

# Delovanje, uporaba in izbira VF spektralnega analizatorja

Matjaž Vidmar - S53MV

## 1. Vrste spektralnih analizatorjev

Spektralni analizator je beseda, ki lahko pomeni mnogo različnih stvari. Steklena prizma je naprimer osnovni del spektralnega analizatorja za vidno svetlobo, saj žarek bele sončne svetlobe razkloni v mavrico, lepo urejeno po valovnih dolžinah oziroma frekvencah elektromagnetnega valovanja svetlobe. Tudi človeško uho je razmeroma zmogljiv spektralni analizator, seveda omejen na določen frekvenčni pas zvočnega valovanja.

Med vsemi različnimi spektralnimi analizatorji so danes najbolj zmogljivi merilniki za radijsko in mikrovalovno področje frekvenc. Radijski oziroma mikrovalovni spektralni analizatorji pokrijejo širok frekvenčni pas (veliko razmerje med najnižjo in najvišjo merjeno frekvenco), obvladajo veliko dinamiko jakosti vhodnih signalov (razmerje med najšibkejšim in najmočnejšim merjenim signalom preko 120dB) in hkrati zmorejo razločiti signale, ki so frekvenčno zelo blizu.

Predhodniki radijskih oziroma mikrovalovnih spektralnih analizatorjev so bili takoimenovani panoramski

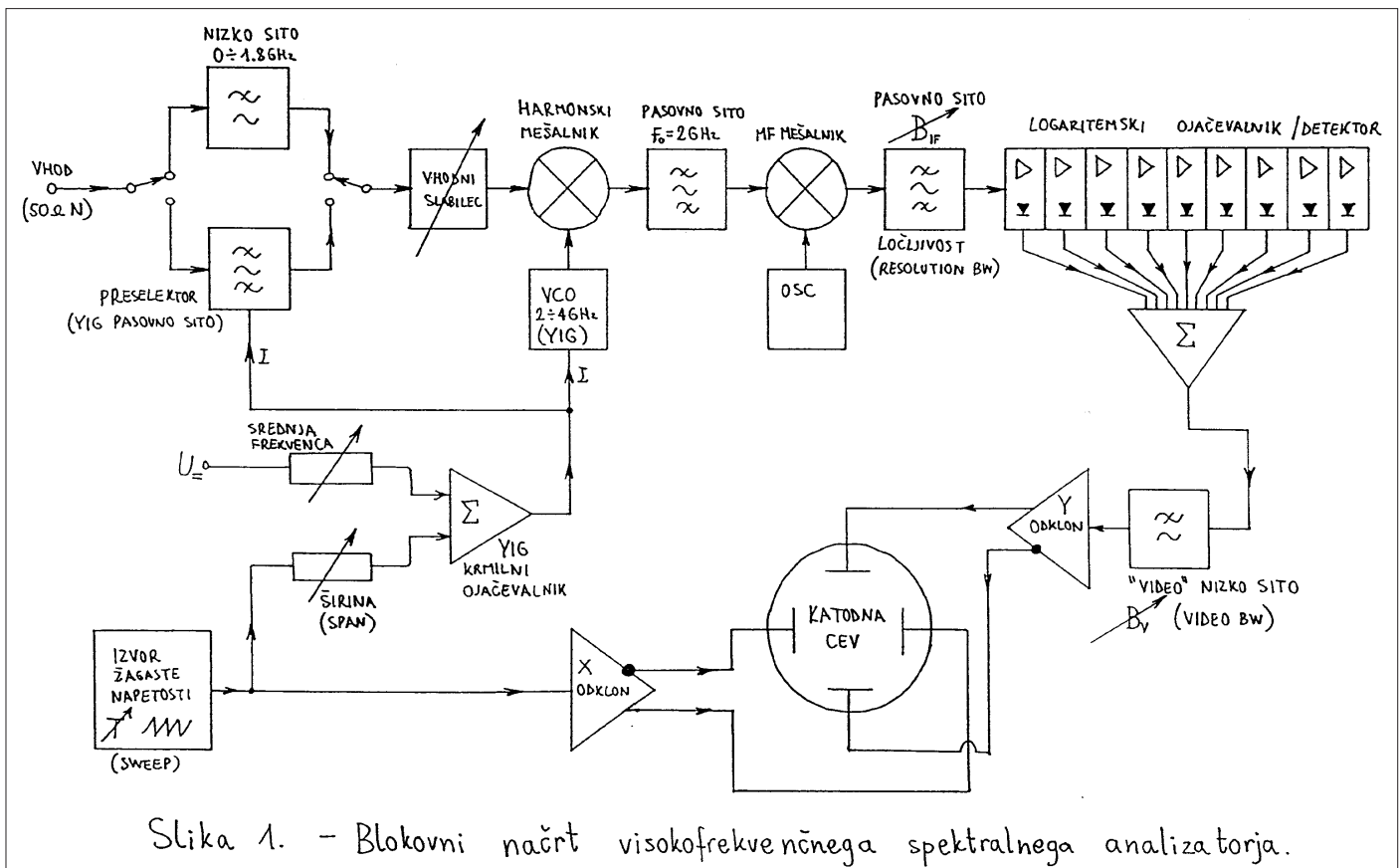
sprejemniki. Panoramski sprejemniki ne sprejemajo ene same frekvence, pač pa stalno preletavajo določen frekvenčni pas in rezultat izpišejo na zaslonu katodne cevi: na vodoravni osi frekvenco ter na pokončni osi jakost signala. V začetku so se v glavnem uporabljali samo v vojaške namene: iskanje sovražnikovih oddajnikov. Električne lastnosti panoramskih sprejemnikov so bile za današnja merila zelo slabe: frekvenčni pas je bil zelo omejen (razmerje manj kot 1:2 med spodnjo in gornjo frekvenco), dinamika merjenja jakosti signalov je redko presegla 50dB in frekvenčna ločljivost je bila slaba (eno samo sito v medfrekvenci).

Znaten korak naprej je bil narejen pred približno tremi desetletji. Razvoj polprevodniških sestavnih delov je omogočil povsem nova vezja. Hkrati so se z naraščanjem števila radijskih postaj postavile dosti strožje zahteve za kvaliteto oddajnikov in sprejemnikov, da bi se preprečile medsebojne motnje. Nov, zmogljiv merilni inštrument za opazovanje visokofrekvenčnih signalov so potrebovali ne samo vojaki, pač pa tudi širne

množice civilnih uporabnikov radijskih postaj.

Tovarna Hewlett-Packard je prišla med prvimi na tržišče z napravo, ki je ponujala dosti več od običajnih panoramskih sprejemnikov: pokrivanje skoraj celotnega frekvenčnega pasu od zvočnih frekvenc do gigahercov, več kot 70dB dinamike in širok nabor različnih sit v medfrekvenci. Novi merilnik je izdelovalec krstil za spektralni analizator (po angleško "spectrum analyzer"). V praksi se je naprava odlično obnesla predvsem zaradi svoje raznolike uporabnosti kljub ne ravno nizki ceni. Tudi ime spektralni analizator se je ustalilo in z leti postalo pojem visokofrekvenčnih meritev.

Danes dobimo na tržišču nove in rabljene opreme celo vrsto različnih VF spektralnih analizatorjev, od vrhunske merilne tehnike pa vse do takšnih, ki si ne zaslužijo naziva "merilni inštrument". Možna je tudi samogradnja spektralnega analizatorja. Kljub temu predstavlja VF spektralni analizator skoraj "tabu temo" za večino radioamaterjev, verjetno zaradi visoke cene novih



merilnikov. Kar je še slabše, večina radioamaterjev sploh ne zna uporabljati teh merilnikov in si niti ne predstavlja, kako z njim rešiti nekatere probleme.

Seveda moram takoj pojasniti, da VF spektralni analizator ponavadi ni nujno potreben. Večino stvari lahko izmerimo tudi z enostavnejšo merilno tehniko. Bistvena razlika pa je v času meritve: s primernim merilnikom dobimo rezultat v trenutku, z nepriemernim pa se namučimo ure in ure oziroma napako opazimo šele takrat, ko je že prepozno in nam je medtem požrla veliko dragocenega časa.

VF spektralni analizator torej pomeni radioamaterju konstruktorju predvsem bistven prihranek časa. Čas pa je danes še kako pomemben, če samo pomislimo na to, koliko nedokončanih naprav čaka na podstrešju vsakega radioamaterja konstruktorja. Namen tega članka je torej tudi spremeniti miselnost radioamaterjev: primerno vsoto sredstev je nujno investirati v merilno tehniko in nekaj časa je treba posvetiti temu, da se jo naučimo uporabljati, sicer bojo rezultati našega dela slabi, kljub najboljšim radijskim postajam in drugi opremljeni.

## 2. Delovanje VF spektralnega analizatorja

Visokofrekvenčni spektralni analizator lahko izvedemo na različne načine. Najbolj pogosta izvedba spektralnega analizatorja je sprejemnik z mešanjem, kjer lokalni oscilator stalno preletava željeni frekvenčni pas. Za nižje frekvence (danes nekje do 100MHz) se da izdelati tudi FFT spektralni analizator: vhodni signal prevedemo v številsko obliko z A/D pretvornikom in pretvorbo iz časovnega v frekvenčni prostor opravi računalnik. Za mikrovalovne frekvence je pred leti veliko obetal akustooptični spektralni analizator, ki pa ni nikoli dosegel uporabnih rezultatov kar se tiče občutljivosti, ločljivosti in dinamike.

Blokovni načrt običajnega VF spektralnega analizatorja je prikazan na sliki 1. Merilni sprejemnik vsebuje več mešanj, prva medfrekvenca pa je izbrana visoko (med 500MHz in 5GHz, najbolj običajna vrednost je 2GHz), da pri meritvah nižjih frekvenc vse neželjene odzive enostavno izločimo z nizkoprepustnim sitom na vhodu. Spektralni analizator je torej zasnovan podobno kot sodobni KV

sprejemniki, ki signale iz pasu 0-30 MHz mešajo najprej na višjo medfrekvenco okoli 70MHz.

Prvi medfrekvenci seveda sledi vsaj še eden (običajno dva ali trije) mešalniki na nižje medfrekvence, kjer je lažje izdelati pasovna sita željene širine in signal detektirati. Podobno kot na S-metru radijskih postaj je tudi skala jakosti signala na zaslonu spektralnega analizatorja logaritemska. Ker pri merilniku zahtevamo večjo točnost prikaza kot na S-metru radijske postaje, je detektor izveden kot logaritemski ojačevalnik z večjim številom stopenj (8 do 10). Odziv vsake stopnje je sicer linearen, vsota odzivov pa se približa logaritemski krivulji, ko upoštevamo prag zaščitenja vsake stopnje posebej.

Izhod logaritemskega detektorja krmili pokončni odklon na katodni cevi. Najpogosteje si izberemo prikaz 10dB na pokončni razdelek zaslona, kar pomeni 80dB ali 100dB preko celega zaslona. Boljši spektralni analizatorji omogočajo tudi preklon v način 2dB na razdelek za natančna opazovanja, kot tudi prikaz v linearnih enotah. Običajni način delovanja, se pravi slikica, na katero smo vajeni, je seveda 10dB na razdelek.

Vodoravni odklon katodne cevi krmili izvor žagaste napetosti. Ista žaga tudi premika frekvenco prvega oscilatorja (sweep), da merilnik preletava željeno frekvenčno območje. Osrednja frekvenca in širina preleta (po angleško "span") sta seveda nastavljivi: prva zvezno z enim ali več potenciometri (groba in fina nastavitve), druga pa s preklonnikom v korakih 1, 2, 5, 10 itd.

Najzahtevnejši del spektralnega analizatorja je prvi oscilator (VCO). Ta oscilator mora pokriti široko frekvenčno področje, frekvenca mora biti električno nastavljiva (s tokom ali napetostjo) in oscilator mora hkrati imeti čimmanjši amplitudni in fazni šum. Lastnosti VCOja praktično omejujejo tako frekvenčno področje kot dinamiko jakosti vhodnih signalov za celotni merilnik.

Profesionalni merilniki uporabljajo v ta namen YIG oscilator. YIG (Yttrium-Iron-Garnet) je mikrovalovni feritni material, ki ima v mikrovalovnem frekvenčnem pasu rezonanco z visoko kvaliteto (Q1000) na molekularnem nivoju. Rezonančna frekvenca YIG ferita je natančno premosorazmerna jakosti enosmerne magnetnega polja, v katerem se nahaja ferit.

Za uporabo v mikrovalovnih oscila-

torjih in pasovnih sitih se YIG ferit brusil v kroglice premera okoli 1mm. Kroglica se z zankico sklopi v visokofrekvenčno vezje, sicer pa je vstavljena magnetno polje elektromagneta, ki določa frekvenco rezonatorja. Frekvenco YIG oscilatorja ali pasovnega sita zato nastavljammo z enosmernim tokom, ki teče skozi navitje elektromagneta. Frekvenca je seveda premosorazmerna krmilnemu toku, kar je ena od prednosti YIG oscilatorjev in pasovnih sit.

Prav izum YIG oscilatorja je omogočil prelomnico pred tremi desetletji, ko je iz panoramskega sprejemnika nastal spektralni analizator. Visoka cena YIG oscilatorja seveda pomeni, da je tudi celotni merilnik precej drag. Slaba lastnost YIG oscilatorjev in pasovnih sit je tudi ta, da so občutljivi na zunanja magnetna polja, natančnost nastavljanja frekvence pa dodatno moti histereza jedra elektromagneta. Pri spektralnih analizatorjih in drugih merilnikih z YIG sestavnimi deli se zato pogosto zgodi, da se po večkratnem preklopu področja frekvenca enostavno zamakne za 10MHz ali 20MHz, ker se je jedro elektromagneta namagnetilo drugače.

Frekvenčni pas spektralnega analizatorja je omejen s pokrivanjem VCOja in vrednostjo prve medfrekvence. Enostavna rešitev z nizkoprepustnim sitom na vhodu postavi gornjo frekvenčno mejo pod vrednost prve medfrekvence. Seveda bi ostali produkti mešanja z osnovno frekvenco in višjimi harmonskimi prvega oscilatorja omogočali tudi opazovanje višjih frekvenc, le da v tem načinu delovanja odziv merilnika ni več enoličen, pač pa isti signal vidimo na več mestih na zaslonu, ki ustrezajo različnim produktom mešanja.

Seveda je bolje nekaj kot nič in enostavni spektralni analizatorji omogočajo izključitev nizkoprepustnega sita na vhodu. Boljši merilniki imajo na vhodu vgrajeno nastavljivo YIG pasovno sito, s katerim lahko izberemo le enega od produktov mešanja. Frekvenco pasovnega sita mora seveda stalno nastavljammo isti izvor žage, ki krmili prvi oscilator.

## 3. Osnovne meritve s spektralnim analizatorjem

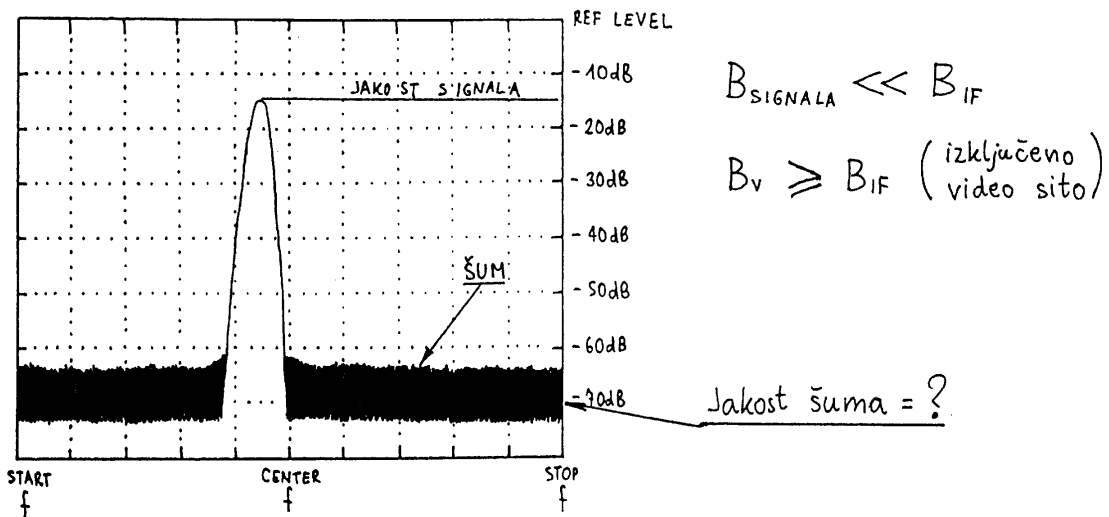
Visokofrekvenčni spektralni analizator vsekakor ni vsemogočni merilni inštrument. Kot vsak merilnik ima tudi spektralni analizator svoje

MF sito :  $T \geq \frac{\Delta f}{B_{IF}^2}$  ;  $f \leq \frac{B_{IF}^2}{\Delta f}$  ( $B_V \geq B_{IF}$ )

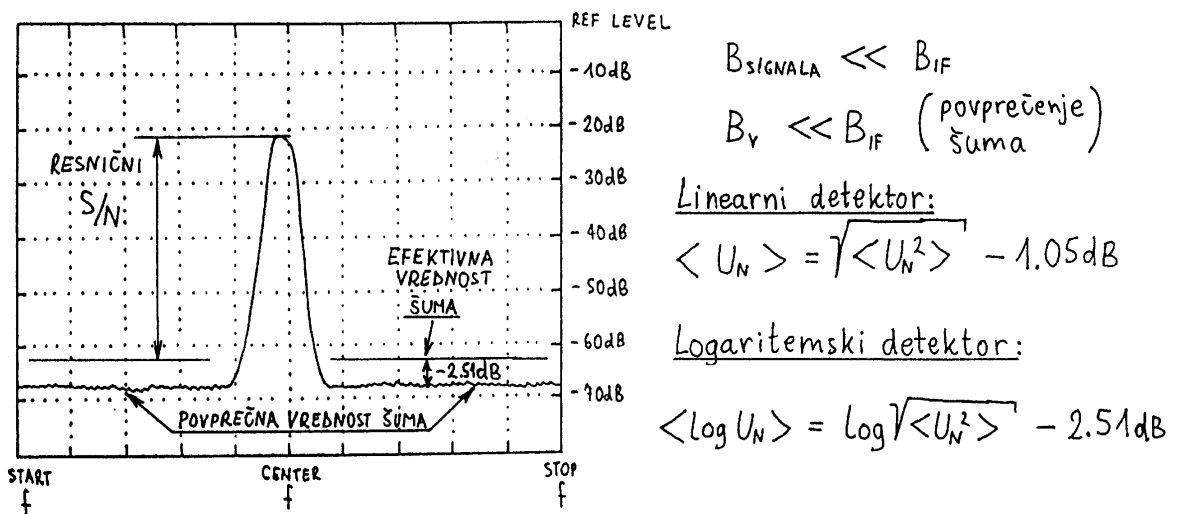
Video sito :  $T \geq \frac{\Delta f}{B_{IF} \cdot B_V}$  ;  $f \leq \frac{B_{IF} \cdot B_V}{\Delta f}$  ( $B_V < B_{IF}$ )

Katodna cev :  $T \geq \frac{N}{B_{IF}}$  ;  $f \leq \frac{B_{IF}}{N}$  ( $B_V \geq B_{IF}$  ;  $N < \frac{\Delta f}{B_{IF}}$ )

Slika 2 - Omejitve časa skaniranja (frekvence žage).



Slika 3 - Meritev jakosti ozkopasovnih (sinusnih) signalov.



Slika 4 - Meritev jakosti šuma in razmerja signal/šum.

lastne omejitve, kot tudi omejitve samega postopka merjenja signalov. Tudi najdražji spektralni analizator postane povsem neuporaben, če ga prekrmilimo s premočnimi signali na vhodu. Meritev frekvenčnega spektra sama zahteva določen čas in ta čas se lahko samo še podaljša zaradi načina delovanja merilnika oziroma zaradi slabega razmerja signal/šum.

Vsak resen VF spektralni analizator ima na vhodu vgrajen uporovni slabilec, ponavadi s preklopnikom s koraki po 10dB. Z vhodnim slabilcem lahko takoj preverimo, ali je slika na zaslonu še vedno verodostojna. Ko povečamo slabljenje za 10dB, se mora celotna slika premakniti navzdol za en razdelek. Če pa se nekatere "špičke" ali "brki" premaknejo navzdol za 20dB ali več ali celo izginejo, potem so na zaslonu prisotni neželeni produkti mešanja, ki nastajajo v samem spektralcu, ponavadi zaradi prekrmiljenja vhodnega mešalnika.

Razen vhodnega slabilca imajo nekateri spektralni analizatorji tudi možnost nastavljanja ojačenja v medfrekvenci, da se celotno ojačenje merilnika bolje prilagodi širini pasovnega sita v medfrekvenci. Z ojačenjem v medfrekvenci seveda ne moremo bistveno vplivati na dinamiko jakosti vhodnih signalov, ki jo določa vhodni mešalnik in fazni šum prvega oscilatorja.

Sama meritev frekvenčnega spektra zahteva čas, ki je točno obratna vrednost ločljivosti merilnika. Če hočemo meriti spekter z ločljivostjo 1kHz, potem znaša najmanjši čas meritve 1 milisekunda. Ker visokofrekvenčni spektralni analizator razpolaga z enim samim sitom željene širine, moramo čas meritve še pomnožiti s številom točk, v katerih merimo spekter.

Meritev spektra lahko zato postane kar dolgočasna, kot to prikazuje slika 2. Čas meritve je v skupnem seštevku obratno sorazmeren kvadratu širine medfrekvenčnega sita, saj ožje sito pomeni tudi večjo ločljivost oziroma večje število posamičnih meritev. Če uporabljamo dodatno nizkoprepustno sito za demodulirani (video) signal, potem se čas meritve še podaljša. Končno ne smemo zanemariti omejene ločljivosti katodne cevi, zadnji izraz na sliki 2 je zato v bistvu skrajna spodnja meja za širino uporabljenega MF sita.

Nekaterim od omenjenih omejitev se spretno izogonejo druge vrste spektralnih analizatorjev, naprimer

FFT ali akustooptični spektralci. FFT (Fast Fourier Transform) algoritem se naprimer obnaša kot velika množica vzporednih pasovnih sit, od katerih je vsako uglašeno na eno frekvenco meritve. Pri FFT spektralcu zato časa meritve ni treba množiti s številom točk, saj ima vsaka frekvenca svoje sito.

Žal sedanji A/D pretvorniki omejujejo FFT spektralne analizatorje na nizke frekvence, običajno omejene na pas zvočnih frekvenc oziroma mehanskih vibracij. Takšen spektralni analizator lahko naredimo na kateremkoli računalniku, ki je opremljen z A/D pretvornikom (zvočno kartico) in je v praksi lahko tudi koristen, naprimer za uglaševanje RTTY in packet modemov oziroma za iskanje šibkih signalov v šumu (EME).

Končno je možna kombinacija obeh vrst spektralnih analizatorjev, se pravi panoramski sprejemnik, ki mu lahko vključimo še FFT v medfrekvenci. Vrhunski merilniki so tako tudi izdelani in odlično delujejo, le njihova cena je še vedno šestštevilično število v ameriških dolarjih...

Visokofrekvenčni spektralni analizator je merilnik, ki lahko meri signale v širokem razponu frekvenc in jakosti. Zato je njegova točnost merjenja jakosti signalov slabša od pravih merilnikov moči. Točnost merjenja moči se giblje v razponu +/-0.5dB za vrhunske spektralne analizatorje pa vse do +/-3dB in slabše za cenene spektralce.

Jakost ozkopasovnih (sinusnih) signalov preprosto odčitamo na pokončni skali, kot je to prikazano na sliki 3. Odčitani vrednosti moramo prišteti faktor skale (REF LEVEL) oziroma merilnik pred meritvijo umeriti na znan izvor signala. Takšno preprosto meritev jakosti signalov seveda smemo uporabljati samo takrat, ko je celotna širina spektra signala (Bsignala) dosti manjša od širine sita v medfrekvenci (ločljivosti spektralnega analizatorja) in je razmerje signal/šum veliko.

Pri meritvah jakosti širokopasovnih signalov oziroma šuma moramo biti bolj previdni. Predvsem se moramo zavedati, da je moč šuma običajno enakomerno porazdeljena po frekvenčnem spektru, jakost šuma pa je podana na enoto širine spektra. Pri meritvi jakosti šuma oziroma razmerja signal/šum je zato bistven podatek širina sita v medfrekvenci spektralca.

Ker je šum povsem naključen signal, na zaslonu spektralca ne vidimo ravne črte, pač pa migotajočo "travo". Jakost šuma zato izmerimo s povprečenjem tako, da nastavimo video sito dosti ožje od medfrekvenčnega sita. Ta ukrep seveda poveča čas meritve, ampak "trava" se na ta način skrči v bolj ali manj ozko črto, kot je to prikazano na sliki 4.

Končno moramo pri merjenju jakosti upoštevati še način povprečenja video sita. Jakost šuma ponavadi podajamo z efektivno vrednostjo (povprečje moči, se pravi kvadrata napetosti ali toka), video sito pa povpreči logaritemski oziroma linearni izhod detektorja. Linearno povprečje je za 1.05dB manjše od povprečja moči, logaritemsko povprečje pa je kar za 2.51dB manjše od povprečja moči.

Frekvenčno območje spektralnega analizatorja lahko seveda razširimo z zunanji mešalniki oziroma konverterji, žal običajno na račun dinamike jakosti merjenih signalov. Proizvajalci spektralnih analizatorjev običajno ponujajo takšne zunanje harmonske mešalnike za frekvence nad 26.5GHz v valovodni tehniki. Dodatni mešalniki iz praktičnih zahtev meritve ne morejo biti vgrajeni v samo ohišje spektralnega analizatorja, zato je slednji opremljen z izhodom prvega lokalnega oscilatorja in dodatnim medfrekvenčnim vhodom, kot je to prikazano na sliki 5.

Pred spektralni analizator lahko seveda priključimo poljuben konverter. Naprimer, s cenanim konverterjem za satelitsko TV na 11GHz in cenanim spektralcem do 2GHz lahko opazujemo signale v frekvenčnem pasu 10-12GHz. V praksi se je zelo obnesel harmonski konverter s prosto nastavljamim oscilatorjem v širokem frekvenčnem pasu, kot je to prikazano na sliki 6. S primerno izbiro frekvence oscilatorja lahko neželjene produkte mešanja premaknemo tako, da dobimo na zaslonu skoraj čisto sliko. Uporaba takšnega konverterja seveda zahteva nekoliko več znanja in spretnosti, vendar nadomesti dosti dražji profesionalni spektralec z YIG preselektorjem.

#### 4. Sledilni izvor za spektralni analizator

Spektralni analizator je merilnik, ki opazuje pojave v živih napravah, se pravi signale, ki jih naprave same oddajajo. Pri razvoju in izdelavi

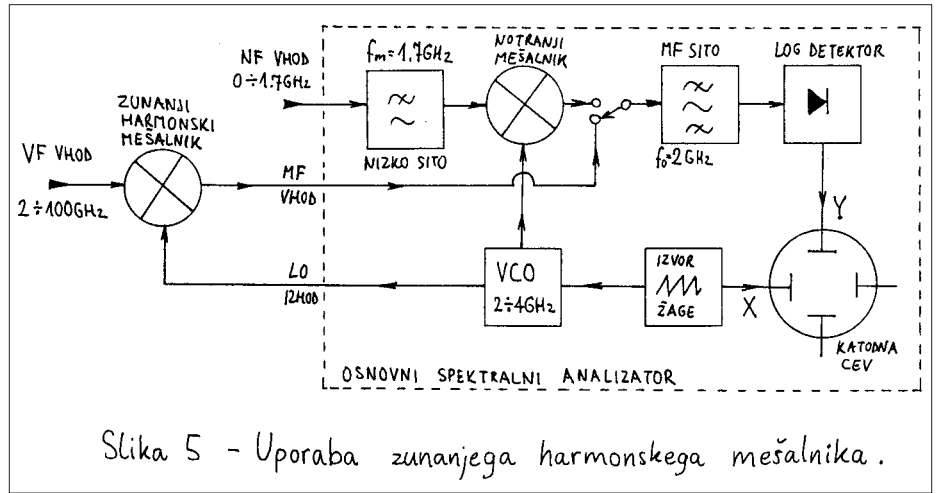
radijskih naprav pa potrebujemo tudi merilnik, ki bi izmeril frekvenčni odziv sita ali ojačevalnika brez drugih vhodnih signalov. Takšen merilnik običajno dobimo na tržišču pod imenom analizator vezij (network analyzer) v različnih izvedbah. Skalarni merilniki (scalar network analyzer ali SNA) izmerijo le jakost odziva vezja, vektorski merilniki (vector network analyzer ali VNA) pa izmerijo jakost in fazo odziva merjenega vezja.

Če pogledamo blokovni načrt spektralnega analizatorja, hitro ugotovimo, da vsebuje večino sestavnih delov, ki jih potrebuje tudi analizator vezij. Kar v spektralnem analizatorju manjka, je primeren izvor signala, ki bi deloval natančno na tisti frekvenci, kjer spektralni analizator sprejema. Takšen izvor zato imenujemo sledilni izvor (po angleško tracking generator) in ga lahko dokupimo kot dodatno opremo za večino spektralnih analizatorjev na tržišču. Spektralec opremljen s sledilnim izvorom dopušča celo večjo dinamiko meritve jakosti odziva od skalarnih analizatorjev vezij, žal pa večina spektralcev ni opremljena za meritve faze odziva.

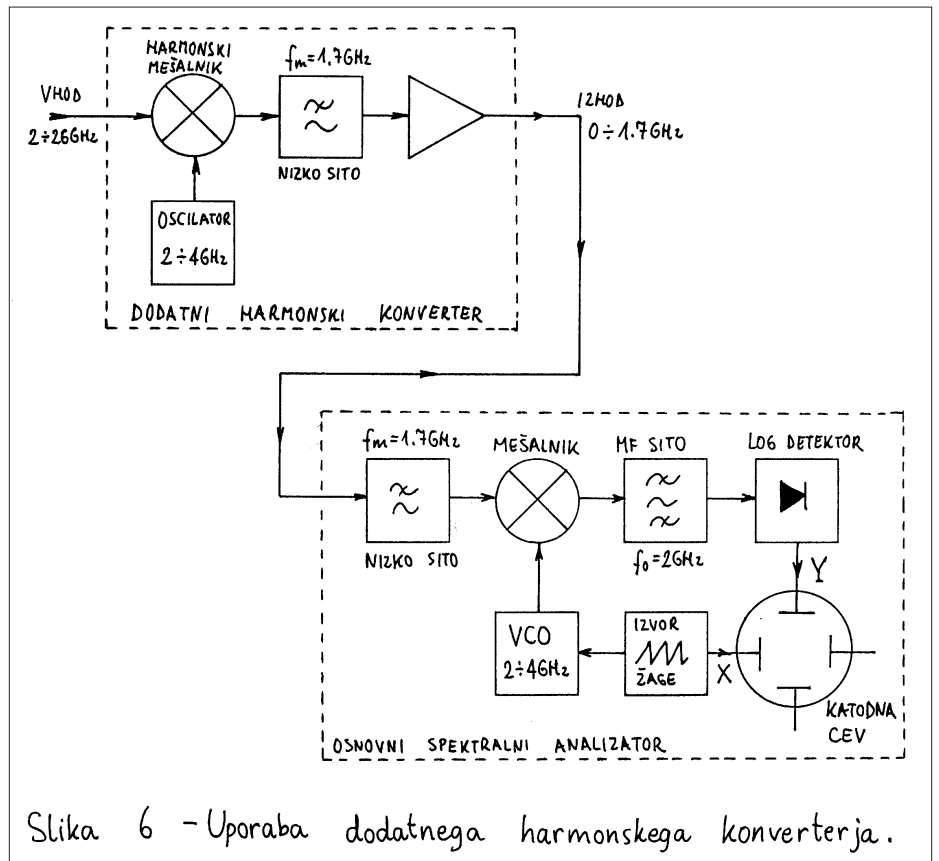
Običajna izvedba sledilnega izvora je prikazana na sliki 7. Sledilni izvor vsebuje oscilator, ki je uglašen natančno na medfrekvenco spektralca. Vgrajeni oscilator se meša s prvim oscilatorjem spektralca. Izhod mešalnika gre skozi nizkoprepustno sito, kjer se izseje le željeni produkt mešanja, naprimer frekvenčni pas od 0 do 1.7GHz. Nizkoprepustno sito mora seveda zadušiti ostanke 2GHz oscilatorja kot tudi ostale produkte mešanja, da ti ne vdrejo skozi merjenec v sprejemnik, kjer bi zaradi povsem enakega mešanja lahko zašli v medfrekvenco in popolnoma pokvarili rezultat meritve.

Podobno nalogo ima tudi ločilni ojačevalnik za prvi oscilator spektralca, da se oscilator na vrednosti medfrekvence 2GHz ne prebije po isti poti nazaj v merilni sprejemnik. Sledilni izvor običajno vsebuje tudi avtomatsko regulacijo ojačenja iz vsaj dveh razlogov: da je jakost izhodnega signala čimbolj konstantna in da mešalnik ni nikoli prekrmljen s signalom na vrednosti medfrekvence 2GHz, kar bi povzročilo obilico neželenih produktov mešanja.

Nekateri spektralni analizatorji dopuščajo tudi spreminjanje frekvence drugega ali celo tretjega mešanja. Sledilni izvor je v tem slučaju bolj



Slika 5 - Uporaba zunanjega harmonskega mešalnika.



Slika 6 - Uporaba dodatnega harmonskega konverterja.

komPLICIRAN, saj je treba izhodni signal sestaviti iz mešanja točno v obratnem vrstnem redu, kot potuje signal v merilnem sprejemniku. Takšni spektralci so seveda opremljeni z izhodi vseh lokalnih oscilatorjev, da lahko nanje priključimo ustrezno prirejen sledilni izvor.

Večina sledilnih izvorov je omejena na osnovno frekvenčno področje spektralnega analizatorja pod vrednostjo prve medfrekvence. Za medfrekvenco 2GHz je to običajno pas 0-1.7GHz. Za meritve na višjih frekvencah nas proizvajalci merilne opreme ponavadi prepričujejo, da bo treba kupiti pravi analizator vezij za takšne meritve.

Razširitev frekvenčnega pasu sle-

dilnega izvora je včasih zelo enostavna, kot je to prikazano na sliki 8. V tem slučaju uporabimo kot sledilni izvor kar prvi oscilator spektralca, v pasu 2-3.7GHz, seveda posredovan preko ločilnega ojačevalnika. Na sprejemni strani uporabimo merilni (harmonski) konverter, da pas 2-3.7GHz preslikamo na vhodni pas spektralca 0-1.7GHz. Seveda mora biti oscilator konverterja uglašen točno na vrednost prve medfrekvence spektralca.

Podobno kot analizatorje vezij lahko tudi spektralec s sledilnim izvorom uporabimo za meritve prilagojenosti (odbojnosti ali valovitosti) visokofrekvenčnega bremena. Za takšno meritve seveda potrebujemo

še smerni sklopnik ali reflektometerski mostiček, kot je to prikazano na sliki 9. Kot detektor uporabimo kar cel spektralni analizator. Glede na običajne reflektometre ima takšna meritve prednost, da lahko merimo z majhnimi močmi v celotnem frekvenčnem pasu, ki ga dopušča sledilni izvor.

### 5. Slikovni pomnilnik za spektralni analizator

Tovarniški spektralni analizatorji so običajno opremljeni z vgrajenim prikazovalnikom s katodno cevjo oziroma novejši s prikazovalnikom na tekočinskih kristale. Če vgrajeni prikazovalnik ne zadošča, če želimo boljše ločljivost oziroma če želimo rezultat meritve dodatno obdelati, shraniti ali izrisati, oziroma če spektralni analizator ne razpolaga z lastnim prikazovalnikom, potem priključimo na spektralni analizator zunanji prikazovalnik, kot je to prikazano na sliki 10.

Pri tem mora izvor žage posredovati prikazovalniku vsaj dva ločena signala: odklon po vodoravni osi (X ali proženje) ter gašenje povratnega žarka. Večina spektralnih analizatorjev uporablja gašenje žarka tudi zato, da označi začetek oziroma konec veljavnega skeniranja, ko frekvenca VCOja ne ustreza več napetosti žage. Če prikazovalnik ne razpolaga z vhodom za gašenje, lahko s signalom za gašenje tudi prekinemo detektirani video signal in tako označimo začetek ali konec koristnega dela preleta žage.

Od vseh možnih obdelav rezultata

meritve je najbolj koristen slikovni pomnilnik. Stari spektralni analizatorji so naprimer uporabljali posebne katodne cevi s pomnilniškim zaslonom in tako omogočali tudi zelo počasne prelete. Sodobni spektralni analizatorji seveda uporabljajo računalniški pomnilnik, opremljen z A/D in D/A pretvorniki.

Slikovni pomnilnik je še posebno koristen v slučaju uporabe sledilnega izvora. V tem slučaju shranimo v pomnilniku krivuljo odziva brez merjenja in potem primerjamo z merjencem, kot je to prikazano na sliki 11. Še več, na izhodu pomnilnika lahko novo krivuljo odštejemo od stare (odštevanje v logaritemski skali pomeni deljenje v linearni) in tako dobimo čisti odziv merjenca brez netočnosti sledilnega izvora in spektralnega analizatorja. Takšen slikovni pomnilnik nam proizvajalci spektralnih analizatorjev ponavadi ponujajo pod imenom "storage normalizer".

### 6. Izbira spektralnega analizatorja

Do spektralnega analizatorja lahko pridemo na več različnih načinov, seveda odvisno od tega, kaj bi radi merili, koliko časa potrebujemo merilnik in ne nazadnje koliko sami znamo uporabljati in vzdrževati merilnik. Ker je možnosti res veliko, bom tule skušal opisati dobre in slabe lastnosti vsake izmed njih.

#### (A) Izposoja merilnika

Spektralnih analizatorjev tudi pri nas ni malo: podjetja, raziskovalne ustanove, državne ustanove in tudi posamezniki razpolagajo z večjim šte-

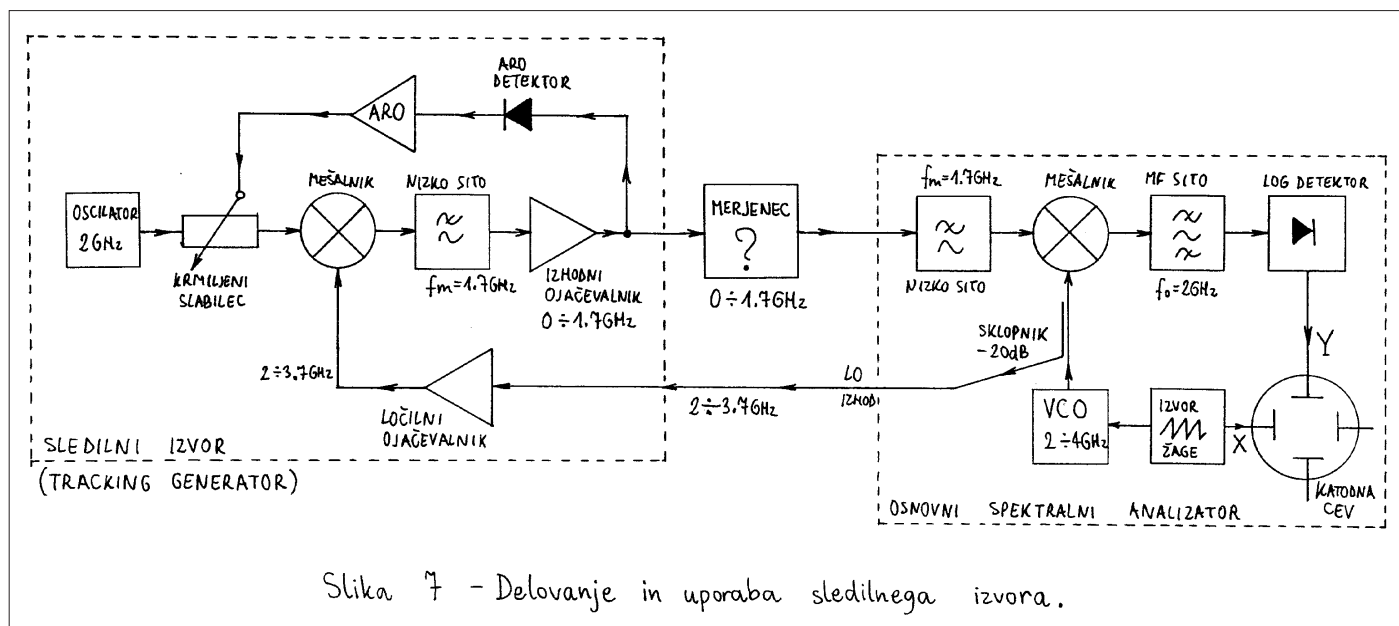
vilom profesionalnih merilnih instrumentov, ki niso vsi 100% izkoriščeni. Pod izposajo seveda mislim to, da prinesemo merjenec do merilnika, saj obratno verjetno ne bo šlo.

Ker je v tem slučaju čas meritve zelo omejen, moramo točno razmisliti, kaj in kako bomo merili. Za naš merjenec moramo prinesiti s sabo vse priključne kable s standardnimi VF vtičnicami (BNC, N ali SMA), poskrbeti moramo za lastno napajanje merjenca in ostale dodatke (mikrofoni, tipke, modemi, zvočniki, slušalke) in imeti na razpolago primerno orodje za razdiranje in uglaševanje merjenca.

Razumeti moramo tudi razliko med uglaševanjem in popravlilom: uglaševanje bo verjetno šlo z izposojenim spektralcem, popravo pa bo treba opraviti doma, saj je daleč preveč zamudno. Znancu radioamaterju, ki nam je omogočil dostop do profesionalne merilne opreme, zato prizanesimo s popravili naše nemarnosti pri gradnji naprave!

#### (B) Nakup novega merilnika

Na tržišču dobimo dve veliki skupini merilnikov, ki se razlikujeta v ceni in zmogljivosti. Prvo skupino bi lahko imenovali profesionalni merilniki, se pravi spektralci z YIG oscilatorjem in petštevilkno ali šestštevilkno ceno v ameriških dolarjih. Kljub visoki ceni ni nujno, da so takšni merilniki povsem brezhibni. Vsi sodobni merilniki imajo naprimer računalniško voden prikazovalnik, pri tem pa je obnavljanje vsebine slike pogosto zelo počasno, pa tudi kvaliteta slike je slaba (ker računalnik ne zmora obdelati več po-



datkov). Najnovejši in tudi najdražji modeli spektralcev zato ponujajo poleg digitalnega prikaza tudi običajni analogni prikaz.

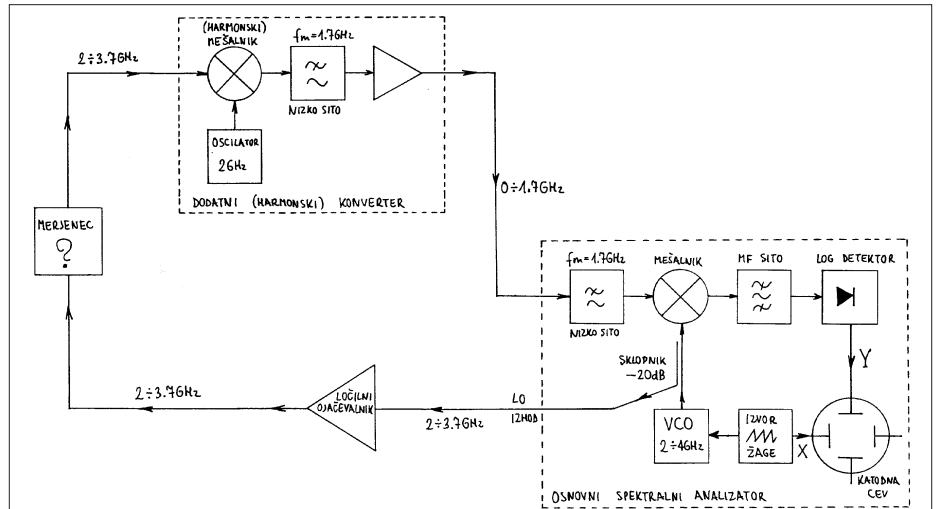
Druga skrajnost ponudbe so ceneni panoramski sprejemniki za inštalaterje TV anten in kabske televizije. Cena teh merilnikov je sicer smešno nizka, zato pa je pokrivanje omejeno na televizijske kanale. Frekvenčna ločljivost, dinamika in točnost merjenja jakosti signalov so zelo slabe. Večina teh merilnikov vsebuje na vohu preprosto modul TV tunerja in medfrekvenčni čip z izhodom za S-meter, kar bi lahko bila osnovna zamisel tudi za enostavno radioamatersko samogradnjo. Žal je končni rezultat tako slab, da je takšen merilnik celo za radioamaterja konstruktorja skoraj neuporaben.

Žal na tržišču manjka vmesni razred, se pravi univerzalni merilnik, ki bi pokrival celotno frekvenčno področje od enosmerne do vsaj 1000 ali 1500MHz za sprejemljivo ceno. Nekaj takšnih izdelkov se je vseeno pojavilo, naprimer Hameg-ov spektralec do 1GHz kot eden boljših predstavnikov cenениh merilnikov (hibridni VCO z varikap diodami, dve različni siti v medfrekvenca) in na drugi strani ceneni predstavnik profesionalnih merilnikov, Hewlett-Packard-ov spektralec do 1.5GHz (vsebuje YIG oscilator s PLL stabilizacijo frekvence), za katerega obljublajo štirimestno ceno v ameriških dolarjih.

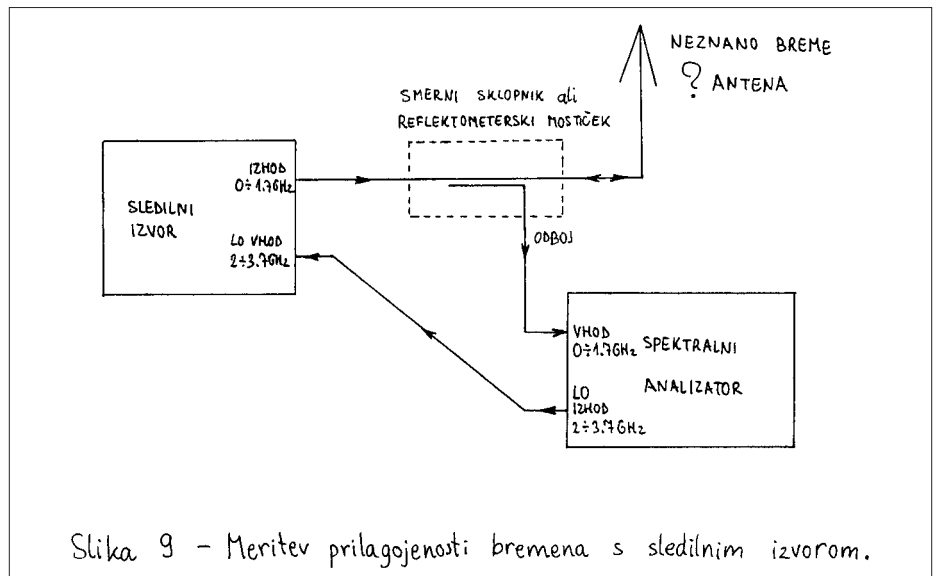
**(C) Nakup rabljenega merilnika**

Radioamaterji se večinoma odločajo za nakup rabljenega profesionalnega merilnika. Cena, uporabnost in vzdrževanje takšnega merilnika so seveda vprašanja zase. Rabljeni merilni inštrumenti so naprimer zelo poceni v ZDA zaradi obilice profesionalnih uporabnikov, ki stalno obnavljajo svojo merilno opremo. Hkrati je povpraševanje po takšnih merilnikih v ZDA razmeroma majhno, saj tamkajšnjih radioamaterjev konstruktorstvo kaj dosti ne zanima.

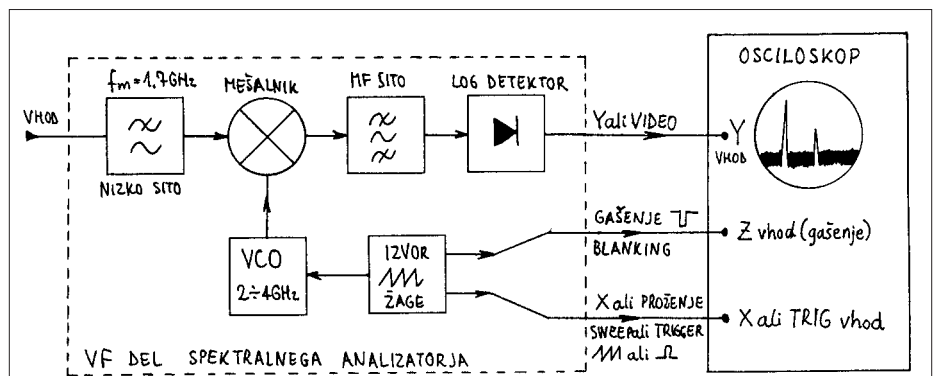
Dvajset let star, a povsem brezhiben spektralni analizator lahko zato kupimo pri trgovcu s starimi merilnimi inštrumenti v skoraj vsakem večjem mestu v ZDA za komaj sto ali dvesto ameriških dolarjev. Letalski prevoz takšne težke pošasti v Evropo je seveda veliko dražji. Razen težav vrste 115V in 60Hz je v Evropi problem vzdrževanje: colski vijaki, colski zobčniki, colski zobati jermeni iz preperlele gume za pogon



Slika 8 - Enostavna razširitev frekvenčnega območja sedilnega izvora.



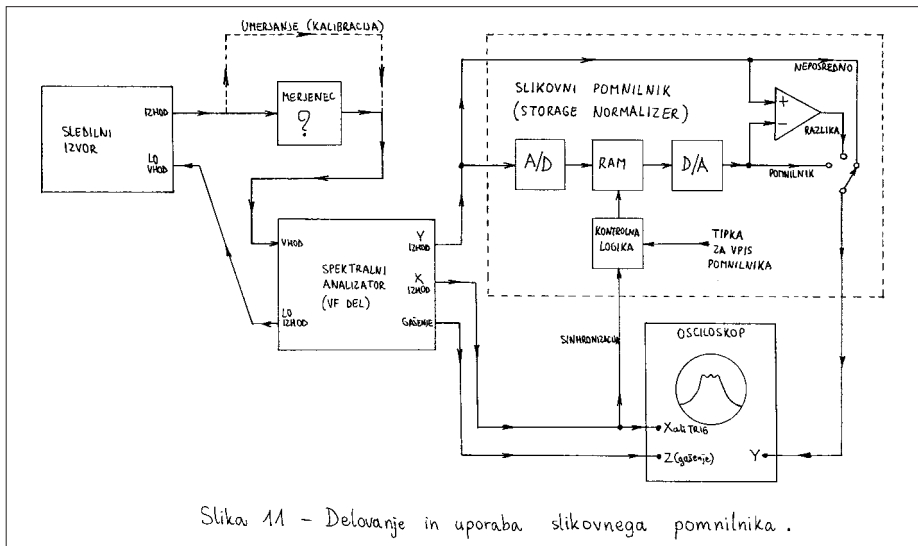
Slika 9 - Meritev prilagoditve bremena s sledilnim izvorom.



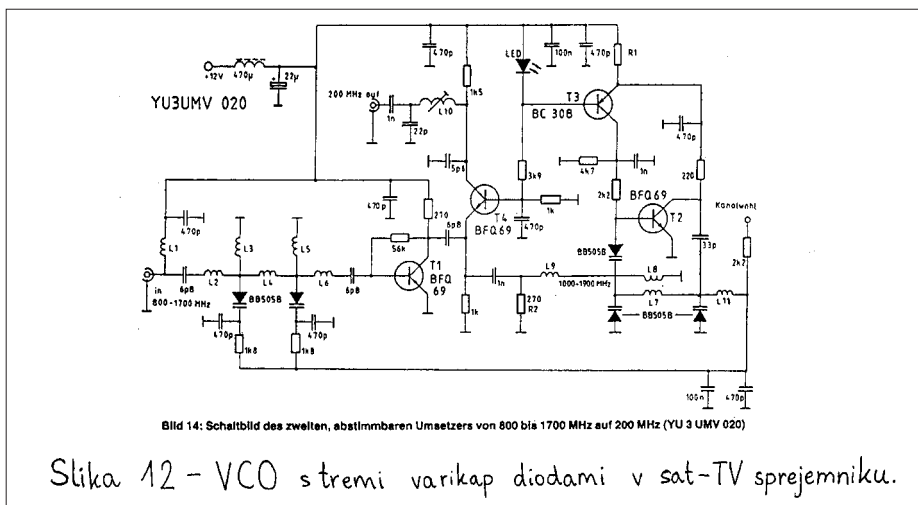
Slika 10 - Priključitev spektralnega analizatorja na osciloskop.

skale spektralnega analizatorja itd. V Evropi je povpraševanje po spektralnih analizatorjih dosti večje zaradi velikega števila radioamaterjev konstruktorjev, hkrati pa je ponudba manjša kot v ZDA. Nekateri trgovci se zato celo ukvarjajo z uvozom starih merilnikov iz ZDA. Cene so zato precej višje, desetkrat do tridesetkrat višje od tistega, kar bi za

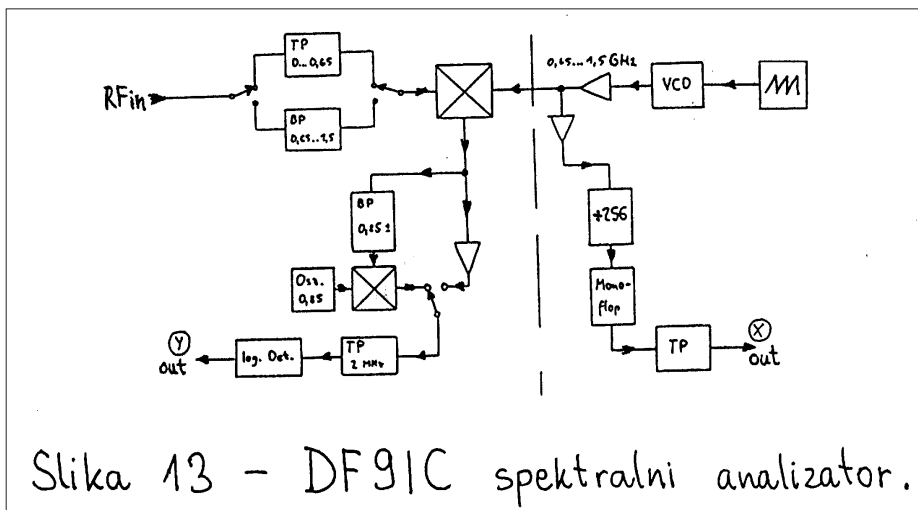
enak merilnik plačali v ZDA. Nekateri evropski trgovci pretiravajo s cenami tako daleč, da so pri njih rabljeni merilniki celo dražji od enakih novih merilnikov. Mogoče gre pa za muzejsko vrednost? Vzdrževanje dvajset let starega merilnika je lahko zelo muhasto. Že pot do načrtov oziroma do celotne vzdrževalske dokumentacije zna biti



Slika 11 - Delovanje in uporaba slikovnega pomnilnika.



Slika 12 - VCO s tremi varikap diodami v sat-TV sprejemniku.



Slika 13 - DF91C spektralni analizator.

zapletena. Posebno težavno je popravilo vložkov, ki se vtaknejo v osnovno ohišje merilnika, ko ne razpolagamo z ustreznimi podaljševalnimi kabli. Prekinjajoče napake, ki se pojavijo samo občasno oziroma takrat, ko se merilnik dobro ogreje, so seveda višek preizkusa živcev lastnika takšnega merilnika.

Pri novejših rabljenih merilnikih moramo paziti tudi na tehnologijo

gradnje merilnika. Dvajset in več let stari merilniki vsebujejo skoraj izključno analogna vezja, novejši merilniki pa čedalje več digitalnih vezij, predvsem za stabilizacijo frekvence (PLL ali FLL) in v elektroniki prikazovalnika. Medtem ko vzdrževanje oziroma popravilo analognih vezij ne predstavlja težav, saj lahko vedno najdemo ustrezen nadomestni sestavni del, je popravilo namenskih

digitalnih integriranih vezij nemoogoče!

(D) Samogradnja spektralnega analizatorja

Samogradnja spektralnega analizatorja vsebuje dve veliki oviri. Prva ovira je v tem, da je spektralni analizator komplicirana naprava, ki je po zahtevnosti gradnje primerljiva s SSB radijsko postajo. Druga ovira je v tem, da so nekateri sestavni deli spektralnega analizatorja težko izvedljivi v amaterskih razmerah. Pri tem mislim predvsem na kvaliteten oscilator za prvo mešanje, saj si gradnje YIG oscilatorja ne moremo privoščiti doma, ker ne razpolagamo z ustreznimi materiali za gradnjo. Tovarniško izdelan YIG oscilator lahko sicer kupimo na drugi strani velike luže za približno tisoč dolarjev. Kot posledico obeh omenjenih ovir lahko objavljene načrte resnih amaterskih samogradenj spektralcev preštejemo na prste ene roke.

Sam sem sestavil moj prvi spektralni analizator leta 1985, potem ko sem ugotovil, da bom brez takšnega merilnika težko shajal tudi pri gradnji amaterskih radijskih postaj. VCO sem izdelal s tistim, kar sem imel na razpolago, se pravi z varikap diodami iz UHF TV tunerjev. Glavna težava silicijevih varikap diod je razmeroma visoka zaporedna upornost (nekaj ohmov) in s tem povezana slaba kvaliteta nihajnih krogov na visokih frekvencah. Z običajnimi VCOji zato s takšnimi varikap diodami ne moremo preseči meje 1GHz.

Z nekoliko izboljšanim načrtom VCOja na tri varikap diode (dve v nihajnem krogu in ena za kompenzacijo faze odziva tranzistorja) sem uspel pokriti področje 850-1750 MHz. Prvo medfrekvenco spektralca sem zato postavil na 1GHz, da sem pokrtil področje 0-750MHz v enem zamahu. Načrta celotnega merilnika se nisem upal nikoli objaviti, saj je bil moj prototip prava zmešnjava različnih tehnik gradnje in pokrpan na vseh koncih in krajih, da je reč nekako delala. Leto kasneje (1986) sem objavil le načrt izboljšane VCOja kot sestavni del sprejemnika za satelitsko TV (glej sliko 12).

Bolj ponovljiv spektralni analiator je objavil leta 1987 Jochen Jirman, DB1NV v časopisu UKW-Berichte. DB1NV se je odločil za prvo medfrekvenco 500MHz, da je z običajnim VCOjem iz UHF TV tunerja pokrtil področje 0-450MHz v enem zamahu. V istem časopisu je za svoj spektralni analizator kasneje objavil še veliko



dodatkov (stabilizacija frekvence, sledilni izvor, slikovni pomnilnik, računalniški vmesnik) pa tudi izboljšav in predelav. Med ostalim je v svoj spektralni analizator kasneje vgradil tudi moj VCO.

Kljub vsem objavljenim člankom je bil DB1NV-jev spektralni analizator prekompliciran in je obetal premalo, da bi ga zgradilo večje število radioamaterjev. Dosti večji uspeh je doživel enostaven merilnik, ki ga je razvil Wolf-Henning Rech, DF9IC in je prikazan na sliki 13. DF9IC je razvil enostaven spektralni analizator z ničelno medfrekvenco za pas 650-1500MHz. Za nižje frekvence napravica vključi dodatni mešalnik, tako da je prva medfrekvenca na 850MHz. DF9IC je seveda vgradil v svoj merilnik preizkušena objavljena vezja, se pravi moj VCO na tri varikap diode in DB1NV-jevo linearizacijo frekvenčnega odziva VCOja.

Omejitev DF9IC-jevega merilnika je ničelna medfrekvenca, ki prinaša vsaj dve težavi. Prva je v tem, da dobimo na zaslonu tudi odzive na višjih harmonskih frekvencah VCOja. Dinamika merjenja jakosti signalov je zato omejena na največ 50dB. Druga težava je v tem, da ima ničelna medfrekvenca samo eno vejo (namesto dveh vej v kvadraturi). Posledica je zahteva po zelo ozkem video situ glede na širino medfrekvenčnega sita, kar pomeni počasno skaniranje kljub širini MF sita 2MHz.

DF9IC-jev spektralni analizator dobimo danes v obliki cenene kit-ses-tavljanke v dveh majhnih ploče-

vinastih škatlicah na vseh radioamaterskih sejnih v Nemčiji. Napravico priključimo na katerikoli osciloskop, ki omogoča XY način delovanja. Kljub vsem omejitvam je napravica zelo uporabna za uglaševanje verig množičnih stopenj in iskanje napak v visokofrekvenčnih napravah, zato je doživela velik uspeh med radioamaterji po celi Evropi. Tudi v Sloveniji jo s pridom uporablja večje število radioamaterjev.

**7. Zahteve in možnosti nove samogradnje**

Ker se radioamaterska tehnika počasi seli na višje frekvence, je bilo delo z mojim starim spektralnim analizatorjem domače izdelave čedalje težje. Tudi uporabniki DF9IC-jeve napravice so kmalu spoznali njene omejitve. V dobrih dvanajstih letih uporabe spektralca sem seveda spoznal, kaj v takšnem merilniku pogrešam in kaj je nepotrebno. Iz izkušenj sem sestavil tudi zahteve: frekvenčni pas osnovnega merilnika vsaj do 1.4GHz in dinamika merjenja jakosti signalov vsaj 90dB.

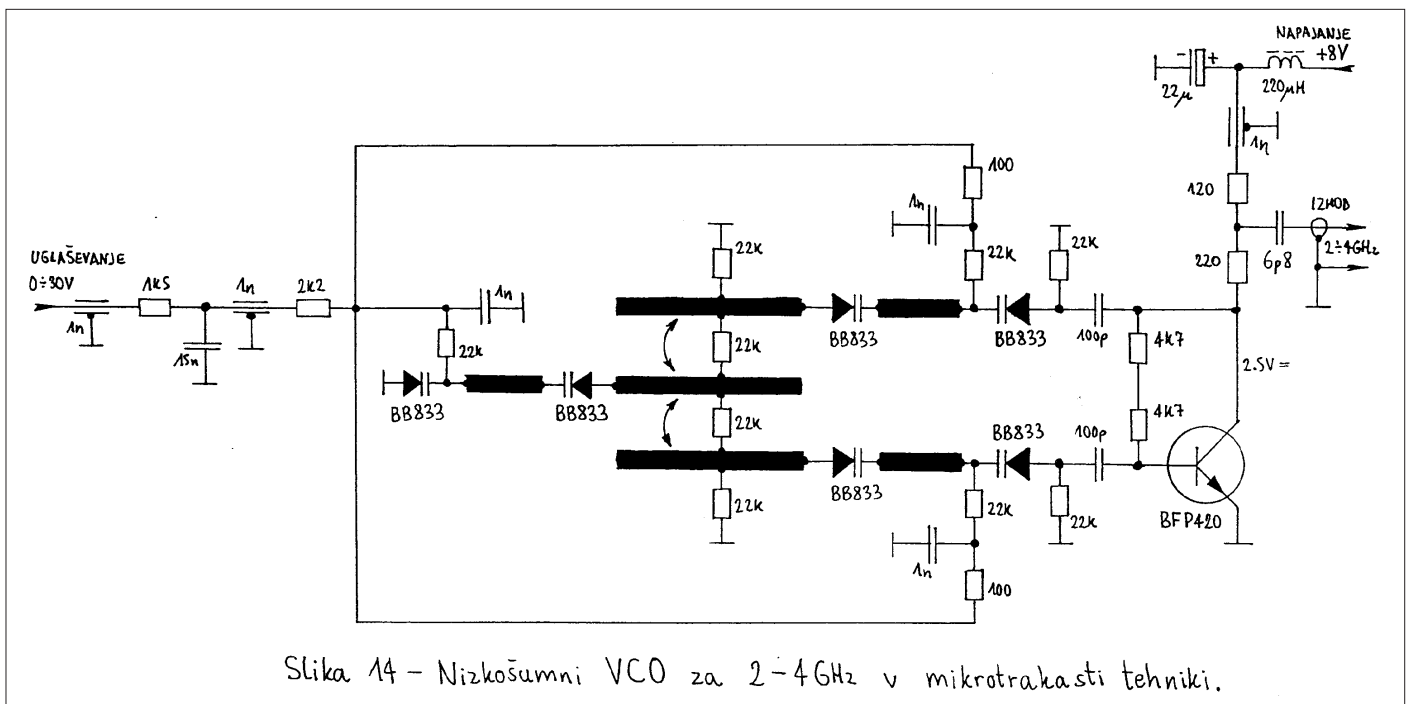
Zelo ozka sita v medfrekvenci so se izkazala nepotrebna: pri starem spektralcu nisem nikoli uporabljal sit, ožjih od 10kHz. Po drugi strani je pa zelo pomembna zahteva, da je najširše sito dovolj široko, da omogoča opazovanje celotnega frekvenčnega pasu od nič do najvišje frekvence in pri tem slika ne utripa zaradi prepočasnega skaniranja niti črte ne

izginjajo zaradi omejene ločljivosti katodne cevi osciloskopa. Najširše sito mora zato imeti širino okoli 3-5MHz.

Ključni sestavni del samogradnje je seveda VCO. Uporabi YIG oscilatorja bi se rad izognil zaradi težavne dobavljivosti. Profesionalci sicer poznajo tudi VCOje z varikap diodami za frekvence do 18GHz, vendar je hibridna tehnologija gradnje teh VCOjev amaterjem nedostopna, pa tudi do varikap diod iz galijevega arzenida težko pridemo. Kljub višji kvaliteti Q GaAs varikap diod je seveda šum še vedno precej večji od YIG oscilatorjev.

Na srečo se na tržišču sestavnih delov stvari počasi, a vztrajno premikajo, predvsem po zaslugi SMD tehnike. Satelitska TV je prinesla nove, izboljšane silicijeve varikap diode, primerne za frekvence vse do 3GHz. Mobilni telefoni so prinesli nove silicijeve bipolarne tranzistorje z visokim ojačenjem (GaAsFETi so za oscilatorje neprimerni zaradi visokega šuma 1/f).

Z novimi sestavnimi deli je bilo treba poiskati samo še ponovljivo konstrukcijo nizkošumnega oscilatorja, ki bi pokril široko frekvenčno področje, naprimer 2-4GHz. Rešitev naloge je v mikrotrakastem interdigitalnem situ, ki deluje kot povratna vezava v oscilatorju. Nerodnost interdigitalnega sita je le v tem, da moramo vzporedno uglaševati vse prste sita. Ker so silicijeve varikap diode za širokopotrošne naprave razmeroma poceni, ta zahteva sploh ni tako huda, kot izgleda na prvi pogled.



Slika 14 - Nizkošumni VCO za 2-4GHz v mikrotrakasti tehniki.

Jakost šuma interdigitalnega VCOja je nekje med šumom običajnih VCOjev z varikap diodami in YIG oscilatorji, to se pravi za 10-20dB boljši od varikap VCOjev in za 10-20dB slabši od YIG oscilatorjev.

Načrt nizkošumnega VCOja z interdigitalnim sitom je prikazan na sliki 14 in vsebuje kar 6 varikap diod, v vsakem prstu po dve. Če bi v vsak prst vgradili le po eno diodo, frekvenčni pas ne bi presegel 1200-1300 MHz. Večje frekvenčno pokrivanje dosežemo tako, da so diode porazdeljene vzdolž mikrotrakastih vodov, za kar potrebujemo šest ali celo devet diod. Kot aktivni sestavni del uporabimo seveda najboljši tranzistor, ki ga lahko kupimo, se pravi BFP420. Vsi ostali sestavni deli, upori in

kondenzatorji, so standardno vgrajeni SMDji velikosti 0805, kar zagotavlja ponovljivost gradnje.

Z izboljšanimi, novejšimi sestavnimi deli bi se verjetno dalo doseči še večje pokrivanje, saj varikap diode BB833 niso zadnji krik tehnike. Zaradi ponovljivosti sem se odločil, da se ustavim pri pasu 2-4GHz in postavim prvo medfrekvenco spektralnega analizatorja na 2.1GHz. Pokrivanje osnovnega spektralnega analizatorja se zato razteza od nič do 1700-1800MHz, glede na tolerance izdelave VCOja in ostalih vezij spektralnega analizatorja. Takšna izbira je smiselna tudi zato, da pade luknja pokrivanja sledilnega izvora in harmonskega konverterja v razmeroma nezanimiv pas okoli 2GHz, pri tem pa

so vremenski sateliti okoli 1.7GHz in radioamatersko področje 2.3GHz zanesljivo dobro pokriti.

Z opisanim VCOjem sem sestavil spektralni analizator in harmonski konverter ter pripadajoča sledilni izvor in slikovni pomnilnik, ki sem jih predstavil na UKV srečanju 11/4/1998 v Ljubljani. Medtem sem sestavil še en enak spektralni analizator, še druga dva enaka prototipa z vsemi pripomočki pa sta izdelala S57UUD in S57RA. Gradnja naprave se je torej izkazala ponovljiva brez večjih težav, zato upam, da se nam bo še kdo pridružil in na ta način pomagal premakniti radioamatersko konstruktorstvo v Sloveniji za korak naprej.

