

Čas 3: Antenski nizovi.

Električno polje antene u dalekoj zoni zračenja izraženo preko karakteristične funkcije zračenja.

Električno polje u dalekoj zoni zračenja može se predstaviti pomoću karakteristične funkcije zračenja kao:

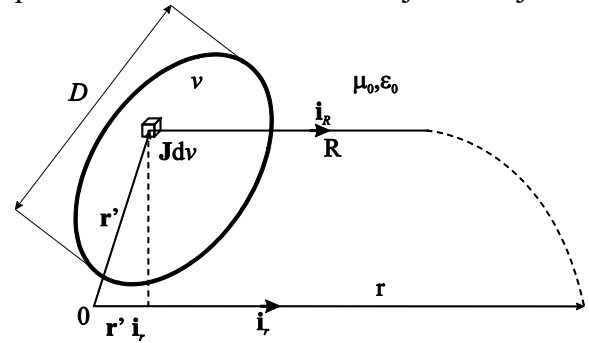
$$\mathbf{E}(r, \theta, \phi) = j \frac{Z_0}{2\pi} I_0 \frac{e^{-j\beta r}}{r} \mathbf{F}(\theta, \phi), \quad \beta r \gg 1, \quad r > 2D^2 / \lambda_0,$$

gde je D maksimalna dimenzija antene.

$$\mathbf{F}(\theta, \phi) = \frac{\beta}{2} \mathbf{i}_r \times (\mathbf{i}_r \times (\frac{1}{I_0} \int_V \mathbf{J}(\mathbf{r}') e^{j\beta \mathbf{r}' \cdot \mathbf{i}_r} dv)),$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}, \quad \beta = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0},$$

$$R = r - \mathbf{r}' \cdot \mathbf{i}_r.$$



Slika 1(t-a).

Karakteristična funkcija zračenja je bezdimenziona kompleksna vektorska funkcija pravca ($\mathbf{i}_r$) u kome se određuje polje zračenja. Ona određuje zavisnost intenziteta, faze i polarizacije električnog polja antene od pravca u dalekoj zoni zračenja. U dalekoj zoni zračenja relativna raspodela polja $\mathbf{E}$ ne zavisi od r , već samo od θ i ϕ . Intenzitet i faza električnog polja zavise od rastojanja kao u slučaju sfernog talasa za jedan posmatrani pravac.

Karakteristična funkcija zračenja može se izraziti i pomoću efektivne dužine antene ($\mathbf{l}_{\text{eff}}$). Efektivna dužina antene može se shvatiti i kao dužina ekvivalentnog Hercovog dipola koji u datom pravcu zrači na isti način kao i posmatrana antena.

$$\mathbf{F}(\theta, \phi) = \frac{\beta}{2} \mathbf{i}_r \times (\mathbf{i}_r \times \mathbf{l}_{\text{eff}}),$$

$$\mathbf{l}_{\text{eff}} = \frac{1}{I_0} \int_V \mathbf{J}(\mathbf{r}') e^{j\beta \mathbf{r}' \cdot \mathbf{i}_r} dv.$$

Teorema o translaciji karakteristične funkcije zračenja.

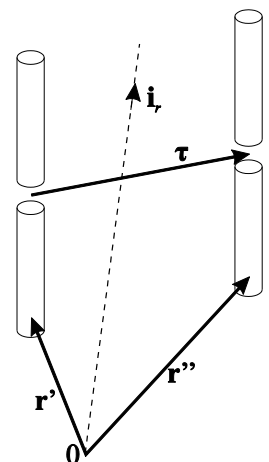
Prilikom translacije originalne antene (čiji je poteg $\mathbf{r}'$) za pomeraj $\boldsymbol{\tau}$ karakteristična funkcija zračenja izražena pomoću karakteristične funkcije zračenja originalne antene je:

$$\mathbf{F}_{\tau}(\theta, \phi) = e^{j\beta \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{i}_r} \mathbf{F}(\theta, \phi), \quad \mathbf{r}'' = \mathbf{r}' + \boldsymbol{\tau}.$$

Pošto je $e^{j\beta \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{i}_r}$ skalarna kompleksna funkcija pravca čiji je modul jednak jedinici može se zaključiti sledeće:

Translacijom karakteristične funkcije zračenja u odnosu na originalnu antenu:

1. Menja se samo raspodela faze (električnog polja u zoni dalekog zračenja) u zavisnosti od pravca.
2. Ne menja se zavisnost amplitude i polarizacije (električnog polja u zoni dalekog zračenja) od pravca.



Slika 1(t-b).

Antenski nizovi.

Antenski sistem čini više antena (elemenata antenskog sistema) koje rade na istoj učestanosti i čijom kombinacijom se dobija željeni dijagram zračenja. Zarad lakše praktične realizacije obično se kombinuju antene istog tipa, veličine i osobina.

Antenski nizovi su vrlo uska klasa antenskih sistema. Antene (elementi antenskog niza) su u prostoru orijentisane na isti način (kao da svi elementi antenskog niza nastaju translacijom jednog elementa).

Podela antenskih nizova prema međusobnom prostornom položaju elemenata antenskog niza:

- Linearni. Elementi antenskog niza su raspoređeni duž jedne linije.
- Planarni (površinski). Elementi antenskog niza su raspoređeni u ravni (koplanarni su).

Podela antenskih nizova prema raspodeli amplituda i faza napajanja:

- Uniformni. Elementi antenskog niza su ravnomerno raspoređeni u prostoru. **Struje** napajanja elemenata niza su iste amplitude i konstantnog faznog pomeraja od elementa do elementa antenskog niza.
- Neuniformni.
 - U užem smislu. Elementi antenskog niza su ravnomerno raspoređeni u prostoru. **Struje** napajanja elemenata niza su različite amplitude i konstantnog faznog pomeraja od elementa do elementa antenskog niza.
 - U širem smislu. Elementi antenskog niza su neravnomerno raspoređeni u prostoru. **Struje** napajanja elemenata niza su različite amplitude i promenljivog faznog pomeraja od elementa do elementa antenskog niza.

Faktor niza.

Električno polje u dalekoj zoni zračenja i karakteristična funkcija zračenja jednog elementa antenskog niza (na osnovu teoreme o translaciji karakteristične funkcije zračenja originalnog elementa sa strujom I_0) su:

$$\mathbf{E}_i(r, \theta, \phi) = j \frac{Z_0}{2\pi} I_i \frac{e^{-j\beta r}}{r} \mathbf{F}_i(\theta, \phi),$$

$$\mathbf{F}_i(\theta, \phi) = e^{j\beta \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{i}_r} \mathbf{F}_0(\theta, \phi), \quad i = 1, \dots, N.$$

Neka se struje napajanja elemenata niza razlikuju po amplitudi i fazi u odnosu na originalni element:

$$I_i = a_i I_0, \quad a_i \in \mathbb{C}.$$

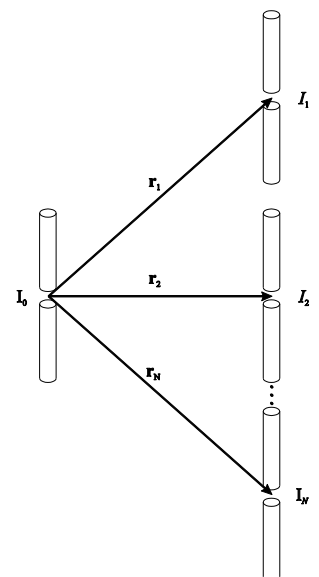
Na osnovu principa superpozicije, ukupno (rezultantno) električno polje u dalekoj zoni zračenja je:

$$\mathbf{E}_R = \sum_{i=1}^N \mathbf{E}_i = j \frac{Z_0}{2\pi} I_0 \frac{e^{-j\beta r}}{r} \left(\sum_{i=1}^N a_i e^{j\beta \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{i}_r} \right) \mathbf{F}_0 = j \frac{Z_0}{2\pi} I_0 \frac{e^{-j\beta r}}{r} \mathbf{F}_R.$$

Iz prethodnog izraza se vidi da je rezultantna karakteristična funkcija zračenja promenjena u odnosu na originalni element množenjem skalarnim kompleksnim faktorom koji nazivamo faktorom niza (F_s).

$$F_s = \sum_{i=1}^N a_i e^{j\beta \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{i}_r},$$

$$\mathbf{F}_R = F_s \mathbf{F}_0.$$



Slika 1(t-c).

Pošto je faktor niza skalarni kompleksni faktor, kojim se množe sve komponente električnog polja u datom pravcu, polarizacija ostaje ista kao kod izvodnog elementa, a menja se samo amplituda i faza u zavisnosti od pravca (uglova θ i ϕ). Prema tome, upotrebom antenskih nizova menja se samo oblik (i faza) dijagrama zračenja originalnog elementa ali polarizacija ostaje nepromenjena.

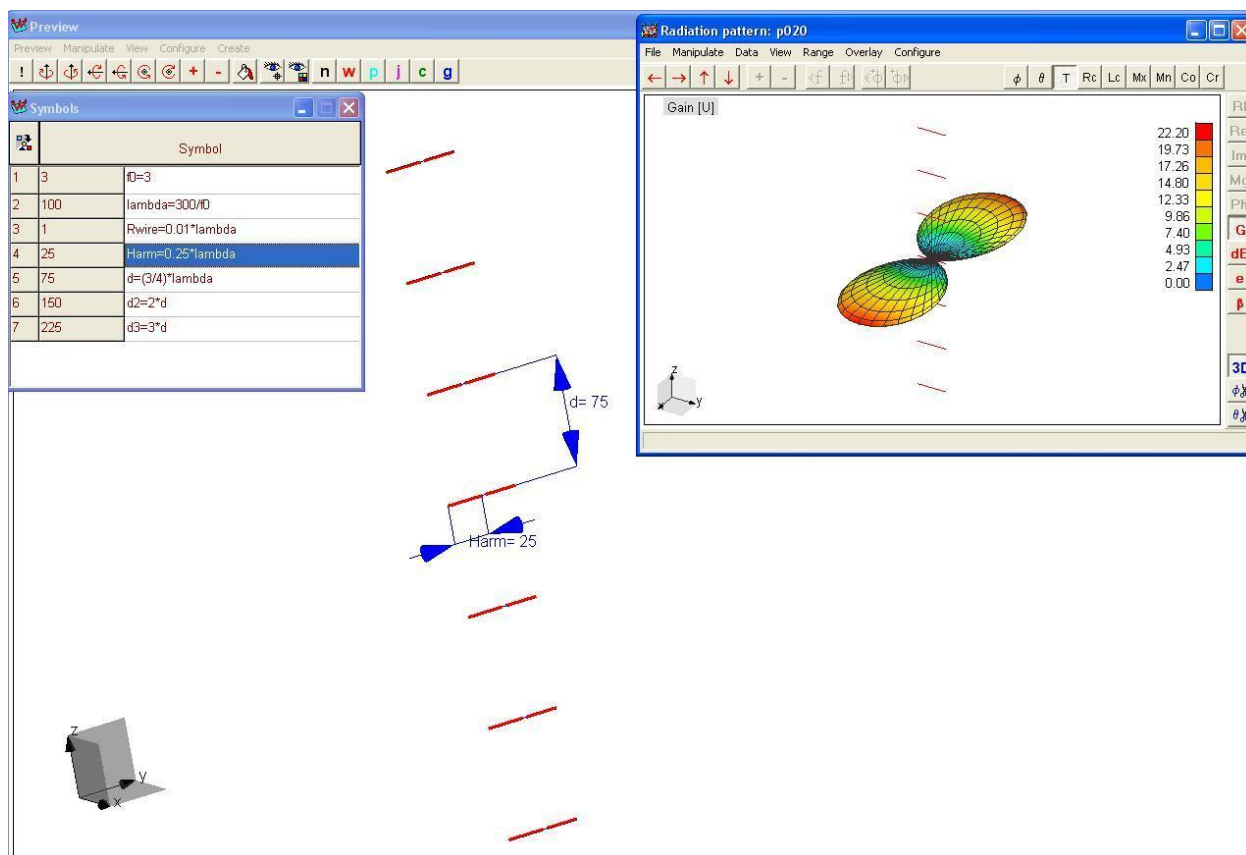
Trebalo bi napomenuti da ova izvođenje važi samo kod jednako orijentisanih elemenata (međusobno samo translatorno pomerenih) i ako su im karakteristične funkcije zračenja identične. Čak i ako su elementi istih geometrijskih dimenzija, ali su vrlo bliski, zbog međusobnog uticaja (međusobne sprege koja menja ulaznu impedansu elemenata niza) može doći do nejednake raspodele struje u pojedinim elementima, što čini da im karakteristične funkcije zračenja nisu jednake. Stoga bi trebalo imati u vidu i ovo ograničenje. Kod uobičajenih antenskih nizova (kod kojih se elementi nalaze na rastojanjima reda $\lambda_0 / 4$) greške koje se zbog ovog efekta javljaju su vrlo male i mogu se primetiti tek pri nivoima bočnih listova koji su ispod -30 dB u odnosu na glavni snop zračenja.

P01. Uniformni antenski nizovi sa transversalnim zračenjem.**Uvod:**

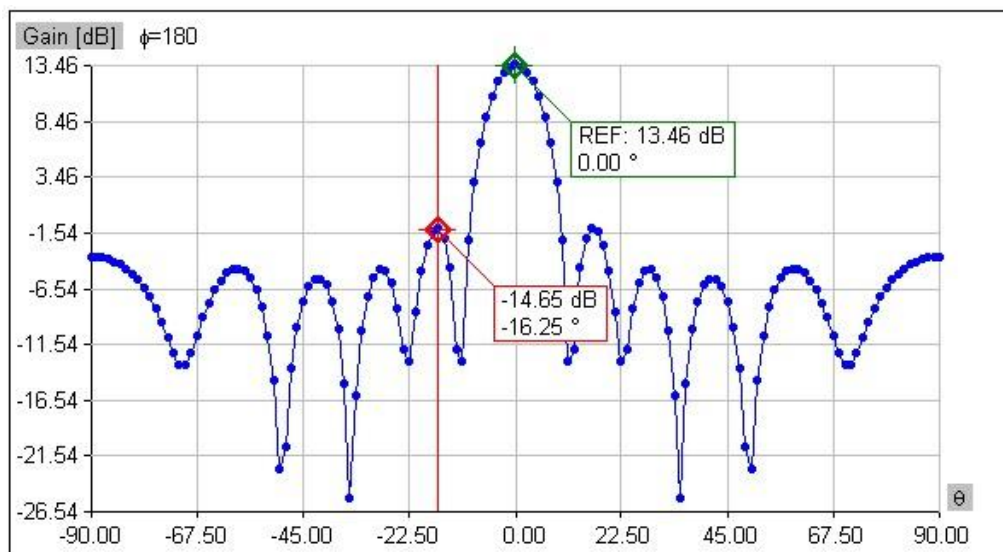
- Pravac maksimalnog zračenja je upravan na osu antenskog niza.
- Zbog margine, inženjerski, za rastojanje između elemenata niza se uzima $d = \frac{3}{4}\lambda_0$ (mada je optimalno $d = \frac{N-1}{N}\lambda_0$, gde N predstavlja broj elemenata antenskog niza, a λ_0 predstavlja talasnu dužinu u slobodnom prostoru koji okružuje antenski niz).
- Maksimalna usmerenost za $d = \frac{3}{4}\lambda_0$ je $D_{\max} = 1,5N$.
- Struje napajanja elemenata niza su u fazi; međusobni fazni pomeraj struja napajanja elemenata antenskog niza je $\delta = 0$.

Zadatak:

Projektovati linearni uniformni antenski niz sa transversalnim zračenjem. Niz se sastoji od 7 polutalasnih dipola, postavljenih upravno na osu niza. Radna učestanost je $f_0 = 3\text{GHz}$. Za međusobno rastojanje polutalasnih dipola uzeti $d = \frac{3}{4}\lambda_0$. Za poluprečnik žice od koje su načinjeni polutalasni dipoli uzeti $R_{\text{wire}} = 0,01\lambda_0$. Prikazati 3D dijagram zračenja i 2D dijagram zračenja u ravni upravnoj na osu polutalasnih dipola (elemenata antenskog niza).



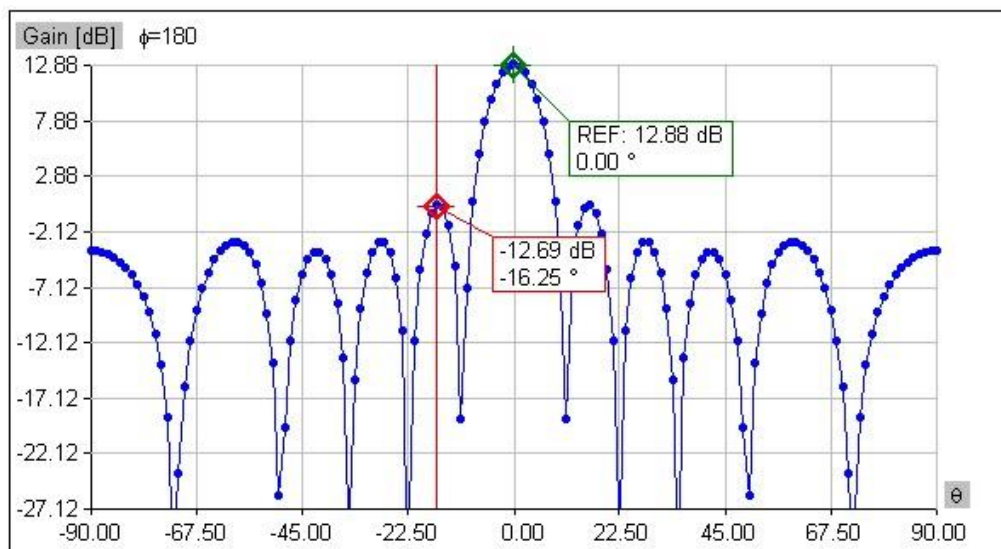
Slika 1(a).



Slika 1(b).

Sa slike 1(b) se vidi da je slabljenje prvog bočnog lista veće od teorijskih 12,4 dB [Antene i prostiranje radio talasa, Momčilo B. Dragović, str. 69]. Razlog tome leži u činjenici da iako se antene napajaju naponskim generatorima iste efektivne vrednosti elektromotorne sile, zbog postojanja sprege, Y parametri antena nisu jednaki. Samim tim ni moduli ulaznih admitansi, ni efektivne vrednosti struja napajanja elemenata niza (što je potreban uslov prilikom teorijskog izvođenja za faktora niza).

Kako bismo smanjili spregu među dipolima smanjimo im dužinu 100 puta. U tom slučaju trebalo bi promeniti H_{arm} na $H_{\text{arm}} = 0,0025 \lambda_0$.



Slika 1(c).

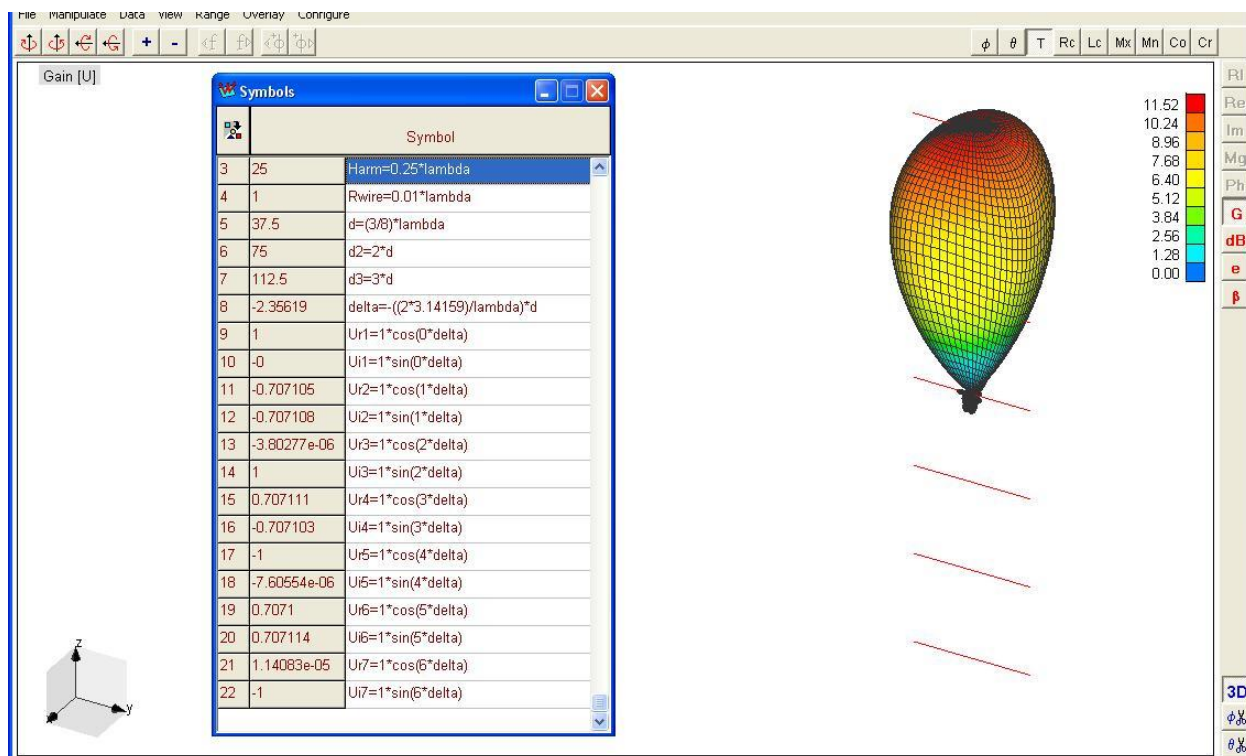
Sa slike 1(c) vidimo da smo se sa $H_{\text{arm}} = 0,0025 \lambda_0$ približili teorijskoj vrednosti slabljenja prvog bočnog lista od 12,4 dB, kao i da 2D dijagram zračenja više odgovara teorijskom za uniformne antenske nizove [Antene i prostiranje radio talasa, Momčilo B. Dragović, str. 69, slika 45].

P02. Uniformni antenski nizovi sa longitudinalnim zračenjem.**Uvod:**

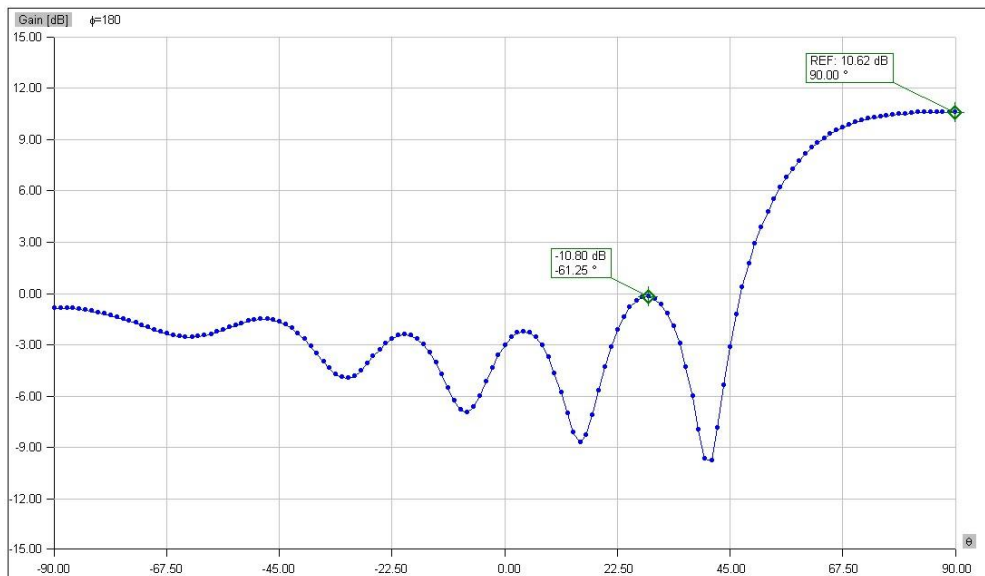
- Pravac glavnog zračenja kolinearan je sa osom antenskog niza.
- Zbog margine, inženjerski, za rastojanje između elemenata niza se uzima $d = \frac{3}{8}\lambda_0$ (mada je optimalno $d = \frac{N-1}{2N}\lambda_0$, gde N predstavlja broj elemenata antenskog niza a λ_0 predstavlja talasnu dužinu u slobodnom prostoru koji okružuje antenski niz).
- Maksimalna usmerenost za $d = \frac{3}{8}\lambda_0$ iznosi $D_{\max} = 1,5N$ (isti dobitak duplo kraćim antenskim nizom u odnosu na nizove sa transversalnim zračenjem).
- Struje napajanja elemenata antenskog niza nisu u fazi; međusobni fazni pomeraj struja napajanja elemenata niza je $\delta = -\beta d$, gde je β fazni koeficijent u slobodnom prostoru.

Zadatak:

Projektovati linearni uniformni antenski niz sa longitudinalnim zračenjem. Niz se sastoji od 7 polutalasnih dipola postavljenih upravno na osu niza. Radna učestanost je $f_0 = 3\text{GHz}$. Za međusobno rastojanje polutalasnih dipola uzeti $d = \frac{3}{8}\lambda_0$. Za poluprečnik žice od koje su napravljeni polutalasni dipoli uzeti $R_{\text{wire}} = 0,01\lambda_0$. Prikazati 3D dijagram zračenja i 2D dijagram zračenja u ravni upravnoj na osu polutalasnih dipola (elemenata antenskog niza).



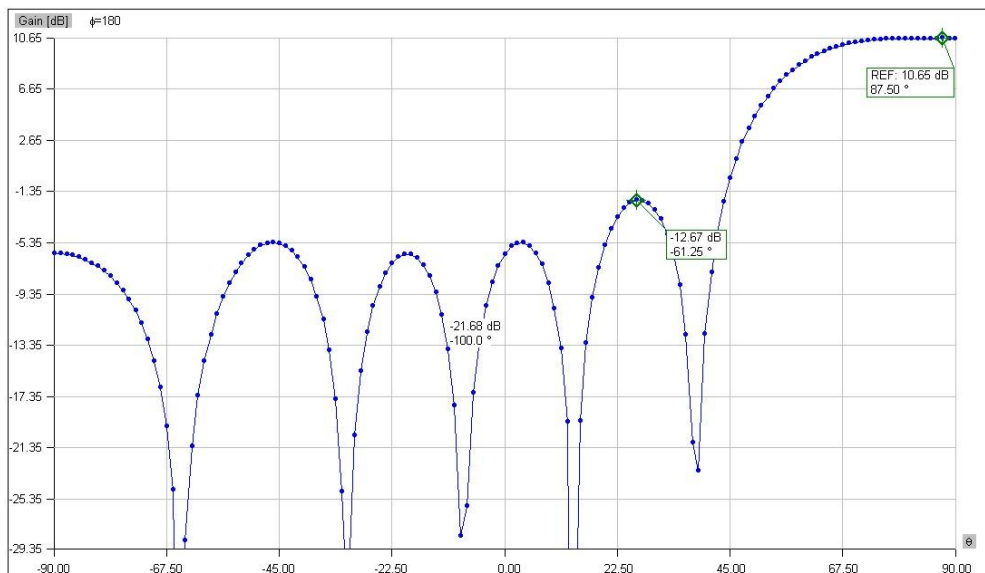
Slika 2(a).



Slika 2(b).

Sa slike 2(b) se vidi da je slabljenje prvog bočnog lista manje od teorijskih 12,4 dB [Antene i prostiranje radio talasa, Momčilo B. Dragović, str. 69]. Razlog tome leži u činjenici da iako se antene napajaju naponskim generatorima iste efektivne vrednosti elektromotorne sile, zbog postojanja sprege, Y parametri antena nisu jednaki. Samim tim ni moduli ulaznih admitansi, ni efektivne vrednosti struja napajanja elemenata antenskog niza (što je potreban uslov prilikom teorijskog izvođenja za faktora niza).

Kako bismo smanjili spregu među dipolima smanjimo im dužinu 100 puta. U tom slučaju trebalo bi promeniti H_{arm} na $H_{\text{arm}} = 0,0025 \lambda_0$.



Slika 2(c).

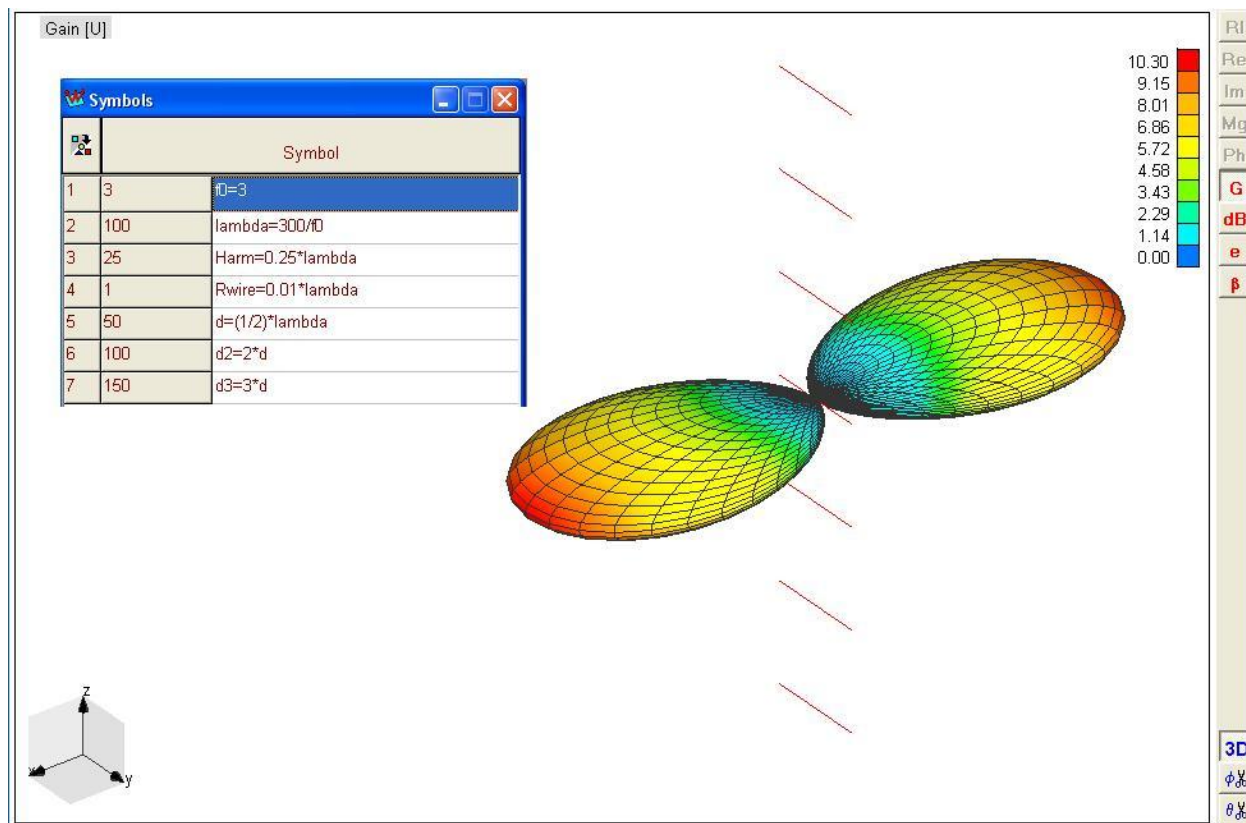
Sa slike 2(c) vidimo da smo se sa $H_{\text{arm}} = 0,0025 \lambda_0$ približili teorijskoj vrednosti slabljenja prvog bočnog lista od 12,4 dB, kao i da 2D dijagram zračenja više odgovara teorijskom za uniformne antenske nizove [Antene i prostiranje radio talasa, Momčilo B. Dragović, str. 69, slika 45].

P03. Neuniformni antenski nizovi (u užem smislu) sa transversalnim zračenjem – Binomijalni niz.**Uvod:**

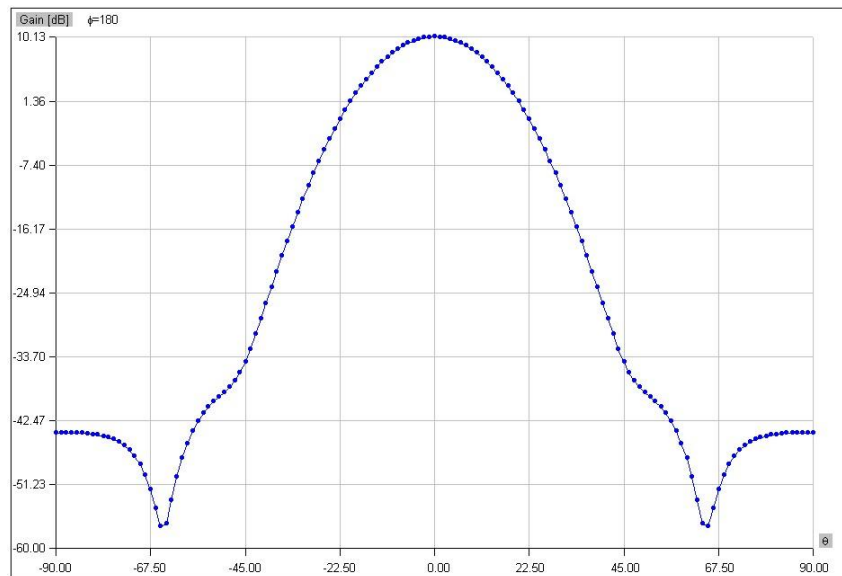
- Pravac glavnog zračenja je upravan na osu antenskog niza.
- Međusobno rastojanje elemenata antenskog niza je $d = \frac{1}{2}\lambda_0$ (teorijski nema bočnih listova), gde λ_0 predstavlja talasnu dužinu u slobodnom prostoru koji okružuje antenski niz).
- Maksimalna usmerenost za $d = \frac{1}{2}\lambda_0$ iznosi $D_{\max} = 1,77\sqrt{N}$, gde N predstavlja broj elemenata antenskog niza.
- Struje napajanja elemenata niza su u fazi; međusobni fazni pomeraj struja napajanja elemenata antenskog niza je $\delta = 0$.
- Relativna raspodela efektivnih vrednosti struja napajanja elemenata niza je binomijalna.

Zadatak:

Projektovati linearni neuniformni (u užem smislu) antenski niz sa transversalnim zračenjem. Niz se sastoji od 7 polutalasnih dipola postavljenih upravno na osu niza. Radna učestanost je $f_0 = 3\text{GHz}$. Efektivne vrednosti struja napajanja imaju binomijalnu raspodelu. Za međusobno rastojanje polutalasnih dipola uzeti $d = \frac{1}{2}\lambda_0$. Za poluprečnik žice od koje su načinjeni polutalasni dipoli uzeti $R_{\text{wire}} = 0,01\lambda_0$. Prikazati 3D dijagram zračenja i 2D dijagram zračenja u ravni upravnoj na osu polutalasnih dipola (elemenata antenskog niza).



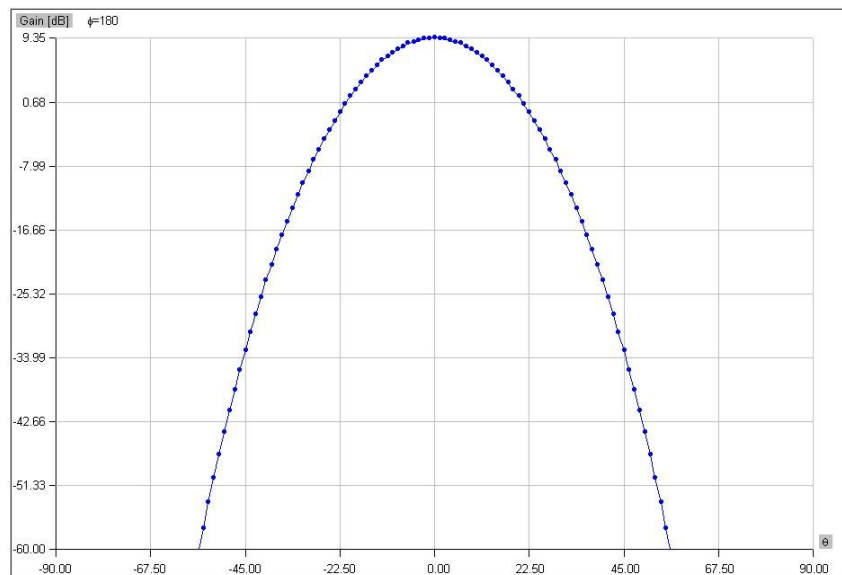
Slika 3(a).



Slika 3(b).

Sa slike 3(b) se vidi da je slabljenje prvog loba oko 54 dB u odnosu na glavni snop zračenja. U idealnom (teorijskom) slučaju ovaj lob ne postoji tj. njegovo slabljenje je beskonačno. U simulaciji postojanje loba posledica je sprege među dipolima (koja se preslikava u nejednakost ulaznih admitansi elemenata antenskog niza i odstupanje efektivnih vrednosti struja napajanja od željene binomijalne raspodele).

Smanjenjem dužina krakova polutalasnih dipola na $H_{\text{arm}} = 0,0025 \lambda_0$ smanjuje se sprema među elementnima niza.



Slika 3(c).

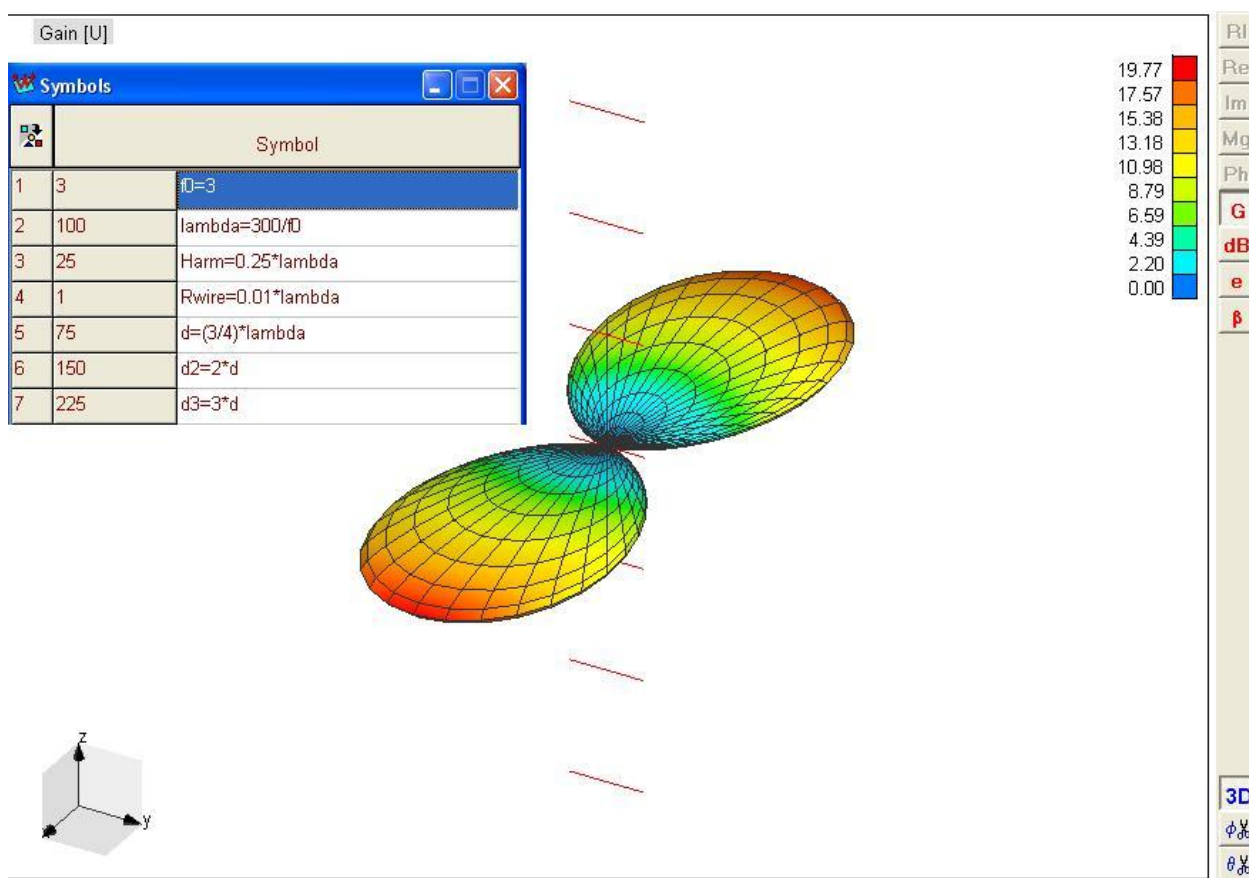
Sa slike 3(c) se vidi da je slabljenje prvog bočnog loba (kada je $H_{\text{arm}} = 0,0025 \lambda_0$) veće od 70 dB u odnosu na snop glavnog zračenja, što se (kada se u obzir uzme konačan broj značajnih cifara u jednostrukoj tačnosti sa kojima računari rade) može smatrati vrlo dobrim poklapanjem sa teorijom.

P04. Neuniformni antenski nizovi (u užem smislu) sa transversalnim zračenjem - Trougaoni niz.**Uvod:**

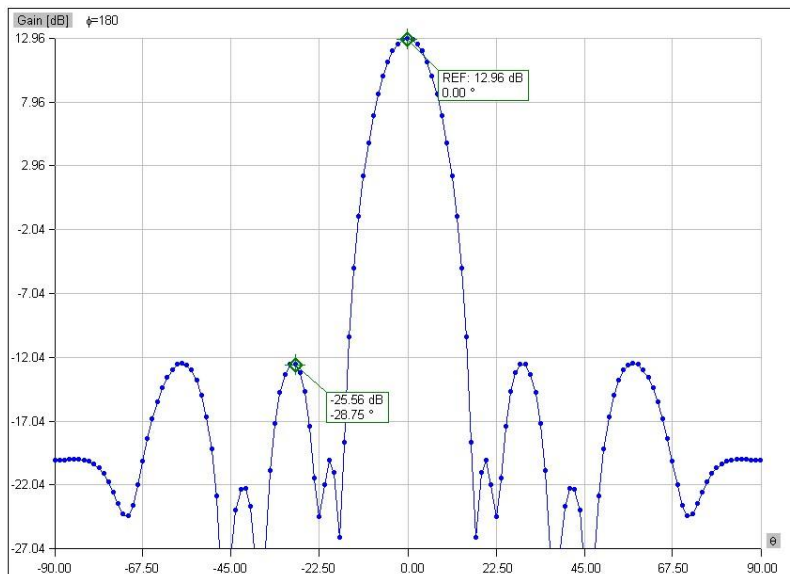
- Pravac glavnog zračenja upravan je na osu antenskog niza.
- Zbog margine, inženjerski, za rastojanje između elemenata niza se uzima $d = \frac{3}{4}\lambda_0$ (mada je optimalno $d = \frac{N-1}{N}\lambda_0$, gde N predstavlja broj elemenata antenskog niza, a λ_0 predstavlja talasnu dužinu u slobodnom prostoru koji okružuje antenski niz).
- Struje napajanja elemenata niza su u fazi; međusobni fazni pomeraj struja napajanja elemenata antenskog niza je $\delta = 0$.
- Relativna raspodela efektivnih vrednosti struja napajanja elemenata antenskog niza je trougaona.

Zadatak:

Projektovati linearni neuniformni (u užem smislu) antenski niz sa transversalnim zračenjem. Niz se sastoji od 7 polutalasnih dipola, postavljenih upravno na osu niza. Radna učestanost je $f_0 = 3\text{GHz}$. Efektivne vrednosti struja napajanja imaju trougaonu raspodelu. Za međusobno rastojanje elemenata antenskog niza uzeti $d = \frac{3}{4}\lambda_0$. Za poluprečnik žice od koje su napravljeni polutalasni dipoli uzeti $R_{\text{wire}} = 0,01\lambda_0$. Prikazati 3D dijagram zračenja i 2D dijagram zračenja u ravni upravnoj na osu polutalasnih dipola (elemenata antenskog niza).

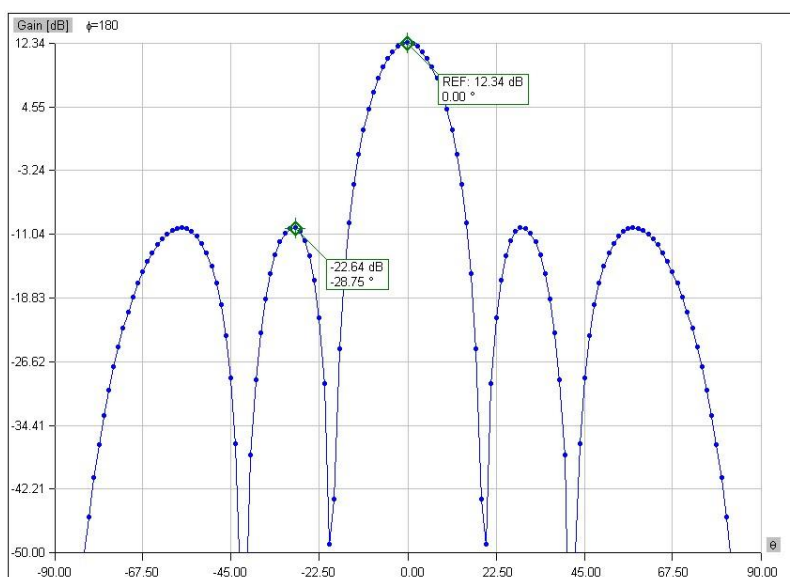


Slika 4(a).



Slika 4(b).

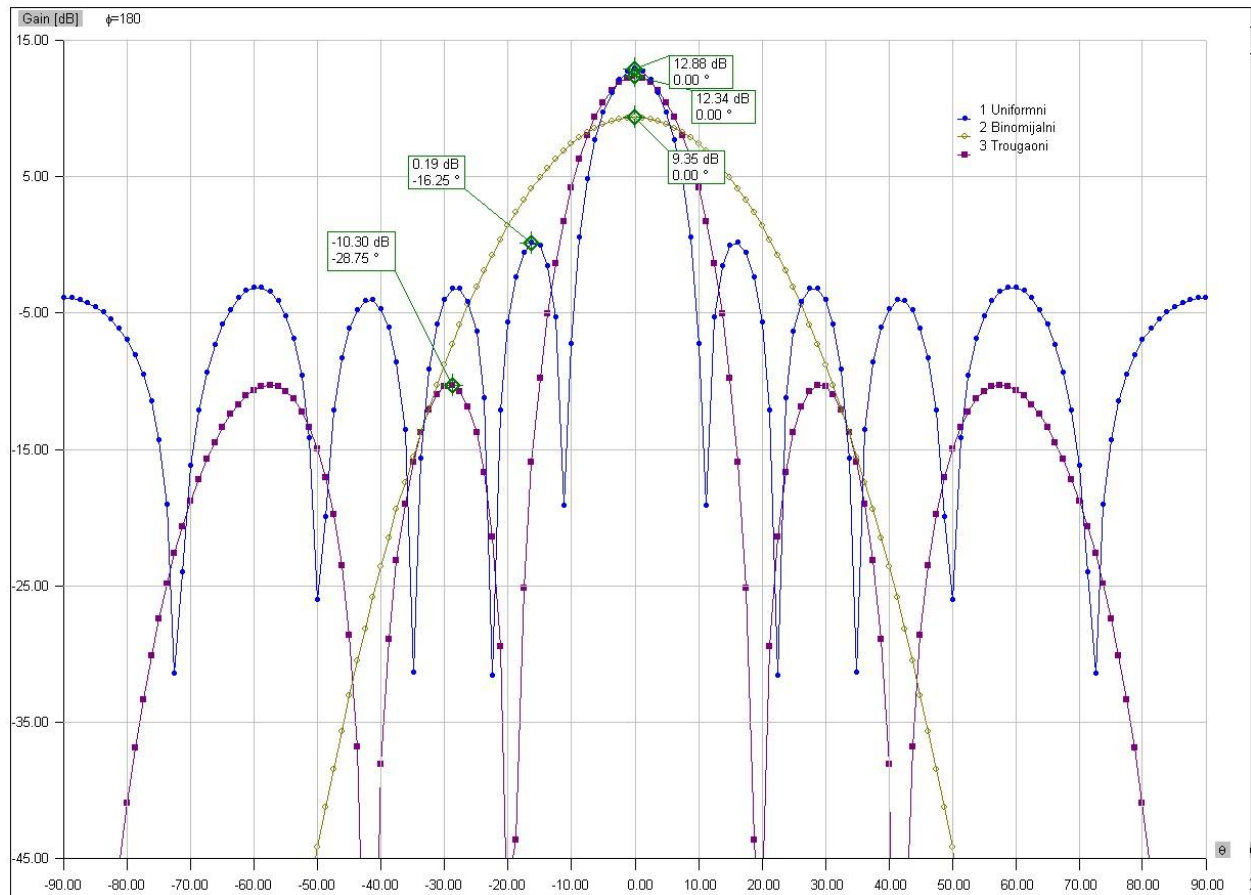
2D dijagram zračenja sa elementima niza kod kojih je smanjena sprega između elemenata niza (smanjena je razlika između modula ulaznih admitansi) smanjenjem dužina kraka na $H_{\text{arm}} = 0,0025 \lambda_0$ prikazan je na slici 4(c).



Slika 4(c).

Jasno se vidi da na grafiku prikazanom na slici 4(c) postoji manje (parazitnih) bočnih lobova koji se mogu pripisati nejednakim ulaznim admitansama elemenata niza, samim tim i efektivnim vrednostima struja napajanje elemenata niza koje odstupaju od (željene) trougaone raspodele.

Na slici 4(d) dat je uporedni prikaz 2D dijagrama zračenja niza sa transversalnim zračenjem u slučaju uniformne, binomijalne i trougaone raspodele efektivnih vrednosti struje. U sva tri slučaja nizovi se sastoje od istog broja elemenata ($N = 7$) i istog su tipa (u cilju objektivnog poređenja). Kako bi se rezultati što bolje poklapali sa teorijskim, u sva tri slučaja dužina kraka elemenata niza je $H_{\text{arm}} = 0,0025 \lambda_0$.



Slika 4(d).

Sa slike 4 (d) može se zaključiti sledeće:

Uniformni antenski nizovi imaju najveću usmerenost. Loša strana je što imaju malo potiskivanje prvog bočnog lista (u teoriji nešto manje od 13 dB).

Sa druge strane binomijalni nizovi imaju najveće potiskivanje bočnih listova (teorijski oni nemaju bočne listove pa je potiskivanje beskonačno), ali kao manu imaju najmanju usmerenost.

Trougaoni nizovi se mogu shvatiti kao kompromis između dva gore pomenuta. Imaju neznatno manji dobitak od uniformnih nizova, dosta bolji dobitak od binomijalnih nizova, a potiskivanje prvog bočnog lista dosta je bolje od uniformnih (teorijski oko 26 dB).

Primititi da se umesto modelovanja svakog polutalasnog dipola posebno, jedan može translirati korišćenjem manipulacija.