

LAP 3731 Arvutivõrgud

dots. Toomas Tommingas
e-mail: toomas@eha.va.ttu.ee
tel: 6202109
Reaalajasüsteemide õppetool
Automaatikainstituut
TTU 1998

LAP 3731 Arvutivõrgud

□ Põhiõpikud:

- W. Stallings, Data and Computer Communications, Prentice-Hall 1996.
- F. Halsall, Data Communications, Computer Networks and Open Systems, Addison-Wesley 1996

Sissejuhatus

Informatsioon

Mis assotsieerub mõistega "Informatsioon" ?

- | | |
|------------------------|----------------------------|
| □ AK uudised | □ geograafiline kaart |
| □ ajalehed, raadio, TV | □ partituur |
| □ kartoteek | □ sireen |
| □ kohtukutse | □ armastusavaldus |
| □ telefonikõne | □ isikukood |
| □ telegramm | □ vöötkood spagetipakendil |
| □ distantsjuhtimiskäsk | □ temperatuurimõõdja lugem |
| | □ ... |

Informatsioon (2)

- Tegemist on erinevate
 - informatsiooniliikidega
 - informatsiooni salvestamise vormidega
 - informatsiooni edastamise (kommunikatsiooni) liikidega
 - informatsiooni esitusviisidega
- Informatsioon on konkreetsete (tegelike, kujuteldavate või tajutavate) objektide või protsesside abstraktne esitus (kirjeldus)

Informatsiooniedastus

- Enamus infoallikaid väljastavad *redundantset* informatsioon = REDUNDANTS
- Vastuvõtja tõlgendab ka signaali seda osa, mida tegelikult saatja ei väljastanud = IRRELEVANTS

Informatsioon

- ❑ Tehniliselt mõõdetava informatsiooni ja selle väärtuse vahel tema kasutaja jaoks ei ole olulist seost
- ❑ Näide: Vendade Rothschild'ide edastatud informatsioon Waterloo lahinguväljalt (1 bit) tõi sisse terve varanduse!

Kommunikatsioon

- ❑ Kommunikatsioon - infovahetus *indiviidide* või ka indiviidide *gruppide* vahel:
 - *elusa looduse* esindajad
 - *eluta looduse* osad (arvutid, mõõteriistad, jne.)
- ❑ Kommunikatsioonitehnika - informatsiooni edastuse teooria ja praktikaga tegelev õpetus.
- ❑ Sidetehnika - *signaalide* kujul, s.t. ajas muutuvate füüsiliste suurustena esitatud informatsiooni *edastamise, vahendamise* ja *töötlemisega* tegelev teadusharu (KT alamhulk)

Arvutivõrgud

- ❑ Sidetehnika rakendatuna eluta looduse osade (eeskätt arvutite) vahelise kommunikatsiooni realiseerimiseks
- ❑ Kuidas hinnata kommunikatsioonisüsteemi *headust*?
 - Kiirus (maht/voog - NB **QoS**!)
 - ulatus
 - häire- / veakindlus
 - hind
 - ...

Mitteelektrilised ülekandesüsteemid

- ❑ Sõnumiedastussüsteemid
 - 206 e.m.a. Hiinas hästiorganiseeritud käskjalgade **VÕRK**
 - "kollane post"
 - torupost - kapslite edastamine suruõhu abil
- ❑ Kodeeritud sõnumiedastus
 - kasutatakse *lõpliku* hulka *kokkulepitud* märke
 - vastavus sõnum - märk ongi *kood*

Kodeeritud sõnumiedastus

- ❑ Eelised:
 - märke saab esitada sõnumi sisust sõltumata *füüsiliste* suurustena, mis tagavad näit. suure edastus*kauguse* ja/või *kiiruse*
 - kuivõrd vastuvõtja omab *a priori* teadmist saabuvate märkide kohta (lõplik arv), suureneb *töökindlus*
 - koodi saladuses hoidmine võimaldab vältida pealtkuulamist (tegelikult kuuldest arusaamist)
- ❑ Näiteid:
 - tam-tam, sarvehääl, tuli, peegel, suits jne.

Kodeeritud sõnumiedastus (2)

- ❑ Oluline täiustus - märkide vastavusse seadmine tähtede ja numbritega
 - Kreeka kindral Polybus aretas u. 300 a. e.m.a. 5 x 5 maatriksina asetatud tõrvikuid ja kasutas *releejaamu*
 - Merenduses erinevad süsteemid lippude ja tahvlitega
 - 18. Saj lõpus semaforisüsteemid. Tuntuim Claude Chappe 3'e segmendiline semafor
- ❑ Raudteesignaalid samuti kodeeritud sõnumiedastus
 - kohati veel tänapäevalgi mehaaniliselt opereeritav (Bowden 1835)

Analoogsõnumite edastus

- ❑ Otsene akustiline/optiline hääle/pildi edastus võimalik ainult lühikese vahemaa tagant
 - häääl ca. 100m
 - ruuporid/torud
 - optiline edastus läbi atmosfääri vaatamata võimsa optika kasutamisele tugevalt **ilmastikust** sõltuv
 - pildiedastus punkthaaval paralleelseid optilisi kiude kasutades võimalik mõne km. ulatuses (liiga kallis)

Elektrilised ülekandesüsteemid

- ❑ 16. saj. uuris dr. W.Gilbert hõõrdumisel tekkivat elektrit
- ❑ 1646 pakkus filosoof T. Browne välja mõiste “elektter” (kasutati põhiliselt meditsiinis)
- ❑ 1747 Dr. Watsoni eksperiment elektrit ülekandmiseks traadi abil.
- ❑ 1753 idee kasutada elektrit märkide edastuseks - algas “ürgaeg”

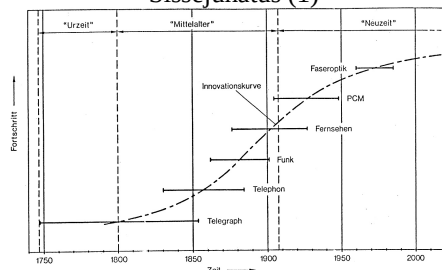
Elektrilised ülekandesüsteemid (2)

- ❑ 1800 A. Volta galvaaniline patarei
- ❑ 1800 - 1900 “Keskaeg”
 - elektromagnetiline **telegraaf**
 - elektromagnetiline **telefon**
 - esimesed traadita telegraafid (Marconi 1907)
- ❑ “Uus aeg” algas vaakumdiodi ja -triodi avastamisega
- ❑ 1952 transistor - “uus dimensioon”

Kommunikatsioonivahendite areng

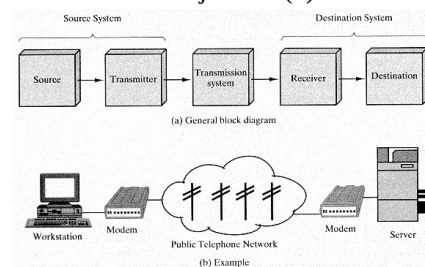
- ❑ Füüsilise efekti või fundamentaalse tehnilise printsiibi avastamine
- ❑ Idee kasutada seda sõnumiedastuseks
- ❑ Sobiva tehnoloogia väljatöötamine, mis viib vastava kommunikatsioonisüsteemi läbimurdeni
- ❑ Vastava teooria väljatöötamine, mis võimaldab kommunikatsioonisüsteemi optimeerida
- ❑ Tehnoloogia edasiarendamine ja täiustamine

Sissejuhatuse (1)



Joonis 1. Tähtsamate kommunikatsioonisüsteemide välja-töötamisaegade võrdlus

Sissejuhatuse (2)



Joonis 2. Lihtsustatud kommunikatsiooni mudel

Informatsioon

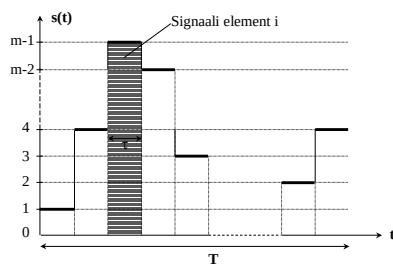
- seotud *teadmisega* (Δ) - järelikult *subjektiivne*
- millest sõltub saadava informatsiooni (D teadmine) hulk? Mõned objektiivsed tegurid:
 - võimalike märkide (sõnumite) arv
 - tõenäosus ("üllatusefekt" - patoloogilised juhud on harvad, seega *ebatõenäolised*)
 - sisemised seosed sündmuste vahel

Digitaalsignaali infosisaldus

- digitaalsignaali $s(t)$:
 - kestvus T
 - koosneb sarnastest **signaalelementidest**
 - elemendi kestus on τ
 - iga signaalelement võib omada ühte m väärtusest
 - signaalelementide arv:

$$n = T/\tau$$

Digitaalsignaali infosisaldus(2)



Digitaalsignaali infosisaldus (3)

- eeldusel, et kõik olekud (m) on võrdtõenäosel, on signaalis sisalduv *informatsioon* otseselt sõltuv *võimalike kombinatsioonide* hulgast:

$$k = m^n$$
- informatsiooni ühikuks on ühes elementaarotsuses sisalduva informatsiooni hulk 1 bit (binary digit).
- et määrata signaali infosisaldust bittides, on vaja leida kahendelementide arv I mis on vajalik k kombinatsiooni esitamiseks.

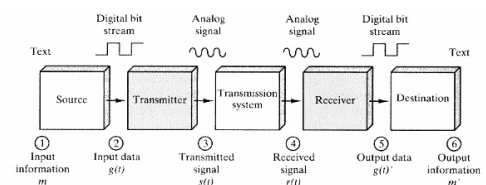
Digitaalsignaali infosisaldus (4)

$$2^I = m^n,$$

$$I = n \frac{\log m}{\log 2} = n \lg m \text{ [bit]}$$

$$I = \frac{T}{\tau} \lg m \text{ [bit]}$$

Sissejuhatus(3)



Joonis 3. Lihtsustatud kommunikatsiooni model (2)

source: Stallings

Kommunikatsioonisüsteemi funktsioonid

- ☐ Transpordikeskkonna efektiivne kasutamine (utilization)
- ☐ Liidestus (Interfacing)
- ☐ Signaalide genereerimine
- ☐ Sünkroniseerimine
- ☐ Andmevahetuse haldamine
 - Veatuvastus ja -parandus (Error detection and correction)
 - Andmevoo juhtimine (Flow control)

Kommunikatsioonisüsteemi funktsioonid(2)

- ☐ Adresseerimine
- ☐ Marsrutiseerimine (Routing)
- ☐ Taaskäivitamine (Recovery)
- ☐ Sõnumi vormistamine (formatting)
- ☐ Andmekaitse (security)
- ☐ Võrguhaldus (Network management)

I. Andmeside

- ☐ Põhimõisted
 - Pidev / diskreetne signaal
 - Signaali mudel ajapiirkonnas
 - Signaali mudel sageduspiirkonnas
 - Sagedus, spekter, riba laius
 - Kanali maht, andmeedastuskiirus
 - Andmed(info) ja signaalid

1. Signaalid

Signaalid (1)

Signaalid on tehnilistes süsteemides kasutatavad, üldjuhul *ajas muutuvad* füüsilised suurused.

Eristatakse kahte olulist signaalitüüpi: *ajas pidevad* signaalid ja *ajas diskreetsed* signaalid.

Ajas pidev signaal

- ☐ $x(t)$
 - t - jooksev aeg

Näited:

Pinge, voolu, väljatugevuse, kiiruse, jõu, pöörete arvu jne. sõltuvus ajast.

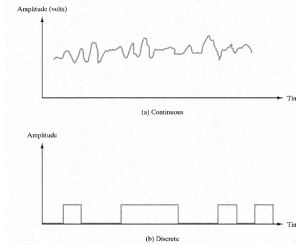
Aga:

must-valge pildi heleduse sõltuvust *koordinaadist* nimetatakse samuti *luminants-signaaliks*

Ajas diskreetne signaal

- ❑ arvutite kasutamine tingib signaalide esitamise nn. *tugiväärtuste reana*.
- ❑ tehnilistel kaalutlustel on mõtekas kasutada ekvidistantsseid (T) tugiväärtusi - *ajaline kvantiseerimine*.
- ❑ matemaatiline esitus: $x(nT)$, lihtsustatult $x(n)$ - intervall T on konstantne (dimensiooniga!) maastaabitegur.

Signaalid (2)



Joonis 4. Pidevad ja diskreetseid signaalid

source: Stallings

Signaalide klassifitseerimine (1)

- ❑ *informatsioonisignaalid*
 - kannavad informatsiooni
 - ajs *pidevad* või ajas *diskreetseid*
 - funktsiooni väärtus *analoog-* või *digitaalsuurus*
 - *mitedeterministlikud*
- ❑ informatsioonisignaalid võivad põhjustada iseenesest *deterministliku* signaali (kandja) parameetrite varieerumist ajas:
 - *modulatsioon*
 - *kodeerimine*

Signaalide klassifitseerimine (2)

- ❑ *abisignaalid*
 - *ei sisalda informatsiooni*
 - *determineeritud*
 - harmooniline võnkumine
 - perioodiline impulsijada

Signaali energia

- ❑ Kuivõrd me tegeleme reaalseste signaalidega, on signaali amplituudi väärtused alati lõplikud
- ❑ signaalite käsitletavuse seisukohalt on signaali energia üks oluline suurus
- ❑ signaali $u(t)$ hetkvõimsus:

$$P(t) = u(t) \cdot I(t) = u(t) \frac{u(t)}{R} = \frac{u^2(t)}{R}$$
- ❑ signaali $u(t)$ normeeritud hetkvõimsus ($R=1\Omega$):

$$P(t) = u^2$$

Signaali energia (2)

- ❑ Signaali normeeritud energia:

- ❑ lõpliku energiaga signaal:
 - ajaliselt piiramatul signaal
- ❑ lõpliku energiaga signaal:
 - $u(t)$ eksisteerib ainult vahemikus $t_2 - t_1$
 - $u(t)$ koondub $t \rightarrow \infty$ nii, et W_n jääb lõplikuks

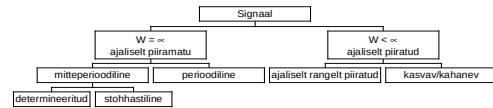
$$W_n = \infty$$

$$W_n < \infty$$

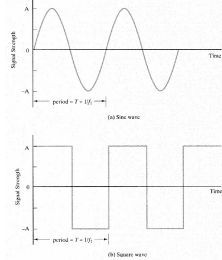
Häired

- segavad süsteemi tööd
- ei sisalda *kasulikku informatsiooni*
- enamalt jaolt *mittedeterministlikud*
- häiresignaaliid:
 - mürad (statsionaarsed juhusl. protsessid)
 - müralaadsed häired (mittestats. juh. prots)
 - pakettid
 - perioodilised häired (selekt.)

Signaalide klassifikatsioon



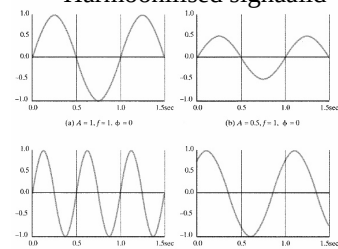
Perioodilised signaalid



Joonis 5. Perioodilised signaalid

source: Stallings

Harmonilised signaalid



Joonis 6. Harmonilise signaali parameetrid: A, f, φ

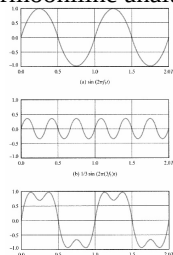
source: Stallings

2. Harmooniline analüüs

Tähtsamad read

Põhiklassid	Tunnus	Rida
Piiratud energiaga signaalid (piiratud kestvusega)	$W_n < \infty$ $P_n = 0$	• Fourier' integral • Tayloriga rida
Perioodilised signaalid	$W_n = \infty$ $P_n < \infty$ Period T	• Fourier' rida • Tayloriga rida signaali lõigu t ∈ [0, T] kohta
Stohhastilised signaalid	$W_n = \infty$ $P_n < \infty$ mitteperioodiline mittedeterministlik	• Üldistatud harmooniline analüüs • Tayloriga rida suvalise signaali lõigu kohta

Harmooniline analüüs (1)



Joonis 7. Harmooniliste komponentide liitmine

source: Stallings

Fourier' rida

Väide: iga* perioodiline funktsioon $s(t)$ perioodiga T on võimalik esitada harmooniliste funktsioonide lõpmatu summana (reana)

Hüpotees:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(\omega_n t + \phi_n)$$

Fourier' rida (2)

$s(t)$ võib sisaldada konstanti (konstant on suvalises intervallis perioodiline). Järelikult:

$$\omega_0 t = 0, \phi_n = 0.$$

Uus hüpotees:

$$s(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\omega_n t + \phi_n)$$

Fourier' rida (3)

$s(t)$ on perioodiline perioodiga T . Järelikult peab kehtima iga ajahetke $(t + T)$ korral:

$$\cos(\omega_n(t+T) + \phi_n) = \cos(\omega_n t + \phi_n)$$

ehk

$$\omega_n(t+T) + \phi_n = \omega_n t + \phi_n + k2\pi$$

seega

$$\omega_n T = k2\pi$$

Fourier' rida (4)

Harmooniline võnkumine:

$$s(t) = A \cos(\omega_T t + \phi)$$

$$\omega_T = 2\pi / T$$

seega

$$\omega_n = k \frac{2\pi}{T} = k \omega_T$$

mõistlik valik:

$$n=1 : k=1$$

$$n=2 : k=2$$

siit oluline seos:

$$\omega_n = n \omega_T$$

Fourier' rida (5)

Lõplik kuju:

$$s(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_T t + \phi_n)$$

määrata on vaja A_n ja ϕ_n

konventsioon: $A_n \geq 0, A_1, A_2, \dots \geq 0$

nimetused: A_0

$$A_1 \cos(\omega_T t + \phi_1)$$

$$A_2 \cos(2\omega_T t + \phi_2)$$

$$A_3 \cos(3\omega_T t + \phi_3)$$

.

alalkomponent

1. harmooniline

2. harmooniline

3. harmooniline

.

Fourier' rida (6)

Alternatiivne kuju:

$$s(t) = a_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_1 t + 2 \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega_1 t$$

Koosinusrida
(paarisfkt.)

Siinusrida
(paaritu fkt.)

$$A_n \cos(n\omega_1 t + \phi_n) = A_n \cos \phi_n \cos n\omega_1 t - A_n \sin \phi_n \sin n\omega_1 t$$

$$2a_n \quad 2b_n$$

Fourier' rida (7)

a_n, b_n on Fourier'koefitsiendid NB! $a_n, b_n \geq 0$

Suuruste A_n ja ϕ_n ühelt poolt ning a_n ja b_n teiselt poolt kehtivad järgmised seosed:

alaliskomponent

$$a_0 = A_0$$

koosinusamplituud

$$a_n = \frac{1}{2} A_n \cos \phi_n$$

siinusamplituud

$$b_n = -\frac{1}{2} A_n \sin \phi_n$$

Fourier' rida (8)

alaliskomponent

$$A_0 = a_0$$

amplituud

$$A_n = 2 \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

faas

$$\phi_n = -\arctan(b_n/a_n) + k\pi$$

Fourier' kordajate määramine (1)

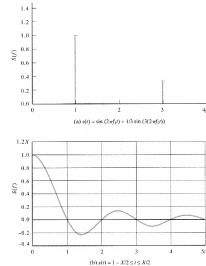
Lähtume lõplikust Fourier' reast (summast):

$$s_N(t) = a_0 + 2 \sum_{n=1}^N a_n \cos n\omega_1 t + 2 \sum_{n=1}^N b_n \sin n\omega_1 t$$

Seega erineb $s(t)$ $s_N(t)$ 'st igal ajahetkel kuigivõrd:

$$|s(t) - s_N(t)| \neq 0$$

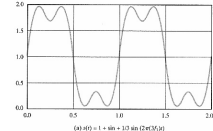
Harmooniline analüüs (2)



Joonis 8. Perioodilise signaali esitus sageduspiirkonnas.

source: Stallings

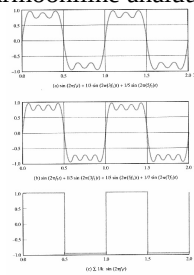
Harmooniline analüüs (3)



Joonis 9. Alaliskomponendiga perioodiline signaal

source: Stallings

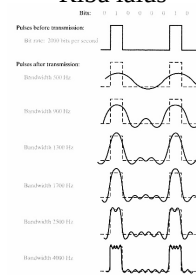
Harmooniline analüüs (4)



Joonis 10. Täisnurkimpulss

source: Stallings

Riba laius



Joonis 11. Riba laiuse mõju digitaalsignaale

source: Stallings