

7. MUUD MODULATSIOONIVIISID

7.1 Ortogonaalne sagedustihendus OFDM

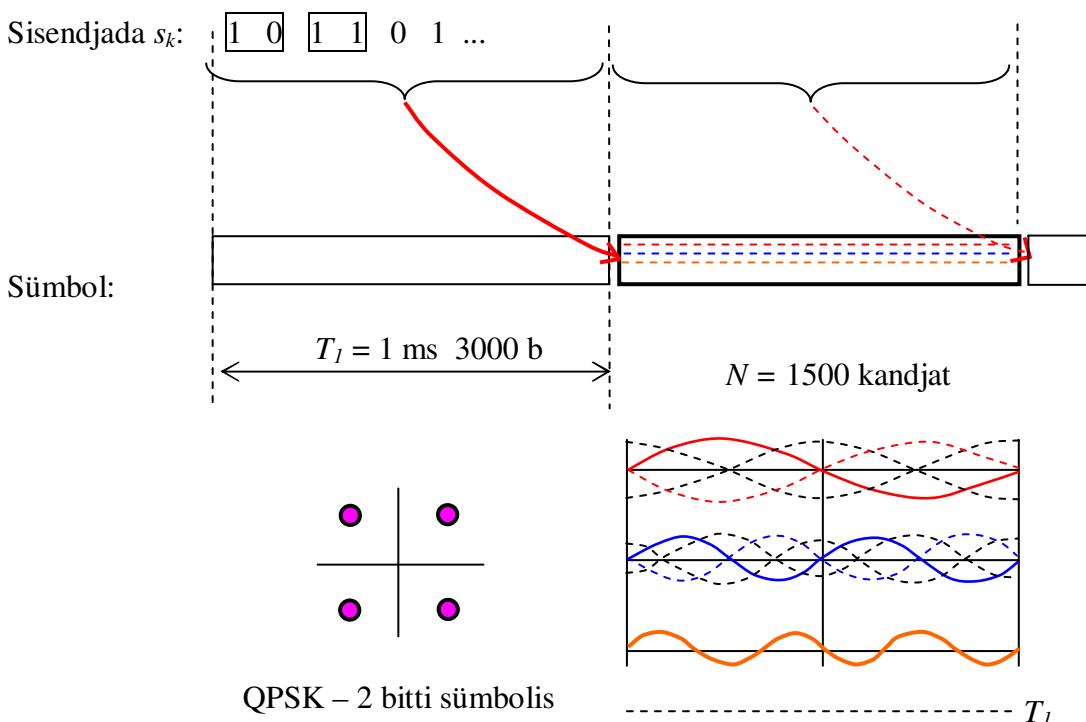
Kiire binaarse andmevoo teisendamisel järjestik-paralleeltüüpi muunduris saame signaali muundada suure hulga üheaegselt muutuvate digitaalsete osasignaalide summaks, mida edastatakse üheaegselt multitoon-modulatsiooni abil.

Multitoon-modulatsioon (MTM) on sagedustihenduse variant, kus suur arv kandjaid genereeritakse kas filtrite abil või nn mitmetaktiliste süsteemidega. Kandjad moduleeritakse osasignaalidega ja summaarne signaal edastatakse vastuvõtjale, kus toimub vastupidine teisendus. See on kasutusele tulnud kiiretoimelistes digitaalsidesüsteemides. Allpool vaatleme digitaalse multitoon-modulatsiooni (DMT) moodust, mida nimetatakse ortogonaalseks sagedustihenduseks.

Ortogonaalse sagedustihenduse OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex OFDM) korral moodustatakse paljude kandesageduste summa Fourier' teisenduse abil:

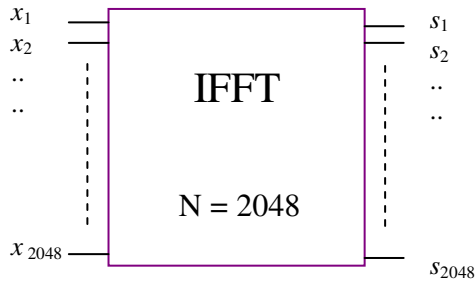
- üksikute kandjate (Fourier' rea liidetavate) amplituud ja faas määratakse binaarsignaali järgi;
- iga kandja edastab 2 bitti (QPSK: igal sagedusel amplituudi reaal- ja imaginaarosa, või $\pm 1 \pm j$);
- kandjate summa on kompleksne väljundsignaal, mille liidetavad ei muutu ühe sümboli vältel.

Signaali formeerimise näide



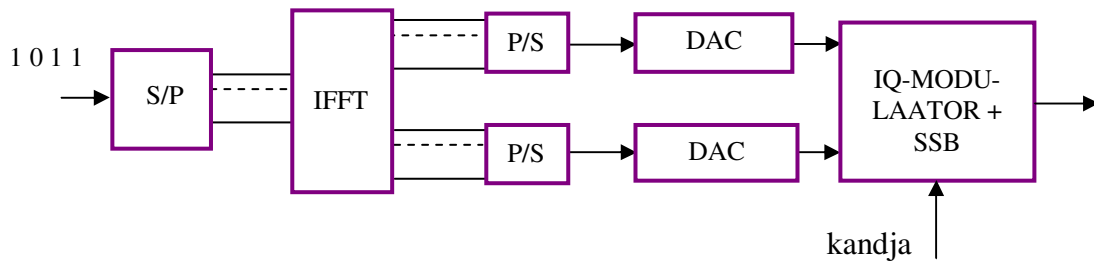
Igal kandjal kasutatakse modulatsiooni QPSK, mis edastab ühel kandjal 2 bitti sümbolis. Vajalik kandjate arv on $N = 1500$. Kandjate vahekaugus (sagedussamm) on $\Delta f = 1/T_l$. Saatja väljundsignaal moodustatakse Fourier' teisenduse abil (N harmoonilise amplituudid \rightarrow kompleksne ajasignaal). Kasutusel on kiire **Fourier' pöördteisenduse** algoritm (*Inverse Fast Fourier Transform IFFT*). Selleks tuleb esialgne bitijada muundada järjestik-paralleelmuunduri S/P abil sümboli

pikkusele vastavateks pakettideks, mida töödeldakse IFFT abil. Järgneb kahekanaline paralleeljärjestikmuundur P/S, DAC ning IQ-modulaator.



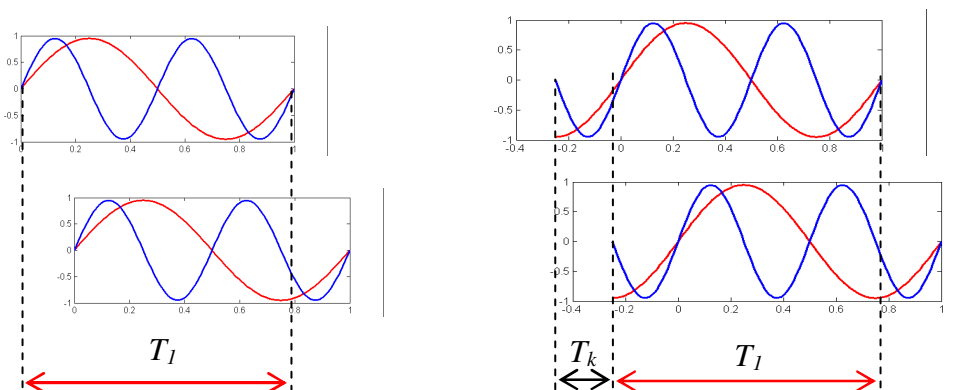
Vastuvõtul toimub arvutus kiire Fourier' teisenduse (*Fast Fourier Transform FFT*) algoritmiga.

Ühe signaalilõigu (sümboli) vältel on kandjate amplituudi ja algfaasi suurused konstantsed. See on edastuse härekindluse seisukohalt oluline omadus.



Kandjate arvu vähendamiseks saab OFDM-signaali moodustada ka modulatsiooni 16QAM (igal sagedusel 4 bitti) või 64QAM (igal sagedusel 6 bitti) abil. See nõuab, et müra oleks vastavalt madalam.

Mitmekiirelise levi olukorras (*multipath propagation*) on vastuvõtja sisendis mitme erineva ajalise hilistusega signaali summa. See rikub harmooniliste täpse ortogonaalsuse, mistõttu neid ei ole enam võimalik üksteisest eraldada. Olukorra parandamiseks viiakse sisse ajaline **kaitseintervall**. Selleks on iga sümboli alguses tema lõpuosa koopia (10-25%), mistõttu õnnestub saada summaarsest signaalist lõigud pikkusega T_I . Ajaline nihe vastab signaali sageduskomponentide faasinihkele, mille mõju on aga kõrvaldatav diferentsiaalmeetodil.



Kaitseintervalli osa edastatakse kahekordselt. Seetõttu tuleb sama keskmise edastuskiiruse säilitamiseks suurendada edastuskiirust sümboli põhiosa ajal. Sümboli kestus on FFT põhisageduse f_I perioodist T_I , millele liitub kaitseintervall T_k : $T_s = T_I + T_k$.

OFDM edastuskiirus on sümbolite arv sekundis

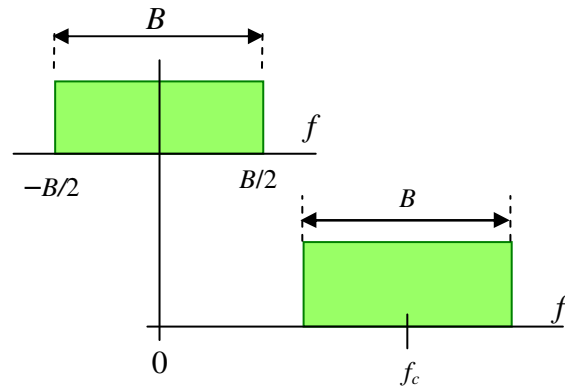
$$r = 1/T_s = 1/(T_l + T_k).$$

Sagedussamm (sageduslik lahutusvõime) on

$$\Delta f = f_l = 1/T_l.$$

Vajalik sagedusriba laius on $B = N/T_l$.

Ortogonaalne sagedustihendus on kasutusel digitaalse heliringhäälingu DAB (*Digital Audio Broadcasting DAB*) ja digitaalse televisiooni-ringhäälingu DVB (*Digital Video Broadcasting DVB*) modulatsioonina. Samuti on ta kasutusel uutes mobiilsidesüsteemides.



OFDM → COFDM

Digitaalne heliringhäälingusüsteem DAB on realiseeritud 4 võimalikus variandis (moodused I – IV). Ajalise kaitseintervalli pikkus on kõigil variantidel ~25 % sümboli pikkusest. Kasutatav modulatsioon on QPSK. Sagedusriba laius on 1,5 MHz.

	I	II	III	IV
Kandjate arv	1536	768	384	192
Sagedussamm	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Sümboli pikkus	1 ms	0,5 ms	0,25 ms	0,125 ms

Digitaalne televisiooniringhäälingusüsteem DVB-T on realiseeritud kahes variandis – 8 k ja 2 k. Kaitseintervalli pikkus on 25, 12, 6 või 3 % sümboli pikkusest. Kasutatakse modulatsiooniviise 4QAM (QPSK), 16QAM ja 64QAM. Sagedusriba laius on 7,6 MHz.

Variant	8 k	2 k
Kandjate arv	6817	1705
Sagedussamm	1116 Hz	4465 Hz
Sümboli pikkus	896 μ s	224 μ s

Uus heliringhääling
DRM (*Digital Radio
Mondiale*) < 30 MHz

OFDM spekter

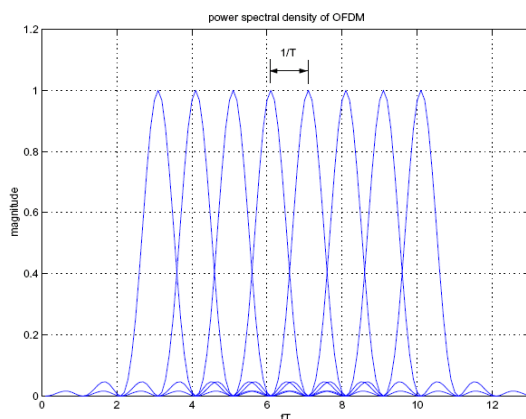


Abb. 4.16: Leistungsdichtespektrum von OFDM

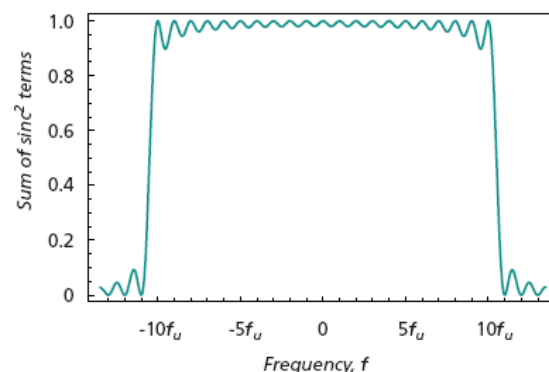


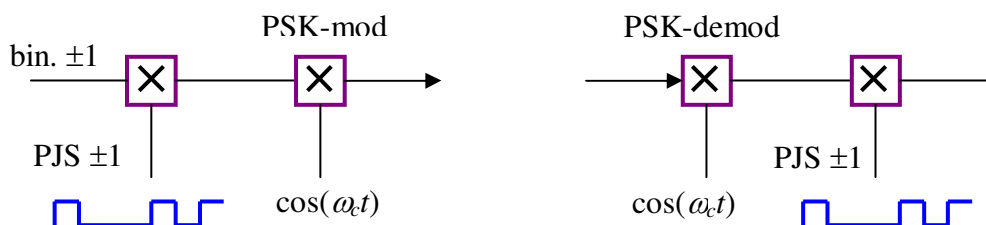
Figure 5
A group of adjacent sinc² functions (21 in this case) approximates to a block.

7.2 Hajaspektermodulatsioon

Hajaspektermodulatsioon (*spread-spectrum modulation*) kasutab digitaalsignaalide edastamiseks nende moduleerimist laiaribalise mürataolise signaaliga. Tulemuseks on signaali spektri hajutamine väga laiale sagedusalale, mis ületab tunduvalt infoedastuseks vajalikku minimaalset sagedusala. Selle modulatsiooniviisi põhilised kasutusvaldkonnad on:

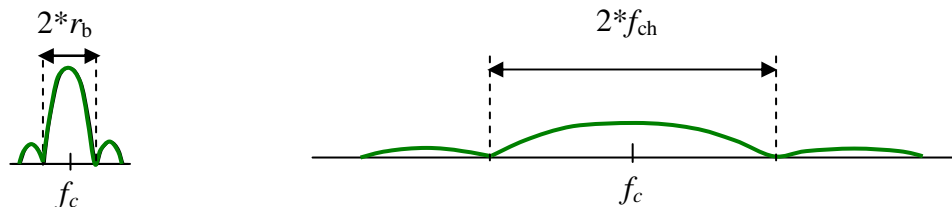
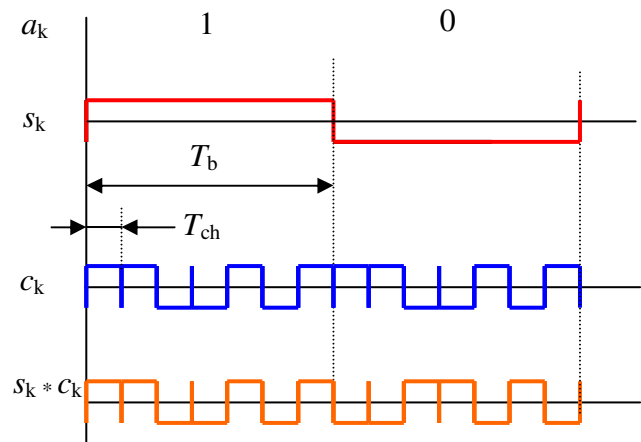
- signaali salastamine, kuna mürasarnane signaal on raskesti avastatav ja detekteeritav;
- koodjaotusega ühispöördussüsteem (*code division multiple access CDMA*), kus see võimaldab edastada ühes ja samas sagedusribas üheaegselt palju signaale.

Otsejadaga hajaspektermodulatsiooni (*direct sequence spread spectrum DSSS*) juhtumil korrutatakse digitaalsignaal läbi pseudojuhusliku signaaliga (PJS), mille formaat on ± 1 . Edasi järgneb digitaalmodulatsioon (näiteks PSK või QPSK), mis viib signaali kandesagedusele ω_c . Vastuvõtja suudab signaali demoduleerida vaid siis, kui ta saab kasutada täpselt samasugust PJS (kood-signaali). Vastasel juhul ei ole signaal vastuvõtja sisendis mürast eristatav.



Sisendbitile a_k vastab polaarne signaal s_k , mille biti pikkus joonisel on $T_b = 7 T_{ch}$. Siin T_{ch} on pseudojuhusliku signaali samm (samm ehk pilk – *chip*). Sammu pikkus on $T_{ch} \ll T_b$ (takt-sagedus $f_{ch} \gg r_b$).

Signaali s_k spektri kuju vastab funktsioonile $\text{sinc}(f/r_b)$, mille pealehe laius on $2r_b$. Pseudojuhusliku signaali c_k spektri kuju on $\text{sinc}(f/f_{ch})$, mille pealehe laius on $2f_{ch}$. Korrutise $s_k * c_k$ spekter on vastavalt signaalide s_k ja c_k spektrite konvolutsioon. Selle laius on $2(f_{ch} - f_b) \approx 2f_{ch}$ ja kuju on ligilähedane c_k spektrile.



Polaarsete signaalide korrutise $s_k * c_k$ asemel on saatjas sageli lihtsam kasutada loogiliste signaalide (1/0) liitmist mooduliga 2, mis annab sama tulemuse.

Edastusel liituv häire $j(t)$ mõju

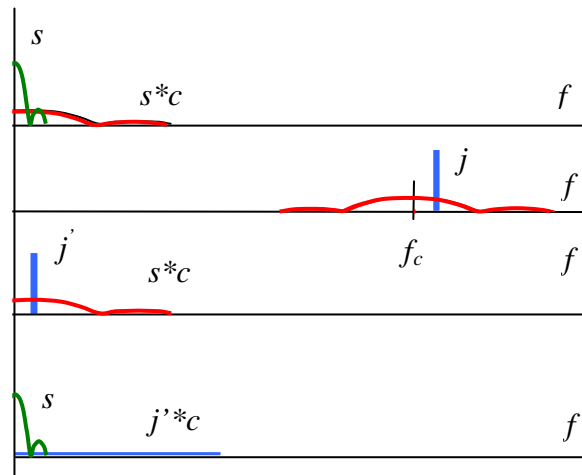
Demodulaatori väljund on

$$y_k = s_k * c_k + j',$$

kus j' on häiresignaali. Peale y_k korrutamist c_k -ga saame

$$\begin{aligned} u_k = y_k * c_k &= s_k * c_k^2 + j' * c_k = \\ &= s_k + j' * c_k, \end{aligned}$$

kuna alati $c_k^2 = 1$.



Korrutamise järel on kitsaribaline müra muutunud laiaribaliseks, mille mõju kasulikule signaalile saab filtri abil oluliselt vähendada.

Suhet $PG = T_b/T_{ch}$ nimetatakse hajaspektermodulatsiooni ülekandeteguriks (*processing gain PG*). PG on arvuliselt võrdne pseudojuhusliku signaali sammude arvuga N ühe biti kohta.

QPSK variandis on sünfasse ja kvadratuurse kanali pseudojuhuslikud signaalid (nn koodsignaalid) erinevad. Näiteks kasutab globaalne positsioonimissüsteem (*Global Positioning System GPS*) hajaspektermodulatsiooniga signaale, mida edastavad 24 suhteliselt madalal lendavat satelliiti. Kui vastuvõtja saab kätte 4 ... 5 satelliidi signaalid, suudab ta määrata oma asukoha koordinaadid, kiiruse jne. Kõik satelliidid edastavad signaale L1 ja L2:

- signaal L1 sagedusel 1575,42 MHz on QPSK-modulatsiooniga,
- selle sünfase kanal kannab standardkoodi (*course-acquisition code C/A*) kiirusega 1,025 Mb/s,
- kvadratuurkanal kannab täppiskoodi (*precision code P*) kiirusega 10,25 Mb/s,
- signaal L2 edastab sagedusel 1227,6 MHz vaid täppiskoodi.

7.3 Pseudojuhusliku signaali genereerimine

Pseudojuhusliku signaalina (PJS) kasutatakse lineaarse tagasisidega nihkeregistri abil genereeritud binaarsignaali, mille paljud omadused on lähedased valgele mürale. See signaal tagab:

- hea eraldatavuse sama PJS nihutatud versioonist, st omab minimaalset autokorrelatsioonifunktsiooni,
- hea eraldatavuse teistest samas süsteemis kasutatavatest pseudojuhuslikest signaalidest, st omab minimaalset vastastikust korrelatsioonifunktsiooni teiste signaalide suhtes.

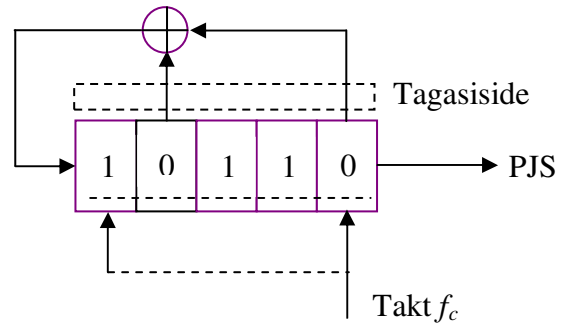
Vaatleme tagasisidega nihkeregistri tööd lineaarse rekursiivjada genereerimisel. Joonisel on toodud 5-astmeline nihkeregister, mida juhib taktsignaali sagedusega f_c . Tagasiside on võetud 2. ja 5. astmelt, registri sisendisse antav signaal moodustatakse tehtega summa mooduliga 2. Tagasiside kohtade sümbolne esitus polünoomkujul (nn generaatorpolünoom) on $G(x) = 1 + x^2 + x^5$. Valitud tagasiside tagab maksimaalse pikkusega pseudojuhusliku jada (nn M-jada). 5 astme korral on jada pikkuseks $2^N - 1 = 2^5 - 1 = 31$ sammu. Selle möödudes hakkab väljundsignaal perioodiliselt korduma, kusjuures perioodi pikkuseks on M-jada pikkus.

Nihkeregistri töö kirjeldamiseks kirjutame välja registri algseisu ja selle muutused. Tabelit jätkates saab veenduda, et väljund hakkab 31 sammu järel perioodiliselt korduma.

Formaati 1/−1 viidud pseudojuhusliku signaali omadused on lähedased juhuslikule mürale. Tema autokorrelatsioonifunktsioon $R(k) = 1$, kui $k = 0$, muudel nihke k väärtustel $R(k) = 0$. Signaali võimsus on alati $(\pm 1)^2 = 1$. PJSi määravad täielikult 3 parameetrit – registri pikkus, tagasiside kohad (st generaatorpolünoom) ja algseis. Neid teades saab vastuvõtjas tekitada samasuguse PJSi.

Registri algseis	1 0 1 1 0	Väljund
1. samm	0 1 0 1 1	0
2. samm	0 0 1 0 1	1
3. samm	1 0 0 1 0	1
4. samm	0 1 0 0 1	0

Kasutatav registri pikkus on enamasti palju suurem – 15 ja isegi 42. Kui $N = 11$, siis $2^{11} - 1 = 2047$, kui $N = 33$, $2^{33} \approx 8,6 \cdot 10^9$). Mitme M-jada üheaegsel kasutamisel süsteemis on puuduseks väike jadade arv, mille vastastikune korrelatsioon oleks küllalt väike. Keerukamaid koodisignaale on võimalik saada mittelineaarsete tehete abil mitmest pseudojuhuslikust signaalist. Näiteks Goldi koodid on saadud kahe PJS liitmisel tehtega summa mod-2, Kasami koodid aga veel keerukamal viisil.



7.4 Sagedushüplusega modulatsioon

Alternatiivne meetod signaali spektri hajutamiseks on muuta juhuslikul viisil signaali kandesagedust. Sel juhul toimub spektri laienemine ajas teatud hüpetena. Taolist moodust nimetatakse sagedushüpluseks (*frequency hopping FH*). Vastavat modulatsiooniviisi tähistatakse FHSS.

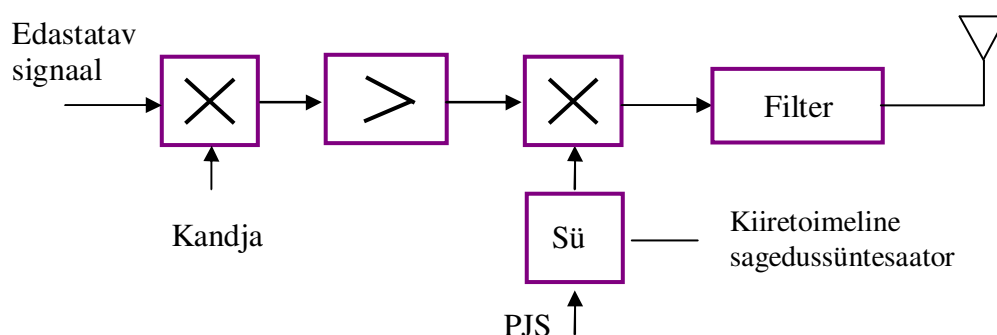
Aeglane sagedushüplus – igal hüppe väärtusel edastatakse mitu signaali sümbolit (bitti).

Kiire sagedushüplus – ühe sümboli edastamise ajal toimub palju hüppeid.

Signaali salastamise seisukohalt on kiiret sagedushüplust raskem jälgida, kuid ka raskem tehniliselt realiseerida.

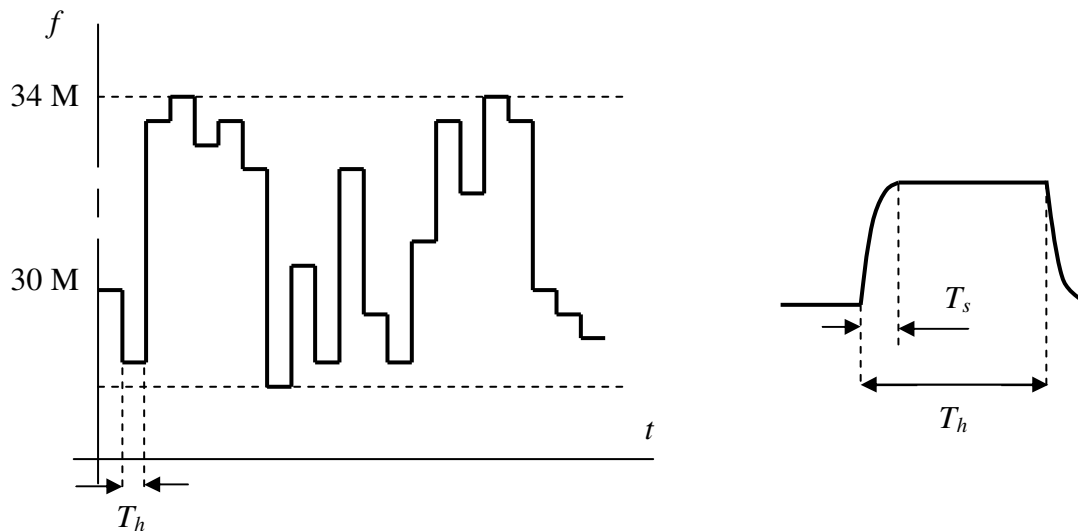
Struktuurskeemil on näidatud edastatava digitaalsignaali modulaator (FSK, MFSK vms. modulaator) koos vahesagedusvõimendiga, millele järgneb teine segusti. Selle juhtsignaali tekitab sagedussüntesaator, mille sageduse muutumist juhivad pseudojuhuslik signaal PJS.

Vastuvõtjas peab sagedushüplusega signaali demoduleerimiseks olema täpselt sama pseudojuhusliku signaaliga juhitud sagedussüntesaator. Kiiretoimelistes sünkronisaatorites on raske tagada täpseid faasivahekordi, mistõttu sagedushüplusega süsteemi vastuvõtja kasutab tavaliselt mittekoherentset vastuvõttu.



Sagedussüntesaator peab olema kiiretoimeline, et tagada võimalikult kiire üleminek uuele kandesagedusele. Iga hüppe alguses tekib sageduse siirdeaeg, mis peab võrreldes hüppe kestusega olema küllalt väike: $T_s \ll T_h$.

Sagedushüplusega signaali avastamise keerukus on otseselt määratud ajavahemikuga, mille vältel signaali sagedus püsib teatud väärtusel. Kui sageduse väärtusi on palju ja hüplus on küllalt kiire, on igal sagedusel viibimise kestus tühiselt väike osa kogu edastusajast.



The concept of frequency hopping, a type of spread spectrum, goes back a long way. Perhaps the earliest description of the technique is in Nikola Tesla's U.S. patent # 723188, 1903, the application for it having been filed even earlier in July 1900. Tesla came up with the idea after demonstrating the world's first radio-controlled submarine in 1898, when it became apparent the radio signals controlling the submarine needed to be secure from "being disturbed, intercepted, or interfered with in any way." His patented design is comprised of many separate transmitter/receiver pairs of differing carrier frequency (or other exclusive characteristic), which are alternately activated by an encoding wheel in a predetermined order of succession, duration, and combination.

Frequency hopping is also mentioned in radio pioneer Johannes Zenneck's book *Wireless Telegraphy* (German, 1908, English translation McGraw Hill, 1915), although Zenneck himself states that Telefunken had already tried it several years earlier. Zenneck's book was a leading text of the time and it is likely that many later engineers were aware of it. A Polish army officer Leonard Danielewicz came up with the idea in 1929. Several other patents were taken out in the 1930s, including one by Willem Broertjes (Germany 1929, US patent # 1,869,695, 1932). During WWII the US Army Signal Corp was inventing a communication system called SIGSALY for communication between Roosevelt and Churchill, which incorporated spread spectrum, but due to its top secret nature, SIGSALY's existence did not become known until the 1980s.

The most celebrated invention of frequency hopping was that of actress Hedy Lamarr and composer George Antheil, who in 1942 received patent number 2,292,387 for their "Secret Communications System". (Lamarr had learned about the problem at defense meetings she had attended with her husband at the time, Fritz Mandl, an arms manufacturer. ^[1]) This version of frequency hopping used a piano-roll to change between 88 frequencies, and was intended to make radio-guided torpedoes harder for enemies to detect or to jam. The patent came to light during patent searches in the 1950s when ITT and other private firms began to develop Code Division Multiple Access, a civilian form of spread spectrum, though the Lamarr patent had no direct impact on subsequent technology. It was in fact ongoing military research at MIT Lincoln Laboratory, Magnavox Government & Industrial Electronics Corporation, ITT and Sylvania Electronic Systems that led to early spread spectrum technology in the 1950s. Parallel research on radar systems and a technologically similar concept called "phase coding" also had an impact on spread spectrum development.



Ülesanded

1. OFDM sümboli pikkus on 0,5 ms. Leida kandesagedused. Kui suur hilistumine on lubatud mitmekiirelisel vastuvõtul, kui kaitseintervalli pikkus on 0,125 ms?
2. OFDM sümboli pikkus on 1 ms ja kaitseintervalli pikkus on 0,25 ms. Leida vajalik kandesageduste arv ja sagedusriba laius, kui edastatava digitaalsignaali bitikiirus on 2 Mb/s. Modulatsioon on kas QPSK või 64QAM.
3. OFDM kasutab sümboleid pikkusega 0,2 ms, kaitseintervall on 25% sümbolist. Leida vajalik kandesageduste arv ja sagedusriba laius, kui digitaalsignaali bitikiirus on 0,8 Mb/s. Modulatsioon on 16QAM (50% kandjatest) ja 64QAM.
4. Pseudojuhusliku signaali generaatori nihkeregistri pikkus on $L = 4$, tagasiside kohad 1. ja 4. aste ning algseis 1011. Kui pikk on genereeritav M-jada? Kirjutada välja jada esimesed 10 väärtust.