

MODULATSIOON IRO0010

Loengumaterjal 13

[Julia Berdnikova, Ants Meister]

MUUD MODULATSIOONIVIISID

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

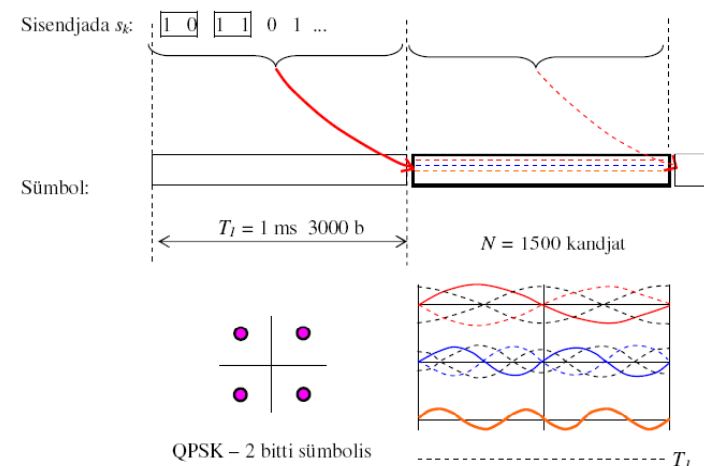
Multitoon-modulatsioon (MTM) on sagedustihenduse variant, kus suur arv kandjaid genereeritakse kas filtrite abil või nn. mitmetaktiliste süsteemidega. Kandjad moduleeritakse osasignaalidega ja summaarne signaal edastatakse vastuvõtjale, kus toimub vastupidine teisendus. See on kasutusele tulnud kiiretoimelistes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

ORTOGONAALNE SAGEDUSTIHENDUS (OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplex*) (COFDM *coded OFDM*)

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



12.12.2011

3

12.12.2011

2

12.12.2011

4

Signaali formeerimise näide

Igal kandjal kasutatakse modulatsiooni QPSK, mis edastab ühel kandjal 2 bitti sümbolis.

Vajalik kandjate arv on $N = 1500$.

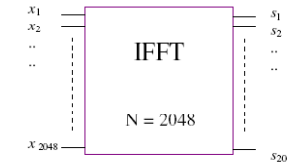
Kandjate vahekaugus (sagedussamm) on $\Delta f = 1/T_1$.

Saatja väljundsignaal moodustatakse Fourier' teisenduse abil (N harmoonilise amplituudid \rightarrow kompleksne ajasignaali). 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.

12.12.2011

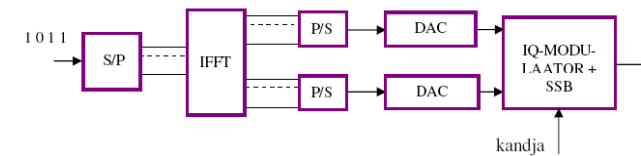
5

Signaali formeerimise näide



12.12.2011

6



OFDM

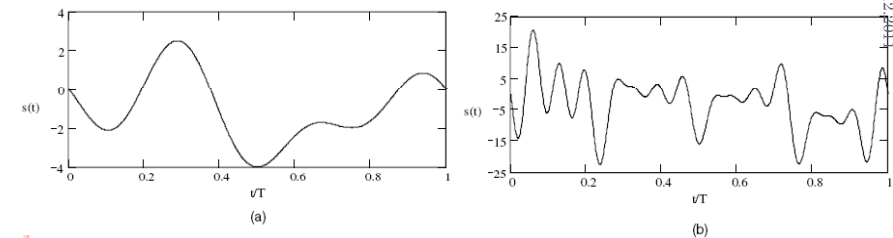
Vastuvõtul toimub arvutus kiire Fourier' teisenduse (*Fast Fourier Transform FFT*) algoritmiga. Ühe signaalilõigu (sümboli) vältel on kandjate amplituudi ja alfaasi suurused konstantsed. See on edastuse häirekindluse seisukohalt oluline omadus.

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.

12.12.2011

7

OFDM



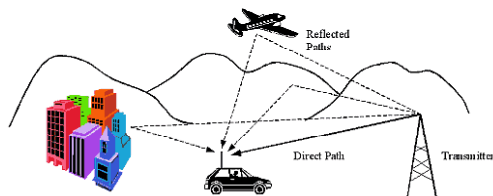
12.12.2011

8

Figure 12.1 Examples of baseband OFDM signal waveform. (a) 4-channel QPSK-OFDM signal with each subcarrier modulated by one of four possible symbols in the QPSK constellation with amplitude $\sqrt{2}$ and phases of $\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$, and $7\pi/4$, respectively. (b) 16-channel QAM-OFDM signal with each subcarrier modulated by one of 16 possible symbols in the square 16QAM constellation located on $(-3, -1, +1, +3) \times (-3, -1, +1, +3)$ grid.

MITMEKIIRELINE LEVI

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_1 . Ajaline nihe vastab signaali sageduskomponentide faasinihkele, mille mõju on aga kõrvaldatav diferentsiaalmeetodil.

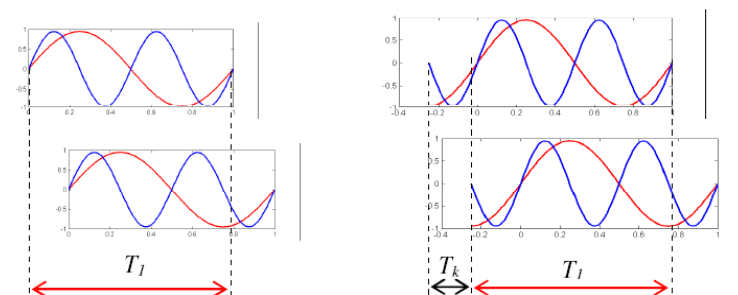


<http://www.digitalradiotech.co.uk/cofdm.htm>

12.12.2011

9

MITMEKIIRELINE LEVI



Kaitseintervalli (*guard interval*) osa edastatakse kahekordselt. Seetõttu tuleb sama keskmise edastuskiiruse säilitamiseks suurendada edastuskiirust sümboli põhiosa ajal. Sümboli kestus on FFT põhisageduse f_1 perioodist T_1 , millele liitub kaitseintervall T_k : $T_s = T_1 + T_k$.

12.12.2011

10

OFDM

OFDM edastuskiirus on sümbolite arv sekundis

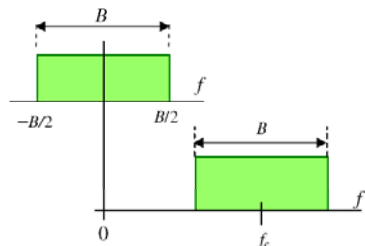
$$r = 1/T_s = 1/(T_1 + T_k)$$

Sagedussamm (sageduslik lahutusvõime) on

$$\Delta f = f_1 = 1/T_1$$

Vajalik sagedusriba laius on

$$B = N/T_1$$



12.12.2011

11

OFDM

Ortogonaalne sagedustihendus on kasutusel digitaalse heliringhäälingu DAB (*Digital Audio Broadcasting DAB*) ja digitaalse televisiooniringhäälingu DVB (*Digital Video Broadcasting DVB*) modulatsioonina. Samuti on ta kasutusel uutes mobiilsidesüsteemides ning WLAN (IEEE 802.11a, g, n) süsteemides.

12.12.2011

12

DIGITAALNE HELIRINGHÄÄLINGUSÜSTEEM DAB

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

12.12.2011

	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

13

DIGITAALNE TELEVISIOONIRINGHÄÄLINGUSÜSTEEM DVB-T

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.

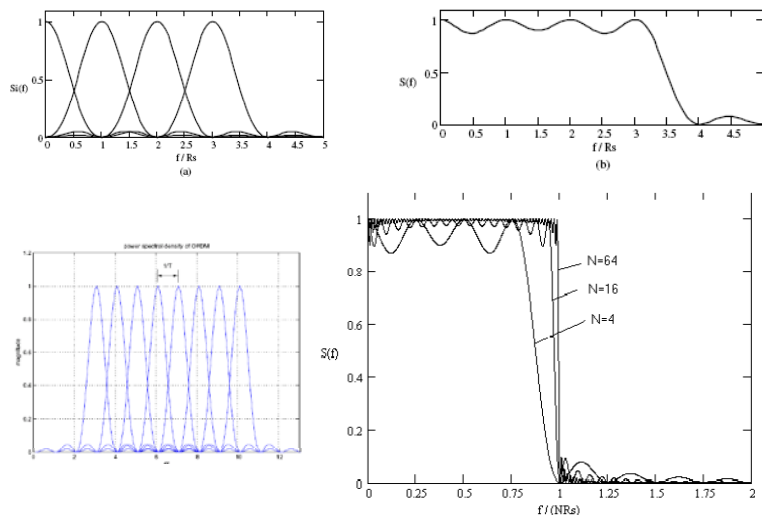
12.12.2011

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

14

OFDM VÕIMSUSE SPEKTRAALTIHEDUS



12.12.2011

15

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.

(*Linear feedback shift register – LFSR, m-sequence*)

12.12.2011

16

M-jada

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 tehetega summa mooduliga 2. Tagasiside kohtade sümboolne esitus polünoomkujul (nn generaatorpolünoom) on

$$G(x) = 1 + x^2 + x^5.$$

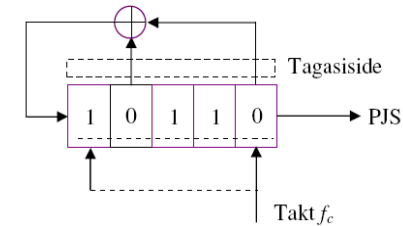
Valitud tagasiside tagab maksimaalse pikkusega pseudojuhusliku jada (nn M-jada). 5 astme korral on jada pikkuseks $2^N - 1 = 2^5 - 1 = 31$ sammu. Selle möödudes hakkab väljundsignaal perioodiliselt korduma, kusjuures perioodi pikkuseks on M-jada pikkus.

12.12.2011

17

LFSR

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



12.12.2011

18

LFSR

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.

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 signalist. Näiteks Goldi koodid on saadud kahe PJS liitmisel tehetega summa mod-2, Kasami koodid aga veel keerukamal viisil.

12.12.2011

19

PSEUDOJUHSLIK SIGNAAL (PJS)

LFSR SEQUENCE (LINEAR FEEDBACK SHIFT REGISTER), M-JADA (M-SEQUENCE)

Näide: $N=15$

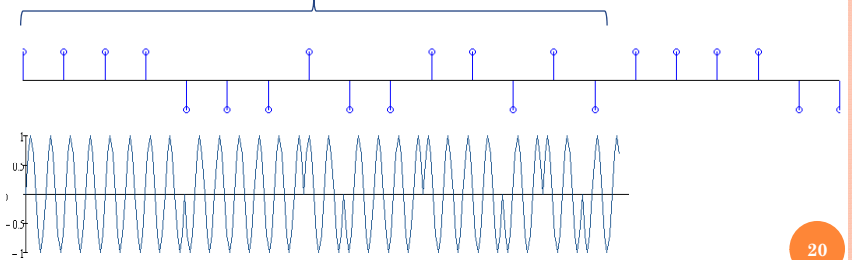
Algväärtused: (4 bitti) 1 1 1 1

Valem: (feedback 4,3 bits) $b_i = (-1) \cdot b_{i-4} \cdot b_{i-3}$

$N=15$

XNOR või XOR

A		B		XNOR Truth Table	
A	B	A	B	Input A B	Output
1	1	-1	-1	0 0	1
1	-1	1	1	0 1	0
-1	1	1	1	1 0	0
-1	-1	-1	-1	1 1	1



Pseudojuhuslik signaal

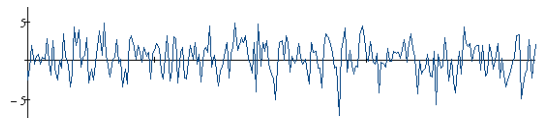
12.12.2011

20

PSEUDOJUHUSLIK SIGNAAL (PJS) JA MÜRA

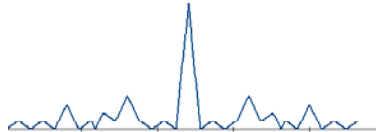
SNR=-6dB

PSJ + müra

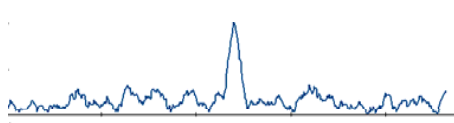


Vastuvõtt:

Optimaalse vastuvõtja väljund ilma mürata



Optimaalse vastuvõtja väljund müraga



12.12.2011

21

HAJASPEKTERMODULATSIOON

Hajaspektermodulatsioon (*spread-spectrum modulation*) kasutab digitaalsignaali 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:

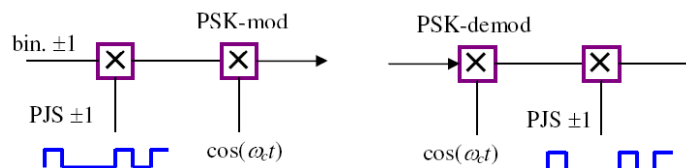
- signaali salastamine, kuna mürasarnane signaal on raskesti avastatav ja detekteeritav;
- koodjaotusega ühispöördussüsteem (*code division multiple access CDMA*), kus see võimaldab edastada ühes ja samas sagedusribas üheaegselt palju signaale.

12.12.2011

22

OTSEJADAGA HAJASPEKTERMODULATSIOON

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 (koodsignaali). Vastasel juhul ei ole signaal vastuvõtja sisendis mürast eristatav.

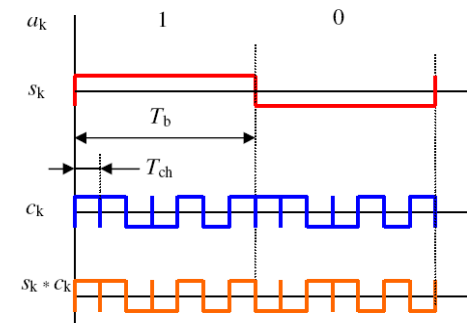


12.12.2011

23

OTSEJADAGA HAJASPEKTERMODULATSIOON

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 $T_{ch} \ll T_b$ (taktsagedus $f_{ch} \gg r_b$).



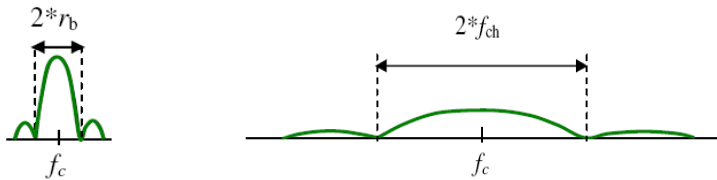
12.12.2011

24

OTSEJADAGA HAJASPEKTERMODULATSIOON

Signaali s_k spektri kuju vastab funktsioonile $\text{sinc}(f/r_b)$, mille pealehe laius on $2r_b$. Pseudojohusliku 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.

25

12.12.2011

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

$$u_k = y_k * c_k = s_k * c_k^2 + j' * c_k = s_k + j' * c_k,$$

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 pseudojohusliku signaali sammude arvuga N ühe biti kohta.

26

12.12.2011

GPS

QPSK variandis on sünfaasse ja kvadratuurse kanali pseudojohuslikud 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 sünfaasne 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.

27

12.12.2011

SAGEDUSHÜPLUSEGA MODULATSIOON

Alternatiivne meetod signaali spektri hajutamiseks on muuta juhuslikul viisil signaali kandesagedust. Sel juhul toimub spektri laienemine ajas teatud hüpätena. 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.

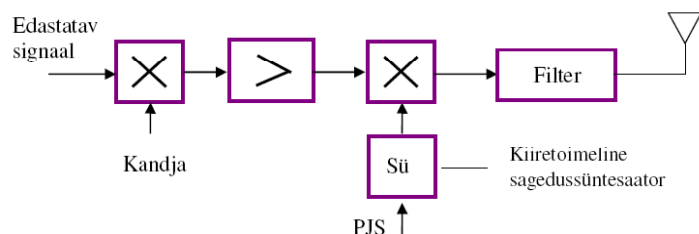
Signaali salastamise seisukohalt on kiiret sagedushüplust raskem jälgida, kuid ka raskem tehniliselt realiseerida.

28

12.12.2011

SAGEDUSHÜPLUSEGA MODULATSIOON

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

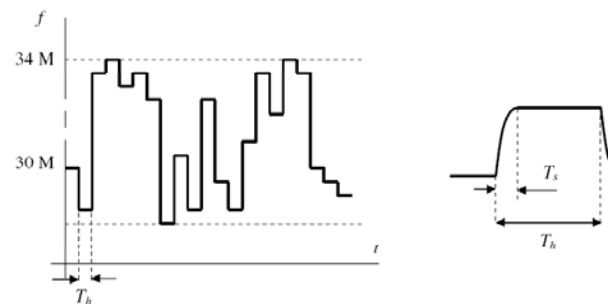


12.12.2011

29

SAGEDUSHÜPLUSEGA MODULATSIOON

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.



12.12.2011

30

SAGEDUSHÜPLUSEGA MODULATSIOON

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.

12.12.2011

31

KOKKUVÕTE

- MUUD MODULATSIOONIVIISID
- ORTOGONAALNE SAGEDUSTIHENDUS
- PSEUDOJUHUHLIKU SIGNAALI GENEREERIMINE
- HAJASPEKTERMODULATSIOON
- SAGEDUSHÜPLUSEGA MODULATSIOON

KÜSIMUSED

12.12.2011

32