TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Tietoverkkolaboratorio

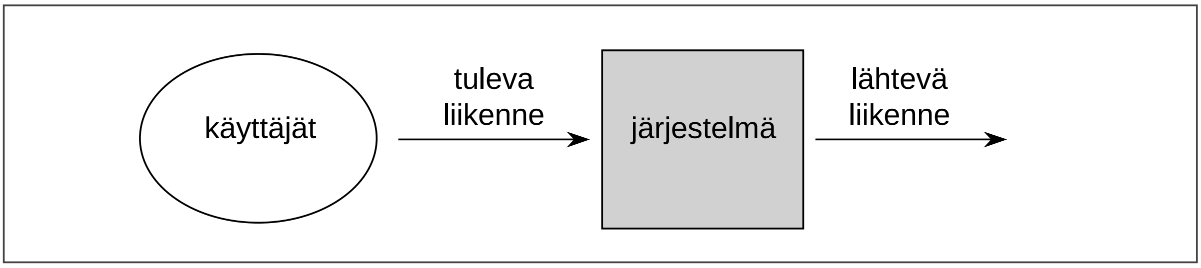
1. Johdanto

Sisältö

- Liikenneteorian tehtävä
- Liikenneteoreettiset mallit
- Puhelinliikenteen mallinnus puhtaana menetysjärjestelmänä
- Dataliikenteen mallinnus puhtaana jonotusjärjestelmänä

Liikenteellinen näkökulma

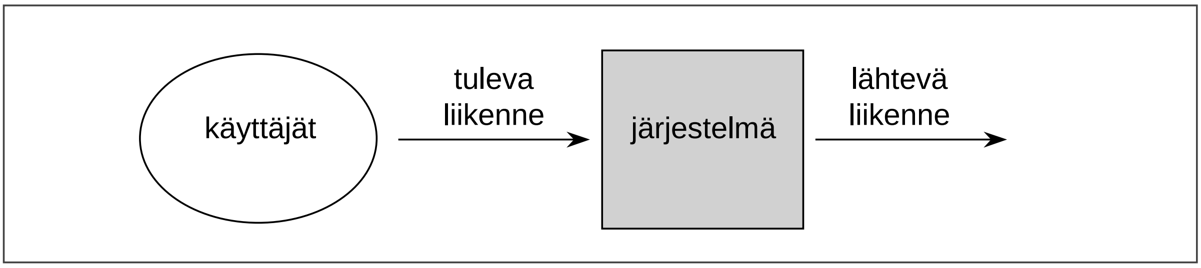
- Tietoliikennejärjestelmä **liikenteellisestä näkökulmasta**:



- Idea:
  - järjestelmän **käyttäjät** generoivat **liikennettä**, jota **järjestelmä palvelee**

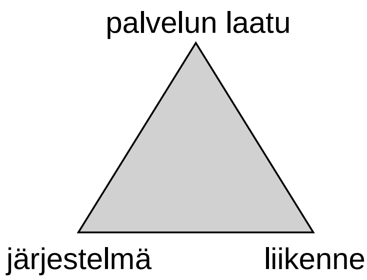
Mielenkiintoisia kysymyksiä

- Millainen on käyttäjän kokema palvelun laatu annetussa järjestelmässä ja annetulla liikenteellä?
- Miten järjestelmä tulee mitoittaa, jotta annetulla liikenteellä saavutetaan haluttu palvelun laatu?
- Millaisella liikenteellä järjestelmää voidaan kuormittaa niin, ettei palvelun laatu siitä kärsi?



Liikenneteorian tehtävä (1)

- Tehtävänä on määrätä seuraavan kolmen tekijän väliset riippuvuudet:
  - **palvelun laatu**
  - **järjestelmän kapasiteetti**
  - **liikenteen voimakkuus**



Liikenneteorian tehtävä (2)

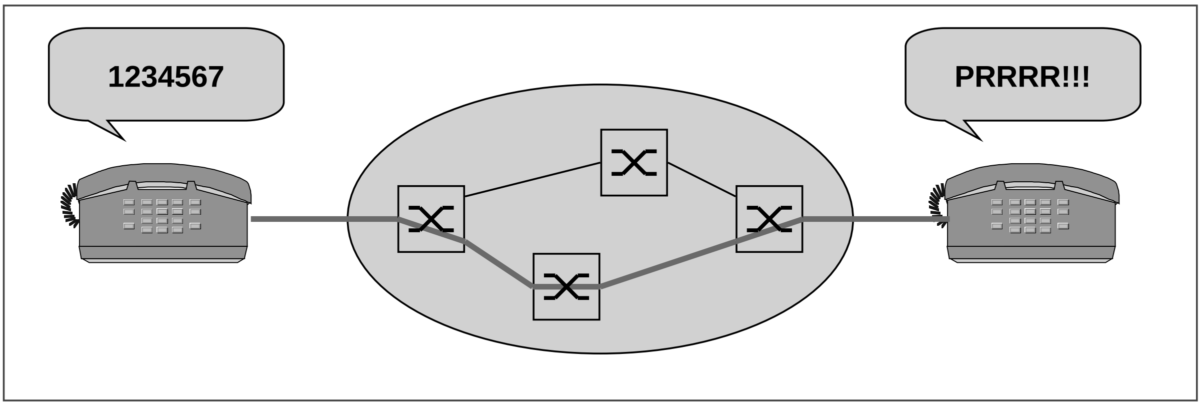
- Järjestelmänä voi olla
  - yksittäinen laite (esim. keskusten välinen yhdysjohto puhelinverkossa, pakettien reititystä tekevä prosessori dataverkossa, ATM-verkon statistinen multiplekseri) tai
  - kokonainen tietoliikenneverkko (esim. puhelin- tai dataverkko) tai sen osa
- Järjestelmä koostuu tyypillisesti
  - varsinaisesta laitteesta (hardware) ja
  - sitä ohjaavasta logiikasta (software)
- Liikenne taas muodostuu (tapauksesta riippuen)
  - kutsuista, paketeista, purskeista, soluista tms.

Liikenneteorian tehtävä (3)

- Palvelun laatua voidaan kuvata
  - käyttäjän kannalta
    - esim. kutsuesto, pakettivirran kokeman viiveen jakauma
  - järjestelmän kannalta jolloin usein puhutaan järjestelmän **suorituskyvystä** (performance)
    - esim. käyttöaste
- Toisaalta palvelun laatua voidaan kuvata
  - järjestelmälle tarjotun liikenteen kannalta
    - esim. ATM-yhteyspyyntöjen kokema kutsuesto tai jokin muu yhteystason laatua kuvaava suure; grade of service (GOS)
  - järjestelmän palveleman liikenteen kannalta
    - esim. hyväksytyn ATM-yhteyden aikana menetetyt solut tai jokin muu yhteydenaikaista laatua kuvaava suure; quality of service (QOS)

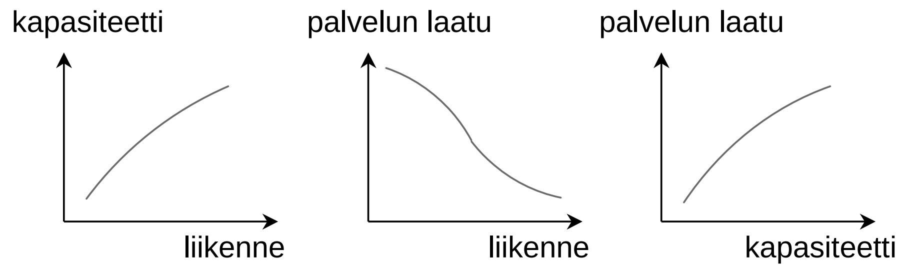
Esimerkki

- Puhelinliikenne
  - liikenne = puhelut
  - järjestelmä = puhelinverkko
  - palvelun laatu = todennäköisyys, että “linja ei ole varattu”



Eri tekijöiden väliset riippuvuudet

- Riippuvuuksien **kvalitatiivinen** kuvaus:



annetulla palvelun laadulla | annetulla kapasiteetilla | annetulla liikenteellä

- Riippuvuuksien **kvantitatiivisten** kuvaamiseen tarvitaan **matemaattisia malleja**

Liikenneteoreettiset mallit

- Liikenneteoreettiset mallit ovat yleensä luonteeltaan **tilastollisia** (siis stokastisia vastakohtana deterministiselle)
  – Vaikka järjestelmät itsessään ovat useimmiten deterministisiä, liikenne on tyypillisesti luonteeltaan stokastista
- Perimmäisenä syynä on siis **liikenteen tilastollinen luonne**
  – “Koskaan et voi tietää, milloin joku soittaa sinulle“
- Tästä taas seuraa, että myös palvelun laadun kuvaamisessa tarvittavat muuttujat ovat luonteeltaan tilastollisia, siis **satunnaismuuttujia**:
  – käynnissä olevien kutsujen lkm
  – pakettien lkm puskurissa
- Satunnaismuuttujaa kuvaa sen **jakauma**
  – todennäköisyys, että käynnissä olevien yhteyksien lkm on n
  – todennäköisyys, että puskurissa olevien pakettien lkm on n
- **Stokastinen prosessi** kuvaa ajan myötä tapahtuvaa satunnaista vaihtelua

Läheiset osaamisalueet

- Todennäköisyyslaskenta
- Stokastisten prosessien teoria
- Jonoteoria
- Tilastolliset analyysit (mittausdatan käsittely)
- Operaatiotutkimus
- Optimointiteoria
- Päätösteoria (Markov päätösprosessit)
- Simulointitekniikat (oliopohjainen ohjelmointi)

Todellinen järjestelmä ja sitä kuvaava malli

- On hyvä pitää mielessä todellisen järjestelmän ja sitä kuvaavan mallin ero:
  - Mallilla kuvataan (ja pitääkin kuvata) vain jotakin tiettyä, kiinnostuksen kohteena olevaa osaa tai ominaisuutta todellisesta järjestelmästä
  - Eri syistä johtuen kuvaus ei useinkaan ole edes kovin tarkka vaan hyvinkin approksimatiivinen $\Rightarrow$ varovaisuus johtopäätösten teossa

Käytännölliset päämäärät

- Verkonsuunnittelu
  - mitoitus
  - optimointi
  - suorituskykyanalyysi
- Verkon- ja liikenteenhallinta
  - verkon tehokas operointi
  - vikatilanteista toipuminen
  - liikenteenhallinta
  - reititys
  - laskutus

Kirjallisuutta

- Teleliikenneteoria
  - V. B. Iversen, “Teletraffic Engineering Handbook”, http://www.tele.dtu.dk/teletraffic/
  - Teletronikk (1995) Vol. 91, Nr. 2/3, Special Issue on “Teletraffic”
  - COST 242, Final report (1996) “Broadband Network Teletraffic”, Eds. J. Roberts, U. Mocci, J. Virtamo, Springer
  - J.M. Pitts and J.A. Schormans (1996) “Introduction to ATM Design and Performance”, Wiley
  - J. Roberts, “Traffic Theory and the Internet”, http://www.comsoc.org/ci/public/preview/roberts.html
- Jonoteoria
  - L. Kleinrock (1975) “Queueing Systems, Vol. I: Theory”, Wiley
  - L. Kleinrock (1976) “Queueing Systems, Vol. II: Computer Applications”, Wiley
  - D. Bertsekas and R. Gallager (1992) “Data Networks”, 2nd ed., Prentice-Hall
  - P.G. Harrison and N.M. Patel (1993) “Performance Modelling of Communication Networks and Computer Architectures”, Addison-Wesley

Sisältö

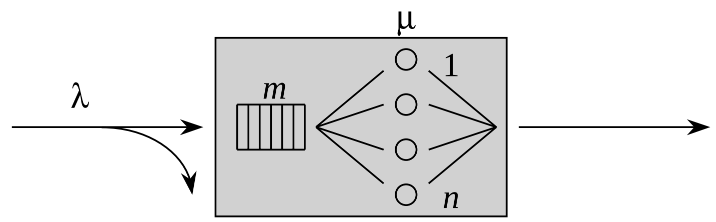
- Liikenneteorian tehtävä
- Liikenneteoreettiset mallit
- Puhelinliikenteen mallinnus puhtaana menetysjärjestelmänä
- Dataliikenteen mallinnus puhtaana jonotusjärjestelmänä

Liikenneteoreettiset mallit

- Liikenneteoreettisessa mallinnuksessa on periaatteessa kaksi vaihetta
  - liikenteen mallinnus $\Rightarrow$ **liikennemalli**
  - tutkittavan järjestelmän mallinnus $\Rightarrow$ **järjestelmämalli**
- Karkeasti ottaen liikenneteoreettiset mallit voidaan jakaa käytetyn järjestelmämallin perusteella kahteen osaan:
  - **menetysjärjestelmät** (estomallit)
  - **jonotusjärjestelmät** (jonomallit)
- Jatkossa esittelemme joitakin yksinkertaisia liikenneteoreettisia malleja, joilla voidaan mallintaa joitakin yksittäisiä tietoliikenneverkon laitteita
- Kokonaisia verkkoja voidaan mallintaa yhdistelemällä tällaisia yksinkertaisia malleja verkoksi
  - estoverkot
  - jonoverkot

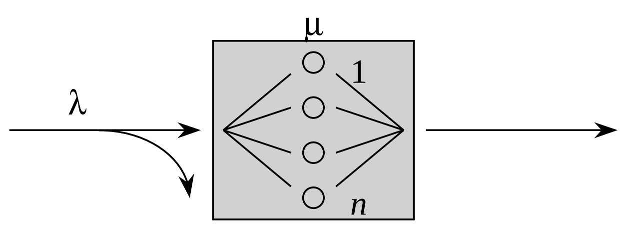
Yksinkertainen liikenneteoreettinen malli

- **Asiakkaita saapuu** keskimäärin nopeudella λ (asiakasta per aikayks.)
  - $1/\lambda$ = keskimääräinen asiakkaiden väliaika
- **Asiakkaita palvellaan** n:llä rinnakkaisella **palvelijalla**
- Palvelija palvelee keskimäärin nopeudella μ (asiakasta per aikayks.)
  - $1/\mu$ = keskimääräinen asiakkaan palveluaika
- Lisäksi järjestelmässä on m **odotuspaikkaa**
- Estyvät asiakkaat (joiden saapuessa järjestelmä on **täysi**) menetetään



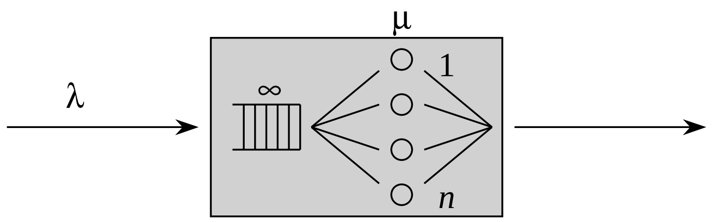
Puhdas menetysjärjestelmä

- Ei yhtään odotuspaikkaa ($m = 0$)
  - Jos asiakkaan saapuessa kaikki palvelijat ovat käytössä eli järjestelmä on ns. **estotilassa** (usein puhutaan myös **täydestä** järjestelmästä), kyseinen asiakas poistuu koko järjestelmästä pääsemättä palveluun ollenkaan. Järjestelmä on siis **estollinen**.
- Käyttäjän kokeman palvelun laadun kannalta kiinnostava suure on esim
  - todennäköisyys, että järjestelmä on täysi asiakkaan saapuessa
- Järjestelmän kannalta taas kiinnostavia suureita ovat esim.
  - palvelijoiden käyttöaste ja käytössä olevien palvelijoiden lkm:n jakauma



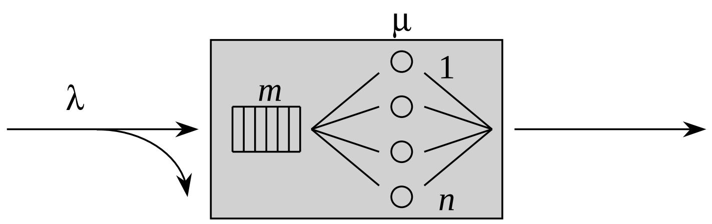
Puhdas jonotusjärjestelmä

- Ääretön määrä odotuspaikkoja ($m = \infty$)
  - Yhtäkään asiakasta ei menetetä, vaan jos asiakkaan saapuessa kaikki palvelijat ovat käytössä, ko. asiakas jää odottamaan järjestelmän sisälle palveluun pääsyä. Järjestelmä on siis **estoton**.
- Käyttäjän kokeman palvelun laadun kannalta kiinnostava suure on esim
  - todennäköisyys, että asiakas joutuu odottamaan kauemmin kuin jokin annettu referenssiaika (ts. “liian kauan”)
- Järjestelmän kannalta taas kiinnostava suureita ovat esim.
  - palvelijoiden käyttöaste ja käytössä olevien palvelijoiden lkm:n jakauma



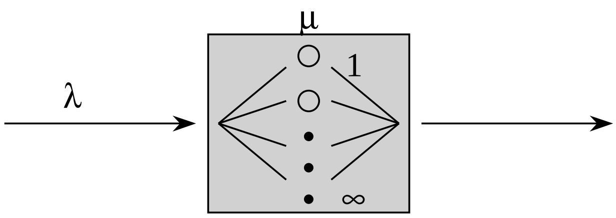
Sekajärjestelmä

- Äärellinen määrä odotuspaikkoja ($0 < m < \infty$)
  - Jos asiakkaan saapuessa kaikki palvelijat ovat käytössä mutta osa odotuspaikoista on vapaana, kyseinen asiakas jää odottamaan palveluun pääsyä.
  - Jos taas kaikki odotuspaikatkin ovat käytössä, asiakas menetetään.
  - Osa asiakkaista siis joutuu odottamaan palveluun pääsyä, ja osa jopa jää kokonaan vaille palvelua. Tämäkin järjestelmä on siis estollinen.



Ääretön järjestelmä

- Ääretön määrä palvelijoita ($n = \infty$)
  - Yhtäkään asiakasta ei menetetä, eikä kenenkään tarvitse edes odottaa palveluun pääsyä. Estoton järjestelmä.
  - Tällaisen (hypotettisen) järjestelmän analyysi on tyypillisesti huomattavasti helpompaa kuin vastaavan todellisen järjestelmän, jossa voi olla vain äärellinen määrä palvelijoita.
  - Joskus tämä on ainoa tapa saada edes approksimatiivista tietoa vastaavasta todellisesta järjestelmästä.



Littlen kaava

- Tarkastellaan systeemiä, johon
  - saapuu uusia asiakkaita intensiteetillä λ
- **Stabiilisuusoletus**:
  - Systeemiin ei kerry asiakkaita, vaan se tyhjenee aika ajoin
- Seuraus:
  - Asiakkaita myös poistuu intensiteetillä λ
- Merkitään

$$\overline{N} = \text{keskimäärin systeemissä olevien asiakkaiden lkm}$$
$$\overline{T} = \text{keskimääräinen asiakkaan systeemissä viettämä aika}$$

- **Littlen kaava**:

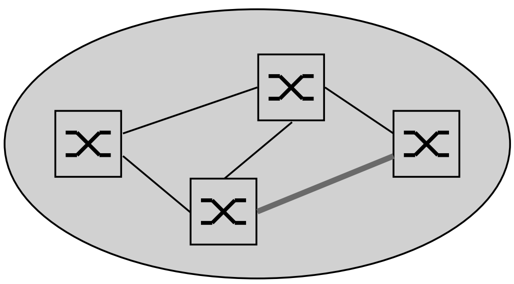
$$\overline{N} = \lambda \overline{T}$$

Sisältö

- Liikenneteorian tehtävä
- Liikenneteoreettiset mallit
- Puhelinliikenteen mallinnus puhtaana menetysjärjestelmänä
- Dataliikenteen mallinnus puhtaana jonotusjärjestelmänä

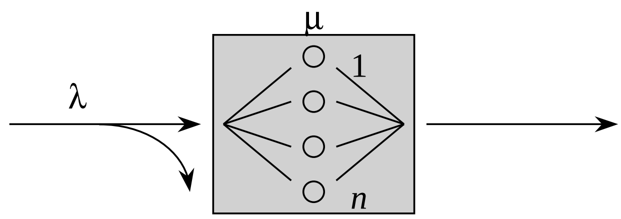
Klassinen puhelinliikenteen mallinnus (1)

- Menetysjärjestelmiä on perinteisesti käytetty puhelinliikenteen kuvaamiseen
  - Uranuurtajana oli tanskalainen matemaatikko *A.K. Erlang* (1878-1929).
- Tarkastellaan kahden keskuksen välisellä linkillä kulkevaa puhelinliikennettä (klassinen liikenneteoreettinen ongelma)
  - Liikenne koostuu käynnissä olevista puheluista, jotka käyttävät ko. linkkiä

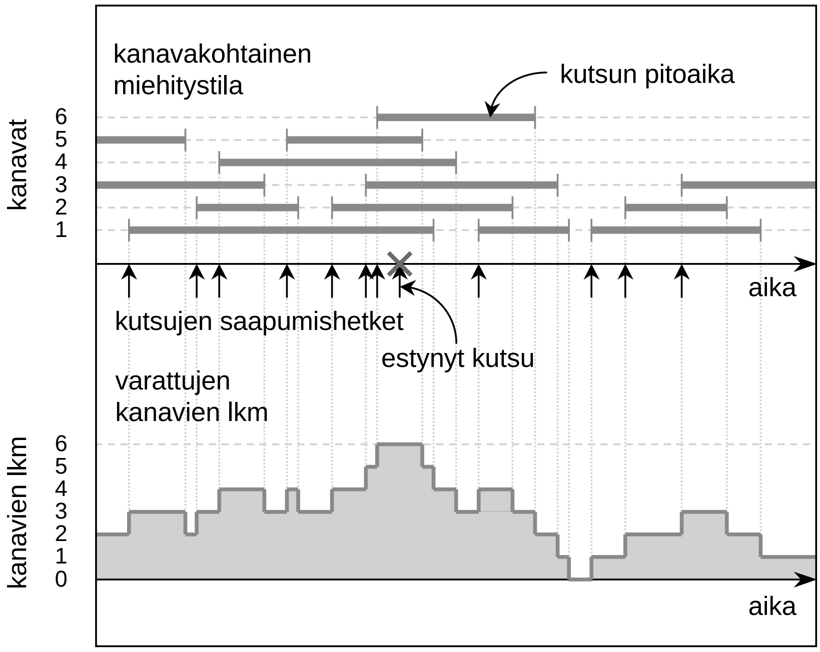


Klassinen puhelinliikenteen mallinnus (2)

- Erlang käytti mallina **puhdasta menetysjärjestelmää** ($m = 0$)
  - asiakas = kutsu = puhelu
    - λ = uusien kutsujen saapumisintensiteetti
  - palveluaika = (kutsun) pitoaika
    - $h = 1/\mu$ = keskimääräinen pitoaika
  - palvelija = yksittäinen linkin kanava
    - n = linkillä olevien rinnakkaisten kanavien lkm



Liikenneprosessi



Liikenneintensiteetti

- Puhelinverkoissa:

Liikenne ↔ Kutsut

- Liikenteen voimakkuutta kuvaa liikenneintensiteetti a
- **Määritelmä**: **Liikenneintensiteetti** a on saapumisintensiteetin λ ja keskimääräisen pitoajan h tulo:

$$a = \lambda h$$

  - Liikenneintensiteetti on paljas luku, mutta asiayhteyden korostamiseksi sen “yksiköksi” usein merkitään **erlang** (**erl**)
  - Littlen kaavan nojalla: liikenneintensiteetti kertoo keskimäärin käynnissä olevien kutsujen lkm:n vastaavassa (hypoteettisessa) äärettömässä systeemissä

Esimerkki

- Tarkastellaan paikalliskeskusta. Oletetaan, että
  - uusia puheluita tulee tunnissa keskimäärin 1800 kpl ja
  - puhelun keskimääräinen pitoaika on 3 min.
- Tällöin liikenneintensiteetiksi tulee

$$a = 1800 * 3 / 60 = 90 \text{ erlang}$$

- Jos keskimääräinen pitoaika kasvaa 3:sta 10:een minuuttiin, niin

$$a = 1800 * 10 / 60 = 300 \text{ erlang}$$

Ominaisliikenne

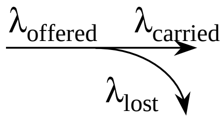
- Eri lähteiden synnyttämiä tyypillisiä liikenneintensiteettejä ovat:
  - yksityinen tilaaja: 0.01 - 0.04 erlang
  - yritystilaaja: 0.03 - 0.06 erlang
  - yrityksen vaihde (PBX): 0.10 - 0.60 erlang
  - maksupuhelin: 0.07 erlang
- Näin ollen esimerkiksi
  - tyypillinen yksityistilaaja käyttää ajastaan 1-4 % puhumalla puhelimessa (niin sanotun kiiretunnin aikana)
- Jatkoa edellisen kalvon esimerkkiin:
  - 90 erlangin liikenteen synnyttämiseen tarvitaan noin 2250 - 9000 yksityistilaajaa

Esto

- Menetysjärjestelmässä osa kutsuista menetetään:
  - Saapuva kutsu menetetään, jos kaikki kanavat on varattu (so. systeemi on täysi) ko. kutsun saapuessa
  - Termi **esto** viittaa tähän tapahtumaan
- Menetysjärjestelmissä voidaan määritellä useita eri estosuureita:
  - **Kutsuesto** B_c = tn, että saapuva kutsu menetetään = niiden saapuvien kutsujen osuus, jotka menetetään
  - **Aikaesto** B_t = tn, että systeemi on täysi (mielivaltaisena ajanhetkenä) = se osuus ajasta, jolloin systeemi on täysi
- Nämä suureet eivät välttämättä ole samoja; tosin
  - jos uudet kutsut saapuvat Poisson-prosessin mukaisesti, niin $B_c = B_t$
- Sovellutusten kannalta ollaan yleensä kiinnostuneita kutsuestosta, joka kuvaa käyttäjien kokemaa palvelun laatua
- Aikaesto taas on usein helpommin laskettavissa oleva suure

Kutsuintensiteetit

- Menetysjärjestelmässä voidaan erottaa seuraavat kutsuintensiteetit:
  - λ_{offered} = kaikkien saapuvien kutsujen saapumisintensiteetti
  - λ_{carried} = palveluun päässeiden kutsujen saapumisintensiteetti
  - λ_{lost} = menetettyjen kutsujen saapumisintensiteetti

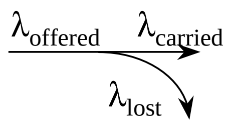


- Huom:

$$\lambda_{\text{offered}} = \lambda_{\text{carried}} + \lambda_{\text{lost}} = \lambda$$
$$\lambda_{\text{carried}} = \lambda(1 - B_{\text{c}})$$
$$\lambda_{\text{lost}} = \lambda B_{\text{c}}$$

Liikennevirrat

- Eri kutsuintensiteettien avulla voidaan määritellä seuraavat liikennevirrat:
  - **Tarjottu liikenne** $a_{\text{offered}} = \lambda_{\text{offered}} h$
  - **Kuljetettu liikenne** $a_{\text{carried}} = \lambda_{\text{carried}} h$
  - **Menetetty liikenne** $a_{\text{lost}} = \lambda_{\text{lost}} h$



- Huom:

$$a_{\text{offered}} = a_{\text{carried}} + a_{\text{lost}} = a$$
$$a_{\text{carried}} = a(1 - B_{\text{c}})$$
$$a_{\text{lost}} = aB_{\text{c}}$$

- Tarjottu ja menetetty liikenne ovat hypoteettisia suureita, mutta kuljetettu liikenne on mitattavissa, sillä Littlen kaavan mukaan se kertoo keskimäärin käynnissä olevien kutsujen lkm:n

Liikenneteoreettinen analyysi (1)

- Järjestelmän kapasiteetti
  - n = linkissä olevien rinnakkaisten kanavien lkm
- Liikenne
  - a = (tarjottu) liikenneintensiteetti
- Palvelun laatu (käyttäjän näkökulmasta)
  - B_c = kutsuesto = tn, että saapuva kutsu menetetään
- Tarkastellaan tyyppiä **M/G/n/n** olevaa **puhdasta menetysjärjestelmää**, ts. oletetaan, että
  - uudet kutsut saapuvat **Poisson-prosessin** mukaisesti (intensiteetillä λ) ja
  - kutsujen pitoajat ovat riippumattomia ja samoin jakautuneita noudattaen **mitä tahansa jakaumaa**, jonka odotusarvo on h

Liikenneteoreettinen analyysi (2)

- Tällöin eri tekijöiden (järjestelmä, liikenne ja palvelun laatu) välisen yhteyden kertoo ns. **Erlangin kaava**

$$B_c = \mathrm{Erl}(n,a) := \frac{\frac{a^n}{n!}}{\sum_{i=0}^{n} \frac{a^i}{i!}}$$

- Huom: $n! = n \cdot (n-1) \cdot \ldots \cdot 2 \cdot 1, \quad 0! = 1$
- Vaihtoehtoisia nimiä:
  - Erlangin B-kaava
  - Erlangin estokaava (blocking formula)
  - Erlangin menetyskaava (loss formula)
  - Erlangin ensimmäinen kaava

Esimerkki

- Tarkastellaan esimerkinomaisesti hyvin pientä systeemiä. Oletetaan, että rinnakkaisten kanavien lkm on $n = 4$ ja liikenneintensiteeetti $a = 2.0$ erlang. Tällöin kutsuestoksi B_c tulee

$$B_c = \mathrm{Erl}(4,2) = \frac{\frac{2^4}{4!}}{1 + 2 + \frac{2^2}{2!} + \frac{2^3}{3!} + \frac{2^4}{4!}} = \frac{\frac{16}{24}}{1 + 2 + \frac{4}{2} + \frac{8}{6} + \frac{16}{24}} = \frac{2}{21} \approx 9.5\%$$

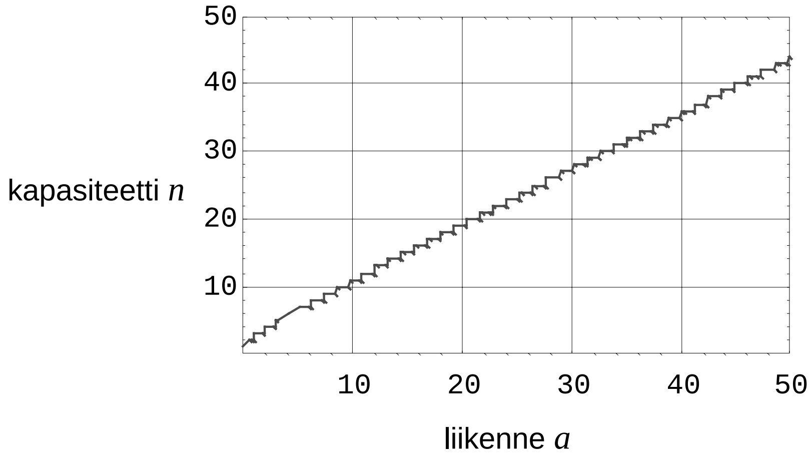
- Jos linkin kapasiteetti kasvatetaan $n = 6$ kanavaan, niin B_c pienenee arvoon

$$B_c = \mathrm{Erl}(6,2) = \frac{\frac{2^6}{6!}}{1 + 2 + \frac{2^2}{2!} + \frac{2^3}{3!} + \frac{2^4}{4!} + \frac{2^5}{5!} + \frac{2^6}{6!}} \approx 1.2\%$$

Tarvittava kapasiteetti liikenteen funktiona

- Asetetaan palvelun laatuvaatimukseksi, että kutsuesto $B_c < 20\%$
- Tarvittava kapasiteetti n liikenteen a funktiona saadaan kaavalla:

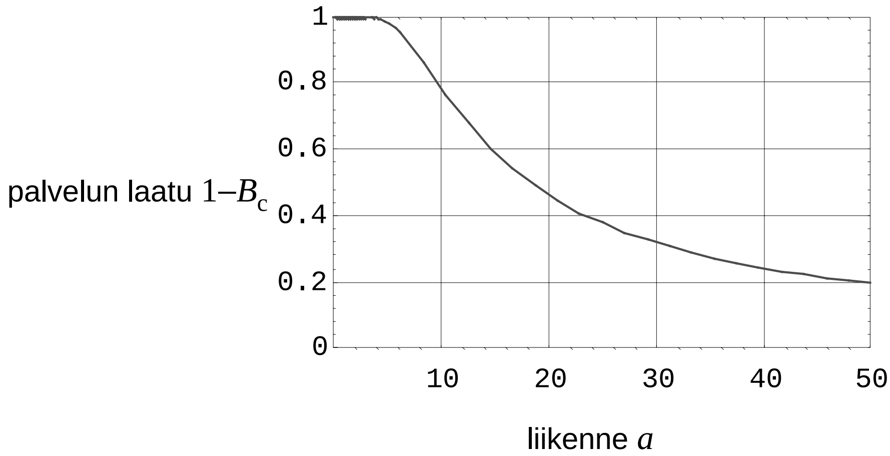
$$n(a) = \min\{N = 1,2,\ldots \mid \mathrm{Erl}(N,a) < 0.2\}$$



Palvelun laatu liikenteen funktiona

- Oletetaan sitten, että rinnakkaisten kanavien lkm eli kapasiteetti $n = 10$
- Palvelun laatu $1{-}B_c$ liikenteen a funktiona saadaan kaavalla:

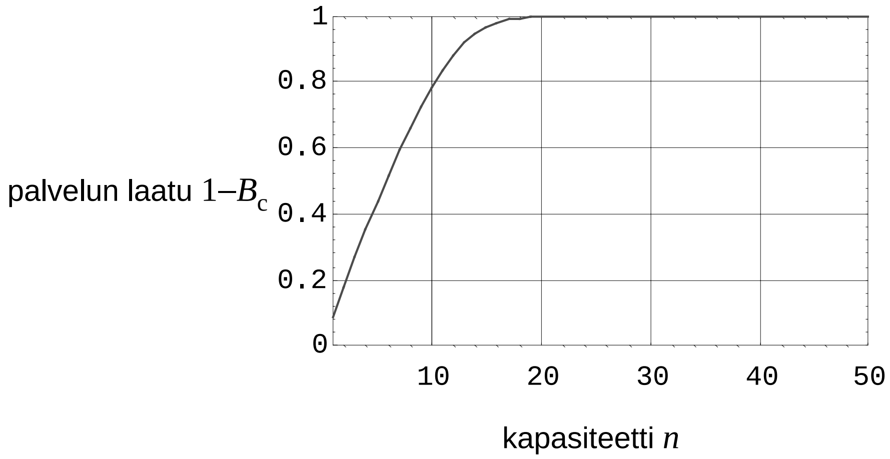
$$1 - B_c(a) = 1 - \mathrm{Erl}(10, a)$$



Palvelun laatu kapasiteetin funktiona

- Oletetaan lopuksi, että tarjotun liikenteen intensiteetti $a = 10.0$ erlang
- Palvelun laatu $1{-}B_c$ kapasiteetin n funktiona saadaan kaavalla:

$$1 - B_c(n) = 1 - \mathrm{Erl}(n, 10.0)$$

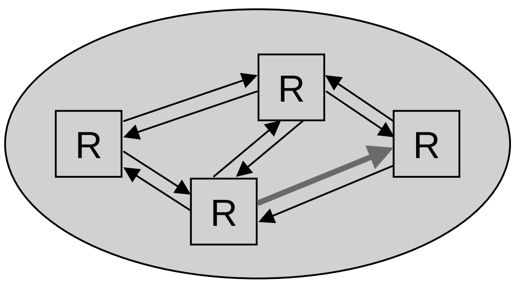


Sisältö

- Liikenneteorian tehtävä
- Liikenneteoreettiset mallit
- Puhelinliikenteen mallinnus puhtaana menetysjärjestelmänä
- Dataliikenteen mallinnus puhtaana jonotusjärjestelmänä

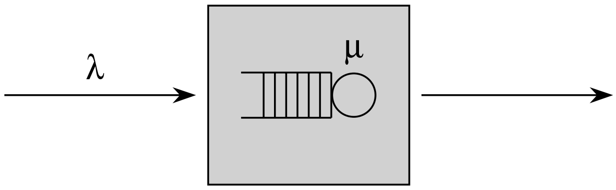
Klassinen dataliikenteen mallinnus (1)

- Jonotusjärjestelmät taas soveltuvat hyvin (pakettikytketyn) dataliikenteen kuvaamiseen
  - Uranuurtajina 60- ja 70-luvuilla ARPANET:in tutkijat, eritoten *L. Kleinrock* (**`http://www.lk.cs.ucla.edu/`**)
- Tarkastellaan yhtä reitittimen ulostulolinkkiä
  - Liikenne koostuu linkkiä pitkin lähetetyistä datapaketeista

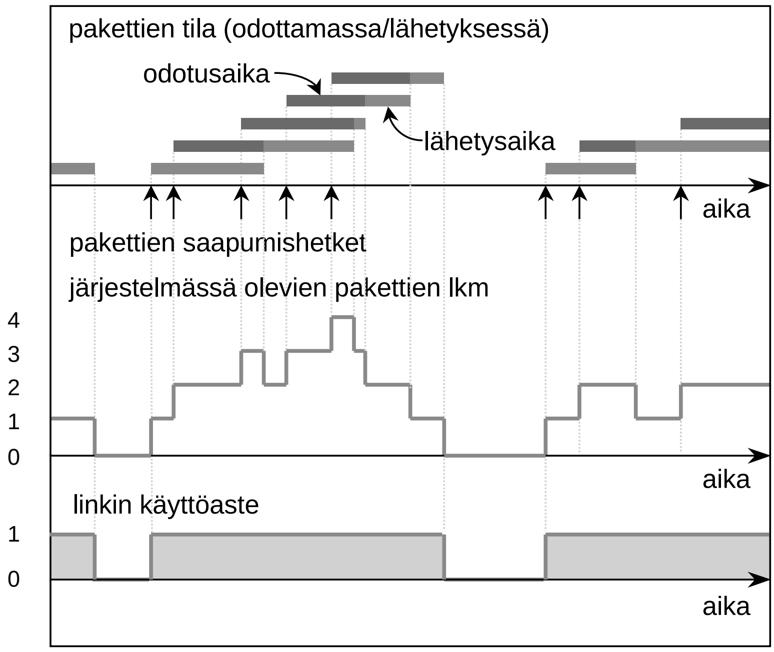


Klassinen dataliikenteen mallinnus (2)

- Klassisena mallina on yhden palvelijan (n = 1) **puhdas jonotusjärjestelmä**, jossa on siis ääretön määrä odotuspaikkoja ($m = \infty$)
  - asiakas = paketti
    - λ = uusien pakettien saapumisintensiteetti (pakettia per aikayks.)
    - L = keskim. paketin pituus (datayks.)
  - palvelija = linkki, odotuspaikat = puskuri
    - R = linkin kapasiteetti (datayks. per aikayks.)
  - palveluaika = paketin lähetysaika
    - $1/\mu = L/R$ = keskim. paketin lähetysaika (aikayks.)



Liikenneprosessi



Liikennekuorma

- Pakettikytkentäisissä dataverkoissa:

Liikenne $\leftrightarrow$ Paketit

- Liikenteen voimakkuutta kuvataan liikennekuormalla ρ
- **Määritelmä**: **Liikennekuorma** ρ on saapumisintensiteetin λ suhde palveluintensiteettiin $\mu = R/L$:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\lambda L}{R}$$

  - Liikennekuorma on paljas luku (kuten menetysjärjestelmän liikenneintensiteettikin)
  - Littlen kaavan nojalla: liikennekuorma kertoo keskimäärin palvelussa olevien asiakkaiden lkm:n. Se voidaan myös tulkita tn:ksi, että palvelija on jollakin mielivaltaisella ajanhetkellä käytössä. Näin ollen se kertoo myös järjestelmän **käyttöasteen** (utilization).

Esimerkki

- Tarkastellaan reitittimen ulostulolinkkiä. Oletetaan, että
  - lähetettäviä paketteja saapuu keskimäärin 10 kpl sekunnissa,
  - yhden paketin keskimääräinen pituus on 400 tavua, ja
  - linkin kapasiteetti on 64 kbps.
- Tällöin linkin kuormaksi (ja samalla käyttöasteeksi) tulee

$$\rho = 10 * 400 * 8 / 64{,}000 = 0.5 = 50\%$$

- Jos linkin kapasiteetti olisi 150 Mbps, niin kuormaksi tulisi vain

$$\rho = 10 * 400 * 8 / 150{,}000{,}000 = 0.0002 = 0.02\%$$

- Huom:
  - 1 tavu = 8 bittiä
  - 1 kbps = 1 kbit/s = 1 kbit per second = 1,000 bittiä sekunnissa
  - 1 Mbps = 1 Mbit/s = 1 Mbit per second = 1,000,000 bittiä sekunnissa

Liikenneteoreettinen analyysi (1)

- Järjestelmän kapasiteetti
  - R = linkin kapasiteetti (kbps)
- Liikenne
  - λ = pakettien saapumisintensiteetti (pakettia sekunnissa)
  - L = keskimäär. paketin pituus (kbit). Oletetaan tässä: L = 1 kbit
- Palvelun laatu (käyttäjän näkökulmasta)
  - P_z = tn, että paketin täytyy odottaa “liian kauan”, so. kauemmin kuin annettu referenssiviive z. Oletetaan tässä: z = 0.1 s
- Tarkastellaan tyyppiä **M/M/1** olevaa **puhdasta menetysjärjestelmää**, ts. oletetaan, että
  - uudet paketit saapuvat **Poisson-prosessin** mukaisesti (intensiteetillä λ) ja
  - pakettien pituudet ovat riippumattomia ja samoin jakautuneita noudattaen **eksponenttijakaumaa** odotusarvolla L

Liikenneteoreettinen analyysi (2)

- Tällöin eri tekijöiden (järjestelmä, liikenne ja palvelun laatu) välisen yhteyden kertoo seuraava kaava:

$$P_z = \mathrm{Wait}(R, \lambda; L, z) := \begin{cases} \frac{\lambda L}{R} \exp(-(\frac{R}{L} - \lambda) z), & \text{if } \lambda L < R \; (\rho < 1) \\ 1, & \text{if } \lambda L \geq R \; (\rho \geq 1) \end{cases}$$

- Huom:
  - Järjestelmä on **stabiili** vain tapauksessa $\rho < 1$. Muutoin odottavien pakettien jono kasvaa lopulta äärettömän pitkäksi.

Esimerkki

- Oletetaan, että lähetettäviä paketteja saapuu intensiteetillä $\lambda = 50$ pakettia sekunnissa ja linkin kapasiteetti on $R = 64$ kbps. Tällöin liian pitkän viiveen tn:ksi P_z (missä siis z = 0.1 s) tulee

$$P_z = \text{Wait}(64{,}50;1{,}0.1) = \frac{50}{64}\exp(-1.4) \approx 19\%$$

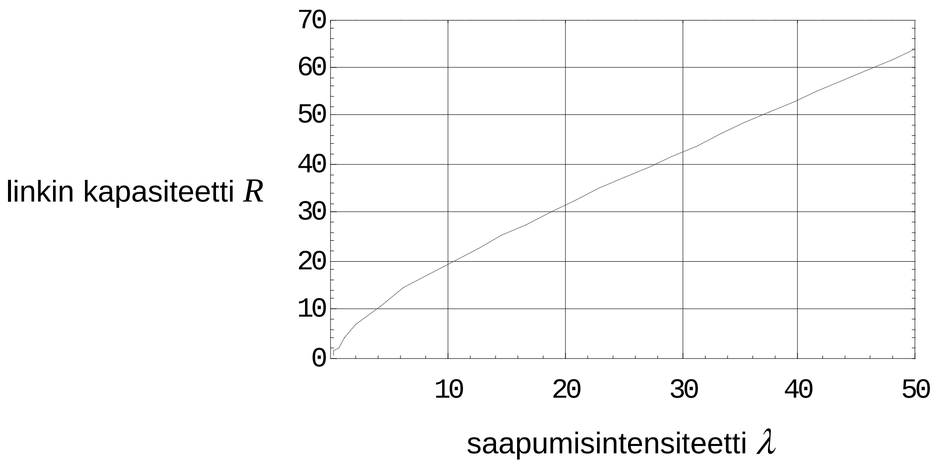
- Huom: Järjestelmä on stabiili, sillä

$$\rho = \frac{\lambda L}{R} = \frac{50}{64} < 1$$

Tarvittava kapasiteetti saapumisintensiteetin funktiona

- Asetetaan palvelun laatuvaatimukseksi, että $P_z < 20\%$
- Tarvittava kapasiteetti n saapumisint:n λ funktiona saadaan kaavalla:

$$R(\lambda) = \min\{r > \lambda L \mid \text{Wait}(r, \lambda;1{,}0.1) < 0.2\}$$

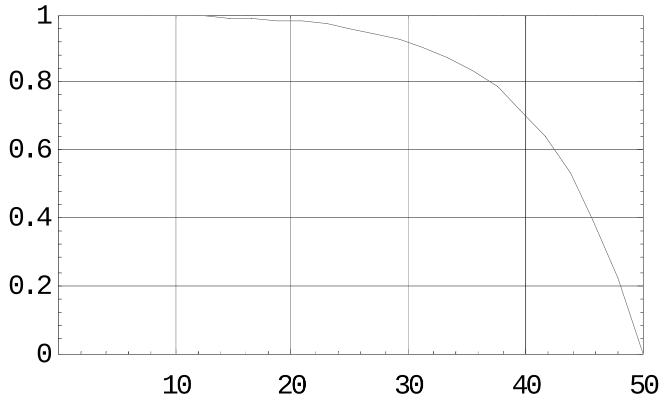


Palvelun laatu saapumisintensiteetin funktiona

- Oletetaan sitten, että linkin kapasiteetti on R = 50 kbps
- Palvelun laatu $1-P_z$ saapumisint:n λ funktiona saadaan kaavalla:

$$1-P_Z(\lambda)=1-\mathrm{Wait}(50,\lambda;1,0.1)$$

palvelun laatu $1-P_z$



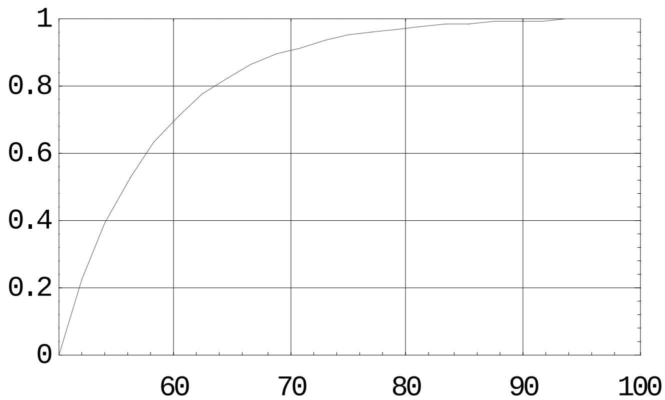
saapumisintensiteetti λ

Palvelun laatu kapasiteetin funktiona

- Oletetaan lopuksi, että saapumisintensiteetti on λ = 50 pakettia/s
- Palvelun laatu $1-P_z$ linkin kapasiteetin R funktiona saadaan kaavalla:

$$1-P_Z(R)=1-\mathrm{Wait}(R,50;1,0.1)$$

palvelun laatu $1-P_z$



linkin kapasiteetti R

Sanastoa

- (tele)liikenneteoria = (tele)traffic theory
- jonoteoria = queueing theory
- menetysjärjestelmä = loss system
- jonotusjärjestelmä = queueing system
- estoverkko = loss network
- jonoverkko = queueing network
- saapumisintensiteetti = arrival intensity
- saapumisväliaika = interarrival time
- palveluintensiteetti = service intensity
- palveluaika = service time
- ääretön = infinite
- kutsu = call
- pitoaika = holding time
- liikenneintensiteetti = traffic intensity
- liikennemäärä = traffic volume
- esto = blocking
- aikaesto = time blocking
- kutsuesto = call blocking
- estotn = blocking probability
- paketti = packet
- lähetysaika = transmission time
- (liikenne)kuorma = (traffic) load
- käyttöaste = utilization
- liikenne = traffic

THE END