

Raadiokanal

(järg)

Koherentsus-ribalaius

- Edastuskanali koherentsus-ribalaiuse B_C määratlemine kui ribalaiuse, mille piires võib kanali sageduskarakteristiku lugeda ühtlaseks (kõik spektrikomponendid sumbuvad võrdset)
- Koherentsus-ribalaiuse hindamise aluseks on võimsuse ruutkeskmine hajumine σ_T :

$$B_C \approx \frac{1}{\sigma_T}$$

- need parameetrid kirjeldavad kanali omadusi antud vastuvõtukohas
- ei anna infot vastuvõtja liikumise kohta

Spektri laienemine

- Vastuvõetud signaali spektri Doppleri efektist tingitud laienemist väljendab parameeter

$$B_D = 2\Delta f_{max}$$

- Kui signaali spektri laius $\Delta f \gg B_D$, võib Doppleri efekti mõju arvestamata jätta
- Aja

$$T_C \approx \frac{1}{B_D}$$

kestel kanali impulsskaja praktiliselt ei muutu

Kokkuvõte väikese mõõtkavaga levinähtustest

- Ühtlane vaibumine – sumbuvus on ühesugune signaali kogu ribalaiuses
 - signaali ribalaius on palju väiksem kui kanali koherentsus-ribalaius: $B_S \ll B_C$
 - sümboliintervall on oluliselt suurem kui kanali ajaline hajumine: $T_S \gg \sigma_T$
- Sagedusest sõltuv vaibumine – signaali spektrikomponendid sumbuvad erineval määral
 - signaali ribalaius on suurem kui kanali koherentsus-ribalaius: $B_S > B_C$
 - sümboliintervall on väiksem kui kanali ajaline hajumine: $T_S < \sigma_T$
 - ligikaudne reegel: ekvalaiser on vajalik, kui $\sigma_T > 0,1 T_S$

Kiired ja aeglased vaibumised

- Aeglased vaibumised – kanali impulsskaja on sümboliintervalli T_S kestel praktiliselt muutumatu
 - kanali koherentsusaeg on oluliselt suurem kui sümboliintervall: $T_C \gg T_S$
 - signaali ribalaius on palju suurem kui Doppleri hajumine: $B_S \gg B_D$
- Kiired vaibumised – kanali impulsskaja muutub sümboliintervalli kestel oluliselt
 - $T_C < T_S$
 - $B_S < B_D$

Vaibumised erinevas ajalisel mõõtkavas

- Vastuvõetud signaali keskmistamine pika aja jooksul – ei ole vaja arvestada Rayleigh' vaibumistega
- Bitivigasuse hindamisel üksikute bittide vastuvõtu järgi, s.t. häirekindluse analüüsil bitiintervalli kestusega võrreldavas ajaskaalas on Rayleigh' vaibumiste mõju vajalik arvesse võtta

Nakagami jaotused ja vaibumistega kanal

Vastuvõetud raadiosignaali nivoo α kõikumiste kirjeldamine vaibumistega kanalis

- Nakagami- n jaotus (Rice' jaotus)

$$p_\alpha(\alpha) = \frac{2(1+n^2)e^{-n^2\alpha}}{\Omega} \exp\left(-\frac{(1+n^2)\alpha^2}{\Omega}\right) I_0\left(2n\alpha\sqrt{\frac{1+n^2}{\Omega}}\right)$$

$n = 0 \dots \infty$ (vaibumisparameeter);

$n = 0 \Rightarrow$ Rayleigh' vaibumised;

$n \rightarrow \infty \Rightarrow$ AWGN kanal (ainult üks levitee)

Nakagami- n jaotus

Iseloomustab levitingimusi:

- mobiilsel vastuvõtul linnas
- pikorakkudes (ruumid, tehased)
- satelliidivastuvõtul
- laevadevaheliste raadiolinkide korral

Nakagami jaotused ja vaibumistega kanal

- Nakagami- m jaotus

- üldistatud jaotusseadus, mis sisaldab erijuhtudena Rayleigh', Rice' jne. jaotusi

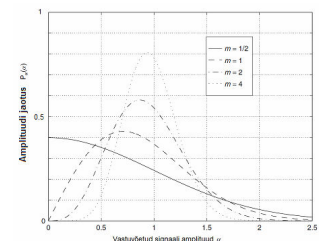
$$p_\alpha(\alpha) = \frac{2m^m \alpha^{2m-1}}{\Omega^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\alpha^2}{\Omega}\right), \quad \alpha \geq 0$$

- kirjeldab sageli kõige täpsemalt mitmekiirelevi mobiilsel vastuvõtul (nii maapiirkonnas kui sisetingimustes) ja ionosfäärilevi

Nakagami- m jaotuse graafikud $\Omega = 1$ korral

Erijuhud:

- $m = 1/2 \rightarrow$ ühepoolne normaaljaotus (halvim vaibumiste tüüp)
- $m = 1 \rightarrow$ Rayleigh' jaotus
- $m \rightarrow \infty \rightarrow$ vaibumisteta AWGN kanal



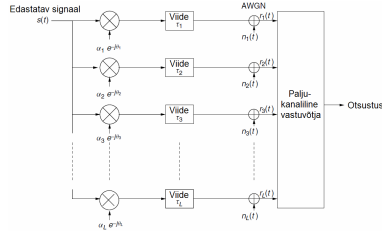
Hajusvastuvõtt

Hajusvastuvõtt (*diversity*)

- Hajusvastuvõtt – vaibumiste mõju vähendamine signaali mitme koopia vastuvõtu abil häiresuhte parandamiseks: kõik koopiad vaibuvad üheaegselt väga väikese tõenäosusega
- Raadiosignaali mitme koopia vastuvõtu (hajusvastuvõtu) variandid:
 - Ruumiline – mitu vastuvõtuantenni
 - Sageduslik – edastus mitmel sagedusel; sageduste erinevus on suurem kui kanali koherentsus-ribalaius (hajaspekter- või mitme kandjaga edastus)
 - Ajaline – edastus mitmes ajapilus, mis on eraldatud vähemalt kanali koherentsusaja võrra
 - Mitmekiirelevi ärakasutamine – peegeldunud signaalide energia kogumine (otsehajutusega hajaspektersüsteemid koos RAKE vastuvõtjaga)

Hajusvastuvõtuga kanali matemaatiline mudel

- Edastuskanal jaguneb mitmeks osakanaliks, mille korral signaal jõuab vastuvõtjasse läbi L aeglase vaibumistega kanali



Hajusvastuvõtuga kanali matemaatiline mudel

- osakanaleid kirjeldavad parameetrid:
 - $\{a_i\}$ – i -nda signaali amplituud ($i = 1, \dots, L$)
 - $\{\theta_i\}$ – faas
 - $\{\tau_i\}$ – viide
- Eeldame, et need kolm parameetrite hulka on üksteisest sõltumatud ja parameetrite väärtused ei muutu ühe sümboliintervalli kestel
- Olgu viide esimeses (referents-)kanalis $\tau_1 = 0$ ja $\tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_L$
- Osakanalites lisanduvad signaalidele adiitiivsed mürakomponendid võimsuse spektraaltihedusega $\{N_i\}$. Eeldame, et mürakomponendid on üksteisest ja signaalide amplituudidest (vaibumiste ulatusest) sõltumatud.

Signaalide liitmise "puhtad" meetodid

- Suurima summaarse häiresuhtega liitmine
 - eri osakanalite signaale võimendatakse enne liitmist erineval määral vastavalt häiresuhtele antud osakanalis ("puhtaimat" signaali võimendatakse kõige rohkem)
 - optimaalne meetod, kuid eeldab osakanalites levivate signaalikomponentide amplituudide ja faaside hindamist vastuvõtjas
- Võrdse võimendusega liitmine
 - mitteoptimaalne meetod
 - vajalik on ainult osakanalite signaalide faaside hindamine, seega lihtsam meetod

Signaalide liitmise "puhtad" meetodid

- Suurima häiresuhtega osakanali (signaali) valik
 - puudub mitme osakanali signaalide koherentne liitmine, seega ei ole vaja teada signaali faasi
 - eeldab pidevat häiresuhte jälgimist kõigis osakanalites
 - kasutatav diferentsiaalmodulatsiooniga signaalide ja mittekoherentsetel vastuvõtudel
- Osakanalite vahel ümberlülitamine läve alusel
 - demoduleeritakse teatud osakanali signaali seni, kuni häiresuhte ei lange allapoole etteantud läve
 - vastuvõtja ei jälgi pidevalt kõiki osakanaleid, s.t. ei pöörata sellele tähelepanu, kas mõnes teises osakanalis on parem häiresuhte
 - lihtsam variant: häiresuhte langemisel osakanalis alla läve lülitatakse ümber teise osakanali signaali demoduleerimisele, vaatamata sellele, kas selles osakanalis on häiresuhte lävest suurem või väiksem
 - kasutatav kõikide edastusmeetodite korral (koherentne ja mittekoherentne vastuvõtt)

Hübriid-liitmismeetodid

- adaptiivne L_c suurima häiresuhtega osakanali otsing (kõigi L osakanali hulgast) ja valitud osakanalite signaalide liitmine.
- Mitme hajusvastuvõtu meetodi kombineerimine
 - nt. kahemõtteline RAKE vastuvõtja WCDMA-süsteemis
 - kasutatakse mitut RAKE vastuvõtjat koos antennivõredegaga
 - iga antennivõre paikneb erinevas ruumipunktis

Kompromiss keerukuse ja jõudluse vahel

- Seos ühelt poolt häiresuhte, sidekatkestuse tõenäosuse ja vastuvõetud sümbolite vigasuse ning teiselt poolt modulatsiooni- ja hajusvastuvõtu variantide ja vaibumise tüüpide vahel

Vaibumistega kanalit iseloomustavad põhiparameetrid seoses hajusvastuvõtuga

- vaibumiste jaotusseadused erinevates osakanalites
- signaali nivoo kahanemise profiil osakanalites
 - mitmekiirelevil eeldatakse leviteedega seotud signaalide võimsuse ja seega ka häiresuhte eksponentsiaalset kahanemist osakanalites levitee pikkuse (osakanali järjekorranumbri) kasul:

$$\overline{SNR}_l = \overline{SNR}_1 e^{-\delta(l-1)} \quad (l = 1, \dots, L)$$

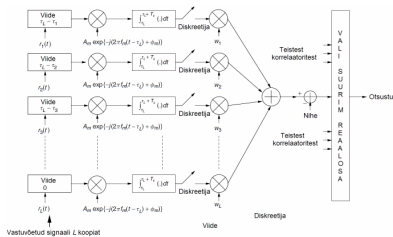
kus \overline{SNR}_1 on häiresuhte esimesel (referents-) leviteel ja δ – keskmise võimsuse kahanemise tegur

Vaibumistega kanalit iseloomustavad põhiparameetrid seoses hajusvastuvõtuga

- vaibumiste ulatus (sügavus)
- vaibumiste korreleeritus (antennide ebapiisav vahemaa)

Suurima häiresuhte alusel liitmine

- Vaatleme L osakanaliga vastuvõtjat
- See on optimaalne paljukanaliline vastuvõtja, sõltumata vaibumiste tüübist erinevates osakanalites



L osakanaliga vastuvõtja

- Kaalud $w_l = a_l / N_l$ ($l = 1, \dots, L$) ja nihe $\sum_{l=1}^L \frac{\alpha^2}{N_l}$.
- Võrdtõenäoste sümbolite korral on summaarne tinglik häiresuhte ühe sümboli kohta signaalide liitja väljundis

$$SNR_l = \sum_{l=1}^L SNR_l$$

- Bitivigastus koherentsel bitidastusel avaldub seosega

$$P_b(E | SNR_l, l = 1, \dots, L) = Q(\sqrt{2gSNR_l}),$$

kus parameeter g sõltub edastusmeetodist (nt. koherentsel BPSK korral $g = 1$)

Keskmine bitivigastus osakanalitega vastuvõtjas

- Tinglikku bitivigastust tuleb keskmistada juhuslike häiresuhte $\{SNR_l, l = 1, \dots, L\}$ järgi
- Klassikalise meetodi korral leitakse summaarse tingliku häiresuhte jaotusseadus $p(SNR_l)$ ja arvutatakse selle alusel keskmine bitivigastus

$$P_b(E) = \int_0^{\infty} Q(\sqrt{2gSNR_l}) p(SNR_l) dSNR_l$$

- keskmise bitivigastuse analüütilise avaldise leidmine eeldab $p(SNR_l)$ lihtsa esituse olemasolu

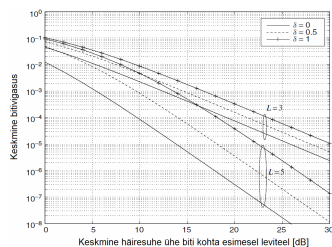
Keskmine bitivigastus osakanalitega vastuvõtjas

- Enamasti on osakanalite parameetrid erinevad
 - erinevad võimsuse hajumise profiilid
 - erinevad vaibumiste jaotusseadused
- Niisugusel juhul on sobiv rakendada momente genereerivat funktsiooni kasutatavat meetodit Q-funktsiooni korrutisena esitamisega

$$P_b(E | SNR_l, l = 1, \dots, L) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{gSNR_l}{\sin^2 \phi}\right) d\phi = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \exp\left(-\frac{gSNR_l}{\sin^2 \phi}\right) d\phi$$

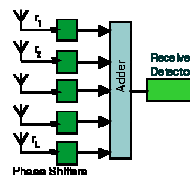
Keskmine bitivigasus BPSK ja hajusvastuvõtu korral

- Hajusvastuvõtt:
 - $L = 3; 5$
- Raadiokanal on sagedus-selektiivne ja Nakagami- m jaotusega vaibumistega ($m = 0,5$)
 - δ – võimsuse kahanemise tegur



Signaalide koherentne võrdse võimendusega liitmine

- Vastuvõtja töötleb kõigi L osakanali signaale:
 - Ühe osasignaali töötlemine seisneb edastusel tekkinud faasinihke hindamises ja selle kõrvaldamises
 - Saadud koherentsed signaalid liidetakse



Joonis: www.wirelesscommunication.nl

Signaalide koherentne võrdse võimendusega liitmine

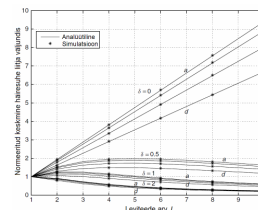
- Liitsignaali tinglik häiresuhe (eeldusel, et kõik sümbolid on võrdse energiaga E_s)

$$SNR_t = \frac{\left(\sum_{l=1}^L \alpha_l\right)^2 E_s}{\sum_{l=1}^L N_l}$$

kus α_l – vastuvõetud signaali suhteline tase l -ndal leviteel
 E_s – sümboli energia,
 N_l – müra võimsuse spektraaltihedus l -ndal leviteel

Signaalide koherentne võrdse võimendusega liitmine

- Joonis – liitsignaali esimese levitee signaali häiresuhte järgi normeeritud häiresuhe SNR_t/SNR_s Nakagami- m kanalis erineva kiirusega kahanevate võimsustega ($\delta = 0; 0,5; 1; 2$) osasignaali korral
- võrdse võimendusega liitmine on mitteoptimaalne
 - tekivad liitmiskao liitsignaali normeeritud häiresuhte vähenemise osasignaali võimsuse kiirema kahanemise korral (δ suurenemisel)
- Võrdse võimendusega liitmise efektiivsus on lähedane optimaalsele, kui signaalide võimsused osakanalites on ligikaudu võrdsed ($\delta \approx 0$)



Viited

- H.H.Nguyen, E.Shwedyk, A First Course in Digital Communications. Cambridge University Press, 2009.
- C. Comaniciu, kursuse 'EE653 Cross-Layer Design for Wireless Networks' loengumaterjalid (Stevens Institute of Technology, Hoboken, USA)
- www.wirelesscommunication.nl