

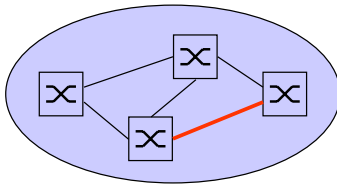
3. Esimerkkejä

Sisältö

- Puhelinliikenteen malli
- Pakettitason malli dataliikenteelle
- Vuotason malli elastiselle dataliikenteelle
- Vuotason malli virtaavalle dataliikenteelle

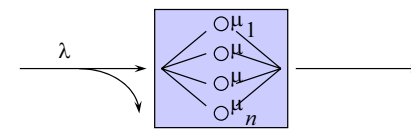
Klassinen puhelinliikenteen malli (1)

- **Menetysjärjestelmiä** on perinteisesti käytetty puhelinliikenteen kuvaamiseen kutsutasolla
 - 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

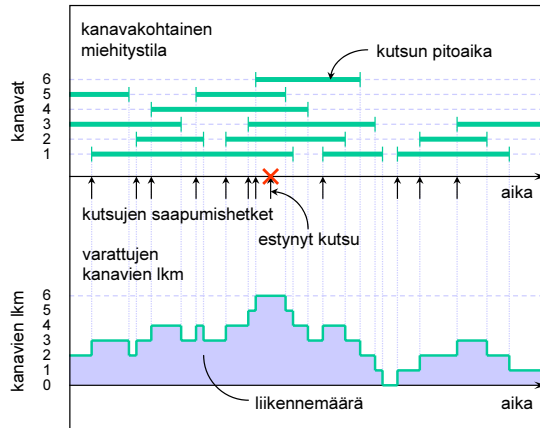


Klassinen puhelinliikenteen malli (2)

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



Liikenneprosessi



5

Liikenneintensiteetti

- Tarjotun 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)**
- Little'n kaavan nojalla: liikenneintensiteetti kertoo keskimäärin käynnissä olevien kutsujen lkm:n vastaavassa äärettömässä systeemissä
- **Esimerkki:**
 - Uusia puheluita tulee tunnissa keskimäärin 1800 kpl ja puhelun keskimääräinen pitoaika on 3 min. Tällöin liikenneintensiteetiksi tulee

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

6

Esto

- Menetysjärjestelmässä osa kutsuista menetetään:
 - Saapuva kutsu menetetään, jos kaikki kanavat on varattu (so. systeemi on täysi) ko. kutsun saapuessa
 - Termi **esto** (blocking) 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
 - Esimerkki: oma kännykkäsi
 - Mutta jos uudet kutsut saapuvat Poisson-prosessin mukaisesti, niin $B_c = B_t$
- Kutsuesto kuvaa paremmin käyttäjien kokemaa palvelun laatua
- Aikaesto taas on suoraviivaisemmin laskettavissa oleva suure

7

Kutsuintensiteetit

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

$$\lambda_{\text{offered}} \begin{matrix} \swarrow \lambda_{\text{carried}} \\ \searrow \lambda_{\text{lost}} \end{matrix}$$

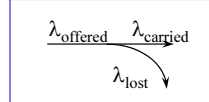
$$\begin{aligned} \lambda_{\text{offered}} &= \lambda_{\text{carried}} + \lambda_{\text{lost}} = \lambda \\ \lambda_{\text{carried}} &= \lambda(1 - B_c) \\ \lambda_{\text{lost}} &= \lambda B_c \end{aligned}$$

8

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** $a_{\text{lost}} = \lambda_{\text{lost}} h$



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

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

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

- 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) 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**

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

$$n! = n \cdot (n-1) \cdot \dots \cdot 2 \cdot 1, \quad 0! = 1$$

- 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 liikenneintensiteetti $a = 2.0$ erlang. Tällöin kutsuestoksi B_c tulee

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

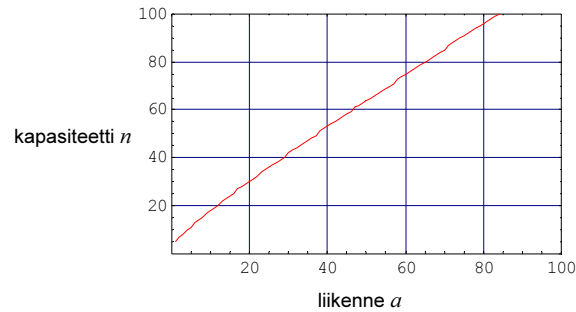
- Jos linkin kapasiteetti kasvatetaan $n = 6$ kanavaan, niin B_c pienenee arvoon

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

Kapasiteetti liikenteen funktiona

- Asetetaan palvelun laatuvaatimukseksi, että kutsuesto $B_c < 1\%$
- Tarvittava kapasiteetti n liikenteen a funktiona saadaan kaavalla:

$$n(a) = \min \{i = 1, 2, \dots \mid \text{Erl}(i, a) < 0.01\}$$

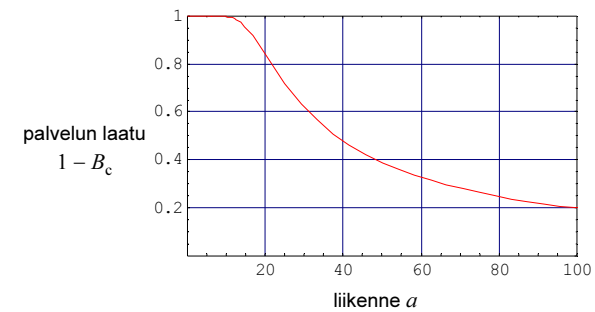


13

Palvelun laatu liikenteen funktiona

- Oletetaan sitten, että rinnakkaisten kanavien lkm eli kapasiteetti $n = 20$
- Palvelun laatu $1 - B_c$ liikenteen a funktiona saadaan kaavalla:

$$1 - B_c(a) = 1 - \text{Erl}(20, a)$$

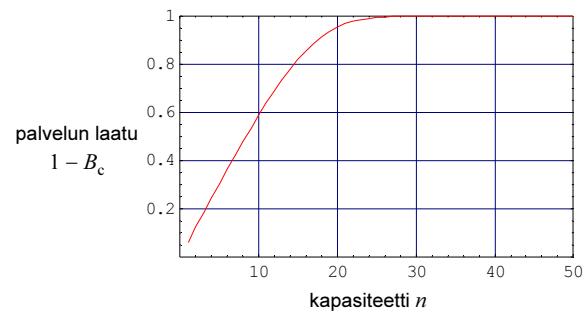


14

Palvelun laatu kapasiteetin funktiona

- Oletetaan lopuksi, että tarjotun liikenteen intensiteetti $a = 15.0$ erlang
- Palvelun laatu $1 - B_c$ kapasiteetin n funktiona saadaan kaavalla:

$$1 - B_c(n) = 1 - \text{Erl}(n, 15.0)$$



15

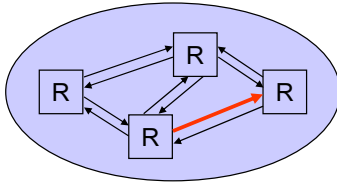
Sisältö

- Puhelinliikenteen malli
- Pakettitason malli dataliikenteelle
- Vuotason malli elastiselle dataliikenteelle
- Vuotason malli virtaavalle dataliikenteelle

16

Pakettitason malli dataliikenteelle (1)

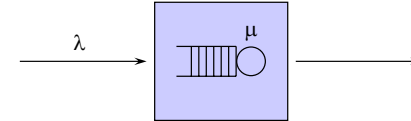
- **Jonotusjärjestelmät** soveltuvat dataliikenteen kuvaamiseen pakettitasolla
 - Uranuurtajina 60- ja 70-luvuilla ARPANET:in tutkijat, eritoten *L. Kleinrock* (<http://www.lk.cs.ucla.edu/>)
- Tarkastellaan yhtä IP-reiittimen ulostulolinkkiä
 - Liikenne koostuu linkkiä pitkin lähetetyistä datapaketeista



17

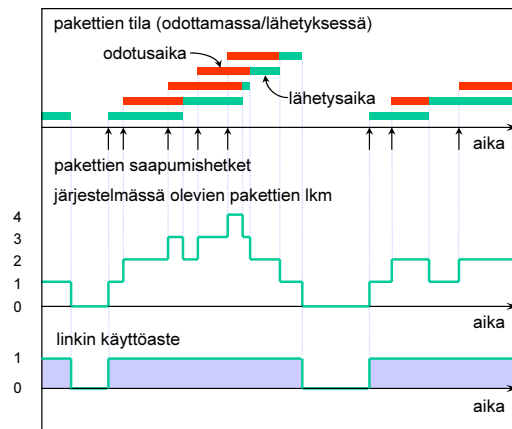
Pakettitason malli dataliikenteelle (2)

- 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
 - C = linkin kapasiteetti (datayks. per aikayks.)
 - palveluaika = paketin lähetysaika
 - $1/\mu = L/C$ = keskim. paketin lähetysaika (aikayks.)



18

Liikenneprosessi



19

Liikennekuorma

- Tarjotun liikenteen voimakkuutta kuvataan liikennekuormalla (load).
- **Määritelmä: Liikennekuorma** ρ on pakettien saapumisintensiteetin λ suhde pakettien palveluintensiteettiin $\mu = C/L$:

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

- Liikennekuorma on paljas luku (kuten menetysjärjestelmän liikenneintensiteettikin)
- Littlen kaavan nojalla: liikennekuorma kertoo keskimäärin palvelussa olevien asiakkaiden lkm:n.
- Se voidaan myös tulkita t'n:ksi, että palvelija on mielivaltaisella ajanhetkellä käytössä. Näin ollen se kertoo järjestelmän **käyttöasteen** (utilization).

20

Esimerkki

- Tarkastellaan reitittimen ulostulolinkkiä. Oletetaan, että
 - lähetettäviä paketteja saapuu keskimäärin 50,000 kpl sekunnissa,
 - yhden paketin keskimääräinen pituus on 1500 tavua, ja
 - linkin kapasiteetti on 1 Gbps.
- Tällöin linkin kuormaksi (ja samalla käyttöasteeksi) tulee

$$\rho = 50,000 * 1500 * 8 / 1,000,000,000 = 0.60 = 60\%$$

Viive

- Jonotusjärjestelmässä osa paketeista joutuu odottamaan lähetykseen pääsyä:
 - Saapuva paketti jää odottamaan puskuriin, jos ko. paketin saapuessa linkki on jo varattu
- Paketin **viive** (delay) reitittimen ulostulolinkillä koostuukin
 - **odotusajasta** (jonotusviive), joka riippuu systeemin tilasta paketin saapuessa, sekä
 - **lähetyksajasta**, joka riippuu paketin pituudesta ja linkin kapasiteetista
- Esim.

- paketin pituus = 1500 tavua
- linkin kapasiteetti = 1 Gbps
- paketin lähetyksaika = $1500 * 8 / 1,000,000,000 = 0.000012 \text{ s} = 12 \mu\text{s}$

Liikenneteoreettinen analyysi (1)

- Järjestelmän kapasiteetti
 - C = linkin kapasiteetti (kbps)
- Liikenne
 - λ = pakettien saapumisintensiteetti (pakettia sekunnissa)
 - L = keskimääräinen paketin pituus. Oletetaan tässä: $L = 1 \text{ kbit}$
- Palvelun laatu (käyttäjän näkökulmasta)
 - $P_z = \text{tn}$, että paketin täytyy odottaa "liian kauan", so. kauemmin kuin annettu referenssi viive z . Oletetaan tässä: $z = 0.00001 \text{ s} = 10 \mu\text{s}$
- Tarkastellaan tyyppiä **M/M/1** olevaa **puhdasta jonotusjärjestelmää**, 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:

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

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

Esimerkki

- Oletetaan, että paketteja saapuu intensiteetillä $\lambda = 600,000$ pps = 0.6 pakettia/ μ s ja linkin kapasiteetti on $C = 1.0$ Gbps = 1.0 kbit/ μ s.
- Järjestelmä on stabiili, sillä

$$\rho = \frac{\lambda L}{C} = 0.6 < 1$$

- Liian pitkän viiveen tn:ksi P_z (missä siis $z = 10$ μ s) tulee

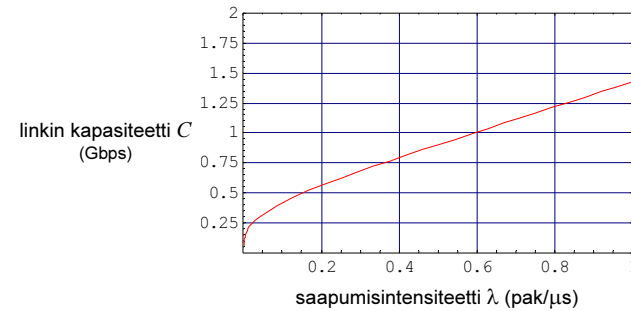
$$P_z = \text{Wait}(1.0, 0.6; 1, 10) = 0.6 \exp(-4.0) \approx 1\%$$

25

Kapasiteetti saapumisintensiteetin funktiona

- Asetetaan palvelun laatuvaatimukseksi, että $P_z < 1\%$
- Tarv. kapasiteetti C saap.intensiteetin λ funktiona saadaan kaavalla:

$$C(\lambda) = \min \{c > \lambda L \mid \text{Wait}(c, \lambda; 1, 10) < 0.01\}$$

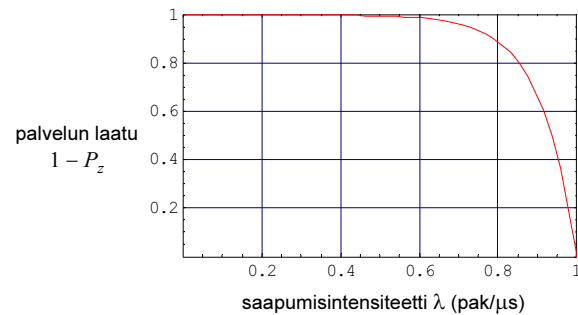


26

Palvelun laatu saapumisintensiteetin funktiona

- Oletetaan sitten, että linkin kapasiteetti on $C = 1.0$ Gbps = 1.0 kbit/ μ s
- Palvelun laatu $1 - P_z$ saap.intensiteetin λ funktiona saadaan kaavalla:

$$1 - P_z(\lambda) = 1 - \text{Wait}(1.0, \lambda; 1, 10)$$

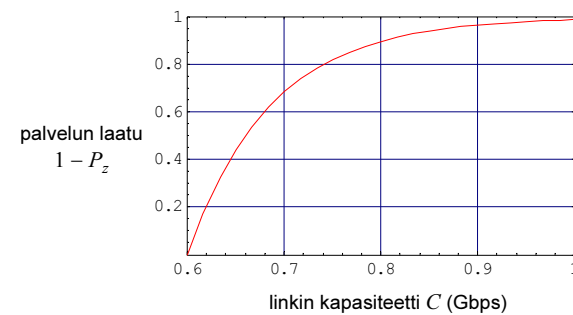


27

Palvelun laatu kapasiteetin funktiona

- Oletetaan lopuksi, että $\lambda = 600,000$ pakettia/s = 0.6 pakettia/ μ s
- Palvelun laatu $1 - P_z$ linkin kapasiteetin C funktiona saadaan kaavalla:

$$1 - P_z(C) = 1 - \text{Wait}(C, 0.6; 1, 10)$$



28

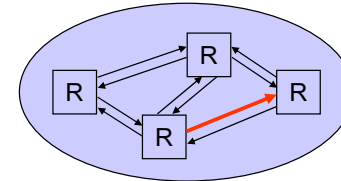
Sisältö

- Puhelinliikenteen malli
- Pakettitason malli dataliikenteelle
- Vuotason malli elastiselle dataliikenteelle
- Vuotason malli virtaavalle dataliikenteelle

29

Vuotason malli elastiselle dataliikenteelle (1)

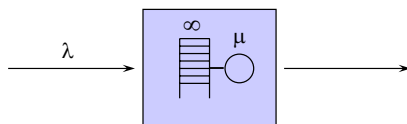
- **Jakojärjestelmät** soveltuvat **elastisen** dataliikenteen kuvaamiseen vuotasolla
 - Elastisuus tarkoittaa, että voiden lähetyksenopeus sopeutuu vallitsevaan liikennetilanteeseen: ruuhka pudottaa kaikkien voiden lähetyksenopeuksia
 - Tätä koulukuntaa edustaa esim. *J. Roberts* tutkijoineen (<http://perso.rd.francetelecom.fr/~roberts/>)
- Tarkastellaan yhtä reitittimen ulostulolinkkiä
 - Liikenne koostuu linkkiä pitkin kulkevista TCP-voista, joita käytetään erilaisten digitaalisten dokumenttien (tiedostojen, www-sivujen, ...) siirtoon



30

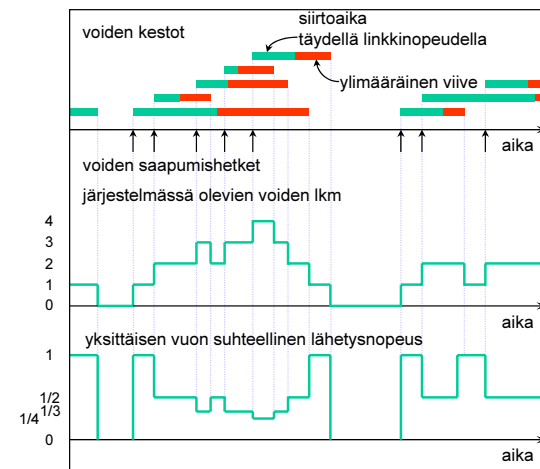
Vuotason malli elastiselle dataliikenteelle (2)

- Yksinkertaisimpana mallina on yhden palvelijan ($n = 1$) **puhdas jakojärjestelmä**, jossa kokonaispalvelunopeus on kiinteä μ
 - asiakas = TCP-vuo = siirrettävä "tiedosto"
 - λ = uusien voiden saapumisintensiteetti (vuota per aikayks.)
 - S = keskim. vuon pituus = keskim. siirrett. tiedoston koko (datayks.)
 - palvelija = linkki
 - C = linkin kapasiteetti (datayks. per aikayks.)
 - palveluaika = tiedoston siirtoaika täydellä linkinopeudella
 - $1/\mu = S/C$ = keskim. tiedoston siirtoaika täydellä nopeudella (aikayks.)



31

Liikenneprosessi



32

Liikennekuorma

- Tarjotun liikenteen voimakkuutta kuvataan liikennekuormalla ρ
- Määritelmä: Liikennekuorma** ρ on voiden saapumisintensiteetin λ suhde voiden kokonaispalveluintensiteettiin $\mu = C/S$:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\lambda S}{C}$$

- Liikennekuorma on tässäkin tapauksessa paljas luku
- Jakojärjestelmissä liikennekuorma ei kerro keskimäärin palvelussa olevien asiakkaiden lukumäärää. Miksei?
- Se voidaan kuitenkin edelleen tulkita t:n:ksi, että palvelija on mielivaltaisella ajanhetkellä käytössä. Näin ollen se kertoo järjestelmän **käyttöasteen** (utilization).

Esimerkki

- Tarkastellaan reitittimen ulostulolinkkiä. Oletetaan, että
 - uusia voita saapuu keskimäärin 50 kpl sekunnissa,
 - yhden vuon keskimääräinen pituus on 1,500,000 tavua, ja
 - linkin kapasiteetti on 1 Gbps.
- Tällöin linkin kuormaksi (ja samalla käyttöasteeksi) tulee

$$\rho = 50 * 1,500,000 * 8 / 1,000,000,000 = 0.60 = 60\%$$

Läpimeno

- Jakojärjestelmässä palvelukapasiteetti jaetaan tasan kaikkien aktiivisten voiden kesken. Tästä taas seuraa, että **kaikki** vuot viivästyvät, ts. kokonaisviive ylittää pelkän lähetysajan (ellei vuo sitten satu olemaan yksinään järjestelmässä).
- Määritelmä:** Vuon keskimääräisen koon S suhdetta sen kokemaan keskimääräiseen kokonaisviiveeseen D sanotaan **läpimenoksi** θ (throughput) eli keskimääräiseksi lähetysnopeudeksi,

$$\theta = S / D$$

- Esimerkki:

- $S = 1$ Mbit
- $D = 5$ s
- $\theta = S/D = 0.2$ Mbps

Liikenneteoreettinen analyysi (1)

- Järjestelmän kapasiteetti
 - C = linkin kapasiteetti (Mbps)
- Liikenne
 - λ = voiden saapumisintensiteetti (vuota sekunnissa)
 - S = keskimäär. vuon pituus. Oletetaan tässä: $S = 1$ Mbit
- Palvelun laatu (käyttäjän näkökulmasta)
 - θ = vuon läpimeno eli keskimääräinen lähetysnopeus
- Tarkastellaan tyyppiä **M/G/1-PS** olevaa **jakojärjestelmää**, ts. oletetaan, että
 - uudet vuot saapuvat **Poisson-prosessin** mukaisesti (intensiteetillä λ) ja
 - voiden pituudet ovat riippumattomia ja samoin jakautuneita noudattaen **mitä tahansa jakaumaa**, jonka odotusarvo on S

Liikenneteoreettinen analyysi (2)

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

$$\theta = X_{\text{put}}(C, \lambda; S) := \begin{cases} C - \lambda S = C(1 - \rho), & \text{if } \lambda S < C (\rho < 1) \\ 0, & \text{if } \lambda S \geq C (\rho \geq 1) \end{cases}$$

- Huom:
 - Järjestelmä on **stabiili** vain tapauksessa $\rho < 1$. Muutoin voiden lukumäärä ja keskimääräinen läpimenoaika kasvaa rajatta, ja vuon kokema läpimeno lähestyy nollaa.

37

Esimerkki

- Oletetaan, että voita saapuu intensiteetillä $\lambda = 600$ vuota sekunnissa ja linkin kapasiteetti on $C = 1000$ Mbps = 1.0 Gbps.
- Järjestelmä on stabiili, sillä

$$\rho = \frac{\lambda S}{C} = \frac{600}{1000} = 0.6 < 1$$

- Läpimenoiksi tulee

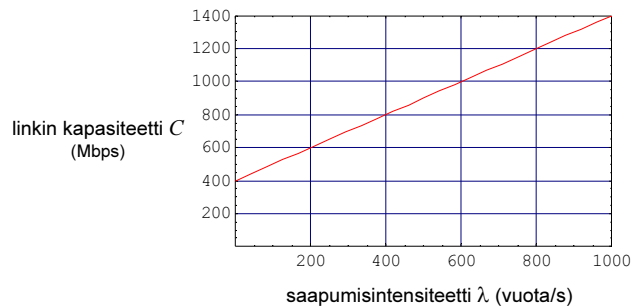
$$\theta = X_{\text{put}}(1000, 600; 1) = 1000 - 600 = 400 \text{ Mbps} = 0.4 \text{ Gbps}$$

38

Kapasiteetti saapumisintensiteetin funktiona

- Asetetaan palvelun laatuvaatimukseksi, että $\theta \geq 400$ Mbps.
- Tarv. kapasiteetti C saap.intensiteetin λ funktiona saadaan kaavalla:

$$C(\lambda) = \min \{c > \lambda S \mid X_{\text{put}}(c, \lambda; 1) \geq 400\} = \lambda S + 400$$

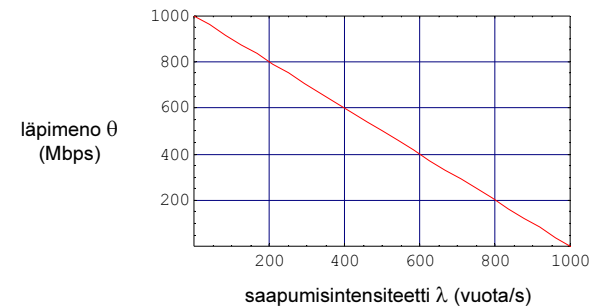


39

Palvelun laatu saapumisintensiteetin funktiona

- Oletetaan sitten, että linkin kapasiteetti on $C = 1000$ Mbps
- Palvelun laatu θ saapumisintensiteetin λ funktiona saadaan kaavalla:

$$\theta(\lambda) = X_{\text{put}}(1000, \lambda; 1) = 1000 - \lambda S, \quad \lambda < 1000/S$$

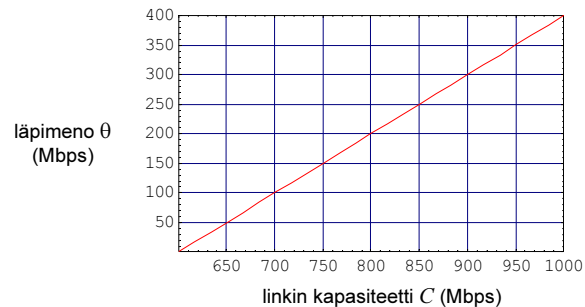


40

Palvelun laatu kapasiteetin funktiona

- Oletetaan lopuksi, että saapumisintensiteetti on $\lambda = 600$ vuota/s
- Palvelun laatu θ linkin kapasiteetin C funktiona saadaan kaavalla:

$$\theta(C) = X_{\text{put}}(C, 600; 1) = C - 600S, \quad C > 600S$$



41

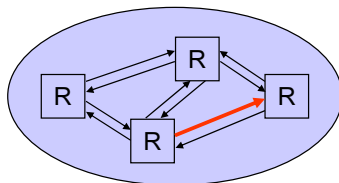
Sisältö

- Puhelinliikenteen malli
- Pakettitason malli dataliikenteelle
- Vuotason malli elastiselle dataliikenteelle
- Vuotason malli virtaavalle dataliikenteelle

42

Vuotason malli virtaavalle CBR-liikenteelle (1)

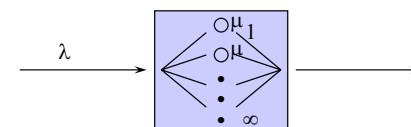
- **Ääretön järjestelmä** soveltuu virtaavan vakionopeuksisen dataliikenteen kuvaamiseen vuotasolla
 - Virtaavan vuon lähetysnopeus ei reagoi verkon tilaan, eikä verkon tila myöskään vaikuta vuon kestoon
 - Tällaisia malleja sovellettiin 90-luvulla ATM-verkkojen CBR-liikenteen liikenneteoreettiseen analyysiin
- Tarkastellaan yhtä reitittimen ulostulolinkkiä
 - Liikenne koostuu linkkiä pitkin kulkevista UDP-voista, joita käytetään virtaavan vakionopeuksisen liikenteen (esim. VoIP) siirtoon



43

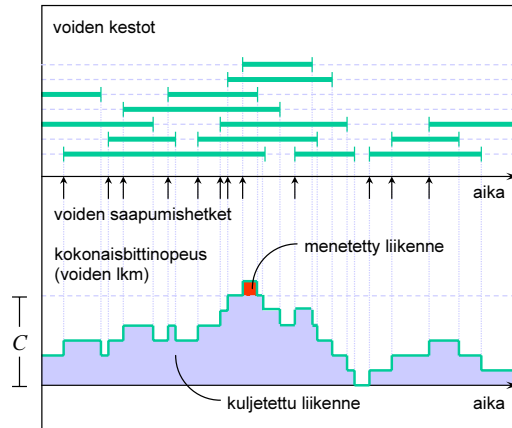
Vuotason malli virtaavalle CBR-liikenteelle (2)

- Mallina on siis **ääretön järjestelmä** ($n = \infty$)
 - asiakas = UDP-vuo = vakionopeuksinen bittivirta
 - λ = uusien voien saapumisintensiteetti (vuota per aikayks.)
 - palveluaika = vuon kesto
 - $h = 1/\mu$ = keskimääräinen vuon kesto (aikayks.)
- **Puskuriton** vuotason malli:
 - kun voien yhteinen lähetysnopeus ylittää linkin nopeuden, bittejä katoaa (tasaisesti kaikilta voilta)



44

Liikenneprosessi



45

Tarjottu liikenne

- Merkitään r :llä yksittäisen vuon bittinopeutta
- Tarjotun liikenteen voimakkuutta kuvaa keskimääräinen volden yhteenlaskettu bittinopeus R
 - Little'n kaavan nojalla keskimääräinen aktiivisten volden lkm on

$$a = \lambda h$$

- Tätä voidaan kutsua **liikenneintensiteetiksi** (vrt. puhelinliikenne)
- Tästä seuraa, että

$$R = ar = \lambda hr$$

46

Häviösuhde

- Merkitään N :llä systeemissä olevien volden lukumäärää
- Aina kun volden yhteinen lähetysnopeus Nr ylittää linkin kapasiteetin C , bittejä katoaa nopeudella

$$Nr - C$$

- Keskimääräinen katoamisnopeus on siis

$$E[(Nr - C)^+] = E[\max\{Nr - C, 0\}]$$

- **Määritelmä:** Häviösuhde p_{loss} kertoo kadonneen liikenteen osuuden koko liikenteestä:

$$p_{\text{loss}} = \frac{E[(Nr - C)^+]}{E[Nr]} = \frac{1}{ar} E[(Nr - C)^+]$$

47

Liikenneteoreettinen analyysi (1)

- Järjestelmän kapasiteetti
 - $C = nr$ = linkin kapasiteetti (kbps)
- Liikenne
 - $R = ar$ = tarjottu liikenne (kbps)
 - r = vuon bittinopeus (kbps).
- Palvelun laatu (käyttäjän näkökulmasta)
 - p_{loss} = häviösuhde
- Tarkastellaan tyyppiä $M/G/\infty$ olevaa **ääretöntä järjestelmää**, ts. oletetaan, että
 - uudet vuot saapuvat **Poisson-prosessin** mukaisesti (intensiteetillä λ) ja
 - volden kestot ovat riippumattomia ja samoin jakautuneita noudattaen **mitä tahansa jakaumaa**, jonka odotusarvo on h

48

Liikenneteoreettinen analyysi (2)

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

$$p_{\text{loss}} = \text{LR}(n, a) := \frac{1}{a} \sum_{i=n+1}^{\infty} (i-n) \frac{a^i}{i!} e^{-a}$$

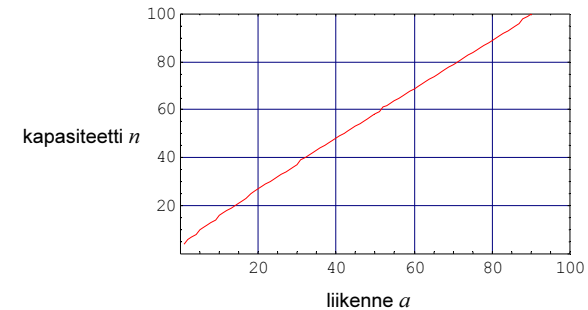
- Esimerkki:
 - $n = 20$
 - $a = 14.36$
 - $p_{\text{loss}} = 0.01$

49

Kapasiteetti liikenteen funktiona

- Asetetaan palvelun laatuvaatimukseksi, että häviösuhte $p_{\text{loss}} < 1\%$
- Tarvittava kapasiteetti n liikenteen a funktiona saadaan kaavalla:

$$n(a) = \min \{i = 1, 2, \dots \mid \text{LR}(i, a) < 0.01\}$$

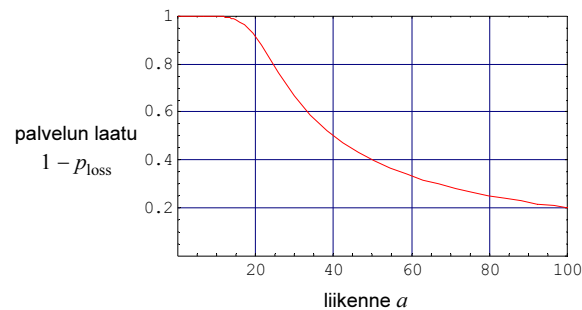


50

Palvelun laatu liikenteen funktiona

- Oletetaan sitten, että kapasiteetti $n = 20$
- Palvelun laatu $1 - p_{\text{loss}}$ liikenteen a funktiona saadaan kaavalla:

$$1 - p_{\text{loss}}(a) = 1 - \text{LR}(20, a)$$

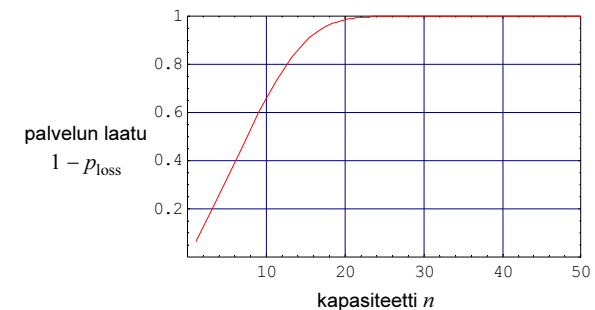


51

Palvelun laatu kapasiteetin funktiona

- Oletetaan lopuksi, että tarjotun liikenteen intensiteetti $a = 15.0$ erlang
- Palvelun laatu $1 - p_{\text{loss}}$ kapasiteetin n funktiona saadaan kaavalla:

$$1 - p_{\text{loss}}(n) = 1 - \text{LR}(n, 15.0)$$



52