lambda_0$), $l_1=47$ mm ($0,39\lambda_0$), $l_2=63$ mm ($0,53\lambda_0$), $h=20$ mm ($0,17\lambda$).

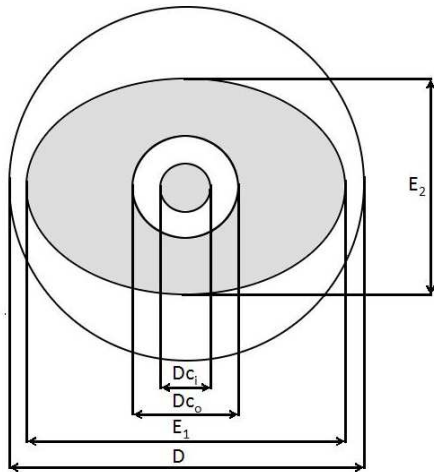
Preizkusili smo veliko različnih vrst vzbujevalnih sond. Za malenkost boljši rezultati so bili doseženi z uporabo bakrene cevke s premerom stene 0,6 mm in zunanji premerom okrog 4 mm. Za uglaševalni vijak je bil uporabljen vijak M6x70. Za njegovo pritrditev na anteno se lahko uporabita dve matici, kakor je tole prikazano na sliki 6.



Slika 6: Konstrukcija antene
Figure 6. Antenna construction

Izmere velike elipsaste in majhne krožne zaslonke so prav tako podane za frekvenco okrog 2,5 GHz. Prikazane so na sliki 7. Dimenzije so: $D_{c1}=10$ mm ($0,08\lambda_0$), $D_{c0}=20$ mm ($0,17\lambda_0$), $E1=65$ mm ($0,54\lambda_0$), $E2=48$ mm ($0,4\lambda_0$), $D=83$ mm ($0,69\lambda_0$).

Obe zaslonki sta nameščeni na zaščitni pokrov antene, ki je bil izdelan iz 1,5 mm debelega pleksi stekla z relativno dielektričnostjo približno 3,4. Zaščitni pokrov je bil izoblikovan tako, da se je točno prilegal notranjemu radiju oboda. Tako je pritrditev na anteno zelo preprosta, rabi pa tudi za okrepitev celotne konstrukcije.

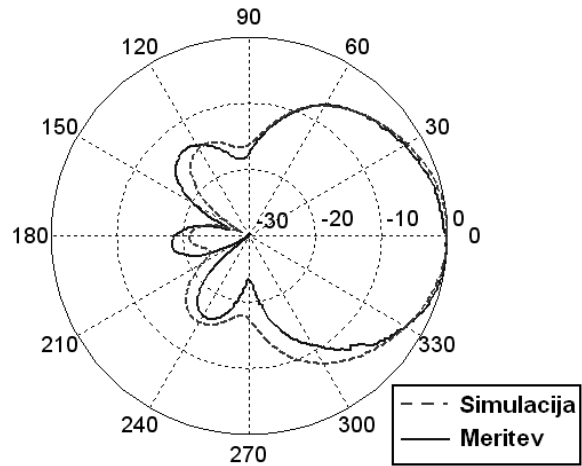


Slika 7: Dimenzije velike elipsaste in majhne okrogle zaslonke
Figure 7. Dimensions of the large ellipse disc and the small circular reflector

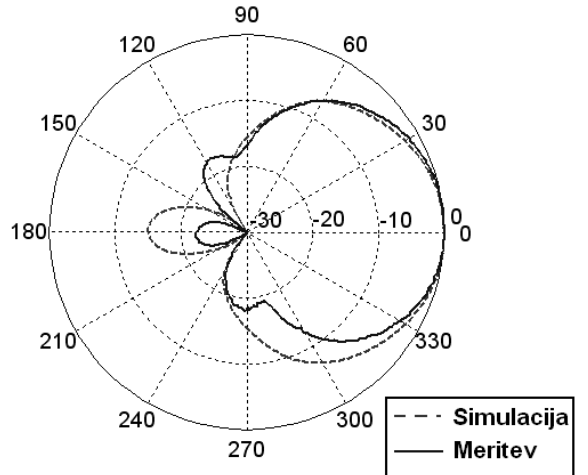
3.2 Izmerjeni rezultati

Glavni parametri antene (imepdanca, smerni diagrami in smernost) so bili izmerjeni med frekvencama 2,2 in 2,7 GHz v korakih po 20 MHz.

Na slikah 4 in 5 sta prikazana smerna diagrama, ki sta bila izmerjena na centralni frekvenci, 2,46 GHz. Slika 8 prikazuje smerni diagram antene v horizontalni polarizaciji (E-ravnina), slika 9 pa smerni diagram v vertikalni polarizaciji (H-ravnina). V obe sliki sta vključena tudi smerna diagrama, ki sta bila izračunana z uporabo 3D simulacijskih orodij.



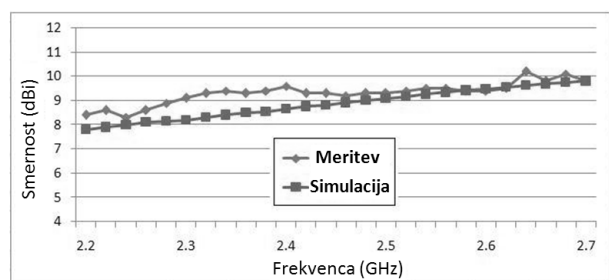
Slika 8: Smerni diagram (E-ravnina)
Figure 8. Radiation pattern (E-plane)



Slika 9: Smerni diagram (H-ravnina)
Figure 9. Radiation pattern (H-plane)

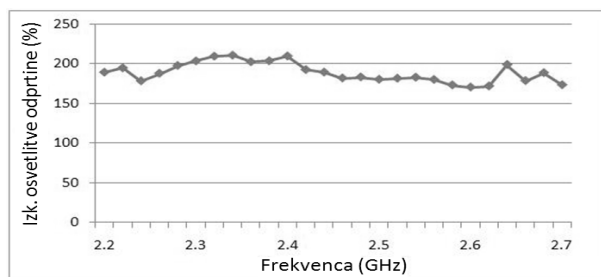
Slika 10 prikazuje smernost antene med 2,2 in 2,7 GHz. Za primerjavo rezultatov je prikazana tudi smernost, ki je bila izračunana z uporabo 3D simulacijskih orodij. Rezultat praktično izmerjene smernosti antene je bil izračunan prek integracije obeh ravnin (E- in H-ravnina) smernih diagramov. Smernost je bila izmerjena brez uporabe uglasevalnega vijaka.

Na frekvenci 2,64 GHz je bila praktično izmerjena največja smernost, ki je znašala 10,2 dBi.



Slika 10: Simulirana in izmerjena smernost antene
Figure 10. Simulated and measured directivity of the antenna

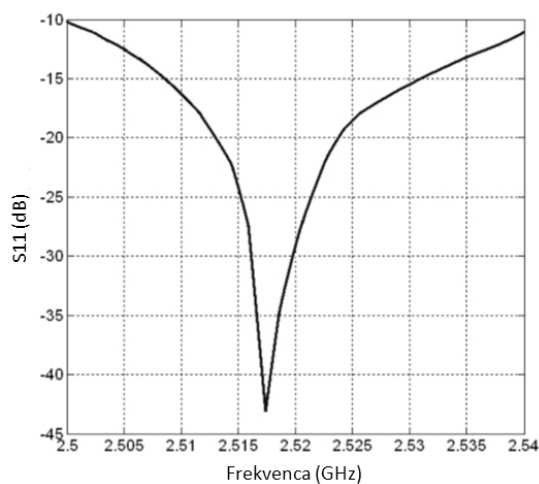
Izkoristek osvetlitve odprtine antene je prikazan na sliki 11. Izračunan je bil iz praktično izmerjene smernosti, ki je prikazana na sliki 6. Antena doseže največji izkoristek osvetlitve odprtine na frekvenci 2.34 GHz z 210 %.



Slika 11: Izkoristek osvetlitve odprtine antene
Figure 11. Aperture efficiency of the antenna

Prilagoditveno slabljenje (S_{11} [dB]) je prikazano na sliki 12. Izmerjeno je bilo s pomočjo analizatorja vezij. Prilagoditveno slabljenje, ki je prikazano na sliki 8 je prilagoditveno slabljenje same antene, brez uporabe uglaševalnega vijaka. Z uporabo uglaševalnega vijaka je mogoče točko najboljše prilagoditve premikati na druge frekvence v območju med 2,2 in 2,7 GHz.

Tipična pasovna širina antene je med 30 in 50 MHz, čeprav je bila na nekaterih frekvencah dosežena tudi pasovna širina med 70 in 100 MHz.

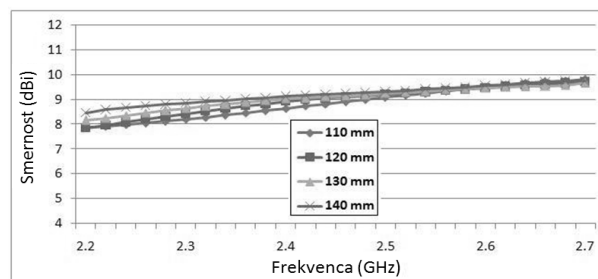


Slika 12: Prilagoditveno slabljenje antene
Figure 12. Return loss of the antenna

Na prilagoditveno slabljenje antene vpliva tudi fizična dolžina antene (l_1+l_2). Z daljšo anteno se resonančna frekvenca antene zniža.

Slika 13 prikazuje vpliv dolžine (l_1+l_2) antene na smernost antene. Rezultati so bili dobljeni z uporabo 3D simulacijskih orodij. Spreminjal se je samo parameter l_2 , ker je bilo v praksi izmerjeno, da spreminjanje parametra l_1 ne vpliva bistveno na prilagoditveno slabljenje antene.

Glede na rezultate, dobljene iz simulacij, lahko sklepamo, da ima daljša antena večjo smernost na nižjih frekvencah in nekoliko manjšo na višjih.



Slika 13: Simulirani vpliv dolžine antene na smernost
Figure 13. Simulated variations in directivity due to the length of the antenna

4 Sklep

V članku je bil predstavljen nov način za povečanje smernosti krožnega valovoda. Bistveni prednosti tega načina sta njegova preprostost in nizki stroški izdelave. Čeprav, da je metoda preprosta, daje primerljive rezultate z drugimi, bolj zapletenimi metodami.

Izmerjeni rezultati so potrdili pričakovane rezultate iz 3D simulacijskih orodij. Anteno je mogoče uporabiti kot samostojno, za dodatno povečanje smernosti lahko sestavimo polje takšnih anten, ali pa jo uporabimo kakor reflektor za parabolično zrcalo.

Dalo bi se jo še naprej izboljšati s hibridno uporabo te metode s še katero od predlaganih metod iz drugih člankov. Na primer, lahko bi uporabili zamisel iz tega članka za povečanje smernosti z obroči in ji dodali metamateriale. Tako bi bilo mogoče še naprej povečati smernost same antene.

5 Literatura

- [1] E. Conforti, A. J. Giarola and R. F. Souza, "Radiation from open-ended circular waveguide", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol. 22, June, 1984, pp. 78-81
- [2] Le-Wei Li, Mook-Seng Leong, Pang-Shyan Kooi, Tat-Soon Yeo, You-Lin Qiu, "Radiation of an aperture antenna covered by a spherical-shell chiral radome and fed by a circular waveguide" *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Volume 46, May, 1998 pp. 664-671
- [3] A.V. Shishkova, S.N. Pivnenko, N.N. Gorobets, "Polarization characteristics of an open-ended circular waveguide", *IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques*, Vol. 2, September, 2003, pp. 465-467
- [4] J.M. Reiter, F. Arndt, "Analysis of circular waveguide antennas including the outer wall geometry with a spherical-wave formulation of the boundary contour-mode-matching method", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol. 2, June, 1994 pp. 1070-1073

- [5] S. Piedra, J. Basterrechea, M.F. Catedra, "Extension of a CG-FFT BOR formulation to model slots in circular waveguide antennas", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol. 3, June, 1998 pp. 1514–1517
- [6] J. L. Volakis, R. C. Johnson, H. Jasik, "Antenna engineering handbook", McGraw-Hill Professional, 2007
- [7] M. Hakkak, H. Ameri, "Gain enhancement of dielectric resonator loaded waveguide antennas with dielectric overlays", *Electronics Letters*, Volume 28, March, 1992 pp. 541-542
- [8] Guo-Hua Zhang, Yun-Qi Fu, Chang Zhu, Dun-Bao Yan, Nai-Chang Yuan, "A circular waveguide antenna using high-impedance ground plane", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 2, 2003, pp. 86-88
- [9] Li Bin, Wu Bian, Liang Chang-hong, "High gain circular waveguide array antenna using electromagnetic band-gap structure", *APMC - Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings Conference Proceedings*, Vol. 3, December, 2005 pp. 4–8
- [10] S.P. Skobelev, "On improvement of the radiation performance of the open-ended circular waveguide", *IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques*, Vol. 2, September, 2003, pp. 477 - 480
- [11] S.K. Katenev, H. Shi, "Stop bandwidth extremums of a periodic iris-loaded circular waveguide", *IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques*, September, 2007, pp. 471-473
- [12] M. Vidmar, "Na sneg in led odporni lonci za 23cm in 13cm", RTV klub Murska Sobota, 1999
- [13] Jože Mlakar, "Elektromagnetno valovanje", Založba FE in FRI, 2002
- [14] Li B., Wu B., and Liang C.H.: "Study on high-gain circular waveguide array antenna with metamaterial Structure", *Progress In Electromagnetics Research, PIER 60*, 207–219, 2006

Adam Raspor je diplomiral leta 2007 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Trenutno je študent podiplomskega študija na isti fakulteti.

Matjaž Vidmar je diplomiral leta 1980, magistriral leta 1983 in doktoriral leta 1992 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je na Fakulteti za elektrotehniko, Katedra za telekomunikacije, kjer je predstojnik laboratorija za sevanje in optiko. Sodeluje pri številnih domačih in tujih projektih s področja optičnih in radijskih komunikacij. Spekter njegovega raziskovalnega dela je zelo širok in se giblje od letalstva do optičnih komunikacij.