

# Uticaj koaksijalnog kabla na sistem od četiri Yagi antene

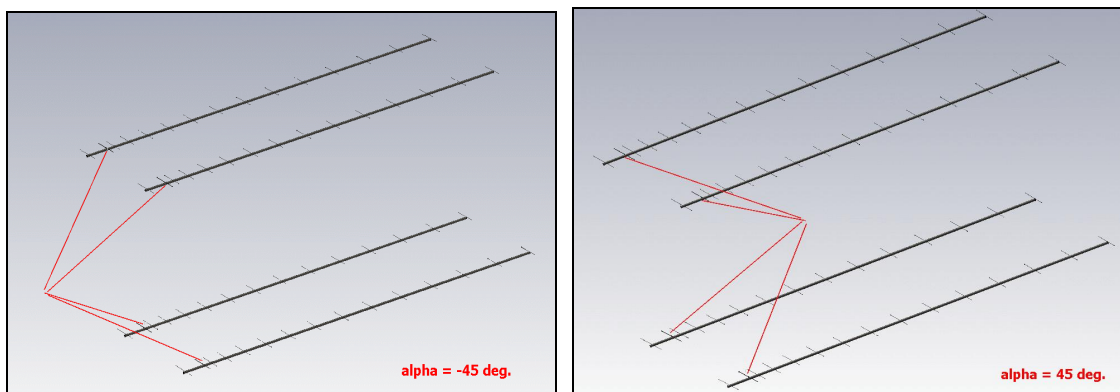
Dragoslav Dobričić, YU1AW

[dragan@antennex.com](mailto:dragan@antennex.com)

## Uvod

U prethodnom članku koji se sastoji iz dva dela [1, 2] prezentirali smo rezultate istraživanja kako koaksijalni kabl kojim se napaja antena utiče na karakteristike antene u situaciji kada je postignuta minimalna, a kasnije i puna interakcija između antene i kabla. Istraživanje je sprovedeno pomoću kompjuterskih simulacija šest različitih antena pod jednakim uslovima. U prvom delu članka rezultati su pokazali visok stepen zavisnosti uticaja od ugla *alfa* pod kojim kabl prilazi aktivnom dipolu antene. Ovo se dogodilo uprkos tome što je prilazni ugao *alfa* uvek ležao u ravni simetrije antene kako bi se održala minimalna interakcija između kabla i antene. Čak i pod tim idealizovanim uslovima i u odsustvu bilo kakvih drugih spoljašnjih uticaja sredine, rezultati simulacija su pokazali značajnu degradaciju karakteristika pojedinih antena.

U situacijama kada koristimo horizontalno složene antene u sistem, jednostavno nije moguće imati kabl koji uvek leži u vertikalnoj ravni simetrije antene. U drugom delu članka objavili smo rezultate sprovedenih istraživanja kako koaksijalni kabl utiče na karakteristike antene kada ne leži u ravni simetrije antene, kao što se obično koristi kada napajamo dve horizontalno postavljene spregnute antene ili četiri antene postavljene dve iznad dve, ali i iz bilo kog drugog razloga koji zavisi od zahteva mehaničkog rešenja noseće konstrukcije antenskog sistema. U toj situaciji, kabl ne leži u ravni simetrije antene, i prilazi aktivnom dipolu antene pod nekim uglom *beta* koji leži u ravni normalnoj na ravan simetrije antene. U tom slučaju, poništavanje nekih efekata je prisutno u manjem stepenu i možemo da očekujemo veći uticaj nego u situaciji kada kabl leži tačno u ravni simetrije antene. Međutim, ovde je takođe uočljivo da je koaksijalni kabl postao značajan deo zračeće strukture antene. Zbog značajnog uticaja i zračenja koaksijalnog napojnog kabla, dijagrami usmerenosti antena u obe ravni su veoma izobličeni.



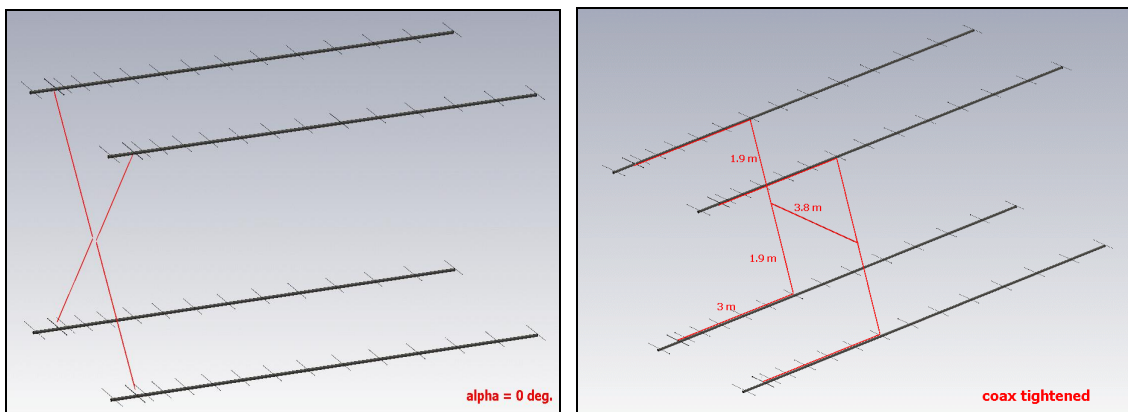
Sl.1 Sistem Yagi antena sa koaksijalnim kablom u piramidalnoj formi i sa vrhom okrenutim nazad (levo) i napred (desno)

U ovom članku ispitaćemo kako napojni koaksijalni kabl utiče na karakteristike četiri antene povezane u sistem, dve iznad dve, kada su kablovi aranžirani na nekoliko različitih načina.

U slučaju četiri antene povezane u sistem kablovi za napajanje obično imaju formu sova X sa deliteljem snage 1:4 u centru. Zajednička ravan u kojoj kablovi koji formiraju oblik slova X i u kojoj leži delitelj snage može biti ista ravan u kojoj takođe leže aktivni dipoli antena. Ako kablovi za napajanje formiraju takav simetričan oblik koji leži u jednoj zajedničkoj ravni tada možemo očekivati uzajamno poništavanje nekih efekata napojnog kabla na antene. Ali veoma često delitelj snage može biti pomeren napred ili nazad zavisno od drugih mehaničkih zahteva noseće konstrukcije i u tom slučaju kablovi formiraju piramidalni oblik sa deliteljem snage na vrhu piramide. U takvim slučajevima poništavanje efekata može biti drugačije i možemo očekivati drugačiju veličinu uticaja kabla na antene.

Iz rezultata prethodnih istraživanja koji su datu u prethodnim člancima, koji pokazuju da se minimalni uticaji postižu kada se kabl vodi učvršćen uzduž antenskog nosača i noseće strukture, odlučili smo da istražimo antenski sistem sa kablom formiranim u obliku slova H kao što je dato na Sl. 2-desno. To je, pored piramidalne forme okrenute vrhom napred, date na Sl. 1-desno, najčešće korišćen način napajanja sistema od četiri antene. Sa takvim načinima napajanja je moguće da se, obično dosta masivan, delitelj snage jednostavno pričvrsti za noseću strukturu, čime se ispunjava jedan od važnih mehaničkih zahteva. Kablovi formirani u obliku slova X su takođe dosta uobičajen način napajanja kada se kablovi spajaju direktno bez upotrebe masivnog delitelja snage koji ima sposobnost transformisanja impedanse. Piramidalni oblik okrenut vrhom nazad je relativno retko u upotrebi iako daje neke prednosti u karakteristikama, ali je mnogo komplikovaniji u mehaničkom pogledu i čini ceo antenski sistem nepotrebno većim.

Na Sl. 1 i 2 možemo videti modele antenskih sistema od četiri antene postavljene dve iznad dve sa napojnim kablovima aranžiranim na nekoliko različitih načina.



Sl.2 Sistem Yagi antena sa koaksijalnim kablom formiranim da leži u jednoj ravni kao slovo X (levo) i kao slovo H pričvršćen za nosač i noseću strukturu (desno).

### Uslovi pod kojima su vršene simulacije

Svih šest Yagi antena su simulirane pod jednakim uslovima. Provodni okrugli nosač u vidu cevi prečnika 50 mm postavljen je ispod elemenata tako da rastojanje između ose nosača i ose elemenata iznosi 40 mm. To predstavlja prilično dobar prikaz simulacije Yagi antene sa izolovanim elementima od nosača, koji su montirani na nosač pomoću

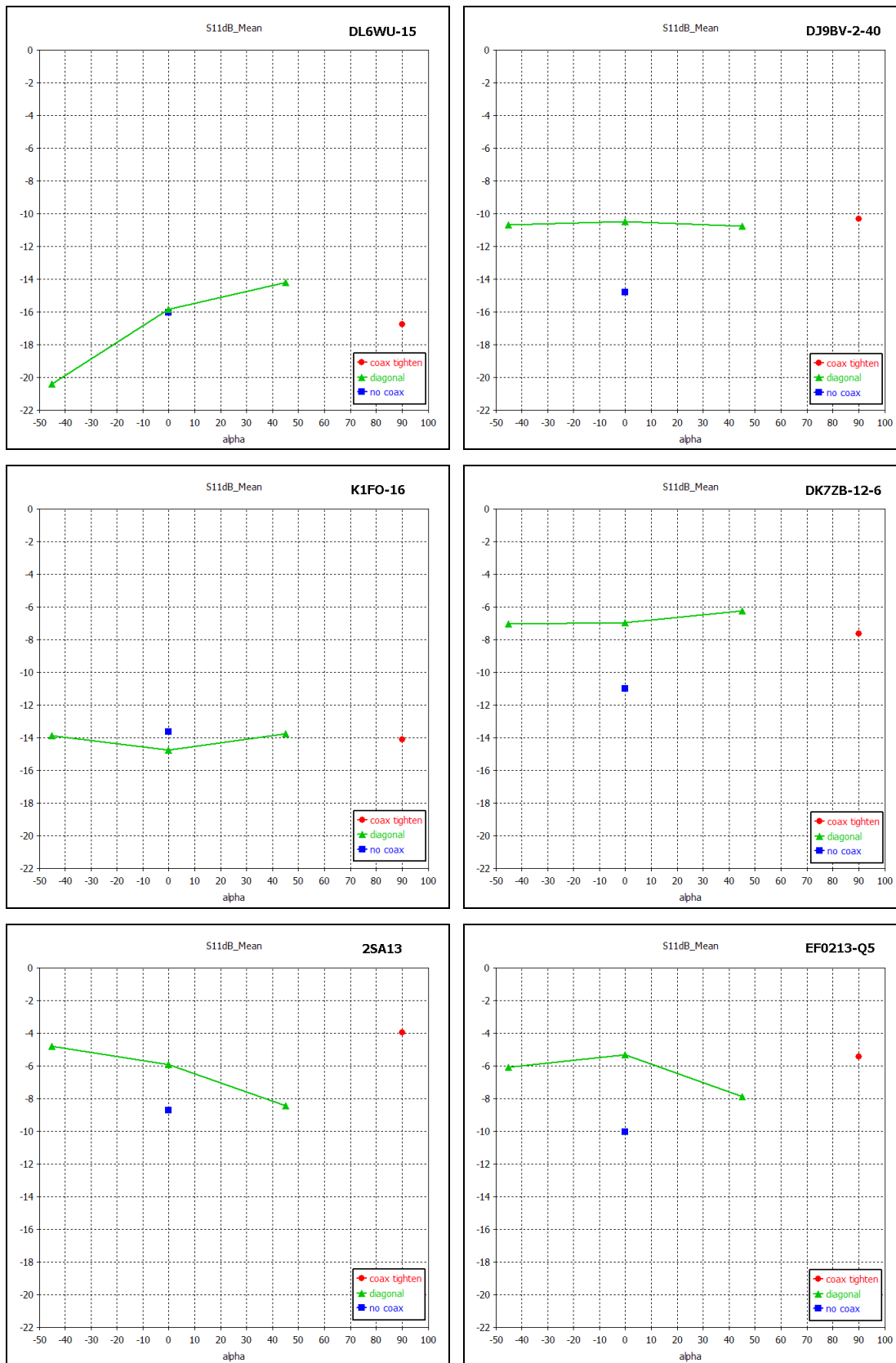
plastičnih izolatora sa vrlo malom relativnom dielektričnom konstantom i na visini od 15 mm iznad gornje površine nosača. Svaka Yagi antena sa elementima postavljenim u horizontalnoj ravni je napajana sa koaksijalnim kablom određenog prečnika koji dolazi od zajedničkog delitelja snage ka zračućem elementu na nekoliko različitih načina.

Ugao *alfa* je definisan na isti način kao u prethodnom članku i on leži u ravni simetrije antene. Ugao *beta*, koji leži u ravni koja je normalna na osu nosača, takođe je definisan na isti način kao u prethodnom članku. Zadavanjem različitih vrednosti za ta dva ugla i za dužinu kabla, moguće je postavljanje kabla u bilo koji položaj i formiranje različitih načina napajanja antene.

Kao i u prošlom članku, koaksijalni vod je 10 mm u prečniku, i njegov gornji kraj se nalazi u blizini donje površine nosača ali je ne dodiruje. Oba kraja spoljašnjeg provodnika koaksijalnog kabla ostavljena su nepovezana. RF izvor je postavljen i spojen za krakove u sredini izolacionog procepa otvorenog dipola. Na ovaj način je predstavljena simulacija antenskog sistema napajanog koaksijalnim kablom preko idealnog 1:1 baluna koji predstavlja beskonačnu impedansu za „common mode“ struje koje teku po spoljašnjoj površini spoljašnjeg provodnika koaksijalnog kabla. Ovakav aranžman daje dobre mogućnosti da se istraži uticaj koaksijalnog kabla na antenski sistem samo usled indukovanih struja koje teku po spoljašnjoj površini koaksijalnog kabla kao posledica bliskog elektromagnetnog polja antene.

Uslovi pod kojima su vršene simulacije su vrlo slični praktičnoj situaciji kada je sistem od četiri Yagi antene postavljen na vrh visokog i tankog stuba, koji nije deo simulacionog modela antene. Rastojanje između nosača antena je 3.8 m u obe ravni što je vrlo blizu optimalnom rastojanju za date dužine nosača od 4 talasne dužine i dobijenih direktivnosti ispitivanih antena.

Simulirano je nekoliko različitih situacija. Prva je kada kabl dolazi od svake od antena iz pravca zajedničkog delitelja koji se nalazi u centru između antena i leži u istoj ravni sa kablovima i aktivnim dipolima antena i tako formira oblik slova X. Druga je kada se prethodni aranžman promeni zbog toga što delitelj snage ne leži u zajedničkoj ravni sa kablovima i aktivnim elementima antena. U toj situaciji možemo da imamo dva moguća mesta za delitelj, jedno je ispred zajedničke ravni a drugo iza. U oba slučaja kablovi formiraju oblik piramide, ali u prvom slučaju sa vrhom okrenutim napred, a u drugom okrenutim nazad u odnosu na smer zračenja antena. I na kraju, moguće je voditi kablove pričvršćene za nosač antene i noseću strukturu antenskog sistema koja je u obliku slova H, leži u ravni normalnoj na ose antena i pomerena je oko 1.5 talasnih dužina napred u odnosu na ravan u kojoj leže aktivni elementi antena.



Sl. 3. Srednja vrednost ulaznog povratnog slabljenja u opsegu 144...146 MHz za različite konfiguracije kabla i tipove antena

Ove simulacije bi trebale, zajedno sa prethodnim [1, 2] da pruže odgovor na pitanje na koji način je najbolje voditi koaksijalni kabl u odnosu na stub, nosač antene i druge moguće noseće strukture antene i koliko su različite antene osetljive na to.

Za ovaj posao opet je korišćen profesionalni program za simulaciju antena baziran na FIT metodi umesto uobičajenih MoM baziranih programa koji su se već ranije pokazali neodgovarajući zbog nekoliko neprihvatljivih programskih ograničenja [2]. Slično kao i u prethodnim člancima, uticaj kabla je posmatran na sledećim karakteristikama antena:

1. Srednja vrednost ulaznog povratnog slabljenja ( $S_{11}$ ) u opsegu 144...146 MHz
2. Srednja vrednost širokopojasne usmerenosti u opsegu 144...146 MHz
3. Srednja vrednost Q faktora antene u opsegu 144...146 MHz
4. Dijagram usmerenosti antene u E i H ravni na frekvenciji 144.5 MHz

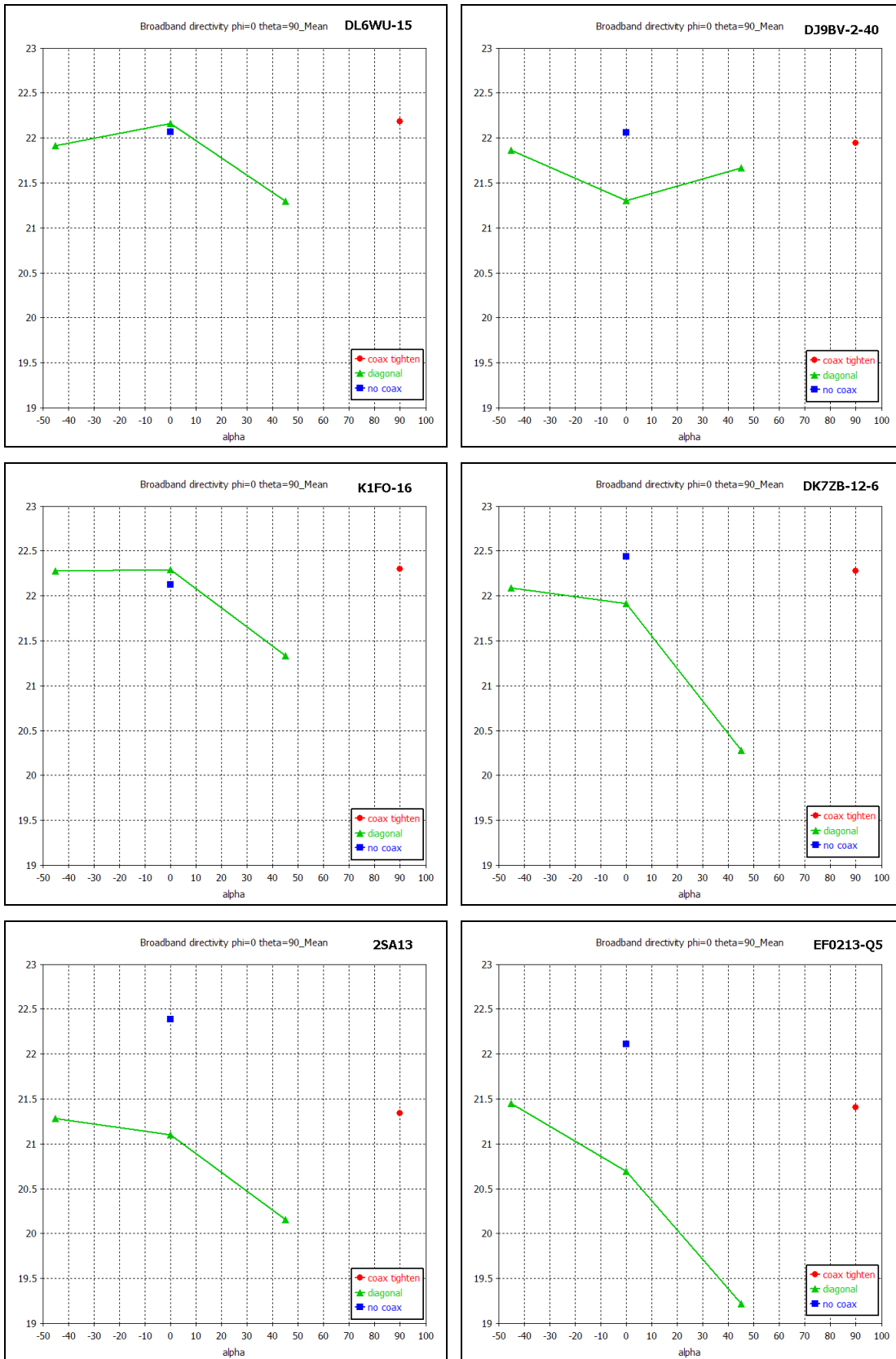
Na prikazanim dijagramima oznaka „*diagonal*“ sa uglom alfa = -45 st. odgovara piramidalnom obliku napojnih kablova sa vrhom okrenutim nazad (Sl. 1-levo), sa uglom alfa = 0 st. odgovara kablovima u obliku slova X (Sl. 2-levo) i sa uglom alfa = 45 st. odgovara piramidalnom obliku napojnih kablova sa vrhom okrenutim napred (Sl. 1-desno). Oznaka „*coax tighten*“-ed odgovara kablovima u obliku slova H koji su pričvršćeni za antenski nosač i noseću strukturu u vidu okvira u obliku slova H (Sl. 2-desno), dok oznaka „*no coax*“ znači da su iste četiri antene sa nosačima elemenata ali bez koaksijalnih kablova i noseće strukture antena simulirane kao referenca za poređenje.

U NEC i drugim MoM programima obično se antene simuliraju bez nosača elemenata antene i bez koaksijalnih kablova za napajanje. Zbog toga se dobijaju vrlo idealizovani rezultati i oblici dijagrama usmerenosti. To je obično tako zbog činjenice da ti programi ne mogu precizno da simuliraju nosače antena i kablove za napajanje u blizini antene zbog dobro poznatih i dokumentovanih ograničenja samih programa [3].

### **Uticaj na ulazno povratno slabljenje**

Očekivan je nešto veći uticaj koaksijalnog kabla na ulazno povratno slabljenje i SWR antene zbog takve pozicije kabla koja ne proizvodi minimalnu interakciju između antene i kabla kao u prethodnom članku [2]. Sprovedene simulacije su dale jasnu potvrdu da prisustvo i položaj napojnog koaksijalnog kabla, koji leži van ravni simetrije antene, proizvodi mnogo značajne promene ulazne impedanse antene i ulaznog povratnog slabljenja. Ali postoji velika razlika između pojedinih načina kako se antene napajaju kao i samih antena.

DL6WU i K1FO antenski sistemi su pokazali da su vrlo tolerantni na način kako su napojni kablovi aranžirani. U svim simuliranim načinima napajanja ove antene skoro da nisu pokazale nikakvu degradaciju ulaznog prilagođenja, tj. srednje vrednosti ulaznog povratnog slabljenja u poređenju sa istim antenskim sistemom simuliranim bez kablova i noseće strukture kao reference (Sl. 3). To je rezultat njihove širokopojasne prilagođenosti tako da frekvencijsko pomeranje krivih povratnog slabljenja usled uticaja kablova ne proizvodi skoro nikakvu promenu srednje vrednosti ulaznog povratnog slabljenja.



Sl. 4. Srednja vrednost širokopojasne direktivnosti u opsegu 144...146 MHz za različite konfiguracije kabla i tipove antena

Svi ostali antenski sistemi su pokazali neki stepen degradacije ulaznog povratnog slabljenja zbog uticaja kablova na antene pri svim načinima napajanja u poređenju sa „no coax“ referencom. Antene sa nižim Q faktorom ponovo su pokazale bolje ponašanje i mnogo manju osetljivost na uticaj kabla.

Vrlo je interesantno da skoro za sve antene nema jednostavne i očigledne korelacije između degradacije ulaznog povratnog slabljenja i degradacije direktivnosti ili pojačanja antene. To znači da **ne možemo** lako i intuitivno da izvlačimo zaključke o stepenu degradacije direktivnosti na osnovu degradacije ulaznog povratnog slabljenja ili SWR-a!

### **Uticaj na širokopojasnu usmerenost**

Kao što smo pomenuli u prethodnom članku [1, 2], krive širokopojasne usmerenosti se pomeraju po frekvenciji pod uticajem prisustva i položaja koaksijalnog napojnog kabla slično kao pod uticajem provodnog nosača ili vlage na elementima [3, 4]. Antene sa višim Q faktorom imaju uže krive širokopojasne usmerenosti i, zbog veće osetljivosti na spoljašnje uticaje sredine, njihove krive se pomeraju više. Kao rezultat većeg frekvencijskog pomeranja krivih usmerenosti, one imaju značajno veću promenu srednje vrednosti usmerenosti u radio-amaterskom opsegu.

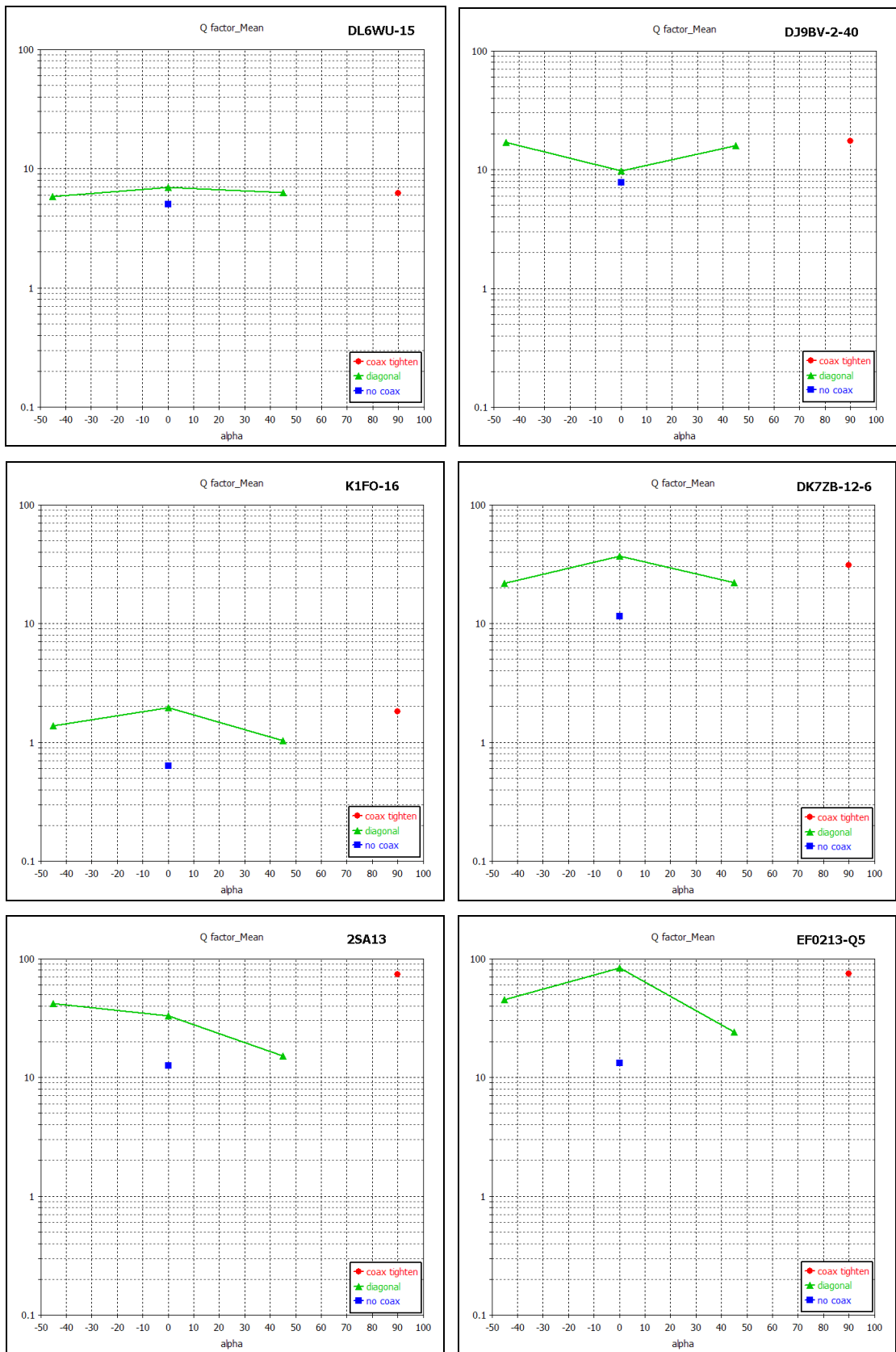
Antenski sistemi sastavljeni od DL6WU i K1FO antena gotovo da nisu imali nikakvu degradaciju direktivnosti za „coax tighten“ i „diagonal“ aranžman kablova sa uglom alfa = -45 st. i alfa = 0 st. DJ9BV i DK7ZB antenski sistemi su imali veoma malu degradaciju direktivnosti za „coax tighten“ aranžman u odnosu na „no coax“ referencu. Dakle, sve antene osim 2SA13 i EF0213-Q5 su sa „coax tighten“ aranžmanom kablova postigle skoro istu srednju vrednost direktivnosti kao i sa „no coax“ referencom (Sl. 4).

Najozbiljnija degradacija kod svih antena, a posebno onih sa višim Q faktorom, je kada kablovi dolaze sa prednje strane antene (alfa = 45 st.), izuzev možda DJ9BV antene koja ima za nijansu veću degradaciju sa uglom alfa = 0 st. Nažalost, ovo je vrlo često korišćena konfiguracija kablova jer ona u praksi daje neke mehaničke prednosti pri montaži delitelja snage.

### **Uticaj na Q faktor antene**

Promena srednje vrednosti Q faktora antene takođe sledi istu zakonitost kao ulazno povratno slabljenje i usmerenost antene. Pojedinačne antene sa višim Q faktorom trpe mnogo značajnije povećanje Q faktora zbog prisustva i položaja kabla nego antene sa nižim Q faktorom. Ovo je vrlo slično promeni Q faktora antene usled uticaja vlage na njenim elementima kao što smo već ranije ustanovili i opisali u ranijim člancima [4, 5].

Međutim, ovde je takođe uočljivo da je koaksijalni kabl postao značajan deo zračeće strukture antene. Pored ozbiljne degradacije dijagrama usmerenosti antene, zračenje koaksijalnog kabla takođe menja ulaznu impedansu antene pored ostalog i promenom otpornosti zračenja i otpornost gubitaka. Svi ovi faktori zajedno menjaju Q faktor svake pojedinačne antene a time i celog sistema.



Sl. 5. Srednja vrednost Q faktora u opsegu 144...146 MHz za različite konfiguracije kabla i tipove antena



Antenski sistemi koji se sastoje od DL6WU, K1FO, DJ9BV i donekle od DK7ZB antena zadržale su nisku vrednost Q faktora sa svim konfiguracijama napojnih kablova u odnosu na „no coax“ referentnu vrednost. Preostale dve antene, 2SA13 i EF0213-Q5, povećale su svoje Q faktore približno 2-5 puta u odnosu na „no coax“ referentne vrednosti (Sl. 5). Možda je najinteresantnije da obe antene imaju vrlo visok Q faktor sa „coax tighten“ konfiguracijom kablova koja je vrlo često korišćena u praksi. Takođe je interesantno da antene sa visokim Q faktorom kada su u sistemu, ali bez kablova i noseće strukture, imaju niži Q faktor nego što ga ima pojedinačna antena.

### **Uticaj na dijagram usmerenosti antene**

Dijagrami usmerenosti u E i H ravni za svih šest antenskih sistema u zavisnosti od konfiguracije napojnih kablova dati su na Sl. 6 i Sl. 7.

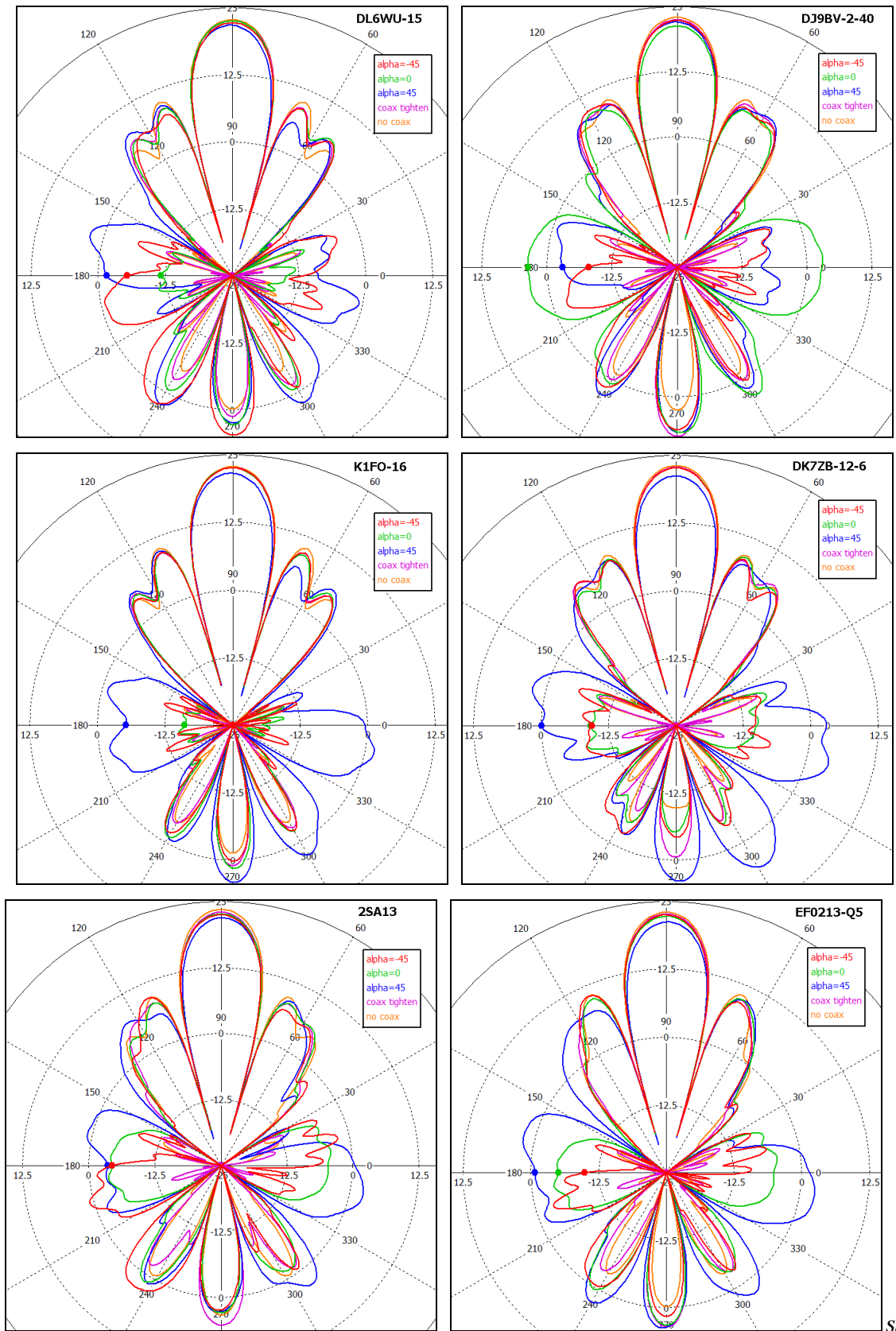
Zbog značajnog uticaja i zračenja koaksijalnog napojnog kabla, dijagrami usmerenosti antena u obe ravni su veoma izobličeni. Konfiguracija kabla „coax tighten“ generalno pokazuje najmanje izobličenja dijagrama u poređenju sa „no coax“ referentnim dijagramom. Međutim, očigledno je, kao što je to primećeno i napomenuto u prošlom članku, da svaka antena ima neki položaj kabla koji je njena „Ahilova peta“ pri kome nastaje najozbiljnije izobličenje dijagrama usmerenosti. Sa druge strane pak, stepen izobličenja dijagrama usmerenosti veoma zavisi od tipa antene.

Za sve simulirane antene najozbiljnija izobličenja dijagrama usmerenosti su za „diagonal“ konfiguraciju kablova sa uglom  $\alpha = 45$  st., tj. kada kabl dolazi sa prednje strane. Ovo je vrlo popularan i često korišćen način aranžiranja napojnih kablova u praksi. Za K1FO antene i donekle za DK7ZB antene ovo je jedini loš način aranžiranja napojnih kablova i svi ostali načini napajanja ne proizvode tako velika izobličenja njihovih dijagrama. Za sve ostale antene „diagonal“ aranžman kablova daje izobličen dijagram za skoro sve vrednosti ugla  $\alpha$  u većoj ili manjoj meri zavisno od tipa antene.

### **Zaključak**

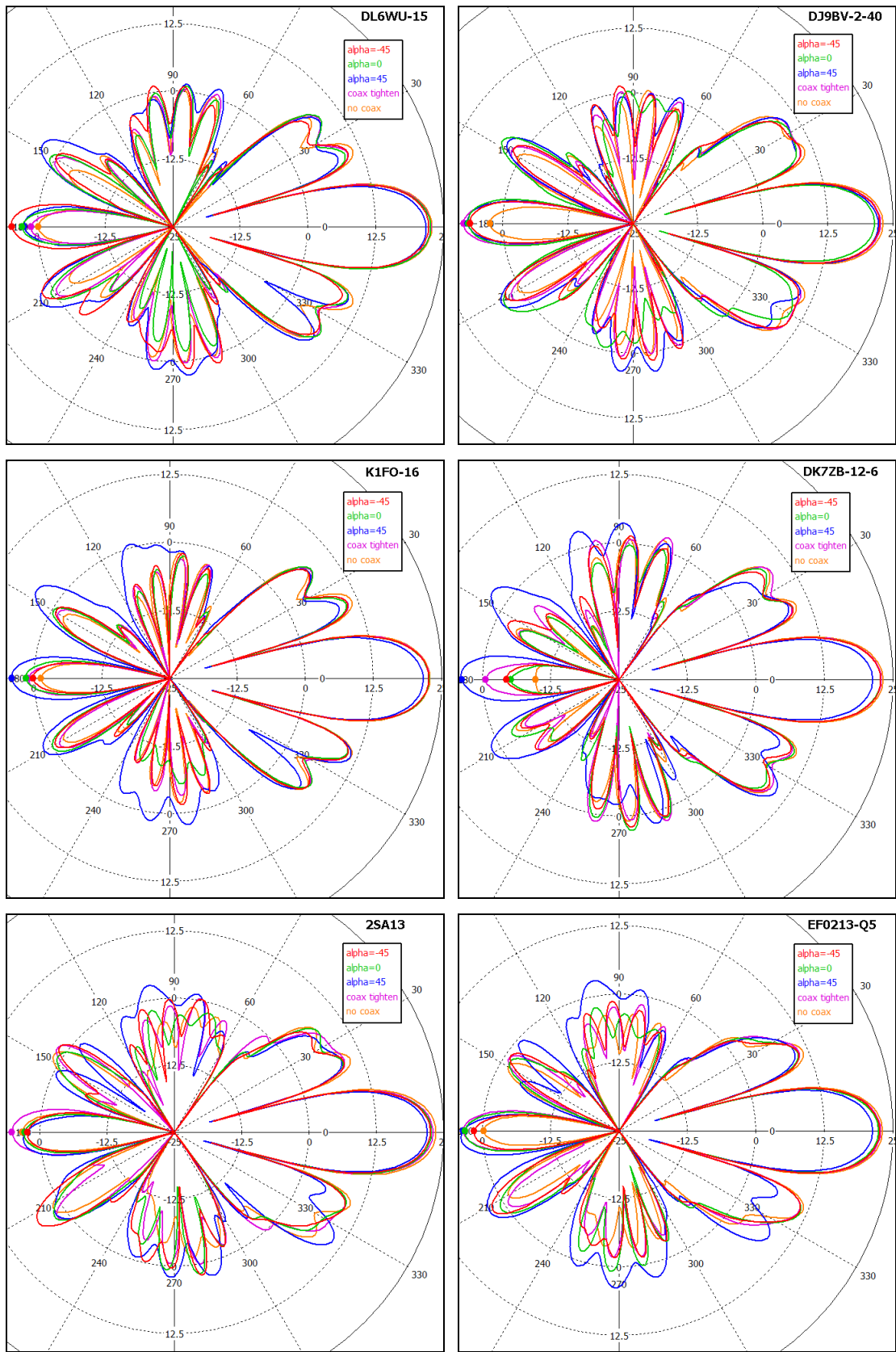
U ovom članku prezentirali smo rezultate istraživanja kako koaksijalni napojni kabl, koji je formiran na nekoliko različitih načina, utiče na karakteristike antenskog sistema od četiri antene.

Prikazani rezultati sada mogu da daju odgovore na pitanja o najboljem načinu aranžiranja koaksijalnog kabla za napajanje antenskog sistema. Ako već moramo da vodimo kabl van ravni simetrije antene onda nam rezultati ovih simulacija jasno pokazuju da je najbolje voditi kabl od aktivnog dipola uzduž nosača antene i noseće strukture kao što je dato na Sl. 2-desno. Takođe, ustanovljeno je da je najbolji položaj kabla koji proizvodi najmanji uticaj na karakteristike antene praktično isti skoro za sve tipove antena sa izuzetkom nekih antena sa višim Q faktorom.



Sl. 6. Dijagrami zračenja u E ravni na 144.5 MHz za svih šest antena u zavisnosti od konfiguracije kabla

Sl.



Sl. 7. Dijagrami zračenja u H ravni na 144.5 MHz za svih šest antena u zavisnosti od konfiguracije kabla

Izgleda da individualne antene sa više potisnutim sporednim snopovima, i prema tome višim Q faktorom, ne mogu da daju nikakvu korist u postizanju boljeg dijagrama kod antenskih sistema zbog njihove veće osetljivosti na ostale antene u sistemu, kablove za napajanje i noseću konstrukciju. One ne mogu u potpunosti da iskoriste svoj čist dijagram zbog svoje osetljivosti na uticaje okoline zbog koje obično trpe velika izobličenja dijagrama.

Sa druge strane, antene sa manje potisnutim sporednim snopovima i nižim Q faktorom trpe manji uticaj sredine i kao rezultat obično imaju manje ukupno povećanje sporednih snopova. Jasno je vidljivo iz prezentiranih dijagrama zračenja da obe vrste antena, i one sa visokim Q faktorom i bolje potisnutim sporednim snopovima, i one sa niskim Q faktorom i slabije potisnutim sporednim snopovima, imaju slično potiskivanje sporednih snopova kada su povezane u antenski sistem od više antena.

Zbog toga izračunavanje efektivne šumne temperature za antenske sisteme bez uzimanja u obzir konfiguracije kablova i noseće strukture je vrlo varljivo. Čak i izračunavanje efektivne šumne temperature za pojedinačnu antenu bez uzimanja u obzir kabla, njegove pozicije u odnosu na antenu, nosača i noseće strukture na stubu je veoma netačno. Bilo kakvo poređenje i rangiranje antena prema tako izračunatim rezultatima za šumnu temperaturu antene izgleda prilično iluzorno!

Ove simulacije su nedvosmisleno potvrdile da antene sa nižim Q faktorom [5] u svim uslovima imaju manju degradaciju karakteristika. Svi ovi uticaji na najvažnije osobine antene na očigledan način ilustruju verovatno ponašanje i osetljivost antene na spoljašnje uticaje okoline u praktičnim radnim uslovima.

U jednom od ranijih članaka [4] na bazi analize i poređenja preko 50 različitih tipova antena zaključili smo da za poslednjih 30 godina nema značajnog napretka u poboljšanju karakteristika Yagi antena. Tada je ova izjava nekom možda mogla da zvuči suviše grubo i potcenjivački. Ali sada, sa svim ovim rezultatima simulacija, možemo jasno videti da su antene koje se najbolje ponašaju u svim uslovima upravo one koje su projektovane pre mnogo, mnogo godina!

#### Reference:

1. Dragoslav Dobričić, YU1AW, **Coaxial Cable Feeder Influence on Yagi Antenna – Part 2**, *antenneX*, October 2009, Issue No. 150. *Prevedeno na srpski jezik*: Dragoslav Dobričić, YU1AW, **Uticaj koaksijalnog kabla na Yagi antenu – 2 deo**, [http://www.yu1aw.ba-karlsruhe.de/Uticaj\\_koaksa\\_na\\_Yagi-2.pdf](http://www.yu1aw.ba-karlsruhe.de/Uticaj_koaksa_na_Yagi-2.pdf)
2. Dragoslav Dobričić, YU1AW, **Coaxial Cable Feeder Influence on Yagi Antenna**, *antenneX*, September 2009, Issue No. 149. *Prevedeno na srpski jezik*: Dragoslav Dobričić, YU1AW, **Uticaj koaksijalnog kabla na Yagi antenu**, [http://www.yu1aw.ba-karlsruhe.de/Uticaj\\_koaksa\\_na\\_Yagi.pdf](http://www.yu1aw.ba-karlsruhe.de/Uticaj_koaksa_na_Yagi.pdf)
3. Dragoslav Dobričić, YU1AW, **Boom Influence on Yagi Antenna**, *antenneX*, May 2009, Issue No. 145. *Prevedeno na srpski jezik*: Dragoslav Dobričić, YU1AW, **Uticaj nosača na Yagi antenu**, <http://www.yu1aw.ba-karlsruhe.de/Uticaj%20nosaca%20na%20Yagi%20antenu.pdf>

4. Dragoslav Dobričić, YU1AW, **Yagi Antenna Design Sensitivity in Practice**, *antenneX*, November 2008, Issue No. 139. *Prevedeno na srpski jezik*: Dragoslav Dobričić, YU1AW, **Osetljivost Yagi antena u praksi**, <http://www.yu1aw.ba-karlsruhe.de/Osetljivost%20Yagi%20antena%20u%20praksi.pdf>
5. Dragoslav Dobričić, YU1AW, **Yagi Antenna Q factor**, *antenneX*, July 2008, Issue No. 135.

(Članak je preveden iz časopisa *antenneX*, November 2009.)