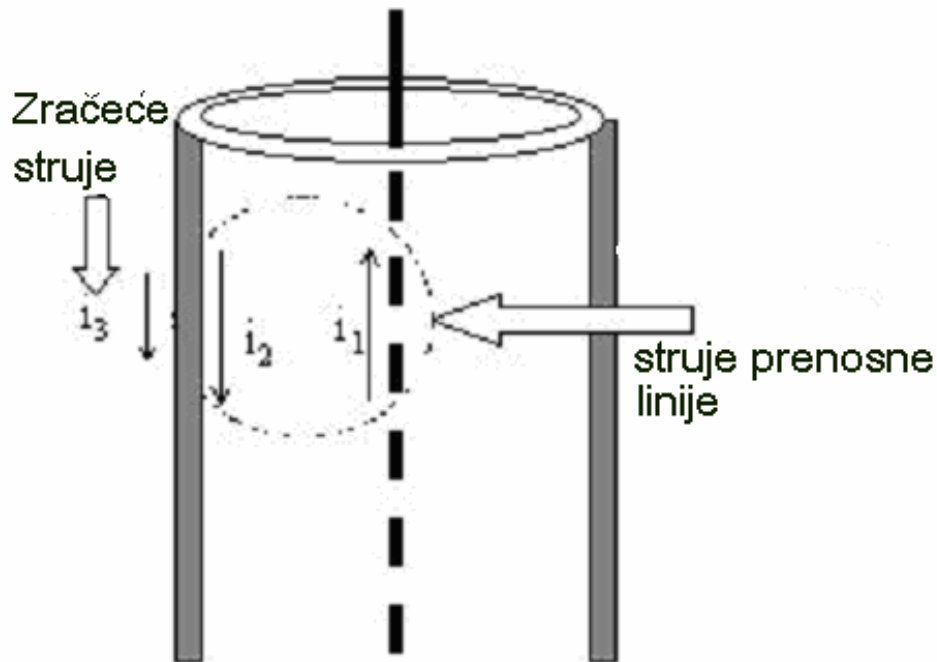


BALUNI

Uvod

Balun je sredstvo kojim se nebalansirani kabl (koaksijalni) spaja na balansiranu antenu. Pojam "balun" se često zlorabljuje a knjihe i teorija ga izbegavaju. Elektromagnetska realnost čini ga jednim od najvećih problema. Gornja definicija je i tačna i pogrešna - elaborisana definicija bi trebala da glasi: sredstvo koje predstavlja visoku lokalnu impedancu za zračene struje duž opleta napojnog kabla. Ono "lokalna" podrazumeva da on prigušuje struje samo na tacki na kojoj je lociran; uzaludno je nadati se da će i struje na ostatku kabla biti prigušene. "Zračene struje" odgovara predstavi struje na spoljnom provodniku koaksijalnog kabla, a ne na normalne struje transmisionne linije u unutrašnjosti kabla (vidi sliku 1). Struje transmisionne linije u unutrašnjosti kabla su suprotnog polariteta i jednake (zbog sprege transmisionne linije), a od okruženja su oklopljene činjenicom da ih skin-efekt u pletenici sprečava da se penetriraju u spoljno okruženje.



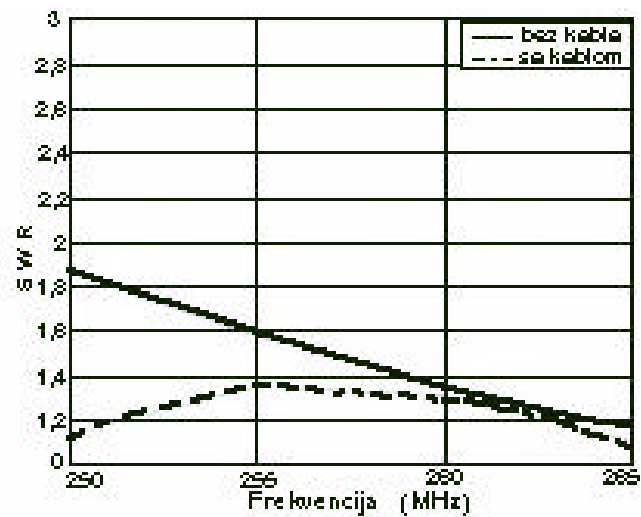
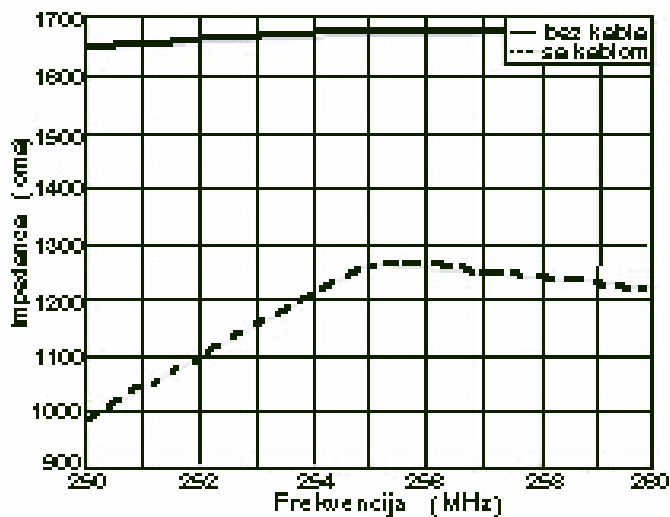
Slika 1. Zračene struje i struje transmisionne linije na koaksijalnom kablu

Primećujemo odsustvo reference na transformaciju impedance. Baluni ponekad konvertuju ulaznu impedancu, ali to je onda dodatna funkcija koja se treba posmatrati odvojeno od osnovne funkcije. U praksi, baluni su nam potrebni čak i ako se napajaju nesimetrične antene (kao što je dipol napajan izvan centra), pošto ne želimo da napojni kabl postane deo antenskog sistema, ali želimo da struje na obe napojne tačke antene budu jednake.

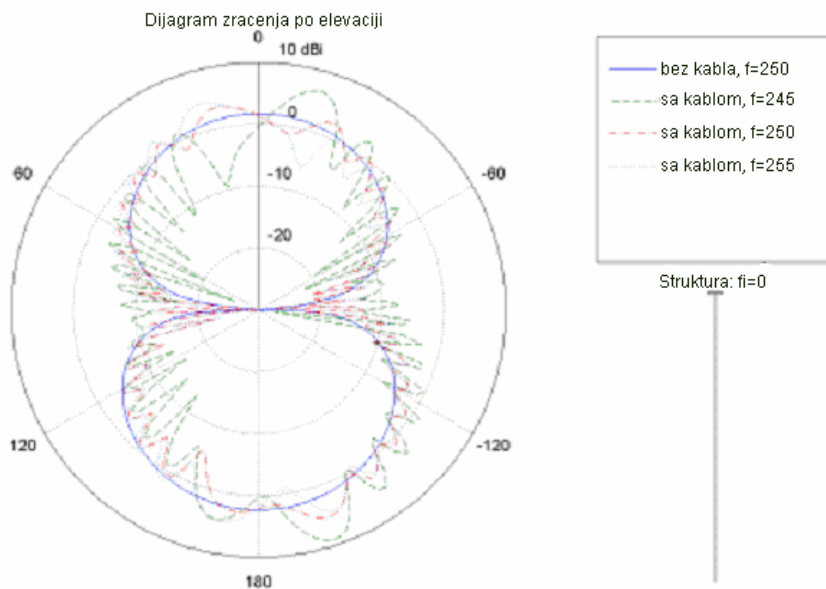
Na VF su ovi baluni posebno interesantni i ponekad se nazivaju "prigušni" (common mode chokes) ili strujni baluni, za razliku od naponskih baluna. Naponski baluni obezbeđuju da naponi na oba terminala antene budu jednaki i suprotnog polariteta - u odnosu na tačku uzemljenja koju predstavlja oklop koaksijalnog kabla. Ako je antena sama po sebi simetrična, ovi balansirani naponi uzrokuju da na anteni teku balansirane struje, zbog čega nema nebalansiranih (spoljnih) struja na kablu. Ako antena nije simetrična, naponski baluni ne sprečavaju protok tih struja u kablu, pa se malo koriste u antenskim aplikacijama. Čak i kada je antena simetrična, njeno okruženje često ne uzrokuje struje zračenja.

Zašto su potrebni baluni?

Nebalansirana napojna struja utiče na impedancu u napojnim tačkama antene. Ovo je svojevrsna glavobolja kada se treba meriti ulazna impedanca kod visokoimpedantne antene. Dijagram zračenja antene može se u velikoj meri promeniti zbog uticaja asimetričnih struja kao i zračnih struja sa napojnog voda.

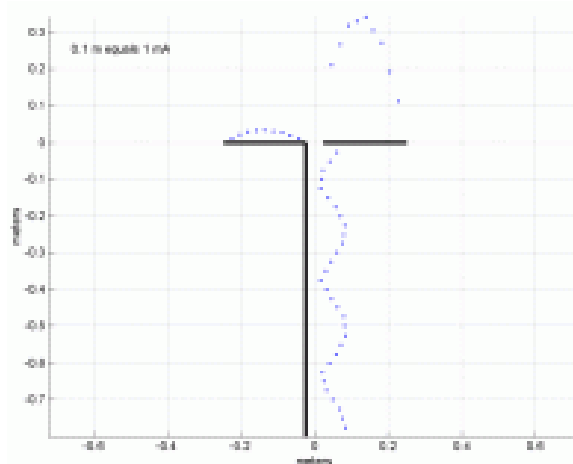


Slika 2. Uticaj nebalansiranih struja na ulaznu impedancu: a) Ulazna impedanca za dipol 1? sa i bez napojnog kabla, b) Uticaj napojnog kabla na SWR za savijeni $\lambda/2$ dipol.

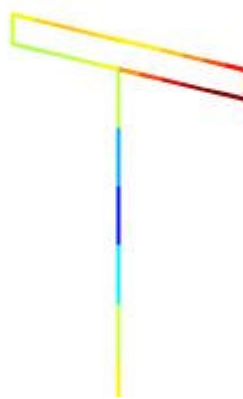


Slika 3 Dijagram zracenja za polutalasni savijeni dipol sa i bez uticaja okomito postavljanog napojnog voda dužibe 10 metara

Zracece struje napojne linije mogu da uzrokuju radio-smetnje i, generalno, mogu da stvore nepredvidive atruje na metalnim delovima u okruženju (antenski stub i sl). Ako napojni kabl nije dizajniran da bude deo zraceceg sistema, normalno, ne može se kontrolisati njegova orijentacija i oblik.



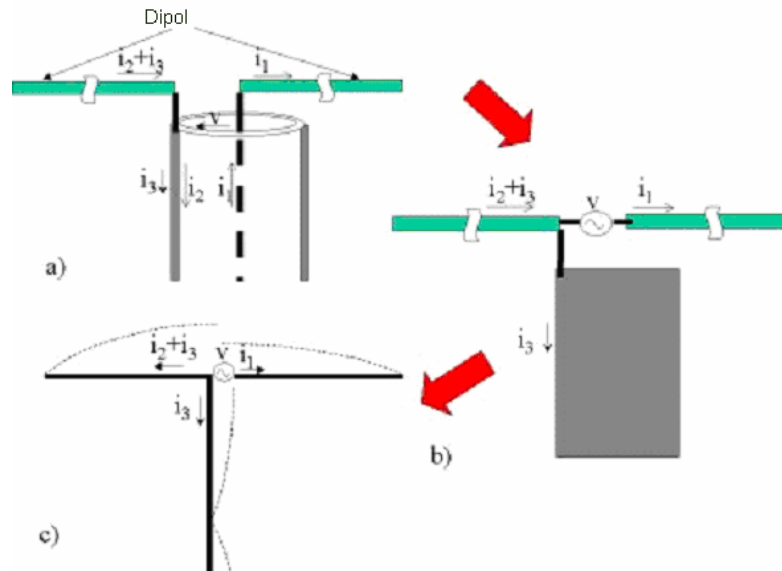
a) Punotalasni dipol



b) Struja u savijenom dipolu

Slika **Error! Bookmark not defined**. Primer zraceutih struja na napojnom kablu. a) anti-rezonantni dipol dužine 50 cm na frekvenciji 560 MHz. b) polutalasni dipol na 245 MHz. NAPOMENA: Napojni kabl je dug 10 m, a ovde je prikazan samo njegov vršni deo.

Formulacije i pojednostavljenja

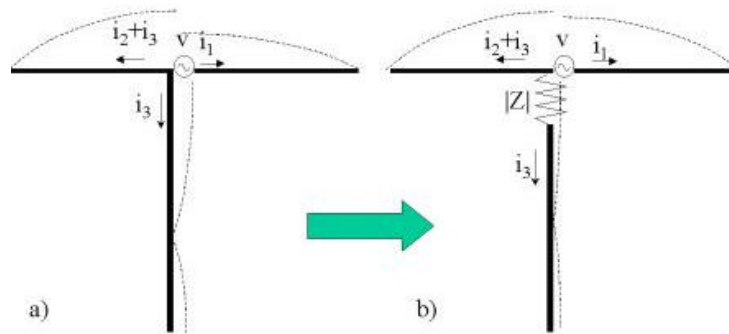


Slika 5 - Pojednostavljenje formulacije antene napajane nebalansiranom linijom: a) daje punu ilustraciju problema b) Skrivanje struja transmisionne linije i predstavljanje efekta na liniju od napona (v), između unutrašnjeg i spoljnog provodnika kao elementarnog izvora c) Reduciranje žica na žice uklaňanjem svih radijatora na crtežu radi lakšeg razumevanja.

Slika 5 prikazuje kako nebalansirano napajanje antene može da se redukuje na ekvivalentan pojednostavljeni model koji je lakši za razumevanje i prikladniji za simuliranje upotrebom programa MoM (Method of Moments).

Slika 6 prikazuje jednostavan metod modeliranja baluna ubacenog u tacku napajanja antene. Modeliranje baluna kao impedance je ocigledno korektno za "strujni" tip baluna, pošto se struje mogu prigušiti ili redukovati njihovim prezentiranjem u formi ekvivalentne impedance. Decovanje baluna ce zavisiti od magnitude njegove impedance u odnosu na impedancu antene i na "antensku impedancu" napojnog kabla. Mada se na slici 6 koristi simbol za otpornik da bi se predstavila impedance baluna, ova impedance je cesto kompleksna. Ta impedance baluna a ne njena kompleksna priroda odredjuje koliko je taj balun efikasan.

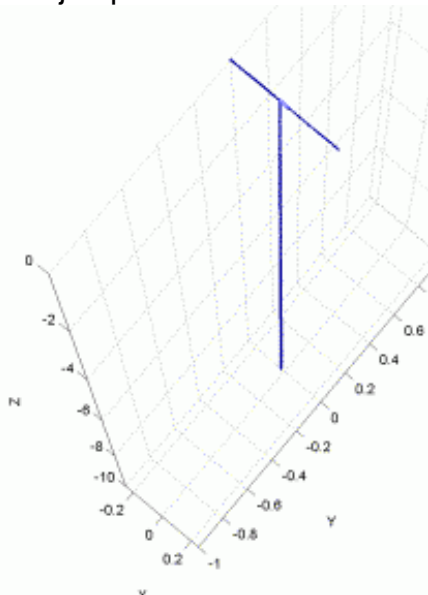
Impedanca u odnosu na frekvencu može se takodje upotrebiti da bi se dobila indikacija propusnog opsega baluna i, najvažnije, impedance se može izmeriti ili izracunati za razlicite balune. Kasnije ce biti reci o nekim specificnostima pri izracunavanju i merenju performansi baluna, a sada cemo obratiti pažnju na interakciju između impedance baluna, tipa antene i nebalansiranih struja.



Slika **Error! Bookmark not defined.** a) Bez baluna b) balun modeliran kao kompleksna impedanca

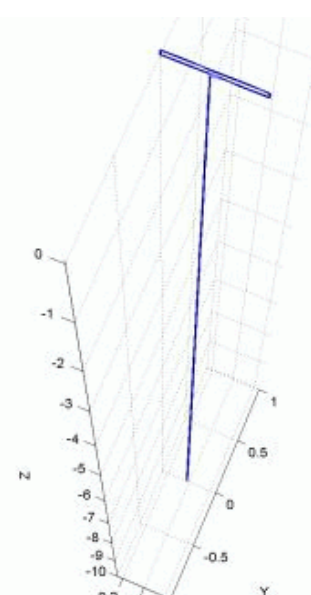
Impedanca baluna i tipovi antena

Da bi se dobila potpuna slika o efektivnosti i propusnog opsega baluna, potrebno je poznavanje antena. U sklopu istraživanja relacija sa smerom i dimenzijama na slici 7, nadjena su tri razlicita tipa antena. Ulazna impedanca dipola u rezonanci (285 MHz) je oko 70 Ω , savijenog dipola na 245 MHz je oko 300 Ω , dok je za dipol u anti-rezonanciji (565 MHz) oko 1700 Ω . Ove tri antene ce, dakle, pokazati efekt antenske impedance na iznos nebalansiranih struja kao i na zahteve koji se postavljaju pred balun.



a) Model za dipole; 0.5 m 1 mm precnik žice.

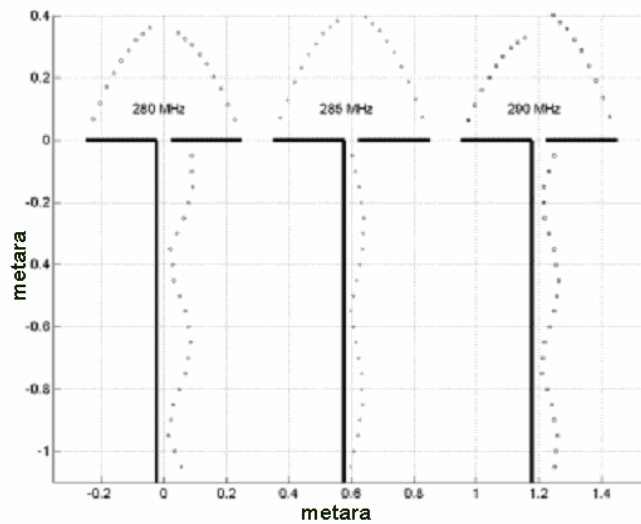
Rezonanca je približno na 285 MHz a anti-rezonanca na 565 MHz.



b) Model savijenog dipola dužine 0.5 m, razmaka 0.05 m i precnika žice 1 mm.

Slika 7- SuperNEC modeli antena i napojnih kablova. U svim slucajevima prikljucen je napojni kabl dužine 10 metara na jednu stranu izvora da bi se modelirale radijacione struje. Ako su ukljuceni efekti baluna, oni se modeliraju upotrebom rezistivnog opterecenja na vršnom segmentu napojnog kabla.

Treba opaziti kako se nebalansirane struje ponašaju pri promeni frekvencije, kako to pokazuje slika 8. Vrednost nebalansirane (ili zracece) struje je strogo zavisna od frekvencije, uglavnom kao rezultat prirode stojecih talasa na napojnom vodu. U stvarnosti, ona je zavisna i od dužine kabla i kako je kabl terminiran. Obicno uvek postoji neka varijacija struje na napojnom vodu. U ovom naznacenom slucaju, razmatramo napojni kabl dužine 10 metara na otvorenom kolu. Rezultat nije specifican ovakvom stanju pošto se uvek najpre izvede simulacija na nekoliko frekvencija i odabere frekvencija pri kojoj se javlja najgori slucaj nebalansiranosti. U kasnijoj fazi, racunamo debalans kombinacije baluna i antene; tada razmatramo srednju vrednost struje na napojnoj liniji i položaj prema srednjoj struji kompletne antene na nekoliko frekvencija. Uzevši prosek za frekvencije, kao i zadnjih pola talasa dužine koaksijalnog voda, gledamo da minimizujemo njihov efekt.



Slika **Error! Bookmark not defined.** - Nebalansirane struje na dipolu dužine 0,5 m na tri bliske frekvencije. NAPOMENA: Napojni kabl je dužine 10 m a ovde je nacrtan samo njegov vršni deo

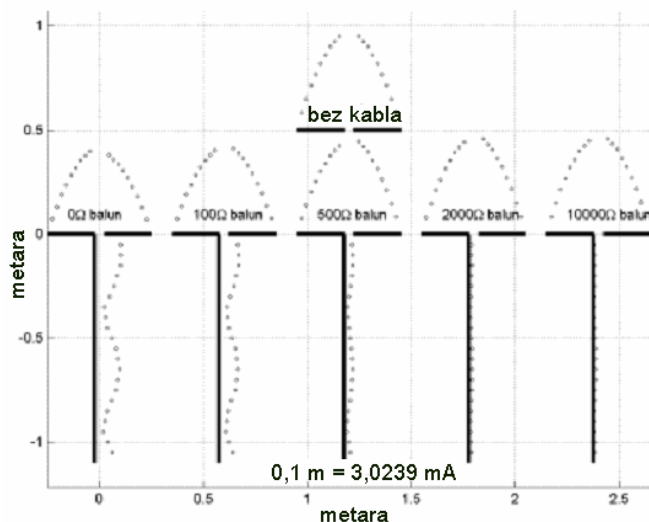
Slike 9, 10 i 11 prikazuju distribuciju struja na antenama sa razlicitim iznosima impedance baluna. U svim slucajevima, balun se modelira kao omski otpornik na vršnom segmentu kabla. Slika 9 indicira da je veliki stepen balansiranja postignut kada se prikljuci nebalansirana linija na obican polutalasni dipol. Kvalitativno prosudjivanje dalo bi predstavu da samo baluni sa impedancom od 500 ili više oma daju zadovoljavajuće malu vrednost nebalansiranih struja na kابلu.

Slika 10 prikazuje nebalansirane struje na savijenom dipolu. Važno je zapaziti ekstremne nivoe nebalansiranih struja, ako nema baluna ili je upotrebljen balun sa niskom vrednošću. Malo ko bi mogao da poveruje da ce pod ovakvim, skoro idealnim uslovima (nema spoljnih objekata i kabl je dobro aranžiran), ovakva antena morati da trpi ovako dramaticne nivoe naizbalansiranih struja. Savijeni dipol sa nominalnim ulaznim otporom od 300 oma izgleda da zahteva balun sa mnogo vecom vrednošću impedance da bi se nebalansirane struje stavile pod kontrolu. Prema slici, ta zahtevana vrednost je 2000 oma i više.

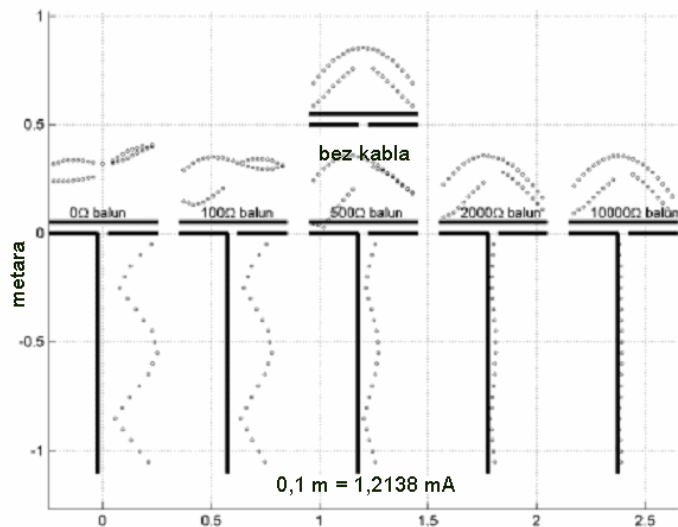
Slika 11 prikazuje ekstremne poteškoce sa nebalansiranim strujama kada se koristi antena sa visokom impedancom. Ova antena je u anti-rezonanci na oko 580 MHz, sa ulaznom rezistancom od 1600 oma. Vidljivo je da je neophodno da u tom slucaju impedanca baluna bude barem 10000 oma. Iz ovih rezultata može se izvuci grubo pravilo da impedanca baluna treba da je oko 10 puta veca od impedance antene u celom radnom opsegu frekvencija.

Da se ne bi smo oslanjali na ovakav kvalitativni pristup, pokušajmo da definišemo odnos nazvan "debalans", prema sledecem:

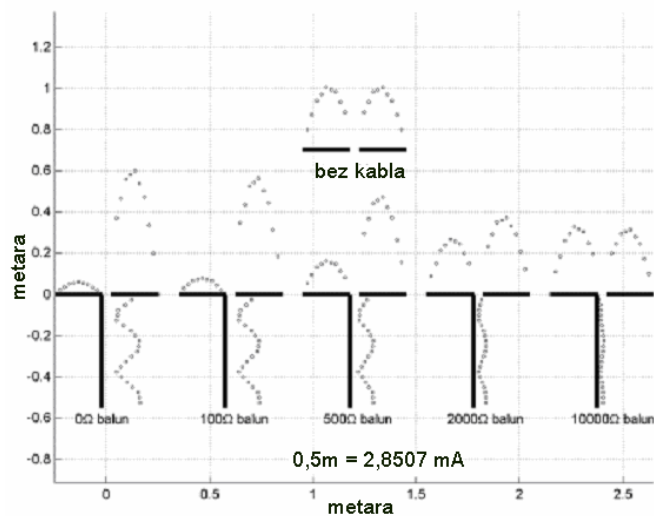
$$\text{Debalans} = \frac{\text{Srednja struja kroz kabl}}{\text{Srednja struja u anteni}}$$



Slika 9 - Dijagram struja na rezonantno polutalasnom dipolu sa raznim vrednostima ubacenih baluna. NAPOMENA: Napojni vod je dug 10m i prikazan je samo njegov vršni deo

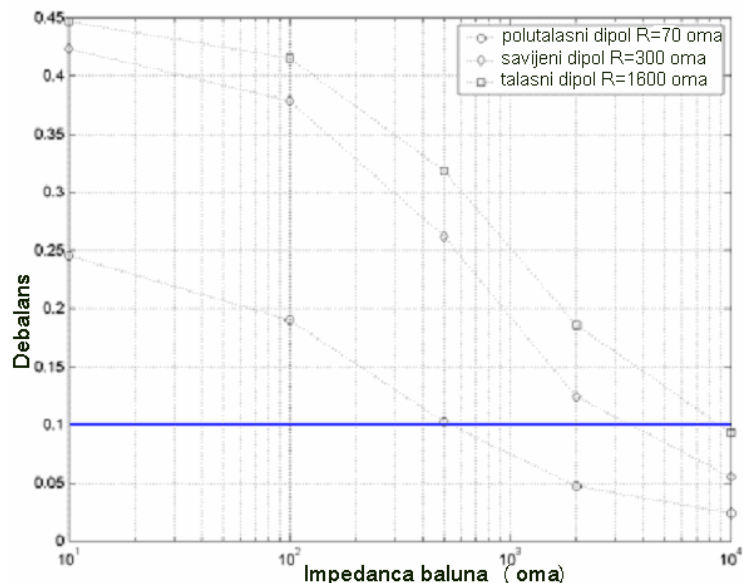


Slika 10 - Dijagram struja na polutalasnom savijenom dipolu sa raznim vrednostima balunat size balun inserted. NAPOMENA: Napojni vod je dug 10m i prikazan je samo njegov vršni deo



Slika 11 - Dijagram struja na antirezonantnom jednotalasnom dipolu sa raznim vrednostima baluna. NAPOMENA: Napojni vod je dug 10m i prikazan je samo njegov vršni deo

Debalans je, dakle, vrednost bez dimenzije koji samo kvantifikuje nivo neizbalansiranosti kod određene antene, orijentacije kabla ili konfiguracije baluna. Srednja vrednost struje podrazumeva se za ceo frekventni radni opseg i za sve pozicije duž antene. Srednja struja kroz kabl takodje treba da se posmatra u celom radnom opsegu, ali se za izracunavanje debalansa



Slika 12 - Dijagram strujnog debalansa prema impedanci baluna za antene sa razlicitim nominalnim ulaznim rezistancama.

uzima samo vršni deo kabla u dužini od pola talasa. Ovo ne čini značajniju razliku u razmatranim slučajevima, ali sa manje idealnim konfiguracijama kabla postaje jasno da balun utiče samo na struju u napojnom kabl u blizini napojne tačke - gde je balun pozicioniran. Slika 12 prikazuje ovu vrednost dijagramski, za razmatrane slučajeve. Dijagram potvrđuje dosadašnji kvalitativni pristup. Očigledno je da što je viša impedanca antene - potrebna je viša impedanca baluna, da bi se debalans suzbio. Vrednost debalansa manja od 0.1 izgleda da je razuman kriterijum za upotrebu u pristupu performansama baluna.

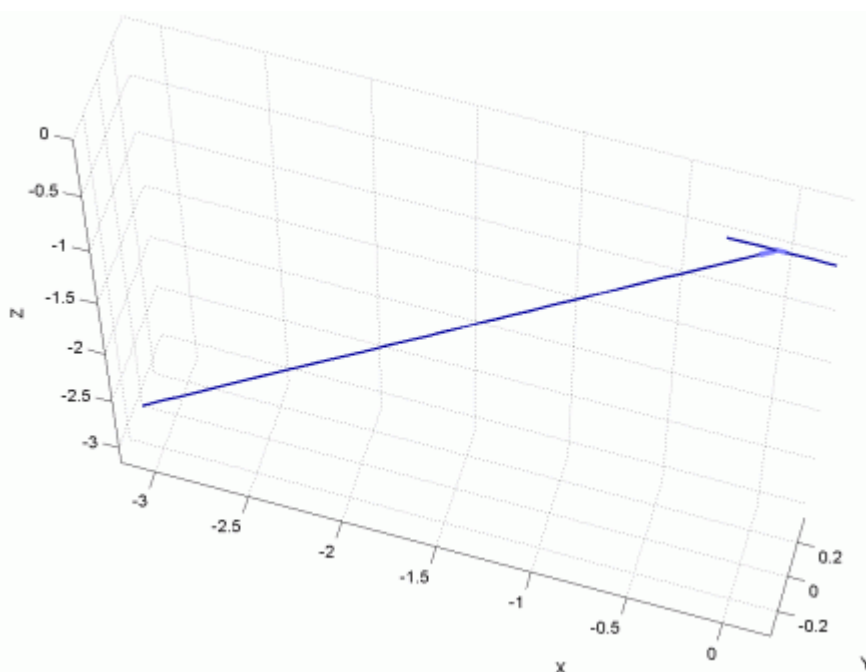
Uticao orijentacije kabla na nebalansirane struje

Predhodni tekst je pokazao značaj antenske impedance za kontrolisanje nebalansiranih struja. Faktor koji se ne odnosi na antenu je orijentacija napojnog kabla. Svi znamo iz iskustva da ako je napojni kabl pozicioniran asimetrično, nebalansirane struje su visoke. Da bi smo ovo istražili, modelirali smo polutalasnog rezonantni dipol sa 10 metara napojnog kabla, takodje, ali pod uglom od 45 stepena prema osi dipola. Model je prikazan na slici 13.

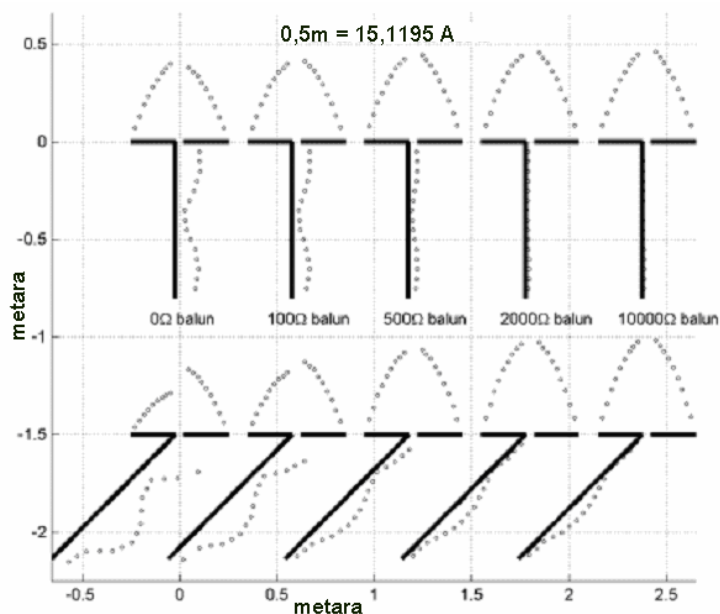
Slika 14 upoređuje struje na zakošenom napojnom provodniku sa strujama dobijenim pri okomitom položaju. Evidentna su dva aspekta:

- ? Nebalansirane struje su znatno veće na zakošenom kabl. Zahtevaju se veće vrednosti impedance baluna.
- ? Evidentan je interesantan aspekt u slučajevima 2000 W i 10 kW za zakošeni kabl. Struje su, izgleda tako, prigušene oko prvih (vršnih) pola talasa napojnog kabla, a nakon toga rastu. Ovo je trebalo očekivati zbog uzajamnog sprežanja, ali i zbog nečeg što je već istaknuto: struje su moguće čak i u slučaju odlične balansiranoće antenske struje u napojnim tačkama. Jaga ante na daje dobar dokaz da se struje generišu i na nepriključenim žicama.

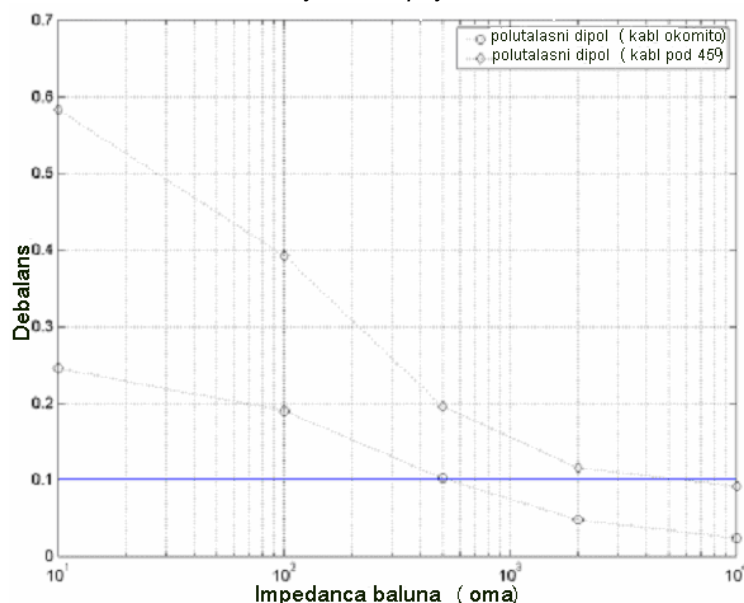
Slika 15 još jednom pokazuje odnos između porasta debalansa i zahteva za većom impedancijom baluna. Odatle se može zaključiti da se, pri asimetričnoj orijentaciji kabla, impedanca baluna mora povećati za red veličina. Pritom, treba imati u vidu da su vrednosti impedance baluna obično previše optimističke i da su u stvarnosti uvek niže, a okomito vodjenje napojnog kabla u dužini od više talasa je teško izvodljivo. Druge antene, asimetrične sekcije stuba, montažni elementi i drugo, takodje, imaju svoj uticaj na balansiranoću. U nastavku ćemo istražiti stvarnost.



Slika 13 SuperNEC model dipola sa zakošenim (45 stepena) napojnim kablom



Slika 14 Poredjenje struja u rezonantnom polutalasnom dipolu koji je napajan sa okomito i koso vodjenim napojnim kablom



Slika 15 - Uporedjenje debalansa u strujama sa rezistancom baluna za slucaj okomitog i zakošenog vodjenja napojnog kabla.

Stvarni balun: kako ga odmeriti?

Na slici 16 razmotreni su neki stvarni baluni. Tu je ukljucen dobro poznat cetvrt-talasni kratkospojeni rukavac ili bazuka-balun. Ovaj balun nastaje ubacivanjem dodatnog cilindra (rukavca) preko spoljne površine koaksijalnog kabla. Ovaj rukavac je kratkospojen na 1/4 talasne dužine od napojne tacke. Stvara se, dakle, druga transmisiona linija u kojoj je spoljni provodnik taj rukavac, a spoljni provodnik kabla postaje unutrašnji provodnik te nove linije. Idealna cetvrt-talasna transmisiona linija rezultuje u beskonacnoj impedanci na frekvenciji za koju je dugacka cetvrt talasa. Stvarna impedanca linije ce biti:

$$|Z| = Z_0 \tan h (\gamma x)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

gde je

α je gubitak na liniji u Neperima/metru (8.69 dB/m = 1 neper/m) i $\beta = \omega \sqrt{LC}$

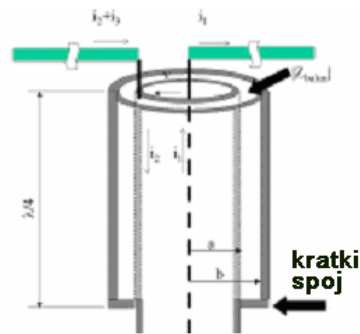
Z_0 je karakteristicna impedanca koaksijalne linije izmedju pletenice stvarnog napojnog kabla i rukavca i data je sa obrascem:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a}$$

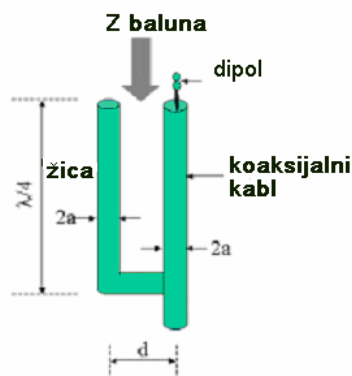
gde su "b" i "a" definisani na slici 16a.

Dve važne implikacije ovih jednačina su:

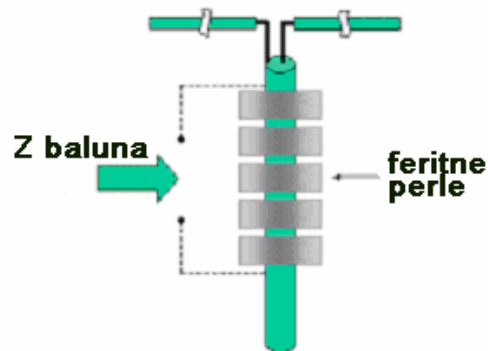
- ? Maksimalna vrednost se redukuje sa beskonacne vrednosti na neku nižu vrednost kako se "?" uvecava (napr. kako gubici u "novoj" koaksijalnoj liniji postaju veci).
- ? Impedanca se skalira direktno sa Z_0 , koja je vrlo niska ako je rukavac napravljen dovoljno tesno preko koaksijalnog kabla, korišćenjem samo spoljnog plasticnog omotaca kabla kao dielektrika i distancera. Dakle, bice znacajne dobiti ako se primeni cvrst dielektricki cilindar preko koaksijalnog kabla, cime se povecava odnos b/a , odnosno, impedanca baluna.



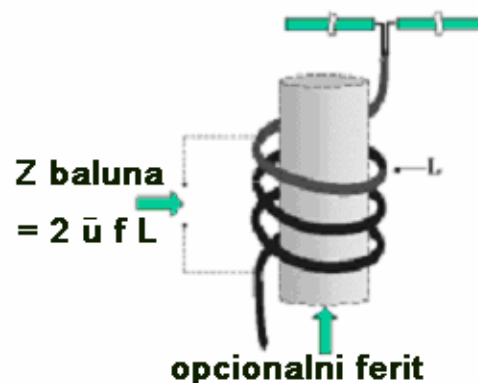
a) Balun tipa "rukavac" ili "bazuka"



b) Baluna tipa "bazuka" sa dve žice



c) Balun sa feritnim perlama



d) Balun sa smotanim kablom

Slika 16.- Cetiri tipa strujnih baluna (bez transformacije impedance)

Bolji pristup (barem teoretski) se nudi ne sa upotrebom rukavca vec pravljenjem dvo-žicne transmisione linije, gde se prikljucuje dodatna žica nominalno istog precnika kao za spoljni

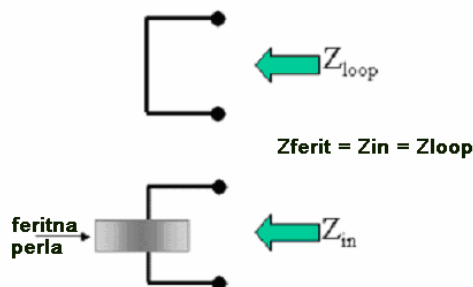
precnik koaksijalnog voda. Karakteristicna impedanca dvočicne linije je data sa:

$$Z_0 = 120 \ln(d/a)$$

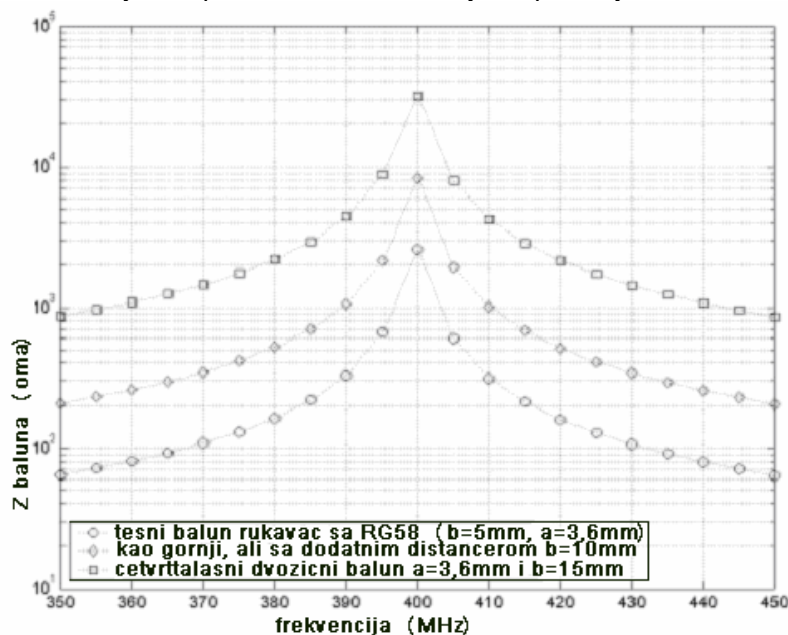
što rezultuje u vecim vrednostima nego za koaksijalnu situaciju. Za razmatranje ovog tipa linije je posebno važna cinjenica da balun sada može da predstavi asimetriju i treba ga postaviti duž pletenice kabla u položaj koji je okomit na žice dipola. Na slici 18 su prikazane kompjuterski izracunate performanse ovog tipa baluna. Uzeto je da je vrednost gubitaka 2.7 puta gubici u kablju RG-58. Ova vrednost je dobijena iz empirijske veze sa nekim merenjima koja su izvodjena na balunu sa "cvrsto" nataknutim rukavcem, zatim na balunu sa rukavcem koji je imao dielektricni cilindar i na balunu sa dve žice. Merenjima su dobijene vrednosti gubitaka a onda su primenjene jednacine da bi se dobile performanse baluna u odnosu na frekvencu. Odavde je nadjeno da je ta vrednost realna u granicama 2,5 - 3 puta gubici u RG-58. To je iznenadjujuce za slucaj baluna sa dve žice pošto je korišćen vazdušni dielektrik, a verovatno je tako zbog gubitaka u zracenju a ne zbog omskih ili dielektrickih gubitaka. Jasno je da dvočicni balun može da napaja normalni dipol u celom opsegu, savijeni dipol za oko 30 MHz a antene sa vecim impedancama za oko 10 MHz. "Cvrsti" balun ce zadovoljiti za oko 10 MHz na normalnom dipolu, ali neće biti prikladan za savijeni dipol ili više-impedantne antene.

Neki misle da se rešenje problema propusnog opsega nudi sa balunom sa feritnim perlama ili sa induktivnim balunima (slika 16c i 16d). Feritni balun se jednostavno formira navlacenjem feritnih torusa preko napojnog kabla do napojne tacke. Ako pritegnemo balun da ne bude duži od umnoška osmine talasa, tada se može uzeti oko 125 mm kao regija baluna. Upotrebom torusa Ø22 mm (materijal 61Fair-Rite), može se dobiti impedanca od 326 po torusu. Ovo rezultuje u virtuelno konstantnoj (široko-pojasnoj) impedanci od 2000 oma za ovaj tip i velicinu baluna. Može se koristiti za napajanje širokopojasnih antena sa ulaznom impedancom do oko 200-300 oma.

Jedan metod za merenje impedance torusa na VF frekvencijama prikazan je na slici 17. Impedanca se menja sa frekvencom i balun deluje samo ako se koriste prikladni torusi koji održavaju visoku impedancu preko celog frekventnog opsega koji se koristi.



Slika 17. - Metod merenja impedance za jedan feritni torus. Ukupna impedanca baluna dobija se jednostavnim množenjem impedance torusa sa brojem upotrebljenih torusa.



Slika 18 - Efikasnost baluna

Jednostavni induktivni balun prikazan je na slici 16d. Pravi se namatanjem napojnog kabla u zavojnicu kako bi se dobila induktanca L . Impedanca ovog baluna data je sa:

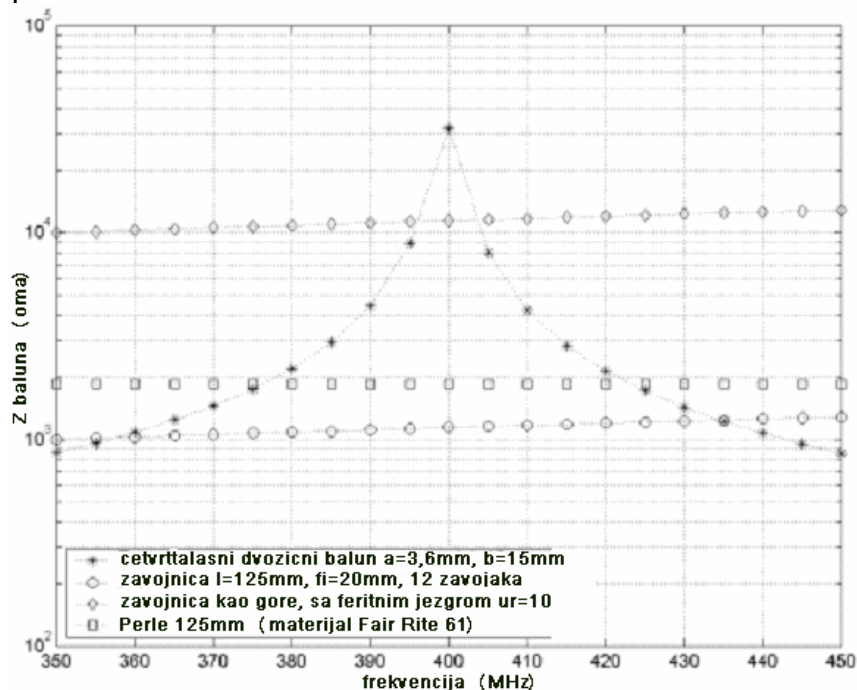
$$Z = 2\pi fL$$

Induktanca ovakve zavojnice, u odlicnim uslovima, data je sa:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \text{ (H)}$$

gde je A površina preseka zavojnice, l je dužina a N broj namotaja. Ova jednačina se treba smatrati kao gruba aproksimacija, jer u stvarnosti i drugi uslovi iz okruženja uticu na induktancu. Na višim frekvencijama, tu su i interni kapaciteti izmedju zavojaka. Za ovu studiju je uzeta zavojnica dužine 125 mm i precnika 20 mm, sa 12 namotaja. Odgovarajuca radna frekvencija je 300 MHz.

Slika 19 daje uporedjenje ovakvih baluna. Ocgledno je da su feritni baluni vrlo uspešni u pogledu širine radnog opsega. Opterećeni feritni balun je još impresivniji i može se nositi sa antenama i debalansima svih tipova. Takodje, kombinacije složenijih transformatorskih baluna uspešno koriste induktivno opterećenje. Baluni od prenosnih linija, popularni na kratkim talasima, koriste bifilarno ili trifilarno motane linije na feritnim jezgrima. Linije nose jednake struje ali suprotne po fazi, ne uzrokujući fluks, odnosno, induktancu. Nebalansirane struje rezultuju u fluksu i induktivitetu. Impedanca baluna se, dakle, može lako meriti merenjem impedance ovih "komon mod" komponenti.



Slika 19 - Poredjenje dvožicnog četvrttalasnog baluna, baluna sa feritnim perlama i induktivnih baluna (sa i bez feritnog jezgra)

Zaključak

Da bi se postigla puna upotrebna efikasnost baluna, neophodno je poznavanje antenskih tipova, pa su antene podeljene u tri vrste i na njima je istraživan odnos izmedju orijentacije i dimenzija prikazanih na slici 7. Ulazna impedanca dipola u rezonanci (285 MHz) je oko 70 O, savijenog dipola na 245 MHz oko 300 O, dok je za dipol u anti-rezonanci (565 MHz) 1700 O. Ove tri antene su, dakle, pokazale efekte antenske impedance na iznos nebalansiranih struja kao i zahteve u pogledu baluna.