Dr Duško Radić,
major, dipl. inž.

FREKVENTNI KRITERIJUMI ZA NASTAJANJE IM PRODUKATA U PRIJEMNIKU RADARA

U članku je prikazana metoda za dobijanje frekventnih kriterijuma za mogućnost nastanka smetnji u vidu intermodulacionih produkata u prijemniku radara ili bilo kom drugom prijemniku kod kojeg su ulazna visokofrekventna kola, frekventno gledajući, relativno širokopojasna. Posebno su dati kriterijumi za nastajanje intermodulacionih produkata do petog reda u visokofrekventnom pojačavaču i mešaču prijemnika.

Uvod

Prijemnici rada su superheterodini prijemnici, a prema blok-shemi ulaznih visokofrekventnih blokova mogu se svrstati u prijemnike sa visokofrekventnim pojačivačem (VFP) i prijemnike bez VFP [1]. U daljem radu biće razmatran superheterodini prijemnik, s jednim mešanjem, ali se razvijena metoda rešavanja problema elektromagnetne kompatibilnosti (EMK) može primeniti i na prijemnike s više mešanja. Za usvojeni prijemnik uvek će vredeti da je centralna frekvencija međufrekventnog pojačavača ω_{mf} manja od frekvencije signala lokalnog oscilatora.

Iz literature [2] poznato je da se nepovoljno dejstvo elektromagnetskog okruženja na prijemnik ostvaruje preko onih kola prijemnika koja imaju nelinearnu amplitudnu karakteristiku. Ovo dejstvo ostvaruje se kroz menjanje pojačanja ili slabljenja i kroz generisanje novih signala, takozvanih intermodulacionih produkata (IM), koji predstavljaju nenamerne smetnje.

Od navedenih sklopova prijemnika radara nelinearnu amplitudnu karakteristiku imaju VFP i mešač koji predstavljaju nelinearne inercijalne sklopove [2], pa zato rešavanje prenosa signala kroz njih predstavlja izuzetno slo-

žen problem. U dostupnoj literaturi [2 i 3] data je jedna od metoda za rešavanje ovog problema koja predviđa razdvajanje nelinearnog inercijalnog sklopa na serijsku vezu linearnog inercijalnog sklopa i nelinearnog neinercijalnog sklopa. Rešavanjem prenosa signala parcijalno kroz pojedini sklop, rešava se ukupni prenos signala.

Visokofrekventni pojačavač

Mogućnost i uslovi nastajanja IM produkata u VFP određena je frekventnim karakteristikama samog VFP. Simulacijom na računaru potrebnih frekventnih karakteristika VFP i razvojem programa za utvrđivanje frekventnih kriterijuma, izvršena je frekventna analiza mogućnosti nastajanja IM produkata u VFP. Program za utvrđivanje frekventnog kriterijuma baziran je na Dual Backtrack algoritmu [4], koji omogućava pronalaženje rešenja frekventnog kriterijuma za IM produkte visokih redova uz veliki broj ulaznih signala.

Kao što je pretpostavljeno, VFP se može predstaviti kao serijska veza ulaznog VF filtera s frekventnom širinom B_{vfu} , nelinearnog neinercijalnog elementa i izlaznog VF filtera s centralnom frekvencijom ω_0 i frekventnom ši-

rinom B_{vfi} (slika 1). Pretpostavit će se da je $B_{vfu} \geq B_{vfi}$, kao što je to obično i u praksi.

Sl. 1 — Blok-shema visokofrekventnog pojačavača

Da bi se mogao istražiti uticaj širina B_{vfu} i B_{vfi} i lokacije ω_0 u opsegu B_{vfu} na mogućnost nastajanja IM produkata u VFP, pretpostavlja se da su ulazni i izlazni filteri idealni i normalni u odnosu na sredinu B_{vfu} . Bitne frekventne karakteristike su: B_{vfu} — normirana širina frekventnog pojasa ulaznog filtera; B_{vfi} normirana širina frekventnog pojasa izlaznog filtera; ω_0 — normirana frekvencija sredine B_{vfi} ; ω_1 — normirana najviša frekvencija u B_{vfu} ; ω_N — normirana najniža frekvencija u B_{vfu} . Međusobni odnos navedenih karakteristika prikazan je na slici 2.

Sl. 2 — Frekventni odnos filtera VFP

Polazi se od pretpostavke da na ulazu VFP deluje složeni ulazni signal sastavljen od N_u jednostavnih signala frekvencije ω_i , $i=1,2,\dots,N_u$. Frekventni razmak između dva susedna signala konstantan je i manji od frekventne širine izlaznog filtera $B_{vfi} > \omega_{i+1} - \omega_i = \Delta\omega$. Verovatnoća pojavljivanja signala ista je i svi se pojavljuju istovremeno $p_i = p_j = 1$, $i,j=1,2,\dots,N_u$ (slika 3). Za potrebe simulacije uzeto je $\Delta\omega = 0.01$.

Sl. 3 — Ulazni skup S_0

Pod dejstvom takvog ulaznog signala na izlazu VFP pojaviće se složeni signal [5] sastavljen od sume jednostavnih signala, čije frekvencije ispunjavaju kriterijum:

$$\sum_{i=1}^N a_i \omega_i = \omega_c \text{ uz } \omega_0 - B_{vfi}/2 \leq \omega_c \leq \omega_0 + B_{vfi}/2 \quad (1)$$

gde su:

$\omega_i \in B_{vfu}$, $a_i \in \mathbb{Z}$, $i=1,2,\dots,N_u$ i $c=0,1,2,\dots,N_{IM}$ — broj rešenja.

Kako bi ovako postavljeni kriterijum mogao imati beskonačno mnogo rešenja to je postavljeno ograničenje:

$$\sum_{i=1}^N |a_i| = Q, \quad i=1,2,\dots,N_u. \quad (2)$$

Rešenja koja ispunjavaju postavljeni kriterijum i kod kojih je $Q=2,3,\dots$ zovu se IM produkti Q -tog reda.

Upotrebom razvijenog programa za rešavanje frekventnog problema u okviru kojeg su za određeni red varirane širina frekventnog pojasa ulaznog filtera VFP, širina i lokacija izlaznog filtera VFP dobiveni su frekventni kriterijumi za nastajanje IM produkata do petog reda. U okviru brojnih izvršenih simulacija konstatovano je da širina frekventnog pojasa izlaznog filtera VFP ne utiče na mogućnost nastajanja IM produkata, već direktno utiče na broj generiranih IM produkata i to pod uslovom da je ispunjen frekventni kriterijum.

Iz provedene frekventne analize može se zaključiti da se u VFP, nezavisno od širine frekventnog pojasa ulaznog filtera, na njegovom izlazu uvek

moгу generisati IM produkti neparnih redova. Njihov broj zavisi od širina B_{vfu} i B_{vfi} i lokacije ω_0 . Porastom neparnog reda raste i broj IM produkata. Isto tako, sa povećavanjem B_{vfu} i B_{vfi} broj IM produkata raste, a sa pomeranjem ω_0 ka rubovima B_{vfu} broj IM produkata pada. Za mogućnost generisanja IM produkata parnih redova, frekventni kriterijum je potrebna širina frekventnog pojasa ulaznog filtera VFP. Iz rezultata provedenih simulacija može se zaključiti da je taj kriterijum to čštriji, odnosno B_{vfu} veće, što je red parnog IM produkta niži. Za mogućnost nastajanja IM produkata drugog reda mora biti ispunjeno $B_{vfu} \geq 0.67$, a za IM produkte četvrtog reda mora biti ispunjeno $B_{vfu} \geq 0.4$. Porastom reda parnog IM produkta raste i broj IM produkata. Kao i kod IM produkata neparnih redova, broj IM produkata parnih redova direktno će zavistiti od veličina B_{vfu} i B_{vfi} . Broj IM produkata raste sa približavanjem ω_0 rubovima B_{vfu} .

Mešač

Mogućnost i uslovi nastajanja IM produkata u mešaču određena je frekventnim karakteristikama samog mešača. Računarskom simulacijom frekventnih karakteristika mešača, a uz korišćenje razvijenog programa izvršena je frekventna analiza mogućnosti nastajanja IM produkata u mešaču.

Kao što je pretpostavljeno, mešač se može predstaviti kao serijska veza ulaznog filtera mešača s frekventnom širinom B_{m1} unutar koje se nalazi frekvencija radnog kanala ω_0 , nelinearnog neinercijalnog elementa u koji preko odvojenog ulaza dolazi signal lokalnog oscilatora ω_{lo} i izlaznog filtera iz mešača s frekventnom širinom B_{m2} (slika 4). Za potrebe frekventne simulacije mešača, a u cilju dobijanja frekventnih kriterijuma koji ograničavaju nastajanje IM produkata u mešaču, pretpostavljeno je da je izlazni filter iz mešača ustvari ulazni filter u međufrekvent-

ni pojačavač (MFP). Frekventne karakteristike ovog filtera su centralna frekvencija $\omega_{mf} < \omega_{lo}$ i frekventna širina izlaznog filtera manja ili jednaka frekventnoj širini ulaznog filtera $B_{m2} \leq B_{m1}$.

Sl. 4 — Blok shema mešača

Da bi mogao da se istraži uticaj širina B_{m1} i B_{m2} i veličine ω_{mf} na mogućnost nastajanja IM produkata u mešaču, pretpostavlja se da su ulazni i izlazni filter idealni i normirani u odnosu na $\omega_{lo} = 1$.

Prema literaturi [5] ω_{lo} može biti veća ili manja od ω_0 , to će se posebno analizirati svaki od ovih slučajeva. Bitne frekventne karakteristike ovakvog mešača su B_{m1} — normirana širina frekventnog pojasa ulaznog filtera; B_{m2} — normirana širina frekventnog pojasa izlaznog filtera; ω_1 — normirana gornja granična frekvencija u B_{m1} ; ω_N — normirana donja granična frekvencija u B_{m1} ; ω_0 — normirana centralna frekvencija radnog kanala i ω_{mf} — normirana centralna frekvencija međufrekventnog pojačavača. Međusobni odnos navedenih karakteristika prikazan je na slici 5.

Sl. 5 — Frekventni odnos filtera mešača

Polazi se od pretpostavke da na ulazu mešača deluje složeni ulazni signal sastavljen od sume N_u jednostavnih signala frekvencije ω_i , $i=1,2,\dots,N_u$.

Frekventni razmak između dva susedna signala konstantan je i manji od frekventne širine izlaznog filtera $B_{m2} > \omega_{i+1} - \omega_i = \Delta\omega$. Verovatnoća pojavljivanja signala je ista i svi se pojavljuju istovremeno, $p_i = p_j = 1$.

Prema literaturi [6], na izlazu mešača pojaviće se složeni signal sastavljen od sume jednostavnih signala čija frekvencija ispunjava kriterijum

$$a_{l_0} + \sum_i a_i \omega_i = \omega_j = \omega_{mf} \pm B_{m2}/2 \quad (3)$$

gde su:

$$\omega_i \in B_{m1}, a_i, a_{l_0} \in \mathbb{Z}, i=1, 2, \dots, N_u \text{ i}$$

$j=0, 1, 2, \dots$ — broj rešenja i a_{l_0} — koeficijent uz $\omega_{l_0}=1$. Kako bi ovako postavljeni kriterijum imao beskonačno mnogo rešenja, to se postavlja ograničenje $|a_{l_0}| + \sum_i |a_i| = Q$ $i=1, 2, \dots, N_u$. Rešenja koja zadovoljavaju postavljeni kriterijum uz $Q=2$ i $|a_{l_0}|=1$ nazivaju se smetnja na kanalu i smetnja na simetričnom kanalu. Sva ostala rešenja, kod kojih je $Q=2, 3, 4, \dots$, zovu se LM produkti Q -tog reda. Uređena Q -torka a_j, a_{l_0} zovu se oblik LM produkta Q -tog reda.

U mešaču nastaju dve vrste LM produkta. Prva vrsta su LM produkti generisani od signala s ulaza mešača i kod njih je $a_{l_0}=0$. Druga vrsta su LM produkti generisani od ulaznih signala i od signala lokalnog oscilatora, i kod njih je $a_{l_0}=0$.

Variranjem širine frekventnog pojasa B_{m1} , B_{m2} i veličine ω_{mf} dobijeni su frekventni kriterijumi za nastajanje LM produkata do petoga reda u mešaču. U okviru izvršenih simulacija konstatovano je da širina frekventnog pojasa izlaznog filtera mešača B_{m2} ne utiče na mogućnost za nastajanje LM produkta u mešaču, već samo utiče na broj generisanih LM produkata i to pod uslovom da je ispunjen frekventni kriterijum.

Iz dobijenih rezultata proizlazi frekventni kriterijum za nastajanje LM produkata 2. reda u mešaču. Po tom

kriterijumu širina frekventnog pojasa ulaznog filtera mešača mora da bude jednaka ili veća od centralne frekvencije međufrekventnog pojačavača, ($B_{m1} \geq \omega_{mf}$) da bi se na izlazu mešača mogao generisati LM produkt drugog reda. Dobijeni kriterijum ne zavisi od veličine ω_{l_0} u odnosu na ω_0 .

Kod LM produkta 3. reda uočava se velika razlika u mogućnosti nastajanja LM produkta, u zavisnosti od veličine ω_{l_0} u odnosu na ω_0 . Kod mešača sa $\omega_{l_0} > \omega_0$ lakše se generišu LM produkti nego kod mešača sa $\omega_{l_0} < \omega_0$. Veličina ω_{mf} je u obrnuto proporcionalnoj vezi sa veličinom B_{m1} . U oba slučaja područje rada mešača u kojem se ne mogu javiti LM produkti trećeg reda ograničava LM produkt s $a_{l_0} = \pm 1$.

Za LM produkte 4. reda s $a_{l_0} = \pm 1$ ne postoji frekventni kriterijum za mogućnost nastajanja. Ovi LM produkti mogu da se generišu nezavisno od veličine ω_{mf} , a broj mogućih LM produkata određen je veličinom B_{m1} i B_{m2} . Ako se pretpostavi da je B_{m2} frekventna širina jednog kanala i da u svakom kanalu postoji samo jedan signal, tada je broj mogućih LM produkata N_{LM} određen odnosom B_{m1}/B_{m2} . LM produkti s $a_{l_0}=0$ i ± 2 mogu nastati tek ako je zadovoljen kriterijum da je $2B_{m1} \geq \omega_{mf}$. Dati frekventni kriterijum i broj generisanih LM produkata ne zavisi od veličine ω_{l_0} u odnosu na ω_0 .

Područje u kome ne mogu da se generišu LM produkti 5. reda za mešač s $\omega_{l_0} > \omega_0$ ograničeno je LM produktom s $a_{l_0} = -2$, a za mešač s $\omega_{l_0} < \omega_0$ ograničeno je LM produktom s $a_{l_0} = 3$. To područje je mešač s $\omega_{l_0} > \omega_0$ puno je manje od područja mešača s $\omega_{l_0} < \omega_0$, jer su maksimalne dozvoljene granice za prvi slučaj $\omega_{mf}=0.25$ i $B_{m1}=0.33$, a za drugi slučaj $\omega_{mf}=0.33$ i $B_{m1}=0.5$. Veličina B_{m1} je u obrnuto proporcionalnoj vezi s veličinom ω_{mf} .

Objedinjavanjem svih dobijenih frekventnih kriterijuma za nastajanje LM produkata do petog reda u mešaču i

uzimanjem iz svakog reda samo onog oblika koji najviše ograničava područje u kome ne mogu da se generišu IM produkti, dobijaju se integralni frekventni kriterijumi za svaki tip mešača. Za mešač s $\omega_{lo} > \omega_0$ kriterijumi su dati na slici 6, a za mešač s $\omega_{lo} < \omega_0$ na slici 7. Na ovim slikama jedino nije prikazan IM produkt 4. reda s $a_{lo} = \pm 1$, jer za njega ne postoji frekventni kriterijum.

Na slici je šrafurom označeno područje gde se mogu generisati IM produkti i ono je uslovno nazvano zabranjeno područje. U nešrafiranom području ne mogu se generisati IM produkti i ono je uslovno nazvano slobodno područje.

Sl. 6 — Ukupni frekventni kriterijumi nastajanja IM produkata u mešaču kod kojega je $\omega_{lo} > \omega_0$

Sl. 7 — Ukupni frekventni kriterijumi nastajanja IM produkata u mešaču kod kojega je $\omega_{lo} < \omega_0$

Iz dobijenih rezultata, u zavisnosti od veličine ω_{lo} prema ω_0 , uočava se velika razlika u veličini područja u kome

ne mogu da se generišu IM produkti do petog reda — dozvoljeno područje. Gornja leva ograničenja stvaraju IM produkti parnih redova i ista su za obe vrste mešača, a gornja desna ograničenja stvaraju IM produkti neparnih redova i za mešače s $\omega_{lo} > \omega_0$ puno su oštrija nego kod mešača s $\omega_{lo} < \omega_0$ 1,3 puta veći može biti ω_{mf} i 1,4 puta može biti veći B_{m1} nego kod mešača s $\omega_{lo} > \omega_0$, a da se još uvek mešač nalazi u dozvoljenom području. Razlika u veličini dozvoljene površine je 1,85 puta u korist mešača s $\omega_{lo} < \omega_0$. Uzimajući u obzir i IM produkt 4. reda s $a_{lo} = \pm 1$ za koji ne postoji frekventni kriterijum, kriterijumi za nastajanje IM produkata parnih redova isti su za obe vrste mešača, dok su za neparne redove kriterijumi puno oštriji za mešače s $\omega_{lo} > \omega_0$.

Zaključak

Sa frekventnog aspekta na ispravan rad prijemnika u složenom elektromagnetskom okruženju bitno utiču, kako struktura samog prijemnika, tako i karakteristike njegovih sklopova. Pod strukturom se podrazumeva blok-šema, odnosno dali prijemnik ima ili nema visokofrekventni pojačavač i kako je mešač realizovan, (sa jednim ili više stepena mešanja). Veličina frekventnog opsega ulaznih filtera u visokofrekventni pojačavač i mešač utiče na mogućnost za generisanje i sam broj generisanih intermodulacionih produkata, a veličina frekventnog opsega izlaznih filtera iz ovih sklopova utiče na broj generisanih intermodulacionih produkata. Frekvencija lokalnog oscilatora (veća ili manja od frekvencije radnog kanala) isto tako utiče na mogućnost generisanja intermodulacionih produkata. Povoljnija varijanta je ona kada je frekvencija lokalnog oscilatora manja od frekvencije radnog kanala. Isto tako, i izbor centralne frekvencije međufrekventnog pojačavača sitno utiče na mogućnost za generisanje i broj generisanih intermodulacionih produkata.

Literatura:

- [1] S. M. Klič, Proektirovanie SVC ustroystv radiolokacionyh priemnikov, Sovetskde radio, Moskva, 1973.
- [2] I. S. Stojanović, Osnovi telekomunikacija, »Građevinska knjiga«, Beograd, 1973.
- [3] I. Zahradka, Djelovanje jakih izvankanalnih RF signala na radio-prijemnik, Radovi TVA, TSC KoV JNA, Zagreb, 1981.
- [4] S. Morito, H. M. Salkin, and D. E. Williams, Two backtrack algorithms for the radio frequency intermodulation problem, Appl. Math. Optimiz., vol. no. 6, pp 221—240, 1980.
- [5] O. V. Golorin, Radio-priemnye ustroystva, Vysshaja škola, Moskva, 1987.
- [6] M. Bajić, Radarske antene, CVTŠ KoV JNA, »General armije Ivan Gošnjak«, Zagreb, 1986.