

# Širokopasovni nizkošumni oscilatorji spektralnega analizatorja

Andrej Romih, Boštjan Vlaovič, Zmagoslav Brezočnik

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Univerza v Mariboru

Smetanova ul. 17, SI-2000 Maribor, Slovenija

{andrej.romih, bostjan.vlaovic, brezocnik}@uni-mb.si

## Abstract

This paper describes and compares characteristics of the Yttrium-Iron-Garnet (YIG) and voltage controlled oscillator (VCO). They are two basic types of broadband oscillators that are used in spectrum analyzers. Additionally we describe S53MV wideband lownoise varicap VCO as an example of good performances and cheap construction.

## 1. Uvod

Za opazovanje signalov v frekvenčnem prostoru je nepogrešljiv merilni instrument spektralni analizator. Uporablja se za opazovanje frekvenčnih spektrov signalov vse od kratkovalovnih pa vse do mikrovalovnih radijskih frekvenc. Navadno pokriva zelo široko frekvenčno področje in ima veliko dinamiko, kar pomeni, da lahko z njim merimo tako zelo šibke kot tudi zelo močne signale.

Pri meritvah visokofrekvenčnih signalov imamo pogosto opraviti z množico signalov. Meritev vseh signalov običajno ni zanimiva, saj navadno želimo meriti jakost in frekvenco vsakega signala posebej, hkrati pa želimo zagotoviti delovanje na širokem frekvenčnem področju. Merjeni signal ni nujno najmočnejši signal, lahko je tudi več kot milijonkrat šibkejši od drugih prisotnih bližnjih signalov. Frekvenčno razločljivost in s tem tudi dinamiko merjenja signalov zagotavljajo stabilni oscilatorji z nizkim amplitudnim in faznim šumom. Širino pokrivanja frekvenčnega področja pa pogojuje prvi spremenljivi oscilator. Ta mora delovati v čim širšem frekvenčnem področju. Lastnosti oscilatorja določa množica parametrov. Ti imajo različen vpliv na posamezne želene lastnosti in so med seboj odvisni. Prvi spremenljivi oscilator je torej eden izmed najzahtevnejših delov spektralnega analizatorja. V prispevku obravnavamo napetostno krmiljene oscilatorje (VCO – voltage controlled oscillator) in tokovno krmiljene YIG (Yttrium-Iron-Garnet) oscilatorje [2].

V drugem razdelku naredimo primerjavo in opis tehničnih lastnosti VCO in YTO (YIG tuned oscillator) oscilatorjev. V tretjem razdelku kot tipičen primer

cenovno ugodnega napetostno krmiljenega oscilatorja opišemo S53MV širokopasovni nizkošumni VCO. Po tehničnih lastnostih ga lahko uvrstimo v razred med običajnim VCO in YTO oscilatorjem. Sledi zaključek v katerem so predlagane posamezne izboljšave.

## 2. Vrste širokopasovnih nizkošumnih oscilatorjev in njihove karakteristike

Načrtovanje širokopasovnih oscilatorjev ni enostavno, saj je navadno potrebno izbrati srednjo pot med zelenimi karakteristikami. Pri širšem frekvenčnem področju delovanja oscilatorja je na primer težje doseči konstanten izhodni nivo in zadušiti višje harmonike osnovne komponente oscilatorja.

Danes se v vseh spektralnih analizatorjih višjega cenovnega razreda uporabljajo YTO oscilatorji. YIG je feritni material, ki ima na mikrovalovnih frekvencah visoko kvaliteto ( $Q = 1000$ ) na molekularnem nivoju. Frekvenca tega ferita je premosorazmerna jakosti enosmernega magnetnega polja v katerem se nahaja ferit. Brušen je v kroglico premera približno 1 mm. Ta je z zankico sklopljena v visokofrekvenčno vezje. Frekvenco YIG oscilatorja določa elektromagnetno polje, ki je odvisno od enosmernega toka, ki teče skozi navitje elektromagneta. Slaba stran takšnega oscilatorja je, da so občutljivi na zunanja magnetna polja in imajo histerezo jedra elektromagneta. Zaradi dražjega postopka izdelave YIG oscilatorja se kot prvi oscilator spektralnih analizatorjev nižjega cenovnega razreda uporablja napetostno krmiljen oscilator narejen iz silicijevih varikap diod (varikap VCO).

Osnovna lastnost spektralnega oscilatorja je gotovo njegovo frekvenčno področje delovanja. Iz tabele 1 je razvidno, da se z uporabo obeh tipov oscilatorjev lahko doseže enako območje delovanja od 2 do 4 GHz. Enako velja za izhodni nivo (P), ki je podan v dBm. Tudi pri frekvenčni odvisnosti moči oscilatorja ni razlik med obema tipoma oscilatorja. Temperaturna odvisnost  $f(T)$  je dosti manjša pri YTO oscilatorjih, zato so ti primernejši za okolja, kjer prihaja do večjih temperaturnih sprememb. Odvisnost izhodnega nivoja oscilatorja od temperature  $P(T)$  v območju od  $-30$  do  $60^{\circ}\text{C}$  pa je pri obeh tipih oscilatorja podoben.

Tabela 1: Primerjava karakteristike VCO-jev

	Visoka Q (npr. YTO)	Nižja Q (VCO z varikap diodami)
Frek. Območje	2 – 4 GHz	2 – 4 GHz
Izhodni nivo – P	+ 10 dBm	+ 10 dBm
P(f)	+/- 2 dB	+/- 2 dB
f(T)	+/- 10 ppm/°C	+/- 500 ppm/°C
P(T) (-30 do 60°C)	+/- 2 dB	+/- 2 dB
Modulacijska občutljivost	10–20 MHz/mA	50–200 MHz/V
Vsi harmoniki	- 20 dBc	- 20 dBc
FM šum (pri odmiku 100 kHz)	-110 dBc/Hz	-100 dBc/Hz
AM šum (pri odmiku 100 kHz)	-140 dBc/Hz	-140 dBc/Hz
Napaka odziva na $\Delta f$ -kratkoročno	+/- 2 MHz pri 1 $\mu$ s	+/- 2 MHz pri 1 – 100 $\mu$ s
Napaka odziva na $\Delta f$ -dolgoročno	+/- 2 MHz pri 5 – 30 s	+/- 2 MHz pri 5 – 30 s
$\Delta f$ zaradi neprilagojenosti	+/-1 MHz	+/-20 MHz
$\Delta f$ zaradi $\Delta U_{\text{nap}}$	5 MHz/V	5 MHz/V

Pri občutljivosti frekvence oscilatorja glede na krmilno veličino ni mogoče narediti neposredne primerjave, saj se pri YTO oscilatorjih modulacijska občutljivost meri v MHz/mA pri VCO oscilatorjih pa v MHz/V. Pri veliki modulacijski občutljivosti nam že majhna motnja napetosti na krmilnem vhodu oscilatorja lahko povzroči veliko spremembo frekvence oscilatorja. Npr. amplituda motnje 50 mV pri oscilatorju z modulacijsko občutljivostjo 50 MHz/V, spremeni frekvenco oscilatorja za 2.5 MHz.

Vsi neželeni harmoniki osnovnega signala oscilatorja, so merjeni relativno glede na osnovni signal. Iz tabele 1 je razvidno, da so enako zastopani pri obeh oscilatorjih in so podani v dBc (dB carrier).

Fazni šum imenujemo tudi FM šum, saj sta oba med sabo direktno povezana. Načrtovanje oscilatorjev zahteva dobro poznavanje virov faznega šuma in njihov vpliv na tehnične lastnosti oscilatorja. Fazni šum je odvisen od:

- kvalitete (Q) resonatorja,
- kvalitete (Q) varikap diode,
- aktivnega tranzistorja oscilatorja,
- šuma, ki ga povzroča napajalna napetost,
- šuma, ki ga povzroča krmilna napetost,
- morebitne motnje, ki se prebije skozi visokofrekvenčni izhod.

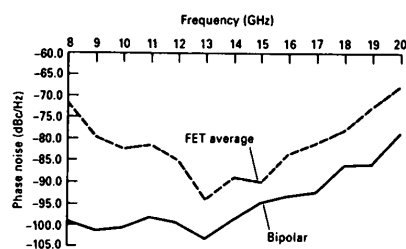
Tabela 1 prikazuje SSB (Single Side Band) fazni šum merjen z odmikom relativno glede na osnovno frekvenco nihanja oscilatorja na 1 Hz pasovne širine. YTO oscilatorji imajo v povprečju fazni šum manjši za

10 dBc/Hz, zato so primernejši za spektralne analizatorje, kjer želimo imeti visoko razločljivost. Fazni šum običajnih YIG oscilatorjev omejuje razločljivost spektralnega analizatorja na 1 kHz (pri vrednostih medfrekvence 2 GHz). Amplitudni (AM) šum je pri obeh tipih oscilatorja podoben in znaša -140 dBc/Hz pri odmiku od nosilca za 100 kHz.

Hipna sprememba krmilne veličine oscilatorja narekuje spremembo frekvence oscilatorja iz  $f_1$  na  $f_2$ , vendar ta ni hipna. Prehod frekvence oscilatorja iz  $f_1$  na  $f_2$  potrebuje nekaj časa za stabilizacijo. Zato pride do frekvenčne napake. To obravnavamo ločeno v začetnem časovnem intervalu ( $\Delta f$ -kratkoročno) in po stabilizaciji frekvence oscilatorja ( $\Delta f$ -dolgoročno) [5]. Kratkoročna napaka odziva (short-term post tuning drift) je pri YTO oscilatorjih manjša, zato je čas za stabilizacijo krajši. Dolgoročna napaka odziva (long-term post tuning drift) predstavlja odstopanje od želene frekvence po 30 sekundah. Tudi v tem primeru so vrednosti ugodnejše pri YTO oscilatorjih [4].

Frekvence oscilatorja se lahko spreminja tudi zaradi neprilagojenosti bremena oz. spremembe impedance bremena pri povratnem slabljenju 12 dB in vseh fazah (Pulling of f for all phases of 12 dB return loss). Iz tabele je razvidno, da je ta vpliv dosti manjši pri YTO oscilatorjih. Vpliv na spremembo frekvence oscilatorja odpravimo tako, da izhod zaključimo s slabilnikom nizke vrednosti ali dodamo vmesni ojačevalnik.

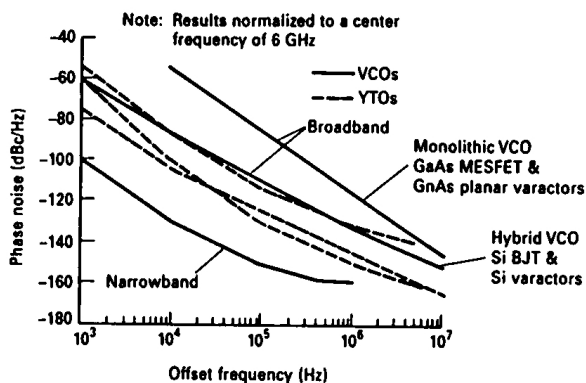
Spremembo frekvence oscilatorja lahko povzroči tudi nihanje krmilne veličine oscilatorja (Pushing of f with change of bias voltage). Iz tabele 1 je razvidno, da je  $\Delta f$  zaradi  $\Delta U_{\text{nap}}$  pri obeh tipih oscilatorjev enaka.



Slika 1: Primerjava faznega šuma pri bipolarnem in FET tranzistorju pri odmiku 10 kHz

Natančnejša študija YTO in VCO oscilatorjev pokaže, da lahko s pravilnim načrtovanjem naredimo zelo dobre VCO oscilatorje, ki ne bodo dosti zaostajali za YTO oscilatorji pri obravnavanih karakteristikah v tabeli 1, hkrati pa so primernejši za aplikacije kjer potrebujemo zelo hitre spremembe frekvence (frequency hopping). Iz slike 1 je razvidno, da so za gradnjo VCO oscilatorjev primernejši bipolarni tranzistorji. GaAsFET in Metal-Semiconductor-Field-Effect-Transistor (MESFET) tranzistorji so neprimerni zaradi visokega faznega šuma.

Kvaliteta nihajnega kroga običajnega VCO oscilatorja je slaba zaradi visoke upornosti silicijeve diode, ki na UHF področju znaša nekaj ohmov. Frekvenčno področje takšnega oscilatorja ne preseže 1 GHz. Nižji fazni šum se lahko doseže z varikap diodami iz galijevega arzenida (GaAs). Kljub večji kvaliteti teh diod je še vedno fazni šum takšnega oscilatorja precej večji od YTO oscilatorja (Slika 2).



Slika 2: Fazni šum pri YIG in varikap VCO oscilatorjih in središčni frekvenci 6 GHz

Boljši VCO oscilatorji vsebujejo v povratni vezavi pasovno sito z varikap diodami s katerim se razširi frekvenčno območje oscilatorja. Kot tipičen predstavnik takšnega VCO oscilatorja bo v naslednjem razdelku podrobneje opisan S53MV širokopasovni nizkošumni VCO.

### 3. S53MV širokopasovni nizkošumni VCO oscilator z varikap diodami

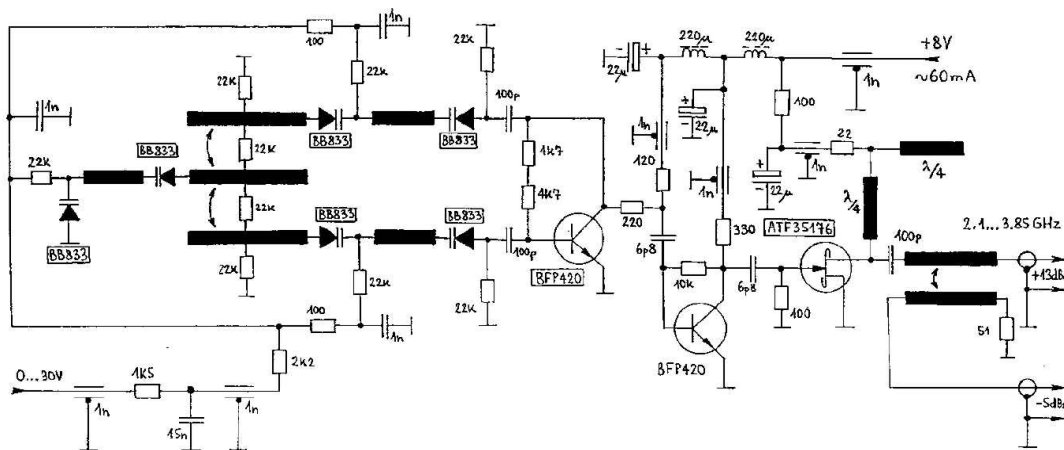
S53MV širokopasovni nizkošumni VCO oscilator je razvil dr. Matjaž Vidmar [1,3]. Večje frekvenčno pokrivanje je zagotovljeno z mikrotrakastim pasovnim (interdigitalnim) sitom v povratni vezavi. Električno shemo tega oscilatorja prikazuje slika 3. Jakost šuma je

nekje med šumom običajnega VCO in YIG oscilatorja. Od običajnih varikap VCO oscilatorjev je boljši za 10 do 20 dB od YIG oscilatorjev pa je za isto vrednost slabši.

Pasovno sito je sestavljeno iz treh prstov, ki so dolgi četrtno valovne dolžine ( $\lambda/4$ ). Vsak prst vsebuje po dve varikap diodi BB833 (Slika 3). Frekvenco oscilatorja nastavljamo s pomočjo vstavljenih varikap diod, saj z njimi "kapacitivno" podaljšujemo dolžino prstov. Varikap diode lahko vstavimo vzporedno z napetostnim maksimumom ali serijsko z tokovnim maksimumom po dolžini resonatorja. Pri mikrovalovnih frekvencah jih zaradi velike kapacitivnosti ponavadi vstavimo serijsko s tokovnim maksimumom. Z večjim številom vstavljenih varikap diod dobimo tudi večje frekvenčno pokrivanje oscilatorja. Zaradi seštevanja izgub na posameznih diodah je v tem primeru večja tudi vstavitvena upornost povratne vezave oscilatorja. Vse izgube v povratni vezavi je potrebno pokriti s tranzistorjem z visoko tranzitno frekvenco  $f_T$  (npr.: BFP420). Slika 4 prikazuje izmerjen fazni šum S53MV širokopasovnega nizkošumnega VCO-ja. Prikazana je povprečna vrednost meritve faznega šuma med VCO oscilatorjem s široko in ozko izvedbo prstov resonatorja. S prekinjeno črto je vrisan fazni šum merilnega instrumenta — spektralni analizator HP 8593 EM.

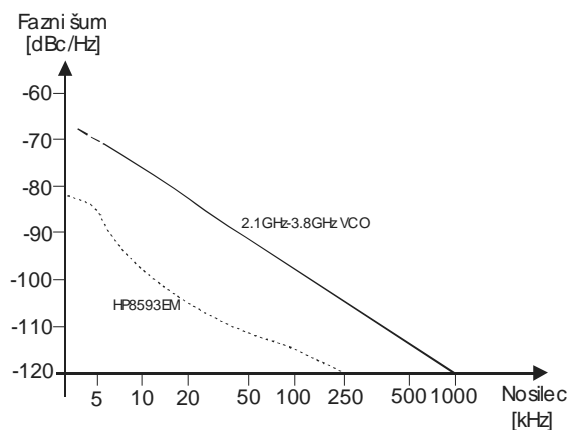
Tipična kapacitivnost varikap diod BB833 se giblje od 0.75 pF do 9.3 pF z razmerjem  $C_{max}/C_{min}$  okrog 12 pri krmilnem napetostnem območju med 1 V in 28 V. Tipična upornost diode pri frekvenci 470 MHz znaša 1.8  $\Omega$ . Nekoliko manjšo upornost ima novejša varikap dioda BB857 (1.5  $\Omega$ ). Večje razmerje  $C_{max}/C_{min} = 16.7$  ima BB867, žal pa tudi večjo upornost, ki znaša 2.8  $\Omega$  in nam poslabša kvaliteto posameznega prsta.

Poleg upornosti varikap diode, vplivajo na kvaliteto snovno geometrijske lastnosti mikrotrakastega prsta. Sredinski prstan ima največji vpliv na spremembo frekvence VCO-ja, saj ima tudi največjo kvaliteto Q v obremenjenem stanju ( $Q_{loaded}$ ). S povečanjem sklopa



Slika 3: S53MV širokopasovni nizkošumni VCO za 2 do 4 GHz v mikrotrakasti tehniki

med prsti interdigitalnega sita lahko povečamo frekvenčno področje pokrivanja VCO-ja. Žal pa to vpliva na  $Q_{\text{loaded}}$  resonatorja in s tem poslabšamo fazni šum oscilatorja. V tem primeru lahko začne oscilator nihati še na višjih resonančnih frekvencah interdigitalnega sita, kar ni zaželeno, saj s tem postane napetostno/frekvenčna krivulja oscilatorja nemonotona.



Slika 4: Meritev faznega šuma S53MV širokopasovnega nizkošumnega VCO-ja

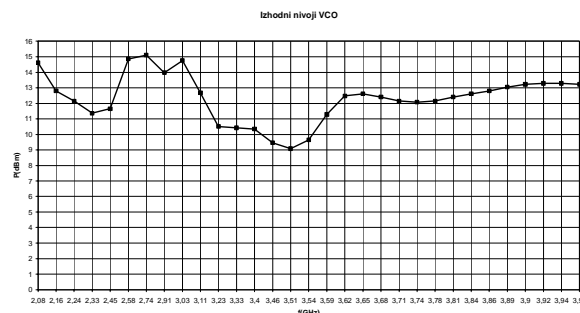
Oscilator vsebuje tudi filtriranje napajalne in krmilne napetosti. Frekvenca tega oscilatorja se ne spreminja linearno tako kot je to značilno za YIG oscilatorje. Krivulja odziva doseže največjo strmino okoli 120 MHz/V pri napetosti 7 V. Pri nižjih napetostih strmina počasi upada do približno 90 MHz/V. Pri višjih napetostih je strmina še dosti bolj nelinearna znaša manj kot 10 MHz/V.

Spodnjo frekvenčno mejo VCO-ja bi lahko še znižali za približno 50 MHz, če bi na vse varikap diode pripeljali majhno negativno napetost (približno -0.7 V). S53MV širokopasovni nizkošumni VCO je narejen na vitroplastu FR4 debeline 0.8 mm. Slaba lastnost FR4 je velik temperaturni koeficient, ki ob dvigu temperature premakne frekvenco VCO-ja navzdol.

Približen izhodni nivo S53MV širokopasovnega nizkošumnega VCO-ja, izmerjen z diodnim watmetrom, prikazuje slika 5 [6].

#### 4. Zaključek

Danes so na tržišču na voljo sodobnejši elektronski elementi, zato bi se karakteristike S53MV širokopasovnega nizkošumnega oscilatorja lahko še nekoliko izboljšale. S sodobnejšimi varikap diodami z večjim razmerjem  $C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$  in še nižjo upornostjo bi se verjetno dalo še nekoliko povečati frekvenčno območje oscilatorja in izboljšati fazni šum.



Slika 5: Meritev izhodnih nivojev S53MV širokopasovnega nizkošumnega VCO-ja

Za zagotovitev nižjega faznega šuma je potrebno zamenjati tudi aktivni tranzistor (BF420) s kakšnim novejšim in narediti dodatno stabilizacijo delovne točke tranzistorja. Primerna sta tranzistorja BFP520 in BFP540 ali še novejši SiGe tranzistorji serije BFP600 s tranzitnimi frekvencami  $f_T$  do 70 GHz. Dodatno izboljšanje šuma bi prinesla tudi menjava serijsko vezanih uporov k varikap diodam z visokofrekvenčnimi dušilkami brez parazitnih resonanc v frekvenčnem delovnem področju oscilatorja. Avtor oscilatorja se je odločil za upore zaradi težje dobavljivosti visokokvalitetnih visokofrekvenčnih dušilk. S hitrim PLL vezjem, ki bi dodatno stabiliziralo frekvenco, bi lahko dosegli tudi višjo razločljivost spektralnega analizatorja.

Zaključimo lahko, da je s sodobnimi elektronskimi elementi in tehnologijami mogoče izdelati VCO oscilatorje, ki so primerljivi z YTO oscilatorji pri frekvenčnih območjih do nekaj GHz. Vseh dobrih lastnosti YTO oscilatorjev vsekakor ne dosegajo, imajo pa tudi nekatere prednosti kot so: nižja cena, hitrost uglaševanja in manjša poraba.

#### Literatura

- [1] Matjaž Vidmar, Wideband & Low-Noise Microwave VCO, VHF Communications 4, 1998.
- [2] Matjaž Vidmar, Delovanje, uporaba in izbira VF spektralnega analizatorja, CQ ZRS – Glasilo radioamaterjev Slovenije, 3, 1998.
- [3] Matjaž Vidmar, VF spektralni analizator 0...1750MHz, CQ ZRS – Glasilo zveze radioamaterjev Slovenije 4, 1998.
- [4] Ulrich L. Rohde, Microwave and Wireless Synthesizers; Theory and Design, 1997.
- [5] Mini-Circuits, <http://www.minicircuits.com>.
- [6] Primož Lemut, Mikrovalovna sonda za merjenje moči, CQ ZRS – Glasilo zveze radioamaterjev Slovenije 3, 1998.