

Mr Dušan Korolija,
potpukovnik, dipl. inž.
Vojnotehnički institut VJ,
Beograd

PRIJEMNIK SA DIREKTNOM KONVERZIJOM RADIO-FREKVENCIJSKOG SIGNALA

UDC: 621.396.62 : 681.3.06

Rezime:

Pojačani zahtevi za smanjenje troškova hardvera, veličine i potrošnje uređaja u ćelijskim mobilnim komunikacijama naveli su konstruktore na intenzivniju primenu prijemnika sa direktnom konverzijom. Dugo napušten u senci superheterodinskog prijemnika, prijemnik sa direktnom konverzijom češće je korišćen u poslednjoj deceniji. Prijem sa direktnom konverzijom ima nekoliko prednosti koje ga čine pogodnim za integraciju, kao i za rad u više opsega i za višestandardni rad. U ovom radu opisane su karakteristike prijemnika s direktnom konverzijom, kao i inherentni nedostaci superheterodinskog prijemnika sa stanovišta integracije.

Ključne reči: superheterodinski prijemnik, simetrična frekvencija, direktna konverzija, jednosmerni pomak, softverski radio.

DIRECT CONVERSION OF RADIO-FREQUENCY SIGNAL RECEIVER

Summary:

Increased demands for low cost of hardware, small size and low power consumption of equipment in cellular mobile communications have driven designers to resurrect the direct conversion receiver. Long abandoned in favor of the mature superheterodine receiver, the direct conversion receiver has emerged over the last decade. Direct conversion reception has several qualities which makes it very suitable for integration as well as multi-band, multi-standard operation. This paper describes the characteristics of the direct conversion receiver as well as the inherent imperfections of the superheterodine receiver from the aspect of integration.

Key words: superheterodine receiver, image frequency, direct conversion, DC offset, software radio.

Uvod

Na zadacima razvoja ćelijskih mobilnih komunikacija poslednjih desetak godina angažovan je veliki broj naučnika i istraživača, čiji je zadatak bio da konstruišu optimalan sistem, koji će zadovoljiti interese i potrebe proizvođača, pro-

vajdera i korisnika sistema. Zahtevi koje je mobilni uređaj trebalo da zadovolji bili su: niska cena, mala potrošnja energije, male dimenzije i dobar kvalitet veze. Svi podsistemi mobilnog uređaja (obradu signala u osnovnom opsegu, napajanje, predaja, antena) do sada su u velikoj meri odgovorili ovim zahtevima, osim pri-

jemnika koji se u ovom periodu sporo menjao. Glavna prepreka za ovu promenu bio je heterodinski princip prijemnika, koji je još od dvadesetih godina prošlog veka pa do danas dominantan kod većine prijemnika. Ovaj prijemnik sastoji se od mnogo diskretnih, relativno skupih komponenti koje je teško integrisati kako bi se smanjila cena, potrošnja i ukupne dimenzije prijemnika.

Za rešavanje ovog problema uloženo je dosta napora. Rešenje je nađeno u primeni druge vrste prijemnika – prijemnika sa direktnom konverzijom¹ (PDK), koji je poznat još od 1924. godine. Prvi put ga je koristila britanska kompanija za radio sredinom šezdesetih godina. U odnosu na superheterodinski prijemnik PDK je jednostavniji i ima znatno manje komponenti i nema skupih filtara, pa je pogodniji za integraciju. Uspešno je primenjen kod pejdžera, mobilnih telefona, personalnih računara, satelitskih prijemnika, itd.

U ćelijskim mobilnim komunikacijama danas se koristi više standarda, što znatno otežava korišćenje mobilnog telefona na širim geografskim područjima.² Mali su izgledi da će se i u budućnosti dobiti jedinstveni svetski standard mobilnih komunikacija. Zbog toga se pred mobilne uređaje postavlja i dodatni zahtev da rade sa različitim vrstama rada³ i u više opsega,⁴ što obezbeđuje višestandardni rad. Ovakav zahtev može da zadovolji novi koncept radija – softverski radio. Arhitektura superheterodinskog radija ima više nedostataka i ne može poslužiti

kao hardverska podloga za softverski radio. Arhitektura PDK je i ovde pokazala znatne prednosti i omogućava realizaciju softverskog radija.

Na početku ovog rada analizirani su nedostaci superheterodinskog radija sa stanovišta zahteva savremenih ćelijskih mobilnih uređaja, opisan je PDK i istaknute njegove prednosti u odnosu na superheterodinski prijemnik. Opisani su i nedostaci PDK, na koje su istraživači u svetu poslednjih desetak godina uložili dosta energije da bi ih rešili. Na kraju rada prikazana je primena PDK u softverskom radiju.

Superheterodinski prijemnik

Arhitektura superheterodinskog prijemnika je zbog svoje visoke osetljivosti i selektivnosti u različitim varijantama jezgro skoro svih radio-prijemnika koji su poslednjih 80 godina u upotrebi (profesionalni radio-uređaji, radio i TV prijemnici, GPS prijemnici, itd.). Na slici 1 prikazana je principna blok-šema superheterodinskog prijemnika.

Kod ovog prijemnika pomoću radio-frekvencijskog (RF) pojasnog filtra izdvaja se, više ili manje selektivno, korisni signal iz mnogobrojnih signala indukovanih u anteni. U malošumnom pojačavaču⁵ korisni signal se pojačava, a filter iza njega služi da oslabi neželjenu simetričnu frekvenciju. Korisni signal se u prvom mešaču množi sa harmonijskim signalom iz prvog lokalnog oscilatora. Rezultat toga je translacija spektra korisnog signala na određenu, višu ili nižu frekvenciju. Ako se sa f_k obeleži central-

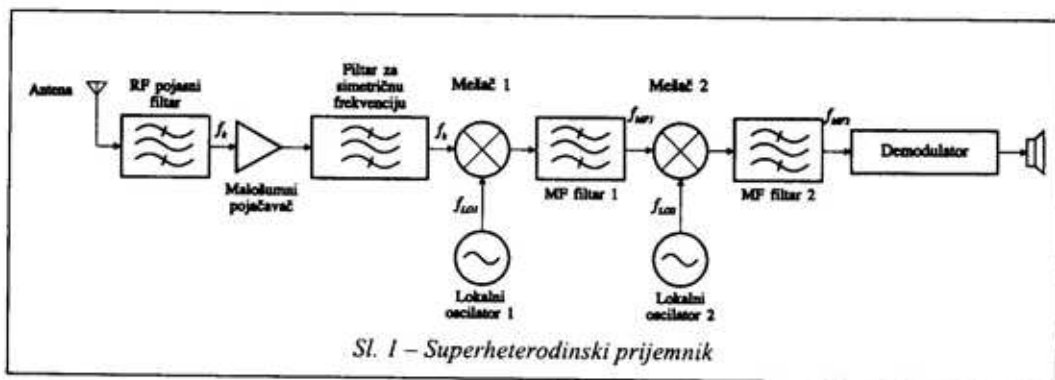
¹ Direct conversion receiver

² Roaming service

³ Multimode

⁴ Multiband

⁵ Low noise amplifier (LNA)



Sl. 1 – Superheterodinski prijemnik

na frekvencija spektra korisnog signala, a sa f_{LO1} frekvencija signala prvog lokalnog oscilatora, tada se na izlazu međufrekvencijskog (MF) filtra 1 dobija centralna frekvencija transliranog spektra korisnog signala (tako zvana prva međufrekvencija):

$$f_{MF1} = f_k \pm f_{LO1} \quad (1)$$

Pri promeni radne frekvencije za Δf i frekvencija prvog lokalnog oscilatora menja se za isti iznos. Na taj način se na izlazu prvog mešača uvek dobija korisni signal konstantne centralne frekvencije f_{MF1} . Zahvaljujući tome svi sklopovi iza prvog mešača podešeni su na fiksnu frekvenciju, čime se potrebna selektivnost, pojačanje i stabilnost jednostavnije postižu nego da se to izvodi pri promenljivoj frekvenciji. Pomoću drugog mešača i drugog lokalnog oscilatora spektar korisnog signala se translira na nižu frekvenciju (u odnosu na frekvenciju RF signala) koja je pogodna za dalju obradu (filtriranje, pojačanje i demodulacija). Sa stanovišta selektivnosti i osetljivosti ovo rešenje translacije spektra korisnog signala na fiksnu međufrekvenciju dalo je znatnu prednost superheterodinskom prijemniku u odnosu na ostale postojeće vrste pri-

jemnika, zbog čega je i dominirao u radio-tehnici dugi niz godina.

Sa stanovišta optimizacije arhitekture savremenog mobilnog uređaja radi njegove minijaturizacije, smanjenja cene i potrošnje energije, glavni nedostaci superheterodinskog prijemnika su:

- potreba za relativno skupim i glomaznim filtrima koje je teško integrisati i koji nisu pogodni za promenu propusnog opsega,

- postojanje simetrične frekvencije.⁶

Kod superheterodinskog prijemnika se iza mešača nalaze međufrekvencijski filtri, koji daju glavni doprinos selektivnosti čitavog prijemnika. Zbog toga ovi filtri zahtevaju rezonatore sa visokim Q faktorom. Što je viša međufrekvencija (manji odnos širine međufrekvencije i njene centralne frekvencije) to je potreban veći Q faktor. Visoki zahtev za Q faktorom postiže se korišćenjem filtera sa površinskim akustičnim talasom,⁷ piezoelektričnih ili kristalnih filtera. Potreba za visokim Q faktorom unosi dodatna ograničenja, jer ovi filtri često zahtevaju neuobičajene završne impedanse, i podešavanja propusnog opsega filtra mogu pogoršati šum, pojačanje, linearnost i

⁶ Image frequency

⁷ Surface-acoustic-wave filter (SAW)

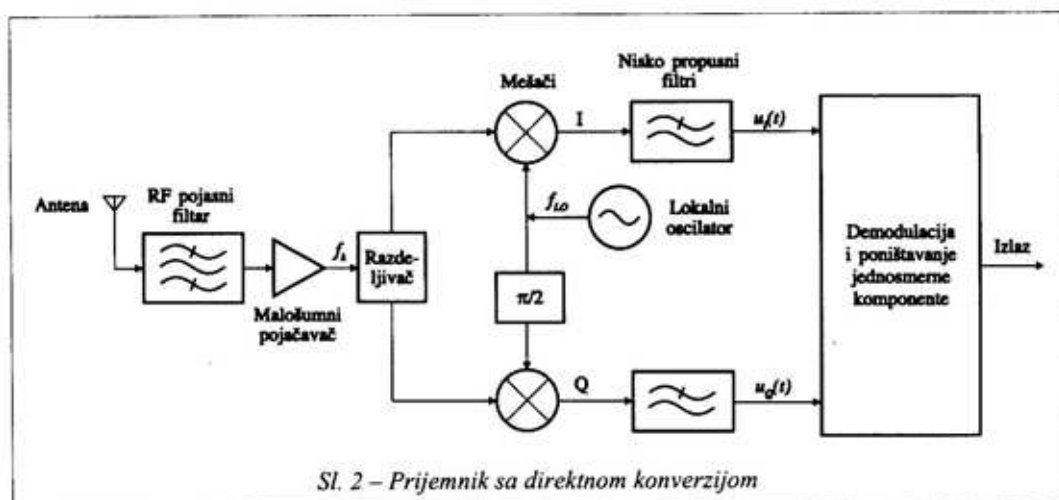
disipaciju snage susednih aktivnih stepena. Što je manji odnos širine međufrekvencije i centralne frekvencije to je propusna karakteristika filtra osetljivija na varijacije vrednosti podešavajućih elemenata. Zato je širina opsega međufrekvencijskog filtra podešena na određeni signal i nije je pogodno podešavati za drugi. To znači da superheterodinski prijemnik nije pogodan za višestandardni rad.

Kod superheterodinskog prijemnika frekvencija f_s koja je za $2f_{FMI}$ udaljena od frekvencije f_k i to na onu stranu na kojoj je frekvencija f_{LO} , predstavlja simetričnu frekvenciju. Ako se signal ove frekvencije probije od prvog mešača, on dalje prolazi kroz prijemnik na isti način kao i korisni signal na frekvenciji f_k i izaziva neželjeni odziv prijemnika. Zbog visoke verovatnoće pojavljivanja ovog signala kod ovog prijemnika je potrebno preduzeti mere za slabljenje ove frekvencije. Jedna od njih je postavljanje filtra za potiskivanje simetrične frekvencije između malošumnog pojačavača i prvog mešača. Ovaj filter je najčešće pasivan. Pored toga što povećava troškove prijemnika i što

ga je teško integrisati, on postavlja i dodatni zahtev za malošumnim pojačavačem – njegovo prilagodavanje na ulaznu impedansu filtra od 50Ω . Dvostrukim mešanjem kod superheterodinskog prijemnika smanjuje se uticaj simetrične frekvencije na taj način što se uzima visoka prva međufrekvencija (čak i viša od f_k), ali je i kod njega neophodan filter za potiskivanje simetrične frekvencije. Oдавно su poznate dve arhitekture prijemnika koje dobro eliminišu simetričnu frekvenciju i kod kojih posle malošumnog pojačavača nije potreban filter za gušenje simetrične frekvencije, a to su arhitekture Hartley i Weaver za potiskivanje simetrične frekvencije [1].

Prijemnik sa direktnom konverzijom

Na slici 2 prikazan je PDK, koji rešava dobar deo nedostataka superheterodinskog prijemnika sa stanovišta minijaturizacije, smanjenja cene, smanjenja potrošnje energije i mogućnosti višestandardnog rada.



Sl. 2 – Prijemnik sa direktnom konverzijom

Prva dva sklopa PDK – RF pojasni filter i malošumni pojačavač isti su kao i kod superheterodinskog prijemnika. Kod ovog prijemnika frekvencija lokalnog oscilatora f_{LO} jednaka je frekvenciji korisnog signala f_k , tako da je:

$$f_k - f_{LO} = 0 \quad (2)$$

Na osnovu jednačine (2) može se zaključiti da ovaj prijemnik nema međufrekvenciju, tj. da je međufrekvencija jednaka nuli, tako da se na izlazu niskopropusnih filtera u I i Q grani dobija signal u osnovnom opsegu:

$$u_I(t) = U(t)\cos[\phi(t)] \quad (3)$$

$$u_Q(t) = -U(t)\sin[\phi(t)]$$

gde je informacija sadržana u fazi $\phi(t)$ i/ili u amplitudi $U(t)$. Kvadraturne komponente dalje se obrađuju u demodulatoru. Zbog toga što je kod ovog prijemnika međufrekvencija jednaka nuli, on se naziva i prijemnik sa nula-međufrekvencijom.⁸ U teoriji digitalnih demodulatora kod prijemnika na slici 2 mešači sa lokalnim oscilatorom predstavljaju deo demodulatora, zbog čega se ovaj prijemnik često naziva i direktni.

Prijemnik sa direktnom konverzijom ima više prednosti u odnosu na superheterodinski prijemnik. Budući da je kod ovog prijemnika međufrekvencija jednaka nuli on nema simetričnu frekvenciju. Zbog toga nisu potrebni sklopovi koji smanjuju uticaj ove frekvencije – filter za slabljenje simetrične frekvencije i sklopovi za drugu međufrekvenciju. Kod ovog prijemnika koristi se samo

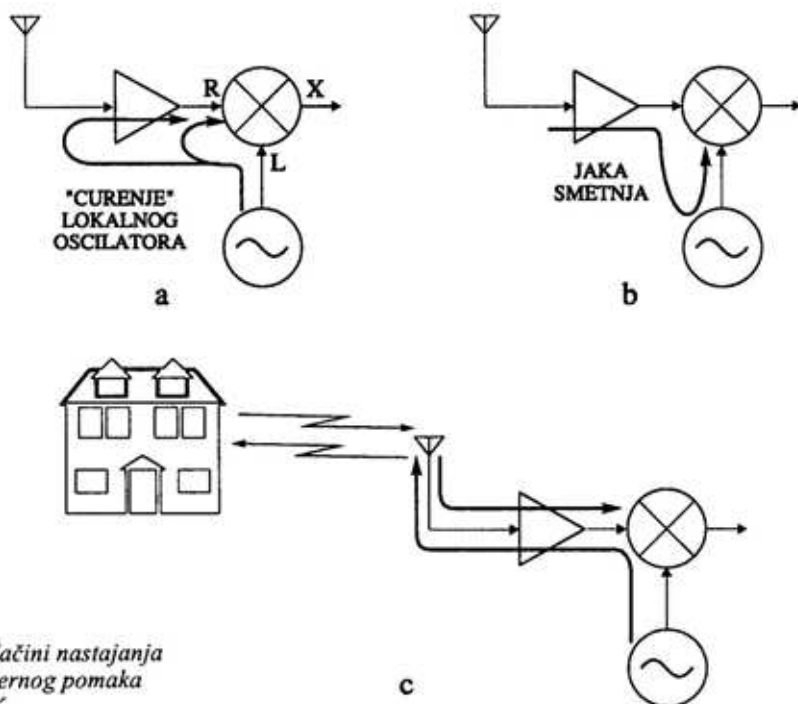
jedan lokalni oscilator, što znači da se unosi samo fazni šum jednog lokalnog oscilatora. Kako se na izlazu mešača ovog prijemnika izdvaja signal u osnovnom opsegu, nisu mu potrebni glomazni međufrekvencijski filteri sa velikim Q faktorom, već se na izlazu mešača koriste jednostavni niskopropusni filteri. Ovaj prijemnik podešava se na signale različite širine u osnovnom opsegu jednostavnim podešavanjem gornje granične frekvencije niskopropusnih filtera u I i Q grani.

Pored prednosti u odnosu na superheterodinski prijemnik, PDK ima i ozbiljne inherentne nedostatke, koji su ga dugi period držale u senci superheterodinskog koncepta.

Pošto se korisni RF signal kod direktne konverzije odmah konvertuje u osnovni opseg, sa relativno slabim filtriranjem u RF pojasom filteru, različiti fenomeni doprinose stvaranju jednosmernih signala (jednosmerni pomak),⁹ koji se direktno pojavljuju kao ometajući signali u osnovnom opsegu korisnog signala. Signal lokalnog oscilatora može, konduktivnim ili radijacionim putem, da stigne na RF ulaz (R port) mešača i, mešajući se sa samim sobom, da proizvede jednosmernu komponentu na izlazu mešača (sl. 3a). Ako ovo „curenje“ signala lokalnog oscilatora stigne na ulaz malošumnog pojačavača proizvodi još jače ometanje (sl. 3a). Ovaj efekat predstavlja veliku teškoću pri integraciji lokalnog oscilatora, mešača i malošumnog pojačavača na jednom silikonskom substratu, gde brojni mehanizmi mogu doprineti slaboj izolaciji. Sa druge strane, jaka

⁸ Zero-IF receiver

⁹ DC offset



Sl. 3 – Načini nastajanja jednosmernog pomaka kod PDK

smetnja u blizini korisnog signala (koju propušta RF pojasni filter), pojačana u malošumnom pojačavaču, može doći do ulaza za lokalni oscilator (L-port) i na taj način izazvati mešanje sa samim sobom i proizvesti jednosmernu komponentu (sl. 3b). I kod superheterodinskog prijemnika i kod PDK postoji mogućnost da deo energije lokalnog oscilatora konduktivnim putem preko mešača, malošumnog pojačavača i RF pojasnog filtra (zbog njihove nedovoljne reverzne izolacije) dođe do antene, koja je zrači u okolni prostor. Ovaj signal pojavljuje se kao smetnja za ostale prijemnike u blizini. Kod PDK ova pojava može izazvati i jednosmerni signal u osnovnom opsegu. Naime, zračeni signal može se odbiti od zgrada i pokretnih objekata i vratiti u

prijemnik (sl. 3c). Ipak, ovaj efekat kod ovog prijemnika je manje opasan za stvaranje jednosmernog pomaka od „curenja“ lokalnog oscilatora i jake smetnje.

„Curenje“ signala iz lokalnog oscilatora ili RF signala na neodgovarajući ulaz mešača nije jedini način na koji se neželjeni jednosmerni signal može proizvesti. Sklopovi prijemnika koji imaju nelinearnost parnog reda će, takođe, proizvesti jednosmernu komponentu signala.

Da li će jednosmerni pomak učiniti prijemnik manje osetljivim zavisi od tipa sistema. Očigledno je da kapacitivna sprema na izlazu mešača eliminiše jednosmernu komponentu. Neke modulacione tehnike kao, na primer, modulacija sa frekvencijskim pomeranjem (FSK), pokazuju malu degradaciju ako se iz spek-

tra odstrane niske frekvencijske komponente, pa se uticaj jednosmernog pomaka eliminiše pomoću kondenzatora na izlazu mešača. Međutim, neke modulacione tehnike imaju značajnu spektralnu snagu na niskim frekvencijama, pa će kapacitivna sprega izazvati značajan gubitak signala, kao i degradaciju verovatnoće greške u prenosu. Zato se za eliminaciju jednosmernog pomaka koriste druge metode. Jedna od njih zasniva se na primeni digitalnog signala procesora (DSP) u okviru obrade signala u osnovnom opsegu.

Sledeći problem kod PDK je nelinearnost. Kao i superheterodinski prijemnik i PDK je izložen sporednim neželjenim odzivima, koji su posledica nelinearnosti malošumnog pojačavača i mešača. Kod superheterodinskog prijemnika oni se pojavljuju pri ulaznim RF sporednim frekvencijama f_{NO} , pri kojima je:

$$|nf_{NO} \pm mf_{LO}| = f_{MF} \quad (4)$$

a kod PDK na sporednim frekvencijama f_{NO} pri kojima je:

$$nf_{NO} - mf_{LO} = 0 \quad (5)$$

Ako se na ulazu PDK nalazi RF signal:

$$u_{RF} = U \cos(\omega t) \quad (6)$$

i pod pretpostavkom da je nelinearnost prijemnika modelovana polinomom:

$$u_z(u_{RF}) = a_1 u_{RF} + a_2 u_{RF}^2 + a_3 u_{RF}^3 + \dots \quad (7)$$

dobiće se izlazni signal u kojem se nalazi i jednosmerna komponenta:

$$\begin{aligned} u_z(u_{RF}) &= a_1 U \cos(\omega t) + \\ &+ a_2 U^2 \left(\frac{\cos(2\omega t) + 1}{2} \right) + \dots \\ &= \underbrace{\frac{a_2 U^2}{2}}_{\text{jednosmerna komponenta}} + a_1 U \cos(\omega t) + \\ &+ \frac{a_2 U^2}{2} \cos(2\omega t) + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

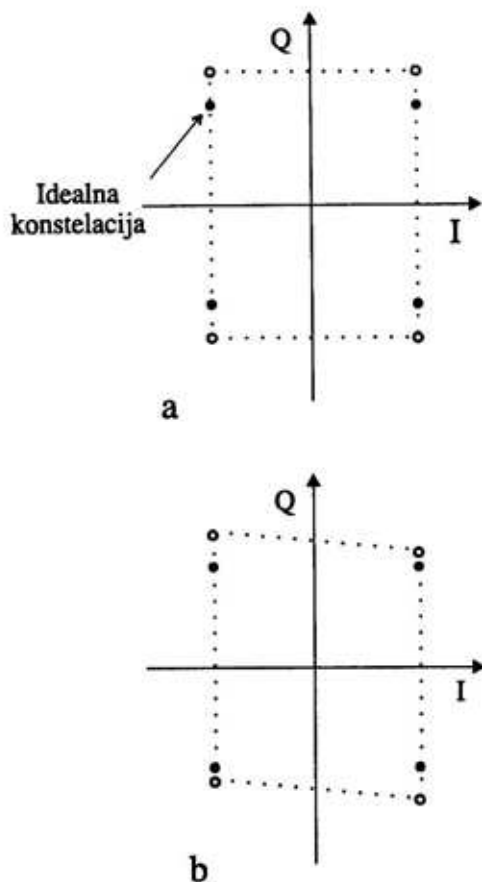
Važno je uočiti da kod PDK, zbog njegove nelinearnosti, jak ometajući RF signal izaziva jednosmernu komponentu na izlazu mešača bez obzira na to da li je taj signal na sporednoj frekvenciji ili ne. Ova komponenta se pojavljuje na izlazu mešača primarno usled nelinearnosti PDK drugog reda, koja se karakteriše tačkom preseka¹⁰ drugog reda IP(2).

Zbog visoke frekvencije lokalnog oscilatora, kod PDK nije moguće realizovati digitalni IQ demodulator. Analogni IQ demodulator karakteriše nejednaka podešenost dveju grana. Zbog toga dolazi do narušavanja potrebnog faznog i amplitudnog odnosa između signala u IQ granama (slika 4), a time i do greške u demodulisanom signalu. Tipično, poželjno je držati amplitudsku nepodešenost ispod 1dB i faznu nepodešenost ispod 5°. Zahvaljujući usavršavanju monolitne integracije to postaje sve dostižnije.

Mada je koncept PDK dao rešenja na mnoge konstrukcione probleme, doveo je i do komplikacija pri realizaciji. Samo mali broj kompanija uspeo je da realizuje PDK, i to u frekvencijskom opsegu pejdžera i bežičnih telefona do 900

¹⁰ Intercept point

MHz. Na otvorenom tržištu jedino kompanija Analog Devices nudi GSM čip set Othelo sa direktnom konverzijom (frekvencijski opseg 880 MHz do 960 MHz i 1710 MHz do 1880 MHz) [2].



Sl. 4 – Nebalansiranost analognog IQ demodulatora:
a – nebalansiranost pojačanja, b – fazna nebalansiranost

Prijemnik sa konverzijom na nisku međufrekkvenciju

Zbog teškoća pri otklanjanju nedostataka kod PDK, oдавно se pojavila arhitektura prijemnika kod koje su elimi-

nirani glavni nedostaci PDK, a istovremeno zadržane sve njegove prednosti. To je prijemnik kod kojeg se koristi konverzija RF signala na nisku međufrekkvenciju, koja obično iznosi oko širine jednog kanala. Tako, na primer, ako je širina kanala 1 MHz međufrekkvencija se postavlja između 500 kHz i 1,5 MHz. Ovaj prijemnik naziva se i prijemnik sa međufrekkvencijom blizu nule.¹¹ Kod ovog prijemnika odnos širine međufrekkvencije i njene centralne frekvencije je veliki, pa je međufrekkvencijski filter moguće realizovati sa komponentama koje imaju mali Q faktor. Međufrekkvencijski filter sa površinskim akustičnim talasom ili kristalni filter, potrebni u slučaju visoke međufrekkvencije, mogu se zameniti aktivnim RC filtrom ili nekim drugim filtrom za niske frekvencije, koji su pogodni za silikonsku integraciju. Niska međufrekkvencija može se translirati u osnovni opseg pomoću dodatnog mešača ili, još bolje, u digitalnom domenu dovođenjem međufrekkvencijskog signala na analogno-digitalni konvertor. U [3] su opisani postupci ove translacije.

Primena PDK u softverskom radju

Na slici 5 prikazana je arhitektura idealnog softverskog prijemnika.

Idealni softverski prijemnik na sadašnjem tehnološkom i tehničkom stepenu razvoja još je teško realizovati. Glavna prepreka je analogno/digitalni (A/D) konvertor koji se ne može upotrebiti na radio-frekkvencijama zbog rigoroznih zahteva koje on mora da zadovolji (viso-

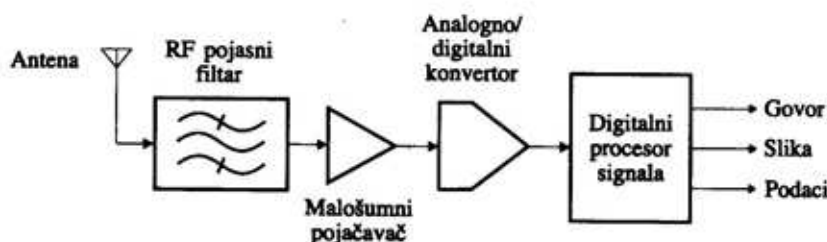
¹¹ Near-zero IF-NZIF

ka frekvencija uzorkovanja, visoka rezolucija, efekat džitera itd.). Zbog toga se vrši translacija signala na nižu frekvenciju na kojoj se obavlja A/D konverzija. Princip heterodinskog prijemnika nije pogodan za realizaciju softverskog prijemnika, zbog svih njegovih ranije nabrojanih nedostataka (simetrična frekvencija, glomazni i skupi filtri, nepogodnost za višestandardni rad, itd.).

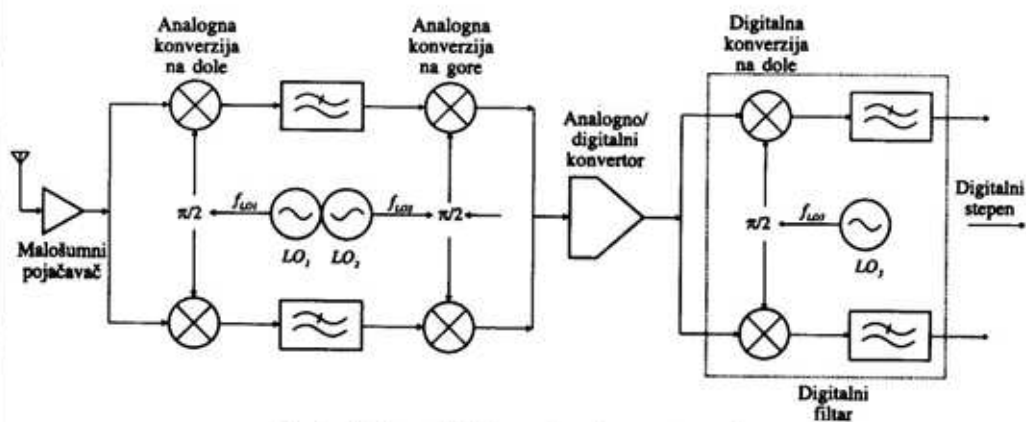
Koncept PDK može se upotrebiti za implementaciju softverskog prijemnika. Pri tome se signali u I i Q granama posle mešanja vode na niskopropusne filtre, kojima se programski menja gornja granična frekvencija u slučaju promene vrste rada. Zatim se ovi signali konvertuju

iz analognog u digitalni oblik pomoću IQ A/D konvertora. Izlaz iz A/D konvertora vodi se u digitalni stepen gde se selekcija potrebnih kanala ostvaruje pomoću softverski definisanih filtara sa programabilnom graničnom frekvencijom. Nedostatak ove konfiguracije je pojava neželjenih odziva u blizini $f = 0$ (jednosmerne komponente). Zbog toga se koristi nešto složenija konfiguracija softverskog prijemnika u kojem se, takode, koristi koncept PDK (slika 6) [4].

Kod ovog prijemnika prijemni signal se direktno konvertuje u osnovni opseg, gde se ceo ulazni opseg grubo selektuje u niskopropusnom filtru. Posle filtriranja cela širina opsega signala se transli-



Sl. 5 – Idealni softverski radio-prijemnik



Sl. 6 – Primena PDK u softverskom prijemniku

ra na programabilnu međufrekvenciju. Međufrekvencijski signal ima tačno određenu širinu. Nakon toga signal se digitalizuje i digitalno translira u osnovni opseg.

Zaključak

Zbog prednosti u odnosu na superheterodinski prijemnik, PDK će u budućnosti nalaziti sve veću primenu, naročito u onim uređajima gde se traži mala potrošnja, male dimenzije, niski troškovi sastavnih delova i višestandardni rad.

U ćelijskim mobilnim komunikacijama trenutno je važna tranzicija od mobilnih uređaja koji prenose samo glas ka uređajima koji prenose i podatke i sliku. Standardizovani servis koji GSM sistemu omogućava ovu tranziciju jeste GPRS (General Packet Radio Service), kao ključni element za premošćavanje procesa između druge generacije (2G) mobilnih uređaja za prenos govora i multime-

dijalno orijentisanih uređaja treće generacije (3G). Koncept softverskog radija i arhitektura PDK i prijemnika sa konverzijom na nisku međufrekvenciju predstavljaju jaku podršku razvoja 3G.

Efekti primene PDK značajni su i za vojnu primenu, posebno kod ručnog i prenosnog radio-uređaja, koji se po zahtevima sve više približavaju univerzalnom mobilnom terminalu treće generacije mobilnih komunikacija. Zbog toga je angažovanost na istraživanju i praćenju trendova razvoja ćelijskih mobilnih komunikacija sve intenzivnija.

Literatura:

- [1] Mashhour, A.; Domino, W.; Beamish, N.: On the direct conversion receiver – a tutorial, *Microwave Journal*, June, 2001.
- [2] Mannion, P.: Direct conversion prepares for cellular prime time, *Electronic Design*, November 22, 1999.
- [3] Droinet, Y.: Advanced RF technologies for the wireless market, *Microwave Journal*, September, 2001.
- [4] Zgonjanin, D.; Mitrevski, K.; Zelenbaba, Lj.: *Software radio: Principles and overview*, IX Telekomunikacioni Forum, Beograd, 2001.
- [5] Šunjevarić, M.: *Radio-tehnika I – skripta*, Vojnotehnička akademija, Beograd, 2002.