TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Tietoverkkolaboratorio

4. Liikenteen mallinnus ja mittaus

Sisältö

- Perinteinen puhelinliikenteen mallinnus
- Liikenteen vaihtelu
- Liikenteen mittaus
- Perinteinen dataliikenteen mallinnus
- Uudet dataliikenteen mallit

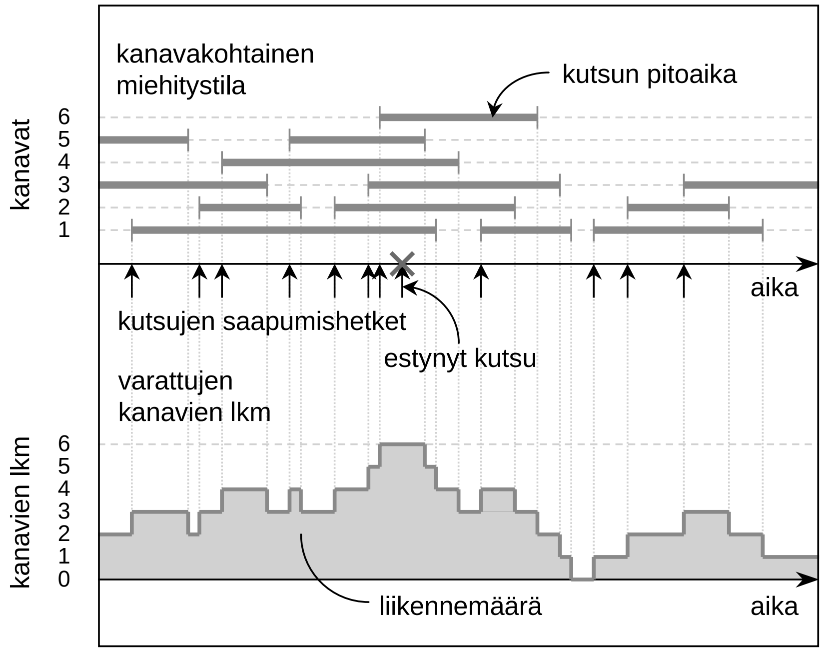
Puhelinliikenteen mallinnus

- Puhelinverkossa liikenne koostuu **kutsuista** (puheluista)

Liikenne ↔ Kutsut

- Verkon kannalta on tärkeää kuvata
  - **kutsujen saapumisprosessi** (millä hetkillä uusia puheluja yritetään käynnistää)
  - **kutsujen pitoaikajakauma** (miten kauan yksittäiset puhelut kestävät)
- Nämä yhdessä muodostavat
  - **liikenneprosessin**, joka kertoo montako puhelua on yhtaikaa käynnissä
    = montako kanavaa on yhtaikaa varattuna
    = kuljetetun liikenteen (hetkellisen voimakkuuden) erlangeina
- Huom. Tiettynä aikavälinä kuljetettua kokonaisliikennettä sanotaan
  - **liikennemääräksi** eli liikenteen volyymiksi
    = liikenteen voimakkuuden integraali yli ko. aikavälin

Liikenneprosessi

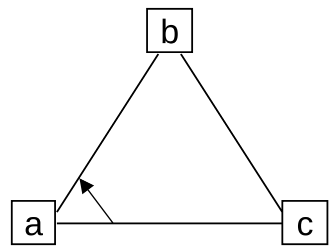


Kutsujen saapumisprosessin mallinnus (1)

- **Aggregoitu liikenne** (runkoverkossa)
  - perinteinen malli: Poisson-prosessi (intensiteetillä λ)
    - hyvin lyhyellä aikavälillä Δ tulee joko uusi kutsu (tn:llä $\lambda\Delta$) tai sitten ei (tn:llä $1 - \lambda\Delta$)
    - eri aikavälit ovat toisistaan riippumattomia
    - tuloksena riippumattomat ja eksponentiaaliset saapumisten väliajat keskiarvolla $1/\lambda$
  - malli toimii, jos hyvin suuri käyttäjäpopulaatio, joka tekee päätöksiä kutsujen käynnistämisestä toisistaan (ja aiemmista päätöksistään) riippumatta
  - vastaavat järjestelmämallit:
    - **Poisson-malli** (ääretön kapasiteetti)
    - **Erlang-malli** (äärellinen kapasiteetti)

Kutsujen saapumisprosessin mallinnus (2)

- Hierarkkiseen vaihtoehtois-reititykseen liittyvä **ylivuoto-liikenne** (runkoverkossa)
  - mallinnettu esim. keskeytyvänä Poisson-prosessina (Interrupted Poisson Process, IPP) tai yleisemmin Markov-moduloituna Poisson-prosessina (Markov modulated Poisson process, MMPP)
  - ideana on, että Poisson-prosessin mukaiset saapumiset sallitaan tai estetään riippuen ns. moduloivan prosessin tilasta



suora reitti: a - c
vaihtoehtoinen reitti: a - b - c

Kutsujen saapumisprosessin mallinnus (3)

- **Yksittäinen käyttäjä** (tilaajan käyttäytymisen mallinnus)
  - perinteinen malli: eksponentiaalinen on-off-prosessi
    - käyttäjä voi olla kahdessa eri tilassa: ‘on’ ja ‘off’
      - kun puhelu on käynnissä, tila on ‘on’
      - muutoin tila on ‘off’
    - sekä kutsun pitoajat että eri kutsujen väliset ajat oletetaan eksponentiaalisesti jakautuneiksi (tyypillisesti eri parametreilla)
- Yksittäisten käyttäjien **superpositio** (tilaajaverkossa)
  - äärellinen määrä yksittäisiä käyttäjiä, jotka
    - mallinnetaan kuten yllä ja
    - toimivat toisistaan riippumatta
  - vastaavat järjestelmämallit:
    - **Binomi-malli** (riittävä kapasitetti)
    - **Engset-malli** (riittämätön kapasiteetti)

Kutsujen pitoajan mallinnus (1)

- Perusoletus:
  - pitoajat ovat **riippumattomia** ja **samoin jakautuneita** (independent and identically distributed, **IID**)
- Pitoajan jakauma
  - perinteinen malli: eksponentiaaliset pitoajat
    - 1 parametri $\Rightarrow$ **yksinkertaisuus!**
    - muistittomuus: kestettyään ajan t, kutsu päättyy lyhyessä aikavälissä $(t, t+\Delta)$ ajasta t riippumattomalla tn:llä $\mu\Delta$
    - häntäjakauma pienenee eksponentiaalista vauhtia
  - monimutkaisempia malleja:
    - normaalijakauma (2 parametria: keskiarvo ja varianssi)
    - log-normaalijakauma (2 parametria)
    - Weibull-jakauma (2 parametria)
    - hypereksponentiaalinen (3 parametria)

Kutsujen pitoajan mallinnus (2)

- Pitoaika riippuu myös esim. siitä,
  – onko kyseessä liike- vai yksityispuhelu (päivä vs. ilta)
  – onko kyseessä tavallinen puheyhteys vai kenties puhelinyhteyden käyttö muihin tarkoituksiin (kuten Internet-surffailu, faxin lähetys yms.)

Sisältö

- Perinteinen puhelinliikenteen mallinnus
- Liikenteen vaihtelu
- Liikenteen mittaus
- Perinteinen dataliikenteen mallinnus
- Uudet dataliikenteen mallit

Liikenteen vaihtelu eri aikaskaaloissa (1)

- **Ennustettavat vaihtelut**
  - **Trendikehitys** (vuosia)
    - liikenteen määrän kasvu:
      - olemassaolevat palvelut: käyttäjien määrän kasvu, käyttötottumuksen muutokset, tariffien muutokset
      - uudet palvelut
  - **Vuosittainen kausivaihtelu**, vuosiprofiili (kuukausia)
  - **Viikkorytmiin liittyvät vaihtelut**, viikkoprofiili (päiviä)
  - **Päivärytmiin liittyvät vaihtelut**, päiväprofiili (tunteja)
    - sisältäen “kiiretunnin”
    - huom. eri käyttäjäryhmillä erilaiset (päivä-/viikko-/vuosi-) profiilit
  - **Ulkoisista tapahtumista** johtuvat ennustettavat vaihtelut
    - säännölliset: esim. joulu
    - epäsäännölliset: esim. puhelinäänestykset

4. Liikenteen mallinnus ja mittaus

Liikenteen vaihtelu eri aikaskaaloissa (2)

- **Satunnaiset vaihtelut**
  - **Lyhyen aikavälin satunnaisvaihtelut** (sekunteja - minuutteja)
    - toisistaan riippumattomien käyttäjien käyttäytymiseen liittyvät vaihtelut
      - satunnaiset kutsujen saapumiset
      - satunnaiset kutsujen pitoajat
  - **Pitkän aikavälin satunnaisvaihtelut** (tunteja - ...)
    - satunnaiset vaihtelut päivä-, viikko-, vuosiprofiilin ympärillä
    - jokainen päivä, viikko, … on erilainen
  - **Ulkoisten tapahtumien** aiheuttamat satunnaisvaihtelut
    - esim. maanjäristykset ja muut luonnonmullistukset

Kiiretunti (1)

- Verkon mitoittaminen suurimman milloinkaan esiintyvän liikennehuipun varalle ei ole tarkoituksenmukaista
- Puhelinverkoissa mitoitusta varten kehitetty (laskennallinen) liikenteen huippua kuvaava suure on ns. **kiiretunnin** (busy hour) **liikenne**

Kiiretunti ≈ se yhden tunnin pituinen jakso, jona liikenteen määrä on suurin

  – tämä määritelmä on yksikäsitteinen vain yksittäisille päiville
  – kyseessä on siis (tarkkaan ottaen) päivittäinen huipputunti (daily peak hour)

- Mitoitukseen sopivien (useampaan päivään liittyvien) keskimääräisten arvojen määräämiseksi suosituksissa on määritelty kiiretunnin liikenteelle erilaisia mittaustapoja
  – ADPH (Average Daily Peak Hour)
  – TCBH (Time Consistent Busy Hour)
  – FDMH (Fixed Daily Measurement Hour)

Kiiretunti (2)

- Merkitään
  – N = mitattauspäivien lkm (esim. N = 10)
  – $a_n(\Delta)$ = liikenteen keskim. voimakkuus mittauspäivän n aikavälillä Δ
  – $\max_\Delta a_n(\Delta)$ = huipputunnin liikenne mittauspäivänä n
- Kiiretunnin liikenne a eri menetelmillä laskettuna:

$$a_{\mathrm{ADPH}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \max_\Delta a_n(\Delta)$$

$$a_{\mathrm{TCBH}} = \max_\Delta \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} a_n(\Delta)$$

$$a_{\mathrm{FDMH}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} a_n(\Delta_{\mathrm{fixed}})$$

- Selvästikin

$$a_{\mathrm{FDMH}} \le a_{\mathrm{TCBH}} \le a_{\mathrm{ADPH}}$$

Sisältö

- Perinteinen puhelinliikenteen mallinnus
- Liikenteen vaihtelu
- Liikenteen mittaus
- Perinteinen dataliikenteen mallinnus
- Uudet dataliikenteen mallit

Liikenteen mittaus (1)

- Liikennemittauksia tarvitaan
  - verkonsuunnittelua varten
    - mitoituksen pohjaksi
    - liikennemallien luomiseksi
    - liikenne-ennusteiden tekemiseksi
  - dynaamisen liikenteenhallinnan toteuttamiseksi
    - mittauksiin perustuva yhteyksien hyväksyntämenettely
    - dynaaminen reititys
    - ruuhkan havaitseminen ja hallinta
  - mutta myös laskutustiedon keräämiseksi
- Liikennemittausten tarve kasvaa, sillä …
  - tulee uusia palveluita ja uudenlaisia verkkoja
  - liikenteen luonne muuttuu, käyttötottumukset muuttuvat, tariffit muuttuvat
  - liikenne tietoverkoissa on erilaista kuin perinteisessä puhelinverkossa

Liikenteen mittaus (2)

- Puhelinverkon mittaukset
  - liikenne eri linkeillä
    - liikenneprosessi (liikenteen voimakkuus varattuina kanavina)
    - kutsujen saapumisprosessi (saapumisväliajat)
    - kutsujen pitoajat
  - liikenne runkoverkon solmuissa
    - eri suuntiin lähtevän liikenteen jakauma
    - eri suunnista tulevan liikenteen jakauma
  - liikenne liityntäverkon solmuissa
    - liikenteen jakauma lähteen tyypin mukaan
    - eri palveluiden käyttö

Liikenteen mittaus (3)

- Internetin/lähiverkkojen mittaukset
  - liikenne eri linkeissä
    - liikenneprosessi (linkin käyttöaste)
  - liikenne eri solmuissa
    - pakettitasolla (IP)
      - pakettien saapumisprosessi (saapumisväliajat)
      - pakettien koot
    - yhteystasolla (TCP)
      - yhteyksien saapumisprosessi (saapumisväliajat)
      - yhteyksien kestot
      - yhteyksien aikana siirrettyjen bittien määrät
      - em. tiedot sovellutuksittain (ftp / http / email / telnet etc.)

Liikennemittausten analysointi

- Perinteiset tilastolliset menetelmät:
  - parametrien **estimointi**
    - liikenneintensiteetti
    - liikenteen vaihtelu (lyhyen aikavälin varianssi)
    - liikenteen huipukkuus
  - liikenneintensiteetin tiheysfunktion estimointi
  - liikenteen autokorrelaation estimointi
- Uusi lähetymistapa:
  - liikenteen **skaalautuvuuden** analyysi
    - itsesimilaarisuus
    - multifraktaalisuus

4. Liikenteen mallinnus ja mittaus

Liikenneintensiteetin estimointi liikennemittauksista

- Tarkastellaan puhelinverkon liikenneprosessia (yksittäisessä linkissä)
  - Liikennettä mitataan aikavälillä $[0,T]$ (esim. kiiretunti)
  - Merk. $V(T)$:llä liikenteen määrää tällä aikavälillä (satunnaismuuttuja!)
- Tarkoitus on estimoida (välitetyn liikenteen) liikenneintensiteettiä a
  - em. mittauksiin perustuen
  - olettaen, että se pysyy vakiona ko. aikavälillä
- Ilmeinen a:n **estimaatti** on

$$\hat{a} = \frac{V(T)}{T}$$

- Kyseessä on **harhaton** (unbiased) estimaatti, ts. sen odotusarvo on a:

$$E[\hat{a}] = \frac{E[V(T)]}{T} = a$$

Erilaiset mittaustavat (1)

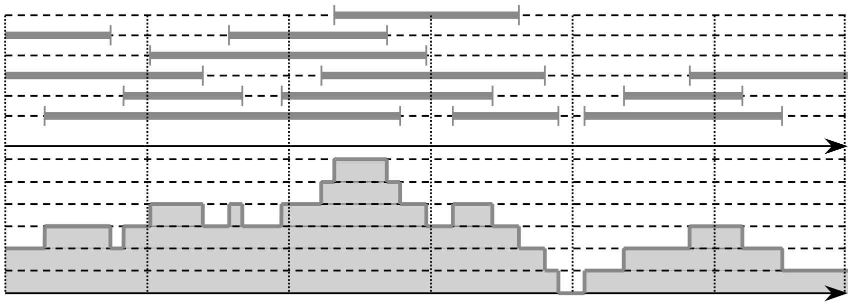
- **Jatkuva mittaus**
  - rekisteröi
    - varattujen kanavien lkm:n hetkellä 0
    - kunkin uuden yhteyden tarkan alkuhetken
    - kunkin yhteyden tarkan lopetushetken
  - tuottaa näin **tarkan** arvon ko. välissä kertyneelle liikennemäärälle $V(T)$
- Säännöllisin väliajoin tehdyt **pistokokeet**
  - rekisteröivät
    - varattujen kanavien lkm $X(t)$ hetkillä $t = 0, \Delta, 2\Delta, ..., T-\Delta$
  - liikennemäärä **arvioidaan** kertomalla näytteet $X(t)$ välin pituudella Δ ja summaamalla yli t:n, ts.

$$\hat{V}_{\Delta}(T) = \sum_{n=0}^{(T/\Delta)-1} X(n\Delta) \cdot \Delta$$

  - arvioidussa liikennemäärässä on selvästikin mittaukseen liittyvää epätarkkuutta: mitä lyhyempi mittausväli Δ, sitä tarkempi arvio

Erilaiset mittaustavat (2)

Jatkuva mittaus



Säännöllisin väliajoin tehdyt pistokokeet

Estimaatin tarkkuudesta (1)

- Jatkuva mittaus
  - Estimaatti $\hat{a}$ itsessään on satunnaismuuttuja suhteellisena virheenään

$$\frac{D[\hat{a}]}{E[\hat{a}]} = \frac{D[V(T)]}{E[V(T)]} = \frac{D[V(T)]}{aT}$$

  - Suhteellisen virheen laskemiseksi oletetaan, että
    - uudet kutsut saapuvat Poisson-prosessin mukaisesti
    - pitoajat ovat eksponentiaalisesti jakautuneita keskiarvolla $h = 1$
    - linkin kapasiteetti on ääretön
  - Tällöin suhteelliseksi virheeksi tulee likimäärin

$$\frac{1}{\sqrt{a}}$$ (kun T on hyvin pieni)

$$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{a}\sqrt{T}}$$ (kun T on tarpeeksi suuri)

Estimaatin tarkkuudesta (2)

- Säännöllisin väliajoin tehdyt pistokokeet
  - Estimaatti $\hat{a}_\Delta$ itsessään on jälleen satunnaismuuttuja suhteellisena virheenään

$$\frac{D[\hat{a}_\Delta]}{E[\hat{a}_\Delta]} = \frac{D[\hat{V}_\Delta(T)]}{E[\hat{V}_\Delta(T)]} = \frac{D[\hat{V}_\Delta(T)]}{aT}$$

  - Huom. Tällä kerralla estimaatissa on
    - paitsi em. satunnaisista vaihteluista johtuvaa virhettä (a:n and $\hat{a}$:n välillä, missä $\hat{a} = V(T)/T$)
    - myös mittaustavasta johtuvaa virhettä (tarkan liikenemäärän $V(T)$:n ja sen oman estimaatin välillä)
  - Samoilla oletuksilla kuin edellä suhteelliseksi virheeksi tulee likimäärin

$$\frac{\sqrt{\Delta}}{\sqrt{a}\sqrt{T}} \cdot \frac{\sqrt{1+\exp(-\Delta)}}{\sqrt{1-\exp(-\Delta)}}$$ (kun T on tarpeeksi suuri)

Esimerkki

- Tarkkuusvaatimus:
  - liikenneintensiteetin estimaatin suhteellinen virhe korkeintaan $p = 5\%$
- Oletus:
  - välitetyn liikenteen todellinen intensiteetti $a = 100$ erlangia
- Jatkuva mittaus:
  - mittausjakson pituuden T pitää olla vähintään

$$T \geq \frac{2}{a \cdot p^2} = \frac{2}{100} \cdot \left(\frac{100}{5}\right)^2 = 8.0 \text{ (keskim. pitoaikaa)}$$

- Säännöllisin väliajoin tehdyt pistokokeet (mittausvälinä $\Delta = 1$):
  - mittausjakson pituuden T pitää olla vähintään

$$T \geq \frac{\Delta}{a} \cdot \frac{1+\exp(-\Delta)}{1-\exp(-\Delta)} \cdot \frac{1}{p^2} \cong \frac{2.164}{100} \cdot \left(\frac{100}{5}\right)^2 \cong 8.7 \text{ (keskim. pitoaikaa)}$$

Sisältö

- Perinteinen puhelinliikenteen mallinnus
- Liikenteen vaihtelu
- Liikenteen mittaus
- Perinteinen dataliikenteen mallinnus
- Uudet dataliikenteen mallit

Dataliikenteen mallinnus

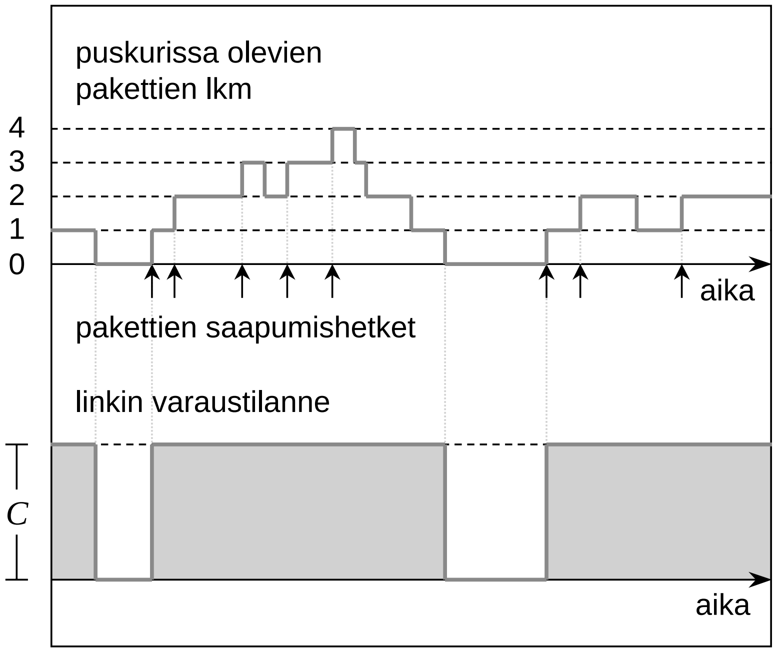
- Perinteinen malli **yhteystasolla** (connection level)
  - uusia yhteyksiä syntyy Poisson-prosessin mukaisesti
    ⇒ yhteyspyyntöjen väliajat riippumattomia ja samoin jakautuneita noudattaen eksponenttijakaumaa
  - yhteyksien kestot ovat eksponentiaalisesti jakautuneita
  - järjestelmämallina **ääretön systeemi** (ei yhteyksien hyväksymismenettelyä)
- Perinteinen malli **pakettitasolla** (packet level)
  - uusia paketteja saapuu Poisson-prosessin mukaisesti
    ⇒ pakettien väliajat riippumattomia ja samoin jakautuneita noudattaen eksponenttijakaumaa
  - pakettien pituudet riippumattomia ja samoin jakautuneita noudattaen eksponenttijakaumaa
    ⇒ pakettien lähetysajat riippumattomia ja samoin jakautuneita noudattaen eksponenttijakaumaa
  - järjestelmämallina yhden palvelijan **jonotusjärjestelmä** (M/M/1 jonomalli)

Pakettitason liikenneprosessi (1)

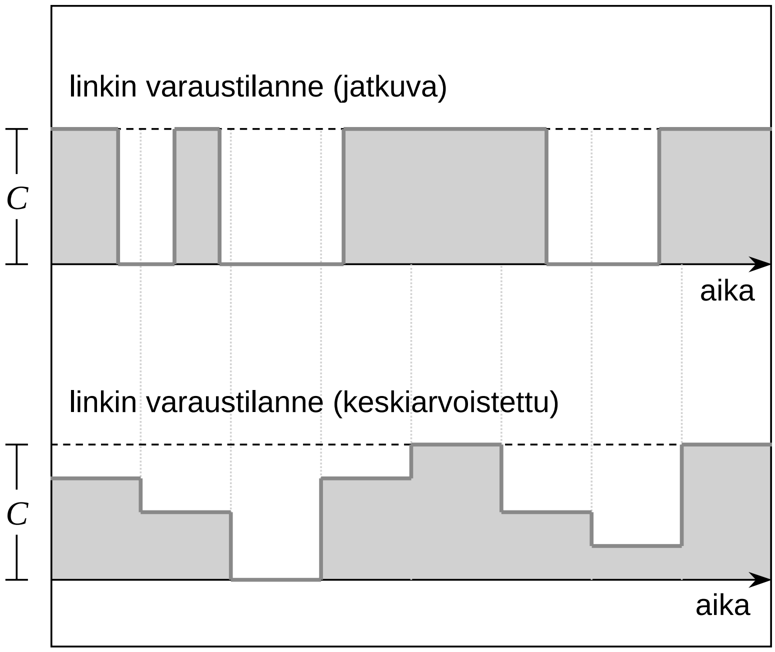
- Pakettitason liikenneprosessin luonne
  - jatkuvassa ajassa tarkasteltuna on vain kaksi vaihtoehtoa
    - joko linkin kapasiteetti on kokonaan käytössä
    - tai sitten se ei ole ollenkaan käytössä

    riippuen siitä, onko linkkiä syöttävässä puskurissa paketteja vai ei
  - keskiarvoistettaessa tätä prosessia
    - varatulle kapasiteetille tulee useampia arvoja

Pakettitason liikenneprosessi (2)

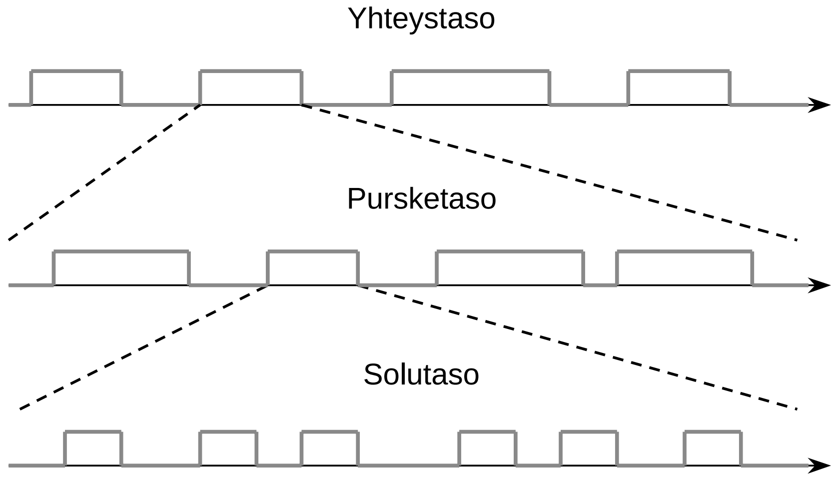


Pakettitason liikenneprosessi (3)



ATM-liikenteen mallinnus (1)

- Kolme eri aikaskaalaa:



ATM-liikenteen mallinnus (2)

- **Yhteystaso** (connection level)
  - “liikenteen yksikkö” = yhteys
  - järjestelmämallina **menetysjärjestelmät** (CBR- ja VBR-yhteyksille)
- **Pursketaso** (burst level)
  - “liikenteen yksikkö” = vaihtelevanmittainen (ja mahdollisesti vaihtelevan-nopeuksinen) purske
  - järjestelmämallina ns. **nestejonomallit** (fluid queue):
    - Anick-Mitra-Sondhi (A-M-S): eksponentiaaliset on-off-lähteet (lkm $< \infty$)
    - Kosten: eksponeniaaliset on-off-lähteet (lkm $= \infty$)
- **Solutaso** (cell level)
  - “liikenteen yksikkö” = kiinteänpituinen paketti = solu
  - järjestelmämallina **jonotusjärjestelmät**:
    - periodisten lähteiden superpositio (N*D/D/1)
    - solujen saapumiset Poisson-prosessin mukaisia (M/D/1)

Sisältö

- Perinteinen puhelinliikenteen mallinnus
- Liikenteen vaihtelu
- Liikenteen mittaus
- Perinteinen dataliikenteen mallinnus
- Uudet dataliikenteen mallit

Bellcorella tehdyt Ethernet-mittaukset

- Bellcorella tehdyt Ethernet (LAN) mittaukset (‘89-’92)
  – pitkäaikainen (sis. satoja miljoonia paketteja) ja erittäin tarkka mittaus
    - jokaisen paketin koko ja lähetyshetki rekisteröitiin
  – kts. IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 2, nr. 1, pp. 1-15, February 1994
- Johtopäätökset:
  – Ethernet-liikenne näyttää olevan **äärimmäisen vaihtelevaa**
    - purkeisuutta kaikissa aikaskaaloissa mikrosekunneista milli-sekunteihin, sekunteihin, tunteihin, kuukausiin, …
  – Ethernet-liikenne näyttää olevan **itsesimilaarista** (self-similar) ja sisältävän **pitkän aikavälin riippuvuutta** (long-range dependence, LRD)
    - jos sitä tarkastellaan eri aikaskaaloissa (zoomataan), se näyttää samanlaiselta, ainoastaan vaihteluiden amplitudi muuttuu
    - ns. Hurstin parametri (siis yksi ainoa) kuvaa riippuvuuden astetta
  – Perinteiset dataliikenteen mallit (Poisson-prosessi, eksponenttijakauma) eivät tuo esiin näitä havaittuja, uusia Ethernet-liikenteen ominaisuuksia!

Paxsonin ja Floydin Internet-mittaukset

- Paxsonin ja Floydin Internet (WAN) mittaukset (‘93-’95)
  - sekä yhteys- että pakettitason tarkastelu
  - kts. IEEE/ACM Trans. Networking vol. 3, nr. 3, pp. 226-244, June 1995
- Yhteystason johtopäätökset:
  - yhteydet, joihin liittyy todellinen (elävä) käyttäjä ja joissa ko. käyttäjä ei käynnistä uusia yhteyksiä istuntonsa aikana (TELNET, FTP sessions), voidaan mallintaa Poisson-saapumisprosessilla (kuitenkin tuntikohtaisin keskiarvoin)
  - sen sijaan muunlaiset yhteydet, ts. aidosti tietokoneiden väliset (SMTP, NNTP) sekä sellaiset, joissa käyttäjä luo useita yhteyksiä saman istunnon aikana (HTTP, FTP data), ovat **purskeisempia** kuin mitä Poisson-malli antaisi olettaa; lisäksi saapumisväliaikojen **korreloituneisuus**
- Pakettitason johtopäätökset
  - TELNET pakettien väliaikojen jakauma on **paksuhäntäinen** (heavy-tailed) eikä siis eksponentiaalinen, kuten perinteiset mallit olettavat

Dataliikenteen uudet mallit (1)

- “Uusia” jakaumia:
  - **subeksponentiaaliset** jakaumat (subexponential distributions)
    - “worse than exponential tail”
    - esim. log-normaalinen, Weibull- ja Pareto-jakauma
  - **paksuhäntäiset** jakaumat (heavy tailed distributions)
    - “power-law tail”
    - esim. Pareto-jakauma (sijaintiparametrina a ja muotoparametrina β)

$$P\{X > x\} = \left(\frac{a}{x}\right)^{\beta}, \quad x \ge a > 0, \ \beta > 0$$

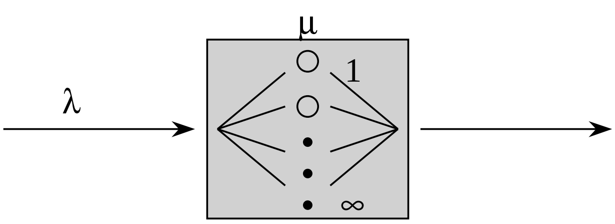
- Uusissa dataliikenteen malleissa näillä jakaumilla kuvataan
  - pakettien pituuksia ja saapumisväliaikoja
  - yhteyksien kestoja ja saapumisväliaikoja

Dataliikenteen uudet mallit (2)

- “Uusia” prosessimalleja:
  - **pitkän aikavälin riippuvuutta** sisältävät prosessit (long range dependence, LRD)
  - **itsesimilaariset** prosessit (self-similarity)
- Jos stokastinen prosessi on (asymptoottisesti) itsesimilaarinen ja positiivisesti korreloitunut, niin se sisältää pitkän aikavälin riippuvuutta
  - esim. **fraktionaalinen Brownin liike** (fractional Brownian motion, FBM)
    - soveltuu kuvaamaan aggregoitua dataliikennettä (runkoverkossa)
    - itsesimilaarinen ja pos. korreloitunut prosessi $\Rightarrow$ LRD
    - vain kolme parametria (säästeliästä!)
    - näistä yksi, **Hurstin parametri** $H \in (½,1)$, kuvaa riippuvuuden astetta (mitä suurempi H sitä pidemmälle riippuvuus kantaa)
- Itsesimilaarisuus ja pitkän aikavälin riippuvuus voi aiheutua paksuhäntäisistä jakaumista (kts. seuraava esimerkki)

Esimerkki

- Tarkastellaan ääretöntä systeemiä (M/G/∞)
  - asiakkaita saapuu Poisson-prosessin mukaisesti
  - palveluajat riippumattomia ja samoin jakautuneita
    - jakauma paksuhäntäinen
    - jakaumalla ääretön varianssi
    - esim. Pareto-jakauma muotoparametrinaan $\beta < 2$
- Tällöin vastaava liikennemääräprosessi on asymptoottisesti itsesimilaarinen sisältäen pitkän aikavälin riippuvuutta



Sanastoa

- liikenne = traffic
- liikenteen voimakkuus = traffic intensity
- liikenneprosessi = traffic process
- liikennemäärä = traffic volume
- saapumisprosessi = arrival process
- ylivuotoliikenne = overflow traffic
- kiiretunti = busy hour
- estimaatti = estimate
- harhaton = unbiased
- aikaskaala = time scale
- yhteystaso = connection level
- pursketaso = burst level
- solutaso = cell level
- pakettitaso = packet level
- nestejono = fluid queue
- itsesimilaarisuus = self-similarity
- pitkän aikavälin riippuvuus = long range dependence = LRD
- paksuhäntäinen jakauma = heavy-tailed distribution

THE END