

Q-faktor Yagi Antene

Dragoslav Dobričić, YUIAW

Uvod

U jednom od mojih prethodnih članaka [1] predložio sam korišćenje SWR radnog opsega antene kao činioca u određivanju ukupnog kvaliteta Yagi antene.

Širina SWR opsega je važna kao relativna mera Q-faktora antene, ponovljivosti njenih karakteristika i osetljivosti na uticaje drugih objekata koji se nalaze u njenom bliskom polju. Zbog toga širina SWR radnog opsega ili Q-faktora učestvuju u određivanju ukupnih karakteristika svake antene.

Radni opseg određen vrednošću ulaznog SWR-a je relativna mera Q-faktora antene i veoma je važan faktor pri određivanju ukupnog kvaliteta Yagi antene.

U ovom članku želim da pokažem kako možemo da izračunamo Q-faktor antene i upotrebimo ga u određivanju kvaliteta antene umesto ranije predloženog SWR radnog opsega [1].

Važnost Q-faktora antene

Možemo da diskutujemo o tome koliko je uticaj Q-faktora na kvalitet antene značajan, kolike veličine treba da bude za naše potrebe i ciljeve i šta želimo da postignemo našim antenama ali ne smemo da zaboravimo da zaista dobra antena mora da ima nizak Q-faktor i visoku vrednost otpornosti zračenja, a ne samo maksimalno moguće pojačanje! Mogućnost realizacije tog projektovanog maksimalnog pojačanja u praksi zavisi direktno i skoro isključivo od Q-faktora antene.

To je slično kao što realizacija niskošumnih karakteristika antene u praksi (povećani odnos signal/šum) veoma mnogo zavisi od ekvivalentne šumne temperature okoline kao što je objašnjeno u već pomenutom prethodnom članku [1]. U praksi, antena će imati one šumne karakteristike koje joj određuje stvarno okruženje bez obzira koliko su uzete veštački niske i nerealne vrednosti za šumnu temperaturu neba pri oceni njene G/T vrednosti radi uvrštavanja na neku listu. Ako hoćemo da znamo kako će neka antena funkcionisati u praksi moramo pri oceni njenih šumnih karakteristika da uzmemo one vrednosti šumne temperature zemlje i neba koje su najverovatnije. Svakako da to nije i ne može biti apsolutno minimalna moguća vrednost šumne temperature neba za datu frekvenciju koja postoji na jednom vrlo malom i ograničenom delu neba, kao što se sada uzima [1].

Antene sa visokim Q-faktorom i sa uskim radnim SWR opsegom ili malom vrednošću otpornosti zračenja, imaju veliku osetljivost na uticaje okoline (kišu, sneg, led, inje, druge bliske antene, stub, noseće konstrukcije i ostale objekte) i slabu ponovljivost karakteristika u praksi. Nije dobro ako je SWR radni opseg VHF/UHF Yagi antene širok samo onoliko koliko je neophodno za njeno korišćenje u posebne namene, na primer 200 kHz opseg za EME rad.

Kakva je korist od antene sa velikim projektovanim pojačanjem ako je toliko kritična da je nemoguće ostvarenje tog pojačanja u praksi zbog vrlo velike osetljivosti i promene karakteristika pod uticajem okoline? Računarom optimizovano veliko pojačanje antene

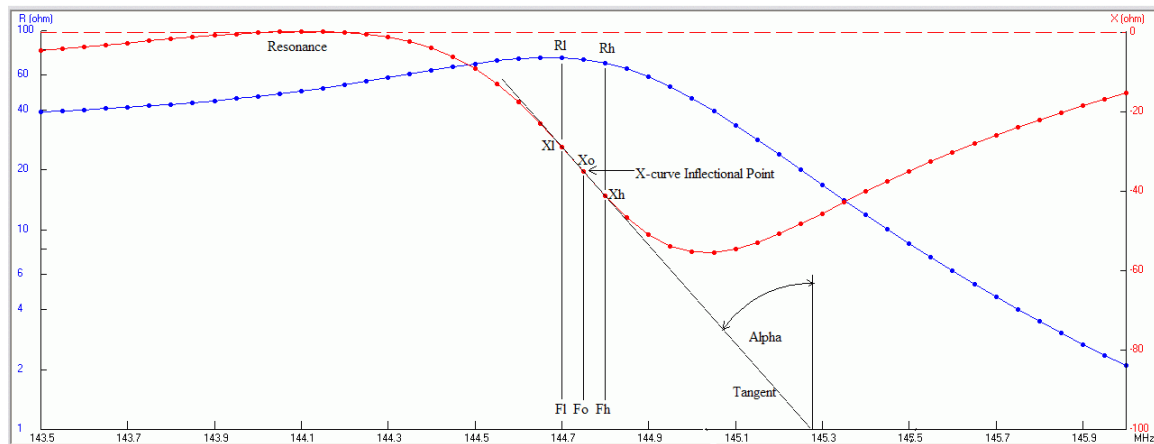
može biti realizovano u praksi jedino ako su radni uslovi antene u praksi jednaki uslovima u kojima je ona bila optimizovana u programu za simulaciju i optimizaciju.

Obično je tokom računarskih simulacija i optimizacija okruženje antene potpuno prazan slobodni prostor (free space) bez ikakvih drugih objekata u njemu. Nasuprot tome, antene u praksi nikada ne rade u takvim uslovima! U praksi mnoštvo različitih objekata nalazi se u blizini i oko antene koji uopšte nisu predstavljeni u modelu programa za antenske simulacije i optimizacije. Uticaj svih ovih objekata na karakteristike antene biće minimalan samo ukoliko antena nije osetljiva na uticaje okoline.

Jedini način da se sačuvaju karakteristike antene uprkos negativnim, razdešavajućim i destruktivnim uticajima okoline je da se sagradi antena sa niskim Q-faktorom. Ovo je posebno važno za Yagi antene zato što one postižu svoje visoke performanse zahvaljujući vrlo preciznom balansu amplituda i faznih stavova struja koje teku u pasivnim elementima antene. Bilo kakvo razdešavanje i uticaj okoline na taj balans može veoma ozbiljno da naruši karakteristike antene, posebno ako je antena kritična zbog visokog Q-faktora. Veliki antenski sistemi sa mnogo individualnih antena spojenih u zajednički sistem ili sa mnogo bliskih antena za druge opsege na istom stubu su takođe veoma podložni velikim međusobnim uticajima.

Nizak Q-faktor antene značajno povećava verovatnoću da će karakteristike antene, koje su dobijene kao rezultat simulacije i optimizacije u idealizovanim uslovima okruženja, biti realizovane i u praksi.

To znači da ostvarenje predviđenog pojačanja individualne antene ili ukupnog pojačanja antenskog sistema, dijagrama zračenja, radnog opsega određenog vrednostima adekvatnog prilagođenja i pojačanja, odgovarajuća vrednost ulazne impedanse svake antene u sistemu a time i pravilna raspodela snaga i faza u njima, ponašanje antenskog sistema u različitim vremenskim uslovima i reakcija na uticaje okolnih objekata, sve to veoma mnogo zavisi od vrednosti Q-faktora antene. To je razlog zašto je Q-faktor, pored pojačanja antene, jedan od najvažnijih faktora svake antene. Još jedan važan faktor antene na frekvencijama iznad oko 1 GHz je njena efektivna šumna temperatura.



Primer proračuna Q-faktora antene pomoću dijagrama realnog i imaginarnog dela ulazne impedanse

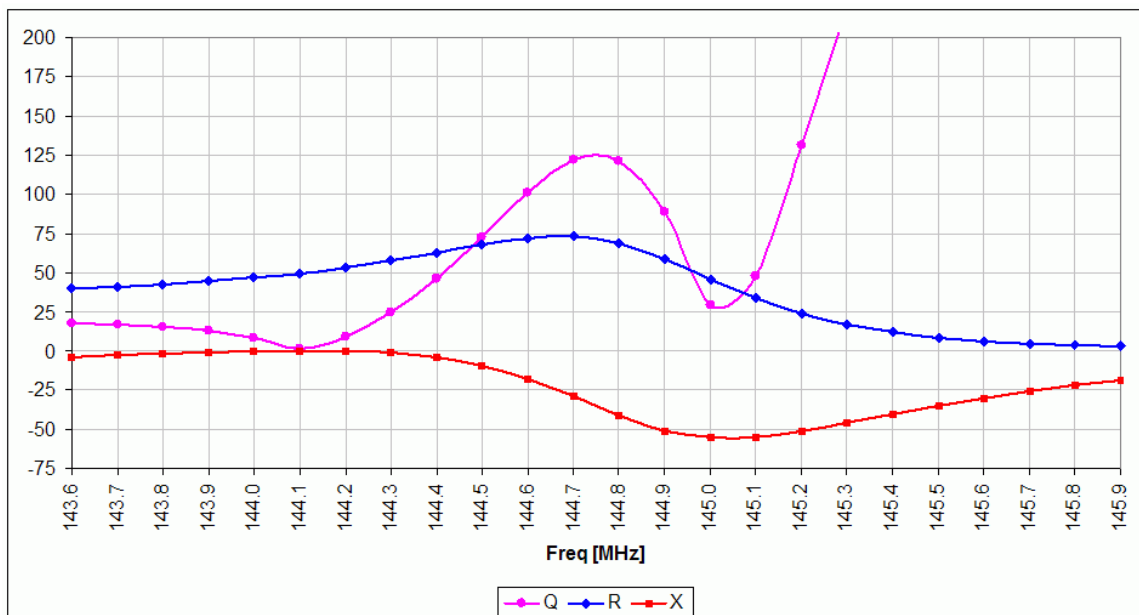
Izračunavanje Q-faktora antene

Standardni način izračunavanja Q-faktora antene u rezonanciji ili na bilo kojoj drugoj frekvenciji dato je u prilogu članka [2] i u knjizi [3].

Proračun koristi date formule i može biti urađen koristeći dijagram simuliranih vrednosti realnog i imaginarnog dela ulazne impedanse antene. Sa tog dijagrama moguće je dobiti vrednosti za R i X za različite frekvencije u blizini rezonance ili na bilo kojoj drugoj frekvenciji u radnom opsegu. Takav način proračuna Q-faktora antene daje mnogo preciznije rezultate nego proračun preko širine SWR radnog opsega iako su oba kauzalno vezana za ponašanje vrednosti ulazne impedanse antene u okolini rezonance.

Ovaj proračun je mnogo komplikovaniji i zahteva više vremena, pa sam stoga u mom prethodnom članku [1] predložio direktno korišćenje širine SWR opsega kao relativnu meru Q-faktora koji je mnogo jednostavniji za upotrebu i daje rezultate koji ne bi trebali mnogo da se razlikuju od direktne upotrebe Q-faktora, zbog vrlo bliske kauzalne veze Q-faktora i širine SWR opsega.

Upotreba širine SWR opsega kao mera Q-faktora antene je mnogo jednostavnija nego egzaktan proračun Q-faktora ali u nekim slučajevima može da dovede do netačnih rezultata. Iako su Q-faktor i SWR opseg kauzalno povezani, za antene sa više elemenata kao što su Yagi antene ove veličine su povezane na mnogo komplikovaniji način i mogu se razlikovati od jednostavnih antena sa samo jednim elementom. Ovo može prouzrokovati netačne rezultate. Bilo je očigledno da je bolje proračunati Q-faktor i dobiti tačnije rezultate iako to zahteva nešto više vremena i napora da se uradi.



Rezultat proračuna Q-faktora antene pomoću dijagrama realnog i imaginarnog dela ulazne impedanse

Antena, predstavljena kao ekvivalentno kolo sastavljeno od serijski vezane kapacitivnosti C , induktivnosti L i otpornosti R , ima Q-faktor koji se može proračunati prema sledećoj formuli [2], [3]:

$$Q = F / 2R * (dX / dF + |X| / F)$$

gde je F frekvencija, X je imaginarna komponenta a R je realna komponenta ulazne impedanse antene koja se sastoji od otpornosti zračenja i otpornosti gubitaka antene. Pošto je otpornost gubitaka za Yagi antene najčešće veoma mali, otpornost zračenja igra dominantnu ulogu u vrednosti Q-faktora Yagi antene.

Realni deo ulazne impedanse antene R može da se menja u granicama frekvencijskog segmenta za koji računamo Q-faktor tako da je pogodno uzeti srednju vrednost u tom segmentu. Srednja vrednost R za segment je $R_m = (R_l + R_h) / 2$ pa se formula za proračun Q-faktora može se napisati u sledećem obliku

$$Q = F_o / (R_l + R_h) * | (X_h - X_l) / (F_h - F_l) + |X_o / F_o| |$$

gde indeksi l , h i o označavaju vrednosti za donju, gornju i centralnu frekvenciju. Ova standardna jednačina važi za antenu predstavljenu kao ekvivalentno serijsko kolo u serijskoj rezonanci kao i za frekvencije daleko ispod i iznad rezonantne frekvencije [2], [3].

Programi za simulacije antena daju vrednosti ulazne impedanse antene koji se mogu koristiti za proračun Q-faktora antene prema datoj formuli za sve frekvencije u radnom opsegu antene. Ovaj monoton posao je urađen uz pomoć Excel programa u koji su svi neophodni ulazni podaci uvezeni iz programa za simulaciju antena, tako da su rezultati mogli biti vrlo brzo i lako kombinovani i upoređivani.

Vrednost diferencijala dX/dF predstavlja nagib tangente na X krivu na željenoj frekvenciji. Što je nagib tangente bliži vertikali, utoliko je veći Q-faktor antene na toj frekvenciji. Mali ugao između tangente i vertikale pokazuje gde se maksimalni Q-faktor obično pojavljuje. To je na frekvenciji gde je ugao α minimalan i tangenta najviše okomita.

Moguće je upoređivati antene prema njihovim maksimalnim vrednostima Q-faktora ili prema srednjim vrednostima u zadatom frekvencijskom opsegu.

Excel program uzima mali „pravi“ (linearan) deo X krive između tri uzastopna frekvencijska koraka i uzima tri tačke na toj liniji na tri uzastopne frekvencije: početnoj (F_l), krajnjoj (F_h) i srednjoj ili centralnoj (F_o). Vrednosti X i R na sve tri frekvencije koriste se u programu za izračunavanje vrednosti Q-faktora prema gornjoj formuli.

Pošto Q-faktor zavisi od vrednosti i nagiba X i R krive, vrednost Q-faktora se menja u radnom opsegu antene. Tačnost rezultata se povećava kada program koristi za proračun delove X i R krive koji su vrlo linearni (mali frekvencijski korak), tj. kada su F_l , F_h i F_o dovoljno blizu tako da se mali obuhvaćeni deo krive može aproksimativno uzeti kao prava linija.

Koliko mali Q-faktor treba da bude?

Odgovor na to pitanje je vrlo sličan onome za efektivnu temperaturu šuma antene. Trebao bi da bude toliko mali da negativni efekti u praktičnom radu mogu biti zanemareni.

Q-faktor antene bi trebao biti dovoljno mali da uticaji okolnih bliskih objekata na rad antene mogu biti zanemareni, zato što je antena projektovana i vrlo precizno optimizovana u programu za simulacije antena za rad u slobodnom prostoru bez bliskih okolnih objekata. Ako Q-faktor antene nije dovoljno mali da bi uticaji okolnih objekata na antenu mogli biti zanemareni, tada to više nije ista ona antena koja je precizno optimizovana i o kojoj je reč, zato što u praksi ona više nema one karakteristike koje su bile izračunate u programu za simulacije antena.

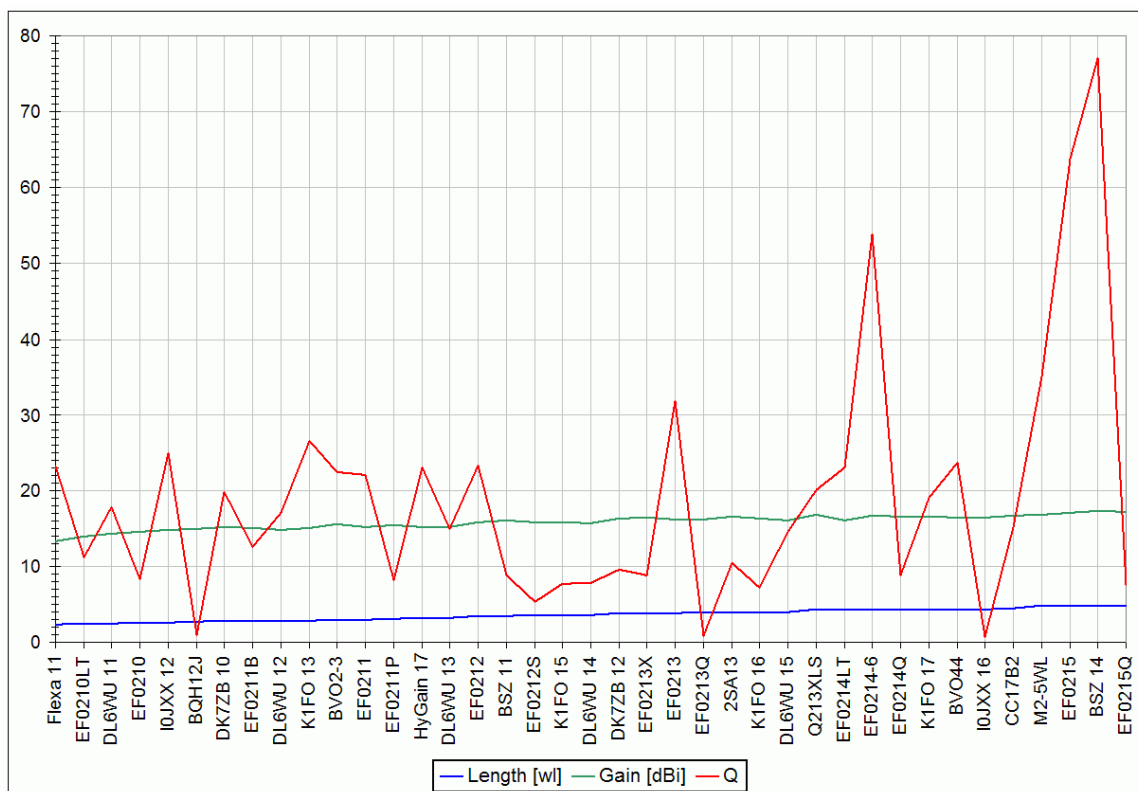
Da li su te nove karakteristike još uvek dovoljno dobre za nas drugo je pitanje, ali je očigledno da će one biti bliže projektovanim vrednostima ukoliko antena trpi manju degradaciju performansi zbog negativnog uticaja uslova okoline. Antena će trpeti manju degradaciju ukoliko ima manji Q-faktor. Bilo bi vrlo lepo kada bismo imali univerzalno pravilo koliko nizak Q-faktor antene treba da bude da bi nam garantovao zanemarljivu degradaciju karakteristika antene. Ali nažalost nema takvog pravila zato što je mnogo različitih antena i mnogo različitih uticaja okoline u igri.

Istina je da je antena sa ekstremno niskim Q-faktorom dobra antena, ali to ne znači da sve antene moraju da imaju tako nizak Q-faktor. Na primer, DL6WU antene su vrlo tolerantne, jer je moguće dodati nekoliko ili odbaciti neki od krajnjih direktora bez neke posebno uočljive degradacije karakteristika osim očekivane promene pojačanja zbog promenjene dužine antene. Međutim DL6WU antene nemaju ekstremno nizak Q-faktor.

Očigledno je da je teško naći demarkacionu vrednost Q-faktora koja deli kritične od nekritičnih antena zato što granica nije tako oštro definisana već je pre u vidu postepenog prelaska iz jedne u drugu krajnost, od dobrih ka lošim antenama, sa postepenim povećanjem Q-faktora.

Pored toga broj i vrsta ostalih antena i objekata oko antene igra takođe značajnu ulogu šta će se desiti sa nekom konkretnom antenom u nekim konkretnim uslovima okruženja. Nije isto ako neka antena koja je optimizovana u programu za simulacije antena da radi sama u slobodnom prostoru, u praksi radi sama na vrhu nekog visokog i tankog stuba, ili ako ista antena radi na velikom rešetkastom stubu u društvu sa mnoštvom drugih bliskih antena. Razlog tome je taj što su u prvom slučaju uslovi mnogo sličniji idealizovanim virtuelnim uslovima u programu za koje je antena optimizovana da radi. U drugom slučaju može se očekivati da će u tako izmenjenim uslovima u praksi, koji su drastično različiti od onih u kompjuterskim simulacijama, antena značajno promeniti svoje karakteristike posebno ako antena ima visok Q-faktor koji je mera osetljivosti antene na promenu uslova okruženja.

U principu, uobičajeno pravilo je da što je manji Q-faktor antene utoliko je ona bolja, tj. manje osetljiva na uticaje okoline.



Q-faktor antene u blizini rezonance, dužina nosača i pojačanje različitih Yagi antena

Dužina Yagi antene, pojačanje i Q-faktor

Kao što se vidi sa dijagrama postepeno povećanje dužine optimalno projektovane Yagi antene proizvodi postepeno povećanje pojačanja. To povećanje je, prema ranim radovima Gintera, DL6WU oko 2.3 dB za svako udvostručenje dužine antene.

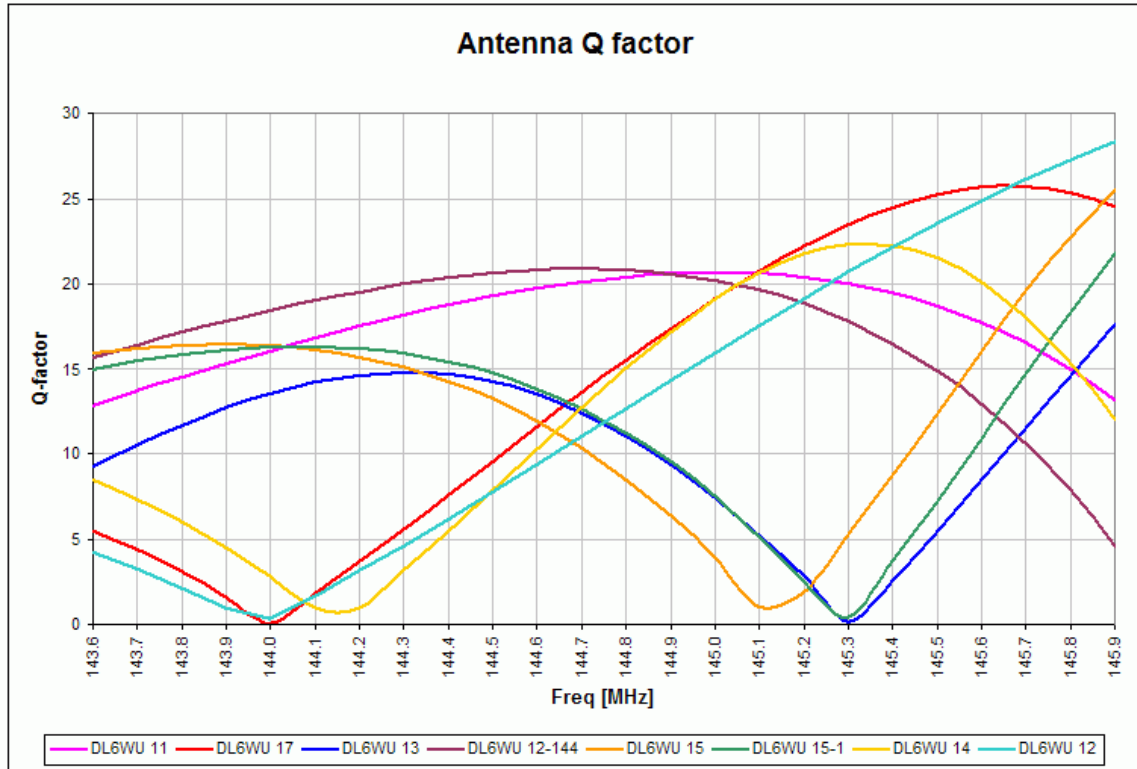
Ali šta se dešava sa Q-faktorom antene? Izgleda da je Q-faktor skoro potpuno nezavisan od dužine antene i njenog pojačanja. Jedina vidljiva zavisnost je da prilikom izvlačenja i poslednjeg delića dB pojačanja u cilju dobijanja maksimalno mogućeg pojačanja za datu dužinu i ekstremno potiskivanje sporednih snopova zračenja u cilju dobijanja maksimalnog odnosa napred/nazad, Q-faktor antene značajno poraste.

Ali to maksimizirano povećanje pojačanja vrlo retko može da pređe 0.5 dB u poređenju sa pojačanjem ostalih antena sa prihvatljivim Q-faktorom. Takođe ekstremno potiskivanje bočnih i zadnjeg sporednog snopa u cilju dobijanja što boljih šumnih karakteristika, takođe proizvodi značajno povećanje Q-faktora antene.

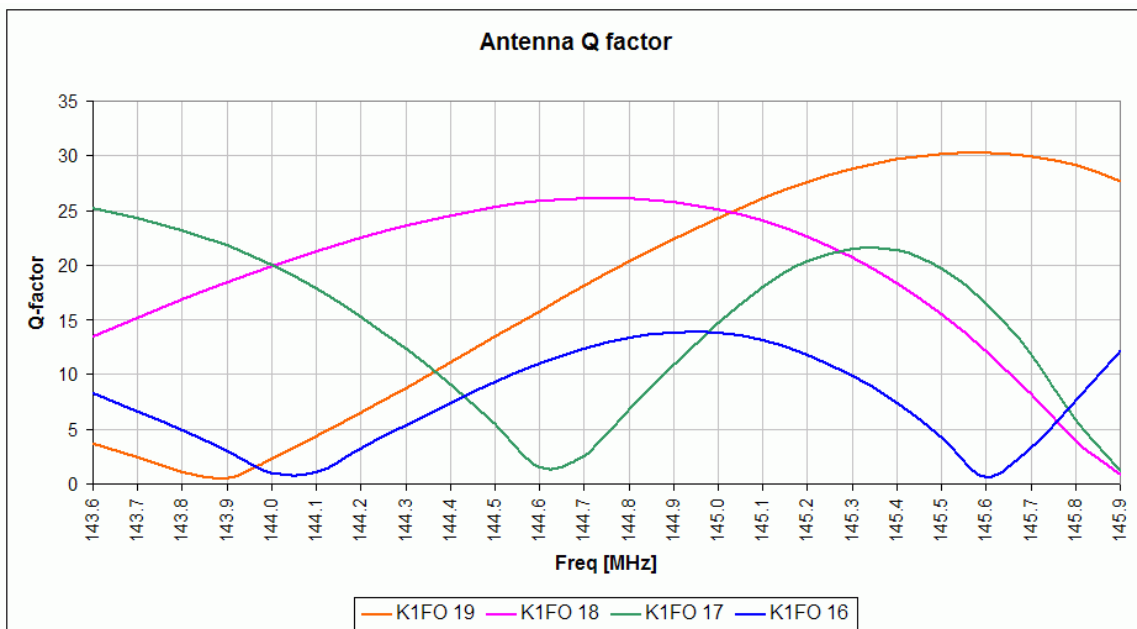
Ali sa druge strane praktična realizacija, tj. ostvarenje tih projektovanih boljih napred/nazad odnosa i šumnih karakteristika veoma mnogo zavisi od šuma i višestrukih refleksija na mestu na kome se nalazi antena i vrlo često ne može biti ostvareno u potpunosti.

Kompjuterska optimizacija karakteristika antene za rad u vrlo uskom SWR radnom opsegu neizbežno vodi ka anteni sa visokim Q-faktorom.

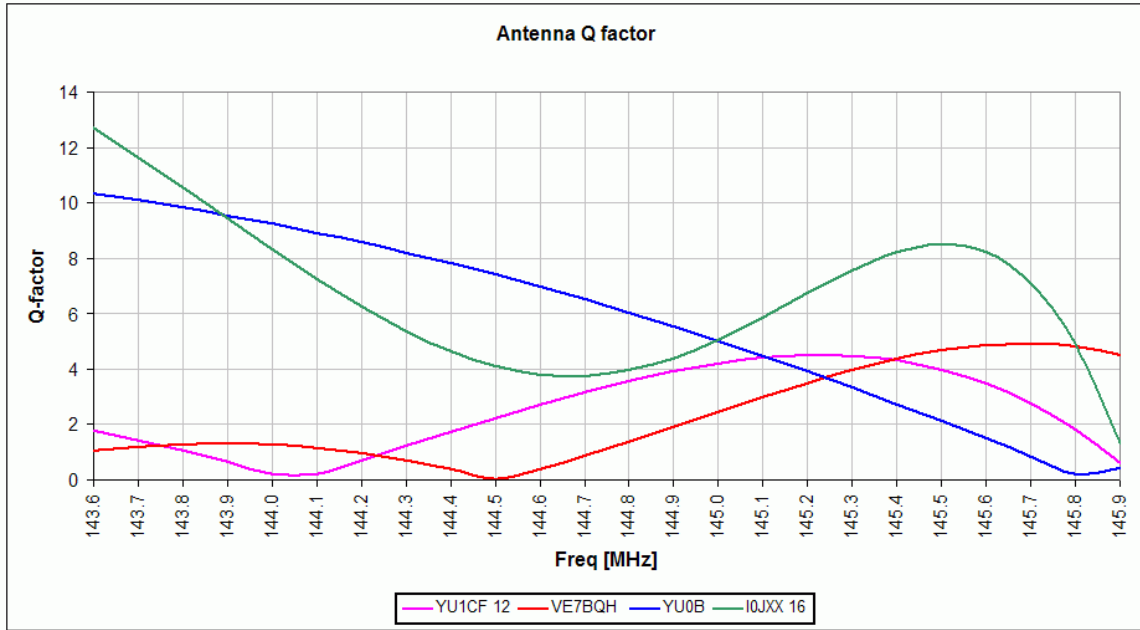
Nasuprot tome, jasno je da autor koji pažljivo izabere kompromise između uzajamno konfrontiranih zahteva može da konstruiše dobru antenu; iako to nije odmah vidljivo na antenskim simulatorima jer se efekti Q-faktora ne vide u idealizovanom okruženju slobodnog prostora u simulacijama antena.



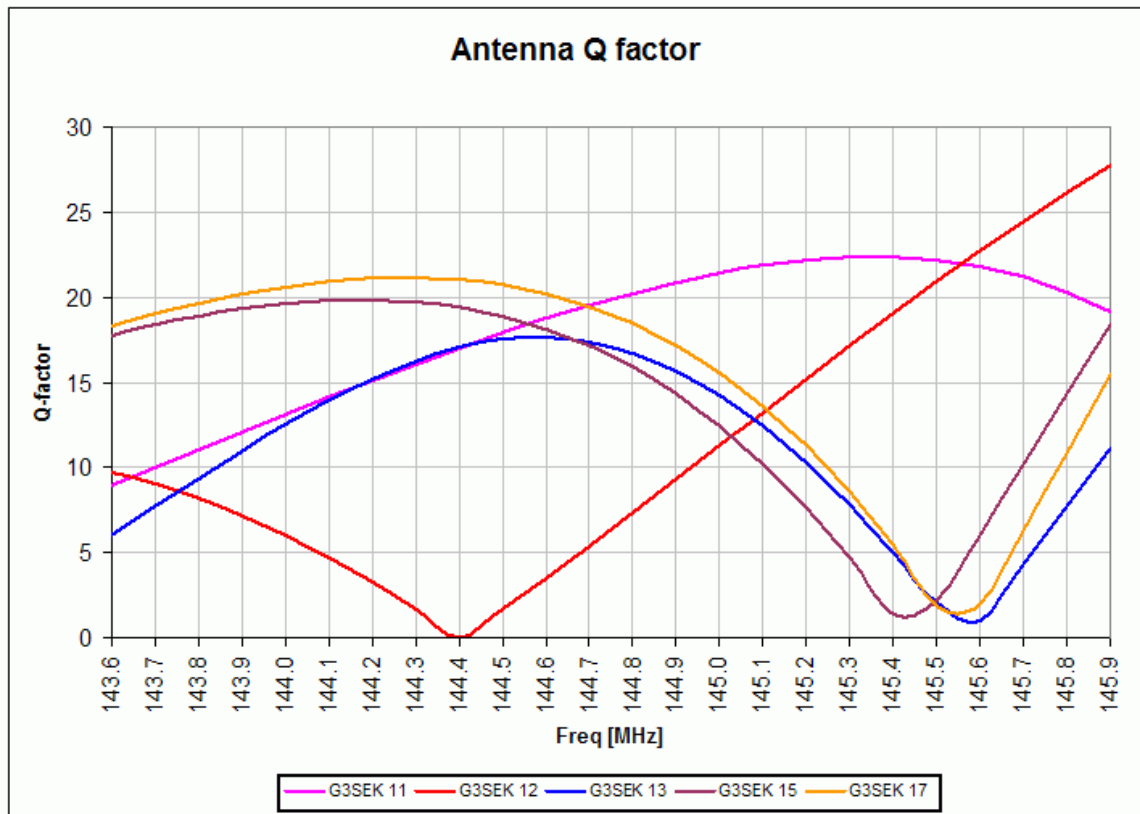
Q-faktori DL6WU Yagi antena različitih dužina



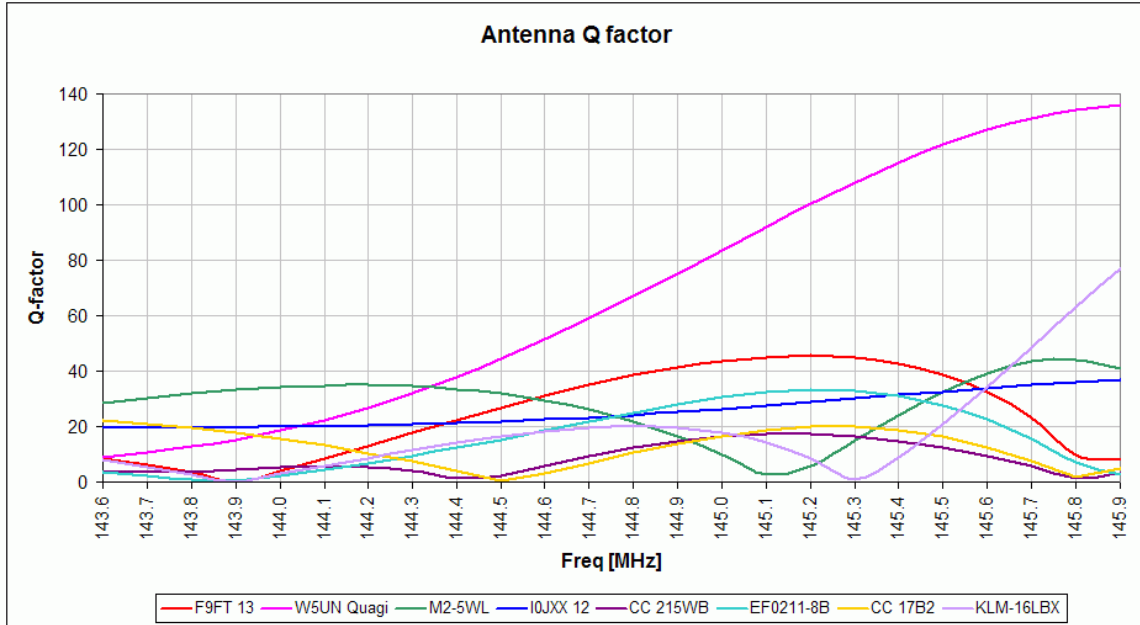
Q-faktori K1FO Yagi antena različitih dužina



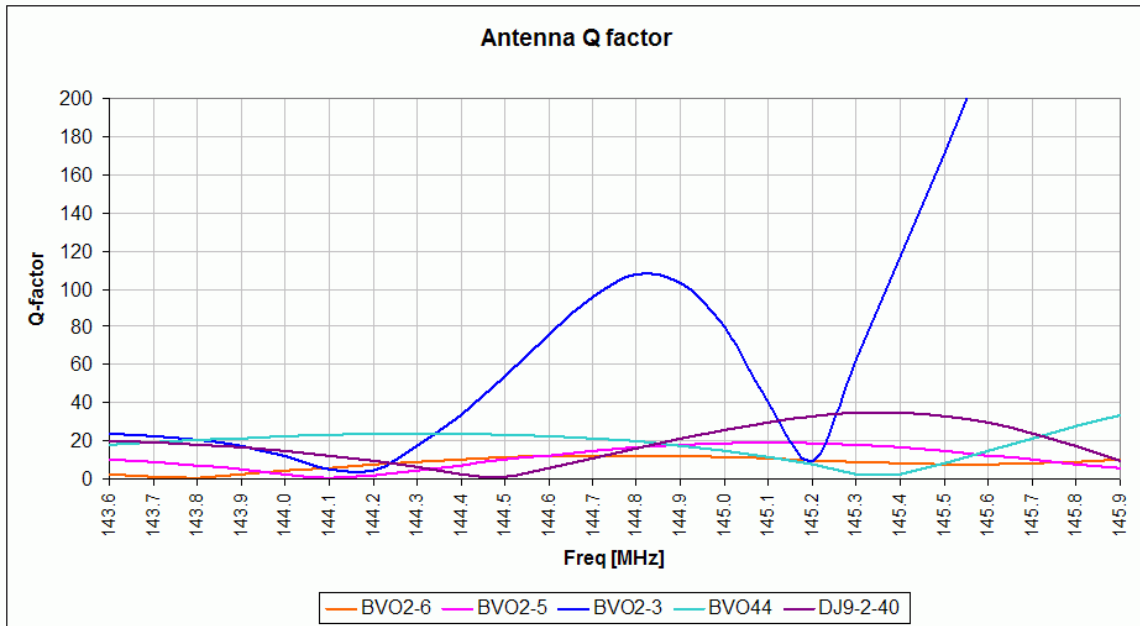
Yagi antene različitih autora sa vrlo niskim Q-faktorom



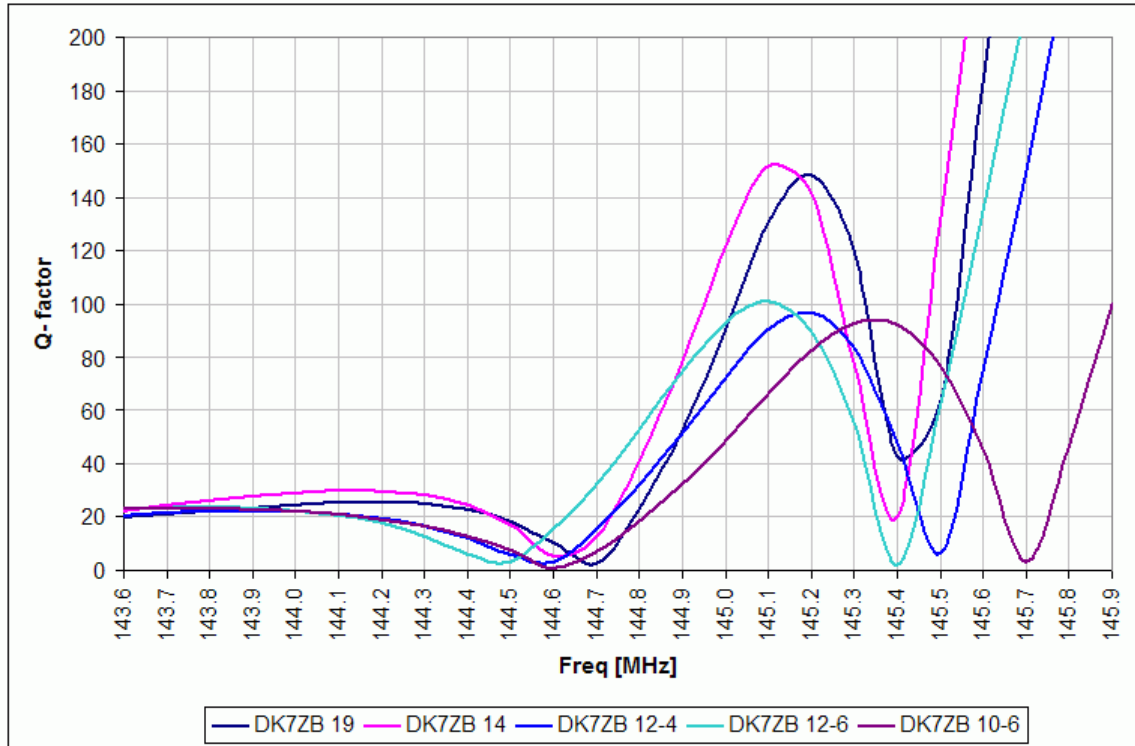
Q-faktori DL6WU Yagi antena različitih dužina, izračunatih G3SEK programom



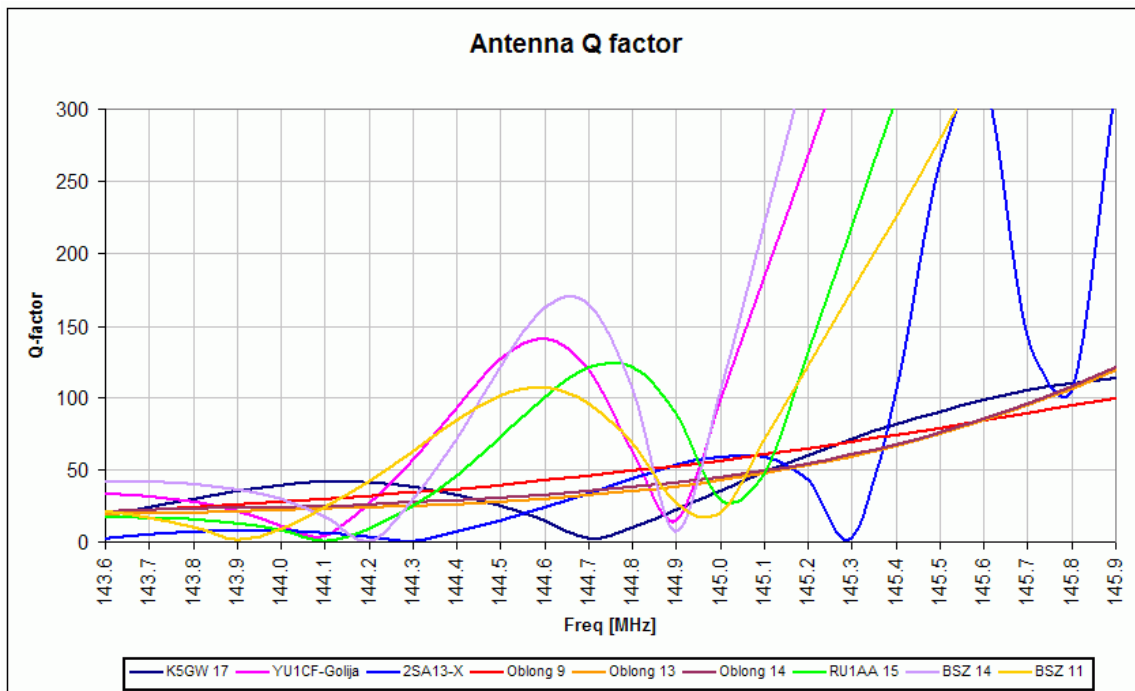
Yagi antene različitih autora sa srednjim Q-faktorom



Q-faktori DJ9BV Yagi antena različitih dužina



Q-faktori DK7ZB Yagi antena različitih dužina

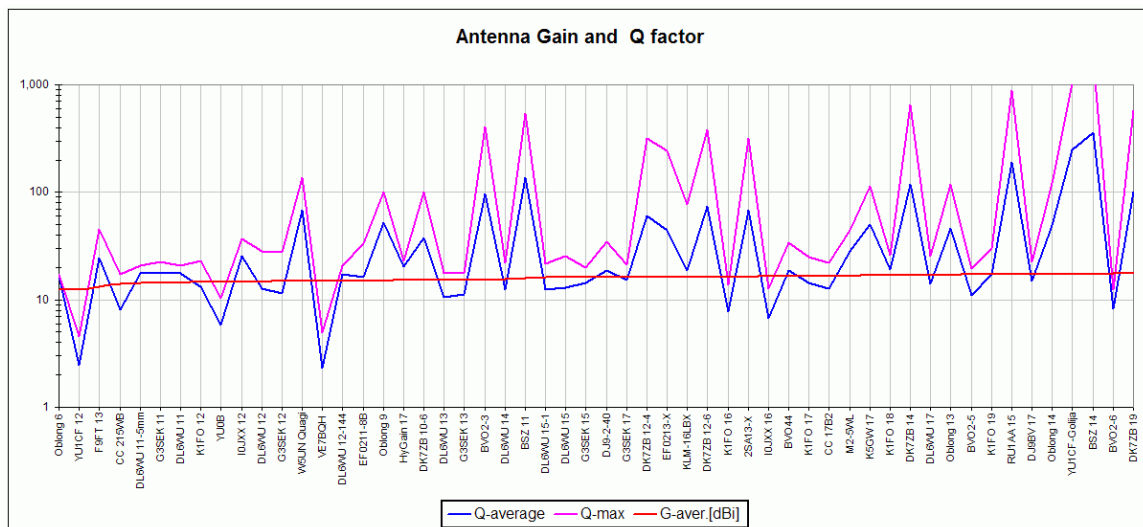


Yagi antene različitih autora sa visokim Q-faktorom

Svi ovi visoki Q-faktori antena pokazuju da su mnogi autori projektovali svoje antene izabравši loše kompromise među važnim i često suprotstavljenim karakteristikama antena.

Njihove antene izgledaju veoma lepo i dobro na antenskim simulatorima u idealizovanom okruženju slobodnog prostora, samo zato što se na njima ne vidi šta se sve dešava u praksi i šta se uopšte zaista ostvari od svih tih idealnih karakteristika koje dobijaju na ekranu monitora.

Merenje SWR antene obično ne može da pruži kompletan uvid u problem i ponudi odgovore na mnoga pitanja.



Pojačanje i prosečni i maksimalni Q-faktori Yagi antena različitih autora

Zaključak

U ovom radu, na osnovu prezentiranog materijala, pokazao sam da pravilan pristup projektovanju Yagi antene mora da uzme u obzir sve važne parametre antene, a ne samo pojačanje ili neku drugu pojedinačnu karakteristiku (odnos napred/nazad, efektivnu šumnu temperaturu, itd.). Između ostalog pokazano je da Q-faktor antene igra važnu ulogu u ukupnom kvalitetu antene i posebno u njenom ponašanju u uslovima praktičnog rada u realnom okruženju.

Vrednost Q-faktora antene predstavlja meru verovatnoće da će dobre karakteristike antene iz virtuelnog sveta računarskih simulacija biti uspešno transformisane i realizovane u realnom, grubom svetu invazivnog okruženja u kome će antena morati da radi.

Iz dijagrama datih na slikama očigledno je da je Q-faktor vezan za pojačanje antene na takav način da je moguće postići veliko pojačanje antene zajedno sa niskim Q-faktorom ako se ne pređe određena granica.

Postoji mnogo antena sa skoro identičnim pojačanjem ali sa ogromnim razlikama u Q-faktoru!

Prema tome izgleda da nam ne stoji ništa na putu da projektujemo, gradimo i koristimo Yagi antene sa velikim pojačanjem i niskim Q-faktorom!

Reference

1. Dragoslav Dobričić, YU1AW, **VHF Antenna Noise Temperature**, AntenneX, April 2008. issue No. 132, <http://yu1aw.ba-karlsruhe.de/vhfnoisetemp.pdf>
Prevedeno na srpski jezik: Dragoslav Dobričić, YU1AW, **Šumna temperatura VHF antena**, http://www.yu1aw.ba-karlsruhe.de/sum_temp_vhf_ant.pdf
2. Jacques Audet, VE2AZX, **Q Calculations of L-C Circuits and Transmission Lines: A Unified Approach**, QEX magazine Sep/Oct 2006. p. 43-51.
http://www.geocities.com/ve2_azx/QEXaudet-Rev1.pdf
3. James T. Aberle, R. Loepsinger-Romak, **Antennas with Non-Foster Matching**, publ. 2007. by Morgan & Claypool, p. 3-5.