



Liikenneteoriaa (vasta-alkajille)

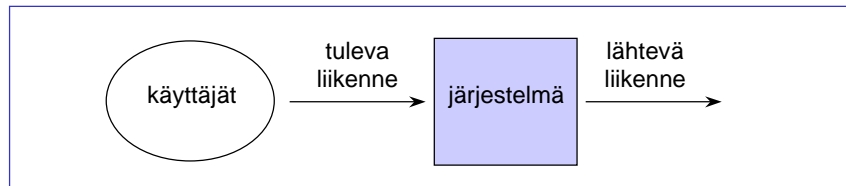
Samuli Aalto
samuli.aalto@hut.fi

Sisältö

- Liikenneteorian tehtävä
- Verkot ja välityspperiaatteen
- Puhelinliikenteen mallinnus
- Dataliikenteen mallinnus

Liikenteellinen näkökulma

- Tietoliikennejärjestelmä **liikenteellisestä näkökulmasta**:



- **Käyttäjät** generoivat liikennettä, jota **järjestelmä palvelee**

3

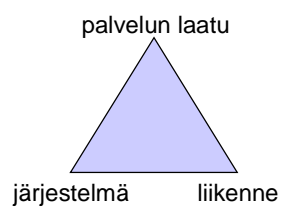
Mielenkiintoisia kysymyksiä

- Millainen on käyttäjän kokemus 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?

4

Liikenneteorian tehtävä

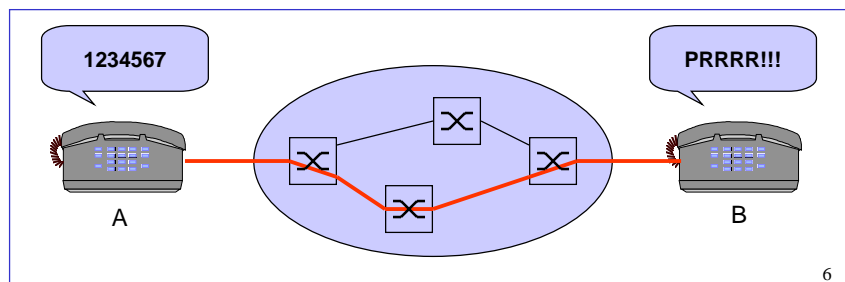
- Määritä seuraavan kolmen tekijän väliset riippuvuudet:
 - palvelun laatu
 - järjestelmän kapasiteetti
 - liikenteen voimakkuus



5

Esimerkki

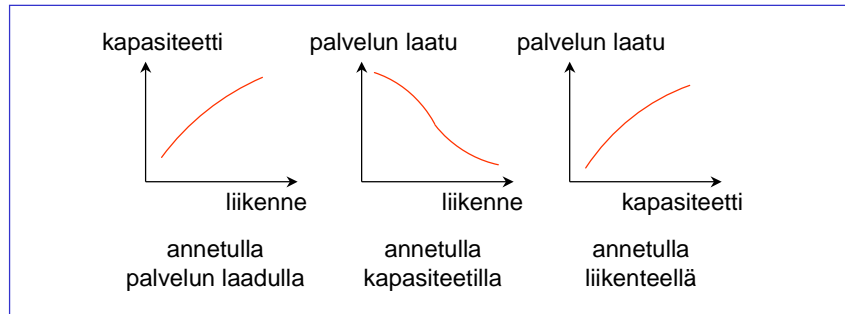
- Puhelinliikenne
 - järjestelmä = puhelinverkko
 - liikenne = puhelut
 - palvelun laatu = todennäköisyys, että yhteydenmuodostus onnistuu, ts. että "linja ei ole varattu"



6

Eri tekijöiden väliset riippuvuudet

- Riippuvuuksien **kvalitatiivinen** kuvaus:



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

7

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”
- Seuraus: myös järjestelmän kuvaamiseen tarvittavat suureet ovat luonteeltaan tilastollisia, siis **satunnaismuuttujia**:
 - käynnissä olevien kutsujen lkm
 - pakettien lkm puskurissa
- **Stokastinen prosessi** kuvaa ajan myötä tapahtuvaa satunnaista vaihtelua

8

Käytännölliset päämäärät

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

9

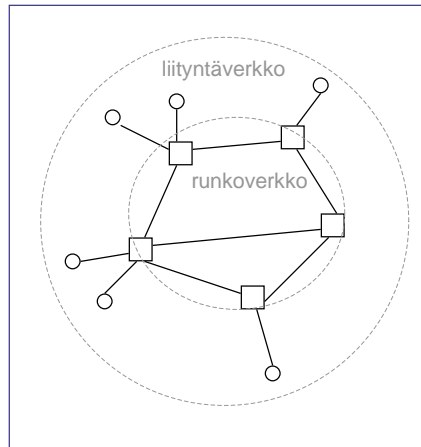
Sisältö

- Liikenneteorian tehtävä
- Verkot ja välityspäätteet
- Puhelinliikenteen mallinnus
- Dataliikenteen mallinnus

10

Tietoliikenneverkot

- Yksinkertainen tietoliikenneverkon malli koostuu
 - **solmuista**
 - päätelaitteet ○
 - verkon solmut □
 - solmujen välisistä **linkeistä**
- **Liityntäverkko**
 - päätelaitteita verkon (reunalla oleviin) solmuihin yhdistävä osa
- **Runkoverkko**
 - verkon solmuja toisiinsa yhdistävä osa



11

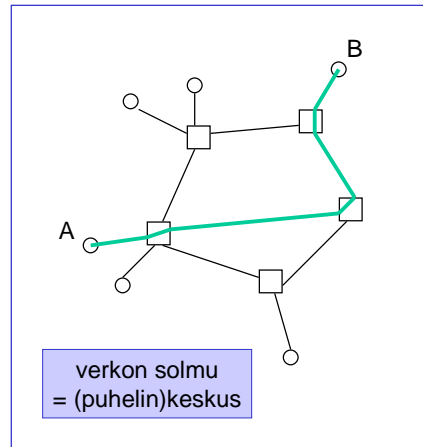
Tiedon siirto yli verkon: välityspäriaatteet

- **Piirikytkentä**
 - perinteisestä puhelinverkosta tuttu yhteydellinen välityspäriaate
 - käytössä myös nykyisissä matkapuhelinverkoissa, esim. GSM
- **Pakettikytkentä**
 - dataverkoissa käytetty (ja niille ominaisempi) välityspäriaate
 - kaksi mahdollisuutta
 - **yhteydellinen** (connection oriented) esim. X.25, Frame Relay
 - **yhteydetön** (connectionless) esim. Internet (IP), SS7 (MTP)
- **Solukytkentä**
 - erikoistapaus yhteydellisestä pakettikytkennästä: kiinteänmittaiset paketit eli **solut**, esim. ATM
 - idea: erilaisten liikennetyyppien (kuten puhe, data ja video) integroiminen samaan verkkoon

12

Piirikytkentä (1)

- **Yhteydellinen:**
 - tiedonsiirtoa edeltää **yhteydenmuodostusvaihe**, jonka aikana yhteys rakennetaan valmiiksi päästä-päähän
 - tarvittavat resurssit **varataan** koko yhteyden keston ajaksi
 - esim. puhelinyhteys varaa yhden **kanavan** kullakin reitillä olevalta linkiltä (**aikajakoinen kanavointi**)
- Informaation siirto **jatkuvana virtana**

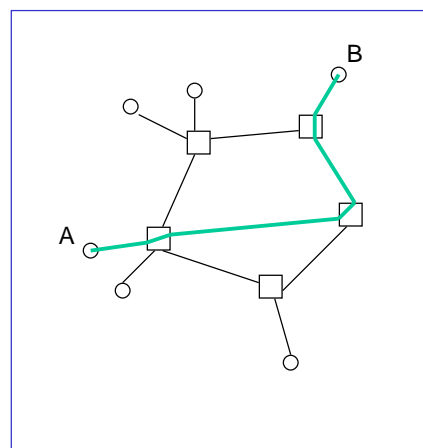


13

Piirikytkentä (2)

- Ennen informaation siirtoa
 - yhteydenmuodostuksesta aiheutuva viive
- Siirron aikana
 - ei overheadia
 - ei ylimääräisiä viiveitä (signaalin etenemisviiveen lisäksi)
- Jotta tehokasta:

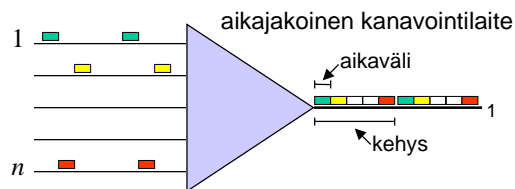
yhteyden kesto >>
yhteydenmuodostukseen
menevä aika



14

Aikajakoinen kanavointi

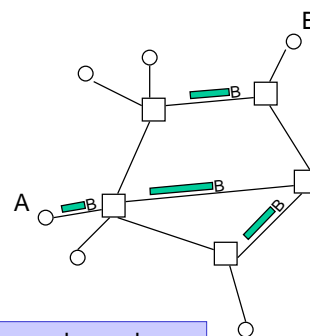
- Käytössä digitaalisissa piirikytkentäisissä verkoissa
 - tiedon siirto kiinteänpituisina kehyksinä, joka jaettu aikaväleihin
 - jokainen aikaväli vastaa yhtä kanavaa
 - varatun aikavälin paikka kehyksessä identifioi yhteyden
- Aikajakoinen kanavointilaite:
 - tulo puolella n 1-kanavaista linkkiä
 - lähtöpuolella 1 n -kanavainen linkki



15

Yhteydetön pakettikytkentä (1)

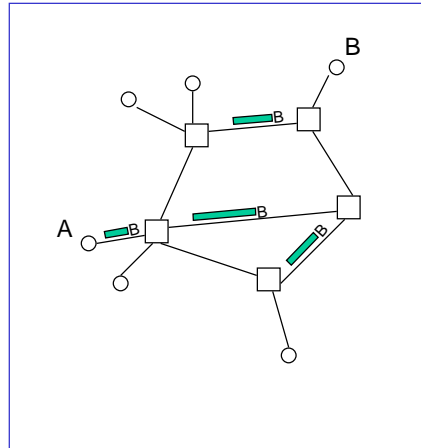
- **Yhteydetön:**
 - ei yhteydenmuodostusta
 - ei resurssien varausta
- Informaation siirto **diskreetteinä paketteina**
 - vaihtelevanmittaisia
 - sisältäen otsikon, jossa mm. kohteen globaali osoite
 - paketit kilpailevat dynaamisesti sekä solmujen prosessointikapasiteetista (reititystaulujen läpikäynti) että linkkien siirtokapasiteetista (**tilastollinen kanavointi**)



16

Yhteydetön pakettikytkentä (2)

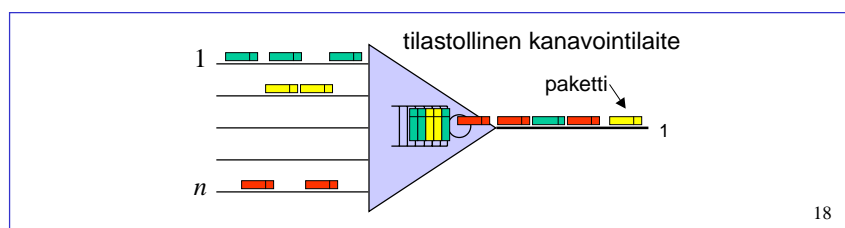
- Ennen informaation siirtoa
 - ei viiveitä
- Siirron aikana
 - overheadia (otsikkotavut)
 - paketin prosessointiviiveitä
 - paketien lähetysviiveitä
 - jonotusviiveitä (paketit kilpailevat yhteisistä resursseista sekä solmuissa että linkeillä)



17

Tilastollinen kanavointi

- Käytössä paketti- ja solukytkentäisissä verkoissa
- Kanavointilaite yhdistää n :n sisääntulevan linkin liikennevirrat yhteiselle ulosmenolinkille
 - paketit saapuvat satunnaisesti ja kilpailevat jonotusperiaatteella koko käytettävissä olevasta linkin kaistasta
 - ⇒ tarve puskurointiin



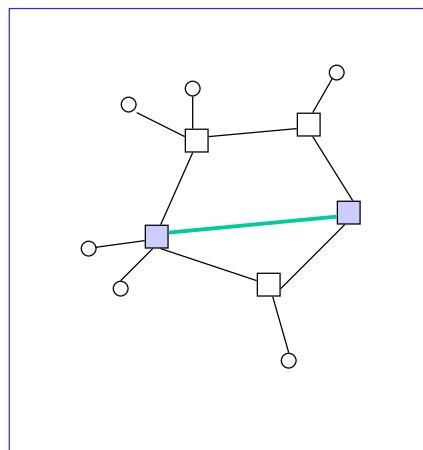
18

Sisältö

- Liikenneteorian tehtävä
- Verkot ja välityspäätteet
- Puhelinliikenteen mallinnus
- Dataliikenteen mallinnus

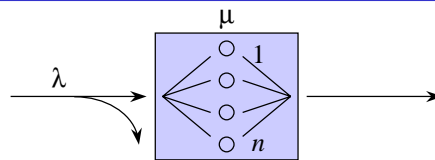
Klassinen puhelinliikenteen mallinnus (1)

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



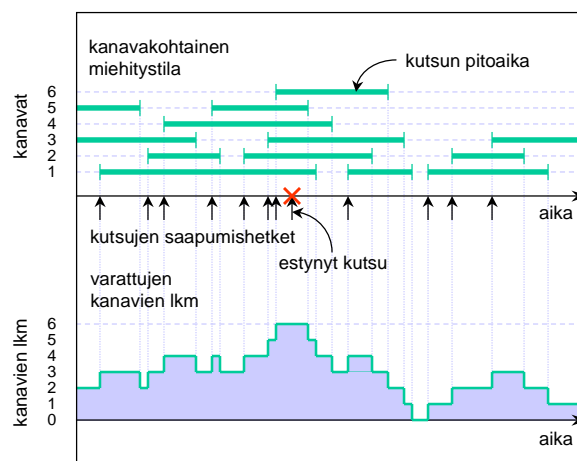
Klassinen puhelinliikenteen mallinnus (2)

- Erlang käytti mallina $n:n$ palvelijan **menetysjärjestelmää**
 - asiakas = kutsu = puhelu
 - λ = uusien kutsujen saapumisintensiteetti
 - palveluaika = (kutsun) pitoaika
 - h = keskimääräinen pitoaika
 - palvelija = yksittäinen linkin kanava
 - n = linkillä olevien rinnakkaisten kanavien lkm



21

Liikenneprosessi



22

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**

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

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

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
- Eri estosuureita:
 - **Kutsuesto** B_c = todennäköisyys, että saapuva kutsu menetetään = niiden saapuvien kutsujen osuus, jotka menetetään
 - **Aikaesto** B_t = todennäköisyys, että systeemi on täysi (mielivaltaisena ajanhetkenä) = se osuus ajasta, jolloin systeemi on täysi
- Sovellutusten kannalta ollaan yleensä kiinnostuneita kutsuestosta, joka kuvaa käyttäjien kokemaa palvelun laatua
- Aikaesto taas on usein helpommin laskettavissa oleva suure

25

Liikenneteoreettinen analyysi (1)

- Järjestelmän kapasiteetti
 - n = linkissä olevien rinnakkaisten kanavien lkm
- Liikenne
 - a = (tarjottu) liikenneintensiteetti
- Palvelun laatu (käyttäjän näkökulmasta)
 - B_c = kutsuesto = t_n , että saapuva kutsu menetetään
- Tarkastellaan tyyppiä **M/G/n/n** olevaa **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

26

Liikenneteoreettinen analyysi (2)

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

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

- 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

27

Esimerkki

- 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

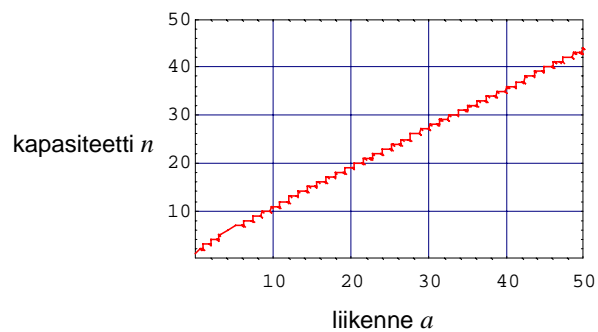
$$B_c = \text{Erl}(6, 2) = \frac{\frac{2^6}{6!}}{1 + 2 + \frac{2^2}{2!} + \frac{2^3}{3!} + \frac{2^4}{4!} + \frac{2^5}{5!} + \frac{2^6}{6!}} \approx 1.2\%$$

28

Tarvittava kapasiteetti liikenteen funktiona

- Palvelun laatuvaatimus: kutsuesto $B_c < 20\%$
- Tarvittava kapasiteetti n liikenteen a funktiona:

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

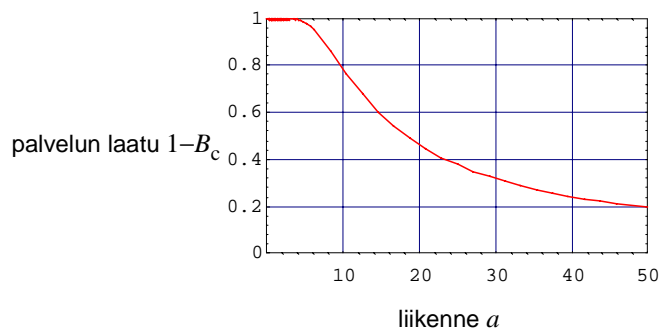


29

Palvelun laatu liikenteen funktiona

- Oletetaan sitten, että kapasiteetti $n = 10$
- Palvelun laatu $1 - B_c$ liikenteen a funktiona:

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

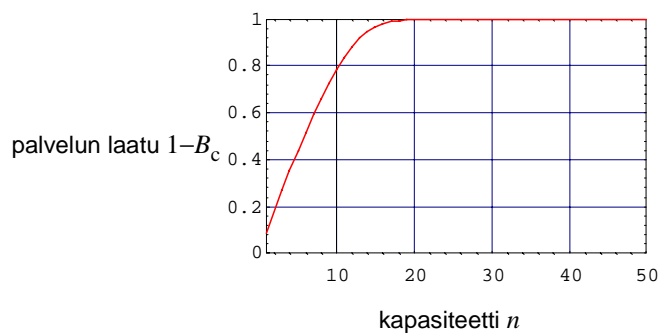


30

Palvelun laatu kapasiteetin funktiona

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

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



31

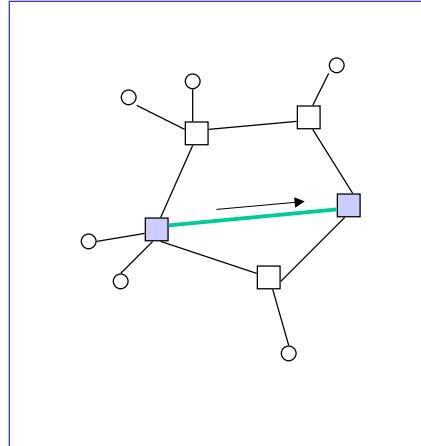
Sisältö

- Liikenneteorian tehtävä
- Verkot ja välityspperiaatteen
- Puhelinliikenteen mallinnus
- Dataliikenteen mallinnus

32

Klassinen dataliikenteen mallinnus (1)

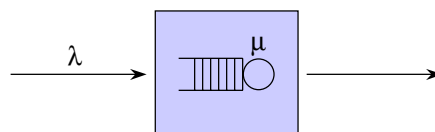
- Jonotusjärjestelmät taas soveltuvat hyvin (pakettikytketyn) dataliikenteen kuvaamiseen
 - uranuurtajina 60- ja 70-luvuilla ARPANET:in tutkijat (mm. *L. Kleinrock*)
- Tarkastellaan yhtä reitittimestä toiseen menevää linkkiä
 - liikenne koostuu linkkiä pitkin lähetetyistä datapaketeista



33

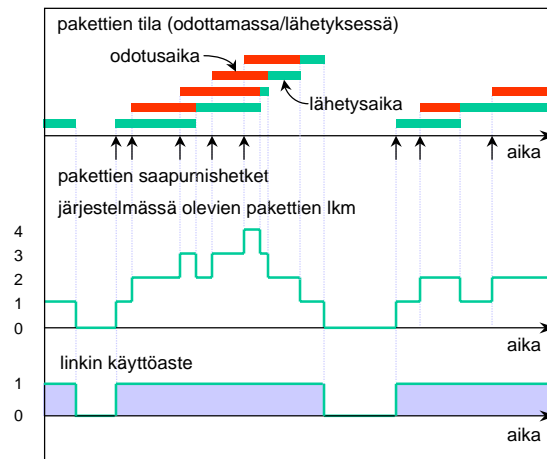
Klassinen dataliikenteen mallinnus (2)

- Klassisena mallina on yhden palvelijan **jonotusjärjestelmä**, jossa on ääretön määrä odotuspaikkoja
 - asiakas = paketti
 - λ = uusien pakettien saapumisintensiteetti
 - L = keskim. paketin pituus
 - palvelija = linkki, odotuspaikat = reitittimen ulosmenoportin puskuri
 - R = linkin kapasiteetti
 - palveluaika = paketin lähetysaika
 - $1/\mu = L/R$ = keskim. paketin lähetysaika



34

Liikenneprosessi



35

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.
- Se voidaan myös tulkita t'n:ksi, että palvelija on mielivaltaisella ajanhetkellä käytössä. Se siis kertoo järjestelmän **käyttöasteen**.

36

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

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

- 1 tavu = 8 bittiä
- 1 kbps = 1 kbit/s = 1,000 bittiä sekunnissa
- 1 Mbps = 1 Mbit/s = 1,000,000 bittiä sekunnissa

37

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)
 - $P_z = \tau n$, että paketin täytyy odottaa "liian kauan", so. kauemmin kuin annettu referenssiive z . Oletetaan tässä: $z = 0.1$ s
- Tarkastellaan tyyppiä **M/M/1** olevaa **menetysjärjestelmää**, ts. oletetaan, että
 - uudet paketit saapuvat **Poisson-prosessin** mukaisesti (intensiteetillä λ)
 - pakettien pituudet ovat riippumattomia ja samoin jakautuneita noudattaen **eksponenttijakaumaa** odotusarvolla L

38

Liikenneteoreettinen analyysi (2)

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

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

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

39

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

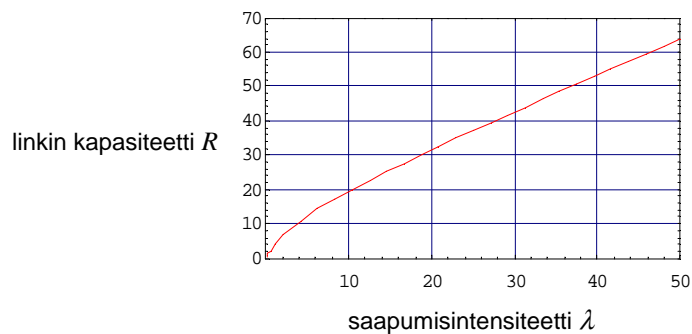
$$\rho = \frac{\lambda L}{R} = \frac{50}{64} < 1$$

40

Tarvittava kapasiteetti saapumisintensiteetin funktiona

- Palvelun laatuvaatimus: $P_z < 20\%$
- Tarvittava kapasiteetti n saapumisintensiteetin λ funktiona:

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

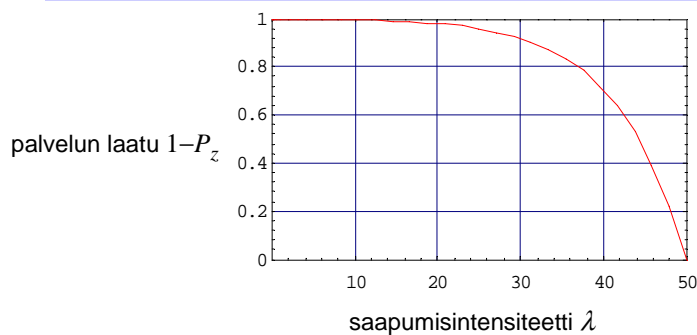


41

Palvelun laatu saapumisintensiteetin funktiona

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

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

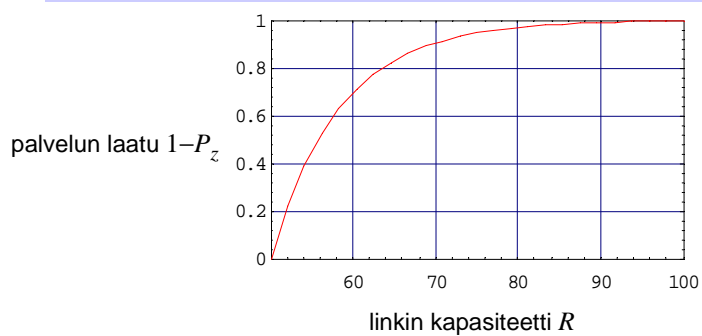


42

Palvelun laatu kapasiteetin funktiona

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

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



43

THE END



44