

7 SIGNAALI SPEKTRI ANALÜÜS

7.1 Üldist

Perioodiliselt korduva signaali spekter on tema Fourier' rida.

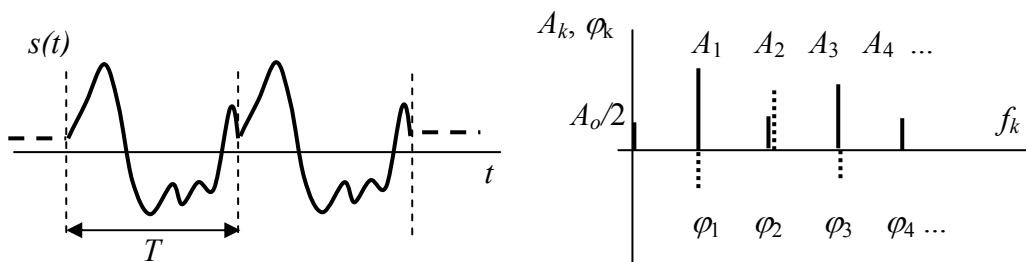
Fourier' rea abil on signaal esitatav tema alaliskomponendi ja harmooniliste summana

$$s(t) = \frac{A_o}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(2\pi k f_o t + \varphi_k),$$

kus $f_o = 1/T$ on põhiharmoonilise sagedus ja $k f_o$ – k -nda harmoonilise sagedus,
 A_k ja φ_k – k -nda harmoonilise amplituud ja faas,
 $A_o/2$ – alaliskomponent.

Amplituud A_k ja faas φ_k leitakse signaali $s(t)$ järgi integraaliga

$$A_k e^{j\varphi_k} = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) e^{-j2\pi k f_o t} dt, \quad k = 0, 1, 2 \dots$$



Mitteperioodilise signaali saame eelmisest, kui signaali kordusperiood $T \rightarrow \infty$.

Seejuures väheneb harmooniliste vahekaugus (sagedussamm) Δf ja üksiku spektrijoone amplituud A , suureneb aga spektrijoonte arv.

Minnes amplituudilt üle suhtele $A^2/\Delta f$, saame suuruse, mis ei vähene, vaid läheneb võimsuse spektraaltihedusele $G(f)$. Nii määratakse **võimsuse spektraaltihedus** kui sageduse pidev funktsioon.

Signaali- ja spektrianalüsaatori näit igal sagedusel vastab võimsusele analüsaatori sagedusribas Δf . Sõltuvalt signaali tüübist tuleb seda mõista erinevalt:

- perioodilise signaali korral, kui analüsaatori lahutusvõime on piisav joonspektri üksikute joonte eristamiseks, on see joonspektri iga komponendi võimsus;
- kui üksikud spektrijooned ei ole eristatavad, on spektri pindala igal sagedusel võrdne spektraaltiheduse ja ribalaiuse korrutisega $G(f)\Delta f$;
- mitteperioodilise signaali korral on näit võrdne signaali spektraaltiheduse ja analüsaatori ribalaiuse korrutisega $G(f)\Delta f$.

Pideva spektriga signaali spektri korral on näit (võimsus) mingil sagedusel f_0 võrdeline suurusega

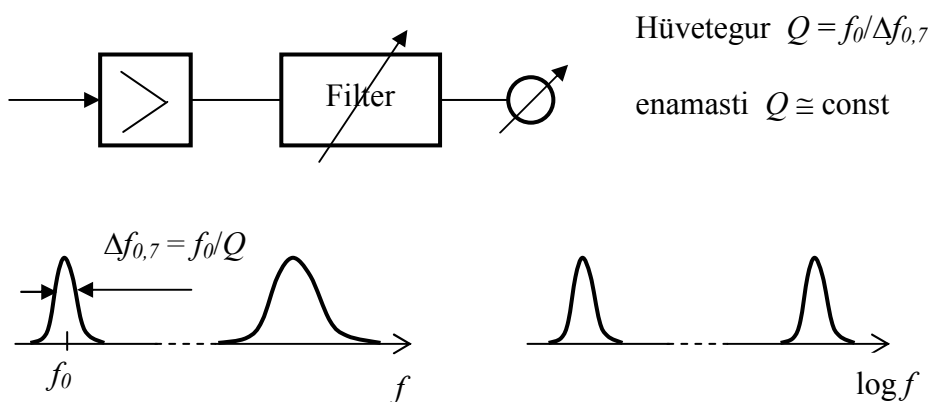
$$U^2 = \int S(f)K_U^2(f)df \approx S(f_0)K_U^2(f_0)\Delta f_{RBW} ,$$

mis annab spektraaltiheduseks $S(f_0) \approx \frac{U^2}{K_U^2(f_0)\Delta f_{RBW}}$.

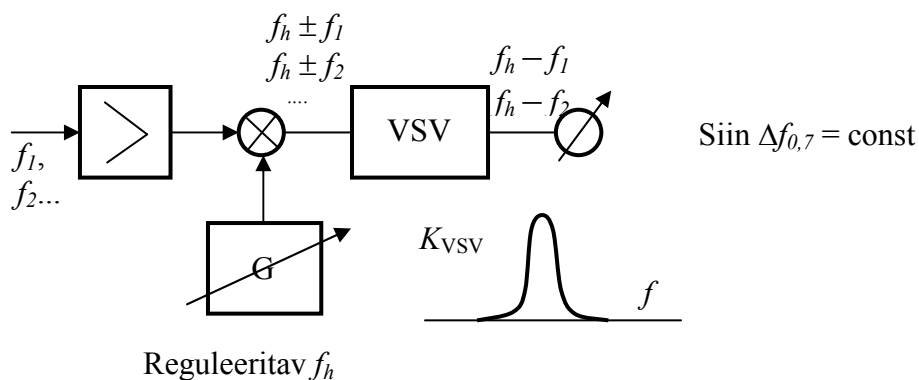
Madalatel sagedustel (helisagedused 20 Hz ... 20 (200) kHz) kasutatakse käsitsi häälestatavaid lainekeju analüsaatoreid (harmooniliste analüsaator, selektiiv-voltmeeter). Kõrgemal sagedusel on aga kasutusel automaatselt häälestuvad analüsaatorid.

7.2 Lainekeju analüüs

Ümberhäälestatava filtriga lainekeju analüsaator



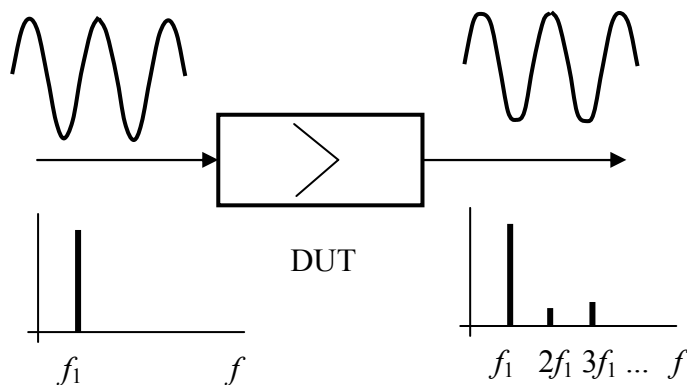
Ümberhäälestatava heterodüüniga lainekeju analüsaator



7.3 Moonutuste mõõtmine

Ühe tooni meetod

Eesmärgiks on leida signaali iseloomustav harmooniliste tegur k , mis näitab signaali kuju erinevust puhtast siinussignaalist. On kasutusel madalsagedusseadmete mittelineaarharmoonutuste mõõtmiseks.



Harmooniliste tegur

$$k = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots}}{U_1}$$

Teine variant

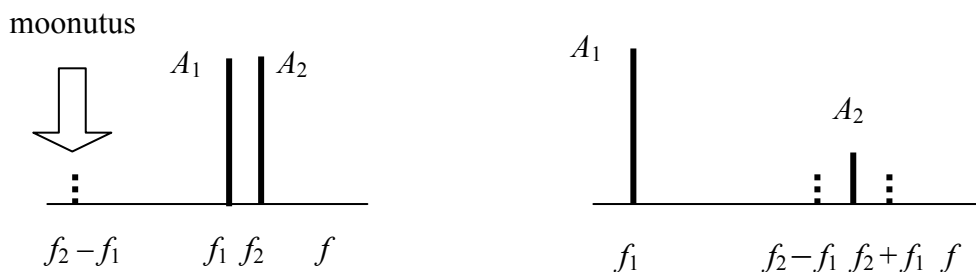
$$k' = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots}}$$

Kui $k < 10\%$, siis $k \cong k'$

Kahe tooni meetod

Meetodit kasutatakse seadmete mittelineaarsuse uurimisel, kus siinussignaalide summast koosneva signaali korral tekkivad uued komponendid (kombinatsioon-sagedused).

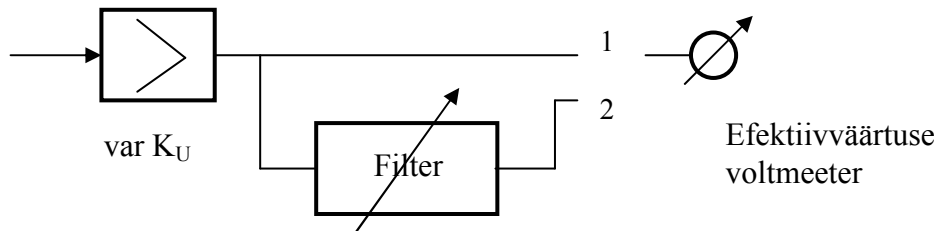
Testsignaal on kahe siinussignaali summa: $u_1(t) = A_1 \sin(2\pi f_1 t) + A_2 \sin(2\pi f_2 t)$. Signaalide amplituudi ja sageduse valikul kasutatakse kahte varianti.



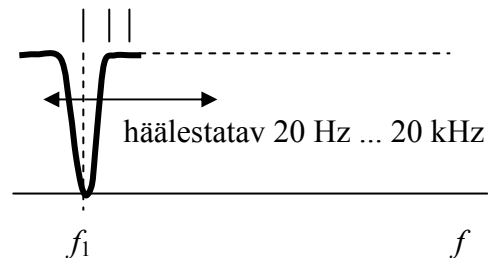
Moonutusi hinnatakse lisandunud komponentide (moonutuse saaduste) suuruse järgi.

Mittelineaarhoonutuste mõõtur

Mõõtur määrab harmooniliste teguri suuruse, mis võib olla vahemikus 0,05 ... 30 %. On kasutusel helisagedusseadmete mittelineaarsuse määramiseks.



Kasutatav režektorfilter



Mõõtmine koosneb 2 osast:

- alul (lülitasi asend 1) mõõdetakse signaali efektiivväärtus, seejuures muudetakse võimendustegurit nii, et näit oleks 100%;
- seejärel (lülitasi asend 2) häälestatakse filter signaali põhiharmoonilise sagedusele; saadav voltmeetri näit vastab harmooniliste teguritele k .

7.4 Signaali spektri mõõtmine

Statsionaarse signaali spektraalkomponentide mõõtmine toimub ajas mitte üheaegselt, vaid nn **järjestikanalüüsi teel**. Selleks saab kasutada ühekanalist seadet – **spektrianalüsaatorit** (*spectrum analyser SA*), mida häälestatakse valitud sagedusalas teatud kiirusega ümber. Häälestamise käigus mõõdetakse signaali spektraalkomponentide suurus (võimsus).

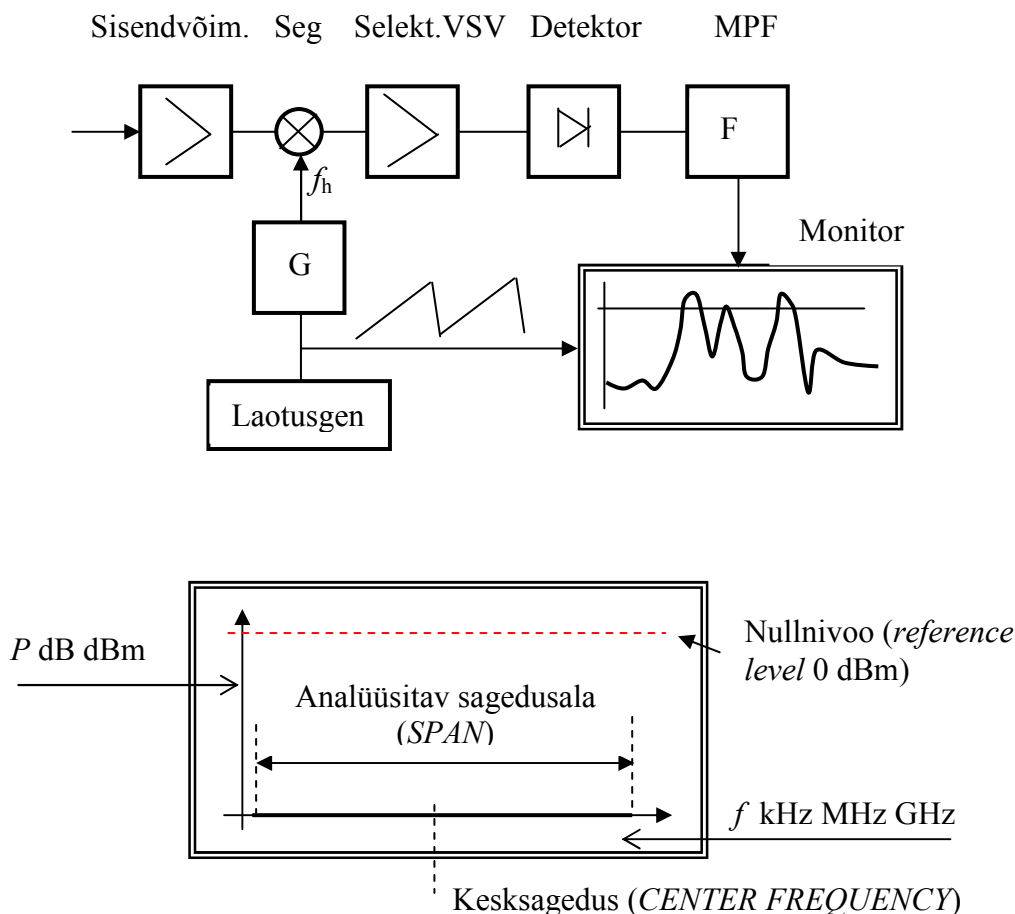
Täiuslikum analüsaator (nn **vektoranalüsaator** – *vector signal analyser VSA*) mõõdab signaali amplituudi ja faasi (või reaali- ja imaginaarosa).

Spektraalkomponentide üheaegne jälgimine on vajalik vaid mittestatsionaarsete signaalide korral, kus kasutatakse **paralleelanalüüsi**.

7.4.1 Spektrianalüsaator

Järjestiktoimega spektrianalüsaator on seade, mis oma sagedusliku selektiivsuse tõttu lahutab signaali spektraalkomponente üksteisest. Selleks on kasutusel selektiivne võimendi, mille häälestussagedus perioodiliselt kordudes muutub. Mingil fikseeritud ajahetkel eraldab võimendi kõigist sisendsignaali sageduskomponentidest selle osa, mis langeb suhteliselt kitsasse sagedusribasse Δf . See võimendatakse selektiivvõimendis ja läheb detektori kaudu väljundseadmele.

Selektiivsüsteemi aeglane ümberhäälestamine toimub generaatori (heterodüüni) sageduse muutmise teel. See on sama mis sisendi ümberhäälestamine teisele sagedusele, kusjuures vahesagedusvõimendi jääb töötama fikseeritud sagedusel. Tulemuseks on, et sisendsignaali sageduskomponendid eraldatakse üksteise järel summaarsest signaalist.

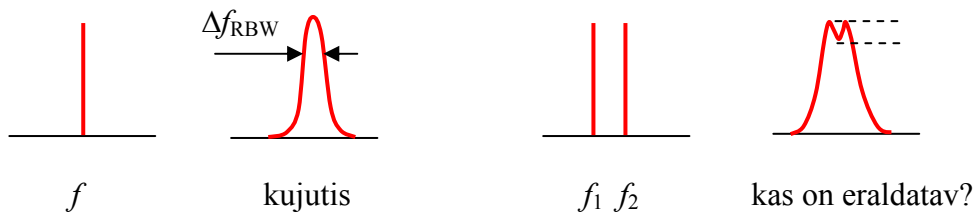


Sageduskomponentide lahutamise (selektiivsuse) tagab vahesagedusvõimendi, mille ribalaius on Δf_{RBW} (raadiosagedus-ribalaius *resolution bandwidth RBW*). Parema selektiivsuse saamiseks on kasutusel kahekordne sagedusmuundamine, suurte ja väikeste signaalide üheaegseks jälgimiseks aga võimendi logaritmiline karakteristik.

Detektorile järgneb madalpääsfilter F, mille ribalaius Δf_{VBW} (videoribalaius – *video bandwidth VBW*) võetakse tavaliselt suurem kui Δf_{RBW} . See suurus iseloomustab detektori filtrit, mis on vajalik juhusliku signaali ning häire mõju silumiseks.

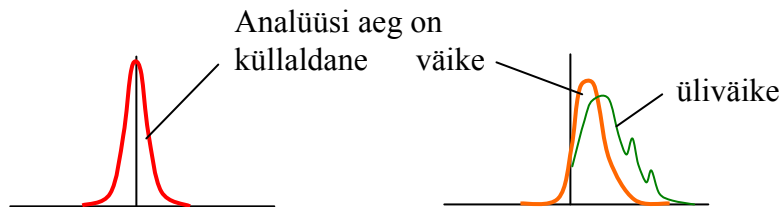
Lahutusvõime

Lahutusvõime oleneb ribalaiusest Δf_{RBW} ning on $\Delta f_L = (2 \dots 3) * \Delta f_{RBW}$.



Analüüsi aeg T_a on määratud laotuspinge tõusuaja kestusega, mis ei tohi olla alla teatud väärtuse. Kui analüsaatoris seatakse analüüsi aeg käsitsi, peab selle suurus olema

$$T_a \geq \frac{\Delta F_{anal}}{(\Delta f_{RBW})^2}, \text{ kus } \Delta F_{anal} \text{ on analüüsitava sagedusriba laius}$$



Dünaamiline ulatus (dünaamika diapsoon) on üheaegselt jälgitav maksimaalse ja minimaalse signaali erinevus detsibellides. Suurus ulatub kuni 80 .. 90 dB. Minimaalne signaali tase oleneb analüsaatori omamürast, maksimaalne tase aga analüsaatori lineaarsusest ja moonutuste tekkimisest suurte sisendsignaali korral.

Sageduse mitmekordne muundamine analüsaatoris FSH3:

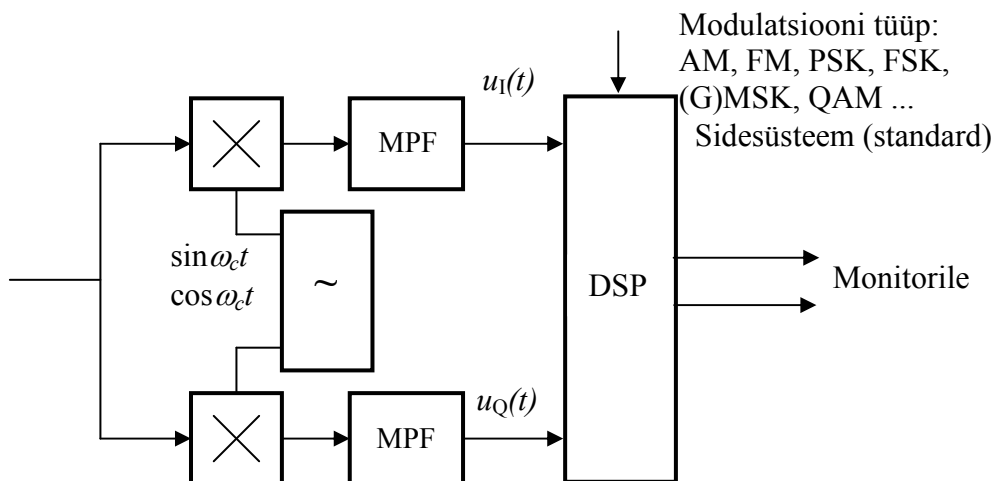
Vahesagedus: 1. – 7231/4031 MHz

2. – 831 MHz

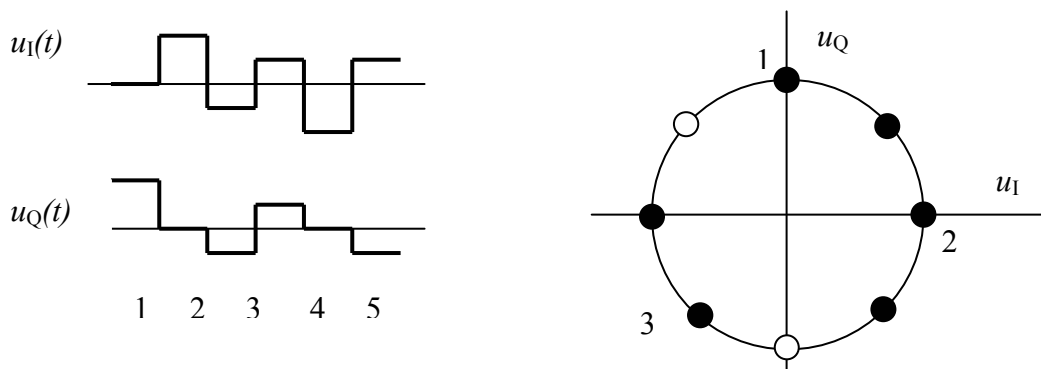
3. – 31.25 MHz

7.4.2 Vektoranalüsaator

Vektoranalüsaatoriks nimetatakse täiuslikumat spektrianalüsaatorit, milles tavalise detektori asemel on kaks faasitudlikku sünkrodetektorit. Neist ühe juhtsignaaliks on vahesagedusega koosinussignaali, teisel aga vahesagedusega siinussignaali. Detektorite väljundis on koosinus- ja siinuskomponendi amplituudile vastavad signaalid (nn I- ja Q-kanali signaalid) $u_I(t)$ ja $u_Q(t)$. Nende järgi toimub vastavalt modulatsioonisüsteemile ja sidesüsteemi standardile lõplik demoduleerimine digitaalses signaaliprotsessoris DSP.



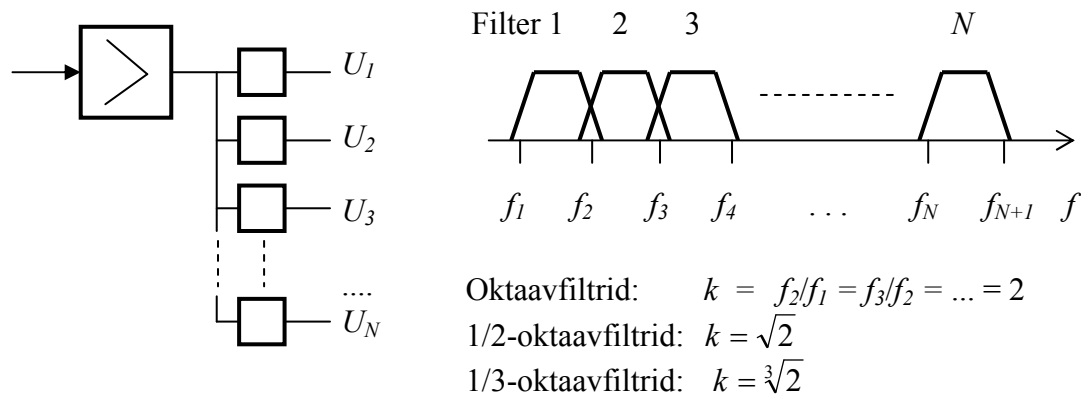
Näide: Modulatsioon 8PSK



Signaali punkt:	1	2	3	...
Faas:	90°	0°	-225°	...
Bin. signaal:	010	000	101	...

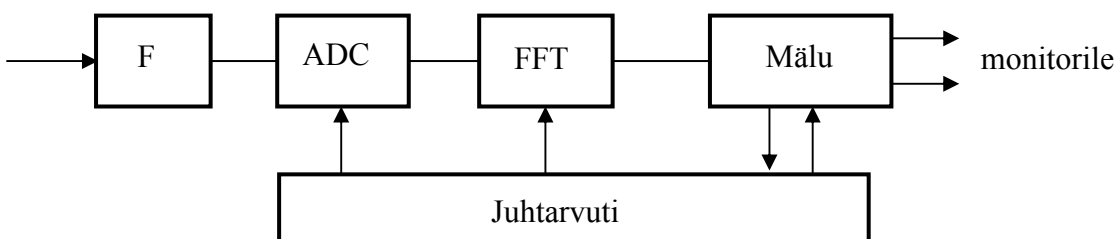
7.4.3 Paralleeltoimega spektrianalüsaator

Suur arv paralleelselt töitavaid filtreid lahutab signaali spektraalkomponentideks, mida jälgitakse, mõõdetakse ja registreeritakse. Üheaegne ehk paralleelanalüüs on vajalik mittestatsionaarsete signaalide analüüsil. Kasutusel helisagedustel.

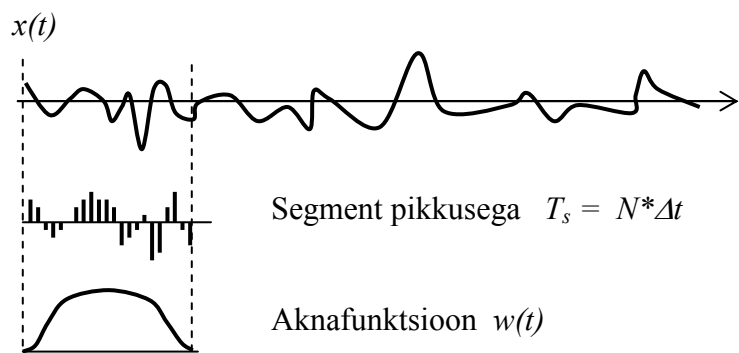


FFT-analüsaator

Sagedusalas kuni 100 kHz on võimalik arvutada signaali kõik spektraalkomponendid reaajas üheaegselt, kasutades selleks Fourier' teisendust. Tulemuseks on kompleks-spekter.

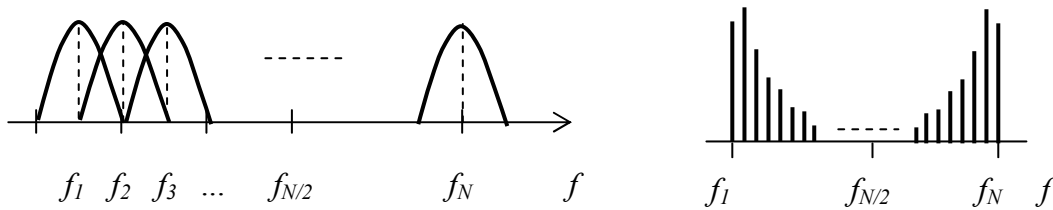


Analüüsitava signaali lähendatakse peale madalpääsfiltri F analoog-digitaalmuundurile ADC. Digitaalsignaali moodustatakse paketid (nn segmendid) lugemite arvuga $N = 64, 128, \dots, 2048$ sammu. FFT abil arvutatakse Fourier' teisendus, mis annab kõigi spektraalkomponentide kompleksamplituudid. Analüüsi korratakse paljude segmentidega ning leitakse keskmine. Segmente on otstarbekas enne analüüsi korrutada aknafunktsiooniga, mis vähendab järske hüppeid segmendi algus- ja lõpuosas.



FFT arvutab spektraalkomponentide kompleksamplituudid sagedustel, mille väärtused on $f_1 = 1/T_s$, $f_2 = 2f_1$, $f_3 = 3f_1$ jne kuni f_N . Sagedused alates $f_{N/2}$ kuni f_N vastavad negatiivsetele sagedustele. Reaalsignaali korral on negatiivsetel ja positiivsetel sagedustel paiknevad spektri osad ühesugused.

Analüüsi tulemus vastab paralleelselt lülitatud filtrite komplektile, mille filtrite sageduskarakteristiku kuju on $\sin x/x$ (joonisel näidatud vaid selle keskosa).



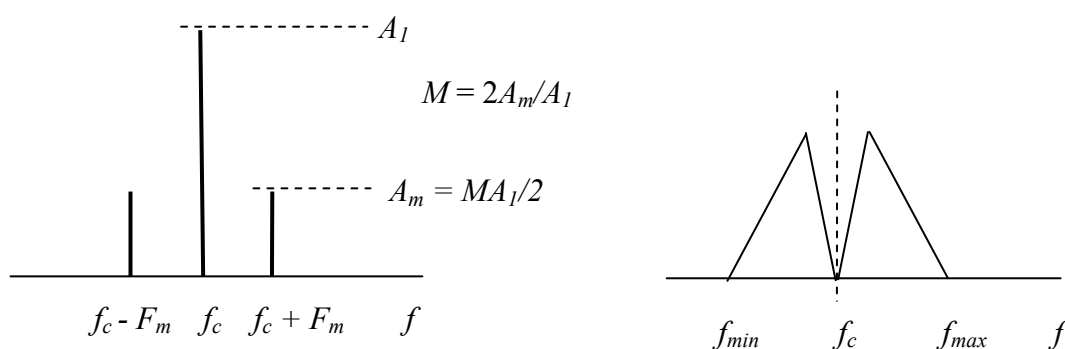
[FFT-analüsaatori lahutusvõime](#) on ligikaudu võrdne sagedussammuga

$$\Delta f = f_1 = 1/(N \cdot \Delta t).$$

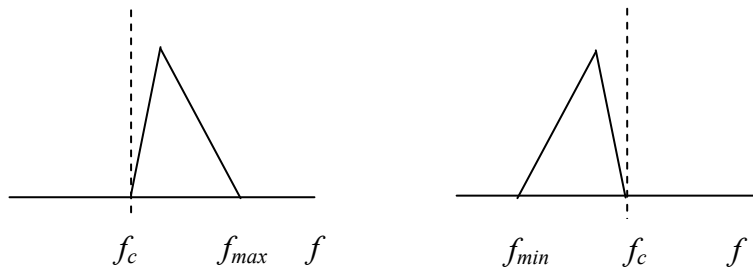
Täpsem analüüs näitab, et lahutusvõime oleneb kasutatavast aknafunktsioonist ja on mõnevõrra halvem kui arvutatud Δf .

7.5 Tüüpilised mõõtmised spektrianalüsaatoriga

[Amplituudmodulatsioon](#)



SSB



Sagedusmodulatsioon (FM)

Spektri kuju oleneb modulatsiooniindeksist M_F

Siinuselise moduleeriva

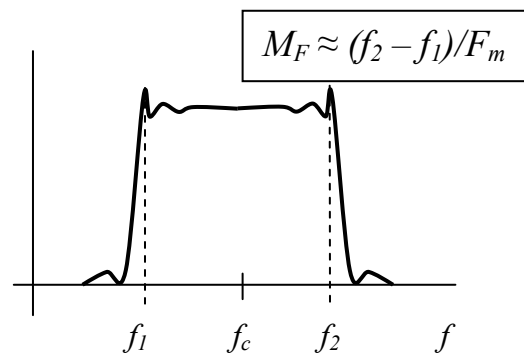
signaali jaoks $M_F = f_\Delta / F$

a) kitsaribaline ($M_F < 0,8$)

– spekter nagu AM,

indeks $M_F \approx 2A_m/A_1$

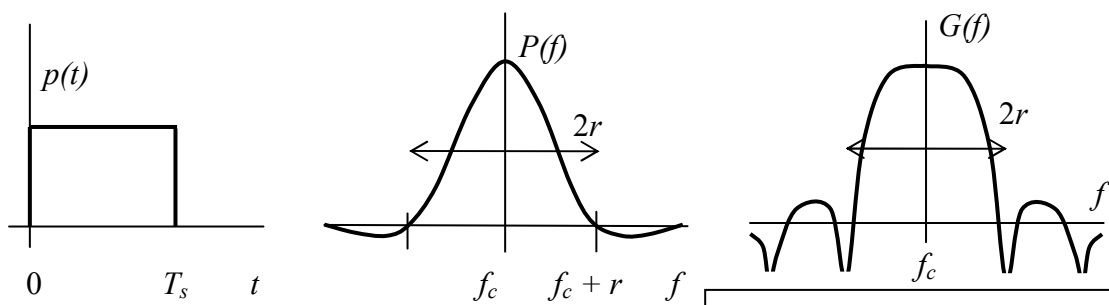
b) laiaribaline



Amplituudmanipulatsioon ASK

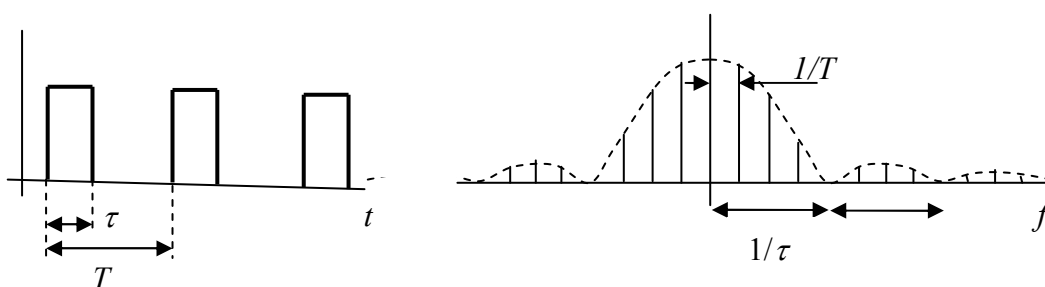
Spekter oleneb sümboli amplituudi ajalisest käigust

Lihtaim juhul – NRZ-formaadis nelinurk, mille pikkus võrdub sümboli pikkusega

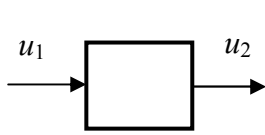


Paljude digitaalmodulatsiooni tüüpide omadus: konstantse kõrgusega spektrijooned

Impulss-signaali spekter



2. ja 3. järku moonutused



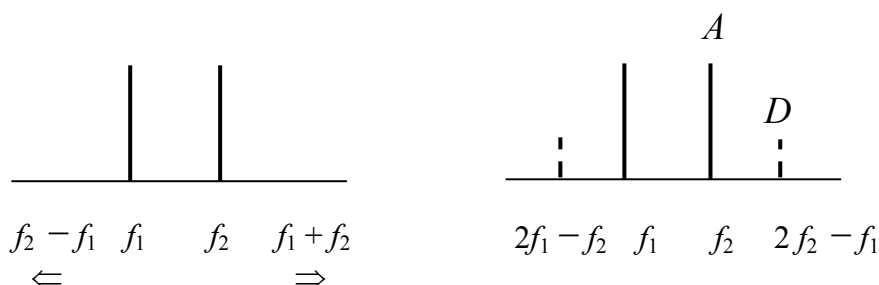
Ideaalses süsteemis $u_2 = K_1 u_1$
 Reaalses süsteemis $u_2 = K_1 u_1 + K_2 u_1^2 + K_3 u_1^3 + \dots$

↑ ↑
 2. järku 3. järku
 moonutused

Kahe siinuse summast koosneva signaali korral saame:

$(\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t)^2 \Rightarrow$ tekkivad sagedused $2f_1, 2f_2, f_1 \pm f_2$

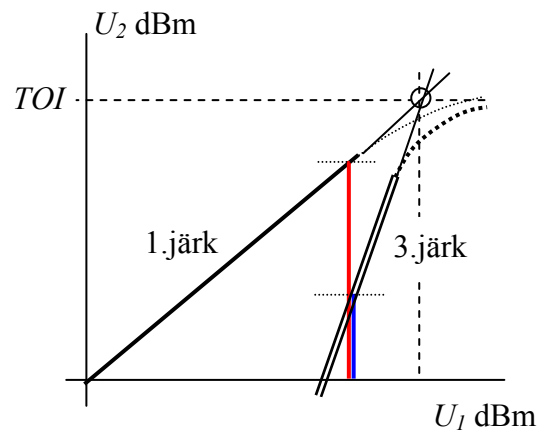
$(\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t)^3 \Rightarrow$ tekkivad sagedused $3f_1, 3f_2, 2f_1 \pm f_2, f_1 \pm 2f_2$



3. järku moonutuse saadused on spektris sisendsageduste f_1 ja f_2 lähedal.

Nende suurust iseloomustab parameeter TOI – 3. järku moonutuste lõikepunkt (*third order intercept point TOI*).

TOI on siinussignaali suurus, mille juures tekkiv 3. järku moonutus on sama suur kui sisendsignaali.



Logaritmilistes ühikutes mõõdetud suuruste A ja D järgi saame arvutusvalemi:

$$3 * (TOI - A) = TOI - D;$$

$$TOI = \frac{3 * A - D}{2}.$$

