Tietoliikenteen perusteet

Kuljetuskerros

Kurose, Ross: Ch 3

Sisältöä

- Kuljetuspalvelut
- Yhteydetön kuljetuspalvelu, UDP
- Luotettavan kuljetuspalvelun periaatteet
- Yhteydellinen kuljetuspalvelu, TCP
- Ruuhkanhallinta TCP:ssä

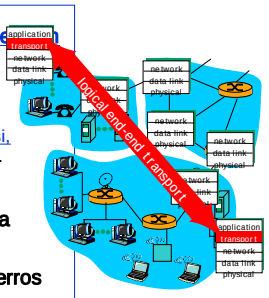
Oppimistavoitteet:
- Tuntea Internetin kuljetusprotokollien (UDP/TCP) toiminnallisuus ja periaatteet
-Osata luotettavan kuljetuspalvelun ja vuonvalvonnan periaatteet ja toteutukset
-Osata TCP-ruuhkanhallinnan

Kuljetuskerros

Kuljetuspalvelu

Kuljetuskerros

- Tarjoaa kuljetuspalvelun prosessien välille
- Vain isäntäkoneissa
  - **Lähetys**: Pilko sovelluskerroksen sanoma pienemmiksi segmenteiksi, jotka verkkokerros toimittaa perille.
  - **Vastaanotto**: Kokoa segmentit sanomaksi, jonka sovellus lukee.
- Verkkokerros reitittää koneesta koneelle
- Segmentin koko s.e. verkkokerros pystyisi välittämään sellaisena



KuRo05: Fig 3.1

Sovelluksen vaatimuksia

- **Verkkokerroksen palvelu voi**
  - Muuttaa segmentin bittejä tai kadottaa segmenttejä
  - Toimittaa segmentit epäjärjestyksessä kuljetuskerrokselle
  - Viivyttää segmenttejä satunnaisen pitkän ajan
  - Luovuttaa kuljetuskerrokselle useita kopioita samasta segmentistä
  - Rajoittaa segmentin kokoa
- **Sovellus edellyttää kuljetuspalvelulta**
  - Virheettömyyttä, luotettavuutta
  - Järjestyksen säilymistä
  - Kaksoiskappaleiden karsimista
  - Mielivaltaisen pitkien segmenttien sallimista
  - Vuonvalvonnan mahdollistamista
- Kuljetuskerros peittää verkkokerroksen puutteita ja parantaa sovelluksen näkemää palvelun laatua

Internetin kuljetusprotokollat

- **TCP: luotettava, järjestyksen säilyttävä tavujen kuljetuspalvelu**
  - **Virheenvalvonta** (error control): Huomaa ja korjaa virheet, hylkää kaksoiskappaleet
  - **Vuonvalvonta** (flow control): Älä ylikuormita vastaanottajaa
  - **Ruuhkanhallinta** (congestion control): Älä ylikuormita verkkoa
  - **Yhteyden muodostaminen ja purku**
- UDP: Ei-luotettava, ei-järjestyksen säilyttävä sanomien kuljetuspalvelu
  - Välittää vain sanomia, ei pyri mitenkään parantamaan verkkokerroksen tarjoamaa palvelun laatua
  - Luotettavuus jää sovelluskerroksen hoidettavaksi
- **Kumpikaan kuljetuspalvelu ei anna takuita viiveelle tai siirtonopeudelle** ("best effort")

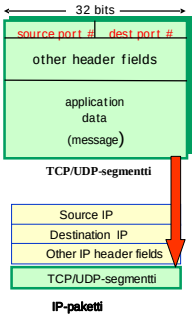
Mikä kone /Mikä prosessi?

- Kuljetuskerros tarjoaa päästä-päähän yhteyden
  - Prosessilta prosessille (~ pistokkeesta pistokkeeseen)
  - Prosessi lukee ja kirjoittaa sanomia halutessaan
- Datan lisäksi on välitettävä osoitetietoja
  - Vastaanottajan ja lähettäjän tiedot
  - Eri koneiden prosessit voivat käyttää samaa palvelua
  - Saman koneen prosessit voivat käyttää eri palveluita
- Kuljetuskerros: mikä prosessi = mikä portti
- Verkkokerros: mikä kone = mikä IP-osoite
- Porttinumero
  - 16-bittinen: 0 – 65535
  - Portit 0 – 1024 on varattu kukin tietylle palvelulle (well known ports)
    - Esim. www-palvelulle portti 80, SMTP-postipalvelulle portti 25

Mikä kone /Mikä prosessi?

Lähetys (asiakas)

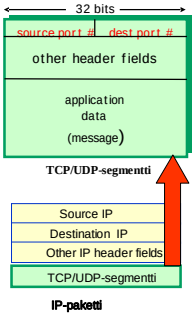
- **Kuljetuskerros**
  - **Segmentin otsakkeessa lähde- ja kohdeprosessin porttinumero**
  - **Antaa segmentin verkkokerroksen välitettäväksi**
  - **TCP: huolehtii myös luotettavuudesta**
  - **UDP: tarjoaa pelkän välityspalvelun**
- **Verkkokerros**
  - **Paketin otsakkeessa lähde- ja kohdekoneen IP-osoite à reitittimet osaavat ohjata oikealle koneelle**



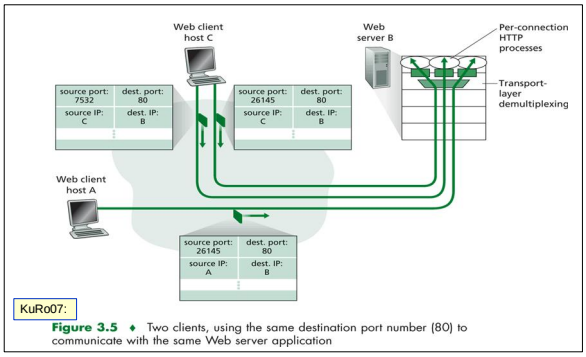
Mikä kone /Mikä prosessi?

Vastaanotto (palvelija)

- **Verkkokerros**
  - **Vastaanottaa IP-paketin**
  - **Poistaa verkkokerroksen otsaketiedot**
  - **Luovuttaa paketissa olleen segmentin kuljetuskerrokselle**
- **Kuljetuskerros**
  - **Poistaa kuljetuskerroksen otsaketiedot**
  - **Kokoaa yhteenkuuluvat segmentit sanomiksi (tavuvirraksi)**
  - **Ohjaa sanoman (tavuvirran) oikelle prosessille (eli oikeaan pistokkeseen) porttinumeron avulla**
    - **TCP: huolehtii myös luotettavuudesta**
    - **UDP: tarjoaa pelkän välityspalvelun**



Kaksi www-asiakasta ja palvelija



KuRo07:

Figure 3.5 ♦ Two clients, using the same destination port number (80) to communicate with the same Web server application

Kuljetuskerros

Yhteydetön kuljetuspalvelu UDP

UDP (User Datagram Protocol)

- Yhteydetön
  - KJ ei pidä tallessa mitään sovellusten väliseen keskusteluun liittyvää.
  - Sovellus antaa aina sanoman lisäksi kohdeosoitteen ja kohdeportin
- Ei takaa luotettavuutta (~'epäluotettava'?)
  - vain minimi palvelu: mille koneelle, mihin porttiin
  - voi kadottaa sanoman
- Ei myöskään säilytä sanomien järjestystä
  - Sovellus saa sanomat siinä järjestyksessä kun ne tulevat perille
- Vähän yleisrasitetta
  - Aikaa ei kulu yhteyden muodostukseen eikä purkuun
  - Ei kulu resursseja yhteyden tilatietojen ylläpitoon
  - Pieni otsake
  - Ruuhkanhallinta ei säännöstele liikennettä

Käyttö

- Vaikka UDP ei takaa luotettavuutta, se sopii silti monen sovelluksen tarpeisiin
  - Alkujaan oli vain TCP, UDP luotu myöhemmin
- Miksi UDP?
  - Pieni yleisrasite
  - Sovellus voi sietää virheitä
  - Reaaliaikavaatimuksia, saavuttaa suuremman siirtonopeuden
- Tarvittava luotettavuus on räätälöitävissä sovellukseen
  - Sovellusprotokolla: oma sanomanumerointi, uudelleenlähetys

Kuljetusprotokollat

- **TCP** (Transmission Control Protocol) [RFC 793]
  - **Yhteydellinen palvelu** (connection-oriented)
    - Yhteyden muodostus ennen datan siirtoa (handshaking)
    - Kaksisuuntainen TCP-yhteys (full-duplex)
    - Yhteyden purku (shutdown)
  - **Luotettava kuljetuspalvelu**
    - Järjestyksen säilyttävä tavuvirta sovellukselle
    - segmenttinumerot, kuittaukset, uudelleenlähetykset
  - **Vuonvalvonta** (flow control)
    - Lähettäjä hiljentää vauhtia, jos **vastaanottaja** ei ehdi käsitellä
  - **Ruuhkanvalvonta** (congestion control)
    - Lähettäjä hiljentää vauhtia, jos **reititttimet** eivät ehdi käsitellä

Verkkosovelluksia

Application	Application-Layer Protocol	Underlying Transport Protocol
Electronic mail	SMTP	TCP
Remote terminal access	Telnet	TCP
Web	HTTP	TCP
File transfer	FTP	TCP
Remote file server	NFS	Typically UDP
Streaming multimedia	typically proprietary	Typically UDP
Internet telephony	typically proprietary	Typically UDP
Network management	SNMP	Typically UDP
Routing protocol	RIP	Typically UDP
Name translation	DNS	Typically UDP

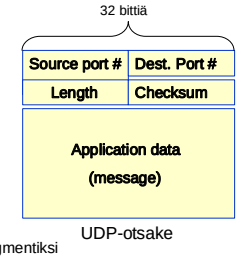
Figure 3.6 ♦ Popular Internet applications and their underlying transport protocols

Kuro05:

Miksi nämä sovellukset suosivat UDP:tä?

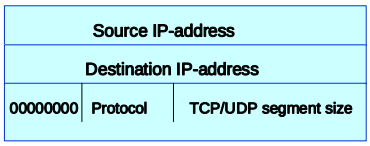
UDP-segmenti rakenne

- **Porttinumerot**
  - Koska prosessien välinen palvelu
- **Length**
  - Segmentin kokonaispituus otsake (8 B) mukaanluettuna
- **Checksum (optionaalinen)**
  - Bittivirheen havaitsemiseen
  - UDP ei yritä toipua, hävittää virheellisen segmentin
- **Data**
  - Pitkä sanoma pilkottuna useaksi segmentiksi
- **IP-osoitteet vasta verkkokerroksen otsakkeessa**
  - Näitä tarvitaan **reitityksessä**



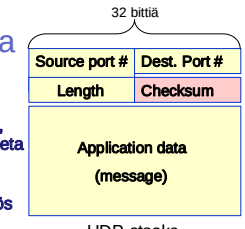
Kuljetuskerroksen pseudo-otsake

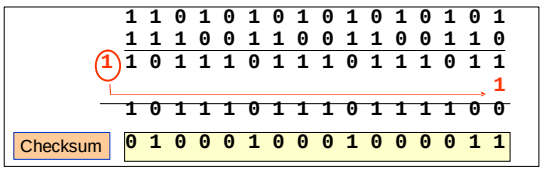
- **Käyttö vain isäntäkoneen sisäisesti. Ei lähetetä verkkoon.**
  - **UDP laskee tarkistussumman otsakkeelle, datalle ja ns. pseudo-otsakkeelle, joka sisältää IP-otsakkeen tietoja**
  - **Varmistus, että segmentti on tullut oikeaan koneeseen ja oikeaan porttiin**



UDP-tarkistussumma

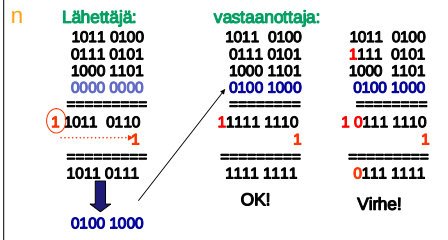
- **Lähetys**
  - **Summaa 16 bitin kokonaisuudet (otsake + pseudo-otsake mukana), ylivuotobitit lasketaan mukaan, talleta yhden komplementtina**
- **Vastaanotto**
  - **Summaa 16 b kokonaisuudet (myös tarkistussumma).**
  - **Jos tuloksena on 16 ykköstä, niin OK!**





Esimerkki

- Lasketaan tarkistussumma kolmen tavun mittaiselle sanomalle (tässä vain 8 bitin mittaisena):



Yhden komplementti

Miksi UDP-tarkistussumma

- Kaikki linkkikerrokset eivät suorita tarkistuksia!
  - Ethernet huolehtii kyllä
- UDP-tarkistussumma ei ole kovin tehokas havaitsemaan virheitä!
- UDP ei yritä toipua virheistä!
  - Jotkut toteutukset voivat tuhota virheellisen segmentin
  - Jotkut antavat sen sovellukselle varoituksen kera
- Lisärasite?
  - Ei tarvitse käyttää, jos ei halua. Tällöin lähettäjä laittaa tarkistusummaksi pelkkiä nollia

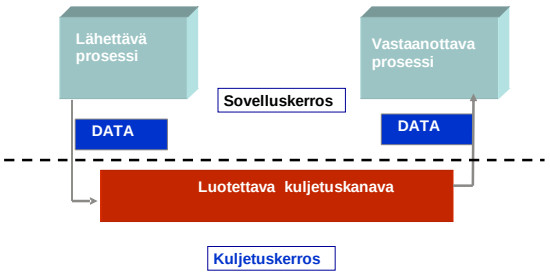
Tehtäviä:

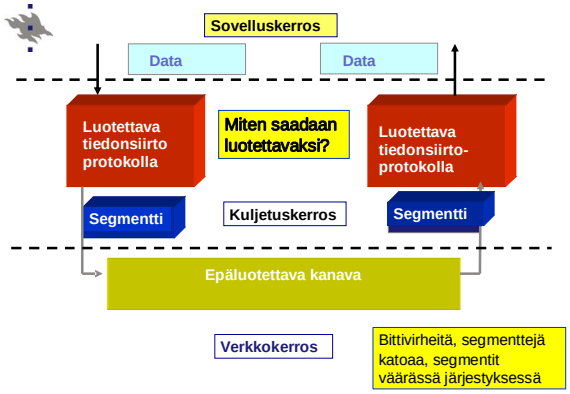
- Lähetetä 10 tavun viesti UDP:llä.
  - Miten kauan kestää lähettäminen, jos lähetysnopeus on 56 kbps?
    10 tavua + 8 tavua = 18 * 8 b = 144 bittiä
    144 b/ 56 000 b/s = 2.57 ms
  - Miten suuri on etenemisviive, jos etäisyys lähettäjältä vastaanottajalle on 1000 km?
    1000 km/200 000 km/s = 5 ms
  - Miten suuri on UDP-otsakkeen aiheuttama yleisrasite (overhead)?
    8/18 = 0.44 eli 44 %

Kuljetuskerros

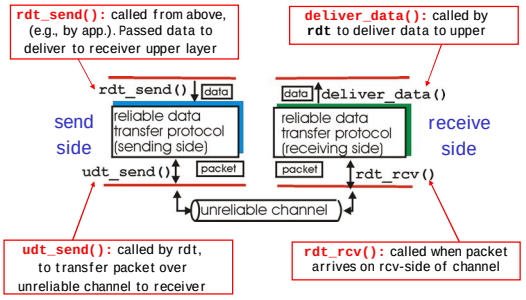
Luotettavan kuljetuspalvelun periaatteet

Luotettava tiedonsiirto



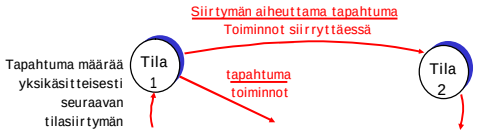


Kuinka tehdään luotettavaksi?



Kuinka saada luotettavaksi?

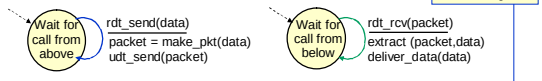
- Tarkastellaan yleisesti luotettavan tiedonsiirron ongelmia ja erilaisia ratkaisuyrityksiä
  - Edeten ideaalitilanteesta yhä ongelmaisempaan
  - Käyttäen äärellisiä tila-automaatteja lähettäjän ja vastaanottajan toiminnan kuvaamiseksi



Versio rdt1.0: Ideaalitilanne

- Oletus: **siirtokanava on täysin luotettava**
  - Ei bittivirheitä, ei katoavia paketteja, ei epäjärjestystä
- Luotettava kuljetuspalvelu =
  - Lähettäjä kirjoittaa datan kanavaan,
  - Vastaanottaja lukee datan kanavasta

KuRo05: Fig 3.9

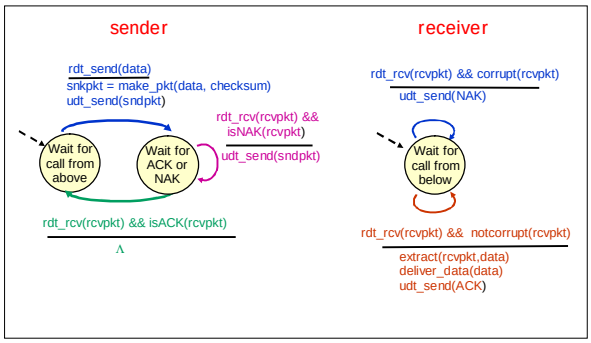


sender receiver

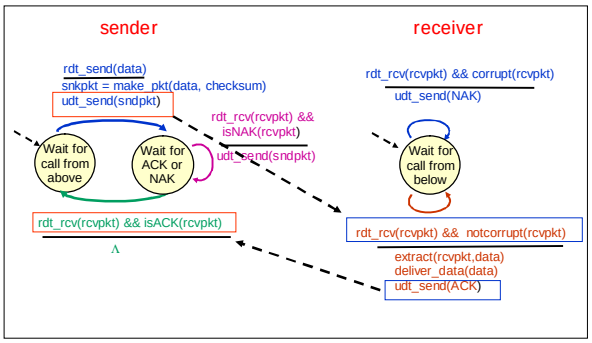
Versio rdt2.0: Bittivirheitä

- Oletus: Voi olla **vain bittivirheitä**
  - Bitti voi kääntyä siirron aikana
  - **Siirto ei kadota paketteja**
- **Kuinka toipua?**
  - Kuittaukset: vastaanottaja kuittaa ACK:lla virheettömän paketin,
  - NAK-kuittaus, jos paketti on virheellinen + hylkää
  - Jos NAK, niin lähettäjä lähettää paketin uudelleen
- Stop-and-wait-protokolla
  - Lähettäjä odottaa kuittausta ennenkuin lähettää seuraavan
- Luotettava kuljetuspalvelu
  - Virheen huomaaminen: **tarkistussumma**
  - Palaute vastaanottajalta: **kuittaussanoma** (ACK / NAK)
  - **Uudelleenlähetys**: dataa puskuroitava

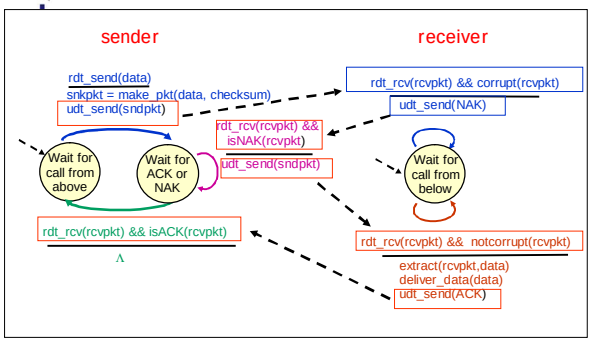
rdt2.0:



rdt2.0: Toiminta, kun ei ole virhettä



rdt2.0: Toiminta virhetilaneessa



rdt2.0: Missä voi mennä väärin?

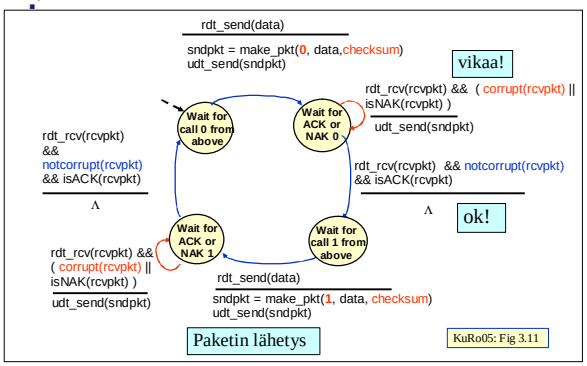
- Ei toimi, jos ACK /NAK -bitit korruptoituvat!
  - Onko OK vai ei?
- Korjaus:ACK/NAK-paketteihin tarkistusbitit, jotta virhe huomataan
- Entä toipuminen?
  - Jos jos kuittauksessa virhe, uudelleenlähetetään paketti
  - Uudelleenlähetys voi tuottaa kaksoiskappaleen, jotka on huomattava ja hylättävä
- => Paketteihin järjestysnumero
  - Kaksoiskappale: jos sama numero
  - Vastaanottaja kuittaa normaalisti, mutta ei anna sovellukselle

Versio rdt2.1: enemmän bittivirheitä

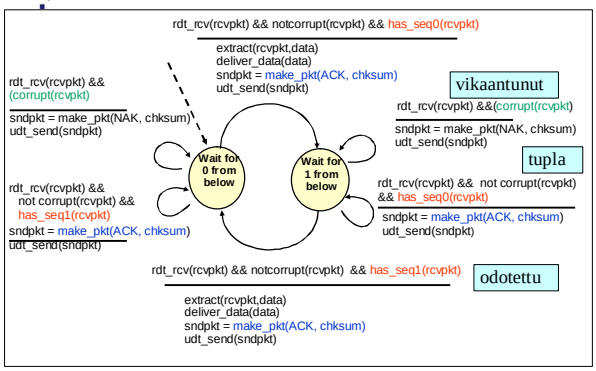
Lähettäjä:
- Lisää pakettiin järjestysnumeron
  (numerot 0 ja 1 riittävät tässä protokollassa. Miksi?)
  Ns. vuorottelevan bitin protokolla
- Tarkista, että ACK/NAK ei ole korruptoitunut
  Tilakaaviossa nyt kaksinkertaisesti tiloja
  Kaavion tilan 'muistettava' paketin numero
- Säilytä kopio lähetetystä paketista

Vastaanottaja:
- Tarkista, ettei ole kaksoiskappale
  - Kaavion tilan 'muistettava' seuraavan paketin numero: 0 vai 1
- Myös duplikaatti kuitattava, koska ei tiedä menikö edellinen kuittaus perille

rdt2.1: Lähettäjän tilakaavio



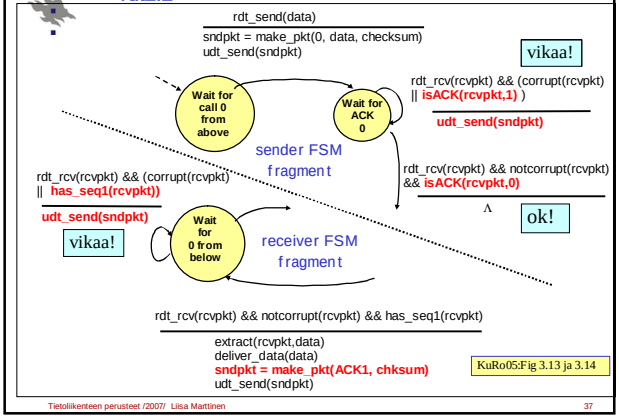
rdt2.1: vastaanottajan tilakaavio



Versio rdt2.2: vain ACK-kuittaus käytössä

- Sama toiminnallisuus kuin edellä
- Käyttää vain ACK-kuittauksia
  - Vastaanottaja kuittaa viimeksi kunnossa saamansa paketin
  - Kuittaukseen on liitettävä kuitattavan paketin numero
- Jos samalle paketille (nro X) tulee useita ACK-kuittauksia *(duplicate ACK)*, niin sitä seuraava paketti (nro X+1) joko puuttuu tai on virheellinen
  - ~NAK-kuittaus
  - Lähetetään uudelleen sanoma X+1

rdt2.2

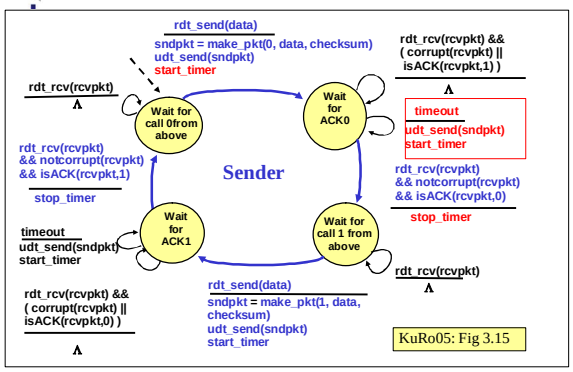


KuRo05:Fig 3.13 ja 3.14

Versio rdt3.0: paketteja voi kadota

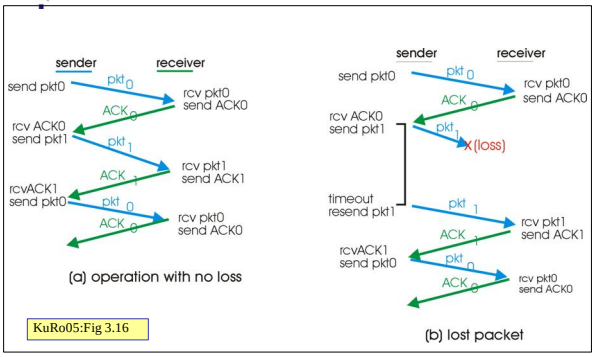
- **Oletus**: Siirtokanava voi kadottaa paketteja
  Sekä datapaketteja että kuittauspaketteja voi kadota.
  Tarkistussumma, pakettinumero, ACK eivät vielä riitä! **Miksi?**
- Lähettäjä odottaa jonkin aikaa kuittausta
  Jos ei saavu, lähettää paketin uudelleen
  Ajastin laukaisee uudelleenlähetyksen
- Jos paketti (data / kuittaus) kuitenkin vain viivästyy eikä olekaan kadonnut
  Syntyy duplikaatti, joka havaitaan sanomanumeroinnin avulla
  Kuittauksessa mukana kuitatun paketin numero

rdt3.0



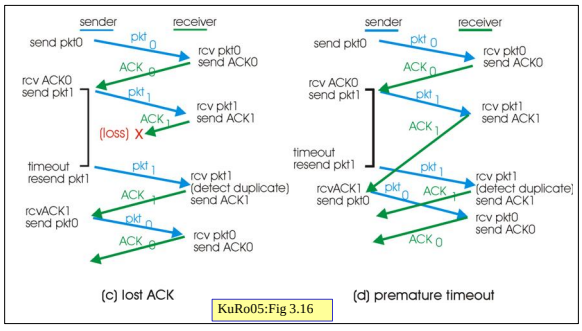
KuRo05: Fig 3.15

rdt3.0 toiminnassa



KuRo05:Fig 3.16

rdt3.0 toiminnassa



KuRo05:Fig 3.16

rdt3.0: Tehokkuus?

Esim: 1 Gbps linkki, 15 ms päästä-päähän etenemisviive eli **RTT = 30 ms, 1 KB:n paketti**

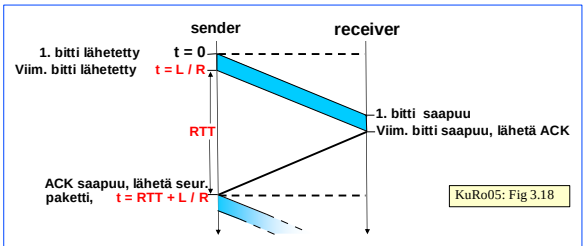
$$T_{transmit} = \frac{L\ (\text{packet length in bits})}{R\ (\text{transmission rate, bps})} = \frac{8\text{kb/pkt}}{10^{**}9\ \text{b/sec}} = 8\ \text{microsec}$$

$$U_{sender} = \frac{L / R}{RTT + L / R} = \frac{.008}{30.008} = 0.00027$$

Käyttöaste (utilization): se osa kokonaisajasta, jolloin lähettäjä lähettää

- 1KB paketti 30 ms:n välein -> 33kB/s nopeus 1 Gbps linkillä.
- Stop-and-wait-protokolla rajoittaa, ei linkin todellinen kyky siirtää dataa

rdt3.0: stop-and-wait tehokkuus



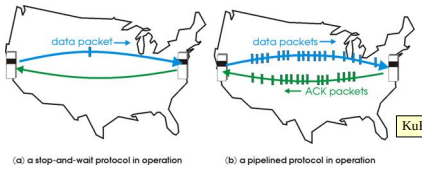
KuRo05: Fig 3.18

$$U_{sender} = \frac{L / R}{RTT + L / R} = \frac{.008}{30.008} = 0.00027$$

rdtX.X: Liukuhihnaprotokollat

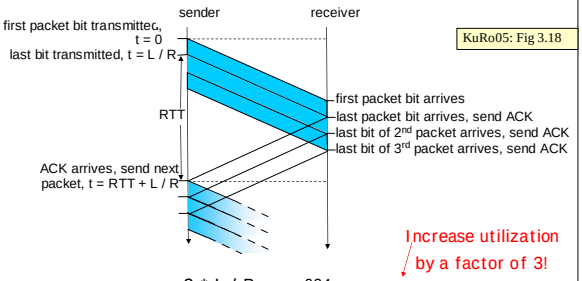
Lähettäjä saa lähettää useita paketteja, vaikka ei ole saanut kuittauksia edeltäviin

- Numerointi (0,1) ei enää riitä, lisää numeroita tarvitaan
- Tarvitaan puskurointia molemmissa päissä



KuRo05: Fig 3.17

Liukuhihnoitus: käyttöasteen kasvattaminen



KuRo05: Fig 3.18

Increase utilization by a factor of 3!

$$U_{sender} = \frac{3 * L / R}{RTT + L / R} = \frac{.024}{30.008} = 0.0008$$

Liukuva ikkuna (sliding window)

- **Ikkuna** = tietyllä hetkellä sallitut pakettinumerot
  - Riippuu yhteyden tyypistä ja puskuroinnista
  - Rajallinen kenttä pakettinumerolle
  - Vuonvalvonta: vaihteleva ikkunan koko N
- **Lähetysikkuna**
  - Ikkunan koko = montako pakettia saa olla kuittaamatta
  - Mitkä pakettinumerot on käytetty, mutta kuittaamatta
  - Mitä pakettinumeroita voi vielä käyttää
- Lähettäjän on odotettava, jos kaikki numerot on käytetty
- Kun kuittaus saapuu, ikkuna liukuu
  - Seuraavat numerot tulevat luvallisiksi

Liukuva ikkuna

- **Vastaanottoikkuna**
  - Mitkä pakettinumerot otettu vastaan, mutta kuittaamatta
  - Mitä pakettinumeroita lähettäjä saa vielä käyttää
- Jos saadussa paketissa on ikkunan viimeinen numero
  - Ikkuna pysäyttää pakettien lähetyksen vastapäästä
  - Ikkuna estää uusien pakettien vastaanoton
- Paketin kuittaus liu'uttaa myös vastaanottajan ikkunaa
  - Hyväksytään uusia pakettinumeroita

Kun ikkunan koko on 1

- Vain yksi paketti kuittaamattomana
  - One Bit Sliding Window –protokolla
  - = stop-and-wait –protokolla
- Pakettinumerot 0 ja 1 riittävät
- ACK ilmoittaa
  - Joko seuraavaksi odotetun paketin numeron
  - Tai viimeksi vastaanotetun virheettömän paketin numeron
- ACK sisältää paketin numeron
  - Kuittausduplikaatti ei voi kuitata väärää paketteja

Virhetilanteen käsittely

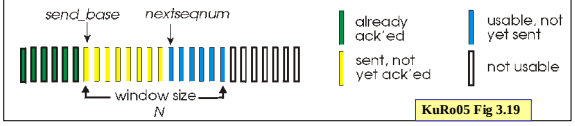
- Entä, kun huomataan virhe?
  - Monta muuta pakettia jo matkalla
- Pakettiin ei tule kuittausta
  - Paketti katosi tai virheellinen
  - Kuittaus katosi tai virheellinen
  - => Ajastin laukeaa aikanaan
- **"Go-Back-N" (paluu N:ään)**
  - Paketit uudelleenlähetetään virheellisestä lähtien
- **Selective Repeat (Valikoiva toisto)**
  - Lähetetään vain virheelliset paketit

Go-Back-N

- Vastaanottaja hyväksyy paketit vain järjestyksessä
  - Kuittaa järjestyksessä tulleen virheettömän paketin
  - Hylkää kaikki puuttuvan tai virheellisen paketin jälkeiset paketit eikä lähetä niistä kuittauksia
- Kun lähettäjä ei saa pakettiin kuittausta
  - Lähetysikkuna täyttyy ja estää uusien pakettien lähettämisen
  - Lähettäjän ajastimet laukeavat
  - Lähettäjä lähettää uudestaan kaikki viimeisen kuittauksen jälkeiset paketit
  - Näiden kuittaukset siirtävät taas lähetysikkunaa
- **Tehoton, jos paljon virheitä ja iso ikkkuna**

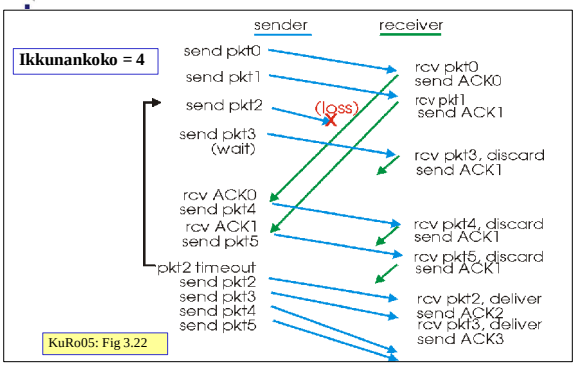
Go-Back-N

- Parannus: nopea reagointi puuttuvaan
- Kumulatiivinen ACK
  - Lähetä ACK, jossa korkein järjestyksessä saadun kelvollisen paketin numero
  - Tämä kuittaa kaikki pienemmällä numerolla lähetetyt paketit
- Jos välistä puuttuu paketti
  - Lähetä uudestaan ACK, jossa korkein järjestyksessä saadun paketin numero
  - Tuplakuittaus (duplicate ACK)



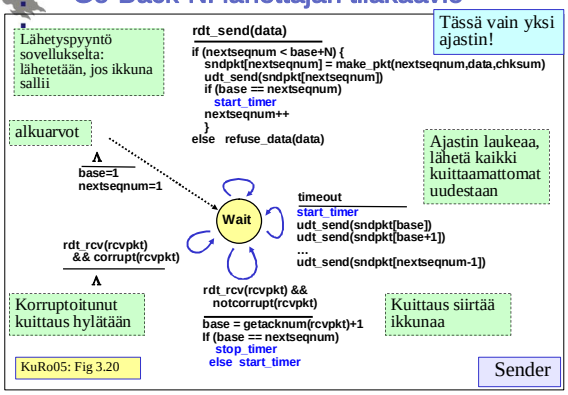
KuRo05 Fig 3.19

Go-Back-N: Esimerkki

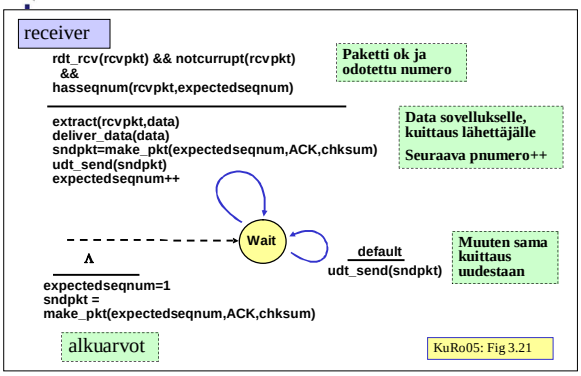


KuRo05: Fig 3.22

Go-Back-N: lähettäjän tilakaavio



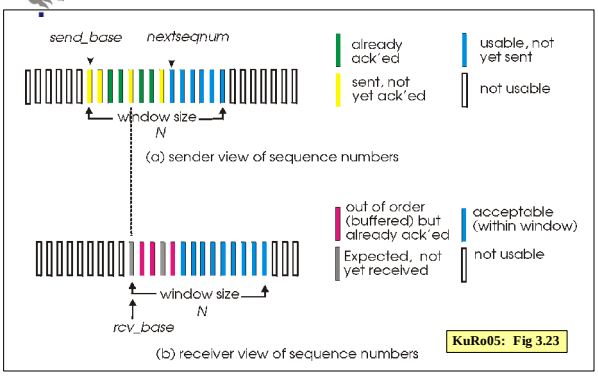
Go-Back-N: Vastaanottajan tilakaavio



Valikoiva toisto (Selective Repeat)

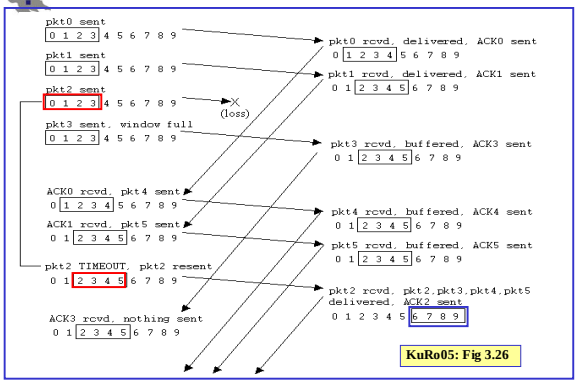
- **Valikoiva uudelleenlähetys**
  - Lähetä uudelleen vain virheellinen /puuttuva paketti
- **Kuittaus jokaiselle kelvolliselle paketille**
- **Paketit sovellukselle oikeassa järjestyksessä**
  - Vastaanottajalla oltava puskuritilaa pakettien järjestämiseen
- **Jos lähettäjä ei saa kuittausta paketista**
  - Lähetysikkunan täyttyminen pysäyttää lähettämisen
  - Aikanaan ajastin laukeaa ja aihettaa uudelleenlähetyksen
  - Jokaisella paketilla on oma ajastin
- **Ikkuna liukuu nytkin tasaisesti**
  - Yksi puuttuva kuittaus voi pysäyttää lähetyksen
  - Kun puuttuva paketti saatu, ikkuna liukuu kaikkien kuitattujen yli

Valikoiva toisto



KuRo05: Fig 3.23

Esimerkki



KuRo05: Fig 3.26

Ikkunankoko

- Pakettinumeroille varatun kentän koko vaikuttaa myös ikkunankokoon
  - Yleensä jokin kakkosen potenssi
  - Kentän koko k bittiä => käytössä 2**k pakettinumeroa
- Kun paketit numeroidaan 0, 1, …, n, niin ikkunan koko saa olla korkeintaan

Go-Back-n: n
Valikoiva toisto: (n+1)/2

Yhteenveto menetelmistä

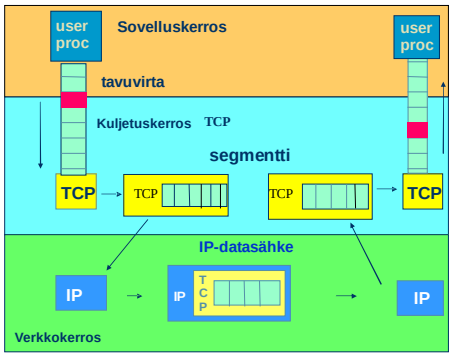
- Ks. KuRo05 Table 3.1
- Tarkistussumma
- Ajastin
- Järjestysnumero
- Kuittaukset
  - Positiiviset ACK
  - Negatiiviset NAK
- Ikkunat, liukuhihnoitus

Kuljetuskerros

Yhteydellinen kuljetuspalvelu TCP

FRC 793, RFC 1122, RFG 1323, RFC 2018, FRC 2581

TCP: prosessilta prosessille -tavuvirta



TCP-protokolla

- **Päästä-päähän kuljetuspalvelu**
  - Yksi lähettäjä, yksi vastaanottaja
  - Reitittimet eivät ole kiinnostuneita kuljetustason protokollasta
- **Yhteydellinen** (connection-oriented)
  - Yhteydenmuodostus
  - Isäntäkoneissa: puskuritila, ikkunakoko, tavunumerointi
  - Yhteyden purku
- **Kaksisuuntainen** (full duplex)
  - Yksi yhteys, jossa yhtä aikaa liikennettä molempiin suuntiin
- **Luotettava, järjestyksen säilyttävä tavuvirta**
  - Ei sanomarajoja
  - Tavunumerointi
  - Kumulatiiviset kuittaukset

TCP-protokolla

- Vuonvalvonta, ruuhkanhallinta (-valvonta)
  - Lähettäjä ei voi tukahduttaa vastaanottajaa eikä reitittimiä
- Liukuvan ikkunan protokolla
  - Vuonvalvonta ja ruuhkanhallinta vaikuttavat ikkunankokoon
- Puskurointia molemmissa päissä
  - Uudelleenlähetystä varten
  - Jotta saadaan annettua sovellukselle järjestyksessä

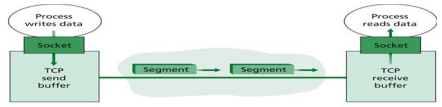


Figure 3.28 ♦ TCP send and receive buffers

TCP-protokolla

- Segmentillä maksimikoko
  - MSS (maximum segment size) = paljonko dataa segmentissä
- Varmistaa, että tässä koneessa ei tarvita lisäpilkkomista paketeiksi
- Linkkikerroksen fyysiset ominaisuudet vaikuttavat MSS:N arvoon
  - MTU (maximum transfer unit)
  - Ethernet MTU = 1500 => MSS = 1460, sillä TCP:n ja IP:n osoitteet (20 +20 tavua) vievät oman tilansa

Figure 3.30 ♦ Dividing file data into TCP segments

TCP-segmentti

Otsake aina vähintään 20 B
Options-osa tarvittaessa

Segmentti- ja kuittaus-numerot tavunumeroina

Ikkunankoko: paljonko tilaa vastaanottopuskurissa (tavua)

ACK= kuittausnumero validi;
RST (reset),
SYN yhteydenmuodostus
FIN yhteydenpurku
URG, PSH ei käytetä

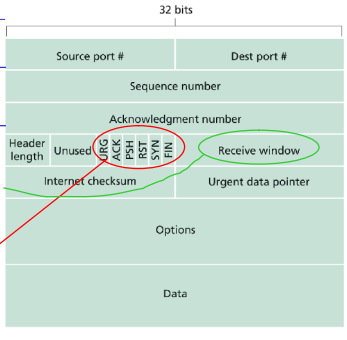


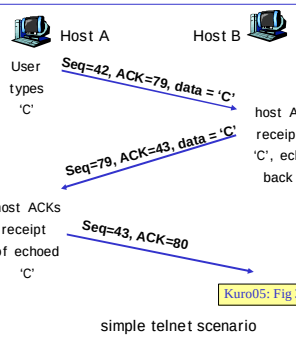
Figure 3.29 ♦ TCP segment structure

Tavunumerointi

Tavuvirtaa …
Segmentit voivat olla erikokoisia

Segmentin 'numero'=
- ensimmäisen tavun numero
- alkuarvot sovitaan yhteyttä muodostettaessa

Kuittaus
- seuraavaksi odotetun tavun numero
- kumulatiivinen
- kylkiäisenä (piggybacked)



Kuro05: Fig 3.31

simple telnet scenario

TCP: lähetys (simplified)

```
NextSeqNum = InitialSeqNum;  SendBase = InitialSeqNum
loop (forever) {
  switch(event)
    event: data received from application above
       create TCP segment with sequence number NextSeqNum
       if (timer currently not running) start timer
       pass segment to IP
       NextSeqNum = NextSeqNum + length(data)
    event: timer timeout
       retransmit not-yet-acknowledged segment with
            smallest sequence number
       start timer
    event: ACK received, with ACK field value of y
       if (y > SendBase) {
          SendBase = y
          if (there are currently not-yet-acknowledged segments)
             start timer
       }
} /* end of loop forever */
```

Vuonvalvonta ja/tai ruuhkanhallinta voi estää lähettämisen!

Riittääkö 1 segmentti?

Yksi vai monta?

Ajastimen arvo?

Toistokuittaukset?

Kuro05: Fig 3.33

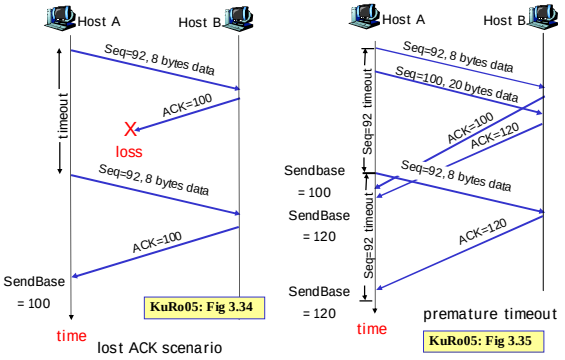
Comment:

- SendBase-1: last cumulatively ack'ed byte

Example:

- SendBase-1 = 71; y= 73, so the rcvr wants 73+ ; y > SendBase, so that new data is acked

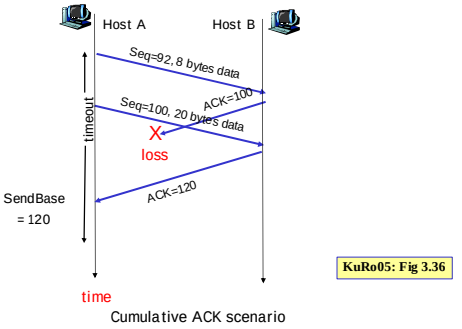
TCP: uudelleenlähetys



KuRo05: Fig 3.34

KuRo05: Fig 3.35

TCP: uudelleenlähetys (2)



KuRo05: Fig 3.36

TCP ACK generation [RFC 1122, RFC 2581]

Event at Receiver	TCP Receiver action
Arrival of in-order segment with expected seq #. All data up to expected seq # already ACKed	Delayed ACK. Wait up to 500ms for next segment. If no next segment, send ACK
Arrival of in-order segment with expected seq #. One other segment has ACK pending	Immediately send single cumulative ACK, ACKing both in-order segments
Arrival of out-of-order segment higher-than-expect seq. # . Gap detected	Immediately send *duplicate ACK*, indicating seq. # of next expected byte
Arrival of segment that partially or completely fills gap	Immediate send ACK, provided that segment starts at lower end of gap

Nopea uudelleenlähetys (fast retransmit)

- Timeout suhteellisen pitkä
  - => aika iso viive ennen uudelleenlähetystä
- Vastaanottaja ilmoittaa puuttuvasta segmentistä toistokuittauksilla (duplicate ACK)
  - Liukuhihnoituksen vuoksi useita segmenttejä voi olla kuittaamatta
  - Jos välistä puuttuu segmentti, seurauksena on useita ACK-kuittauksia
- Jos lähettäjä saa 3 samaa segmenttiä kuittaavaa **toistokuittausta**, se olettaa, että seuraava segmentti on kadonnut
  - Ja lähettää puuttuvan segmentin heti
- Nopea uudelleenlähetys = lähetä uudelleen jo ennen kuin ajastin laukeaa eli kolmen tuplakuittauksen jälkeen.

Nopea uudelleenlähetys

Sender

```
event: ACK received, with ACK field value of y
        if (y > SendBase) {      uuden segmentin  kuittaus
            SendBase = y
            if (there are currently not-yet-acknowledged segments)
                start timer
        }
        else {
            increment count of dup ACKs received for y
            if (count of dup ACKs received for y = 3) {
                resend segment with sequence number y
            }
```

a duplicate ACK for already ACKed segment

Nopea uudelleenlähetys (fast retransmit)

Paluu n:ään vai valikoiva toisto?

- **Kumpaa TCP käyttää?**
  - Liukuvan ikkunan protokolla
  - Hybridi, tavallaan 'best-of-both'
- **Go-Back-N-tyyppinen**
  - Virheellisiä tai väärässä järjestyksessä tulleita ei hyväksytä, mutta ne yleensä talletetaan puskuriin
    - Kumulatiivinen ACK
    - Kaikkia virheellisestä lähtien ei tarvitse lähetttää uudestaan
- Valikoiva toisto
  - Kumulatiivinen ACK ei kelpaa
  - SACK-kuittaus (selective ACK), joka kertoo, mitkä segmentit vastaanotettu (RFC 2018), ei yleisesti käytössä

Vuonvalvonta

- Jotta lähettäjä ei tukahduta vastaanottoa
  - Siirtonopeus sovitettava vastaanottavan sovelluksen mukaan
- Kuittaus on irroitettu vuonvalvonnasta
- Liukuva ikkuna, koko vaihtelee
  - Kuittaus siirtää ikkunaa
  - Vuonvalvonta määrää ikkunankoon
  - Kun ikkunankoko = 0, ei saa lähettää!
- Vastaanottaja kertoo, montako tavua puskureihin vielä mahtuu
  - TCP-segmentin otsakkeen kenttä **Receive window**
  - **Sovellus lukee tavut silloin kun haluaa**
  - **Koko on mukana jokaisessa TCP-segmentissä (molempiin suuntiin)**
- **Myös ruuhkanhallinta rajoittaa lähettämistä**

Vuonvalvonta

- Kun ikkunankoko ==0, milloin voi taas lähettää?
- Jatka lähettämällä tavun kokoisia segmenttejä
  - Kysely
- Kuittaus antaa ajantasalla olevan tiedon vastaanottajan puskuritilasta
  - Edellisen ACK:n toistokuittaus => ei tilaa
  - Normaali ACK, kun vapaata vähintään täydelle TCP-segmentille
- Miksi lähettäjä ei vain odota, että vastaanottaja kertoo, kun tilaa jälleen tulee
  - Entä, jos tämä kuittaus katoaa!
  - Lähettäjä odottaa turhaan ja vastaanottaja luulee, ettei sillä ole lähetettävää, lukkiutuminen!

Yhteyden muodostus

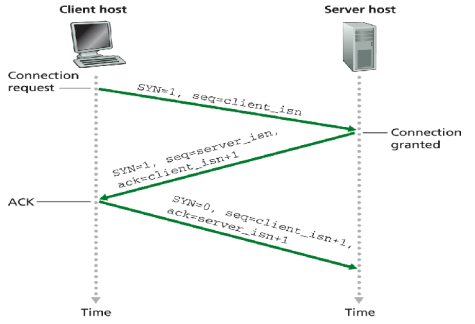
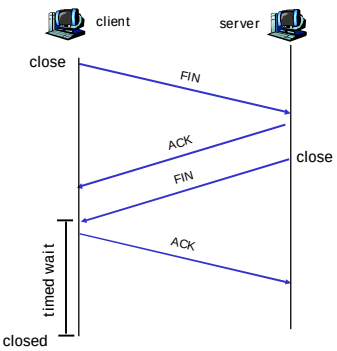


Figure 3.38 ♦ TCP three-way handshake: segment exchange

Yhteyden muodostus

- **Kolmivaiheinen kättely** (three-way handshake)
  - 3 segmenttiä: SYN – SYNACK – SYNACK
  - Otsakkeen bittikentät
  - Viimeinen voi sisältää dataa (piggybacket)
  - Jos porttiin ei liity prosessia, vastaukseksi RST-segmentti eli yhteyttä ei voida muodostaa
- Varaa puskuritilaa
  - Lähettäjä puskuroi uudelleenlähetystä varten
  - Vastaanottaja saatujen pakettien järjestämistä varten
- Sovitaan tavunumeroinnin alkuarvoista
  - Kuittauksia vasten
- Ilmoita oma vastaanottoikkunan koko
  - Vuonvalvontaa varten

Yhteyden purku



Yhteyden purku

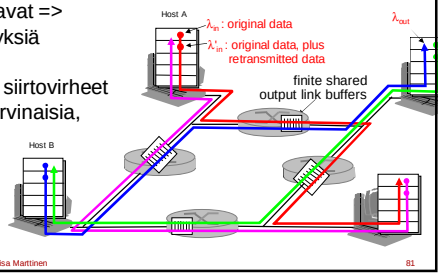
- Molemmat suunnat puretaan erikseen
  - 4 segmenttiä: FIN – ACK, FIN – ACK
- Yhteys on kokonaan purettu, kun molemmat suunnat purettu
- Purku käyttää ajastimia
  - Joidenkin erikoistilanteiden hallintaan
  - Noin 2 * paketin maksimaalinen elinikä
  - Tyypillisesti 30, 60 tai 120 s

Kuljetuskerros

Ruuhkanhallinta TCP:ssä

Ruuhka

- Reitittimelle tulee paketteja nopeammin kuin se ehtii välittää niitä eteenpäin
  - Pitkiä jonotusviipeitä
  - Pakettien hävittämistä (puskuritila loppuu)
- Ajastimet laukeavat => uudelleenlähetyksiä
- Lankaverkoissa siirtovirheet ovat nykyisin harvinaisia, paketin katoamisen syynä lähes aina ruuhka



Miten ratkaista ongelma?

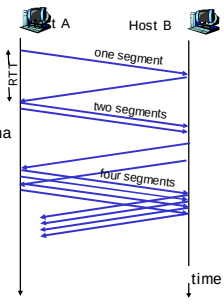
- Lähettäjän on hidastettava vauhtia
- Verkkoavusteinen ruuhkanvalvonta (network assisted congestion control)
  - Reitittimet antavat tietoa ruuhkasta
  - Lisäbitit kertomassa ruuhkasta tai kenttä, joka ilmoittaa yhdeydelle sallitun lähetysnopeuden (explicit rate)
- **Päästä-päähän ruuhkanvalvonta** (end-to-end congestion control)
  - Reitittimet eivät kerro ruuhkaantumisestaan isäntäkoneille
  - Isäntäkoneet huomaavat itse ruuhkan lisääntyneestä pakettien katoamisesta ja uudelleenlähetyksistä
  - TCP käyttää tätä
- Tällä kurssilla käsitellään vain TCP:n ruuhkanhallinta
  - TCP Reno -algoritmi
  - Ruuhkanhallintaan kehitetty runsaasti erilaisia algoritmeja

Ruuhkaikkuna (congestion window)

- Internetin hetkellinen kuormitus vaihtelee
- Ruuhkaikkuna
  - Paljonko lähettäjä saa tietyllä hetkellä kuormittaa verkkoa
  - Paljonko lähettäjällä saa olla kuittaamattomia segmenttejä
- Lähettäjän päätteltävä itse sopiva ikkunankoko
  - **Jos uudelleenlähetysajastin laukeaa, on ruuhkaa**
  - **Jos kuittaukset tulevat tasaisesti, ei ole ruuhkaa**
- Dynaaminen ruuhkaikkunan koko
  - Kasvata ikkunaa ensin nopeasti, kunnes törmätään ruuhkaan
  - Pienennä sitten ikkunaa reilusti ja kasvata varovasti
- Lähetysikkunan raja voi tulla vastaan ensin
  - Kuittamatta saa olla **min(lähetysikkuna, ruuhkaikkuna)**

TCP Reno: Hidas aloitus (slow start) ja ruuhkanvälttely (congestion avoidance)

- **Aluksi ruuhkaikkuna = yksi segmentti**
  - Alussa hidas siirtonopeus= MSS/RTT
- **Kukin kuittaus kasvattaa yhdellä ruuhkaikkunan kokoa** hidas aloitus
  - Eksponentiaalinen kasvu
  - Ikkuna kaksinkertaistuu yhden RTT:n aikana
- **Jos uudelleenlähetys, puolita ruuhkaikkunan koko**
  - Multiplicative decrease
- **Sen jälkeen kasvata ikkunaa yksi segmentti/RTT** ruuhkanvälttely
  - Lineaarinen kasvu (Additive increase)
  - Ruuhkan välttely (congestion avoidance)
- Siirtonopeus = CognWin / RTT tavua/sek



Kynnysarvo (threshold)

- = ~ varoitus: tästä lähtien syytä varoa ruuhkaa
  - Aluksi threshold = 64 KB
- Ajastimen laukeamisen (timeout) jälkeen
  - Threshold = CongWin / 2
  - Timeout = 2*timeout
- Kynnysarvoon saakka ikkunan kasvatus eksponentilaalista
  - Yhtä kuitattua segmenttiä kohden saa lähettää kaksi uutta
  - Eli kaksinkertaistuu yhden RTT:n aikana
- Sen jälkeen ikkuna kasvaa lineaarisesti ruuhkanvälttely
  - Kasvaa yhdellä yhden RTT:n aikana
- **Miksi näin?**

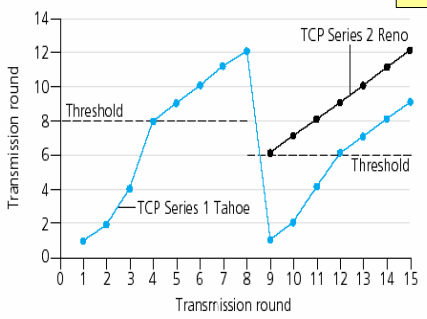
TCP Reno: Tarkennus

- **Saatu 3 ACK-kaksoiskuittausta** (double ACK)
  - Verkko pystyy välittämään dataa!
  - Ei siis (pahaa) ruuhkaa, ehkä paketissa bittivirhe tai paketti kadonnut jostain muusta syystä
- Nopea uudelleenlähetys (fast retransmit)
- Nopea toipuminen (fast recovery)
  - Puolita ruuhkaikkunan koko ja kasvaa sitten lineaarisesti
- **Timeout (= uusi hidas aloitus)**
  - Verkko pahasti ruuhkautunut!
  - Pudota ikkunankoko arvoon 1 Hidas aloitus
  - Kasvata eksponentiaalisesti kynnysarvoon asti
  - Kasvata sitten lineaarisesti ruuhkanvälttely

Vanha TCP Tahoe pudotti aina kokoon 1.

TCP Tahoe vs. TCP Reno

KuRo05: Fig 3.51



TCP Reno Ruuhkanhallinta

State	Event	TCP Sender Action	Commentary
Slow Start (SS)	ACK receipt for previously unacked data	CongWin = CongWin + MSS, If (CongWin > Threshold) set state to "Congestion Avoidance"	Resulting in a doubling of CongWin every RTT
Congestion Avoidance (CA)	ACK receipt for previously unacked data	CongWin = CongWin+MSS * (MSS/CongWin)	Additive increase, resulting in increase of CongWin by 1 MSS every RTT
SS or CA	Loss event detected by triple duplicate ACK	Threshold = CongWin/2, CongWin = Threshold, Set state to "Congestion Avoidance"	Fast recovery, implementing multiplicative decrease. CongWin will not drop below 1 MSS.
SS or CA	Timeout	Threshold = CongWin/2, CongWin = 1 MSS, Set state to "Slow Start"	Enter slow start
SS or CA	Duplicate ACK	Increment duplicate ACK count for segment being acked	CongWin and Threshold not changed

Ajastimen arvo?

- Aseta ajastin, kun segmentti on lähetetty
- Liian lyhyt aika
  - Ennenaikainen timeout, turha uudelleenlähetys
  - Turhat ruuhkatoiminnot
- Liian pitkä aika
  - Turhan hidas reagointi segmentin katoamiseen
  - Ei huomata ruuhkaa ajoissa
- Alkujaan: *Timeoutinterval = 2*RTT*
- *Kuittausaika vaihtelee suuresti ja nopeasti =>käytössä dynaaminen arvo*
  - *Saadaan jatkuvien mittausten perusteella*
- *Jos ajastin laukeaa, tuplaa Timeout*
  - *Exponential backoff*

Ajastimen arvo?

- **Timeoutinterval = EstimatedRTT + 4 DevRTT**
- **Arvioi kiertoviive** eli EstimatedRTT
  - Mittaa jokaisen lähetetyn segmentin kiertoviive tai noin RTT:n välein normaalien lähetysten aikana.
  - Laske painotettu arvo, tyypillisesti $\alpha = 1/8 = 0.125$

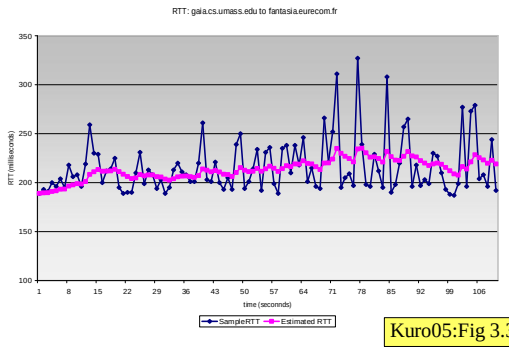
$$EstimatedRTT = (1-\alpha)*EstimatesRTT + \alpha *SampleRTT$$

- **Huomioi poikkeama**

tyypillisesti $\beta=0.25$

$$DevRTT = (1-\beta)* DevRTT + \beta*|SampleRTT-EstimatedRTT|$$

Esimerkki



Kuro05:Fig 3.32

Onko TCP reilu?

- Jokainen reitittimessä kulkeva yhteys kärsii ruuhkasta
- Vain TCP-yhteydet kiltisti vähentävät lähetystään
  - AIMD: additive increase, multiplicative decrease
- Sovellus voi avata monta rinnakkaista yhteytttä
  - Onko tämä reilua muita kohtaan?
- UDP?
  - Ei ruuhkanhallintaa, ei välitä ruuhkasta eikä vähennä lähetystä
  - Multimediasovellukset käyttävät UDP:tä: työntävät dataa vakionopeudella ja sietävät katoamisia
- TCP-ystävällinen reititin?

Kertauskysymyksiä

- TCP vs. UDP?
- Miten tehdä kuljetuspalvelusta luotettava?
- Keskeisimmät TCP:n otsakkeessa olevat tiedot?
- Mitä tapahtuu TCP:n yhteydenmuodostuksessa?
- Vuonvalvonta?
- Ruuhkanhallinta?

ks. Kurssikirja s. 285