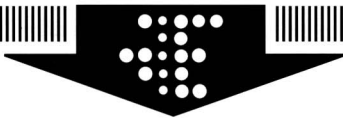


# elektronika u riječi i slici



Uređuje: Mirko Klaić, dipl. ing.

## TRENDOVI U PRIMJENI DIGITALNE ELEKTRONIKE

### PRIMJENA ELEKTRONIKE

Elektronika se danas primjenjuje u gotovo svim područjima svakodnevnog života. Njezino širenje je dodatno potaknuto primjenom digitalne elektronike i ugrađenih računala. Danas je već gotovo nemoguće naći elektronički uređaj koji u sebi ne sadrži neku vrstu računala. Područja primjene ima stvarno mnogo: od svih vrsta komunikacija, primjena u automatskoj regulaciji i upravljanju, pa sve do komercijalnih elektroničkih sustava kao što su audio i video sustavi, TV, DVD, videorekorderi, kamkorderi, digitalni fotoaparati, itd. Svako od navedenih područja primjene ima svoje specifičnosti no ono što je zajedničko za sva jest težnja digitalizaciji, tj. primjeni računala u svrhu obavljanja što je moguće većeg udjela funkcionalnosti. Zbog toga razvoj ugrađenih računalnih sustava, a posebice programska izvedba funkcija elektroničke obradbe signala predstavlja jedan od ključnih trendova u suvremenoj elektronici.

### Programska izvedba funkcija elektroničke obradbe signala

Većina primjena elektroničkih sustava vezana je uz obradbu signala. Zadatak takvog sustava je da nad uzorcima ulaznih signala provede željene operacije, te na osnovi toga formira izlazne nizove uzoraka i konačno pretvorbom u analognu domenu, željene izlazne signale. Dakle, obradba se provodi u vremenski diskretnoj domeni primjenom programskih izvedbi i/ili digitalnih sklopovskih rješenja. Razvoj računala i razvoj teorije digitalne obradbe signala omogućio je programsku izvedbu vrlo složenih funkcija elektroničke obradbe signala, koja su potpuno neizvediva klasičnim analognim sklopovima. Iz navedenog bi se moglo zaključiti da se problem projektiranja elektroničkih sustava preselio iz domene elektronike u domenu programskog inženjerstva, tj. da se posao elektroničara danas sveo isključivo na projektiranje sklopovlja sustava. Međutim, razvoj algoritama digitalne obradbe signala, pa čak i sama njihova izvedba na procesorima, zahtijevaju vrlo dobro poznavanje elektronike, teorije sustava i signala i teorije digitalne obradbe signala. Osnovni principi i postupci su slični kao i kod projektiranja analognih sustava, dok su samo alati drugačiji. Danas postoje brojni programski paketi i okoline koji elektroničarima olakšavaju razvoj algoritama digitalne obradbe signala. Takvi alati sadržavaju već gotove opsežne biblioteke funkcija obradbe signala, čime se značajno umanjuje potreba za razvoj i programiranje svakog pojedinog dijela algoritma od nule. Projektiranje se svodi na povezivanje funkcijskih blokova u mreže, odnosno definiranje parametara pojedinih blokova u svrhu određivanja njihove funkcionalnosti. Što se tiče izvedbe algoritama na stvarnim procesorima za obradbu signala (DSP), na tržištu također postoje automatski generatori izvornog kôda za brojne porodice DSP procesora, čija je zadaća da na osnovi definiranog funkcijskog modela željenog sustava samostalno proizvedu izvorni kôd. Naravno da svi ti alati nisu svemogućni, tj. da primjena digitalne obradbe signala u elektronicu često zahtijeva i značajno iskustvo programskog inženjerstva, ali isto tako i vrlo dobro poznavanje teorije.

### Primjene digitalne obradbe signala u kodiranju

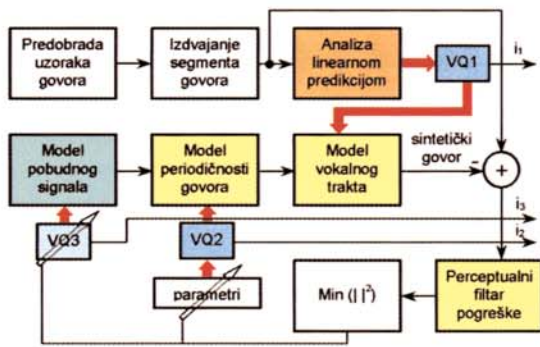
Primjena procesora omogućila je razvoj novih, mnogo složenijih, algoritama obradbe signala. Vrlo dobra ilustracija digitalne obradbe signala korištenjem programskih izvedbi jest područje kodiranja signala, jer se uistinu radi o primjeni kod koje su analogne izvedbe nezamislive. Pod pojmom kodiranja se podrazumijeva pretvorba analognih signala u digitalnu formu u svrhu učinkovite pohrane ili prijenosa, tj. tako da uz zadanu kvalitetu rekonstruiranog signala zahtijevaju što je moguće manje bita za pohranu odnosno prijenos. Kodiranje se tipično koristi za govorni i audio signal (engl. *speech and audio coding*), ali i za kodiranje slike i video signala (engl. *image and video coding*). Kodiranje u širem smislu obuhvaća i obično vremensko otpikavanje i kvantizaciju signala, tj. A/D i D/A pretvorbu, što je poznato pod nazivom pulсно kodna modulacija (engl. *pulse code modulation*, PCM). Međutim, glavni smisao kodiranja jest kako takve PCM uzorke transformirati u drugačiji niz digitalnih uzoraka koji traži mnogo manju brzinu prijenosa, ili prostor za pohranu. Dakle, zadatak kodiranja jest kompresija ili sažimanje ulazne informacije. Najveća učinkovitost sažimanja se postiže koderima koji su prilagođeni statističkim svojstvima signala koji se kodira. Najčešće se takvi postupci provode uz gubitke kvalitete, tj. rekonstruirani signal nije identična replika ulaznog signala. Cilj kodiranja jest učiniti razliku, tj. pogrešku kodiranja, što je moguće manje zamjetljivom. Poznato je da zbog svojstava ljudske percepcije zvuka i slike, različiti tipovi pogrešaka nemaju isto perceptualno značenje, tj. neki su uočljiviji, dok drugi nisu. Većina današnjih sustava kodiranja koristi ta svojstva, te prilikom dodjele bitova pojedinim značajkama signala, veću pažnju i veći broj bita posvećuje upravo onim važnima.

Zbog visokih procesnih mogućnosti današnjih DSP procesora, moguće su vrlo složene obradbe signala. Kodiranje govornog signala otpikanog s 8 kHz danas se provodi algoritmima složenosti od preko 10 MIPSa (milijuna instrukcija u sekundi). To znači da procesor za jedan jedini ulazni uzorak signala izvede i preko 1000 instrukcija, od kojih su preko pola operacije množenja ili zbrajanja. Takvi tipovi obradbe signala u analognoj domeni uopće nisu mogući.

U slučaju obradbe dvodimenzionalnih signala kao što su slika ili video, količina ulaznih podataka je mnogo veća. Video slika PAL formata rezolucije 720×576 piksela sa 25 slika u sekundi zahtijeva propusnost od čak 10 milijuna uzoraka u sekundi. Za bilo kakve upotrebljive obradbe, procesor mora imati propusnost od barem 100 do 1000 operacija u  $\mu$ s. Zbog toga se često kod takvih primjena koriste kombinirana sklopovsko-programska rješenja.

### Standardi kodiranja govora

Tijekom zadnjih 20 godina, predloženi su brojni postupci kodiranja govora, koji su rezultirali mnoštvom standarda na kojima se temelje današnji »govorom omogućeni« uređaji. Primjena kodiranja govora u digitalnim mobilnim telefonima bila je dodatni poticaj razvoju ovih postupaka. Digitalni prikaz govornog signala mnogo je pogodniji za prijenos kada velik broj korisnika dijeli ograničenu širinu pojasa spektra. Brojni standardi kodiranja govora definirani su u okviru udruženja *International*



Sl. 1. Kodno pobudni parametarski koder govornog signala

Telecommunication Union (ITU), kao što su G.711, G726, G.722, G728, G729, G723.1 s brzinama prijenosa od 5,3 do 64 kbit/s. Pored njih, u pojedinim dijelovima svijeta su razvijeni različiti standardi kodiranja govora specifično za primjene u mobilnim telefonima, kao što su GSM u Europi, IS-54 i IS-96 u SAD i PDC u Japanu. Primjenom takvih koder, govor se prenosi uz brzine prijenosa između 3,45 do 13 kbit/s. Ulazni signal u ove koder je govorni signal otpisan s 8 kHz s rezolucijom između 8 i 16 bita. Prema tome, vidljivo je da su stupnjevi sažimanja toliki, da u prosjeku svakom vremenskom uzorku pripada samo 0,4 bita. To se postiže korištenjem tzv. parametarskih postupaka kodiranja. Struktura tipičnog parametarskog koder prikazana je na slici 1. Umjesto da se svaki pojedini uzorak govora kvantizira, kodira i šalje na prijamnu stranu, kod parametarskog koder postupak se provodi na cijelom bloku uzoraka, tj. na segmentu ulaznog signala tipičnog trajanja 25 ms. Za svaki takav segment se provodi analiza signala postupkom linearne predikcije, kojim se pokušava identificirati digitalni filter koji vjerno opisuje kratkotrajna spektralna svojstva govornog signala, odnosno prijenosnu funkciju vokalnog trakta za taj glas. Tipično je riječ o filteru desetog reda koji ima samo polove, tj. čija je frekvencijska karakteristika opisana s 10 koeficijenta u nazivniku prijenosne funkcije. Zbog činjenice da zvučni segment govora kod kojeg glasnice titraju pokazuje kvaziperiodična svojstva s periodom između 3 i 16 ms, pogodno je i ovu periodičnost modelirati dodatnim filterom kojim se opisuju vremenski dugotrajne korelacije signala, odnosno fizikalni proces na glasnica. Ovaj filter je tipično opisan s nekoliko parametara (2 do 4) koji obuhvaćaju period signala kao i faktore korelacije na pomacima koji su bliski periodu. Konačno se određuje i pobudni signal u ovu kaskadu filtera, koji ima oblik slučajnog šuma mnogo manje energije u usporedbi s ulaznim govornim segmentom. Ova redukcija energije je osnova za smanjenje brzine prijenosa. Razvijeni su

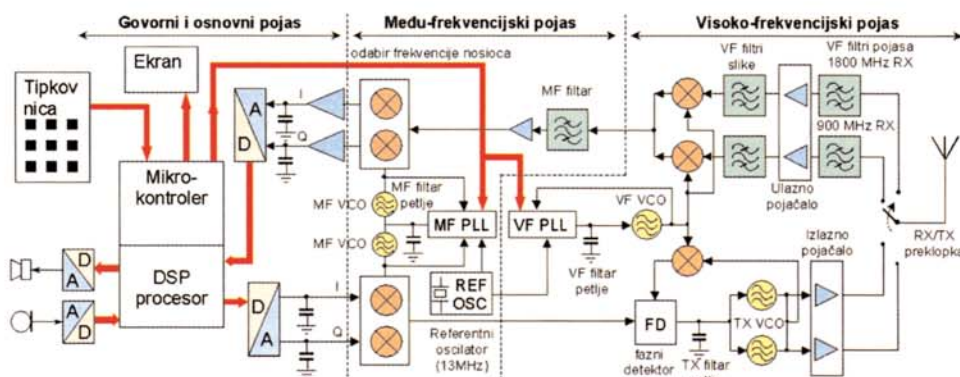
brojni algoritmi kojima se ovaj pobudni signal može vjerno reprezentirati uz minimalni broj bita po uzorku. Izračunati parametri filtera se kvantiziraju, te se zajedno s učinkovito kvantiziranim pobudnim signalom prenose na prijamnu stranu, na kojoj se provodi inverzan postupak rekonstrukcije signala. Cijeli postupak se ponavlja tipično 50 do 100 puta u sekundi. Visok stupanj sažimanja se dodatno ostvaruje primjenom postupka vektorske kvantizacije (VQ) kojom se kvantizacija provodi istovremeno nad cijelim vektorom realnih brojeva kao jednom entitetu. Prilikom kodiranja, se iz unaprijed projektirane kodne knjige bira vektor koji je po određenom kriteriju najbliži ulaznom vektoru, te se na prijamnu stranu šalje isključivo indeks tog odabranog vektora u kodnoj knjizi. Opisani postupak se koristi za kvantizaciju parametara oba filtera (indeksi  $i_1$  i  $i_2$ ), ali i za kvantizaciju blokova uzoraka pobudnog signala tipičnog trajanja 5 ms (indeks  $i_3$ ). Odabir najboljeg pobudnog vektora se provodi propuštanjem svih mogućih vektora u kodnoj knjizi pobude VQ3 kroz kaskadu kvantiziranih filtera, te se bira onaj koji na izlazu daje signal perceptualno najbliži ulaznom segmentu govora.

Svi standardi kodiranja govora korišteni u mobilnim telefonima druge generacije spadaju u grupu parametarskih koder i svi s iznimkom standarda IS-96 traže stalnu brzinu prijenosa. Iskustva u radu mobilnih sustava pokazala su da je vrlo teško osigurati stalnu brzinu prijenosa digitalne informacije, jer ostvariva brzina ovisi o uvjetima prijenosa koji se značajno mijenjaju ovisno o poziciji mobilnog telefona u odnosu na baznu stanicu. Zbog toga je kao standard kodiranja govora za telefone treće generacije prihvaćen novi AMR koder koji ima cijeli niz modaliteta rada. Svaki modalitet zahtijeva drugu brzinu prijenosa, te se tako koder može dinamički prilagođivati trenutačnoj propusnosti radiokanala.

## I. Primjena elektronike u mobilnim telefonima

Vrlo dobra ilustracija primjene analogne i digitalne elektronike te postupaka digitalne obradbe signala su današnji mobilni telefoni. Sa stajališta korisnika radi se o običnom telefonu, no u stvari se u njegovoj unutrašnjosti krije vrlo složen ugrađeni računalni sustav sa čak dva procesora. Osnovni dijelovi mobilnog telefona su mikrokontroler sa sklopovljem za upravljanje, DSP procesor za obradbu signala u osnovnom pojasu, A/D i D/A pretvornici, visokofrekvencijski dio s radio primopredajnikom, akumulatorska baterija, tipkovnica, ekran, zvučnik i mikروفon. Blok shema GSM mobilnog telefona prikazana je na slici 2.

Visokofrekvencijski dio je zadužen za ostvarenje digitalne komunikacije s baznom stanicom putem dvosmjerne radio veze. Ulazni visokofrekvencijski signal s antene se filtrira, i pojačava, te se zatim čitav pojas prvim miješanjem spušta iz mikrovlnog područja u međufrekvencijski pojas, što je prikazano u



Sl. 2. Blok shema GSM mobilnog telefona

gornjem desnom dijelu slike 2. Kako GSM standard ovisno o mrežnom operateru koristi različite frekvencijske pojase za prijenos (900, 1800 ili 1900 MHz), za svaki pojas postoji paralelna grana, s pripadnim filtrima i pojačalima. Međufrekvencijski signal koji može sadržavati svih 124 nosioca se zatim propušta kroz drugi stupanj miješala kojima se izdvaja samo jedan kanal širine 200 kHz, kao što je prikazano u srednjem dijelu slike 2. Izlazni par signala u osnovnom pojasu, tj. signal u fazi (I) i kvadraturni signal (Q) se zatim otpikavaju i obrađuju u vremenski diskretnoj domeni.

Obradba unutar DSP procesora obuhvaća demodulaciju, tj. pretvorbu GMSK (engl. *Gaussian Minimum Shift Keying*) modularnog signala opisanog uzorcima I i Q signala u digitalni niz te zatim sinkronizaciju i izdvajanje korisne digitalne informacije. Kod GSM standarda, osim frekvencijske podjele na jedan od 124 para nosioca (za prijam i predaju) osam istovremenih korisnika dijeli jedan kanal pridružen paru nosioca vremenskim preklapanjem, što je poznato kao *Time Division Multiple Access*, TDMA. Zbog toga se od 64 susjedna paketa odabire samo svaki osmi, tj. samo oni koji pripadaju logičkom kanalu pridruženom prijemu tog mobilnog telefona. Nakon prikupljanja 8 takvih paketa, koji nose ukupno 912 bita informacije, provodi se raspletanje poruke i korekcija pogrešaka nastalih prijenosom postupkom dekodiranja primljenih korekcijskih kodova. Izlaznih 520 bita korekcijskog dekodera opisuju parametre govornog signala za dva susjedna okvira analize i sinteze trajanja 20 ms, koji se prosljeđuju parametarskom dekoderu govornog signala da na osnovi njih postupkom sinteze izračunava 320 uzoraka rekonstruiranog govornog signala. Konačno se D/A pretvorbom tih uzoraka dobiva primljeni govorni signal koji se pojačava i reproducira na zvučniku.

Suprotni smjer je vrlo sličan opisanom. Signal s mikrofona se otpikava i prosljeđuje u DSP procesor, tj. u koder govornog signala koji izračunava parametre modela govora za svaki okvir analize, te kvantizacijom parametara modela formira izlaznu digitalnu poruku. Ona se zaštićuje korekcijskim enkodiranjem i paketi uz dodavanje sinkronizacijske informacije. Nakon GMSK modulacije i izračunavanja uzoraka izlaznih I i Q signala provodi se njihova D/A pretvorba, kvadraturna modulacija u međufrekvencijski pojas i konačna frekvencijska transpozicija u visokofrekvencijski pojas primjenom naponski upravljanih oscilatora i fazno-zatvorenih petlji. Za svaki izlazni pojas postoji zasebno pojačalo snage. Pojačani visokofrekvencijski signal se prosljeđuje do izlazne antenske sklopke čija je zadaća da antenu u pravom trenutku poveže s ulaznim odnosno izlaznim krugom mobitela i to za sve podržane pojase rada. Tijekom odašiljanja izlaz se aktivira 217 puta u sekundi, ali u trajanju od svega 577  $\mu$ s, tj. samo jednu osminu vremena.

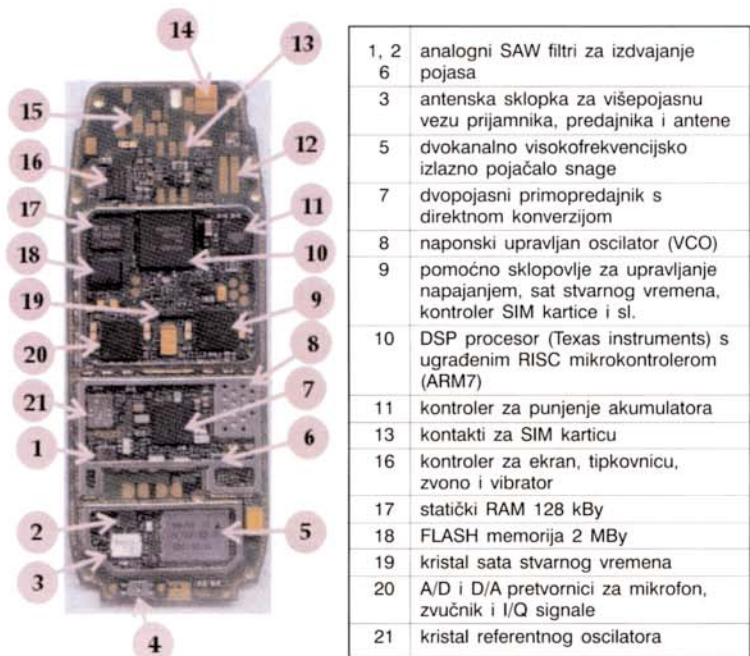
S obzirom da se većina postupaka obradbe signala provodi programski unutar DSP procesora, lako se može prilagoditi korištenom standardu. To može biti osnovni GSM standard, njegove inačice s pola brzine prijenosa ili povećanom kvalitetom, ali čak i potpuno drugi standardi kodiranja kao npr. AMR koder korišten u mobilnim telefonima treće generacije. Kako UMTS standard za mobilne telefone treće generacije podrazumijeva i potpuno drugačiji način radioprijenosa i modulacije kao i potpuno druge frekvencijske pojaseve, klasična heterodinska arhitektura radioprimopredajnika prikazana na slici 2 nije podesna za takav multimodalni rad, tj. za istovremenu podršku GSM i UMTS standarda. Jedan od načina rješavanja ovog problema jest pomak točke A/D i D/A pretvorbe bliže anteni, tj. između međufrekvencijskog i visokofrekvencijskog dijela. U tom slučaju se obradba međufrekvencijskog signala velike širine pojasa (npr. 25 MHz) tako-

der provodi u vremenski diskretnoj domeni, kombinacijom programabilnih sklopovskih i programskih rješenja. Takav pristup je u literaturi poznat kao *Software Defined Radio*, jer se većina funkcija prijama i predaje obavlja postupcima digitalne obradbe signala. To daje iznimnu fleksibilnost prijamnika i moguće je ostvariti iznimno dobre karakteristike, no značajna mana ovih potpuno digitalnih rješenja jest u visokoj potrošnji energije, jer se ipak radi o digitalnom sustavu s vrlo visokom frekvencijom takta. Zbog toga se današnje izvedbe UMTS telefona još uvijek temelje na nezavisnim, namjenskim primopredajnicima za svaki od standarda, koji se tada koriste ovisno o željenom modu rada. Kod takvih visoko integriranih primopredajnika funkcionalnost se ostvaruje kombiniranim analognim i digitalnim rješenjima, što je poznato pod nazivom *Mixed Signal Processing*. Najčešće se temelje na arhitekturi s direktnom konverzijom, kod koje se potpuno izbjegava međufrekvencijski pojas, te se signal direktno spušta iz visokofrekvencijskog u osnovni pojas jednostupanjskom demodulacijom.

### Izvedbe mobilnih telefona

Tiskana pločica tipičnog modernog GSM mobilnog telefona prikazana je na slici 3. Sve elektroničke komponente nalaze se s gornje strane tiskane pločice koja je izvedena u tehnologiji površinske montaže komponenta (engl. *surface mount technology*), dok se donja strana koristi isključivo za izvedbu kontakata tipkovnice. Radioprimopredajnik se nalazi u donjoj polovici pločice i kao što je vidljivo na slici 3 realiziran je pomoću svega 8 većih komponenta. Jezgru tog sustava čini dvopojasni primopredajnik s direktnom konverzijom (7) s pripadnim oscilatorima (8 i 21), pojasnim filtrima (1, 2 i 6) i izlaznim pojačalom (5). Veza s antenom ostvarena je antenskom sklopkom (3), koja sadrži i prilagodbene filtre za pojedine pojase.

Za obradbu signala u osnovnom i govornom pojasu zadužena je gornja polovica tiskane pločice. Kod ovog modela mobilnog telefona DSP procesor i mikrokontroler su integrirani unutar istog digitalnog sklopa (10), dok su sva tri para A/D i D/A pretvornika integrirana u sklopu (20) čime se ostvaruju značajne uštede u cijeni proizvoda, kao i smanjene dimenzija i masa.

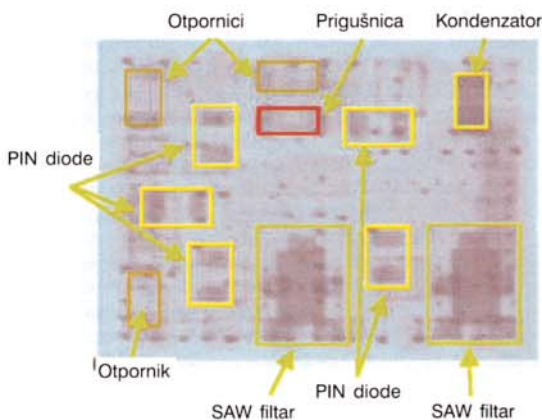


Sl. 3. Izvedba GSM mobilnog telefona (Nokia 3310)

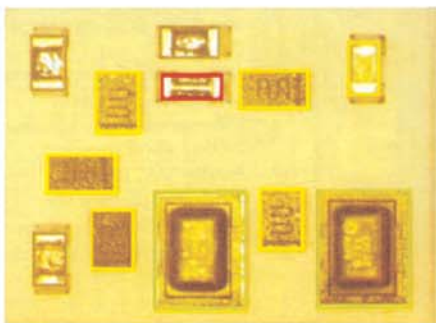
### Analogna obradba signala u modernim mobilnim telefonima

I pored primjene digitalne elektronike, određeni dijelovi sustava uvijek će se izvoditi analognim mrežama. To se prvenstveno odnosi na ulazne krugove mobilnog telefona koji rade u mikrovalnom području. GSM standard u Europi obuhvaća dva pojasa: 900 MHz i 1800 MHz, dok GSM operateri u SAD-u nude GSM usluge u pojasu od 1900 MHz. UMTS telefoni u Europi koriste pojase od 1920 MHz do 1980 MHz za predaju i 2110 MHz do 2170 MHz za prijam. S obzirom da ulazni krug telefona sadrži selektivne filtre koji izdvajaju samo korišteni pojas, UMTS telefon treće generacije koji po standardu mora podržavati i rad u GSM mrežama mora sadržavati barem 4 prijamna pojasno-propusna filtra. Slična priča vrijedi i za predajnu granu takvog telefona. Za razliku od digitalnih filtera, ovi filtri nisu programabilni, tj. za svaki željeni pojas potreban je po jedan filter. Za njihovu izvedbu se koriste tzv. SAW filtri, (engl. *Surface Acoustic Wave*, SAW). Oni se izrađuju tako da se na podlozi od kristala s piezo-električnim svojstvima (npr.  $\text{LiNbO}_3$ , ili  $\text{LiTaO}_3$ ) formiraju metalizirane elektrode sličnim postupcima kao i kod izrade mikroelektroničkih komponenata. Električni signal se piezo efektom pretvara u akustički val koji se širi duž površine kristala. Svojstva širenja su određena oblikom nanesenih elektroda, pa je tako obradom ovih elektroda moguće utjecati na željenu prijenosnu funkciju filtra. Konačno taj se akustički signal ponovno piezo efektom pretvara u izlazni električni signal. SAW filtri su vrlo značajni, jer bi realizacija iste prijenosne funkcije primjenom klasičnih rješenja temeljenih na pasivnim L i C elementima tražila iznimno visok broj komponenata.

I pored korištenja SAW filtera, izvedba ulaznog kruga zahtijeva velik broj dodatnih pasivnih komponenata s visokom linearnosti i malim šumom. Diskretna izvedba korištenjem SMD



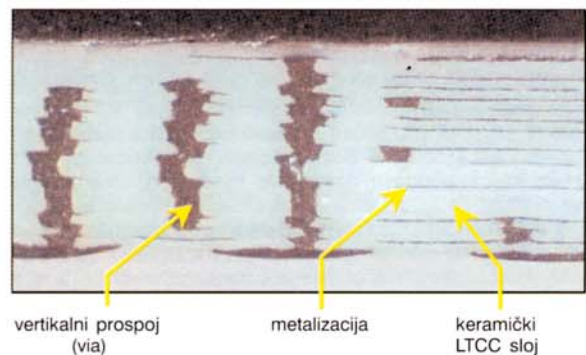
Sl. 4. Rendgen slika FEM modula izvedenog u LTCC tehnologiji



Sl. 5. Fotografija gornje plohe otvorenog FEM modula

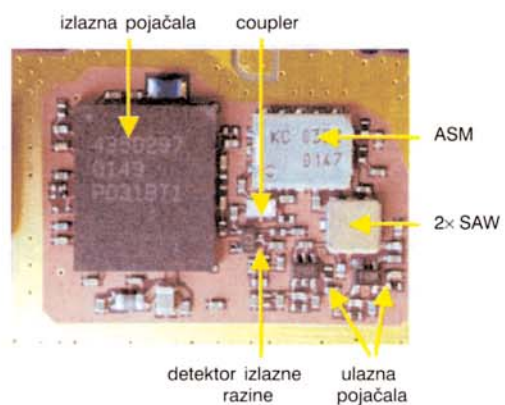
komponenta zauzima značajnu površinu na tiskanoj pločici telefona, pa su zbog masovne proizvodnje usavršene tehnologije izrade hibridnih keramičkih modula kojima je moguće integrirati cijeli ulazni krug višepojasnog telefona u jednom modulu. Izvana taj modul izgleda kao i svaka druga elektronička SMD komponenta, ali se za razliku od mikroelektroničkih komponenti temeljenih na nekoj od silicijskih tehnologija, ovaj sklop sastoji od višeslojne keramičke podloge unutar koje su realizirane pasivne komponente: kondenzatori, induktiviteti i prosposji ostvareni metalizacijom. Na površinu te podloge dodaju se i diskretne pasivne i aktivne komponente koje nisu izvedive u ovoj tehnologiji, te se sve zajedno zatvara u jedno kućište (modul). Razvoj višeslojne keramičke tehnologije pod nazivom *Low Temperature Cofired Ceramics*, LTCC, omogućava izradu sve tanjih slojeva keramike (10–20  $\mu\text{m}$ ), sve bolje površinske razlučivosti (25–50  $\mu\text{m}$ ), ali i sve boljih tipova keramika s rasponom dielektričnih konstanti od 8 do 800.

Primjer LTCC izvedbe modula ulaznog kruga mobitela (engl. *Front End Module*, FEM) veličine 5×4 mm prikazan je na slikama 4 i 5. Modul integrira 50 pasivnih komponenti unutar keramičke podloge koje se na rendgenskoj fotografiji na slici 4 naziru kao male crne točkice, kao i 12 diskretnih SMD komponenti na površini podloge, kao što je prikazano na slici 5. Detalj izvedbe integriranih komponenti u podlozi vidljiv je na bočnom presjeku modula na slici 6.

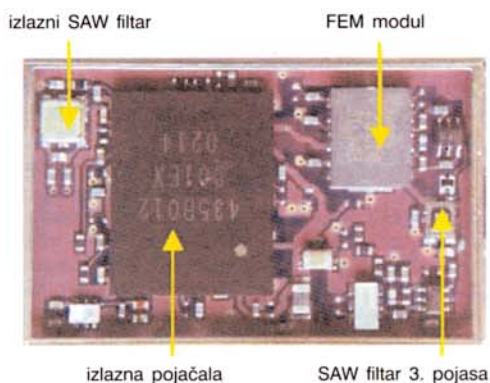


Sl. 6. Integracija pasivnih komponenata u LTCC tehnologiji

Napredak u tehnologiji integracije pasivnih komponenata vidljiv je u usporedbi dva GSM telefona tvrtke Nokia: starijeg 8310 sa dva GSM pojasa i novijeg 7210 sa tri pojasa. Dio tiskane pločice na kojoj se nalazi ulazni krug oba telefona prikazan je na slikama 7 i 8. Izvedba ulaznog kruga je kod starijeg temeljena na dva modula (ASM i dvokanalnog prijamnog SAW filtra), te većem broju pasivnih SMD komponenata. Kod novijeg, SAW



Sl. 7. Ulazni krug mobilnog telefona Nokia 8310



Sl. 8. Ulazni krug mobilnog telefona Nokia 7210

filtri za dva pojasa su integrirani unutar FEM modula, dok se za treći SAW filtar za američki GSM pojas koristi diskretna komponenta. Slični postupci integracije koriste se za izvedbu ulaznih krugova UMTS telefona koji pored ova tri imaju još i četvrti prijamni pojas. Ulazni krug sadrži i višekanalno izlazno pojačalo snage koje je ujedno i najveća komponenta prikazana na slikama 7 i 8. Izvedeno u tehnologiji galij arsenida i pored procesora predstavlja jedno od glavnih potrošača energije unutar telefona.

## II. Ugrađeni računalni sustavi

Primjena elektronike u automatskoj regulaciji i upravljanju danas je također sve više vezana uz pojam ugrađenih računalnih sustava (engl. *embedded system*). Iako je takav sustav prema vanjskom svijetu vezan nizom senzora i aktuatora koji raznovrsne fizikalne veličine pretvaraju u električne signale i obratno, sve obradbe ulaznih veličina, kao i generiranje izlaza provodi računalo pod kontrolom programa. Zbog činjenice da to računalo predstavlja nedjeljiv i na neki način nevidljiv dio cjelokupnog sustava upravljanja, proizlazi i njegov naziv »ugrađeno računalo«. Vrlo često se radi o potpuno autonomnim sustavima koji kada se jednom prilagode procesu kojim se upravlja, više ne traže nikakvu intervenciju ljudskih operatera.

Razvoj ugrađenih računala počeo je s jednostavnijim sustavima temeljenim na 8-bitnim mikrokontrolerima koji su svojom malom cijenom, malom veličinom i malom potrošnjom mogli opravdati primjene u sustavima upravljanja. Širenjem područja primjene, povećavali su se zahtjevi na procesnu moć takvih računala, jer su potrebne obradbe bivale sve složenije. To je uzrokovalo razvoj brojnih porodica 16 i 32 bitnih mikrokontrolera koje danas postoje na tržištu. Međutim, razvoj ovih procesora je zbog ipak nešto manjeg tržišta išao sporijim tempom nego razvoj procesora opće namjene koji se koriste u osobnim računalima. Zbog toga, a i zbog iznimne popularnosti i rasprostranjenosti PC temeljenih arhitektura i svega pripadajućeg digitalnog sklopovlja, kao jezgre ugrađenih sustava se danas sve više pojavljuju računala vrlo slična klasičnim osobnim računalima. Dodatni zahtjevi koji se postavljaju na takva ugrađena PC računala su:

- male dimenzije,
- mala potrošnja,
- pouzdanost i jednostavnost popravka,
- modularnost/proširivost,
- raznovrsnost ulaznih i izlaznih jedinica prilagođenih industrijskim primjenama,
- mogućnost rada u nepovoljnim klimatskim i mehaničkim uvjetima (temperatura, vlaga, vibracije).

Razlog orijentacije ugrađenih računala na PC temeljne arhitekture je prvenstveno vezan na sveobuhvatnost i dostupnost

programske podrške kao i alata za njezin razvoj što značajno ubrzava razvoj sustava i smanjuje njegovu cijenu. S obzirom da se u osnovi radi o PC računalu, moguće je koristiti bilo koji operacijski sustav iz PC svijeta kao što su CE, 98, NT i NTE inačice Windows operacijskog sustava, zatim Linux sustav, ali i operacijske sustave prilagođene za rad u stvarnom vremenu poput QNX i VxWorks. Za sam razvoj programske podrške mogu se koristiti bilo koji od programskih jezika koji se tipično koriste na računalima opće namjene.

Potpun razvoj ugrađenog računalnog sustava obuhvaćao bi sljedeće glavne faze: projektiranje sklopovlja, izradu tiskane pločice, prilagodbu operacijskog sustava na projektirano računalo, razvoj programske podrške i konačno uhođavanje cijelog sustava. Zbog visokih troškova razvoja i mogućih rizika takav potpun razvoj sustava je opravdan isključivo kod velikih serija proizvoda, pa se kod većine primjena koristi integracijski pristup temeljen na standardiziranim modulima. U tom slučaju se sustav gradi od određenog broja gotovih modula dobavljenih na tržištu, čiji je tip i funkcionalnost određena konačnom primjenom sustava.

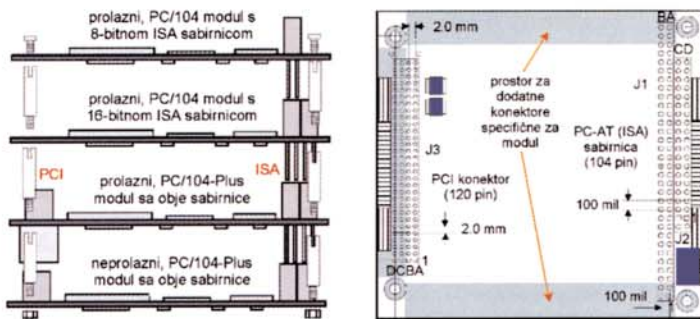
### Modularni standard ugrađenih PC računala PC/104

U svrhu standardizacije takvih modula konzorcij kojeg trenutno čine 83 proizvođača iz cijelog svijeta predložio je standarde PC/104 i PC/104-Plus koji definiraju električne i mehaničke uvjete povezivanja modula. Na tržištu su dostupne stotine različitih modula koji ispunjavaju specifikacije definirane standardima i čijim se međusobnim povezivanjem mogu izgraditi namjenski sustavi za primjene u sljedećim područjima:

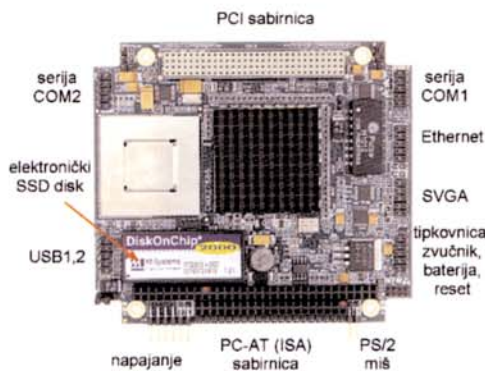
- mjerni i ispitni uređaji,
- medicinski uređaji,
- komunikacijski uređaji,
- upravljanje vozilima, plovilima, letjelicama,
- sustavi za prihvata i pohranu podataka,
- sustavi industrijskog upravljanja,
- sustavi za obradbu slike i video signala,
- raznovrsni automati i slično.

S obzirom da je prilagodba operacijskog sustava na korišteni modul već napravljena od dobavljača modula, projektiranje sustava je znatno olakšano i ubrzano, a primarno se svodi na odabir pogodnih algoritama upravljanja i regulacije i njihovu implementaciju u klasičnim programskim jezicima visokih razina apstrakcije.

Standard PC/104 propisuje module veličine 90×96 mm koji se natiču jedan na drugi u oblik sendviča s razmakom modula od 15 mm. Moguće je vrlo jednostavno prilagoditi arhitekturu sustava potrebama primjene, a i naknadne izmjene su moguće jednostavnim natičanjem dodatnih modula. Električne veze pojedinih modula ostvarene su klasičnom 8 ili 16 bitnom sabirnicom funkcijski identičnom PC-AT (ISA) sabirnicom korištenoj u ranim PC računalima. Razlika je isključivo u mehaničkoj izvedbi i tipu konektora, dok su signali i vremenski odnosi jednaki kao i kod ISA sabirnice. Naknadno je ovaj standard proširen i novim pod nazivom PC/104-Plus, dodavanjem PCI sabirnice koja je postala *de facto* standard povezivanja podjedinica u modernim PC računalima. Broj izvoda na PC/104 sabirnici jednak je 104 odakle proizlazi i naziv standarda, dok je PCI sabirnica izvedena s dodatnim konektorom J3 od 120 izvoda. Ilustracija mehaničkog sloga od 4 modula, kao i raspored konektora na PC/104-Plus modulu prikazan je na slici 9. U slog se prema želji mogu kombinirati raznovrsni tipovi modula: 8-bitni PC/104, 16-bitni PC/104 ili moduli po potpunom PC/104-Plus standardu, tj. s obje sabirnice. Moduli mogu biti prolazni ili neprolazni, kao što je ilustrirano na slici 4. Svaki modul može imati i dodatne izvode (konektore) specifične za njegovu namjenu, a ti se prema standardu nalaze na preostala dva sloboдна ruba tiskane pločice.



Sl. 9. Mehanička izvedba i način povezivanja PC/104 modula



Sl. 10. Procesorski PC/104-Plus modul s PC računalom (RTD-Usa)

Iako su moduli po veličini jednaki floppy disku od 3.5" (površina 86 cm<sup>2</sup>), vrlo su učinkovito izvedeni. Primjenom najnovijih komponenti visokog stupnja integracije projektirani su moduli koji sadržavaju cijelo PC računalo. Tako npr. procesorski modul prikazan na slici 10 pored procesora i radne memorije sadrži i grafički kontroler, elektronički hard disk i gotovo sve periferijske veze uobičajene kod osobnih računala. Glavni elementi ovog modula su:

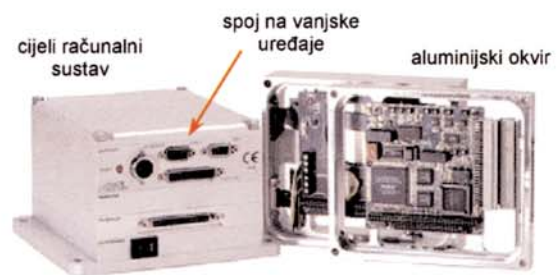
- Geode™, Pentium MMX™ kompatibilan procesor na 300 MHz s 2.0 V napajanja i s pasivnim hladilom,
- SVGA kontroler sa 64-bitnim grafičkim akceleratorom,
- 128 Mby glavne SDRAM memorije,
- PC/104-Plus AT i PCI sabirnica,
- dvije dvosmjerne serijske sabirnice koje podržavaju RS-232/422/485 standarde veze,
- dva USB porta,
- Full Duplex Fast Ethernet kontroler, 10BASE-T/100BASE-Tx,
- priključak za tipkovnicu, miša i zvučnik,
- dodatni paralelni port sa 16 univerzalnih ulazno/izlaznih digitalnih linija,
- elektronički (SSD) disk kapaciteta 288 MB.

Osim minijaturnih dimenzija, bitna razlika ovog modula u odnosu na konvencionalne PC matične ploče jest u potrošnji od samo 5.6 W i radnom temperaturnom rasponu od -40 do +85 C što odgovara industrijskom temperaturnom rasponu.

Zbog jednostavnije mehaničke integracije cijelog sustava moduli se tipično integriraju u aluminijske okvire u kojima su ugrađeni konektori za veze modula prema vanjskim uređajima, kao što je ilustrirano na slici 11. Naticanjem takvih okvira dobiva se kompaktan sustav dimenzija 130 x 152 mm, koji se dodatno može postaviti na amortizirano postolje za primjene u

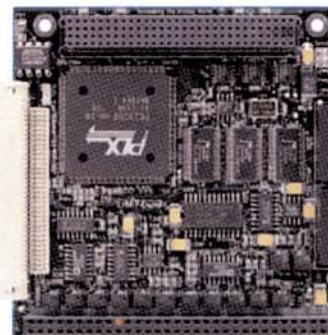
uvjetima visokih vibracija (npr. helikopter, motorni pogoni, itd.). Zbog male disipacije energije, cijeli sustav može biti hermetiziran i hlađen isključivo toplinskim vođenjem kroz kućište što je vrlo značajno kod primjena u agresivnim okolinama (npr. brodska elektronika, kemijska postrojenja i sl.).

Pored procesorskih modula, na tržištu postoje brojni moduli s ulazno izlaznim jedinicama kao što su: jedinice za akviziciju podataka, analogni i digitalni ulaz/izlaz, industrijske sabirnice (FieldBus, CAN), mrežni kontroleri, brojači i vremenski sklopovi, DSP moduli, moduli za obradu govora, audio ili video signala, grafički kontroleri za prikaz, moduli za GPS lokaciju, Fax/Modem, kontroleri elektromotornih pogona, davači položaja, Synchro/Resolver, relejni moduli i slično. Pored samog modula, proizvođač isporučuje i programsku podršku za upravljanje modulom (engl. driver) za sve važnije operacijske sustave, čime se olakšava posao integracije i ubrzava vrijeme izrade sustava.



Sl. 11. Primjer mehaničke integracije PC/104 sustava (RTD-Usa)

Na slici 12 prikazan je PC/104-Plus modul koji sadrži višekanalni A/D i D/A pretvornik za veze ugrađenog računala s analognim ulaznim i izlaznim veličinama.



Sl. 12. PC/104 Plus modul s A/D i D/A pretvornikom

### Zaključak

Trendovi u suvremenoj elektronici diktirani su razvojem mikroelektroničkih sklopova, koji i pored fizikalnih ograničenja tehnologije i dalje pokazuju izniman trend razvoja. Granica između klasične analogne elektronike i obradbe signala u vremenski diskretnoj domeni primjenom digitalne elektronike diktirana je širinom spektra signala. Zbog iznimnih procesorskih mogućnosti današnjih procesora i velikih brzina pretvorbe A/D i D/A pretvornika, ta se granica sve više podiže. Primjena digitalne obradbe signala u elektroničkim uređajima pored većih stupnjeva integracije i poboljšanih svojstava sustava omogućava i smanjenje cijene, što je ujedno i glavna pokretačka sila trenda digitalizacije.

doc. dr. sc. Davor PETRINOVIĆ