

Tosi-aikajärjestelmät – Luento 7: Tietoliikenne

Tiina Niklander

Jane Liu: Real-time systems, luku 11

Sisältö

- n Verkkomalli (ja ominaisuudet)
- n Pakettien vuorottaminen verkossa
 - n Weighted-Fair Queueing (ja muunnelmät)
 - n WFQ, RPS, FWFQ
 - n EDD (Earliest-Due-Date) muunnelmät
 - n D-EDD, J-EDD,
 - n Painotettu kiertö (Weighted Round-Robin, WRR)

Vaatimuksia verkolle

- n Tunnetut ja rajoitetut siirtoviipeet
- n Deterministinen käyttäytyminen häiriötilanteissa (ylikuorma, vikaantumiset)
- n Kiireellisyys tuki (lyhyt vasteaika, muita tärkeämpi viesti)
- n Yhteydellisyys (tosi-aikainen ympäristö ei odota, hiljaisuuden syy täytyy tietää)

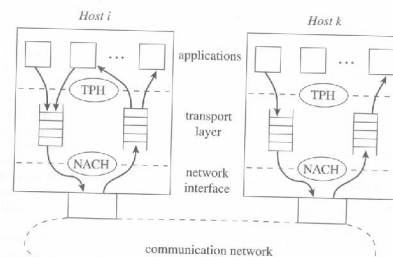
Verkkoja?

- n Paikallinen
 - n LAN tai väylä
 - n Pieni, luotettava
 - n Kovat mahdollisia
- n Laaja
 - n WAN, MAN
 - n Isompi, hitaampi
 - n Vain pehmeitä, kuten multimedia

Verkon rakenne ja aikarajat

- n Tavoitteena käyttää standardeja osia
 - n Helposti saatavilla, huolto helpompaa
 - n Usein kustannustehokkaita
 - n Paljon standardeja: Ethernet, vuororengas
- n LAN hyvin yleinen ratkaisu
- n Aikarajoihin vaikuttaa myös
 - n Kuormitusmalli
 - n Prioriteetit
 - n Häiriötilanteet

Kommunikointimalli



Liu kuva 11-1

Mallinnetaan (jälleen kerran)

- n Ajan kuluminen
 - n Yksi aikayksikkö – yhden maksimikokoisen paketin siirtoaika tarkasteltavassa yhteydessä
 - n Aikayksikkö ei siis sidota minuutteihin tai sekunteihin, se on eri verkoissa eri kokoinen
- n Verkon kapasiteetti
 - n Siirtoviive – lasketaan käyttäen noita abstrakteja yksiköitä, kuinka monta pakettia ehdittäisiin siirtää
 - n Yhteyden pituus – kuinka monta pakettia voi yhtäaikaan olla matkalla (eli kuinka monta abstr. yks. kuluu yhden paketin kulkemiseen)
 - n Kaistanleveyden todellinen numeerinen arvo ei ole tärkeä, joten se on aina 1 (vrt. käyttöaste)

Verkon perusominaisuudet

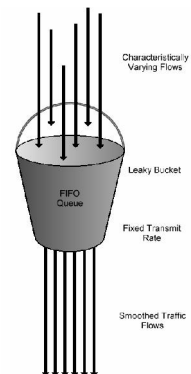
- n Ominaisuudet vaihtelevat verkosta toiseen
 - n verkon kaistanleveys,
 - n paketin koko ja
 - n siirtoaika
- n Mittareita:
 - n Puutokset: Miss ratio, loss ratio
 - n Viiveen vaihtelu (Delay jitter)
 - n Puskurin tarve (Buffer requirement)
 - n Läpimenoaste (Throughput rate)

Liikennöintimallit

- n Jaksolliset (periodic) (p_p, e_p, D_i)
 - n Näitä tuottavat ja käyttävät jaksolliset tapahtumat
 - n Esimerkkejä: sensori data, Constant-Bit-Rate ääni ja videodata
- n Jaksottomat (ei takarajaa)
 - n Näitä tuottavat ja käyttävät jaksottomat tapahtumat
 - n Tavoitteena: pitää viiveiden keskiarvo mahdollisimman pienenä (vrt. tapahtumat)

Liikennöintimallit

- n Sporadiset
 - n Käytetään mallintamaan purskeista (ja vaihtelevaa) liikennettä
 - n Esimerkiksi MPEG-koodattu videodata
 - n Tarkempia liikennöintimalleja (luku 7.8.1)
 - n Ferrari & Verma (FeVe)
 - n Vuotava astia (Leaky Bucket)
 - n (Λ, E), kun E on koko, Λ on tahti



Sporadinen liikenne

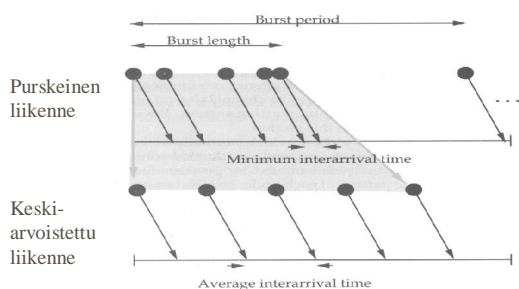


Figure 17.3. Timing pattern of sporadic events

Vuon valvonta

- n Kolme abstraktia mallia
 - n Vuopohjainen (flow): ei tosiaikainen
 - n esim. TCP:n liikkuva ikkuna
 - n Määräpohjainen (rate): jaksolliset ja sporadiset
 - n Säännöllinen, yhtenäistää lähettäjän ja vastaanottajan kapasiteetin, esim. XTP
 - n Vrt. ed. kalvon kuva, jossa tasataan välejä
 - n Ansiopohjainen (credit): Äkillinen tosiaik.
 - n Etukäteen varattava, pyyntö tai varasto

Tosiaikaisten viestien valvonta

- n Määräpohjainen valvonta ensimmäiseen solmuun (toimii samalla hyväksymistestinä)
- n Viiveen vaihtelun valvonta myöhempiin solmuihin, esim. säilyttämällä ensimmäisen solmun liikennöintimalli

Sisältö

- n Verkkomalli (ja ominaisuudet)
- n Pakettien vuorottaminen verkossa
 - n Weighted-Fair Queueing (ja muunnelmät)
 - n WFQ, RPS, FWFQ
 - n EDD (Earliest-Due-Date) muunnelmät
 - n D-EDD, J-EDD,
 - n Painotettu kiertö (Weighted Round-Robin, WRR)

Pakettien vuorottaminen

- n Algoritmit toimivat reitittimissä
- n Reitittimellä on jono kullekin eteenpäin menevälle yhteydelle (connection)
- n Eri yhteyksien paketit päätyvät samaan fyysiseen linkkiin vuorotellen
- n Tarkastellaan vain yhtä eteenpäin vievää reittiä



WFQ (Weighted Fair-Queueing)

- n Demers, Keshav & Shenker: *Analysis and Simulation of a fair queueing algorithm*. Proc. of ACM Sigcomm, p. 1-12, 1989.
- n Kytkin: monta sisään ja yksi puskuroitu ulos, jokaiselle saapuvalla yhteydelle varattu osa kaistasta
- n Miten järjestää saapuvat paketit ulos?
- n Käytetään lopetusnumeroa (finish number).
 - n Se kertoo millä 'kierroksella' tietystä yhteydestä saapuvan sanoman pitäisi viimeistään päästä ulos, jos koko kaista on varattu saapujille.
- n Kukin paketti lähetetään kokonaan ennen seuraavan valintaa
- n Emuloi GPS (Generalised Processor Sharing) teor. mallia



WFQ vuorotusperiaate

- n Kunkin yhteyden ensimmäiselle paketille
 - n lasketaan lopetusnumero
 - n sijoitetaan lopetusnumero SFN-jonoon (Smallest Finish Number)
 - n Tyhjään järjestelmään ensimmäisenä saapuva paketti lähetetään samantien tulipa se mistä yhteydestä tahansa
- n Seuraavaksi lähetettävän paketin valinta
 - n Jos samasta yhteydestä i uusia paketteja odottamassa, käsitellään seuraava kuten yllä
 - n Valitaan seuraavaksi lähetettäväksi paketiksi se, jonka lopetusnumero SFN-jonossa on pienin

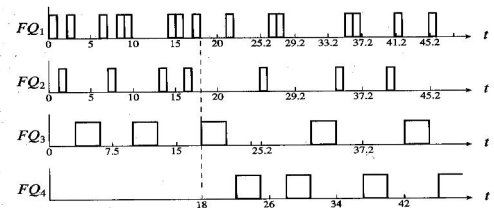
Lopetusnumeron (fn) laskeminen

- n Tavoitteena ylläpitää yhteydelle annettua osuutta kokonaiskapasiteetista
- n 1) Tyhjään linkkiin saapuva (yhteyden i) ensimmäinen paketti:
 - n $t_i = t; U_i += u_i; fn_i += e/u_i;$
- n 2) Seuraavat paketit (kun linkki on kiireinen)
 - n Yhteyden i ensimmäinen paketti
 - n Linkin laskuri $FN += (t - t_i) / U_i$
 - n $fn_i = \max(FN, fn_i) + e/u_i;$ ja SFN-jonoon (fn_i, i)
 - n $t_i = t; U_i += u_i;$

Lopetusnumeron (fn) laskeminen

- n 3) Yhteyden i paketin lähetys päättyi
 - n Lisää yhteyden i paketteja jonossa
 - n $fn_i += e/u_i$ ja SFN-jonoon (fn_i, i)
 - n Ei tällä hetkellä lisää paketteja i:ssä (-> idle)
 - n Linkin laskuri FN += $(t - t_i) / U_b$
 - n $t_i = t$; $U_b = u_i$;
- n Muuttujat:
 - n FN on linkin sarjanumero, ja fn_i yhteyden
 - n U_b on linkin kaistanleveys ja u_i yhteyden
 - n t on nykyhetki ja t_i kertoo linkin tietojen edellisen muutoshetken

WFQ esimerkki



(d) Behavior of weighted fair-queueing servers with deadlines given in real time. FIGURE 7-14 (continued)

Ennen ajanhetkeä 18, kun FQ4 (osuus 3/8) puuttuu, FQ1 (osuus 1/4) saa 2/5 kaistasta, FQ2 (osuus 1/8) 1/5 osan ja FQ3 (osuus 1/4) 2/5 osaa. Ajanhetken 18 jälkeen: kaikki saavat vain niille varatun osuuden.

Rate-Proportional Server (RPS)

- n Stiliadis & Varna: 'Rate-proportional servers: a design methodology for fair queueing algorithms'. ja 'Efficient fair queueing algorithm for packet-switched networks'. IEEE/ACM Tr. on Networking, 6(2), April 1998.
- n Teoreettinen malli ja sen pohjalta laadittu algoritmi Frame-based WFQ, joka ei ole yhtä reilu kuin WFQ, mutta sen yleiskuormitus on hiukan pienempi.
- n FWFQ laskee lähetysarvon (vrt. lopetusnumero) vain ajoittain eli sitten, kun kaikki ko. 'kierrokselle' kuuluneet paketit on lähetetty

Yhteyden ja linkin potentiaali

- n Kaikki GPS-tyyppiset algoritmit käyttävät ajanmukana muuttuvaa järjestyslukua (potentiaali)
- n Potentiaali on abstrakti väline kuvata linkin ja yhteyden toimintaa, se voi olla
 - n lopetusnumero (kuten WFQ),
 - n virtuaalikello (kts. "koko kaistanleveys" – luento 3),
 - n takaraja, ...
- n Potentiaalin $\pi(t)$ ja ajan t suhteen täytyy olla
 - n $\pi(t_2) - \pi(t_1) \geq t_2 - t_1$ linkin ollessa käytössä
 - n $\pi(t) < \pi_i(t)$ yhteydelle i, kun lähetettäviä paketteja

Potentiaali tarkemmin

- n Yhteyden ulos (=linkin) ollessa käytössä, on kunkin sisääntulevan jonottavan yhteyden potentiaali kasvava ajanfunktio (nondecreasing)
- n Linkin potentiaali $\pi(t)$ ajanhetkellä t on t:n ja jonottavien yhteyksien potentiaalien funktio
- n Kun yhteys on vapaa (eikä jonota) sen potentiaali pysyy vakiona. Kun ensimmäinen paketti saapuu tällaista yhteyttä pitkin, yhteyden potentiaaliksi tulee $\max(\pi_i(t), \pi(t))$, missä juuri ja juuri $t < t$

FWFQ – Frame-Based WFQ

- n WFQ pyrkii tarjoamaan mahdollisimman tasapuolisesti kullekin kuuluvan osuuden
- n FWFQ on epäreilumpi, se laskee osuuden vain jaksottain. Laskentavälin minimipituus (kehysten koko F) täytyy olla suurempi kuin kaikkien yhteyksien suurimman paketin teoreettinen siirtoaika (eli e_i/u_i)
- n Tätä jaksottaista laskentaa kutsutaan potentiaalinn kalibroinniksi
- n FWFQ:n aikavaativuus on $O(1)$, kun WFQ:n on $O(n)$

FWFQ: Potentiaalilin kalibrointi

- n Kaikkien viritettyjen (backlogged) yhteyksien potentiaaleille pätee

$$\pi_i(t_k) \leq kF$$
- n Kaikkien yhteyksien potentiaaleille pätee

$$\pi_i(t_k) < (k+1)F$$
- n Kalibroinnissa asetetaan

$$\pi(t_k) = \max(\pi(t_k^-), kF)$$
- n Kalibrointien välillä linkin potentiaali kasvaa tasaisesti (yhden yksikön yhdessä aikayksikössä)

$$\pi(t) = \pi(t_k) + (t - t_k), \text{ kun } t_k < t \leq t_{k+1}$$

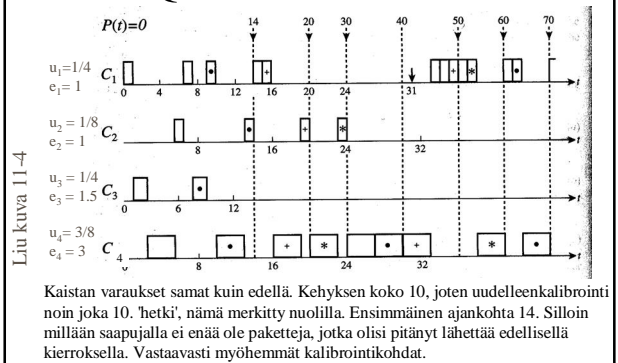
FWFQ: pakettien käsittely

- n Ensimmäinen saapuva paketti
 - n $t_{i1} = t; k += 1; \pi_i = e/u_i;$
 - n Jos $\pi_i > kF$, niin merkkää paketti, Flag=T; X+=1
 - n Laita jonoon (π_i, i)
- n Seuraavat paketit
 - n Yhteyden i ensimmäinen paketti
 - n $\pi_i = \pi + t - t_{i1} + e/u_i;$
 - n Jos $\pi_i > kF$, niin merkkää paketti, Flag=T; X+=1
 - n Laita jonoon (π_i, i)

FWFQ: pakettien käsittely

- n Yhteyden i paketin lähetys päättyi
 - n Jos merkattu paketti, niin X-=1;
 - n Jos X=0 ja Flag=T, niin kalibroi eli
 - n $\pi = \max(\pi + t - t_{i1}, kF); k += 1; t_{i1} = t; \text{Flag} = F;$
 - n Jos yhteys pysyy viritettynä (eli lisää paketteja jonossa), niin
 - n $\pi_i = \pi_i + e/u_i;$
 - n Jos $\pi_i > kF$, niin merkkää paketti, Flag=T; X+=1
 - n Laita jonoon (π_i, i)

FWFQ esimerkki



Sisältö

- n Verkkomalli (ja ominaisuudet)
- n Pakettien vuorottaminen verkossa
 - n Weighted-Fair Queueing (ja muunnelmat)
 - n WFQ, RPS, FWFQ
 - n EDD (Earliest-Due-Date) muunnelmat
 - n D-EDD, J-EDD,
 - n Painotettu kiertö (Weighted Round-Robin, WRR)

Koko yhteyttä tarkastelevia

- n Delay Earliest-Due-Date (D-EDD)
- n Jittered-EDD
- n WRR (Weighted Round-Robin)

Delay Earliest-Due-Date (D-EDD)

- n Ferrari & Verma: A scheme for real-time channel establishment in wide-area networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 8(3), April 1990.
- n Perustuu EDF:ään
- n Päästä-päähän yhteyden muodostuksessa yhden paketin kuljettamiseen käytettävissä oleva aika jaetaan linkkien kesken, kukin linkki saa vähintään tarvitsemansa minimin.
- n Saapuvat viestit jaksotetaan suhteellisen saapumisaikansa mukaisesti. (Näin estetään varattua laajempi kaistan käyttö)
- n Muistuttaa sporadisen palvelimen erikoistapausta

D-EDD: yhteyden muodostus (1/2)

- n Lähettäjä tekee aloitteen. Se lähettää 'request-for-connection'-viestin, jossa kuvataan tulevasta liikenteestä
 - n p_i – pakettien minimisaapumisväli
 - n D_i – aika, jolloin viimeistään vastaanottajalla
- n Jokainen matkalle osuva kytkin (switch)
 - n Päätää hyväksyykö
 - n Varaa alustavasti tarvittavan kapasiteetin
 - n Laskee maksimiviiveen ja sen pohjalta paikallisen suhteellisen aikarajan
 - n Lisää lasketun aikarajan viestiin ennen edelleenlähettämistä

D-EDD: yhteyden muodostus (2/2)

- n Vastaanottaja tarkistaa reitin kelvollisuuden
 - n Laskee kaikkien kytkimien suhteellisen aikarajat yhteen (oltava $\leq D_i$)
 - n Jos aikaraja ylittyy, yhteydenmuodostus epäonnistui
 - n Kun yhteys voidaan muodostaa, vastaanottaja määrää kytkimien paikallisen aikarajat
 - n Se voi jakaa ylimääräisen ajan kytkimille
- n Paluuviestistä kytkimet
 - n poimivat uudet aikarajansa
 - n tekevät pysyvät varaukset tarvittaville resursseille (kaistaleveys ja puskuritila)
 - n vapauttavat tilapäisen varauksen ylijäämään

D-EDD: Pakettien käsittely

- n Vuonvalvonta on keskeistä. EDF ei selviä ylikuormasta, joten sitä ei saa syntyä.
- n Saapuvan paketin paikallista aikarajaa ei lasketa todellisesta saapumisajasta vaan ns. efektiivistä saapumisajasta

$$a_{i,j}^e = \max(a_{i,j-1}^e + p_i, a_{i,j})$$

- n Paikallinen aikaraja on siis

$$d_{i,j} = a_{i,j}^e + D_{i,k}$$

Jittered-EDD

- n Verma, Zhang & Ferrari: Delay jitter control for real-time communication in packet switching network. Proceedings of Tricomm '91, p. 35-46, April 1991.
- n Jitter-EDD on D-EDD:n muunnos, jossa pienennetään sanoman kulkuajan variaatiota.
 - n D-EDD:ssä tuo vaihtelu on varsin suuri, jopa

$$\sum_{j=1}^k (D_{i,k}) - k$$

- n Jitter-EDD ei ole yhtä ahne. Sanomaa ei välttämättä aina lähetetä heti kun voitaisiin. Lähetyshetkien väli pyritään vakioimaan.

J-EDD: toiminta

- Yhteyden muodostus kuten D-EDD
- Paketin käsittely:
 - Vaihtelun tasoittamiseksi lähetettävään pakettiin lisätään tieto 'ahead-time' eli kuinka paljon se on etuajassa suhteessa aikarajaansa.
 - Saapuvalla paketilla lasketaan lähetysaika (ready time), jolloin vasta se laitetaan lähetysjonoon (D-EDD laittoi jonoon heti)

$$r_{i,j} = \max(a_{i,j}^e, a_{i,j} + ah_{i,j})$$

Esimerkki

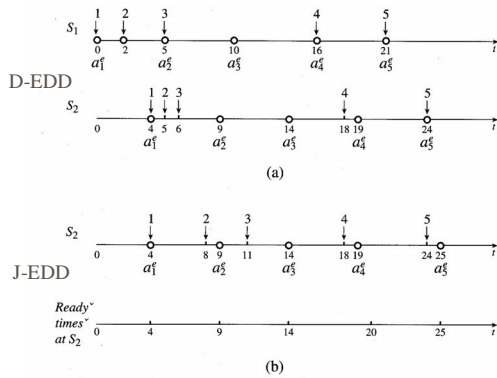


FIGURE 11-6 Example illustrating the delay-EDD and jitter-EDD disciplines.

Liu Kuva 11-6

WRR (Weighted Round-Robin)

- n Kustakin saapuvasta yhteydestä lähetetään yhdellä kierroksella korkeintaan maks. sanomia eteenpäin
- n Greedy-WRR (ahne-WRR): lähettää aina jos voi
- n Stop-and-Go: Lähetetään edellisellä jaksolla saapuneista maksimimäärä (yleensä kaikki)
- n Hierarchical Round-Robin (HRR): eri kuormille eri jakson pituus samassa linkissä
- n Budgeted WRR: ei jaksollinen, mutta tahdistaa silti lähetyksiä paikallisesti.

WRR

- n Ei globaalia kelloa tai aikarajan mukaan järjestettyä jonoa
- n Ei tehtävien (tai töiden) välisiä riippuvuuksia
- n Yhteyksillä on vakiotahhti (constant bit rate)
 - n Esim ääni ja osa multimediaprotokollista
 - n Datavirtaa (message stream) kuvataan (p_i, e_i, D_i)
 - n P ja D kuten ennenkin, mutta e on nyt viestien määrä yhdellä kierroksella (instance)

Greedy-WRR

- Kullakin yhteydellä on paino w_i
- Yhden kierroksen kuluessa yhteyden i viesteistä lähetetään edelleen korkeintaan w_i kappaletta
- Yhteydet käsitellään vuorotellen (siitä RR) ja kaikki painon mukaan mahtuvat viestit lähetetään edelleen
- Kierroksen maksimipituus RL on kiinteä

$$RL \geq \sum_{i=1}^n w_i$$

$$RL < \min(p_i)$$

$$w_i \geq \left\lceil \frac{e_i}{\lfloor p_i / RL \rfloor} \right\rceil$$

Stop-and-Go

- n Pitää kierroksen pituuden RL vakiona, jakaa siis lähetysajan kehyksiin
- n Kehyksessä j saapuva sanoma lähetetään kehysten $j+1$ aikana (jos tahti on pysynyt vakiona)
- n Kehysten synkronointi kytkimien välillä vaikuttaa sekä kulku aikaan että tarvittavaan puskurituloan.

Yhteenveto

- Prioriteettipohjaisia käytäntöjä

Performance Measures	WFQ	Delay-EDD	Jitter-EDD
Acceptance Test	$O(1)$	$O(1)$	$O(1)$
Sched. Complexity	$O(n)$	$O(\log n)$	$O(\log n)$
End-to-end delay bound	$E/u + \rho(e+1)$	$\leq D$	$\leq D$
End-to-end jitter	$const \times \rho$	$const \times \rho$	$const$
Buffer-space requirem.	$const \times \rho$	$const \times \rho$	$const$

Yhteenveto

- Painotettu kierto (WRR)

Performance Measures	Greedy WRR	Synkr. S&G	Ei synkr. S&G
Acceptance Test	$O(1)$	$O(1)$	$O(1)$
Sched. Complexity	$O(1)$	$O(1)$	$O(1)$
End-to-end delay bound	$p_i + (\rho - 1) \times RL$	$p_i + \rho \times RL$	
End-to-end jitter	$p_i - e_i + (\rho - 1) \times (RL - 1)$	$2RL$	$2RL$
Buffer-space requirem.	kts. alla	$2wt_i$	$3wt_i$

$$\left(1 + \left\lceil \frac{(k-1)(RL-1)}{p_i} \right\rceil\right) e_i$$