

Širokopojasne cilindrične opterećene antene sa osvrtom na primenu u VVF opsegu

Mira Maljković, dipl.inž.¹⁾

Obrađene su teorijske osnove analize i sinteze širokopojasnih cilindričnih opterećenih antena i njihova primena u VVF opsegu u vojnim komunikacijama. Tanke cilindrične antene sa opterećenjima imaju veoma značajne karakteristike za praktičnu primenu. Podesnim izborom opterećenja i njihovog položaja duž antene, može da se dobije antena koja ima širokopojasne osobine u pogledu ulazne impedanse, dijagrama zračenja ili neke druge karakteristike.

Ključne reči: Antena, cilindrična antena, širokopojasna antena, širokopojasna cilindrična opterećena antena, karakteristike antene.

Korišćene oznake i simboli

\mathbf{A}	– magnetski vektor potencijal,
\mathbf{A}_e	– električni vektor potencijal,
E	– električno polje,
g	– Greenova funkcija,
I	– struja,
J	– površinska struja,
L_o	– integralni operator,
V	– napon,
Z	– impedansa,
δ	– delta-generator,
ε	– dielektrična konstanta,
μ	– magnetska permeabilnost,
ω	– učestanost.

Uvod

NOVA tehnička rešenja u radio-komunikacijama ili potpuno nove tehnike radio-prenosa, uslovili su i novi pristup antenskom delu radio-uređaja (RU). Ta promena je tekla u dva pravca:

- prvi je primena širokopojasnih antena koje ne zahtevaju postojanje posebnog antenskog prilagođenja u radio-uređajima, a
- drugi je primena novih koncepcija i tehnika u rešavanju antenskih prilagodnih sistema u radio-uređajima koji koriste uskopojasne (rezonantne) antene.

U mnogim praktičnim primenama u telekomunikacijama, navigaciji i dr. neophodno je koristiti antene koje mogu da rade u širokom opsegu frekvencija. Poslednjih nekoliko decenija konstruisano je više različitih tipova antena koje imaju relativno konstantnu admitansu (odn. impedansu) i stabilan oblik dijagrama zračenja u opsegu frekvencija od preko jedne oktave [1].

Razlozi za korišćenje širokopojasnih antena nalaze se u osnovi pojedinih tehnika u radio-komunikacijama. To se odnosi, pre svega, na radio-izviđanje i prenos u proširenom spektru. U radio-izviđanju se najčešće pretražuje širok frekvencijski opseg što, samo po sebi, isključuje primenu uskopojasnih antena (veći broj antena, veći prostor za razmeštaj antenskog sistema, antenski komutatori i dr.). U novim tehnikama prenosa u proširenom spektru (frekvencijsko skakanje, direktna sekvenca) ne koristi se konvencionalni rad na fiksnoj frekvenciji, već se frekvencija menja u užem ili širem frekvencijskom opsegu, pa primena uskopojasnih antena zahteva brze antenske prilagodne sklopove za prilagođenje impedanse uskopojasnih antena.

Naravno, širokopojasne antene se mogu koristiti i za rad na fiksnoj frekvenciji. U tom slučaju, suvišno postaje antensko prilagođenje u radio-uređaju, te se smanjuju gabariti radio-uređaja, njihova kompleksnost i cena, a povećava se pouzdanost i omogućava se veća autonomnost radio-uređaja (manja potrošnja baterija).

Antene koje spadaju u ovu grupu su: cilindrične antene sa opterećenjima, žičane antene sa opterećenjima, log-periodične antene, antene sa progresivnim talasom i diskon antene, kao i cilindrične antene koje imaju prilagođenje u podnožju, a zračeći elemenat je pasivan štap.

Najčešće upotrebljavane su cilindrične antene.

Tanke cilindrične antene sa opterećenjima mogu imati veoma interesantne karakteristike za praktičnu primenu. Podesnim izborom opterećenja i njihovog položaja duž antene, može se dobiti antena koja ima širokopojasne osobine u pogledu ulazne impedanse, dijagrama zračenja ili neke druge karakteristike.

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

Širokopojasne cilindrične opterećene antene -teorijske osnove analize i sinteze-

Jednačine za određivanje raspodele struje u cilindričnim provodnicima

U teorijskoj analizi antena poznavanje raspodele struje duž strukture antene je od posebnog značaja pošto se na osnovu nje mogu odrediti sve ostale karakteristike antena. Zavisno od primenjene metode, raspodela struje duž antene se određuje rešavanjem integro-diferencijalne ili integralne jednačine u kojoj je nepoznata raspodela struje, a figurišu oblik i dimenzije antene, talasna dužina signala, opterećenje duž antene i spoljno pobudno polje [2-6].

Ovde će biti izložen kratak pregled jednačina koje predstavljaju osnovu raznih metoda za analizu tankih cilindričnih antena, kao najjednostavnijih struktura žičanih antena. Cilj je da se analiziraju dobre i loše strane pojedinih jednačina i metoda kako bi se izabrala najbolja.

Osnovne jednačine

Cilj analize tankih cilindričnih antena je određivanje raspodele struje duž antene kada su poznate njene osobine, konfiguracija i uslovi napajanja, tj. kada su definisani svi njeni parametri. Ova raspodela se može odrediti iz uslova da elektromagnetsko polje u prostoru oko antene mora da zadovolji Maxwellove jednačine, kao i odgovarajuće granične uslove.

Posmatraće se savršeno provodna cilindrična antena poluprečnika a i dužine b , smeštena u homogenu dielektričnu sredinu čiji su parametri ϵ i μ . Z-osa koordinatnog sistema leži u osi antene. Antena se nalazi u aksijalno simetričnom prostoperiodičnom pobudnom električnom polju E_i , kružne frekvencije ω , a z-komponenta ovog polja duž antene je $E_{iz}(z)$.

Zbog aksijalne simetrije, struja i opterećenja na površini antene proizvode samo aksijalno električno polje duž z-ose, koje se može izraziti u funkciji zakasnelih potencijala:

$$E_z = -j\omega A_z \frac{\partial V}{\partial z} \quad (1)$$

gde su:

$$\vec{A} = \mu \int_S \vec{J}_s g(r_e) dS \quad (2)$$

magnetski vektor potencijal

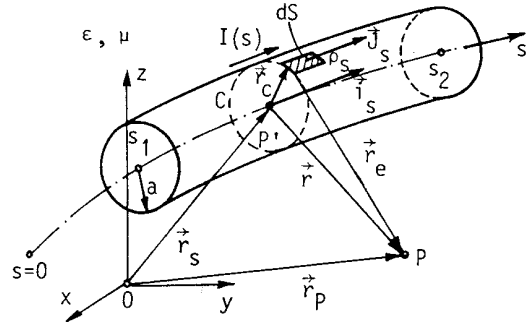
$$V = \frac{1}{\epsilon} \int_S \rho_s g(r_e) dS \quad (3)$$

električni skalar potencijal

$$g(r_e) = \frac{e^{-jkr_e}}{4\pi r_e} \quad (4)$$

Greenova funkcija za neograničenu homogenu sredinu (sl.1), i

$$\vec{r}_e = (\vec{r}_p - \vec{r}_s) - \vec{r}_c = \vec{r} - \vec{r}_c; \quad k = \omega\sqrt{\epsilon\mu} \quad (5)$$



Slika 1. Segment žičane strukture

Primenom proširenih graničnih uslova (Extended Boundary Condition - EBC), pretpostavljeno je da je duž z-ose (između z_1 i z_2):

$$E_z = -E_{iz} \quad (5)$$

gde je E_z polje zbog struja i opterećenja indukovanih na anteni. Ako se (1) zameni u (5), dobija se generalna forma integralne jednačine za raspodelu struje duž antene, čija finalna forma zavisi od izražavanja A_z i V u funkciji $I(z)$.

Ako se na jednačinu (1) primeni Lorentzov uslov:

$$\text{div}A = -j\omega\epsilon\mu V, \text{ odnosno } V = \frac{j}{\omega\epsilon\mu} \text{div}A \quad (6)$$

u ovde razmatranom slučaju je $A = A_z \hat{z}$, pa je duž z-ose

$\text{div}A = \frac{dA_z}{dz}$, dobija se jednačina (1) u obliku:

$$E_z = -j\omega(1 + \frac{1}{k^2} \frac{d^2}{dz^2}) A_z \quad (7)$$

što se može predstaviti u formi:

$$(1 + \frac{1}{k^2} \frac{d^2}{dz^2}) \int_{z_1}^{z_2} I(z) g(r) dz = \frac{E_{iz}}{j\omega\mu} \quad (8)$$

gde je $r = \sqrt{(z-z')^2 + a^2}$ rastojanje između tačke izvora na površini antene i tačke polja na z-osi.

Integro-diferencijalna jednačina (8) naziva se jednačina VEKTOR POTENCIJALA i ona nije pogodna za numeričku analizu cilindričnih antena, jer zahteva numeričko izračunavanje drugog izvoda integrala na levoj strani jednačine po z.

Hallenova integralna jednačina

Jednačina (8) može da se napiše u sledećem obliku:

$$(k^2 + \frac{d^2}{dz^2}) F(z) = k^2 S(z) \quad z_1 < z < z_2 \quad (9)$$

gde je $F(z)$ integral iz jednačine (8), a $S(z)$ je funkcija izvora. Rešenje jednačine (9) je oblika:

$$F(z) = c_1 \cos kz + c_2 \sin kz + kz \int_{z_0}^z S(z') \sin k(z-z') dz' \quad (10)$$

gde su prva dva člana na desnoj strani jednačine rešenje homogene jednačine. Poslednji član je partikularno rešenje

jednačine (9). $F(z)$ zadovoljava (9) za proizvoljno izabranu konstantu z_0 .

Rešenje jednačine (9) može da se napiše i na sledeći način:

$$\int_{z_1}^{z_2} I(z')g(r)dz' + C_1 \cos kz + C_2 \sin kz = \frac{k}{j\omega\mu} \int_{z_0}^z E_{iz}(z') \sin k(z-z')dz' \quad (z_1 < z, z_0 < z_2) \quad (11)$$

Konstante C_1 i C_2 tek treba da se odrede, pa je znak ispred njih irelevantan.

Jednačina (11) je poznata Hallenova integralna jednačina za pravu tanku cilindričnu antenu. Ona je najprostija integralna jednačina za raspodelu struje duž antene, te je razni autori često koriste kao polaznu jednačinu.

Jezgro integrala u jednačini čini Greenova funkcija u slobodnom prostoru, koje je najjednostavnije jezgro koje se može dobiti kod integralnih jednačina za tanke žičane antene. Kod ovog jezgra red singulariteta je minimalan jer se u blizini tačke $z = z'$ ponaša kao funkcija $1/r$. Zbog toga je numerička integracija, koja se primenjuje kod određivanja integrala, relativno jednostavna.

Jednačina (11) sadrži tri konstante (C_1, C_2, z_0). Kako je već rečeno, z_0 se može uzeti proizvoljno, a integracione konstante C_1 i C_2 moraju se naknadno određivati postavljanjem dodatnih uslova. To predstavlja manju ovu jednačine, kao i to što je uticaj izvora određen integralom pobudnog polja duž antene, koji se ponekad mora određivati numerički. Ovaj tip jednačine pogodan je za analizu antena sa delta-generatorom ili delta-opterećenjima, jer se tada integral pobudnog polja može odrediti eksplicitno i daje konačne vrednosti u svim tačkama duž antene. Mada je ova jednačina prvenstveno namenjena za prave cilindrične antene, neki autori su je koristili za rešavanje V-antena.

Pocklingtonova integralna jednačina

Jednačina vektor potencijala (8) može da se preuredi tako da operator u zagradama uđe pod znak integrala. Kako je $g(r)$ funkcija od z , jednačina se može napisati u obliku:

$$\int_{z_1}^{z_2} I(z') \left(1 + \frac{1}{k^2} \frac{d^2}{dz'^2}\right) g(r) dz' = \frac{E_{iz}}{j\omega\mu} \quad (12)$$

Ovaj izraz poznat je kao Pocklingtonova integralna jednačina. U ovoj jednačini je izbegnuto numeričko diferenciranje, ali su zato integrali koji se javljaju u rešenju znatno složeniji.

Jednačina Schelkunoffa

Ako se u jednačinu (1) unesu izrazi za A_z i V , dobija se jednačina dva potencijala koja može da se transformiše u oblik:

$$\int_{z_1}^{z_2} \left[I(z') + \frac{1}{k^2} \frac{d^2 I(z')}{dz'^2} \right] g(r) dz' - \left. \frac{1}{k^2} \frac{d^2 I(z')}{dz'^2} g(r) \right|_{z=z_1}^{z_2} = \frac{E_{iz}}{j\omega\mu} \quad (13)$$

Ova jednačina poznata je kao jednačina Schelkunoffa.

Ovaj tip jednačine se manje koristi, mada je, po mišljenju nekih autora, vrlo pogodan za analizu cilindričnih antena.

Integro-diferencijalna jednačina (8) za struju duž antene numerički se rešava simultanim korišćenjem metode za rešavanje diferencijalnih jednačina i za numeričku integraciju. Slaba strana takvog pristupa je što su integro-diferencijalne jednačine, po pravilu, nestabilne i veoma osetljive na greške pri aproksimaciji i numeričkim postupcima.

Znatno češće se koriste integro-diferencijalne jednačine za struju antene Pocklingtonovog ili Hallenovog tipa. Statistički gledano, Hallenova jednačina se češće koristi. Pocklingtonova jednačina se koristi za opšte slučajeve proizvoljnih žičanih struktura. Pobudno polje predstavlja slobodni član u integralnoj jednačini, što je pogodno za analizu. Uticaj raspodeljenih opterećenja se lako uzima u

* U literaturi se sreće i kao generator delta-funkcije ili δ -generator. obzir, dok koncentrisana opterećenja i delta-generatori moraju biti specijalno modelovani.

Hallenova integralna jednačina nije naročito pogodna za primenu u opštim slučajevima, ali za tanke pravolinijske cilindrične antene ona ima izvesne prednosti. Raspodeljena i koncentrisana opterećenja uvode se u jednačinu podjednako uspešno, a nema ni problema pri analizi delta-generatora. U Hallenovoj jednačini uticaj impedansi i stranog polja javlja se pod znakom integrala, što je numerički stabilno rešenje.

Aproksimacija zone napajanja

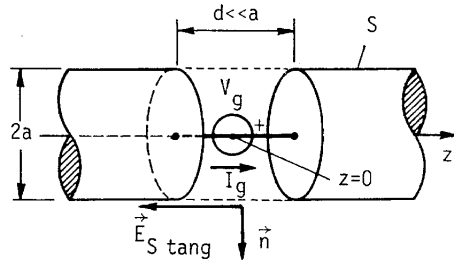
Aproksimativne integralne i integro-diferencijalne jednačine za struju duž cilindričnog provodnika važe za svako pobudno (strano) električno polje u kome može da se nađe antena. Strano polje je često skoncentrisano u relativno maloj zoni antenske strukture (nazvanoj zona pobude). Ovde ćemo izložiti dva modela koja se najčešće koriste za pobudu predajnih antena (žičanih u širem smislu) i za vezu prijemnih antena sa prijemnikom.

Iako se pretpostavlja da eksitaciona zona zauzima električki malu zapreminu, njena geometrija značajno utiče na impedansu ili admitansu antene, mada praktično ne utiče na dijagram zračenja antene. Precizno modelovanje zone pobude antene je potrebno da bi se dobile tačne teorijske vrednosti impedanse ili admitanse antene.

Delta-generator*

Delta-generator je najprostiji model realne pobudne zone žičanih odnosno cilindričnih antena, ali je i najmanje tačan. Često se koristi u analizi žičanih antena, jer se u njima može aproksimirati do izvesnog stepena bilo koji tip pobude.

Na sl.2 prikazan je generator u obliku idealnog naponskog generatora spojenog preko procepa zanemarljive dužine duž antene. Admitansa antene je onda $Y = I_g / V_g$, gde je V_g napon generatora, a I_g struja generatora.



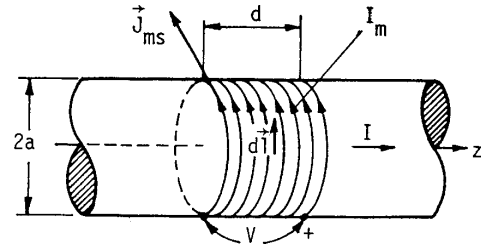
Slika 2. Aproksimacija zone pobude sa idealnim naponskim generatorom

Ako se pretpostavi da širina procepa d teži nuli, onda procep uvodi beskonačnu kapacitivnost na priključke generatora čineći susceptansu antene singularnom, što realno nije slučaj.

Da bi se prevazišla kapacitivnost procepa, koristi se druga predstava delta-generatora (sl.3) koja je proizašla iz prethodne. Sada se pretpostavlja da je polje u procepu nula, dok je u spoljnoj oblasti, van površine S , nepromenjeno. Primenom opšte teoreme ekvivalencije, to je moguće. \vec{E}_s i \vec{H}_s su totalna polja na S zbog svih izvora. Izvori unutar S mogu biti zamenjeni sa ekvivalentnim električnim i magnetskim strujama na S :

$$\mathbf{J}_s = \mathbf{n} \times \mathbf{H}_s, \quad \mathbf{J}_{ms} = -\mathbf{n} \times \mathbf{E}_s \quad (14)$$

\mathbf{n} - spoljašnji jedinični vektor normale na S .



Slika 3. Aproksimacija zone pobude sa magnetskim prstenom struje

Sa ovim ekvivalentnim izvorima, totalno polje unutar S je nula. Magnetske površinske struje na S (sl.2) postoje samo na šrafiranoj površini (sl.3) jer je antena savršeno provodna. Admitansa antene je u ovom slučaju definisana kao $Y = I/V$, gde je I električna struja antene na površini antene u $z=0$. Ova struja nije jednaka I_g , te i admitanse definisane na sl.2 i sl.3 nisu iste.

Ako se u modelu sa sl.3 pusti da d teži nuli, površinski sloj magnetskih struja prelazi u tanki magnetski prsten struje sa površinskom strujom $J_{ms}(z) = V\delta(z)$ i totalna struja prstena postaje $I_m = V$. Kao posledica, javlja se slaba singularna kapacitivnost sa obe strane prstena, što opet rezultuje u beskonačnu susceptansu antene.

U ovom modelu, magnetski prsten struje je izvor stranog električnog polja \mathbf{E}_i , koje je:

$$\mathbf{E}_i = \frac{1}{\epsilon} \text{rot} \mathbf{A}_e, \quad \mathbf{A}_e = \epsilon \int_S \mathbf{J}_{ms} g(r) dS \quad (15)$$

gde je \mathbf{A}_e - električni vektor potencijal.

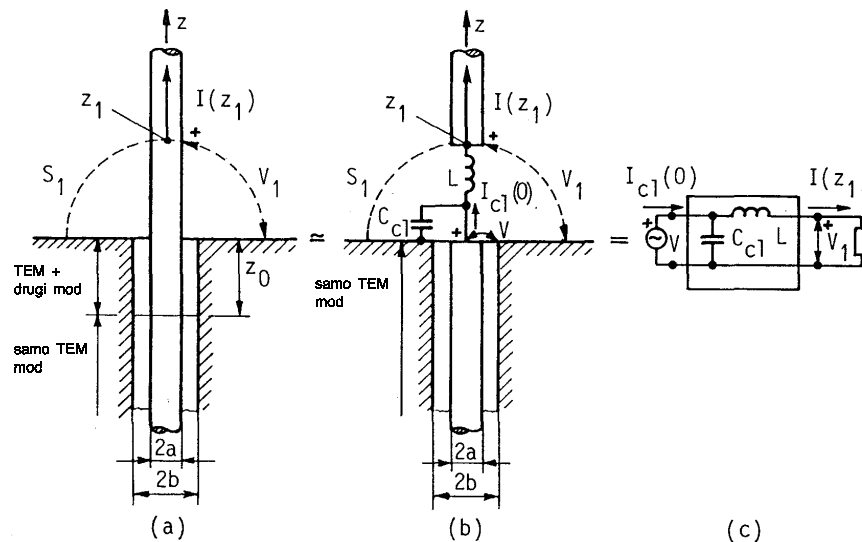
Kada d teži nuli, strano polje duž z -ose (ose antene) je:

$$E_{iz} = \frac{Va^2}{2} \frac{1+jkr}{r^3} e^{-jkr}, \quad r = \sqrt{z^2 + a^2} \quad (16)$$

Vidi se da strano polje brzo opada sa z (sa $1/r^3$ u bliskoj zoni) i da je praktično ograničeno na oblast dužine nekoliko radijusa antene. U toj oblasti je $kr \ll 1$, pošto je radijus antene mnogo manji od talasne dužine i otuda je strano

napajanje asimetričnih antena, kao što su monopol antene [7]. Pobuda antene sa koaksijalnom linijom može se na pogodan način aproksimirati tako da se poluprostor iznad provodne površine tretira nezavisno od koaksijalne linije, a da se primenom teorije likova problem svede na simetrični dipol napajan ekvivalentnim generatorom.

Najčešće korišćene aproksimacije pobude sa



Slika 4. Pobudna zona monopola napajanog koaksijalnom linijom

a) stvarna situacija; b) aproksimacija stvarne situacije; c) reprezentacija teorijom kola

polje duž z -ose u zoni pobude vrlo blizu V . Tako se $E_{iz}(z)$ može aproksimirati sa Diracovom delta-funkcijom, tj. može se staviti $E_{iz}(z) \cong V\delta(z)$.

Model generatora prikazan na sl.3 uvodi slab singularitet kapacitivnosti. U numeričkoj analizi taj singularitet ne može se primeniti pri niskom stepenu aproksimacije struje, ali se, ipak, takav jednostavan model može koristiti.

Uprkos konceptualnim teškoćama, delta-generator je ipak dobra aproksimacija zone pobude, jer daje dovoljnu tačnost u analizi cilindričnih antena. Delta-generator se prevashodno koristi sa Hallenovom integralnom jednačinom, jer se lako uvrštava na desnu stranu jednačine, bez posebnih mera opreznosti.

Aproksimacija pobude koaksijalnom linijom - trakasti generator

Žičane antene najčešće se napajaju koaksijalnim vodom. Kako je on asimetrična struktura, najviše se koristi za

koaksijalnom linijom su aproksimacije TEM magnetskim prstenom struje i aproksimacija trakastim generatorom. Šire će biti obrazložena druga aproksimacija.

Trakasti generator je modifikacija modela generatora sa sl.4 izuzev što d ne teži nuli kao kod aproksimacije delta-generatorom, već je d konačno. Potrebno je odrediti dužinu pobudne zone i raspodelu pobudnog polja duž nje, tako da trakasti generator aproksimira što je moguće bolje stvarnu pobudu antene.

Usled ivičnog polja, TEM talas egzistira samo do nekog rastojanja z_0 ($z_0 < 0$). Između te tačke i kraja linije talas može biti predstavljen sumom TEM talasa i drugih modova talasa (sl.4a). Da bi se izbegla analiza elektromagnetskog polja u tom domenu, aproksimira se domen antene ispod $z=z_1$ i koaksijalne linije iznad $z=z_0$ prostom mrežom (sl.4b). Na sl.4c prikazan je model na bazi teorije kola. Ako se monopol antena napaja hipotetičnim trakastim generatorom (sl.5a) dobija se, sledeći gornje razmatranje, aproksimacija sa sl.5b i njena reprezentacija sa sl.5c.

Ako se uzme da strano polje na površini antene u pobudnoj zoni ima formu:

$$E_{iz} = \begin{cases} \frac{V}{\alpha a} (1 + \cos \frac{\pi z}{\alpha a}) & |z| \leq \alpha a \\ 0 & |z| > \alpha a \end{cases} \quad (17)$$

gde je V napon na otvorenom kraju koaksijalne linije, koeficijent α , koji određuje dužinu αa trakastog generatora na monopol anteni, se dobija iz proste aproksimativne jednačine:

$$\alpha = 2.18 \left(\frac{b}{a} - 1 \right) \quad (18)$$

Na ovaj način se određuje trakasti generator koji je aproksimativno ekvivalentan pobudi koaksijalnom linijom.

Kada se koriste jednačine vektor-potencijala, Pocklingtonova jednačina i Schelkunoffova jednačina, $E_{iz}(z)$ se koristi kako stoji u jednačini (17). Hallenova jednačina za simetričnu dipol antenu sa $z_1 = -h$ i $z_2 = h$ uzima oblik:

$$\int_{-h}^h I(z') g(r) dz' + C_1 \cos kz = \frac{kV}{j\omega\mu} C_g(z) \quad (19)$$

gde je:

$$C_g(z) = \begin{cases} \frac{2}{K} \left[P^2 - 1 - \cos \frac{\pi z}{\alpha a} - (P^2 - 2) \cos kz \right] & 0 \leq z \leq \alpha a \\ \frac{2}{K} \left[P^2 \cos k(z - \alpha a) - (P^2 - 2) \cos kz \right] & z > \alpha a \end{cases}$$

$$K = k\alpha a (P^2 - 1) \quad P = \frac{\pi}{k\alpha a} \quad (20)$$

Za praktičnu primenu je od važnosti da se zna koja je od ovih aproksimacija zone pobude najpogodnija za datu situaciju.

Ako je potrebno da se odredi samo dijagram zračenja neke žičane strukture, onda je dovoljno upotrebiti delta-generator. Aproksimacija sa delta-generatorom daje dovoljno tačne rezultate za admitansu antene, ali pokazuje povećanje susceptanse sa povećanjem stepena polinomijalne aproksimacije struje. Najlakše se uvrštava u Hallenovu integralnu jednačinu.

Za tačno određivanje admitanse žičanih antenskih struktura napajanih koaksijalnom linijom koristi se TEM magnetski prsten struje ili trakasti generator. Ove dve aproksimacije su istog nivoa kompleksnosti i daju praktično iste rezultate.

Metode numeričkog određivanja raspodele struje na anteni

Ovde će biti reči o osnovnim matematičkim tehnikama za reduciranje funkcionalnih jednačina na matricne jednačine. Jedinствен принцип za takve tehnike je nađen u METODI MOMENATA [8]. Generalni pristup problemima zračenja je, u suštini, redukcija odgovarajuće integralne jednačine na sistem algebarskih jednačina sa N nepoznatih, gde su "N nepoznatih" koeficijenti u nekoj odgovarajućoj ekspanziji struje [8].

Metoda momenata

Ako se posmatra metalno telo sa gustinom struje J na njemu, totalno tangencijalno električno polje na njegovoj površini biće nula:

$$\mathbf{E}^s_{\text{tang}} + \mathbf{E}^i_{\text{tang}} = 0 \quad (21)$$

$\mathbf{E}^s_{\text{tang}}$ - električno polje rasejavanja, izračeno zbog gustine struje J
 $\mathbf{E}^i_{\text{tang}}$ - incidentno električno polje zbog izvora lociranog na ili van tela.

U daljem tekstu će se izostaviti indeks tang jer se podrazumeva da se koriste granični uslovi za tangencijalno električno polje.

Tako jednačina (21) ima oblik:

$$-\mathbf{E}^s = \mathbf{E}^i \quad (22)$$

Definišimo operator u obliku:

$$L_{op}(\mathbf{J}) = -(\mathbf{E}^s) \quad (23)$$

odnosno

$$L_{op}(\mathbf{J}) = (\mathbf{E}^i)$$

gde su:

L_{op} - operator koji se definiše za problem od interesa,
 \mathbf{E}^i - poznata pobudna funkcija ili izvor,
 \mathbf{J} - nepoznata funkcija odziva koja treba da se odredi.

U problemima koje razmatramo, L_{op} je integralni operator koji se primenjuje na J i uzima se da za dati izvor egzistira jedno i samo jedno J . L^{-1}_{op} postoji kao:

$$\mathbf{J} = L^{-1}_{op}(\mathbf{E}^i) \quad (25)$$

Da bi se odredio domen i opseg operatora, neophodno je definisati unutrašnji proizvod $\langle \mathbf{J}, \mathbf{E} \rangle$ koji je skalarna veličina dobijena integracijom $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ po površini koja se razmatra. Ovaj unutrašnji proizvod je nazvan reakcija. Reakcija kao moment ili energija, može se fizički

posmatrati.

Postupak za dobijanje rešenja iz ove jednačine može se podeliti u 4 koraka:

1. Nepoznatu varijablu razviti u seriju bazisnih funkcija, J_n , gde je J u domenu L_{op} ,
2. Odrediti pogodan unutrašnji proizvod i definisati skup težinskih funkcija,
3. Uzeti unutrašnje proizvode i od njih formirati matricnu jednačinu,
4. Rešiti matricnu jednačinu po nepoznatoj varijabli.

Kada je jedna nepoznata određena, npr. struja, onda se lako izračunavaju veličine kao što su dijagram zračenja i admitansa antene.

Galerkinova metoda

Razmotriće se prvi korak, tj. razvije se odzivna funkcija J u jednačini (24) u red bazisnih funkcija $J_1, J_2, J_3 \dots$ na površini S :

$$J = \sum I_n J_n \quad (26)$$

gde su koeficijenti I_n , u principu, kompleksni i njih treba odrediti. Kada su oni određeni, dobija se amplituda i faza struje na radiatoru. Zamenom (26) u (24) dobija se:

$$L_{op}(\sum I_n J_n) = (E^i) \quad (27)$$

odnosno, koristeći linearnost L_{op} :

$$\sum_n I_n L_{op}(J_n) = (E^i) \quad (28)$$

Drugi korak u rešavanju je definisanje skupa težinskih funkcija:

$$\sum_n I_n \langle W_m, L_{op} J_n \rangle = \langle W_m, E^i \rangle \quad (29)$$

Ako se želi da je $W_m = J_m$, onda se formulacija problema naziva Galerkinov metod. Jednačina (29) tada postaje:

$$\sum_n I_n \langle J_m, L_{op} J_n \rangle = \langle J_m, E^i \rangle \quad (30)$$

Treći korak je izračunavanje različitih unutrašnjih proizvoda datih u jednačini (30) i formiranje matricne jednačine:

$$\begin{bmatrix} \langle J_1, L_{op} J_1 \rangle & \langle J_2, L_{op} J_2 \rangle & \dots \\ \langle J_2, L_{op} J_1 \rangle & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle J_1, E^i \rangle \\ \langle J_2, E^i \rangle \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (31)$$

ili konciznije napisano:

$$[Z](I) = (V) \quad (32)$$

gde elemenat $[Z]$ može biti uzet kao generalizovana impedansa, (I) kao generalizovana struja, a (V) kao generalizovani napon.

"Point-matching" metoda

U Galerkinovoj metodi tražilo se da se izračunaju elementi generalizovane impedanse:

$$Z_{mn} = \langle J_m, L_{op}(J_n) \rangle \quad (33)$$

gde je L_{op} integralni operator, koji usložnjava proračun Z_{mn} . Ove teškoće se minimiziraju ako se kao težinske funkcije koriste Diracove delta-funkcije, te je:

$$\begin{bmatrix} \langle \delta(S-S_1), L_{op}(J_1) \rangle & \langle \delta(S-S_1), L_{op}(J_2) \rangle & \dots \\ \langle \delta(S-S_2), L_{op}(J_1) \rangle & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle \delta(S-S_1), E^i \rangle \\ \langle \delta(S-S_2), E^i \rangle \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (34)$$

gde je S rastojanje od neke referentne tačke a S_m je rastojanje do tačke gde su primenjeni granični uslovi. E^i_1 označava da je podešavanje učinjeno u tački 1, E^i_2 u tački 2 itd.

Upotreba Diracove delta-funkcije koristi se u fizičkim problemima, tako što se primenjuje na diskretne tačke na površini S , pre nego na kontinualnu površinu. Zato je u upotrebu ušao pojam "point-matching".

Praksa je pokazala da, ako se izabere dovoljan broj tačaka u kojima se podešavaju granični uslovi, onda se može dobiti tačno rešenje. No, tačnost rešenja ne zavisi samo od broja tačaka, već i od njihove lokacije. Upotreba podjednako udaljenih tačaka obično daje dobre rezultate. Ovo je posebno izraženo u proračunu dijagrama zračenja gde je tačka posmatranja daleko od radiatora. Izračunavanje veličina u bliskom polju kao što je impedansa je veoma osetljivo na broj i lokaciju tačaka podešavanja. Ova metoda je relativno prosta, ali je dovoljno tačna za mnoge primene.

Tipovi aproksimacije raspodele struje

Jedna od osnovnih odluka u numeričkom rešavanju problema zračenja je izbor osnovnih (bazisnih) funkcija J_n . U teoriji ima mnogo skupova osnovnih funkcija, dok ih u praksi ima malo pogodnih za dati problem. Neke funkcije daju bržu konvergenciju nego druge, što znači kraći rad računara.

U principu, osnovne funkcije mogu se podeliti u dve klase: osnovne funkcije definisane i nenulte na celom domenu L_{op} (bazisi potpunog domena - entire-domain bases) i osnovne funkcije definisane u domenu L_{op} , ali koje su nulte na delu domena (subdomenski bazisi - sub-domain bases).

Izbor osnovnih funkcija je određen mnogim faktorima koje diktira problem koji razmatramo.

Generalno, metoda momenata je unificirajući koncept u numeričkom rešavanju određenih problema elektromagnetskog polja. Metoda momenata daje mogućnost da se tačno aproksimiraju integralne jednačine

sa sistemom simultanih linearnih algebarskih jednačina. Razmatrana su dva specijalna slučaja ove metode, koji su rezultat posebnog izbora težinskih funkcija. Pri formulisanju problema, važnu ulogu igra izbor osnovnih funkcija pri čemu su razvijene dve osnovne filozofije kako da se one izaberu.

Cilindrične opterećene antene

Električne osobine antene načinjene od perfektno provodnog materijala su, na datoj frekvenciji, zavisne od oblika i veličine antene. Ponekad je pogodno, ili potrebno, da se raspodela struje antene modifikuje za date dimenzije antene. To može biti učinjeno opterećivanjem antene pogodnim tipom opterećenja. Tako se mogu poboljšati neke karakteristike antena, kao što su: admitansa, dijagram zračenja, dobitak i sl.

Ovde će biti izloženi neki aspekti dve vrste ovakvih antena: cilindričnih antena sa raspodeljenim opterećenjima i cilindričnih antena sa koncentrisanim opterećenjima [9-16].

Cilindrične antene sa raspodeljenim opterećenjima

Za cilindričnu antenu sa linearno raspodeljenim opterećenjem duž nje, uzima se da je opterećenje ravna i sporo promenljiva funkcija z -koordinate.

U praksi, kontinualno serijsko opterećenje duž žičane antene u najopštijem slučaju može biti rezistivno, induktivno ili kapacitivno. Rezistivno opterećenje se obično pravi u obliku tankog rezistivnog sloja na dielektričnom štupu. Promenljivo induktivno raspodeljeno opterećenje se dobija ako se antena napravi u obliku žičane spirale sa sporo promenljivim razmakom navoja. Najteže je realizovati kontinualno kapacitivno opterećenje. Kvazi raspodeljeno opterećenje se može dobiti ako antenu pravimo u obliku niza od više metalnih segmenata sa dielektričnim diskovima između njih (antena sa raspodeljenim rezistivnim i kvazi-raspodeljenim kapacitivnim opterećenjem). Rezistivne antene su vrlo interesantne strukture, ali one imaju manu, a to je niska efikasnost (reda 50%). Ova manu nemaju antene sa reaktivnim opterećenjem.

U ovu grupu spadaju i antene obložene dielektričnim ili feritnim slojem. Antene obložene dielektrikom se koriste tamo gde treba da se izbegne direktan kontakt metalne antene sa okolnom sredinom koja može biti korozivna i/ili provodna. Dielektrična obloga može biti zaštita i/ili poboljšanje zračećih osobina antene. Uticaj obloge je izraženiji kada je ona sačinjena od feritnog materijala. Dielektrična obloga ($\epsilon_r \neq 1, \mu = 1$) može se uzeti kao poprečno kapacitivno opterećenje, a feritna obloga ($\epsilon_r = 1, \mu \neq 1$) kao serijsko induktivno opterećenje. Oba opterećenja, u osnovi, imaju isti efekat i povećavaju električnu dužinu antene, pomerajući njene rezonanse prema nižim frekvencijama. Međutim, promene admitanse antene su izraženije u odnosu na iste antene bez obloge.

Cilindrične antene sa koncentrisanim opterećenjima

Koncentrisana opterećenja duž antene se mogu posmatrati kao granični slučaj raspodeljenih opterećenja, kada dužina opterećenog dela nekog segmenta postaje veoma mala u odnosu na dužinu segmenta i talasnu dužinu, a impedansa ostaje konačna.

Po strukturi, koncentrisana opterećenja mogu biti: rezistivna, induktivna, kapacitivna i kombinovana. Realizacija ovih opterećenja je složena, posebno za visoke

frekvencije. Na sreću, tačno modelovanje koncentrisanog impedansnog opterećenja obično nije potrebno. Ako je opterećenje korektno uključeno u integralnu jednačinu, greška u raspodeli struje je praktično lokalizovana u neposrednoj okolini opterećenja. Zbog toga, ovaj efekat nema značajnog uticaja na karakteristike zračenja antene ili njenu admitansu. Mada opterećenja mogu biti predstavljena na razne načine, najprostija aproksimacija opterećenja sa delta funkcijom daje zadovoljavajuću tačnost.

Kratko ćemo izložiti neke tipove cilindričnih antena sa koncentrisanim opterećenjima.

Cilindrične antene sa koncentrisanim rezistivnim opterećenjima

Antene sa rezistivnim opterećenjima pokazuju dobre karakteristike širokopojasnosti u admitansi, ali su rezistivna opterećenja nepogodna zbog gubitaka koje uvode. Za razliku od rezistivnih, kapacitivna opterećenja ne uvode gubitke, ali su frekvencijski zavisna. Zbog toga se oba tipa opterećenja koriste zavisno od situacije.

Kao primer rezistivnih opterećenja, često se navodi Altshulerova antena. Polazeći od teorije transmisionne linije, Altshuler je pretpostavio da duž jednog dela antene možemo imati progresivni talas struje, ako na rastojanju $\lambda/4$ od kraja monopola umetnemo rezistivno opterećenje određene veličine. To je verifikovano na monopolu radijusa $a=0,3175$ cm, na frekvenciji $f=600$ MHz [2]. Spoljašnji radijus koaksijalne linije za napajanje je 8a. Altshuler je našao da je 240Ω , na rastojanju $\lambda/4$ od kraja monopola, optimalno opterećenje. To daje, na delu od tačke pobude do opterećenja, progresivni talas struje i stojeći talas struje od opterećenja do kraja monopola. Monopol pokazuje konstantnu admitansu za praktično bilo koju dužinu sekcije od provodne ravni do opterećenja.

U ovom domenu je interesantna analiza mogućnosti aproksimacije kontinualnih rezistivnih opterećenja sa sekvencama koncentrisanih opterećenja. U referenci [2] dato je poređenje admitansi rezistivnih dipola sa kontinualnim i ek-vidistantnim koncentrisanim opterećenjima ($h=0,226$ m, $a=0,3175$ cm, $f=663$ MHz, totalno opterećenje duž jedne grane dipola je 317Ω ($1400 \Omega/m$). Pokazano je da su dovoljna samo 4 koncentrisana opterećenja pa da se dobiju zadovoljavajući rezultati.

Cilindrične antene sa koncentrisanim kapacitivnim opterećenjem

Da bi se teorija uspešno primenila na antene sa kapacitivnim opterećenjima, potrebno je da se u analizu uvede dobra aproksimacija realnih opterećenja u vidu delta-funkcije. Dobra aproksimacija opterećenja sa delta-funkcijom dobija se ako opterećenje ima formu uskog procepa između dva dela antene. Takva antena može da ima formu dielektričnog štapa na koji su montirani metalni cilindri željene dužine. Ove antene se izvode u više varijanti: sa istim i različitim opterećenjima, sa ekvidistantnim rastojanjem opterećenja i sa rastojanjem koje se smanjuje ka kraju monopola. Za konstrukcije sa istim opterećenjima i sa rastojanjima koja se smanjuju ka kraju antene, očekuju se bolje karakteristike širokopojasnosti nego za ekvidistantna opterećenja.

Cilindrične antene sa kombinovanim opterećenjima

Dok na jednoj strani rezistivne antene sa raspodeljenim opterećenjima imaju dobre širokopojasne karakteristike i pokazuju gubitke, na drugoj strani antene sa kapacitivnim

opterećenjima pokazuju širokopojasne karakteristike užeg stepena u odnosu na rezistivne antene, ali nemaju gubitke. Ovo ukazuje na to, da se od antena sa kombinovanim raspodeljenim i koncentrisanim opterećenjima očekuju karakteristike bolje od antena sa samo jednim tipom opterećenja. U literaturi je obrađivana antena sa raspodeljenim rezistivnim i koncentrisanim kapacitivnim opterećenjima.

Tanke cilindrične antene sa opterećenjima mogu imati karakteristike veoma interesantne za praktičnu primenu. Podesnim izborom opterećenja i njihovog položaja duž antene može se dobiti antena koja ima širokopojasne osobine u pogledu ulazne impedanse, dijagrama zračenja ili neke druge karakteristike.

Sinteza cilindričnih opterećenih antena

Postupak sinteze se u praksi svodi na proces optimizacije u kome se analiza antene mora ponavljati mnogo puta. Zato je poželjno da analiza bude što jednostavnija i da zahteva izračunavanje što manjeg broja nepoznatih parametara, kako bi potrebno računarsko vreme bilo što kraće. Takođe, tačnost primenjene metode treba da bude dovoljno velika da bi optimizacija imala smisla. Zavisno od tačnosti metode usvojene za analizu, teorijski dobijene vrednosti parametara antene mogu da imaju sistematske i slučajne greške. Veće sistematske greške mogu izazvati odstupanje u položaju optimuma, tj. on se može dobiti pri nekim vrednostima parametara antene koji odstupaju od eksperimentalnih optimalnih vrednosti.

Opšti princip sinteze

Sinteza antene je, u principu, svaki proces koji stalno poboljšava karakteristike antena u odnosu na željene, mada se može desiti da dostignuti finalni rezultat bude daleko od željenog. Problem sinteze je problem nelinearne optimizacije. Formira se pogodna realna (obično pozitivno definisana ili poludefinisana) funkcija koja ima minimum kada su dostignute željene karakteristike antene (ili kada su karakteristike antene bolje od željenih). Ovakva funkcija naziva se optimizaciona funkcija.

Optimizaciona funkcija može biti formirana na više načina, na primer, da:

- admitansa antene bude što je moguće bliža željenoj admitansi, na jednoj frekvenciji ili na nekom broju frekvencija;
- dijagram zračenja antene ili antenskog sistema bude što je moguće bliži željenom dijagramu, na jednoj frekvenciji ili na nekom broju frekvencija;
- istovremeno admitansa antene i dijagram zračenja budu što je moguće bliži željenim vrednostima, odnosno oblicima;
- antena bude širokopojasna po admitansi i/ili dijagramu zračenja;
- sprega antene bude minimalna.

Ovde je bitno da se shvati da je opseg karakteristika antena datih dimenzija bitno ograničen kao i da, ako se želi da simultano optimiziramo dve ili više karakteristika antene, su one onda manje ili više kontradiktorne.

Bilo koji parametar antene može se menjati u optimizacionom postupku da bi se dostigla željena karakteristika antene. Obično se razmatraju samo oni parametri antene koji karakterišu njene dimenzije i električne karakteristike. U principu, nema ograničenja

broja optimizacionih parametara. Međutim, to nije praksa iz više razloga: promena nekih parametara više utiče na optimizacionu funkciju nego promena drugih; neki optimizacioni parametri produžavaju vreme optimiziranja; iz praktičnih razloga menjaju se samo oni parametri koji se u praksi mogu lako podesiti na vrednost koja može biti rezultat optimizacionog postupka.

Optimizacione funkcije

Kako ne postoji najbolji optimizacioni metod koji rešava sve probleme optimizacije, potrebno je za sintezu antena naći metod koji je pogodniji od drugih. Optimizacioni metod može se definisati kao specifičan postupak za određivanje sukcesivnih tačaka u parametarskom prostoru u kome treba izračunavati optimizacionu funkciju da bi se dostigao minimum (obično lokalni) [17].

Vrlo retko je broj mogućih tačaka u parametarskom prostoru konačan, da bi se moglo učiniti kompletno pretraživanje i naći globalni minimum. Češće je pretraživanje nekompletno, te nema garancije da je globalni minimum dostignut. Pre je moguće približiti se lokalnom minimumu, sa nekom određenom tačnošću.

Sve optimizacione metode mogu se grubo podeliti u dve grupe:

- a) one koje koriste samo vrednosti same optimizacione funkcije za određivanje sledeće tačke u procesu (direktna metode) i
- b) one koje koriste gradijent optimizacione funkcije za istu svrhu (gradijentne metode).

U bilo kom optimizacionom postupku postoje još dva problema: izbor početne tačke procesa i odluka o kraju procesa. Da bi se otpočelo i obezbedila konvergencija optimizacionog postupka, početna tačka bi trebalo da bude što bliža lokalnom minimumu optimizacione funkcije. Odluka o prekidu optimizacionog postupka zavisi od primenjene metode optimizacije i od cilja sinteze antene.

Metoda kompletnog pretraživanja je konceptualno najprostija metoda. Sastoji se u određivanju optimizacione funkcije u čvorovima višedimenzionalne mreže u prostoru optimizacionih parametara i pretraživanja da bi se među njima našlo optimalno rešenje. Mana ove metode u slučaju velikog broja parametara, je izračunavanje velikog broja vrednosti optimizacione funkcije.

Gradijentna metoda je poznata kao metoda najstrmijeg pada. Najosnovniji oblik metode zasniva se na usvajanju početne tačke, određujući smer u višedimenzionalnom parametarskom prostoru u toj tački u kojoj optimizaciona funkcija opada veoma brzo, usvajajući novu početnu tačku u tom smeru na željenom rastojanju od stare početne tačke i ponavljanju procesa sve dok se ne nađe minimum optimizacione funkcije. Kao i većina optimizacionih metoda, gradijentne metode mogu završiti u lokalnom optimumu, pre nego u željenom globalnom optimumu u domenu razmatranih optimizacionih parametara.

Simpleks metoda (pojam "simplex" koristi se za telo u multidimenzionalnom prostoru koje je generalizacija tetraedra u tri dimenzije) proračunava vrednosti optimizacione funkcije na vrhovima tetraedra u parametarskom prostoru i na osnovu tih vrednosti bira novi, verovatno manji tetraedar, unutar koga bi trebalo da bude smešten optimum. Proces se ponavlja sve dok se ne dobije tetraedar dovoljno male veličine, koji locira optimum sa željenom tačnošću. U ovu grupu metoda spada i simpleks metoda koju su predložili Nelder i Mead i koja je korišćena u sintezi antena.

U sintezi antena moguće je formirati optimizacione funkcije, tako da se mnogi parametri antene mogu koristiti kao optimizacioni parametri. Međutim, treba menjati samo one parametre koji se mogu lako realizovati u praksi. U protivnom, sinteza može ostati samo na teoriji.

Izuzetno metode kompletnog pretraživanja, sve druge ne mogu garantovati da će naći globalni optimum optimizacione funkcije u domenu razmatranih optimizacionih parametara. Ukoliko tako dobijeno rešenje zadovoljava, sa inženjerskog aspekta, obično nas ne interesuje da li egzistira i bolje rešenje.

Širokopolasne cilindrične antene u VVF opsegu

VVF širokopolasne cilindrične antene

Širokopolasna cilindrična (štap) antena je osnovni tip antene kod većine radio-uređaja u VVF opsegu. Ovaj tip antene je, isto tako, nezamenljiv kod većine ručnih, prenosnih i prevoznih radio-uređaja kada je potrebno obezbediti radio-vezu u pokretu.

Dobre osobine štap antene su jednostavnost konstrukcije, a time i primena, uz malu masu, što je veoma bitno kada su u pitanju ručni i prenosni radio-uređaji. Štap antena se sastoji od nekoliko članaka (štapova) relativno male dužine koji se nastavljaju jedan na drugi. Članci su se ranije izrađivali od metala, ali već duže vremena su u upotrebi žice utopljene u plastične materijale armirane staklenim vlaknima koji joj daju potrebnu čvrstoću. Njihovom primenom dobija se znatno u elastičnosti uz zadržavanje električnih karakteristika kao kod metalnih antena.

U kompletima vojnih radio-uređaja primenjuju se štap antene različitih geometrijskih dužina zavisno od frekvencijskog opsega, mobilnosti i snage zračenja radio-uređaja koji ih napaja [18]. Za VVF opseg, prema mobilnosti, može se napraviti sledeća podela upotrebljenih dužina štap antena:

- za ručne i prenosne radio-uređaje: 0,3 - 3 m
- za prevozne radio-uređaje: 1 - 4 m

Široke granice u dužini upotrebljenih antena uzrokovane su različitim eksploatacionim zahtevima koje vojni radio-uređaji moraju da zadovolje. Često se dužina antene podređuje malim dimenzijama uređaja i zahtevima za njegovu laku i brzu upotrebu.

Teorijski dijagram zračenja štap antene nad idealno provodnom površinom u horizontalnoj ravni je kružni, odnosno neusmeren i nezavisan od dužine antene. Međutim, stvarni dijagram zračenja u horizontalnoj ravni može biti znatno deformisan, zavisno od uslova i načina primene štap antene. Najčešće do deformacije dijagrama zračenja u horizontalnoj ravni dolazi pri ugradnji štap antene na kabinu borbenih vozila. U tom slučaju do deformacije dijagrama zračenja dolazi zbog nesimetričnog položaja antene na kabini, uticaja kupole i oruđa ili drugih antena koje su ugrađene na istoj kabini.

Dijagram zračenja u vertikalnoj ravni je funkcija odnosa dužine antene i talasne dužine (radne frekvencije), odnosno raspodele struje duž nje, visine antene u odnosu na zemlju i električnih parametara zemlje.

Efikasnost štap antene ugrađene na vozilo zavisi od više činilaca, među kojima su: tip vozila, mesto postavljanja antene i dr. Neka istraživanja [19] su došla do zaključka da prisustvo karoserije menja oblik dijagrama zračenja, i to izrazitije u slučaju kamiona nego tenka. To je i razumljivo, jer je kod kamiona ukupna električna dužina žičanog provodnika i antene duža nego kod tenka. Grubo govoreći,

prisustvo karoserije kao da povećava električnu visinu antenskog sistema u celini, što se manifestuje u pojavi minimuma i sekundarnog lista u dijagramu zračenja, i to utoliko više ukoliko je frekvencija viša. Ako se, međutim, ograničimo na posmatranje jačine električnog polja u horizontalnoj ravni, može se zaključiti da su relativne promene jačine električnog polja (pri istoj snazi i frekvenciji) u odnosu na antenu bez karoserije manje od ~ 5% kod tenka, a manje od ~ 20% kod kamiona.

Prikaz širokopolasnih cilindričnih antena za prenosne i prevozne RU iz NVO VJ

Ovde će biti izložene osnovne karakteristike širokopolasnih štap antena čija su tehnička rešenja istražena u VTI VJ i čiji razvoj je završen, a to su:

- ŠIROKOPOJASNA ŠTAP ANTENA (kratka antena) A1
 - ŠIROKOPOJASNA ŠTAP ANTENA (duga antena) A2
- koje su namenjene za prenosni VVF radio-uređaj sa frekvencijskim skakanjem, odnosno za prenosne VVF radio-uređaje, kako za prenos u proširenom spektru, tako i za uskopojasni prenos;
- ŠIROKOPOJASNA ŠTAP ANTENA (mobilna, kratka antena) A3
 - ŠIROKOPOJASNA ŠTAP ANTENA (mobilna, duga antena) A4

koje su namenjene za prevozni VVF radio-uređaj sa frekvencijskim skakanjem, odnosno za prevozne VVF radio-uređaje, kako za prenos u proširenom spektru, tako i za uskopojasni prenos [20,21].

Antene A1 i A2 su primopredajne antene: antena A1 se koristi za rad u pokretu i zastanku sa radio-uređajem na leđima poslužioca, a antena A2 se koristi za rad u mestu i zastanku sa radio-uređajem na zemlji. One su antene sa koncentrisanim opterećenjima rezistivno-induktivnog tipa. U podnožju antena se vrši induktivna kompenzacija i širokopolasna transformacija impedanse.

Antene A3 i A4 su primopredajne antene različite dužine i snage, što uslovljava njihovu primenu, prema konkretnim uslovima i potrebama održavanja radio-veze. Obe antene su namenjene za ugradnju na borbeno i neborbeno vozila. To su antene sa koncentrisanim reaktivnim (kapacitivnim) i raspodeljenim rezistivnim opterećenjima. U podnožju antena nalazi se kolo za prilagođenje i širokopolasni transformator impedanse dimenzionisan prema zahtevanoj RF snazi.

U tabeli 1 date su uporedne karakteristike ovih antena. Izvršena ispitivanja (sve četiri antene) intenziteta izračenog električnog polja, koeficijenta stojećeg talasa (Kst) i dužine antene su pokazala [18]:

- da veći intenzitet električnog izračenog polja imaju antene sa lošijim Kst;
- da je optimalna dužina antene sa aspekta izračenog električnog polja oko 2,5 m.

Tabela 1. Uporedne karakteristike antena

ANTENE Karakteristike	Za prenosne radio-uređaje		Za prevozne radio-uređaje	
	A1	A2	A3	A4
Frekvencijski opseg (MHz)	30 - 88		30 - 90	
Maksimalna RF snaga (W)	10		50	100
Koeficijent stojećeg talasa	≤ 2.5 u odnosu na 50 Ω		≤ 3 u odnosu na 50 Ω	
Dobitak u odnosu na λ/4	≥ -13	≥ -7,5	≥ -10	≥ -7,5

monopol (dB)				
Dužina antene (m)	1,28	2,65	1,5	2,5
Masa antene (g)	400	600	1200	1500
Izdržljivost na klimomehaničke uticaje i uticaje okoline	K - 3 SNO 5706			

Rezultati ispitivanja odnosa intenziteta izračenog električnog polja, Kst i dužine antene je u saglasnosti sa teoretskom analizom [22].

Razlog zašto antene sa lošijim Kst imaju bolji intenzitet izračenog električnog polja leži u načinu ostvarivanja zahtevanog Kst. Obično, antene sa rezistivnim opterećenjem pokazuju dobre karakteristike širokopojasnosti, tj. dobar Kst (što je važno sa aspekta radio-uređaja), ali su rezistivna opterećenja nepogodna zbog gubitaka koje uvode, što smanjuje intenzitet izračenog električnog polja.

Zaključak

Električne osobine antene napravljene od savršeno provodnog materijala, su za datu frekvenciju definisane u potpunosti njenim fizičkim karakteristikama. Poznavanje dimenzija antene omogućava, sa manje ili više napora, određivanje raspodele struje duž antene, a na osnovu koje se mogu odrediti sve ostale električne karakteristike antena: admitansa (impedansa), dijagram zračenja, dobitak, efikasnost i druge. Ponekad je pogodno ili potrebno da se raspodela struje duž antene izmeni kako bi se ostvarile željene električne karakteristike. To se omogućuje unosenjem dodatnih opterećenja u strukturu antene, koja mogu biti koncentrisana, raspodeljena ili kombinovana. Takve antene su širokopojasne cilindrične opterećene antene, čije su teorijske osnove analize i sinteze izložene u ovom radu.

Značaj korišćenja širokopojasnih antena nalazi se u osnovi pojedinih tehnika u radio-komunikacijama, kao što su radio-izviđanje i prenos u proširenom spektru. U radio-izviđanju se najčešće pretražuje širok frekvencijski opseg, što samo po sebi isključuje primenu uskopojasnih antena. U novim tehnikama prenosa u proširenom spektru (frekvencijsko skakanje, direktna sekvenca) ne koristi se konvencionalni rad na fiksnoj frekvenciji, već se frekvencija menja u užem ili širem frekvencijskom opsegu, te primena uskopojasnih antena zahteva brze i skupe antenske prilagodbe za prilagođenje impedanse uskopojasnih antena. Širokopojasne antene se mogu koristiti i za rad na fiksnoj frekvenciji. Tako postaje suvišno antensko prilagođenje u radio-uređaju, čime se smanjuju gabariti radio-uređaja, njihova kompleksnost i cena, a povećava se pouzdanost i omogućava se veća autonomnost radio-uređaja.

Literatura

- [1] ŠUNJEVARIĆ, M.M. *Radiotehnika, prvi i drugi deo*. Vojnotehnička akademija, Beograd, 2000.
- [2] POPOVIĆ, B.D., DRAGOVIĆ, M.B., ĐORĐEVIĆ, A.R. *Analysis and Synthesis of Wire Antennas*. Research Studies Press; Division of John Wiley & Sons Ltd, 1982.
- [3] POPOVIĆ, B.D. *CAD of Wire Antennas and Related Radiating Structures*. Research Studies Press; Division of John Wiley & Sons Ltd, 1991.
- [4] MALJKOVIĆ, RISTIN, ĐELOVIĆ. *Antena širokopojasna cilindrična opterećena za VVF opseg*. Elaborat o straživanju tehničkih rešenja. Vojnotehnički institut Beograd, 1985.
- [5] POPOVIĆ, B.D. *Introductory Engineering Electromagnetics*. Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1968.
- [6] POPOVIĆ, B.D. *Elektromagnetika*. Građevinska knjiga, Beograd, 1980.
- [7] POPOVIĆ, B.D. Thin monopole antenna: finite-size belt-generator representation of coaxial-line excitation. *Proc. IEE*, May 1973., vol.120, no.5, p.544-550.
- [8] HARRINGTON, R.F. *Field Computation by Moment Method*. The Macmillan Company, New York, 1968.
- [9] POPOVIĆ, B.D. Theory of imperfectly conducting thin cylindrical dipoles. *Proc. IEE*, December, 1970., vol.117, no.12, p.2205-2208.
- [10] PAUNOVIĆ, Đ.S., POPOVIĆ, B.D. Broadband RC-loaded microwave cylindrical antenna with approximately real input impedance. *The Radio and Electronic Engineer*, May 1977., vol.47, no.5, p.225-228.
- [11] POPOVIĆ, B.D. Synthesis of cylindrical antennas with continuous impedance loading. *Proc. IEE*, May 1977., vol.124, no.5, p.425-428.
- [12] POPOVIĆ, B.D. Theory of cylindrical antennas with lumped impedance loading. *The Radio and Electronic Engineering*, April 1973., vol.43, no.4, p.243-248.
- [13] POPOVIĆ, B.D., DRAGOVIĆ, M.B. Capacitively loaded thin cylindrical antenna. *Proc. IEE*, February 1974., vol.121, no.2, p.101-108.
- [14] POPOVIĆ, B.D. Polynomial approximation of current along thin symmetrical cylindrical dipoles. *Proc. IEE*, May 1970., vol.117, no.5, p.873-878.
- [15] POPOVIĆ, B.D. Theory of cylindrical antennas with arbitrary impedance loading. *Proc. IEE*, October 1971., vol.118, no.10, p.1327-1332.
- [16] DJORDJEVIĆ, A.R., POPOVIĆ, B.D., DRAGOVIĆ, M.B. *A Method for Rapid Analysis of Wire Antenna Structures*. Archiv für Elektrotechnik 61, 1979., p.17-23.
- [17] NELDER, J.A., MEAD, R. A simplex method for function minimization. *Computer J.*, 1965, vol.7, no.4, p.308-313.
- [18] FRANETA, S. *Analiza karakteristika širokopojasnih cilindričnih antena u VVF opsegu u vojnim komunikacijama*. Diplomski rad, Vojnotehnička akademija, Beograd, 1993.
- [19] SURUTKA, J.V., POPOVIĆ, B.D. *Približna analiza uticaja karoserije na impedansu i dijagram zračenja antena na vozilima*. SANU, 1988.
- [20] POPOVIĆ, B.D. i sar. *Elaborat o istraživanju tehničkih rešenja širokopojasnih cilindričnih antena od ugljeničnih vlakana i od metala*. int. dok. VTI-a 05-37-487, 1989.
- [21] MALJKOVIĆ, M.R. *Antena cilindrična širokopojasna, duga i kratka, 30-90 MHz*, Tehnički izveštaj o ispitivanju funkcionalnih modela, 1991, VTI, Beograd, sign. VTI-a 05-01-0416.
- [22] POPOVIĆ, B.D. *Reactively and Resistively Loaded Wideband Whip Antennas: Possibilities and Limitations*. Sixth International Conference on Antennas and Propagation, Conference Publications, Part 1, Antennas, 1989., p.399-402.

Rad primljen: 11.7.2001.god.

