

9. Süsteemid ja signaalid

Arvutivõrgud IEE1100

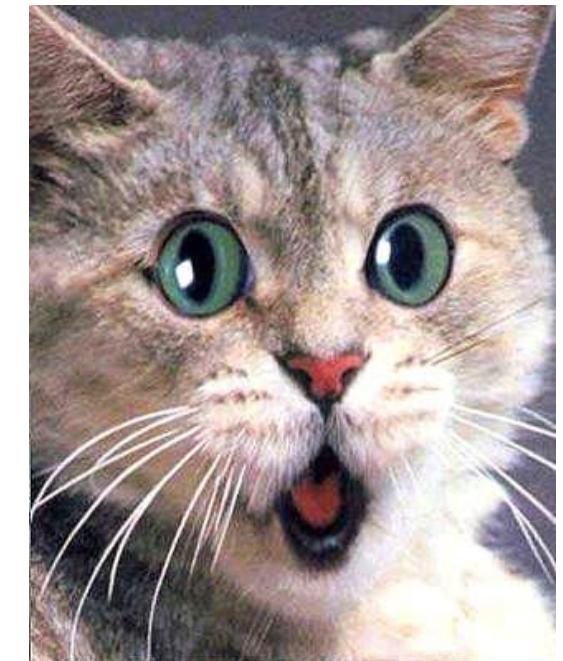
Ivo Müürsepp

Informatsioon

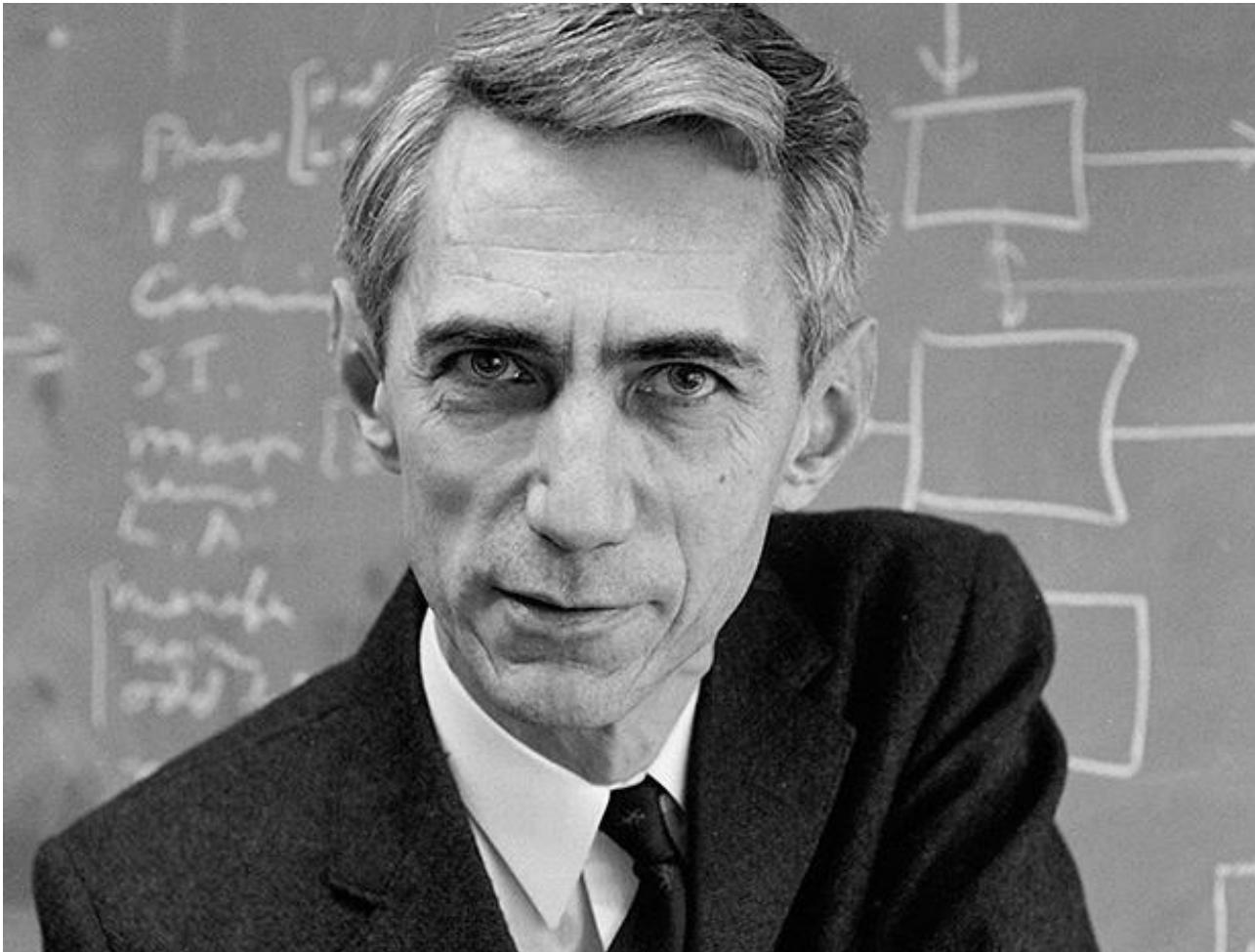
- Informatsioon – teadmatuse vähenemise määr (Üllatuse suurus).
- Teadmised (*knowledge*) – Õigustatud tõene uskumus.
- Andmed (*data*) - muutujate x väärituded.
- Sõnumis m sisalduva informatsiooni hulk

$$I(m) = \log_a \left(\frac{1}{p(m)} \right) = -\log_a p(m)$$

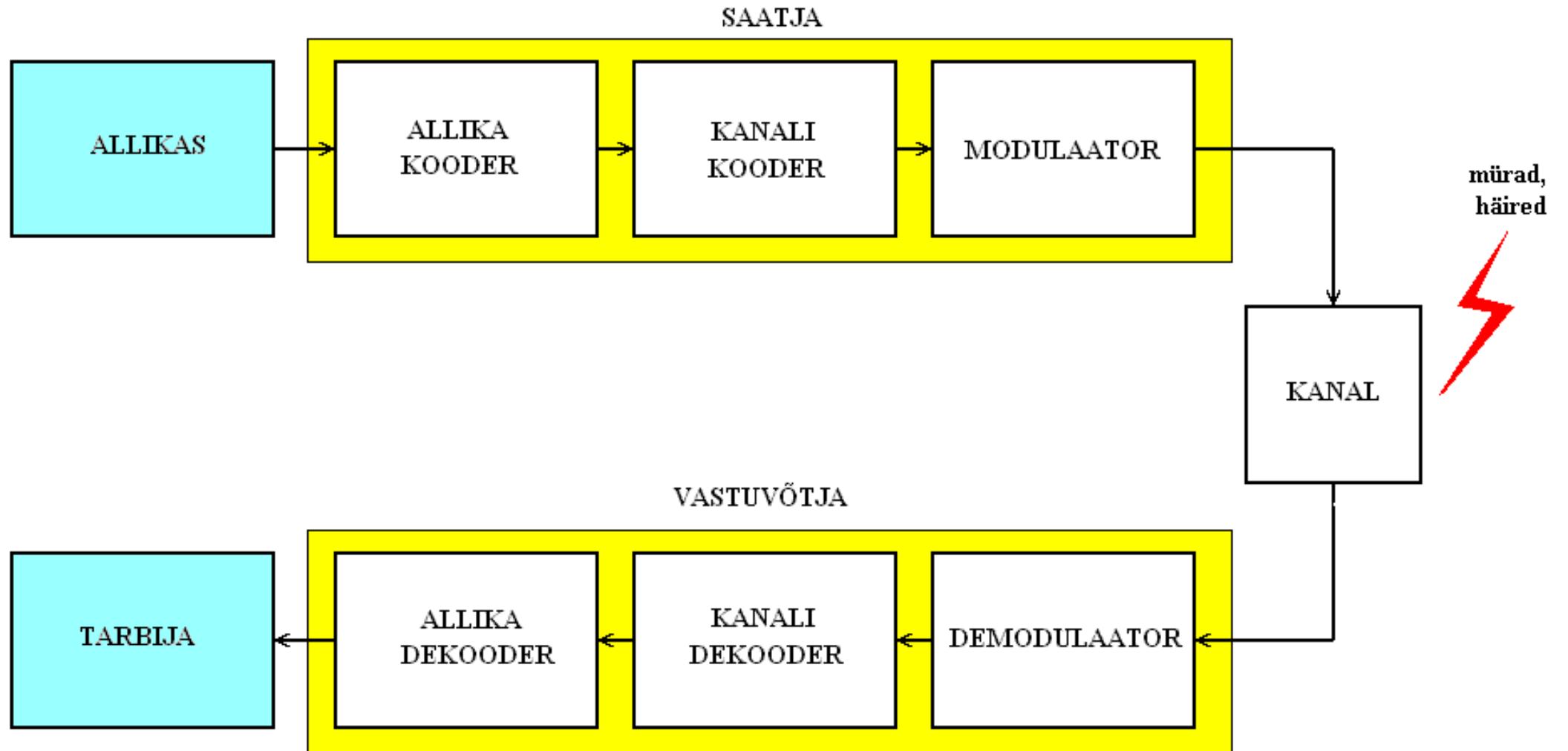
- Informatsiooni mõõtühikud:
 - $a = 2$: bitt, bait, *nibble*
 - $a = e$: nat
 - $a = 10$: hartley



Claude Elwood Shannon

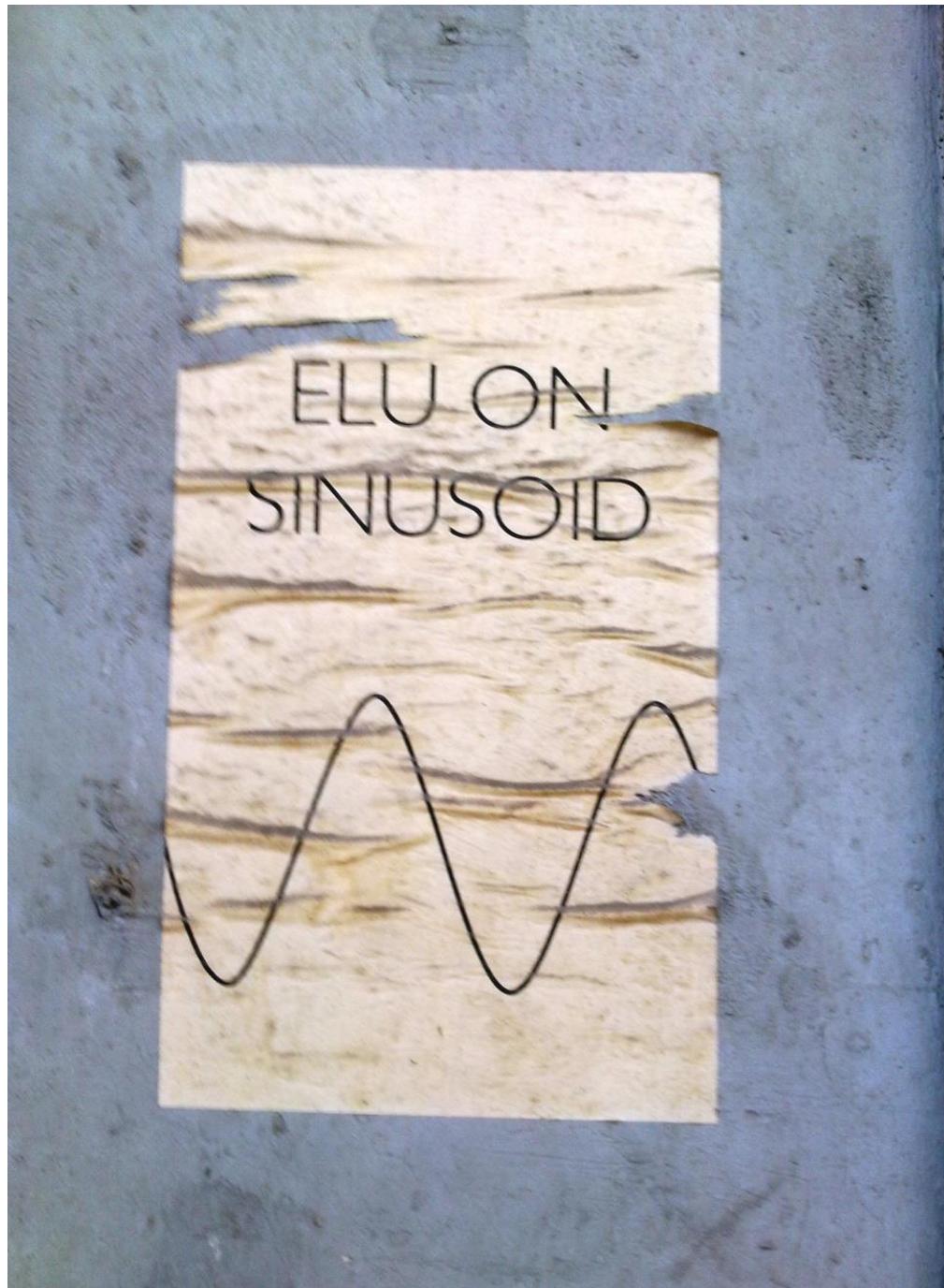


Shannon-Weaveri mudel



Signaal

- Ajas või ruumis muutuv füüsikaline suurus.
 - $s(t)$ $s(x,y,z)$ $s(x,y,z,t)$
- Signaaliga side mõistes on tegemist juhul, kui mainitud suurus edastab informatsiooni mingi nähtuse käitumise või parameetrite kohta.
- Analoogsignaali väärthus on võrdeline ehk analoogne ülekantava füüsikalise suuruse väärtsusega.
- Digmaalsignaal esitab ülekantavat suurust numbrilise väärtsusena.
- Signaali väärtsused võivad olla nii realsed $s(t)$ või kompleksarvulised: $\text{Re}(s) + j \cdot \text{Im}(s)$



Siinussignaal

$$s(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + \varphi)$$

- A – Amplituud ehk maksimaalne kõrvalekalle keskmisest.
- f – Sagedus ehk ajaühikus toimuvate täisvõngete arv.
 - Mõõtühikuks Herts [Hz]
- $\omega = 2\pi f$ – Ringsagedus mis näitab ajaühikus kaetava faasinurga suurust.
 - Mõõtühikuks s^{-1} ehk [rad/s]
- T – Periood ehk ühe täisvõnke kestus.
 - Pöördvõrdeline sagedusega $T = 1/f$
 - Mõõtühikuks sekund [s]
- φ – Algfaas ehk signaali alghetk.
 - Mõõdetakse radiaanides [rad], mõnikord antakse ka kraadides [°]

Siinuspinge

- Sidetehnikas on enamlevinuimaks signaaliks pinge $u(t)$ [V].
- Siinus (harmoonilise) pinge ajaline kuju avaldub:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(2\pi ft + \varphi) \text{ [V].}$$

- U_m on siinuspinge amplituud.
- Pinge väärustust võidakse esitada ka kui maksimaalse ja minimaalse vääruse vahet ehk tipust-tippu pinget (*peak to peak*) U_{pp}
- Harmoonilise pinge korral on $U_{pp} = 2 \cdot U_m$

Efektiivväärtus

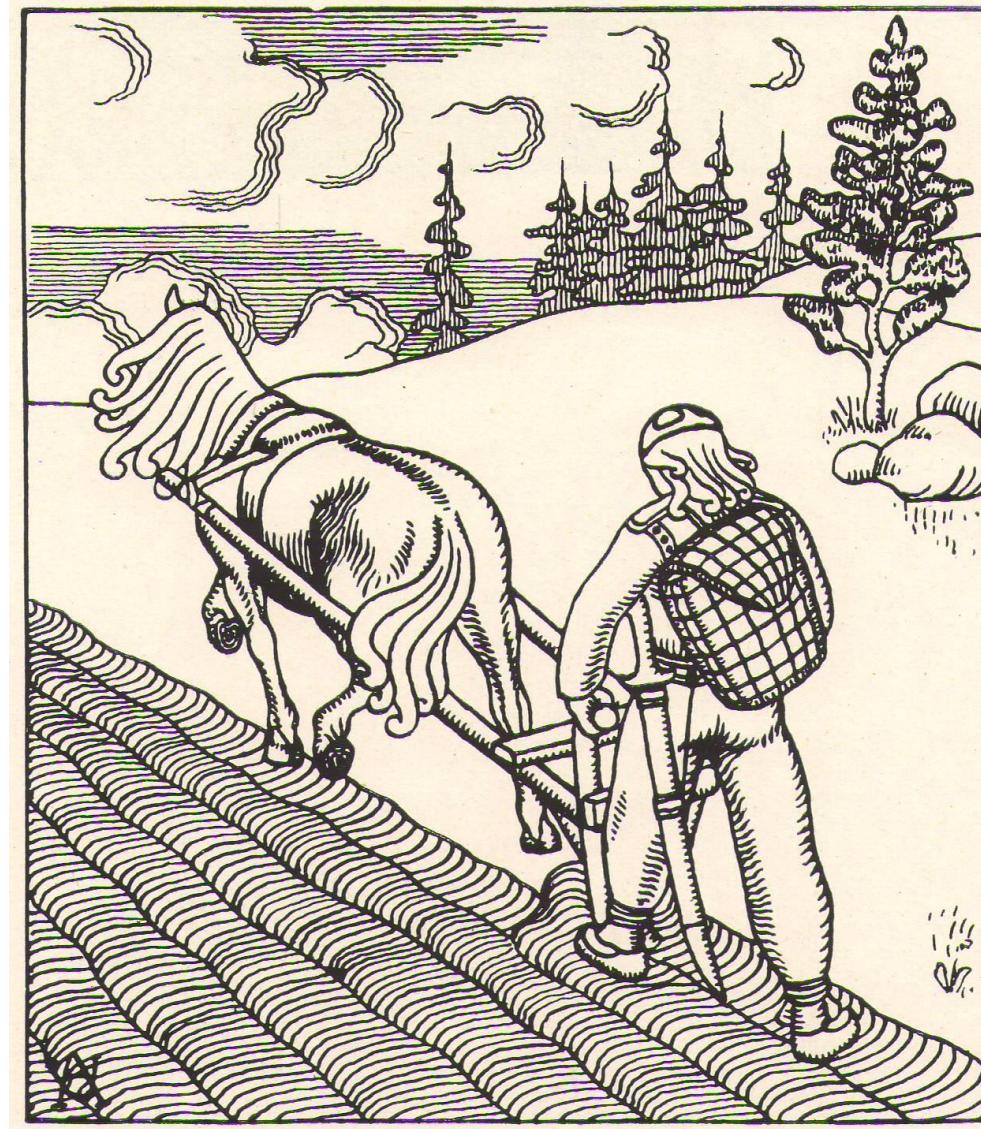
- Pinge efektiivväärtus (*RMS – Root Mean Square*) on defineeritud kui

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

- Sarnaselt saab leida ka muude signaalide efektiivväärtust
- Harmoonilise pinge efektiivväärtus on teiste pinge väärtsuse esitustega seotud alljärgnevalt:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_{pp}}{2\sqrt{2}}$$

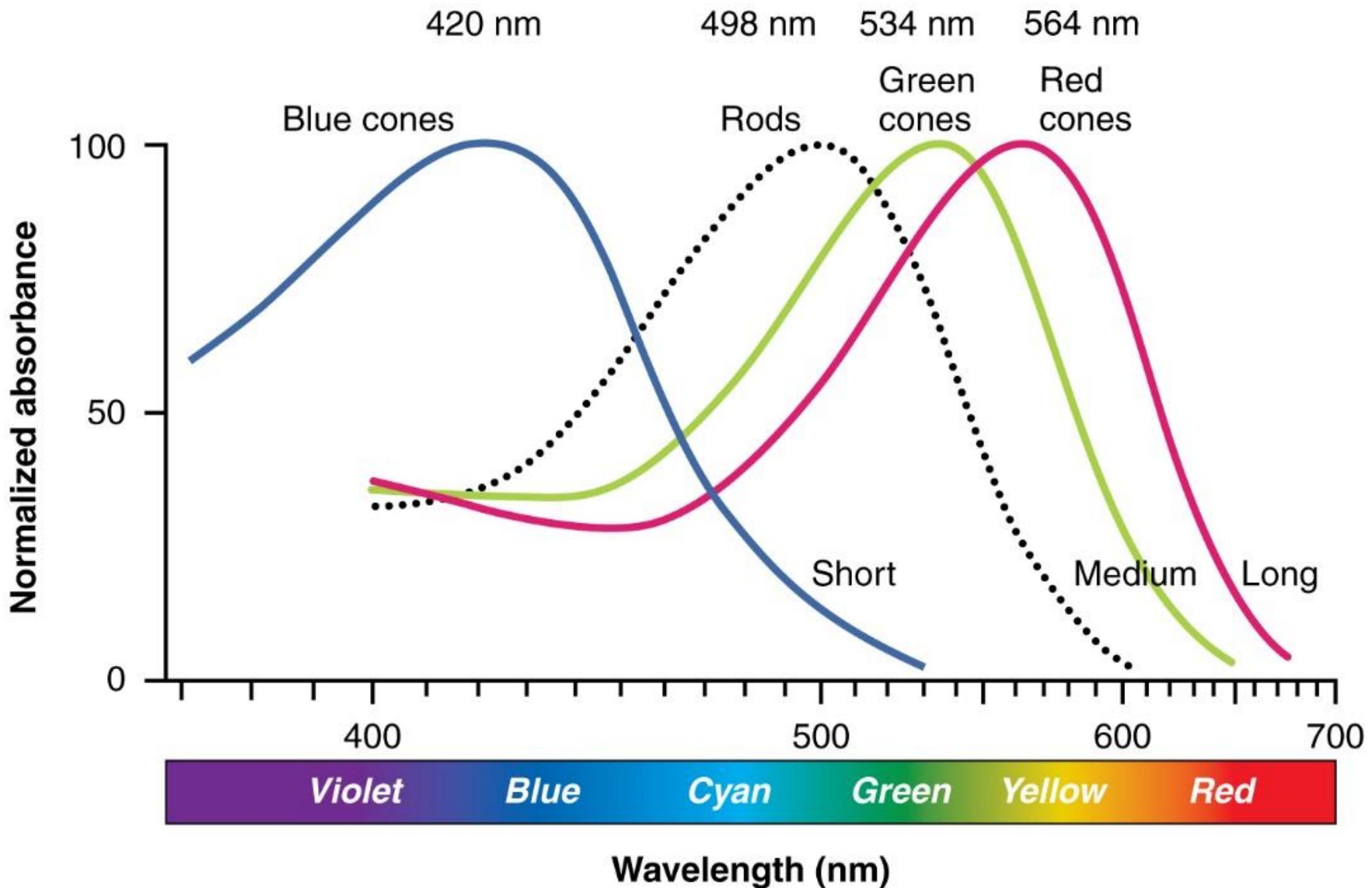
Kahemõõtmelise signaali edastamine



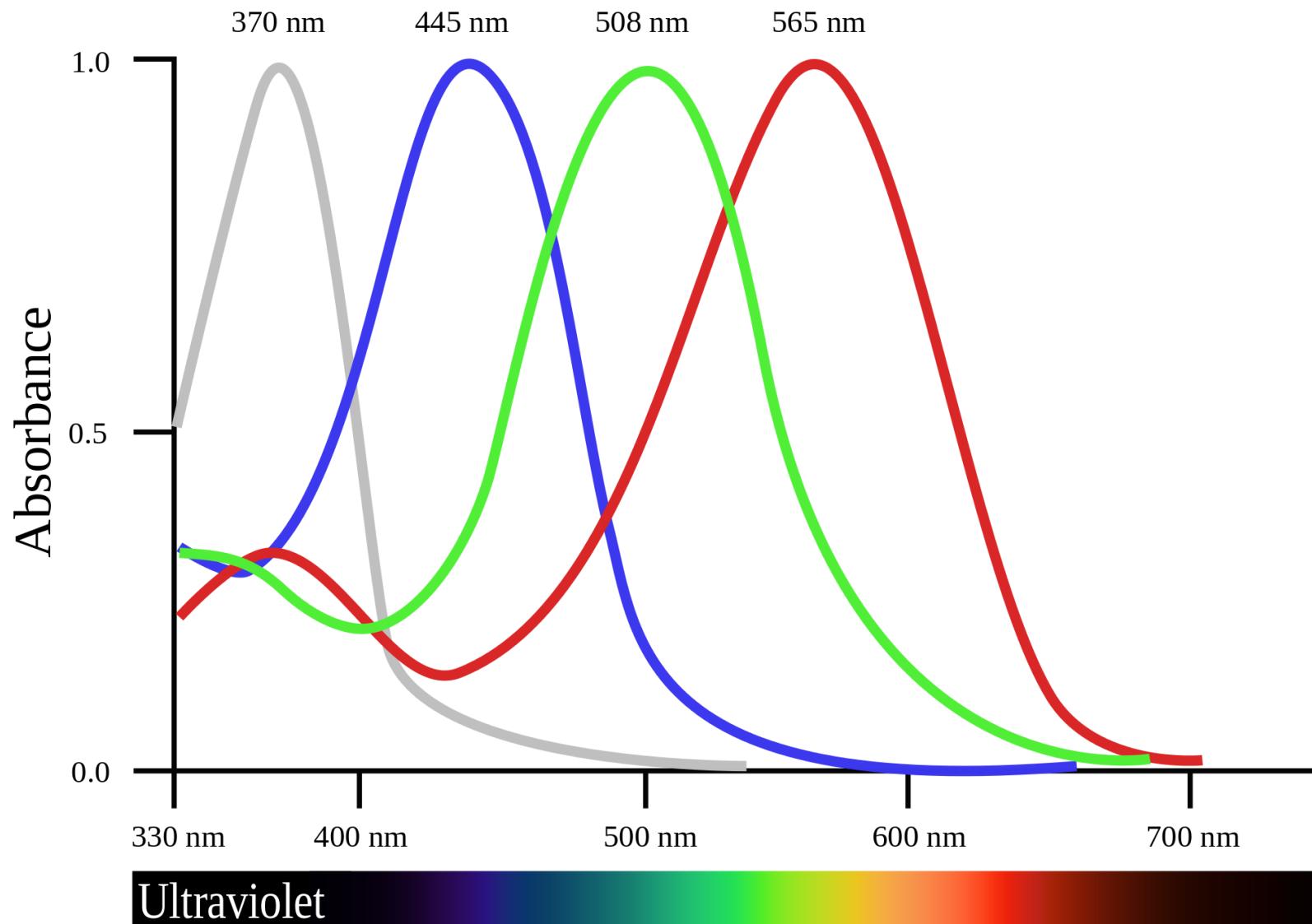
See ei ole kollane!





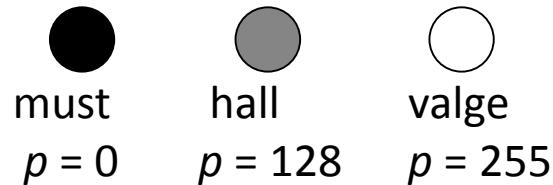
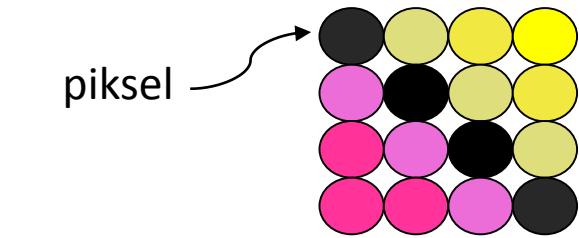


Lindude nägemismeele



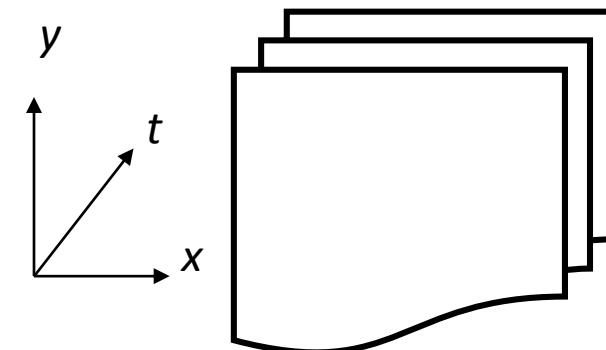
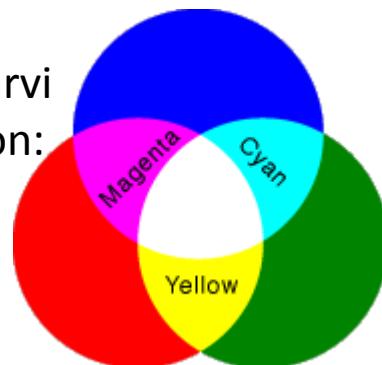
Mitmemõõtmelised signaalid

- **Pilt:** 2D signaal

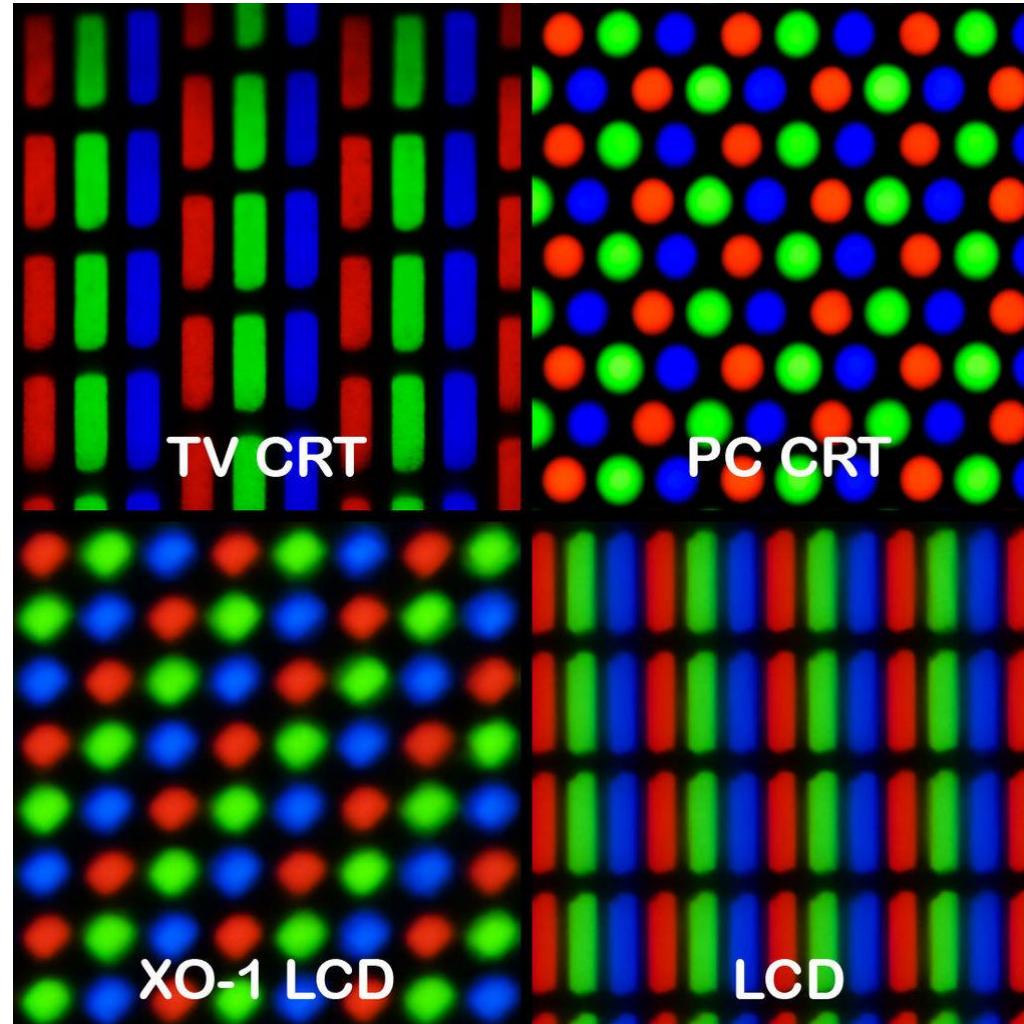


- **Video:** 3D signaal, ajas järjestikuste kahemõõtmeliste piltide (kaadrite) jada.

Värvid:
kolme põhivärvi
kombinatsioon:
RGB

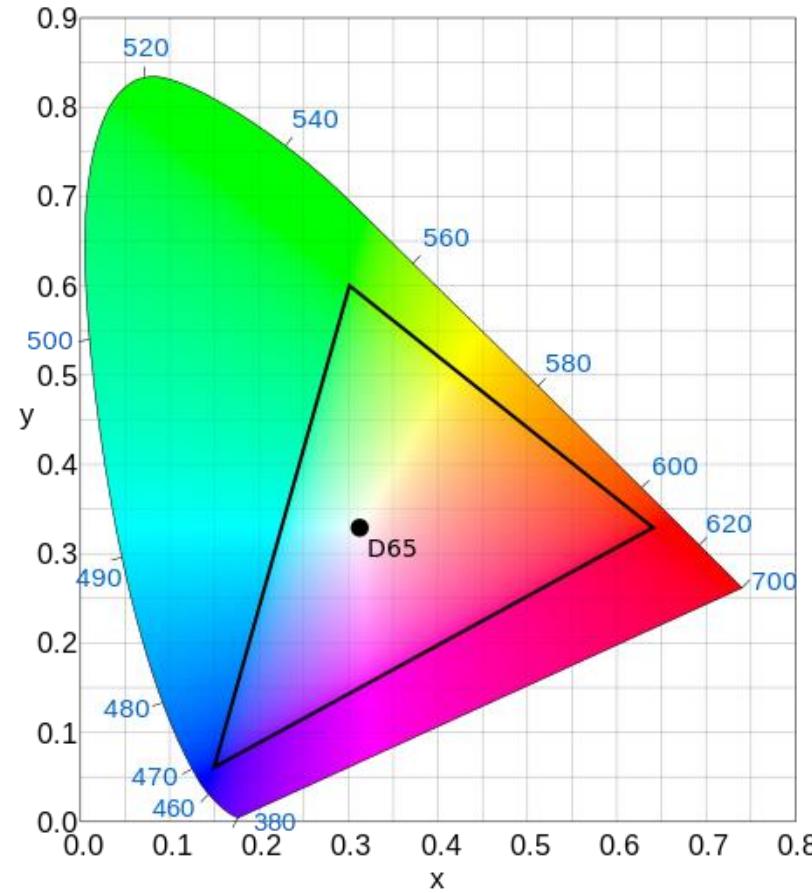


Värvide kujutamine

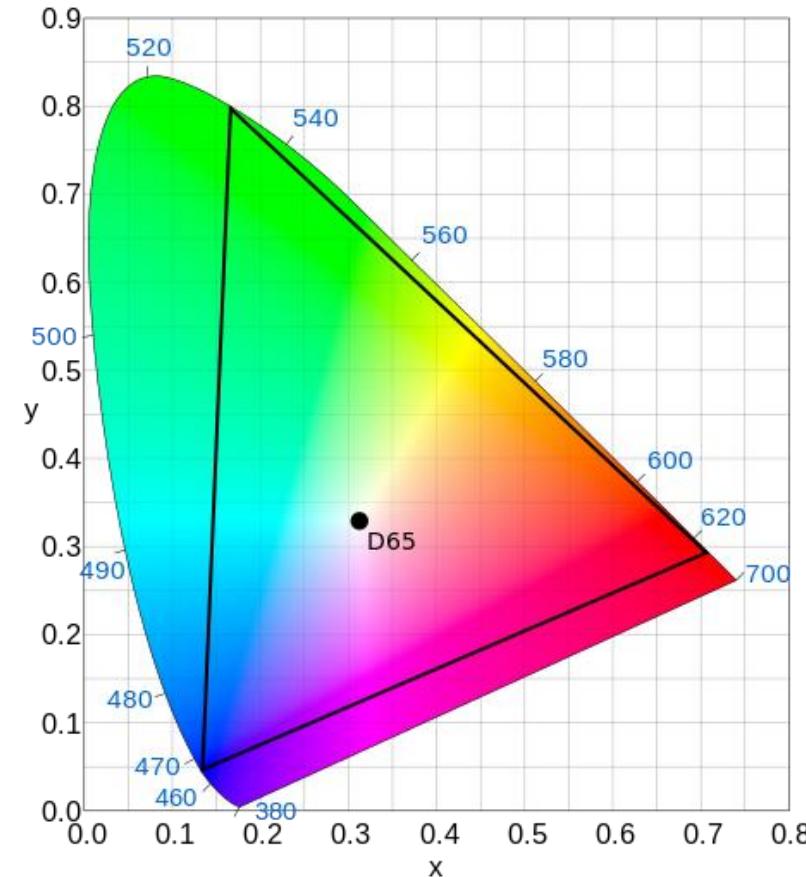


Värvikolmnurk

Rec. 709 (HDTV)



Rec. 2020 (UHDTV)



Pidevad- ja diskreetsed signaalid

- Signaali argument (aeg, ruum) võib olla nii pidev kui diskreetne

$$t \in \mathbf{R} \quad n \cdot \Delta t; n \in \mathbf{Z}$$

- Signaali väärus võib samuti olla kas pidev või diskreetne

$$s(n \cdot \Delta t) \in \mathbf{R} \quad s(t) \in \mathbf{Z}$$

Signaali spekter



Jean-Baptiste Joseph Fourier

Fourieri rida – perioodilise signaali spekter

- Suvalist perioodilist signaali $s(t)$ perioodiga T saab esitada spektrikomponentide kaudu.

$$s(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T} + \varphi_n\right)$$

- A_0 – alaliskomponent ehk keskväärtus
- A_n – n -idna spektrikomponendi amplituud
- φ_n – n -inda spektrikomponendi faas
- Perioodilise signaali spekter on diskreetne

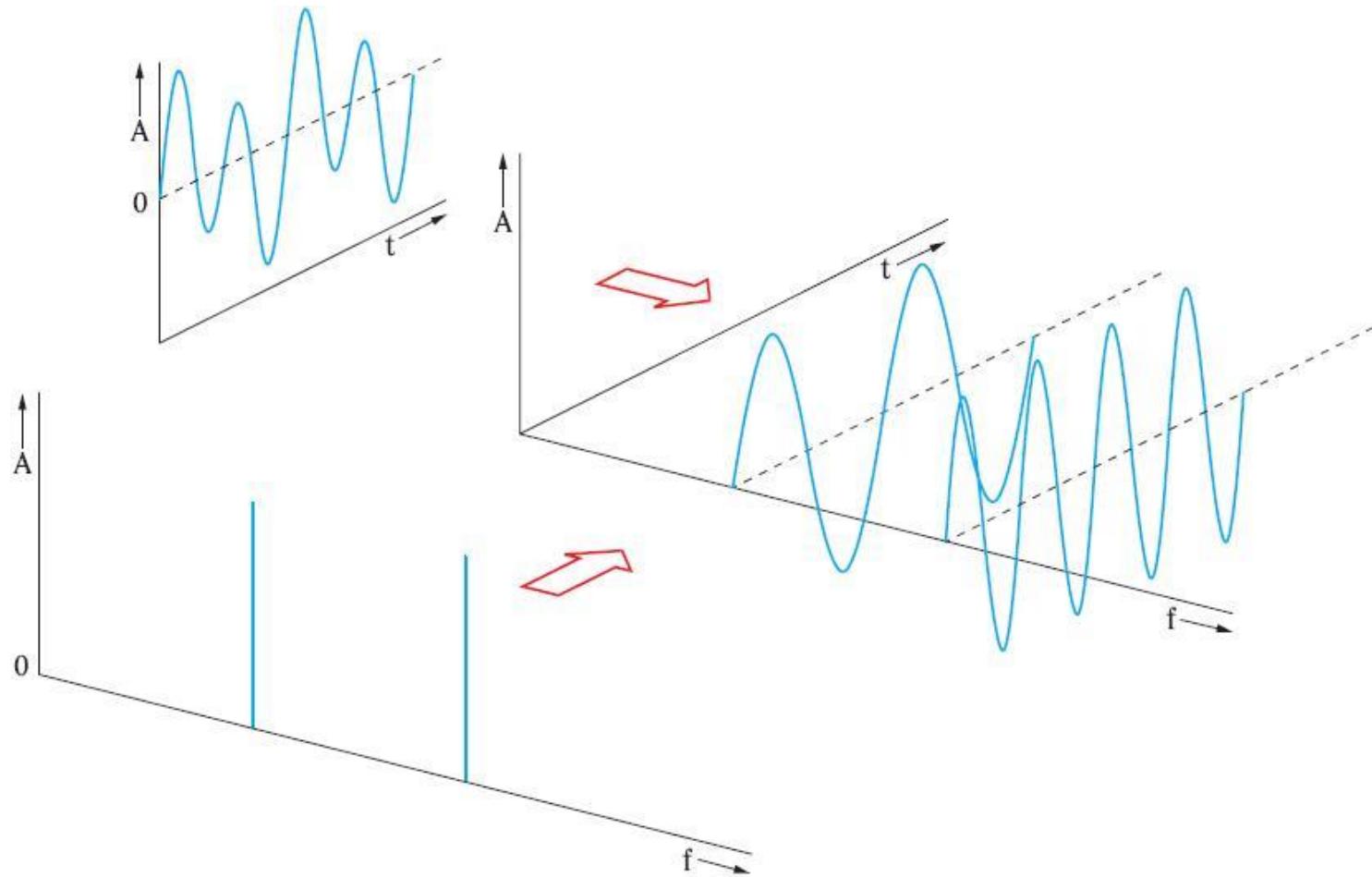
Fourier'i teisendus

- Mitteperioodilise signaali $s(t)$ korral:

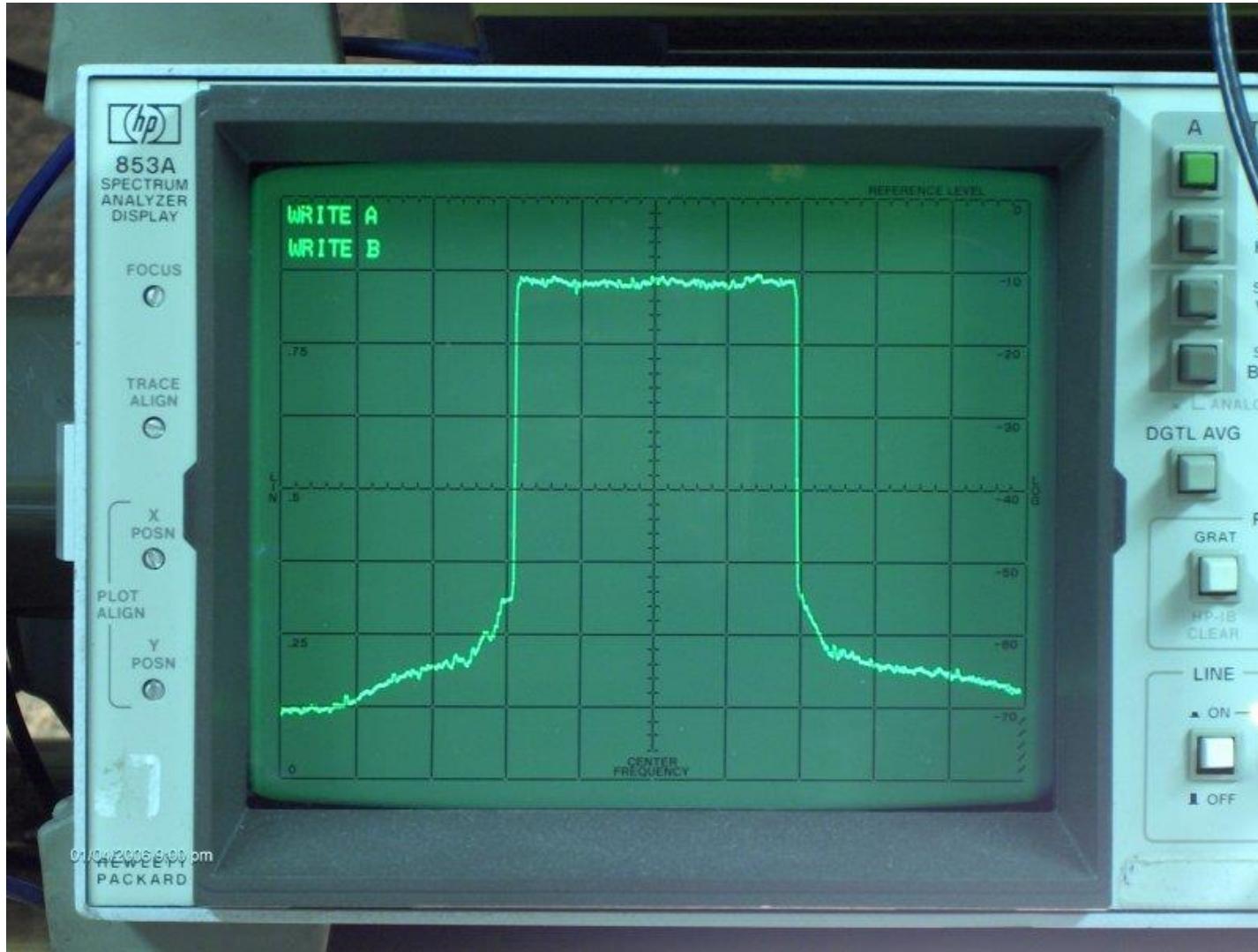
$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{j2\pi ft} df$$

Signaali spekter



Signaali spekter



Signaali võimsus

- Sides kasutatavad signaalid $s(t)$ on üldjuhul elektrilised. Signaaliks on kas elektriline pinge $u(t)$ või voolutugevus $i(t)$.
- Elektrilise signaali **hetkvõimsus** on

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

- Võimsus näitab ajaühikus tehtavat tööd või **ülekantavat energiahulka**.
- Võimsuse mõõtühikuks on W (vatt).
- Elektrilise võimsuse tähiseks on P , kuid signaali võimsust tähistatakse tihtipeale S -ga

Signaali võimsus

- Keskmise võimuse

$$P = \mathbf{E} p(t) = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

- Signaali (pinge) efektiivväärtus

$$U = \sqrt{P}$$

- Oomi seadus

$$i(t) = \frac{u(t)}{Z}$$



Signaali võimsus

- Oomi seadusest tulenevalt saab hetkvõimsust leida ka järgnevalt:

$$p(t) = \frac{u^2(t)}{Z} \quad p(t) = i^2(t) \cdot Z$$

- Juhul, kui impedants on $Z = 1\Omega$ on tegemist normeeritud võimsusega:

$$p(t) = |s(t)|^2 = s(t) \cdot s^*(t)$$

$$P = \mathbf{E}p(t) = \frac{1}{T} \int_0^T |s(t)|^2 dt$$

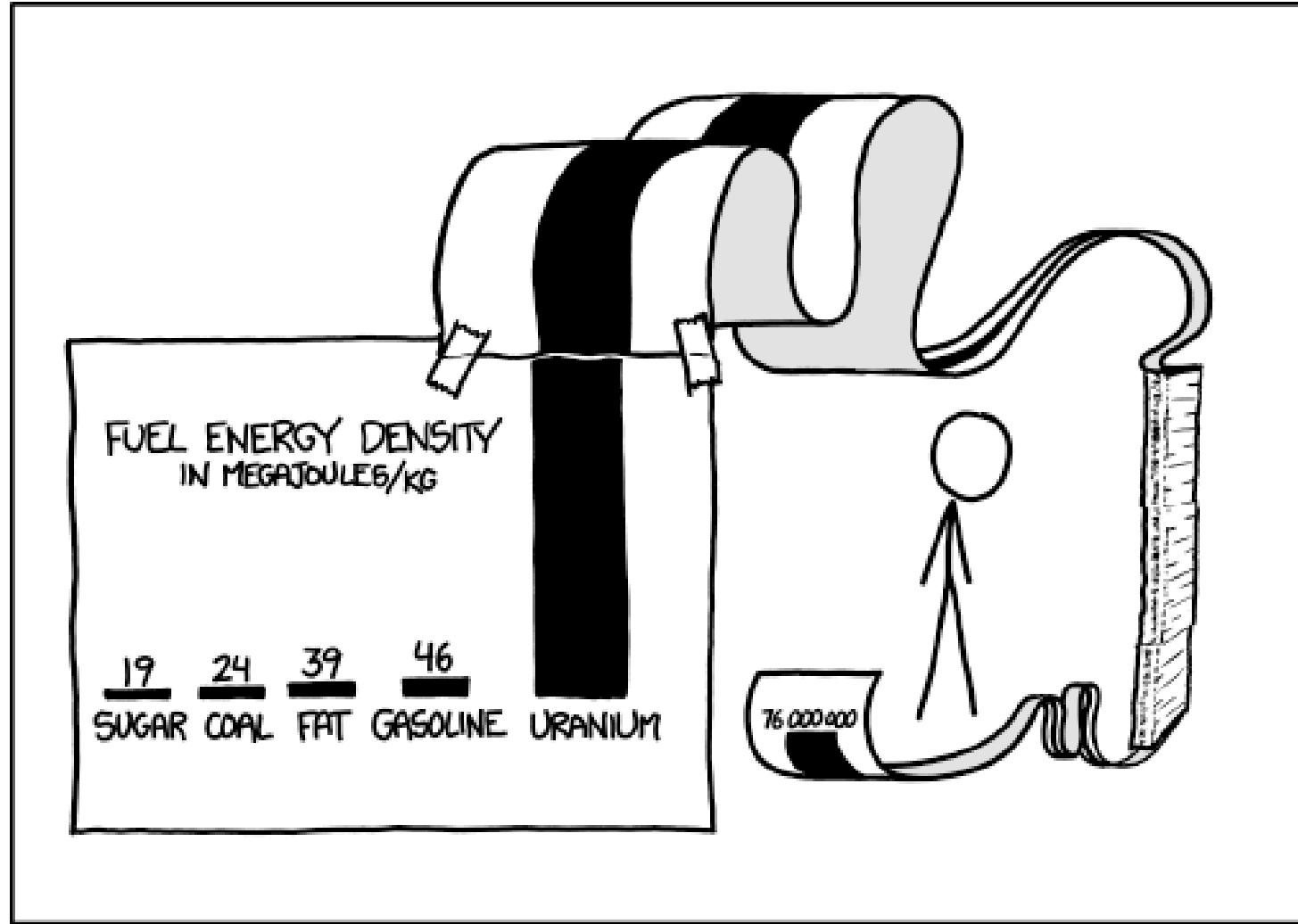
HAARP



Vene rähn



Logaritmilised mõõtühikud



Detsibell dB

- Kahe võimsuse suhet mõõdetakse detsibellides [dB]

$$K[\text{dB}] = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1}$$

- Absoluutsed logaritmilised võimsuse mõõtühikud

$$P[\text{dBW}] = 10 \cdot \log \frac{P}{1\text{W}}$$

$$P[\text{dBm}] = 10 \cdot \log \frac{P}{1\text{mW}}$$

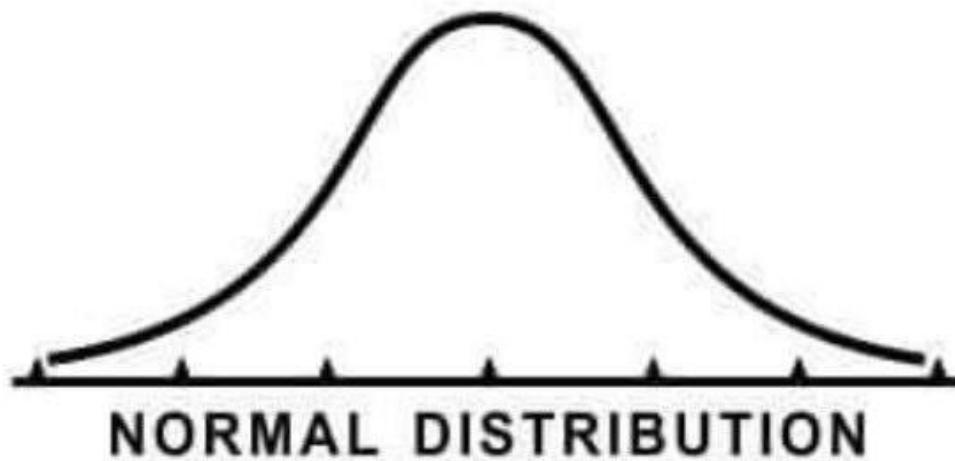


Juhuslik signaal - müra

- Populaarseim müra mudel: AWGN (*Additive White Gaussian Noise*)

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mathbf{E}X)^2}{2\sigma^2}}$$

- Gaussi müra võimsus: $N = \sigma^2$
- Signaal- müra suhe: SNR (*Signal to Noise Ratio*)

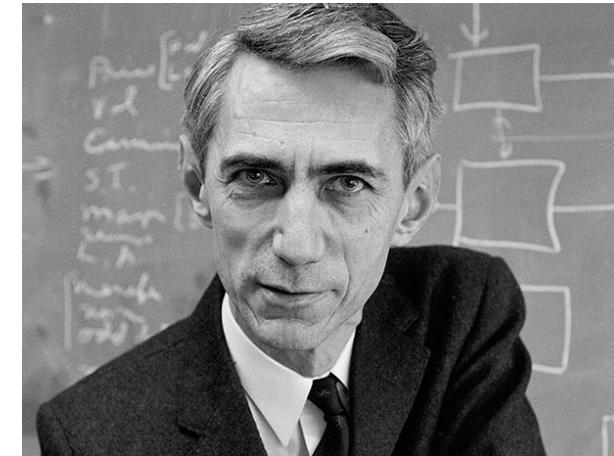


Shannoni valem

- Shannon-Hartley teoreem
- Sidekanali maksimaalne teoreetiline läbilaskevõime C :

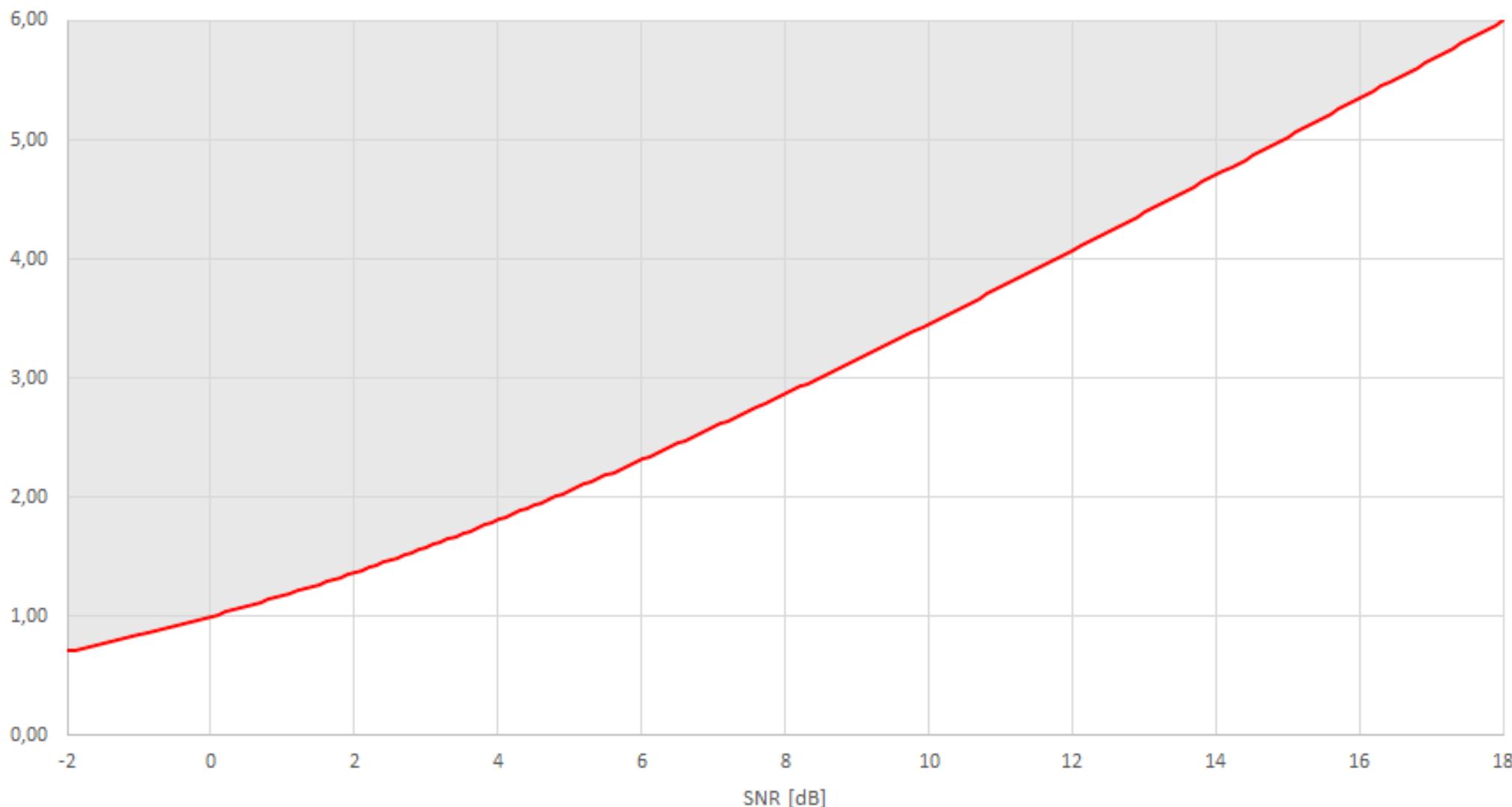
$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad [\text{bit / s}]$$

- B – kanali ribalaius [Hz]
- S – Signaali võimsus [W]
- N – Müra võimsus [W]
- C/B – spektraalefektiivsus [bit/s/Hz]



Shannonin piir

R/B [bit/s/Hz]



Hartley seadus

- Teoreetiline edastuskiirus R kanalis ribalaiusega B , kui kasutada edastamisel M erinevat sümbolit on

$$R = 2B \log_2(M) \text{ [bitt/s].}$$

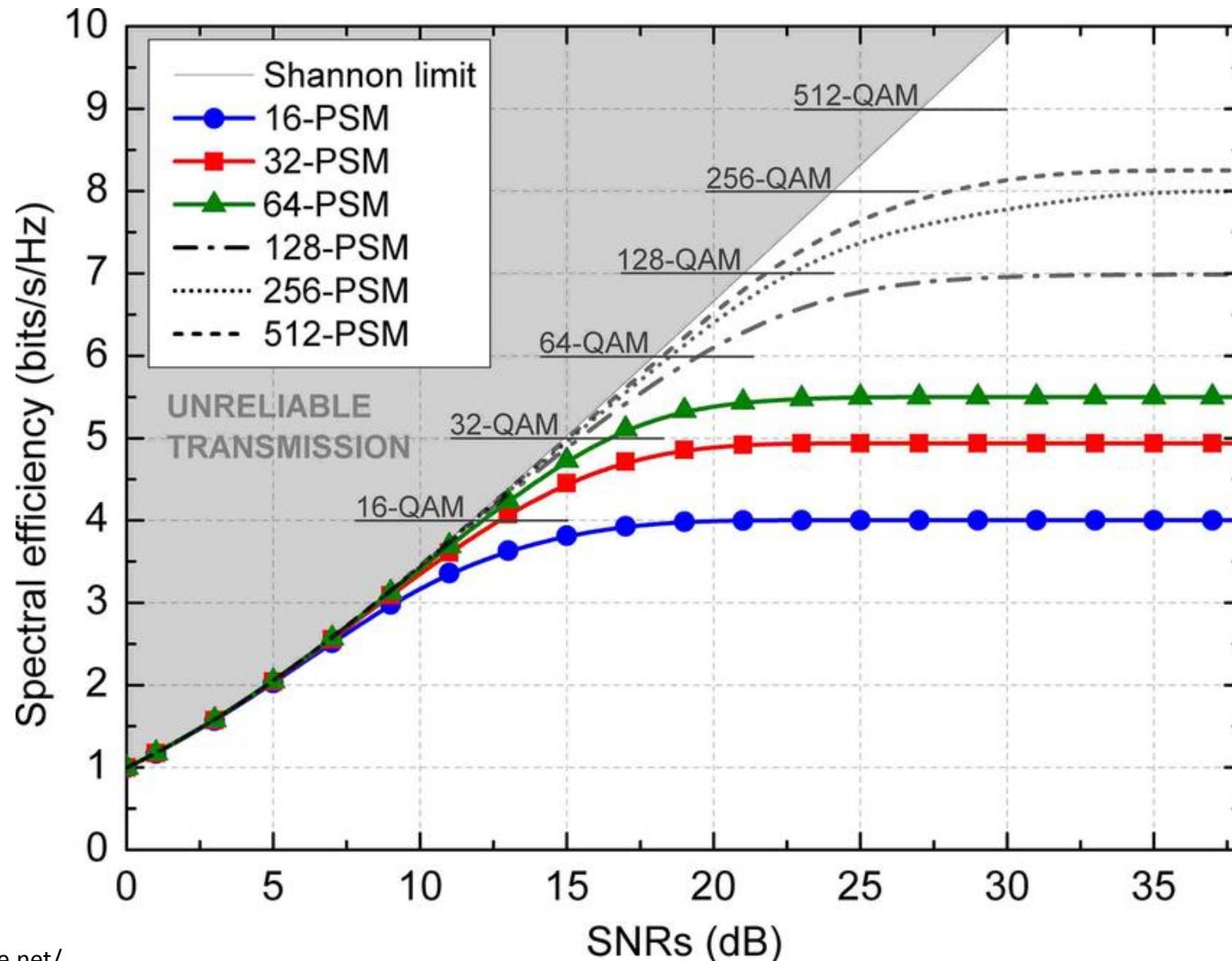
- Võttes arvesse ka Shannon – Hartley seadust saame kas..
- Maksimaalse sümbolite arvu kanalis etteantud signaal-müra suhte korral:

$$M = \sqrt{1 + \frac{S}{N}}$$

- Vajaliku signaal-müra suhte M erineva sümboli edastamiseks:

$$\frac{S}{N} = M^2 - 1$$

Spektraalefektiivsus



Materjalid

- Michael Duck and Richard Read. **Data Communications and Computer Networks for Computer Scientists and Engineers.** Second edition. Pearson Education Limited 2003. Ptk 1 Introduction lk 1-16.
- William Stallings. **Data and Computer Communications** 8th edition. Ptk 3. Analog and digitaal data transmissioon. lk 65-96.
- All About Circuits. **RMS Voltage Calculator.**
<https://www.allaboutcircuits.com/tools/rms-voltage-calculator/>,
21.03.2018

10. Allika kodeerimine

Arvutivõrgud IEE1100

Ivo Müürsepp

Allika mudel



Allika Entroopia

- Shannoni entroopia on informatsioonialliku poolt toodetava informatsiooni **keskmise** hulk.

$$H(A) = \sum_{j=1}^N p(a_j)I(a_j) = -\sum_{j=1}^N p(a_j)\log_2 p(a_j)$$

Allika Entroopia

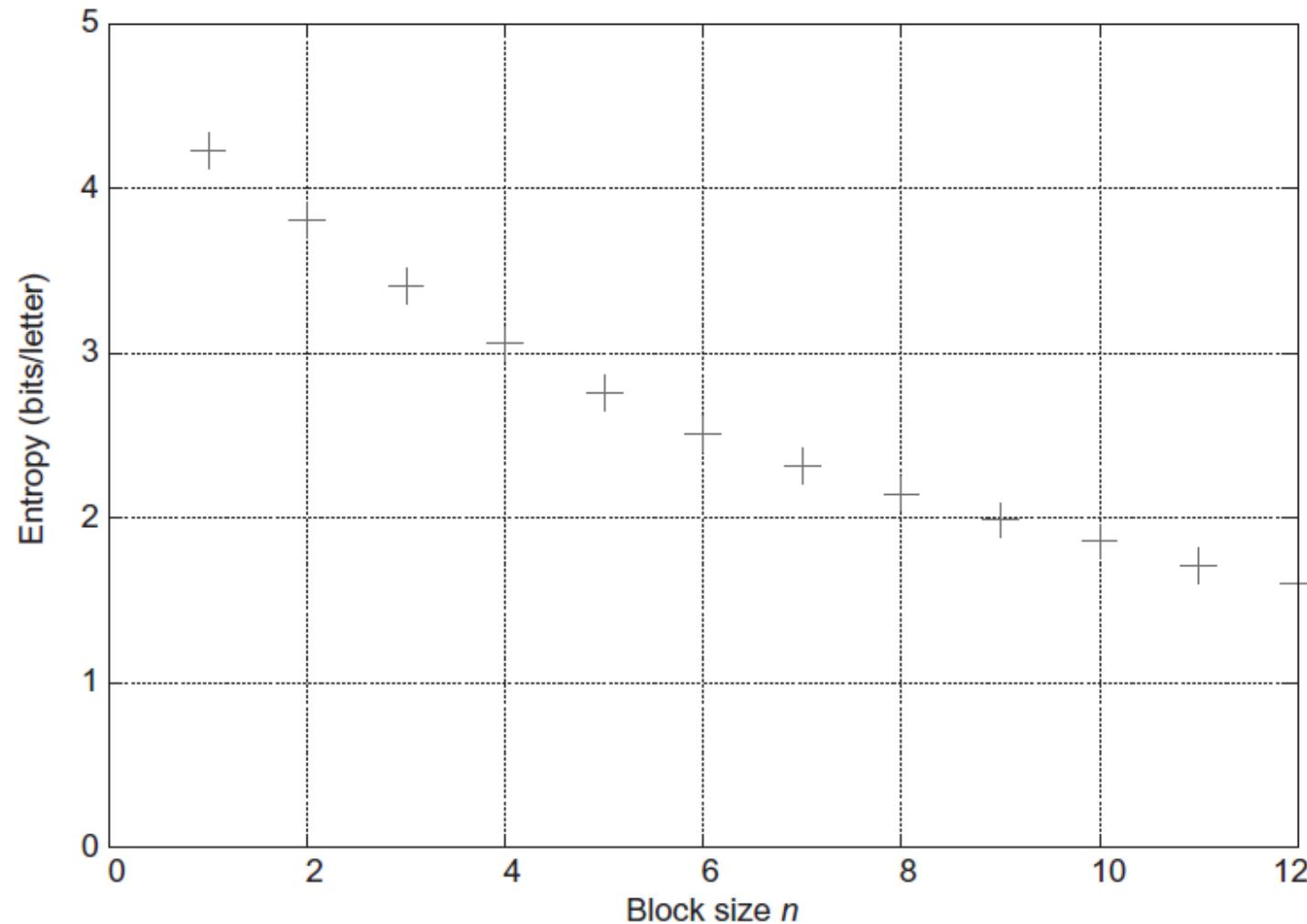


FIGURE 2.1 H_n in bits per letter for $n = 1, \dots, 12$ for *Wealth of Nations*.

Kood

- Koodi C all peetakse silmas ühest vastavust allika sümbolite a_i ja neid sümboleid kirjeldavate digitaalsete sümbolite (koodsnõade) c_i vahel.

USASCII code chart

b ₇ b ₆ b ₅				0 0 0	0 0 1	0 1 0	0 1 1	1 0 0	1 0 1	1 1 0	1 1 1	
b ₄	b ₃	b ₂	b ₁	Column	0	1	2	3	4	5	6	7
↓	↓	↓	↓	Row ↓	0 NUL	DLE	SP	0	@	P	'	p
0	0	0	1	1 SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q	
0	0	1	0	2 STX	DC2	"	2	B	R	b	r	
0	0	1	1	3 ETX	DC3	#	3	C	S	c	s	
0	1	0	0	4 EOT	DC4	\$	4	D	T	d	t	
0	1	0	1	5 ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u	
0	1	1	0	6 ACK	SYN	8	6	F	V	f	v	
0	1	1	1	7 BEL	ETB	'	7	G	W	g	w	
1	0	0	0	8 BS	CAN	(8	H	X	h	x	
1	0	0	1	9 HT	EM)	9	I	Y	i	y	
1	0	1	0	10 LF	SUB	*	:	J	Z	j	z	
1	0	1	1	11 VT	ESC	+	;	K	[k	{	
1	1	0	0	12 FF	FS	.	<	L	\	l	l	
1	1	0	1	13 CR	GS	-	=	M]	m	}	
1	1	1	0	14 SO	RS	.	>	N	^	n	~	
1	1	1	1	15 SI	US	/	?	O	-	o	DEL	

Koodi parameetrid

- Koodsõna keskmine pikkus

$$L = \sum_{j=1}^N p(a_j) n(a_j)$$

- Koodsõna keskmise pikkuse ja allika entroopia erinevust nimetatakse koodi liiasuseks (*redundancy*)

$$D = L - H$$

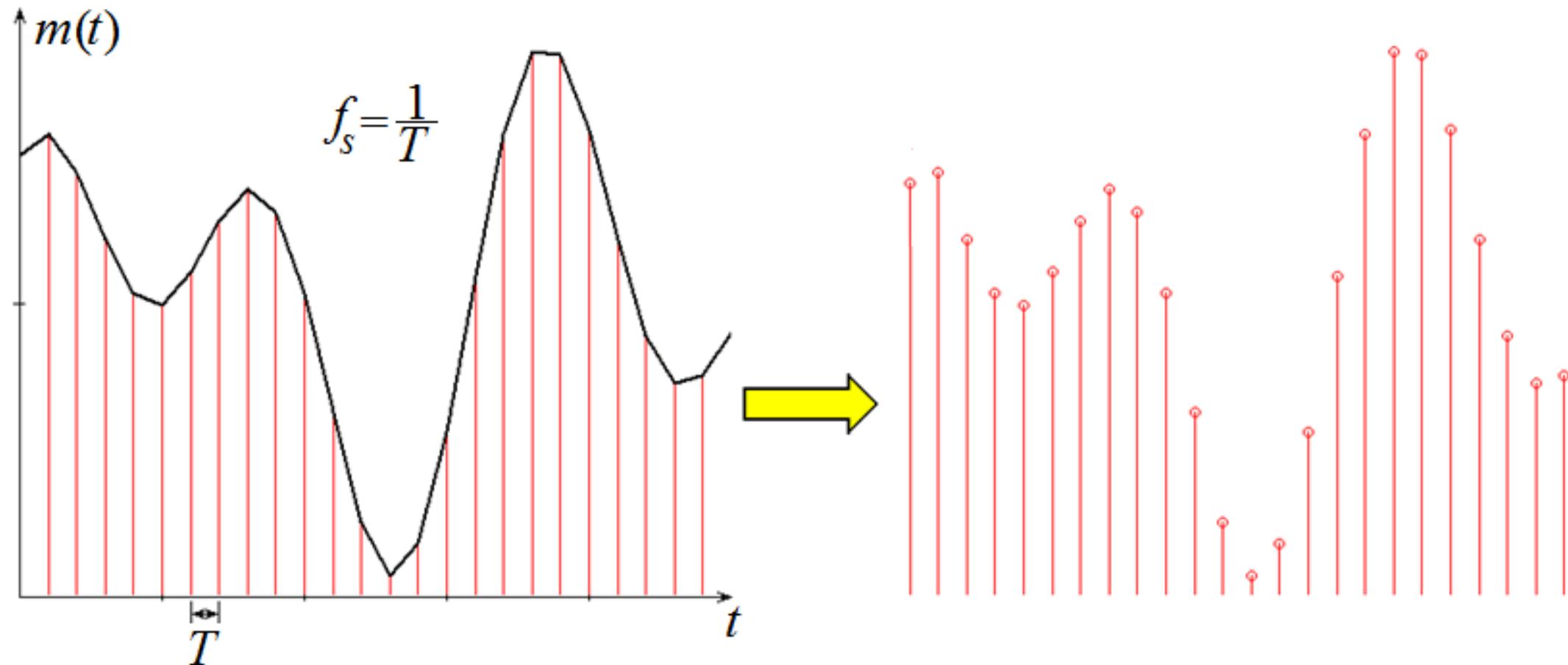
Morse kood

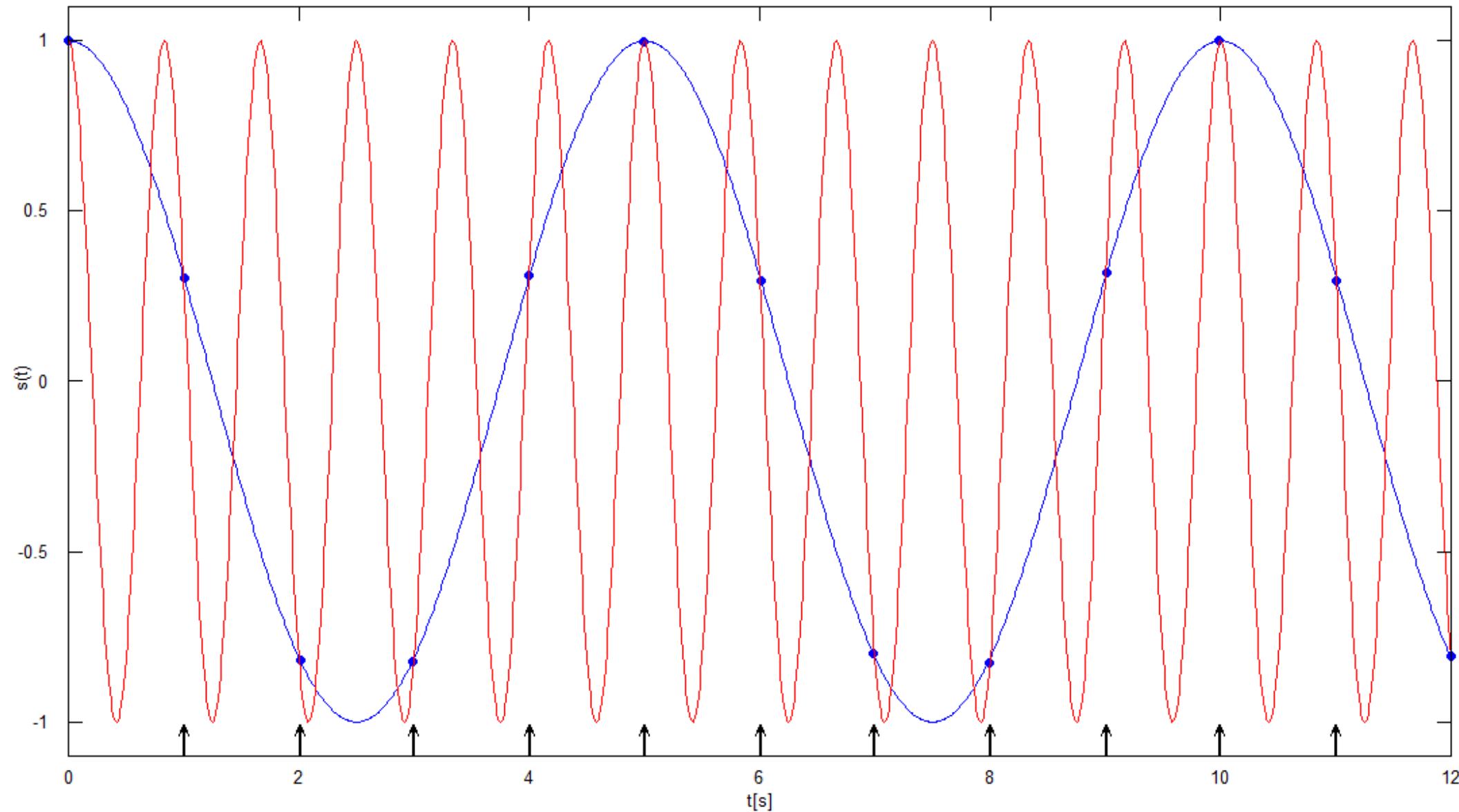
A --	J ·····	S ...	1 -····-
B -····	K -···	T -	2 ·····-
C -····	L ·····	U ...	3 ·····-
D -···	M -··	V ·····	4 ·····-
E ·	N -··	W -···	5 -····
F -····	O -····	X -····	6 -·····
G -····	P -····	Y -····	7 -·····
H -····	Q -····	Z -····	8 -·····
I ..	R -···	0 -·····	9 -·····

Analoog-digitaalmuundus

- Analoogsignaal pidev argumendis ja vääruses $s(t)$.
- Esimese sammuna fikseeritakse analoogsignaali väärus mingil lõplikul hulgal ajahetkedel $s(n \cdot \Delta t)$.
- Protsessi nimetatakse diskreetimiseks.
- Nyquist-Shannon-Kotelnikovi teoreem:
 - Kui signaali $s(t)$ ribalaius on B hertsi, siis on see signaal täielikult määratud disreetsete väljavõtetega ajavahemike $1/2B$ sekundi tagant.
 - Vajalik diskreetimissamm $\Delta t \leq 1/(2B)$
 - Põhiriba signaali korral diskreetimissagedus $f_s \geq 2f_m$

Diskreetimine





Aliased



Kvantimine

- Signaali väärus diskreetsetel ajahetkedel $s(n \cdot \Delta t)$ mõõdetakse mingi lõpliku täpsusega $\pm q/2$ ja salvestatakse digitaalsel kujul bittide arvuga n_B .
- Kvantimissammu q suurus on määratud bittide arvuga n_B ja sisendpinge maksimaalse muutumisvahemikuga U_{pp} ($-U_m \dots U_m$)

$$q = \frac{U_{pp}}{2^{n_B} - 1} \approx \frac{U_{pp}}{2^{n_B}} = \frac{U_m}{2^{n_B-1}}$$

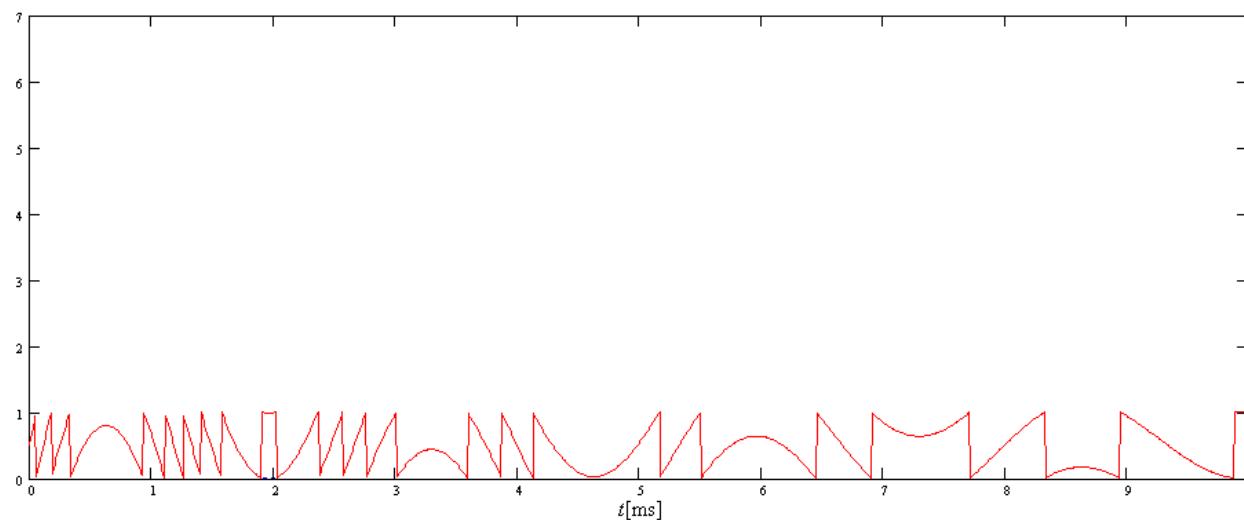
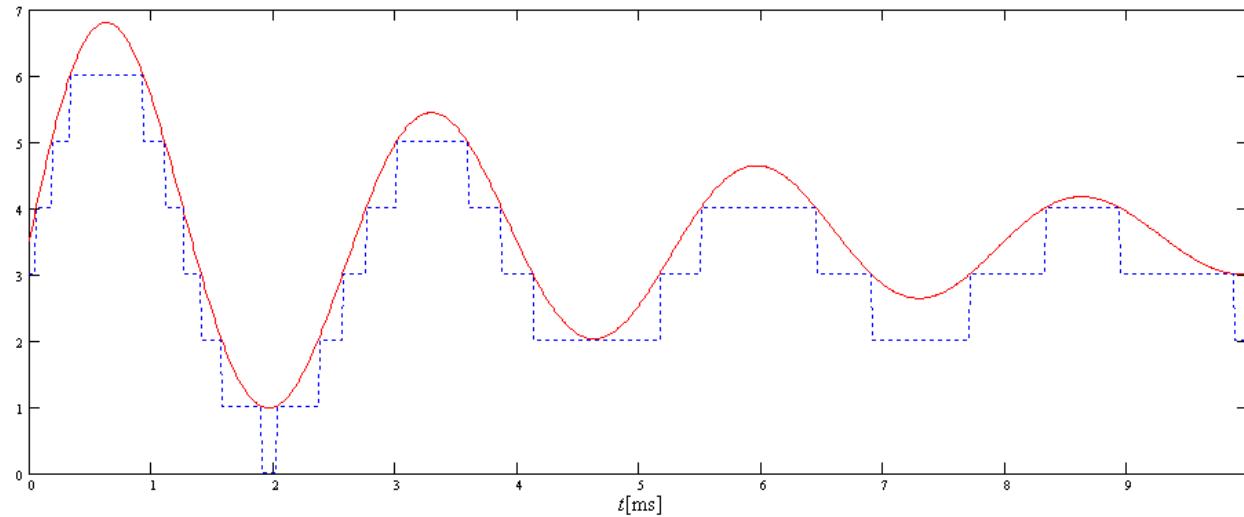
- Kvantimisega kaasneb alati pöördumatu informatsioonikadu, mida iseloomustab kvantimismüra võimsusega

$$N = \frac{q^2}{12}$$

- Signaal-kvantimismüra suhe:

$$SNR \approx 6 \cdot n_B + 4,7 \text{ [dB]}$$

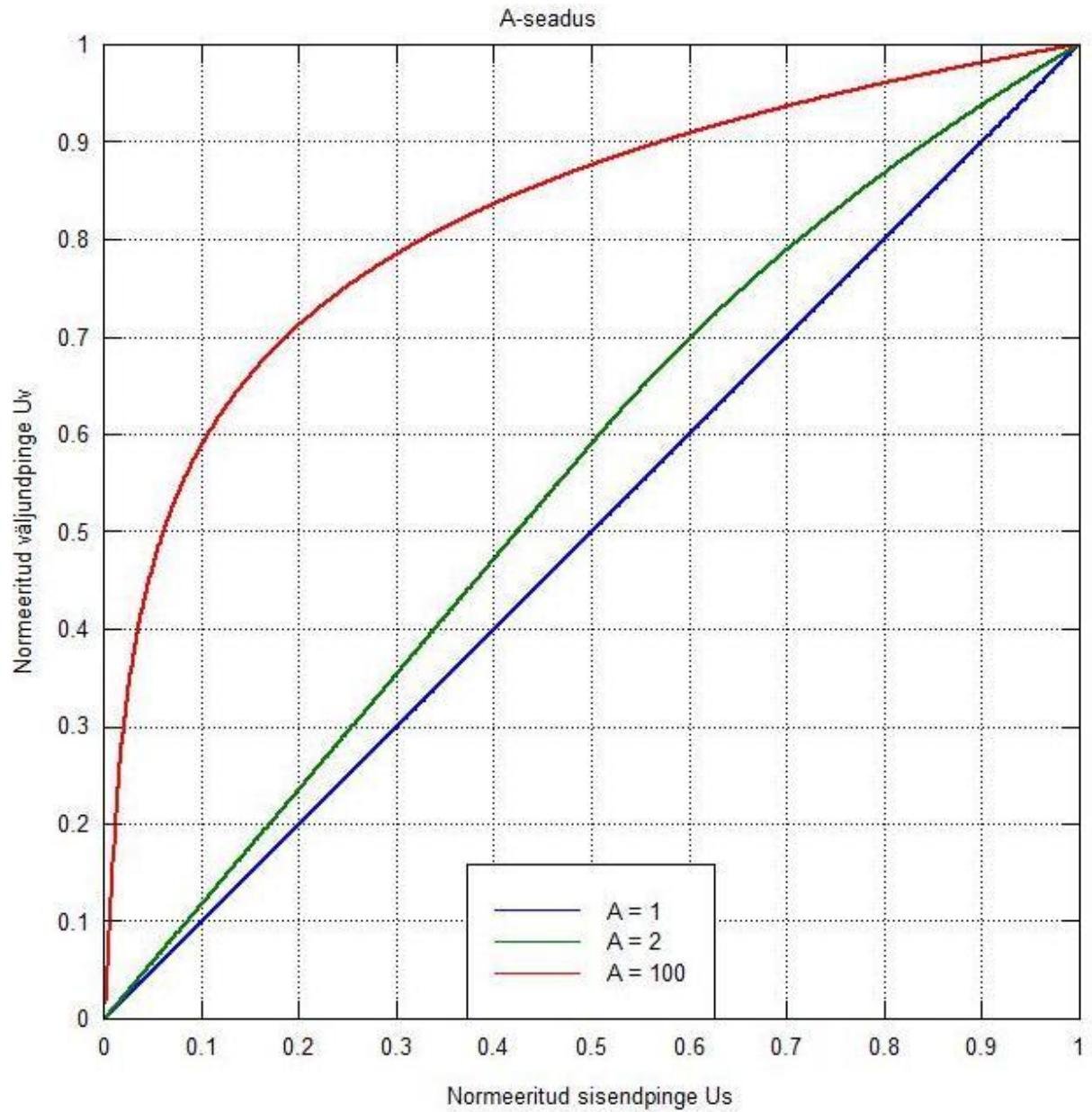
Kvantimismüra



G.711 koodek

- 300-3400Hz
- $f_s = 8\text{kHz}$
- $r = 64\text{kbit/s}$
- A ja μ seadused.
 - A = 87,6

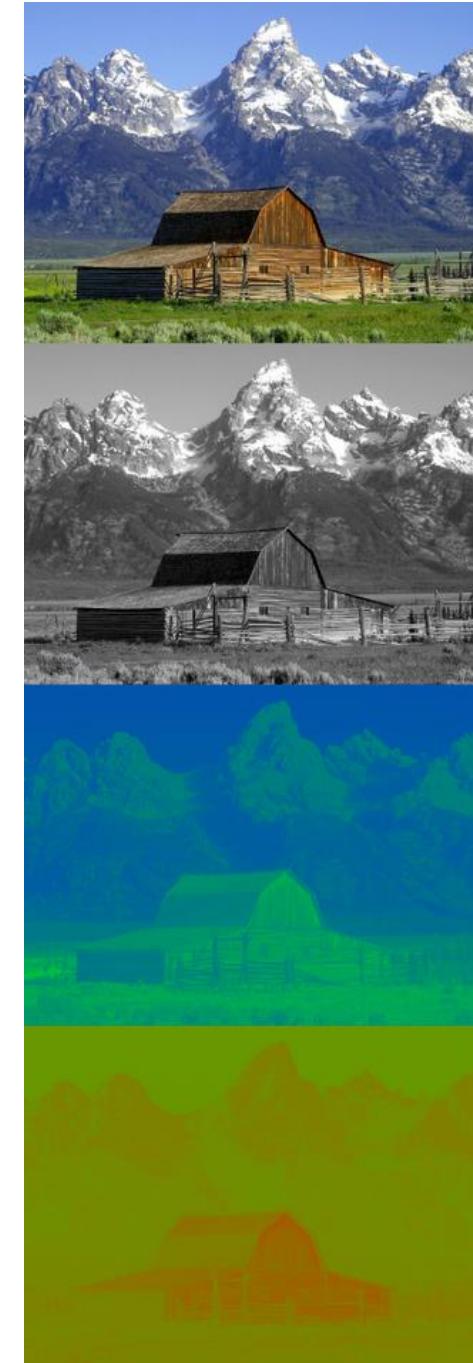
$$|u_v| = \begin{cases} \frac{A|u_s|}{1 + \ln(A)} & 0 \leq |m| \leq \frac{1}{A} \\ \frac{1 + \ln(A|u_s|)}{1 + \ln(A)} & \frac{1}{A} \leq |m| \leq 1 \end{cases}$$



YUV kodeering

- Võimaldab värvusinfo suuremat kompressiooni
- Tagas omal ajal ühilduvuse mustvalge ja värvitelevisiooni vahel (analoog).
- Heleduskomponent Y (ITU-R BT.601)
$$Y = 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B$$
- Värvivahesignaalid U (*blue projection*) ja V (*red projection*)
$$U = 0,492 \cdot (B - Y)$$

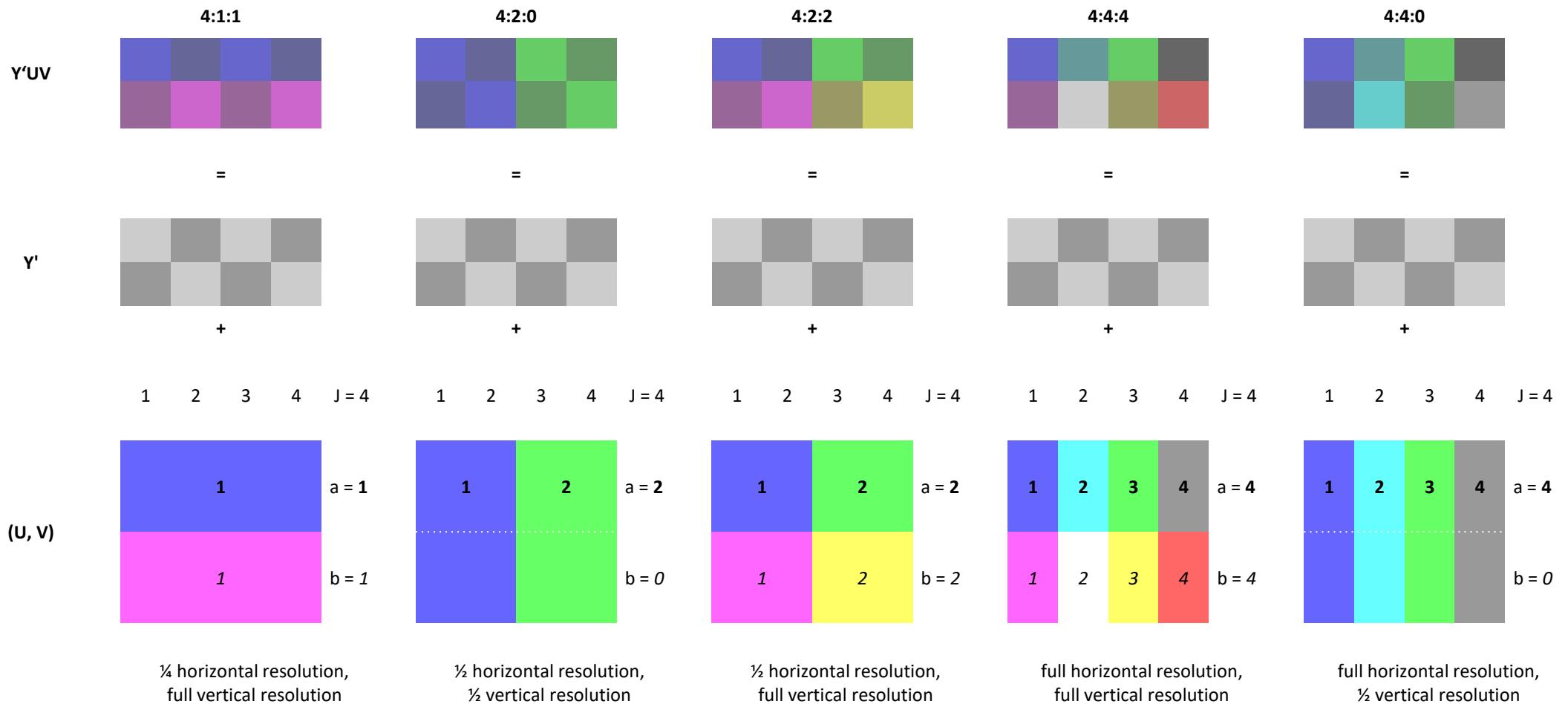
$$V = 0,877 \cdot (R - Y)$$
- Digitaaltehnikas $C_b = U$ ja $C_r = V$ (YCbCr)



Värvivahesignaalide aladiskreetimine

- *Chroma Subsampling*
- Inimsilma eraldusvõime on heleduse suhtes parem kui värvuse suhtes.
- Viimast asjaolu saab ära kasutada vähendamaks kujutise salvestamiseks kuluvat informatsioonihulka.
- Aladiskeetimise skeem esitatakse üldjuhul kolme arvuna $J:a:b$ (näiteks 4:2:2) mis kirjeldab heledus- ja värvivahesignaalide diskreetide arvu J piksli laiuses ja kahe piksli kõrguses alas:
 - J : Vaadeldava ala laius, tavaliselt 4
 - a : Värvivahesignaali diskreetide arv (Cr, Cb) esimeses J pikslit sisaldavas reas.
 - b : Värvivahesignaali muutuste arv (Cr, Cb) esimese ja teise rea vahel

Värvusinfo skeem (4x2 plokk)





4:1:1



4:2:0



4:2:2

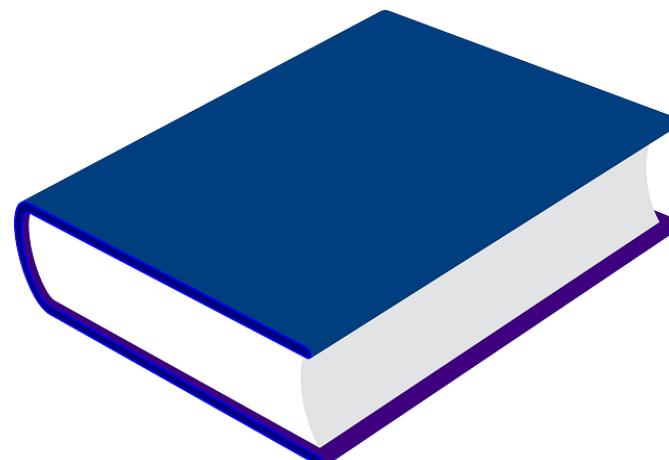


4:4:4



Materjalid

- All About Circuits. Introduction to Digital-Analog Conversion.
<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/digital/chpt-13/digital-analog-conversion/>, 03.31.2018
- ITU-T Recommendation G.711
http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.711-198811-I!!!PDF-E&type=items, 03.31.2018



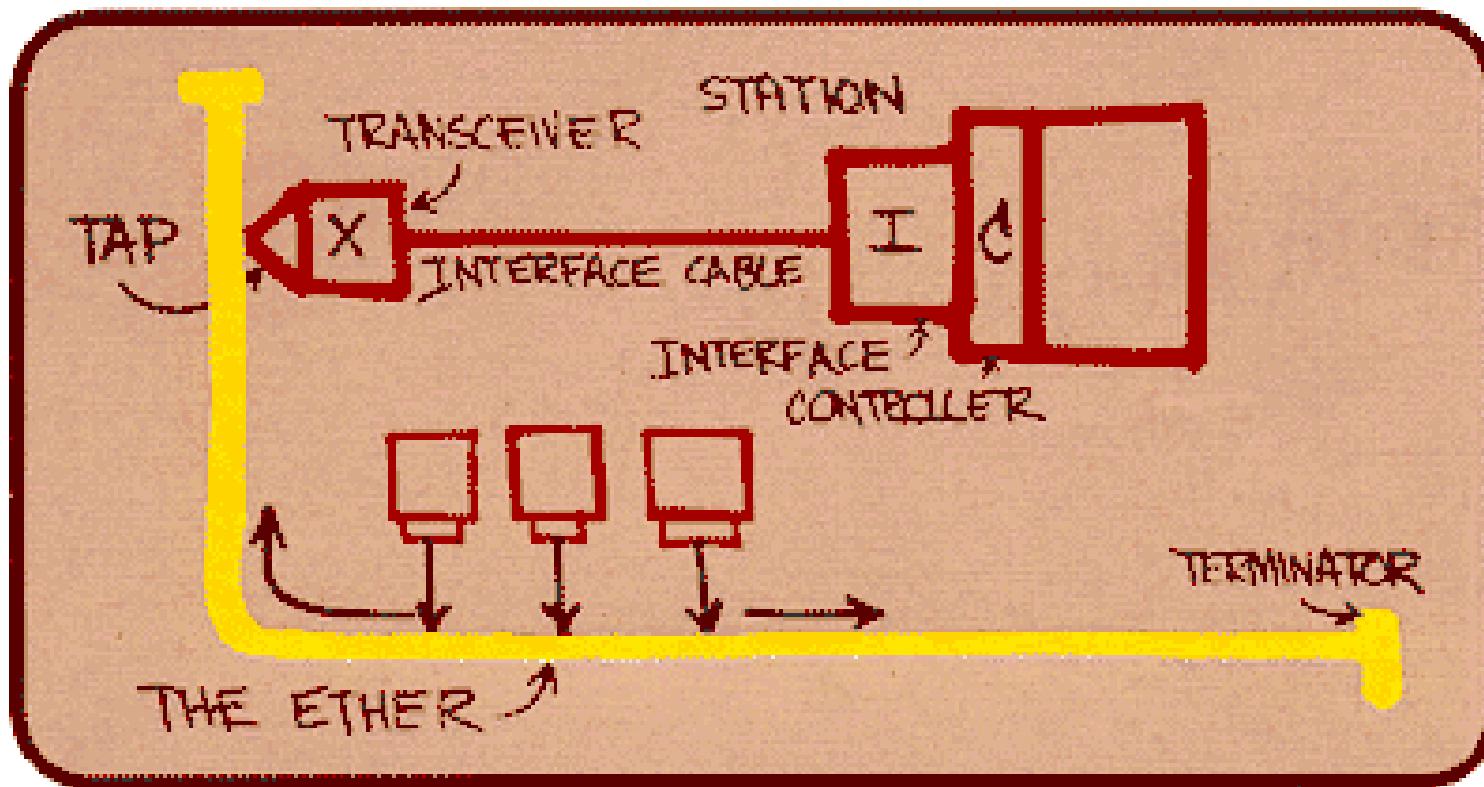
11. Füüsiline kiht

Arvutivõrgud IEE1100

Ivo Müürsepp

10BASE5

- Robert M. Metcalfe



Lainetakistus (karakteristlik impedants)

- Koaksiaalne lainejuht



$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\kappa}} \log \frac{d_1}{d_2}$$

- Kahejuhtmeline lainejuht (keerdpaar)

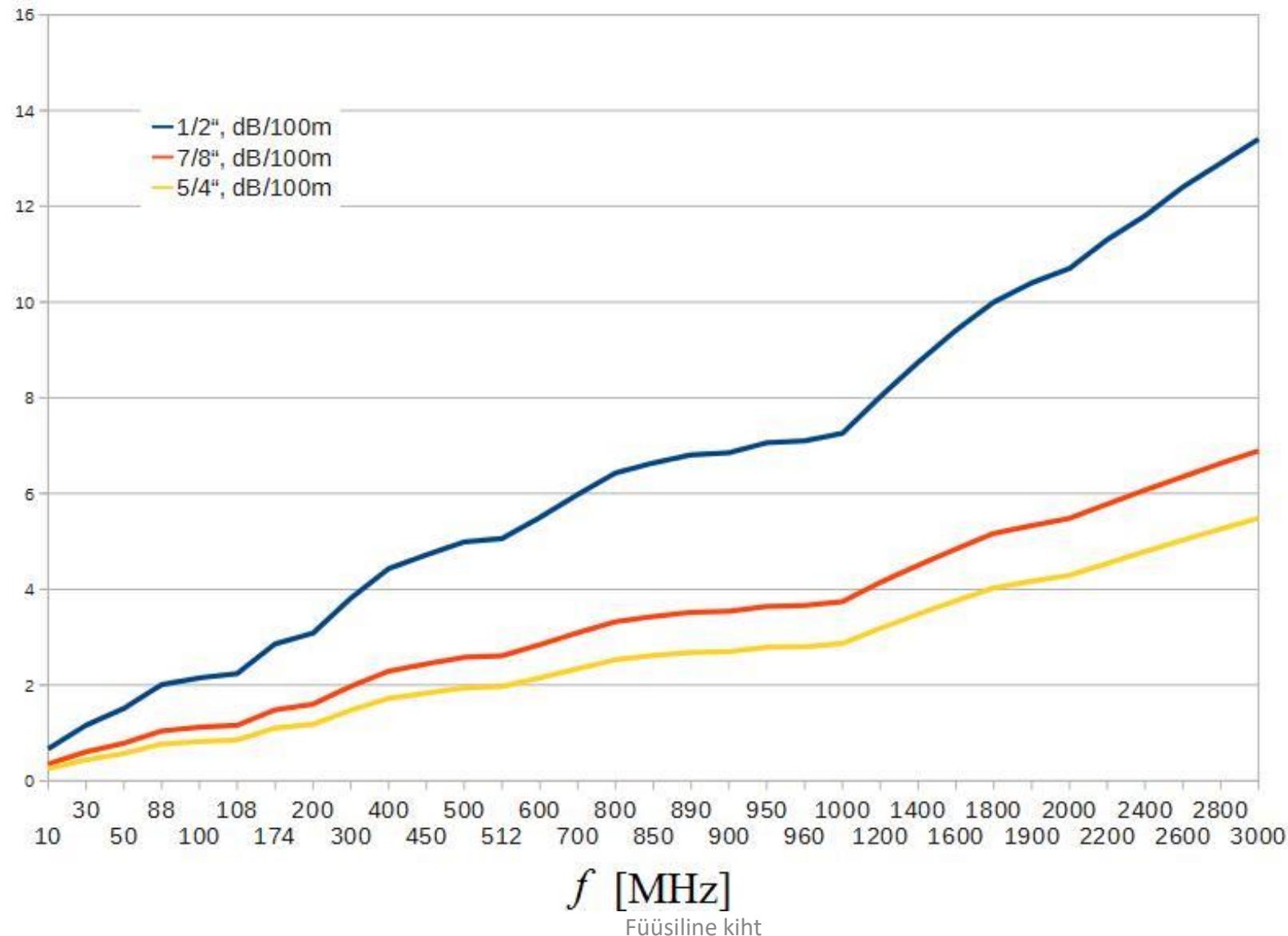


$$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{\kappa}} \log \frac{d}{r}$$

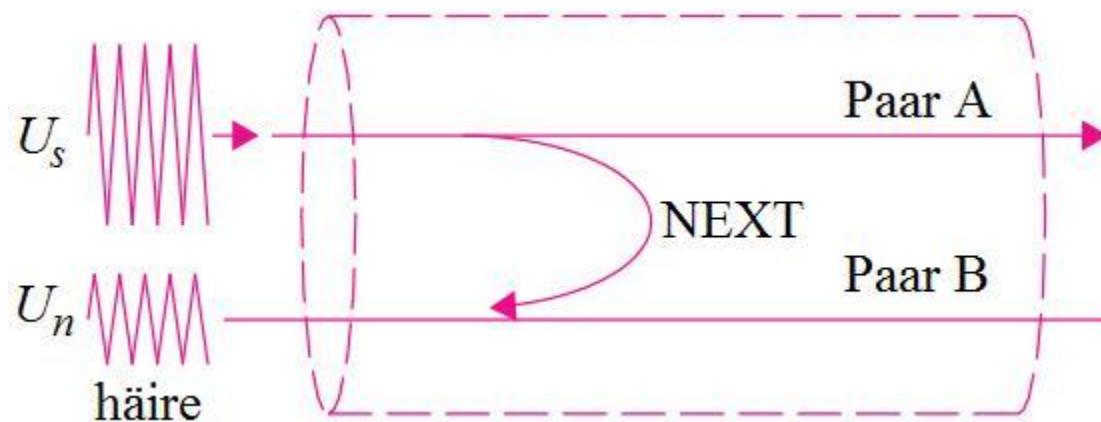
Terminator



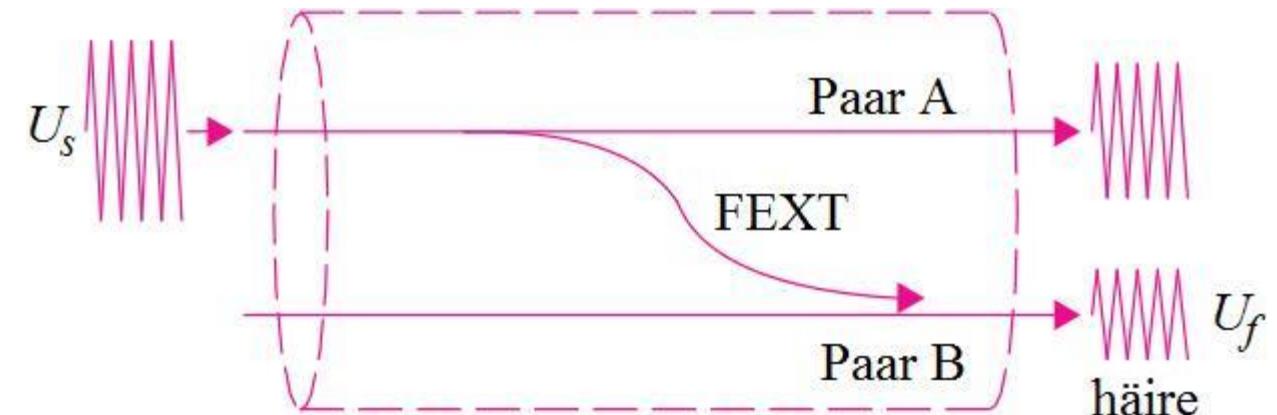
Kaabli Sumbumus



Läbikoste (crosstalk)

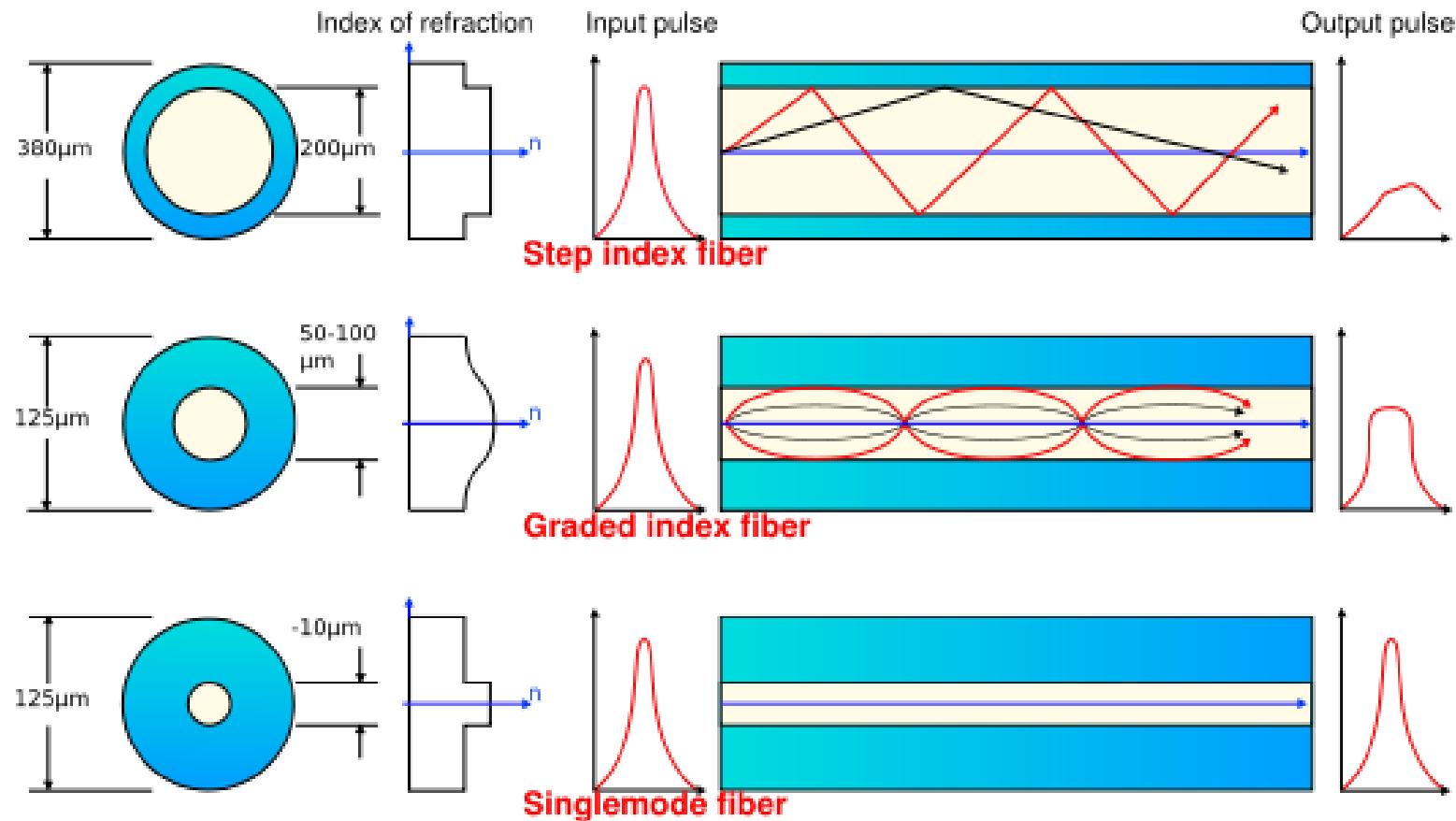


$$NEXT = -20 \log \frac{U_n}{U_s}$$



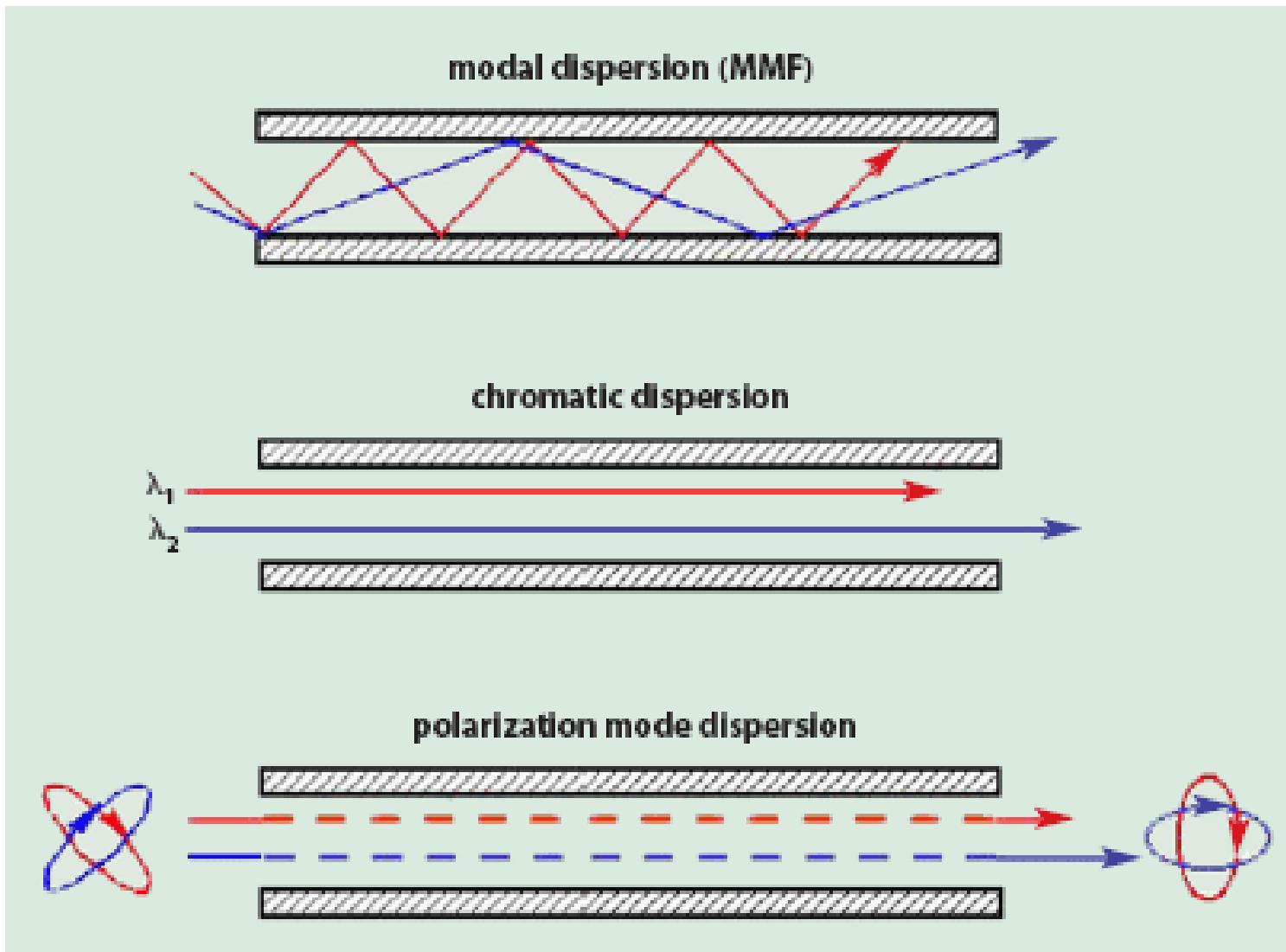
$$FEXT = -20 \log \frac{U_f}{U_s}$$

Fiberoptiline kaabel



Füüsiline kiht

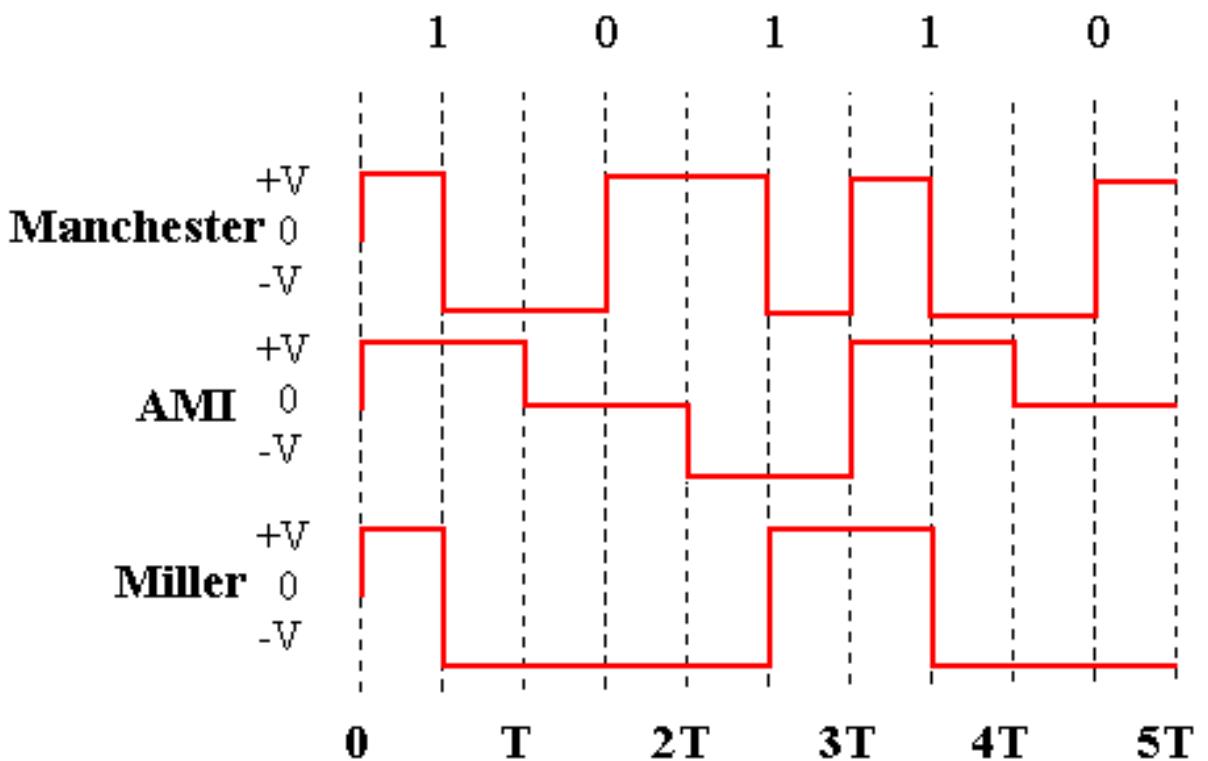
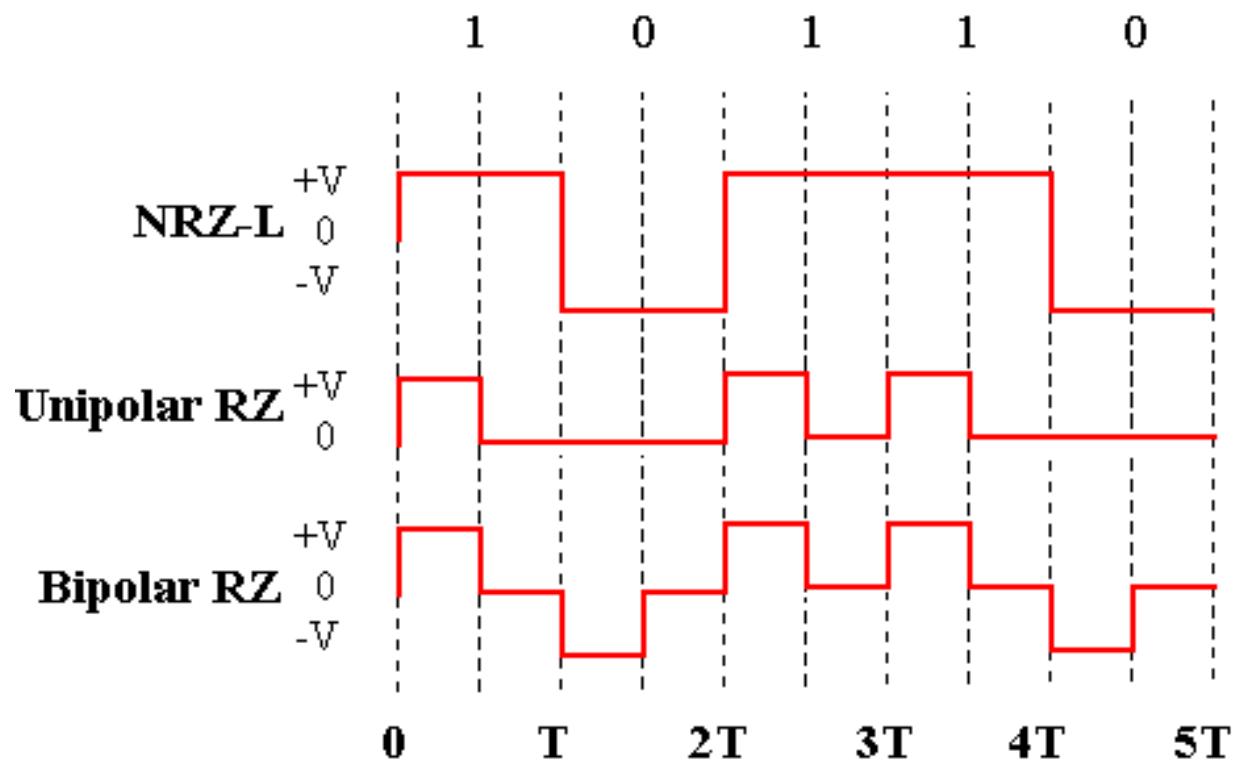
Dispersioon optilistes kaablites



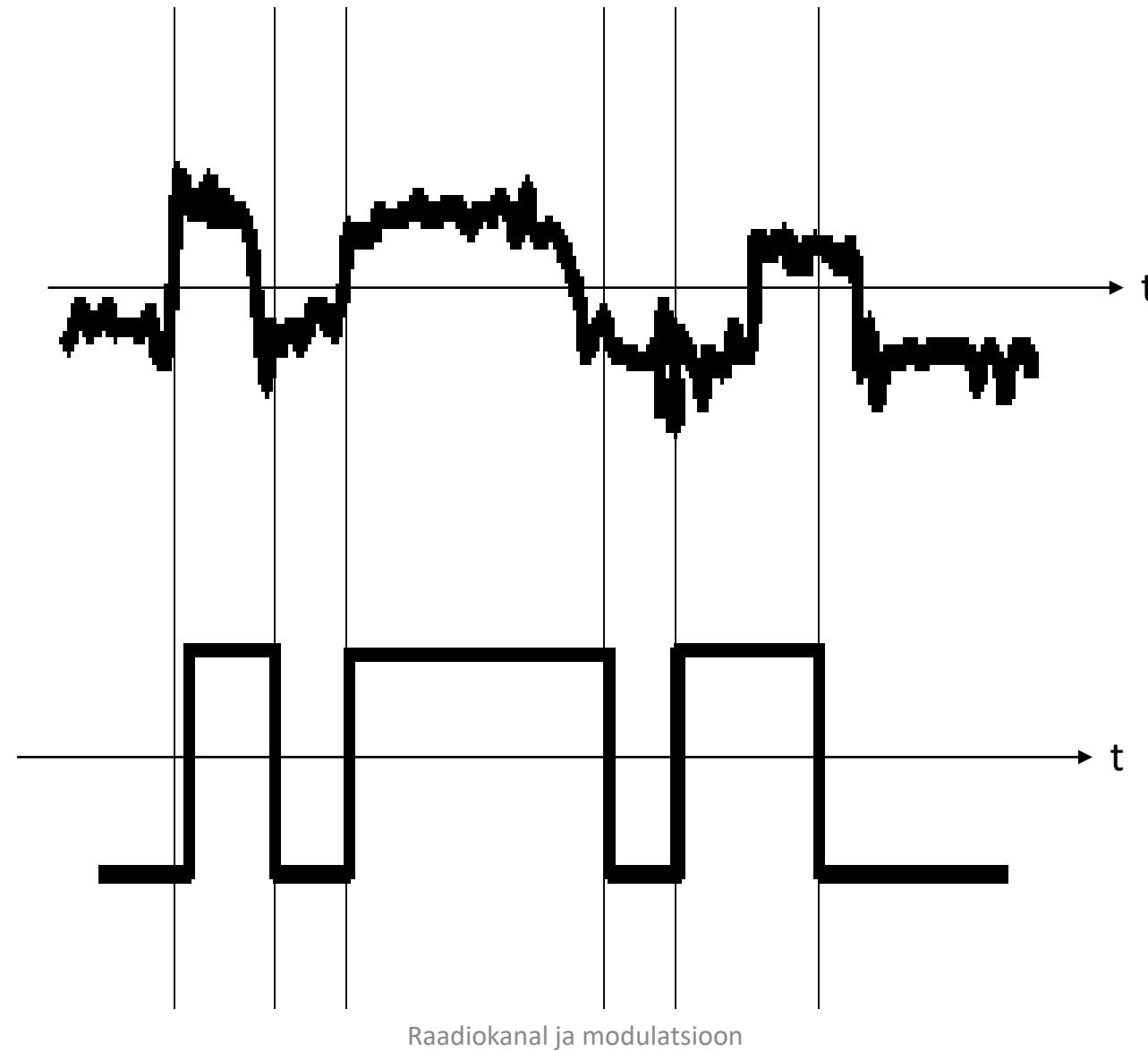
Füüsiline kiht

8

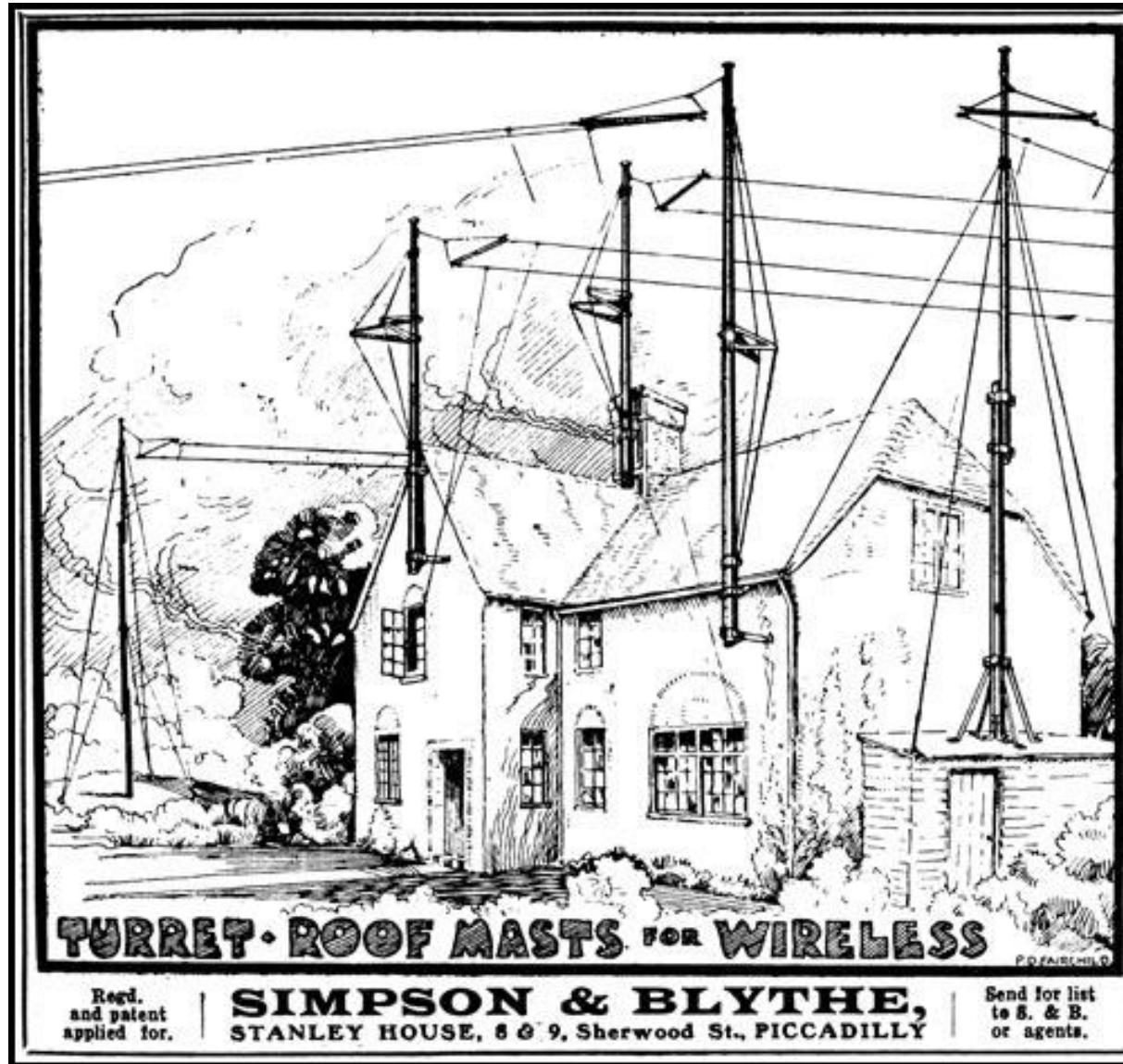
Liinkoodid



Signaali taastamine



Raadiokanal

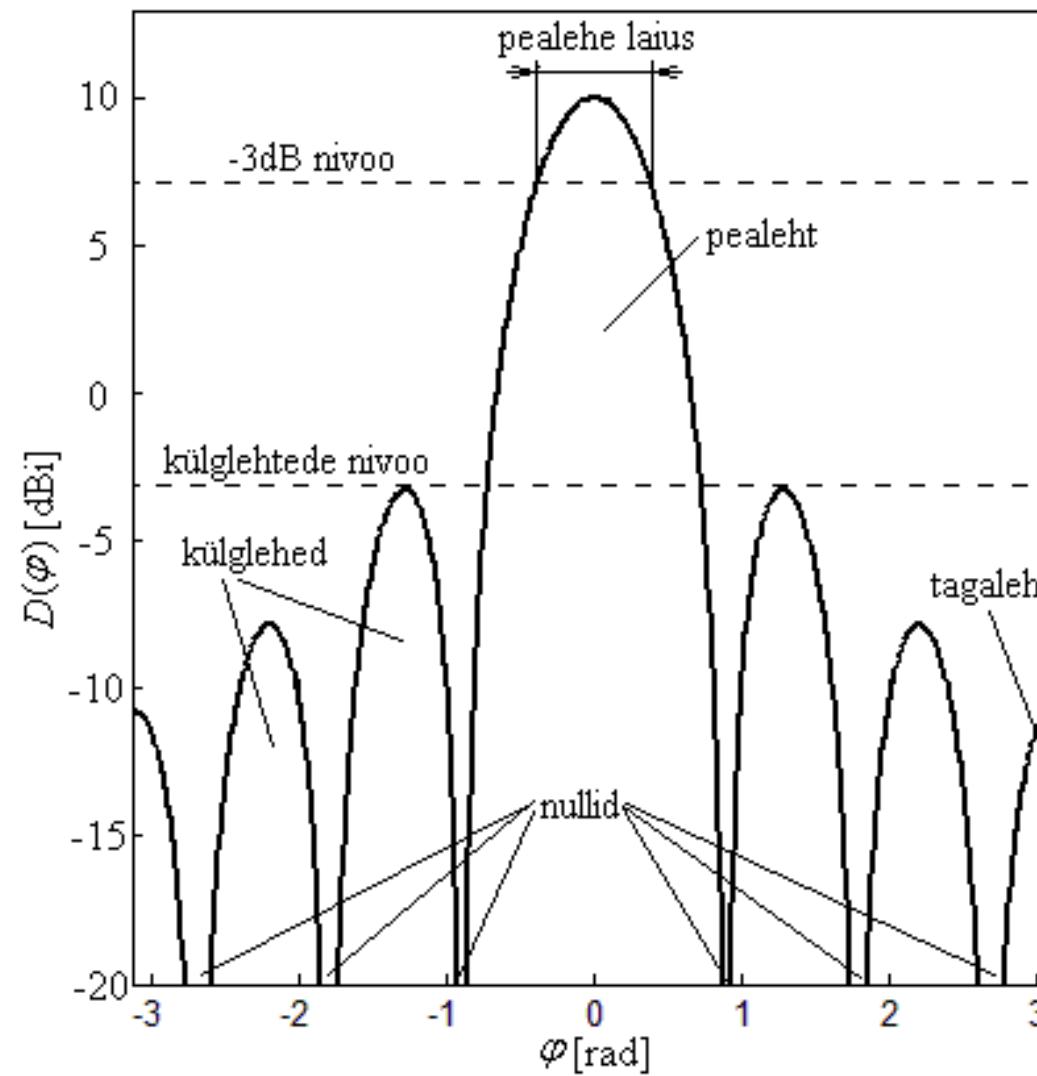


Raadiokanal ja modulatsioon

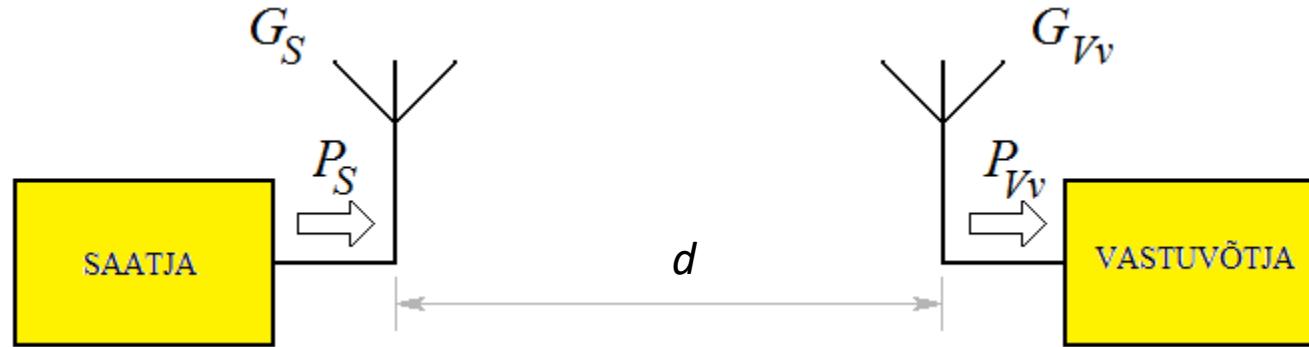
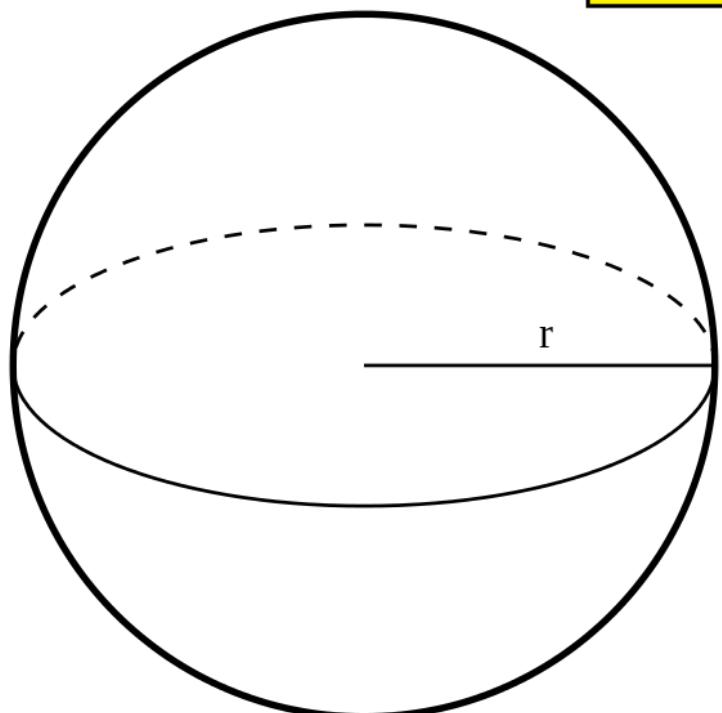
Antenn

- Antenn on seade mis muundab elektrivoolu energiat elektromagnetkiirguse energiaks ja vastupidi.
- Antenn sobitab omavahel raadioseadme ja eetri.
- Antenni parameetrid
 - Antenni võimendus G [dBi]
$$G = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{\max}}{P_{Iso}} \right)$$
 - Impedants Z_a
 - Töösagedused $f_{min} \dots f_{max}$ (ribalaius B)
 - Suunadiagramm $D(\theta, \varphi)$
 - ...

Antenni suunadiagramm



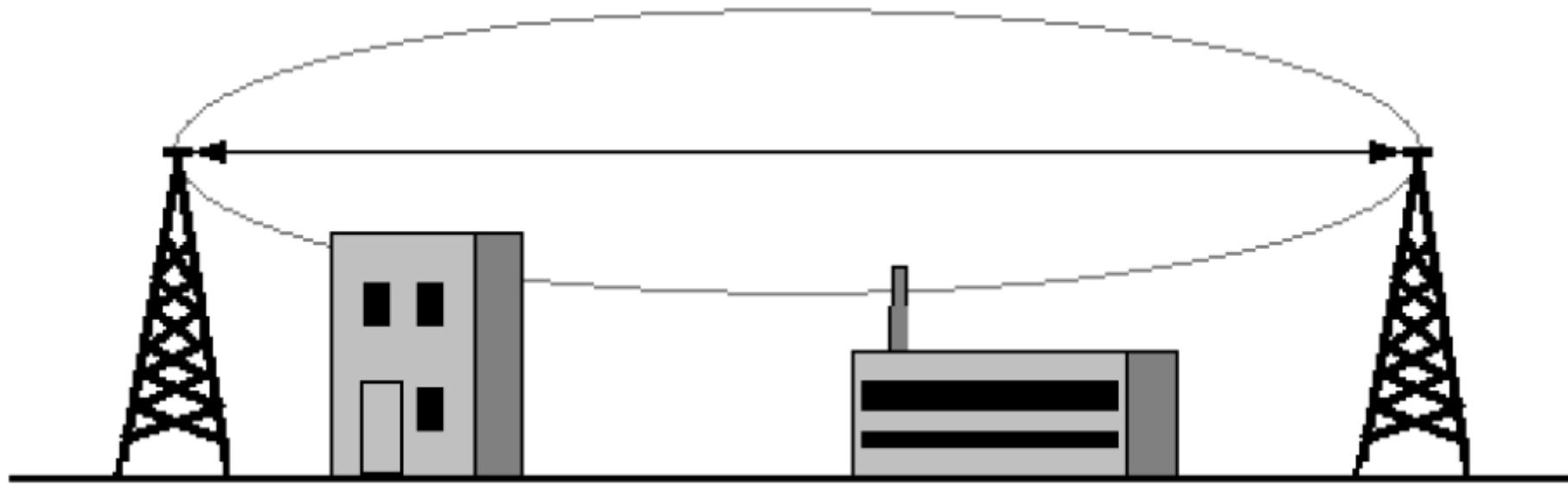
Friis'i valem



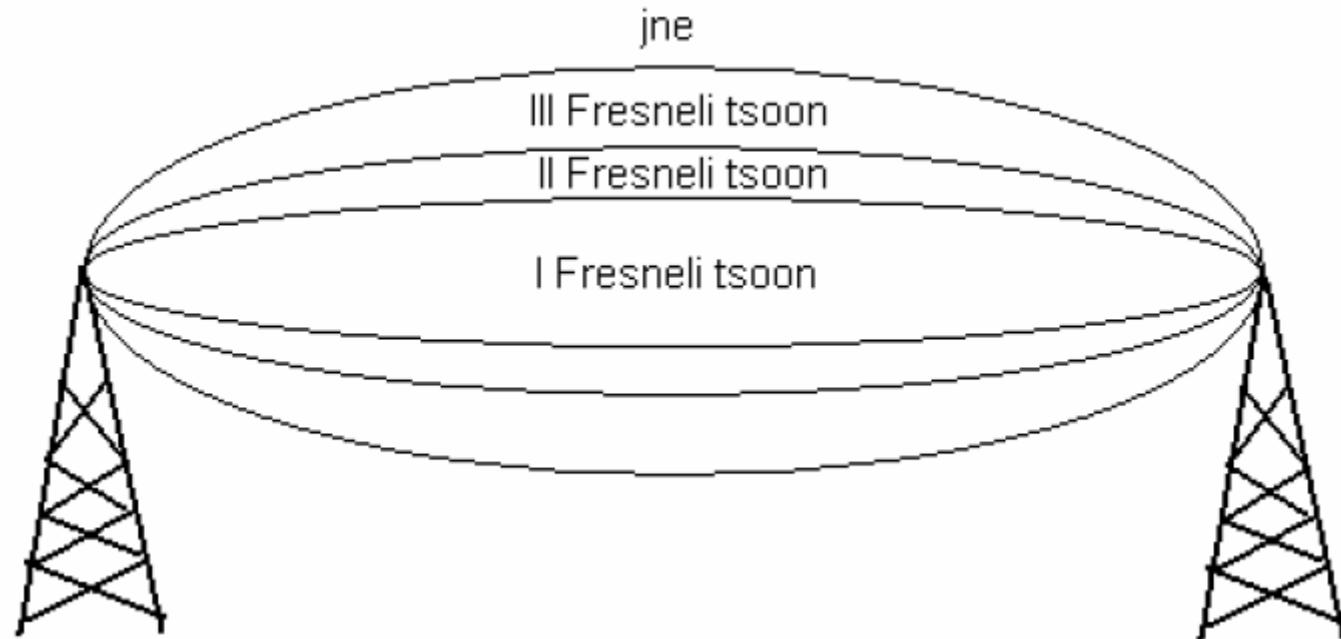
$$P_{Vv} = P_S G_S G_{Vv} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

$$FSL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

Fresneli tsoon

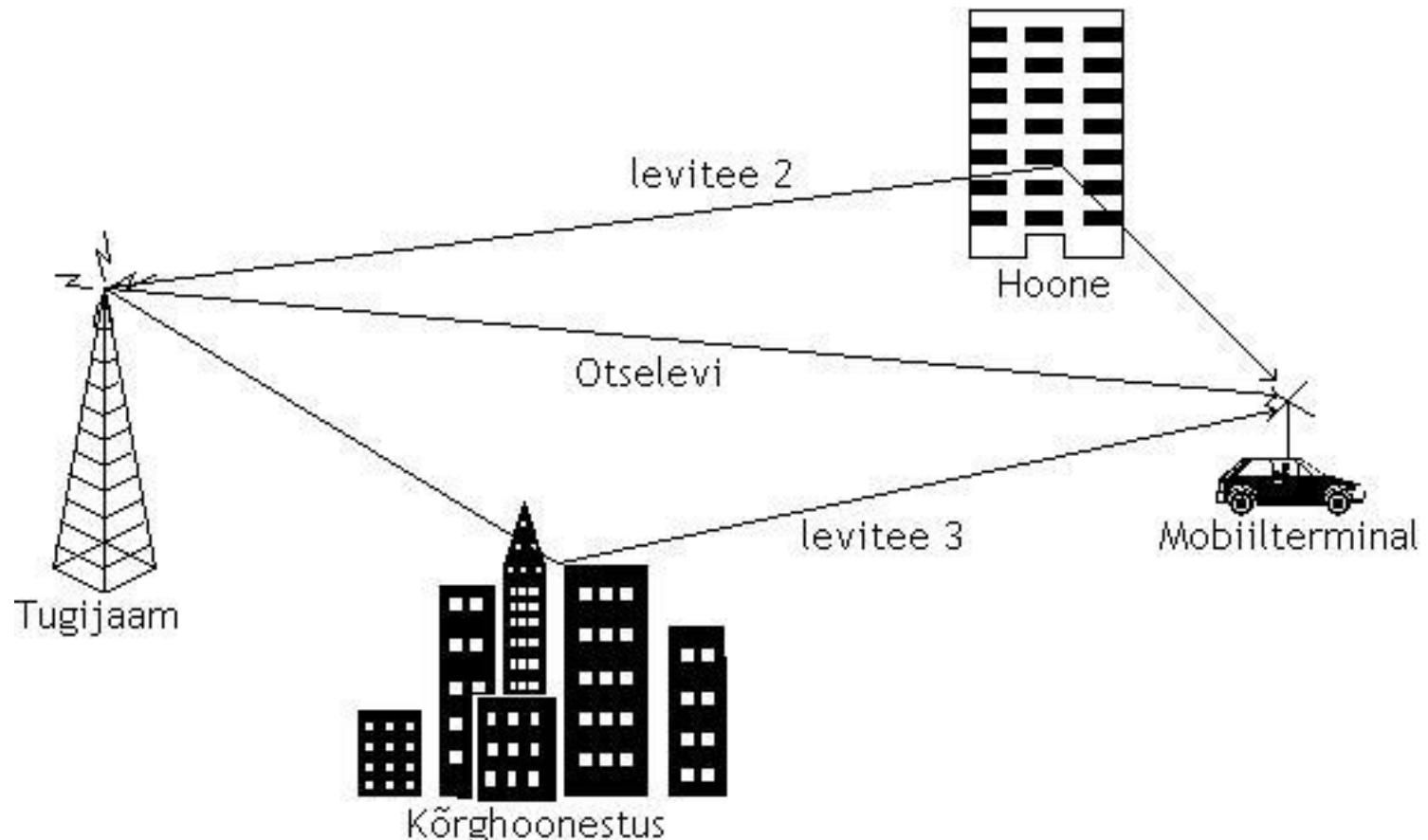


Fresneli tsoonid

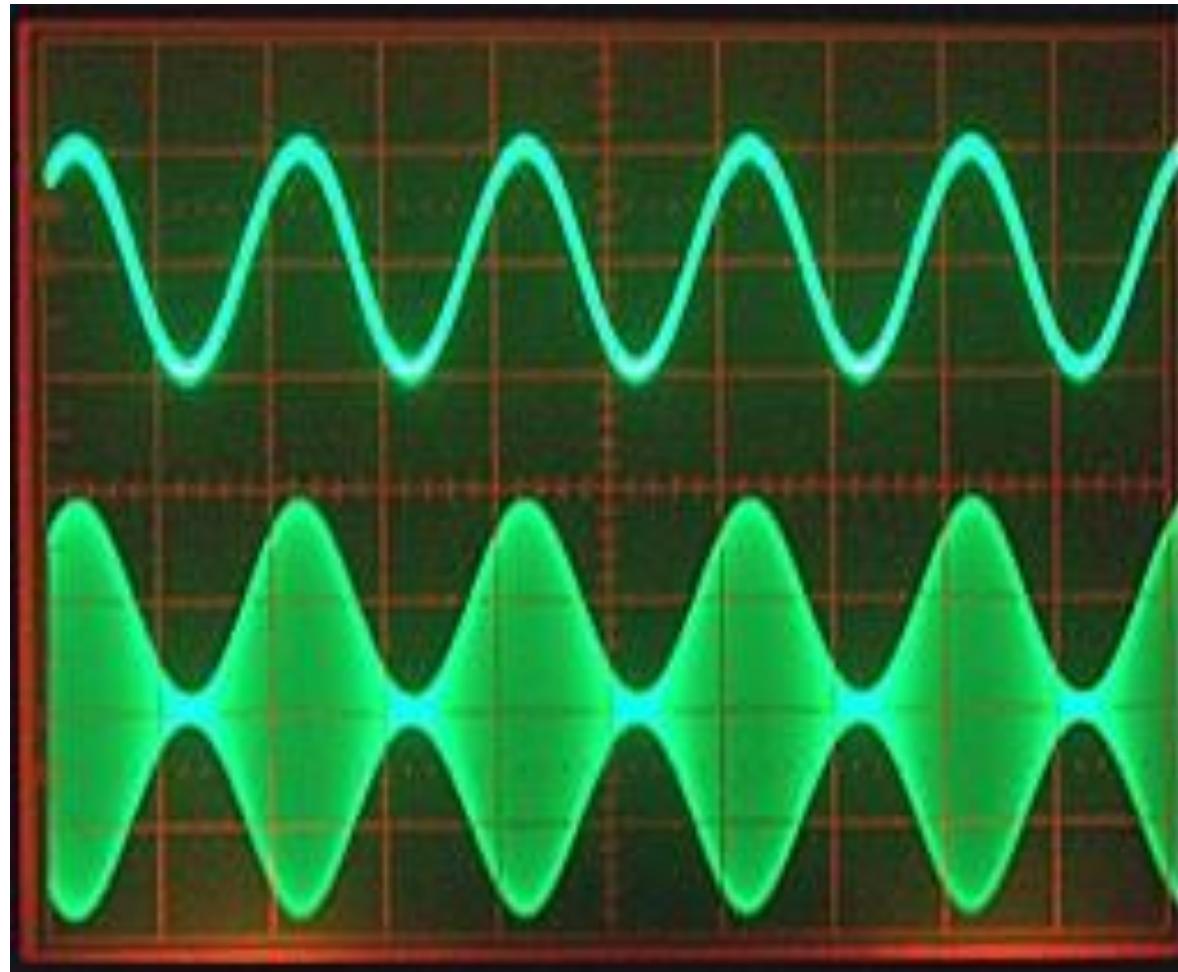


$$d_1 = \sqrt{\lambda \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}}$$

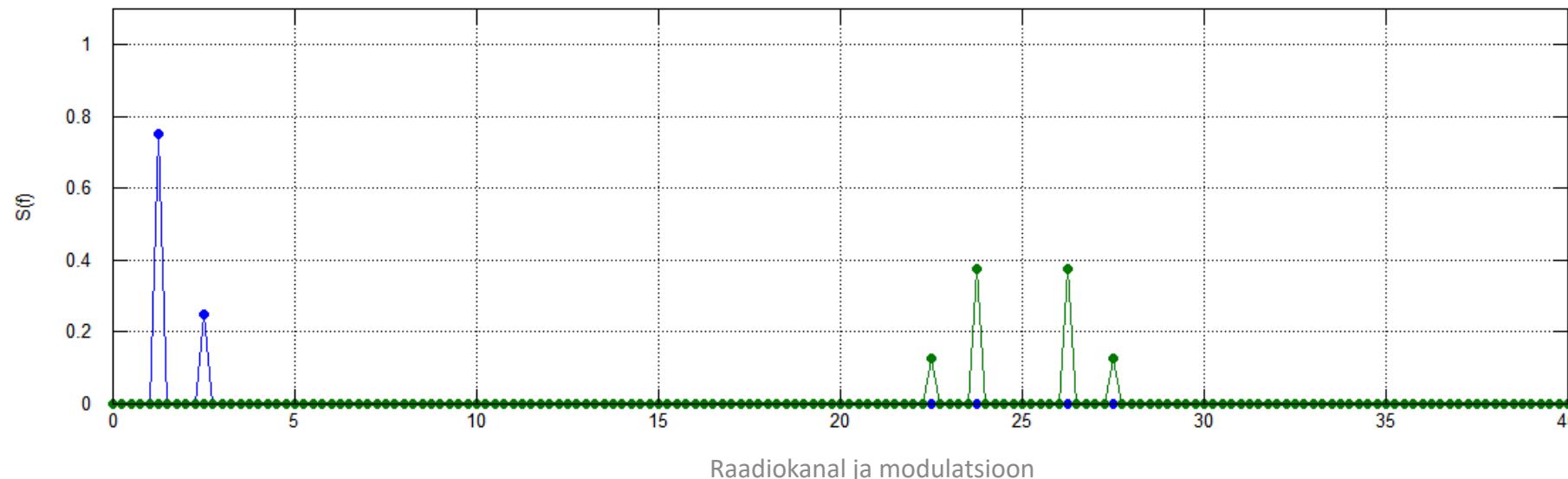
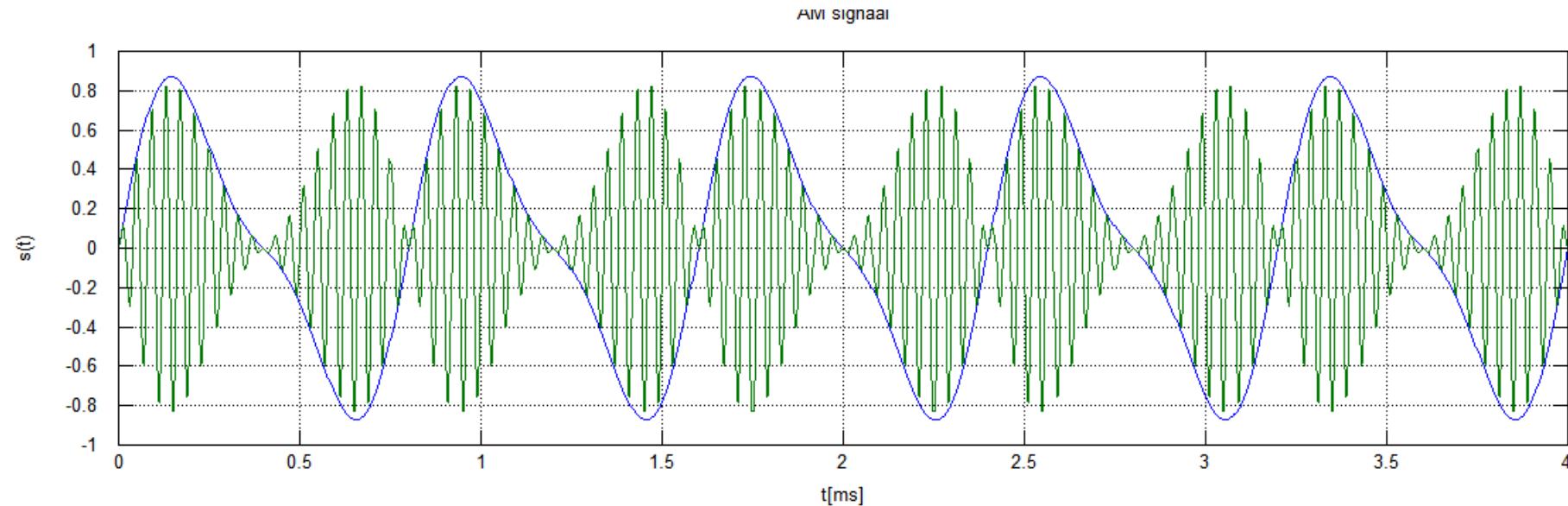
Mitmekiireline levi



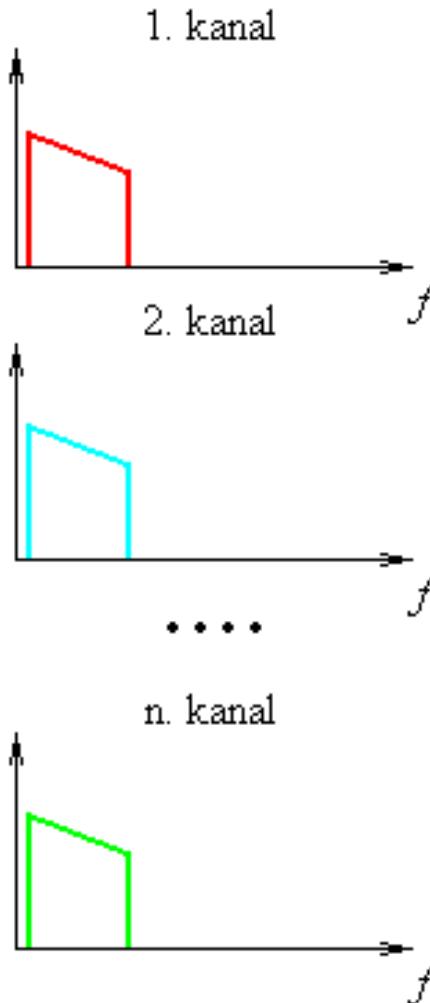
Modulatsioon



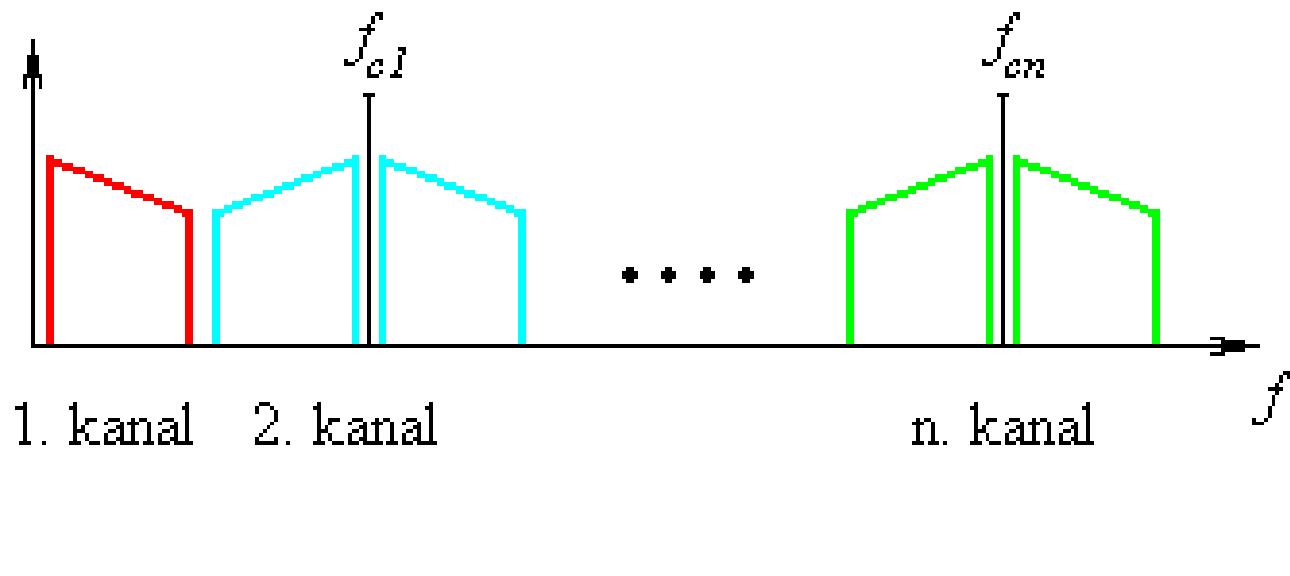
Kandjata amplituudmodulatsioon



Sagedustihendus (FDM)

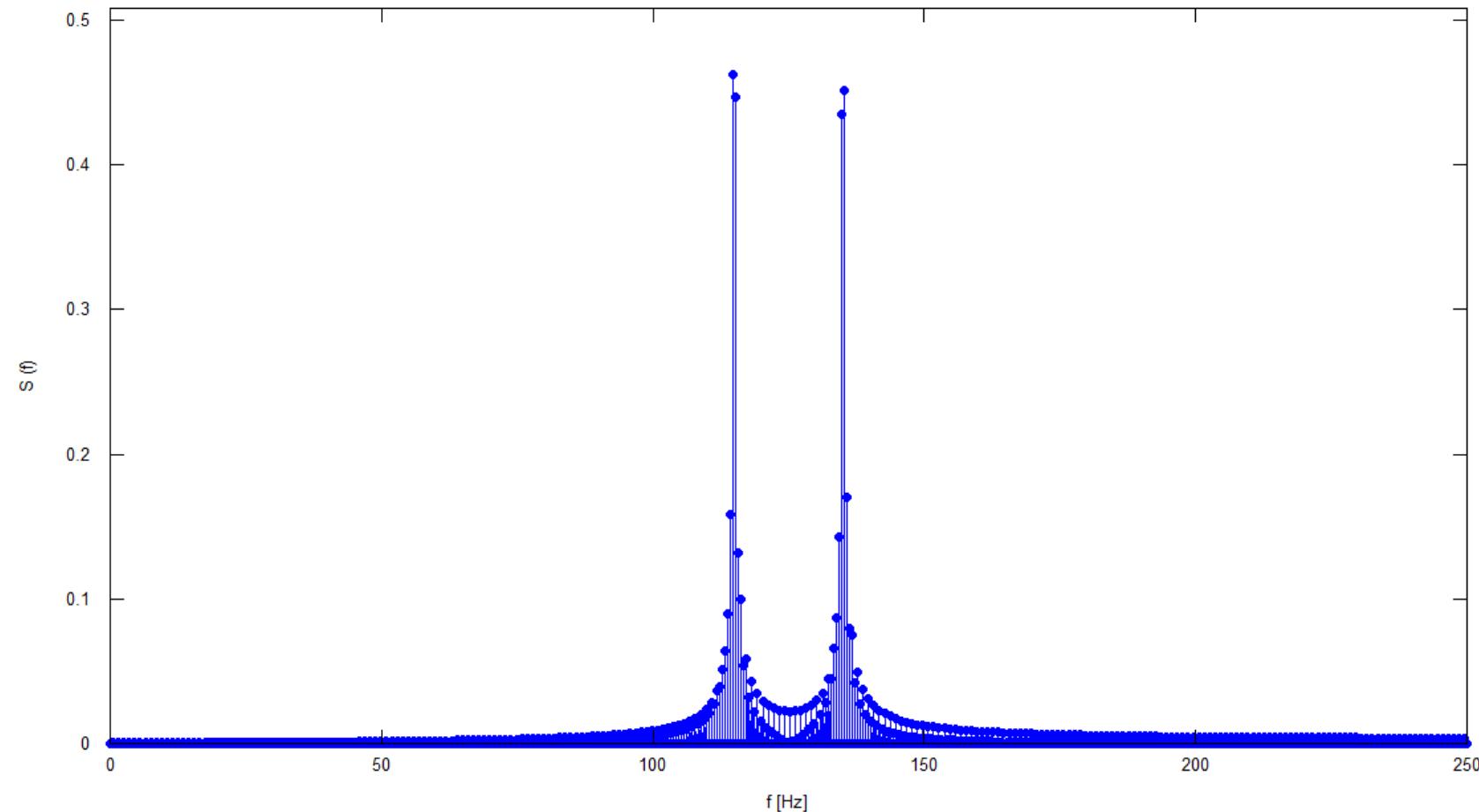


- Kanali sagedusriba efektiivne kasutamine
- Mitme signaali samaaegne edastamine ühes kanalis

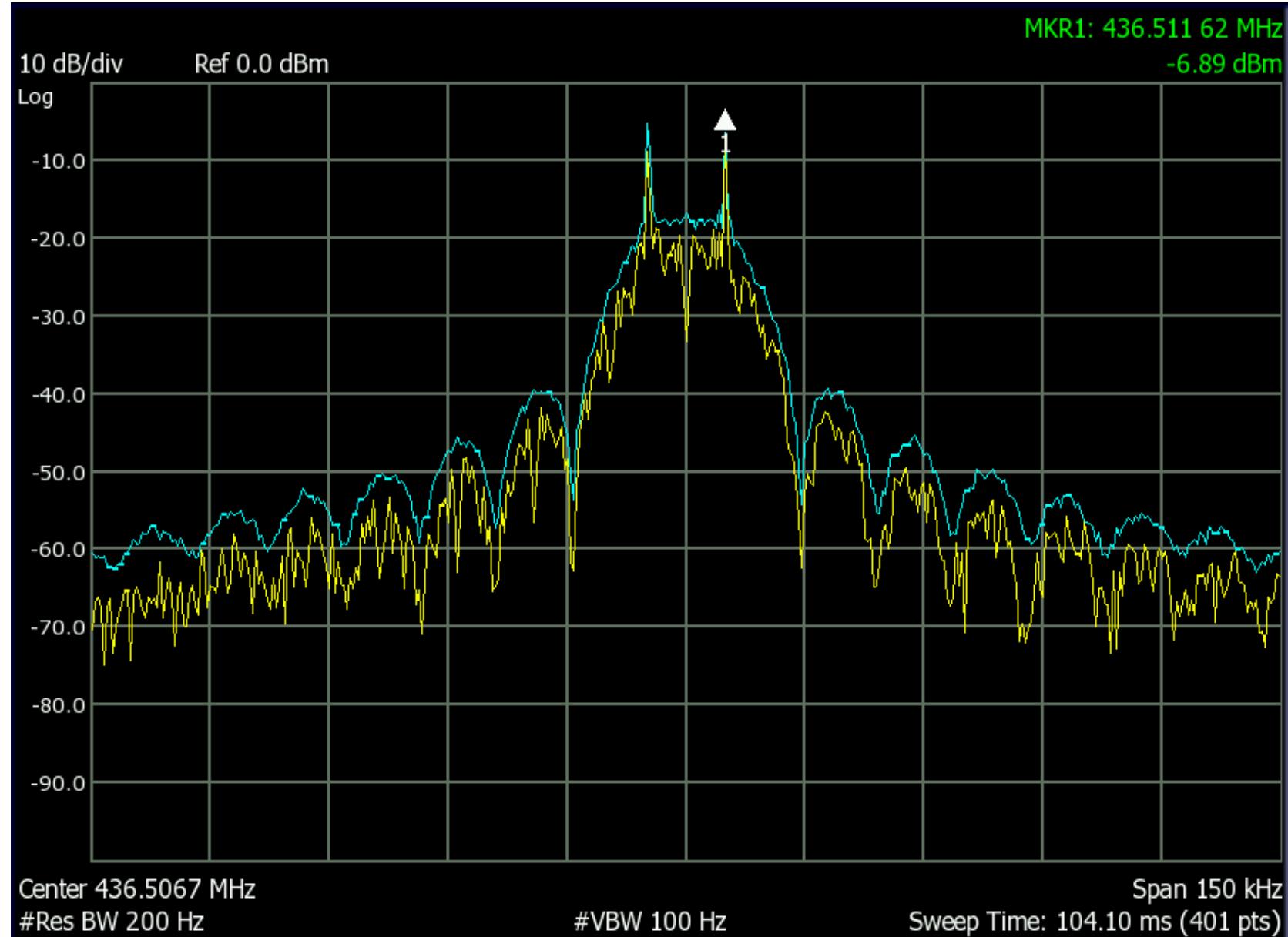


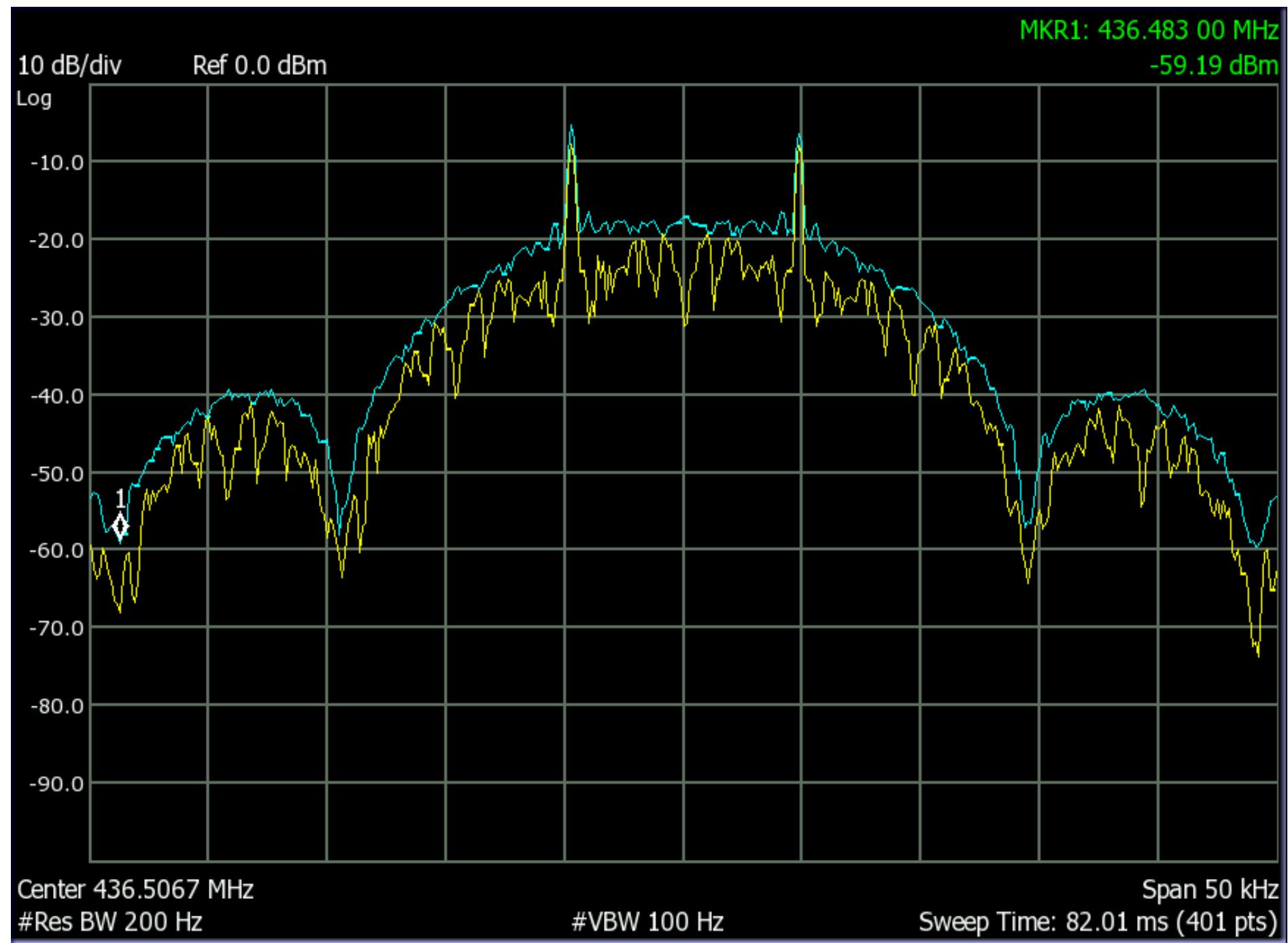
BFSK - spekter

Moduleeritud signaali spekter

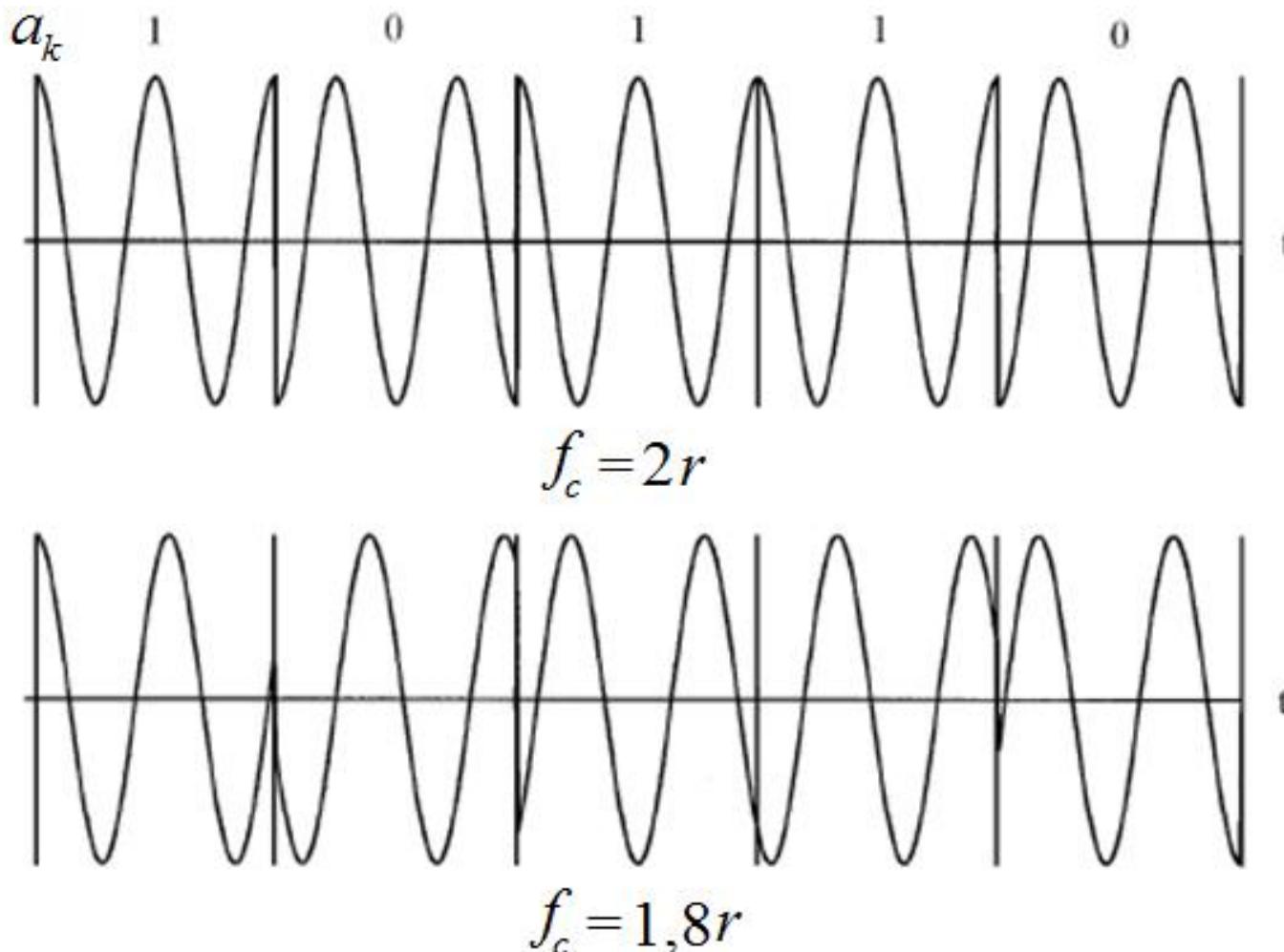


Sunde FSK

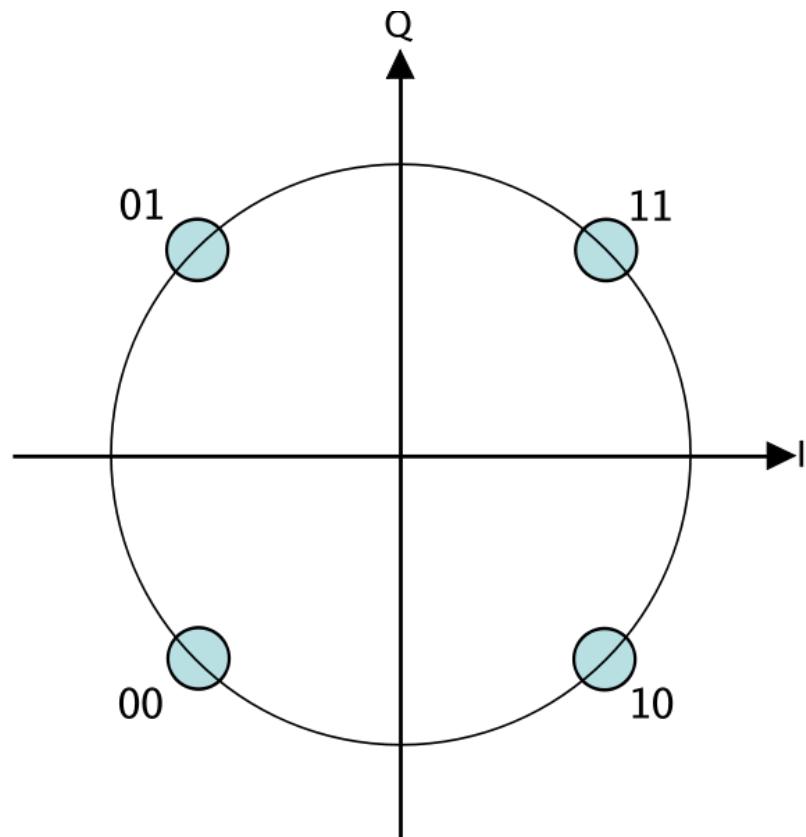




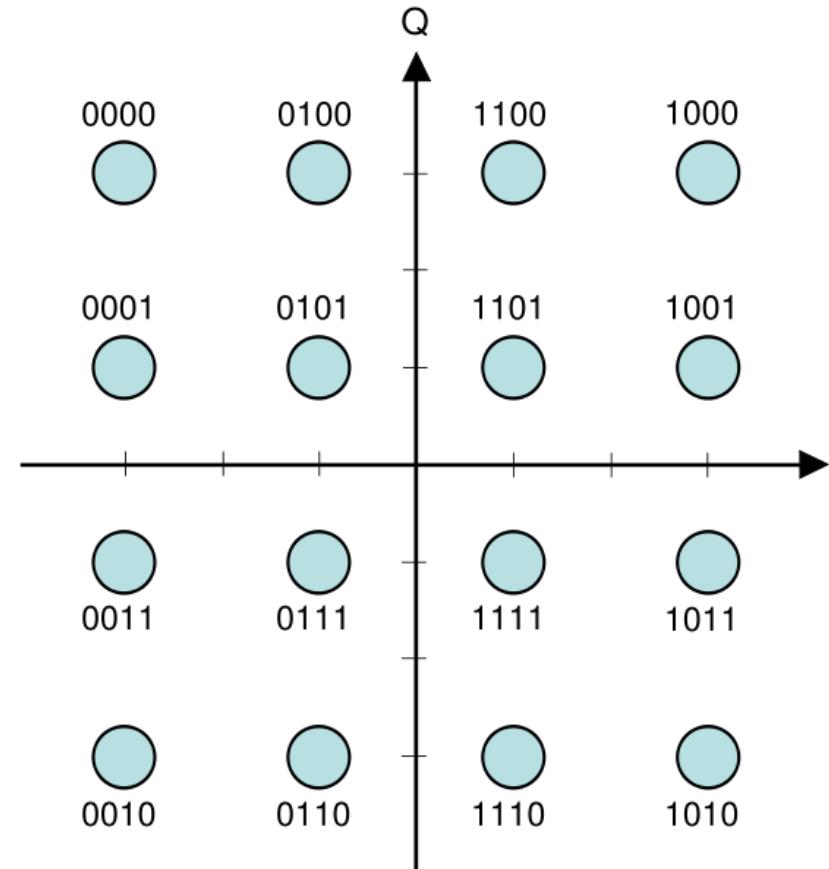
Binaarne faasmanipulatsioon BPSK



Konstellatsioonidiagramm



4-PSK



16-QAM

Häirekindlus

- Digitaalse andmeedastuse kvaliteeti iseloomustab bitivigade tõenäosus BER, mis on vigaselt vastuvõetud bittide n_e arvu suhe kõikide edastatud bittide arvu n :

$$BER = \frac{n_e}{n}$$

- Bitivigade tõenäosus sõltub signaal-müra sutest S/N vastuvõtjas.
- Digitaalsel edastusel kasutatakse S/N asemelt tihtipeale biti energia E_b [J] suhet valge müra võimsuse spektraaltihedusse η [W/Hz]. Viimane suurus on seotud signaal-müra suhtega spektralefektiivsuse ρ [bitt/s/Hz] kaudu:

$$\frac{S}{N} = \frac{E_b}{\eta} \cdot \frac{1}{\rho}$$

Näide: BPSK bitivea tõenäosus

- Koherentsel demoduleerimisel (algfaas teada):

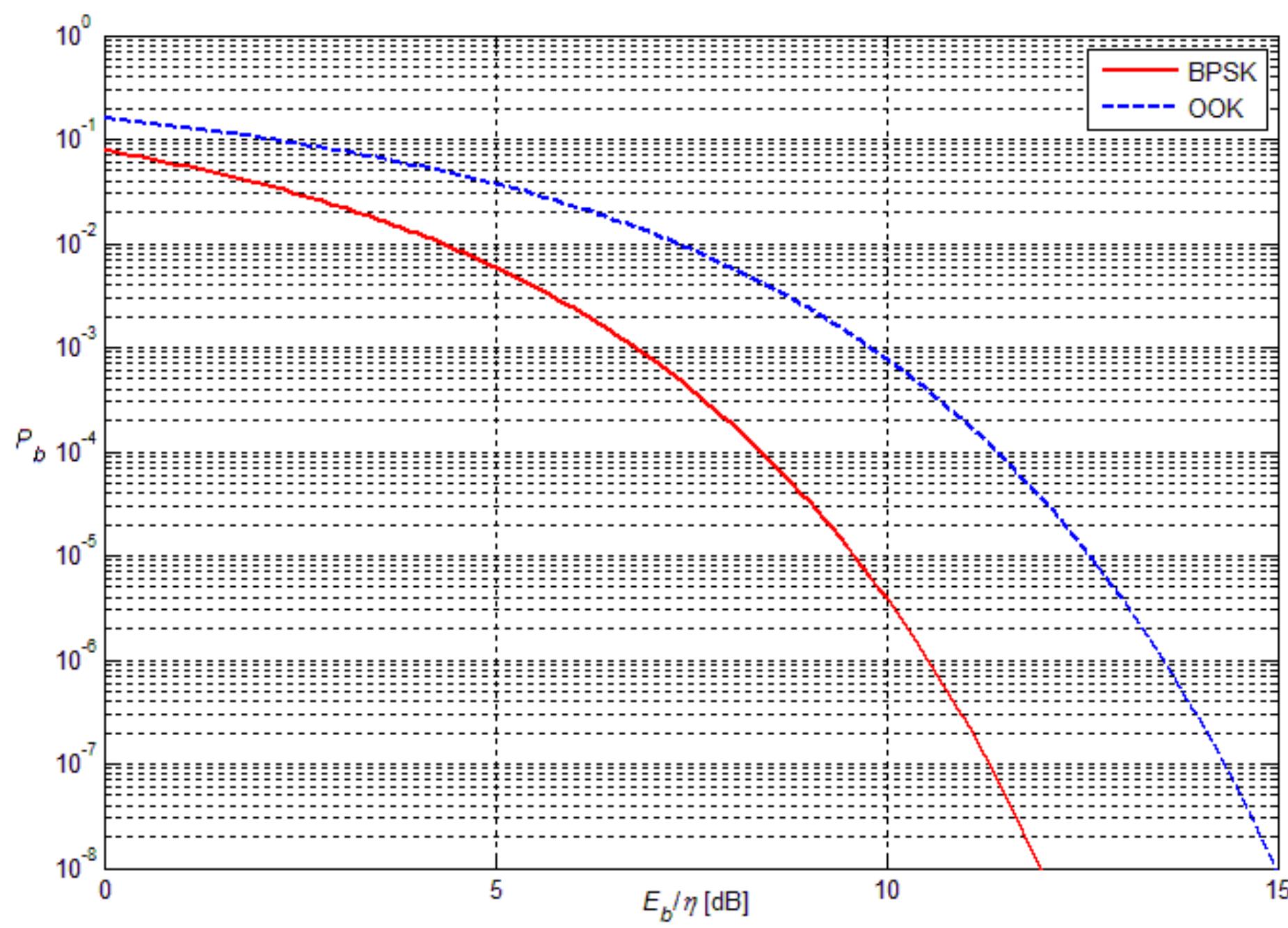
$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{\eta}}\right)$$

- Kus, Q-funktsioon on defineeritud kui (normaaljaotuse „saba“):

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

- Mittekoherentsel demoduleerimisel:

$$P_b = \frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{\eta}}$$



Skrämbler (Scrambler)

- Füüsiline kihi seade mille ülesandeks on bittide järjekorra (pseudo) juhuslik ümberjärjestamine.
- Kasutamise põhjused:
 - Vältimaks pikki, ainult ühest sümbolist, koosnevaid jadasid.
 - ..1111111111111111..
 - Lihtsustamaks vastuvõtjas kella sünkroniseerimist (*Clock Recovery*)
 - Tagab ülekantava signaali spektri kuju sõltumatuse edastatavast informatsioonist.
 - Kui reegel, mille järgi bittide järjekorda muudetakse ei ole teada, siis põhimõtteliselt tagab ka andmete turvalisust ülekandel (krüpteerimine).

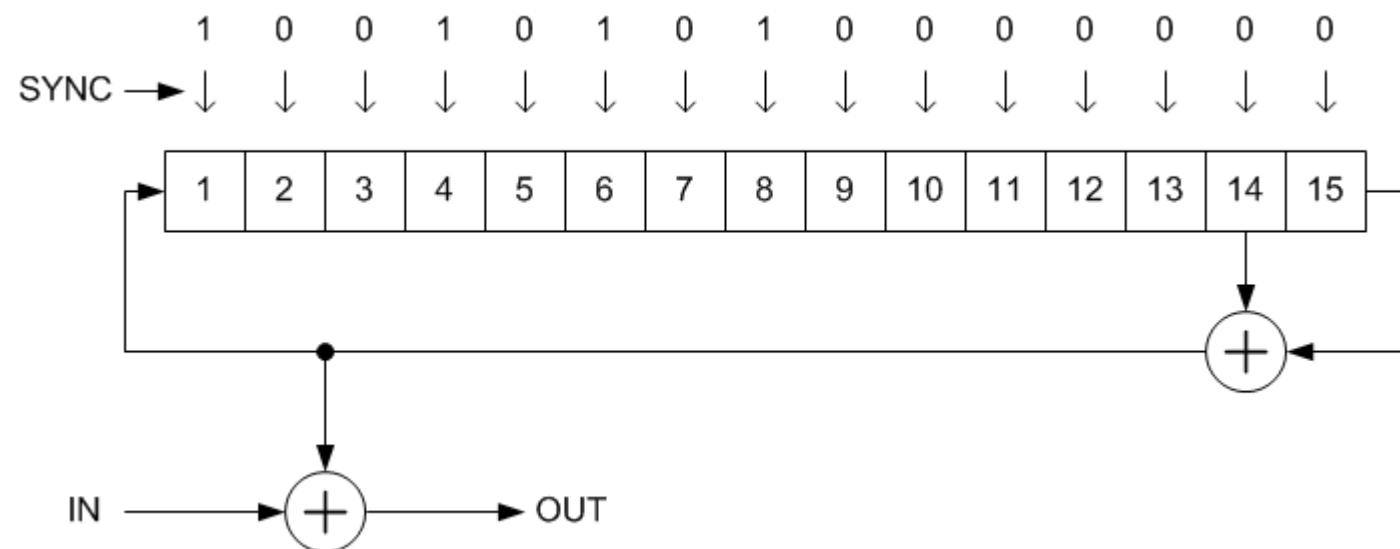
Aditiivne skrämbler

- Nimetatakse ka sünkroonseks skrämbleriiks (*additive or synchronous scrambler*).
- Edastatavale signaalile liidetakse (mooduliga kaks) pseudojuhuslik binaarne jada.
- Liidetav binaarne jada võib olla mällu salvestatud, kuid tavaiselt tekitatakse see tagasisidestatud nihkeregistriga (LFSR). Tekitatav pseudojuhuslik jada on täielikult määratud nihkeregistri algsisu ja genereeriva polünoomiga (tagasiside võtmise kohtadega):

$$1+x^{-14}+x^{-15}$$

- Tagamaks algsete andmete korrektset taastamist peab deskrämbler töötama sünkroonselt, selleks lisatakse edastatavatele andmetele sünkrosõnad.

Aditiivne skrämbler



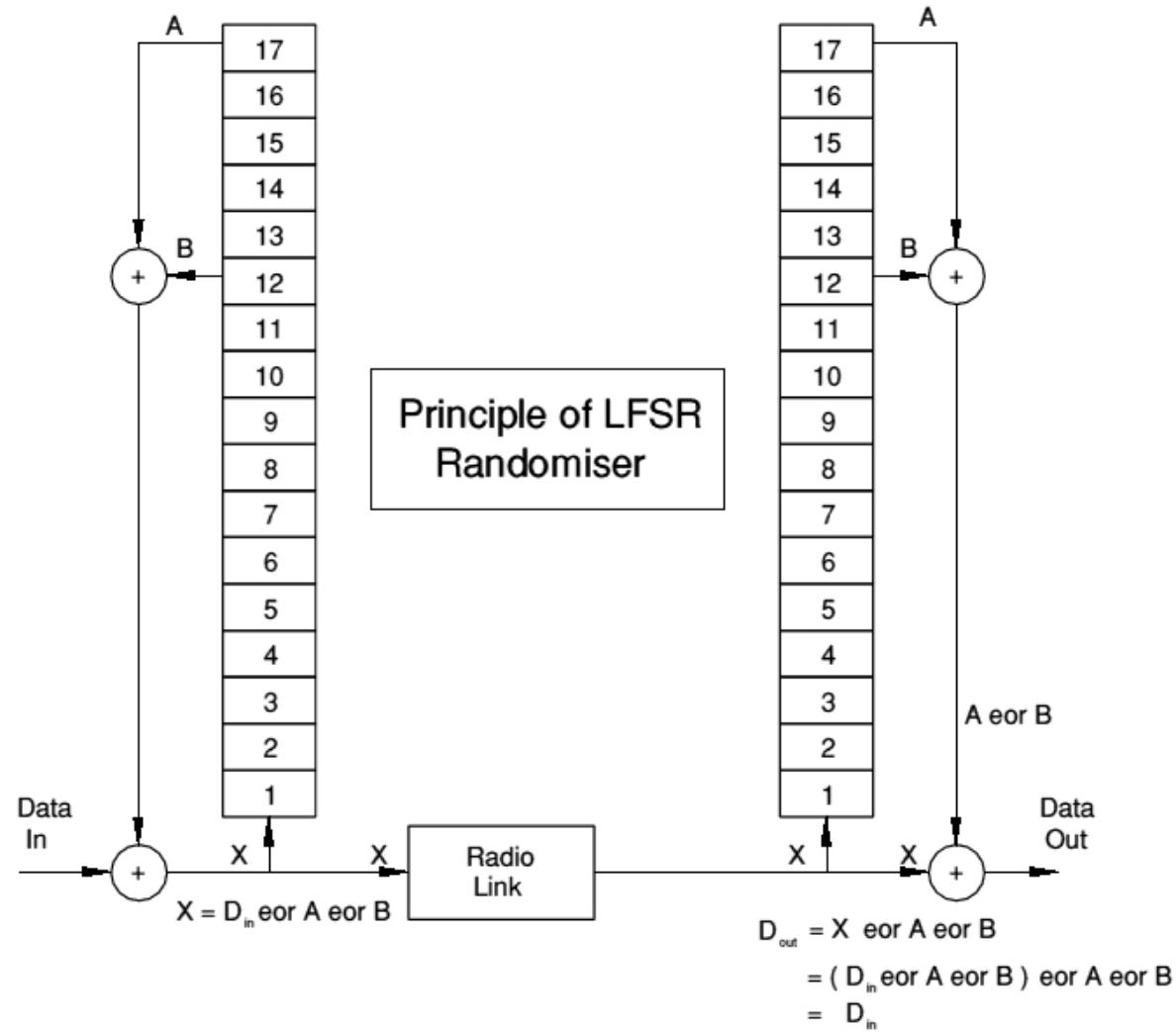
Füüsiline kiht

31

Multiplikatiivne skrämbler

- Nimetatakse ka isesünkroniseeruvaks skrämbleriiks (*multiplicative or self-synchronizing scrambler*).
- Korrutab sisendsignaali iseenda ülekandefunktsiooniga (z-ruumis).
- Ei vaja sünkroniseerimist.
- On määratud samuti polünoomiga. Algseis ei ole kriitiline.
- Kui deskrämbleri sisendis on ühekordne viga, siis väljundis on vigade arv korrutunud tagasisideühenduste arvuga.

Müultiplikatiivne Skrämbler

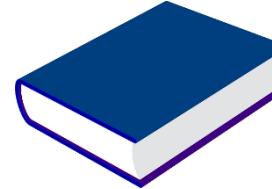


Füüsiline kiht

Multiplikatiivne skrämbler

- Olgu skrämbleri algseis saatjas: **0x07E7E**
- Edastatava kaadri algus enne skrämbleerimist oli:
0x01 0xA6 0x6E 0xE9 0xB9 0xA6 ...
- Vastuvõtjas ei olnud skrämbleri algseis teada ja seetõttu oli deskrämbleri algseis vaikimisi **0x00000**
- Deskrämbleeritud kaadri algus peale deskrämbblerit oli:
0xD9 0x79 0x6E 0xE9 0xB9 0xA6 ...

Lisaks lugeda



- E. Laaneoks. **Sissejuhatus võrgutehnoloogiasse**. Tartu Ülikool 2010. peatükk 5 – **OSI füüsiline kiht**.
- **Practical Telecommunications and Wireless Communications for Business Industry**. Elsevier Ltd, 2004. Peatükk 3 - **Transmission media**.
- *William Stallings*. **Data and Computer Communications** 8th edition. 4.2 Wireless Transmission. lk 117 – 133.
- *Carl R. Nassar* . **Telecommunications Demystified**. Elsevier Ltd 2001. Peatükk 5 - **Getting It from Here to There: Modulators and Demodulators**.

14. Kanalikiht

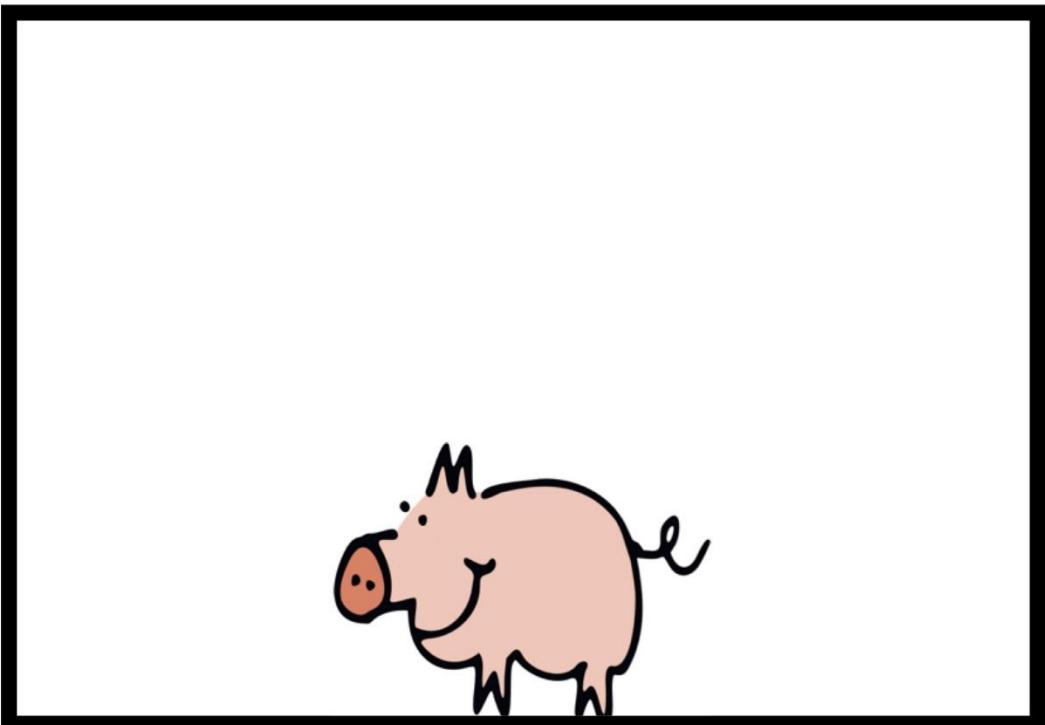
Arvutivõrgud IEE1100

Ivo Müürsepp

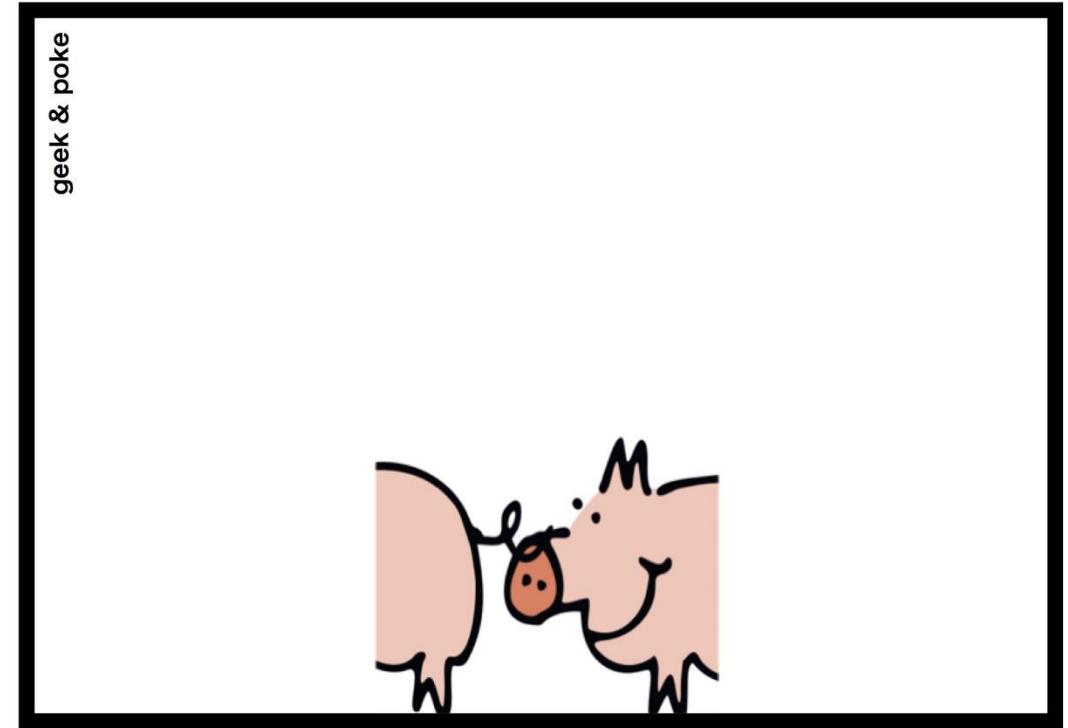
Meediapöörduskiht MAC

- Saatmisel andmete jaotamine kaadriteks, füüsilisel aadressi (MAC aadress), kaadri pikkuse ja veatuvastusväljade lisamine.
- Vastuvõtlul andmete eraldamine kaadrist, aadressi ja vigade tuvastamine.
- Kaadri sünkroniseerimine.
- Füüsilele meediumile juurdepääsu haldamine (*CSMA/CD*).

SIMPLY EXPLAINED



BIG-ENDIAN



LITTLE-ENDIAN

Veatuvastus

- Kontrollsumma
 - Lihtne aga ebatõhus
 - Paarsuskontroll
 - Mooduliga liitmine
- CRC (kontrollkood)
 - *Cyclic redundancy check*
 - Põhineb jagamisel
 - Käsitleb andmeid polünoomina
- CRC spetsifikatsioon:
 - Määratud genereeriva polünoomiga
CRC-4: $x^4 + x + 1$; 0x3 (G.704)
CRC-16-CCITT: 0x1021
 - Algväärtusega
 - Tulemi edastamise järjekorraga
 - Tulemile liidetava konstandiga

Biti- ja baiditäätmine(*Bit- and byte stuffing*)

- Kaadri algust ja lõppu tähistatakse spetsiifilise väljaga (*flag*): 0x7E
- Juhul kui kaadri sees edastatavates andmetes leidub sama bitijärjestus, siis loeb vastuvõtja selle ekslikult kaadri lõpuks.
- Lahenduseks on nn *bit stuffing*.
 - Iga viie järjestikuse „1“ järelle lisatakse „0“ (farssbitt).
- Juhul, kui andmeid edastatakse baidi kaupa on mõistlikum kasutada *byte stuffing*'u nimelist tehnikat (*Control Octet Transparency*).
 - HDLC protokollis kasutatakse spetsiaalselt sümbolit 0x7D (*Control escape octet*), mis asetatakse iga kaadri sees oleva 0x7E või 0x7D okteti ette. Lisaks inverteeritakse vastava okteti viies bitt.

Meediapöördus raadiovõrgus

- Peidetud sõlme probleem
 - *Hidden node probleem*
 - Lahendus: pollimine, token
- Avaliku sõlme probleem
 - *Exposed node probleem*
 - Lahendus: RTS/CTS mehhanism



Cats 'n' Cats
www.catsncats.com

Loogilise ühenduse kiht LLC

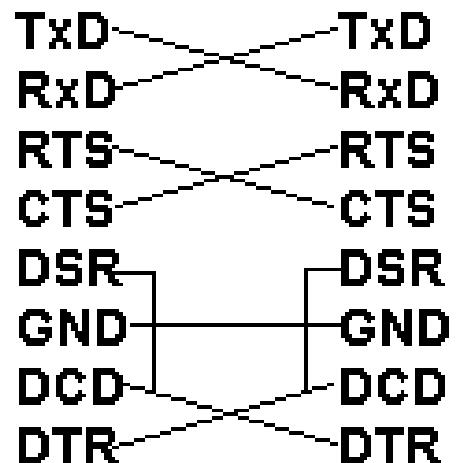
- Liides kõrgema kihi protokollide jaoks. Andmete multipleksimine (LSAP).
- Voo juhtimine (*Stop-and-Wait, Sliding-Window*).
- Vigade tuvastus ja parandamine (ARQ, FEC).



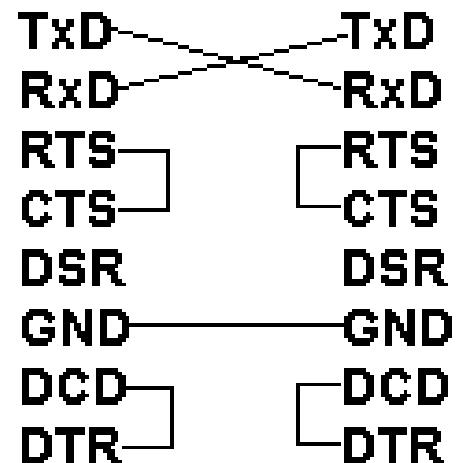
Riistvaraline vookontroll

Nr	Lühend	Tähendus	Selitus
1	CD	<i>Carrier Detect</i>	Modemid on omavahel ühendatud
2	Rx	<i>Receive</i>	Sisend vastuvõetavate andmete jaoks
3	Tx	<i>Transmit</i>	Väljund edastatavatele andmetele
4	DTR	<i>Data Terminal Ready</i>	Arvuti (DTE) on sideks valmis
5	GND	<i>Ground</i>	Maa
6	DSR	<i>Data Set Ready</i>	Modem (DCE) on sideks valmis
7	RTS	<i>Request To Send</i>	Arvuti (DTE) soovib edastada
8	CTS	<i>Clear To Send</i>	Modem (DCE) on valmis andmeid vastu võtma
9	RI	<i>Ring Indicator</i>	Sissetulev „kõne“

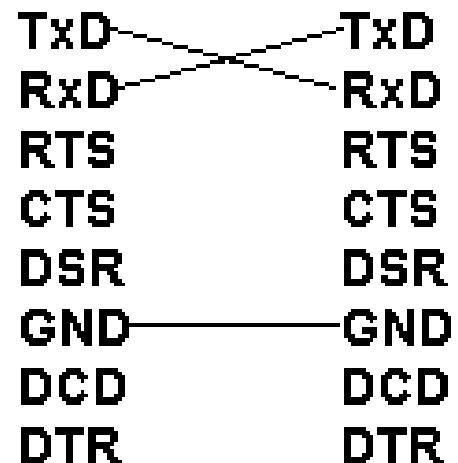
Nullmodem



Full Handshake
Null Modem



No Handshake
Null Modem



Simple 3-Wire
Connection

Vigu parandavad koodid

- FEC – *Forward Error Correction*
- Saavutatakse kontrollitud liiasuse lisamisega.
- Hammingi koodid
 - Kolmkeordsest kordav kood - Hamming (3,1)
 - Hamming (7,4)
- Reed-Solomoni koodid
 - CD, DVB, WiMAX, QR
- BCH koodid
- Konvolutsioonilised koodid
- Võrekoodid
 - Viterbi algoritm.
- Turbokoodid
 - 3G/4G mobiil, kosmoseside
- LDPC koodid (Gallageri koodid)



Mõisted

- Hammingi kaal
 - Koodsõna \mathbf{c} Hammingi kaaluks $w\{\mathbf{c}\}$ nimetatakse tema mittenulliste koordinaatide arvu.
- Hammingi kaugus
 - Kahe koodsõna \mathbf{c}_i ja \mathbf{c}_j vaheliseks kauguseks nimetatakse nende koordinaatide arvu, milles nad üksteisest erinevad. $h = d\{\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_j\} = w\{\mathbf{c}_i \oplus \mathbf{c}_j\}$
- Minimaalne kaugus
 - Koodi \mathbf{C} minimaalseks kauguseks h_{min} nimetatakse kahe erineva koodsõna vähimat kaugust.

$$h_{min} = d\{\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_j\} \quad i \neq j$$

Hammingi kood

- Lineaarne binaarne plokk-kood minimaalse kaugusega $h_{min} = 3$.
- Iga täisarvu $r \geq 2$ korral on ploki pikkus $n = 2^r - 1$, millest informatsiooni kannab $k = 2^r - r - 1$ bitti ja ülejäävud on paarsusbitid.
- Koodi kiiruseks (*code rate*) nimetatakse informatsiooni edastavate bittide arvu k suhet kogu ploki pikkusesse n .

$$R = k/n$$

- Hammingi koodi kiirus

$$R = 1 - r/(2^r - 1)$$

- Suudab parandada ühekordseid bitivigu.

Hamming (7,4)

$$r = 3$$

$$n = 7$$

$$k = 4$$

$$R = 4/7 \approx 0,57$$

Biti nr		7	6	5	4	3	2	1
Biti sisu		d_7	d_6	d_5	p_4	d_3	p_2	p_1
	P_4	x	x	x	x			
	p_2	x	x			x	x	
	p_1	x		x		x		x

$$p_4 = d_7 + d_6 + d_5$$

$$p_2 = d_7 + d_6 + d_3$$

$$p_1 = d_7 + d_5 + d_3$$

Sõnum: 1101

$$p_4 = d_7 + d_6 + d_5 = 1+1+0 = 0$$

$$p_2 = d_7 + d_6 + d_3 = 1+1+1 = 1$$

$$p_1 = d_7 + d_5 + d_3 = 1+0+1 = 0$$

Koodõna: 1100110

Hamming (7,4)

Sõnum: 1101

Koodsõna **c**: 1100110

Veavektor **e**: 0010000

Vigane koodsõna: 1110110

Sündroom:

$$A = p4 + d7 + d6 + d5$$

$$B = p2 + d7 + d6 + d3$$

$$C = p1 + d7 + d5 + d3$$

Leiame sündroomi **s**:

$$A = p4 + d7 + d6 + d5 = 0+1+1+\textcolor{red}{1} = 1$$

$$B = p2 + d7 + d6 + d3 = \textcolor{blue}{1}+1+1+1 = 0$$

$$C = p1 + d7 + d5 + d3 = 0+1+\textcolor{red}{1}+1 = 1$$

$$\text{Sündroom: } s = 101_2 = 5$$

Bitt numbriga 5 ehk $d5$ on vigane!

Parandatud koodsõna: 1100110

Hamming (7,4)

- Genereeriv maatriks

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{c} = \mathbf{d}\mathbf{G}$$

- Süstemaatiline kood

$$\mathbf{G} = [\mathbf{I} | \mathbf{A}] = \left[\begin{array}{cccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right]$$

Paarsuskontrolli maatriks

- Saadakse genereeriva maatriksi teisendamisel

$$\mathbf{H} = [\mathbf{A}^T | \mathbf{I}] = \left[\begin{array}{cccc|ccc} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

- Sündroom leitakse

$$\mathbf{s} = \mathbf{H}\mathbf{c}^T$$

Hamming (7,4) – lubatud koodsõnad

sõnum	koodsõna	sõnum	koodsõna
0000	0000000	1000	1001011
0001	0000111	1001	1001100
0010	0011001	1010	1010010
0011	0011110	1011	1010101
0100	0101010	1100	1100001
0101	0101101	1101	1100110
0110	0110011	1110	1111000
0111	0110100	1111	1111111

- Koodsõna on seitsmebitine, võimalike koodsõnade arv seega $2^7 = 128$
- Lubatud koodsõnu ainult 16
- Kasutusel ainult iga kaheksas

Vaheldamine (*Interleaving*)

- Vigu parandavad koodid suudavad edukalt parandada suhteliselt suurt hulka vigu, eeldusel, et vead on vastuvõetud andmetes ühtlaselt jaotunud.
- Praktikas kipuvad vead esinema suuremate gruppide e pursetena (*error burst*).
- Vaheldi (*Interleaver*) on seade mis vähendab veapursete mõju ja parandab seega vigu parandavate koodide kasutamise tõhusust. Eesmärk saavutatakse muutes enne saatmist andmete järjekorda selliselt, et järjestiku eksisteerivad andmed ei paiknes edastamisel lähestikku.

Interleaving

- Vaheldamise teostamiseks on mitmeid erinevaid viise. Antud näites vaatame plokk-vaheldit (*block interleaver*).
- Olgu edastatavaks sõnumiks järgnev tekst:

SeeOnVaheldamiseNäide

- Peale veapurset on vastuvõetud andmetest kadunud neli järjestikust sümbolit:

SeeO eldamiseNäide

- Puuduoleva osa taastamine on raskendatud, kui mitte võimatu.

Block interleaver

- Edastatavad andmed kirjutatakse ridahaaval $n \times m$ tabelisse:

S	e	e	O	n	V	a
h	e	l	d	a	m	i
s	e	N	ä	i	d	e

- Andmed edastatakse sideliinis veergude kaupa.

ShseeelNOdänaiVmdaie

- Selliselt ei paikne kõrvutised sümbolid edastamisel koos. Samas tekib edastamisel viide, mis on tingitud tabeli kirjutamisest enne edastamise algust ja lugemisest peale vastuvõtu lõppu.

Block interleaver

- Kui nüüd kustub edastatud jadas veapurske tõttu neli järgestikust sümbolit on tulemus järgmine:

Shse NOdänaiVmdaie

- Vastuvõtjas on täidetud tabel kujul:

S	e	_	O	n	V	a
h	_	_	d	a	m	i
s	_	N	ä	i	d	e

- Näeme, et veapurse on peale sümbolite õige järvjekorra taastamist jaotunud ühtlasemalt sõnumi peale laiali:

Se_OnVah_ daamis_Näide

Lisaks lugeda

- **William Stallings. Data and Computer Communications** 8th edition. Peatükk 7 Data Link Conroll Protocols. lk 207 – 228.
- **Functions of LLC and MAC sub-layers of Data Link Layer.**
<http://computernetworkingsimplified.com/data-link-layer/components-data-link-layer-llc-mac/>, 21.04.2018
- Erkki Laaneoks. **Sissejuhatus võrgutehnoloogiasse.** 6 ptk. **OSI kanalikiht.**
- Columbia University. **Serial Port and Modem Cables.**
<http://www.columbia.edu/kermit/cable.html>, 21.04.2018
- **Hamming Codes – How it Works.**
<https://www.gaussianwaves.com/2008/05/hamming-codes-how-it-works/>,
21.04.2018

15. Traadita kohtvõrk ja hajaspektriside

Arvutivõrgud IEE1100

Ivo Müürsepp



New Lada, now with built-in
Wifi.

Traadita kohtvõrk

- Kohtvõrk, milles kaks või enam seadet on omavahel ühendatud kasutades füüsilise kihina raadiolaineid või valgust.
- Enamlevinud standard on IEEE 802.11 (Wi-Fi)
 - Tegemist on meediapöördust (MAC) ja füüsiliksi kirjeldavate spetsifikatsioonidega.
- Optiline juhtmevaba side: Li-Fi
- Seadmed võivad olla ühendatud keskse juurdepääsupunktiga (*Wireless access point*) või otse omavahel (*Point to point, Ad Hoc: WANET*)



IEEE 802.11

- Täpsemalt IEEE 802.11-1997 (*Legacy Mode*)
- Töösagedus 2,4 GHz ISM band
- Edastuskiirus 1 või 2 Mbit/s
- Veaparandus konvolutsioonilise koodiga k/n
- Meediapöördus: CSMA/CA
 - IEEE 802.11 RTS/CTS
- Edastuseks kasutab kas
 - Infrapunakiirgust IR
 - Sagedushüplemist (FH-SS)
 - Sageduse (otsest) hajutamist (DS-SS)



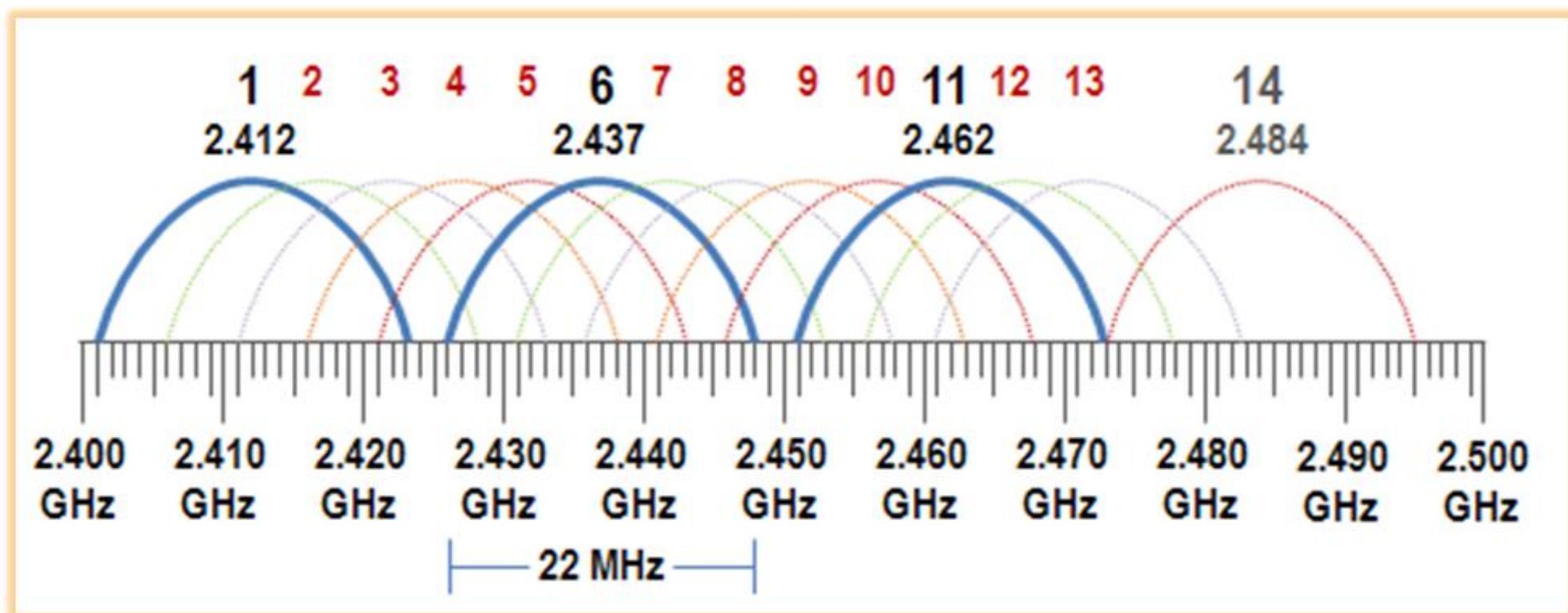
Sagedused ja võimsused

- 2400 - 2483,5 MHz: $EIRP \leq 100 \text{ mW}$
- 5150 - 5350 MHz: $EIRP \leq 200 \text{ mW}$ – ainult siseruumides
- 5470 – 5725 MHz: $EIRP \leq 1 \text{ W}$
- $EIRP$ – Ekvivalentne isotroopne kiirgusvõimsus (*Effective Isotropic Radiated Power*)

$$EIRP = P_s \cdot G_s \text{ [W]}$$

$$EIRP = P_s + G_s \text{ [dBm]}$$

2,4 GHz kanalijaotus



Sumbumus

- Vaba ruumi kadu

$$FSL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

- Logaritmilistes ühikutes

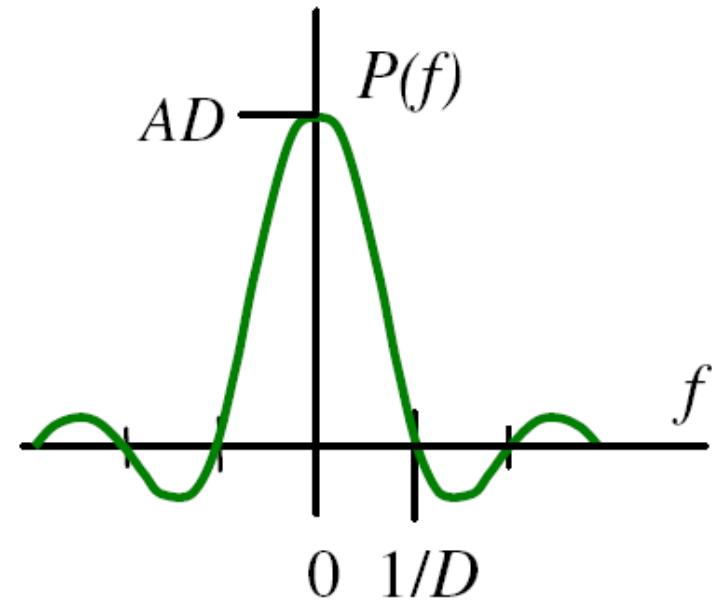
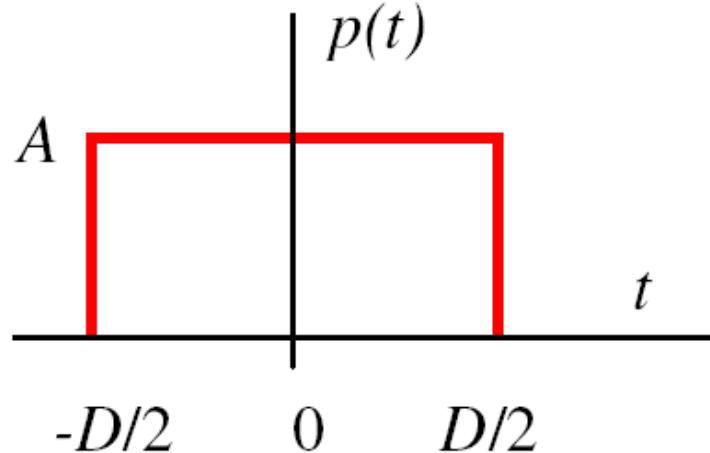
$$FSL = 20\log(d) + 20\log(f) - 147,55 [dB]$$

Sagedusala 2,4 GHz	
kaugus	Sumbuvus (dB)
100 m	80,2
200 m	86,2
500 m	94,2
1 km	100,2
2 km	106,2
5 km	114,2
10 km	120,2

Impulssi spekter

- Nelinurkimpulss $p(t)$ kestusega D sekundit omab spektrit:

$$S(f) = \frac{A}{\pi f} \sin(\pi f D) = AD \operatorname{sinc}(\pi f D)$$



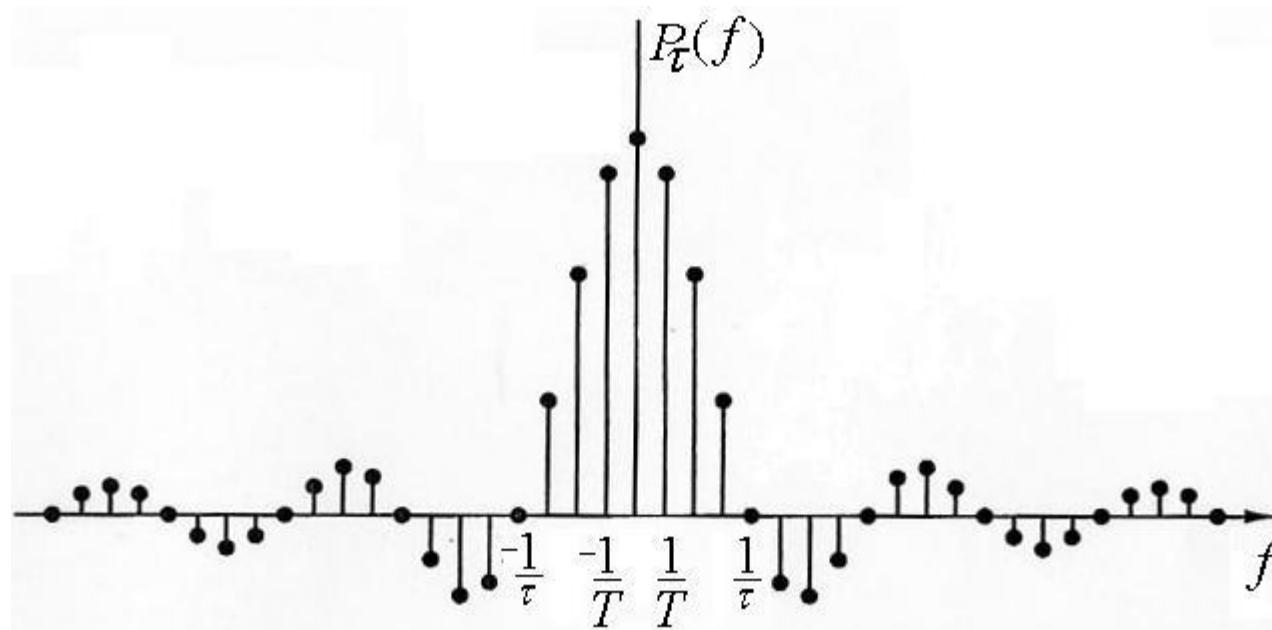
Piiratud spektriga impuls



Traadita kohtvõrk ja hajaspektriside

Impulssjada spekter

- Perioodilise signaali $p_\tau(t)$ spekter $P_\tau(f)$ on diskreetne:
 - Spektrijoonte samm Δf on määratud impulssjada perioodiga T
 - Sinc funktsiooni kujulise mähkija periood on määratud impulsside kestusega τ



Traadita kohtvõrk ja hajaspektride

Joonis: <http://www.ee.bgu.ac.il>

Signaalide võrdlemine

- Ristkorrelatsioon

$$R_{fg}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t)g(t+\tau)dt$$

- Autokorrelatsioon

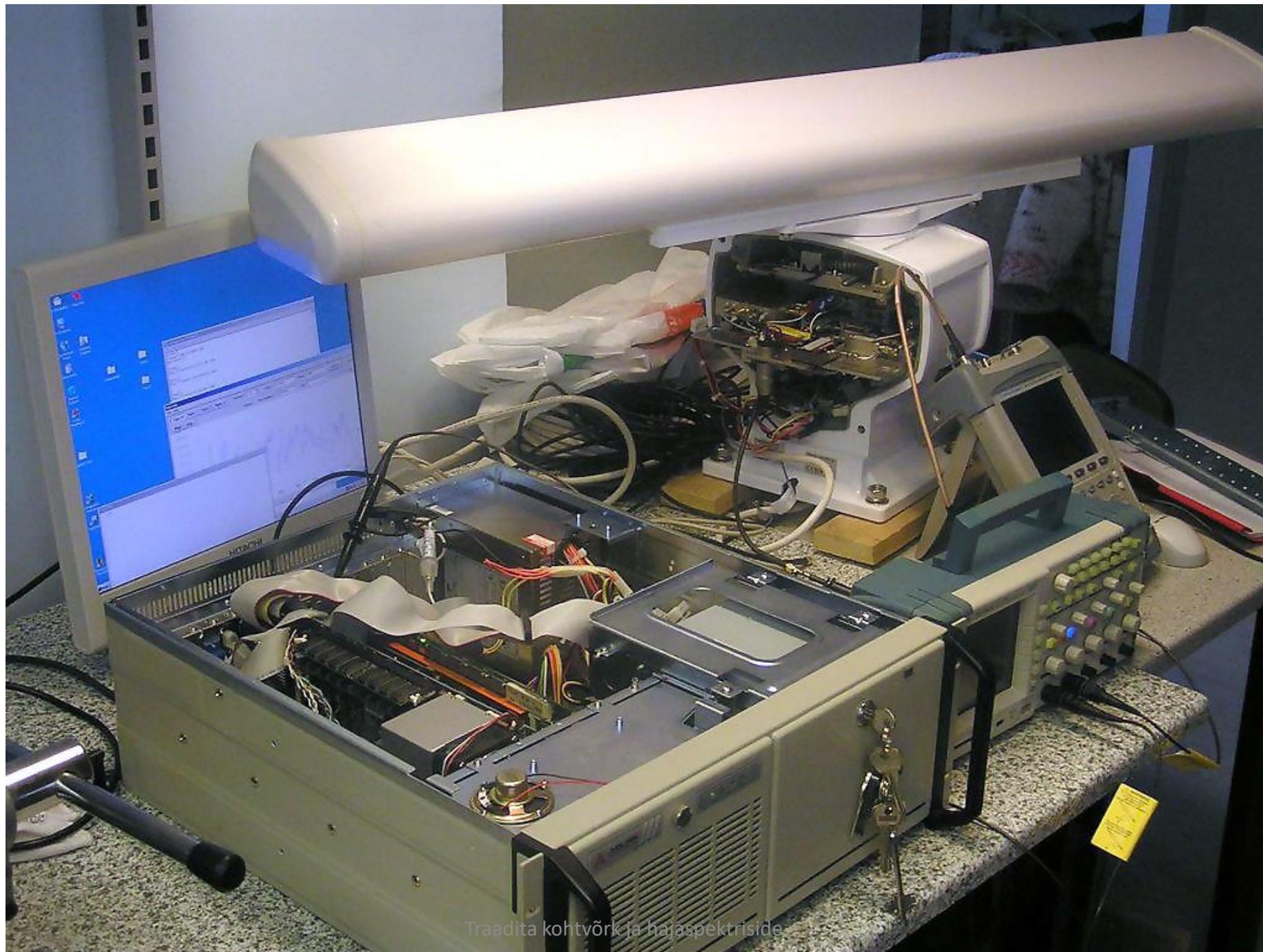
$$R_f(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t)f(t+\tau)dt$$

- Diskreetsel juhul

$$R_{fg}(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f^*[m]g[n+m]$$

Barkeri koodid.

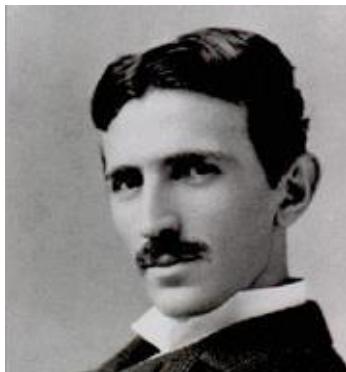
Pikkus	Kood
2	1 -1 ; 1 1
3	1 1 -1
4	1 1 -1 1; 1 1 1 -1
5	1 1 1 -1 1
7	1 1 1 -1 -1 1 -1
11	1 1 1 -1 -1 -1 1 -1 -1 1 -1
13	1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 -1 1 -1 1



Traadita kohtvõrk ja hajaspektride

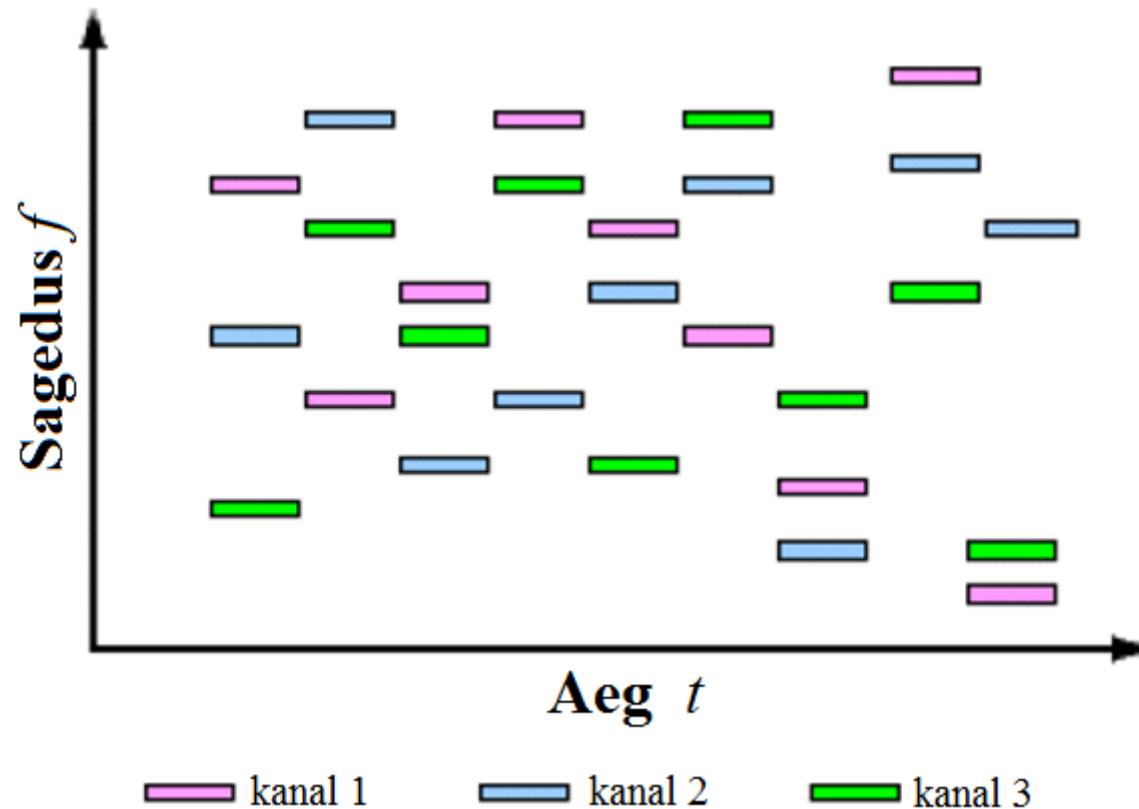
Sagedushüplemine FHSS

- Sagedushüplemist mainiti esmakordselt 1900 aastal **Nikolai Tesla** poolt võetud patendi 725,605 kirjelduses. Idee pärineb **1898** aastal toimunud maailma esimese raadio teel juhitava allveelaeva demonstratsioonilt.
- 1942 aastal **Heddy Lamarr** ja **Georg Antheili** patent nr 2,292,387 raadio teel juhitavale torpeedole.



Traadita kohtvõrk ja hajaspektride

Sagedushüplemine *FH-SS*

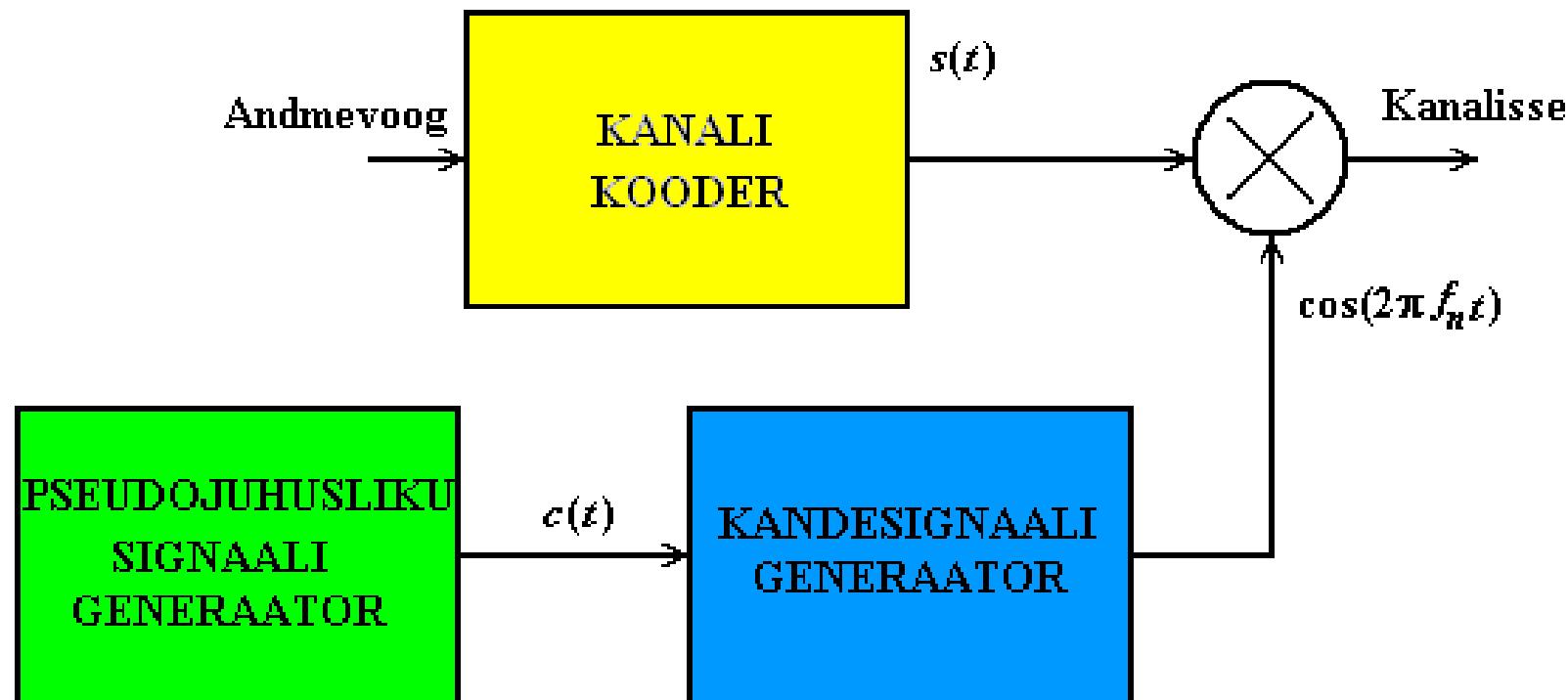


Sagedushüplemine



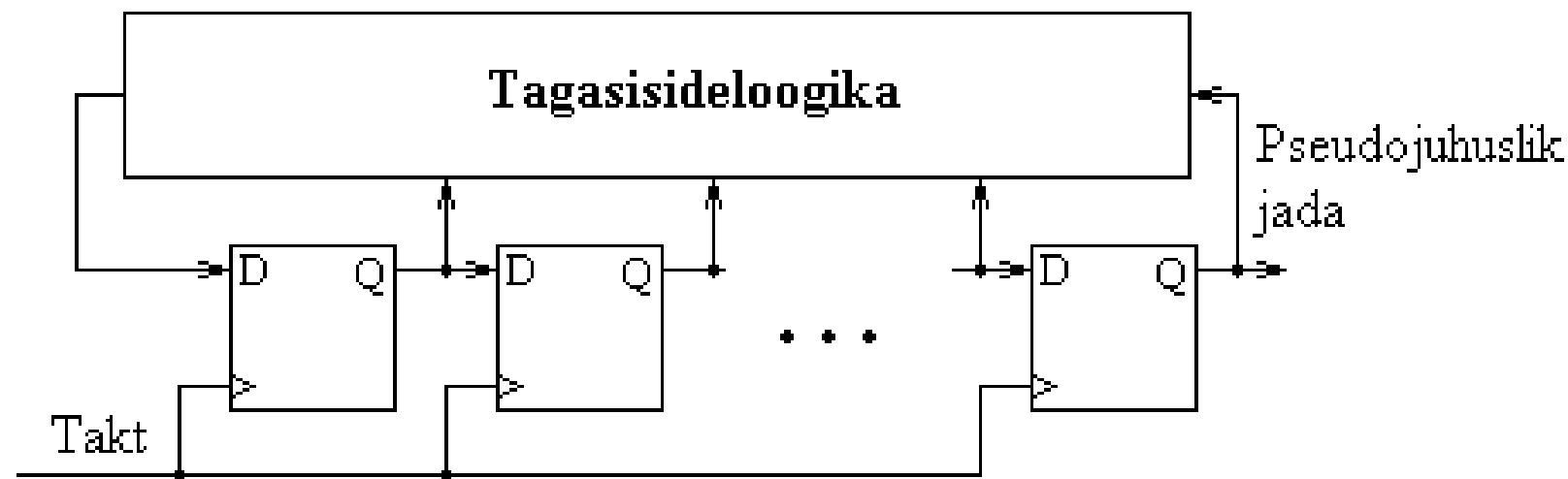
Traadita kohtvõrk ja hajaspektriside

Sagedushüplemine FH-SS

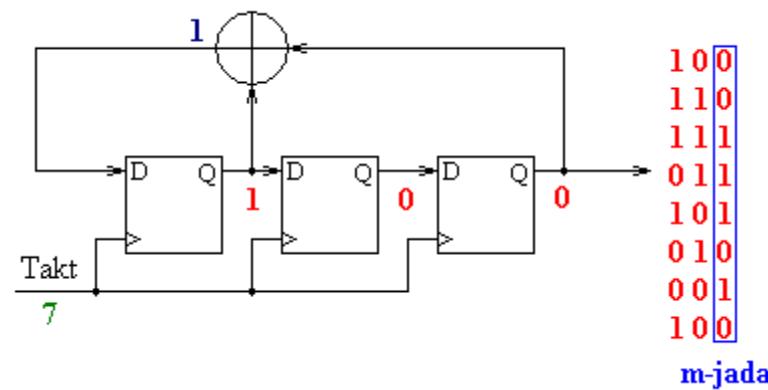


Pseudojuhuslik jada

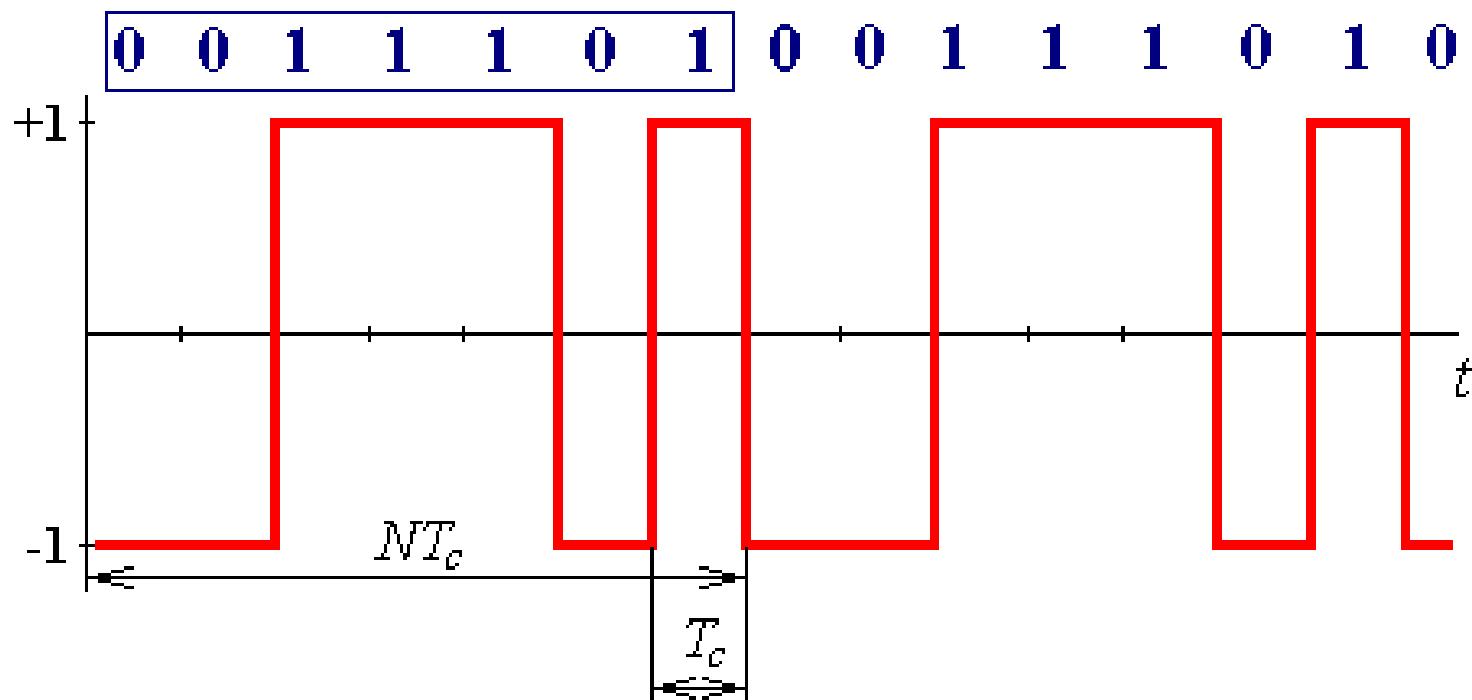
- Binaarne, statistiliselt sarnane juhuslikule jadale (mürataoline)
- Tegelik tekkeprotsess deterministlik, jada seega perioodiline
- M-jada: maksimaalse pikkusega $N = 2^n - 1$
- Tekitatakse tagasisidestatud nihkeregistriga (pikkus n)



M-jada genereerimine



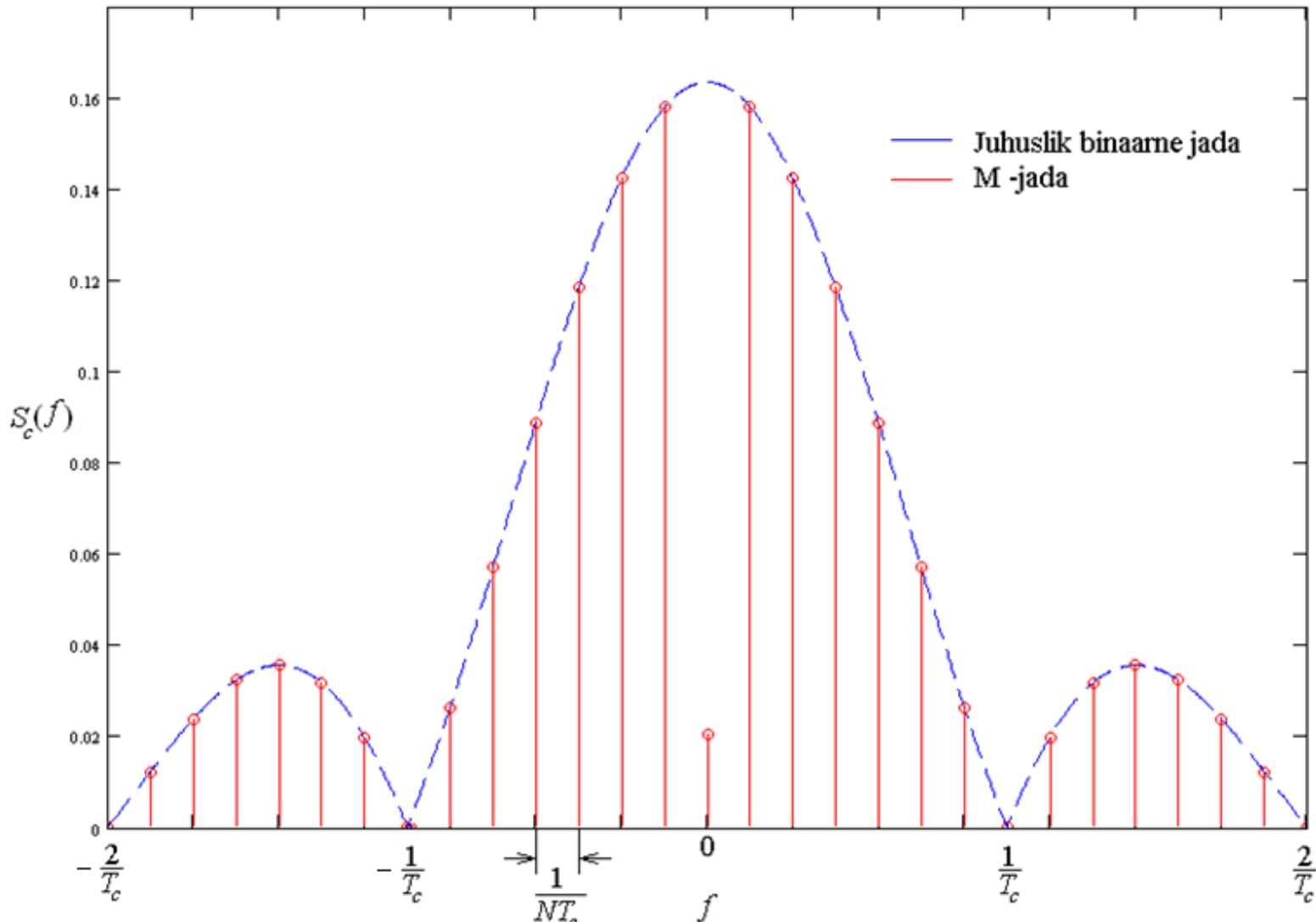
M-jada



M-jada valimine

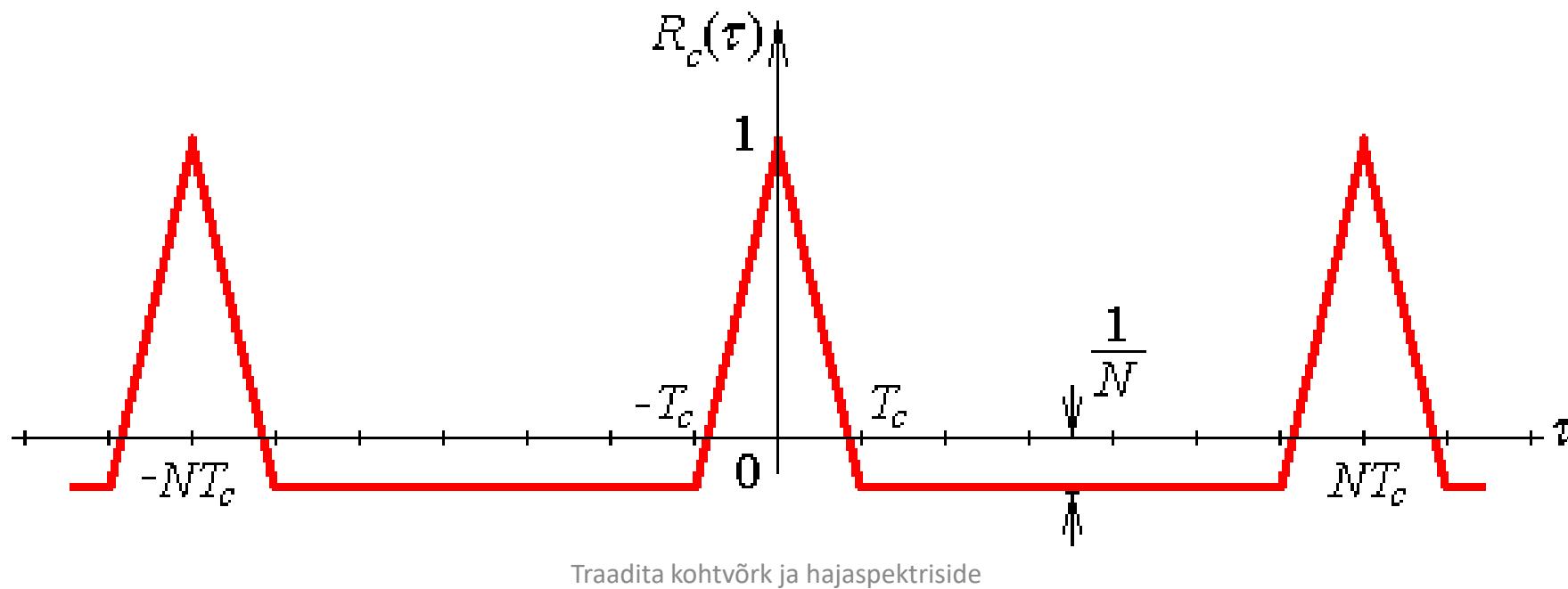
n	Tagasiside väljunditest
2	[2,1]
3	[3,1]
4	[4,1]
5	[5,2], [5,4,3,2],[5,4,2,1]
6	[6,1], [6,5,2,1],[6,5,3,2]
7	[7,1], [7,3],[7,3,2,1], [7,4,3,2],[7,6,4,2], [7,6,3,1],[7,6,5,2],[7,6,5,4,2,1], [7,5,4,3,2,1]

M-jada spekter

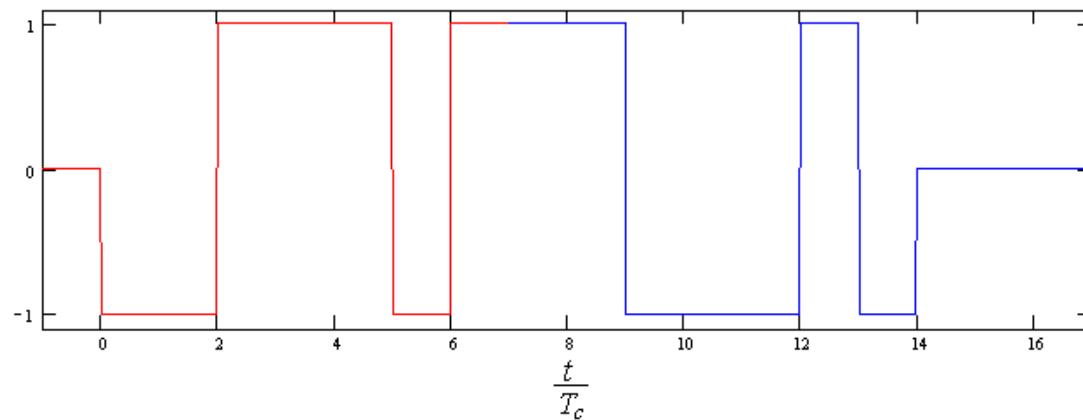
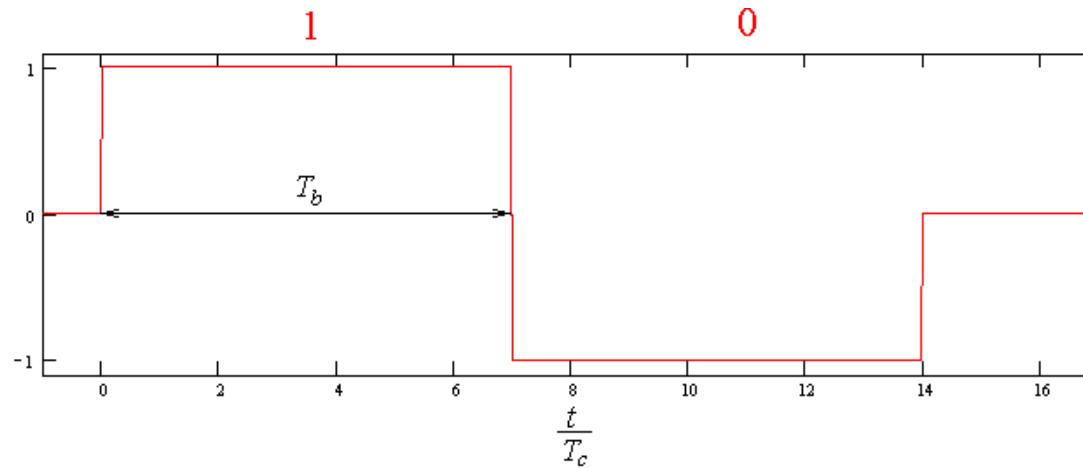


M-jada autokorrelatsioonifunktsioon

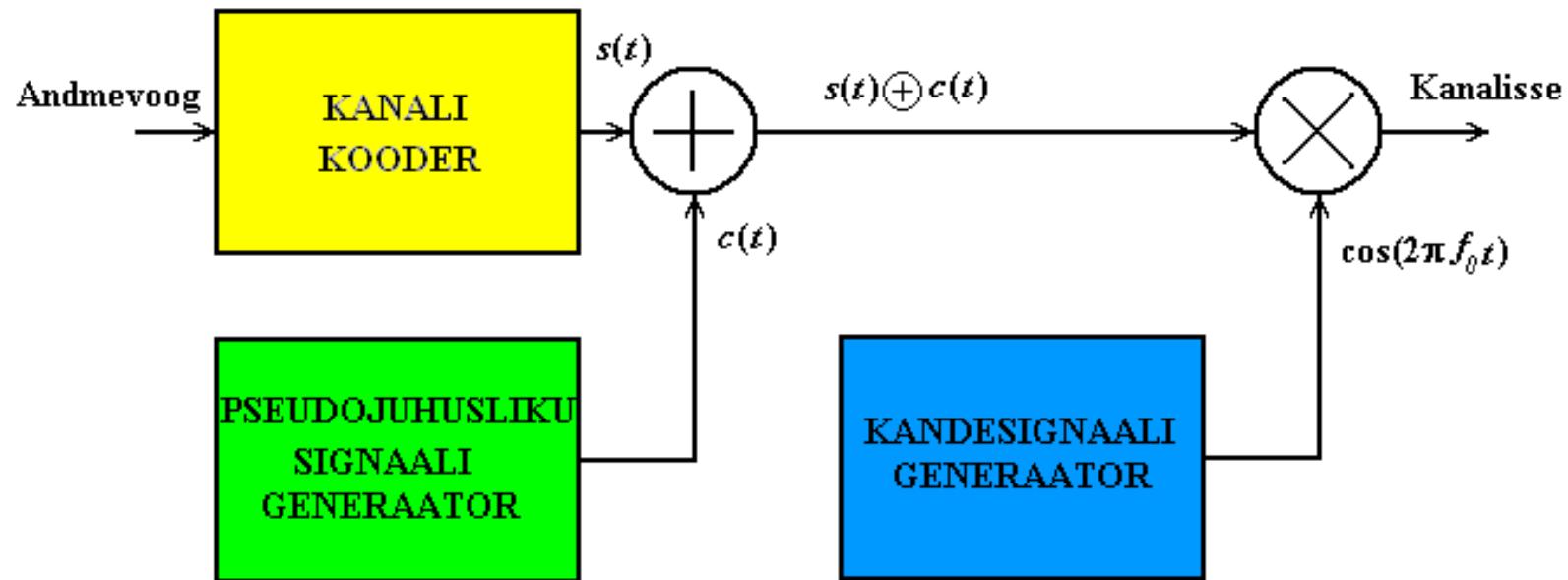
$$R_c(\tau) = \begin{cases} 1 - \frac{N+1}{NT_c} |\tau|, & |\tau| \leq T_c \\ -\frac{1}{N} & \text{otherwise} \end{cases}$$



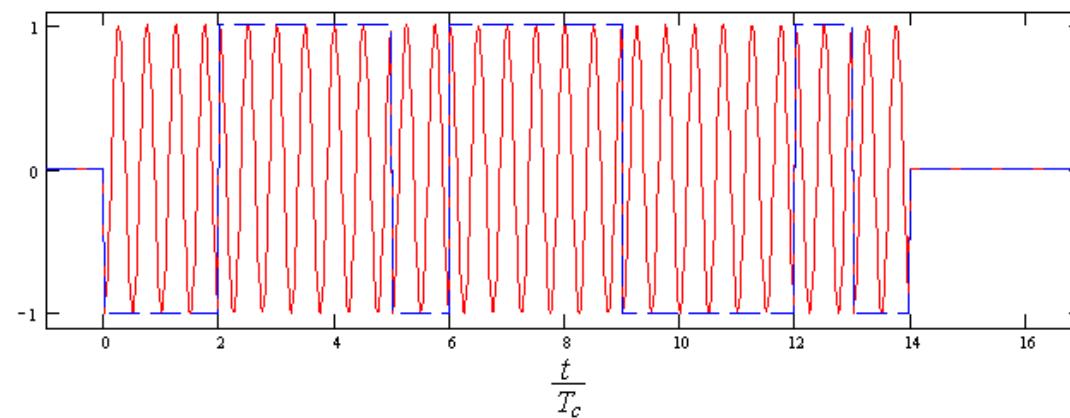
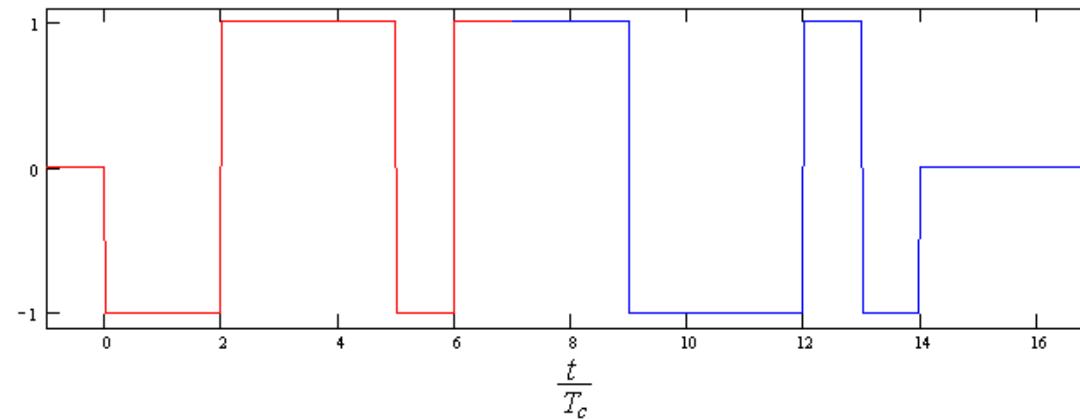
Sageduse hajutamine DS-SS



Sageduse hajutamine DS-SS



Sageduse hajutamine $DS-SS$

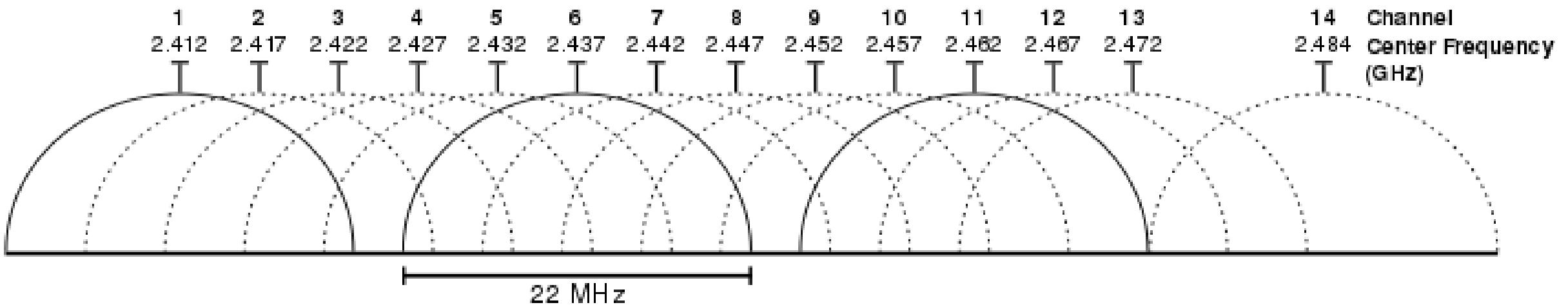


IEEE 802.11b

- Edastuskiirus kuni 11 Mbit/s
 - 5,9 Mbit/s (TCP)
 - 7,1 Mbit/s (UDP)
- Töösagedus 2,4 GHz
- Hajutamine Barkeri koodiga
 - + Suurem edastuskiirus
 - -vähenenud töökaugus ja häirekindlus



2,4 GHz kanalid



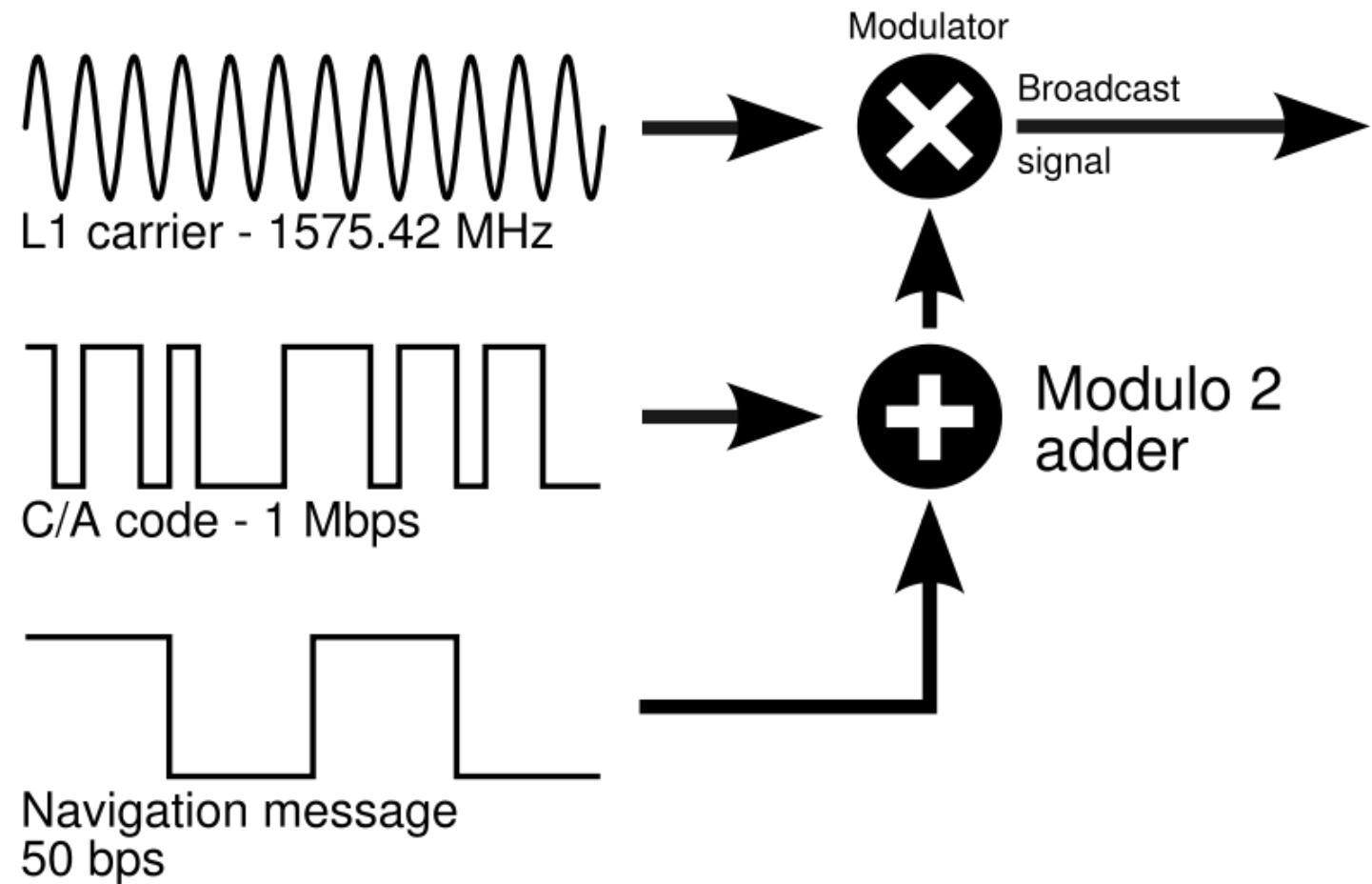
GPS – Global Positioning System

- Sateliidid edastavad signaale kahel sagedusel:
 - L1 1,57542 GHz ja
 - L2 1,2276 GHz
- Signaalide eristamine CDMA meetodil.
- Moduleerimiseks kasutatakse Goldi koodet.
- Avaliku C/A koodi edastatakse kiirusega 1,023 miljonit sümbolit sekundis.
- Täpset koodi P edastatakse kiirusega 10,23 miljonit sümbolit sekundis
- Täpset koodi on võimalik krüpteerida P(Y)

Näide: GPS II

- Kanal **L1** on moduleeritud **C/A** ja **P** koodiga. Kanal **L2** ainult **P** koodiga.
- Informatsiooni ülekandekiirus **50 bit/s**.
- Kasutatakse Goldi koode pikkusega 1023 elementi 1ms jooksul.
- Võimalike Goldi koode pikkusega **1023** on **1025**, kasutatakse ainult **32** neist.

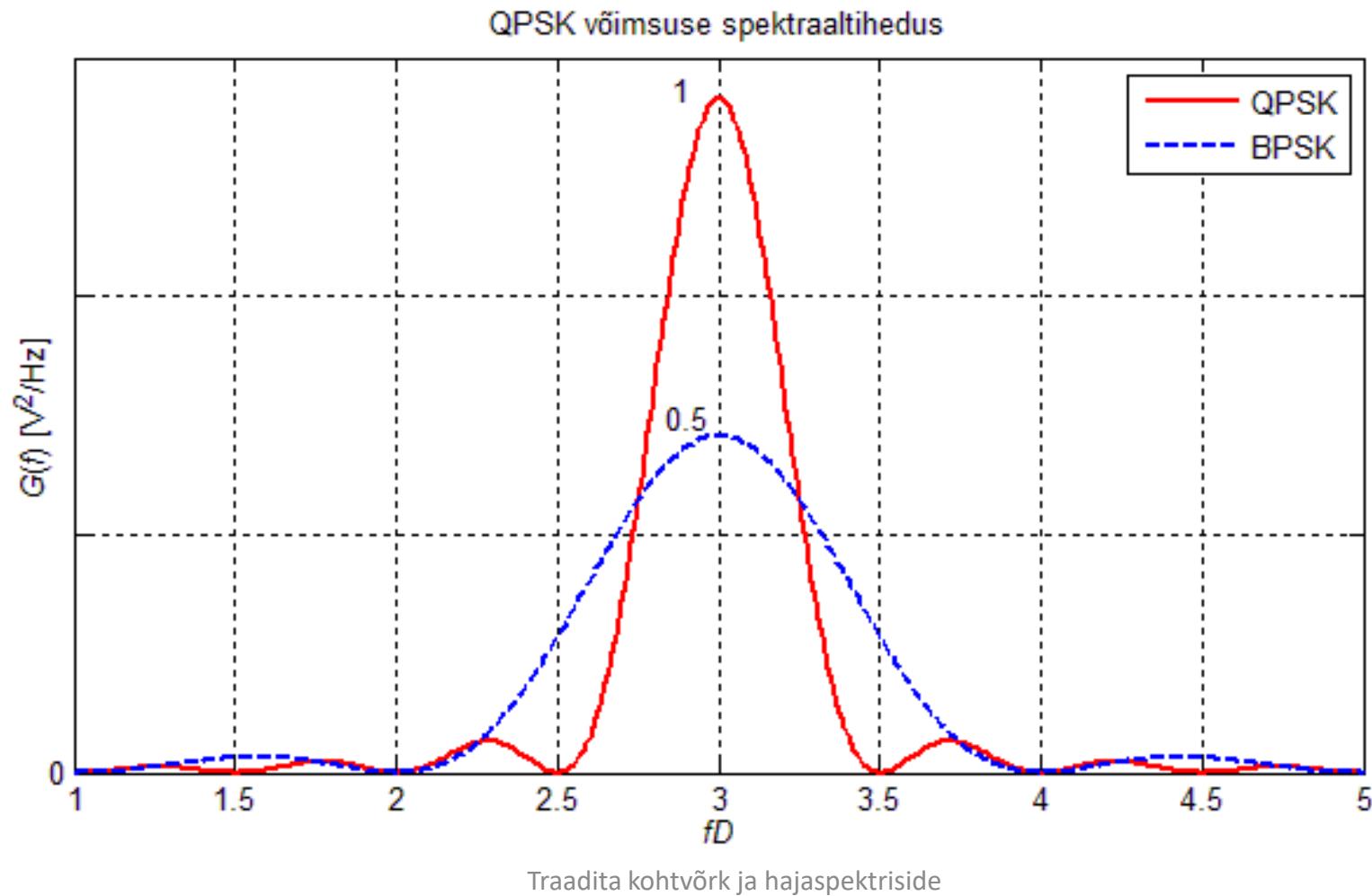
GPS signaali moduleerimine



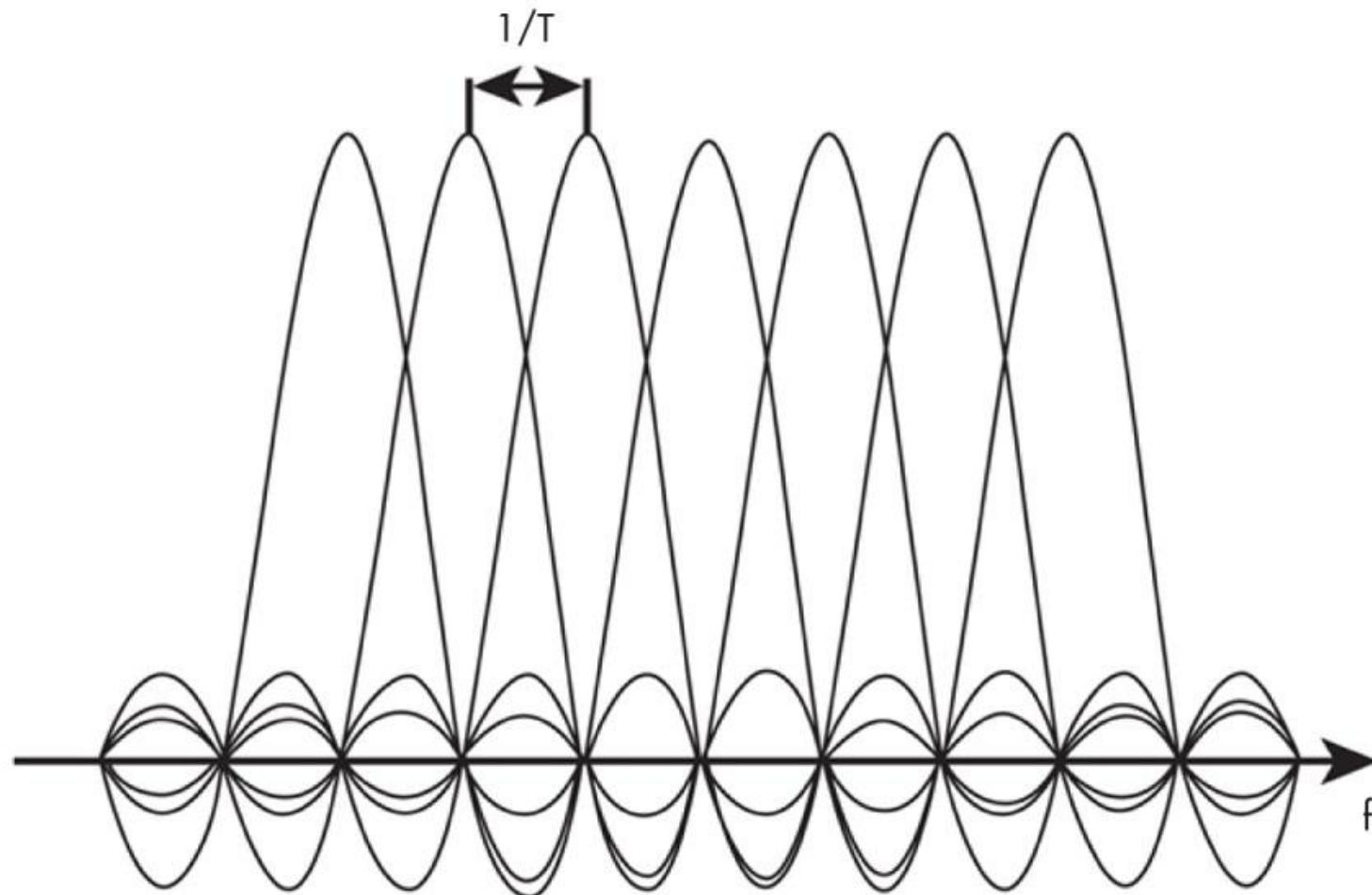
IEEE 802.11a/g

- Andmedastuskiirus 1,5 kuni 54 Mbit/s
- 2,4 GHz (g) ja 5 GHz (a) sagedusalad
- Modulatsiooniviisid: BPSK, QPSK, 16-QAM ja 64-QAM
- Kasutab Ortogonaalset sagedustihendust (*OFDM – Orthogonal frequency-division multiplexing*)

Alamkandja



Ortogonaalne sagedustihendus *OFDM*



Traadita kohtvõrk ja hajaspektride

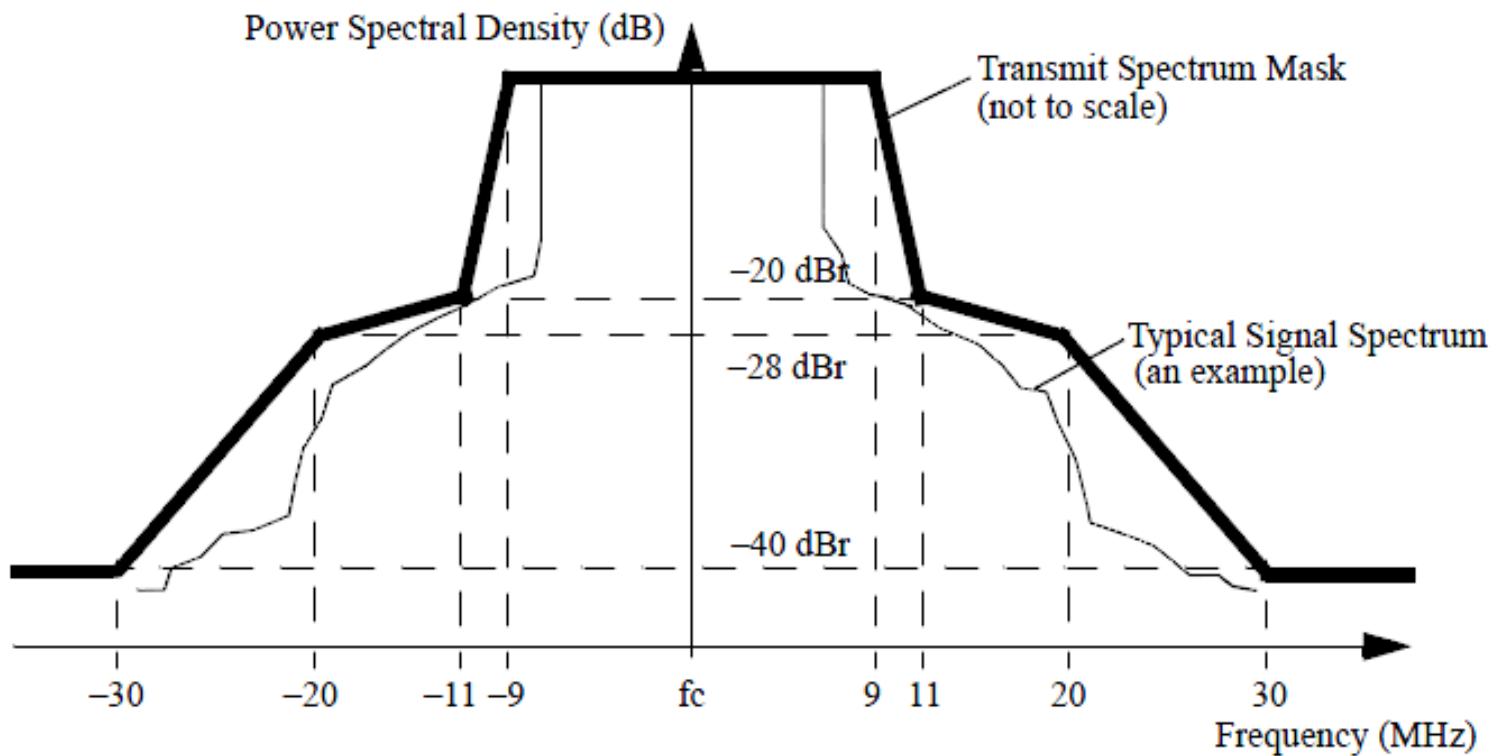
IEEE 802.11a OFDM

- Kasutab 52 kandjat
 - 48 andmeside- ja 4 pilootkanalit
- Teostatakse 64 punktilise diskreetse Fourieri teisenduse abil

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{j2\pi kn}{N}}$$
$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{j2\pi kn}{N}}$$

- Kanali samm 312,5 kHz
- Sümboli kestus 3,2 μ s
- Sümbolite vahel 0,8 μ s paus (*Guard Interval*)

802.11a spektrimask



IEEE 802.11a

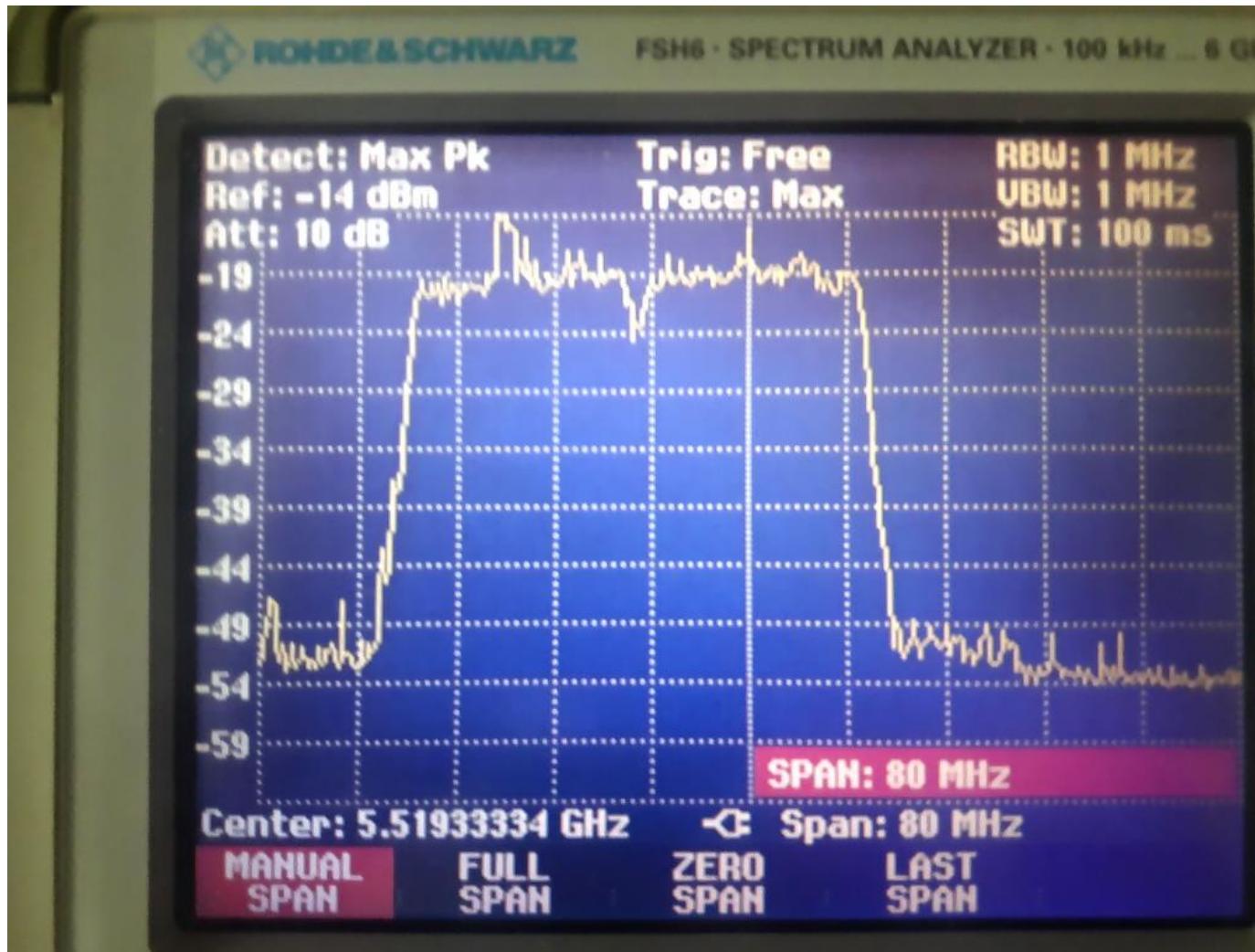
MCS	Modulatsiooniviis	Koodi kiirus	Edastuskiirus [Mbit/s]
13	BPSK	1/2	6
15	BPSK	3/4	9
5	QPSK	1/2	12
7	QPSK	3/4	18
9	16-QAM	1/2	24
11	16-QAM	3/4	36
1	64-QAM	2/3	48
3	64-QAM	3/4	54

IEEE 802.11n

- Standard aastast 2009, seadmed tootmises juba 2007 aastast.
- Töötab nii 2,4 kui 5 GHz sagedusalas
- Kanali ribalaius kas 20 või 40 MHz
- Sümbolite vaheline paus 0,4 μ s (*Guard Interval*)
- Andmeedastuskiirus 54-600 Mbit/s
- Kasutab andmeedastuskiiruse suurendamiseks mitut antenni (MIMO)



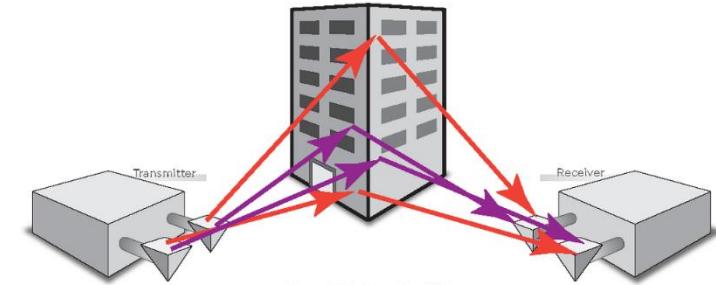
IEEE 802.11n spekter



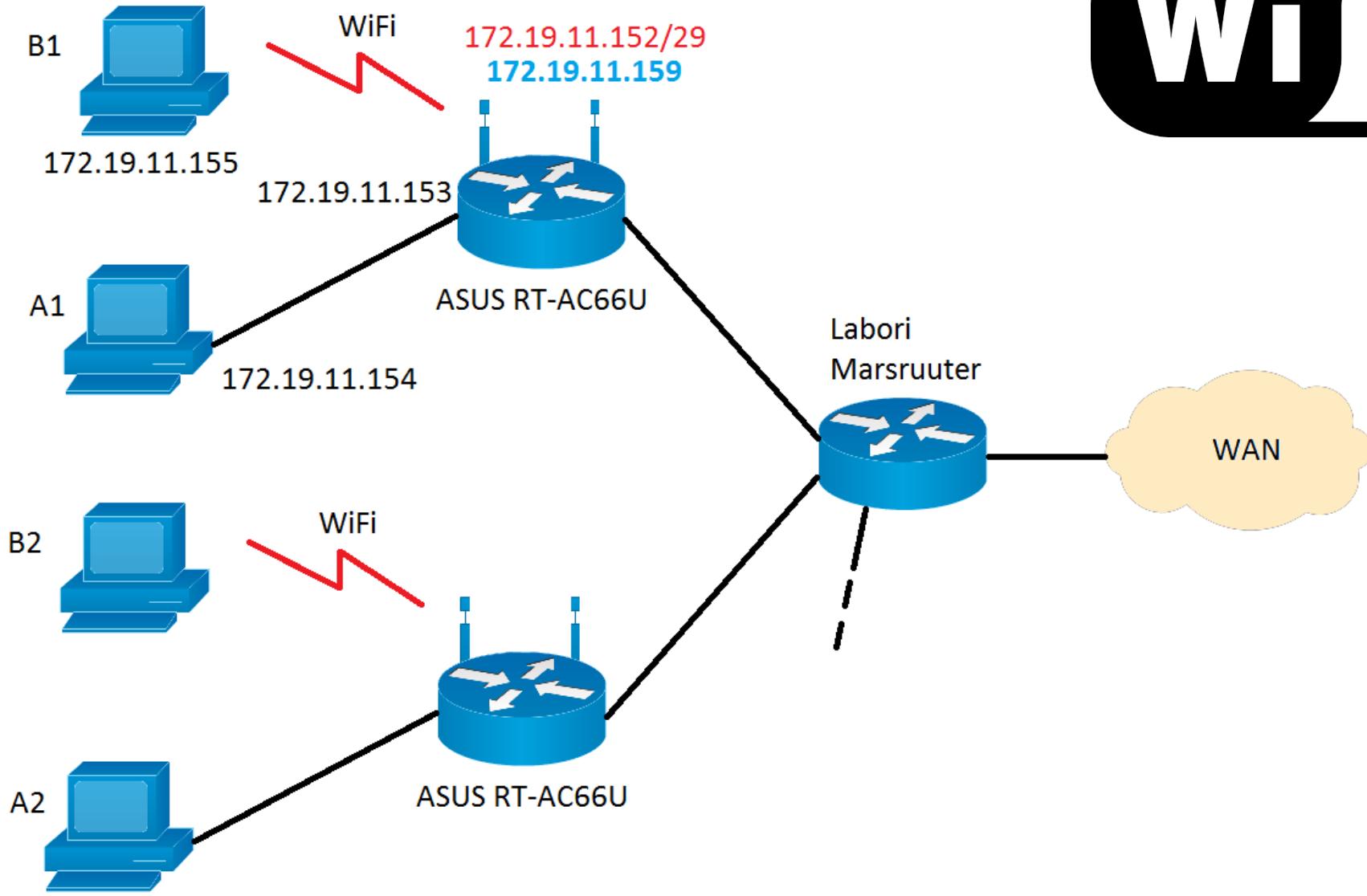
Traadita kohtvõrk ja hajaspektride

MIMO

- MIMO – *Multiple Input Multiple Output*
- Andmeedastuse kiiruse või töökindluse suurendamiseks.
- Mitme antenni kasutamine nii saatjas, kui vastuvõtjas.
- Signaalitöötlus lähtuvalt kanali olekuinfost (*CSI – Channel State Information*)
- Suunadiagrammi formeerimine
- Ruumiline multipleksimine (*Spatial multiplexing*) – mitu aeglast kanalit
- Ruumiline kodeerimine (*Diversity Coding*)
- SDMA *Space Division Multiple Access*



3. praktikum

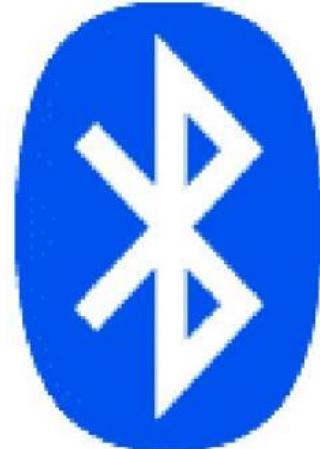


IEEE 802.11...

- 802.11ac
 - Kanali ribalaius kuni 160MHz
 - Ühe kanali edastuskiirus 500Mbit/s
 - Kuni kaheksa MIMO kanali toetus
 - Kuni 256-QAM modulatsioon
- 802.11ad - WiGig
 - Kuni 7Gbit/s 60GHz
- 802.11af – White-Fi
 - 54-790MHz TV sagedused, kognitiivne raadio



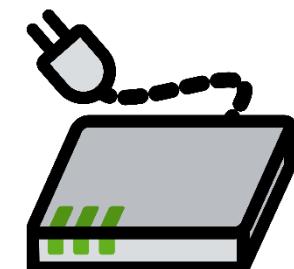
Bluetooth (IEEE 802.15.1)



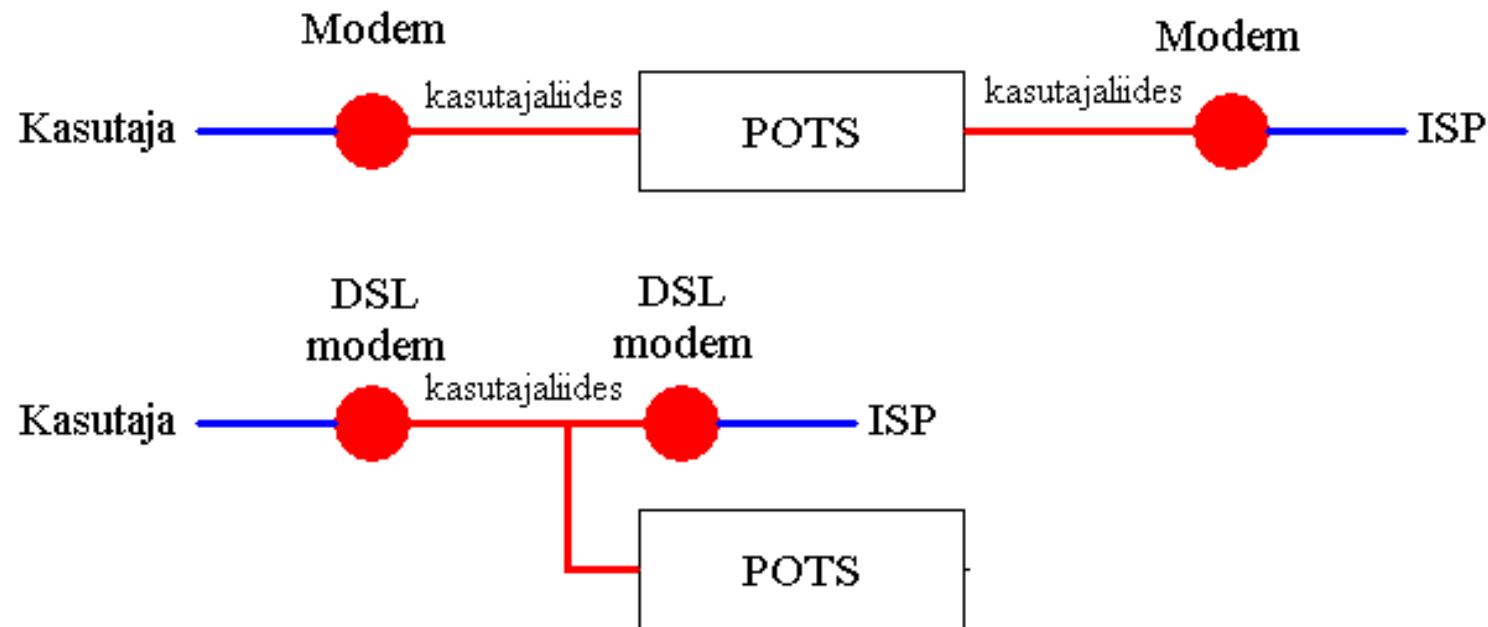
- 1994 Ericsson
- 2,4 GHz ISM-bänd
- Sagedushüpplus 79 kanali vahel ($B = 1 \text{ MHz}$, 800 hüpet sekundis)
- Modulatsiooniviisid:
 - Basic Rate (1 Mbit/s): GFKS
 - Enhanced Data Rate (2 ja 3 Mbit/s): $\pi/4$ –DQPSK, 8-DPSK
- Asendamaks ühendusjuhtmeid (RS-232).
- Väga väike töökaugus 1-100m
- Väikesed kasutatavad võimsused -3 kuni 20dBm.
- 1-25 Mbit/s

DSL – Digital Subscriber Line

- Digitaalne kasutajaliides – andmeedastus üle telefoniliini
 - „Viimane miil“
- Võimaldab andmesidet samaaegselt telefoniteenuse kasutamisega (FDM)
- Kasutatakse majanduslikel kaalutlustel – paljude kasutajateni on olemas analoogtelefoni ajastust pärinev kaabeldus.
 - Odavam kui fiiberoptilise kaabli paigaldamine.
- Edastuskiirus 256 kbit/s kuni 100 Mbit/s
 - Laboritingimustes saavutatud 1 kuni 10 Gbit/s



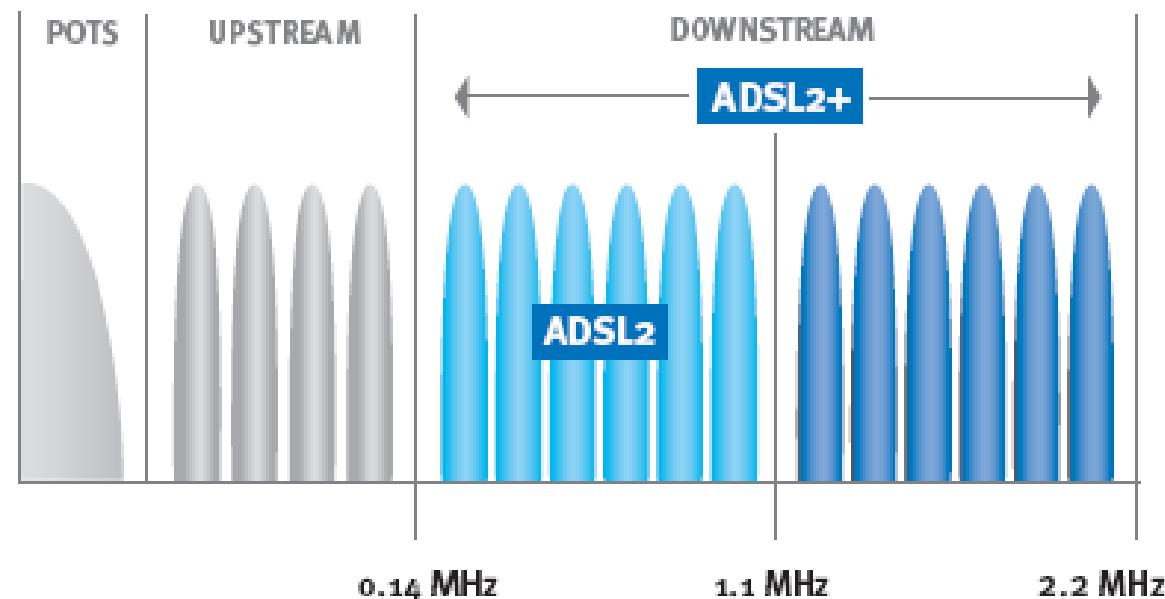
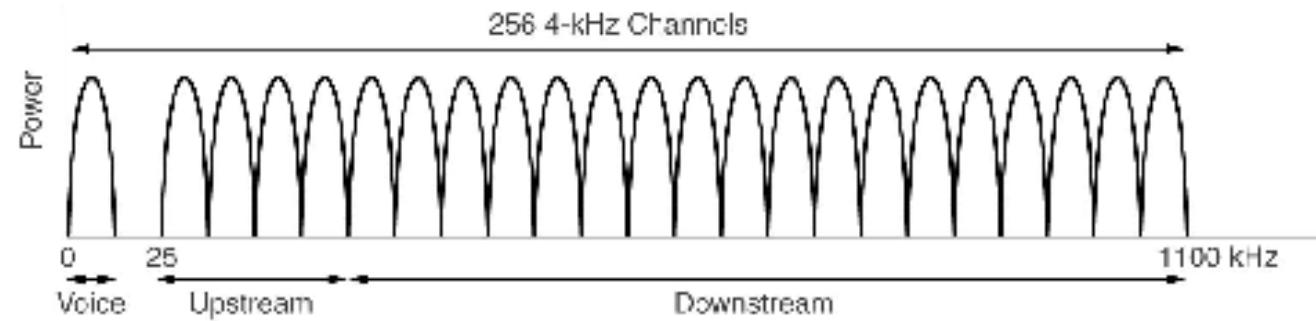
DSL



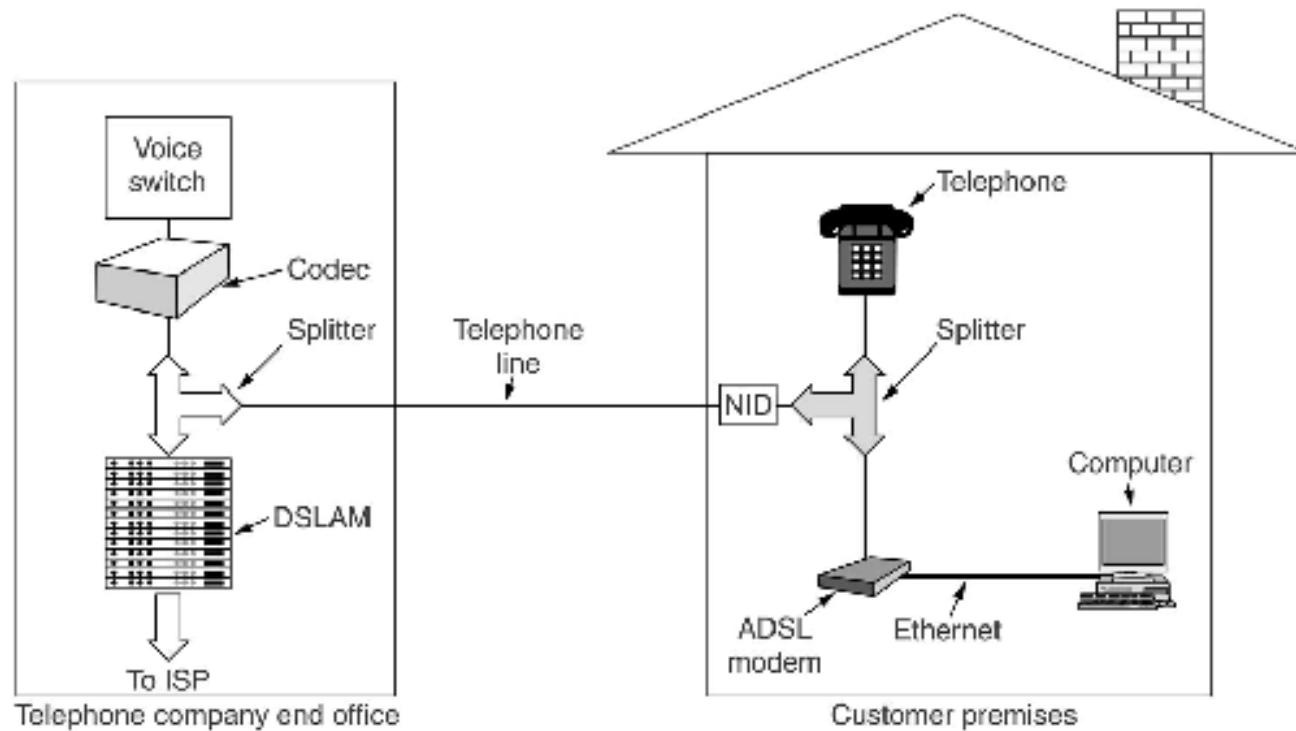
ADSL

- Asümmeetriline DSL
- 1,104 MHz laiune sagedusriba jaotatud 256 kanaliks laiusega 4,3125 kHz.
 - OFDM
 - Allalink 224 kanalit
 - Üleslink 25 kanalit
- Sõltuvalt SNR väärustusest kannab iga üksik kanal 1-15 bitti informatsiooni.
 - Modulatsiooniviisid BPSK kuni 32768- QAM
- Sümbolikiirus 4000 baudi
 - Allalink: $224 \times 15 \times 4000 = 13,4 \text{ Mbit/s}$
 - Üleslüli $25 \times 15 \times 4000 = 1,5 \text{ Mbit/s}$

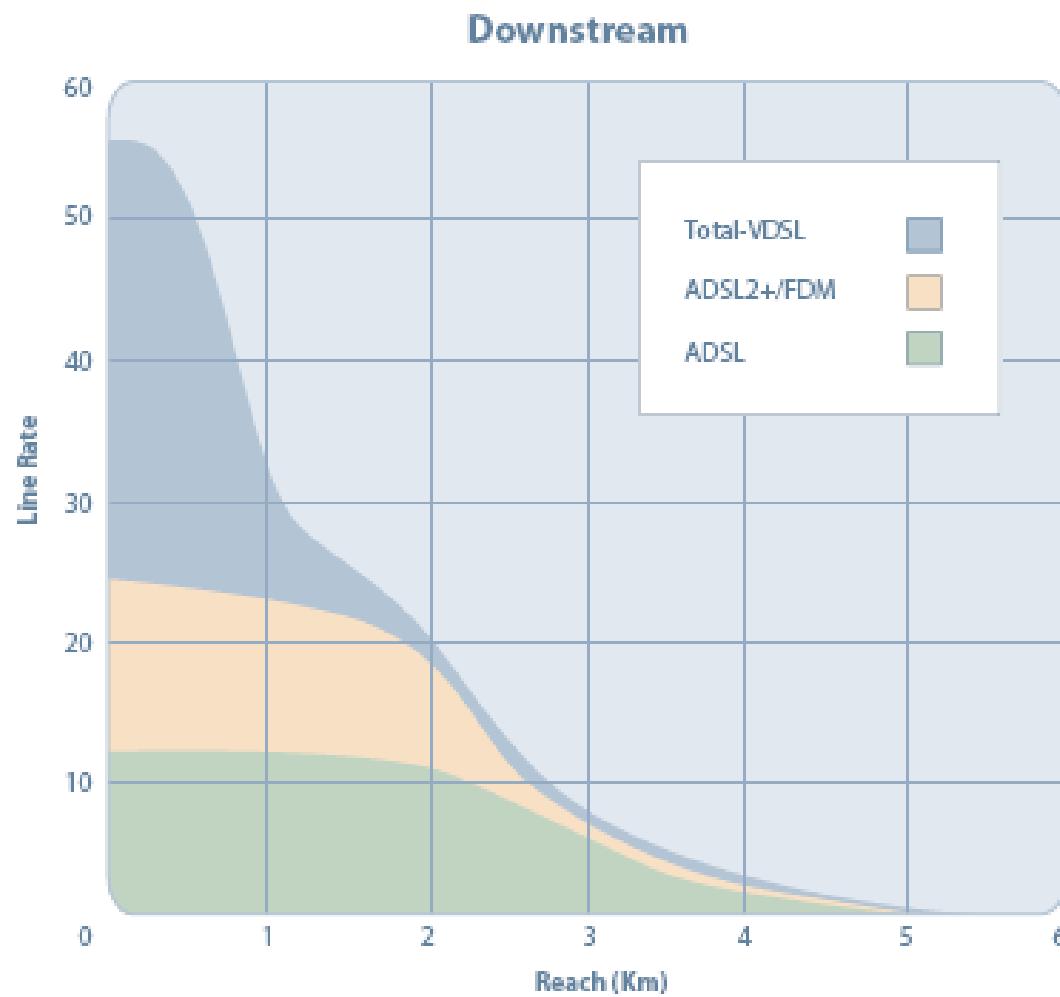
ADSL kanalid



ADSL ülesehitus



xDSL



Loe lisaks

- William Stallings. **Data and Computer Communications.** Kaheksas trükk.
Peatükk 9 – **Spread Spectrum.**
- William Stallings. **Data and Computer Communications.** Kaheksas trükk.
Peatükk 17 – **Wireless LANs.**

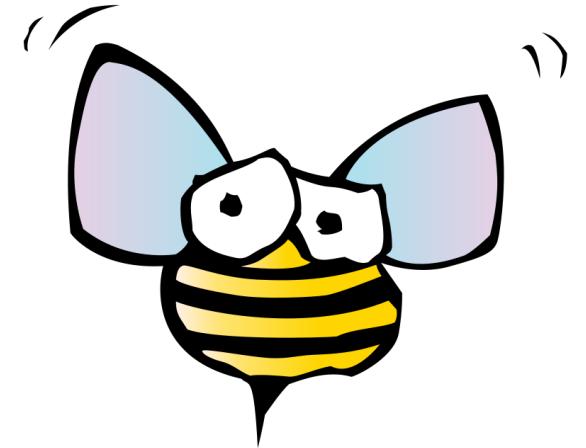
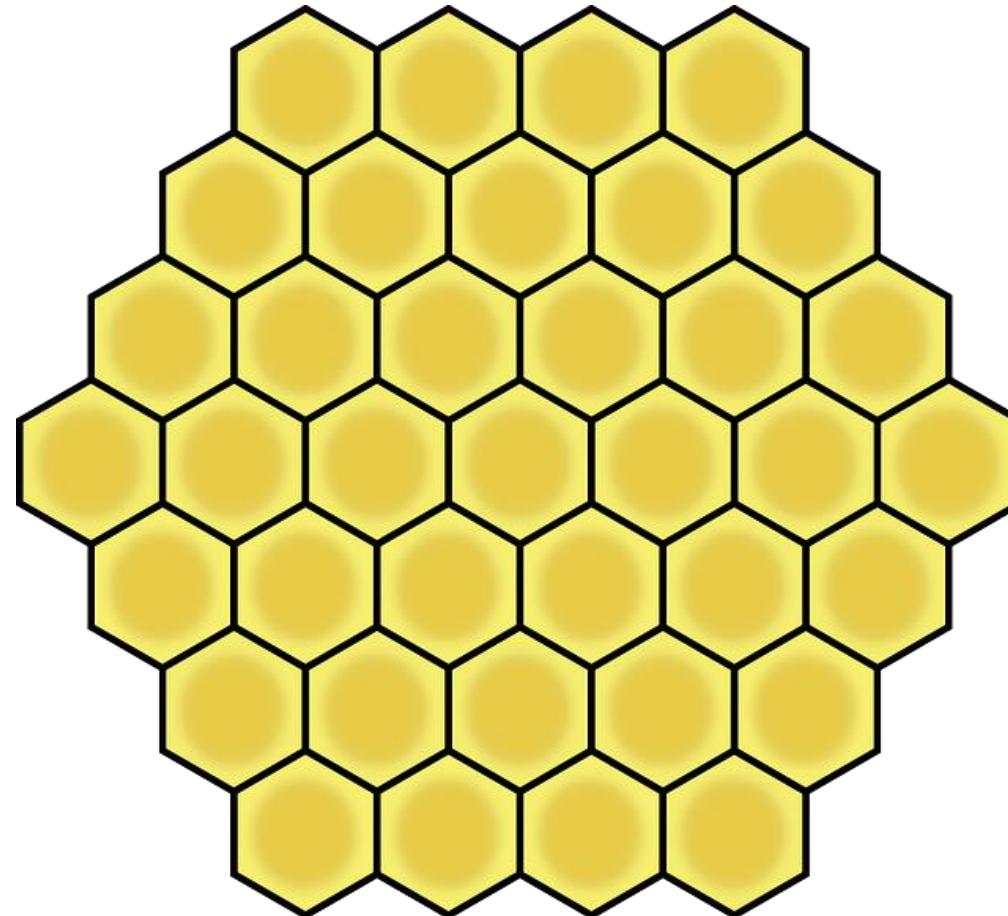


16. Mobiilside

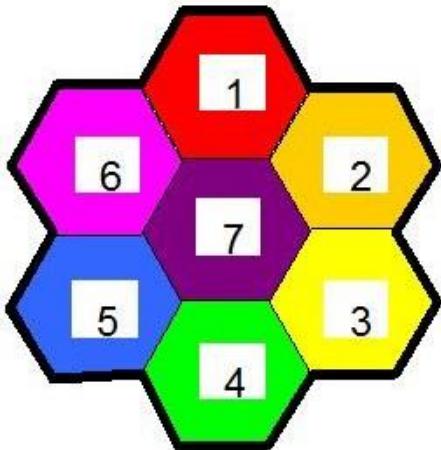
Arvutivõrgud IEE1100

Ivo Müürsepp

Kärgvõrgud



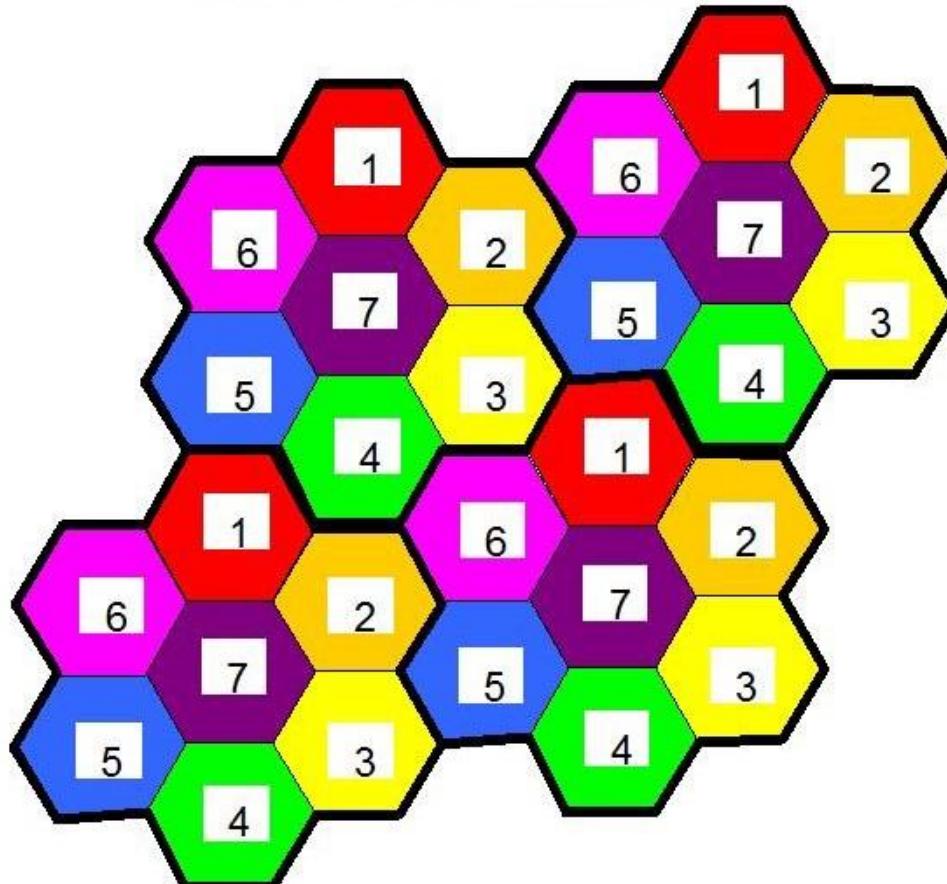
Sageduste taaskasutus



$$N = I^2 + J^2 + IJ$$

$$I, J = 0, 1, 2, 3..$$

$$N = 1, 3, 4, 7, 9, 12, 13, 16, 19, 21, \dots$$

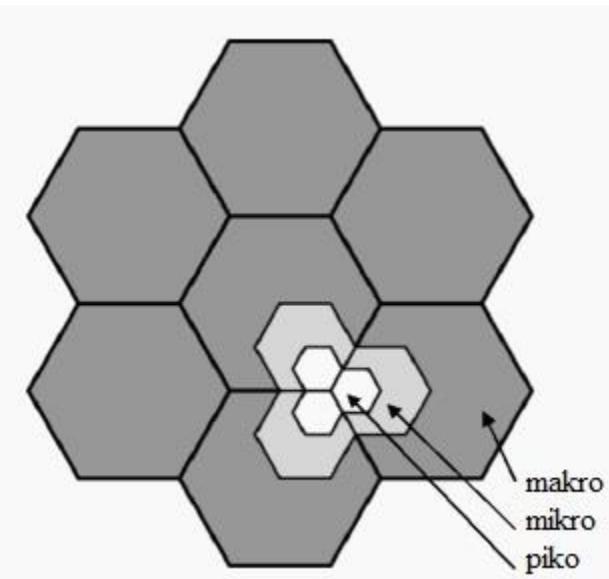


Tugijaam



Mobiilside

Kärgede jaotamine



1G - NMT

- *Nordisk MobilTelefoni*
- Esimene täisautomaatne analoogmobiilside
- Alates 1.10.1981. Eestis suleti võrk 31. detseMBER 2000
- Töösagedused 450 ja 900 MHz
 - Allalink: 463-467,5 MHz
 - Üleslink: 453-457,5 MHz
- Kanali ribalaius 25 kHz
- Täisdupleks edastus FDD
- Kärje raadius 2..30 km
- Terminali kiirgusvõimsus 1 W, autotelefonid kuni 15 W
- Modulatsioon: FM, FFSK (1,2 ja 1,8 kHz) kuni 1200 bit/s

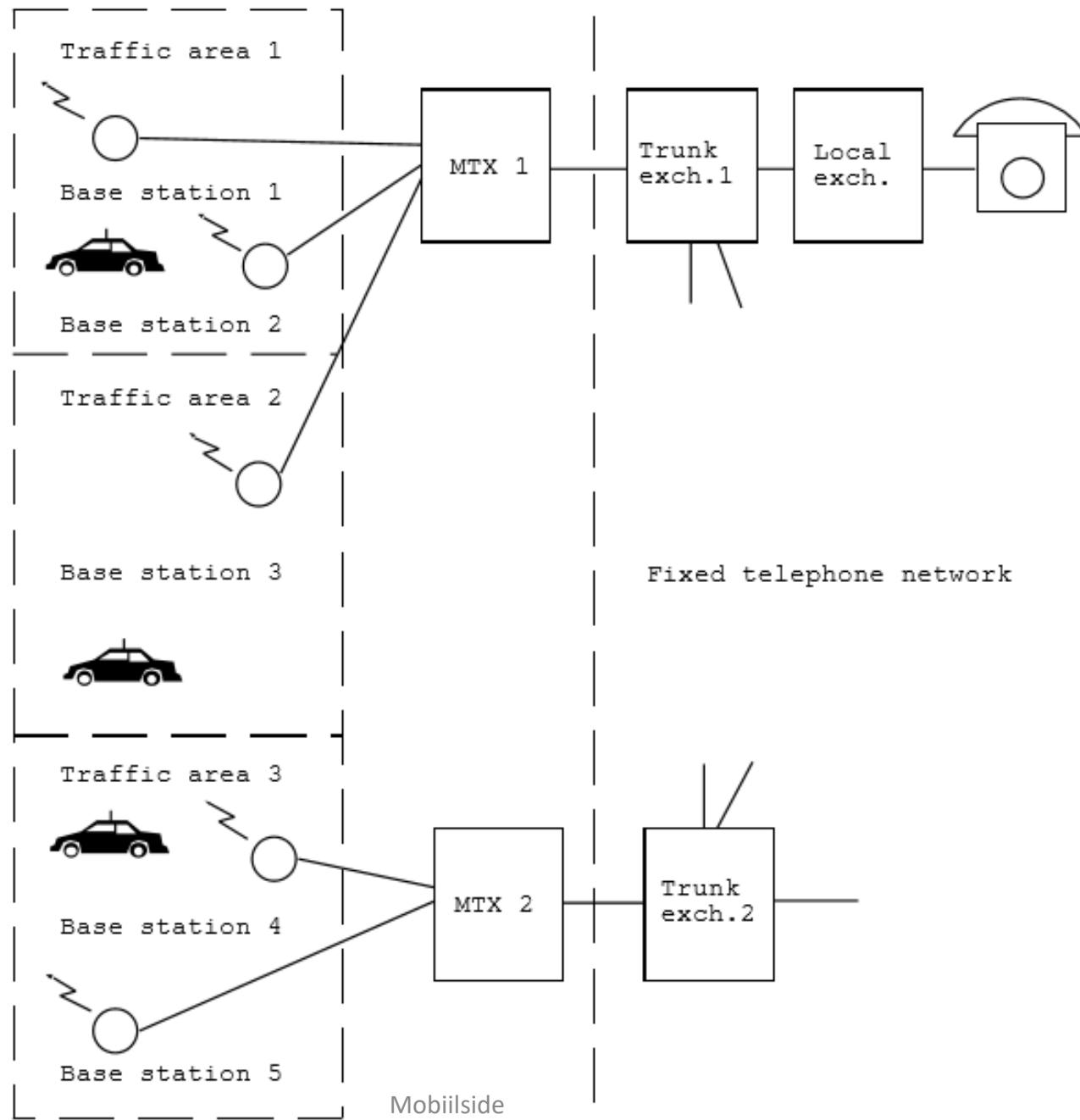


NMT

- Kärje vahetus (*handover*)
 - „Kõva“ (*hard*)
 - 4 kHz testsignaal BS->MS->BS
- Side koduvõrgust (MTXH) väljaspool (MTXV) ehk *roaming*
- Kõne lahtise tekstina (krüpteerimata)
 - Hiljem lisandus võimalus analoogskrämbleri kasutamiseks
- Sõnumiedastus NMT-Text
 - DMS – *Data and Messaging Service*)
- NMT Mobicigi – 380 bit/s
 - Vajalik eraldi väline riistvara



NMT v̈rk



2G - GSM

- *Global System for Mobile communications (Groupe Spécial Mobile)*
- Täisdigitaalne mobiilside
- Alates juulist 1991 Soomes
- Ressursijaotus FDMA/TDMA
- Töösagedused (FDMA) 900 ja 1800 MHz
 - Üleslink 890-915 MHz (1710-1785 MHz)
 - Allalink 935-960 MHz (1805-1880 MHz)
- Kanali ribalaius 200 kHz
- Kanali number ARFCN
 - GSM450: $f_{UL} = 450,6 + 0,2 \cdot (ARFCN - 259)$; ARFCN = 259-293.

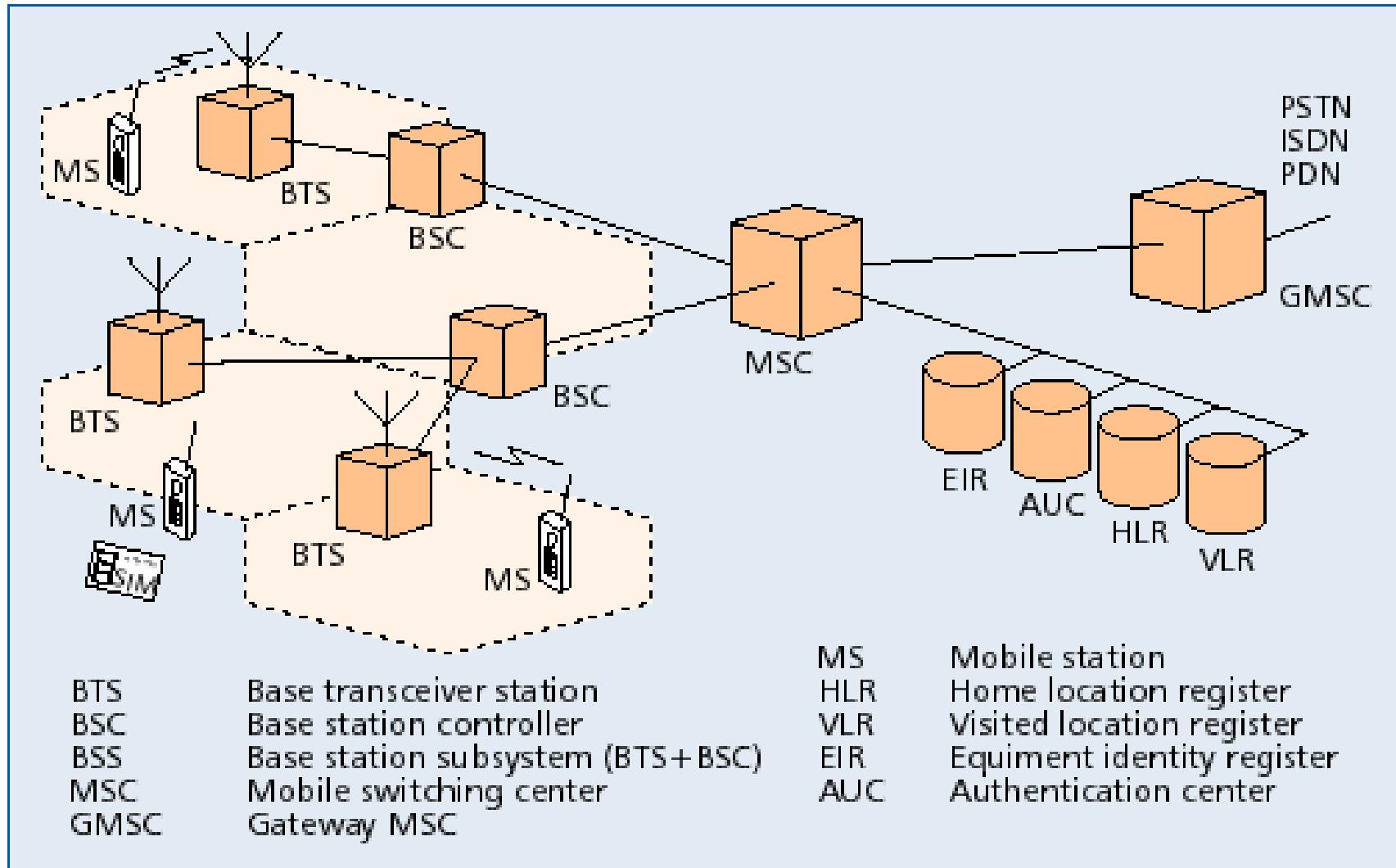


GSM

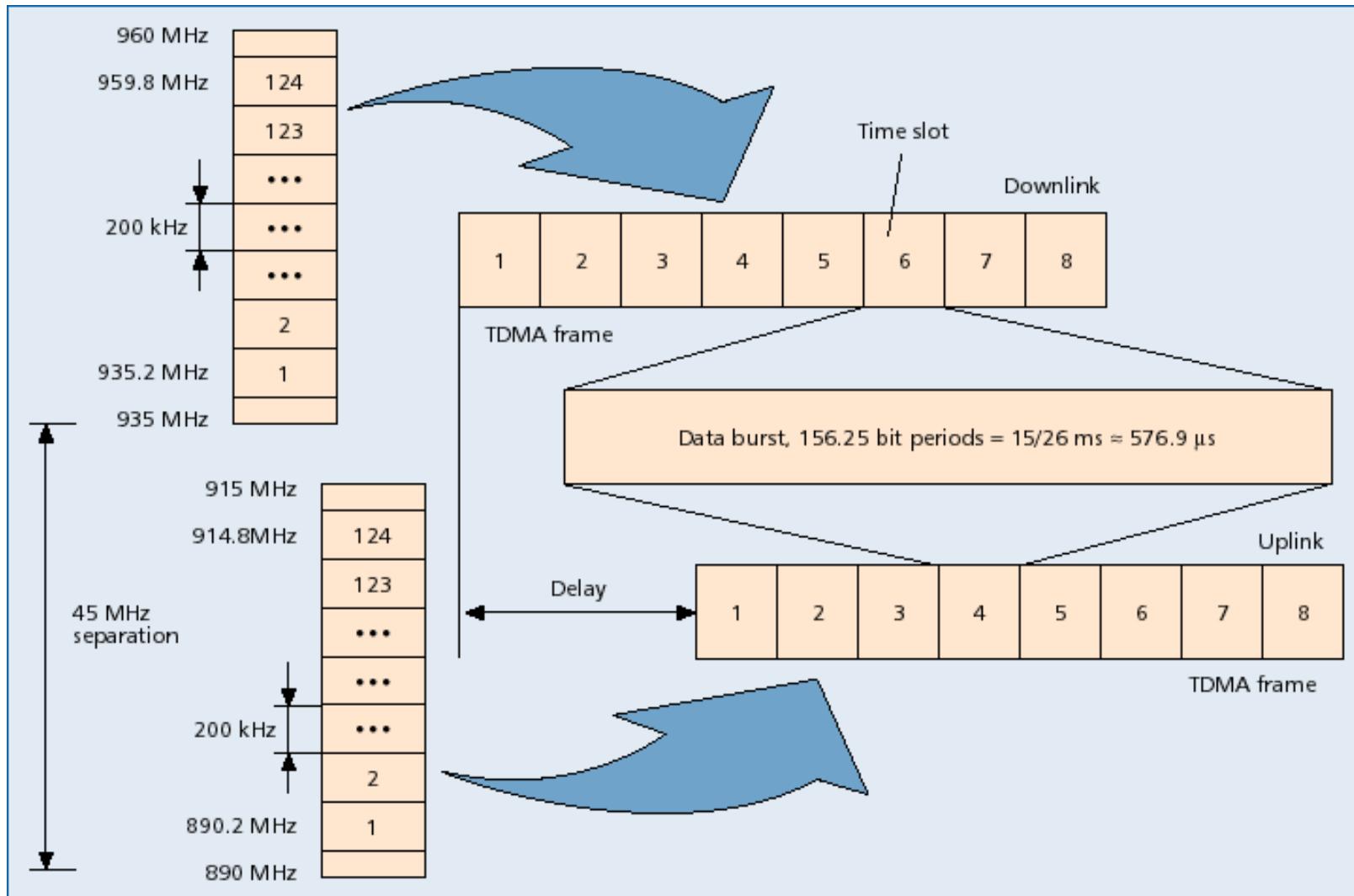
- Modulatsioon: GMSK
- Bitikiirus 270,833 kbit/s
- Kahekso ajapilu, kestusega 0,577 ms
 - kokku 4,615 ms
- Raadiokanal krüpteeritud A5/1



GSM vörk

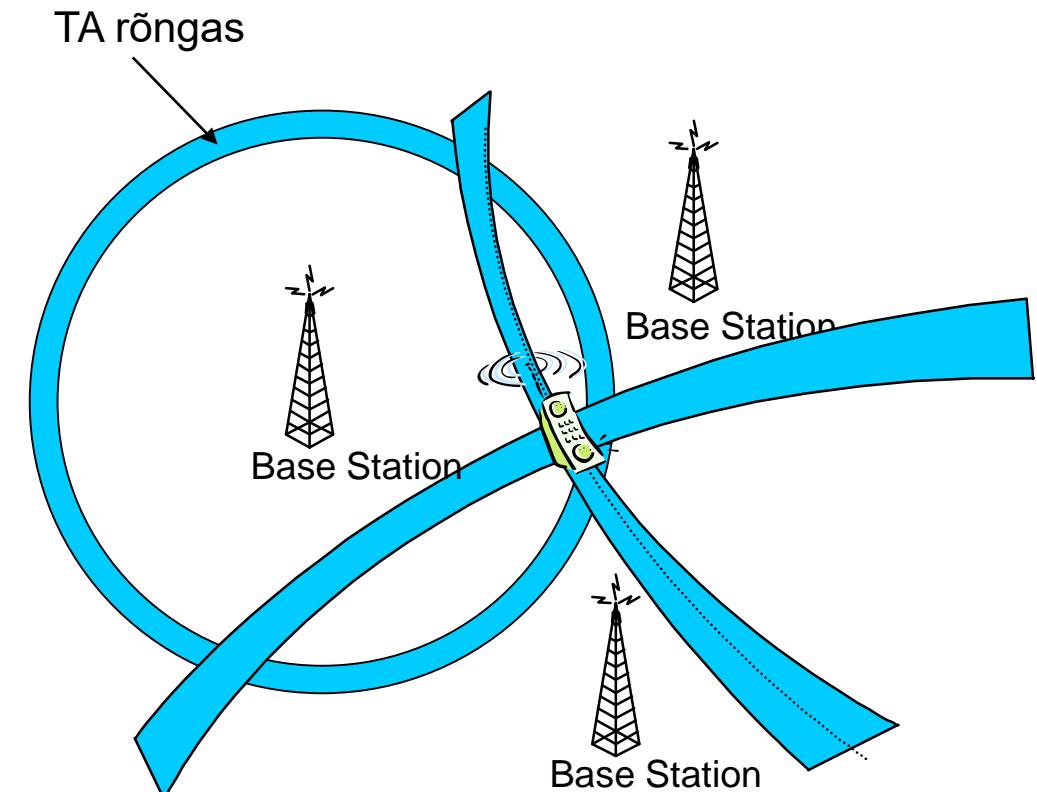
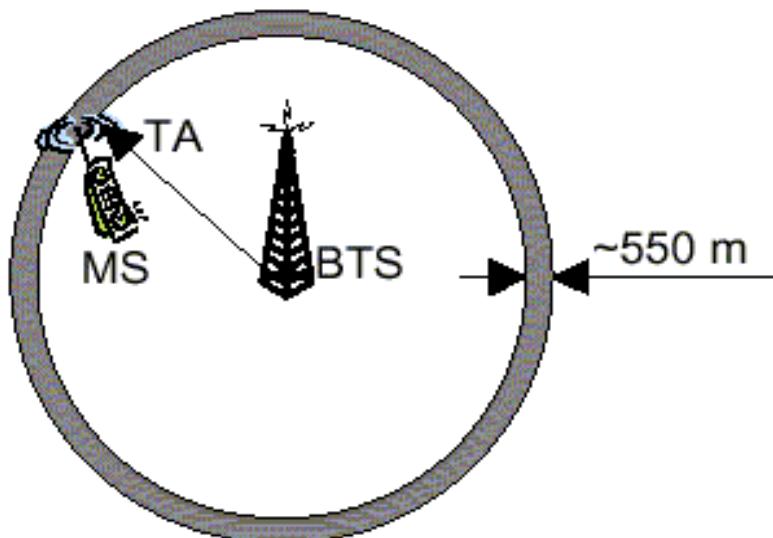


GSM ressursijaotus



GSM mobiilpositsioneerimine

- Kaugus tugijaamast- *TA Timing Advance*
- 550m lõigud (1 bit $3,69\mu s$)
- Väärtus 0-63
- Kärje tunnus *CI*

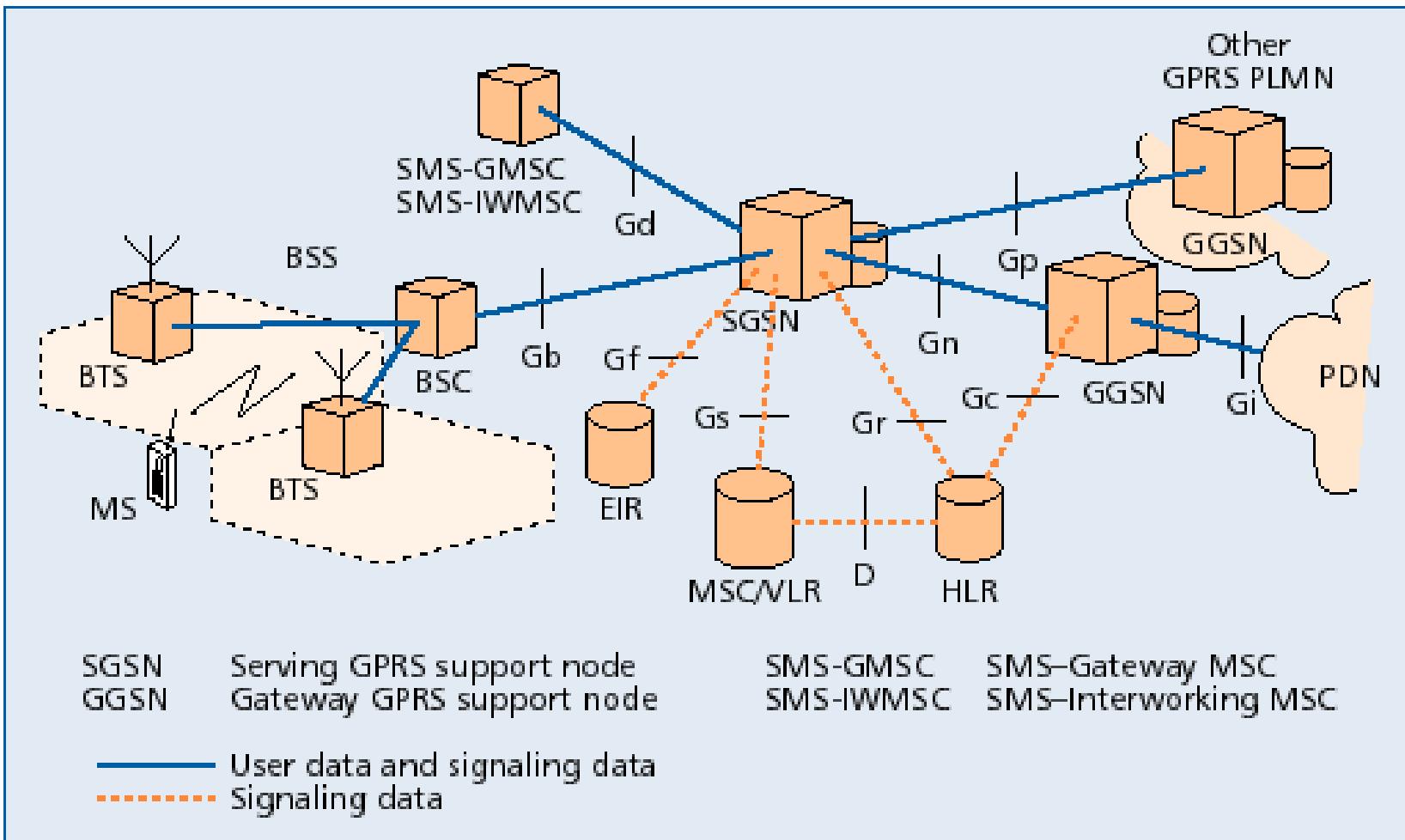


2,5G - GPRS

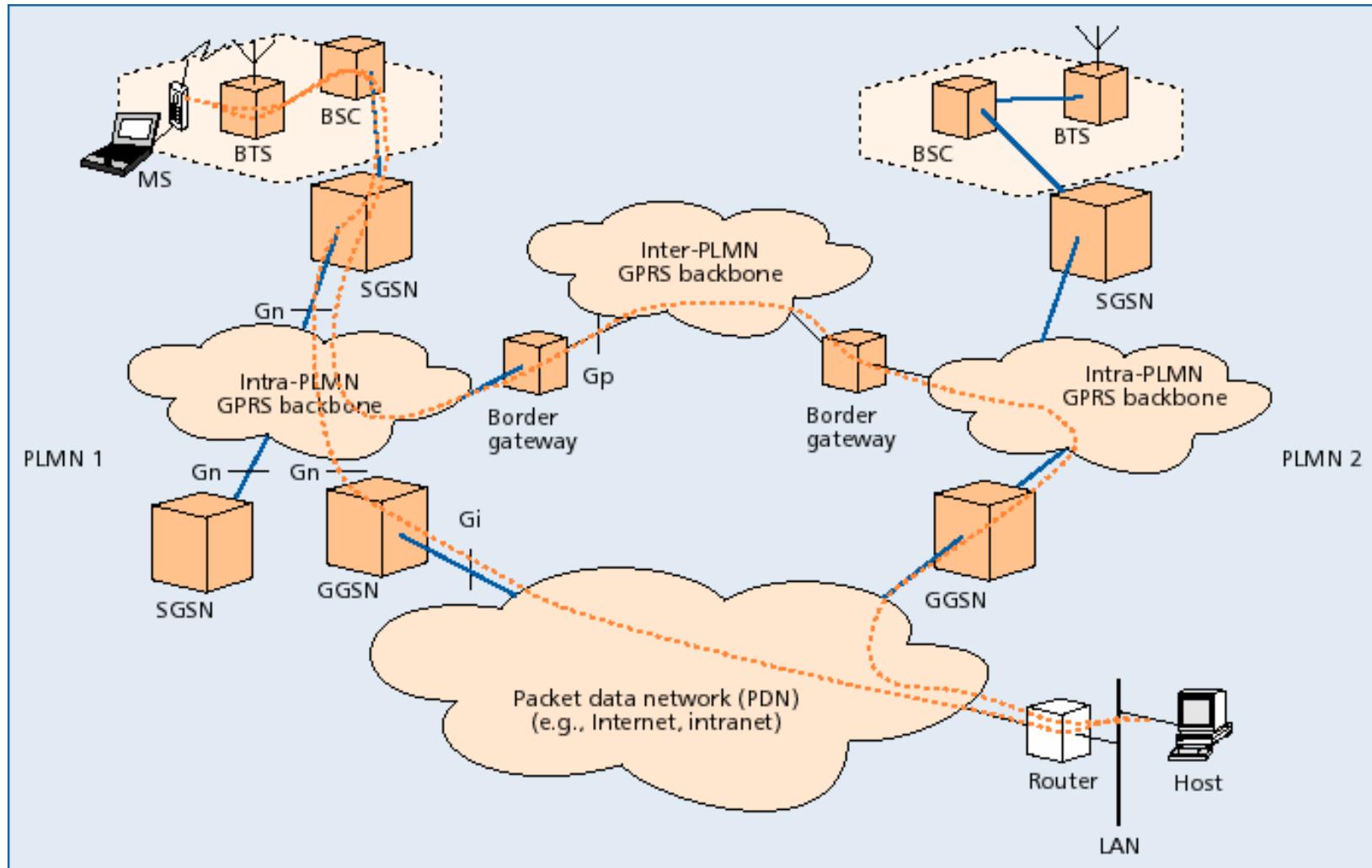
- *General Packet Radio Service*
- Pakettside
- Maksimaalne teoreetiline andmeedastuskiirus kuni 170 kbit/s
- Praktikas 56-114kbit/s
- Kasutatakse mitut ajapilu (teor. Max 7)
- Kasutatakse erinevaid veaparandusmooduseid (4 taset)

Kodeerimis-skeem	Kiirus ajapilu kohta	veakindlus
CS-1	9,05 kbit/s	Kõrge
CS-2	13,4 kbit/s	Keskmine
CS-3	15,6 kbit/s	Madal
CS-4	21,4 kbit/s	Puudub

GPRS võrk



GPRS võrk



2,75G - EDGE



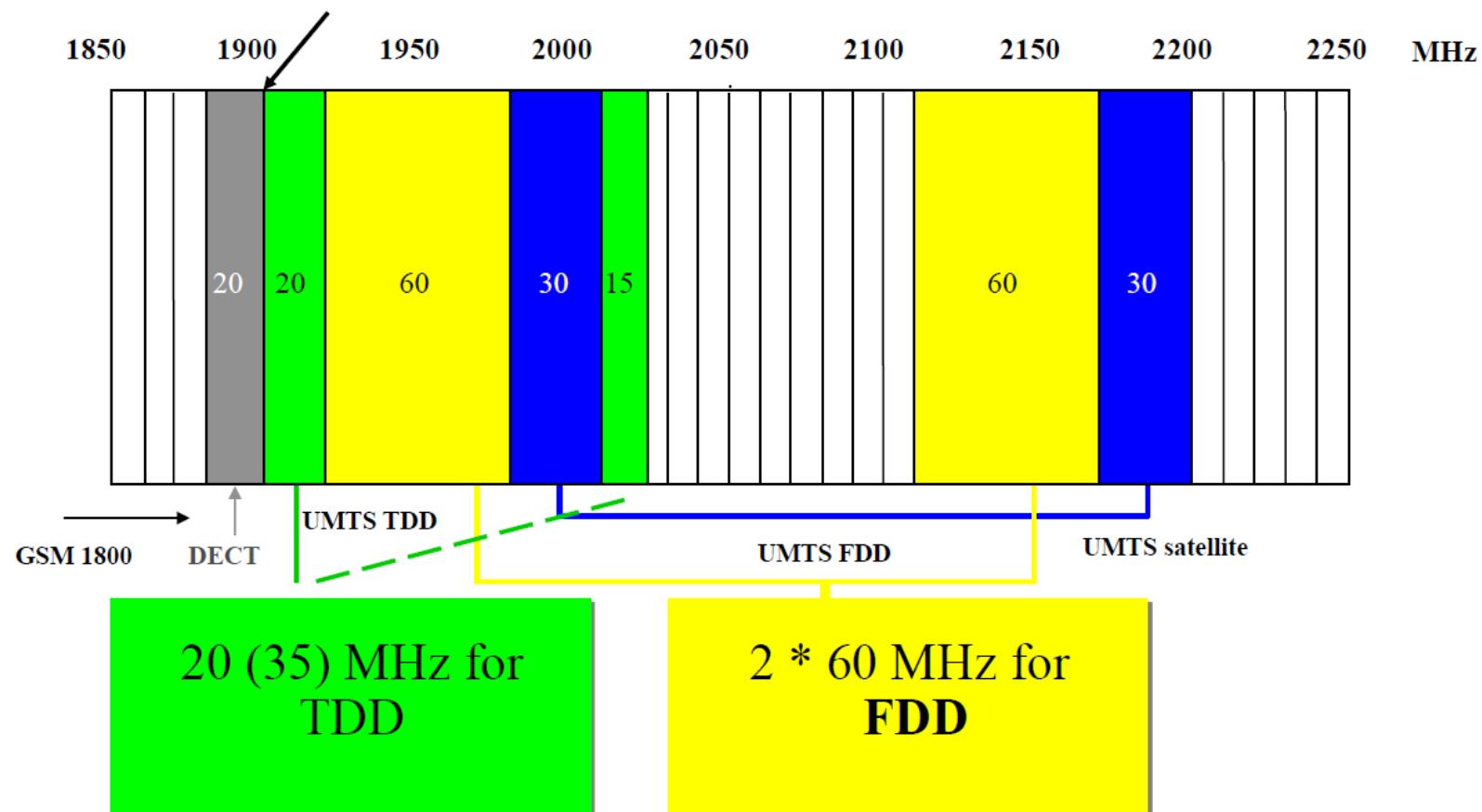
- *Enhanced Data rates for GSM Evolution*
 - (*Enhanced GPRS*)
- Muudatused ainult raadiovõrgus
 - Kaasaarvatud terminalis
 - Kuni 473,6kbit/s
 - 8-PSK modulatsioon

MCS	Kiirus (kbit/s)	Modulatsioon
MSC-1	8,80	GMSK
MSC-2	11,2	GMSK
MSC-3	14,8	GMSK
MSC-4	17,6	GMSK
MSC-5	22,4	8-PSK
MSC-6	29,6	8-PSK
MSC-7	44,8	8-PSK
MSC-8	54,4	8-PSK
MSC-9	59,2	8-PSK

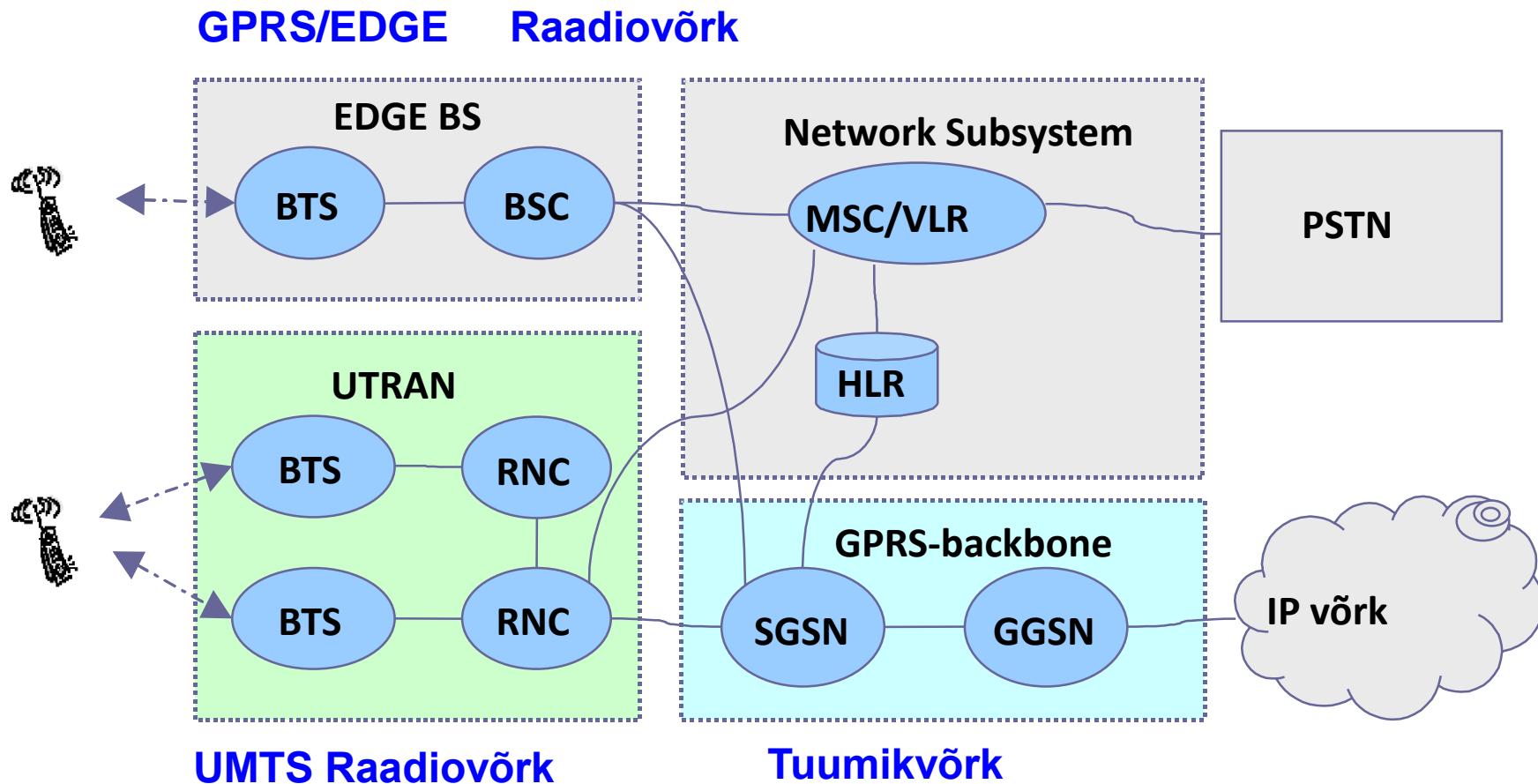
3G UMTS

- *Universal Mobile Telephone System*
- UTRAN raadiovõrk
- W-CDMA – hajaspektrimodulatsioon
 - OVSF (*Orthogonal Variable Spreading Factor*) koodid
- Kanali laius 5MHz
 - FDMA üks ülesse- ja teine allalingi jaoks
 - TDMA
- Hajutava koodi kiirus 3,84 Mcp/s
- Allalingi kiirus kuni 384 kbit/s

UMTS sageduskasutus



GPRS/EDGE + WCDMA



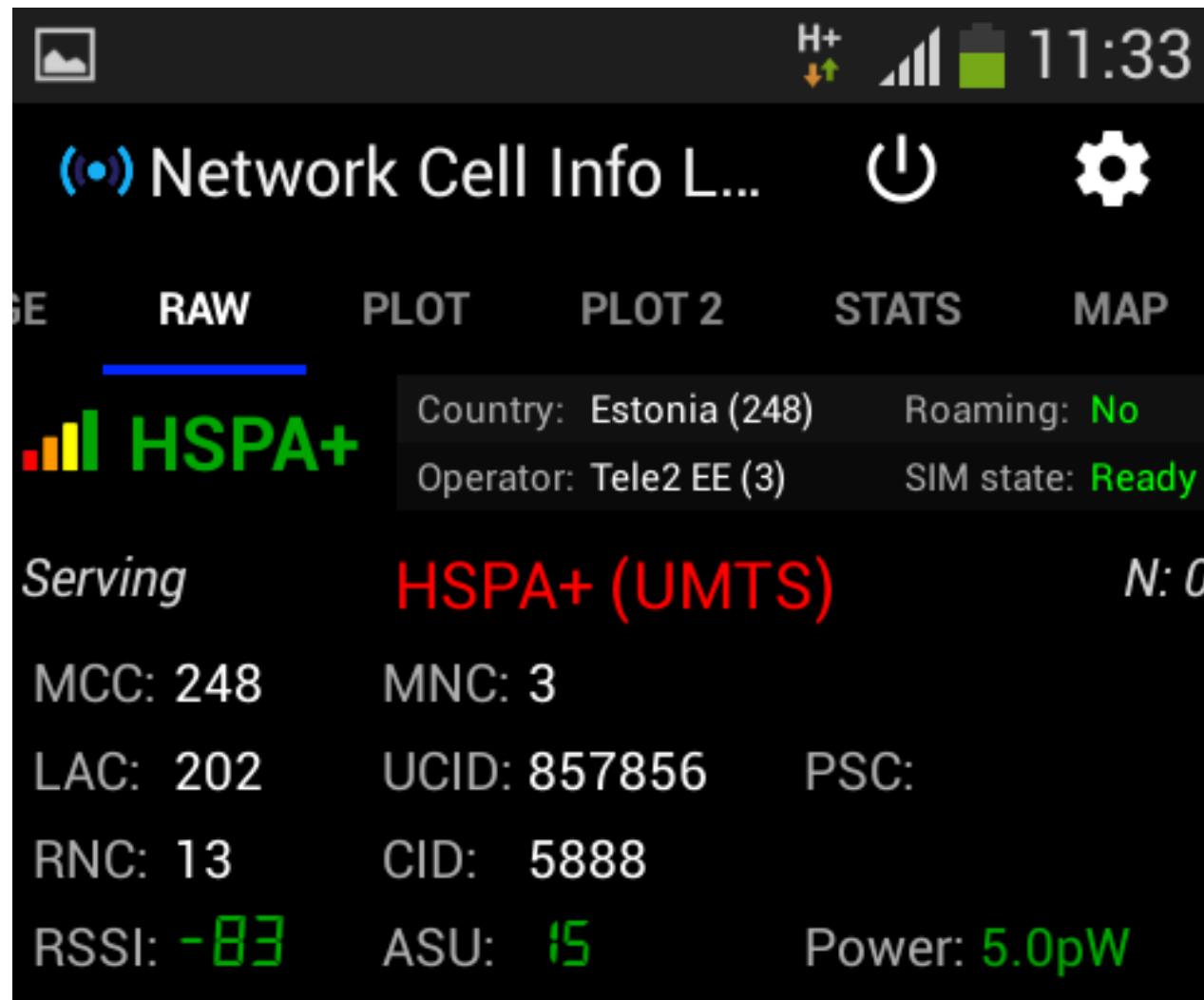
Bitikiirus

Kasutaja bitikiirus kbit/s	Hajutamistegur	Hajutava koodi kiirus Mcp/s
15	256	3,84
30	128	3,84
60	64	3,84
120	32	3,84
240	16	3,84
480	8	3,84
960	4	3,84

3G HSPA

- *High Speed Packet Access*
- Tehnoloogia andmeedastuskiiruse tõstmiseks 3G võrgus.
 - Kõrgemat järu modulatsioon (16 QAM)
 - Kanalite liitmine (2x5 MHz, 4x5 MHz, 8x5 MHz)
 - MIMO (2x2 / 4x4)
- Allalingi kiirus 14,4 – 672 Mbit/s
- Üleslingi kiirus 0,384 – 70 Mbit/s
- HSPA+
 - 43 Mbit/s allalink ja 11 Mbit/s üleslink (5 MHz kanal)

MCC ja MNC



4G nõuded



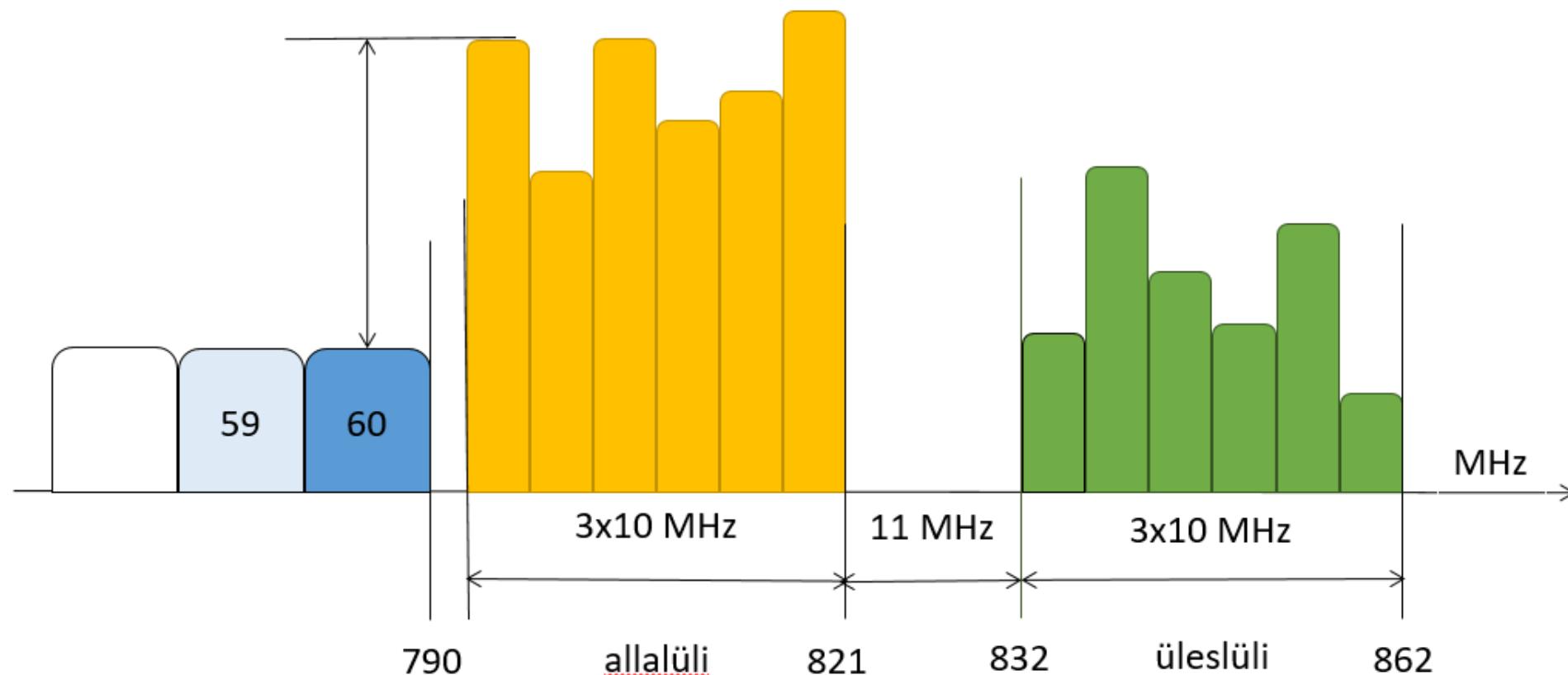
- IMT – Advanced
- Täielikult IP põhine
- Ühilduv eksisteerivate standarditega.
- Suurel kiirusel liikuva terminaliga edastuskiirus 100 Mbit/s
- Statsionaarse terminali puhul edastuskiirus 1 Gbit/s
- Spektraalefektiivsus kuni 15 bit/s/Hz
- Skaleeritav ribalaius 5 - 20 MHz (40 MHz)
- Kõrge kvaliteediga multimeediaedastus
- ...

LTE ehk „4G“

- 4G nõuded on siamaani täies mahus saavutamata.
- 4G LTE (*Long Term Evolution*) 4G nõuded leevendatud kujul.
- 3G tehnika edasiarendus suuremate kiiruste ja väiksemate viidete suunas.
 - Allalink kuni 300 Mbit/s
 - Üleslink kuni 75 Mbit/s
 - Viide väiksem kui 5 ms
- Uus raadiovõrk, täiendused tuumikvõrgus.
- 4G on pigem turunduslik, mitte tehniline termin.



LTE sageduskasutus 800MHz alas Eestis



5G

- Kehtivat standardit pole
- Millimeetri laineala: 28, 38, 60, 72-73 GHz sagedused.
- Väike viide (*Low latency*)
- Parem spektraalefektiivsus
- SDMN (*Software Defined Mobile Network*)
- 3DBF (*3D BeamForming*)
- IoT tugi – suur hulk ühendatud seadmeid
- IPv6



Loe lisaks

- **NMT Doc 450-1: System Description** <http://download.eversberg.eu/mobilfunk/NMT-Dokus/NMT%20DOC%20450-1%20System%20Description%201997-08-08.pdf>,
02.12.2017
- **3G UMTS / WCDMA Basics Tutorial.** http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/umts/umts_wcdma_tutorial.php ,04.12.17
- William Stallings. **Data and Computer Communications.** Kaheksas trükk. Peatükk 14 – **Cellultural Wireless Networks.**

