

Moonutused edastusel

Üldist

- Moonutusvabal edastusel on vastuvõetud signaali kuju edastuskanali väljundis samasugune kui saatja väljundsignaalil kanali sisendis
- Põhilised signaali moonutuste tekkepõhjused edastusel: signaali erineva sagedusega komponentide
 - erineval määral **sumbumine** e. nivoo vähenemine edastuskanalis
 - erineval määral **hilistumine**, kuna signaali levikiirus läbi kanali on lõplik ja sõltub sageli ka signaali komponendi sagedusest

Moonutusvaba edastus

- Vastuvõetud, moonutusteta edastatud signaali võime esitada

$$r(t) = Ks(t - t_d)$$

kus konstant K iseloomustab sumbuvus ja t_d – viidet edastusel; $s(t)$ – saatja väljundsignaal

- Vastuvõetud signaali spekter

$$R(f) = F[r(t)] = Ke^{-j\omega_d} S(f)$$

Moonutusvaba edastus

- Moonutusvaba kanali ülekandefunktsioon e. sageduskarakteristik

$$H(f) = \frac{R(f)}{S(f)} = Ke^{-j\omega_d}$$

- Edastuskanali sageduskarakteristik jaguneb **amplituudikarakteristikuks**

$$|H(f)| = |K|$$

- ja **faasikarakteristikuks**

$$\angle H(f) = -\omega_d \pm m \cdot \pi$$

- viimane liidetav võtab arvesse K võimalikke negatiivseid väärtusi

Moonutusvaba kanal

- Moonutusvaba kanali amplituudikarakteristik on **konstantne**
- Faasikarakteristik sõltub sagedusest **lineaarselt**
 - need tingimused peavad olema täidetud ainult nendel sagedustel, mis esinevad edastatava signaali spektris

Moonutused sidekanalis

Edastuskanalis esinevate moonutuste põhitüübid

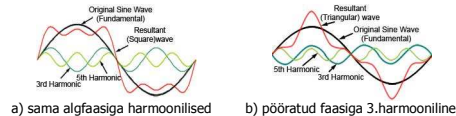
- Sageduskarakteristiku lineaarmoonutused:
 - amplituudikarakteristiku moonutus
 - faasimoonutused
- Lineaarmoonutuste suurus ei sõltu süsteemi sisendsignaali nivoost
- Mittelineaarmoonutused – moonutuste suurus sõltub sisendsignaali nivoost

Sageduskarakteristiku moonutused

- Amplituudikarakteristiku moonutus väljendub signaali erineva sagedusega komponentide erineval määral sumbumises

$$|H(f)| \neq \text{const}$$

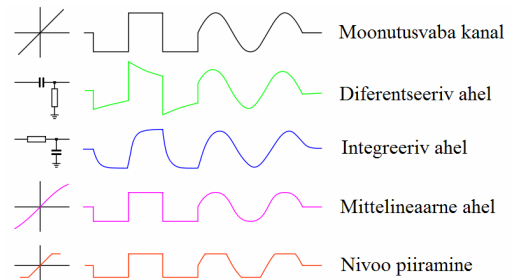
- Faasimoonutused tekivad erineva sagedusega komponentide erineva levikiiruse tagajärjel
 - faasimoonutuse tagajärjel võib signaali nivoo tipp- ja keskväärtuse suhe suurened



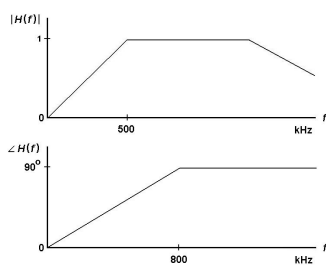
Mittelineaarmoonutus

- Mittelineaarmoonutus tekib, kui kanali sisend- ja väljundsignaali nivoode vaheline seos on mittelineaarne
 - seost lähendav polünoom sisaldab ruut-, kuup- jne. kõrgemat järku liikmeid
- $$r(t) = a_0 + a_1 s(t) + a_2 s^2(t) + \dots$$
- Mittelineaarsel süsteemil puudub ülekandefunktsioon ja niisuguste süsteemide analüüsil kasutatakse teisi meetodeid

Ristkülik- ja siinussignaali moonutuste näiteid



Edastuskanali sageduskarakteristiku näide



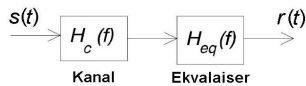
- Kanal on moonutusvaba sagedusvahemikus $500 \leq f \leq 800$ kHz.

Sageduskarakteristiku korrigeerimine (ekvalaiserid)

- Kui lineaarmoonutusi tekitava edastuskanali ülekandefunktsioon on teada, saab moonutusi kompenseerida seadme abil, mille sageduskarakteristik on kanali sageduskarakteristiku pöördväärtus
- Niisugust seadet nimet. *ekvalaiseriks* (*equalizer* – ühtlustaja)
- Olgu kanali ja ekvalaiseri ülekandefunktsioon vastavalt $H_c(f)$ ja $H_{eq}(f)$
- Kogu süsteemi ülekandefunktsioon

$$H(f) = H_c(f)H_{eq}(f)$$

Ekvalaiserid



- Ideaalse sageduskarakteristikuga, moonutusvaba kanali saamiseks peab ekvalaiseri ülekandefunktsioon võrduma

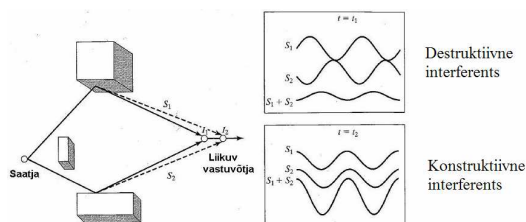
$$H_{eq}(f) = \frac{K e^{-j\omega t_d}}{H_c(f)}$$

- Sagedustel, kus kanali sumbuvus on suur, ei ole niisugune ekvalaiser kasutatav
 - kui signaal on „uppunud“ suurema nivooaga mürrasse, ei saa signaali taastada

Mitmekiirelevi

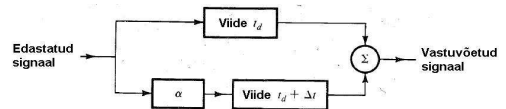
- Mitmekiirelevi esineb, kui signaal jõuab vastuvõtjasse erinevaid leviteid pidi koos erineva hilistumisega
- Leviteede pikkuste erinevusest tingitud käiguvaheed põhjustavad signaali erinevate komponentide vastuvõtjas liitumisel summaarse signaali tugevnemise või nõrgenemise, võrreldes olukorraga, kus peegeldused puuduvad
 - esineb vastavalt konstruktiivne või destruktiivne interferents

Destruktiivse ja konstruktiivse interferentsi näide



Mitmekiirelevi: kaks leviteed

- Vaatleme kahe leviteega sidekanalit: üks omab ühikulist ülekandetegurit ja viidet t_d ja teine levitee omab ülekandetegurit α ja viidet $t_d + \Delta t$
- Nende leviteede ülekandefunktsioonid on vastavalt $e^{-j\omega t_d}$ ja $\alpha e^{-j\omega(t_d + \Delta t)}$



Mitmekiirelevi: kaks leviteed

- Niisuguse kanali summaarne ülekandefunktsioon avaldub

$$\begin{aligned} H(\omega) &= e^{-j\omega t_d} + \alpha e^{-j\omega(t_d + \Delta t)} \\ &= e^{-j\omega t_d} (1 + \alpha e^{-j\omega \Delta t}) \\ &= e^{-j\omega t_d} (1 + \alpha \cos \omega \Delta t - j\alpha \sin \omega \Delta t) \\ &= \underbrace{\sqrt{1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos \omega \Delta t}}_{|H(\omega)|} e^{-j \left[\omega t_d + \tan^{-1} \frac{\alpha \sin \omega \Delta t}{1 + \alpha \cos \omega \Delta t} \right]}_{\theta_h(\omega)} \end{aligned}$$

- $H(\omega)$ amplituudi- ja faasikarakteristik on sageduse ω järgi perioodilised, perioodiga $2\pi / \Delta t$
- Kanali amplituudi- ja faasikarakteristik on moonutatud

Mitmekiirelevi: kaks leviteed

- Juhul, kui kahe kanali ülekandetegurid on lähedased ja kahte erinevat teed pidi saabunud signaalide faaside vahe on n , summutavad need kaks signaali teineteist (struktiivne interferents)
- Ülaltoodud avaldisest näeme, et sagedustel $\omega = n\pi / \Delta t$, $n = 1, 3, 5, \dots$ on $\cos \omega \Delta t = -1$ ja $|H(\omega)| \approx 0$, kui $\alpha \approx 1$
 - mitmekiirelevi nullisagedused
- Sagedustel $\omega = n\pi / \Delta t$, $n = 2, 4, 6, \dots$ liituvad kaks signaali konstruktiivselt ja kanali summaarne ülekandetegur kasvab
- Mitmekiireleviga kanalis esineb seega sagedusest sõltuv vaibumine
 - niisuguse moonutuse mõju saab vähendada ekvalaiseri abil

Vaibumistega kanal

- Eeldasime, et edastuskanali omadused on ajas muutumatud
- Sageli see eeldus ei kehti, nt. ionosfäärilivil lühilaine-raadiosides, kus raadiolainete peegeldustingimused muutuvad ebaregulaarselt

- s.t. kanali ülekandefunktsioon sõltub nii sagedusest ω kui ka ajast t :

$$H(\omega) = H(\omega, t)$$

- vastuvõetud signaali nivoo muutub juhuslikult või ebaselge perioodilisusega
- Niisugust nähtust nimet. samuti **vaibumiseks**, nagu ka mitmekiirelevi korral
- Vaibumiste mõju saab vähendada automaatse võimenduse reguleerimise (AVR, AGC – *Automatic Gain Control*) abil vastuvõtjas

Piiratud ribalaiusega edastuskanal

Üldised piirangud sidesüsteemides

Sidesüsteemides eksisteerivad teatud üldised, süsteemi jõudlust vähendavad piirangud ja häired edastusel:

- kanali piiratud ribalaius
- piiratud saatevõimsus
- häired (müra, mitmekiirelevi, kaja)

Edastuskanali piiratud ribalaiuse põhjused

- sagedusliku multipleximise kasutamine (FDM)
- kanali füüsilised omadused
- regulatsioonid (TJA)

Piiratud ribaga kanali matemaatiline mudel

Piiratud ribaga kanalit võib vaadelda kui lineaarfiltrit vastava impulsskajaga $c(t)$ ja sageduskarakteristikuga $C(f)$

- Sageduskarakteristik $C(f) = 0$, kui sagedus $|f|$ on suurem kui kanali ribalaius W
- Kanali ribalaiuse piires võib sageduskarakteristiku esitada kujul

$$C(f) = |C(f)|e^{-j\theta(f)}$$

kus $|C(f)|$ on kanali amplituudikarakteristik ja $\theta(f)$ - faasikarakteristik

Ideaalne ja moonutustega kanal

- Ideaalse (moonutusvaba) kanali korral on $|C(f)|$ konstantne kõigil sagedustel $|f| \leq W$ ja $\theta(f)$ on sageduse lineaarfunktsioon
- Kui need tingimused ei ole täidetud, moonutab kanal edastatava signaali amplituudi ja/või faasi
- moonutustega kanali korral tekib kanali ribalaiusega W võrreldava sagedusega impulsside jada edastamisel vastuvõtjas impulssidevaheline ülekate (sümboliinterferents)

Edastus läbi piiratud ribalaiusega kanali

Edastatava põhirisignaali esitame impulsside jadana:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{\infty} I_n g(t - nT)$$

kus $\{I_n\}$ on infosümbolite jada, T – sümboliintervall ja $g(t)$ – piiratud ribalaiusega impulss

- impulsi spekter $G(f) = 0$ kanali ribalaiusest W kõrgematel sagedustel $|f| > W$
- kanali ülekandefunktsioon on $C(f)$
 - ka $C(f) = 0$, kui $|f| > W$

Vastuvõetud signaali töötlus vastuvõtjas

- Vastuvõetud signaal avaldub kui

$$r(t) = \sum_{n=0}^{\infty} I_n h(t - nT) + z(t)$$

kus $h(t)$ on vastuvõetud impulsi ajaline kuju ja $z(t)$ – aditiivne valge Gaussi müra.

- Vastuvõtjas esmalt filtreerime vastuvõetud signaali ja seejärel diskreedime selle sagedusega $1/T$ diskreeti sekundis
- Saab näidata, et vastuvõetud sümboli eristamisel on optimaalseks filtriks vastuvõetud impulsi sobitatud filter, s.t. filtri sageduskarakteristik on $H^*(f)$

Vastuvõetud signaali filtreerimine

Vastuvõtja filtri väljund:

$$y(t) = \sum_{n=0}^{\infty} I_n x(t - nT) + v(t)$$

- $x(t)$ on filtri reaktsioon sisendimpulsile $h(t)$
- $v(t)$ – filtri reaktsioon müra komponendile $z(t)$

Vastuvõetud signaali filtreerimine

Kui filtri väljundit $y(t)$ diskreetida momentidel

$$t = kT + \tau_0, \quad k = 0, 1, \dots$$

saame filtri väljunddiskreetid y_k :

$$y(kT + \tau_0) \equiv y_k = \sum_{n=0}^{\infty} I_n x(kT - nT + \tau_0) + v(kT + \tau_0)$$

või samaväärsel kujul

$$y_k = \sum_{n=0}^{\infty} I_n x_{k-n} + v_k, \quad k = 0, 1, \dots$$

kus τ_0 väljendab edastuskanalis tekkivat viidet.

Vastuvõetud signaali filtreerimine

Diskreetid võib esitada kujul

$$y_k = x_0 \left(I_k + \frac{1}{x_0} \sum_{n \neq k} I_n x_{k-n} \right) + v_k, \quad k = 0, 1, \dots$$

x_0 on suvaline mastaabitegur, mille loeme võrdseks 1-ga. Järelkult

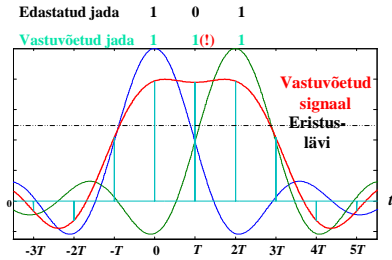
$$y_k = I_k + \sum_{\substack{n=0 \\ n \neq k}}^{\infty} I_n x_{k-n} + v_k$$

- liidetav I_k esitab soovitud infosümbolit k -ndal diskreetimishetkel,
- $\sum_{\substack{n=0 \\ n \neq k}}^{\infty} I_n x_{k-n}$ väljendab **sümboliinterferentsi** – teisi sümboleid kandvate impulsside häirivat mõju,
- v_k – aditiivne Gaussi müra komponent

Sümboliinterferents

- Sageli esineb edastatavate infosümbolite ajaline kattumine vastuvõtjas – sümboliinterferents (ISI)
 - ISI – *InterSymbol Interference*
 - tekkepõhjus: mitmekiirelevi

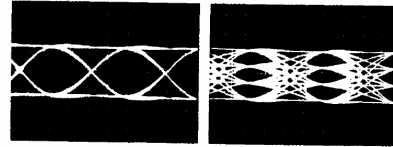
Sümboliinterferentsi näide



Kolmest sümbolist koosnev jada (1, 0, 1),
sümbolite sagedus $1/T$

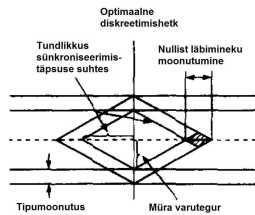
Sümboliinterferents

Sümboliinterferentsi ulatus ja müra mõju on digitaaledastusel hästi vaadeldav ostsillograafi ekraanil. Impulsskoodmodulatsiooni (IKM) korral saame ekraanil nn. silmadiagrammi (joonisel: 2 ja 4 nivooga IKM)



Sümboliinterferents

- Sümboliinterferents väljendub „silma“ sulgumises, mis vähendab suurimat lubatavat lisanduvat müra komponenti (müra varutegurit). Sümboliinterferents nihutab samuti nullist läbimineku hetki.
- Erinevate amplituud-faasmanipuleeritud (M-QAM) signaalide korral põhjustab sümboliinterferents ja müra vastuvõetud signaalipunktide asukohtade nihkumist signaali konstellaatsiooniagrammil.



Viited

- M. Renfors. Digital Transmission. Tampere TÜ loengumaterjalid.
- S. Haykin. Modern Wireless Communications.
- <http://www.learnabout-electronics.org/Amplifiers/amplifiers34.php>