

**Liikenneteorian ja -tekniikan (traffic engineering)
rooli tietoliikennejärjestelmissä**

J. Virtamo

19.10.1999

Teleliikenneteorian pääaine

- Liikenneteorian perusteet (kl) 2 ov
 - johdanto liikenneteoriaan ja sen sovelluksiin
- Jonoteoria (sl) 3 ov (L)
 - matemaattiset perusteet
- Teleliikenneteoria (kl) 3 ov (L)
 - sovelluksia tietoliikennejärjestelmiin
 - edistynyttä jonoteorian aineistoa
- Tietoliikennejärjestelmien simulointi (sl) 2 ov
 - simulointitekniikan perusteet
 - simulointiohjelma luominen
 - simulointiohjelmistot
- Teletekniikan liseniaattiseminaari (sl) 3-10 ov
 - vaihtuva-aiheinen
 - 1997: multirate loss systems, 4 ov
 - 1998: queueing networks 4 ov
 - 1999: traffic modelling

Kenelle

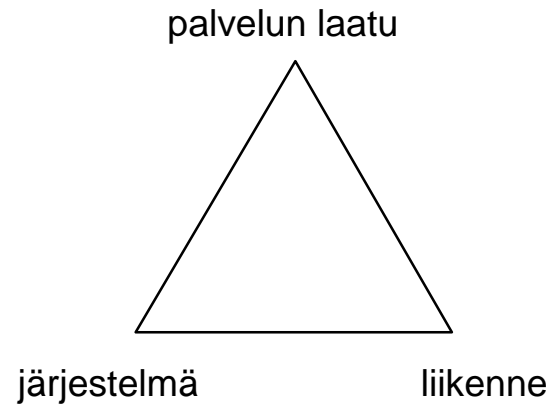
- Tietoliikennejärjestelmätoimittajat
 - järjestelmäsuunnittelun asiantuntijatehtävät
 - mitoitus, suorituskykyanalyysi
 - järjestelmien simulointi
 - liikenteenhallinnan toimintojen suunnittelu ja kehitys
 - uusien konseptien evaluointi
- Tietoliikenneoperaattorit
 - verkkosuunnittelu ja -mitoitus
 - liikenteenhallinnan ja reitityksen menetelmien kehitys ja evaluointi
 - liikennemittaukset ja -ennusteet, monitorointi
 - laskutusperusteiden luonti
- Tutkimus ja kehitys
 - matemaattiset menetelmät
 - laskenta-algoritmit
 - simulointitekniikat
 - liikennemallit
 - liikennemittaukset

Liikenneteoria ja -tekniikka tarjoaa haastavan alueen

- Tietoliikenneala kehittyy nopeasti
- Jatkuvasti tulee uusia verkkokonsepteja
- Liikenteellisten kysymysten järkevä ratkaisu on avainkysymyksiä
 - ATM-verkon liikenteenhallinta
 - reaaliaikaiset sovellukset Internet-verkossa
 - palvelun laatu Internet-verkossa
 - soluradiojärjestelmien kapasiteetin tehokas käyttö
- Matemaattisesti mielenkiintoisia ja vaikeita tehtäviä
- Todellisen liikenteen mittaus ja karakterisointi nopeissa verkoissa

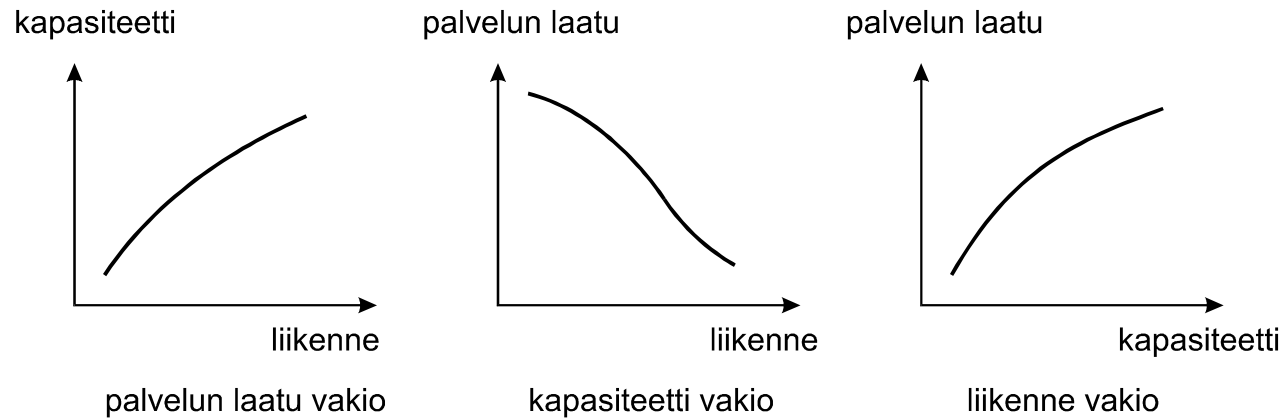
Liikenneteorian tehtävä

- Määrää kolmen eri tekijän väliset riippuvuudet



- 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 (jatkoa)



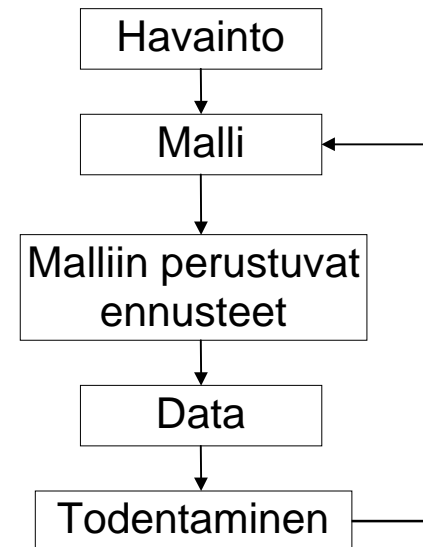
- Liikenneteoria kuvaa matemaattisten mallien avulla eri tekijöiden välisiä riippuvuuksia
 - palvelun laatu
 - tarjottu liikenne
 - järjestelmän kapasiteetti
- Mallit ovat usein luonteeltaan tilastollisia
 - käynnissä olevien yhteyksien lukumäärän jakauma
 - puskurin täyttöjakauma

Liikennemalli

Mallin vaatimukset

- Malli pitää voida todentaa (riittävän helposti) ja sen parametrit pitää voida määrätä mittaushavaintojen perusteella
- Mallin tulee olla riittävän yksinkertainen niin, että sitä voidaan soveltaa käytännön mitoitukseen

Mallin luonti



Liikenneteorian tehtävä (jatkoa)

Liikenneteoria luo pohjan

- verkonsuunnittelulle
 - mitoitukselle
 - optimoinnille
 - suorituskyvyn arvioinnille

- ohjaustoimenpiteille
 - verkon tehokkaalle operoinnille
 - vikatilanteista toipumiselle
 - liikenteenhallinnalle
 - reititykselle
 - laskutukselle

Liikenneteoria nojautuu seuraaviin osaamisalueisiin

- todennäköisyyslaskenta
- stokastiset prosessit
- jonoteoria
- tilastolliset analyysit (mittausdatan käsittely)
- operaatioanalyysi
- optimointiteoria
- päätöksentekoaalyysi (Markov decision processes)
- simulointitekniikat (oliopohjainen ohjelmointi)

Liikenneintensiteetti

$$A = \lambda \cdot s$$

missä

λ = kuljetettujen yhteyksien lukumäärä aikayksikössä (saapumisnopeus, kutsunopeus)

s = yhteyden keskimääräinen kesto eli pitoaika

- Liikenneintensiteetti on paljas luku, mutta asiayhteyden korostamiseksi sen ”yksiköksi” usein merkitään erlang (E, erl)
- A.K. Erlang (1878-1929) kehitti liikenneteoriaa puhelinliikenteen kuvaamiseen
- Liikenneintensiteetti kuvaa keskimäärin yhtäaikaan käynnissä olevien yhteyksien lukumäärää

Esimerkki

- Paikalliskeskuksessa puheluiden lukumäärä tunnissa on 1800
- Puhelun keskimääräinen pitoaika on 3 min

$$A = 1800 \times 3 / 60 = 90 \text{ erlang}$$

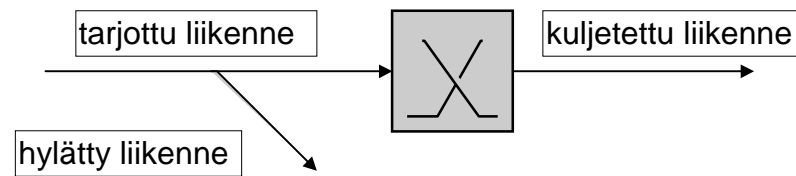
Eri lähteiden synnyttämiä tyypillisiä liikenneintensiteettejä ovat

- | | |
|----------------------|--------------------|
| – yksityinen tilaaja | 0.01 - 0.04 erlang |
| – toimistotilaaja | 0.03 - 0.06 erlang |
| – PBX | 0.1 - 0.6 erlang |
| – maksupuhelin | 0.07 erlang |

90 erlangin liikenteen synnyttämiseen tarvitaan 2250 - 9000 yksityistilaaajaa.

Liikennevirrat

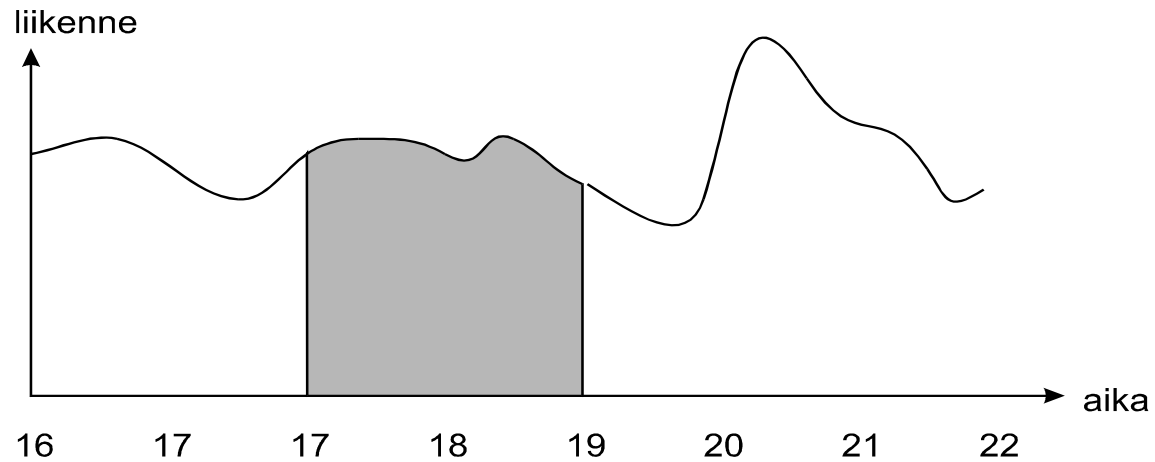
Liikenteessä erotetaan kolme komponenttia:



- Tarjottu liikenne A_0
 - liikenne, joka kuljetettaisiin, jos järjestelmä ei asettaisi mitään rajoituksia
 - teoreettinen käsite
- Kuljetettu liikenne A_c
 - todellisuudessa kuljetettu liikenne
- Menetty liikenne A_l
 - tarjotun ja kuljetetun liikenteen erotus

Liikennemäärä

Tietyn ajanjakson aikana kuljetettu kokonaisliikenne on *liikennemäärä* *l. liikenteen volyyymi*



- Liikennemäärän yksikkö on esim.
 - erlang · tunti
 - puheluminuutti
- Liikennemäärä jaettuna ajanjakson pituudella on keskimääräinen liikenneintensiteetti kyseisen ajanjakson sisällä

Liikenteen vaihtelut

Liikenne vaihtelee useissa eri aikaskaaloissa

- *trendikehitys* (> vuosi)
 - liikenteen määrän kasvu: käyttäjien määrä, käyttötottumusten muutokset
 - liikenne-ennusteet antavat lähtökohdan verkon suunnittelulle
- *kausivaihtelu* (kuukausia)
 - vuodenaikoihin liittyvät vaihtelut (lomakausien kuopat)
- *viikkorytmin vaihtelut* (päiviä)
 - eri viikonpäiviin liittyvät aktiviteettivaihtelut
- *päiväprofiili* (tunteja)
 - työpäivän kulkuun liittyvät vaihtelut
- *satunnaisvaihtelut* (sekunteja -- minuutteja)
 - toisistaan riippumattomien käyttäjien lukumäärän vaihtelut (Poisson-prosessi)
- Viimeksimainittu komponentti on puhtaasti *stokastinen*
- Muut vaihtelut noudattavat keskimäärin tiettyä *profiilia*, josta kuitenkin tapahtuu satunnaisia poikkeamia (jokainen päivä, viikko, kuukausi... on erilainen)

Kiiretunti

- Verkon mitoittaminen suurimman milloinkaan esiintyvän liikennehuipun varalle ei ole tarkoituksenmukaista. Käytännön mitoitus tehtäviä varten on haluttu kehittää laskennallinen liikennekuormaa kuvaava suure, joka kohtuullisessa määrin pyrkii esittämään huippukuormaa, mutta joka kuitenkin keskiarvoistaa yksittäiset liikennepiikit pois.

Se yhden tunnin pituinen jakso,
jona liikenteen volyyymi on suurin

- Liikenne huojuu satunnaisten tekijöiden vaikutuksesta jatkuvasti keskimääräisen käyttäytymisensä ympärillä
- Mitoitukseen sopivien keskimääräisten arvojen määrittämiseksi suosituksissa on määritetty kiiretunnin liikenteelle tietty mittaus tapa
- Itse asiassa on useita eri kiiretunnin liikenteen määritelmiä
 - operaattorit käyttävät näistä itselleen sopivimmaksi katsomaansa

Kiiretunti (jatkoa)

- ADPH (Average Daily Peak Hour)
 - määrätään kullekin päivälle erikseen (mahdollisesti eri ajankohtiin sijoittuva) kiiretunti ja keskiarvoistetaan esim. 10 päivän yli
 - kiiretunnin sijoittumisen tarkkuutena voi olla joko täysi tunti (ADPH-F) tai neljännestunti (ADPH-Q)
- TCBH (Time Consistent Busy Hour)
 - joka päivä samaan kellonaikaan sijoittuva tunnin jakso, jona laskettu keskiarvo (esim. 10 päivän ajalta) on suurin
- FDMH (Fixed Daily Measurement Hour)
 - etukäteen valittuun mittausaikaan (esim. 9.30-10.30) perustuva mittaus, joka keskiarvoistetaan esim. 10 päivän ajalta

$$A_{\text{FDMH}} \leq A_{\text{TCBH}} \leq A_{\text{ADPH}}$$

Pitoaika

- Liikenneintensiteetti A riippuu kutsunopeuden λ lisäksi pitoajasta s
- Pitoaika tarkoittaa yhteyden kokonaiskestoa

$$\text{pitoaika} = (\text{yhteyden muodostusaika}) + (\text{keskusteluaika}) + (\text{yhteyden purkuaika})$$

- Perinteisesti puhelinliikenteessä yhteyden pitoajan keskiarvona on käytetty arvoa 3 min
 - tämä koskee tavallisia työpuheluita
 - yksityispuheluiden kesto on tyypillisesti paljon pitempi
 - pitoajan keskiarvo vaihtelee siten vuorokaudenajan mukaan
- Yhteyden keston jakauma perinteisillä puheluilla on likimain eksponentiaalinen
 - helpottaa merkittävästi analyysien suorittamista
 - eksponenttijakautuma on ”muistiton”
 - jäljelläoleva aika on samalla tavalla eksponentiaalisesti jakautunut riippumatta siitä, kauanko yhteys on jo kestänyt

Pitoaika (esimerkki)

Lähtöoletukset: Keskuksen liikenneintensiteetti klo 10-11 välisenä aikana on 400 erlangia.
Kunkin yhteyden muodostaminen varaa ohjausjärjestelmän 3 s ajaksi.

Esim. 1: Oletetaan, että keskimääräinen pitoaika on 180 s.

Kutsunopeus: $\lambda = A/s = 400 \cdot 3600 / 180 = 8000$ kutsua tunnissa

Ohjausjärjestelmän kuorma: $A = \lambda \cdot s = 8000 \cdot 3 / 3600 = 6.7$ erlang

Esim. 2: Oletetaan, että keskimääräinen pitoaika on 150 s.

Kutsunopeus: $\lambda = A/s = 400 \cdot 3600 / 150 = 9600$ kutsua tunnissa

Ohjausjärjestelmän kuorma: $A = \lambda \cdot s = 9600 \cdot 3 / 3600 = 8.0$ erlang

Palvelun laatu

- Verkkoa ei voi mitoitaa pahimpien yksittäisten liikennehuippujen mukaan: joskus esiintyy tilanteita, joissa haluttua palvelua ei saada tai palvelun laatu on heikentynyt
- Mitoitus tehdään palvelun laatutasolle asetetun (tilastollisen) tavoitteen mukaan
 - grade of service (GoS): yhteystason laatu (esim puhelinverkko)
 - quality of service (QoS): yhteydenaikainen laatu (esim. ATM-verkko)
- Puhelinverkossa puhelu, jota ei voida heti yhdistää
 - voi tulla kokonaan hylätyksi: menetysjärjestelmä
 - voi joutua odottamaan: odotusjärjestelmä
- GoS-vaatimus
 - menetysjärjestelmä: $P(\text{puhelu estyy}) < x \%$
 - odotusjärjestelmä: $P(\text{odotusaika} > z \text{ sekuntia}) < x \%$

Palvelun laatu (jatkoa)

- Menetysjärjestelmä
 - puhelun estyminen voi tyypillisesti tapahtua kiiretunnin aikana
 - tapahtuu tietyllä todennäköisyydellä, joka riippuu kiiretunnin liikenneintensiteetistä ja järjestelmän mitoituksesta Erlangin kaavan mukaan (ns. B-kaava)
 - verkon eri osissa tapahtuvien estojen todennäköisyydet voidaan likimäärin laskea yhteen päästä-päähän eston laskemiseksi
- Odotusjärjestelmä
 - jos puhelun yhdistäminen ei ole heti mahdollista, se jää odottamaan
 - lyhyellä odotusajalla ei ole merkitystä, käyttäjä sellaista tuskin huomaa
 - pitkät odotusajat ovat käyttäjän kannalta ei-toivottavia
 - odotusajalle asetetaan yläraja, jonka jälkeen kutsu hylätään
 - odotusjärjestelmän käyttäytymistä kuvaa ns. Erlangin C-kaava
- Epäonnistuneiden puheluiden uudelleensoittoyritykset

Palvelun laatu (jatkoa)

- Verkkoa ei kannata mitoitaa tarpeettoman pienelle estolle, koska yhteyksien muodostaminen saattaa epäonnistua muista syistä huomattavasti suuremmalla todennäköisyydellä:
 - B-tilaaja ei vastaa
 - B-tilaaja on varattu
 - on valittu väärä numero
- Usein estotodennäköisyydelle asetetaan yläraja 1 %

Palvelun laatu (jatkoa)

- Muissa kuin puhelinverkoissa, palvelun laatua kuvaavat monet muut suureet yhteyksien estotodennäköisyyden lisäksi (tai asemesta)
- ATM-verkossa ja pakettiverkoissa, esim. Internetissä, tärkeitä ovat
 - pakettien/solujen viiveet
 - viiveen vaihtelu
 - hukkuvien pakettien/solujen osuus
 - virheellisten pakettien/solujen osuus
 - läpäisy

Erlangin kaava

Oletukset

- Menetysjärjestelmä: estynyt puhelu menetetään lopullisesti (ei uusintayrityksiä)
- Järjestelmässä on n johtoa, mikä tahansa vapaa johto voidaan ottaa käyttöön
- Kutsujen saapumisprosessi on Poisson-prosessi
 - saapumisia tapahtuu tietyllä keskimääräisellä nopeudella λ
 - muuten ne tapahtuvat täysin satunnaisesti
 - on hyvä malli kutsuyritykselle suuresta riippumattomien käyttäjien joukosta
- liikenneintensiteetti $A = \lambda \cdot s$, missä s on keskimääräinen pitoaika

$$E(n, A) = \frac{\frac{A^n}{n!}}{1 + A + \frac{A^2}{2!} + \dots + \frac{A^n}{n!}}$$

Yhdistää järjestelmän (n), liikenteen (A) ja palvelun laadun (E)

Erlangin kaava (jatkoa)

Esimerkki

- Modeemipoolissa on neljä modeemia ja tarjottu liikenne on 2 erlangia.
Mikä on todennäköisyys, että yhteysyritys epäonnistuu?
 - Katsotaan käyrästöstä / tai taulukosta tai lasketaan suoraan kaavasta

$$E(4, 2) = \frac{\frac{2^4}{4!}}{1 + 2 + \frac{2^2}{2!} + \frac{2^3}{3!} + \frac{2^4}{4!}} \approx 9.5\%$$

- Mikä on esto, jos modeemien määrä nostetaan 6:een?

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

Erlangin kaava (jatkoa)

Estotodennäköisyydellä 1 % tarvittavien johtojen määrä eri liikenneintensiteeteillä:

A (erlang)	n	n / A
3	8	2.7
10	18	1.8
30	42	1.4
100	117	1.17
300	324	1.08
1000	1029	1.03

- Pienillä A:n arvoilla tarvitaan liikenneintensiteettiin nähden moninkertainen johtomäärä
 - kuormitusaste on pieni
- Suurilla A:n arvoilla Erlangin kaava ylimitoitusta ei tarvita
 - tällöin on kuitenkin tärkeää, että mitoituksen pohjana käytettävä A on arvioitu oikein

Aika- ja kutsuesto

Estossa erotetaan kaksi suuretta

- *Aikaesto*
 - aikaosuus, jona verkon tai sen osan resurssit kokonaan varattu
- *Kutsuesto*
 - estyvien yhteisyritysten osuus kaikista yrityksistä
- Yleensä nämä ovat kaksi eri asiaa
 - sovellutusten kannalta ollaan yleensä kiinnostuneita kutsuestosta; tämä määrittelee käyttäjien näkemän palvelun laadun
 - aikaesto on usein helpommin laskettavissa oleva suure
- Erlangin kaavan oletuksilla (Poisson-saapumiset) aikaesto ja kutsuesto ovat samat

Palvelun laatu (QoS) Internetissä

- Internetin kehityksen hot topic
- Nykyisessä Internetissä ainoa tarjottu palvelu on Best Effort -palvelu
 - ei taattua palvelun laatua
 - ei mahdollisuutta differentioida palvelua eri asiakkaiden (sovellusten) tarpeiden mukaan (ei myöskään hinnoittelun differentointia)
 - verkossa ei suoriteta resurssien varausta voille (flows)
 - luottaa TCP:n vuonohjaukseen, jossa lähteet havaitessaan verkon olevan ruuhkautunut vapaaehtoisesti pienentävä lähetysnopeuttaan

Internetin palveluarkkitehtuurit

- Integrated Services (IntServ)

- varauspohjainen lähestymistapa: kullekin vuolle varataan resursseja
- varausprotokolla RSVP (vastaanottajan initialisoima)
- guaranteed service, controlled load service ja best effort service
- pääsynvalvonta (admission control): jos palvelua ei kyetä tarjoamaan, varauspyyntö hylätään
- ns. soft state (varaukset puretaan ellei niitä uudisteta)
- edellyttää vuokohtaisen tilatiedon ylläpitoa; paljon työtä reitittimille
- tästä aiheutuu skaalautuvuusongelma
- soveltuu parhaiten access-verkko-osuuteen

Internetin palveluarkkitehtuurit (jatkoa)

- Differentiated Services (DiffServ)

- perustuu aggrgoitujen liikennevirtojen palvelun eriyttämiseen (ei yksittäisten voiden)
- liikenteen luokittelu ja merkitseminen tapahtuu reunareitittimissä (IP paketin TOS-kenttä)
- tähän mahdollisestii liittyy liikenteen mittaus, muokkaus ja valvonta
- asiakkaan ns. palveluprofiili määrittelee sallitun liikenteen paketit luokitellaan: in-profile, out-of-profile (laatu taataan in-profile liikenteelle)
- eri aggrgaattivirtoja käsitellään eri tavoin verkon reitittimissä: kaista- ja puskuriresurssien jako (ns. per hop behaviours)
- Expedited Forwarding (EF), Assured Forwarding (AF)
näiden sisällä paketeilla voi olla erilaisia hylkäysprioriteetteja
- ei tarvitse säilyttää vuokohtaista tilatietoa, ei signalointia
- monimutkaiset luokittelu- ym. operaatiot tapahtuvat vain reunareitittimissä
- soveltuu hyvin runkoverkkoon
- antaa ISP:eille keinon tarjota eritasoista palvelua asiakkaiden maksukyvyyn ja -halukkuuden mukaan

Liikenteen mittaus

- Liikennemittauksia tarvitaan
 - mitoituksen pohjaksi
 - liikennemallien luomiseksi
 - liikenne-ennusteiden tekemiseksi
 - verkon liikenteenhallinnan toteuttamiseksi
 - dynaamisessa reitityksen toteuttamiseksi
 - laskutustiedon keräämiseksi
- Liikennemittausten tarve kasvaa
 - tulee uusia palveluita ja uudenlaisia verkkoja
 - liikenteen luonne muuttuu, käyttötottumukset muuttuvat
 - liikenne tietoverkoissa on erilaista kuin perinteisessä puhelinverkossa

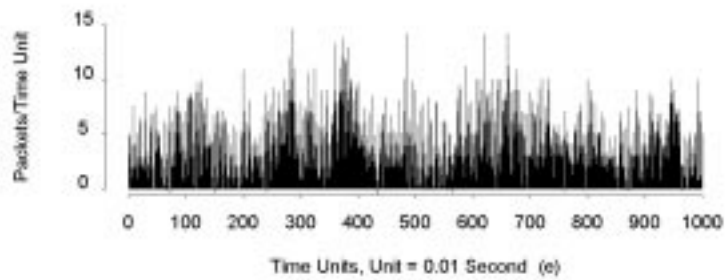
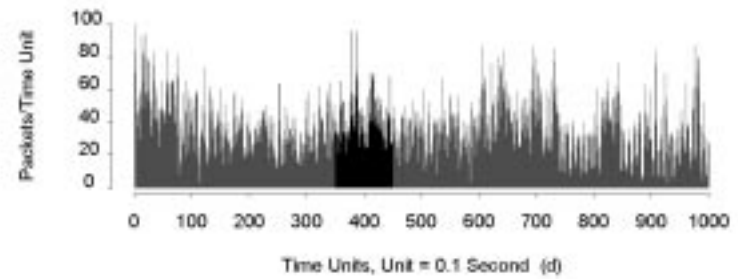
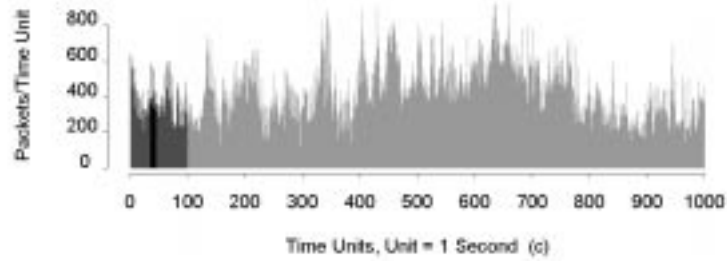
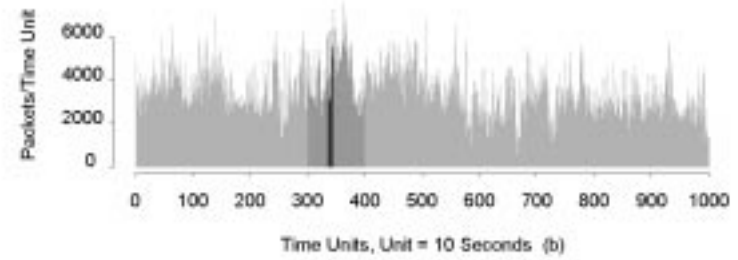
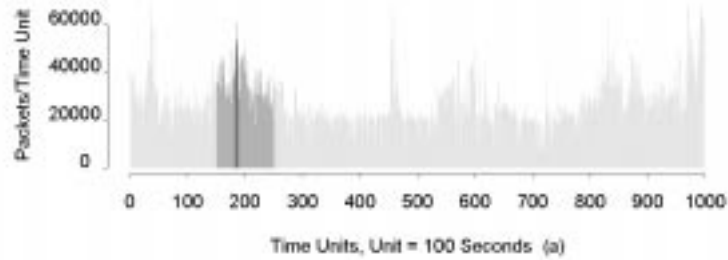
Liikenteen mittaus (jatkoa)

- Mitä mitataan
 - liikenne eri johdoilla
 - eri suuntiin lähtevän liikenteen jakauma
 - eri suunnista tulevan liikenteen jakauma
 - liikenteen jakauma lähteen tyyppin mukaan
 - eri palveluiden käyttö
 - Internetissä: TCP/UDP, ftp / http / email / telnet etc
- Mittaukset toteutetaan
 - keskusten tai reitittimien omilla tiedonkeruujärjestelmillä
 - erillisillä liikenneanalysointilaitteilla

Esimerkki liikennemittauksesta

- 90-luvun alussa Fowler ja Leland suorittavat Bellcoren Ethernet-verkossa pitkäaikaisen, useita kuukausia kestäneen mittauksen, jossa rekisteröitiin jokaisen paketin koko ja lähetysaika
- Tulokset ovat olleet käänteentekeviä
- Osoittautui, että perinteisten liikennemallien oletukset (Poisson-saapumisprosessi) soveltuvat varsin huonosti tyypillisen dataliikenteen kuvaamiseen
- Dataliikenne vaihtelee kaikissa aikaskaaloissa mikrosekunneista millisekunteihin, sekunteihin, tunteihin, kuukausiin...
- Jollakin tarkkuudella liikenteellä on itsesimilaarinen ominaisuus: jos sitä tarkastellaan eri aikaskaaloissa (zoomataan) se näyttää samankaltaiselta, ainoastaan vaihteluiden amplitudi muuttuu
- Dataliikenteelle on kehitetty uusia malleja
 - I. Norros (VTT) on ehdottanut ja soveltanut ns. fraktionaalisen Brownin liikkeen mallia
 - mallissa on vain 3 parametria, kuvaa varsin hyvin liikenteen käyttäytymistä

Bellcore ethernetmittaukset

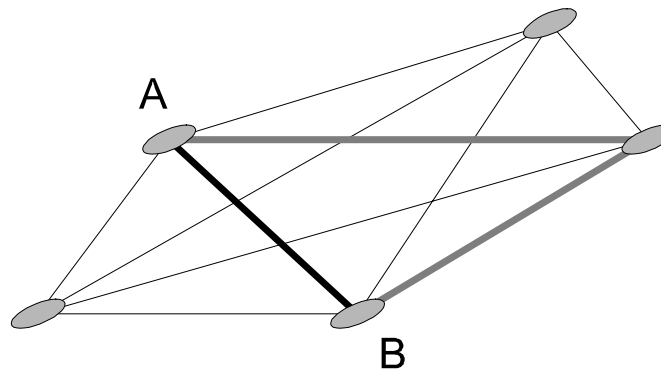


Reititys

- Reititysprotokollan päätehtävä:
löytää reitti liikenteen kuljettamiseksi pisteestä A pisteeseen B
- Yhteydelliset verkot
 - reititys tehdään kerran, yhteyttä luotaessa
- Yhteydettömät verkot
 - reititys tehdään periaatteessa uudelleen jokaista lähetettävää pakettia kohti

Reititys (jatkoa)

- Reitityksen rooli liikenteelliseltä kannalta
 - tarjota vaihtoehtoja liikenteen kuljettamiselle
- Verkon suorituskyvyn parantaminen
 - siirretään liikennettä verkon tilapäisesti ylikuormittuneesta osasta osiin jossa on vapaata kapasiteettia
- Verkon vikasietoisuuden lisääminen
 - verkon jonkin osan vioittuessa ohjataan liikenne kulkemaan vaihtoehtoista reittiä pitkin



Reitityksen liikenteellinen käyttöalue

- Suorituskyvyn parantamisen kannalta vaihtoehtoisreitityksestä on etua keskiraskaalla kuormalla
- Jos liikenne on hyvin vähäistä vaihtoehtoisreititystä ei tarvita
- Jos liikenne on hyvin raskasta vaihtoehtoisreittejä ei kannata käyttää
 - suorille reiteille riittää yllin kyllin kuljetettavaa
 - vaihtoehtoisreititetty liikenne kulkee useamman linkin kautta ja kuluttaa verkon resursseja enemmän kuin suoraan reititetty liikenne
 - vaihtoehtoisreitityksen käyttö raskaalla kuormalla voi johtaa jopa verkon läpäisyn romahtamiseen ilman suojoimenpiteitä (jotka varaavat tietyn osan kapasiteetista suoraan reititettävälle liikenteelle)
- Optimaalinen reititys joutuu ottamaan huomioon jokaisen vaihtoehtoisreititetyn yhteyden vaikutuksen myöhemmin tarjottavan liikenteen kokemaan estoon
 - stokastisen optimoinnin tehtävä
 - dynaaminen ohjelmointi

Yhteydellisen verkon reititysalgoritmeja

- Sequential routing
 - etsii vaihtoehtoisen reitin tietyn etukäteen annetun järjestyksen mukaan
- Dynamic non-hierarchical routing (DNHR)
 - vaihtoehtoisreittejä koskevat taulut vaihtuvat kellonajan mukaan
 - esim. 10 eri taulua vuorokaudessa
- Least loaded routing (LLR)
 - etsii vaihtoehtoisen reitin, jolla (pullonkaulan) vapaa kapasiteetti on suurin
 - vaatii enemmän signalointia
- Random routing
 - valitsee vaihtoehtoisten reittien joukosta jonkun satunnaisesti
 - ei tarvitse signalointia
- Dynamic alternative routing (DAR), sticky random routing
 - onnistunut vaihtoehtoisreitti jää oletusarvoksi, jos täynnä haetaan uusi satunnaisesti
- Dynamically controlled routing (DCR)
 - hyödyntää linkkien tilainformaatiota

Reititys pakettiverkossa

- Reitityksen tulee ottaa huomioon verkon kokonaisuus
- Itsekkään reitityksen vallitessa kapasiteetin lisääminen verkossa voi jopa johtaa kaikkien kokemien viiveiden kasvuun!
 - Braessin paradoksi

ATM-liikenteen keskitys

- Tilastollinen kanavointi
 - useita vaihtuvanopeuksisia liikennevirtoja kanavoidaan samalle linkille
 - hyödynnetään eri lähteiden nopeushuippujen ja -laaksojen limittymistä
 - pieni todennäköisyys, että monta eri lähdettä lähettää samanaikaisesti huippunopeudella
- Tehollinen kaista
 - kuvaa tietylle lähteelle (liikennetyypille) tilastollisessa kanavoinnissa tarvittavaa kaistanvarausta
 - edellyttää lähteen liikenteen karakterisointia (liikennemalli)
 - epähomogeeninen ympäristö: useita erityyppisiä liikennelähteitä
 - sopivien liikennemallien kehittäminen on vaativa tehtävä
- Liikenneluokat
 - liikenteenhallinnan helpottamiseksi voidaan määritellä rajoitettu joukko liikenneluokkia
 - kullakin luokalla on omat laatuvaatimuksensa (QoS)

ATM: puskurointi

- Hetkellisten nopeusvaihteluiden absorboimiseksi liikennettä joudutaan puskuroimaan
- Puskureiden on oltava kyllin suuria, jotta solumenetystodennäköisyys pysyy riittävän pienenä
- Suuret puskurit aiheuttavat pitkiä jonotusviiveitä
- Puskurointistrategiassa eri laatuvaatimukset (viivevaatimukset / soluhukkavaatimukset) on eriytettävä
 - eri liikenneluokille (loogisesti) erilliset puskurit
 - reaaliaikaisille sovelluksille pieni puskuuri
 - dataliikenteelle suuri puskuuri