

Dvostopenjski predojacevalec za L podrocje

=====

Matjaz Vidmar, S53MV

1. Uvod

Pred komaj nekaj leti so bili vsi mikrovalovni sestavni deli, se posebno GaAs tranzistorji, potrebni za nizkosumne predojacevalce, izredno dragi in amaterjem težko dostopni. Obicajni postopek nacrtovanja nizkosumnega predojacevalca je zato vkljuceval izbiro aktivnih sestavnih delov na osnovi njihove cene in razpolozljivosti namesto upostevanja elektricnih lastnosti, temu pa je sledilo nacrtovanje vezja v mikrotrakasti (mikrostrip) tehniki na osnovi obseznega racunanja. Na zalost so bili tako izdelani ojaevalniki le redkokdaj temeljito preizkuseni, tezave s ponovljivostjo in samooscilacijami vezja so bile kar obicajne. Predvsem pa je bilo premalo eksperimentiranja z izdelanim vezjem oziroma z uporabo drugih tehnik izdelave namesto mikrotrakastih vezij.

Na sreco se cena GaAs FETov stalno niza in postajajo lazje dosegljivi, saj se uporabljajo v širokopotrosnih izdelkih, na primer sprejemnikih za satelitsko televizijo. Radioamaterji lahko danes pridemo do teh nekoc dragocenih sestavnih delov celo zastonj, ce razdremo star, neuporaben ali pokvarjen konverter za satelitsko televizijo. Tudi ce moramo GaAs FETe kupiti nove, je njihova cena danes zadosti nizka, da se nam pri spajkanju vec ne trese roka in pri eksperimentirnjju mirne duse kaksnega tudi unicimo. Skratka, radioamaterji smo se koncno naucili delati s temi novimi sestavnimi deli.

Vecina razpolozljivih GaAs FETov je bila nacrtovana za delovanje na 11GHz v konverterju za satelitsko televizijo. V frekvencnem podrocju 11GHz je edini smiselni nacin gradnje ponovljivih vezij uporaba mikrotrakaste tehnike. Pomembna omejitev mikrotrakastega vezja na mehkem teflonskem laminatu z dielektricno konstanto nekje med 2 in 3 je v tem, da ne moremo izjedkati vodov s karakteristikno impedanco zelo razlicno od 50 ohmov: vodi bi bili bodisi preozke ali pa prevec široki. Zato so vsi razpolozljivi GaAs FETi nacrtovani za delovanje v 50-ohmskem okolju v frekvencnem podrocju med 10 in 15GHz, seveda z upostevanjem parazitnih kapacitivnosti in induktivnosti samega GaAs FET chipa in ohisja, v katero je vgrajen.

Isti GaAs tranzistorji bojo delovali pri znatno visjih impedancah na nizjih frekvencah, ce le zelimo izkoristiti vecje ojacenje in izboljsano sumno stevilo. Visje impedance je tezko prilagoditi z obicajnim mikrostrip vezjem (izredno ozki trakci na tiskanem vezju), ker taka vezja vnasajo velike izgube, ki kazijo ojacenje, predvsem pa sumno stevilo. Razen tega imamo na nizjih frekvencah tezave s samoosciliranjem

GaAs FET ojačevalnikov. Končno je tu se nekaj praktičnih težav: na nižjih frekvencah imamo cesto opraviti z izredno močnimi nezazelenimi signali.

V tem članku bom zato opisal zelo uspešno konstrukcijo dvostopenjskega GaAs FET ojačevalnika za L področje (1000MHz - 1700MHz). Dve stopnji zagotavljata zadosti veliko ojačenje, da je prispevek suma slednjih stopenj sprejemnika zanemarljiv, hkrati pa močni signali se ne bojo prekrmilili sprejemnika. Predojacevalec sem v začetku načrtoval za GPS sprejemnik (1575.42MHz), se je pa odlično izkazal, brez kakršnihkoli sprememb v vezju, tudi za sprejem vremenskih satelitov v 1.7GHz področju (Meteosat, NOAA HRPT). Z malenkostno predelavo, spremembo ene same tuljave, se da predojacevalnik tudi optimizirati za 1.3GHz (23cm) ali 2.3GHz (13cm) radioamaterska mikrovalovna frekvenca področja.

2. Načrtovanje nizkosumnega predojacevalca za L področje

Danasnja tehnologija nam nudi v glavnem dve različni vrsti polprevodnikov za gradnjo nizkosumnih ojačevalcev za L področje: poljske tranzistorje (FET) iz galijevega arzenida in bipolarne tranzistorje iz silicija. Bipolarne tranzistorje dobimo v obliki običajnih tranzistorjev (BFRxx in podobni), bodisi v obliki enostavnih integriranih vezij z enim ali dvema tranzistorjema in vgrajenimi upori za polarizacijo in povratno vezavo (Monolithic Microwave Integrated Circuit ali MMIC).

GaAs tranzistorji omogočajo sumno stevilo pod 1dB v L področju in hkrati preko 15dB ojačenja z eno samo stopnjo, težave pa so s stabilnostjo (samooscilacije) taksnih ojačevalnikov. Silicijevi bipolarni tranzistorji sicer omogočajo stabilno delovanje ojačevalnika, zal ob sumnem stevilu 2dB ali več in ojačenju manjšem od 10dB po stopnji.

Nizkosumni ojačevalniki za L področje in bližnje frekvence so zato običajno dvostopenjski: v prvi stopnji uporabljajo GaAs FET za cimboljše sumno stevilo, v drugi stopnji pa silicijev bipolarni tranzistor ali MMIC za stabilno delovanje. Sumno stevilo taksnega ojačevalnika je omejeno s sumom druge stopnje in z izgubami v mikrotrakstem vezju, se posebno prilagoditvi visoke vhodne impedance GaAs tranzistorja. Razen tega se ojačenje bipolarnega tranzistorja v drugi stopnji, okoli 10dB na 1GHz, zelo hitro veka na nižjih frekvencah in lahko preseže 40dB pod 30MHz, zato takšen ojačevalnik zlahka prekrmilijo nezazeleni signali dalec proč od delovne frekvence! MMIC vezja so v tem pogledu nekoliko boljša, zato pa nudijo se slabše sumno stevilo in včasih samooscilirajo na čudne načine, ceprav jih proizvajalci običajno garantirajo kot absolutno stabilne.

Opisani nizkosumni ojačevalnik je bil zato načrtovan z upoštevanjem naslednjih zahtev:

- (A) Uporabiti GaAs FET polprevodnike v obeh stopnjah. Ti dajejo zadosti ojačenja, da je sum tretje stopnje (sprejemnika) nepomemben.
- (B) Najti tehniko izdelave ojačevalnika, ki bo omogočala manjše izgube od mikrotrakstega vezja na dragem teflonskem laminatu.
- (C) Najti vezje, ki bo omogočalo stabilno delovanje ojačevalnika pri vseh možnih kombinacijah impedanc

izvora (antene) in bremena (sprejemnika).

Pri iskanju odgovora na zadnji dve zahtevi si je treba najprej ogledati električne lastnosti GaAs FETov v frekvenčnem področju med 1GHz in 2GHz. V tem frekvenčnem področju se parazitne lastnosti tranzistorskega čipa in ohišja obnašajo kot parazitne kapacitivnosti. Dolžina kanala (vrat) vseh sodobnih GaAs FETov za mikrovalove je tako majhna (0.5 mikrometra ali manj), da v tem frekvenčnem področju se ne vpliva na visokofrekvenčne lastnosti tranzistorja. Vhodna impedanca (vrata) in izhodna impedanca (ponor) sta razmeroma visoki: pri vzporednem nadomestnem vezju znasa realni del okoli 500ohm, imaginarni del pa je vedno kapacitiven v tem frekvenčnem področju.

Prilagoditev vhodne in izhodne impedance GaAs FETA na standardizirano vrednost 50ohm se da v L področju doseči zelo enostavno z zaporednimi tuljavami, drugi sestavni deli običajno niso potrebni. Ker je nizkosumni predojacevalec vezje male moci, lahko tuljave izdelamo kot običajne koncentrirane sestavne dele v frekvenčnem področju med 1GHz in 2GHz. V praksi so to male samonoseče tuljavice, ki imajo od 1 do 3 ovoje na notranjem premeru okoli 3mm. Če tuljavice izdelamo iz posrebrne bakrene zice, bojo izgube v vezju za eden do dva velikostna razreda (10- do 100-krat) manjše kot pri ustreznem mikrotrakastem vezju na dragem teflonskem laminatu.

Razen sestavnih delov, GaAs FETov in tuljav, je treba seveda upoštevati tudi tehniko izdelave ojacevalca, ki vnasa svoje lastne parazitne kapacitivnosti in induktivnosti. Če gradimo visoko-impedancno vezje na tiskani ploščici (mikrotrakasto vezje), bojo parazitni vplivi v glavnem nezazelnjene kapacitivnosti proti masi. Za zmanjšanje teh parazitnih vplivov je treba prilagoditi karakteristično impedanco vodov (za dano tehniko izdelave) velikostnemu razredu impedanc v vezju. Za opisani ojacevalnik so primerni vodi v obliki zice okroglega prereza nad ravno kovinsko ploščo (maso). Taksni vodi imajo karakteristično impedanco med 150 in 200ohm za smiselne dimenzije vodnikov in razdalje do kovinske plošče. Preprosto povedano, teorija pravi, da je sestavne dele taksnega ojacevalnika najbolj smiselno vgraditi v kovinsko skatlico, nad kovinskim dnom (masa), dielektrik pa je enostavno zrak.

Ker so parazitni vplivi v glavnem kapacitivnosti, bo ojacevalna stopnja z GaAs FETom samooscilirala v L področju ali na nižjih frekvencah samo takrat, če sta vhod in izhod zaključena z induktivnimi bremenami z zadostno velikimi Q-ji. V enostopenjskem ojacevalniku je zato treba vgraditi tudi izgube v vhodno ali izhodno vezje za prilagoditev impedance, da zagotovimo stabilno delovanje ojacevalnika pri vseh možnih kombinacijah impedanc izvora in bremena.

V dvostopenjskem ojacevalniku z GaAs tranzistorji se da zagotoviti stabilnost ojacevalnika s primerno nacrtovanim vezjem za prilagoditev impedance med obema stopnjama. Bolj točno povedano, prilagodilno vezje med stopnjama naj ne vsebuje nobenih tuljav ali dusilk proti masi oziroma napajanju, saj lahko le te predstavljajo induktivnost z visokim Q (visoko kvaliteto) na neki frekvenci, pogosto dalec

proc od delovne frekvence ojačevalnika.

Dokončni nacrt dvostopenjskega nizkosumnega ojačevalnika za L področje je prikazan na Sliki 1. Za prilagoditev vhodne impedanče prve stopnje poskrbi tuljava L2, medtem ko je L1 samo četrtvalovna visokofrekvenčna dusilka. Prilagoditev med stopnjama je PI vezje, ki vključuje tuljavi L3 in L4 ter parazitna kapacitivnosti polprevodnikov. Končno, za prilagoditev izhodne impedanče druge stopnje poskrbi L5. L6 je spet četrtvalovna dusilka za napajanje ojačevalnika po izhodnem koaksialnem kablu.

Polarizacijske prednapetosti na vratih obeh GaAs FETov dobimo preko uporov v izvorihi FETov. Izvori FETov so sicer blokirani za visokofrekvenčne signale s kondenzatorji proti masi. Ohišje GaAs FETov ima po dva izvoda za izvor, vsak izvod pa gre na svoj blokirni kondenzator, ki hkrati tudi mehansko nosi celotno vezje, saj je dielektrik zrak!

Enosmerno napetost pripeljemo na ponore FETov preko uporov: uporabi dusilk se je tu pametno izogniti zaradi nevarnosti samooscilacij. Tudi vrata tranzistorja v drugi stopnji so ozemljena preko upora (namesto običajne dusilke) za boljšo stabilnost ojačevalnika. Da omejimo visokofrekvenčne izgube v teh uporih, potrebujemo neobčajno visoko napajalno napetost za ojačevalnik z GaAs tranzistorji, okoli 12V, ki omogoča visje vrednosti uporov. Napajalna napetost obeh GaAs FETov je sicer v vsakem slučaju omejena na manj kot 6V pri normalnem delovanju ojačevalnika. Dodatno zascito pred napetostnimi konicami napajalnika predstavlja tudi tantalov elektrolitski kondenzator 22uF.

3. Izdelava in uglasevanje ojačevalnika

Opisani dvostopenjski predojačevalnik je najbolj smotrno vgraditi v majhno skatlico iz medeninaste pločevine debeline 0.3 do 0.5mm (glej Sliko 2.). Skatlica naj bo dolga 50mm, široka 20mm in visoka 15mm, razen pokrova pa jo izdelamo iz enega kosa pločevine, ki ga zvijemo v zazeljeno obliko in potem robove spajkamo skupaj. Taksna skatlica je zadosti majhna, da nima lastnih rezonanc pod 7GHz in običajno ne potrebuje kosa mikrovalovnega absorberja, da bi z njim prepričali samooscilacije ojačevalnika zaradi električnih rezonanc skatle.

Vhodna in izhodna BNC konektorja (UG1094 brez matic in podložk) naj bi bila prispajkana na skatlico, kot je to prikazano na Sliki 2. Ker je 1.5GHz že precej visoka frekvenca, je treba izbrati res kvalitetne BNC konektorje s teflonsko izolacijo. Skupaj s ceneno računalniško tehniko so se pojavile na trziscu tudi zelo slabe kopije BNC konektorjev, ki jih spoznamo po zanikrno izdelanem srednjem kontaktu, izolator pa seveda ni teflon, pač pa cenena siva plastika, ki se pri spajkanji topi. Visokofrekvenčne lastnosti taksnih konektorjev so seveda izredno slabe (velike izgube) in niso uporabni nad 10MHz. Seveda lahko uporabimo tudi boljše vrste konektorjev od BNC, na primer N ali SMA.

Naslednji korak je vgradnja šestih 470pF keramičnih blok kondenzatorjev, ki mehansko nosijo vezje ojačevalnika. Ti kondenzatorji morajo biti keramični diski ali trapezi brez dovodnih zic, njihova nazivna vrednost pa je lahko tudi večja

od 470pF. Pri spajkanju teh kondenzatorjev se najprej pocini medeninasta plocevina, potem pa je treba dodati zadosti cina, da kontakt na kondenzatorju cin dobro omoci in da krhko telo kondenzatorja iz keramike ne poci ob zvijanju plocevine.

POZOR! V ojaevalniku ne smemo uporabljati vecslojnih chip kondenzatorjev za SMD vezja. Ti kondenzatorji so sicer zelo majhni in na zunaj izgledajo primerni za mikrovalovna vezja, v resnici pa so njihove visokofrekvencne lastnosti zelo slabe. SMD in ostali vecslojni keramichni kondenzatorji imajo zelo velike parazitne induktivnosti in upornosti elektrod, zato se jim v visokofrekvencnih vezjih rajsji izogibajmo. Na mikrovalovih se v vecslojnih kondenzatorjih pojavijo rezonance ze pri nizkih frekvencah (1nF kondenzator ima obicajno rezonanco okoli 1GHz), na visjih frekvencah pa imajo zelo velike izgube.

Vgradnji kondenzatorjev sledi vgradnja uporov. Vsi upori so miniaturni 1/8W upori z zicnatimi izvodi (ne SMD). Uporov, oznacenih z zvezdico ("*"), zaenkrat se ne vgradimo: njihovo točno vrednost poiscemo kasneje, pri uglasevanju. Cetrtvalovni dusilki L1 in L6 sta izdelani iz 6cm dolgega kosa lakirane bakrene zice premera 0.15mm. Konce zice najprej pocinimo, okoli 5mm na vsaki strani, potem pa zico navijemo na podstavek premera okoli 1mm (svedrcek za tiskana vezja). Tocno stevilo ovojev pri tem ni vazno, podstavek za navijanje pa seveda izvlecemo, saj so vse tuljave samonosece.

L2 je izdelana iz 0.6mm debele posrebrene bakrene zice. V praksi uporabimo eno od sedmih zic, ki sestavljajo srednji vodnik kabla RG-214. L2 ima en ovoj z notranjim premerom okoli 3.5mm za frekvencno podrocje od 1.5GHz do 1.7GHz. L3 in L4 so enostavno dovodne zice 1nF kondenzatorja. Enako je izdelana tudi L5. Razmak koncev ovoja L2 in razdaljo med L3 in L4 dolocimo kasneje, pri uglasevanju.

Nazadnje vgradimo oba GaAs FETa. Uglasevanje ojaevalnika zacnemo z nastavitvijo delovnih tock obeh tranzistorjev. Ojaevalnik prikljucimo na napajalnik z nastavljivo izhodno napetostjo, ki jo vnaprej nastavimo na okoli 7V. Napajalno napetost ojaevalnika pocasi visamo ter hkrati dodajamo vzporedne upore v vezju izvorov obeh tranzistorjev tako, da drzimo padec napetosti na obeh tranzistorjih (med izvorom in ponorom) okoli 3V do 4V. Upore seveda pricinimo le ob izkljucenem ojaevalniku! Ko nastavimo vrednosti teh uporov, bo na njih padec napetosti oziroma potencial izvorov proti masi obicajno med 1V in 1.5V. Da preprecimo kakrsnekoli samooscilacije med nastavljanjem delovne tocke, je priporocljivo zakljuciti oba vhod in izhod ojaevalnika na 50-ohmska bremena.

Nastavitvi enosmerne delovne tocke sledi visokofrekvencni preizkus in uglasevanje. V ta namen prikljucimo na vhod ojaevalnika sumni generator, na izhod ojaevalnika pa sprejemnik z občutljivim S-metrom oziroma merilnik sumnega stevila. Najprej nastavimo L3 in L4 na največje ojačenje. Grobo nastavitvev poiscemo s spreminjanjem dolzime obeh dovodnih zic kondenzatorja 1nF, obicajno nekje med 5mm in 10mm, fino nastavitvev pa s spreminjanjem razdalje med zicama. Tudi L5 vpliva na ojačenje, ceprav znatno manj od L3 in L4. Končno poskusimo spremeniti se razmak med konci ovoja L2, le da tu ne opazujemo ojačenja pac pa iscemo cimboljše sumno

stevilo.

Ce uporabljamo starejse GaAs FETe z nizjim ojačenjem (stari CFY... itd) in zelimo vec ojačenja, lahko razen L3 in L4 spremenimo tudi izhodno vezje tako, da povečamo enosmerni tok skozi drugo stopnjo. V tem slucaju izlocimo 470ohm upor in vgradimo 330ohm upor vzporedno s kondenzatorjem inF na izhodu, kot je to crtkano narisano na Sliki 1.

V obratnem slucaju, ce uporabimo novejse GaAs FETe z vecjim ojačenjem ali HEMT (High Electron Mobility Transistor) v prvi stopnji, ojačevalnik lahko samooscilira takrat, ko skatlico zapremo s kovinskim pokrovom. Vzrok je elektricna rezonanca skatlice, ki jo zadusimo s kosckom mikrovalovnega absorberja. V skatlico vgradimo koscek crne "antistaticne" penaste plastike (ki se uporablja za pakiranje občutljivih polprevodnikov) in to po možnosti cimbolj dalec proc od L2, da ne skazimo sumnega stevila.

4. Dosezeni rezultati

Do danes je bilo zgrajeno ze vecje stevilo opisanih predojačevalcev, z uporabo najrazlicnejših GaAs FETov in HEMTov razlicnih proizvajalcev. Ojačevalci dosežejo med 20dB in 35dB ojačenja v zelo širokem frekvenčnem podrocju od nekaj sto MHz pa vse do 3GHz. Razlike v ojačenju je treba predvsem pripisati razlicnim vrstam uporabljenih FETov. Seveda je uporabno frekvenčno podrocje ojačevalnika, kjer doseže najboljše sumno stevilo, bolj ozko: ojačevalnik ne zahteva nobene predelave (uglasevanja tuljav) za delovanje v celotnem 1.5GHz do 1.7GHz podrocju. Za delovanje na 23cm ali pa 13cm amaterskih podrocjih je treba zamenjati edino L2: na 23cm naj ima 2 ovoja, na 13cm pa bo kar na "U" zavita zica.

Z uporabo MGF1302, CFY18 in drugih GaAs FETov v keramickem mikrovalovnem ohisju v prvi stopnji ojačevalnika se je dalo vedno doseči sumno stevilo okoli 0.5dB ali boljše. Edino GaAs FETi v plasticnem ohisju se niso izkazali: dajo slabše sumno stevilo in predvsem dosti manjše ojačenje. Ker je danes cena pravih mikrovalovnih GaAs FETov ze zelo nizka (na sejmu v Friedrichshafnu so letos prodajali na vec mestih MGF1302 po 10DEM/kos v majhnih kolicinah), se cenenih plasticnih FETov verjetno ne splaca uporabljati, saj stanejo vec konektorji in ostali sestavni deli!

Nobeden od zgrajenih prototipov ni nikoli samoosciliral, ko je bil vhod prikljucen na kakrsnokoli anteno. Ojačevalnik ni samoosciliral niti z ozkopasovnimi antenami, kot sta stirizicni heliks za GPS sprejemnik ali pa valovodni zarilec za parabolicno zrcalo. Ojačevalnik vcasih samooscilira edino brez kakrsnekoli zakljucitve vhodnih sponk, vendar je temu prej vzrok rezonanca skatle ojačevalnika.

Koncno, zahvaljujoc se uporabi GaAs FETov v vseh stopnjah je opisani ojačevalnik kjub svoji širokopasovni zasnovi dokaj neobčutljiv za mocne signale dalec proc od zeljene frekvence. Razlaga za to je v tem, da ojačenje GaAs FETov ne narasca s padanjem frekvence, vsaj ne tako hitro, kot se to zgodi pri bipolarnih silicijevih tranzistorjih. Prakticni poskusi so pokazali, da tudi ob uporabi neusmerjene sprejemne antene (GPS ali GLONASS) predojačevalnika ne motijo bliznji oddajniki na 2m in 70cm na samo nekaj metrih razdalje.

Prakticno to pomeni, da v vecini slucajev predojacevalnik ne potrebuje dodatne selektivnosti in je širokopasovna zasnova povsem v redu.

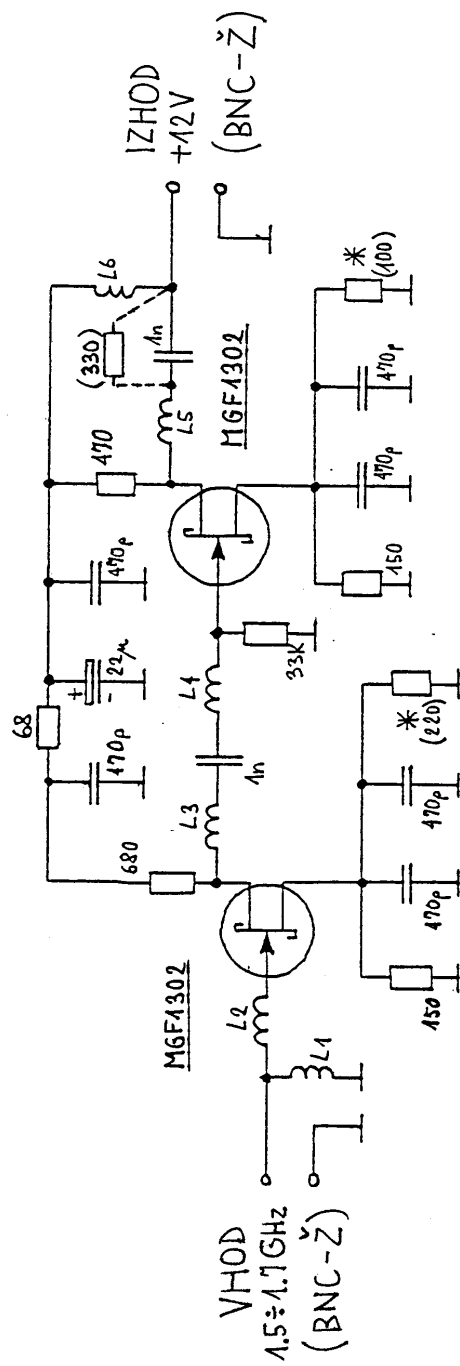
Podrocje 1.5GHz do 1.7GHz sicer ne vsebuje nobenega radioamaterskega podrocja, vendar je za nas radioamaterje vseeno zanimivo: v tem podrocju oddaja kar nekaj razlicnih satelitskih sistemov, ki se jih da sprejemati oziroma uporabljati s skromnimi sredstvi in majhnimi antenami.

V podrocju 1535MHz do 1542MHz oddajajo sateliti za komunikacije z ladjami: tu lahko poslusamo telefonske pogovore. Iz nasih krajev so na nebu vidni trije taksni geostacionarni sateliti (Inmarsat) na 55W, 15W in 64.5E. Za sprejem zadosca kot antena ze kratek heliks dolzine okoli pol metra, seveda z opisanim predojacevalcem.

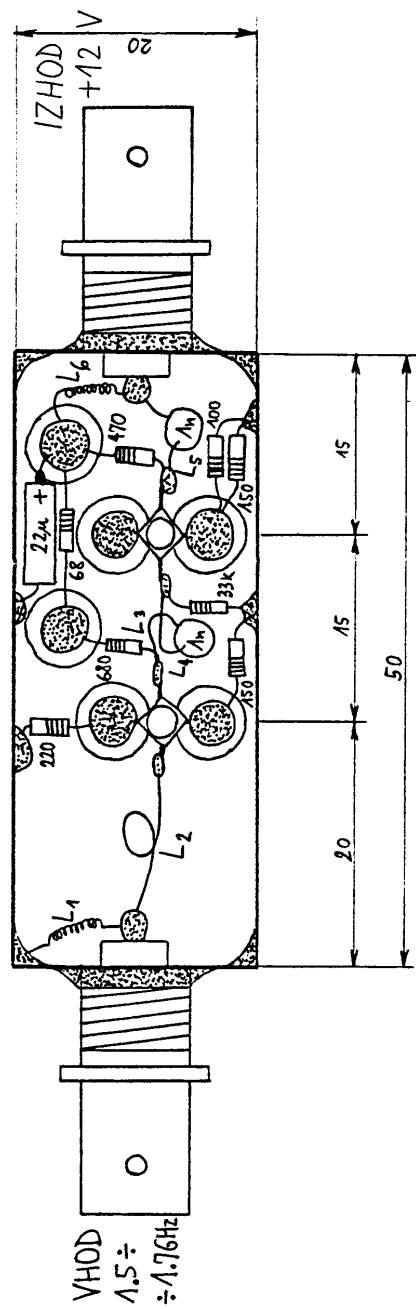
Na 1575.42MHz oddajajo ameriski navigacijski sateliti GPS, ki omogocajo zelo točno dolocanje položaja uporabniskega sprejemnika (okoli 30m v vseh smereh). Podoben ruski sistem GLONASS dela v frekvenčnem podrocju 1602MHz do 1615.5MHz. Trenutno je ze aktivnih 19 GPS satelitov in 13 GLONASS satelitov, vsak sistem zase pa naj bi jih vseboval 24. Za sprejem zadosca ze majcena neusmerjena antena, stirizicni helix, visine komaj 6cm!

V podrocju 1680MHz do 1710MHz oddajajo vremenski sateliti in tudi vremenski baloni. Vecino radioamaterjev najbolj zanimajo geostacionarni sateliti vrste METEOSAT, ki oddajajo na 1691MHz in 1694.5MHz. Iz nasih krajev sta vidna dva aktivna satelita vrste METEOSAT na 0W in na 50W, z opisanim predojacevalcem pa za sprejem slik zadosca ze okoli 1m dolga yagi antena. Razen tega ima opisani predojacevalec zadosti veliko ojacenje, da konverterja ni treba montirati zunaj, saj lahko za predojacevalcem vstavimo do priblizno 20m kvalitetnega TV koaksialnega kabla. Za sprejem drugih vremenskih satelitov potrebujemo vecjo anteno (parabolicno zrcalo) in bolj kompliciran sprejemnik.

Nazadnje je frekvenčno podrocje okoli 1.5GHz zanimivo tudi za fizikalne poskuse: frekvenca je zadosti visoka, da lahko poiscemo prost kanal in zadosti nizka, da z majhno anteno sprejemamo sum Sonca. Seveda lahko z isitimi pripomocki preverimo tudi razliko med termicnim sumom Zemlje in neba, v vsakem slucaju pa potrebujemo opisani nizkosumni ojacevalnik.



Slika 1. - Nacrt nizkosumnega ojačevalnika za L področje.



Slika 2. - Prakticna izvedba nizkosumnega ojaevalnika.

