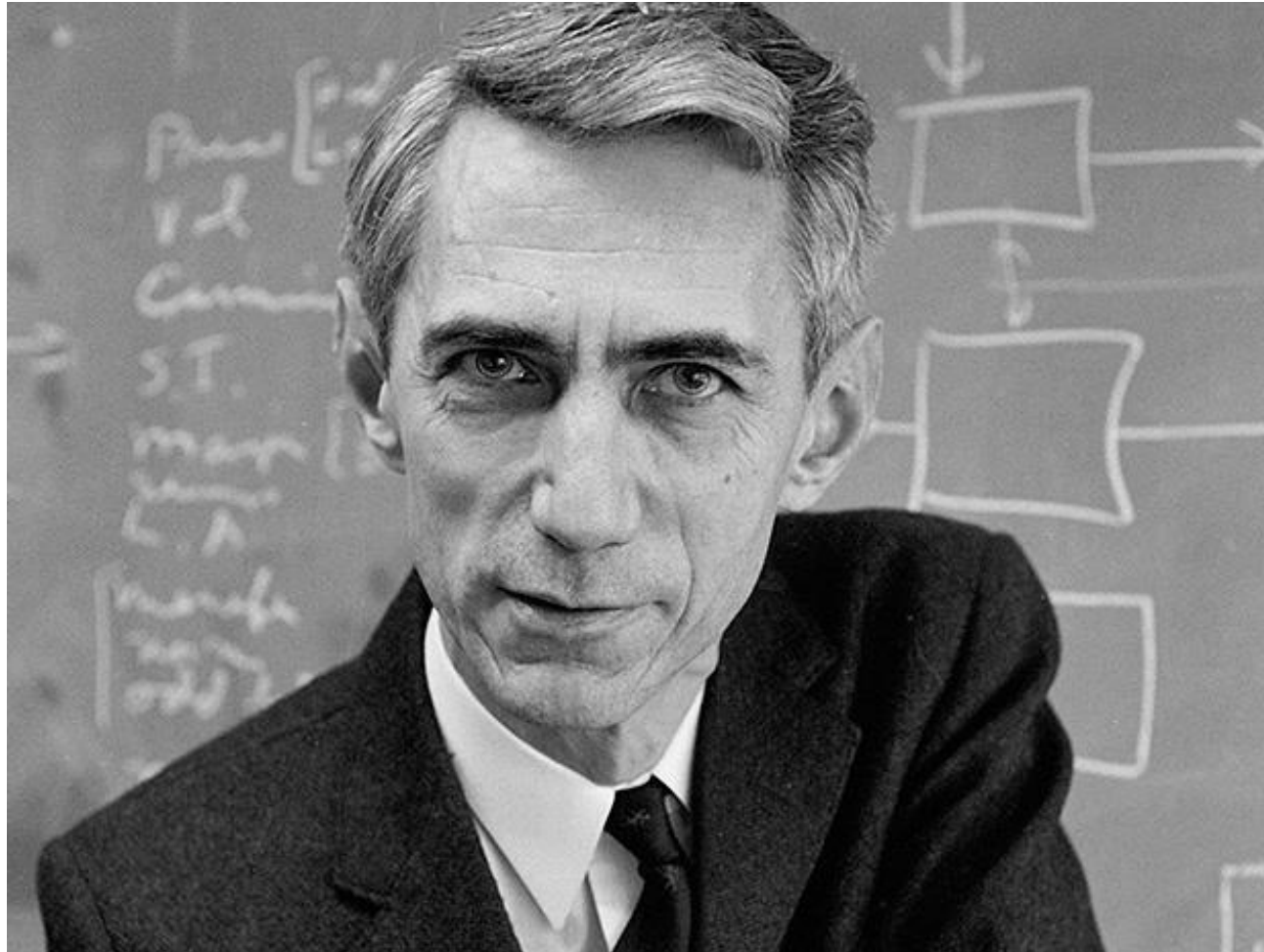


9. Süsteemid ja signaalid

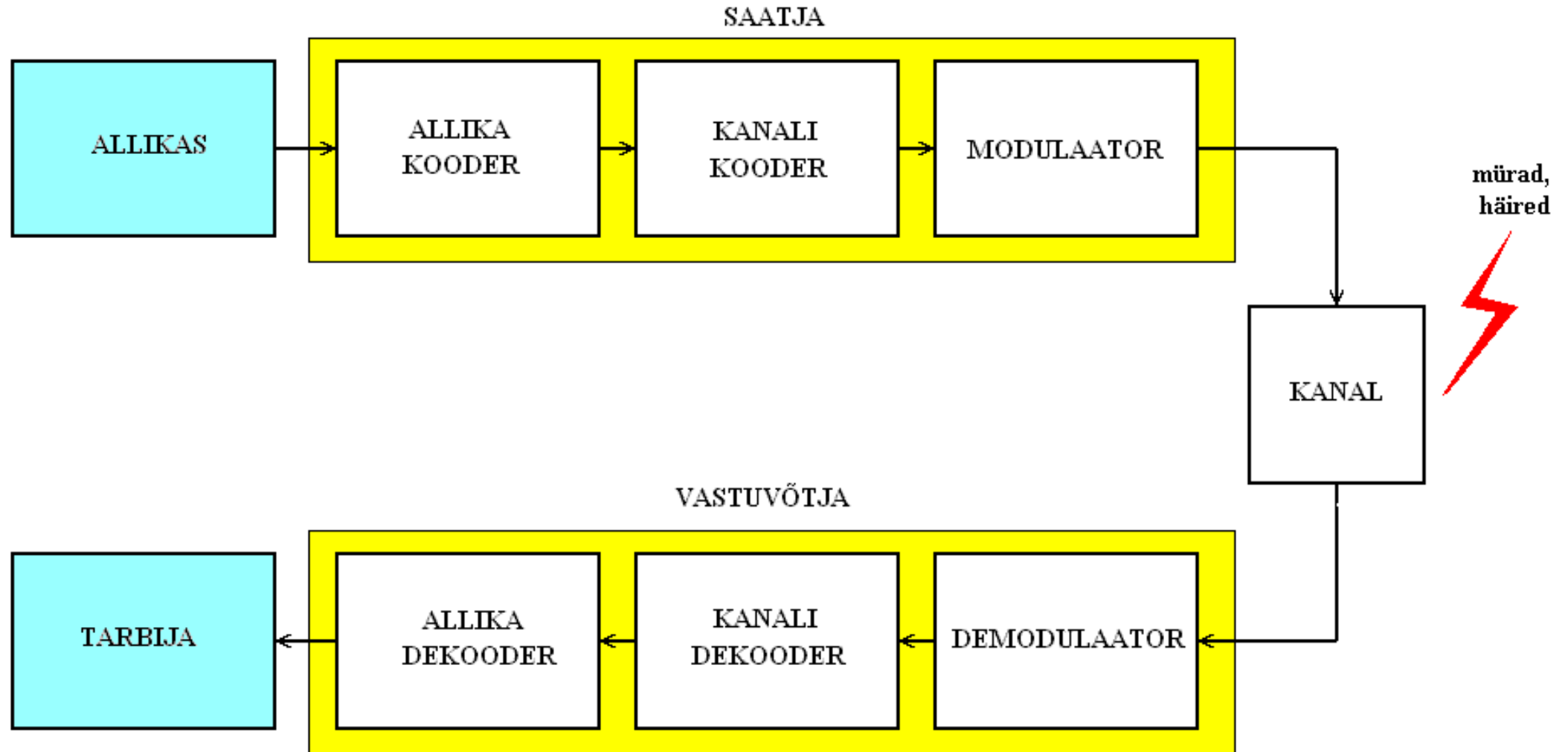
Arvutivõrgud IEE1100

Ivo Mürsepp

Claude Elwood Shannon

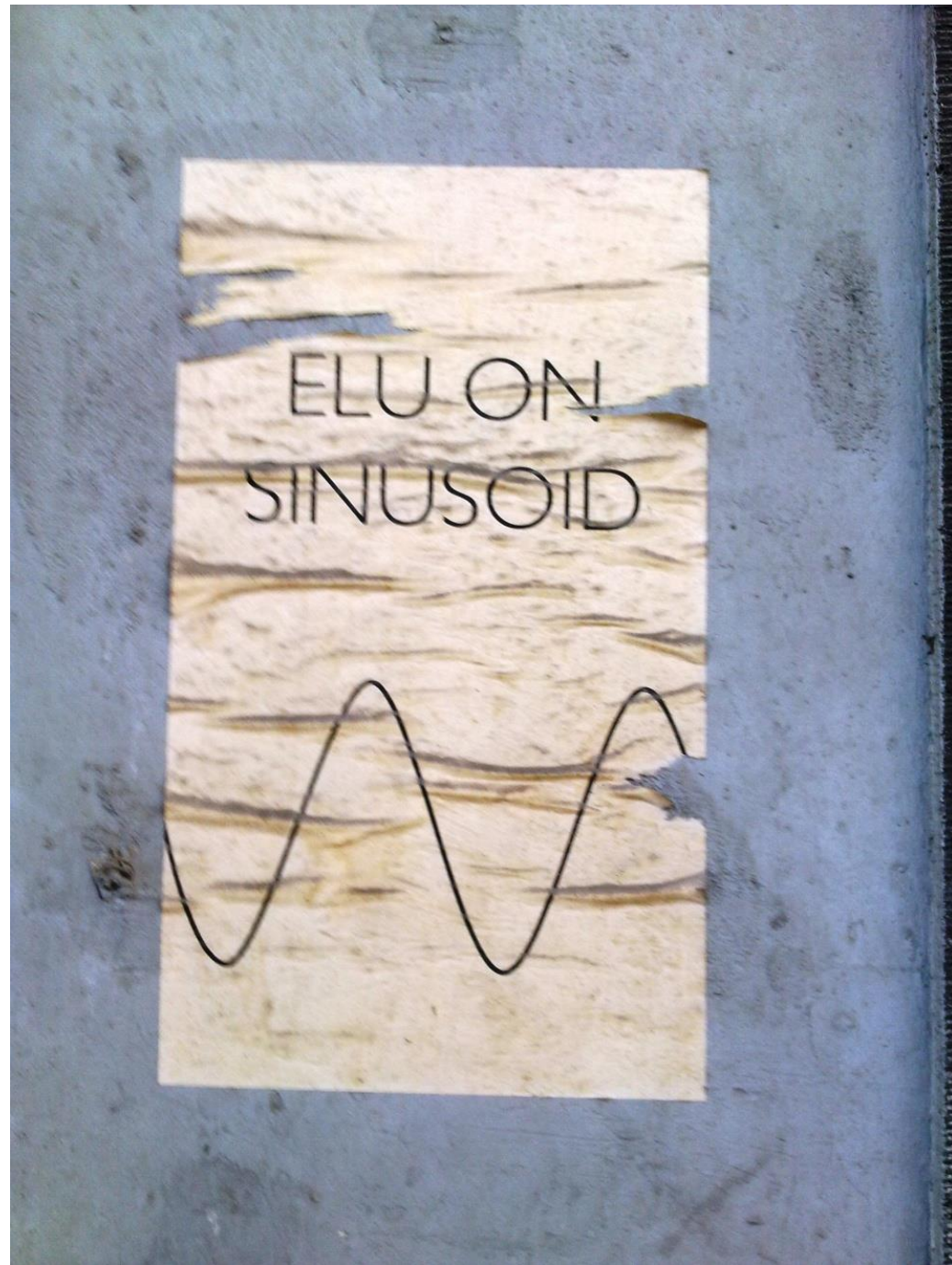


Shannon-Weaveri mudel



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** väärtus on võrdeline ehk analoogne ülekantava füüsikalise suuruse väärtusega.
- **Digitaalsignaali** esitab ülekantavat suurust numbrilise väärtusena.
- Signaali väärtused võivad olla nii reaalsed $s(t)$ või kompleksarvulised:
 $\text{Re}(s) + j \cdot \text{Im}(s)$

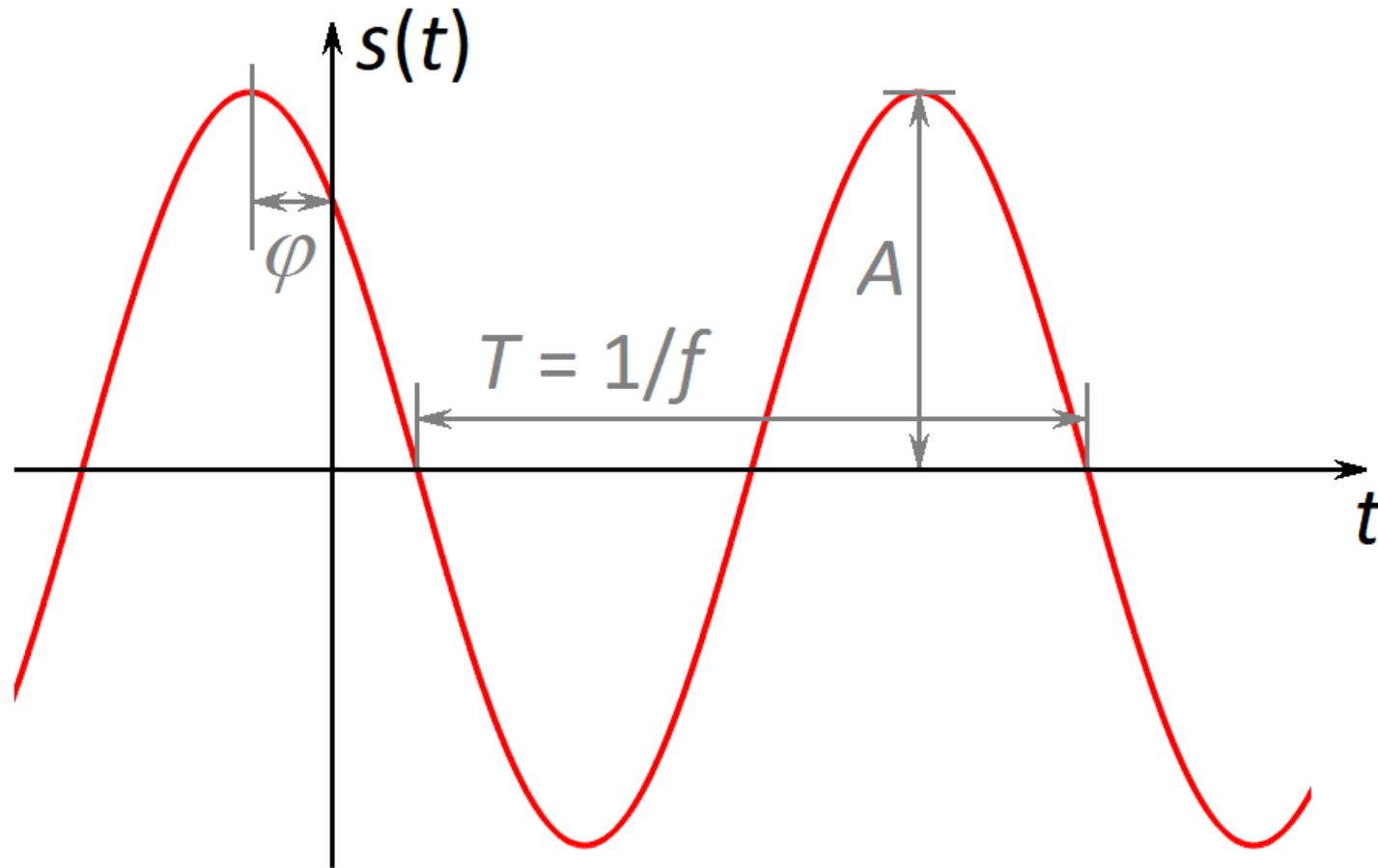


Siinussignaali

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

- 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 [°]

Siinussignaali



Siinuspinge

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

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

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

Efektiivväärtus

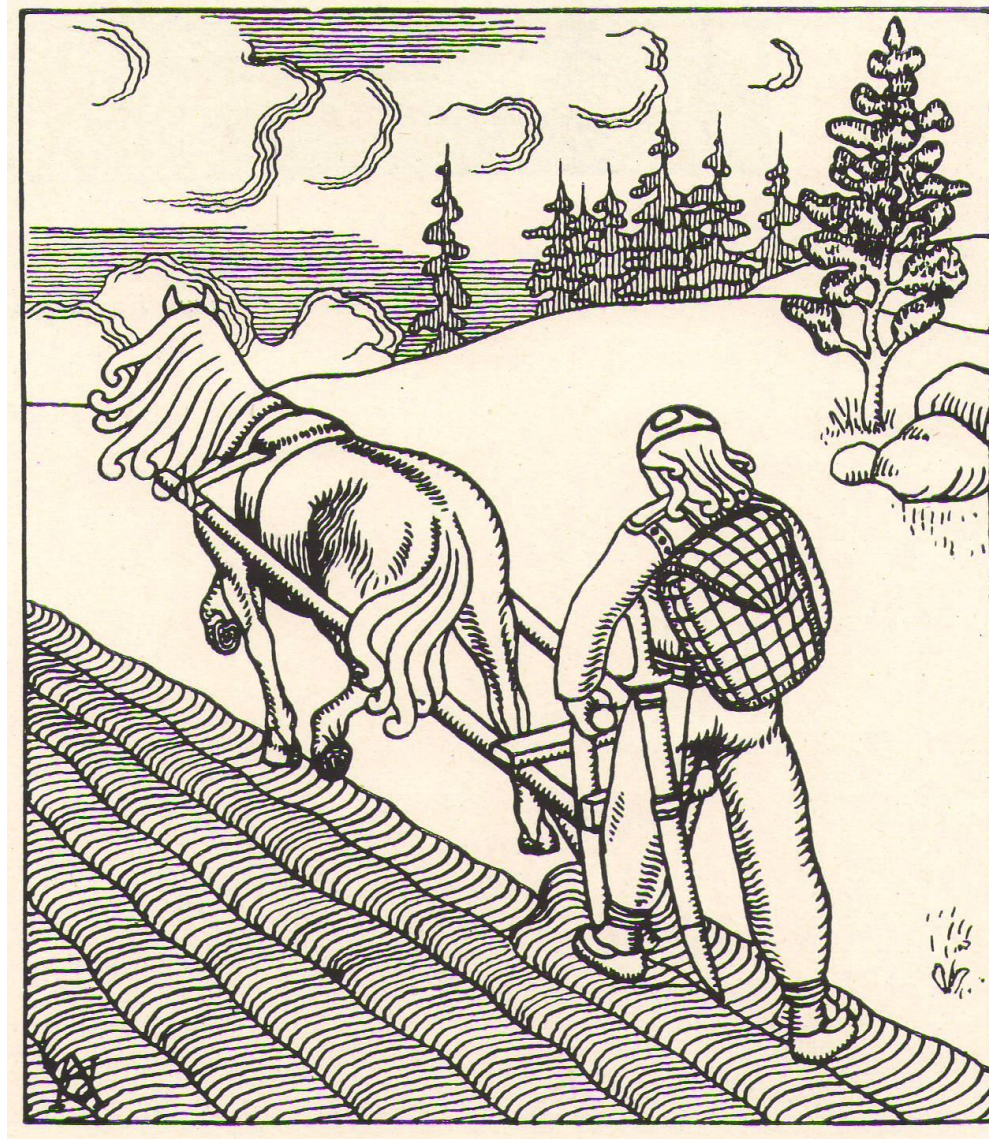
- Pinge **efektiivväärtus** (*RMS – Root Mean Square*) on defineeritud kui

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

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

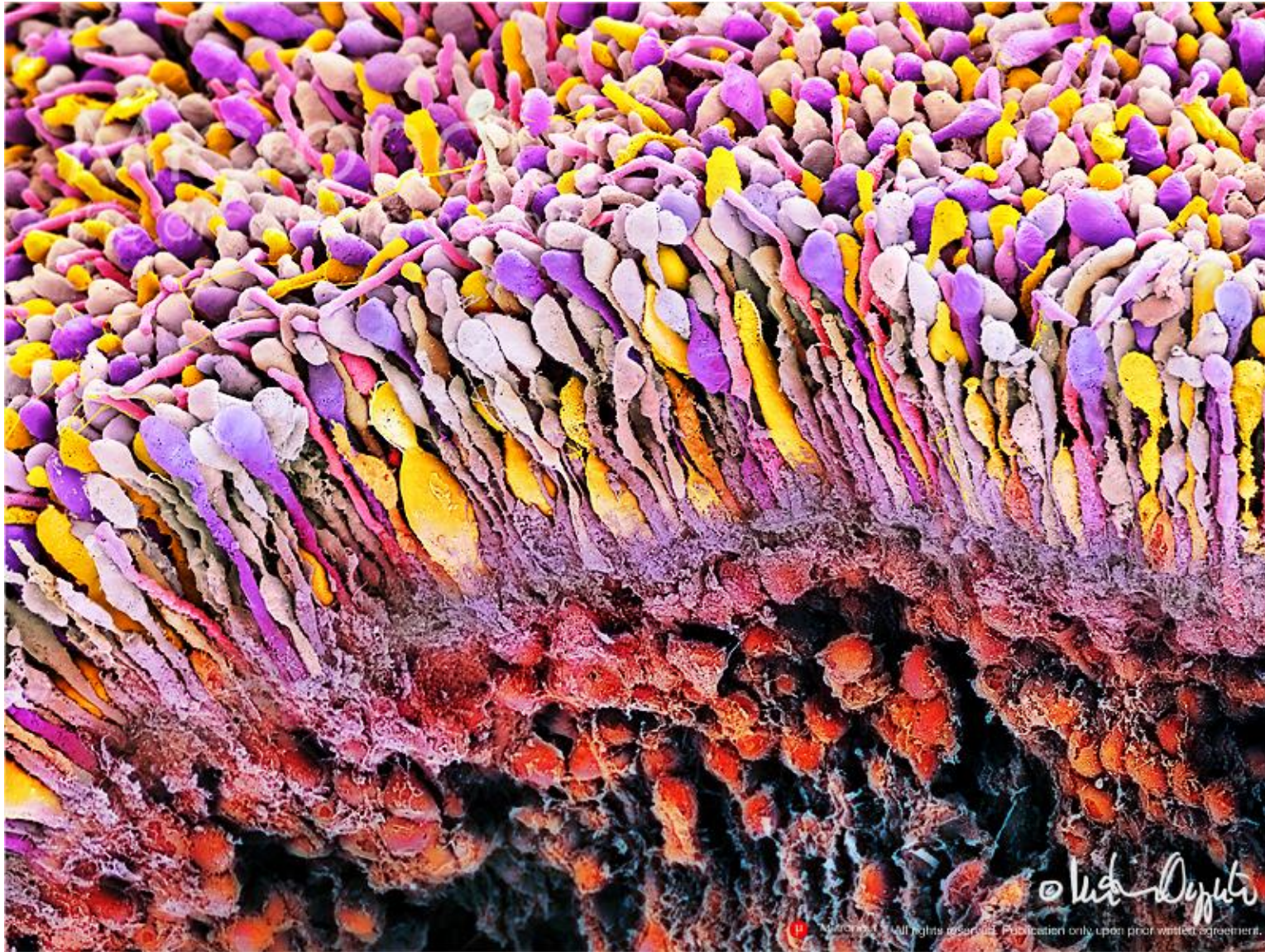
$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_{pp}}{2\sqrt{2}}$$

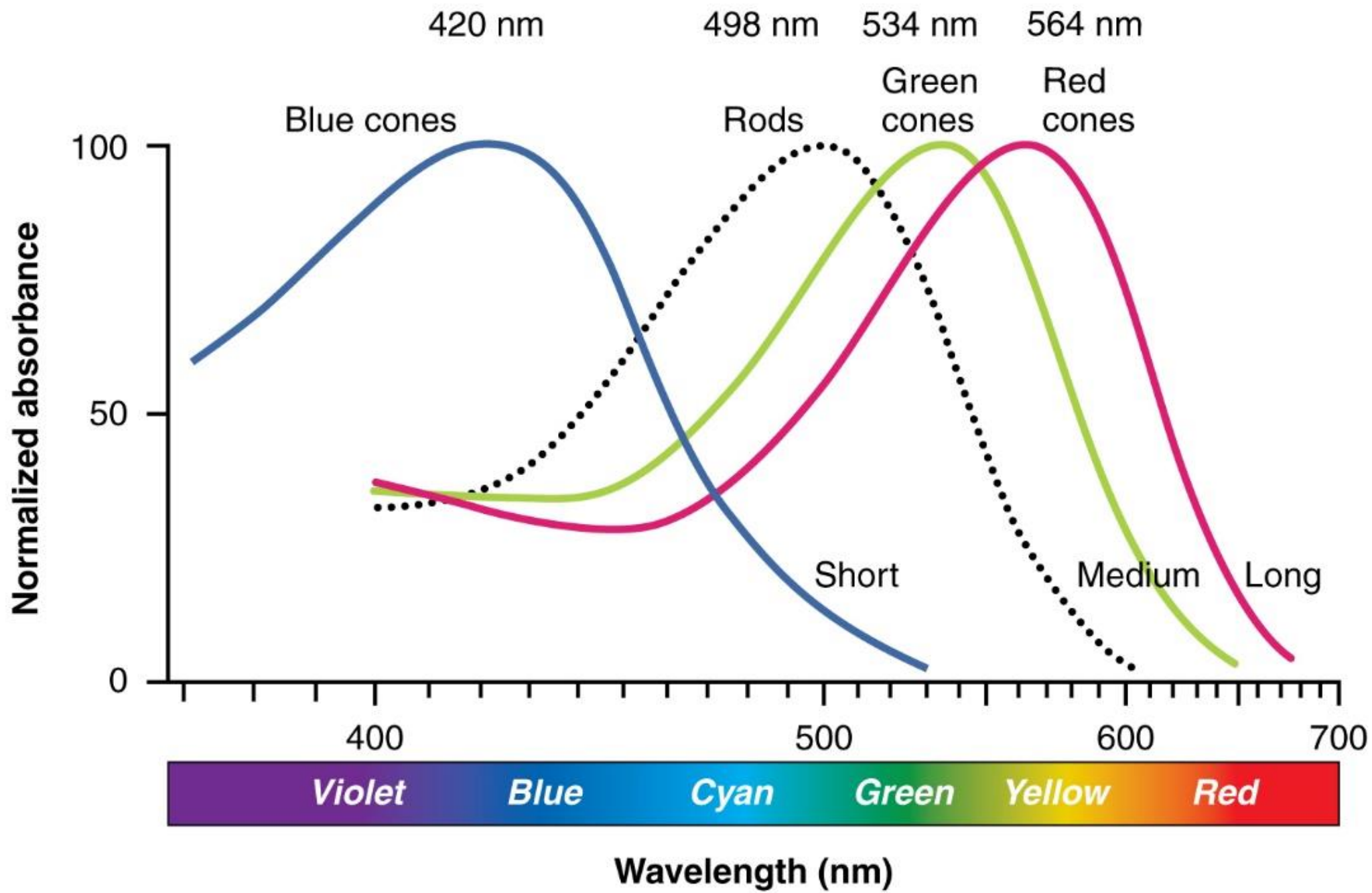
Kahemõõtmelise signaali edastamine



See ei ole kollane!

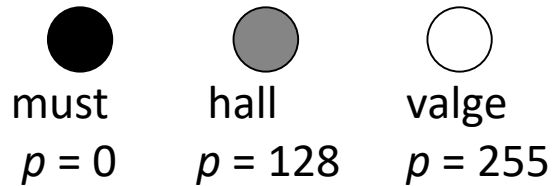
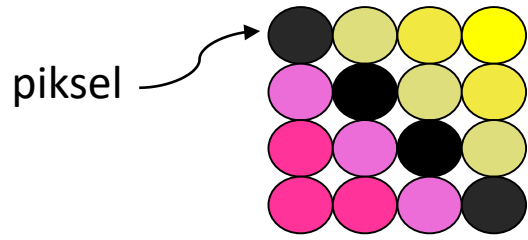






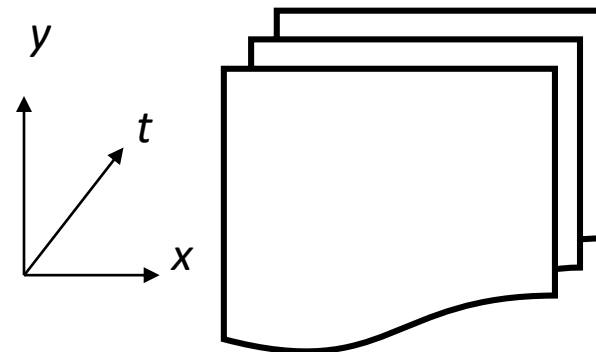
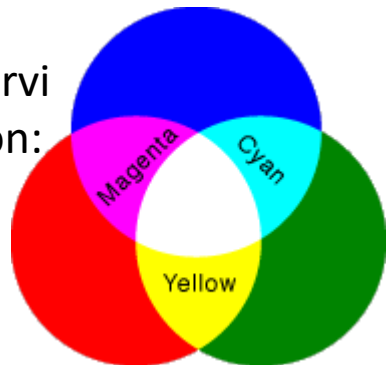
Mitmemõõtmelised signaalid

- **Pilt:** 2D signaal

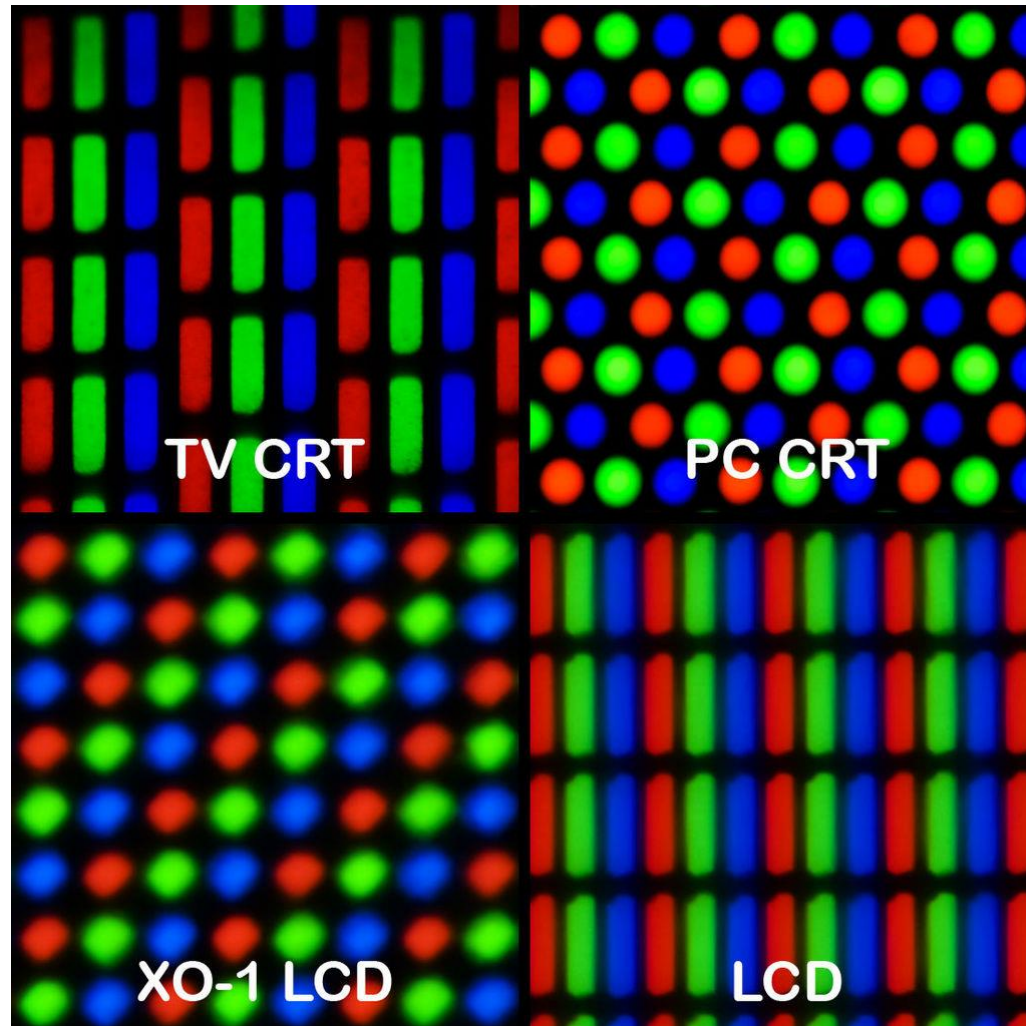


- **Video:** 3D signaal, ajas järjestikuste kahemõõtmeliste piltide (kaadrite) jada.

Värvid:
kolme põhivärvi
kombinatsioon:
RGB

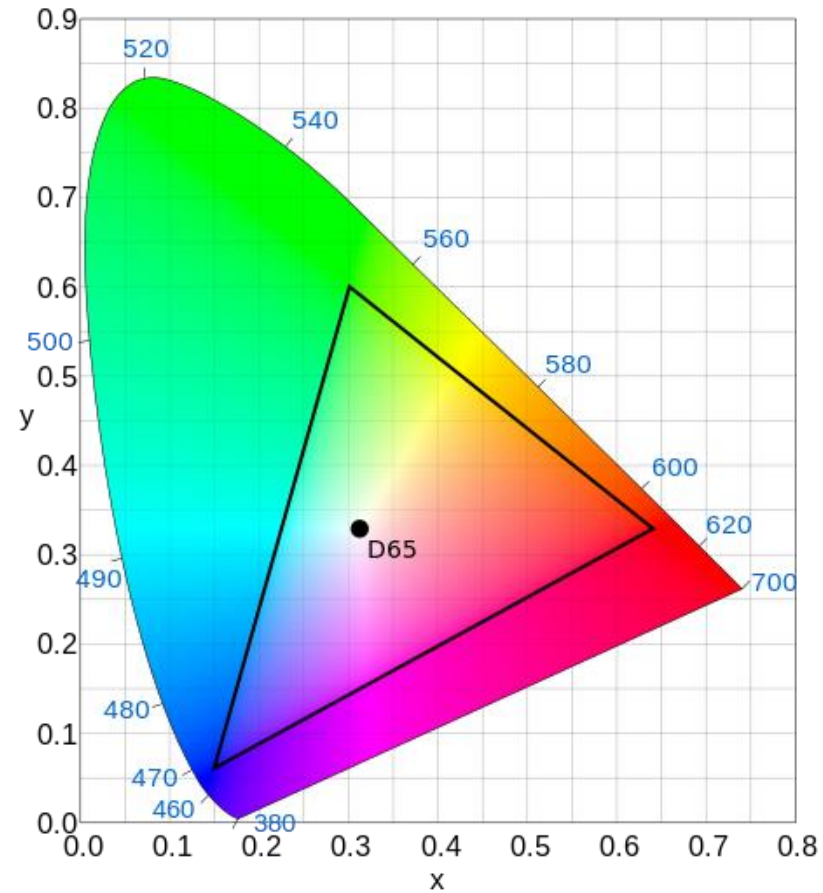


Värvide kujutamine

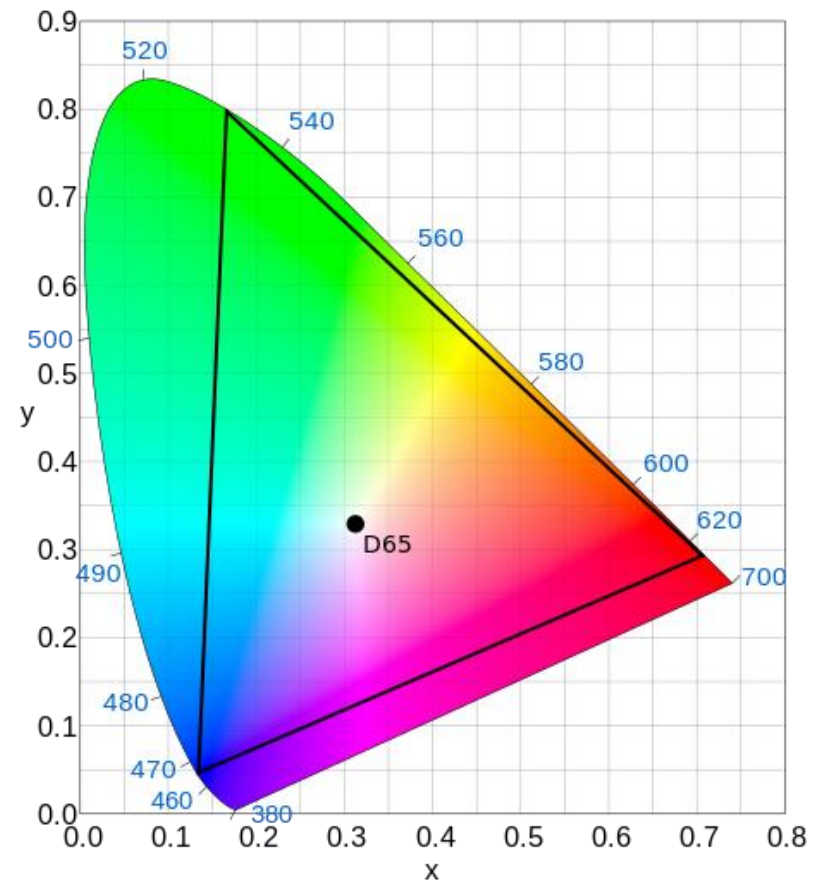


Värvikolmnurk

Rec. 709 (HDTV)



Rec. 2020 (UHDTV)



Pidevad- ja diskreetsed signaalid

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

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

- Signaali väärtus võib samuti olla kas pidev või diskreetne

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



Signaali spekter

- Enamasti koosneb signaal mitmest erineva sagedusega komponendist.
- Signaali **spekter** on nende komponentide jaotus sageduse järgi.
- Signaali spektris oleva kõrgeima ja madalaima sageduse erinevust nimetatakse (signaali) **ribalaiuseks**:

$$B = f_{max} - f_{min}$$



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



Jean-Baptiste Joseph Fourier

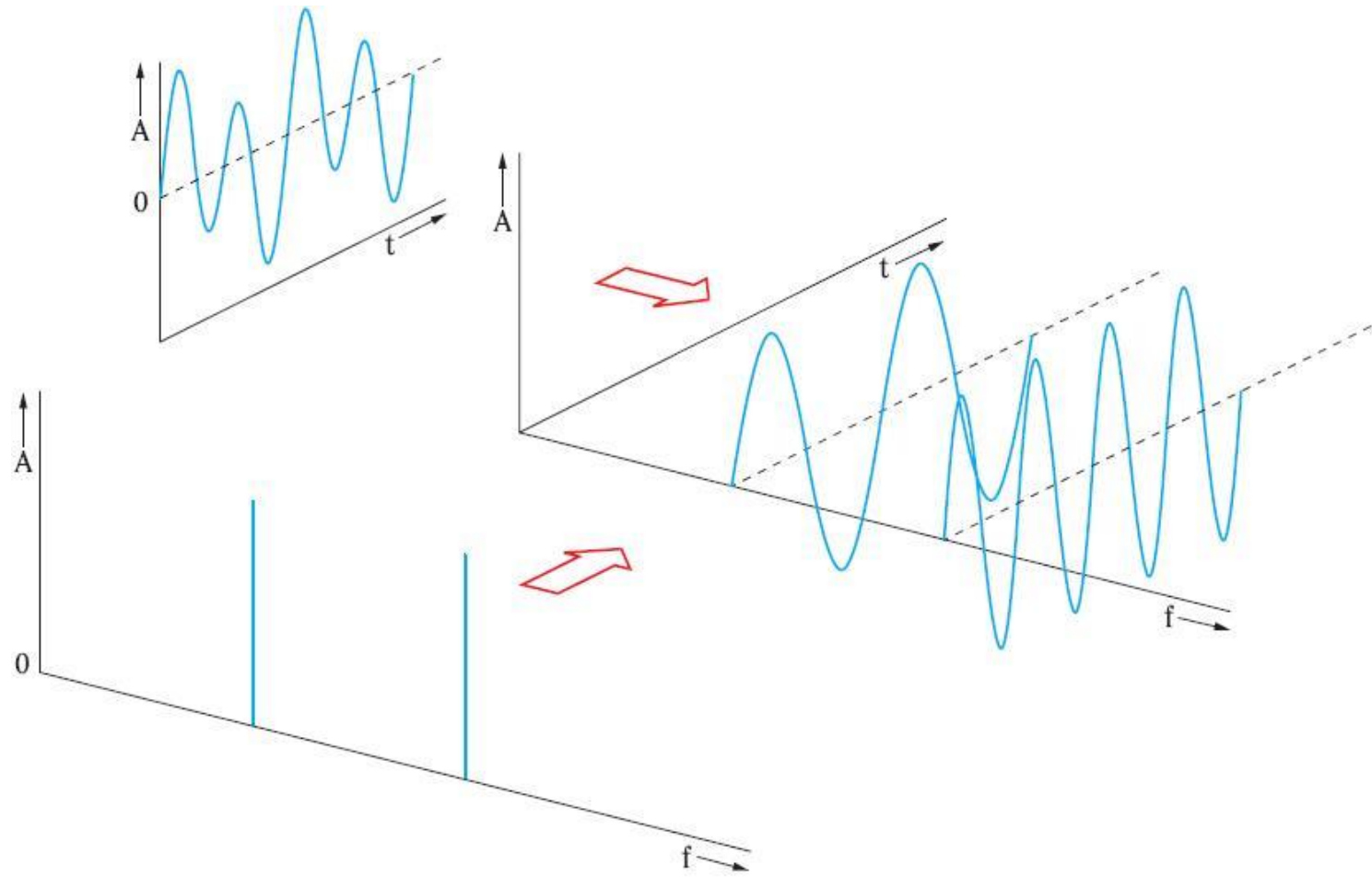
Fourier'i teisendus

- Mitteperioodilise signaali $s(t)$ korral:

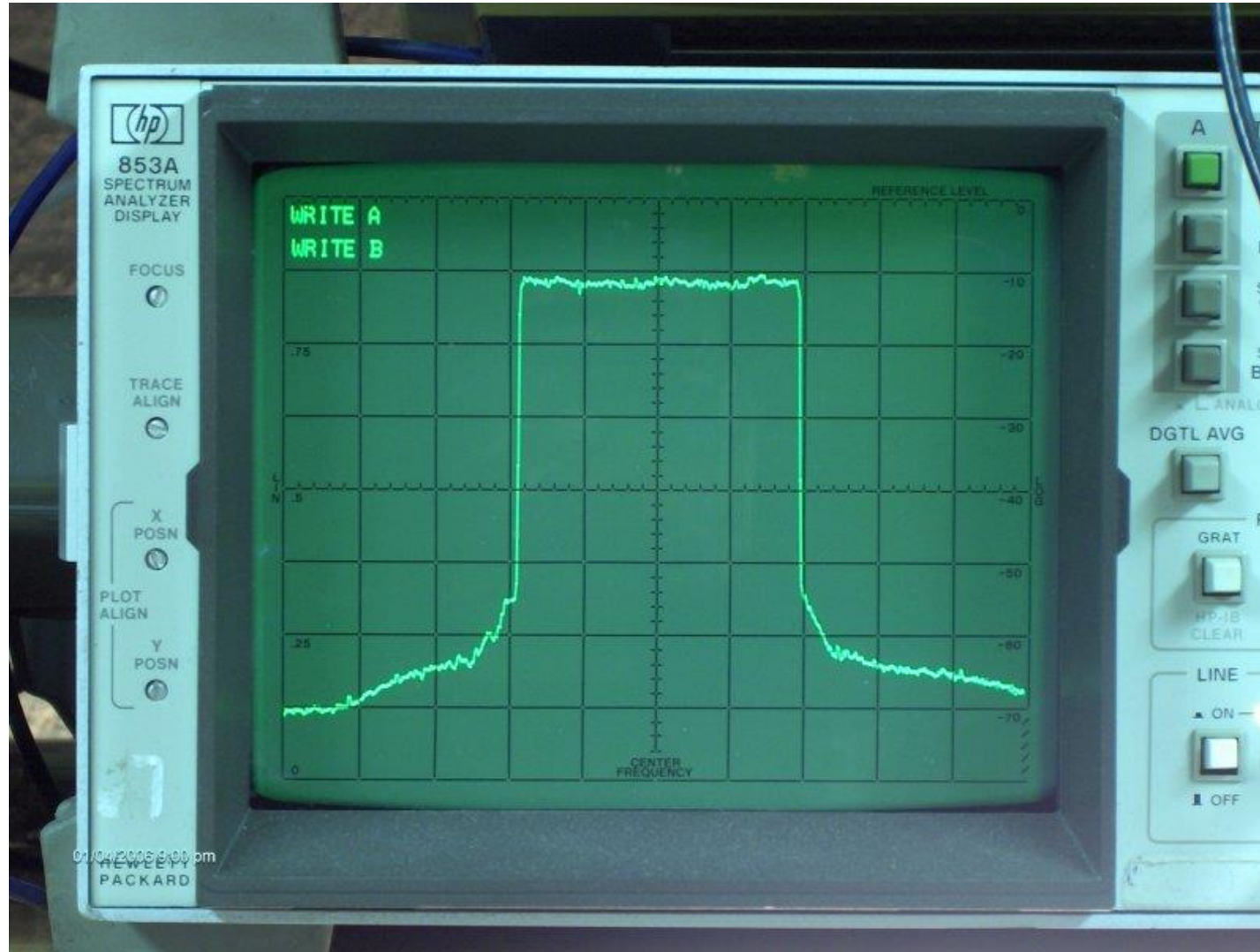
$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

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

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 ja müra oma vastavalt N -ga.

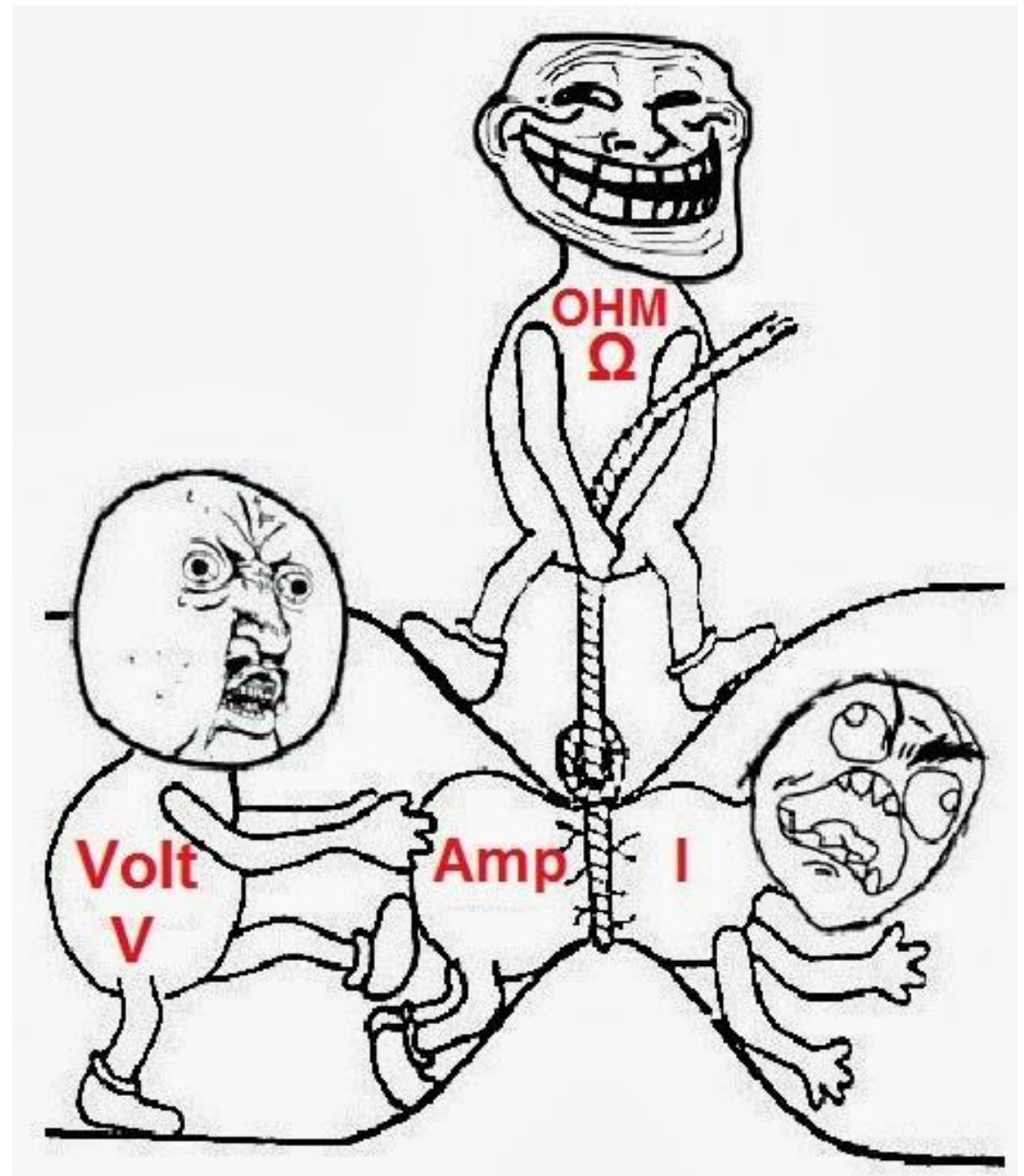
Oomi seadus

- Oomi seadus:

$$I = \frac{U}{R}$$

- Seega saab signaali hetkvõimsust väljendada ka järgnevatel kujudel:

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



Signaali (keskmine) võimsus

- Keskmine võimus:

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

- Näeme, et keskmine võimsus P on vastavalt pinge U ja voolu I efektiivväärtustega seotud järgmiselt:

$$P = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R$$

- Juhul, kui takistus $R = 1 \Omega$ on tegemist normeeritud võimsusega.



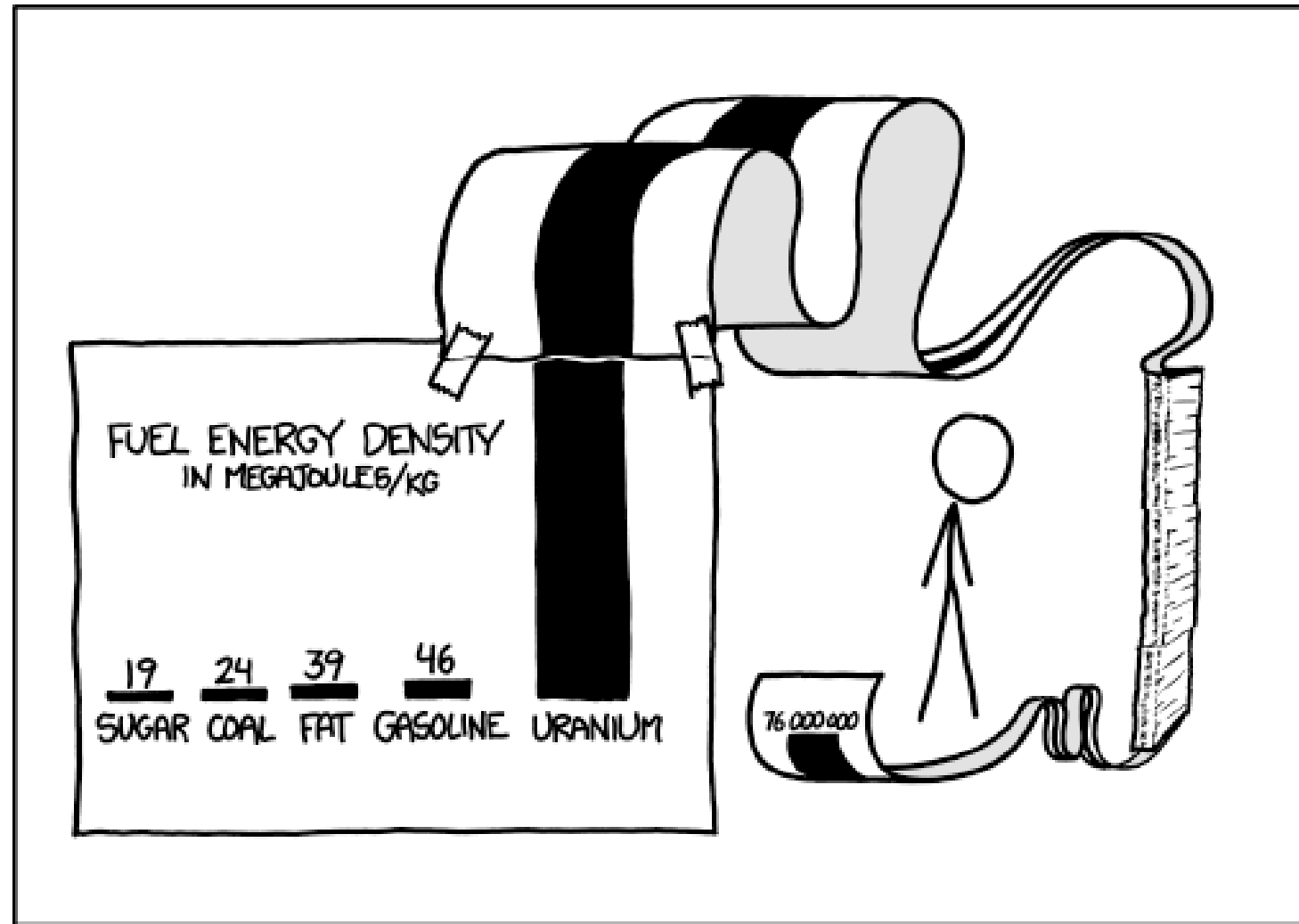
HAARP



Vene rähn



Logaritmilised mõõtühikud



SCIENCE TIP: LOG SCALES ARE FOR QUITTERS WHO CAN'T
FIND ENOUGH PAPER TO MAKE THEIR POINT PROPERLY.

Detsibell dB

- Kahe võimsuse suhet mõõdetakse **detsibellides** [dB]

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

- Absoluutsed logaritmilised võimsuse mõõtühikud:

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

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

- Pinge mõõtmisel:

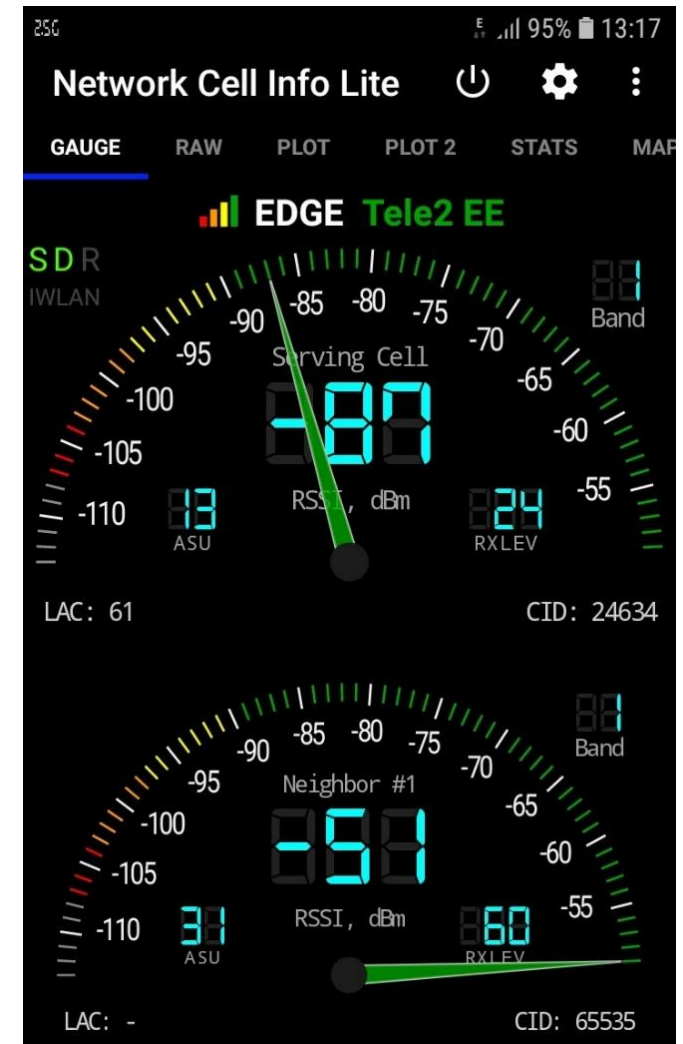
$$U[\text{dBV}] = 20 \cdot \log U[\text{V}]$$



RSSI – Signaalitugevuse indikaator

- RSSI – *Received Signal Strength Indicator*
- Näitab vastuvõetava signaali tugevust.
- Kasutatakse ka suurust ASU (*Arbitrary Strength Unit*)
- GSM mobiilides (2G) on seos järgmine:

$$S = 2 \cdot ASU - 113 [dBm]$$



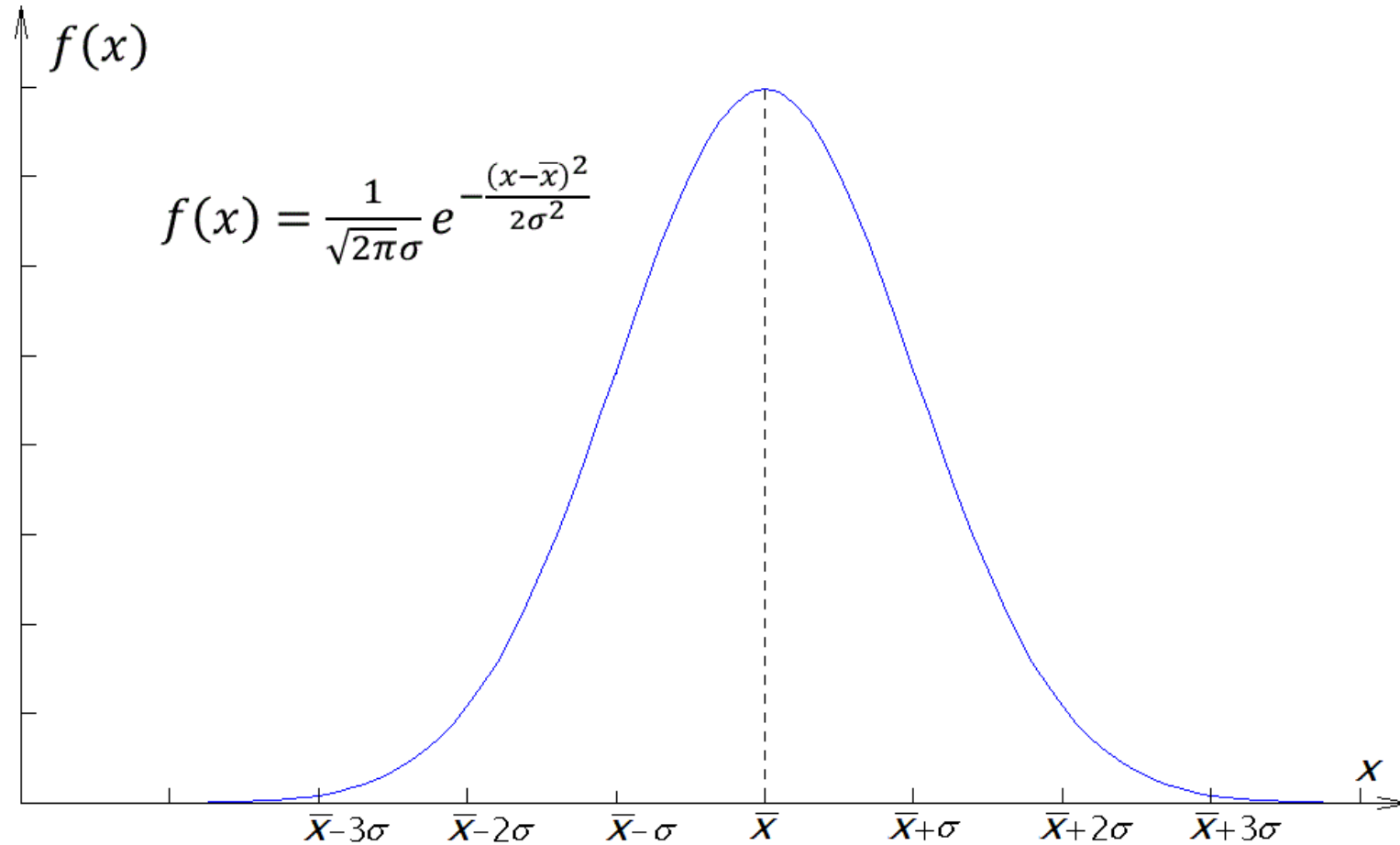
Juhuslik signaal - müra

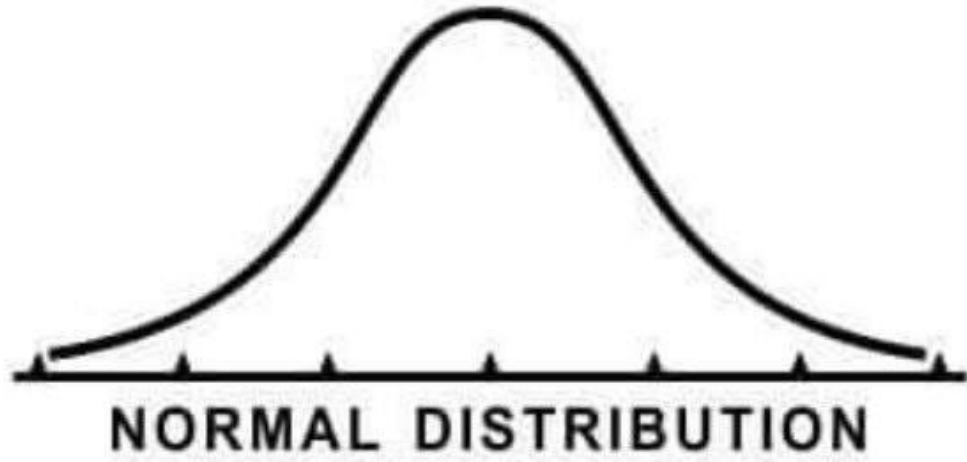
- Populaarseim müra mudel: AWGN (*Additive White Gaussian Noise*)

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

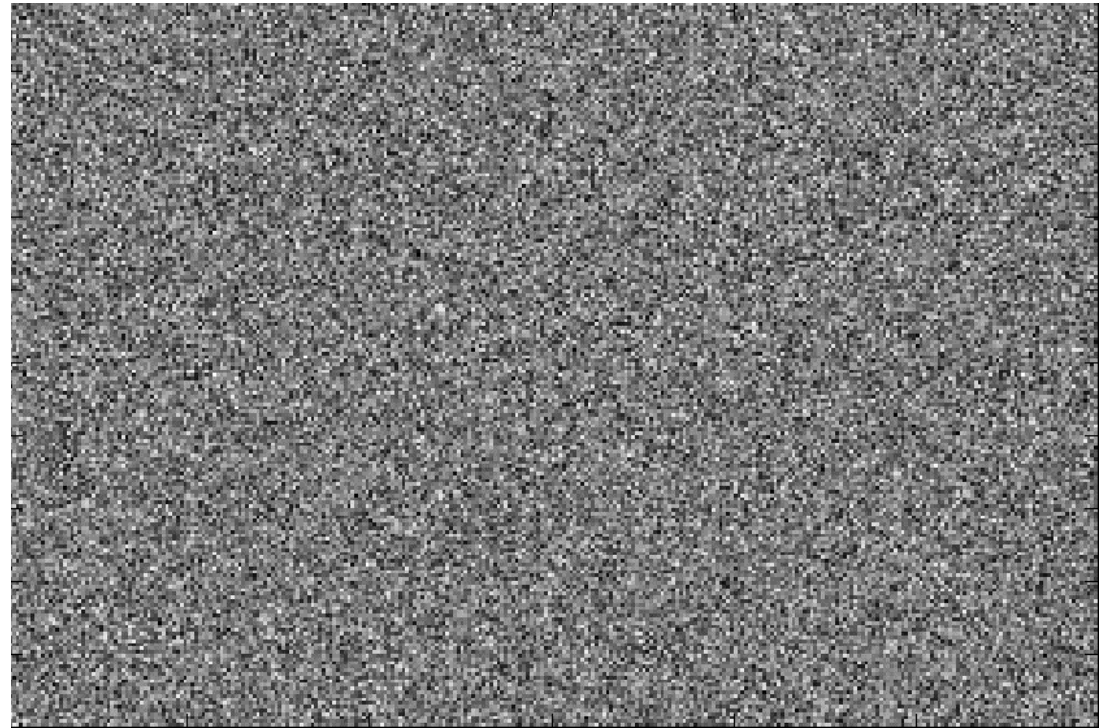
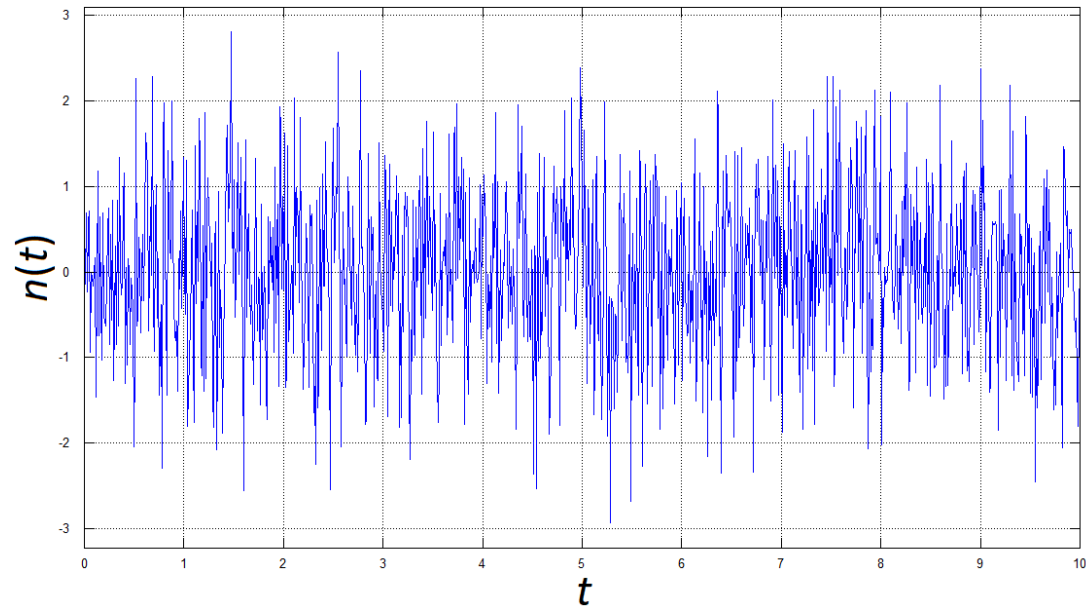
- Gaussi müra võimsus: $N = \sigma^2$
- Signaal- müra suhe: $S[W]/N[W]$
- SNR (*Signal to Noise Ratio*)
 - Logaritmilistes ühikutes: $SNR[\text{dB}] = S[\text{dBm}] - N[\text{dBm}]$

Gaussi müra jaotustihedus





Gaussi müra

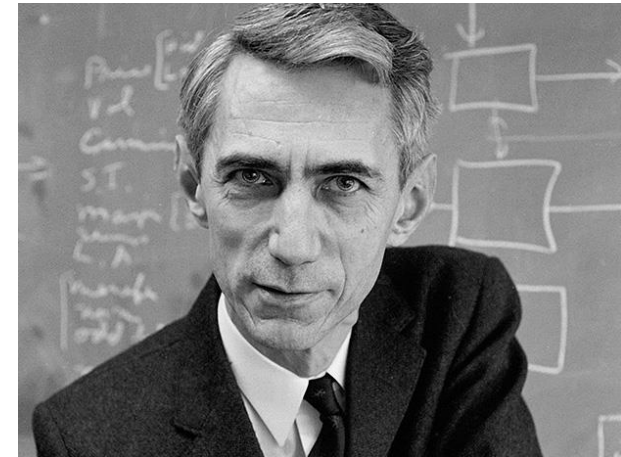


Shannoni valem

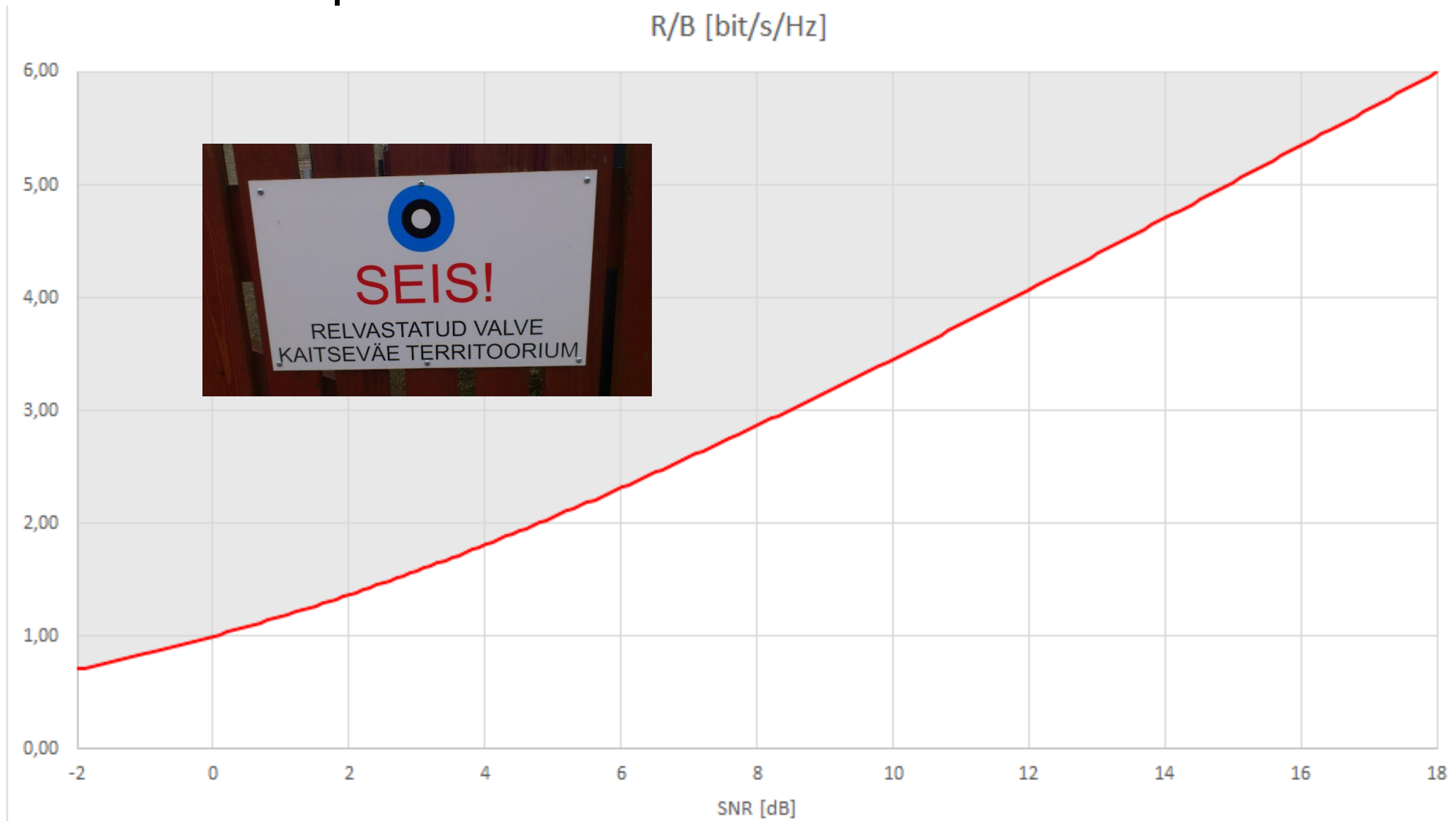
- Shannon-Hartley teoreem
- Sidekanali maksimaalne teoreetiline läbilaskevõime C :

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

- B – kanali ribalaius [Hz]
- S – Vastuvõetava signaali võimsus [W]
- N – Müra keskmine võimsus [W]
- $\rho = C/B$ – spektraalefektiivsus [bitt/s/Hz]



Shannoni piir



Hartley seadus

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

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

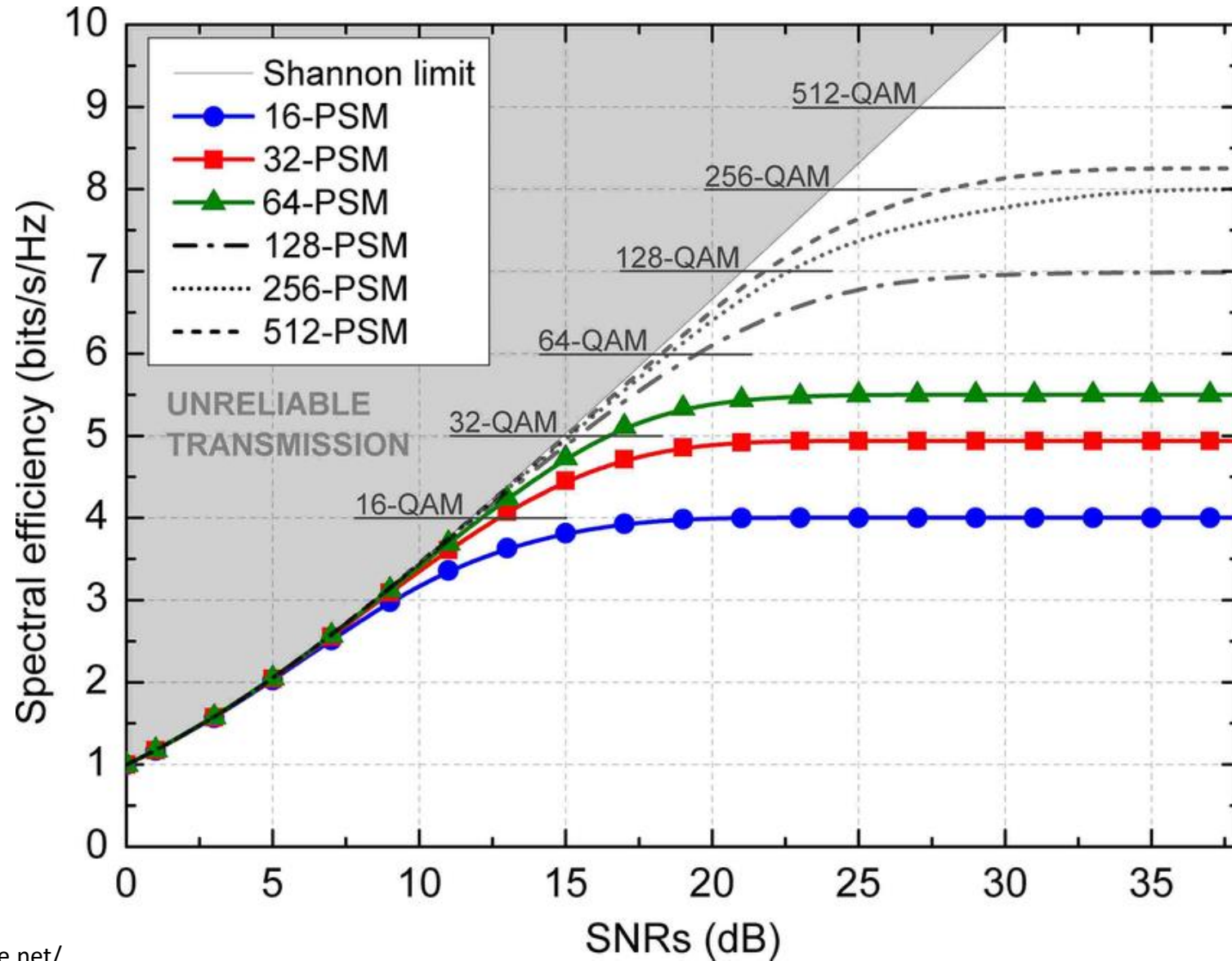
- Võttes arvesse ka Shannon – Hartley seadust saame kas..
- Maksimaalse sümbolite arvu kanalis etteantud signaal-müra suhte korral:

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

- Vajaliku signaal-müra suhte M erineva sümboli edastamiseks:

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

Spektraalefektivsus



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/>,
20.03.2019

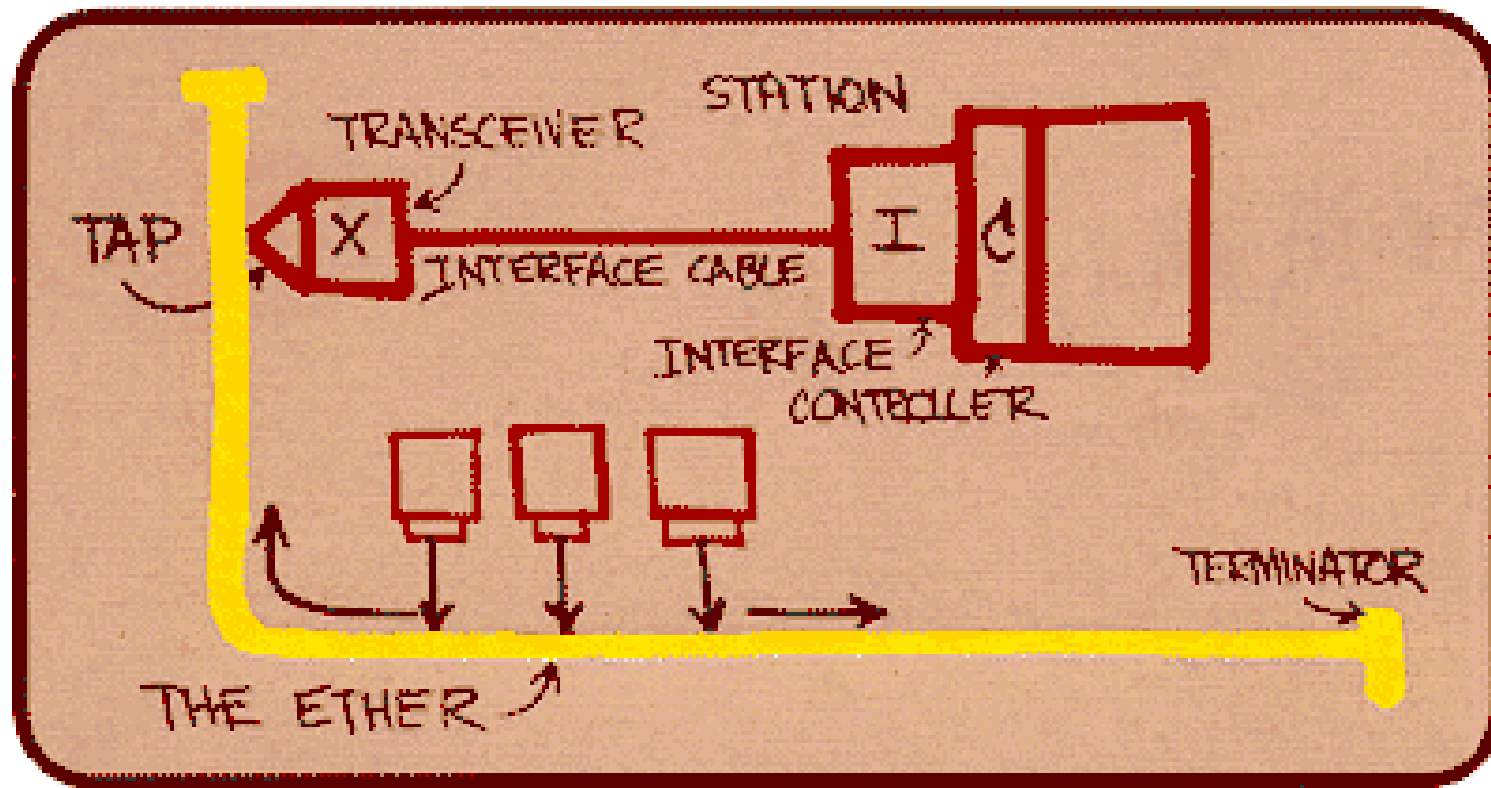
13. Sidekanal

Arvutivõrgud IEE1100

Ivo Mürsepp

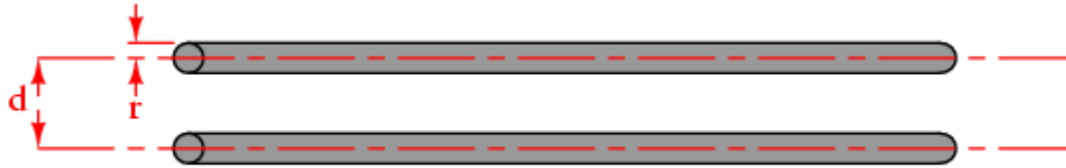
10BASE5

- Robert M. Metcalfe



Vaskkaabel

- Keerdpaar



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

- Koaksiaalkaabel



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

Vaskkaabli parameetrid

- Karakteristlik impedants Z_0
 - Terminaator
- Kiirustegur VF (*Velocity Factor*)

$$v = VF \cdot c$$

- Sumbumus

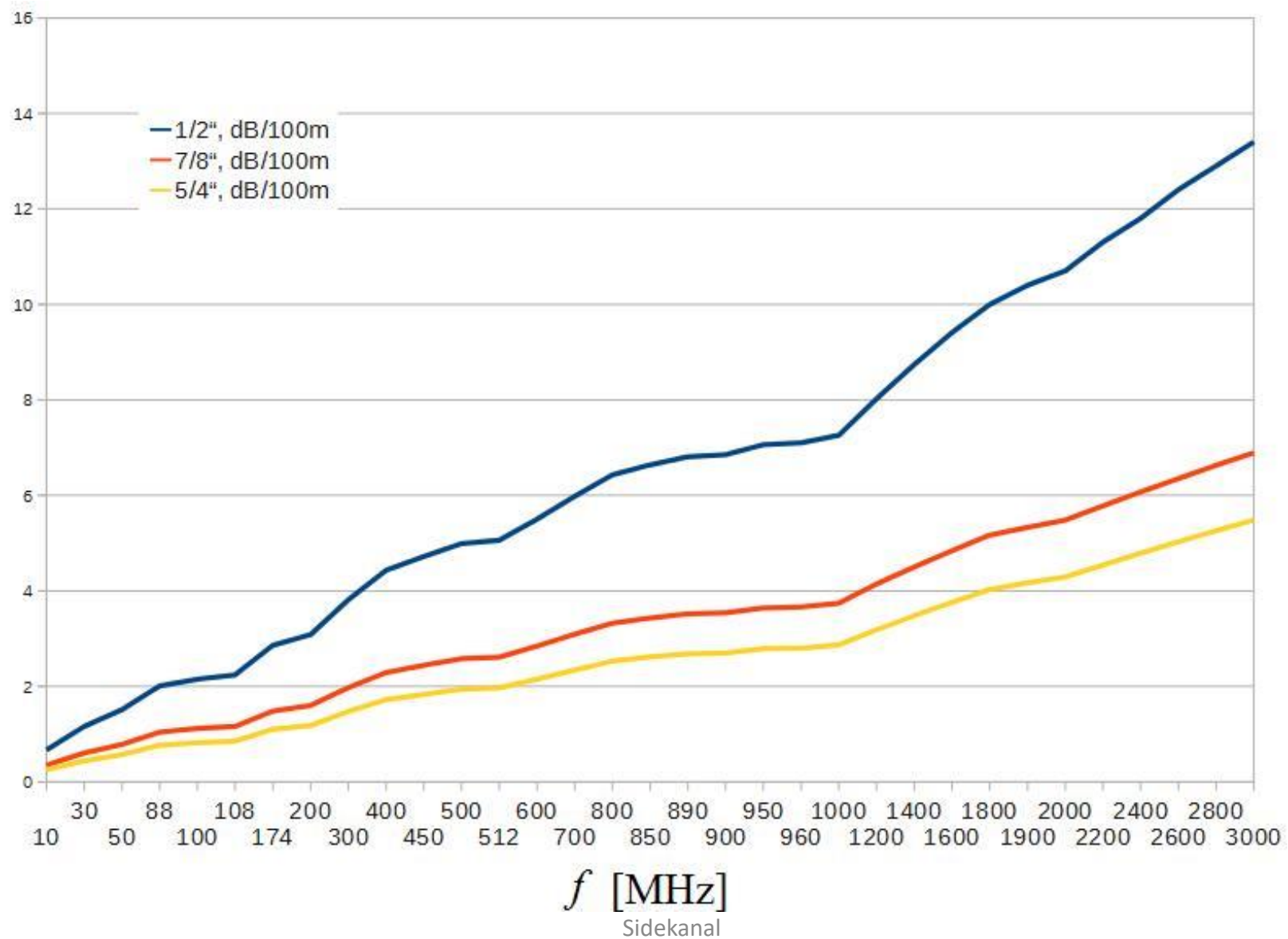
$$K = 10 \cdot \log \frac{P_v}{P_s}$$

- Sõltub sagedusest
 - Antakse üldjuhul pikkusühiku kohta [dB/m]
- Läbikoste (*Crosstalk*)

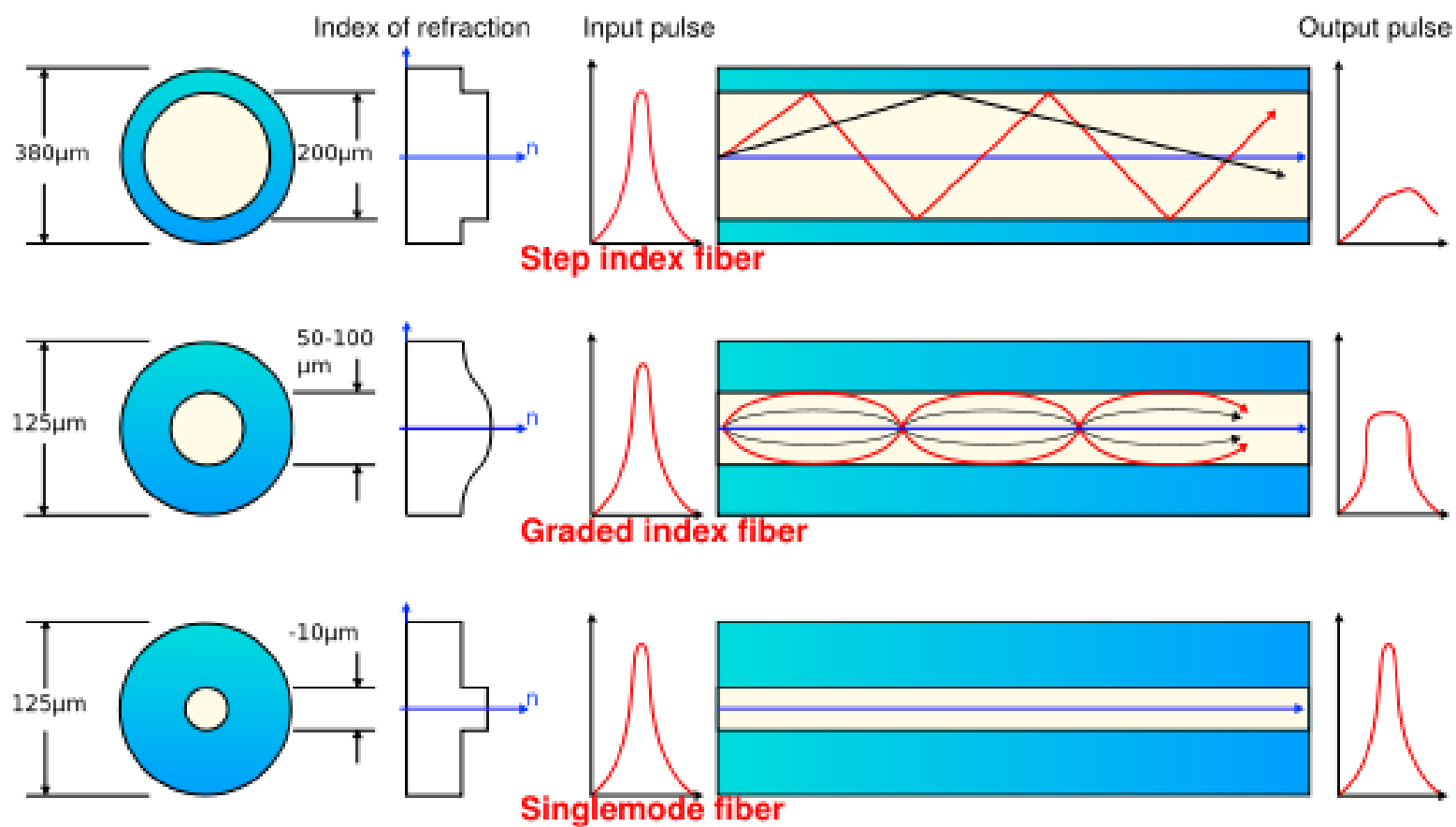
$$NEXT = -20 \log \frac{U_n}{U_s}$$



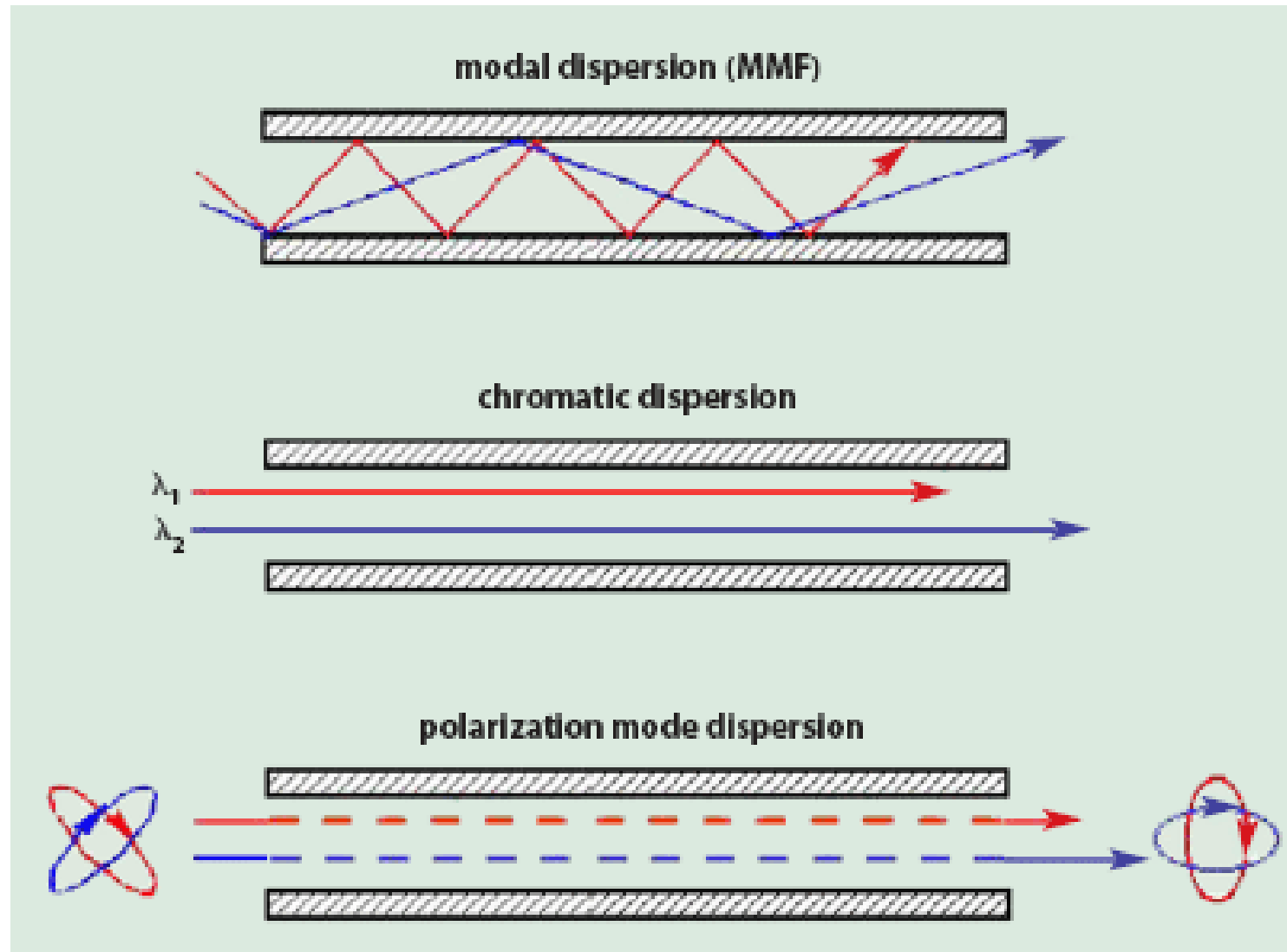
Kaabli Sumbumus



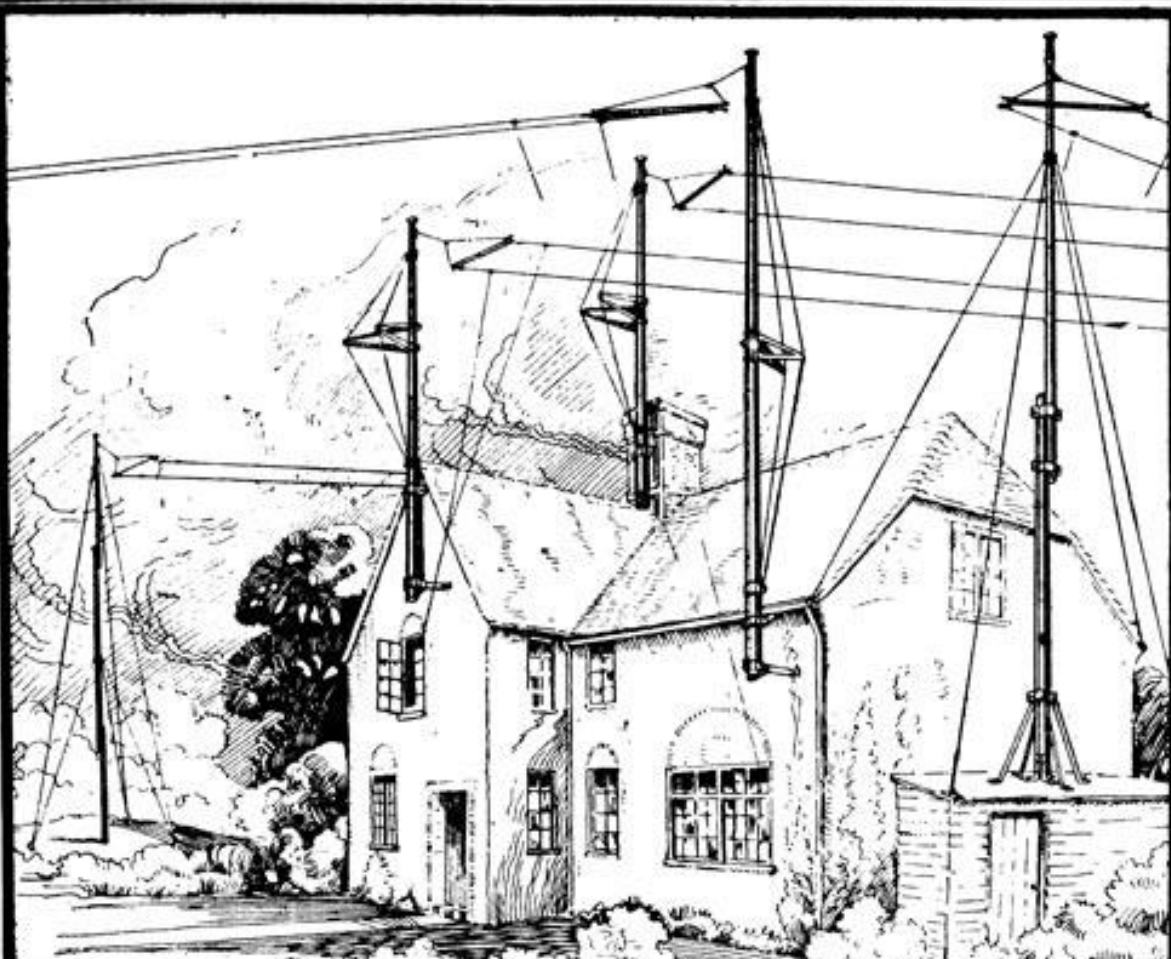
Fiiberoptiline kaabel



Dispersioon optilistes kaablites



Raadiokanal



The illustration shows a two-story house with a gabled roof. Several tall, vertical masts are mounted on the roof, with horizontal cross-arms and various wires extending from them. The masts are supported by ropes and pulleys. The house has several windows, some with shutters, and a door on the ground floor. The scene is rendered in a detailed, etched style.

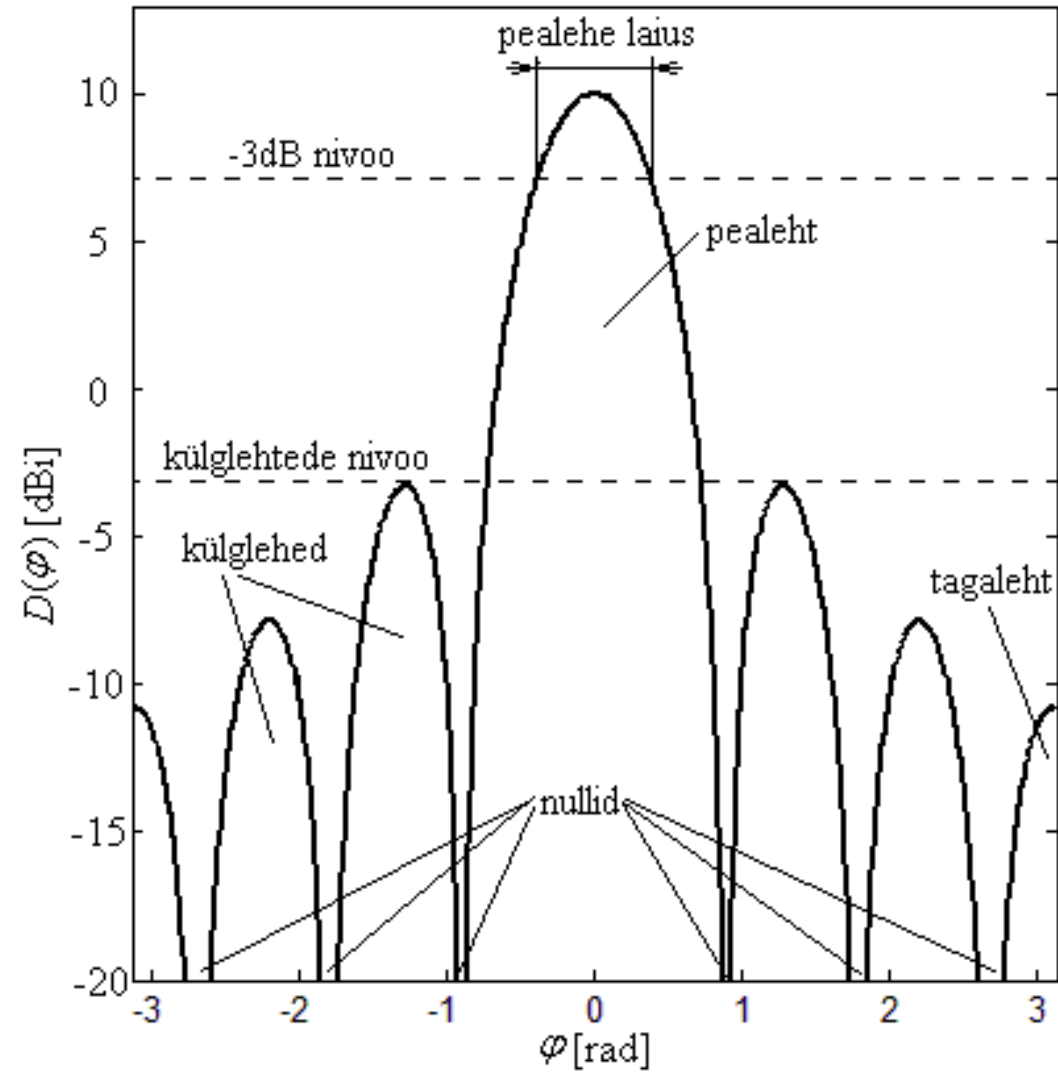
TURRET-ROOF MASTS FOR WIRELESS

Regd. and patent applied for. | **SIMPSON & BLYTHE,** | Send for list to S. & B. or agents.
STANLEY HOUSE, 8 & 9, Sherwood St., PICCADILLY

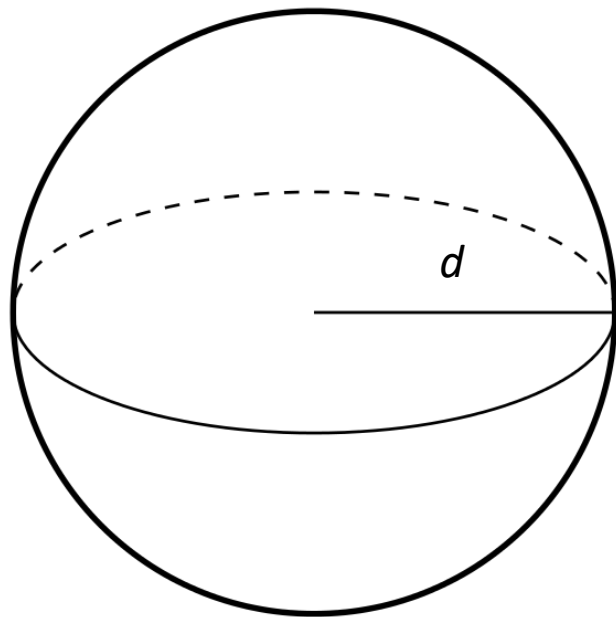
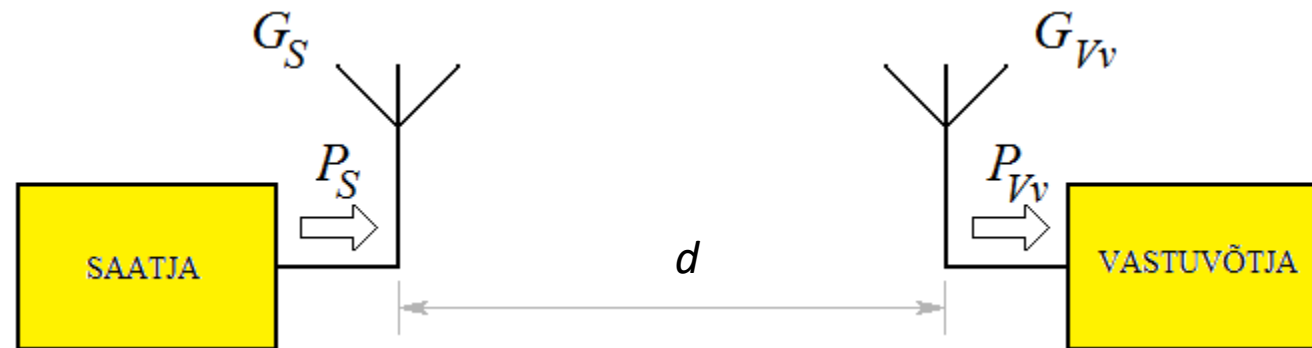
Antenn

- Antenn on seade mis muundab elektrivoolu energia 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 $f_{min} \cdot f_{max}$ (ribalaius B)
 - Suunadiagramm $D(\theta, \varphi)$
 - ...

Antenni suunadiagramm



Friis'i valem



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

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

Lingi bilanss

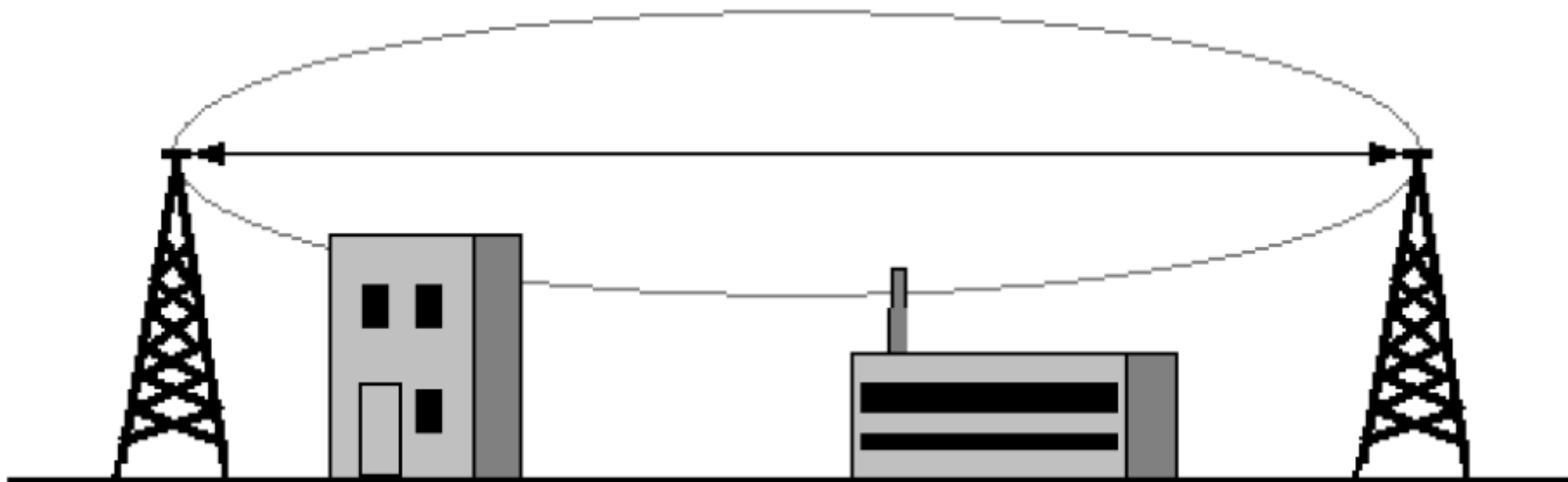
- Friisi valemi esitus logaritmilisel kujul:
 - Saatja võimsus P_S [dBm]
 - Võimsus vastuvõtja sisendis P_{VV} [dBm]
 - Mõnikord kasutatakse võimsuse mõõtühikuna ka dBW
 - Saate G_S - ja vastuvõtuantenni G_{VV} võimendused [dBi]
 - Vaba ruumi kadu FSL [dB]

$$FSL = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

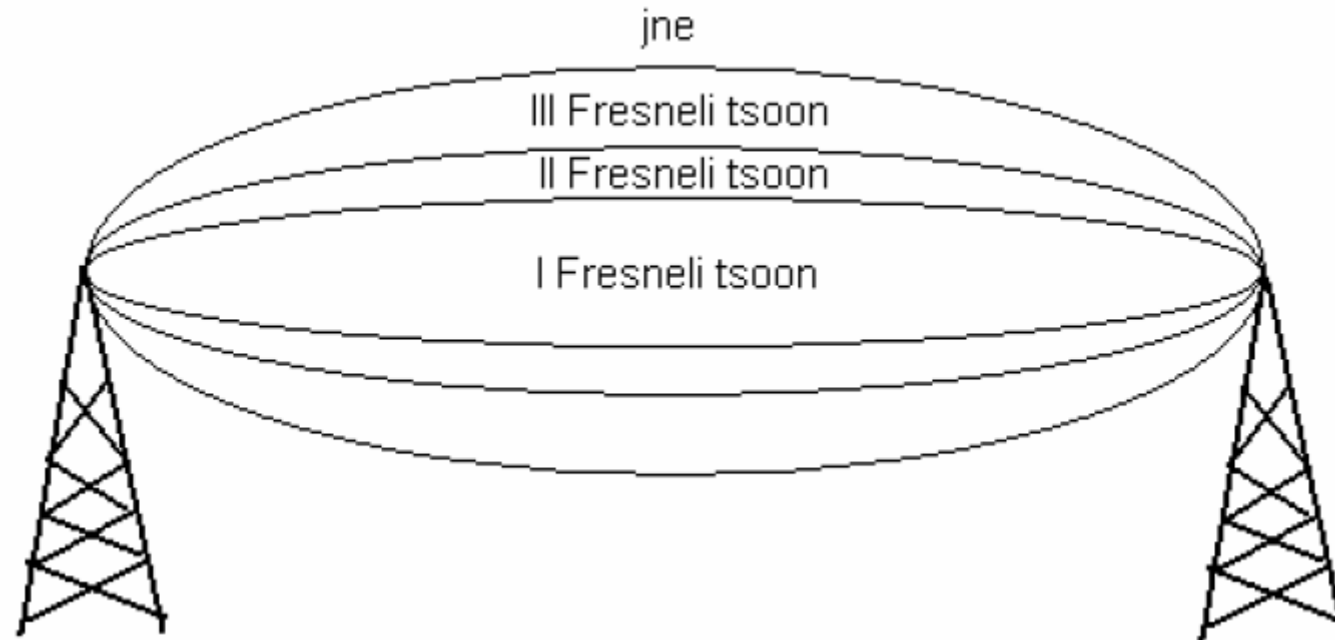
- Muud kaod L [dB]

$$P_{VV} = P_S + G_S + G_{VV} - FLS - L$$

Fresneli tsoon

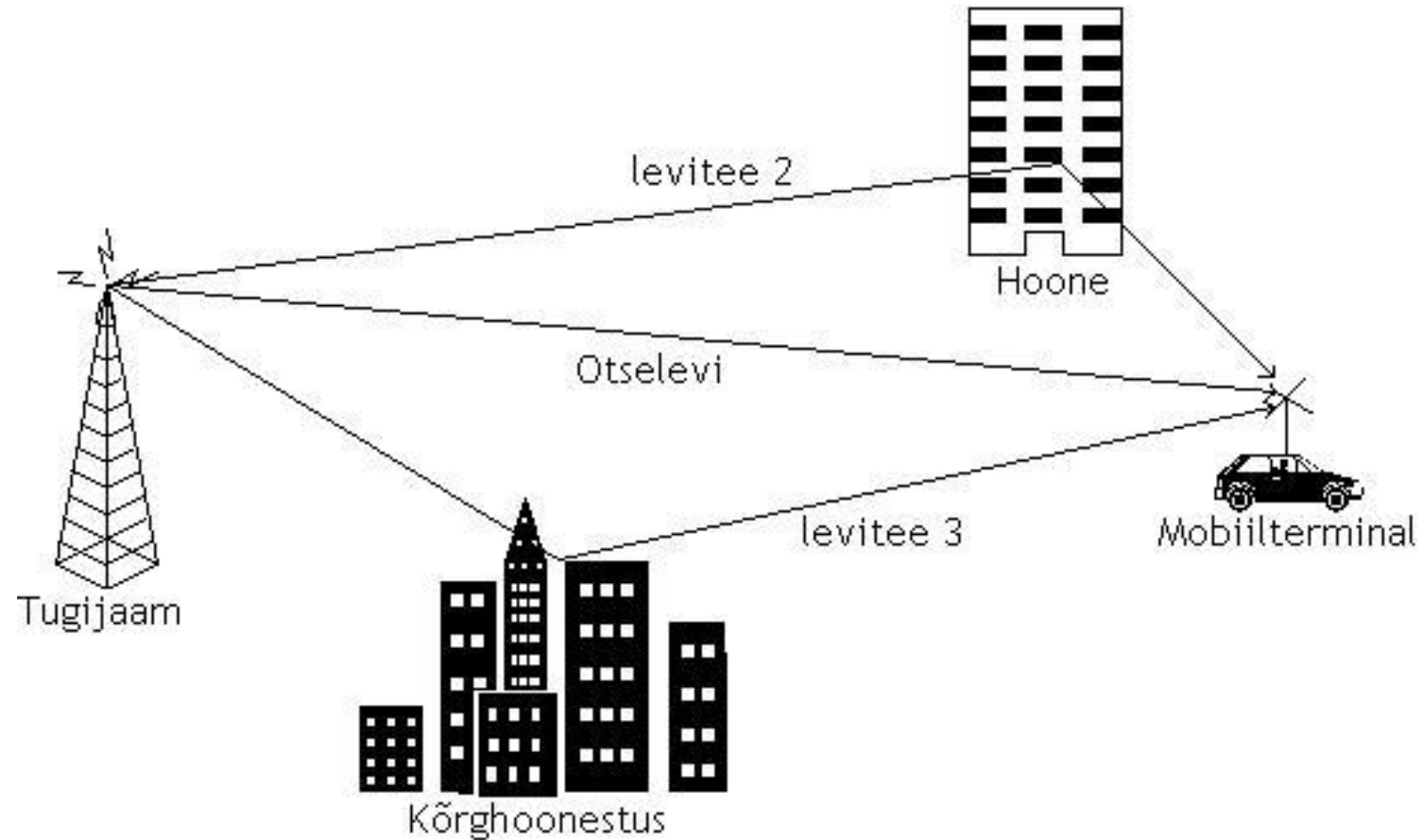


Fresneli tsoonid

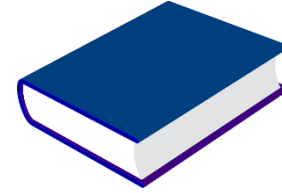


$$d_1 = \sqrt{\lambda \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}}$$

Mitmekiireline levi



Lisaks lugeda



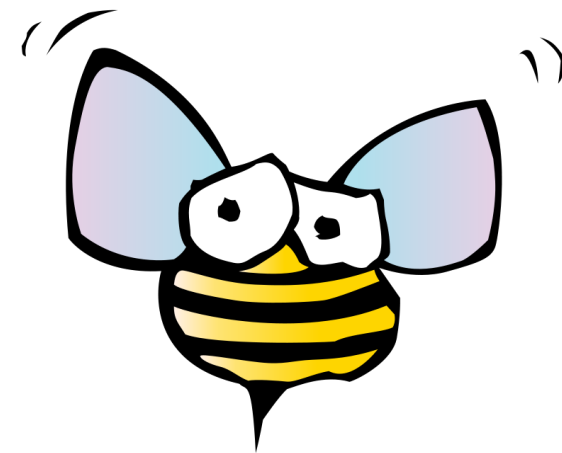
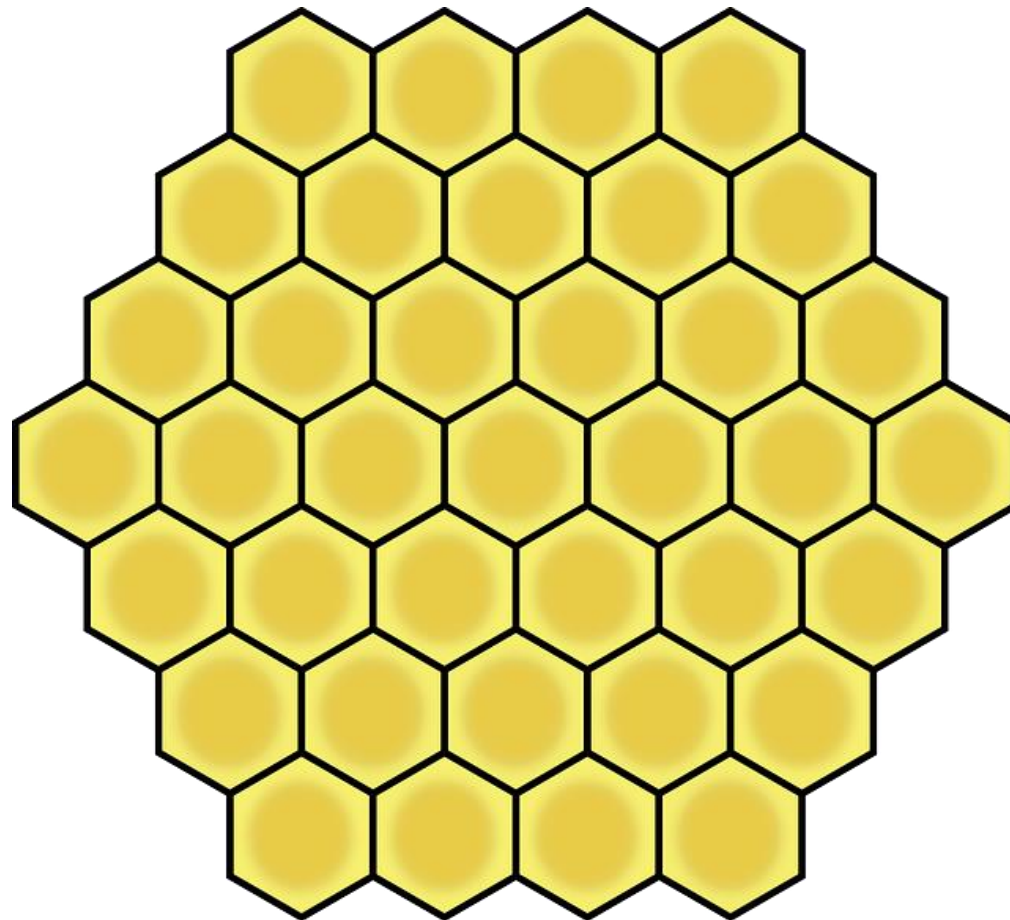
- E. Laaneoks. **Sissejuhatus võrgutehnoloogiasse**. Tartu Ülikool 2010. peatükk 5 – **OSI füüsiline kiht**.
- **Practical Telecommunications and Wireless Communications for Business Industry**. Elsevier Ltd, 2004. Peatükk 3 - **Transmission media**.
- *William Stallings*. **Data and Computer Communications** 8th edition. 4.2 Wireless Transmission. lk 117 – 133.

16. Kärgvõrgud ja mobiilside

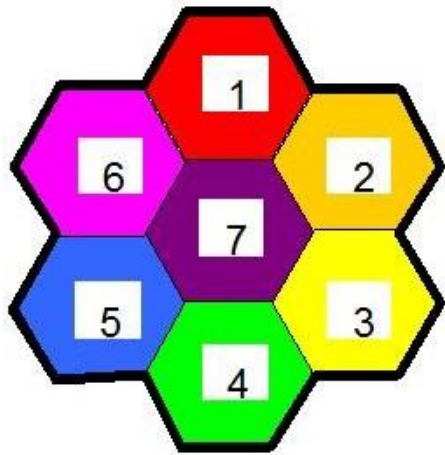
Arvutivõrgud IEE1100

Ivo Mürsepp

Kärgvõrgud



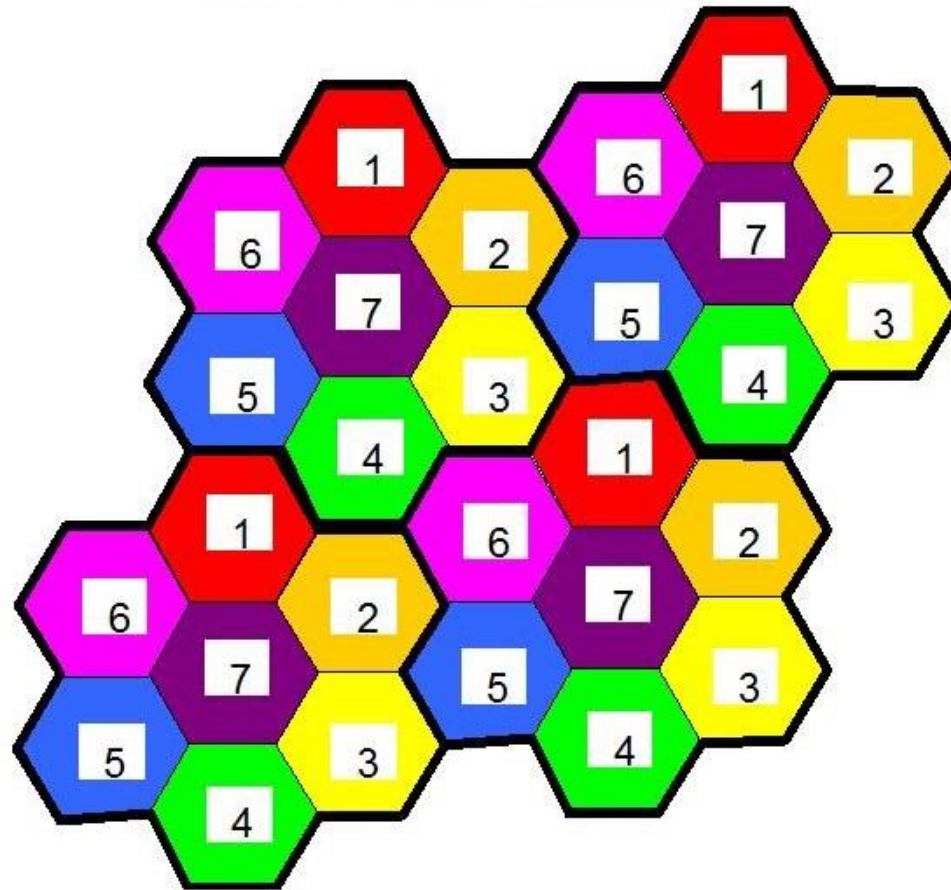
Sageduste taaskasutus



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

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

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

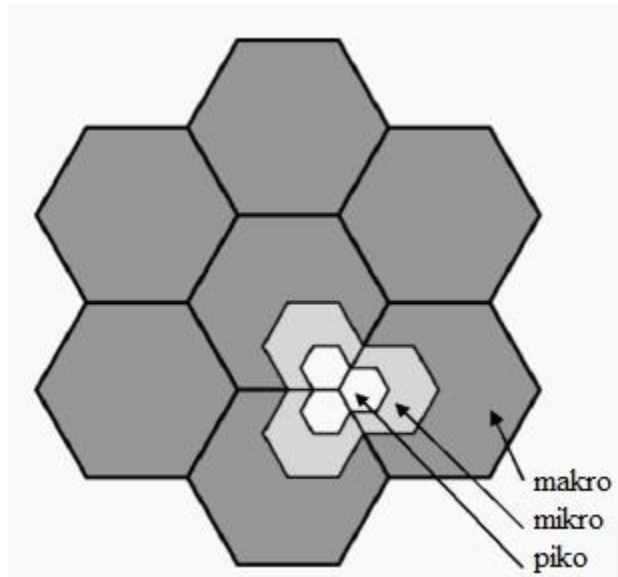


Tugijaam

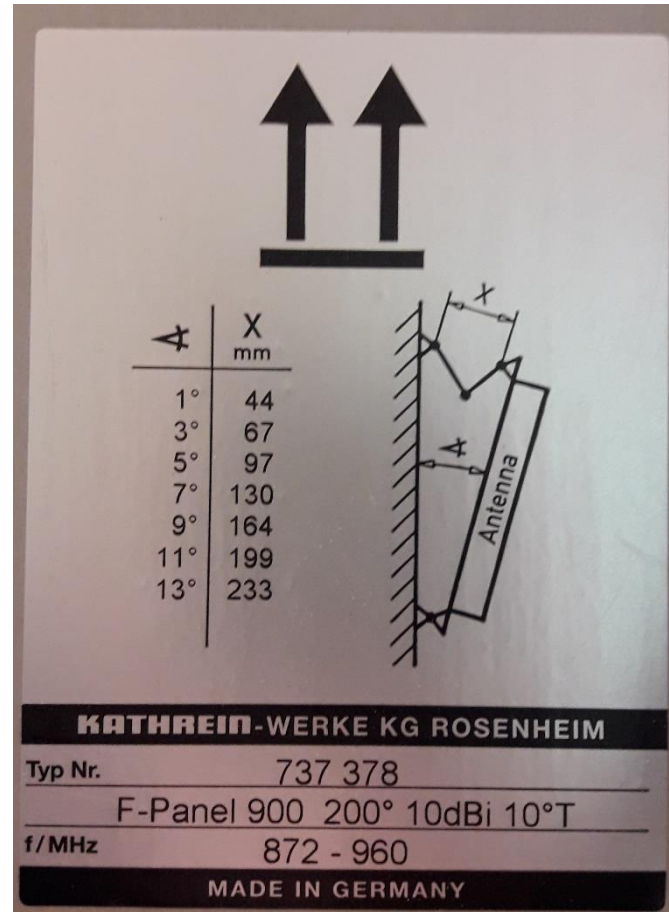


Kärgvõrgud ja mobiilside

Kärgede jaotamine



Antenni allakallutus



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

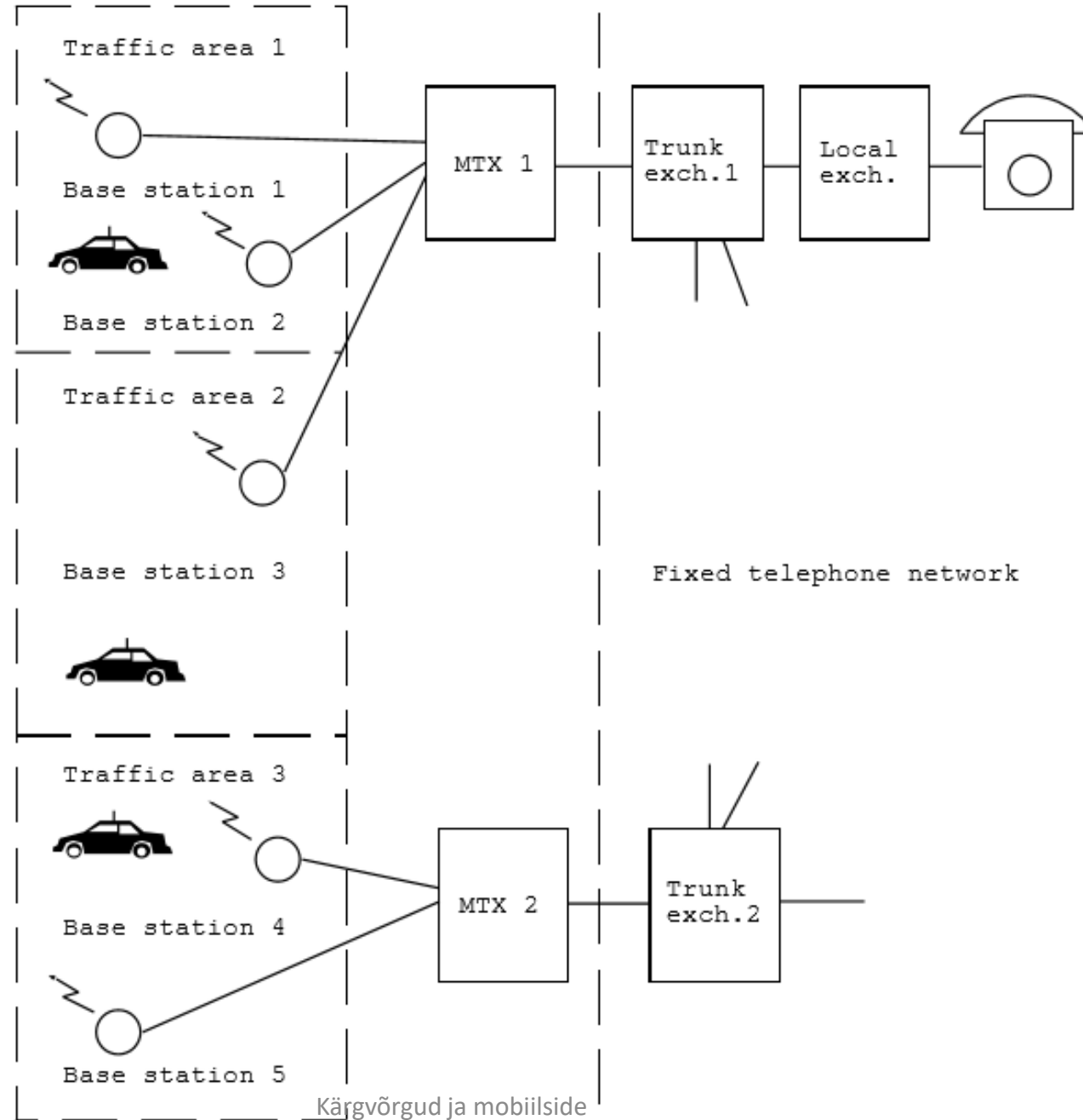


NMT

- 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 Mobidigi – 380 bit/s
 - Vajalik eraldi väline riistvara



NMT võrk



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.

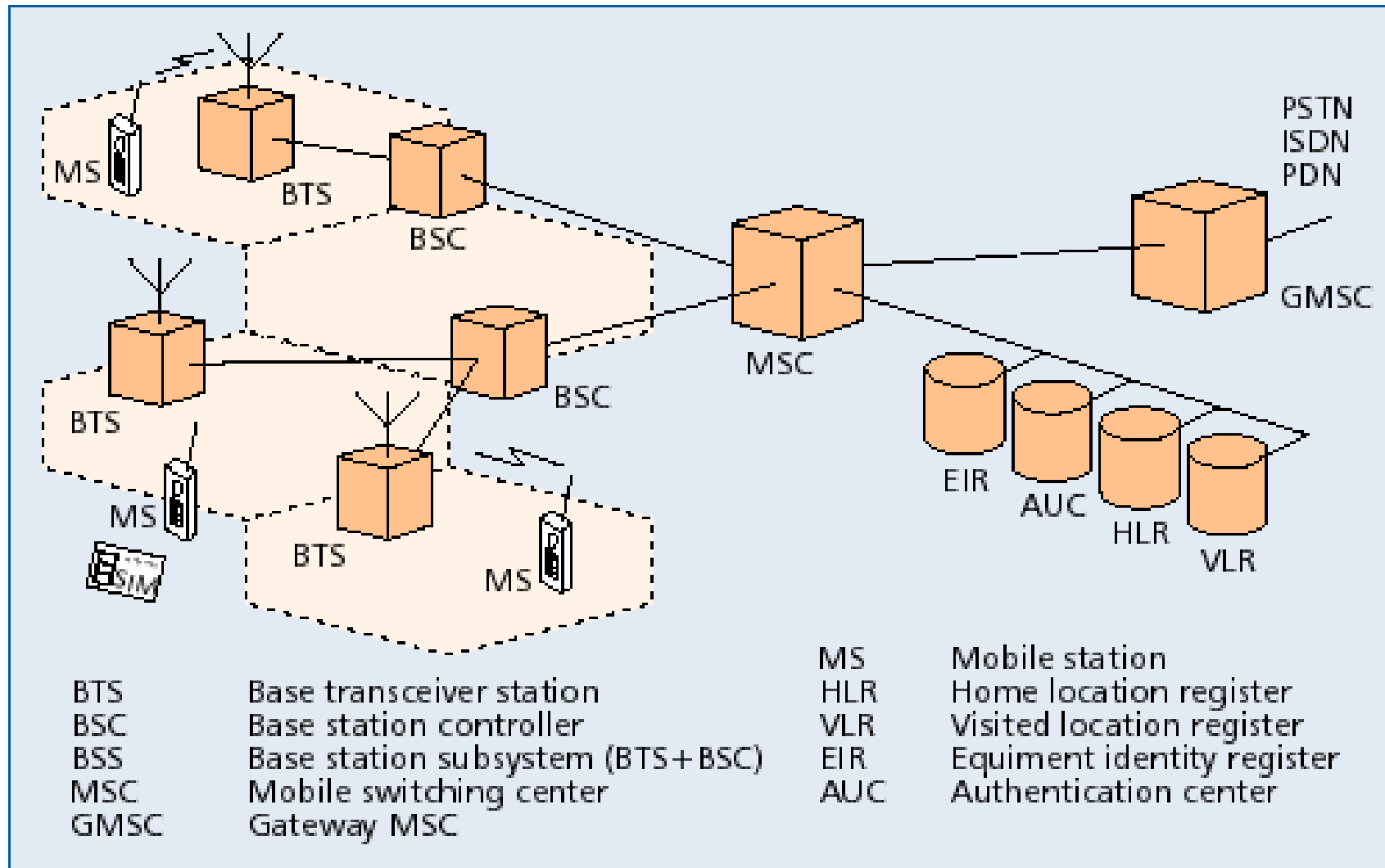


GSM

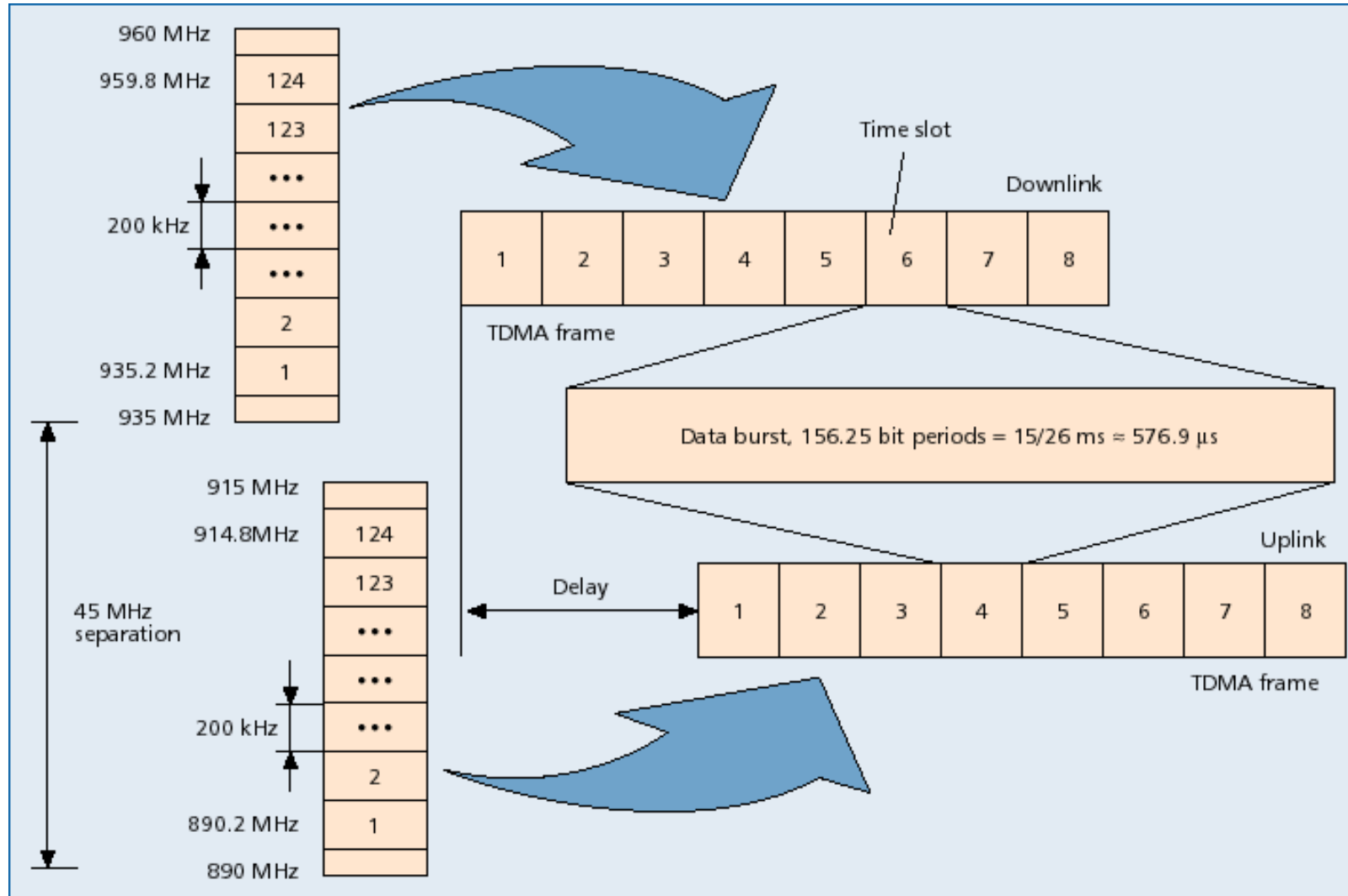
- Modulatsioon: GMSK
- Bitikiirus 270,833 kbit/s
- Kaheksa ajapilu, kestusega 0,577 ms
 - kokku 4,615 ms
- Raadiokanal krüpteeritud A5/1



GSM võrk

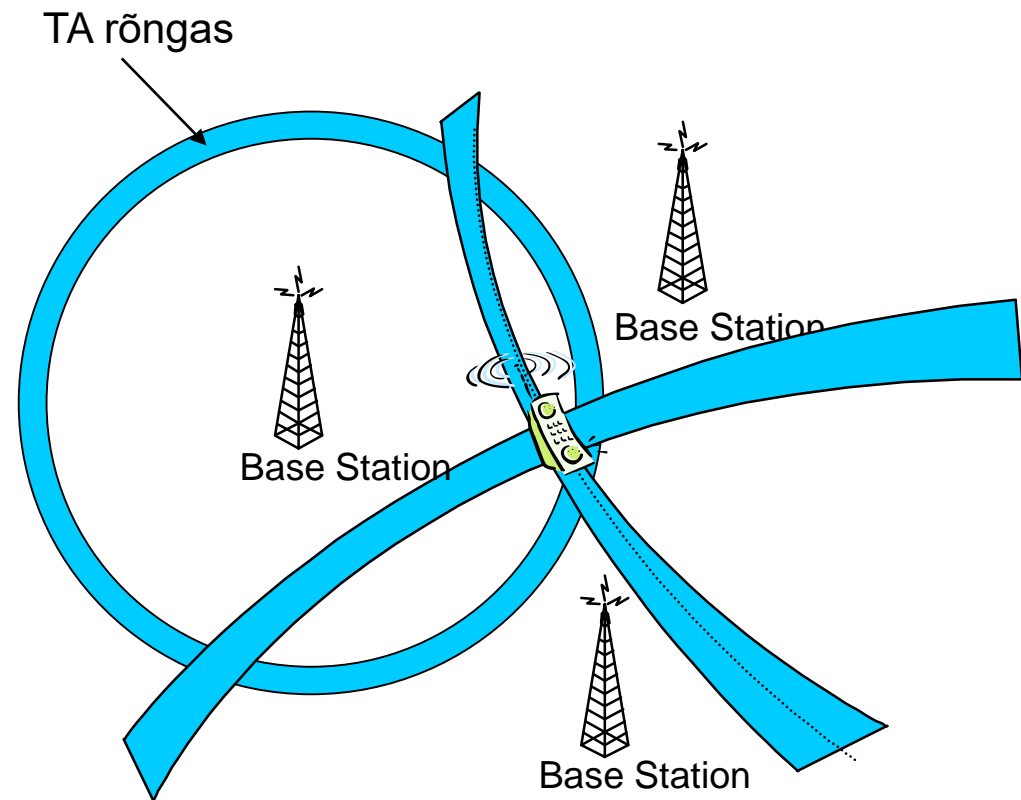
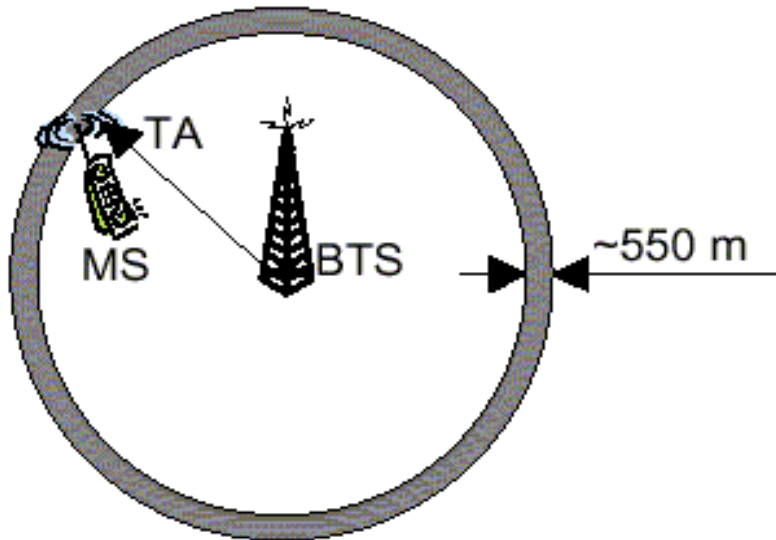


GSM ressursijaotus



GSM mobiilpositsioneerimine

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

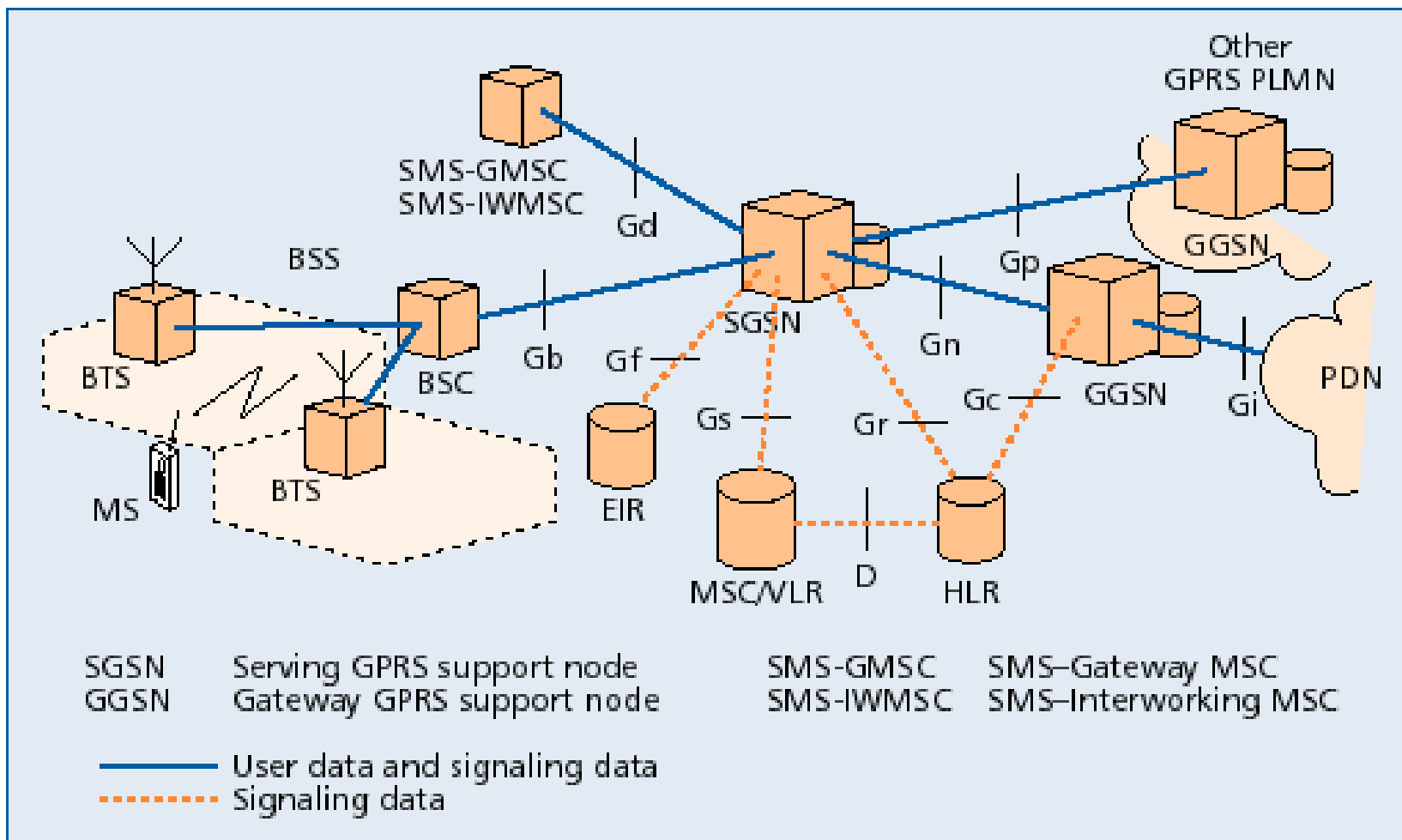


2,5G - GPRS

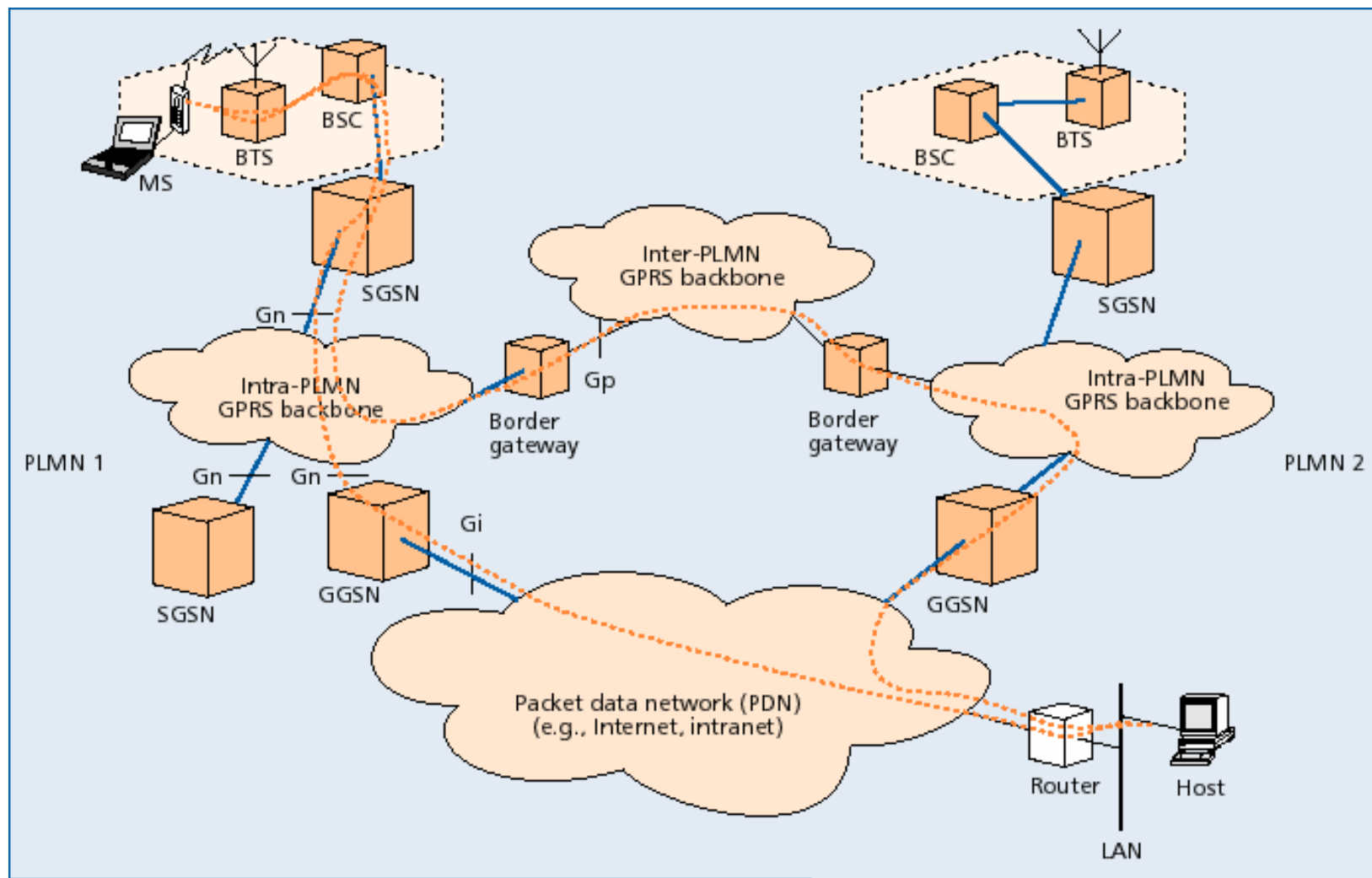
- *General Packet Radio Service*
- Pakettside
- Maksimaalne teoreetiline andmeedastuskiirus kuni 170 kbit/s
- Praktikas 56-114kbit/s
- Kasutatakse mitut ajapilu (teor. Max 7)
- Kasutatakse erinevaid veaparandusmooduseid (4 taset)

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



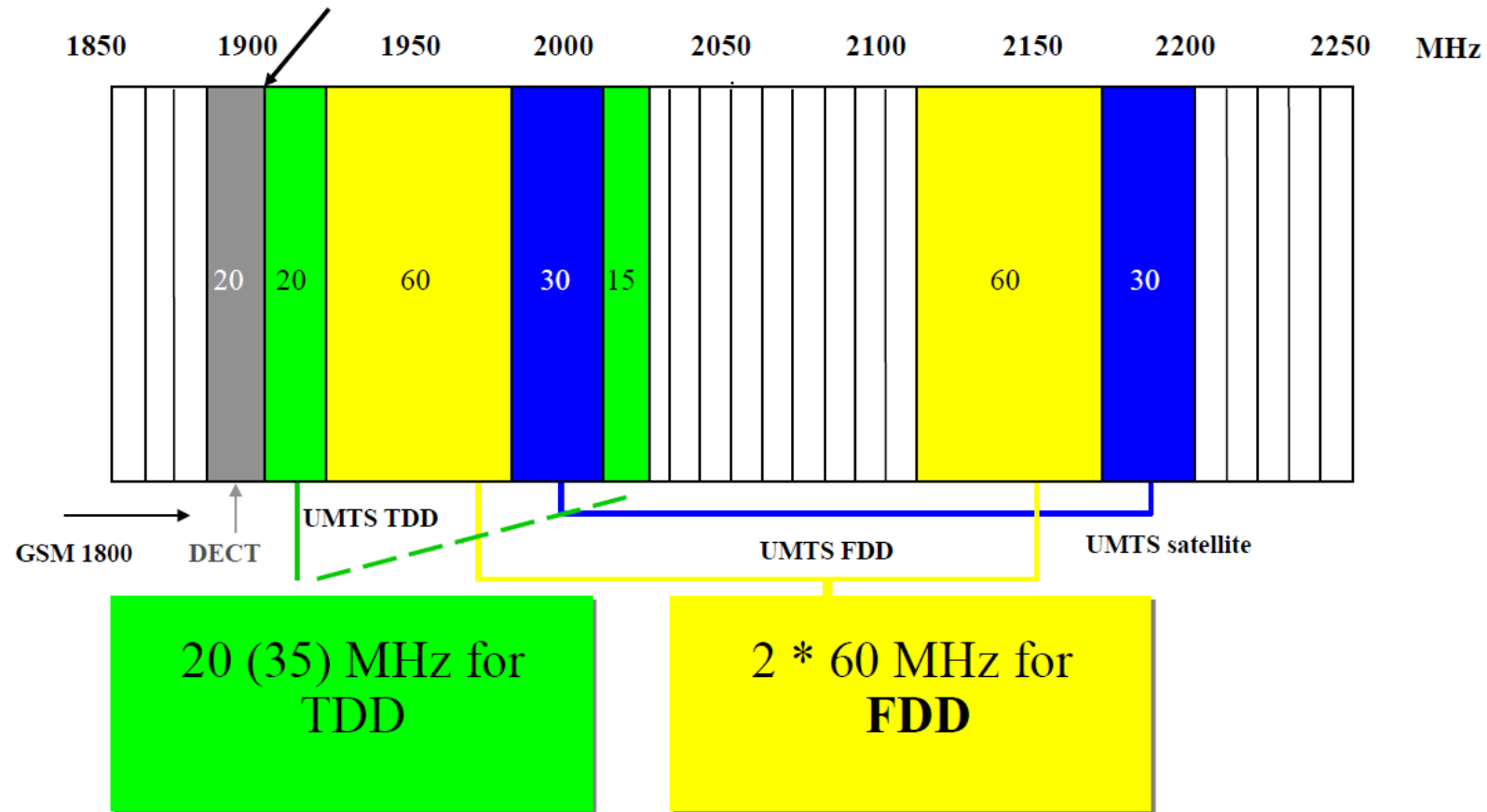
- *Enhanced Data rates for GSM Evolution*
 - *(Enhanced GPRS)*
- Muudatused ainult raadiovõrgus
 - Kaasaarvatud terminalis
- Kuni 473,6kbit/s
- 8-PSK modulatsioon

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

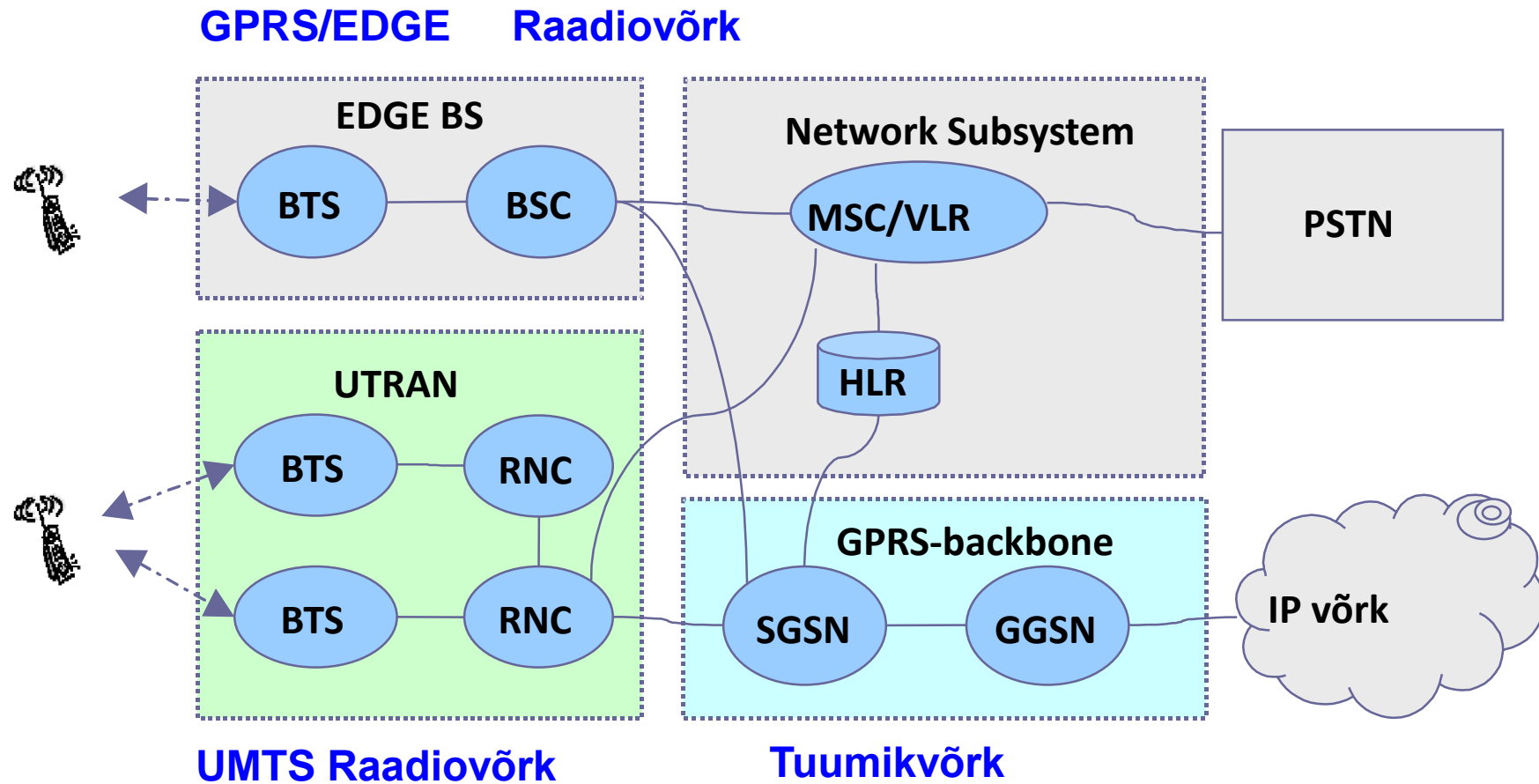
3G UMTS

- *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

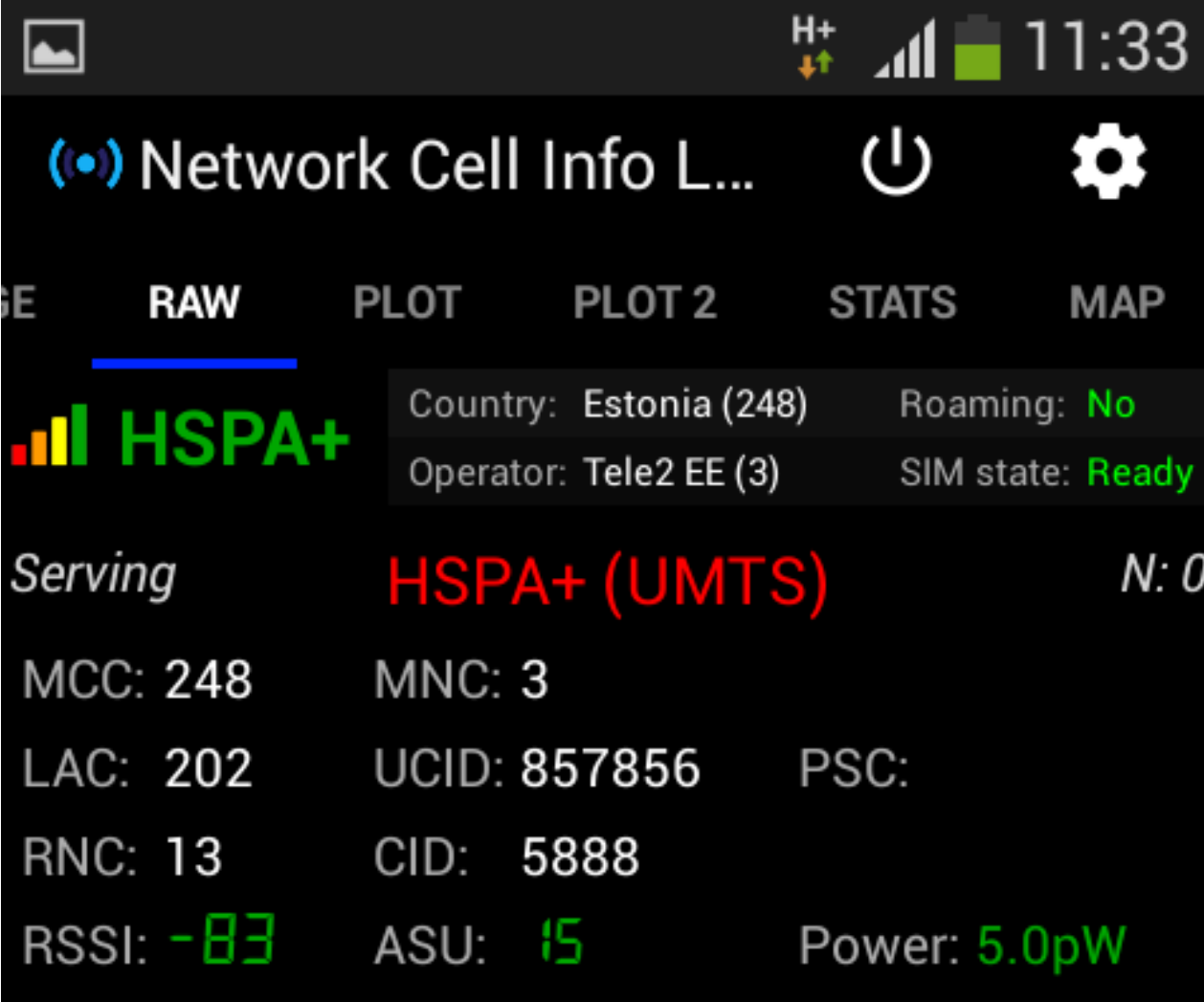
4

3,84

3G HSPA

- *High Speed Packet Access*
- Tehnoloogia andmeedastuskiiruse tõstmiseks 3G võrgus.
 - Kõrgemat järku 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



The screenshot shows the 'Network Cell Info L...' screen on an Android device. The status bar at the top displays 'H+', signal strength, battery level, and the time '11:33'. The screen title is '(📶) Network Cell Info L...'. Below the title are icons for power and settings. A menu bar contains 'RAW', 'PLOT', 'PLOT 2', 'STATS', and 'MAP', with 'RAW' selected. The network type is 'HSPA+' with a signal strength indicator. A tooltip shows 'Country: Estonia (248)', 'Roaming: No', 'Operator: Tele2 EE (3)', and 'SIM state: Ready'. The serving network is 'HSPA+ (UMTS) N: 0'. The following parameters are listed: MCC: 248, MNC: 3, LAC: 202, UCID: 857856, PSC:, RNC: 13, CID: 5888, RSSI: -83, ASU: 15, and Power: 5.0pW.

Country: Estonia (248) Roaming: No
Operator: Tele2 EE (3) SIM state: Ready

Serving **HSPA+ (UMTS)** N: 0

MCC: 248 MNC: 3
LAC: 202 UCID: 857856 PSC:
RNC: 13 CID: 5888
RSSI: -83 ASU: 15 Power: 5.0pW

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
- ...

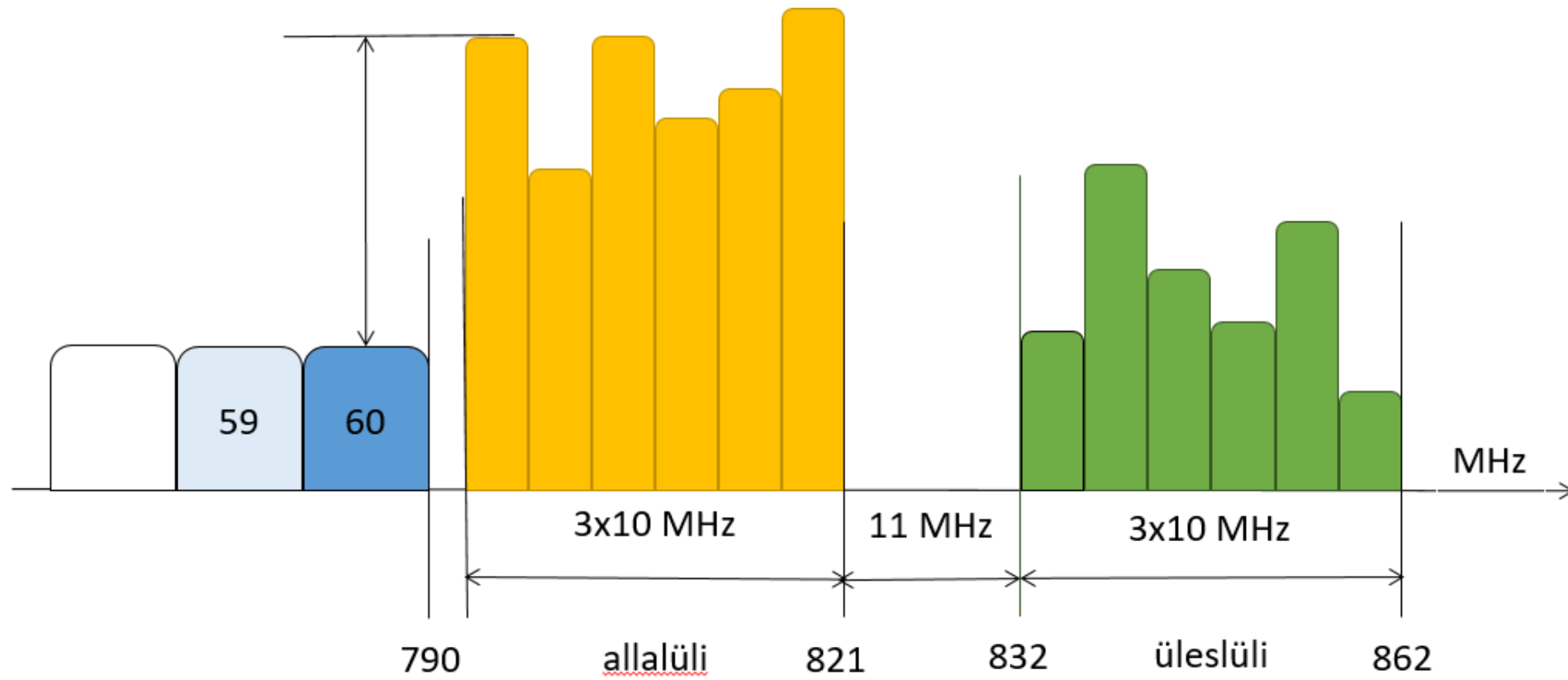


LTE ehk „4G“

- 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

- IMT-2020 standard
- 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 – **Cellular Wireless Networks.**



15. Traadita kohtvõrk ja hajaspektriside

Arvutivõrgud IEE1100

Ivo Mürsepp



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 füüsilist kihti 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)



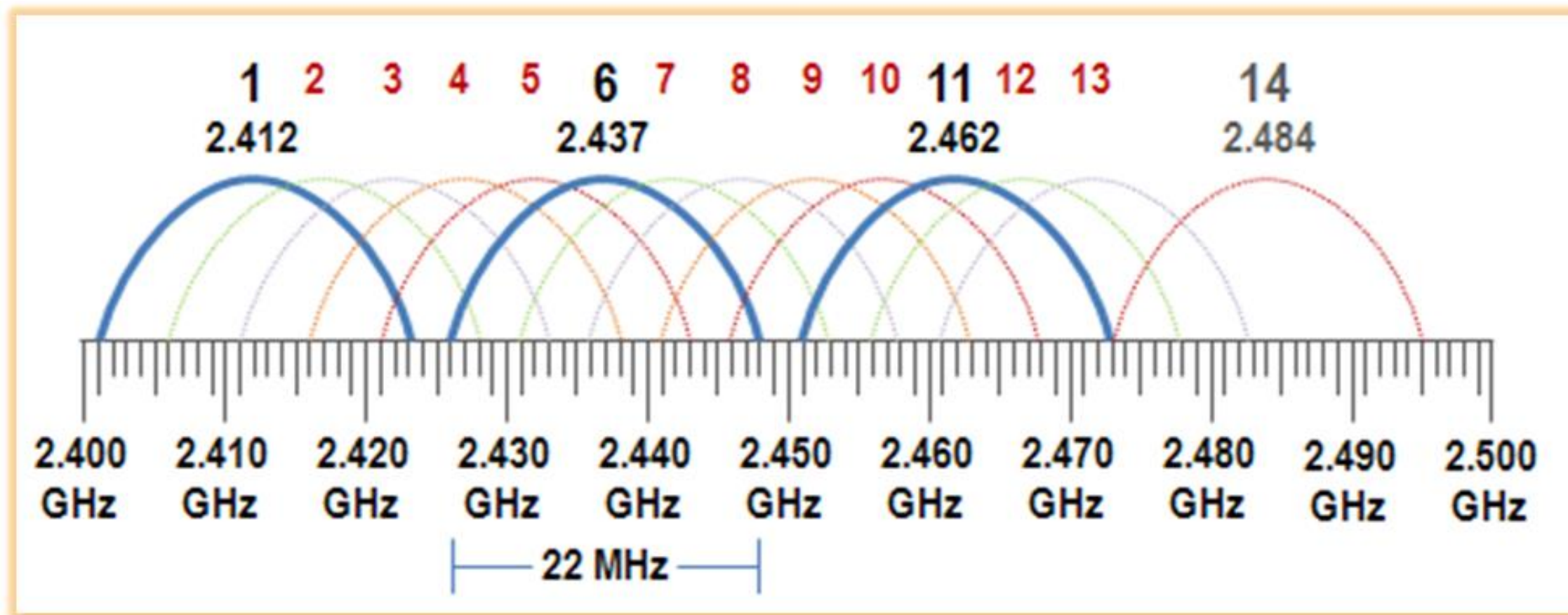
Sagedused ja võimsused

- 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 kanali jaotus



Sumbumus

- Vaba ruumi kadu

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

- Logaritmilistes ühikutes

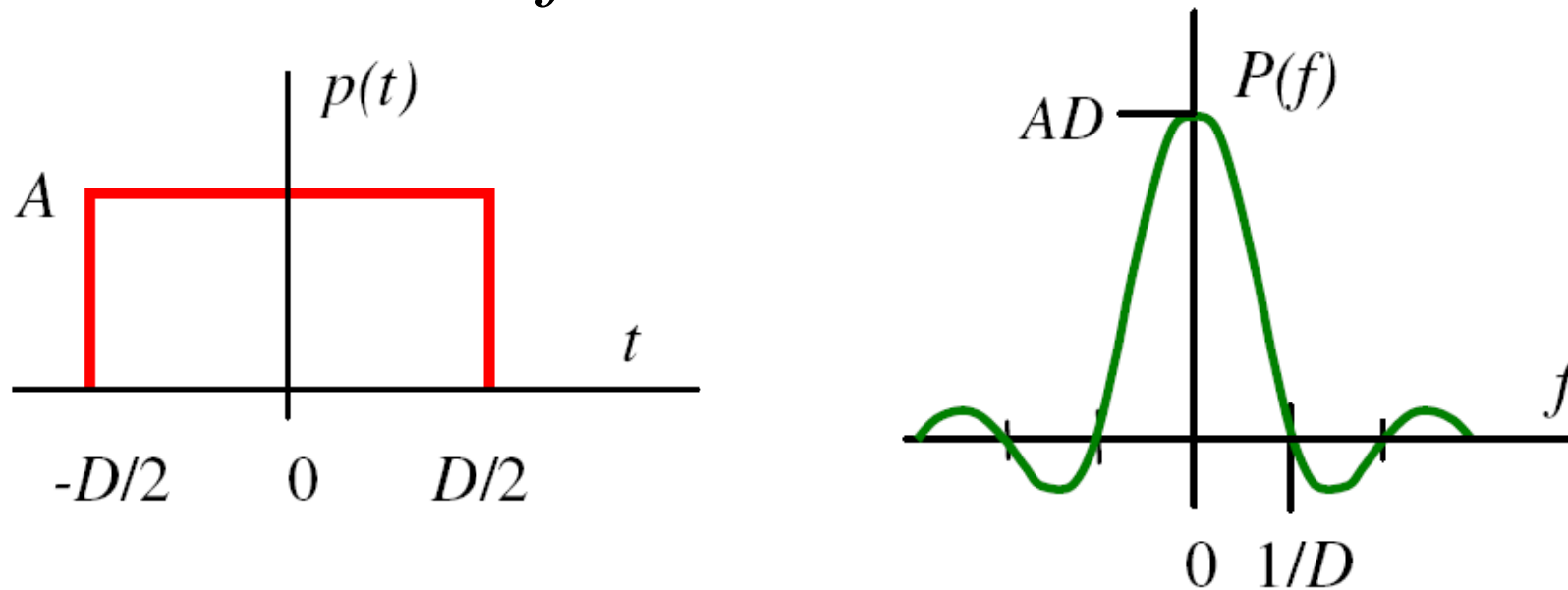
$$FSL = 20\log(d) + 20\log(f) - 147,55 [dB]$$

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:

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



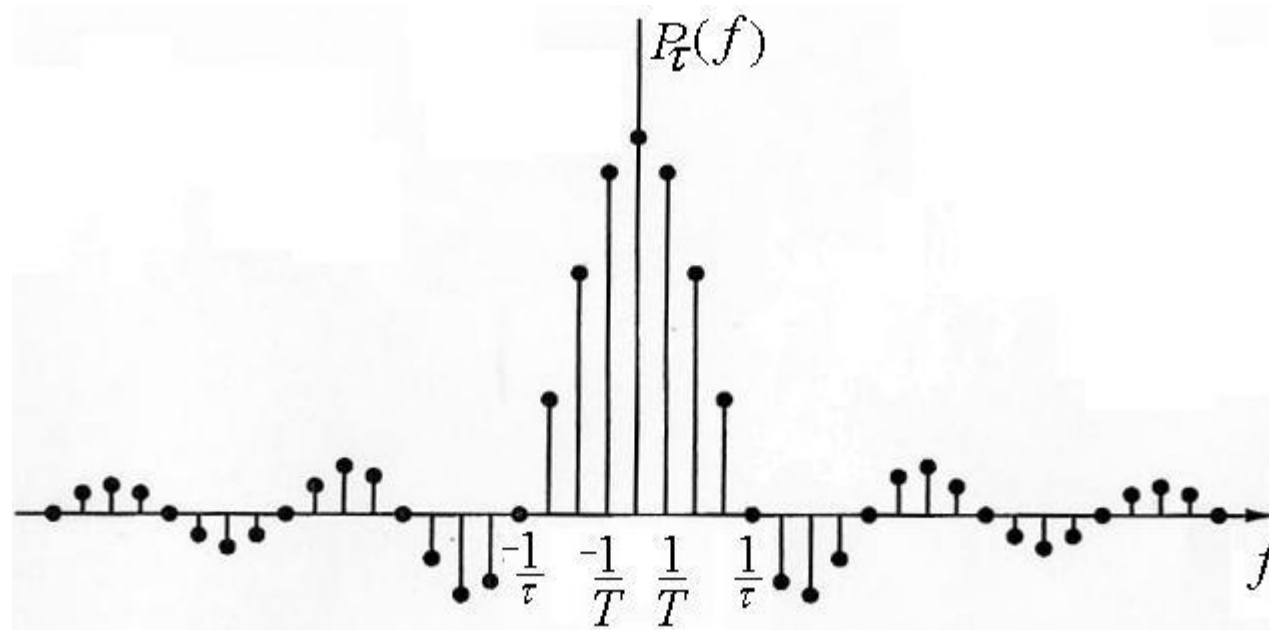
Piiratud spektriga impulss



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 hajaspektriseid

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

Signaalide võrdlemine ja tuvastamine

- Ristkorrelatsioon – signaalide $x(t)$ ja $y(t)$ sarnasus

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x^*(t)y(t + \tau)dt$$

- Autokorrelatsioon - enesesarnasus

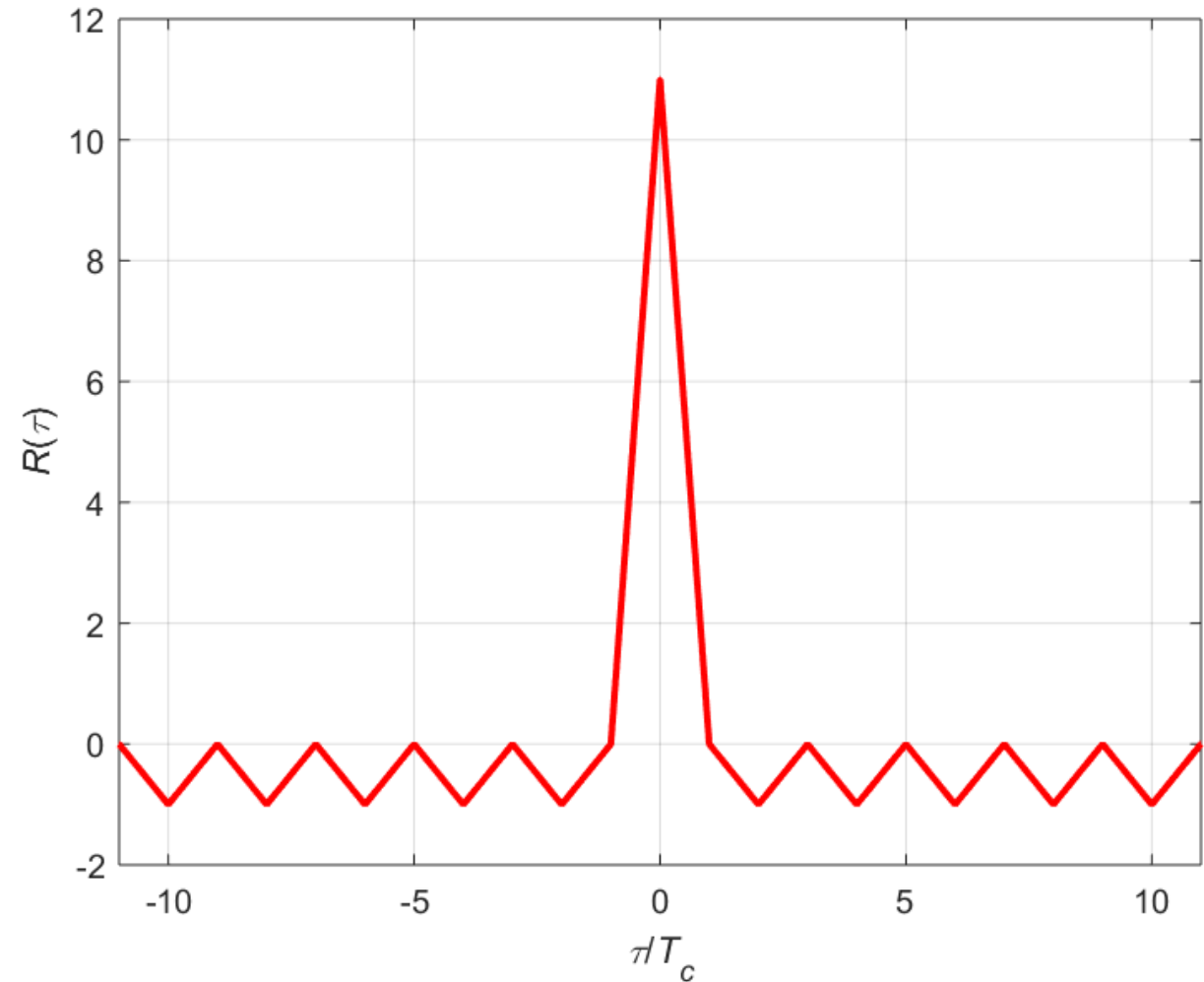
$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x^*(t)x(t + \tau)dt$$

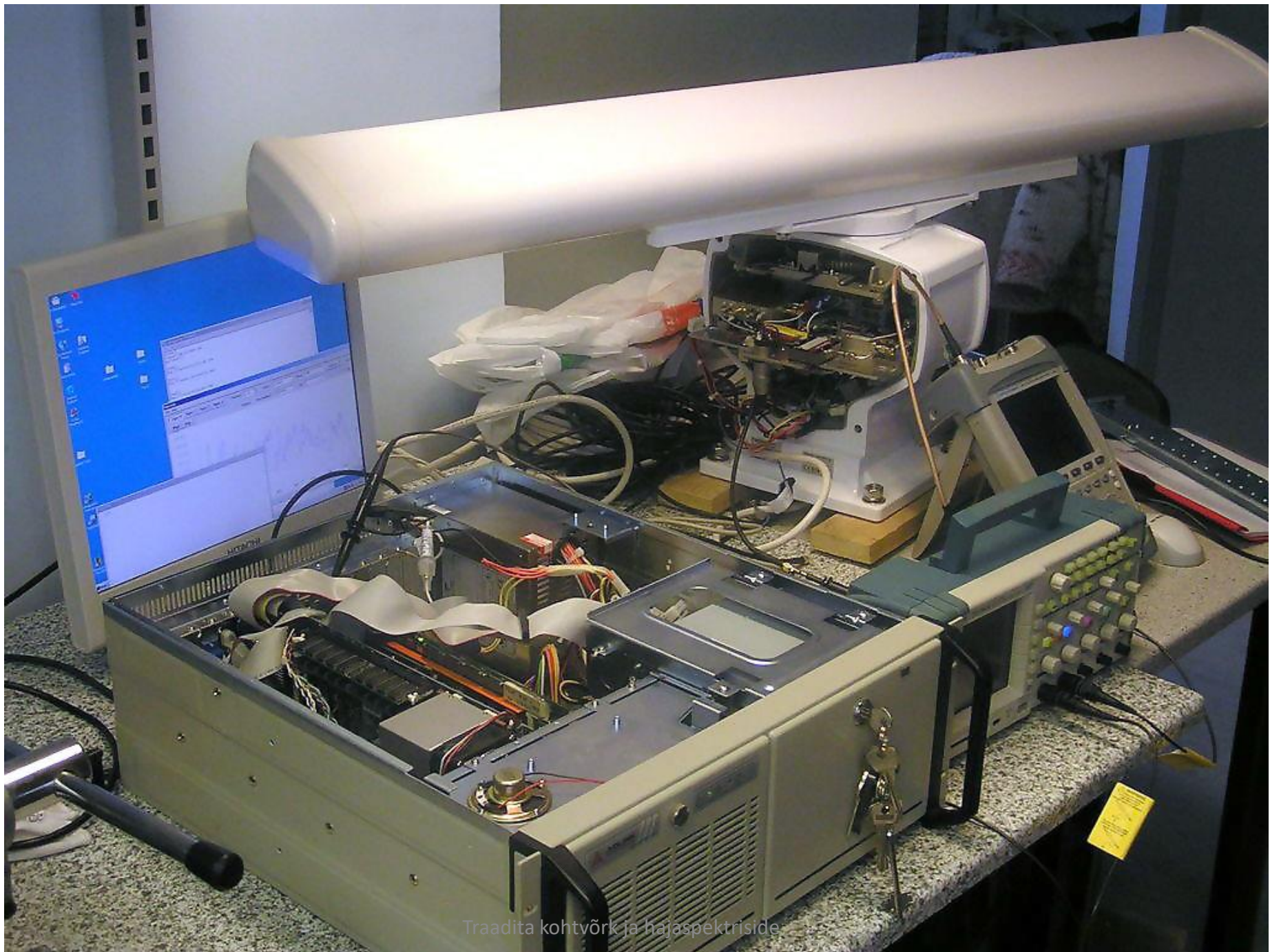
- Diskreetsel juhul

$$R_{xy}[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x^*[m]y[m + n]$$

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





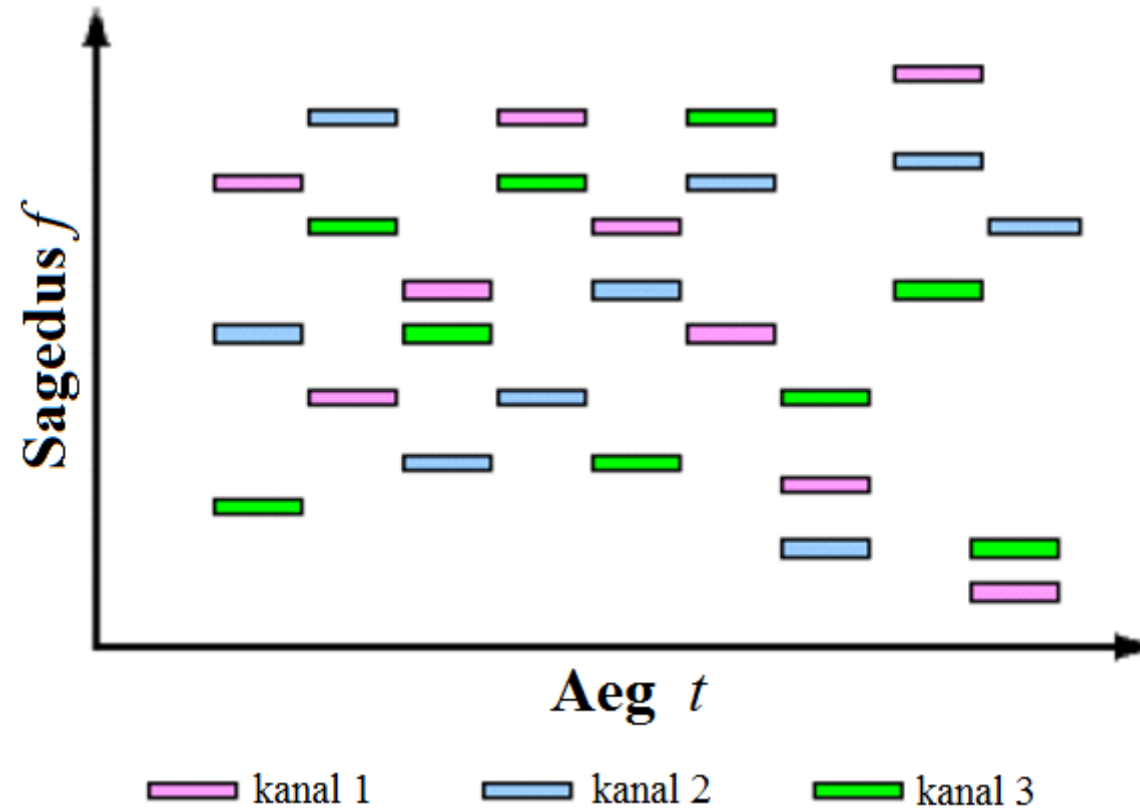
Traadita kohtvõrk ja hajasppektrisiside

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 juhitalvale torpeedole.



Sagedushüplemine FH -SS

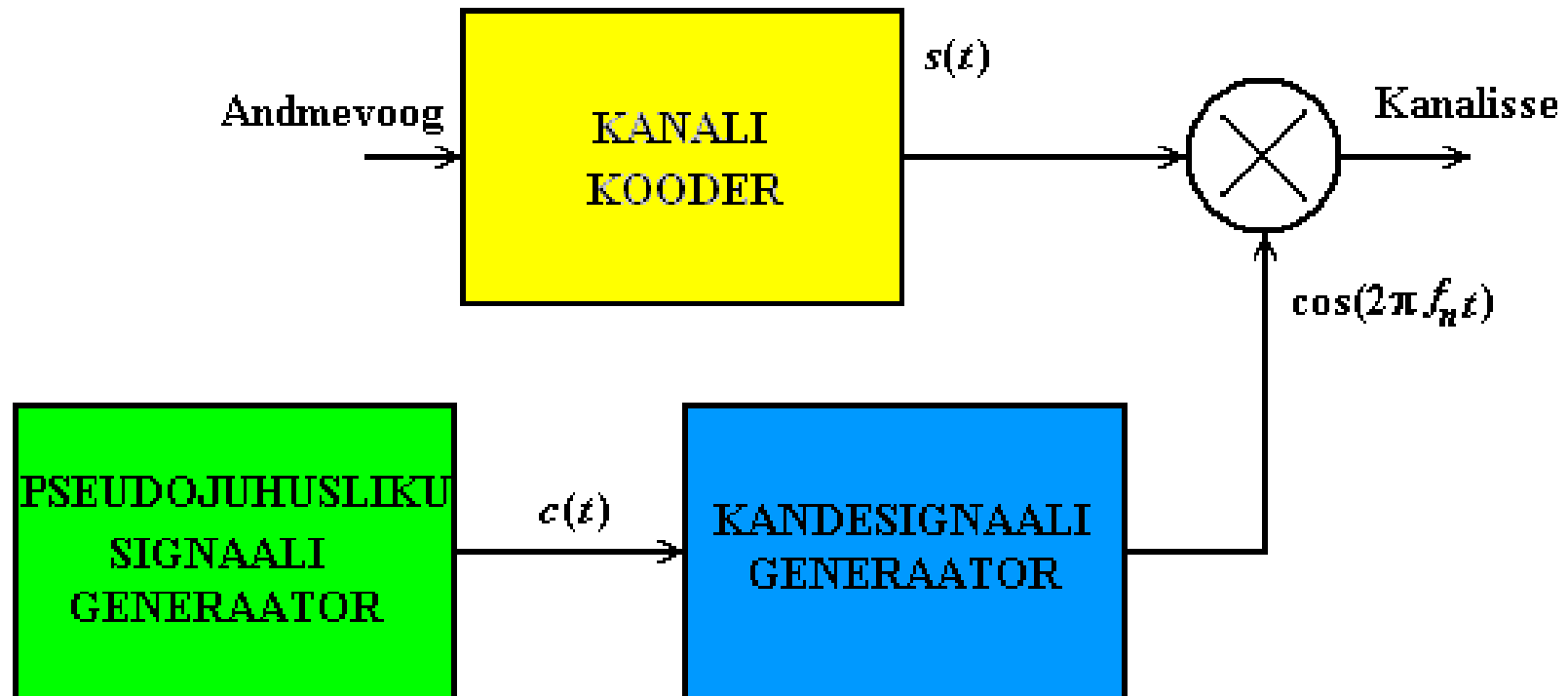


Sagedushüplemine

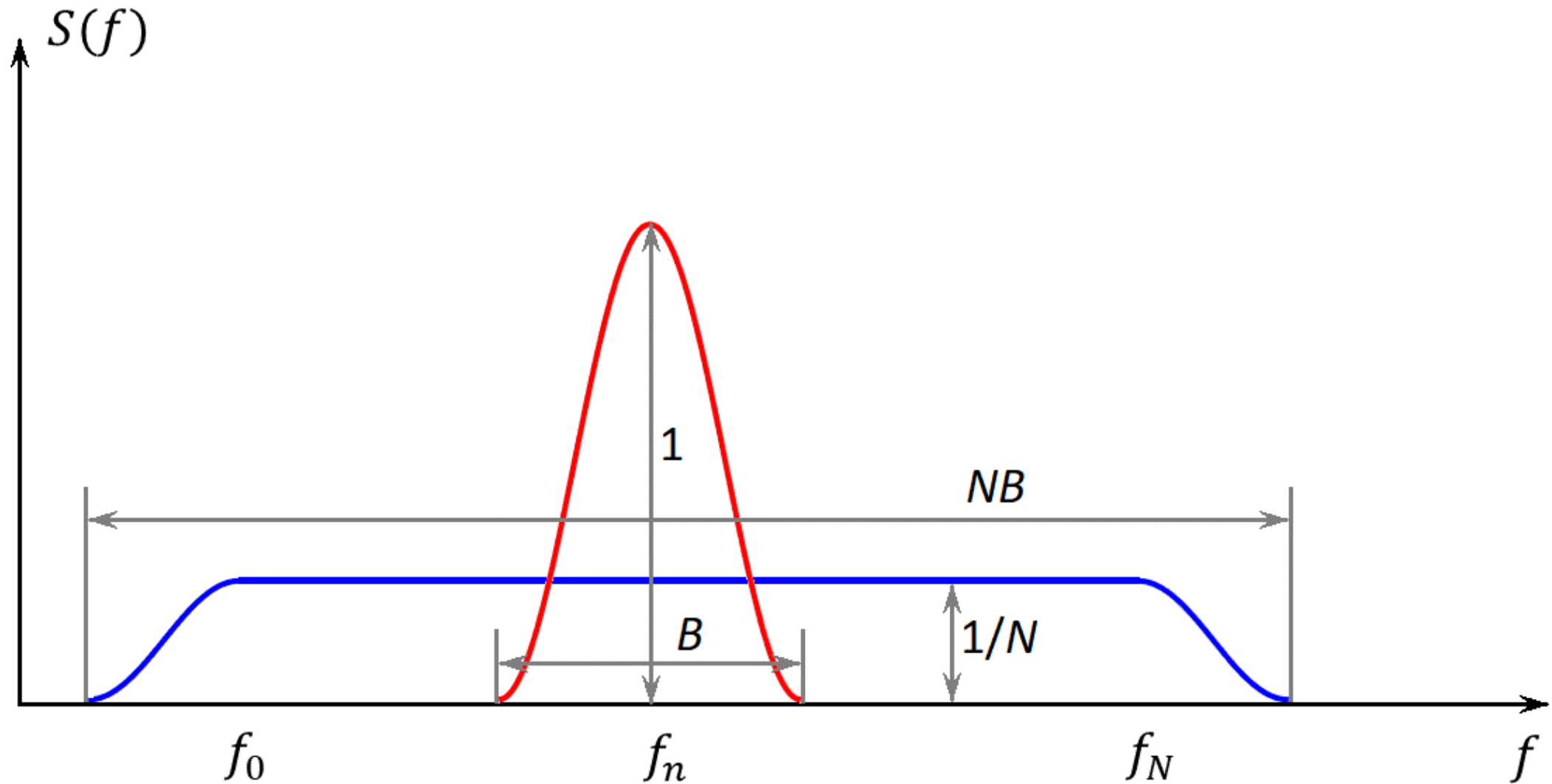


Traadita kohtvõrk ja hajaspektriside

Sagedushüplemine FH -SS

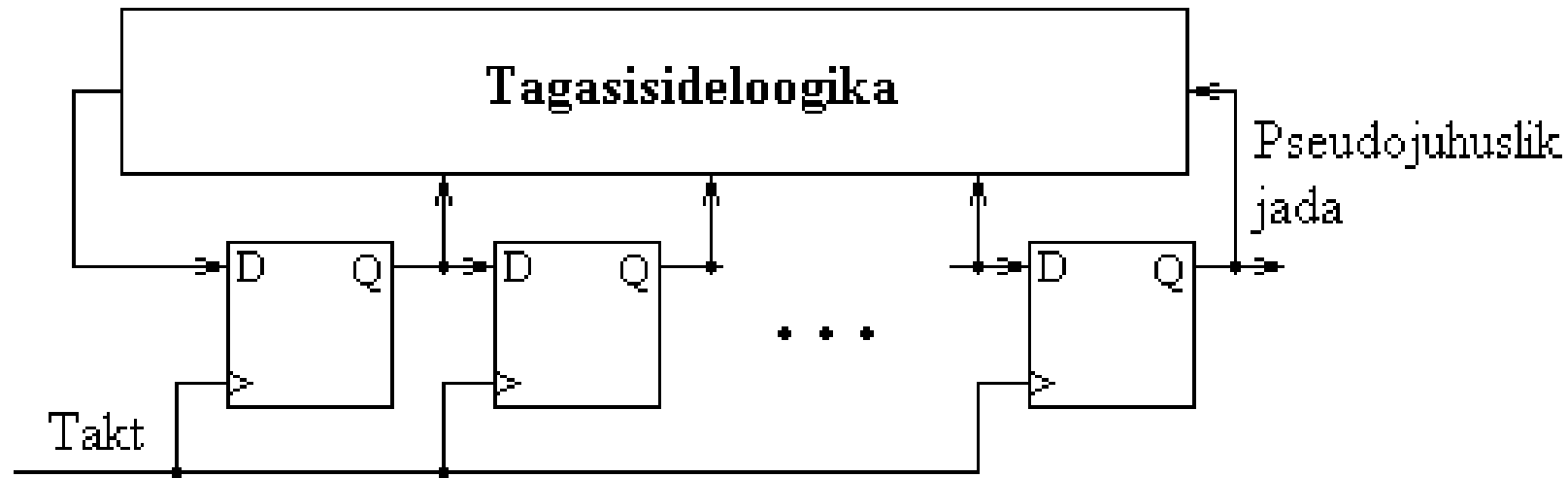


Sagedushüpplemine - spekter



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)

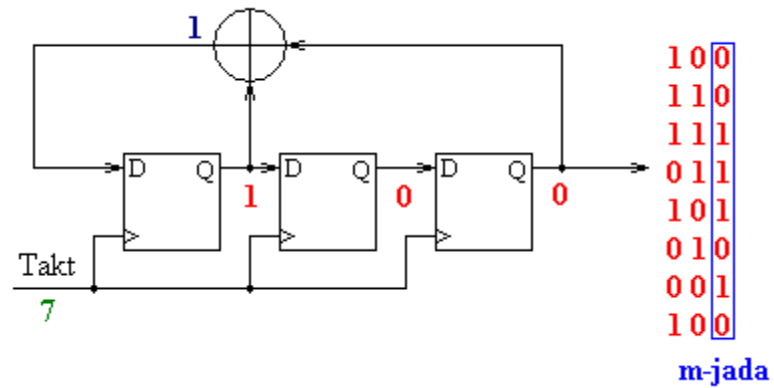


M-jada valimine

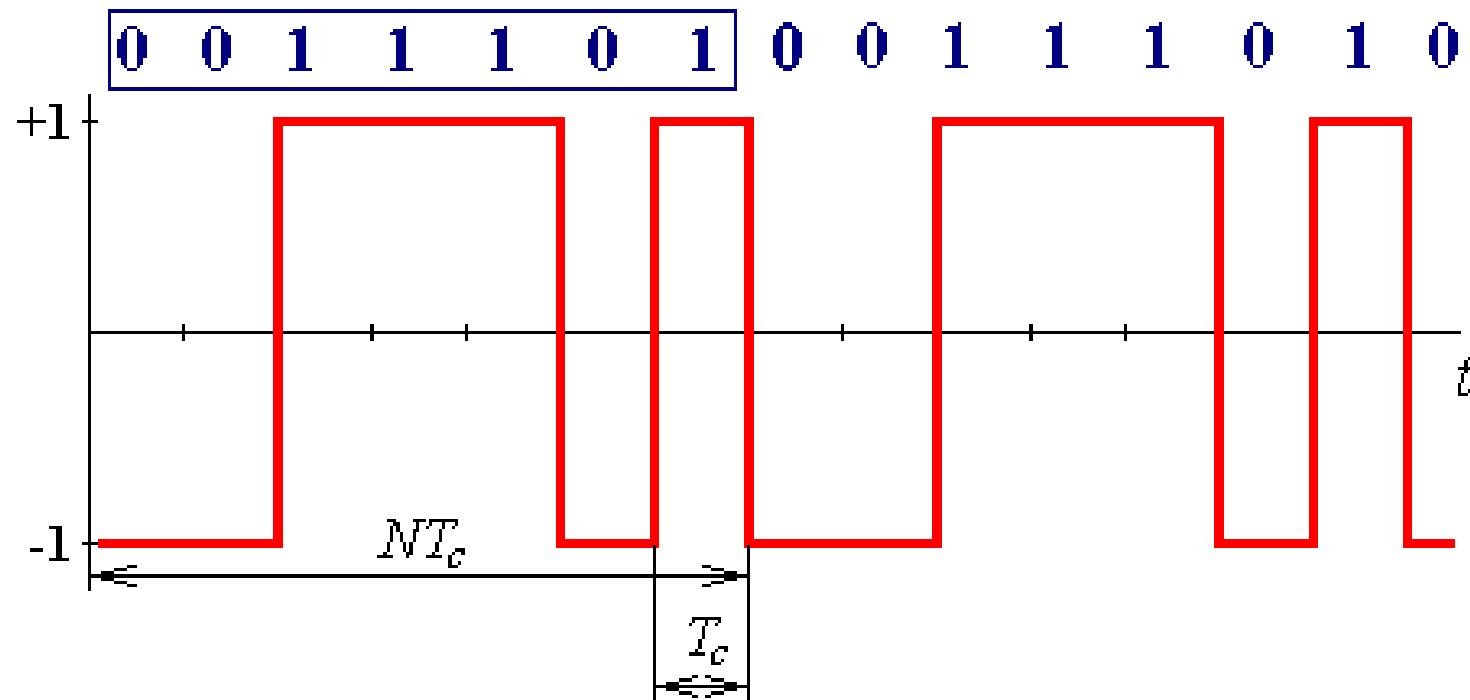
n	Tagasiside väljunditest
2	[2,1]
3	[3,1]
4	[4,1]
5	[5,2], [5,4,3,2],[5,4,2,1]
6	[6,1], [6,5,2,1],[6,5,3,2]
7	[7,1], [7,3],[7,3,2,1], [7,4,3,2],[7,6,4,2], [7,6,3,1],[7,6,5,2],[7,6,5,4,2,1], [7,5,4,3,2,1]

M-jada genereerimine

- $n = 3, N = 7$
- Genereeriv polünoom:
 $g(x) = 1 + x^1 + x^3$

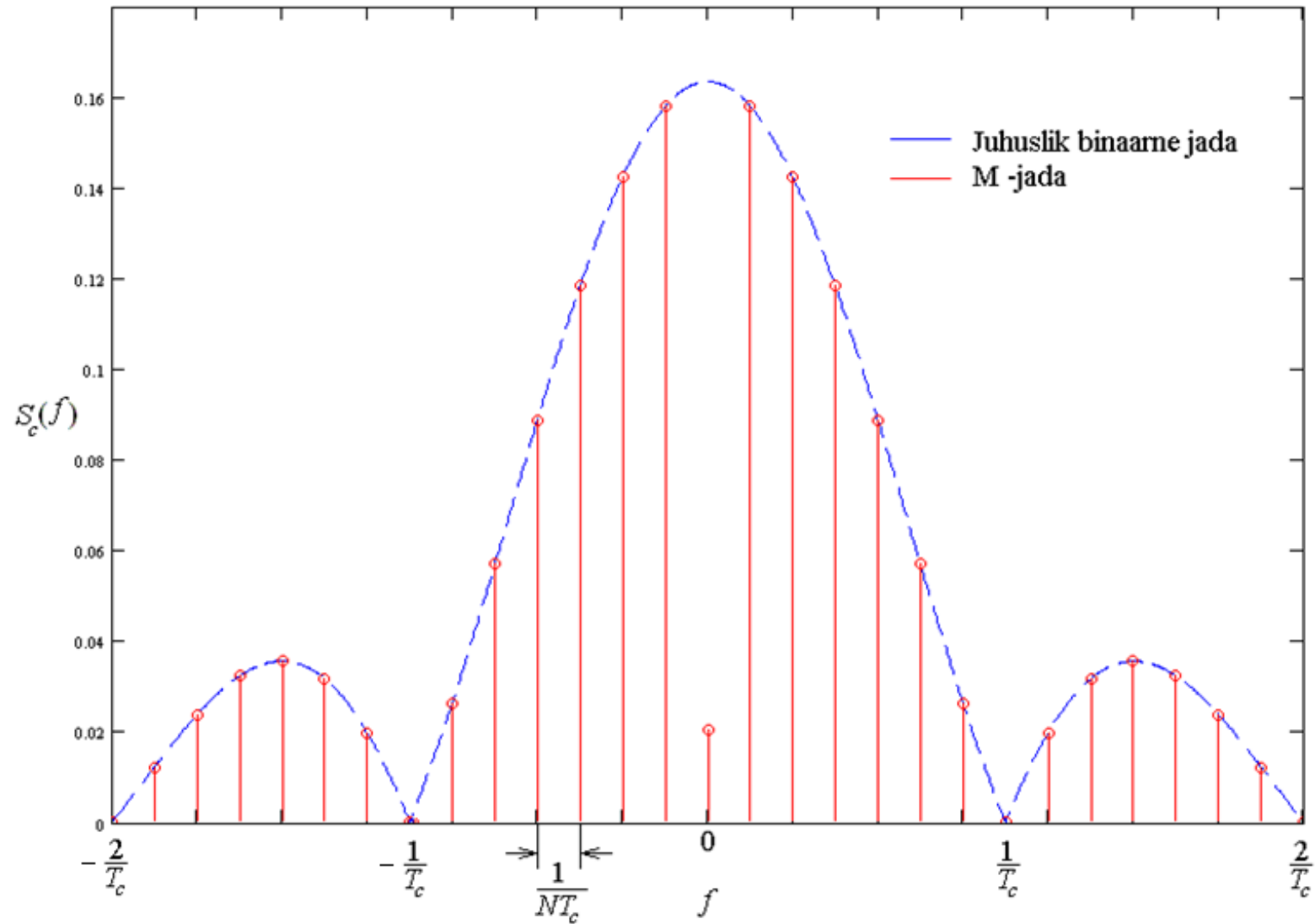


M-jada



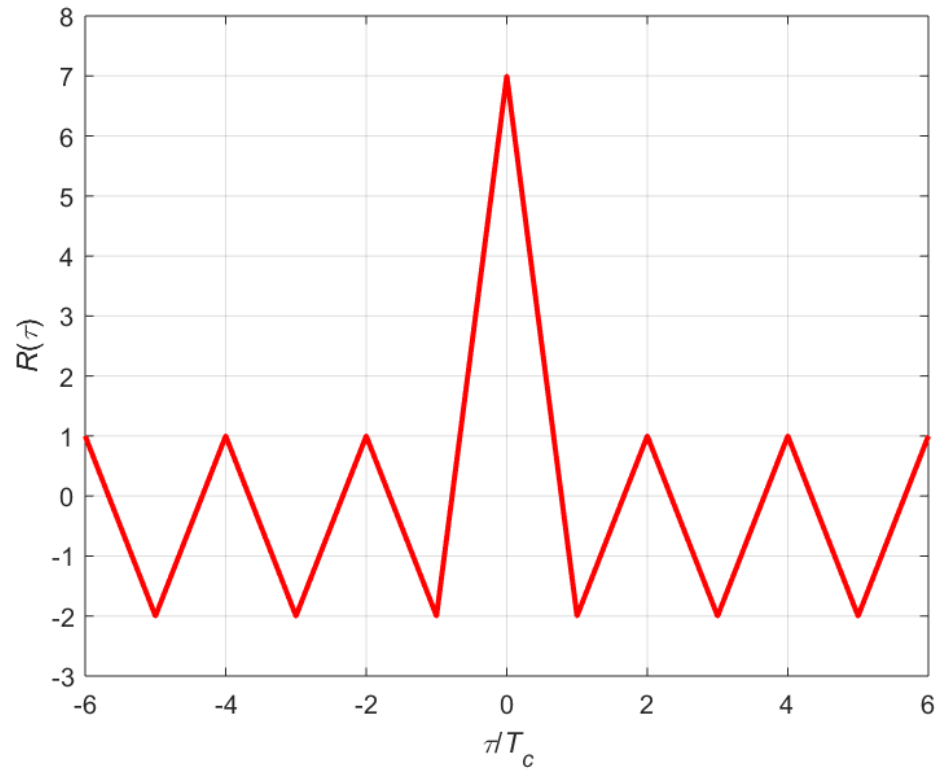
- $n = 3, N = 7$
- Genereeriv polünoom:
$$g(x) = 1 + x^1 + x^3$$
- Algseis: 100

M-jada spekter

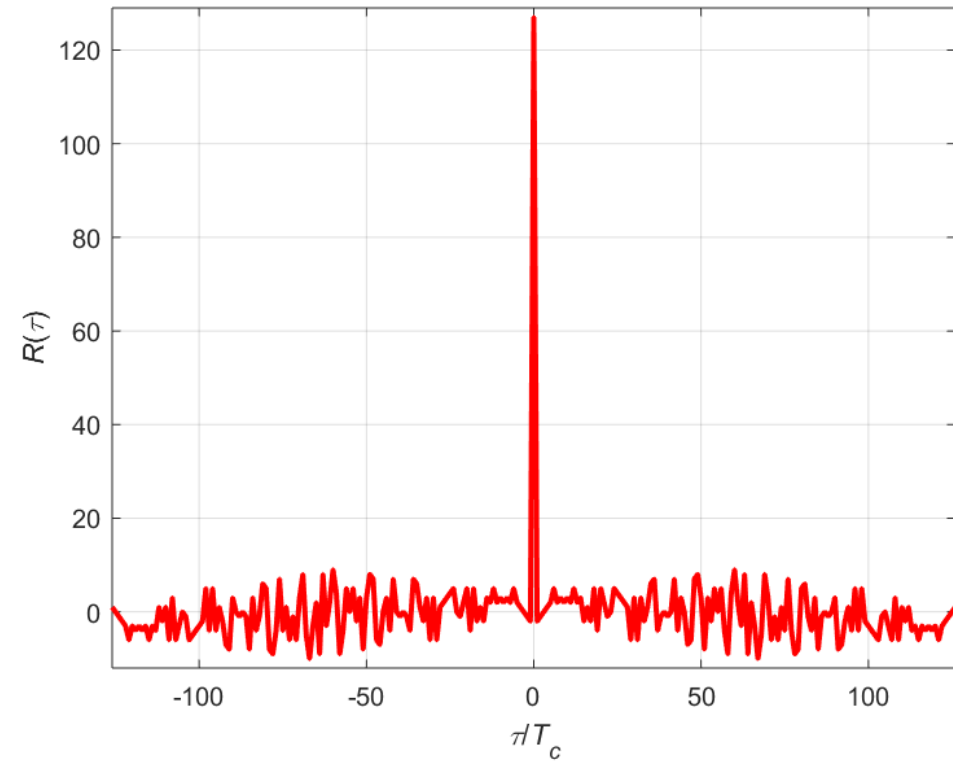


M-jada autokorrelatsioonifunktsioon

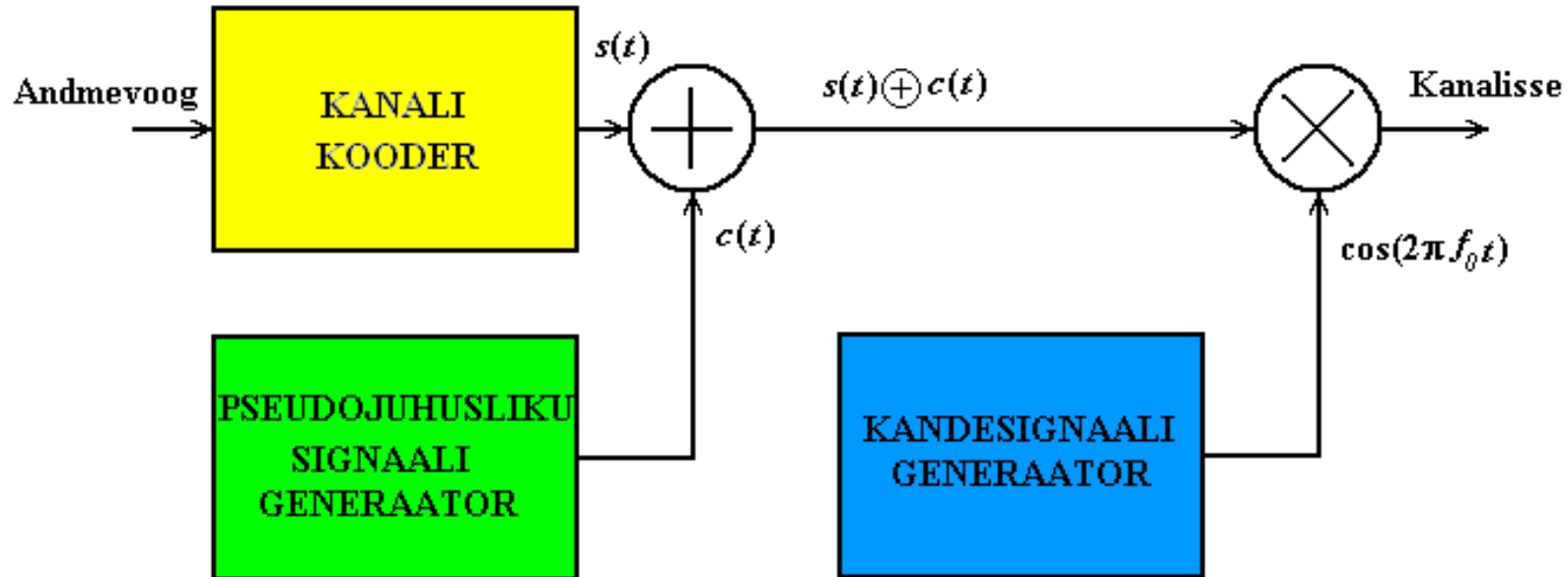
$n = 3; N = 7$



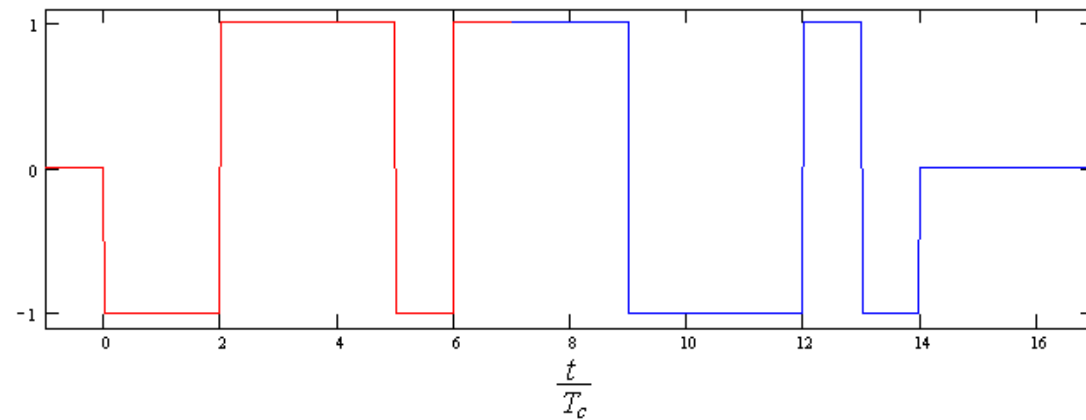
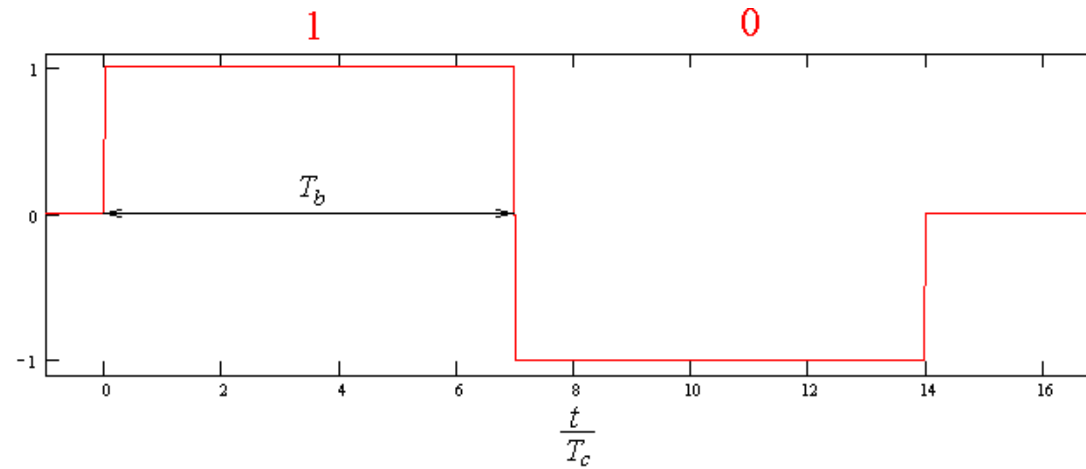
$n = 7; N = 127$



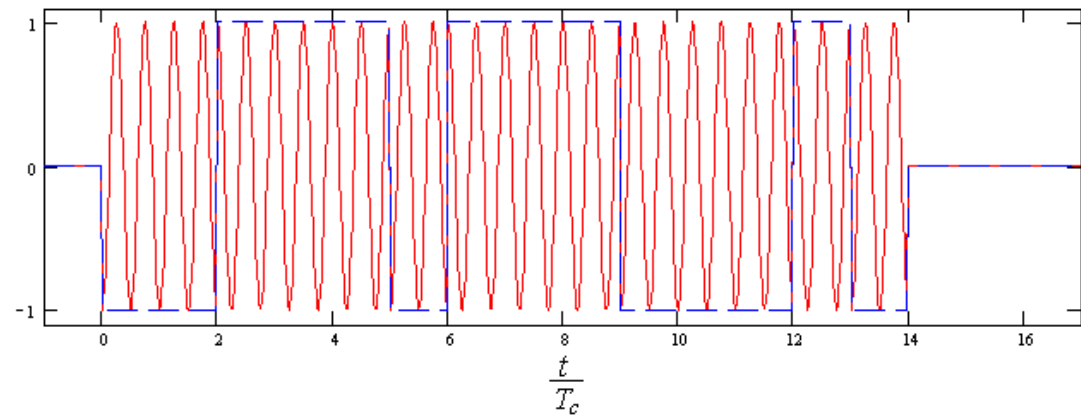
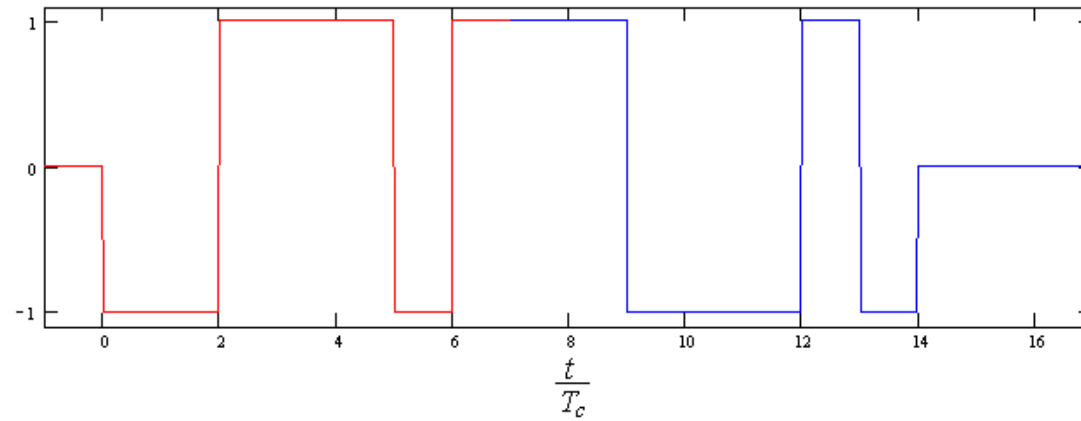
Sageduse hajutamine DS-SS



Sageduse hajutamine DS-SS

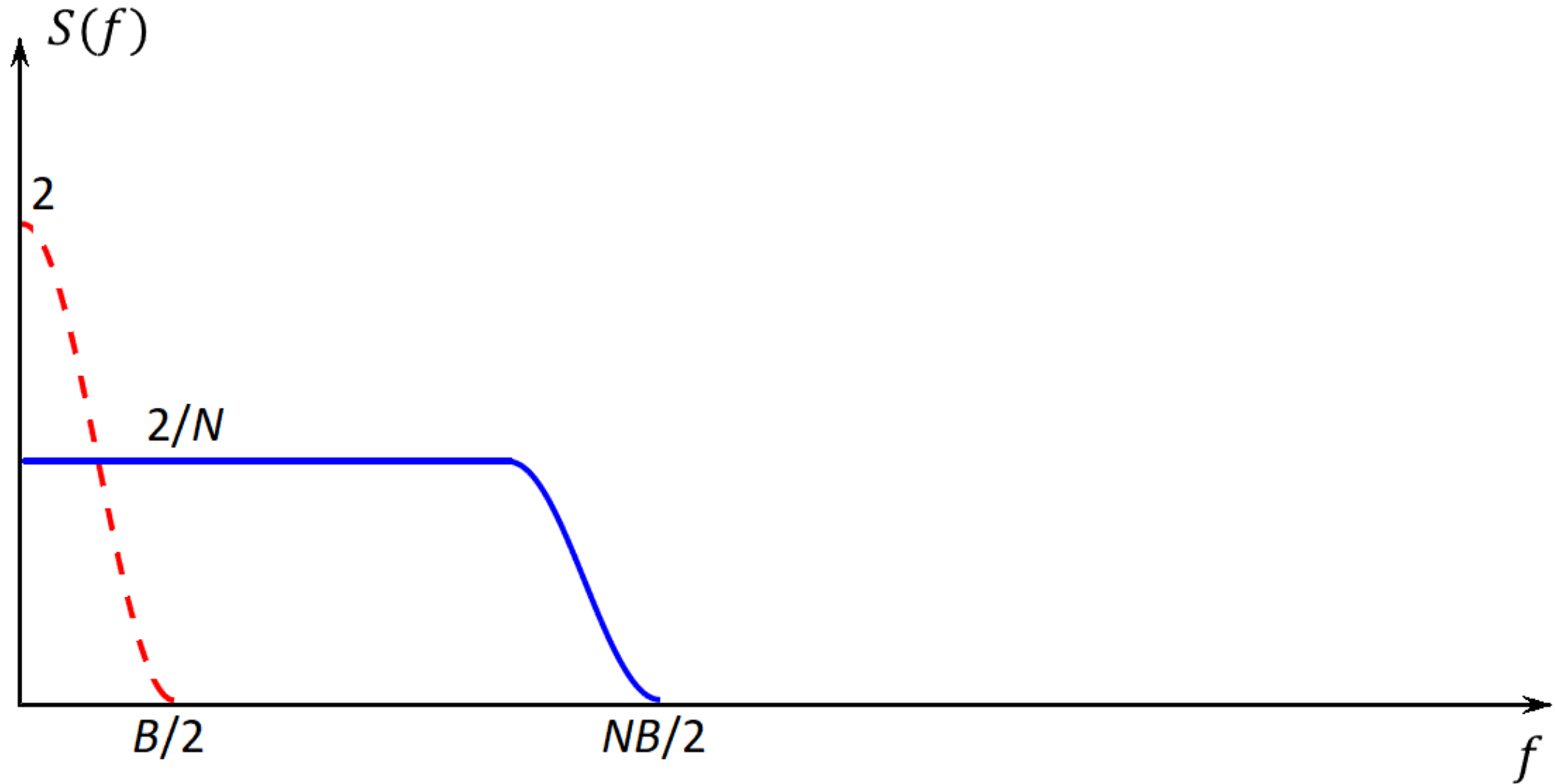


Sageduse hajutamine *DS-SS*

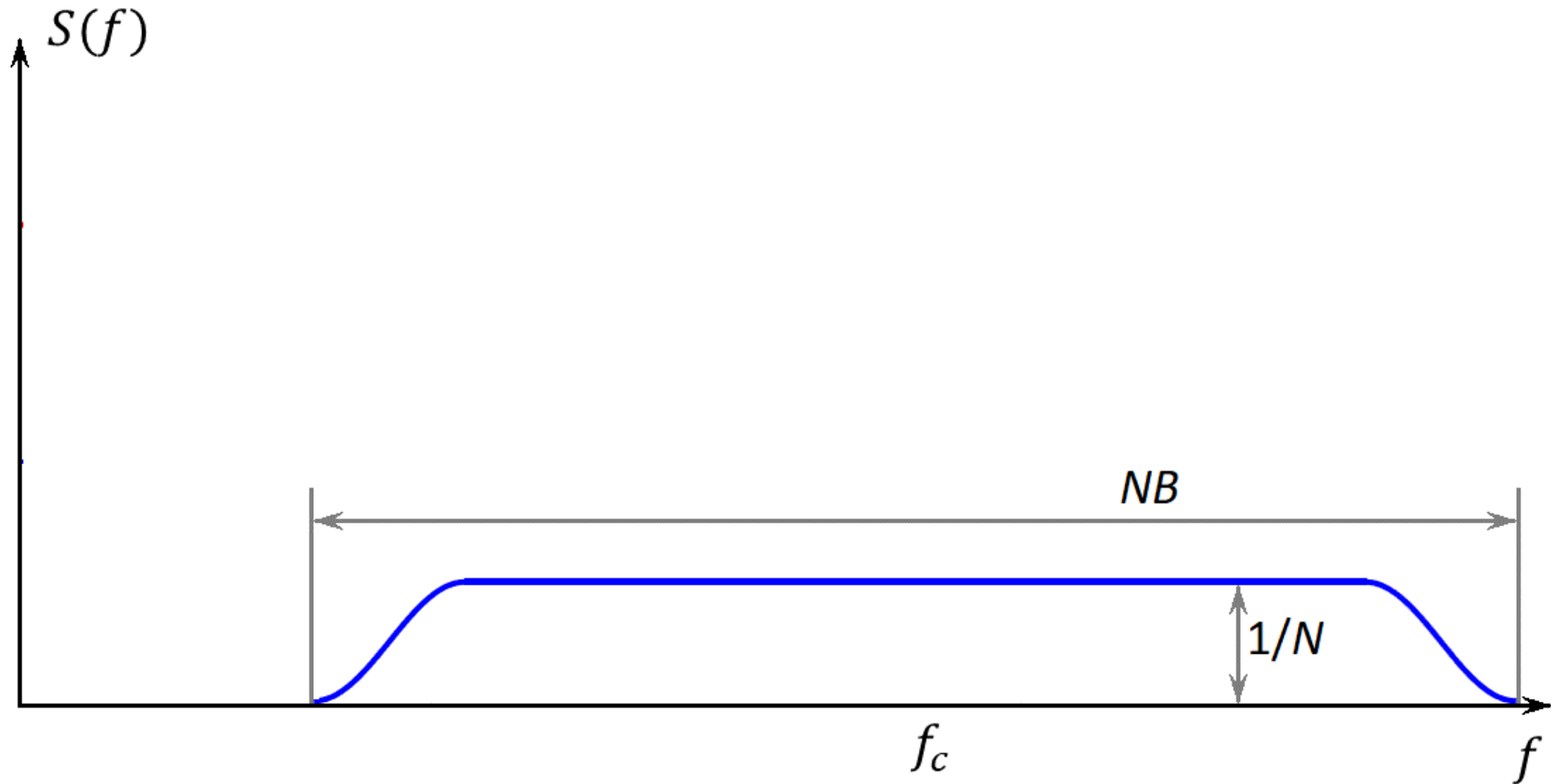


Traadita kohtvõrk ja hajaspektriside

Otsene sageduse hajutamine - spekter



Otsene sageduse hajutamine - spekter

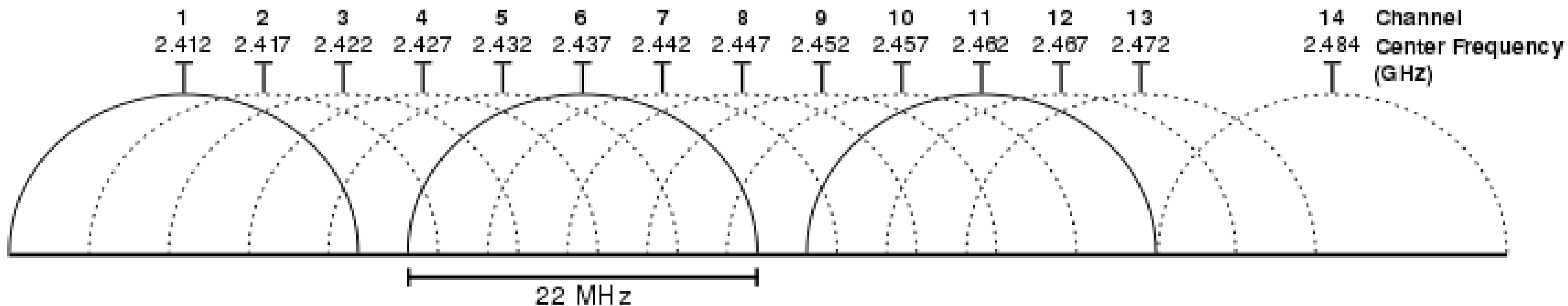


IEEE 802.11b

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



2,4 GHz kanalid



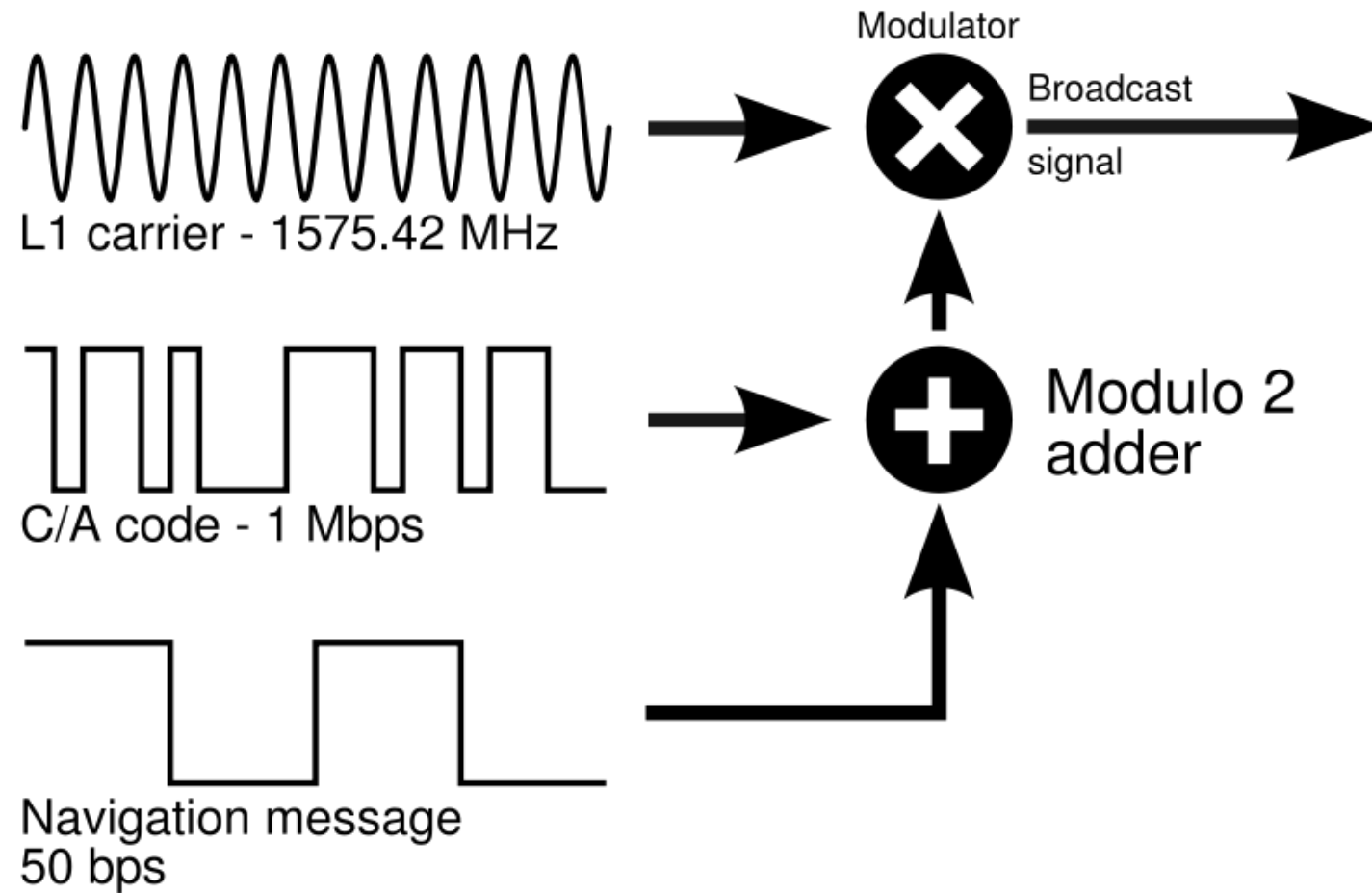
GPS – Global Positioning System

- Sateliidid edastavad signaale kahel sagedusel:
 - L1 1,57542 GHz ja
 - L2 1,2276 GHz
- Signaalide eristamine CDMA meetodil.
- Moduleerimiseks kasutatakse Goldi koode.
- 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 koodi pikkusega 1023 elementi 1ms jooksul.
- Võimalike Goldi koodi pikkusega **1023** on **1025**, kasutatakse ainult **32** neist.

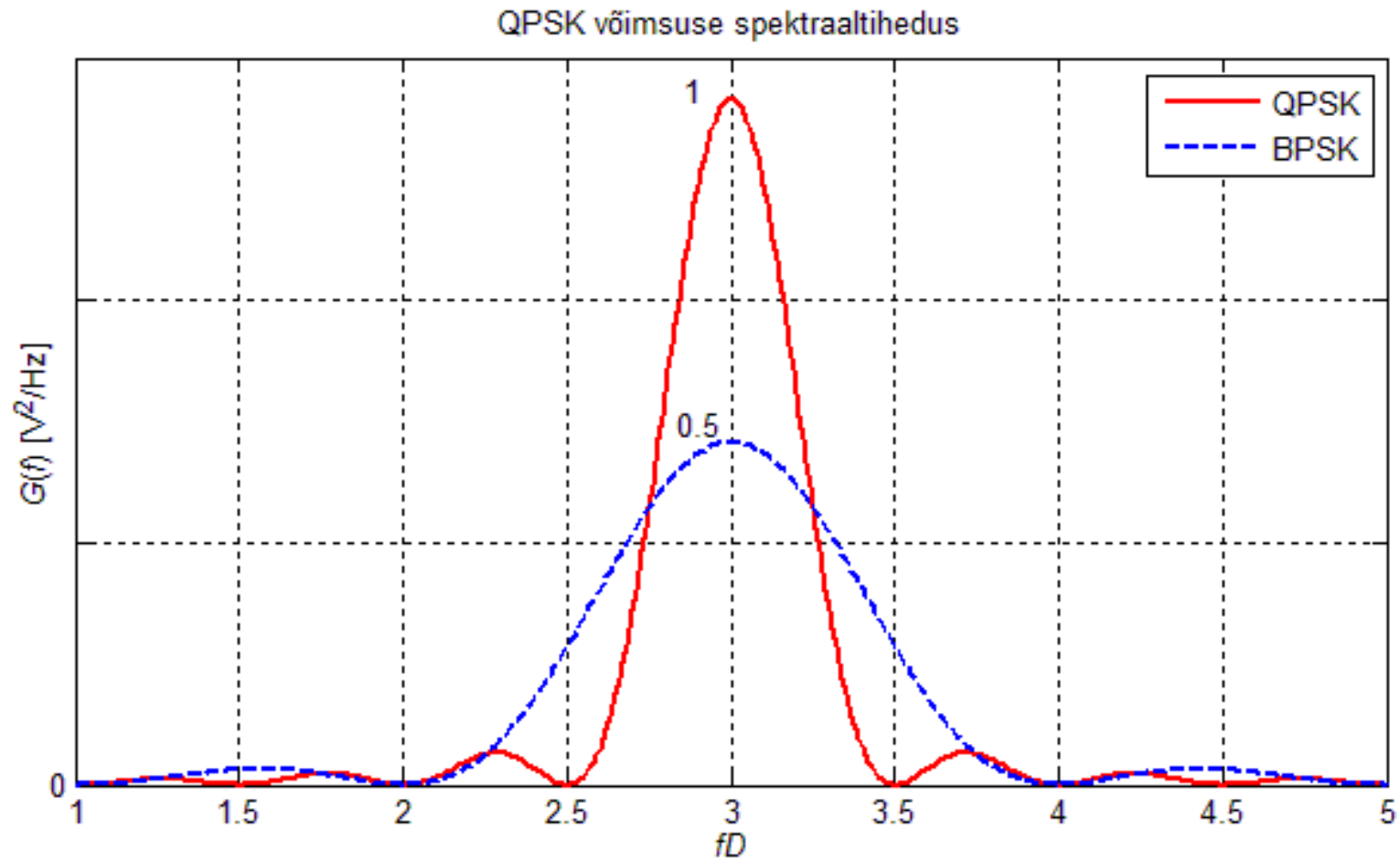
GPS signaali moduleerimine



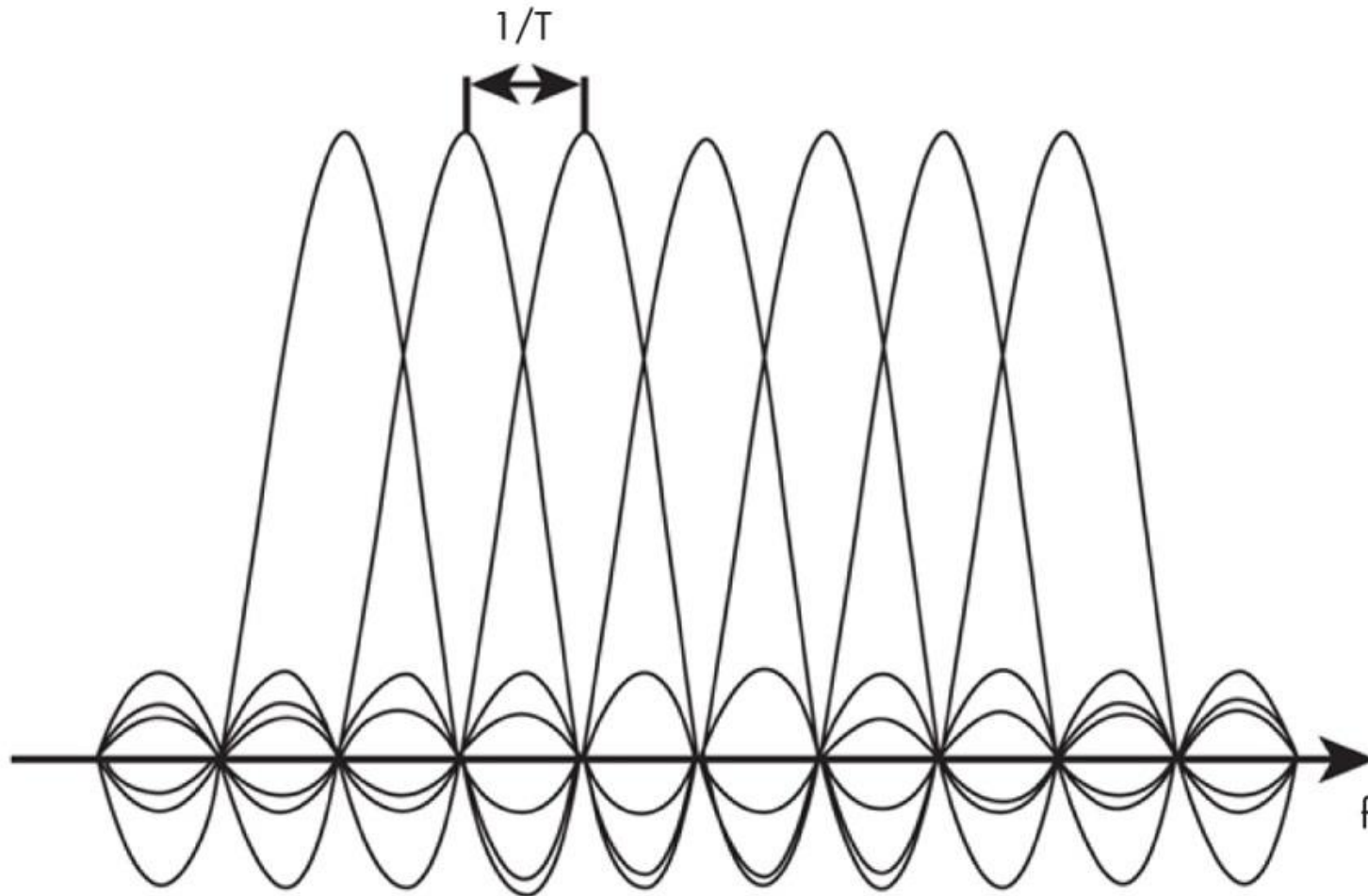
IEEE 802.11a/g

- Andmeedastuskiirus 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*



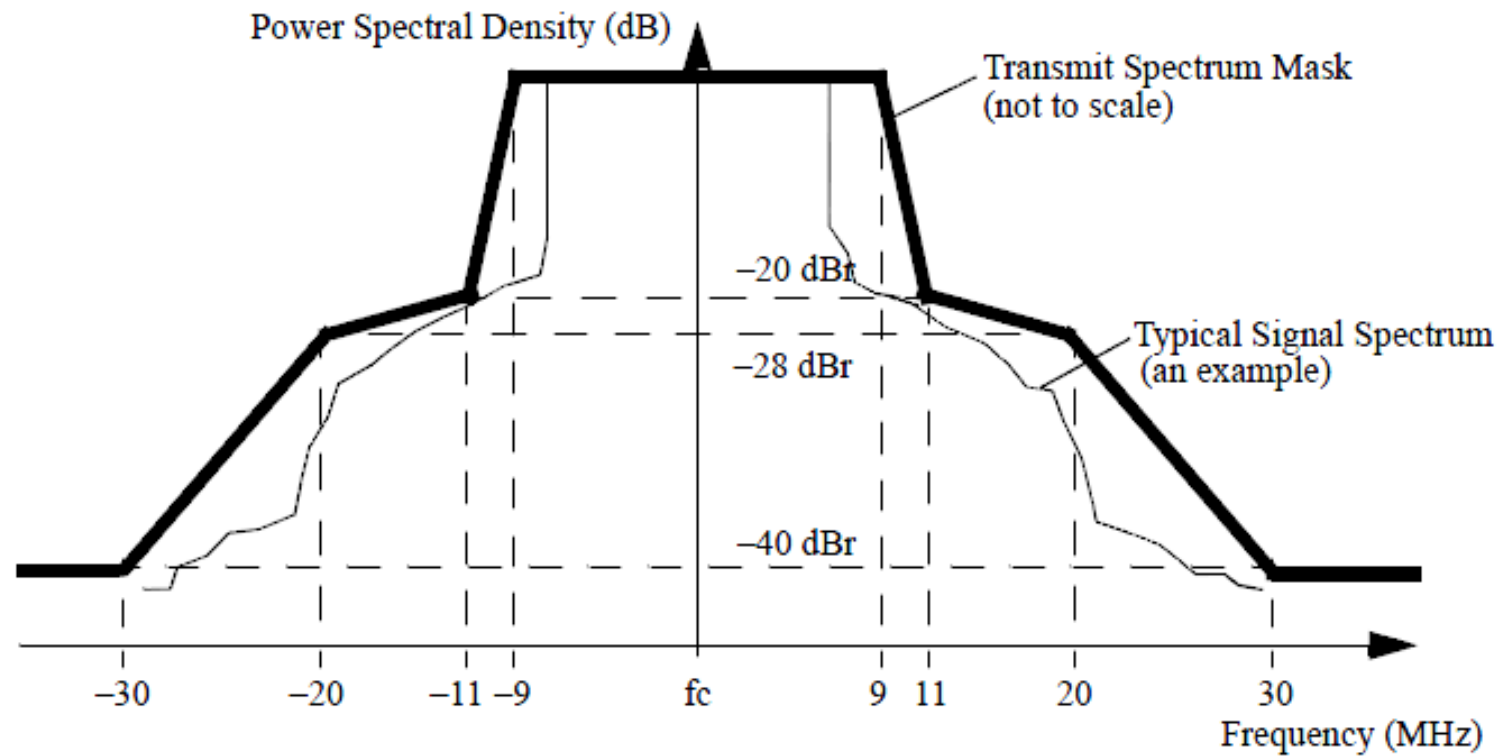
IEEE 802.11a OFDM

- 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

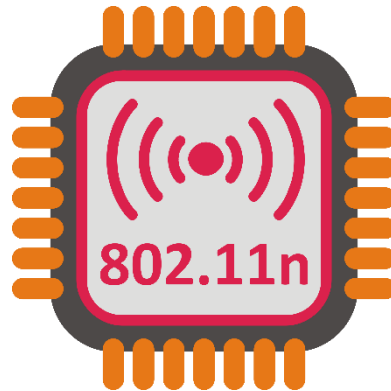


IEEE 802.11a

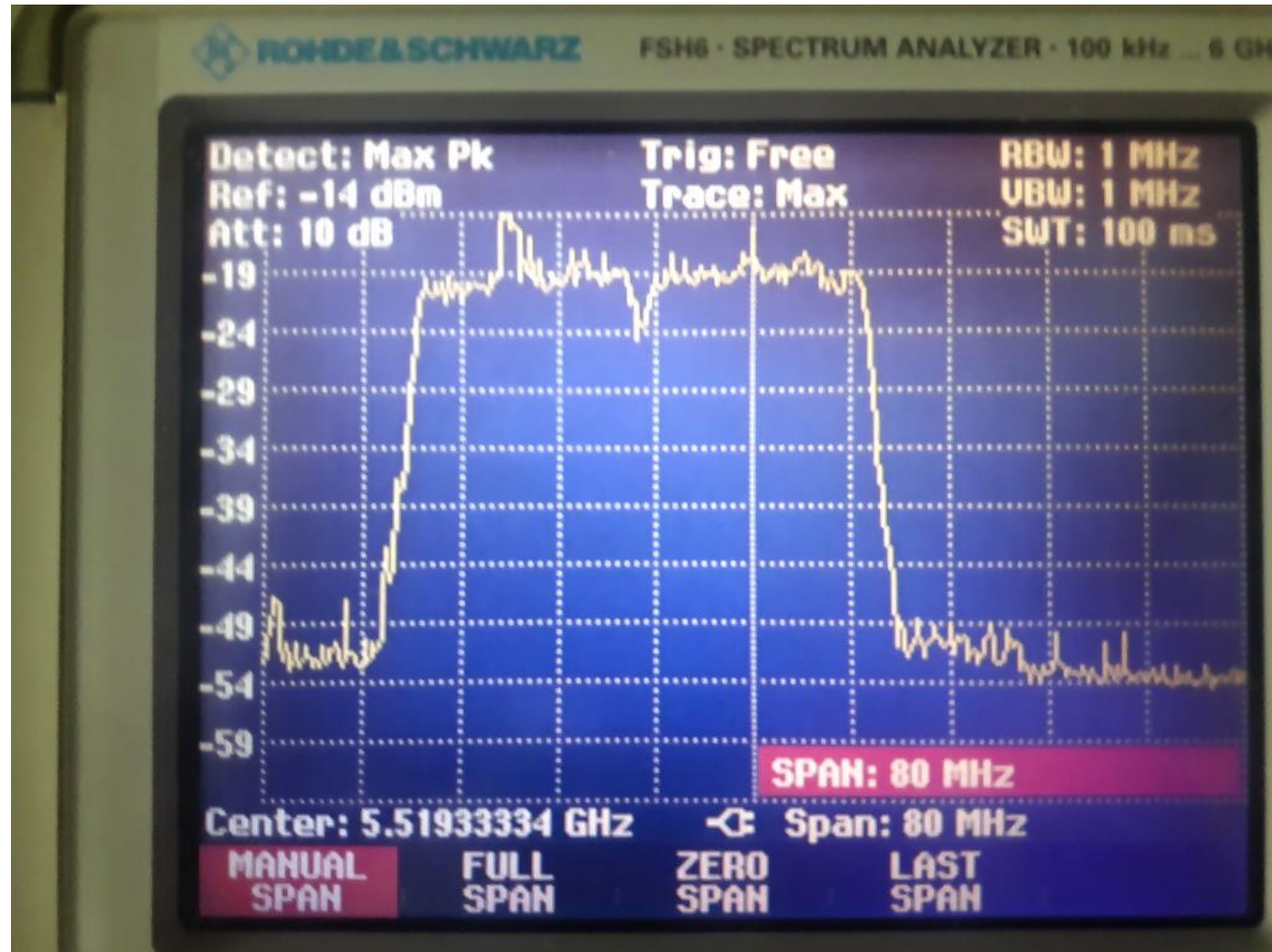
MCS	Modulatsiooniviis	Koodi kiirus	Edastuskiirus [Mbit/s]
13	BPSK	1/2	6
15	BPSK	3/4	9
5	QPSK	1/2	12
7	QPSK	3/4	18
9	16-QAM	1/2	24
11	16-QAM	3/4	36
1	64-QAM	2/3	48
3	64-QAM	3/4	54

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)

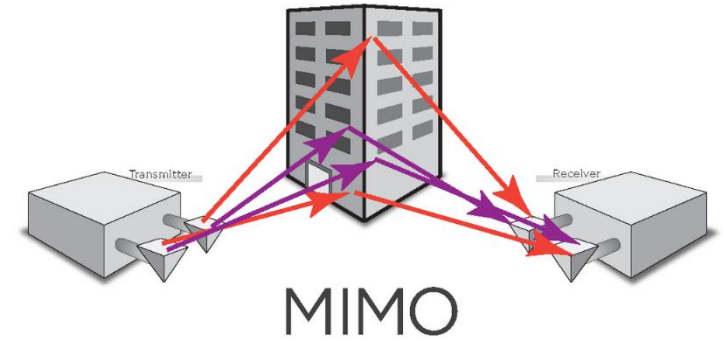


IEEE 802.11n spekter



Traadita kohtvõrk ja hajaspektriside

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*

MOMO

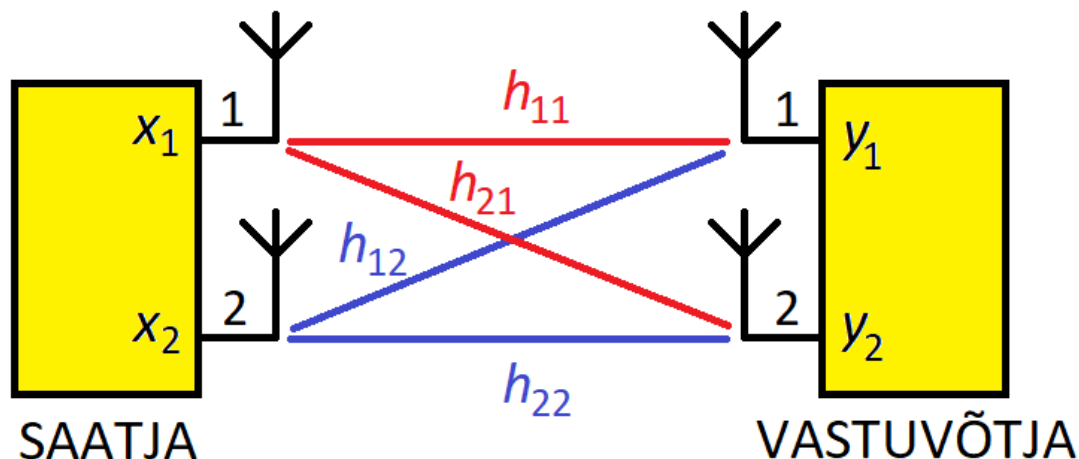


Traadita kohtvõrk ja hajaspektriside

MIMO

- MIMO süsteemis on vähemalt kaks saate- ja kaks vastuvõtuantenni.
 - Massivne MIMO 5G mobiilside võrkudes kasutab kuni 128 antenni.
- Saateantennide arv N peab olema väiksem või võrdne, kui vastuvõtuantennide oma M : $N \leq M$.
- Kokku on MIMO süsteemis $N \cdot M$ erinevat leviteed, igaühete neist saab kirjeldada impulsskajaga h_{mn} .
- Informatsiooni kõigi nende impulsskajade kohta nimetatakse kanali olekuinformatsiooniks CSI (*Channel State Information*). Tavaliselt esitatakse kanali olekuinformatsioon ülekandemaatriksi \mathbf{H} kujul.

2x2 MIMO



- Lihtsaimal juhul: $N = M = 2$

- Signaalid vastuvõtja sisendites:

$$\begin{cases} y_1 = h_{11}x_1 + h_{12}x_2 \\ y_2 = h_{21}x_1 + h_{22}x_2 \end{cases}$$

- Maatrikskujul:

$$\vec{y} = \mathbf{H}\vec{x},$$

- kus

$$\vec{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}, \vec{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \text{ ja}$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}.$$

*Kirjeldatud lihtsustatud mudel kehtib müravaba kitsaribalise lameda feedinguga MIMO korral.

2x2 MIMO

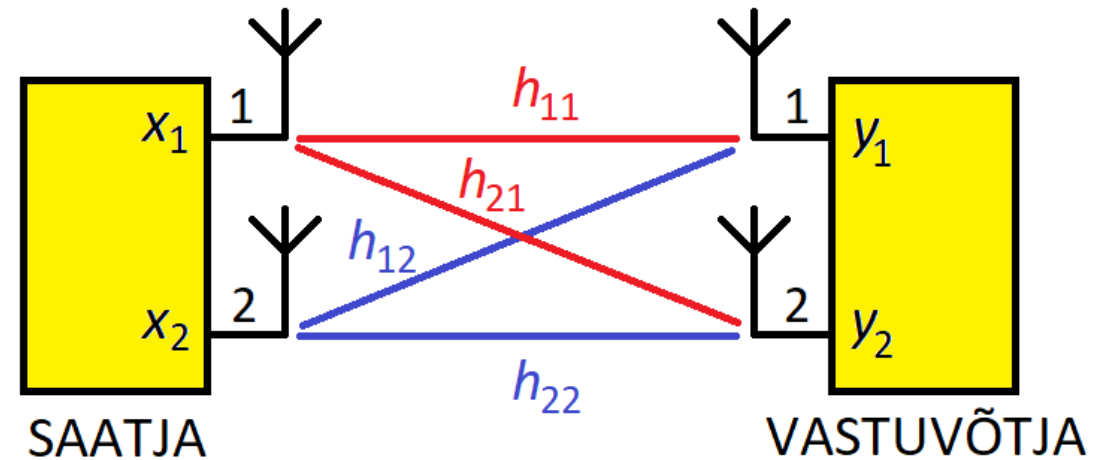
- Kui CSI on teada, saab vastuvõtjas saadetud signaalid teineteisest eristada :

$$\vec{x} = \mathbf{H}^{-1}\vec{y}$$

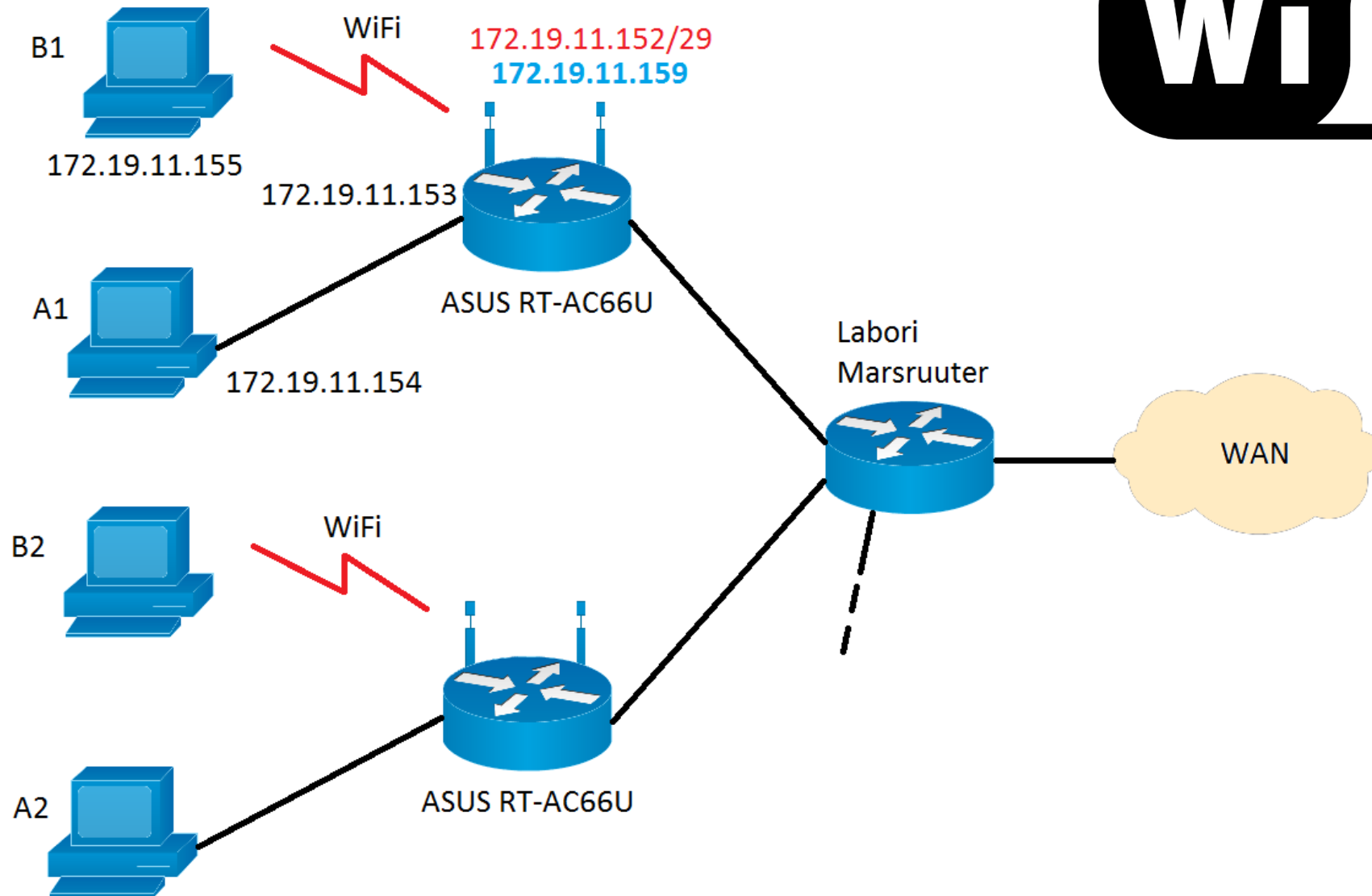
- Kus \mathbf{H}^{-1} on ülekandemaatriksi pöördmaatriks. 2x2 maatriksi korral:

$$\mathbf{H}^{-1} = \frac{1}{h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}} \begin{bmatrix} h_{22} & -h_{12} \\ -h_{21} & h_{11} \end{bmatrix}$$

- Olekumaatriksit saab hinnata edastades teadaoleva kujuga pilootsignaali.



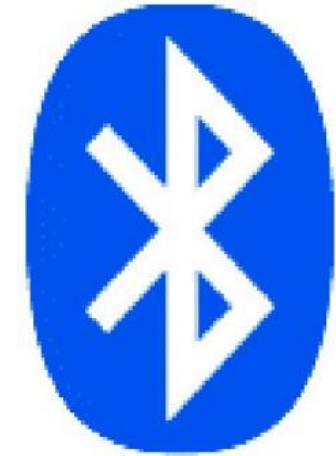
4. praktikum



IEEE 802.11...

- 802.11ac
 - Kanali ribalainus 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)

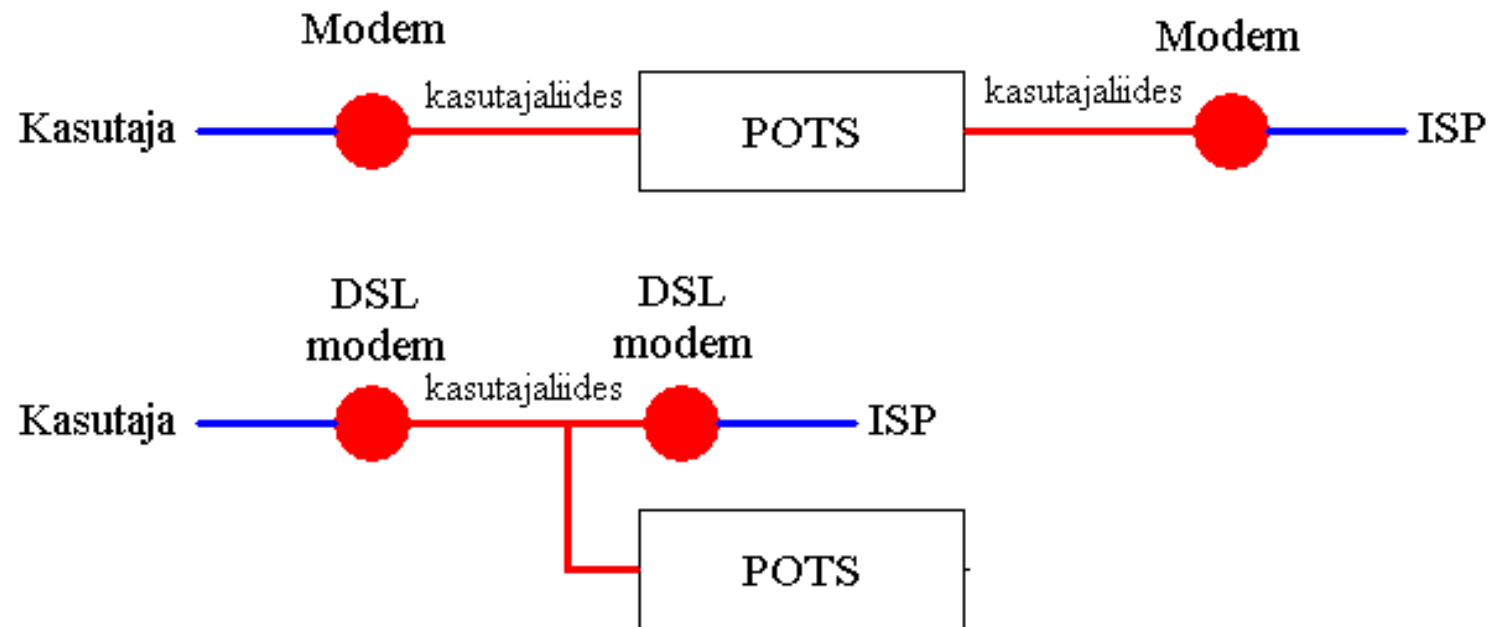
- 1994 Ericsson
- 2,4 GHz ISM-bänd
- Sagedushüpplus 79 kanali vahel ($B = 1$ MHz, 800 hüpet sekundis)
- Modulatsiooniviisid:
 - Basic Rate (1 Mbit/s): GFSK
 - Enhanced Data Rate (2 ja 3 Mbit/s): $\pi/4$ -DQPSK, 8-DPSK
- Asendamaks ühendusjuhtmeid (RS-232).
- Väga väike töökaugus 1-100m
- Väikesed kasutatavad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



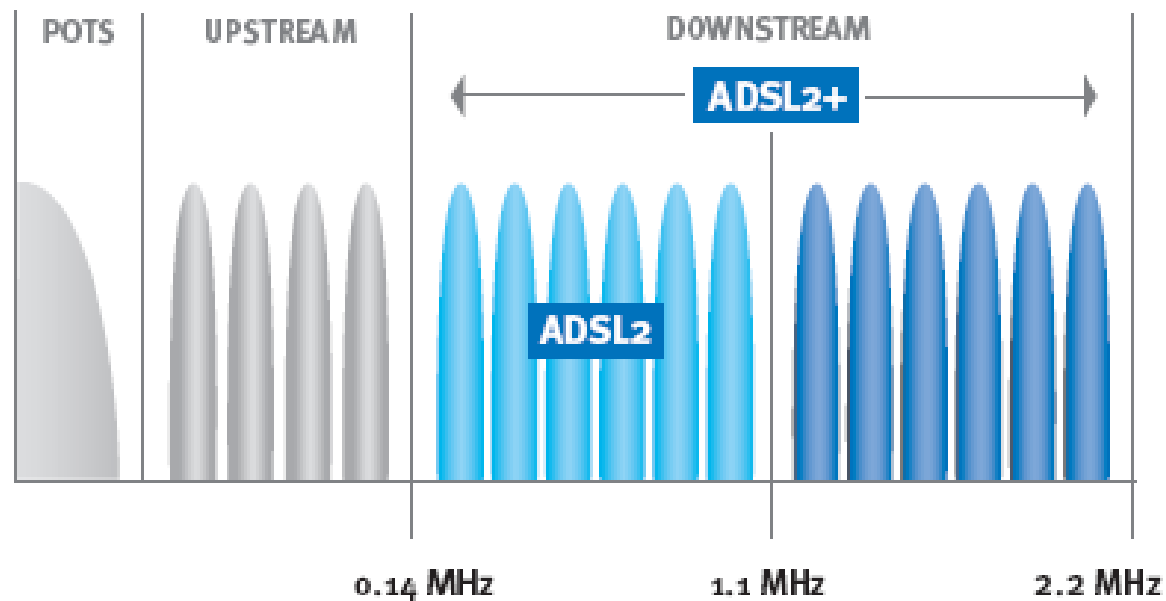
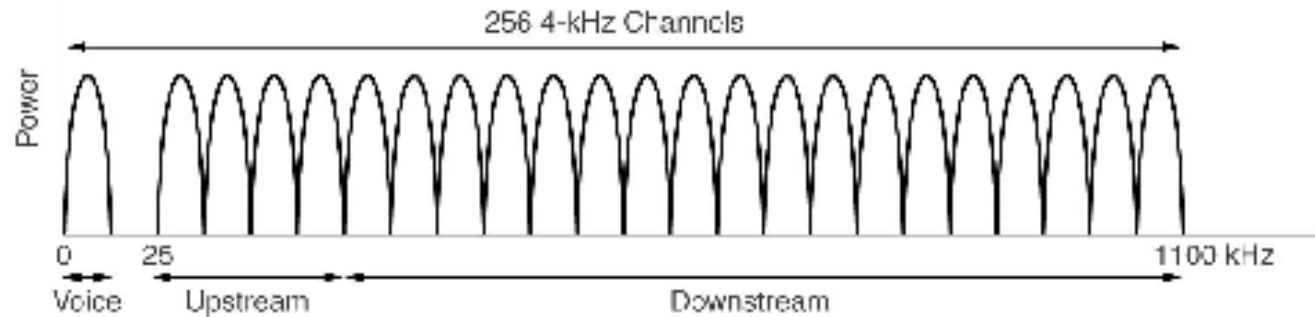
DSL



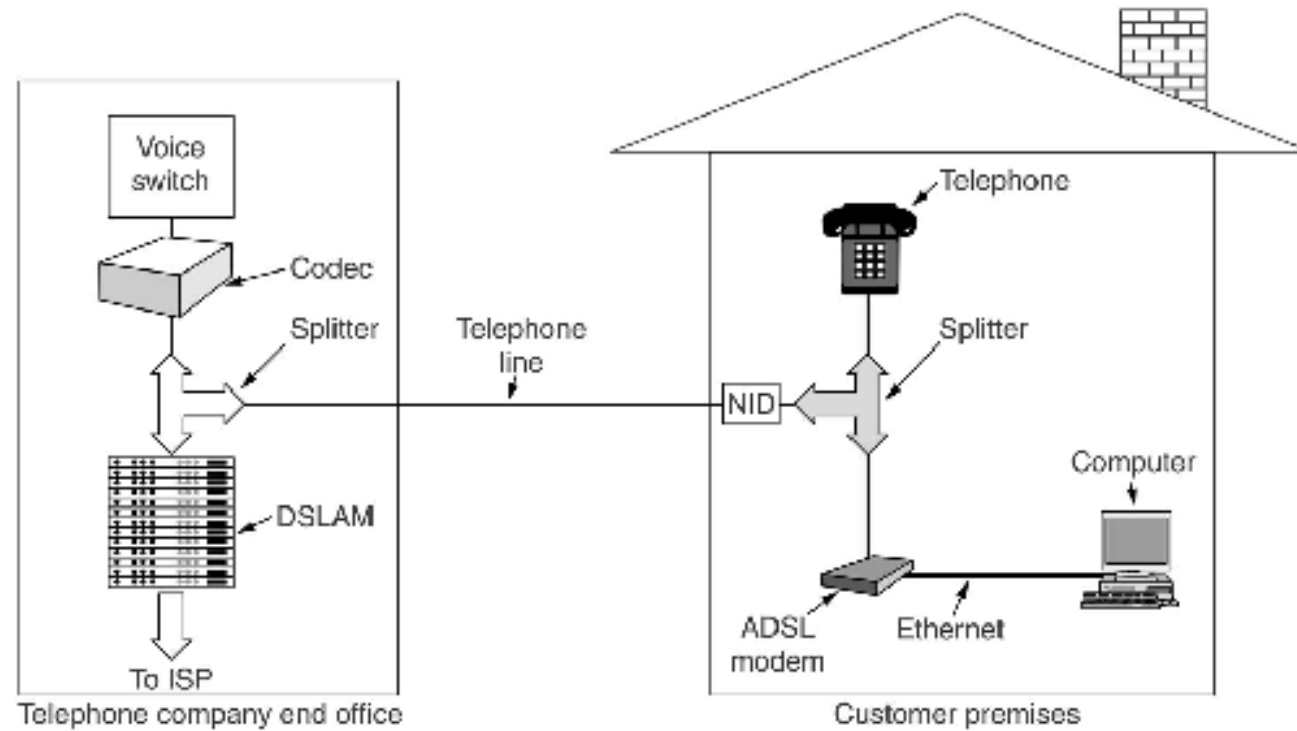
ADSL

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

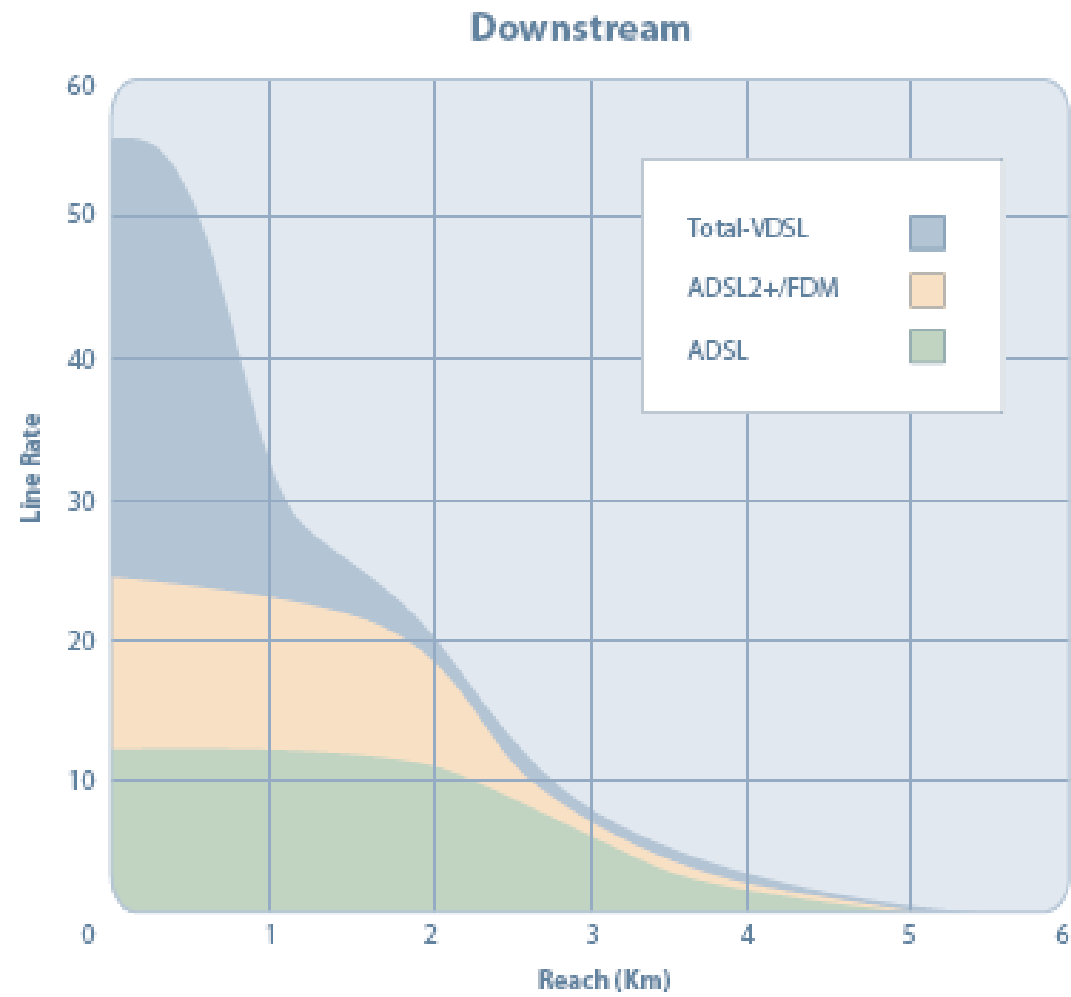
ADSL kanalid



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**.



10. Allika kodeerimine

Arvutivõrgud IEE1100

Ivo Mürsepp

Muudatused õppekorralduses

- 29. aprilli loeng jääb ära – asendus nädal varem 22. aprillil
 - Samas auditooriumis U06A-229
 - Algusega kell 08:00
- 14. nädala harjutustunnid jäävad ära
 - Soovi korral osaleda 13. nädala tunniplaani järgsetes harjutustundides.
 - Plaanis 3. harjutustunni videosalvestus Moodlesse lisada.



Informatsioon

- Informatsioon – teadmatus vähenemise määr (Üllatuse suurus).
- Teadmised (*knowledge*) – Õigustatud tõene uskumus.
- Andmed (*data*) - muutujate x väärtused.
- 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 (8 bitti), *nibble* (4 bitti)
 - $a = e$: nat
 - $a = 10$: hartley



Allika mudel



Allika mudel

- Tõenäosustabel

j	a_j	$p(a_j)$
1	A	0,216
2	B	0,314
3	C	0,07
4	D	0,11
5	E	0,148
6	F	0,142

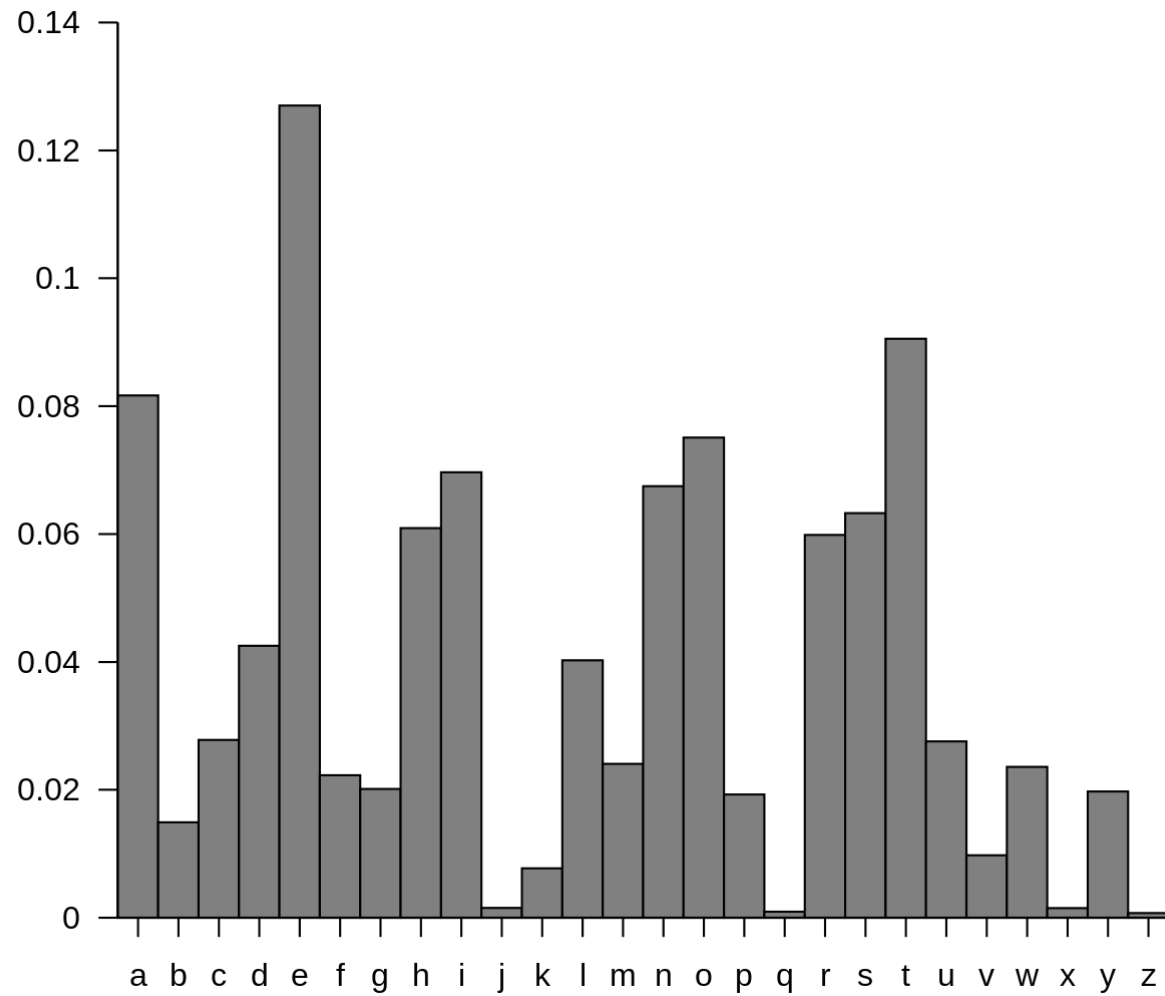
a_j – allika sümbol

$p(a_j)$ – j -inda sümboli esinemise tõenäosus

- Markovi mudel

	$p(a_1)$	$p(a_2)$	$p(a_3)$
a_1	0,7	0,1	0,2
a_2	0,3	0,4	0,3
a_3	0,9	0,06	0,04

Tähtede esinemissagedus ingliskeelses tekstis



Allika Entroopia

- Shannoni entroopia on informatsiooniallika poolt toodetava informatsiooni **keskmine** 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 keskmine **informatsiooni tekkekiirus** on võrdne entroopia $H(A)$ ja sümboli kestuse T_s suhtega:

$$r = \frac{H(A)}{T_s}$$

Kood

- Koodi C all peetakse silmas ühest vastavust allika sümbolite a_j ja neid kirjeldavate digitaalsete sümbolite (koodsõnade) c_j vahel.

USASCII code chart

Bits					Column	0	0	0	0	1	1	1	1
b ₄	b ₃	b ₂	b ₁	Row	0	1	2	3	4	5	6	7	
0	0	0	0	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	&	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	|	
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 **keskmise 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	....

Huffmani kood

- Suurema esinemissagedusega sümbolitele a_j vastavad lühemad koodsõnad c_j .
- Kahele kõike väiksema esinemissagedusega sümbolile vastavad koodid on võrdse pikkusega.
- Huffmani koodi keskmine pikkus:

$$H(A) \leq L \leq H(A) + 1$$

Huffmanian kood

j	a_j	$p(a_j)$
1	A	0,216
2	B	0,314
3	C	0,07
4	D	0,11
5	E	0,148
6	F	0,142

$$H(A) = 2,43 \text{ bitti}$$

a_j	$p(a_j)$
B	0,314
A	0,216
E	0,148
F	0,142
D	0,11
C	0,07

$$L = 2,47 \text{ bitti}$$

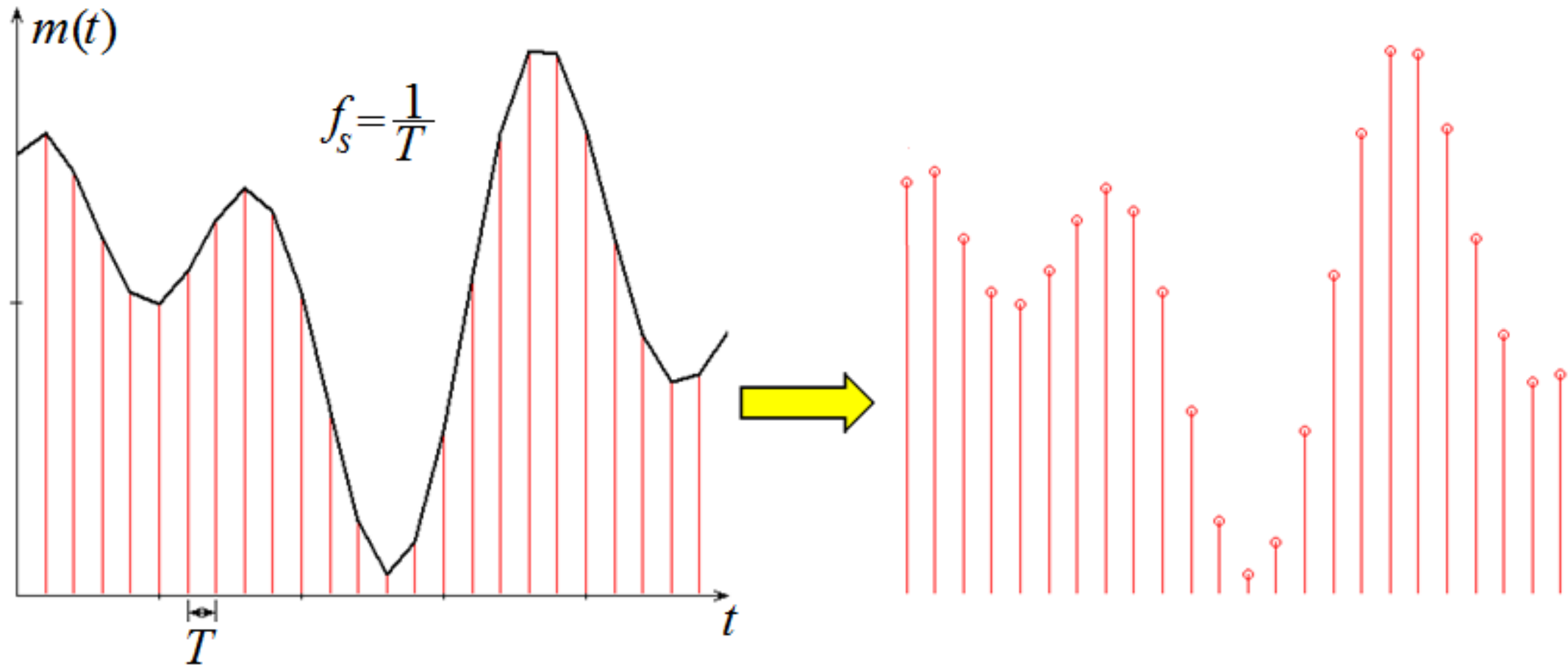
a_j	$p(a_j)$	c_j
B	0,314	11
A	0,216	01
E	0,148	101
F	0,142	100
D	0,11	001
C	0,07	000

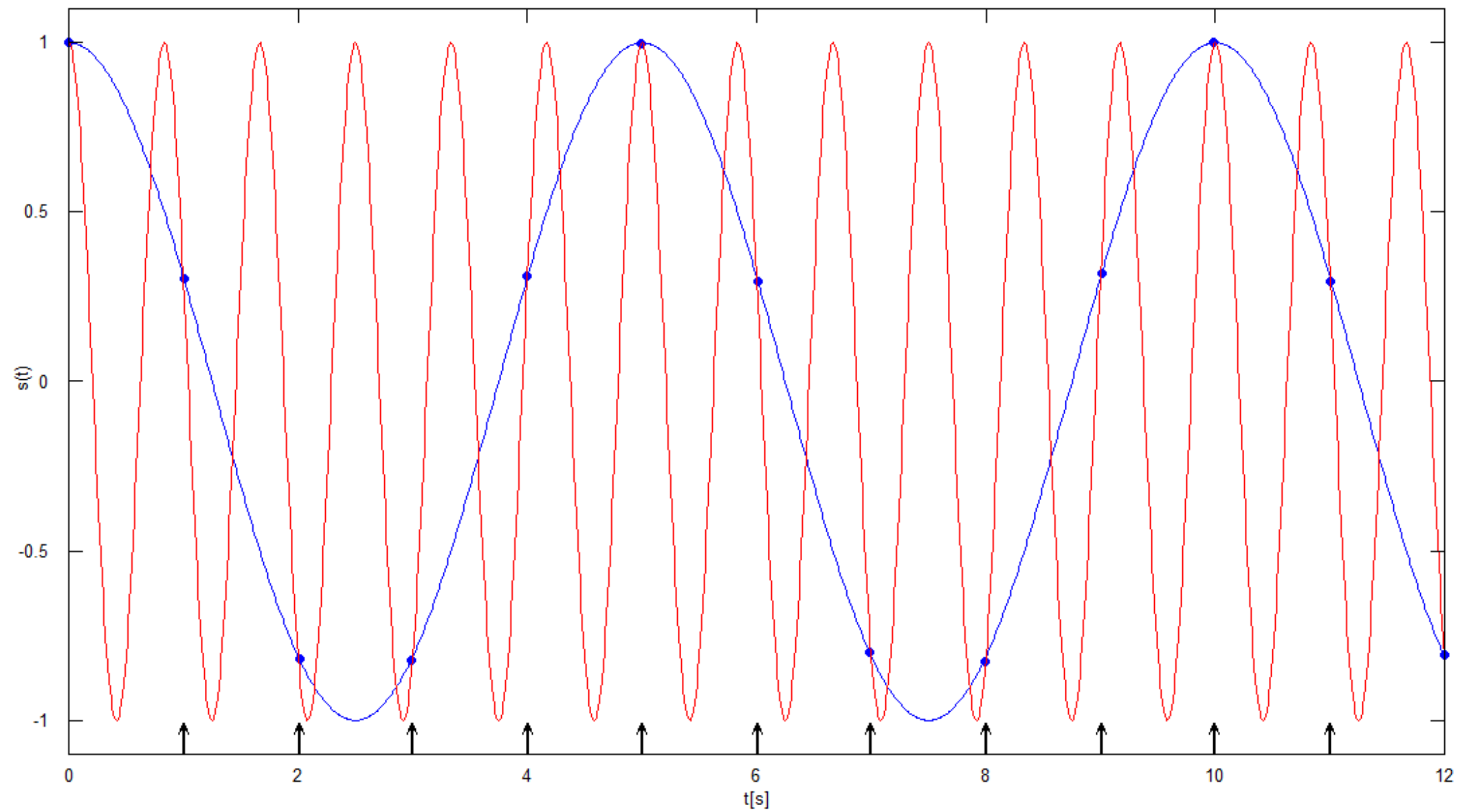
$$D = L - H(A) = 0,04 \text{ bitti}$$

Analoog-digitaalmuundus

- Analoogsignaali pidev argument ja väärtus $s(t)$.
- Esimese sammuna fikseeritakse analoogsignaali väärtus 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

Madala sagedusega
nelinurksignaali



Kõrge sagedusega
nelinurksignaali

Kvantimine

- Signaali väärtus 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} ($-U_m \dots U_m$)

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

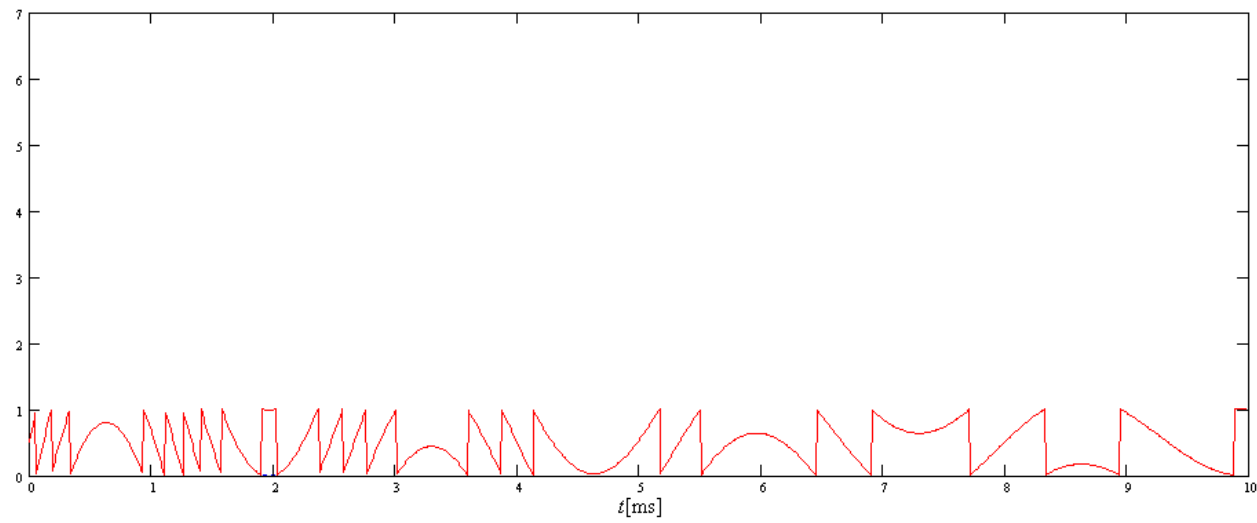
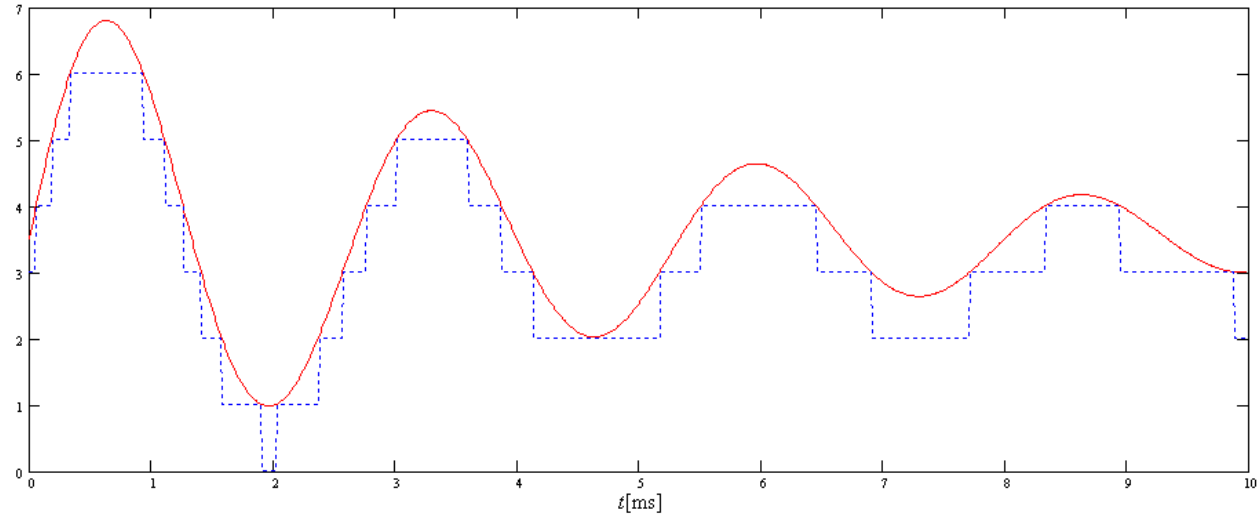
- Kvantimisega kaasneb alati pöördumatu informatsioonikadu, mida iseloomustab kvantimismüra võimsusega

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

- Signaal-kvantimismüra suhe:

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

Kvantimismüra



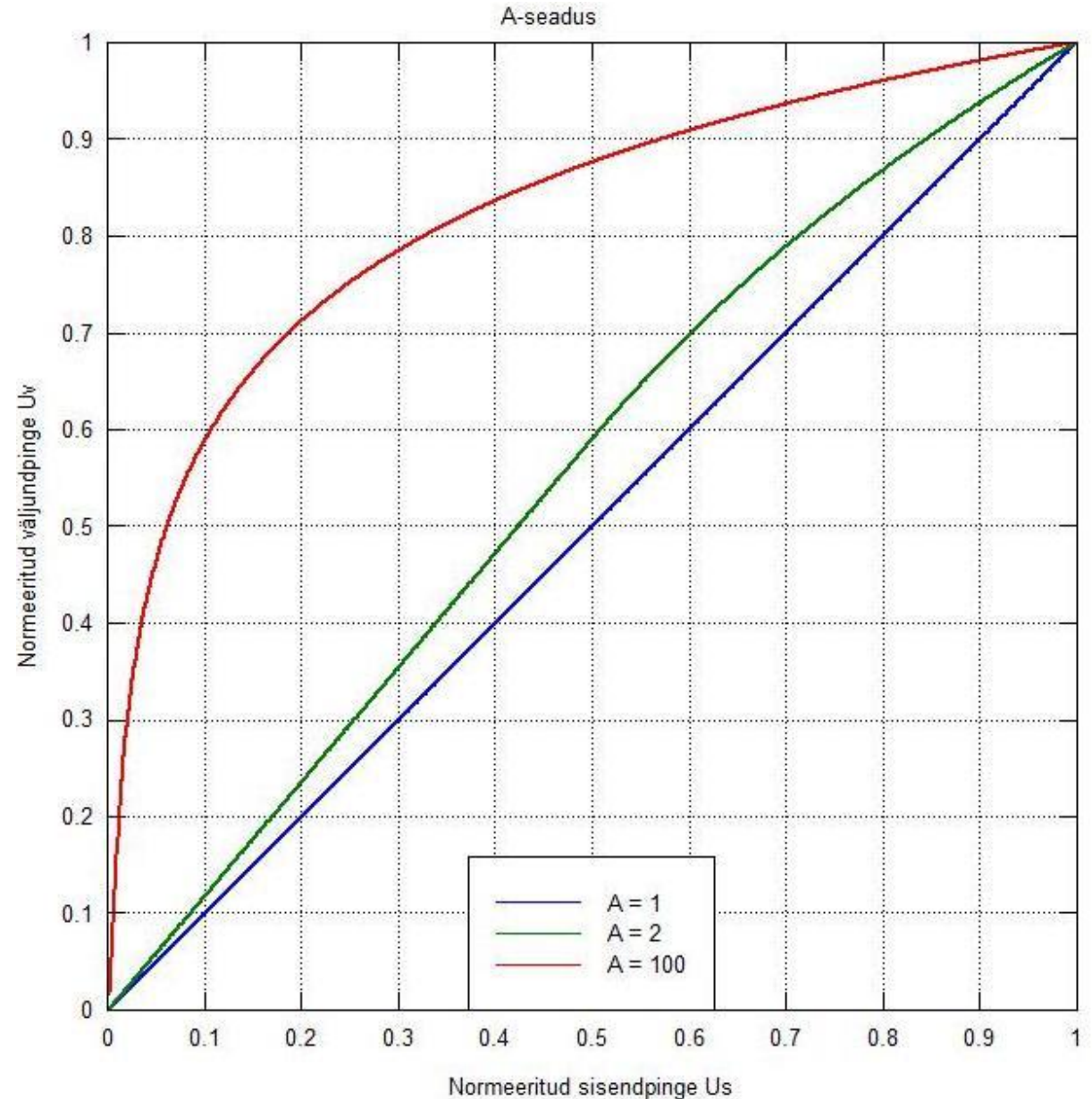
G.711 koodek

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

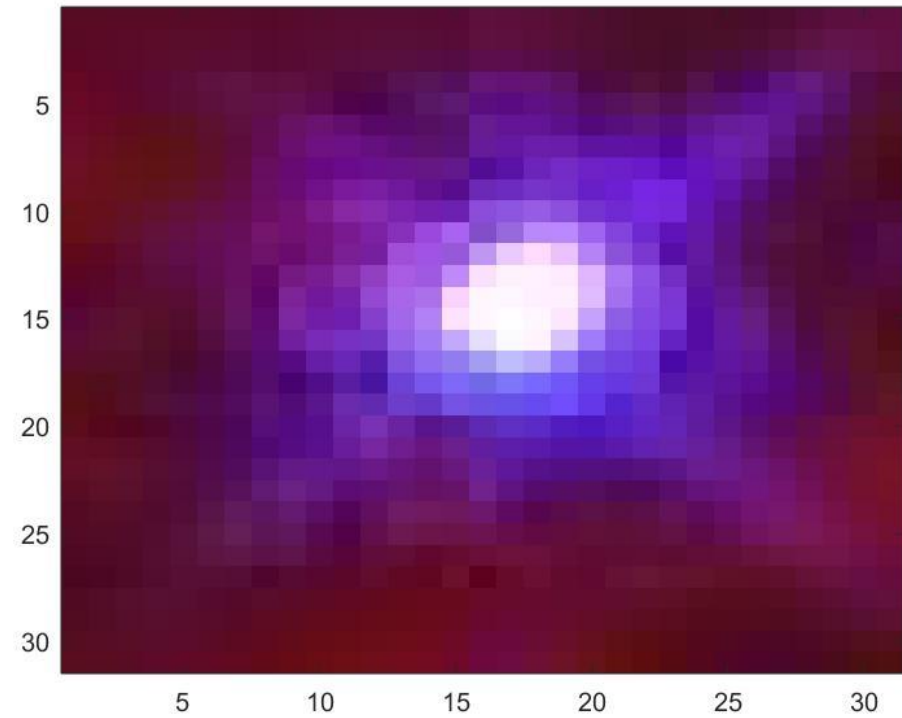
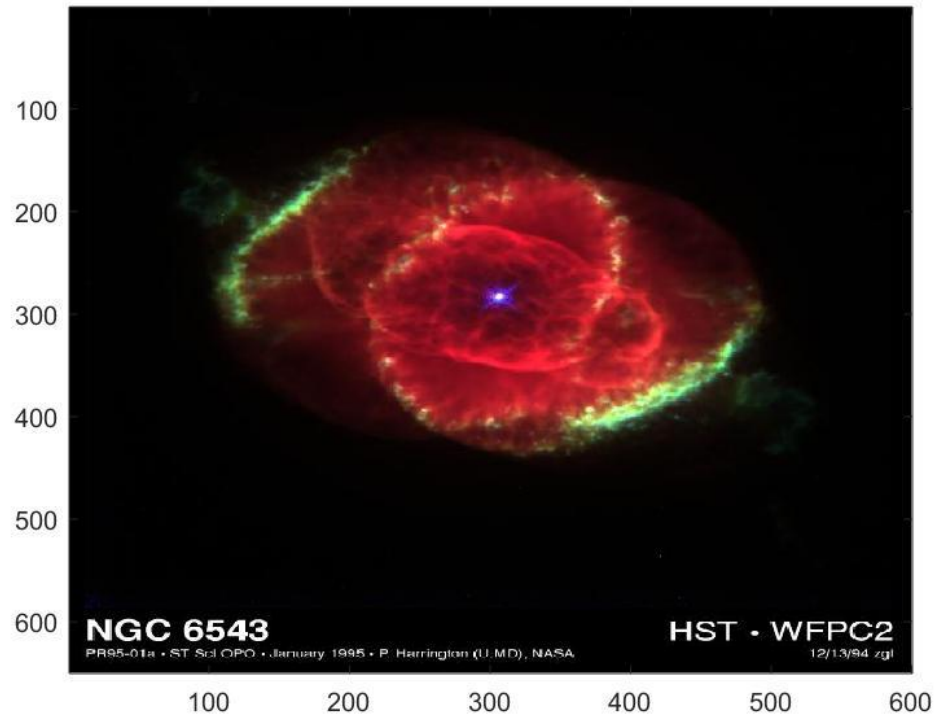
$$|u_v| = \begin{cases} \frac{A|u_s|}{1 + \ln(A)} & 0 \leq |u_s| \leq \frac{1}{A} \\ \frac{1 + \ln(A|u_s|)}{1 + \ln(A)} & \frac{1}{A} \leq |u_s| \leq 1 \end{cases}$$

Normeeritud sisendpinge: $u_s = \frac{u_{sis}}{U_{max}}$

Väljundpinge: $u_{välj} = u_v U_{max}$



Diferentsiaalsete kodeerimine



Diferentsiaalne kodeerimine

Punase värvi heledus:

$$y(n) = x(n) - x(n-1)$$

121	125	135	155	170	132	152	185	188	159
122	118	161	161	151	191	234	255	235	181
132	146	169	160	191	252	255	255	255	224
117	149	169	171	251	255	255	255	255	224
110	132	163	178	255	255	255	255	252	198
120	115	151	162	194	229	251	255	217	160
104	84	128	145	147	163	191	185	150	116
89	72	109	121	128	114	125	120	113	101
106	98	110	101	118	107	104	103	114	100
107	121	106	89	90	94	96	92	81	79

121	4	10	20	15	-38	20	33	121	4
37	-4	43	0	-10	40	43	21	37	-4
49	14	23	-9	31	61	3	0	49	14
107	32	20	2	80	4	0	0	107	32
114	22	31	15	77	0	0	0	114	22
78	-5	36	11	32	35	22	4	78	-5
56	-20	44	17	2	16	28	-6	56	-20
27	-17	37	12	7	-14	11	-5	27	-17
-5	-8	12	-9	17	-11	-3	-1	-5	-8
-7	14	-15	-17	1	4	2	-4	-7	14

YUV kodeering

- Võimaldab värvusinfo suuremat kompressiooni
- Tagas omal ajal ühilduvuse mustvalge ja värvitelevisiooni vahel (analoog).
- Heleduskomponent Y (ITU-R BT.601)

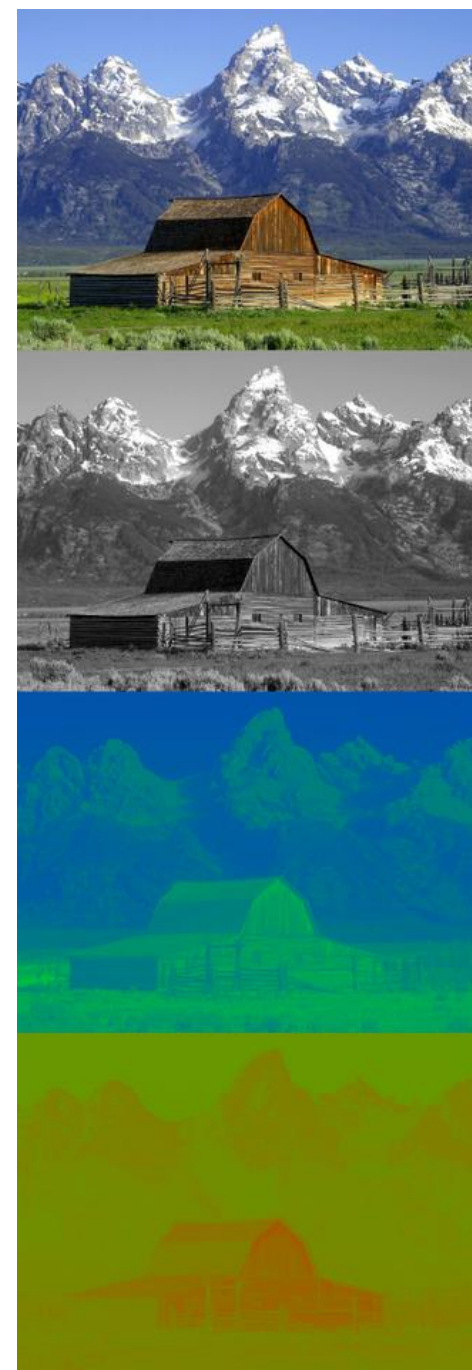
$$Y = 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B$$

- Värvivahesignaaliid U (*blue projection*) ja V (*red projection*)

$$U = 0,492 \cdot (B - Y)$$

$$V = 0,877 \cdot (R - Y)$$

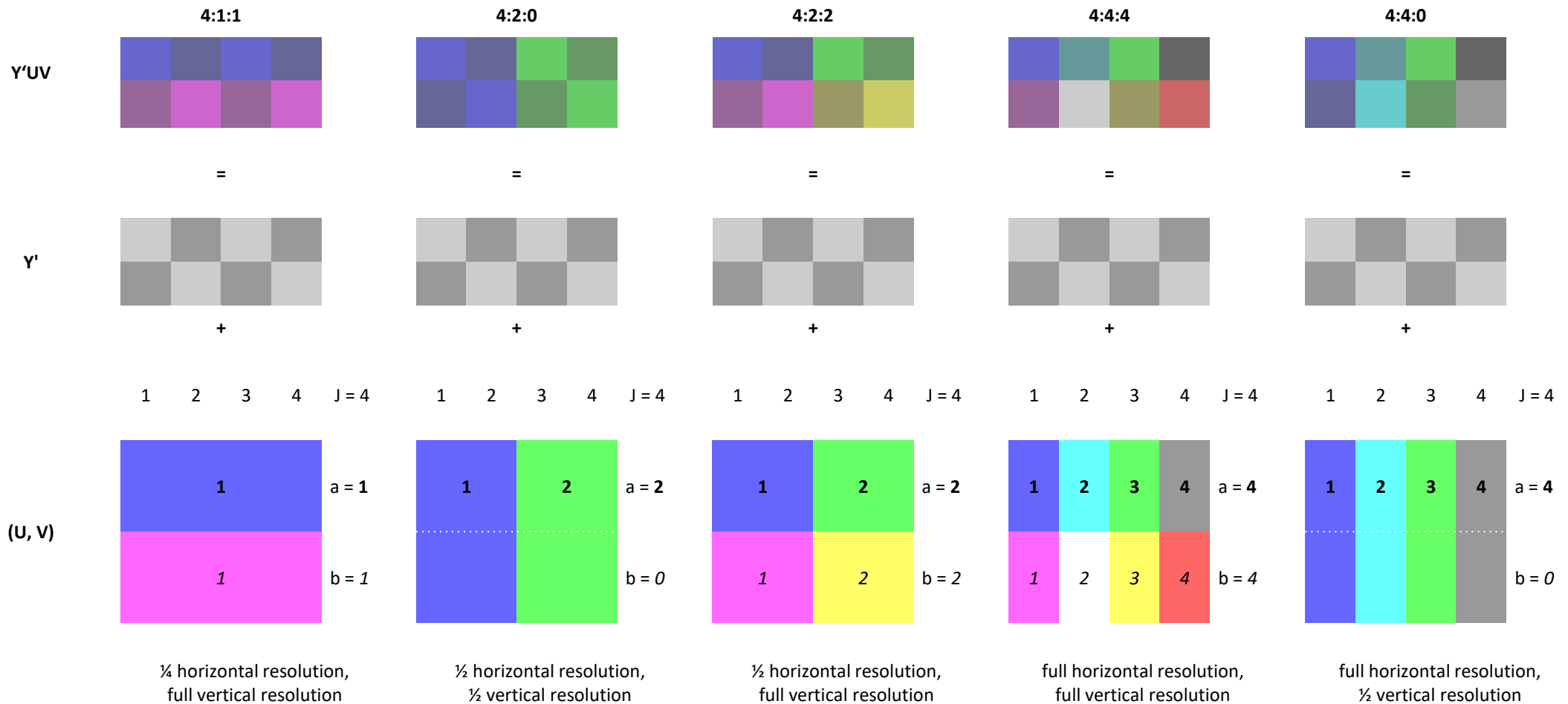
- Digitaaltehnikas $Cb = U$ ja $Cr = V$ (YCbCr)



Värvivahe signaalide aladiskreetimine

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

Värvusinfo skeem (4x2 plokk)





4:1:1



4:2:0



4:2:2

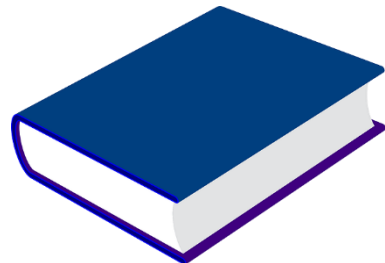


4:4:4



Materjalid

- All About Circuits. Introduction to Digital-Analog Conversion.
<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/digital/chpt-13/digital-analog-conversion/> , 25.03.2019
- 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, 25.03.2019
- K. Sayood. Introduction to Data Compression. 4th edition.
<https://www.sciencedirect.com/book/9780124157965/introduction-to-data-compression>, 25.03.2019 – juurdepäas TTÜ sisevõrgus.



11. Kanali kodeerimine

Arvutivõrgud IEE1100

Ivo Mürsepp

Kanalikihi kaader

- HDLC (*High-Level Data Link Control*) kaader: ISO/EIC 13239:2002

Lipp	Adress	Kontroll	Informatsioon	Kontrollkood	Lipp
1 bait	Vähemalt 1 bait	1 või 2 baiti	N baiti	2 või 4 baiti	1 bait

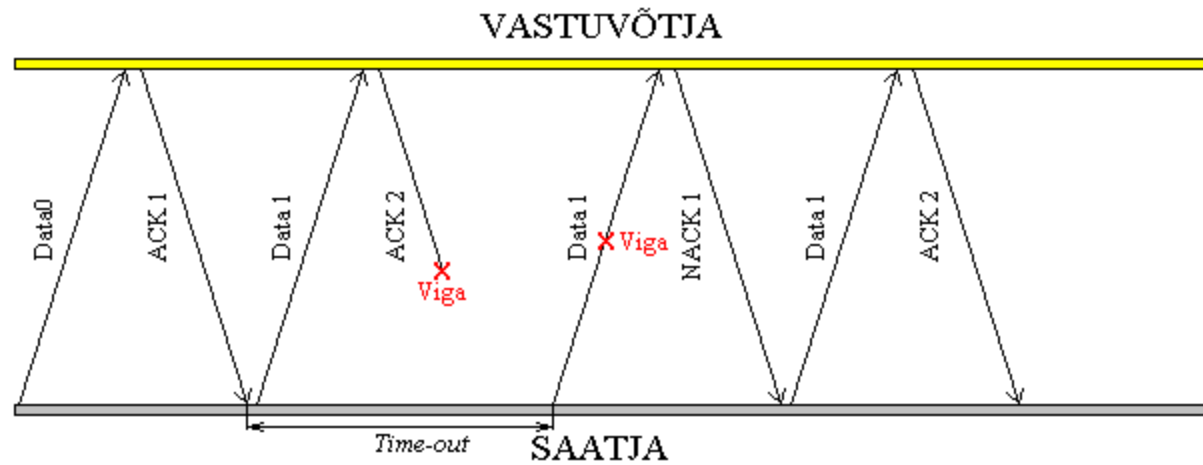
- Etherneti kaader: IEE802.3

Preambul	Lipp	Sihtkoha MAC	Allika MAC	Pikkus	Informatsioon	Kontrollkood
7 baiti	1 bait	6 baiti	6 baiti	2 baiti	46-1500 baiti	4 baiti

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

ARQ – Automatic repeat ReQuest



Vigu parandavad koodid

- FEC – *Forward Error Correction*
- Saavutatakse kontrollitud liiasuse lisamisega.
- Hammingi koodid
 - Kolmkeordselt 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)



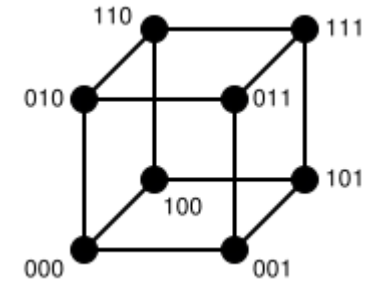
Plokk-kood

- Fikseeritud pikkusega n koodsõnad c_i
- Edastatavale informatsioonile d_i pikkusega k lisatakse kontrollitud liiasus pikkusega $n-k$.

Informatsioon	Liiasus
k	$n-k$

- Kood on **süstemaatiline**, kui koodsõna sisaldab informatsiooni d_i muutmata kujul.
- Kood on **lineaarne**, kui mistahes kahe koodsõna c_i ja c_j liitmisel saadakse samuti koodsõna.

Mõisted



- Hammingi kaal
 - Koodsõna \mathbf{c} Hammingi kaaluks $w\{\mathbf{c}\}$ nimetatakse tema mittenuolliste 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 ülejäänud on paarsusbitid.
- **Koodi kiiruseks** (*code rate*) nimetatakse informatsiooni edastavate bittide arvu k suhet kogu ploki pikkusesse n .

$$R = k/n$$

- Hammingi koodi kiirus

$$R = 1 - \frac{r}{2^r - 1}$$

- 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	<i>d7</i>	<i>d6</i>	<i>d5</i>	<i>p4</i>	<i>d3</i>	<i>p2</i>	<i>p1</i>
<i>p4</i>	x	x	x	x			
<i>p2</i>	x	x			x	x	
<i>p1</i>	x		x		x		x

$$p4 = d7 + d6 + d5$$

$$p2 = d7 + d6 + d3$$

$$p1 = d7 + d5 + d3$$

Sõnum **d**: 1101

$$p4 = d7 + d6 + d5 = 1+1+0 = 0$$

$$p2 = d7 + d6 + d3 = 1+1+1 = 1$$

$$p1 = d7 + d5 + d3 = 1+0+1 = 0$$

Koodsõna **c**: 1100110

Hamming (7,4)

Sõnum **d**: 1101

Koodsõna **c**: 1100110

Veavektor **e**: 0010000

Vigane koodsõna: 1110110

Sündroom:

$$A = p_4 + d_7 + d_6 + d_5$$

$$B = p_2 + d_7 + d_6 + d_3$$

$$C = p_1 + d_7 + d_5 + d_3$$

Leiame sündroomi **s**:

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

$$B = p_2 + d_7 + d_6 + d_3 = 1+1+1+1 = 0$$

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

$$\text{Sündroom: } s = 101_2 = 5$$

Bitt numbriga 5 ehk d_5 on vigane!

Parandatud koodsõna **c**: 1100110

Hamming (7,4)

- Genereeriv matriks

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

- Genereeriva matriksi ridade arv on võrdne sõnumi \mathbf{d} bittide arvuga k , veergude arv on aga võrdne koodsõna \mathbf{c} pikkusega n ($k \times n$ matriks).
- Sõnumile \mathbf{d} vastav koodsõna \mathbf{c} leitakse korrutisena:

$$\mathbf{c} = \mathbf{dG}$$

Paarsuskontrolli maatriks

- Kasutatakse sündroomi arvutamiseks – vigade tuvastamine.
- Paarsuskontrolli maatriksil on n rida (koodsõna \mathbf{c} pikkus) ja $n-k$ veergu (paarsusbittide arv).
- Sündroom \mathbf{s} leitakse

$$\mathbf{s} = \mathbf{cH}$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

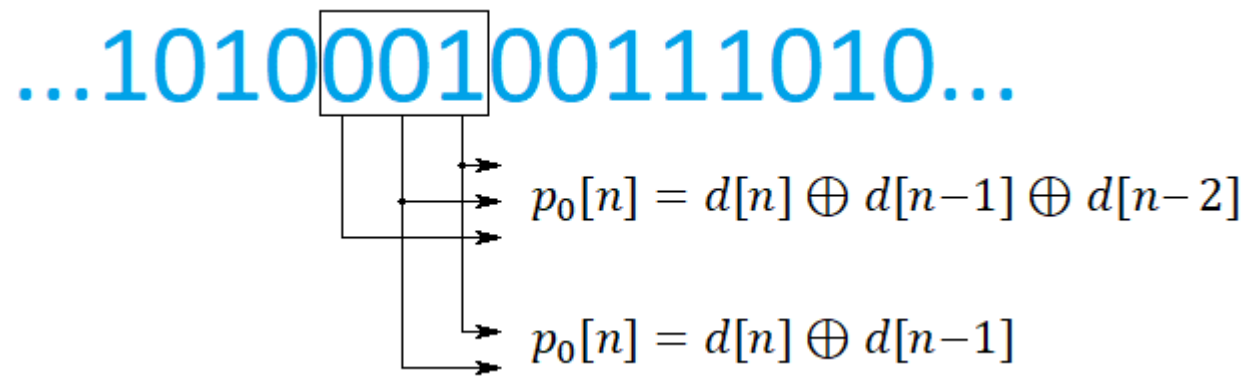
Hamming (7,4) – lubatud koodsõnad

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
- Koodi kaugus $h_{min} = 3$

Konvolutsioonilinsed koodid

- Moodustavad lisaks plokk-koodidele teise suure koodide klassi.
- Pikkus pole fikseeritud, kodeerimine reaajas, ei ole vaja oodata, kuni teatud arv (plokk) sümboleid koodrisesse saabub.
- Väljund sõltub eelmistest sümboolitest – mäluga kood.

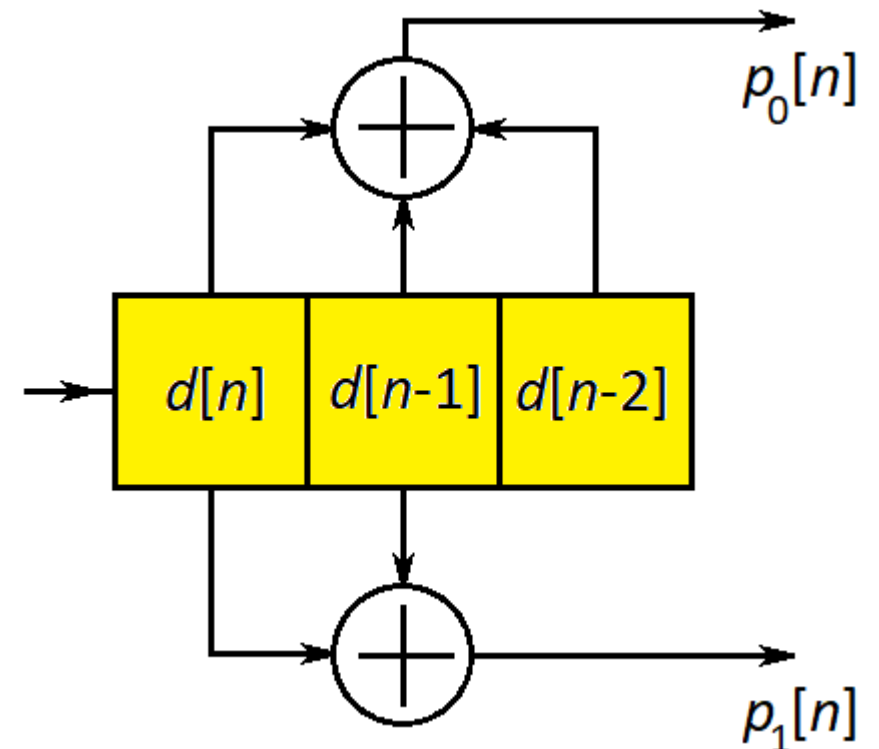


Konvolutsiooniline kood

- Paarsusbittide väärtused:

$$p_i[n] = \left(\sum_{j=0}^{K-1} g_j[n]d[n-j] \right) \text{mod} 2$$

- Koodri pikkus (*constraint*) K
- g_j nimetatakse genereerivaks polünoomiks
 - $g_0 = (1,1,1)$, $g_1 = (1,1,0)$
 - $g_0 = x^2+x+1$, $g_1 = x^2+x$
- Koodi kiirus $R = 1/m$, kus m on summaatorite arv.



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 ehk 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

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

Block interleaver

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

Shse___NOdänaiVmdaie

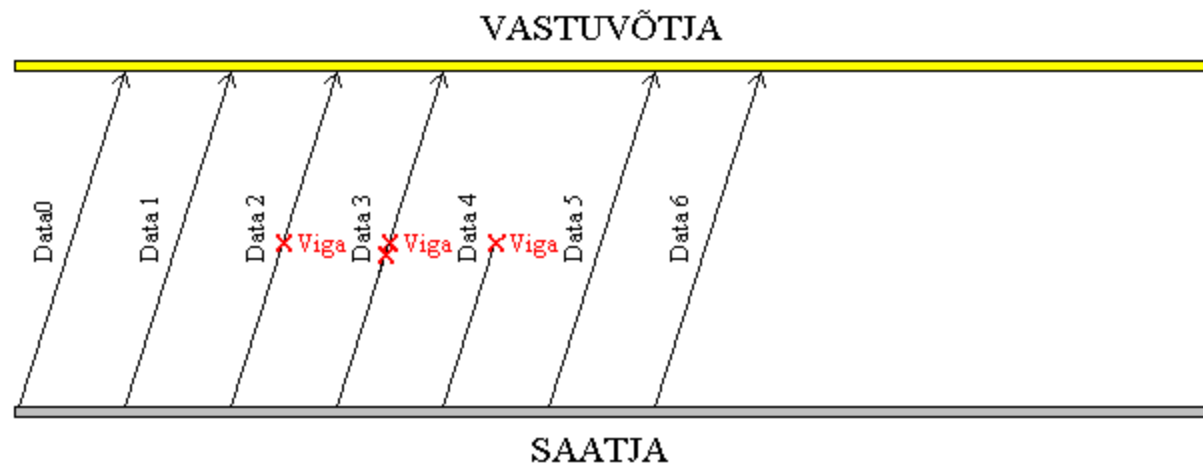
- Vastuvõtjas on täidetud tabel kujul:

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

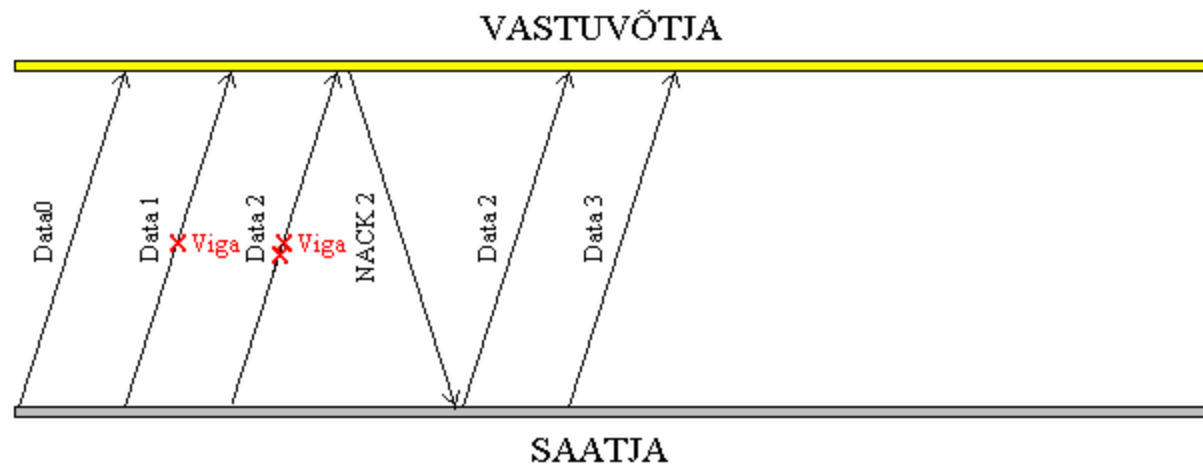
- Näeme, et veapurse on peale sümbolite õige järjekorra taastamist jaotunud ühtlasemalt sõnumi peale laiali:

Se_OnVah__daamis_Näide

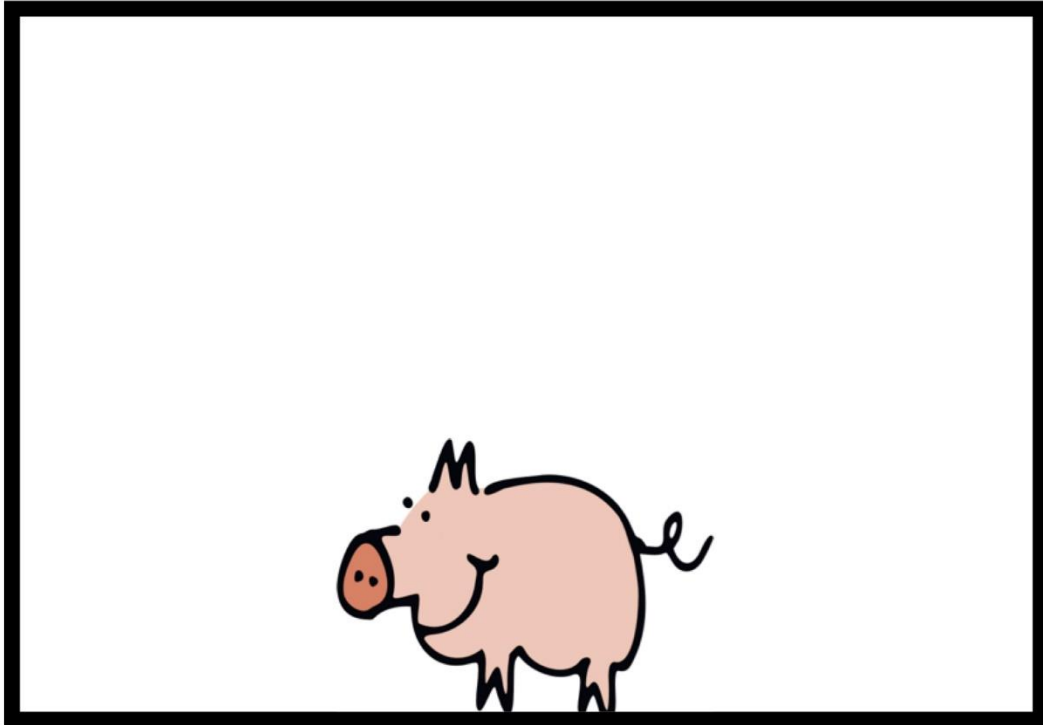
FEC – *Forward Error Correction*



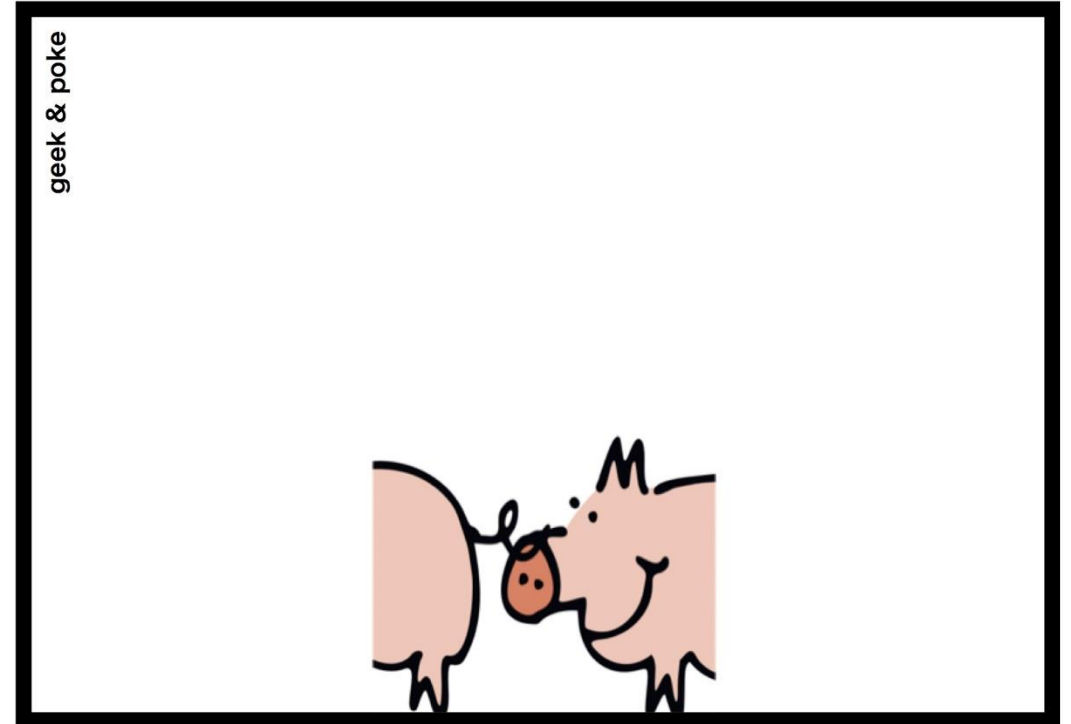
HARQ- *Hybrid Automatic repeat ReQuest*



SIMPLY EXPLAINED



BIG-ENDIAN

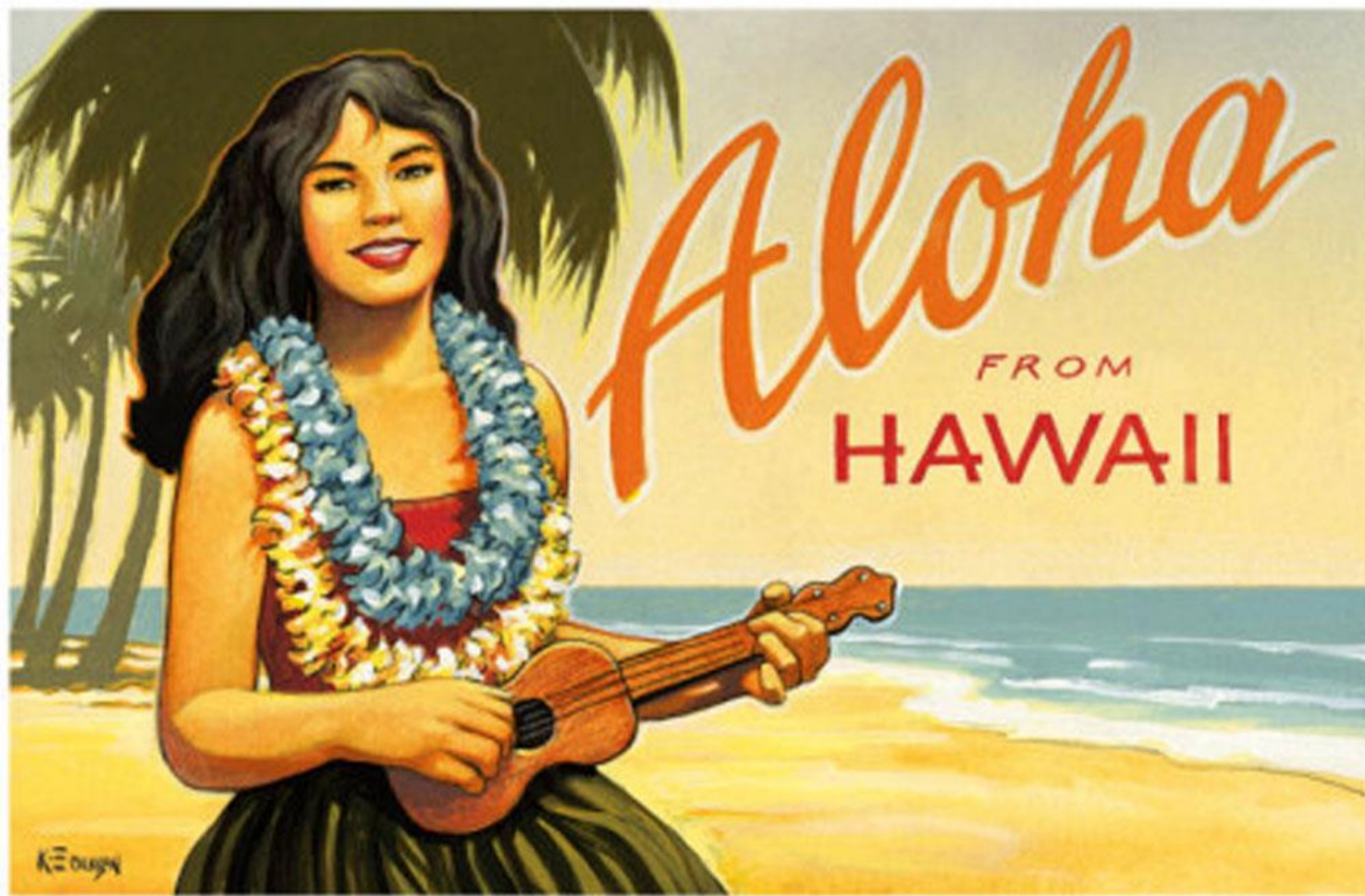


LITTLE-ENDIAN

Biti- ja baiditaitmine (*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“ järele 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 oktetite ette. Lisaks invertteeritakse vastava oktetite viies bitt.

Hulgipöördus



Puhas ALOHA

- Edasta kaader millal tahad.
- Peale kaadri edastust oota kinnitust *ACK* aja t_{max} jooksul

$$t_{max} > \frac{2 \cdot l_{max}}{v}$$

- Kui kinnitust *ACK* ei saabu, siis edasta kaader uuesti.
- Kui N katse järel kinnitust ei saabu, siis loobu kaadri edastusest.

- Maksimaalne kanali kasutus **18%**
- Pesastatud ALOHA korral **37%**

CSMA

- Kuula, kas keegi teine edastab (meedium vaba ?).
- Kui meedium on vaba, siis edasta kaader.
- Kui meedium ei ole vaba, siis oota juhuslikult valitud aja jooksul ja seejärel alusta uuesti esimesest punktist.
- Alternatiiv (järjekindel CSMA): Kui meedium ei ole vaba, siis kuula edasi. Alusta kaadri edastamist niipea kui meedium vabaneb.

CSMA/CD

- Kuula, kas keegi teine edastab (meedium vaba?).
- Kui meedium on vaba, siis edasta kaader.
- Kui meedium ei ole vaba, siis kuula edasi. Alusta kaadri edastamist niipea kui meedium vabaneb. Kuulamist jätkatakse ka edastamise ajal.
- Kui tuvastatakse kokkupõrge (*collision*) siis edasta lühikene teavitussignaal (*jamming*) ja lõpeta seejärel edastus.
- Oota juhuslikult valitud aja (*backoff*) jooksul ja seejärel alusta uuesti esimesest punktist.

Meediapöördus raadiovõrgus

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



Lisaks lugeda

- *William Stallings. Data and Computer Communications* 8th edition. Peatükk 7 Data Link Control Protocols. lk 207 – 228.
- Erkki Laaneoks. **Sissejuhatus võrgutehnoloogiasse**. 6 ptk. **OSI kanalikiht**.
- **Hamming Codes – How it Works**.
<https://www.gaussianwaves.com/2008/05/hamming-codes-how-it-works/>,
05.04.2019
- **CRC veebikalkulaator**:
http://www.sunshine2k.de/coding/javascript/crc/crc_js.html, 05.04.2019

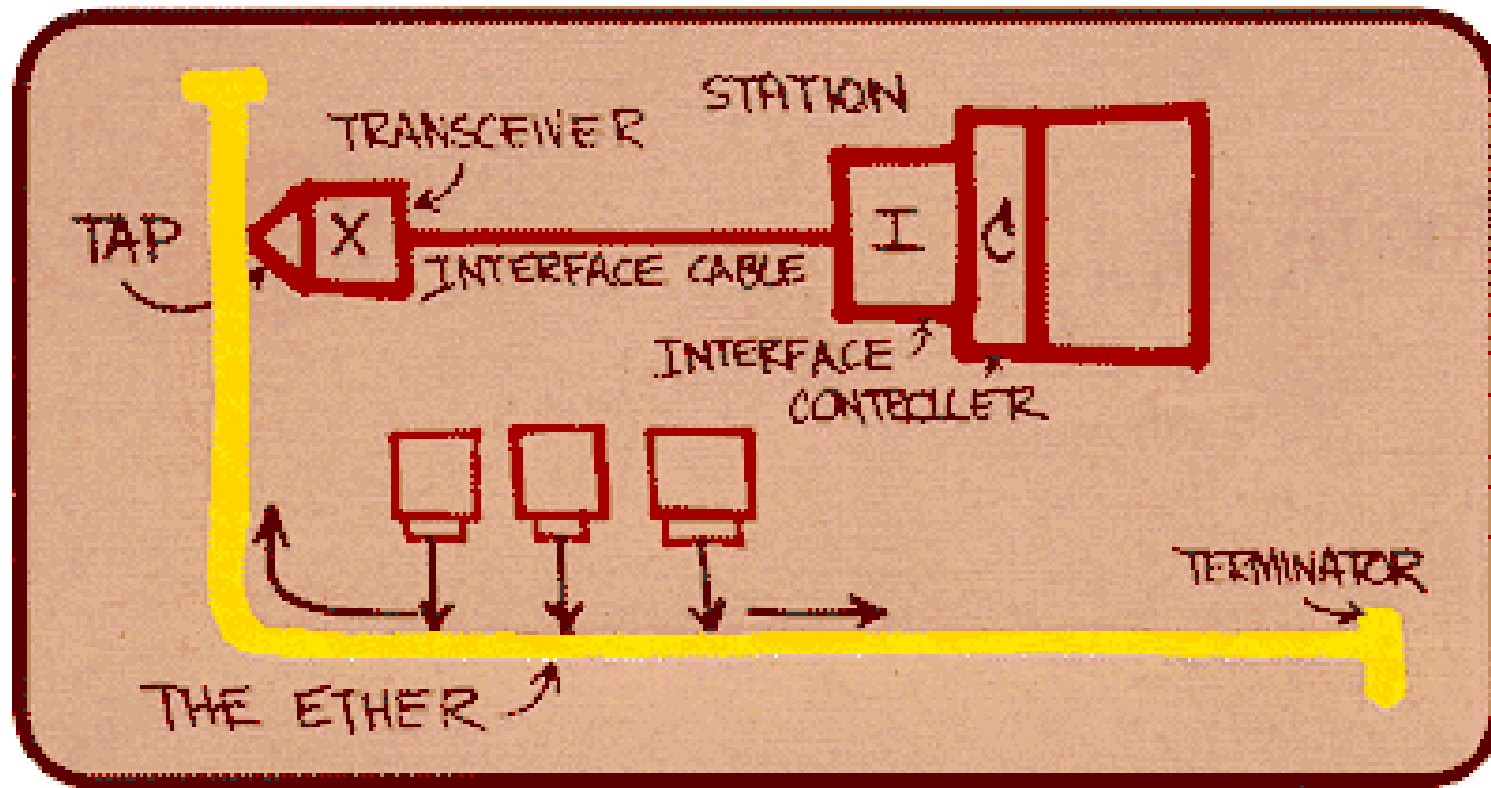
13. Sidekanal

Arvutivõrgud IEE1100

Ivo Mürsepp

10BASE5

- Robert M. Metcalfe



Vaskkaabel

- Keerdpaar



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

- Koaksiaalkaabel



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

Vaskkaabli parameetrid

- Karakteristlik impedants Z_0
 - Terminaator
- Kiirustegur VF (*Velocity Factor*)

$$v = VF \cdot c$$

- Sumbumus

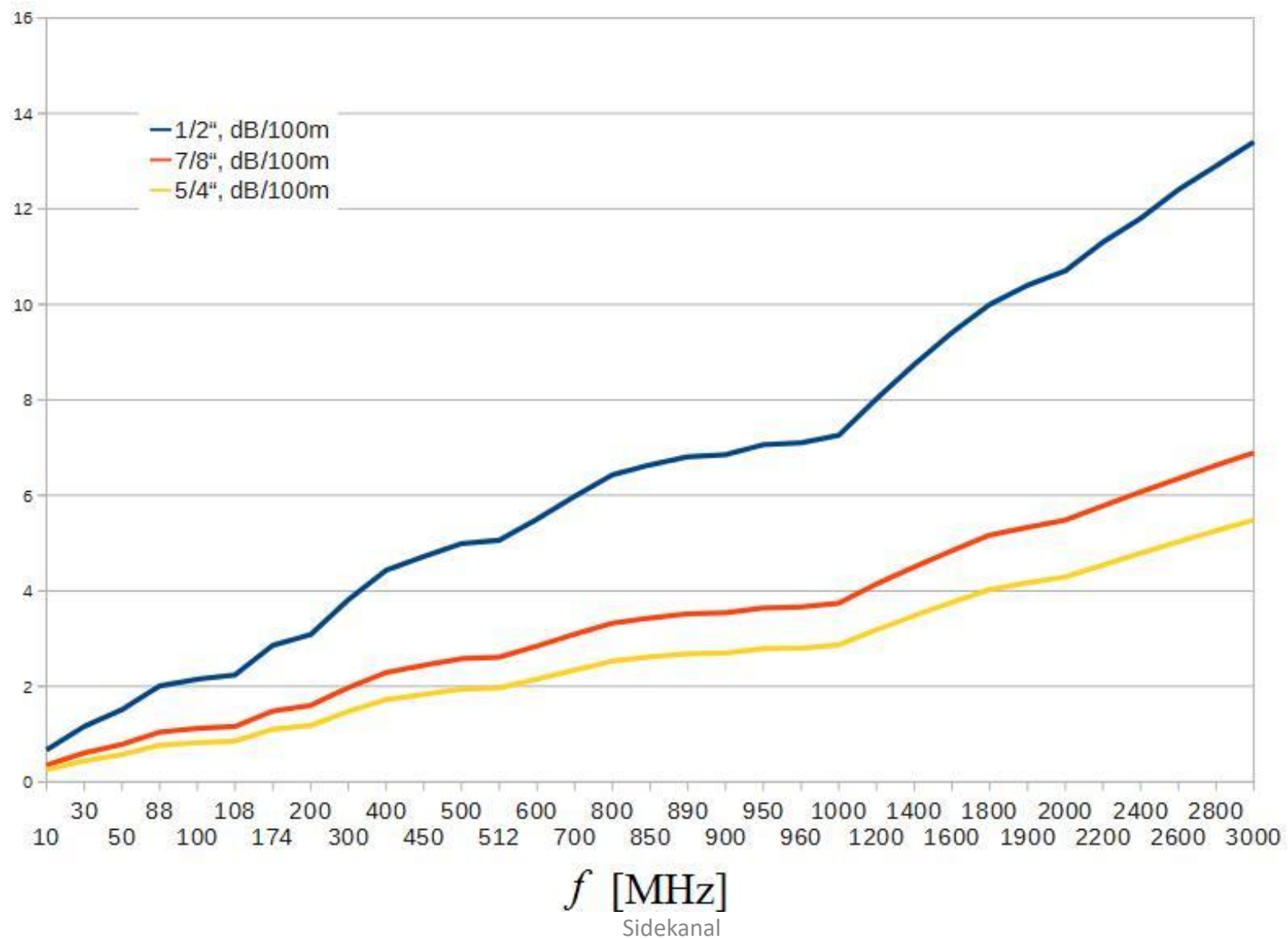
$$K = 10 \cdot \log \frac{P_v}{P_s}$$

- Sõltub sagedusest
 - Antakse üldjuhul pikkusühiku kohta [dB/m]
- Läbikoste (*Crosstalk*)

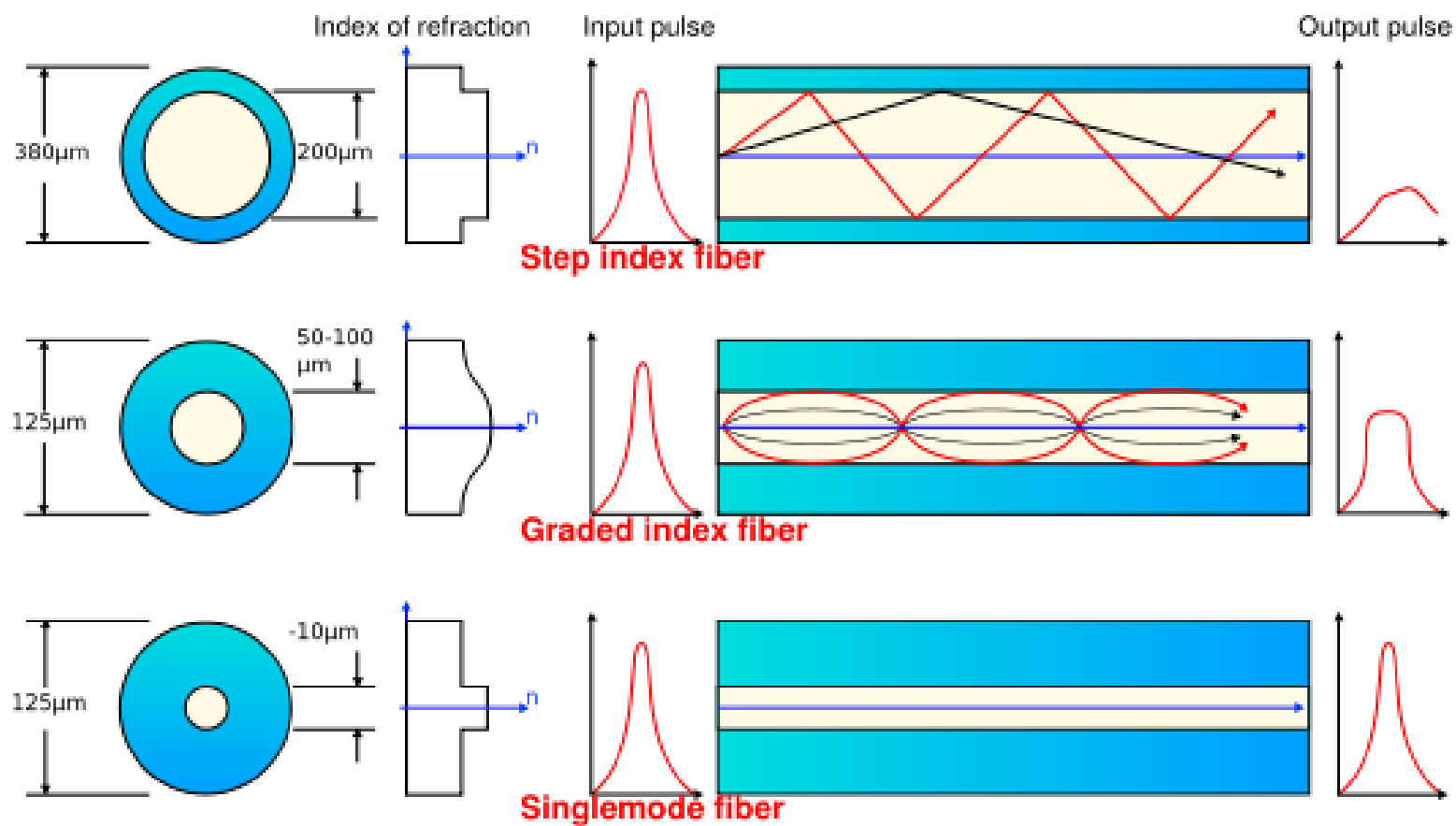
$$NEXT = -20 \log \frac{U_n}{U_s}$$



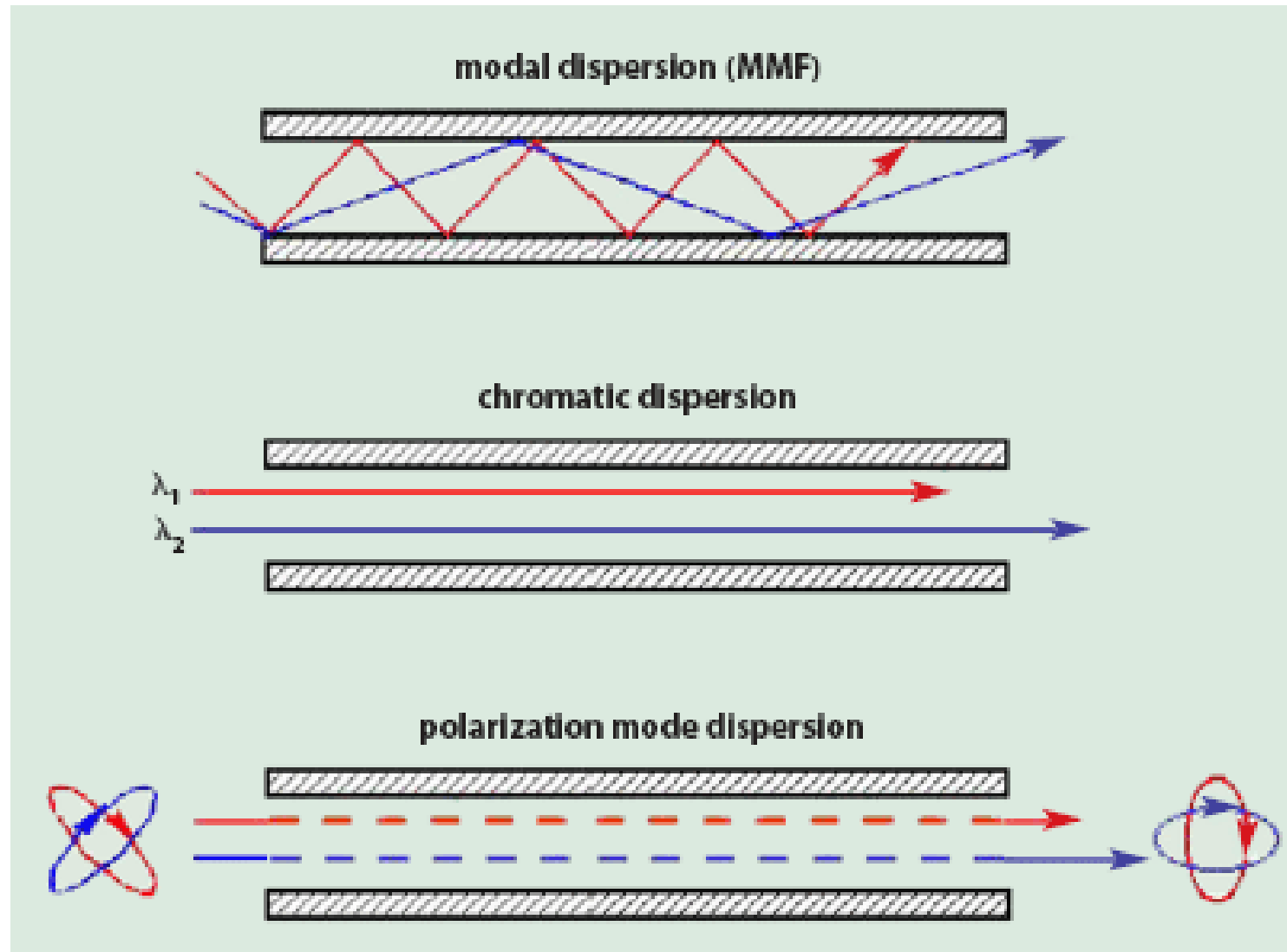
Kaabli Sumbumus



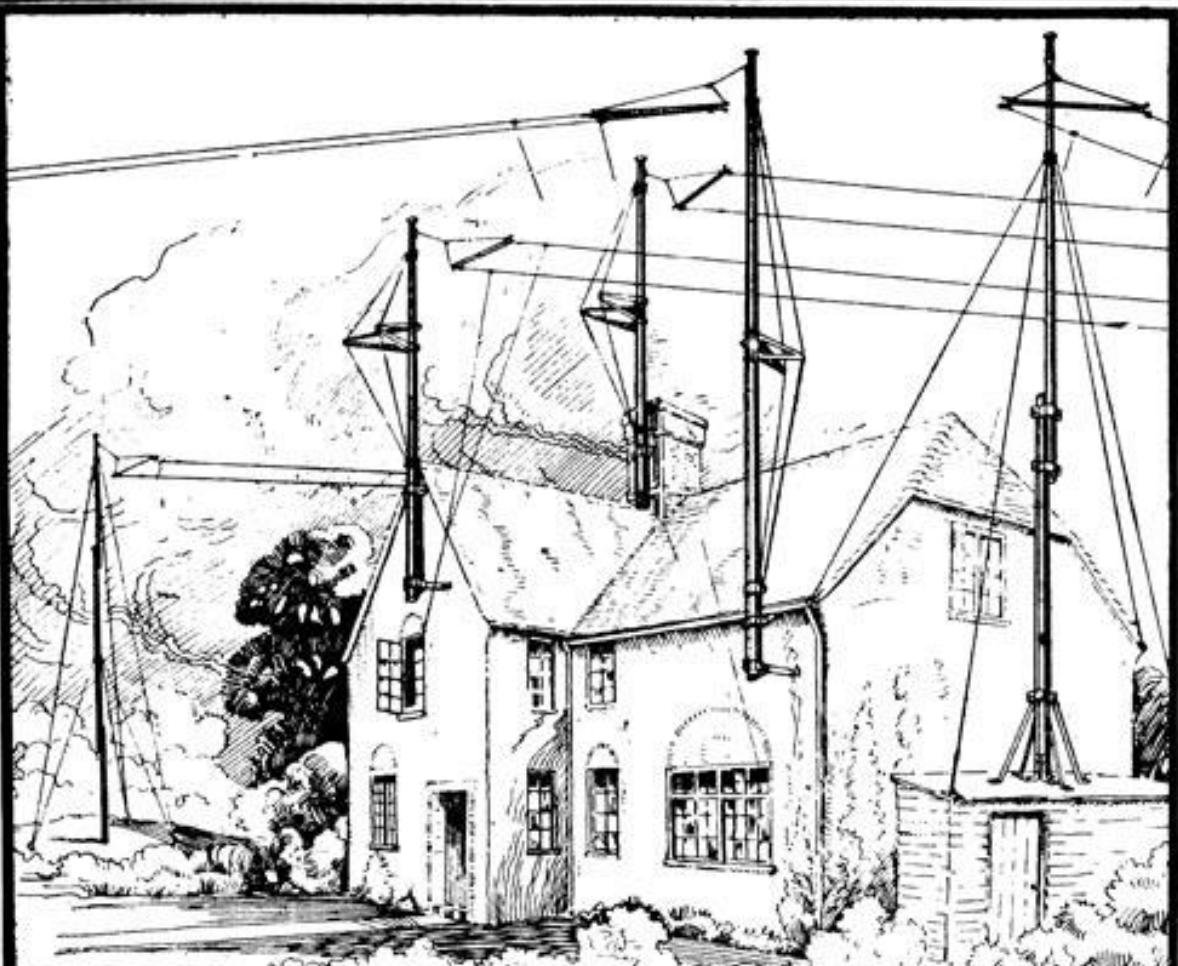
Fiiberoptiline kaabel



Dispersioon optilistes kaablites



Raadiokanal



The illustration shows a two-story house with a gabled roof. Several tall, vertical masts are mounted on the roof, with horizontal cross-arms and various pulleys and wires extending from them. The scene is rendered in a detailed, etched style with cross-hatching for shading. The sky is filled with clouds, and there are some bushes and a tree in the foreground.

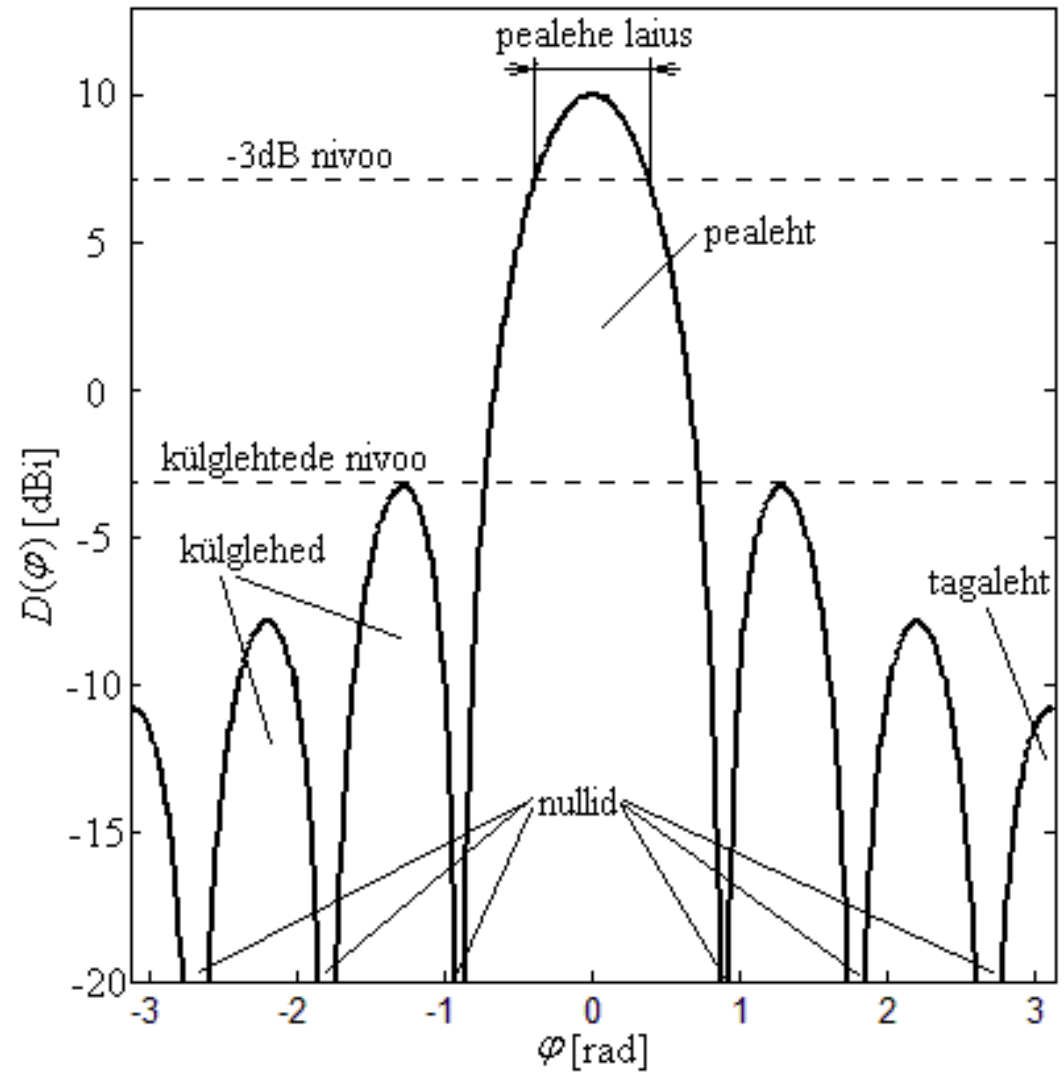
TURRET-ROOF MASTS FOR WIRELESS

Regd. and patent applied for. | **SIMPSON & BLYTHE,** | Send for list to S. & B. or agents.
STANLEY HOUSE, 8 & 9, Sherwood St., PICCADILLY

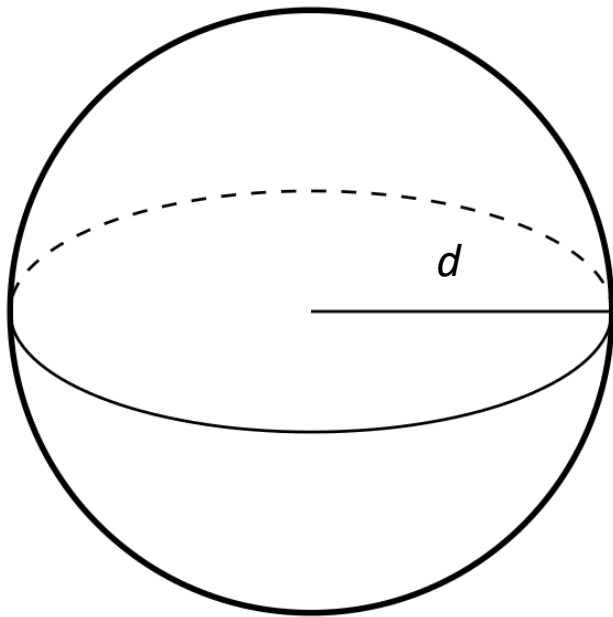
Antenn

- Antenn on seade mis muundab elektrivoolu energia 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 $f_{min} \cdot f_{max}$ (ribalaius B)
 - Suunadiagramm $D(\theta, \varphi)$
 - ...

Antenni suunadiagramm



Friis'i valem



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

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

Lingi bilanss

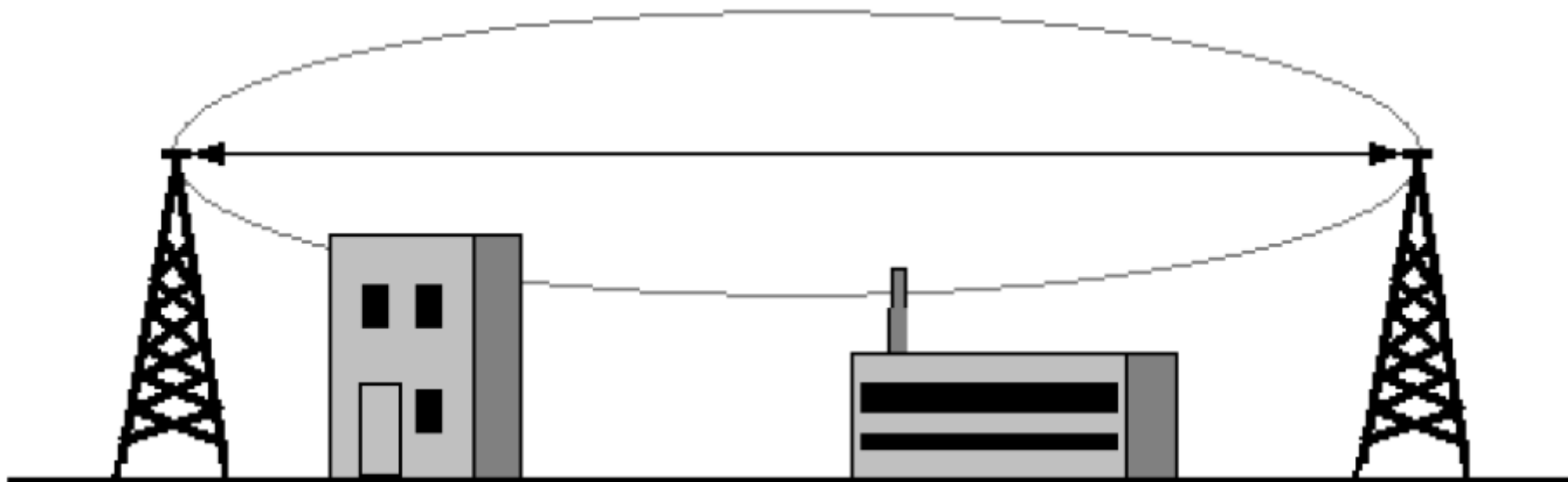
- Friisi valemi esitus logaritmilisel kujul:
 - Saatja võimsus P_S [dBm]
 - Võimsus vastuvõtja sisendis P_{VV} [dBm]
 - Mõnikord kasutatakse võimsuse mõõtühikuna ka dBW
 - Saate G_S - ja vastuvõtuantenni G_{VV} võimendused [dBi]
 - Vaba ruumi kadu FSL [dB]

$$FSL = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

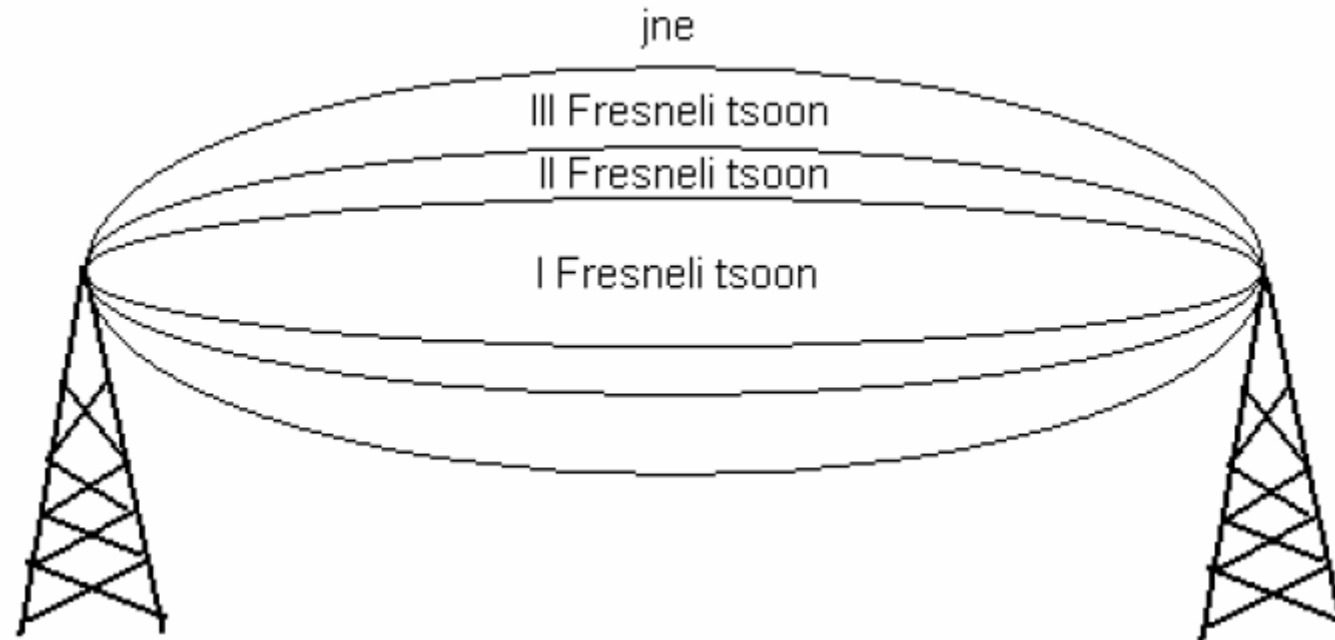
- Muud kaod L [dB]

$$P_{VV} = P_S + G_S + G_{VV} - FLS - L$$

Fresneli tsoon

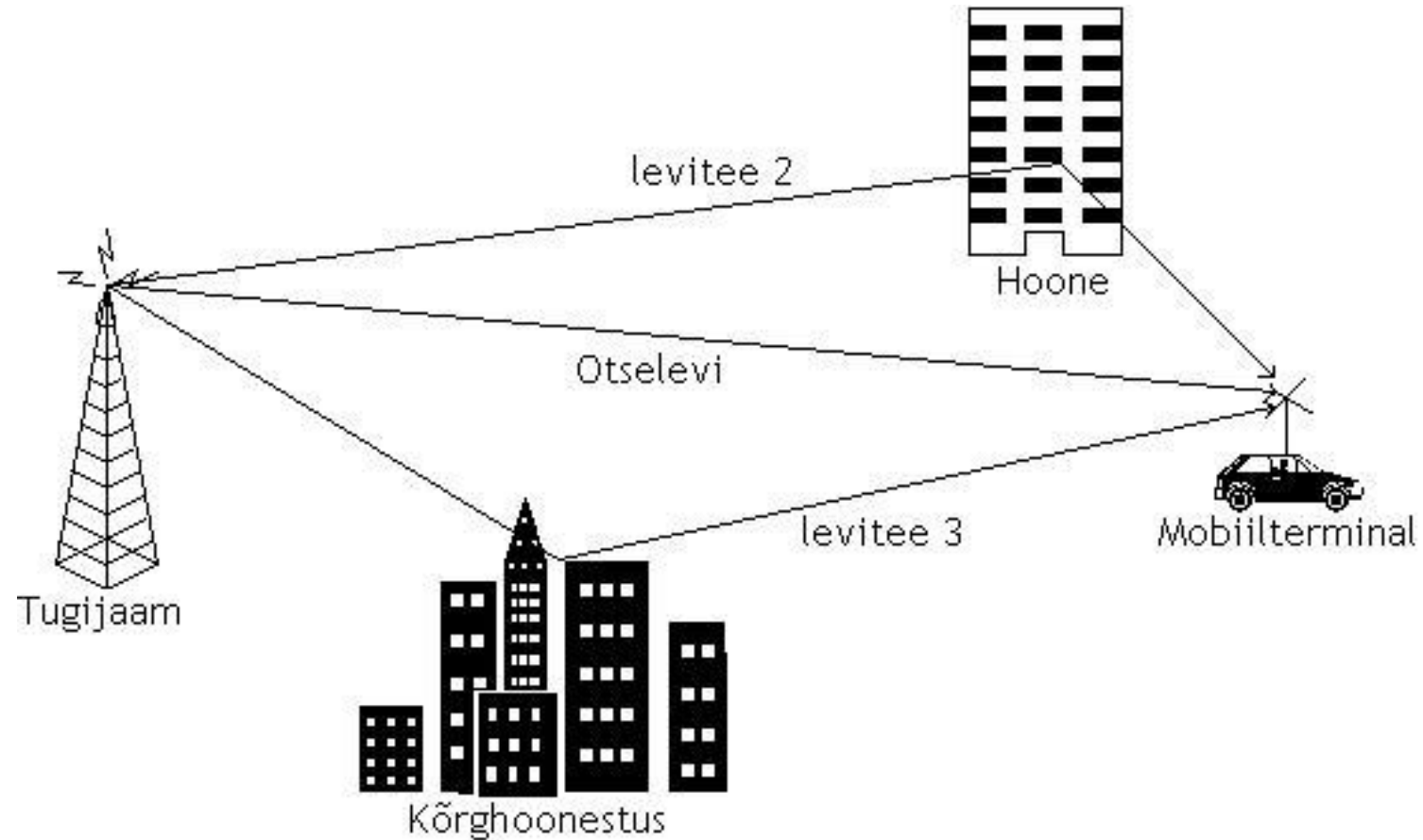


Fresneli tsoonid

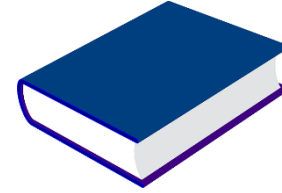


$$d_1 = \sqrt{\lambda \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}}$$

Mitmekiireline levi



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.

12. Modulatsioon

Arvutivõrgud IEE1100

Ivo Mürsepp

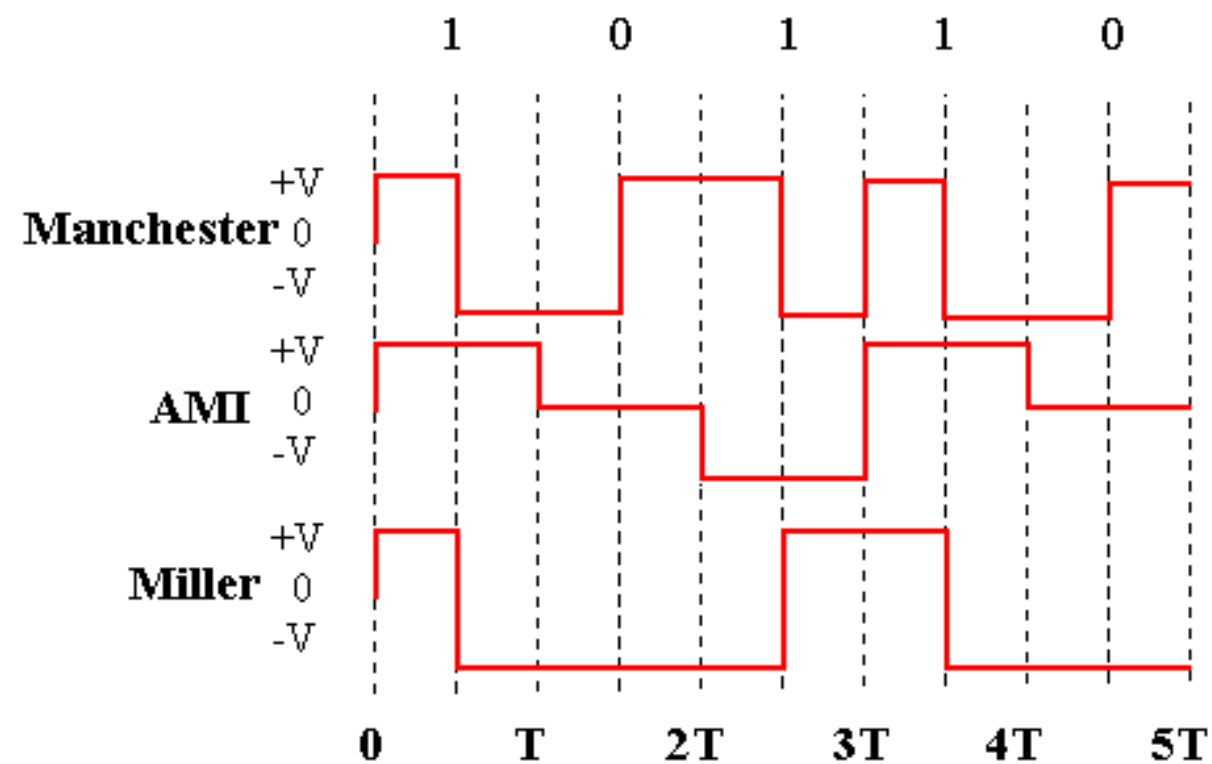
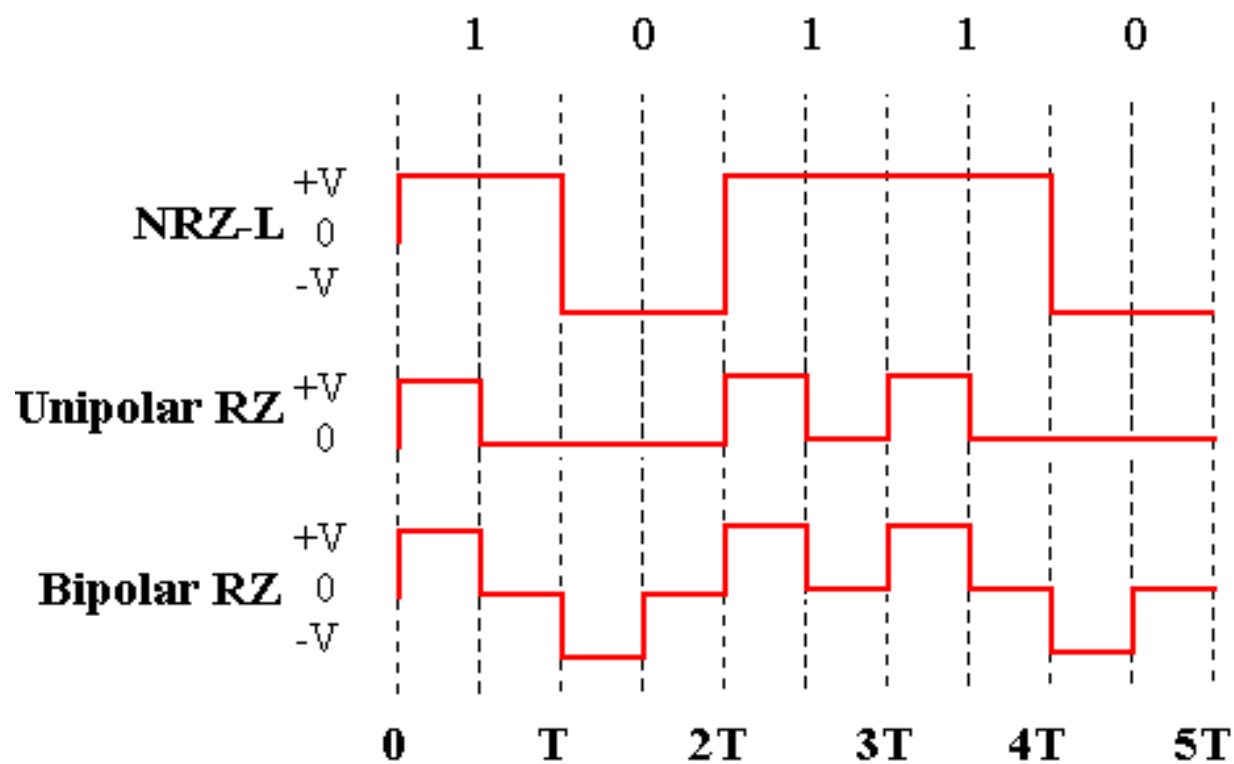
Liinikood

- Vastavust digitaalkujul andmete a_k ja neid kujutavate impulss-signaalide $p(t)$ vahel nimetatakse **liinikoodiks**.
- Digitaalne signaal $s(t)$ liinis:

$$s(t) = \sum_k a_k p(t - kT_s)$$

kus T_s on sümboli kestus.

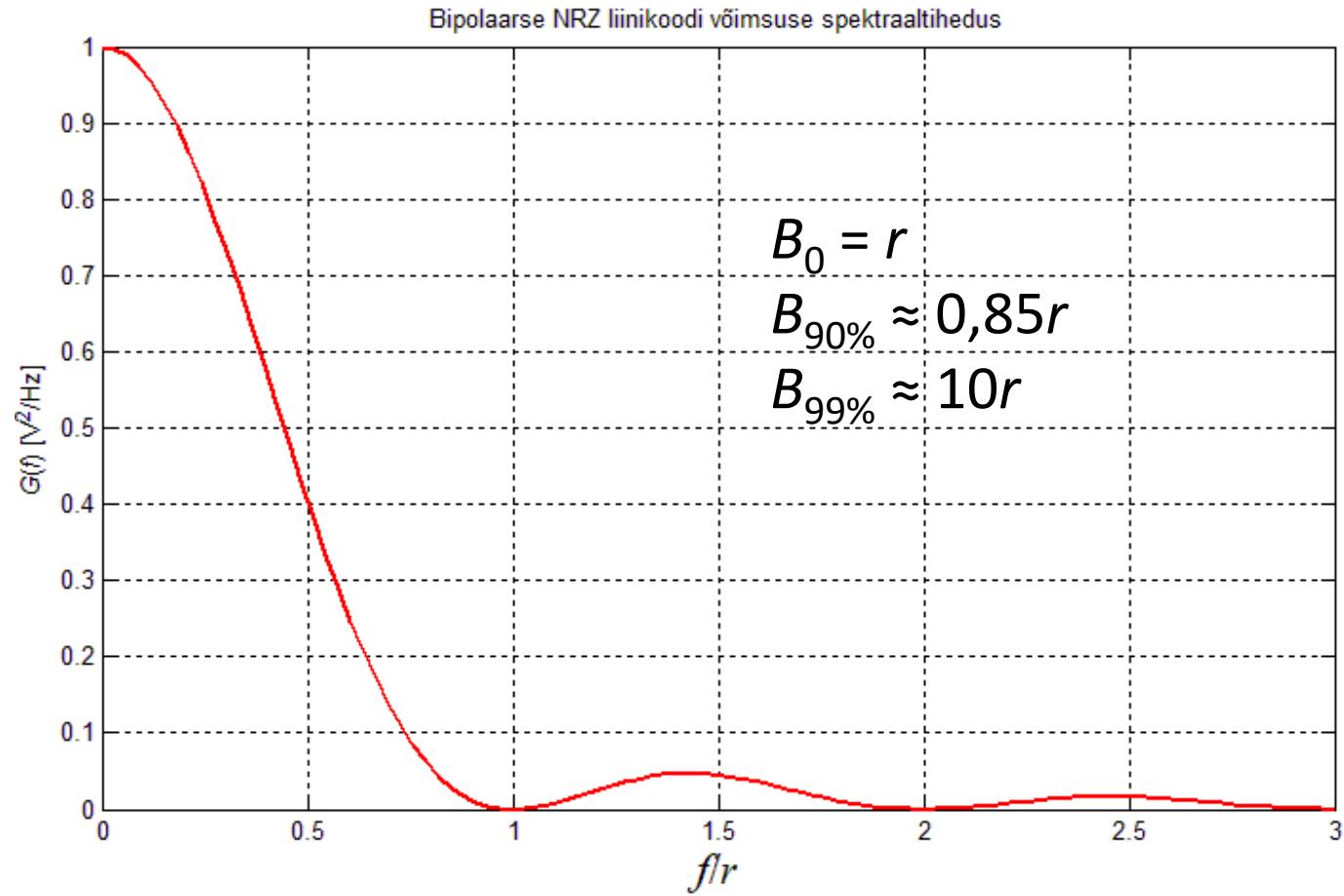
Liinikoodid



Liinikoodide võrdlemine

- Signaali spektri kuju (sagedusriba B kasutamise efektiivsus)
- Tundlikus häirete ja mürade suhtes - veakindlus
- Vigade tuvastamise võimalused
- Sünkroniseerimise lihtsus
- Rakendamise hind ja keerukus

Liinikoodi spekter



Hartley seadus

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

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

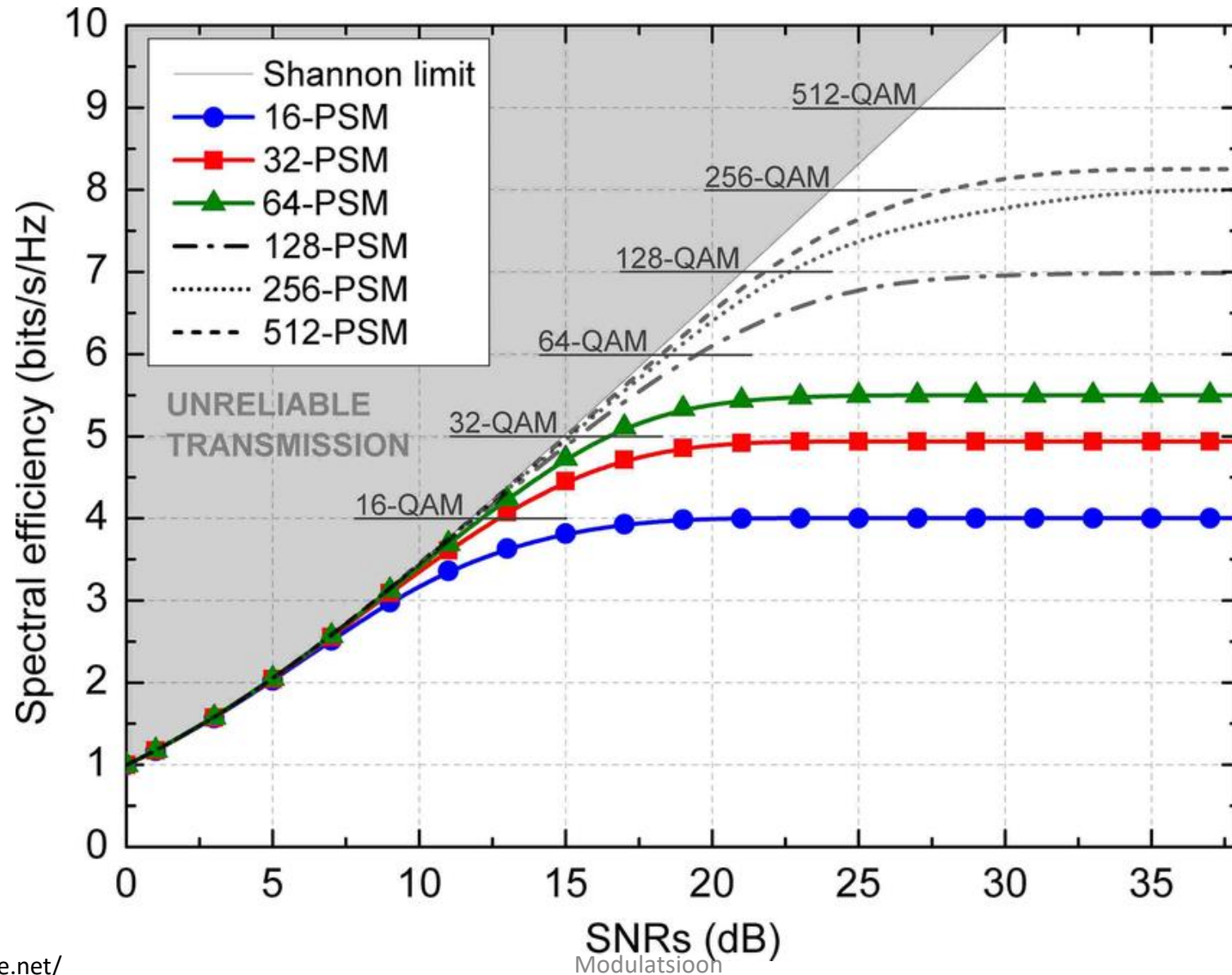
- Võttes arvesse ka Shannon – Hartley seadust saame kas..
- Maksimaalse sümbolite arvu kanalis etteantud signaal-müra suhte korral:

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

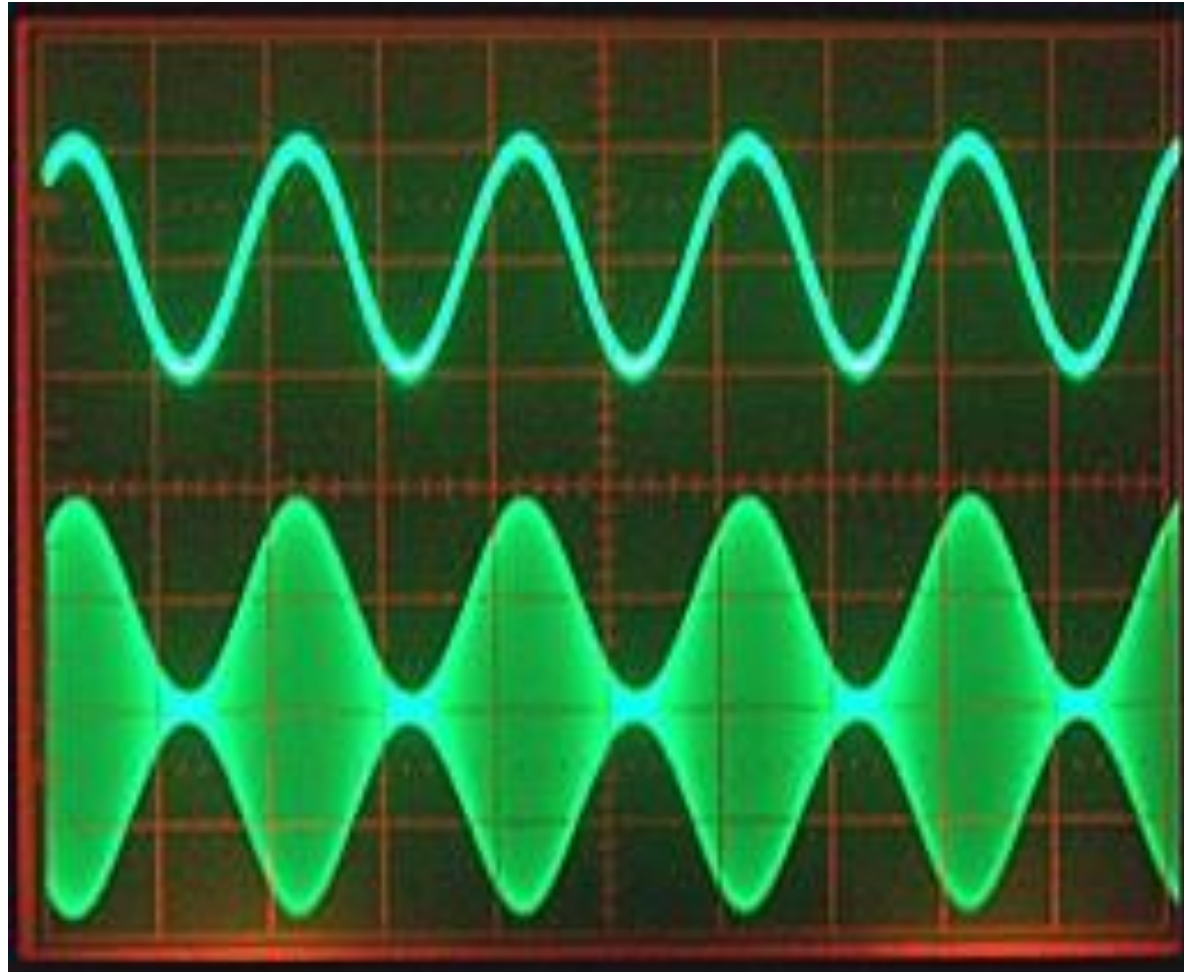
- Vajaliku signaal-müra suhte M erineva sümboli edastamiseks:

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

Spektraalefektiusus



Modulatsioon



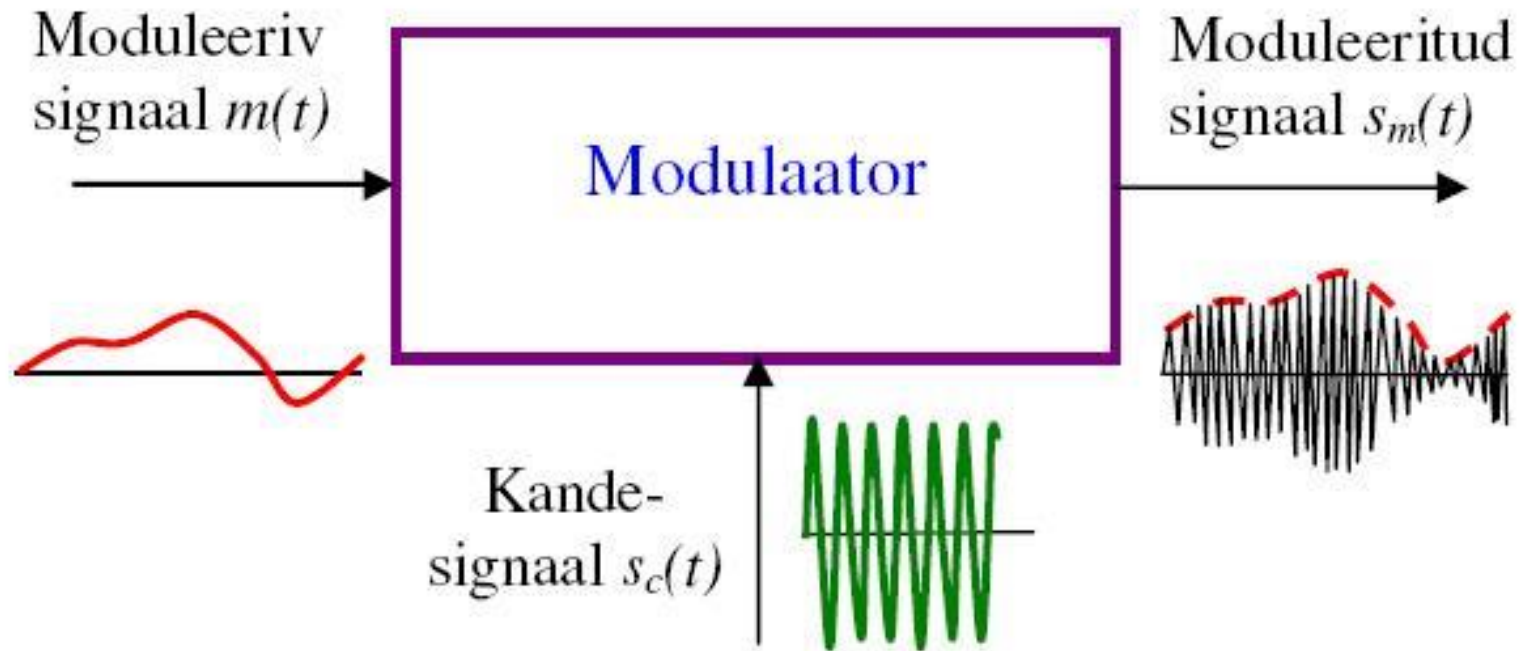
Modulatsioon

- **Modulatsioon** on informatsiooni edastamiseks kasutatava füüsilise nähtuse (elektrivool, elektromagnetväli jne.) mingi parameetri muutmine vastavalt ülekantava signaali muutustele.
- Modulatsioon raadio- ja sidetehnikas on kõrgsagedusliku elektrivõnkumise (kandesignaali $s_c(t)$) või impulsijada mingi parameetri muutmine tunduvalt madalama sagedusega moduleeriva signaali $m(t)$ rütmis.
- Modulatsiooniga kaasneb signaali $m(t)$ esialgse kuju oluline muutus ja tema spektri üleminek teisele sagedusele.

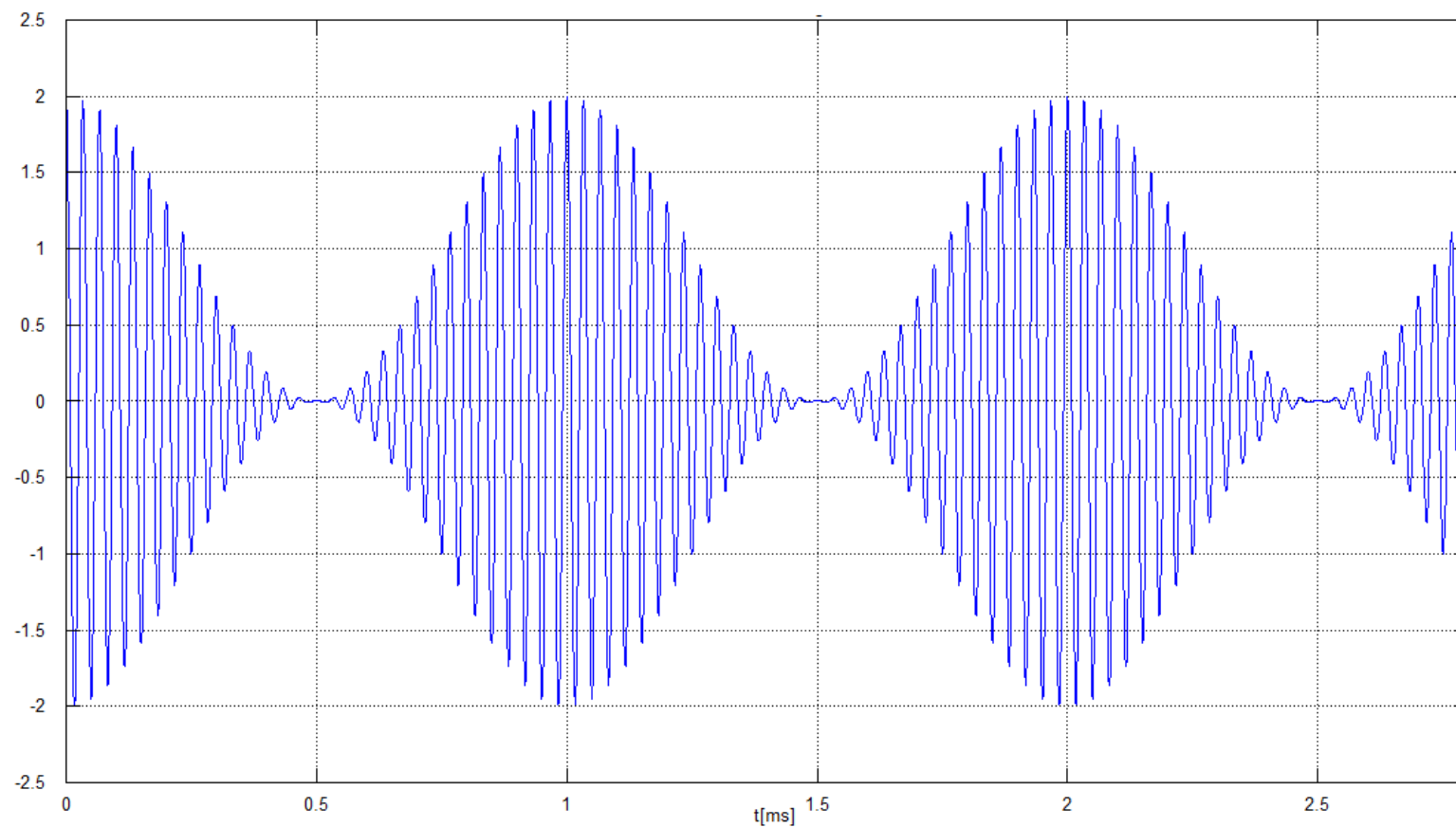
Moduleerimise eesmärgid

- Võimaldab edastada signaali $m(t)$ kanalis mille sagedusomadused on piiratud.
- Vähendada edastatava signaali $m(t)$ kuju või mõne tema olulise parameetri moonutusi edastusel.
- Võimaldada mitme signaali samaaegset edastamist ühes kanalis: sagedustihendus FDMA (*Frequency Division Multiple Access*)
- Kokkuvõtlikult võib öelda, et modulatsiooni eesmärgiks on võimalikult suure hulga informatsiooni võimalikult kvaliteetne ülekanne piiratud sagedusribas piiratud energia abil.

Modulaator



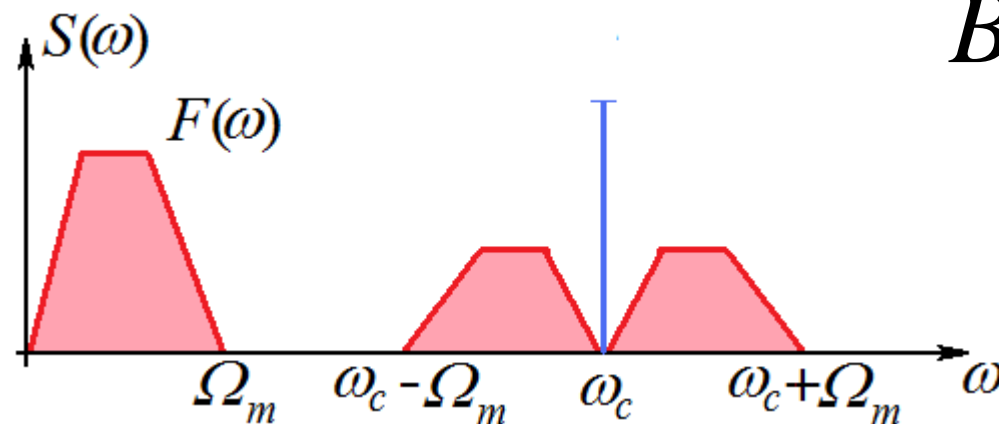
Amplituudmodulatsioon



Modulatsiooni mõju spektrile

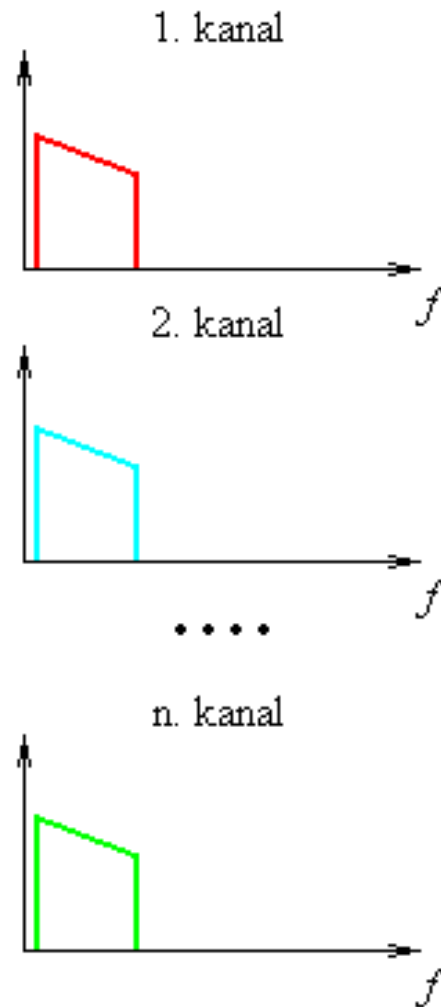
- Kui moduleeriva signaali $m(t)$ spekter on $F(\omega)$, siis amplituudmoduleerimisel tekkiva signaali spekter on kujul:

$$A\delta(\omega - \omega_c) + \frac{AM}{2} [F(\omega - \omega_c) + F(\omega + \omega_c)]$$

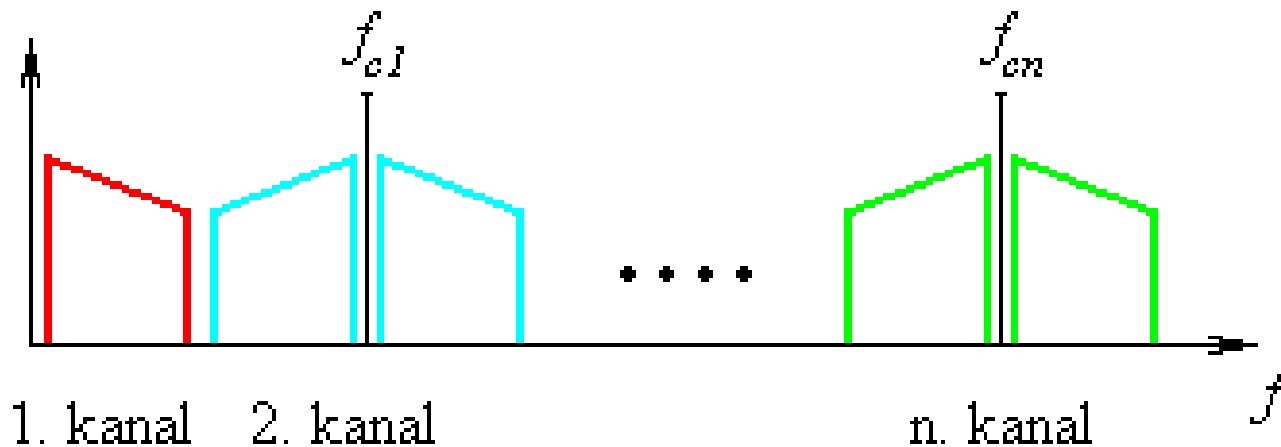


$$B = 2\Omega_m$$

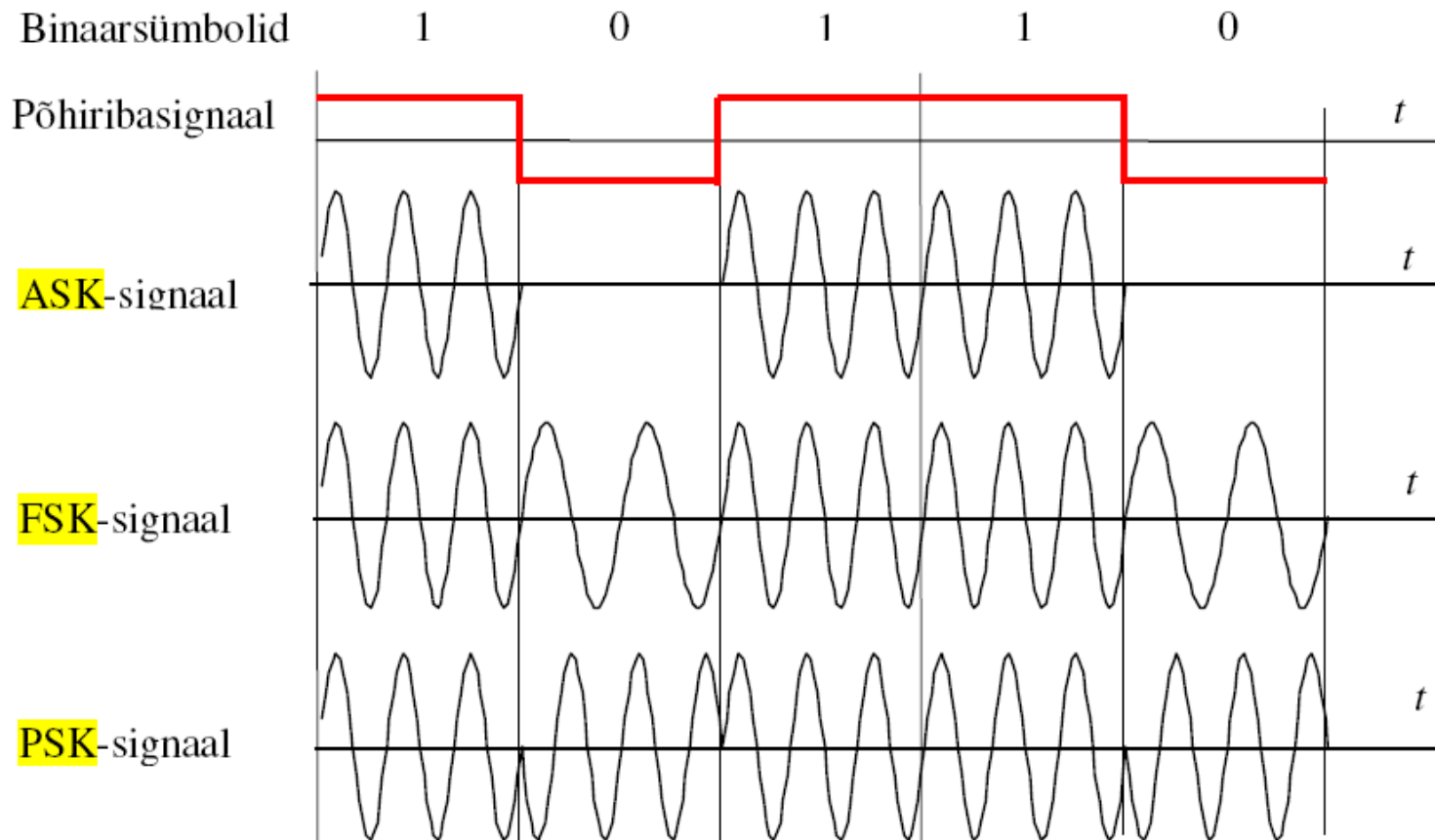
Sagedustihendus (FDMA)



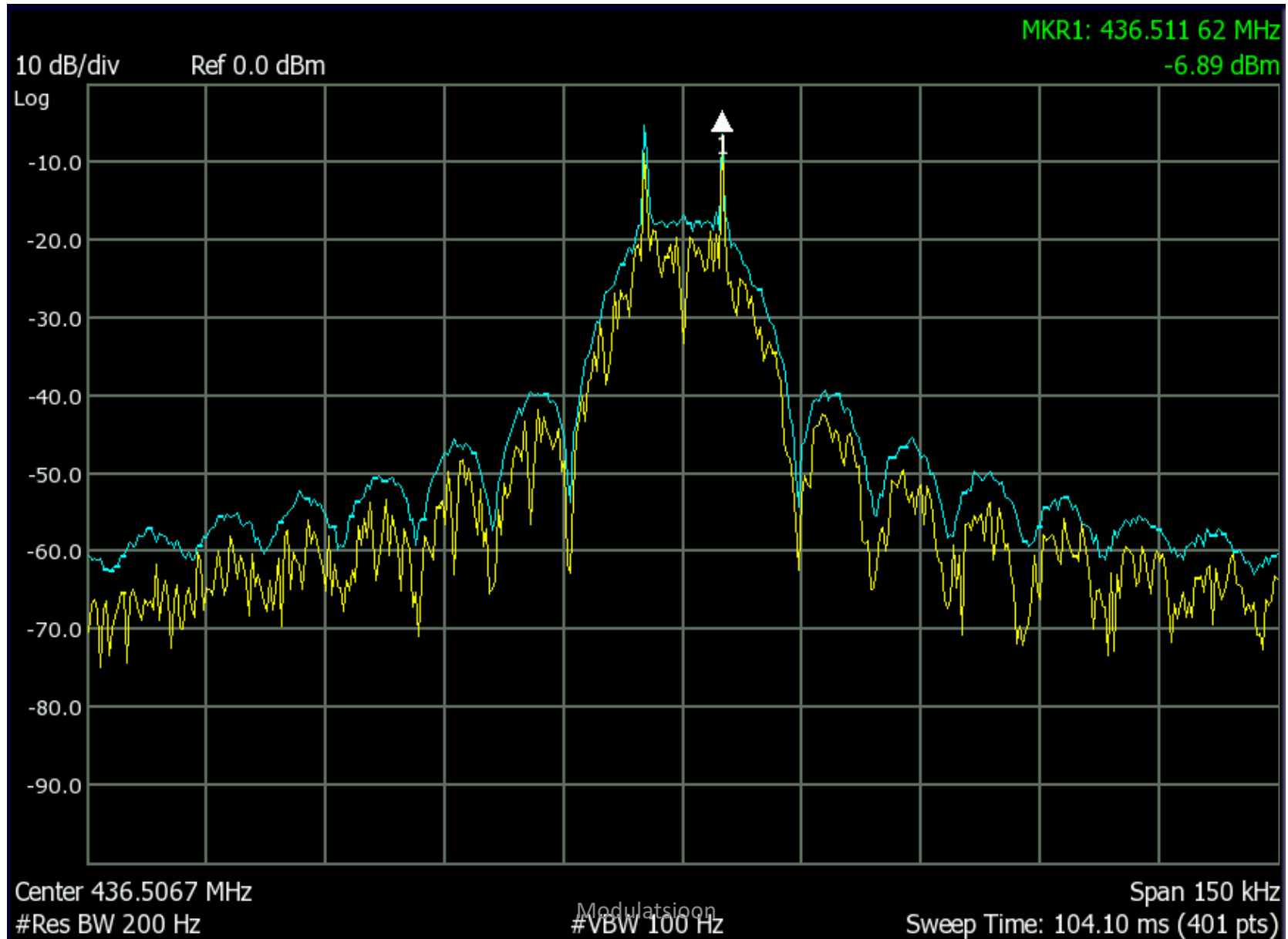
- Kanali sagedusriba efektiivne kasutamine
- Mitme signaali samaaegne edastamine ühes kanalis

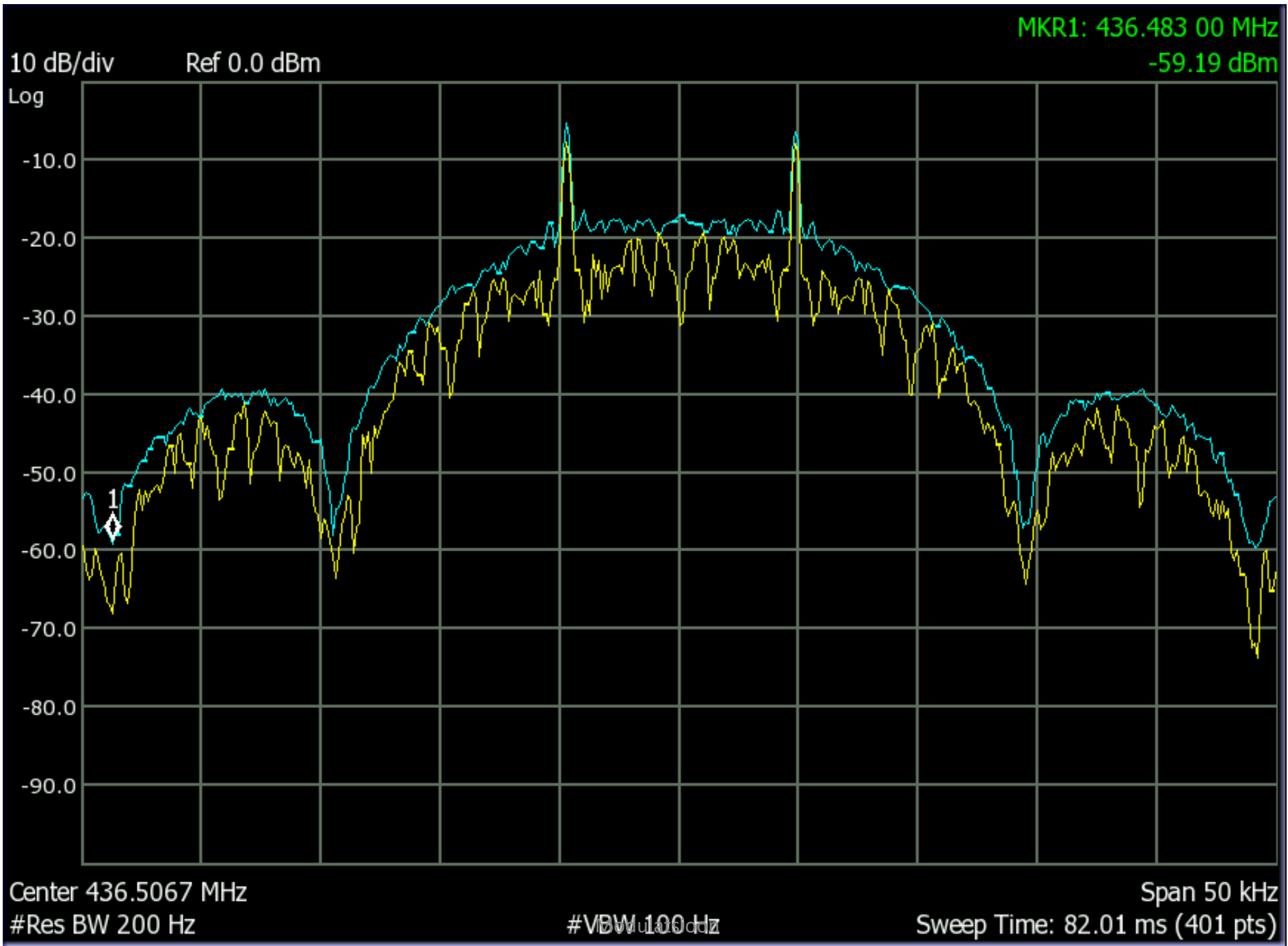


Digitaalm modulatsioon

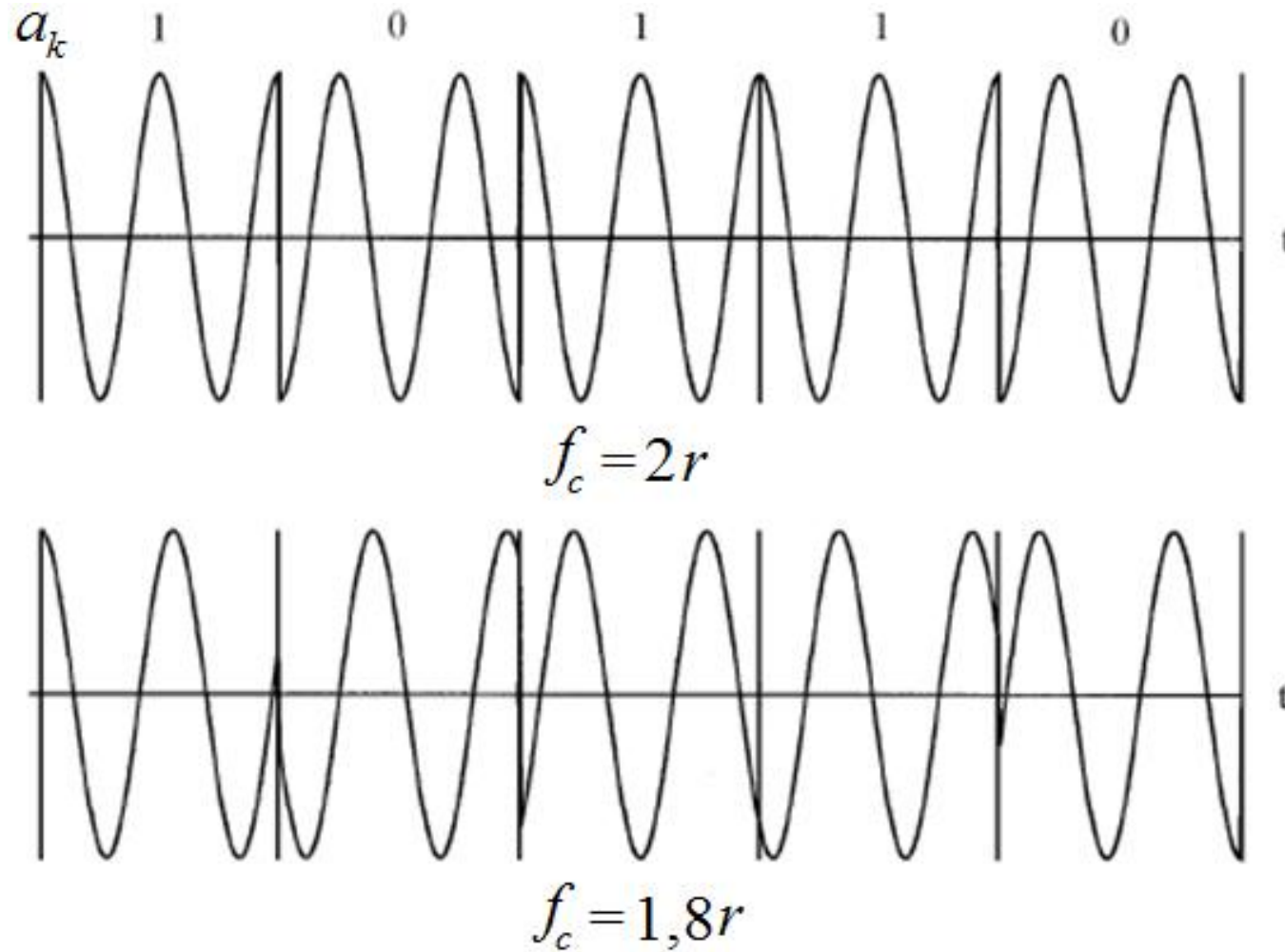


Sunde FSK





Binaarne faasmanipulatsioon BPSK



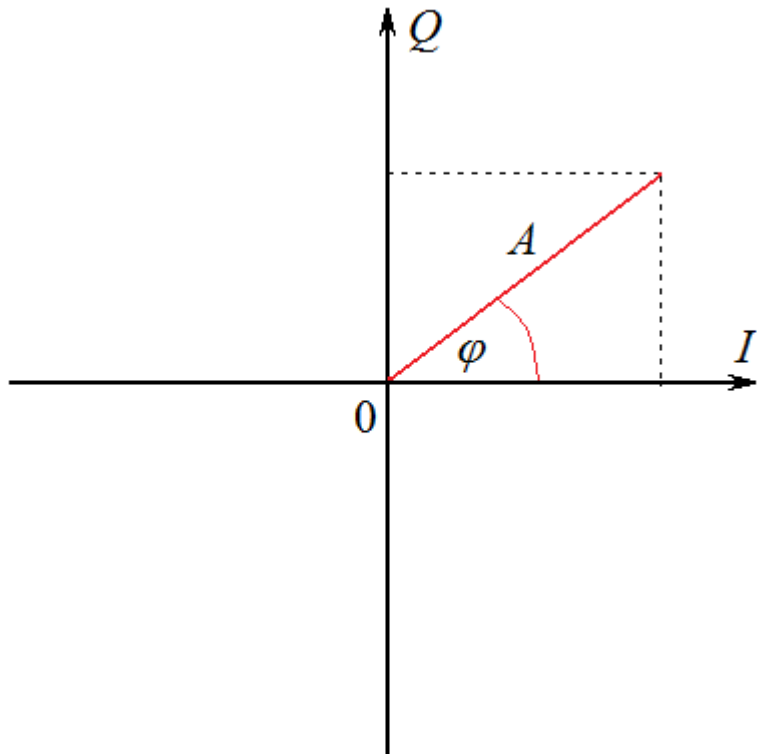
Faasor ja kvadratuurkomponendid

$$s(t) = A \cos(2\pi f t + \varphi) =$$

$$= A \cos(\varphi) \cos(2\pi f t) - A \sin(\varphi) \sin(2\pi f t)$$

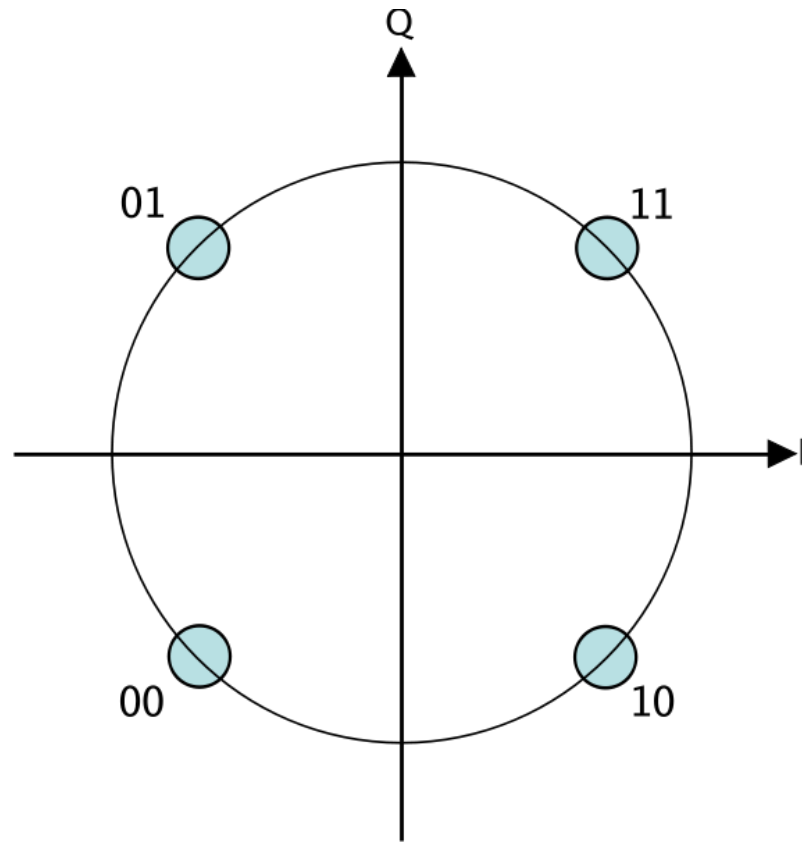
$$I = A \cos(\varphi)$$

$$Q = -A \sin(\varphi)$$

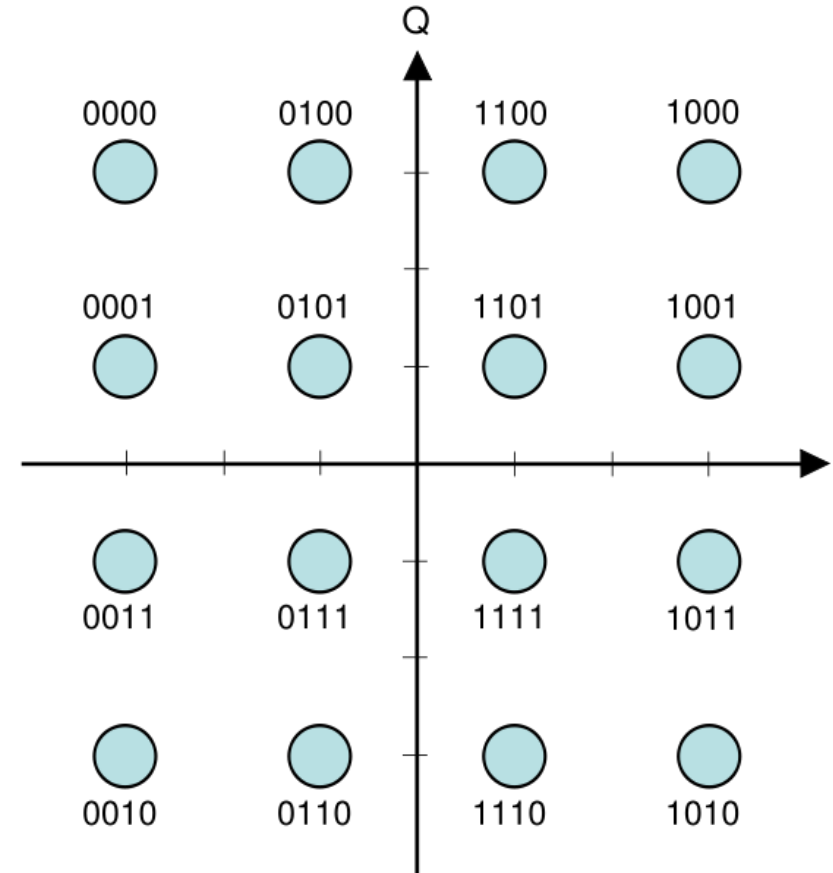


$$s(t) = I \cos(2\pi f t) + Q \sin(2\pi f t)$$

Konstellatsioonidiagramm



4-PSK



16-QAM

Häirekindlus

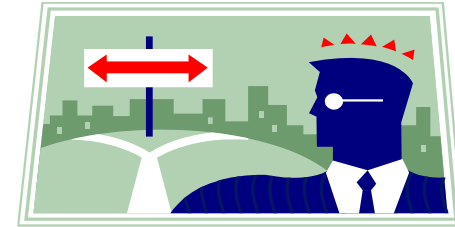
- Digitaalse andmeedastuse kvaliteeti iseloomustab bitivigade tõenäosus BER (*Bit Error Rate*), mis on vigaselt vastuvõetud bittide n_e arvu suhe kõikide edastatud bittide arvu n :

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

- Bitivigade tõenäosus sõltub signaal-müra suhtest 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 spektraalefektivsuse ρ [bitt/s/Hz] kaudu:

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

Häirekindlus



- Üldiselt on digitaalsel signaalil ainult M võimaliku väärtust.
 - Binaarsel edastusel ainult kaks võimalikku väärtust (0 või 1).
- Vastuvõtja ülesandeks on vastuvõetud signaali $s(t)$ ja müra $n(t)$ summa $y(t) = s(t) + n(t)$ põhjal otsustada, et millist M võimalikust sümbolist parasjagu edastati.
- Õige otsuse tegemise tõenäosus on seda suurem, mida parem on signaal-müra suhe otsustaja sisendis. Seetõttu kasutatakse praktikas enne otsuse tegemist signaal-müra suhet maksimeerivat filtrit.
- Viimast nimetatakse tihtipeale optimaalseks filtriks (*Matched filter*).

Näide: BPSK bitivea tõenäosus

- Koherentsel demoduleerimisel (algfaas teada):

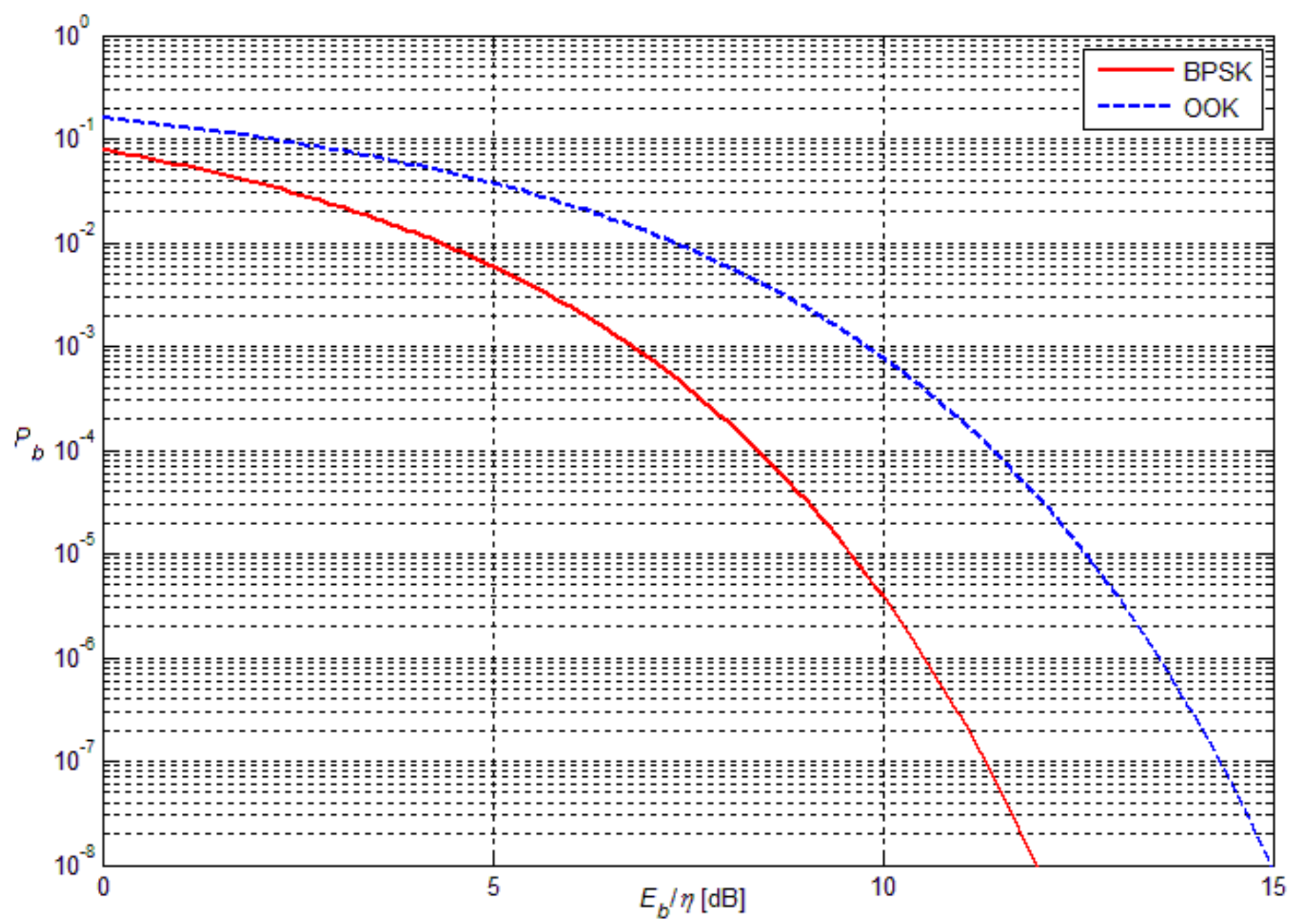
$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{\eta}}\right)$$

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

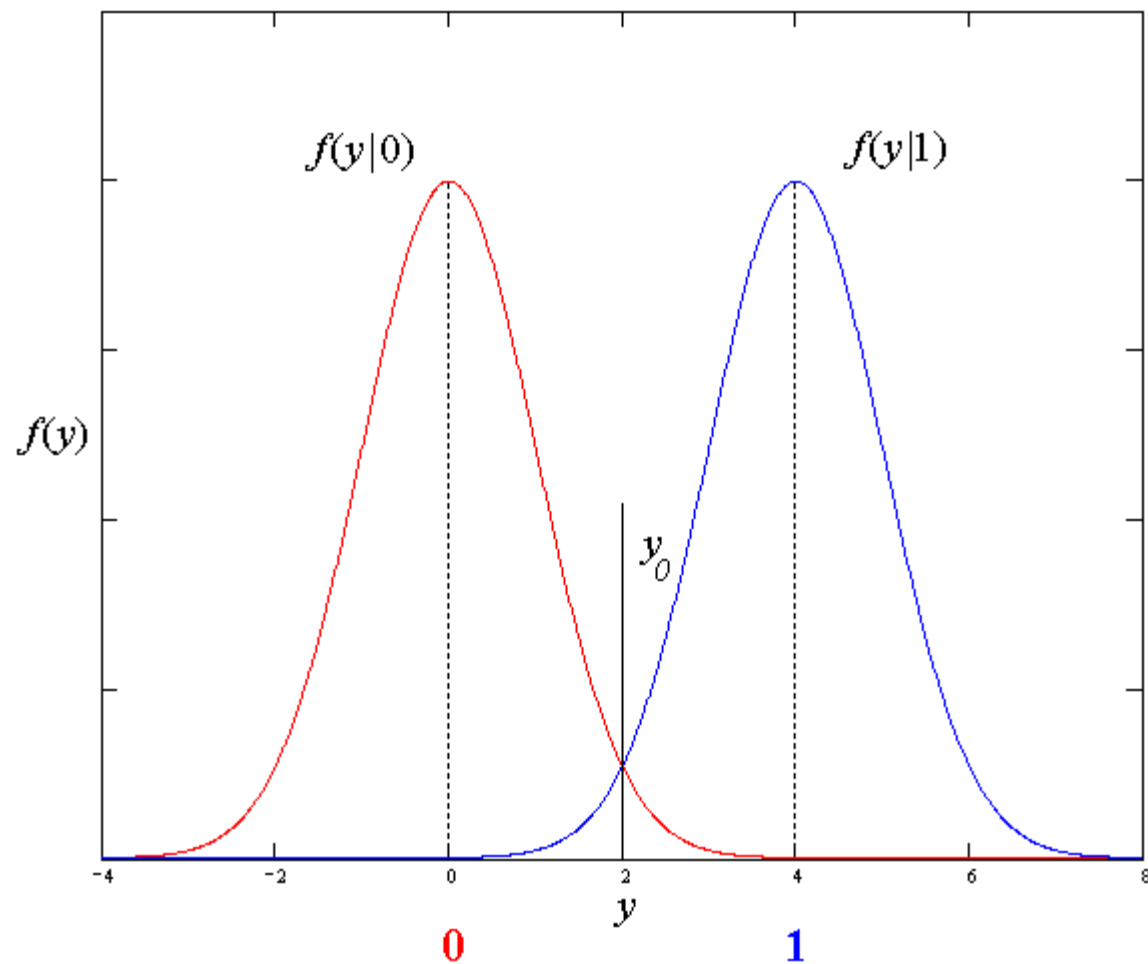
$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

- Mittekohherentsel demoduleerimisel:

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



Mürade mõju bitivigade tekkele



Skrämbler (Scrambler)

- Füüsilise kihi seade mille ülesandeks on bittide järjekorra (pseudo) juhuslik ümberjärjestamine.
- Kasutamise põhjused:
 - Vältimaks pikki, ainult ühest sümbolist, koosnevaid jadasid.
 - ..111111111111111111..
 - 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).

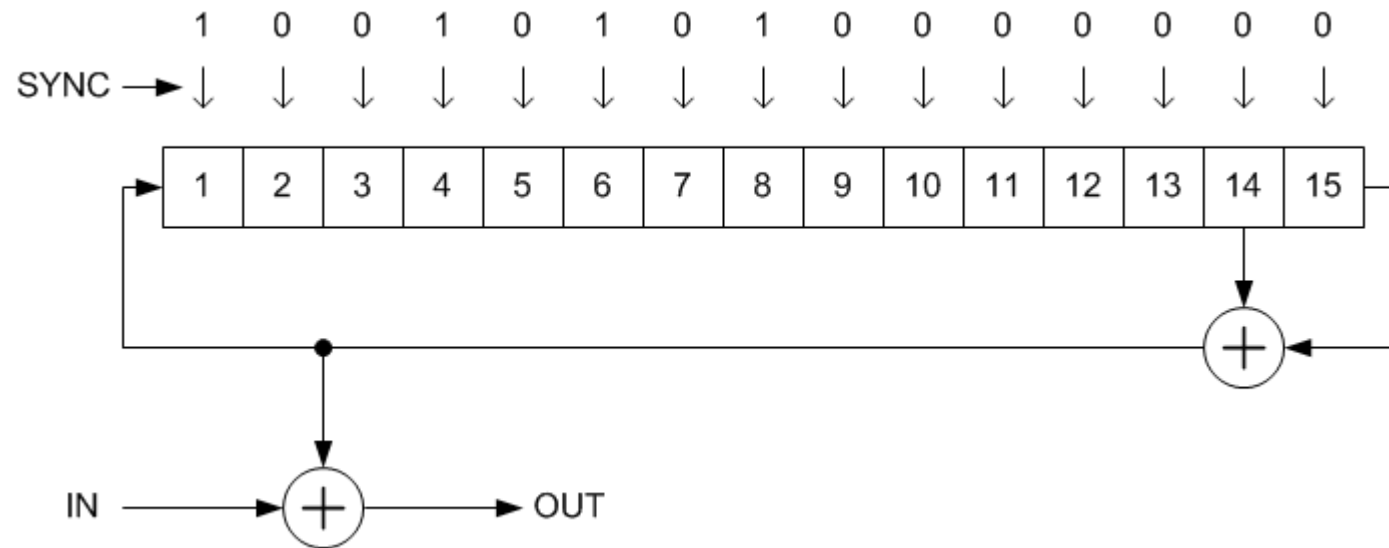
Aditiivne skrämbler

- Nimetatakse ka sünkroonseks skrämbleriks (*additive or synchronous scrambler*).
- Edastatavale signaalile liidetakse (mooduliga kaks) pseudojuhuslik binaarne jada.
- Liidetav binaarne jada võib olla mällu salvestatud, kuid tavaliselt tekitatakse see tagasisidestatud nihkeregistriga (LFSR). Tekitav 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.

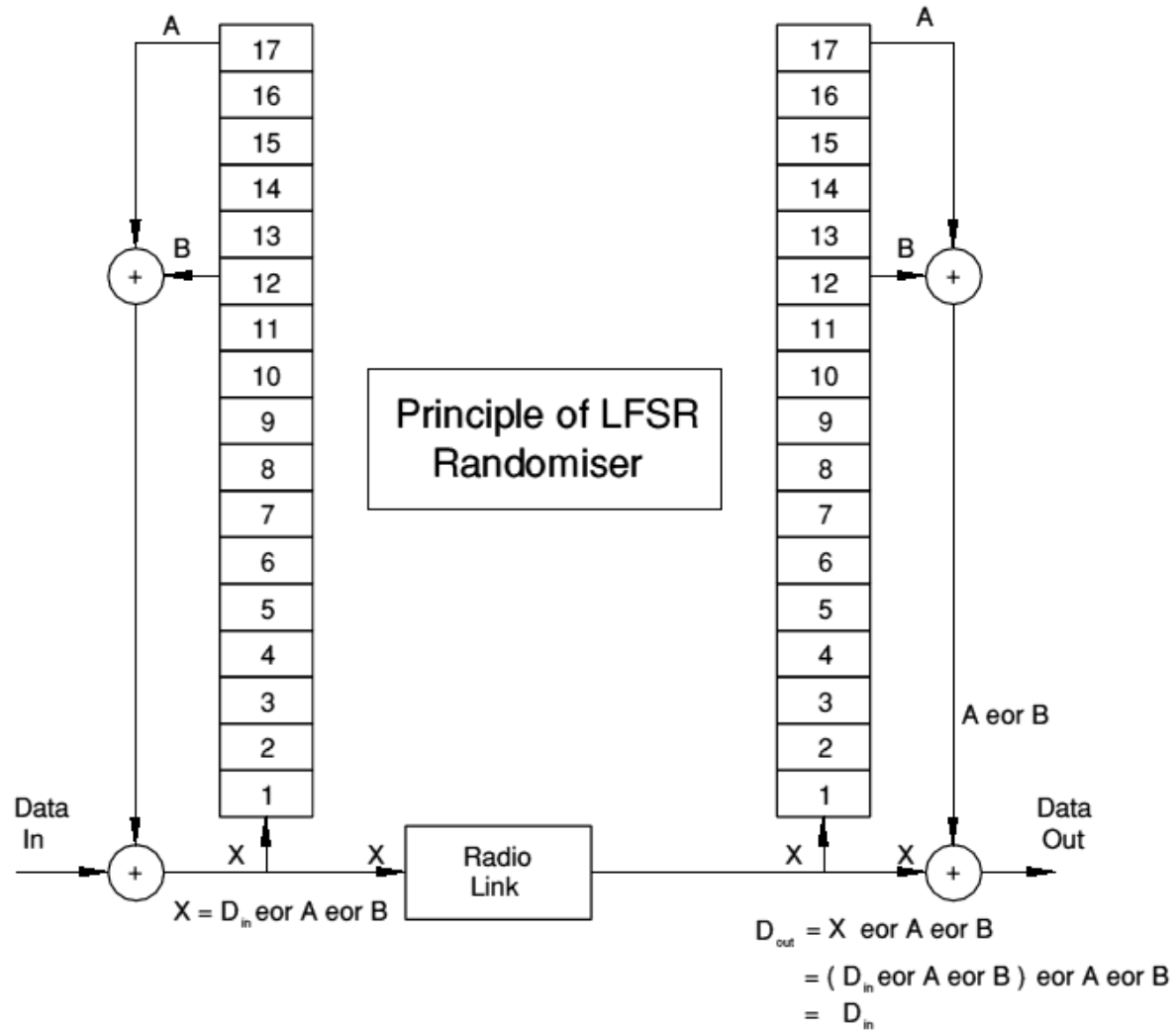
Aditiivne skrämbler



Multiplikatiivne skrämbler

- Nimetatakse ka isesünkroniseeruvaks skrämbleriks (*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.

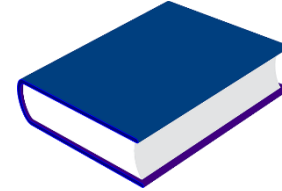
Multiplikatiivne Skrämbler



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 deskrämblerit oli:
0xD9 0x79 0x6E 0xE9 0xB9 0xA6 ...

Lisaks lugeda



- *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**.