

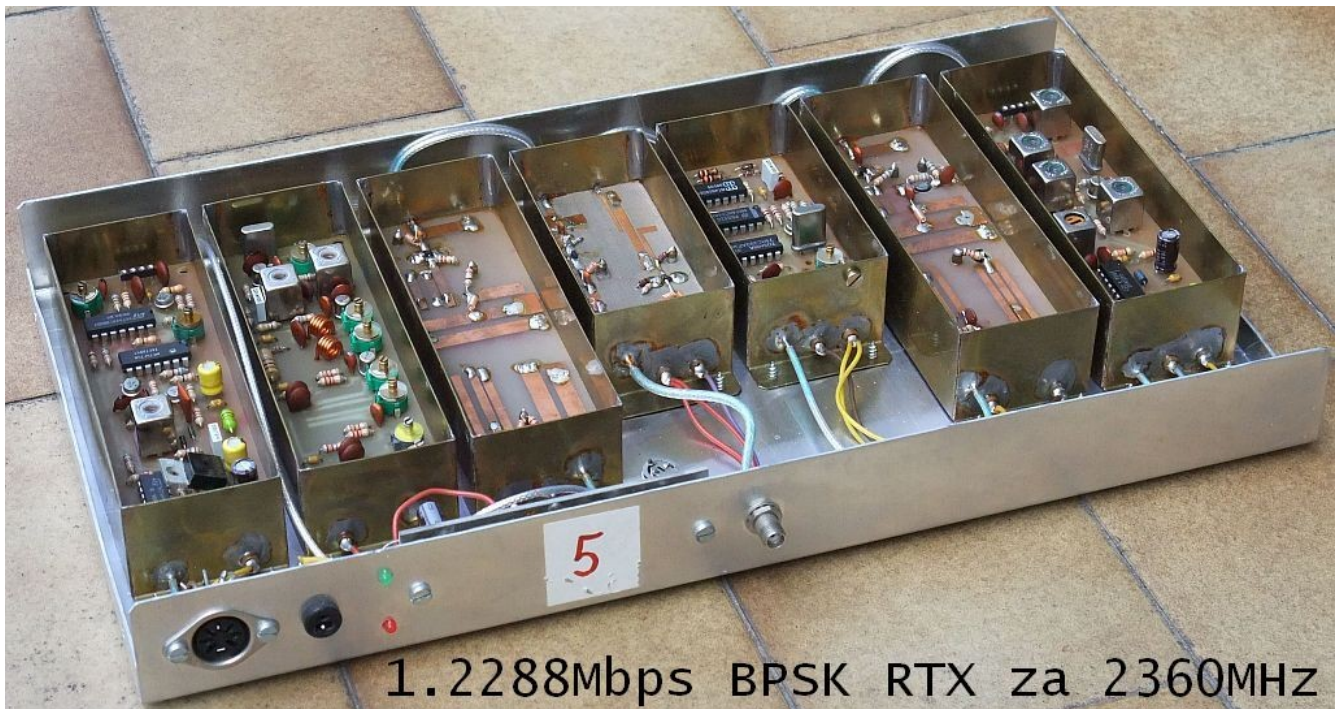
Megabitna BPSK radijska postaja za 430MHz

Matjaž Vidmar, S53MV

1. Zasnova PSK radijske postaje s sodobnimi gradniki

Dobre radijske postaje so osnova učinkovitih radijskih zvez. Tako profesionalne kot amaterske govorne zveze so potrebovale kar nekaj let, da so iz preproste amplitudne modulacije prešle na učinkovitejšo SSB. Modulacija SSB sicer omogoča večji domet radijske zveze in manjše medsebojne motnje za ceno bolj zahtevnih radijskih postaj vključno z rokovanjem in višje stabilnosti frekvence.

Še bolj slikovit razvoj so doživele številске (digitalne) zveze. Začetek številskih zvez je bil silno neučinkovit: telefonski modemi priključeni na govorne radijske postaje. Celo na krovu profesionalnih satelitov so uporabljali preprosta kodiranja podatkov, kot je Manchester, posredovana preko frekvenčno- ali fazno-moduliranega analognega radijskega oddajnika. Razvoj učinkovitejših zvez je zahteval uvedbo modulacij brez nosilca, kot so SSB ali simetrična PSK, oboje s koherentno demodulacijo v sprejemniku.

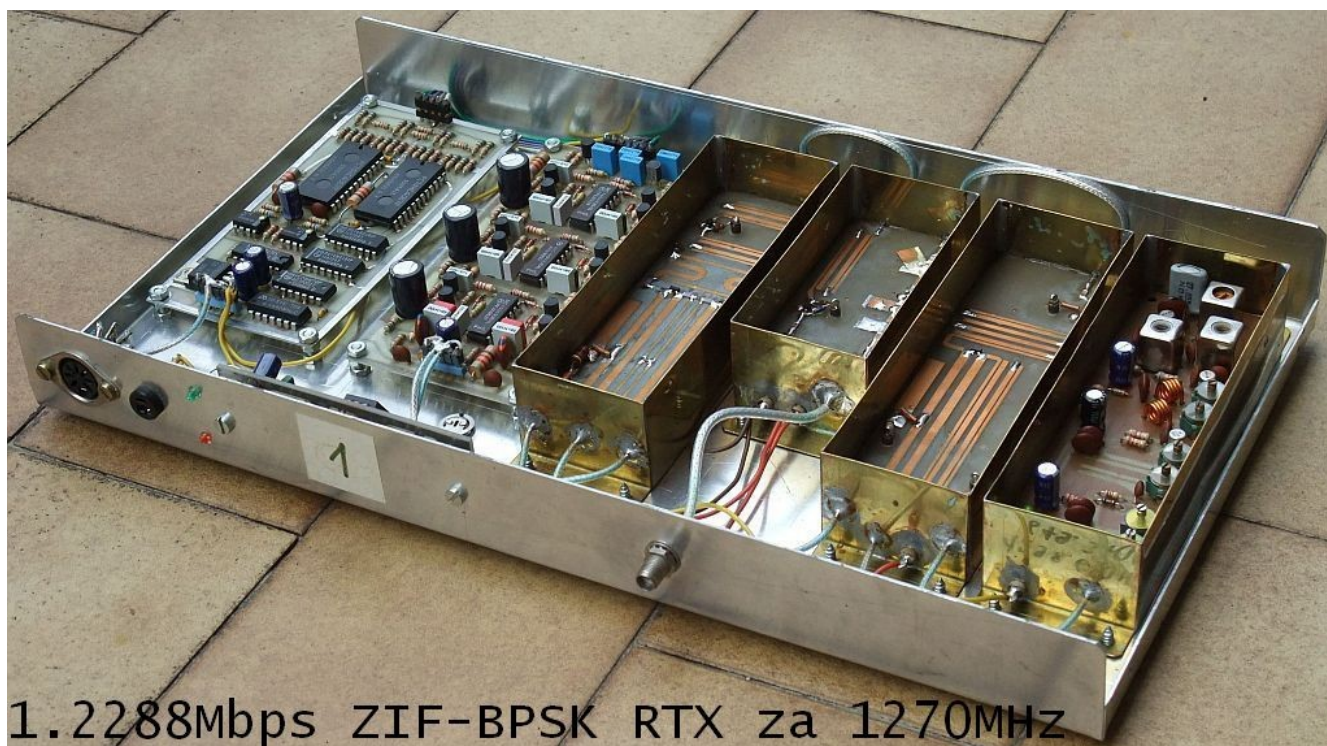


Razmah radioamaterskih računalniških zvez je pred tremi desetletji pospešil standard za protokol AX.25 [4]. Tudi tu smo radioamaterji začeli z neučinkovitimi telefonskimi modemi in govornimi postajami, kar je omogočalo zmogljivost komaj 1200bit/s. Posnemanje profesionalcev v letih 1988-1993 je prineslo Manchester kodiranje skozi prilagojene širokopasovne FM postaje. Običajna medfrekvenčna sita širine 200kHz so omogočala preproste WBFM

radijske postaje in zanesljive zveze z Manchester kodiranjem s hitrostjo 38.4kbit/s v frekvenčnih pasovih 430MHz in 1.2GHz.

Višje hitrosti prenosa zahtevajo učinkovitejše modulacije predvsem zaradi omejenih moči radioamaterskih oddajnikov in zahtev po dometu takšnih zvez. Prve poskuse z dvofazno simetrično BPSK modulacijo in bitno hitrostjo 1.2288Mbit/s sem napravil že leta 1994, vendar ta razvoj ni pripeljal do praktične radijske postaje. Nameraval sem uporabiti transverter za BPSK modulator in demodulator, ki sta delala na medfrekvenci 75MHz.

Naslednje leto sem se odločil za preprostejšo inačico. Oddajnik je bil neposredno BPSK moduliran na končni frekvenci 2.36GHz. Sprejemnik je vseboval dvojno mešanje najprej na 75MHz in končno na 10MHz. S takšnimi radijskimi postajami [1], [2] smo leta 1995 zgradili prve megabitne odseke AX.25 omrežja. BPSK radijska postaja za 2.36GHz je vsebovala kar sedem kompliciranih modulov, od katerih je bil vsak oklopljen s svojo medeninasto škatlico.



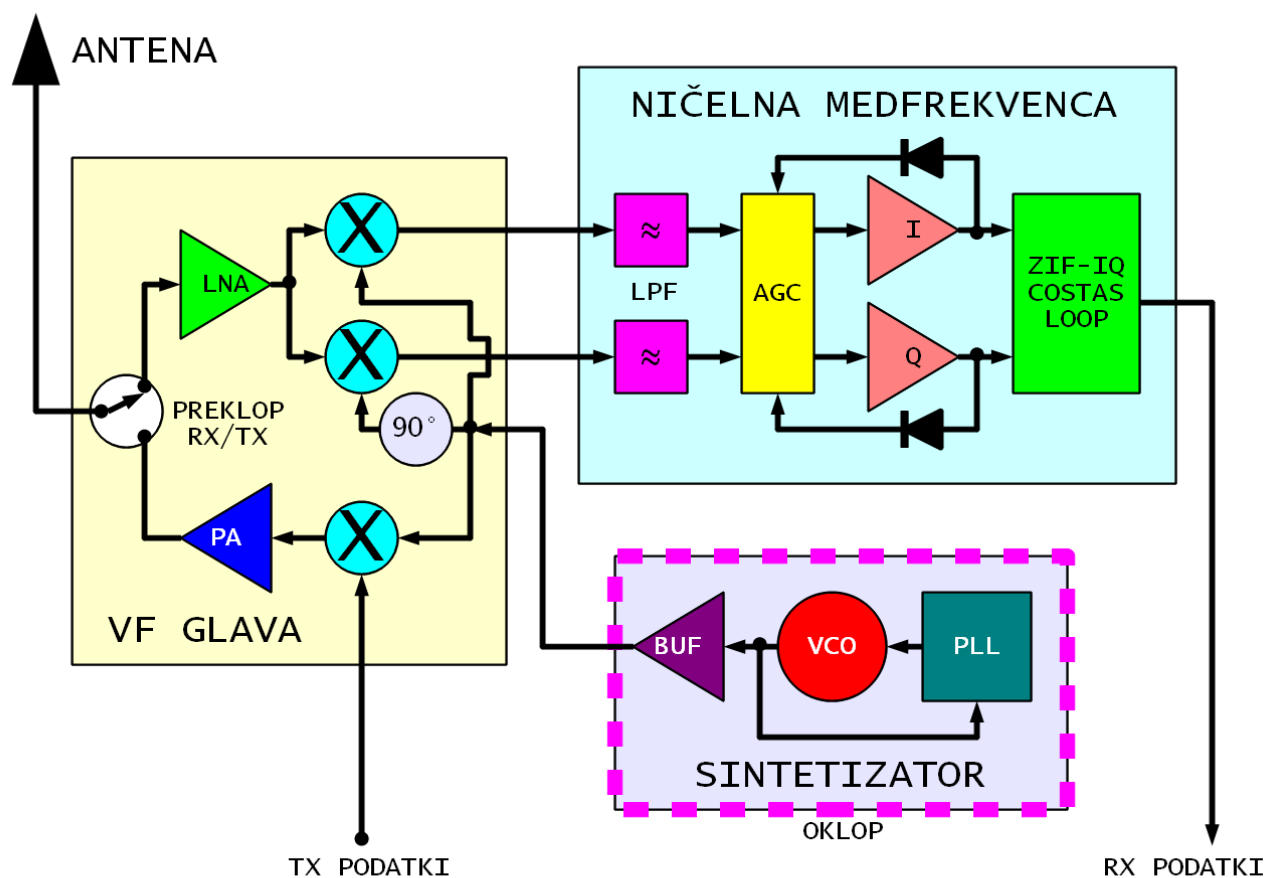
Iskanje preprostejše rešitve je pripeljalo do SSB in BPSK radijskih postaj z ničelno medfrekvenco [3], [5]. Angleško kratico zero-IF ali ZIF smo skovali še preden so profesionalci pogruntali, da se da na isti način poenostaviti GSM telefon ter ga stlačiti v en sam čip. Preproste, a zmogljive ZIF-BPSK radijske postaje in primerni računalniški vmesniki (TNCji) [6], [7], [9] so pripeljali do razmaha packet-radio omrežja v Sloveniji. Svoje dosežke smo zbrali v knjigi "Digitalni mostovi 2000" [8]

Na prelomu stoletja je Internetni protokol tiho, a neusmiljeno izrinil vse ostale komunikacijske protokole vključno z radioamaterskim AX.25. Radioamatersko AX.25 digitalno omrežje smo skušali temu prilagoditi na različne načine [10], še najbolj

preprost je bil priklop na računalnik preko programske podpore za telefonski modem.

Številne izboljšave PSK radijskih postaj [11] niso mogle premagati pomanjkljivosti, napak in čedalje slabše programske podpore zastarelega protokola AX.25. Poskusi prenosa AX.25 okvirjev s hitrostjo 10Mbit/s so se izkazali popolnoma neučinkoviti. Kljub megabitnim zvezam se omrežje AX.25 po zmogljivosti niti uporabnosti ni moglo več primerjati s cenenimi WLAN (WiFi) brezvrvičnimi računalniškimi omrežji.

Ker niti WLAN (WiFi) ne zmore vsega in je z dometom zelo omejen, sem se po večletnem, zares tehtnem premisleku odločil zavreči stari AX.25 in uvesti povsem nov "Ne-Brezhibni Protokol" [12], [13], razviti zanj povsem novo programsko [14] in strojno opremo [15], [16]. Z izginotjem telefonskih modemov in programske podpore zanje je bilo nujno uvesti zmogljivejše vmesnike za Ethernet [17], [18].



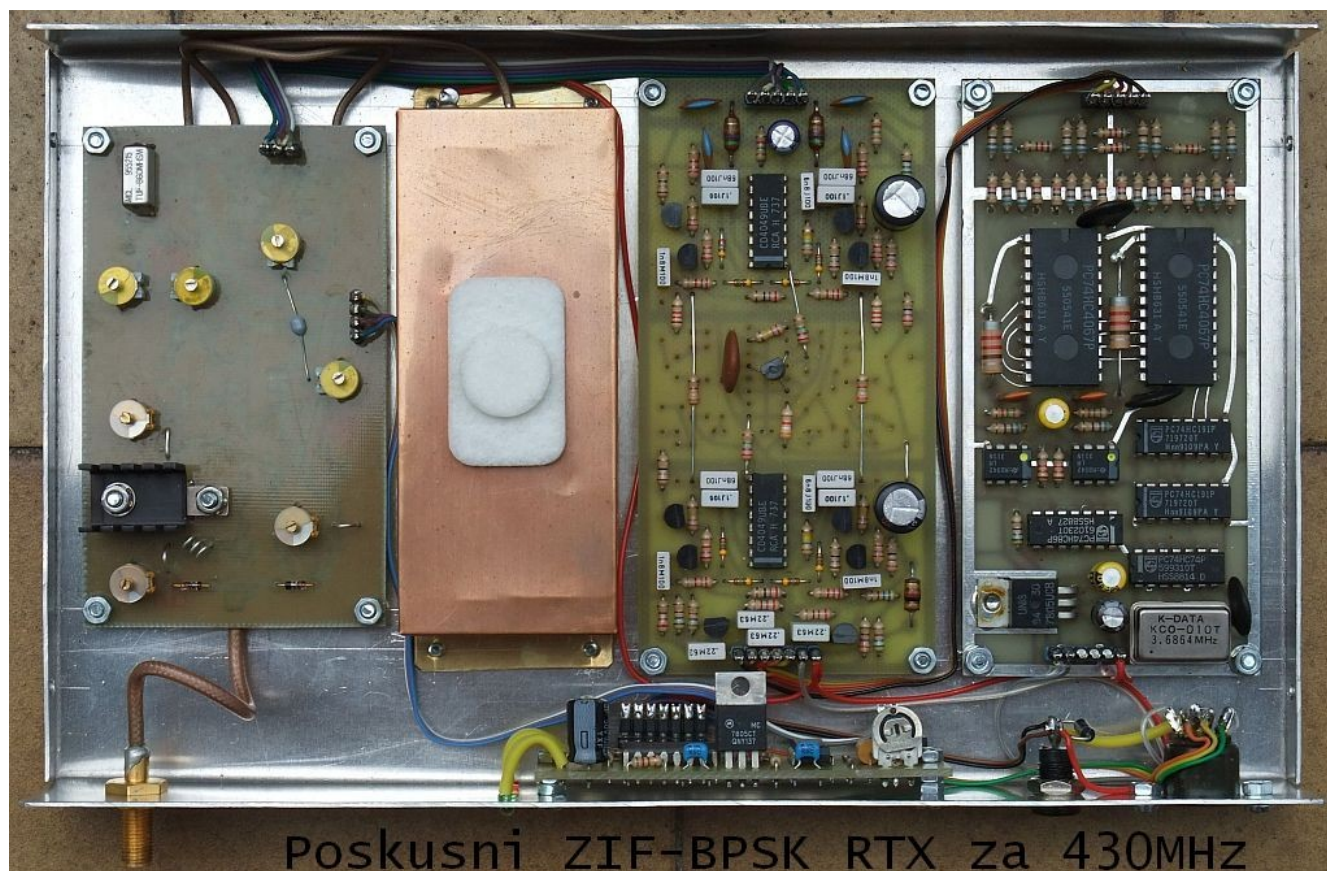
OSNOVNI NAČRT ZIF-BPSK RADIJSKE POSTAJE

Učinkovitost "Ne-Brezhibnega Protokola" je v celoti vezana na obstoj učinkovitih BPSK radijskih postaj, ki so bile načrtovane pred poldrugim desetletjem! Medtem se je v elektroniki marsikaj spremenilo: predvsem imamo dostop do številnih novih, cenejših in zmogljivejših gradnikov za izdelavo radijskih postaj. Izbira BPSK modulacije, demodulatorja za ničelno medfrekvenco in osnovni načrt

BPSK radijske postaje seveda ostanejo nespremenjeni.

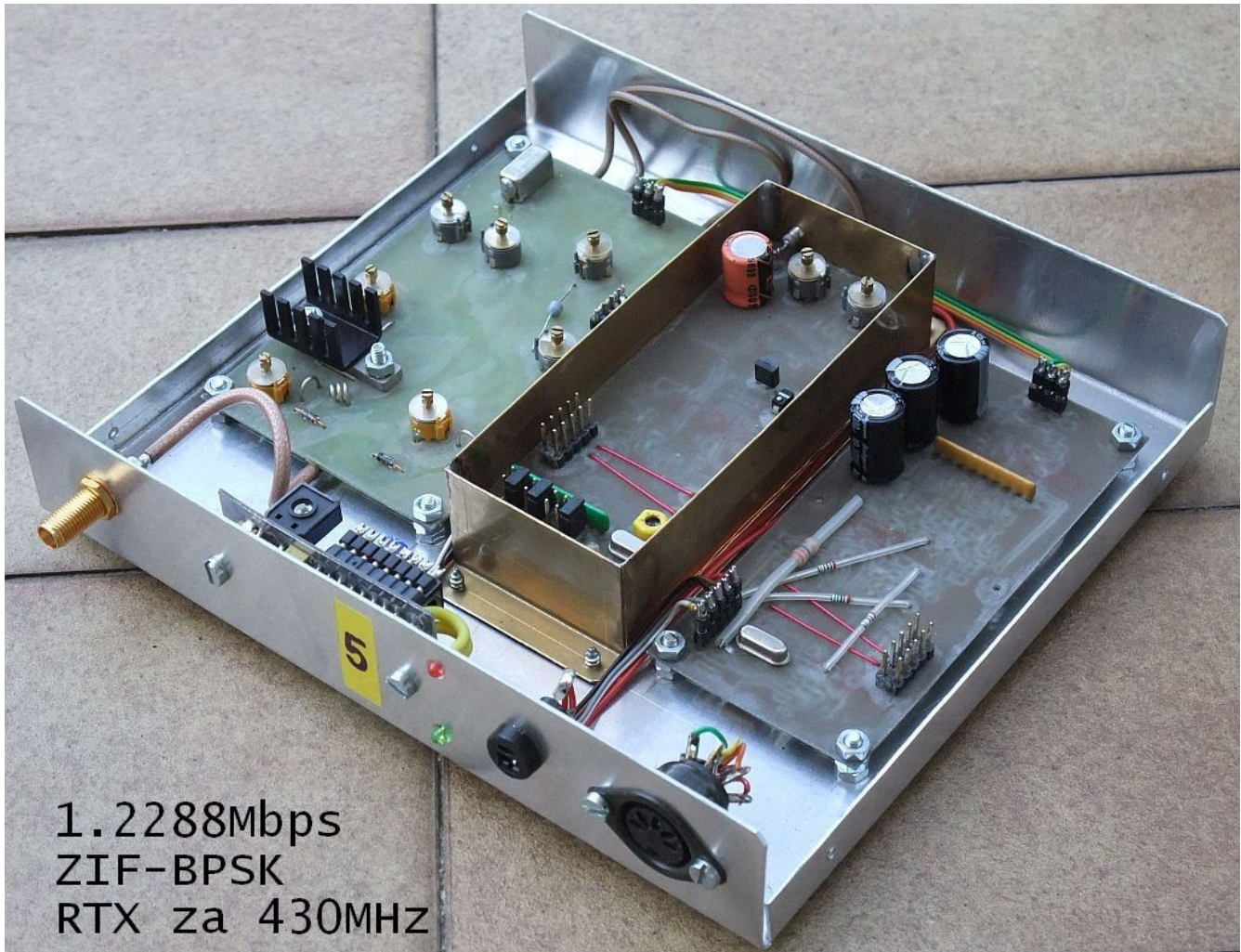
S katerim frekvenčnim področjem torej začeti? Za frekvenčna pasova 1.2GHz in 2.3GHz imamo sicer zastarele, ampak še vedno učinkovite ZIF-BPSK postaje. Kjer je nujno nekaj novega, je frekvenčni pas 430MHz. Velik domet radijskih postaj v frekvenčnem pasu 430MHz omogoča tudi zveze brez neposredne vidljivosti, torej dosti več od cenene WLAN (WiFi) opreme. Hkrati potrebujemo zamenjavo za zastarele WBFM postaje za 430MHz. Frekvenčnega pasu 430MHz radioamaterji skoraj ne uporabljajo več, torej motenj v eno ali drugo smer ne pričakujem. Končno, gradnja radijske postaje za 430MHz je preprostejša in cenejša od mikrovalovnih inačic: na 430MHz se da vse izdelati na enostranskih tiskanih vezjih!

Preprosta ocena pokaže, da je smiselna hitrost delovanja BPSK postaje v frekvenčnem pasu 430MHz med 150kbit/s in 3Mbit/s. Za moje poskuse sem se zato odločil kar za standardno hitrost prenosa 1.2288Mbit/s, za katero sem imel že razvito ničelno mefrekvenco, pripadajočo merilno opremo, (E)ATNCje in veliko izkušenj. Praktični poskusi so potrdili učinkovitost koherentne demodulacije: 1.2288Mbit/s ZIF-BPSK postaja dosega v frekvenčnem pasu 430MHz popolnoma enak domet kot 32-krat počasnejša 38.4kbit/s WBFM postaja. Takšna BPSK postaja omogoča povsem spodobno hitrost dostopa do interneta med 50 in 80kbyte/s.



Načrtovanje nove ZIF-BPSK postaje za 430MHz sem začel s frekvenčnim sintetizatorjem. Tu ZIF postaja potrebuje res dobro oklapljanje, da izhodni signal oddajnika ne vdre nazaj v vco

sintetizatorja, kjer bi povzročil neželjeno frekvenčno modulacijo. Ko sem razvil še visokofrekvenčno sprejemno/oddajno glavo za 430MHz, sem obe enoti vgradil skupaj s staro ničelno medfrekvenco, BPSK demodulatorjem in preklopom sprejem/oddaja v ohišje. Z dvema takšnima ZIF-BPSK postajama sem napravil prve poskuse na 436MHz.



1.2288Mbps
ZIF-BPSK
RTX za 430MHz

Naslednji korak je bil razvoj nove ničelne medfrekvence v SMD tehniki in Costas-ovega BPSK demodulatorja v programirljivi logiki. Tudi vezje za preklon sprejem/oddaja sem prestavil v SMD tehniko, da nova ZIF-BPSK postaja za 430MHz ni kaj dosti večja od stare WBFM radijske postaje za isti frekvenčni pas.

Šele Ne-Brezhibni Protokol in EATNCji so omogočili, da sem novo ZIF-BPSK radijsko postajo res temeljito preizkusil ter natančno nastavljal frekvenčna sita in časovne konstante ničelne medfrekvence. Z neučinkovitim protokolom AX.25 se takšnih poskusov sploh ni dalo narediti! Rezultat teh poskusov je cela vrsta malih popravkov in predelav za vse ZIF-BPSK radijske postaje, nove in stare. Z objavo tega članka o novi ZIF-BPSK radijski postaji za 430MHz sem zato odlašal, saj mora biti temeljni kamen novega NBP omrežja zares zanesljiv.

2. PLL frekvenčni sintetizator

Načrtovanje frekvenčnega sintetizatorja za radijsko postajo z ničelno medfrekvenco ni preprosto. Koherentni demodulator zahteva visoko stabilnost frekvence tako za SSB govor kot za PSK podatke. Dodatna težava je v tem, da izhodna stopnja oddajnika dela na isti frekvenci kot VCO v sintetizatorju. Vdor izhodnega signala oddajnika nazaj v VCO povzroči neželjeno frekvenčno modulacijo. Opisani pojav lahko popači govor oziroma pokvari podatke do te mere, da govor ni več razumljiv oziroma so podatki neuporabni.

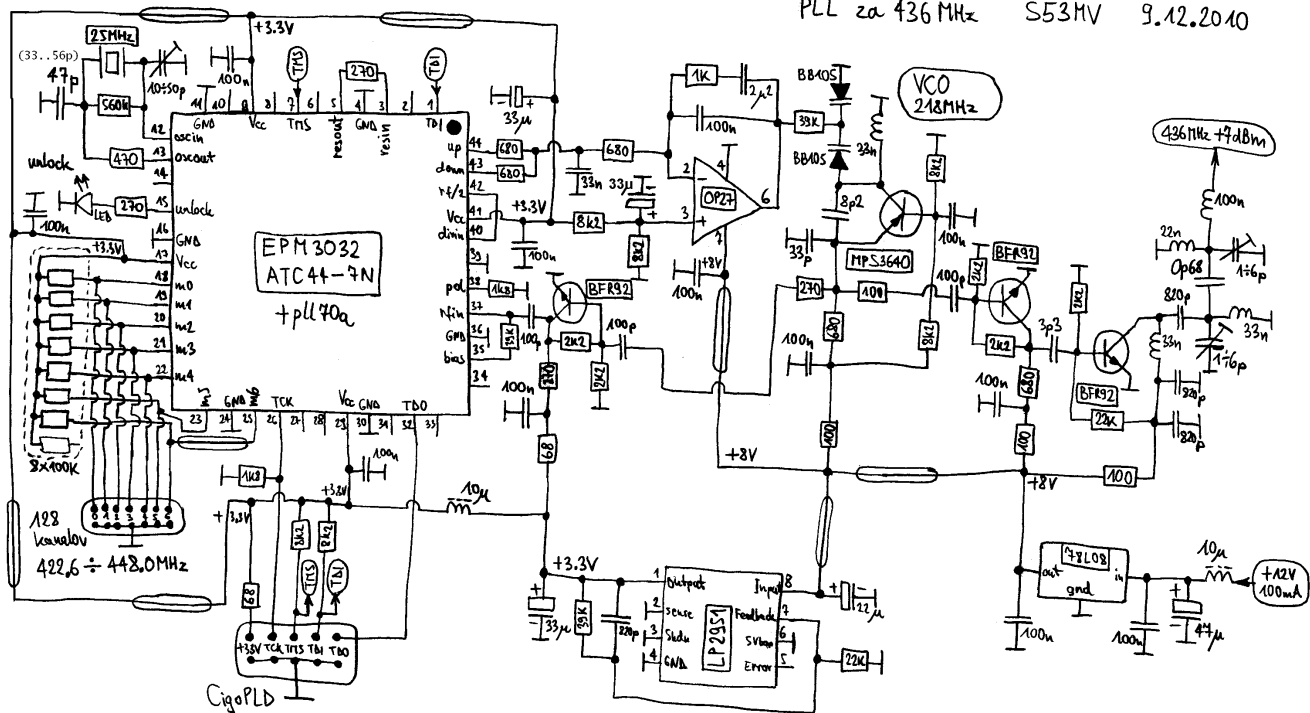
Nezadostno oklapljanje pogosto povzroča preglavice s presluhom celo v profesionalni tehniki. Primer so VHF letalske radijske postaje za amplitudno govorno modulacijo. V laboratoriju dela takšna postaja brezhibno na umetnem bremenu in dobi certifikat. Na letalu je postaja priključena na resnično anteno, ki seva. Prav to sevanje vdre v sintetizator. Neželjena frekvenčna modulacija popači govor pilota do te mere, da ni več razumljiv...

Nezadostno oklapljanje je bila glavna hiba obeh WBFM radijskih postaj za 38.4kbit/s v frekvenčnih pasovih 430MHz in 1.2GHz. Obe WBFM postaji sta uporabljali neposredno moduliran VCO na končni frekvenci oddajnika oziroma njeni polovici. Nekaj neuspešnih poskusov s PLLji me je prepričalo, da sem se v oddajnikih vseh BPSK postaj za 1.2288Mbit/s na 1.2GHz in 2.3GHz odločil za varno rešitev: preprost kristalni oscilator in pripadajoča veriga množilnih stopenj.

Alternativna rešitev bi bila "transverterska" postaja z eno ali več medfrekvencami na oddaji. V takšni postaji lokalni oscilatorji niso v harmonskem razmerju z izhodom oddajnika in prav ta nekoherenca zmanjšuje škodljive učinke neželenega presluha za več velikostnih razredov. Številna frekvenčna mešanja v "transverterski" postaji seveda zahtevajo ozkopasovna frekvenčna sita in natančno uglaševanje. "Transverterska" radijska postaja je zato zahtevnejša in dražja od preproste ničelne medfrekvence "ZIF".

Profesionalci si danes lahko privoščijo vgradnjo celotnega frekvenčnega sintetizatorja v en sam čip, vključno z VCOjem in njegovo tuljavo. Integrirana tuljava in drugi gradniki integriranega VCOja so zelo majhni, simetrične protitaktne stopnje še zmanjšujejo neželjen presluh in dodatno oklapljanje sploh ni potrebno. Kljub strogim zahtevam za stabilnost frekvence PSK in še strožjim za OFDM je danes možno integrirati celotno ZIF-WLAN radijsko postajo v en sam čip!

V frekvenčnem pasu 430MHz je zadosti možnosti za radijske motnje v obe smeri, da mora biti delovna frekvenca megabitne ZIF-BPSK radijske postaje nastavljiva. Kristal in množilne stopnje torej odpadejo. Čeprav se na tržišču že dobijo frekvenčni sintetizatorji z integriranim VCOjem brez zunanjih tuljav, sem se nazadnje odločil za skrbno načrtovan sintetizator z običajnim tranzistorskim VCOjem, ločilnimi stopnjami, logiko PLLja in pločevinastim oklopom.

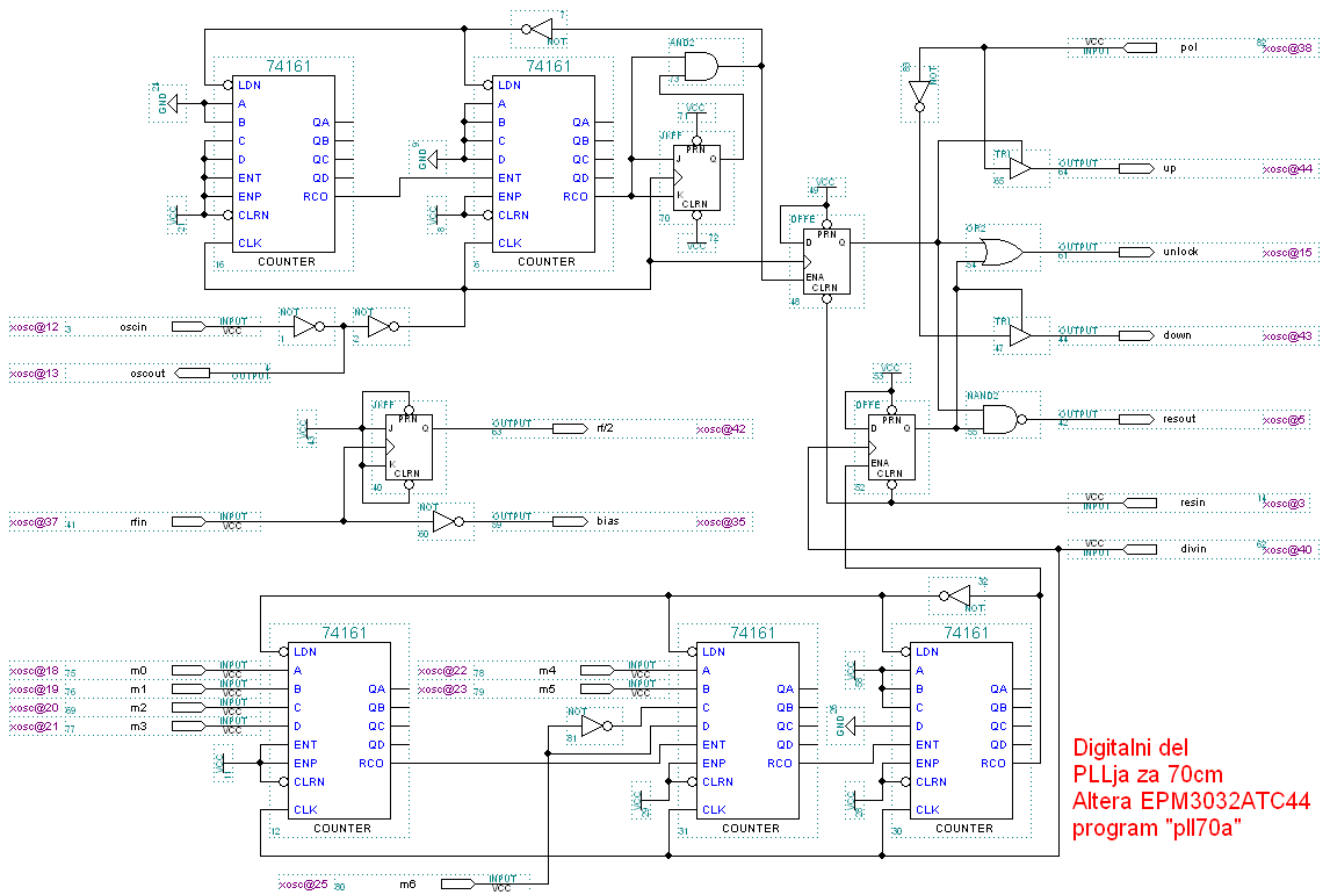


VCO sintetizatorja s PNP tranzistorjem MPS3640 in dvema varikap diodama BB105 dela na polovični frekvenci 218MHz. Frekvenčni podvojevalnik na 436MHz deluje kot dodatna ločilna stopnja, kar dodatno zmanjšuje presluh in neželjeno FM. Ločilni stopnji in podvojevalnik so izdelani s tranzistorji BFR92. Vse tuljave so SMD, da majhno stresano magnetno polje ne zahteva dodatnega oklapljanja. Podvojevalnik proizvede dobrih 5mW moči na 436MHz.

Digitalni del PLLja je izdelan v programirljivi logiki Altera EPM3032ATC44. Poleg števcv vsebuje tudi referenčni oscilator na 25MHz in frekvenčno/fazni primerjalnik. Poleg digitalnih nalog je v EPM3032ATC44 sprogramirano tudi nekaj preprostih analognih nalog: predojačevalnik za signal VCOja, kristalni oscilator in frekvenčno/fazni primerjalnik vključno s kasnilnim vodom (upor 270Ω med nogicama 3 in 5) za preprečevanje histereze.

V EPM3032ATC44 sem poskusno uspel sprogramirati celo podvojevalnik frekvence na 436MHz. Izhodna moč je bila sicer povsem zadovoljiva okoli 10mW, žal pa je signal vseboval preveč neželjenih frekvenčnih komponent zaradi presluhov znotraj EPM3032ATC44. Tudi poraba takšnega podvojevalnika je bila previsoka (preko 100mA). Zato predstavljeni načrt sintetizatorja vsebuje običajen podvojevalnik z NPN tranzistorjem BFR92.

Referenčna frekvenca 25MHz je izbrana zato, ker noben njen harmonik ne pade v frekvenčni pas 430-440MHz. Poleg tega dobimo za 25MHz kvalitetne kremenčeve kristale za uporabo v Ethernet vmesnikih. Vhodni signal 218MHz najprej deli z 2 en sam flip-flop preskalerja, ki mu sledi programirljivi števec. Primerjalna frekvenca PLLja je 50kHz, kar pomeni frekvenčne korake 100kHz za VCO oziroma korake 200kHz na končni frekvenci.



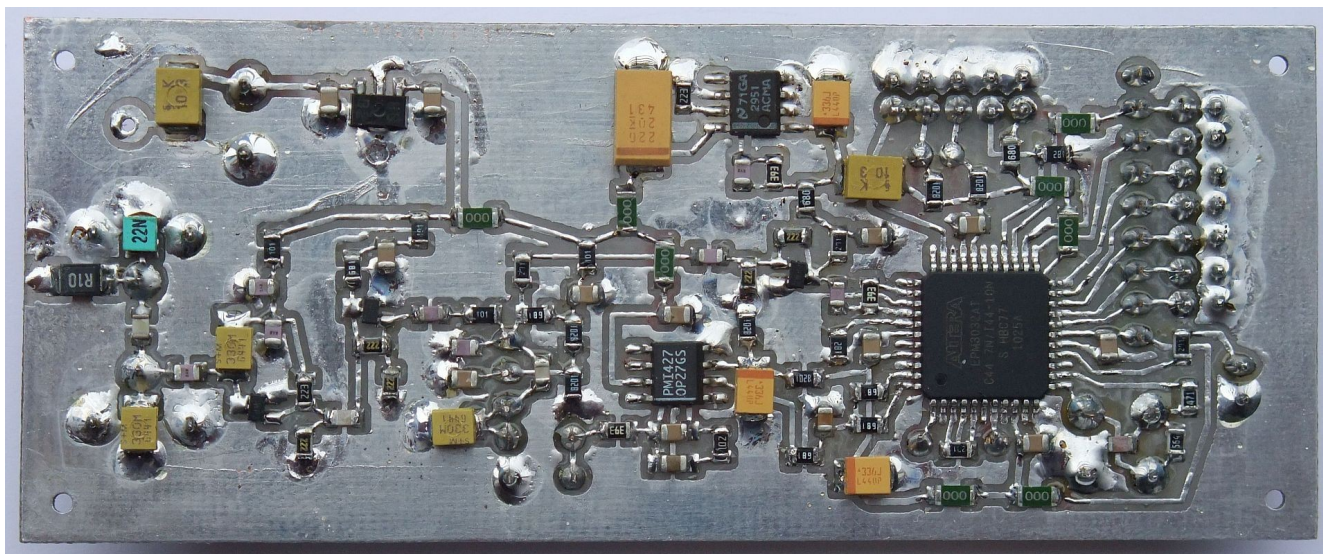
Glavna prednost programirljive logike EPM3032ATC44 je ravno v temu, da lahko z njo izdelamo natančno takšne delilnike, kot jih potrebuje PLL naše radijske postaje. Dodaten mikrokrmilnik za programiranje PLL vezja torej ni potreben! EPM3032ATC44 je sicer sprogramiran tako, da s sedmimi mostički izbiramo izhodno frekvenco sintetizatorja med 422.6MHz in 448.0MHz. Poskusi z EPM3032ATC44-7 so pokazali, da preskaler z enim samim flip-flop-om dela zanesljivo vse do 400MHz, programirljivi števec pa vse do 200MHz. Še hitrejšega, ampak dvakrat dražjega EPM3032ATC44-4 še nisem preizkusil!

Sito na izhodu frekvenčno/faznega primerjalnika je izdelano z malo boljšim operacijskim ojačevalnikom OP27 (pasovna širina 8MHz). Poskusi s še hitrejšim operacijskim ojačevalnikom AD847 (50MHz) niso prinesli nobene izboljšave, pač pa je bilo opazno poslabšanje s prepočasnimi običajnimi operacijskimi ojačevalniki (1MHz).

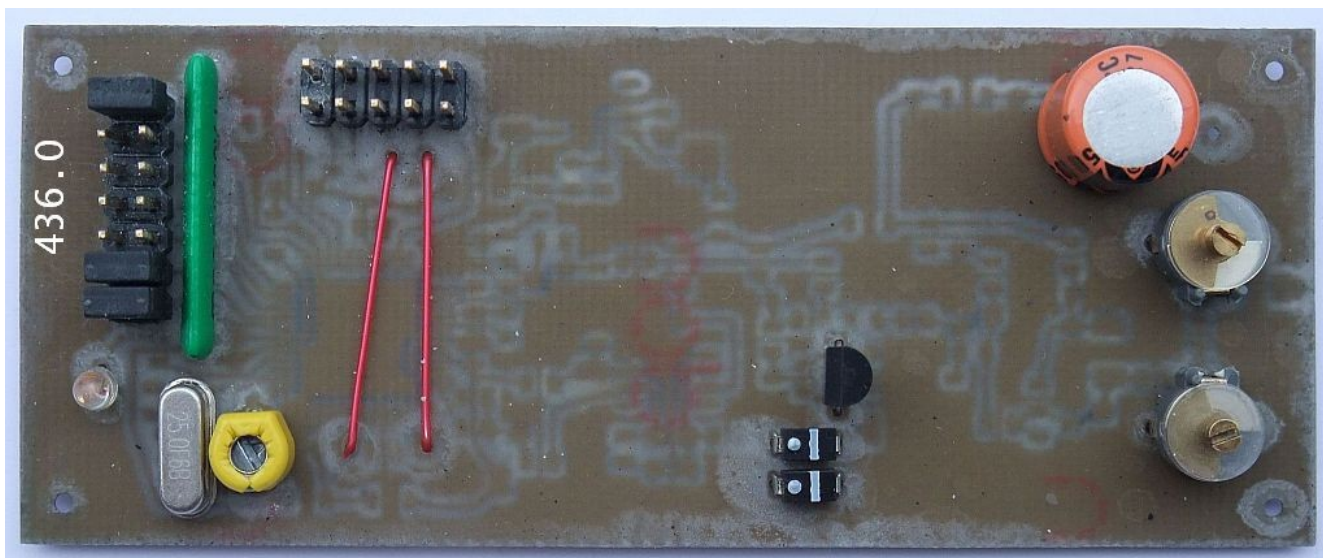
Vezje frekvenčnega sintetizatorja vsebuje še dva SMD regulatorja napajanja: 78L08 (SOT-89) za +8V za analogne stopnje in LP2951 (SOIC-8) za +3.3V za programirljivo logiko EPM3032ATC44. Skupna poraba frekvenčnega sintetizatorja znaša okoli 100mA.

Frekvenčni sintetizator je zgrajen na enostranskem tiskanem vezju z izmerami 40mX100mm. Priporočam vitroplast debeline 1mm. Večina gradnikov je SMD in je vgrajena na spodnji strani tiskanine. Posebno pozornost zasluži izbira pravih SMD tuljav. Z izjemo dušilk 10µH na napajanju imajo vse SMD tuljave zračno jedro, da dosežejo kvaliteto vsaj Q=50 na delovni frekvenci. Pozor, cenejše SMD tuljave

s feritnim jedrom imajo v danem frekvenčnem pasu kvaliteto $Q=10$ ali celo manj!



Na gornji strani tiskanine so nameščeni le redki gradniki: aluminijev elektrolitski kondenzator, trimer kondenzatorji, kristal za 25MHz, svetleča dioda UNLOCK, uporovna letvica $100k\Omega \times 8$, varikap diodi, tranzistor MPS3640, mostički za nastavitev frekvence, vtičnica za programiranje EPM3032ATC44 in dva žična mostička.

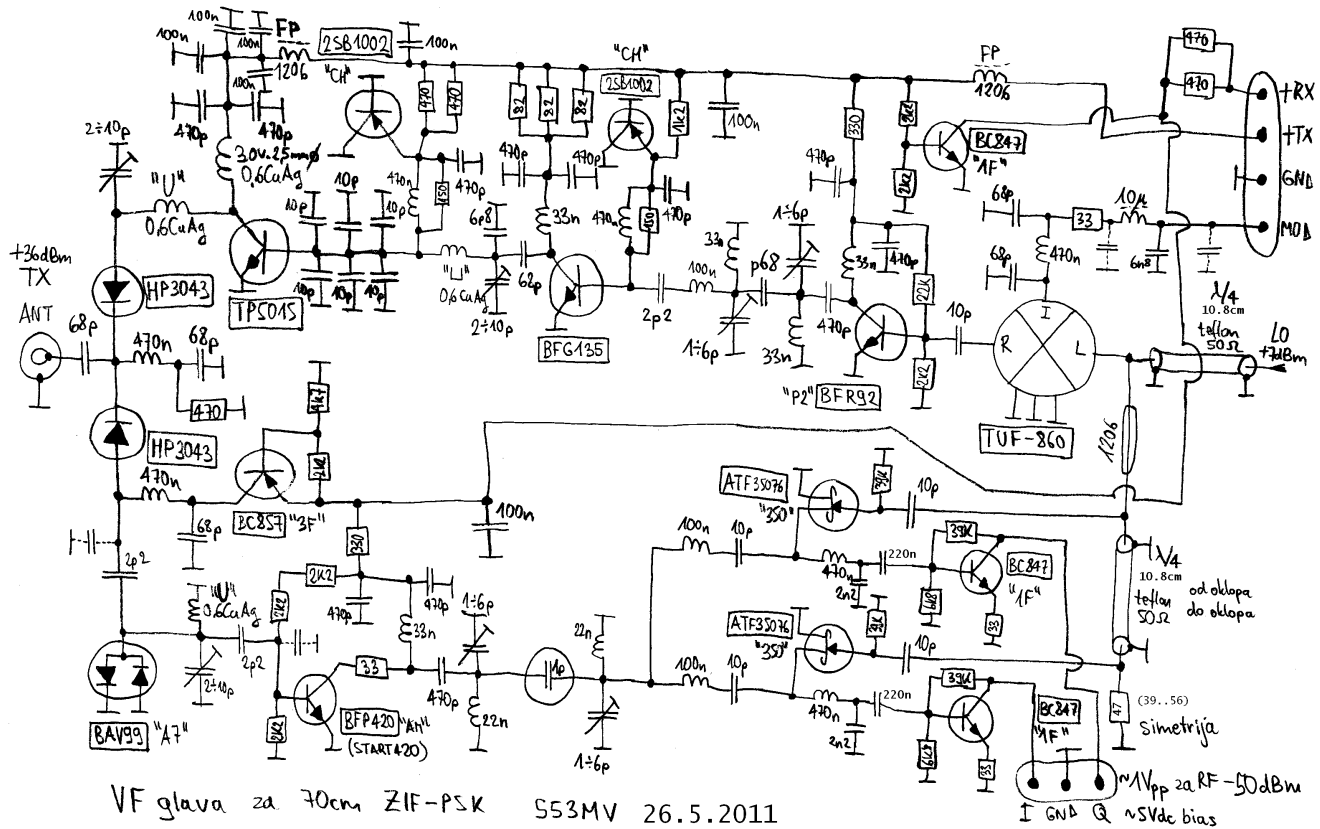


Delovanje PLL frekvenčnega sintetizatorja obvezno preverimo in grobo uglasimo preden tiskano vezje zacinjimo v oklopljeno ohišje! Preverjanje sicer olajšuje dejstvo, da je frekvenčni sintetizator popolnoma samostojna enota, ki ni odvisna od delovanja drugih enot ZIF-BPSK postaje. Najprej preverimo obe napajalni napetosti $+3.3V$ in $+8V$ ter skupno porabo enote. Nato v EPM3032ATC44 zapečemo in preverimo program "pll70a" z orodjem "Altera MAX+plusII" in kablom "CigoPLD".

Ko je EPM3032ATC44 sprogramiran, preverimo uklenitev PLLja.

3. visokofrekvenčna glava PSK postaje

visokofrekvenčna glava vsebuje modulator in močnostni visokofrekvenčni ojačevalnik oddajnika, nizkošumni ojačevalnik in kvadrturni mešalnik sprejemnika ter antenski preklopnik s PIN diodami. Modulator oddajnika in kvadrturni mešalnik sprejemnika oba potrebujeta isti signal lokalnega oscilatorja, to se pravi izhod frekvenčnega sintetizatorja.



Kot BPSK modulator je uporabljen mešalnik TUF-860, ker ima majhno vstavitevno slabljenje in deluje z razmeroma močnimi signali: dobrih 5mW iz frekvenčnega sintetizatorja. Ojačenje celotne oddajne verige je v tem primeru manjše, kar pomeni manj stopenj, predvsem pa manj oklapljanja in možnost izvedbe na enostranskem tiskanem vezju.

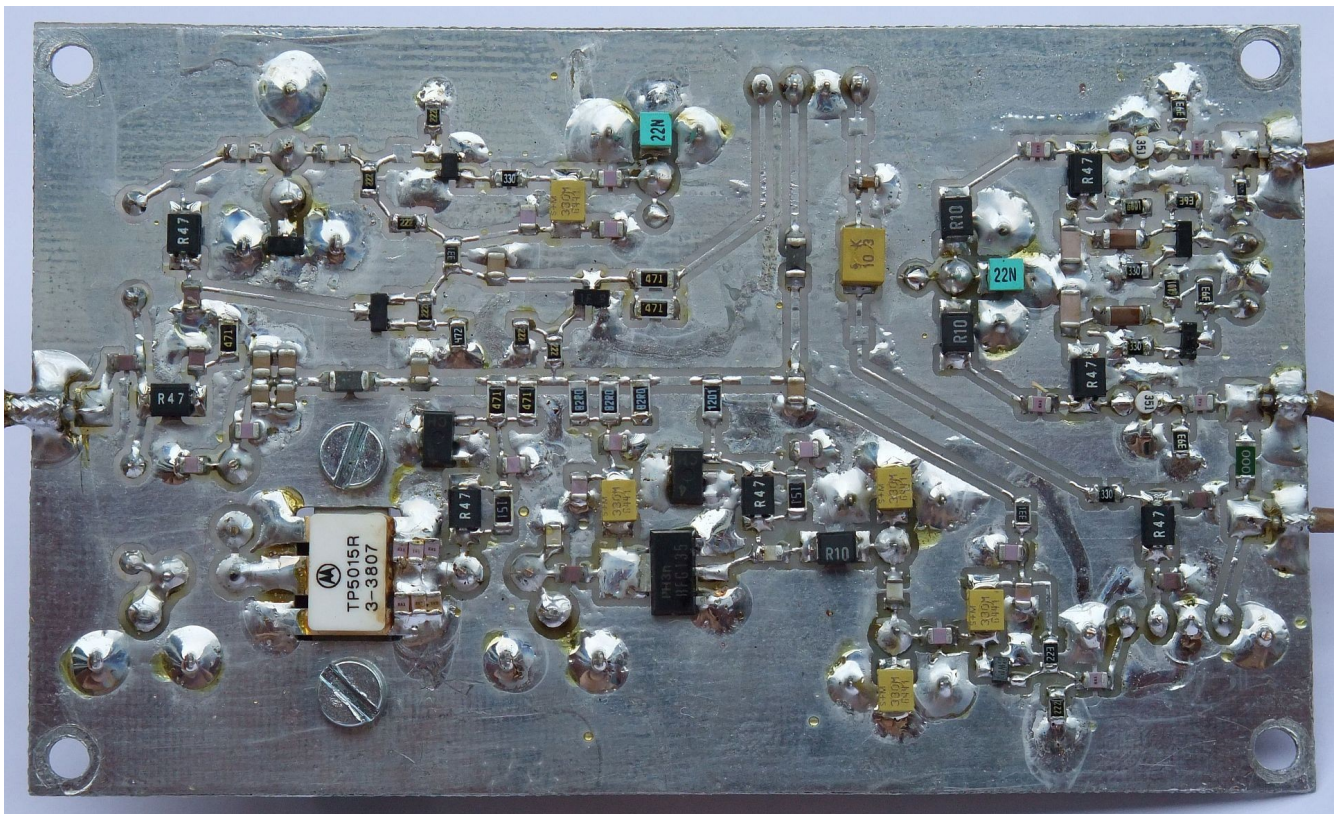
TUF-860 vsebuje v svoji notranjosti venec štirih schottky diod in dva transformatorja, ki sta po navodilih proizvajalca prilagojena za delovanje v frekvenčnem pasu 800..1050MHz. Mešalnik TUF-860 z lahkoto dobimo v starih GSM baznih postajah in deluje odlično tudi v frekvenčnem pasu 430MHz. Seveda lahko v isto vezje vgradimo tudi druge podobne balančne mešalnike z diodnim vencem.

Modulirani signal iz TUF-860 ima jakost okoli 1mW. Prvi tranzistor BFR92 dela v razredu "A" in ta signal ojači na približno 20mW. Drugi tranzistor BFG135 dela v razredu "B" in ojači signal na približno 400mW. Izhodni tranzistor TP5015 dela v razredu "B" in ojači signal na približno 4W.

Izhodni tranzistor TP5015 ni najsodobnejši. Je pa bogato predimenzioniran: proizvajalec zanj navaja 15W izhodne moči pri napajanju 24V in frekvenci 450MHz za analogno mobilno telefonijo (stare NMT bazne postaje). V podobnem ohišju z enako prirobnico dobimo številne tranzistorje za 900MHz GSM bazne postaje: TP3021, TP3022 ali TPS1002, ki pa verjetno potrebujejo malenkost drugačno prilagoditev impedance v bazi.

Antenski preklopnik je izdelan z dvema razmeroma starima PIN diodama HP3043 v steklenem ohišju. Seveda lahko uporabimo tudi drugačne PIN diode. So pa HP3043 zelo značilen predstavnik tistega, kar danes dobimo v SMD ohišjih. Sprejemna PIN dioda je na oddaji izključena, pri tem pa PNP tranzistor BC857 poskrbi, da skozi to diodo ne more teči tok kljub usmerniškem pojavu. Na oddaji lahko na kolektorju BC857 izmerimo tudi -10V!

Dodatno zaščito sprejemnika predstavlja dvojna dioda BAV99 na vhodu sprejemnika. Sprejemnik vsebuje eno samo VF ojačevalno stopnjo s tranzistorjem BFP420 (START420), ki daje na 430MHz preko 30dB ojačanja. Ničelna medfrekvenca v teoriji sicer ne potrebuje nobene selektivnosti v visokofrekvenčnem delu sprejemnika. Trije nihajni krogi, eden pred in dva za BFP420 zato dajejo le grobo selektivnost za dušenje močnih a frekvenčno oddaljenih signalov.

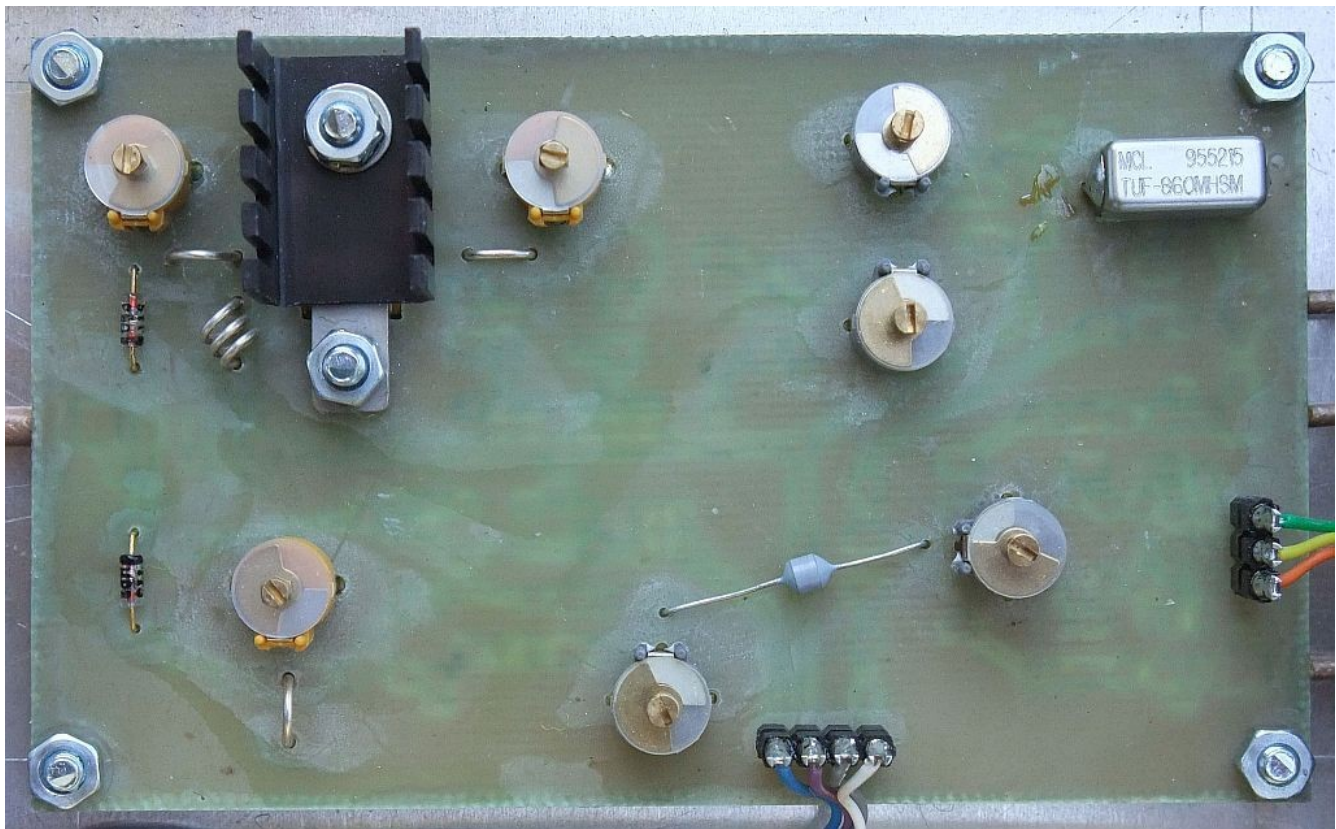


Kvadrturni mešalnik sprejemnika vsebuje dva pasivna mešalnika s HEMToma ATF35076 oziroma katerakoli HEMTA za uporabo v 12GHz SAT-TV konverterjih, da sta le oba HEMTA med sabo enaka! Signal lokalnega oscilatorja je priveden na vrata in modulira upornost kanala med izvorom in ponorom. Visokofrekvenčne in medfrekvenčne signale

Ločujejo preprosta LC sita v ponoru. 90-stopinjski fazni zasuk lokalnega oscilatorja je zagotovljen s kosom koaksialnega kabla skrbno izbrane dolžine. Pasivnima mešalnikoma sledita dva enaka medfrekvenčna ojačevalnika s tranzistorjema BC847, ki dobita napajanje preko svojih izhodov iz enote ničelne medfrekvenca.

visokofrekvenčna glava je zgrajena na enostranskem tiskanem vezju z izmerami 60mX100mm. Priporočam vitroplast debeline 1mm. Večina gradnikov je SMD in je vgrajena na spodnji strani tiskanine. Večina tuljav je SMD z zračnim jedrom in kvaliteto vsaj $Q=50$. Obe feritni dušilki "FP" (1206) imata seveda namenoma velike izgube!

Tuljave v močnostnem delu oddajnika in na vhodu sprejemnika so izdelane iz 0.6mm posrebrene bakrene žice (žila kabla RG-214) in vgrajene na gornjo stran tiskanine. Točno vrednost induktivnosti teh tuljav nastavimo z njihovo višino nad površino tiskanega vezja: "U" v bazi TP5015 ima najnižjo induktivnost in je kar stisnjen na površino, "U" v kolektorju TP5015 je okoli 3mm nad tiskanim vezjem in "U" na vhodu sprejemnika je okoli 4mm nad tiskanim vezjem.



Izhodni tranzistor TP5015 je vgrajen v pravokotno odprtino, izrezano v tiskanem vezju. TP5015 je pritrjen z dvema vijakoma M3X10. Čeprav hlajenje izhodnega tranzistorja tega ne zahteva, je na enega od vijakov pritrjeno še malo hladilno rebro iz črno-eloksiranega aluminija (za TO-220).

Na gornji strani tiskanine so poleg tuljav iz posrebrene žice vgrajeni še kapacitivni trimerji, PIN diodi, kondenzator 1pF, vtičnice za napajanje in nizkofrekvenčne signale ter modulator

(mešalnik) TUF-860. Ohišje TUF-860 je dodatno ozemljeno z dvema žicama, ki sta zacinjeni na njegovo kovinsko ohišje.

Pozor, vsi visokofrekvenčni koaksialni kabli so s teflonsko izolacijo in so pricinjeni na spodnjo stran tiskanega vezja. Dolžine kablov so mišljene od začetka oklopa do konca oklopa. Predpisani fazni zasuk 90 stopinj dosežemo v pasu 430MHz s kablom dolžine 108mm od oklopa do oklopa. To pomeni, da je celotna dolžina kabla okoli 113mm. Na vsakem koncu najprej pocinimo oklop in ga potem odstranimo v dolžini približno 2.5mm.

Zgrajeno visokofrekvenčno glavo najprej preizkusimo brez VF signalov za delovne točke raznih polprevodnikov. Pri tem privedemo napajanje stopnjam sprejemnika ali stopnjam oddajnika, nikakor pa obeh hkrati. Nato pripeljemo signal frekvenčnega sintetizatorja in na vratih obeh HEMTov bi morali preko primerne VF dušilke izmeriti usmerjeno napetost v velikostnem razredu -100mV.

Oddajnik lahko preizkusimo tako, da na modulator pripeljemo veljavno PSK modulacijo. Bližnjica za vklop modulatorja je enosmerni tok okoli 10mA, to se pravi upor približno 1k Ω med MOD in +TX. Brez krmilnega signala BPSK oddajnik ne proizvaja ničesar na svojem izhodu!

V primerno krmiljenem oddajniku uglasimo vse štiri trimerje za največjo izhodno moč na 436MHz. Fine popravke lahko poskusimo tudi z mrcvarjenjem "U-ja" v kolektorju TP5015. Pozor, če sta nihajna kroga med BFR92 in BFG135 močno razglašena, lahko ne dobimo merljive moči na izhodu oddajnika! Pravilno delujoča izhodna stopnja oddajnika bi morala proizvesti vršno moč okoli 5W, kar pomeni okoli 4W pri BPSK oddaji s filtrirano ovojnico. Poraba visokofrekvenčnega dela BPSK oddajnika znaša okoli 650mA, odvisno od toleranc polprevodnikov in uglaševanja.

Sprejemno verigo preizkusimo tako, da na antenski priključek pripeljemo nemoduliran nosilec jakosti približno -50dBm (10nW). Frekvenco nosilca izberemo za približno 100kHz različno od lokalnega oscilatorja. Če postaja dela na 430.8MHz, signal generator nastavimo na 430.9MHz. Vse tri trimerje ponovno nastavimo za največjo jakost obeh mešalnih produktov na izhodu visokofrekvenčne glave. Poraba visokofrekvenčnega dela sprejemnika znaša okoli 25mA.

Oba signala I in Q na 100kHz najlažje opazujemo z osciloskopom. Pri tem ne smemo pozabiti na napajanje obeh BC847 iz ZIF verige ali podobno! Z vhodnim signalom -50dBm bi morali po uglaševanju dobiti okoli 1Vpp na obeh izhodih. Kar je še bolj pomembno, z osciloskopom moramo preveriti, da sta oba signala I in Q enako močna ter imata fazni zamik točno 90 stopinj. Manjšo nesimetrijo (neenaka HEMT) lahko popravimo z zaključitvenim uporom za koaksialni kabel, tako da namesto nazivnih 47 Ω vgradimo 39 Ω ali 56 Ω .

Dvokanalna ničelna medfrekvenca je tudi v novi radijski postaji izdelana z dvema ojačevalnikoma NE592 (ali TL592). Vrlina NE592 je prav v temu, da to NI operacijski ojačevalnik, kot marsikdo zmotno misli. NE592 vsebuje zaporedno vezavo treh ojačevalnih stopenj, kjer ima vsaka stopnja svojo lastno povratno vezavo. Rezultat je velika pasovna širina in hkrati veliko ojačanje, kjer 40 let star NE592 prekaša tudi najšodobnejše operacijske ojačevalnike. Ojačanje operacijskih ojačevalnikov namreč omejuje stabilnost zunanje povratne vezave zaradi lastnega faznega zasuka.

NE592 je razvil Signetics (ameriški Philips) pred štirimi desetletji. Silno podoben sodobnik, ki lahko marsikdaj zamenja NE592, je Fairchildov μ A733. Nekoliko manj podoben sodobnik je bil Siemensov TBA400. Philipsov naslednik NXP je uspešnico NE592 umaknil iz proizvodnje. Na srečo NE592 še vedno proizvaja Onsemi (bivša Motorola), povsem enakovredno kopijo TL592 pa Texas Instruments. Novejših vezij, ki bi lahko neposredno nadomestila NE592, žal ni! Pač pa so se dobre zamisli iz NE592 ohranile v najhitrejših digitalnih vezjih ECL, s katerimi ima NE592 skupno simetrično zasnovo in tudi razmeroma veliko električno porabo...

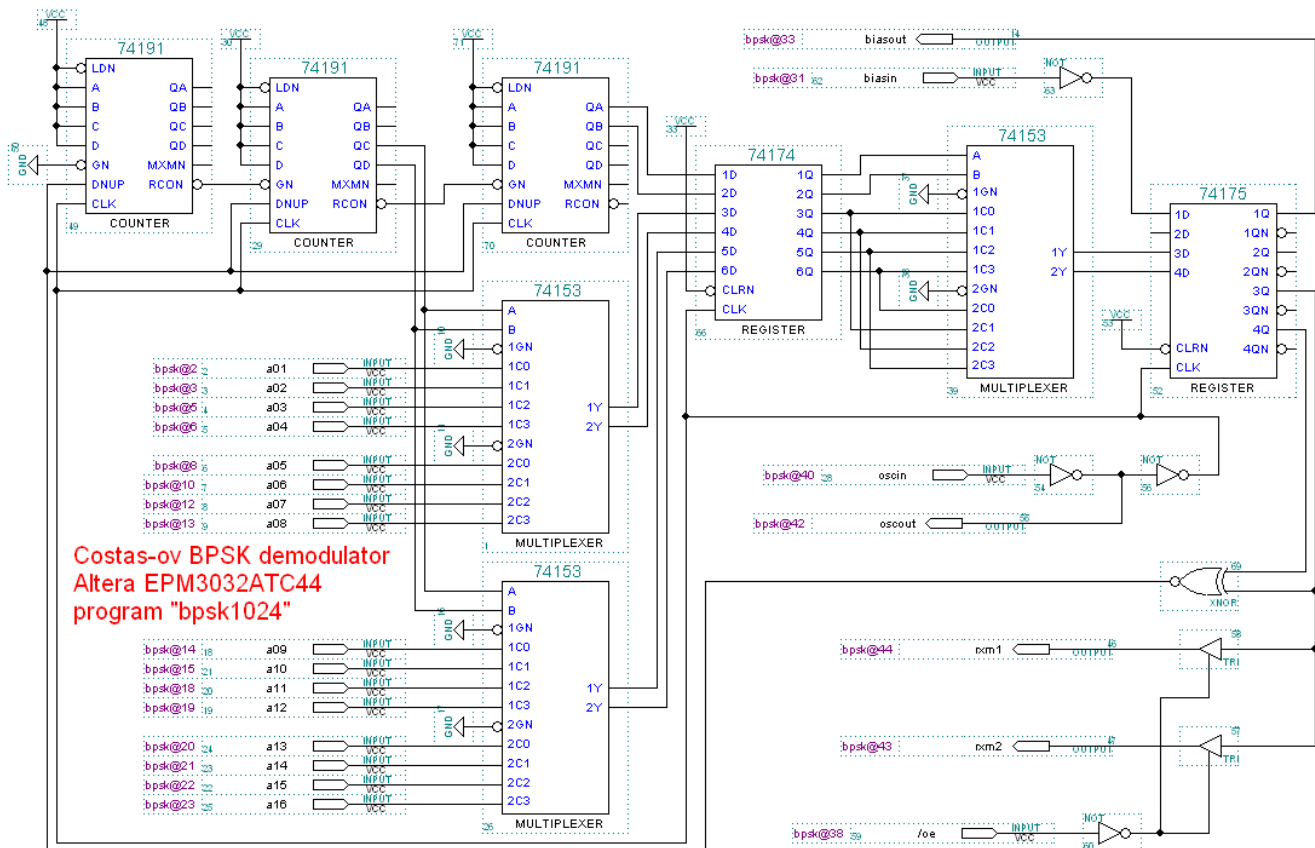
NE592, μ A733 in TBA400 so se prvotno izdelovali v okroglem kovinskem ohišju TO-100 z 10 nogicami. Kovinska ohišja so proizvajalci pred tremi desetletji opustili in dolgo let proizvajali NE592 in μ A733 v plastičnih oziroma keramičnih DIL ohišjih s 14 ali 8 nogicami. Na prelomu tisočletja so izginila še DIL ohišja in danes dobimo NE592 in μ A733 samo še v plastičnih SOIC (SMD) ohišjih s 14 ali 8 priključki. V novi dvokanalni ničelni medfrekvenci sem se zato odločil za NE592 v ohišju SOIC-8.

AGC je izdelan podobno kot v izboljšani medfrekvenčni verigi [11] s štirifaznim detektorjem. Čedalje težje dobavljivi CD4049UB v vlogi dvojnega elektronskega potenciometra je zamenjal 74HC4066 v ohišju SOIC-14. Nizkoprepustna LC " π " sita na vhodu dvokanalne ničelne medfrekvenca in vsi sklopni kondenzatorji so rezultat številnih poskusov iskanja najboljšega kompromisa med popačenjem signala, dovzetnostjo za motnje in šum ter hitrostjo preklopa TX/RX oziroma AGC.

Pomembna vrlina NE592 je tudi prisotnost dveh protifaznih izhodov, ki so kot nalašč za krmiljenje večfaznih uporovnih delilnikov. Demodulator z analognimi stikali [3] potrebuje 16-fazno krmiljenje, za izboljšani demodulator [11] pa zadošča 8-fazno krmiljenje. Ozko grlo obeh demodulatorjev [3] in [11] so komparatorji LM311, ki omejujejo hitrost delovanja na približno 2Mbit/s.

V novem Costas-ovem BPSK demodulatorju sem najprej nameraval uporabiti programirljivo logiko Altera EPM3032ATC44 in hitrejšje dvojne komparatorje LM319. Poskusi so pokazali, da so sicer digitalni vhodi programirljive logike EPM3032ATC44 povsem uporabni tudi v analognem režimu. Še več, ker so vsi vhodi izdelani na istem čipu, so med sabo popolnoma enaki. Zadošča torej en sam izvor referenčne napetosti za vse vhode EPM3032ATC44, ki jih uporabimo kot izredno hitre analogne komparatorje! Dodatni analogni komparatorji torej sploh niso potrebni...

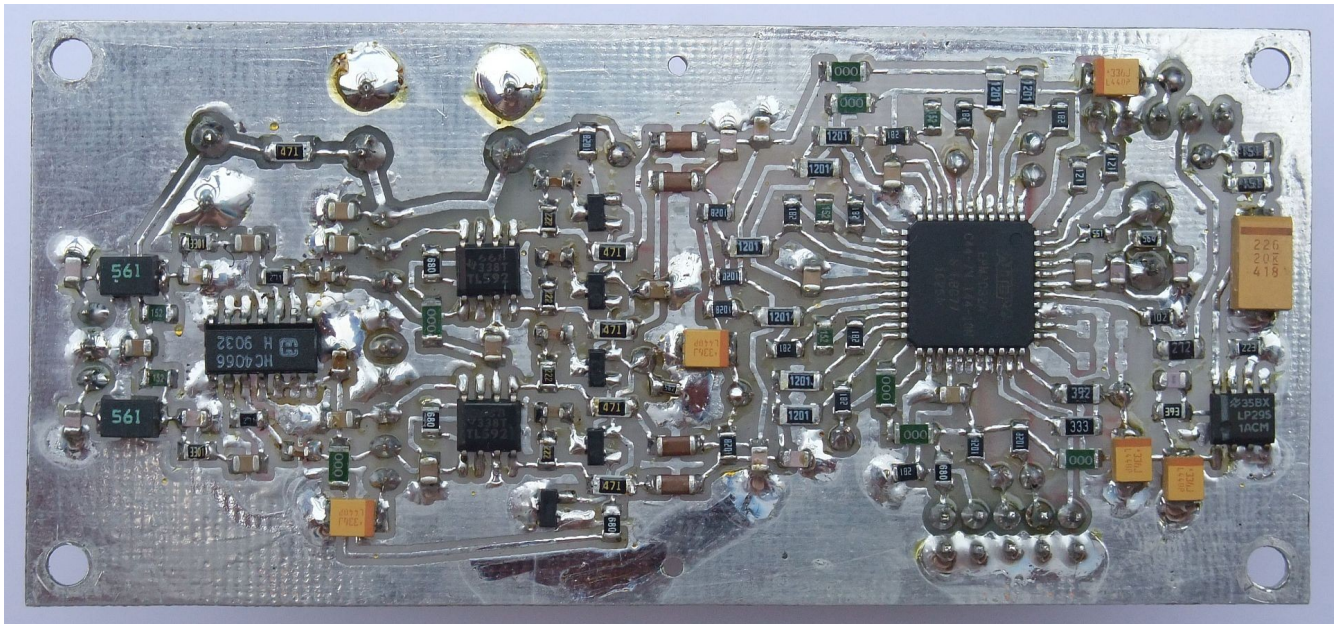
Iz štirih izhodov dveh NE592 naredi uporovni venec iz 20 uporov 16-fazni signal na 16 vhodih EPM3032ATC44. Dodatno vezje v EPM3032ATC44 poskrbi zato, da drži uporovni venec na skrbno izbrani prednapetosti +BIAS, ki natančno ustreza preklopnemu pragu vseh vhodov. Notranje vezje v programirljivi logiki EPM3032ATC44 je po funkciji sicer zelo podobno izboljššanemu demodulatorju [11], le da DPLL dela s koraki 1/1024.



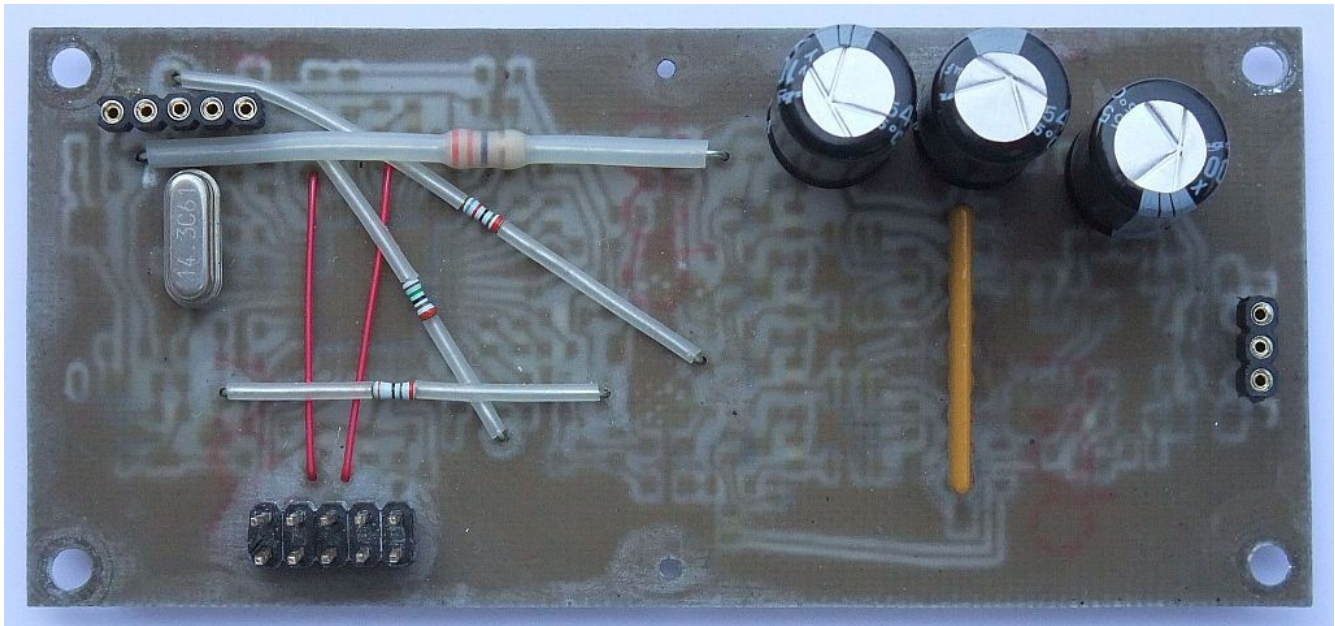
EPM3032ATC44 vsebuje tudi kristalni oscilator za frekvenco takta 14.318MHz. DPLL 1/1024 torej omogoča popraviljanje frekvence nosilca BPSK oddaje vse do +/-13.9kHz. Izhod BPSK demodulatorja sta dva vzporedna tri-state krmilnika. Če vhod /OE povežemo na +TX v ožičenju radijske postaje, na oddaji izključimo BPSK demodulator in mogoče preprečimo neželen presluh med TXM in RXM v kablu med radijsko postajo in (E)ATNCjem.

Vezje demodulatorja vsebuje še regulator LP2951 za napajanje +3.3V za programirljivo logiko EPM3032ATC44. Napajanje obeh NE592 in medfrekvenčnih ojačevalnikov v visokofrekvenčni glavi gre neposredno iz +12V, seveda skrbno presejana in očiščeno z razmeroma velikimi aluminijevimi elektrolitskimi kondenzatorji.

Dvokanalna ničelna medfrekvenca in BPSK demodulator sta zgrajena na enostranskem tiskanem vezju z izmerami 45mmX100mm. Priporočam vitroplast debeline 1mm. Večina gradnikov je SMD in je vgrajena na spodnji strani tiskanine.



Na gornji strani tiskanine so nameščeni le redki gradniki: trije aluminijevi elektrolitski kondenzatorji, kristal za 14.318MHz, štirje upori z žičnimi izvodi, uporovna letvica 10kΩx8, vtičnica za programiranje EPM3032ATC44, vtičnica za vhod, vtičnica za izhod in napajanje in dva žična mostička.



Po končani gradnji najprej preverimo večfazni uporovni venec za kratke stike z digitalnim ohmmetrom. Upornosti po diagonalah morajo biti enake, sicer smo pri spajkanju naredili kašen kratek stik. Nato priklopimo napajanje +12V in preverimo napajalne napetosti +3.3V in +11V (NE592) ter enosmerne napetosti na vseh štirih izhodih NE592 (okoli +9V). Nato v EPM3032ATC44 zapečemo in preverimo program "bpsk1024" z orodjem "Altera MAXplusII" in kablom "CigoPLD".

Ko program v notranjosti EPM3032ATC44 deluje, bi moral delovati

tudi kristalni oscilator na 14.318MHz in vezje za prednapetost +BIAS. Prednapetost +BIAS je običajno okoli +1.25V. Z digitalnim voltmetrom preverimo, da imamo na celotnem večfaznem uporovnem vencu isto enosmerno napetost oziroma da ni enosmernih padcev na nobenem od uporov večfaznega venca.

Končno pripeljemo na vhod I ali Q kakršenkoli signal in preverimo napetost AGC. Ker deluje 74HC4066 z nižjimi napetostmi kot CD4049UB, je tudi AGC napetost približno polovica tistega, kar izmerimo v medfrekvenčni verigi [11]. Ker deluje AGC šele v ničelni medfrekvenci, lahko močni signali (nad -30dBm oziroma močnejši od 1 μ W) na vhodu sprejemnika povzročijo nasičenje visokofrekvenčnih stopenj. Opisane BPSK radijske postaje torej niso primerne za delovanje na zelo kratkih razdaljah samo nekaj metrov, ko so opremljene z antenami!

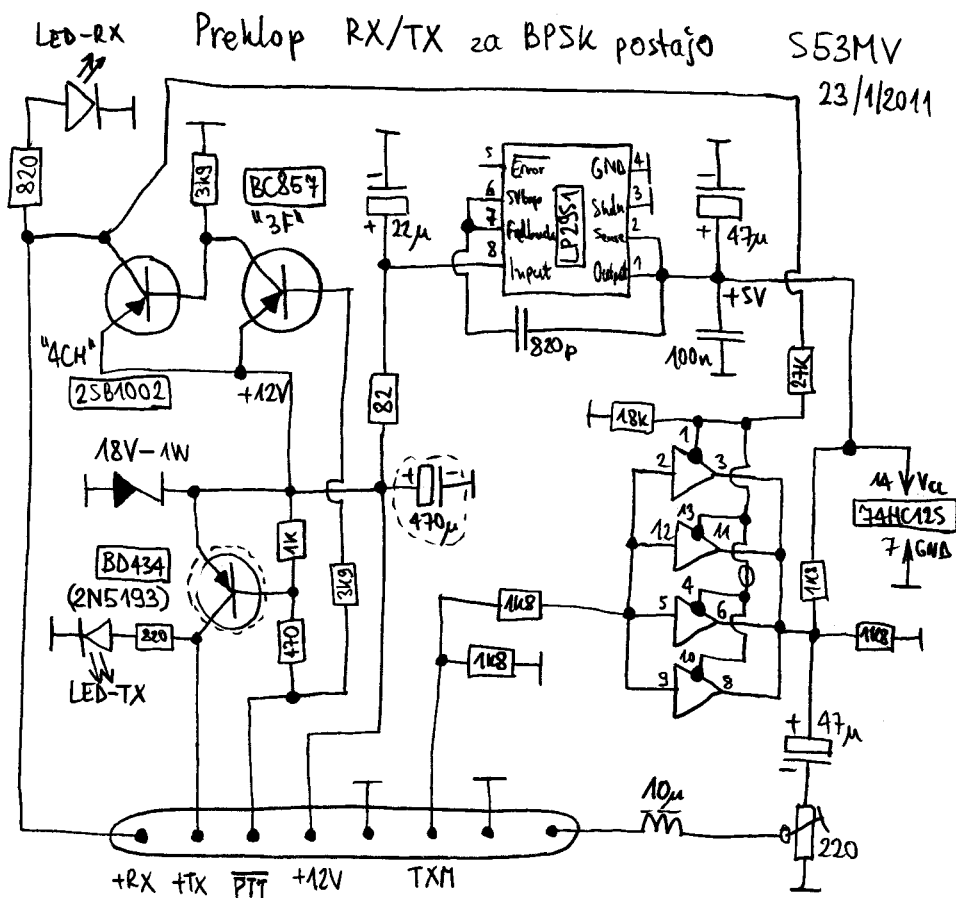
Poraba ničelne medfrekvence in BPSK demodulatorja znaša okoli 100mA brez vhodnih signalov. Ker deluje kar 18 vhodov EPM3032ATC44 v linearnem režimu, poraba upade tudi do 10mA, ko privedemo kakršenkoli signal na vhod I ali Q. K tej porabi moramo prišteti še porabo dveh medfrekvenčnih ojačevalnikov v visokofrekvenčni glavi, ki dobita napajanje iz enote ničelne medfrekvence.

Objavljene vrednosti vseh gradnikov in program "bpsk1024" so primerni za delovanje pri hitrosti 1.2288Mbit/s s filtrirano BPSK modulacijo, kot jo proizvaja oddajnik opisane BPSK radijske postaje za 430MHz. Za delovanje pri višjih bitnih hitrostih, na primer 2Mbit/s, je treba spremeniti vhodna nizkoprepustna LC " π "sita. Večja odstopanja oddajne frekvence bi dopuščal drugačen DPLL v Costas-ovem demodulatorju.

Končno, z drugačnim, nesimetričnim uporovnim vencem bi se dal proizvesti tudi 32-fazni signal v notranjosti EPM3032ATC44, kar bi omogočalo DPLL s finejšimi koraki oziroma demodulacijo QPSK. Isto tiskano vezje in isti polprevodniki torej omogočajo še veliko eksperimentiranja!

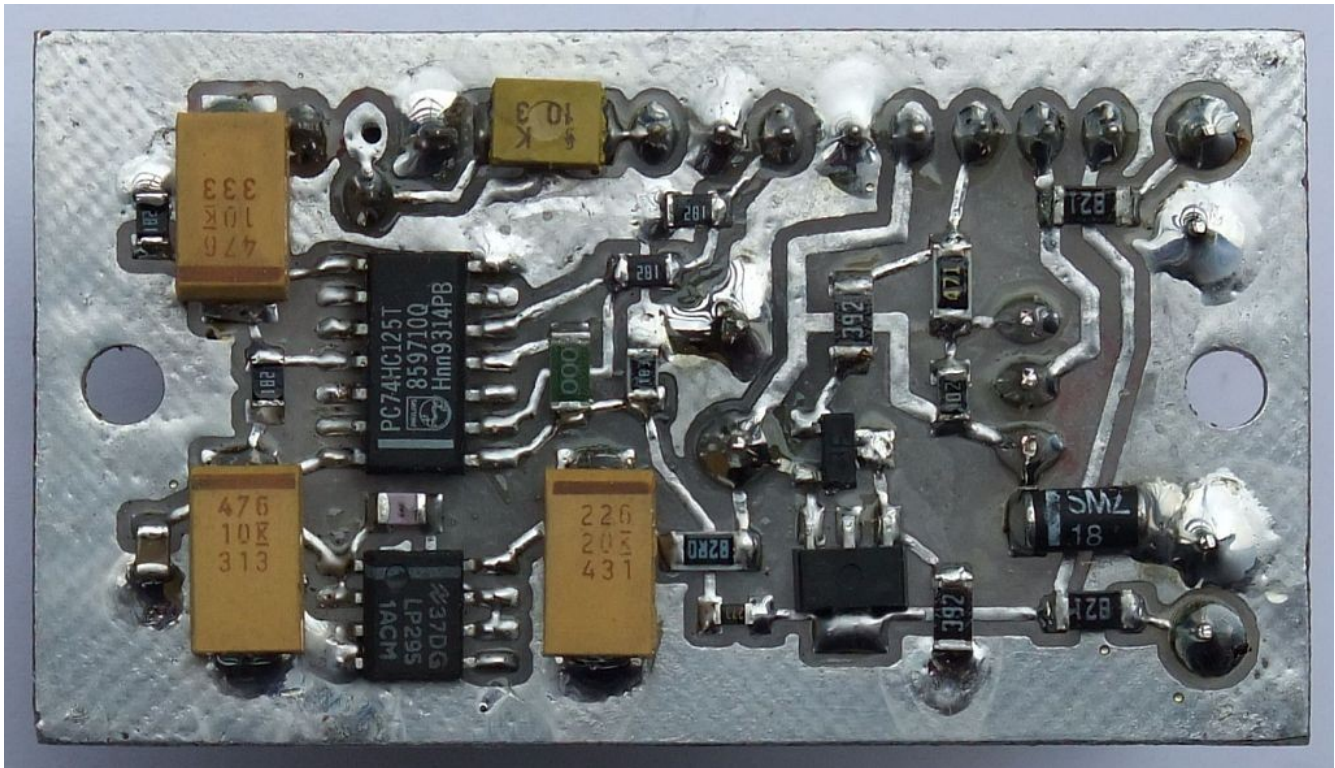
5. Preklop napajanja sprejem/oddaja in krmilnik modulatorja

Preklop napajanja sprejem/oddaja iz signala /PTT preklaplja napajalni napetosti +RX in +TX s tremi PNP tranzistorji. Glede na povečano moč oddajnika potrebuje +TX močnejši preklopni tranzistor BD434 (ali 2N5193). Vezje iz starih BPSK postaj tu ne zadošča, ker je BD136 prešibek in vnaša prevelik padec napetosti. Prisotnost obeh napajalnih napetosti +RX in +TX je označena z zeleno oziroma rdečo LED kot v vseh PSK postajah.

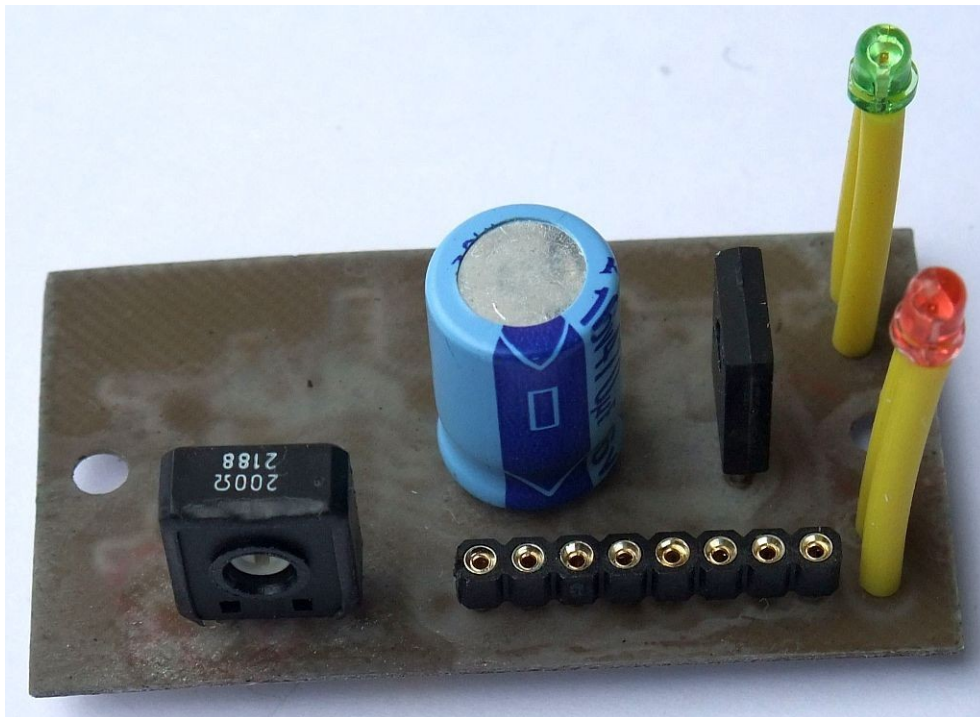


Na istem tiskanem vezju je nameščen tudi krmilnik za modulator oddajnika z vezjem 74HC125, trimernjem 220Ω za nastavitve jakosti modulacije in prvo tuljavo LC nizkoprepustnega "T" sita, saj sta kondenzator in druga tuljava nameščena v visokofrekvenčni glavi. Krmilnik je sicer stalno priklopljen na napajanje +5V iz LP2951, izhod pa je na sprejemu ugasnjen. Dva upora 1.8kΩ tedaj držita tantalov elektrolitski kondenzator naelektren na polovično napetost +2.5V, da ob preklopu na oddajo ni prehodnega pojava.

Preklop napajanja sprejem/oddaja in krmilnik modulatorja sta zgrajena na enostranskem tiskanem vezju z izmerami 28mmX50mm. Priporočam vitroplast debeline 1mm. Večina gradnikov je SMD in je vgrajena na spodnji strani tiskanine:



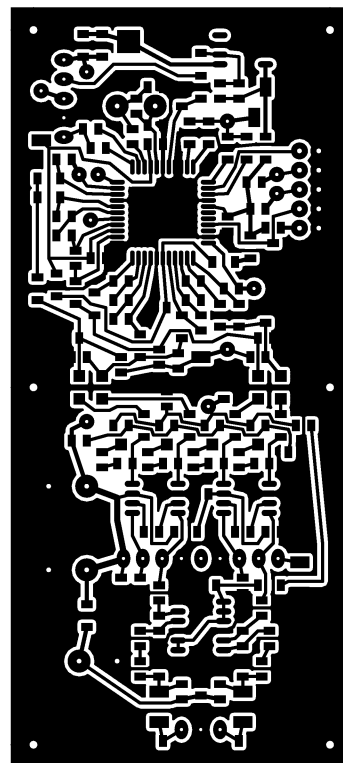
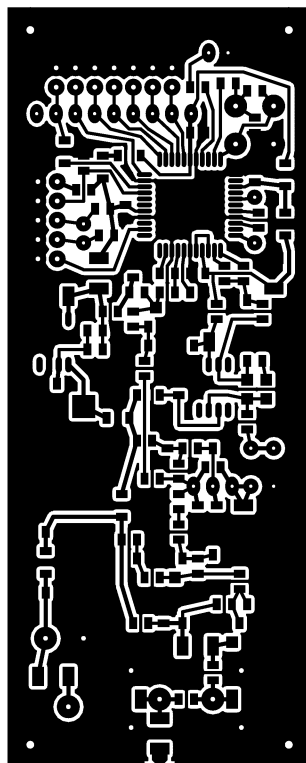
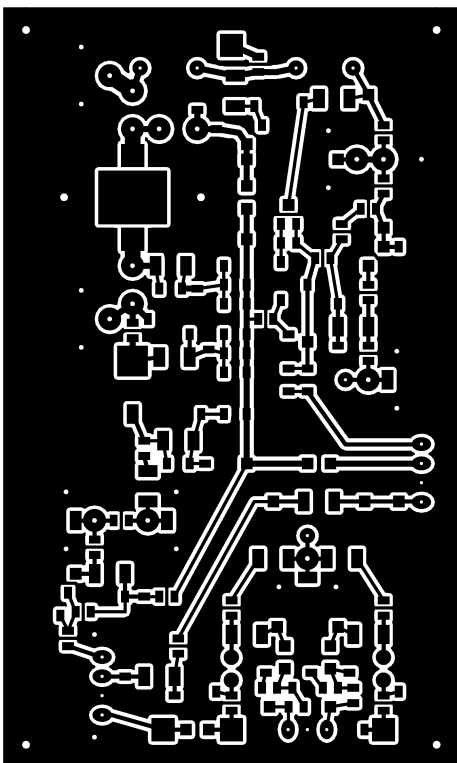
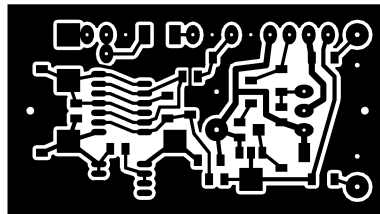
Na gornji strani tiskanine so nameščeni le redki gradniki: aluminijev elektrolitski kondenzator, tranzistor BD434, trimer za modulacijo, obe LED in vtičnica.



Lastna poraba preklopnika znaša okoli 25mA na sprejemu in dvakrat toliko na oddaji. Izhod +RX je načrtovan za bremena do 150mA, izhod +TX pa za bremena do 1A.

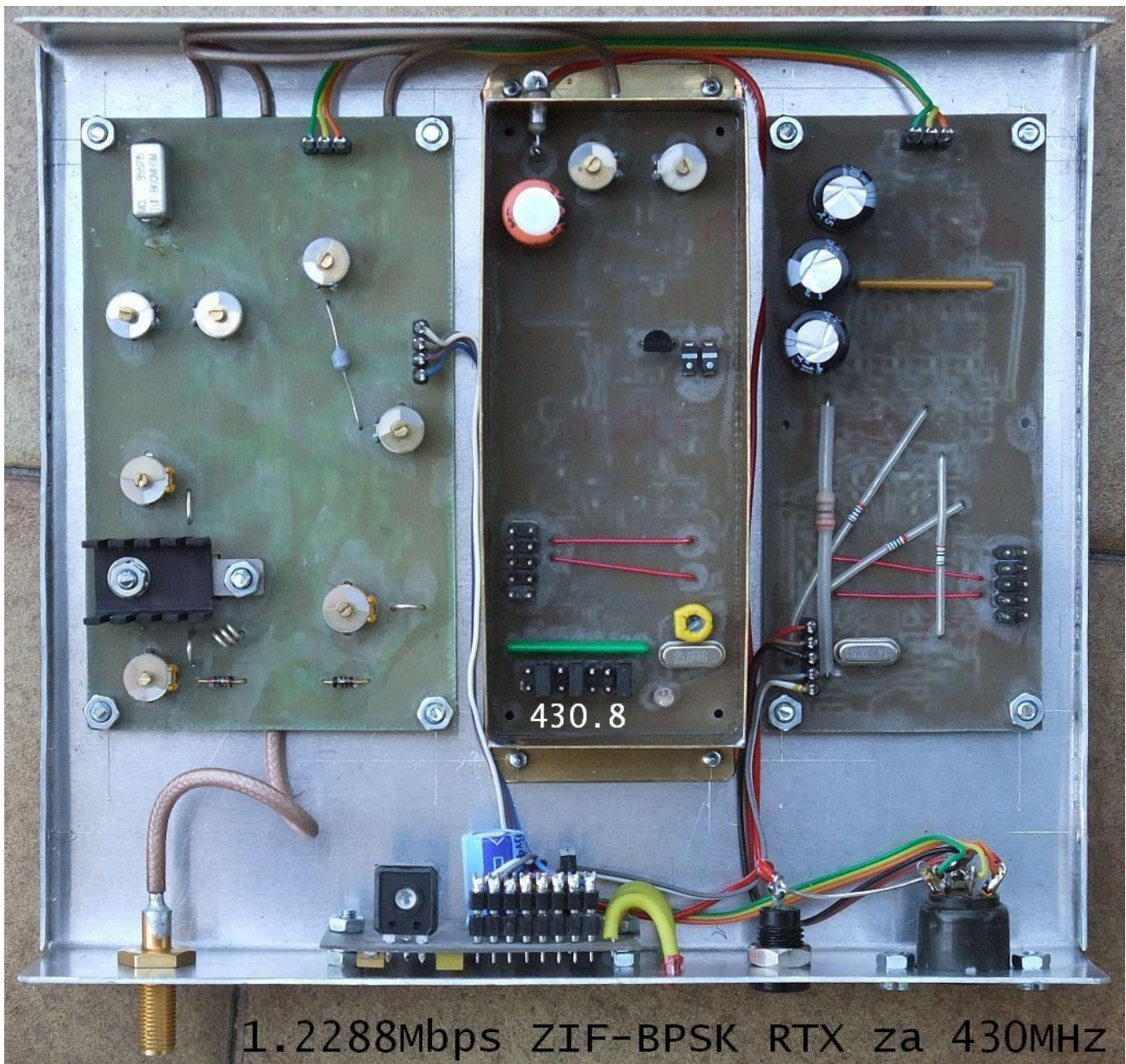
6. Gradnja megabitne BPSK radijske postaje za 430MHz

Megabitna BPSK radijska postaja za 430MHz je izdelana na štirih enostranskih tiskanih vezjih:



Tiskano vezje frekvenčnega sintetizatorja je zacinjeno v oklopljeno ohišje. Ostala tri tiskana vezja so pritrjena z vijaki M3X10 na dno ohišja iz 1mm debele aluminijeve pločevine. Na vsak vijak sta nameščeni dve matici M3, ki določata razdaljo med tiskanim vezjem in aluminijevo pločevino.

Priporočam škatlo iz dveh "Ujev": 1mm aluminijeva pločevina za dno in 0.5mm aluminijeva pločevina za pokrov. Dno škatle naj ima širino 170mm, globino 150mm in višino 30mm kot v prototipu, da se izognemo neželjenim resonancam škatle v frekvenčnem področju delovanja radijske postaje:

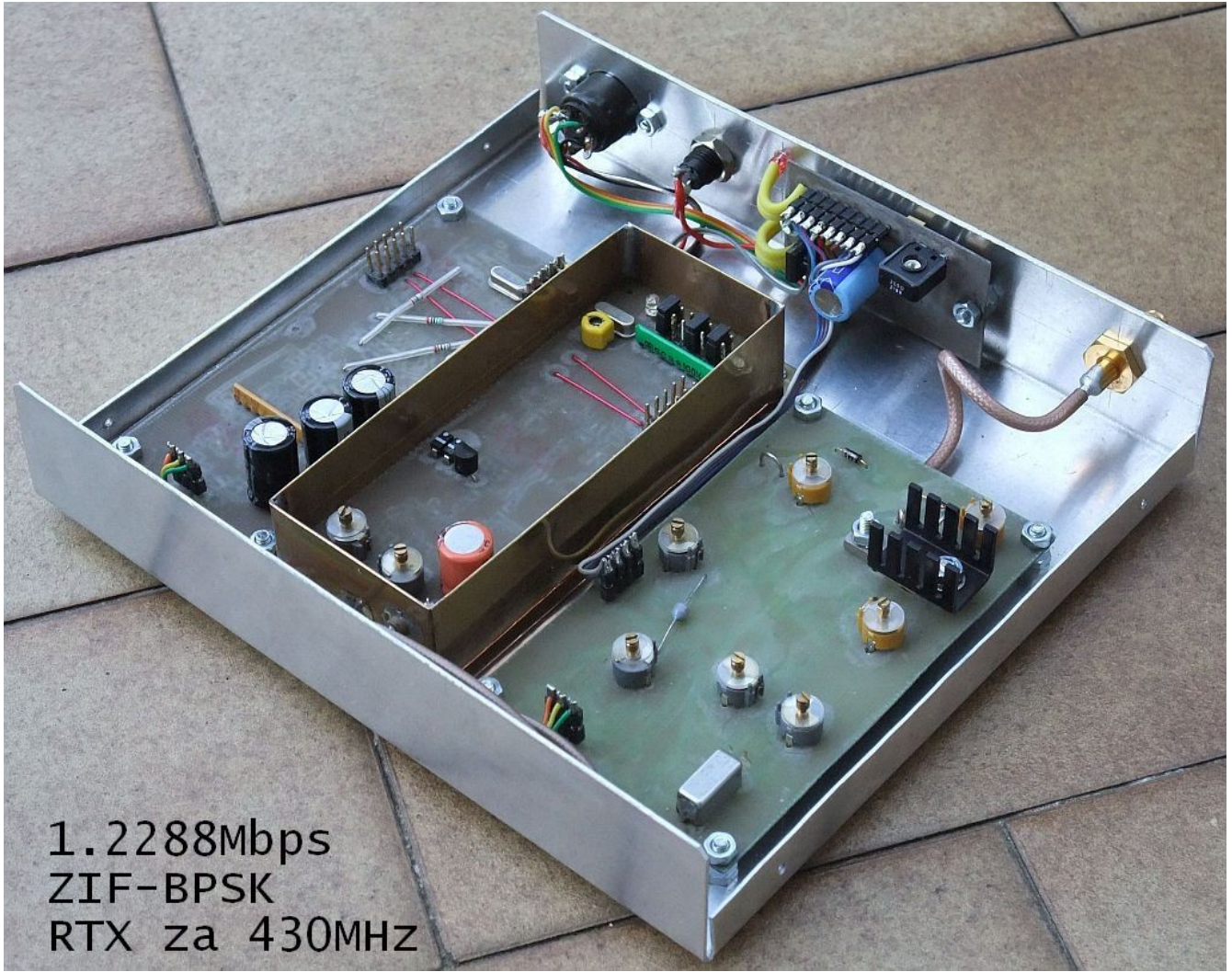


1.2288Mbps ZIF-BPSK RTX za 430MHz

Na bakreni pokrov škatlice frekvenčnega sintetizatorja je nameščen samolepljiv filc, da pokrov škatle iz 0.5mm debele aluminijeve pločevine zadržuje tudi mali bakreni pokrovček na svojem mestu:



Na zadnji strani škatle ni priključkov:



1.2288Mbps
ZIF-BPSK
RTX za 430MHz

7. Poskusi z megabitno BPSK postajo za 430MHz

Ko smo pred skoraj dvema desetletjema skušali postaviti prve WBFM postaje za 38.4kbit/s packet-radio v frekvenčnem pasu 434MHz, se je takoj razlegel krik in vik, koga bojo vse motile radijske oddaje s pasovno širino kar 200kHz. Zagroženih strašnih motenj ni v dveh desetletjih uspel slišati še nihče...

BPSK radijska postaja za 1.228Mbps uporablja sicer 10-krat širši frekvenčni spekter od WBFM postaje, a je tudi spektralna gostota moči zaradi tega 10-krat manjša. Prav spektralna gostota moči ne govori v prid spektralno učinkovitejšim modulacijam, kot jih uporablja WLAN (WiFi). Povrhu BPSK radijske postaje uporabljajo skrambler. Tedaj je spekter oddaje zvezen in podoben naravnemu toplotnemu šumu. Za razliko od zoprnih brenčočih nosilcev vsakih 15.6kHz analogne ATV...

Približna ocena motenj za 1.228Mbit/s BPSK oddajo na 430.8MHz je prikazana na spodnji tabeli:

MOTNJE NA VHODU FM REPETITORJEV V PASU 430-432MHZ		MOTNJE OZKOPASOVNIM CW/SSB POSTAJAM V PASU 432.0-432.4MHZ	
RAZLIČNA POLARIZACIJA (FM=VP, BPSK=HP)	-20dB	ISTA POLARIZACIJA (HP)	0dB
RAZLIČNA PASOVNA ŠIRINA ($B_{BPSK} = 100 \cdot B_{FM}$)	-20dB	RAZLIČNA PASOVNA ŠIRINA ($B_{BPSK} = 1000 \cdot B_{SSB}$)	-30dB
S/N _{MIN} ZA FM DEMODULATOR	+10dB	IZKORIŠČANJE PRVE NIČLE SPEKTRA BPSK MODULACIJE ($f_{BPSK} = 430.800MHz$)	-30dB
-----		-----	
SKUPNO SLABLJENJE ALI RAZMERJE MOČI	-30dB 1/1000	SKUPNO SLABLJENJE ALI RAZMERJE MOČI	-60dB 1/1000000
DOMET REPETITORJA	100km	MOČ BPSK ODDAJNIKA	4w (+36dBm)
UPADANJE MOČI	1/SQRT(1000)	-----	
ŠKODLJIVI DOMET MOTILCA	3km	NAVIDEZNA MOČ MOTILCA	4µw (-24dBm)
...V PRAKSI ŠE DOSTI MANJ ŽARADI SLABIH DUPEKSERJEV IN USTREZNO MANJŠE OBCUTLJIVOSTI REPETITORJEV		...JE ZA NEKAJ VELIKOSTNIH RAZREDOV MANJŠA OD "ŠPRICANJA" QRO POSTAJ V TEKMOVANJU	

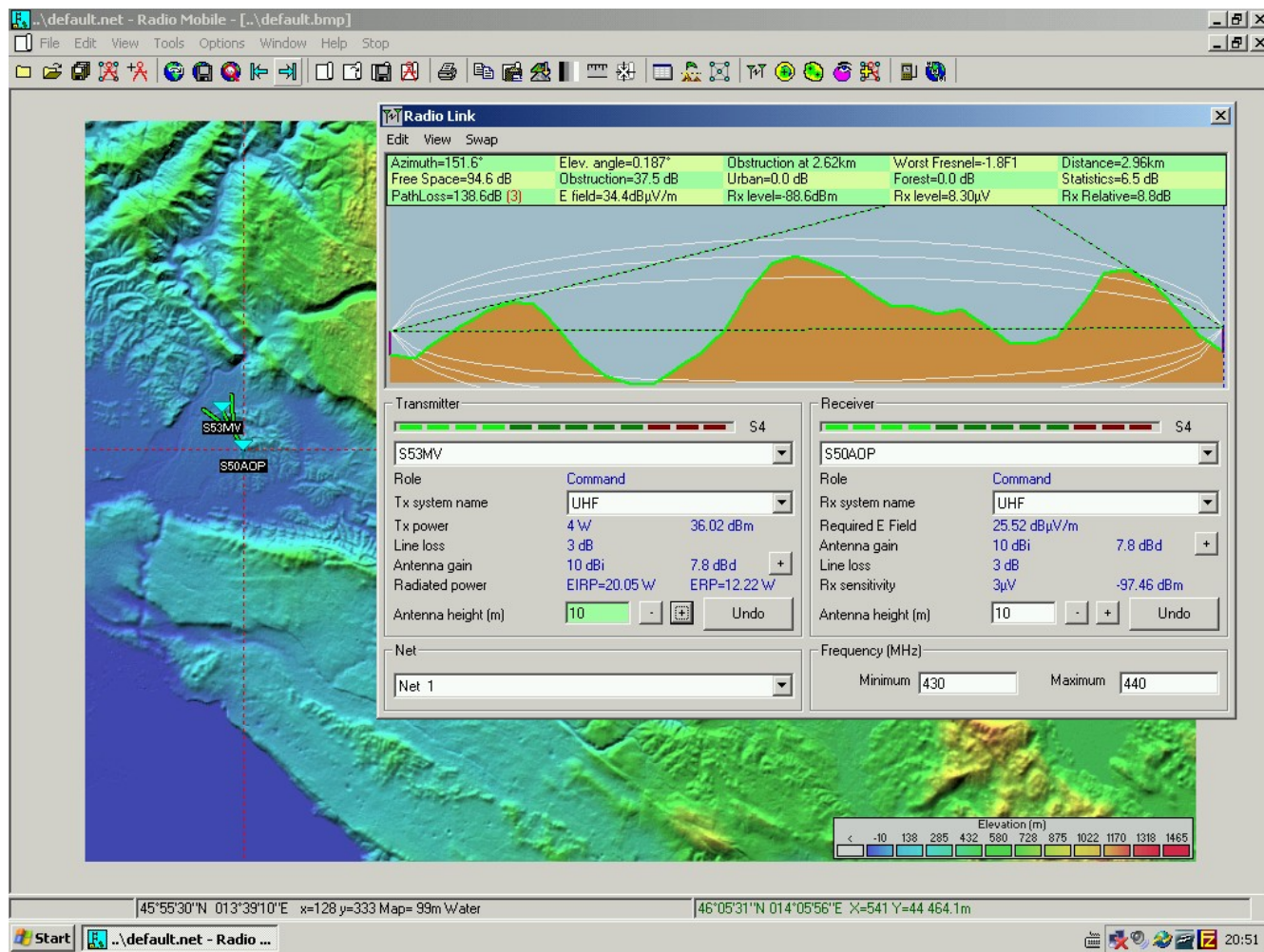
OCENA MOTENJ DRUGIM UPORABNIKOM V PASU 430-440MHZ

Kljub temu, da BPSK postaja deluje v istem frekvenčnem pasu kot vhodi FM repetitorjev, je škodljivi domet BPSK postaje zelo majhen. V praksi to pomeni, da ne moremo imeti FM repetitorja in BPSK

radijske postaje na istem antenskem stolpu, v vseh ostalih primerih pa medsebojnih motenj ne bo opazil nihče!

Izbira frekvence 430.8MHz ni naključna. Prvi minimum spektra BPSK modulacije 1.2288Mbit/s tedaj pade ravno v področje ozkopasovnih komunikacij 430.0-432.4MHz in ta pojav lahko izkoristimo za omejevanje medsebojnih motenj.

Šestmesečni poskusi so pokazali, da obstajajo motnje v obratni smeri. Motnje radioamaterskih oddaj so zelo redek pojav. Dosti bolj resna motnja so profesionalni uporabniki znotraj in zunaj frekvenčnega pasu 430-440MHz. Vozlišče S54YNG na primer stalno sprejema zelo močno motnjo na 442MHz, verjetno na istem antenskem stolpu. Brez dodatnega pasovno-prepustnega sita z votlinskim resonatorjem je BPSK sprejemnik popolnoma gluha.



Številni poskusi so pokazali, da ima 1.2288Mbps BPSK postaja podoben radijski dolet kot 38.4kbit/s WBFM postaja v istem frekvenčnem pasu 430MHz. Nova postaja torej omogoča zveze brez neposredne vidljivosti. Radijska zveza S53MV-S54YNG se je v šestih mesecih izkazala zelo zanesljiva na razdalji 6km preko enega kučlja. Še večji dosežek je zveza S53MV-S50AOP na razdalji sicer samo 3km, ampak preko treh kučljev. Ta zveza omogoča internetni dostop s kar 80kbyte/s in to z več kot 10dB rezerve!

Nova megabitna BPSK radijska postaja za 430MHz je v praktičnih poskusih pokazala, da je vsekakor vreden, če ne že zelo izboljššan naslednik WBFM postaje za packet-radio. Postaja je načrtovana s sodobnimi gradniki, da je enostavna za gradnjo, omogoča povsem spodoben dostop do interneta in ima radijski domet, o katerem profesionalne WLAN (WiFi) škatlice niti sanjati ne morejo.

Končno imamo pravo radijsko postajo, ki prenaša uporabne količine podatkov v zahtevnih razmerah, v vsakem primeru velik korak naprej od "profesionalnih" radijskih zvez vrste "bolje-te-vidim-nego-te-čujem". Radio imamo navsezadnje zato, da pridemo z njim tja, kamor druge vrste zvez ne morejo!

Poraba opisane BPSK postaje znaša okoli 250mA na sprejemu in do 900mA na oddaji pri enosmernem napajanju med 12V in 14V. Poraba oddajnika je seveda odvisna od toleranc vgrajenih delov in točnega uglaševanja. S trimerjem 220Ω lahko izbiramo med nižjo močjo in čistejšim spektrom ter na drugi strani višjo močjo in širšim spektrom. Razlike so v praksi majhne in smiselna nastavitvev drsnika je na sredini! Trimer 220Ω v resnici potrebujemo le pri uglaševanju oziroma preverjanju delovanja postaje, ko lahko pri znižani moči natančneje poiščemo resonance nihajnih krogov.

250mA na sprejemu je še vedno preveč za vozlišče, ki se napaja s fotovoltaičnimi paneli. Več kot 10mA zagotovo prihranimo, če se odrečemo svetlečim diodam na prednji plošči! Še višje prihranke bi prinesli stikalni napajalniki, saj je preko 100mA porabe na +3.3V (ena Altera dela z visokim taktom, druga Altera pa ima 18 vhodov v analognem režimu) in kar nekaj porabnikov na +8V (frekvenčni sintetizator) ali manj (vhodni del sprejemnika).

Žal predelava ni preprosta: motnje stikalnih napajalnikov zelo rade zaidejo v ničelno medfrekvenco preko magnetnih sklopov. Nizkofrekvenčno magnetno oklapljanje niti zdaleč ni preprosto. Končno sta v medfrekvenci dva zastarela in požrešna NE592, ki čakata na sodobnejšo zamenjavo. Razvoja torej še ni konec!

S stikalnimi napajalniki bomo zagotovo še imeli opraviti. Prvo inačico radijske postaje sem namenoma napravil brez njih, da je postaja preprostejša za gradnjo in predvsem bolj zanesljiva. Tudi oklapljanje frekvenčnega sintetizatorja je mogoče predimenzionirano, saj postaja običajno deluje brezhibno tudi brez bakrenih pokrovčkov.

Z opisanimi pokrovčki in ohišjem je postaja delovala vedno v vseh razmerah, s paličasto anteno neposredno na postaji brez kabla, z antenami poljubne impedance, z antenskimi kabli poljubnih dolžin in z najrazličnejšimi pasovnimi siti z votlinskimi resonatorji v antenskem vodu. To je tudi tisto, kar v resnici v praksi najbolj potrebujemo na vrhu hriba. Norišnico s premalo oklopljenimi WBFM postajami imam globoko v spominu!

8. Literatura:

[1] Matjaž Vidmar: "13cm PSK radijska postaja za hitri packet-radio", CQ ZRS 4/1995, strani 18-31.

[2] Matjaž Vidmar: "Popravki, predelave in preizkus 13cm PSK radijske postaje", CQ ZRS 5/1995, strani 22-23.

[3] Matjaž Vidmar: "Uporabniška 23cm PSK radijska postaja za 1.2Mbit/s", CQ ZRS 2/1996, strani 23-37.

[4] Matjaž Vidmar: "Blišč in beda protokola AX.25", CQ ZRS 6/1997, strani 22-31.

[5] Matjaž Vidmar: "PSK radijska postaja za 13cm z ničelno medfrekvenco", CQ ZRS 6/1998, strani 27-31.

[6] Matjaž Vidmar: "Megabitni TNC za packet-radio", CQ ZRS 4/2000, strani 29-35.

[7] Matjaž Vidmar: "Dodatki in izboljšave megabitnega TNCja", CQ ZRS 5/2000, strani 28-33.

[8] Jani Kovač (urednik), Štefan Barbarič, Draskovits Gabor, Jože Herman, Tomi Kacin, Marko Kovačevič, Mijo Kovačevič, Primož Lemut, Franci Mermal, Sine Mermal, Iztok Saje, Darko Volk: Projekt "Digitalni mostovi - hitri packet-radio", financiran s strani Evropske Unije, Program PHARE, 338 strani.

[9] Matjaž Vidmar: "Predelave SuperVozlja in popravki TNCja", CQ ZRS 6/2000, strani 32-34.

[10] Matjaž Vidmar: "Amaterski packet-radio in internet", CQ ZRS 2/2001, strani 22-29.

[11] Matjaž Vidmar: "Izboljšani PSK demodulator za 1.2Mbit/s PSK RTX", CQ ZRS 5/2001, strani 29-33.

[12] Matjaž Vidmar: "Ne-Brezhibni protokol", Elektronik.si #10, strani 3-31.

[13] Matjaž Vidmar: "Ne-Brezhibni protokol", CQ ZRS 3-4/2010, strani 16-29.

[14] Matjaž Vidmar: "Programska oprema ATNC/EATNC inačica h91/e45 (01.11.2010)", Elektronik.si #11, strani 3-37.

[15] Matjaž Vidmar: "ATNC za Ne-Brezhibni protokol", Elektronik.si #12, strani 3-30.

[16] Matjaž Vidmar: "ATNC za Ne-Brezhibni protokol", CQ ZRS 1-2/2011, strani 25-36.

[17] Matjaž Vidmar: "EATNC za Ne-Brezhibni protokol", Elektronik.si #13, strani 3-29.

[18] Darko Volk: "EATNC na eni sami ploščici", Elektronik.si #13, strani 30-41.

* * * * *