

Tosiaikajärjestelmät – 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 kierto (Weighted Round-Robin, WRR)

Vaatimuksia verkolle

- n Tunnetut ja rajoitetut siirtoviipeet
- n Deterministinen käyttäytyminen häiriötilanteissa (ylikuorma, vikaantumiset)
- n Kiireellisyyden tuki (lyhyt vasteaika, muita tärkeämpi viesti)
- n Yhteydellisyys (tosiaikainen 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

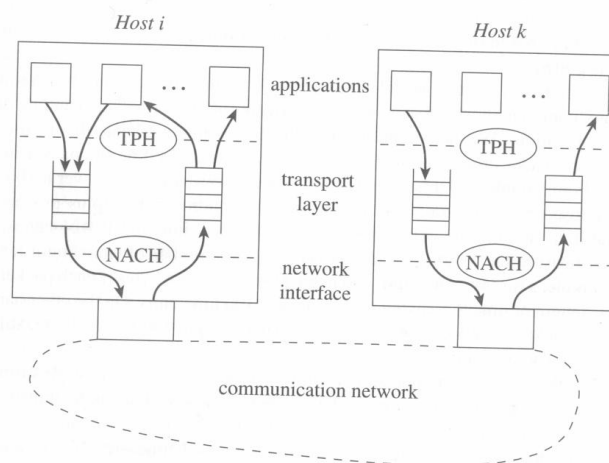


FIGURE 11-1 A real-time communication model.

Liu kuva 11-1

Mallinnetaan (jälleen kerran)

- n Ajan kuluminen
 - n Yksi aikayksikkö – yhden maksimikokoisen paketin siirtoaika tarkasteltavassa yhteydessä
 - n Aikayksikkö ei siis sidota minutteihin 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

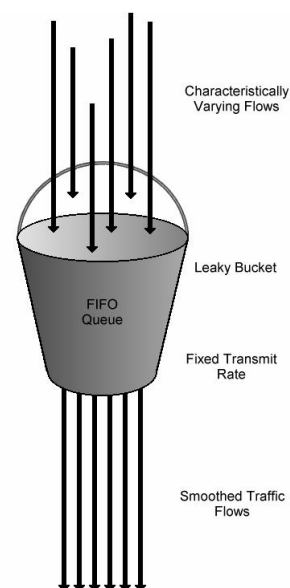
- n Ominaisuudet vaihtelevat verkosta toiseen
 - n verkon kaistanleveys,
 - n paketin koko ja
 - n siirtoaika
- n Mittareita:
 - n Puutokset: Miss ratio, loss ratio
 - n Viiveen vaihtelu (Delay jitter)
 - n Puskurin tarve (Buffer requirement)
 - n Läpimenoaste (Throughput rate)

Liikennöintimallit

- n Jaksolliset (periodic) (p_i, e_i, 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

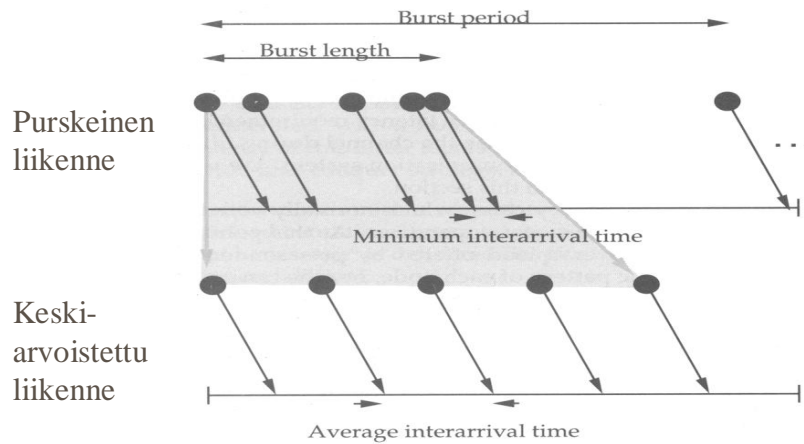


Figure 17.3. Timing pattern of sporadic events

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

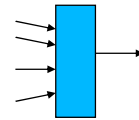
- n Määräpohjainen valvonta ensimmäiseen solmuun (toimii samalla hyväksymistestinä)
- n Viiveen vaihtelun valvonta myöhempisiin solmuihin, esim. säilyttämällä ensimmäisen solmun liikennöintimalli

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 kierto (Weighted Round-Robin, WRR)

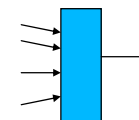
Pakettien vuorottaminen

- 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 (finnish 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

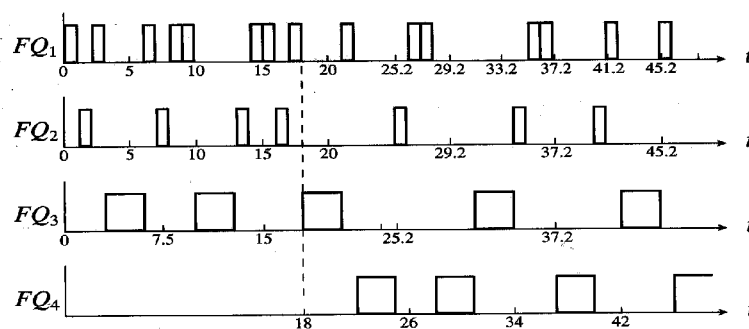
Lopetusnumeron (fn) laskeminen

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

Lopetusnumeron (fn) laskeminen

- n 3) Yhteyden i pakettien lähetyksen 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 $FN += (t - t_{i-1}) / U_b$
 - n $t_{i-1} = t$; $U_b = u_i$;
- 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-1} kertoo linkin tietojen edellisen muutoshetken

WFQ esimerkki



(d) Behavior of weighted fair-queuing 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 & Varma: '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 lähetyksarvon (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 (kehyksen koko F) täytyy olla suurempi kuin kaikkien yhteyksien suurimman paketin teoreettinen siirtoaika (eli e_i/u_i)
- n Tätä jaksottaista laskentaa kutsutaan potentiaalikalibroinniksi
- n FWFQ:n aikavaativuus on $O(1)$, kun WFQ:n on $O(n)$

FWFQ: Potentiaalin 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

$$\pi_i(t_k) = \max(\pi(t_k^-), kF)$$

- 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 $t_{-1} = t; k += 1; \pi_i = e/u_i;$

- 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 $\pi_i = \pi + t - t_{-1} + e/u_i$

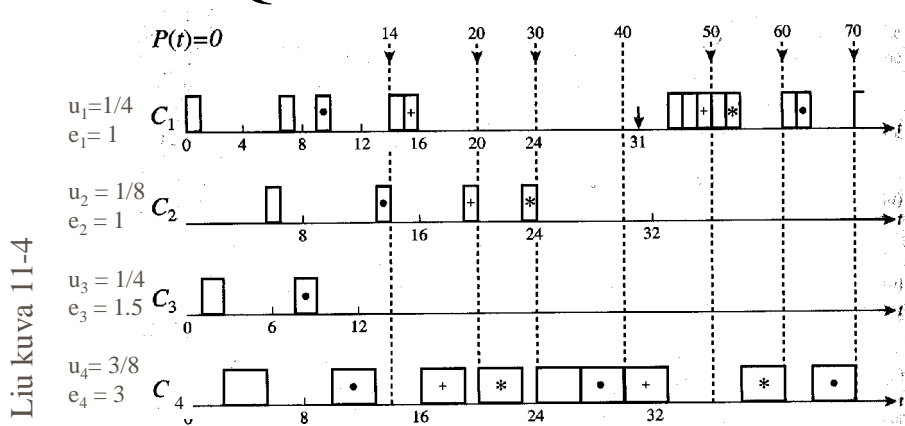
- n Jos $\pi_i > kF$, niin merkkää paketti, Flag=T; X+=1

- n Laita jonoon (π_i, i)

FWFQ: pakettien käsittely

- n Yhteyden i paketin lähetys päättyi
 - n Jos merkattu paketti, niin $X_i=1$;
 - n Jos $X_i=0$ ja $\text{Flag}=T$, niin kalibroi eli
 - n $\pi_i = \max(\pi_i + t - t_{i-1}, kF)$; $k+=1$; $t_{i-1} = t$; $\text{Flag} = F$;
 - 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, $\text{Flag}=T$; $X_i+=1$
 - n Laita jonoon (π_i, i)

FWFQ esimerkki



Kaistan varaukset samat kuin edellä. Kehyksen koko 10, joten uudelleenkalibrointi noin joka 10. 'hetki', nämä merkitty nuolilla. Ensimmäinen ajankohta 14. Silloin millään saapujalla ei enää ole paketteja, jotka olisi pitänyt lähettää edellisellä kierroksella. Vastaavasti myöhemmät kalibrointikohdat.

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 kierto (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 Päättää 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 ylijäämän

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

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

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

- 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 paketille 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

Liu Kuva 11-6

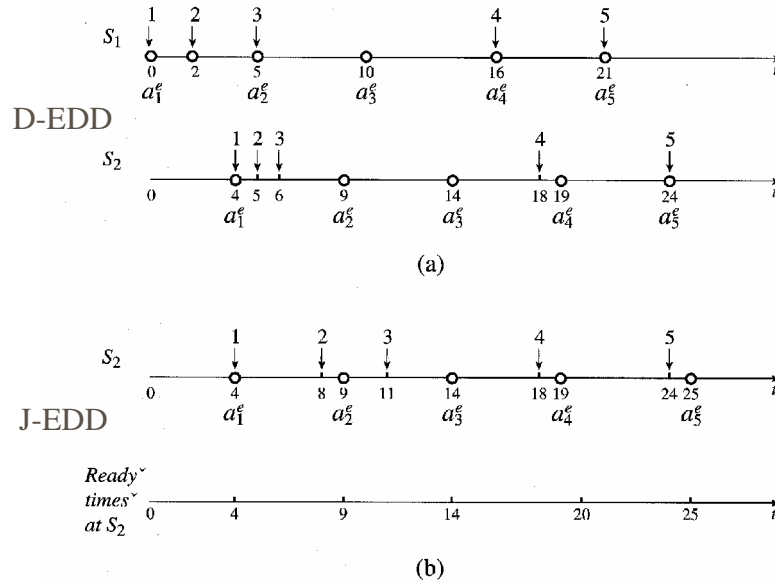


FIGURE 11-6 Example illustrating the delay-EDD and jitter-EDD disciplines.

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

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

$$RL < \min(p_i)$$

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

Stop-and-Go

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

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	$2wt_i$	$3wt_i$

$$\left(1 + \left\lceil (k - 1)(RL - 1) / p_i \right\rceil\right) e_i$$