



1. Johdanto

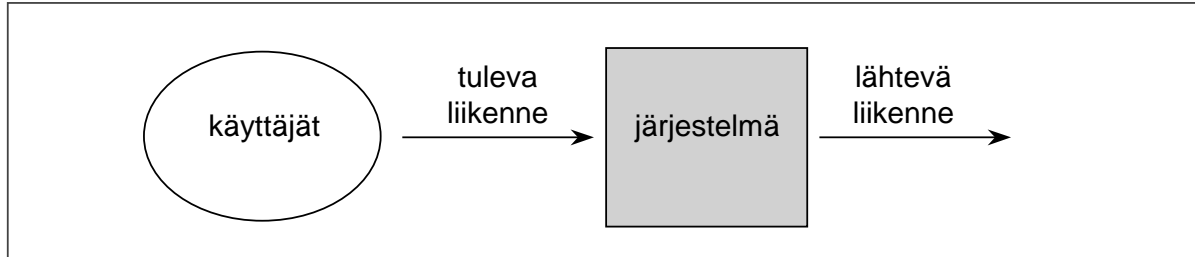
1. Johdanto

Sisältö

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

Liikenteellinen näkökulma

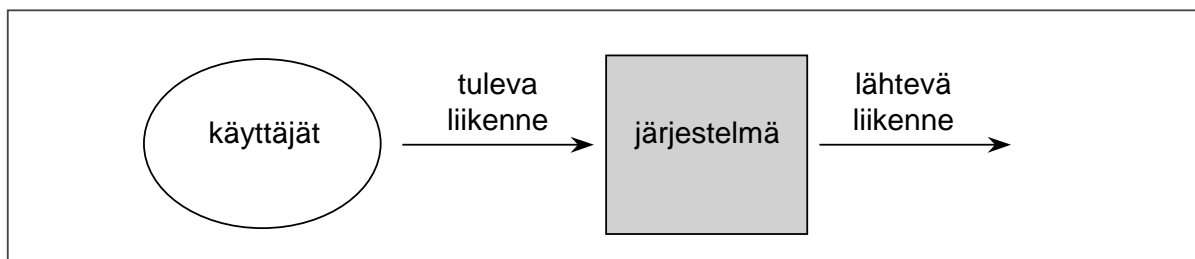
- Tietoliikennejärjestelmä **liikenteellisestä näkökulmasta**:



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

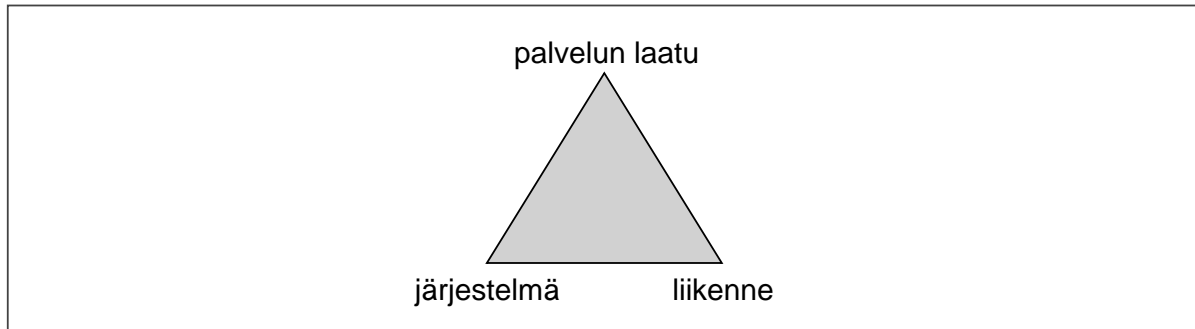
Mielenkiintoisia kysymyksiä

- 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
- Liikenne taas muodostuu (tapauksesta riippuen)
 - kutsuista, paketeista, purskeista, soluista tms.

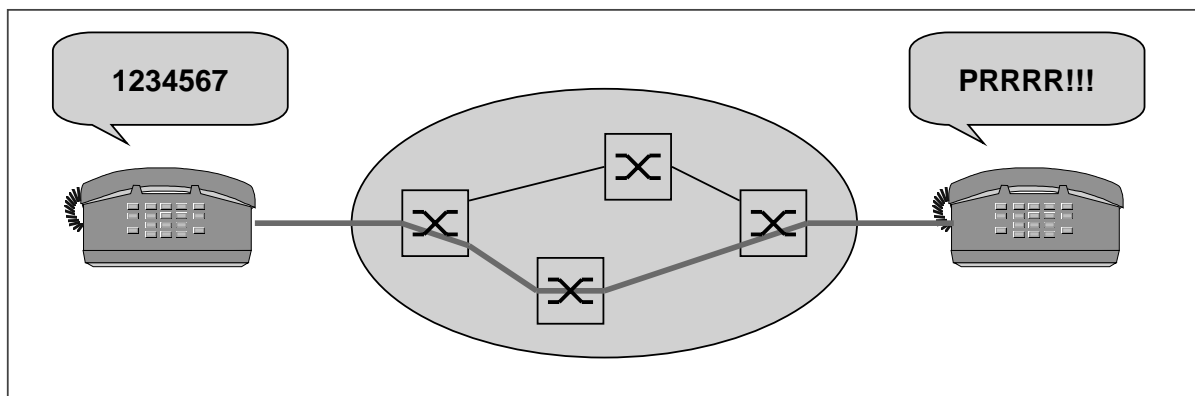
Liikenneteorian tehtävä (3)

- Palvelun laatua voidaan kuvata
 - käyttäjän kannalta (esim. kutsuesto, pakettivirran kokeman viiveen jakauma) tai
 - järjestelmän kannalta (esim. käyttöaste) jolloin usein puhutaan järjestelmän **suorituskyvystä** (performance)
- 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. hyväksytyin ATM-yhteyden aikana menetetyt solut tai jokin muu yhteydenaikaista laatua kuvaava suure); quality of service (QOS)

7

Esimerkki

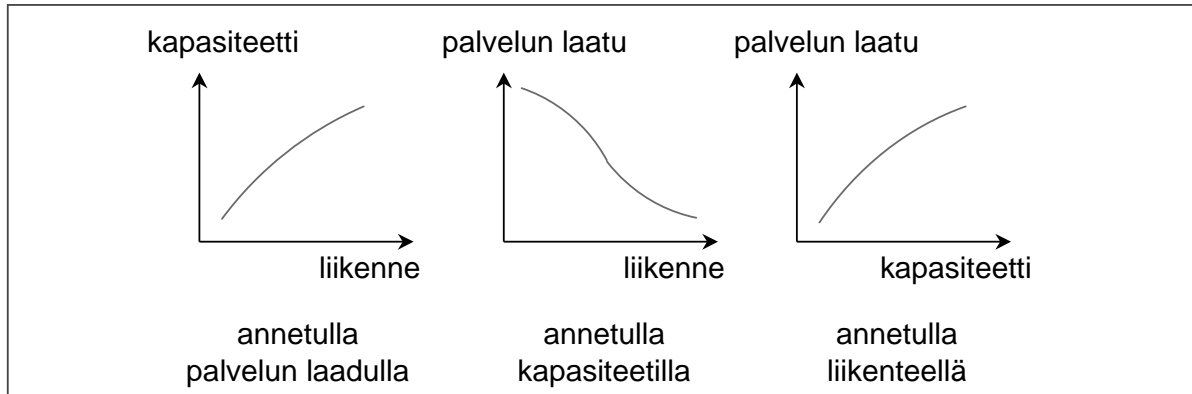
- Puhelinliikenne
 - liikenne = puhelut
 - järjestelmä = puhelinverkko
 - palvelun laatu = todennäköisyys, että "linja ei ole varattu"



8

Eri tekijöiden väliset riippuvuudet

- Riippuvuuksien **kvalitatiivinen** kuvaus:



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

Liikenneteoreettiset mallit (1)

- 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

Liikenneteoreettiset mallit (2)

- 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

- Verkon suunnittelu
 - mitoitus
 - optimointi
 - suorituskykyanalyysi
- Verkon- ja liikenteen hallinta
 - verkon tehokas operointi
 - vikatilanteista toipuminen
 - liikenteen hallinta
 - reititys
 - laskutus

Läheiset osaamisalueet

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

Kirjallisuutta

- Teleliikenneteoria
 - Teletronikk (1995) Vol. 91, Nr. 2/3, Special Issue on "Teletraffic"
 - S-38.118 course book: "Understanding Telecommunications 1", Ch. 10
 - 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
- Jonoteoria
 - L. Kleinrock (1975) "Queueing Systems, Volume I: Theory", Wiley
 - L. Kleinrock (1976) "Queueing Systems, Volume 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

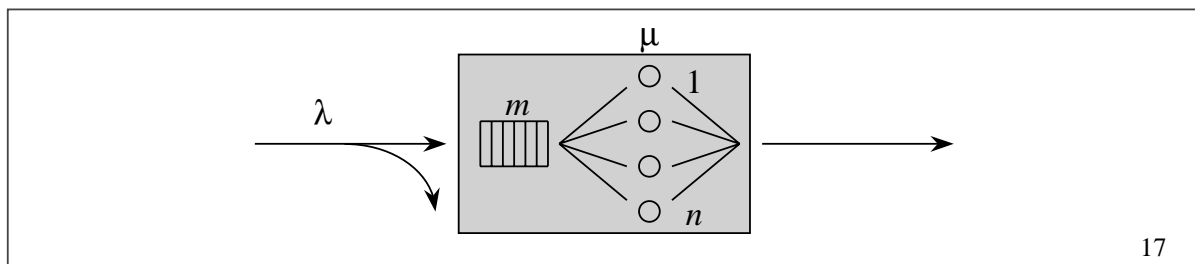
- Liikenneteorian tehtävä
- Liikenneteoreettiset mallit
- Puhelinliikenteen mallinnus puhtaana menetysjärjestelmänä
- Dataliikenteen mallinnus puhtaana jonotusjärjestelmänä

Liikenneteoreettiset mallit

- Liikenneteoreettisessa mallinnuksessa on periaatteessa kaksi vaihetta
 - liikenteen mallinnus ⇒ **liikennemalli**
 - tutkittavan järjestelmän mallinnus ⇒ **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

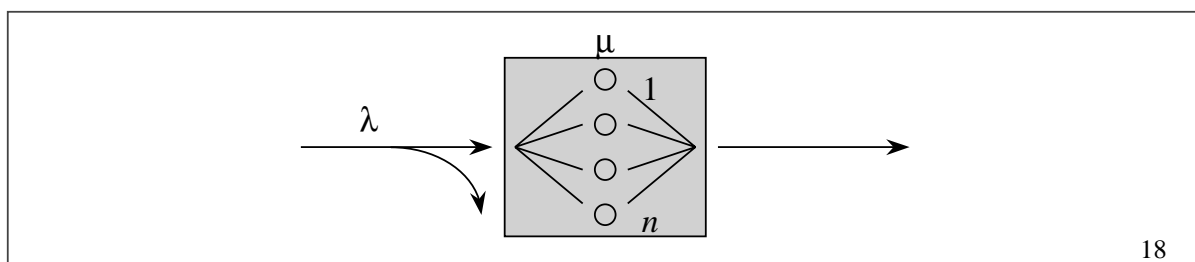
- **Asiakkaita saapuu** keskimäärin nopeudella λ (asiakasta per aikayks.)
 - $1/\lambda$ = keskimääräinen asiakkaiden väliaika
- **Asiakkaita palvelee** n :llä rinnakkaisella **palvelijalla**
- Palvelija palvelee keskimäärin nopeudella μ (asiakasta per aikayks.)
 - $1/\mu$ = keskimääräinen asiakkaan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



17

Puhdas menetysjärjestelmä

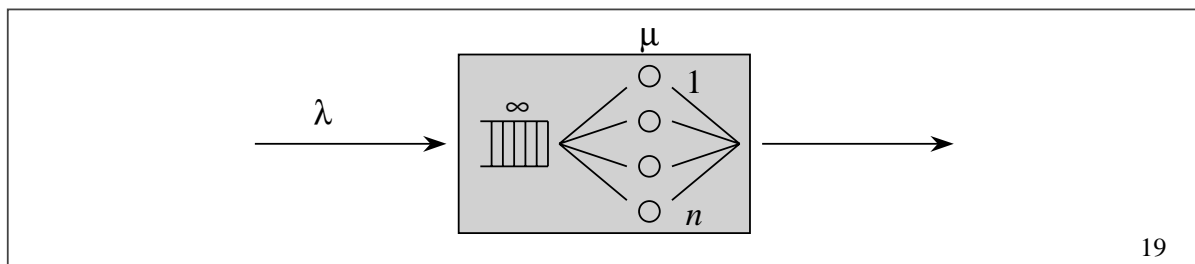
- Ei yhtään odotuspaikkaa ($m = 0$)
 - Jos asiakkaan saapuesssa kaikki palvelijat ovat käytössä eli järjestelmä on ns. **estotilassa** (usein puhutaan myös **täydestä** järjestelmästä), kyseinen asiakas poistuu koko järjestelmästä pääsemättä palveluun ollenkaan. Järjestelmä on siis **estollinen**.
-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



18

Puhdas jonotusjärjestelmä

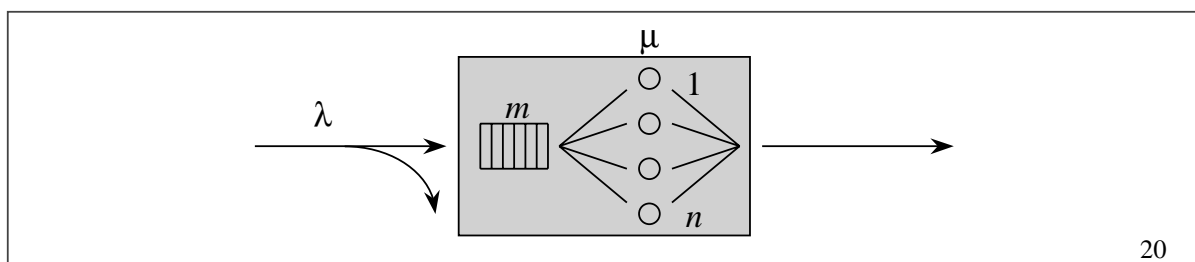
- Ääretön määrä odotuspaikkoja ($m = \infty$)
 - Yhtäkään asiakasta ei menetetä, vaan jos asiakkaan saapuessa kaikki palvelijat ovat käytössä, ko. asiakas jää odottamaan järjestelmän sisälle palveluun pääsyä. Järjestelmä on siis **estoton**.
- Käyttäjän kokeman palvelun laadun kannalta kiinnostava suure 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



19

Sekajärjestelmä

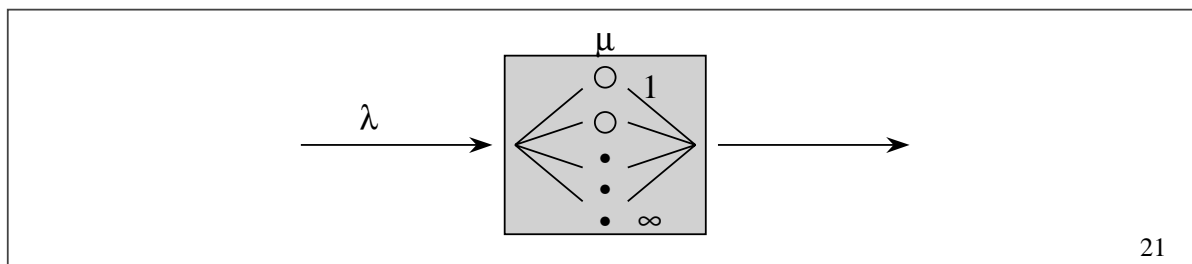
- Äärellinen määrä odotuspaikkoja ($0 < m < \infty$)
 - Jos asiakkaan saapuessa kaikki palvelijat ovat käytössä mutta osa odotuspaikoista on vapaana, kyseinen asiakas jää odottamaan palveluun pääsyä.
 - Jos taas kaikki odotuspaikatkin ovat käytössä, asiakas menetetään.
 - Osa asiakkaista siis joutuu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



20

Ääretön järjestelmä

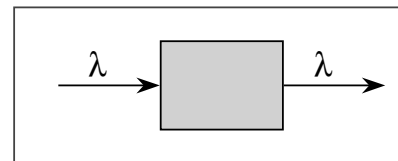
- Ääretön määrä palvelijoita ($n = \infty$)
 - Yhtäkään asiakasta ei menetetä, eikä kenenkään tarvitse edes odottaa palveluun pääsyä. Estoton järjestelmä.
 - Tällaisen (hypotettisen) järjestelmän analyysi on tyypillisesti huomattavasti helpompaa kuin vastaavan todellisen järjestelmän, jossa voi olla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



21

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



\bar{N} = keskimäärin systeemissä olevien asiakkaiden lkm

\bar{T} = keskimääräinen asiakkaan systeemissä viettämä aika

- **Littlen kaava:**

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

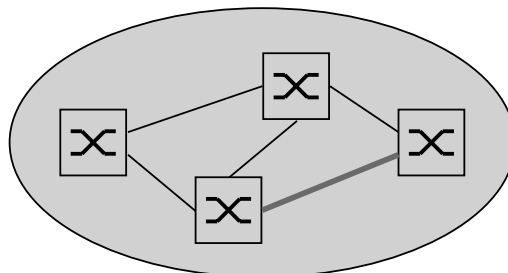
22

Sisältö

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

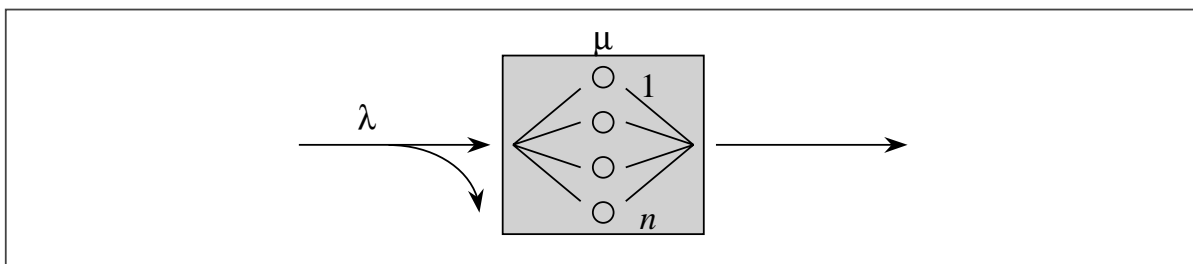
Klassinen puhelinliikenteen mallinnus (1)

- 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



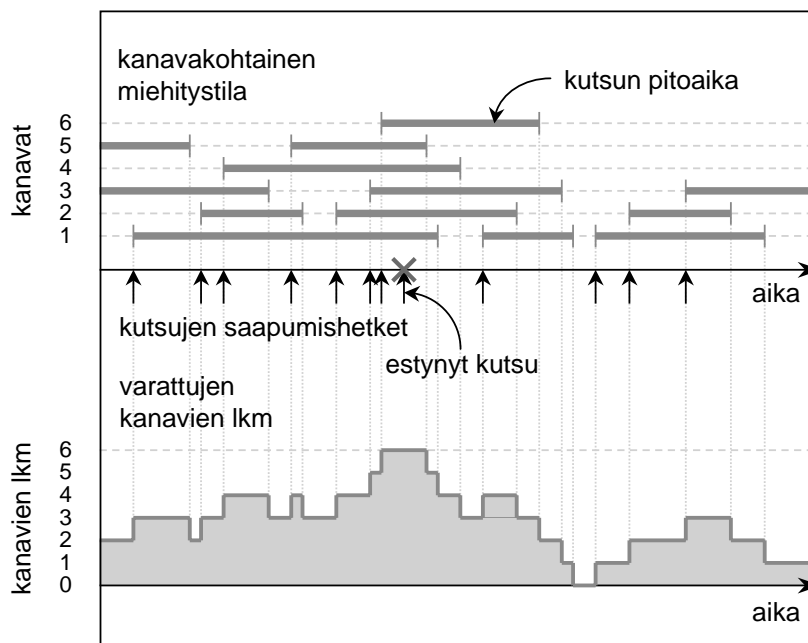
Klassinen puhelinliikenteen mallinnus (2)

- 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



25

Liikenneprosessi



26

Liikenneintensiteetti

- Puhelinverkoissa:

Liikenne \leftrightarrow 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

27

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

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

28

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

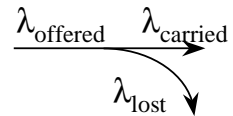
Esto

- 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 ns. 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

- Menetyjärjestelmässä voidaan erottaa seuraavat kutsuintensiteetit:

- λ_{offered} = kaikkien saapuvien kutsujen saapumisintensiteetti
- λ_{carried} = palveluun päässeiden kutsujen saapumisintensiteetti
- λ_{lost} = menetettyjen kutsujen saapumisintensiteetti



- Huom:

$$\lambda_{\text{offered}} = \lambda_{\text{carried}} + \lambda_{\text{lost}} = \lambda$$

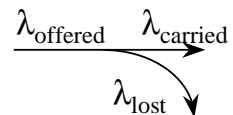
$$\lambda_{\text{carried}} = \lambda(1 - B_c)$$

$$\lambda_{\text{lost}} = \lambda B_c$$

Liikennevirrat

- Eri kutsuintensiteettien avulla voidaan määrittellä 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:

$$a_{\text{offered}} = a_{\text{carried}} + a_{\text{lost}} = a$$

$$a_{\text{carried}} = a(1 - B_c)$$

$$a_{\text{lost}} = aB_c$$

- 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)
 - kutsujen pitoajat ovat riippumattomia ja samoin jakautuneita noudattaen **mitä tahansa jakaumaa**, jonka odotusarvo on h

33

Liikenneteoreettinen analyysi (2)

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

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

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

34

Esimerkki

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

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

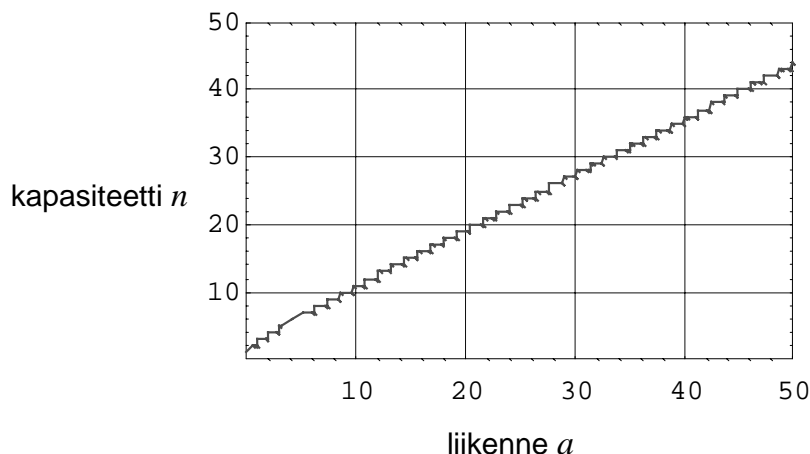
- Jos linkin kapasiteetti kasvatetaan $n = 6$ kanavaan, niin B_c pienenee arvoon

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

Tarvittava kapasiteetti liikenteen funktiona

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

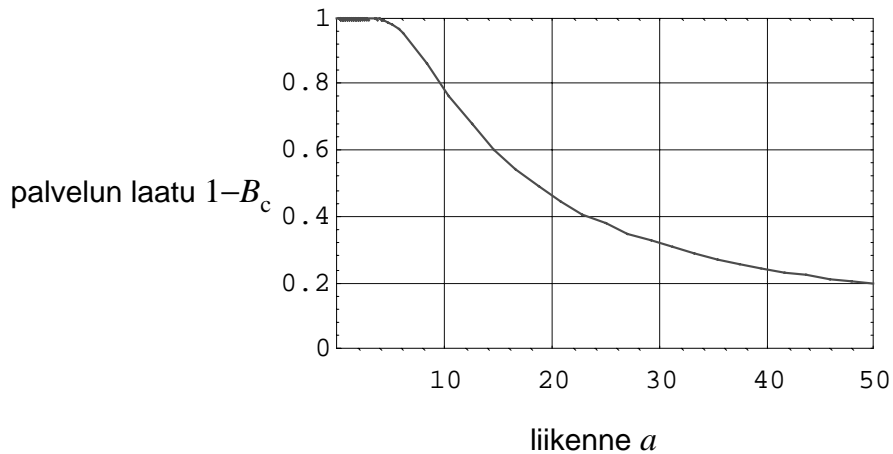
$$n(a) = \min\{N = 1, 2, \dots \mid \text{Erl}(N, a) < 0.2\}$$



Palvelun laatu liikenteen funktiona

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

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

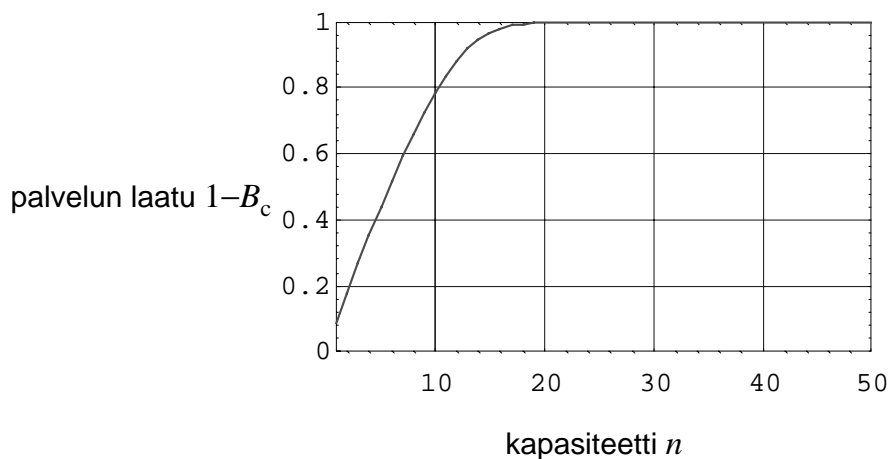


37

Palvelun laatu kapasiteetin funktiona

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

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



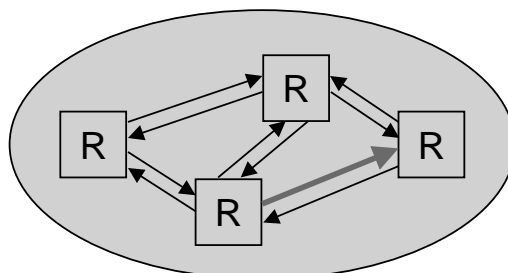
38

Sisältö

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

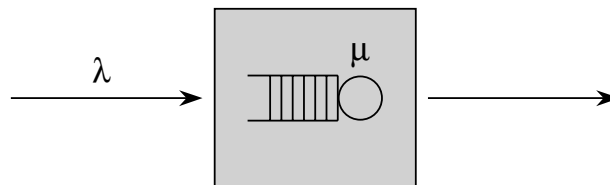
Klassinen dataliikenteen mallinnus (1)

- 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



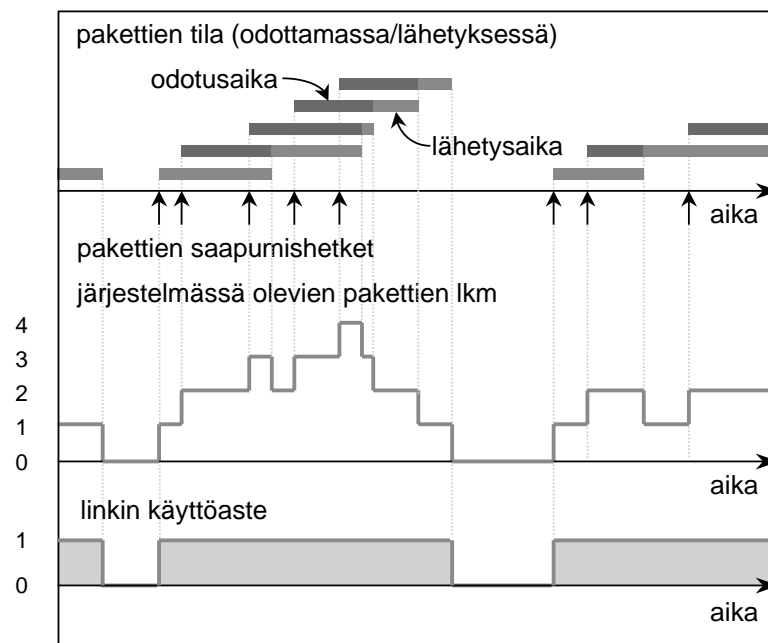
Klassinen dataliikenteen mallinnus (2)

- 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.)



41

Liikenneprosessi



42

Liikennekuorma

- Pakettikytkentäisissä dataverkoissa:

Liikenne ↔ 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. Itse asiassa kyseessä on sama suure kuin (menetysjärjestelmän) liikenneintensiteetti.
- 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).

43

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

44

Liikenneteoreettinen analyysi (1)

- Järjestelmän kapasiteetti
 - R = linkin kapasiteetti (kbps)
- Liikenne
 - λ = pakettien saapumisintensiteetti (pakettia sekunnissa)
 - L = keskimäär. paketin pituus (kbits). Oletetaan tässä: $L = 1$ kbit
- Palvelun laatu (käyttäjän näkökulmasta)
 - $P_z = \text{tn}$, että paketin täytyy odottaa “liian kauan”, so. kauemmin kuin annettu referenssihiive 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)
 - pakettien pituudet ovat riippumattomia ja samoin jakautuneita noudattaen **eksponenttijakaumaa** odotusarvolla L

45

Liikenneteoreettinen analyysi (2)

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

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

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

46

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

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

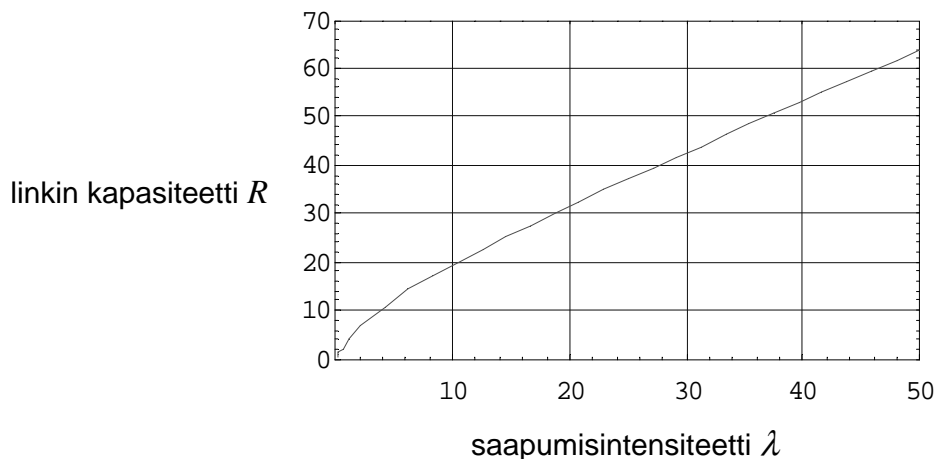
- Huom: Järjestelmä on stabiili, sillä

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

Tarvittava kapasiteetti saapumisintensiteetin funktiona

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

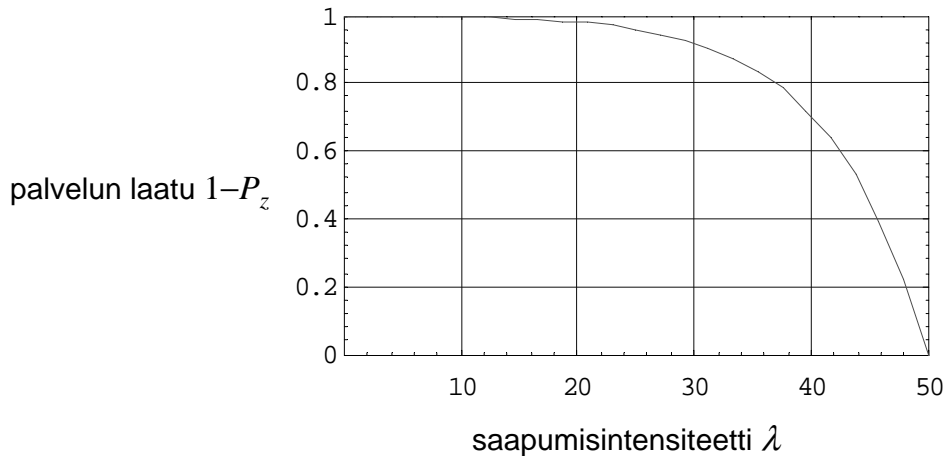
$$R(\lambda) = \min\{r > \lambda L \mid \text{Wait}(r, \lambda; 1, 0.1) < 0.2\}$$



Palvelun laatu saapumisintensiteetin funktiona

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

$$1 - P_z(\lambda) = 1 - \text{Wait}(50, \lambda; 1, 0.1)$$

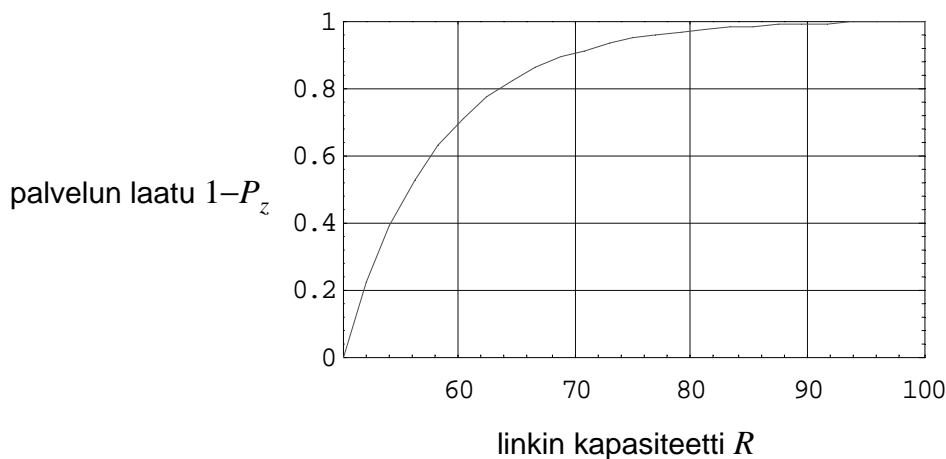


49

Palvelun laatu kapasiteetin funktiona

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

$$1 - P_z(R) = 1 - \text{Wait}(R, 50; 1, 0.1)$$



50

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

