



Tietoliikenteen perusteet

Verkkokerros

Kurose, Ross: Ch 4.1- 4.42 ja 4.5



Sisältöä

- n Verkkokerros
- n Reititin
- n IP-protokolla
- n Reititysalgoritmit



Oppimistavoitteet:

- Osata selittää, kuinka IP-paketteja välitetään verkossa
- Tietää, mitä tietoja sisältyy IP-pakettiin (ja miksi)
- Osata selittää reitittimien rakenne ja toiminta
- Osata kuvailla, kuinka reitittimet kokoavat reititystietonsa = linkkitila- ja etäisyysvektorialgoritmien toimintaideat



Verkkokerros

Verkkokerroksen tehtävät



Verkkokerros

n Toimittaa kuljetuskerroksen segmentit vastaanottajalle

n **Lähetys**

- Luo segmenteistä verkkokerroksen IP-paketteja
- Lisää otsaketietoja: mm. IP-osoitteet

n **Pakettien kulku verkossa**

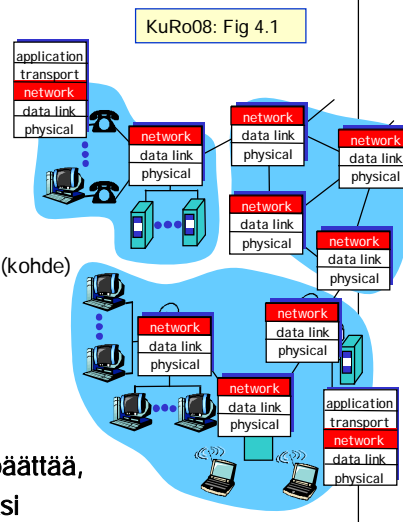
- Isäntä (lähde) – reititin - ...- reititin – isäntä (kohde)

n **Vastaanotto**

- Poista otsake
- Anna segmentti kuljetuskerrokselle

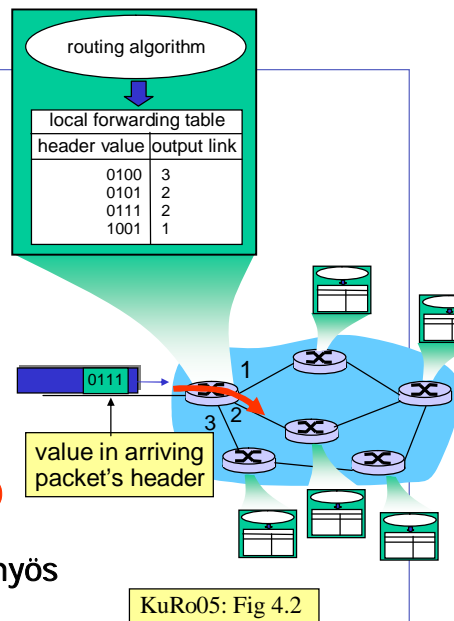
n Toimii etenkin reitityksessä

- n Reititin tutkii IP-paketin otsakkeen ja päättää, mihin linkkiin se lähetetään seuraavaksi



Reititin

- q Ohjaa paketin reitittimen sisään tulolinkistä johonkin ulosmenolinkkiin (**forwarding**)
 - u Katsoo **reititystaulusta** minne
- q Kertoo muille reitittimille reitittämiseen liittyviä tietoja (**routing**)
 - u Reittien selvittäminen
 - u Reititystaulun ylläpito
 - u Oma protokolla tätä varten (**reititysalgoritmi, reititysprotokolla**)
 - u Käsini konfigurointi on hankalaa
- q Piirikytkentäisessä verkossa myös yhteydenmuodostus ja purku



Tietoliikenteen perusteet /2008/ Liisa Marttinen

5

Miksi verkkokerros?

- n Internet koostuu hyvin heterogeenisista verkoista
 - n Verkot toteutettu eri teknologialla
 - n Verkoilla kehyksen (frame) maksimikoko erilainen
 - n Palvelu: yhteydellinen / yhteydetön,
 - n Erilaisia osoittamistapoja: yksitasoinen/hierarkkinen
 - n Monilähetys / yleislähetys
 - n Toiminnot: virheen käsittely, vuonvalvonta, ruuhkanvalvonta, yhteyden laatu / laatutakuu (QoS), turvaus, laskutus, ..
- n Verkkoprotokolla IP (Internet Protocol) on verkkokerroksen yhteinen kieli
 - n Internetin isäntäkoneiden ja reitittimien kommunikointitapa
 - "Kullakin omat murteensa ja tapansa, mutta kaikki osaavat IP:tä."
- n Yhteinen osoitustapa: IP-osoite
 - n Yksikäsitteiset osoitteet

Tietoliikenteen perusteet /2008/ Liisa Marttinen

6



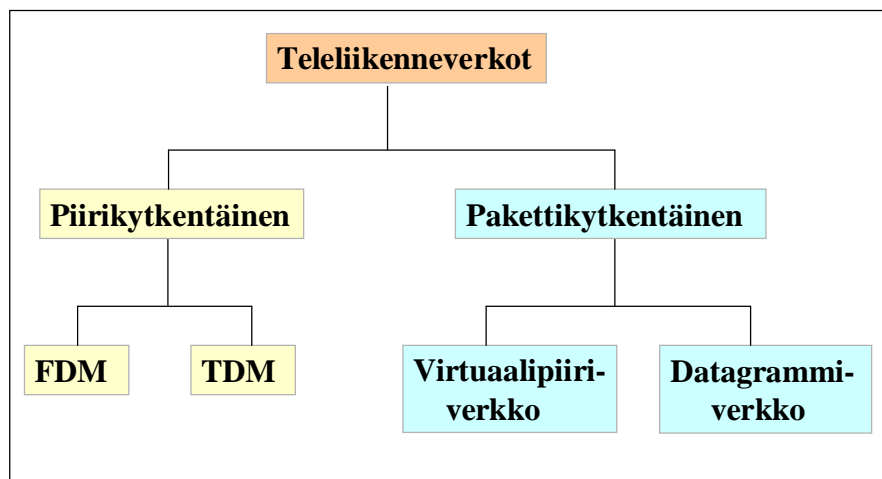
Verkon palvelun laatu

Network Architecture	Service Model	Bandwidth Guarantee	No-loss Guarantee	Ordering	Timing	Congestion Indication
Internet	Best Effort	none	none	any order possible	not maintained	none
ATM	CBR	guaranteed constant	yes	in order	maintained	congestion will not occur
ATM	ABR	guaranteed minimum	none	in order	not maintained	congestion indication provided

KuRo08:Table 4.1



Verkkojen taksonomia





Pakettikytkentäinen verkko

n Joko datagrammiverkkona (= Internet)

Sanoman jokainen paketti reititetään erikseen
kohteen IP-osoitteen perusteella

“Tyhmä verkkokerros”: vain pakettien välitys koneelta koneelle

“Fiksut isäntäkoneet”: virheenvalvonta, vuonvalvonta, järjestys

n tai virtuaalipiiriverkkona

Sanoman jokainen paketti kulkee samaa reittiä pitkin
linkkiin liitetyn virtuaalipiirinumeron perusteella

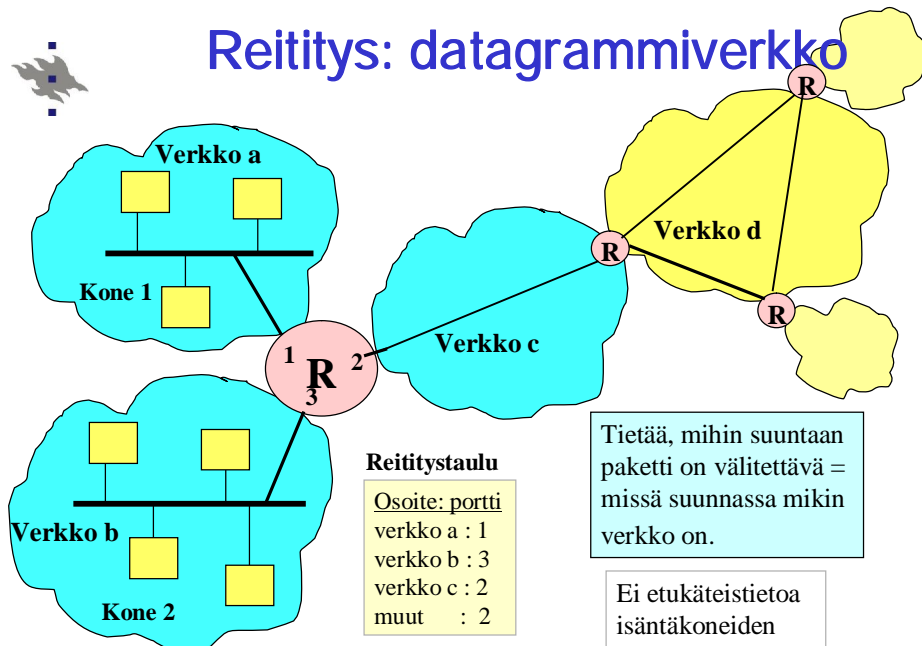
Signaalointiprotokolla: yhteydenmuodostus, ylläpito, purku
yhteyden tietoja reitittäessä (virtuaalipiirin muunnostaulukko)
mahd. myös kaistavarausta

Fiksu verkkokerros: vuonvalvonta, virhevalvonta, järjestys
tyhmit isäntäkoneet: vrt. Puhelin

ATM-verkot (Asynchronous Transfer Mode), X.25-verkot



Reititys: datagrammiverkko





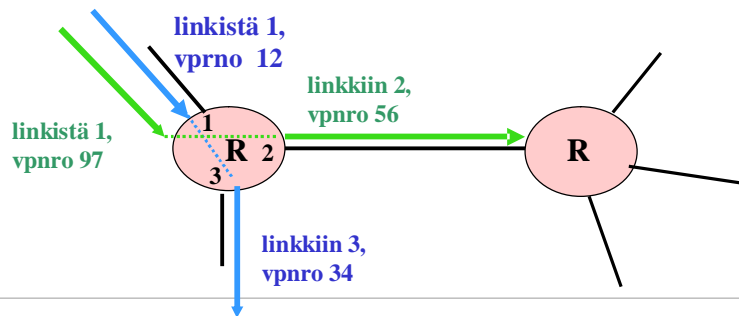
Reititys: Virtuaalipiiriverkko

n 1. paketti muodostaa reitin, muut paketit kulkevat samaa reittiä

n otsakkeessa kohdeosoitteen lisäksi virtuaalipiirinumero **vpnro**

n reititin ylläpitää tietoa piirinumeroista ('hajujälki')

Reititys = selvitä vpnro:a vastaava linkki, välitä paketti linkille



Virtuaalipiirin muunnostaulukko

Sisään: linkki / vpnro		Ulos: vpnro / linkki	
1	12	34	3
1	97	56	2
2	42	101	3
2	10	78	1
3	12	65	2

Taulukkoa päivitettävä aina kun uusi yhteys on muodostettu tai vanha purettu!

Pakettivälitystä: Ylläpitää kyllä tilatietoja yhteydestä (=vpnro), mutta ei varaa resursseja etukäteen!



Virtuaalipiirin muunnostaulukko

§ Virtuaaliyhteyden joka linkillä omat VP-numerot

§ reititin antaa VP-numerot

§ Miksi ei käytetä koko yhteydellä samaa
VP-numeroa?

§ Tarvittaisiin paljon enemmän numeroita!

Nyt riittää pienempi numeroavaruus =>

tarvitaan pienempi kenttä numeroa varten

0-255 => riittää 8 bittiä

0-4095 => tarvitaan 12 bittiä

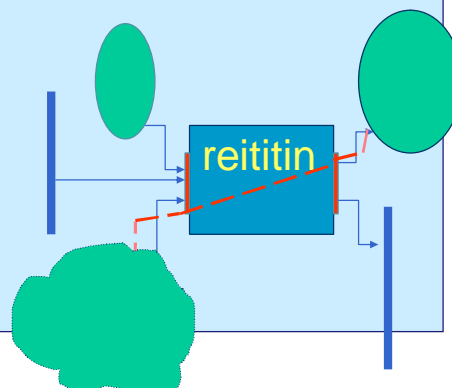
§ Yhteisestä, koko verkon läpikäyvästä numeroinnista
sopiminen on isossa verkossa lähes mahdoton tehtävä!



Verkkokerros

Reititin

Ch. 4.3





Verkkokerros ~ reittäminen

n Reitin (router)

- n Osaa muunnokset siihen kytkettyjen teknologioiden välillä
- n Sisääntulolinkki ja ulosmenolinkki voivat olla eri teknologiaa
- n Välittää verkkokerroksen otsakkeen perusteella (IP-osoite)
- n Laitteistotoimintona tai osin ohjelmallisesti

n Kytin (switch)

- n Sekä sisääntulolinkki että ulosmenolinkki ovat samaa teknologiaa
- n Lähiverkon sisällä välitys linkkikerroksen otsakkeen perusteella
- n Poikkeuksetta aina laitetason toimintona



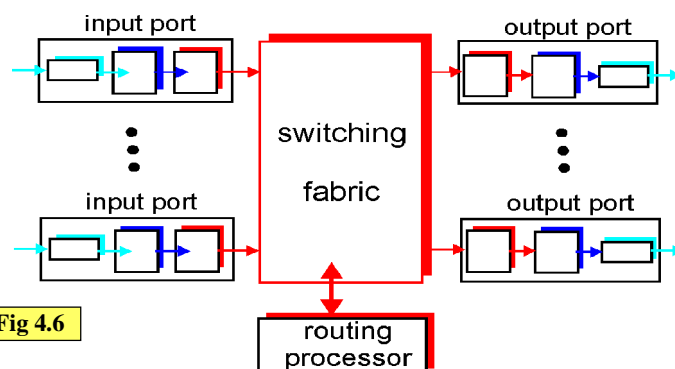
Reitittimen arkkitehtuuri

n Kaksi tehtävää

- n Välitä paketteja tulolinkeistä ulosmenolinkkeihin
- n Suorita reititys algoritmia / -protokollaa

n Portti ~ verkkokortti

- n Useita portteja niputettu yhteen linjakortiksi (line card)



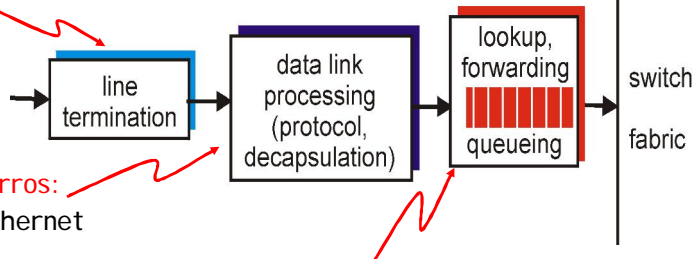


Sisääntuloportti (input port)

Fyysinen kerros
bittitaso esitys

KuRo08: Fig 4.7

Linkkikerros:
e.g., Ethernet



Tavoite: paketti ulos sisääntulon nopeudella

Jonotus: jos ulosmeno hitaampi kuin sisääntulo tai joku muu siirtää samaan ulostuloon

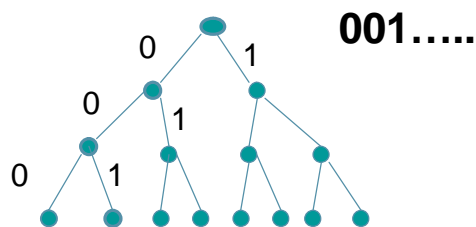
myös HOL (head-of-line blocking)

Jos linjanopeus 2.5 Gbps ja paketin koko 256 tavua => 1.2 miljoonaa pakettia sekunnissa!



Osoitteen

- 1. bitti
- 2. bitti
- 3. bitti
- jne



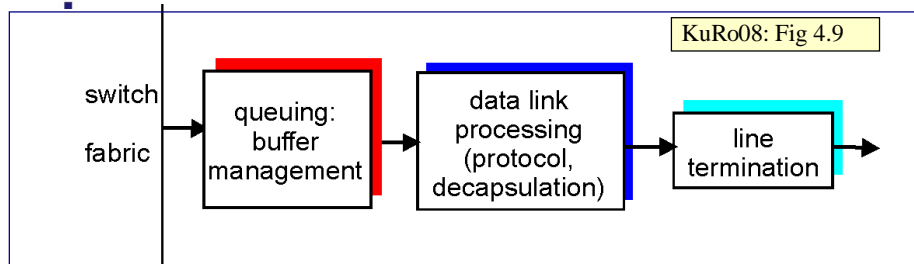
Kun $n = 32$ (IP-osoite), ei ole tarpeeksi nopea nykyisiin runkoreitittimiin!

- content addressable memory (CAM)
- välimuistin käyttö

Hajautettu kytkentä

Esim. kullakin portilla on kopio reititustaulusta, voi tutkia itse Content Addressable Memory (CAM), assosiativinen haku, **longest prefix match**

Ulosmenoportti (output port)



Puskuroi, jos paketteja tulee nopeammin kuin ulosmenon siirtonopeus salli

Sisääntulo nopeampi tai monesta samaan kohteeseen

Voi käyttää priorisointia (packet scheduling)

FCFS (First Come First Served), WFQ (Weighted Fair Queuing),...

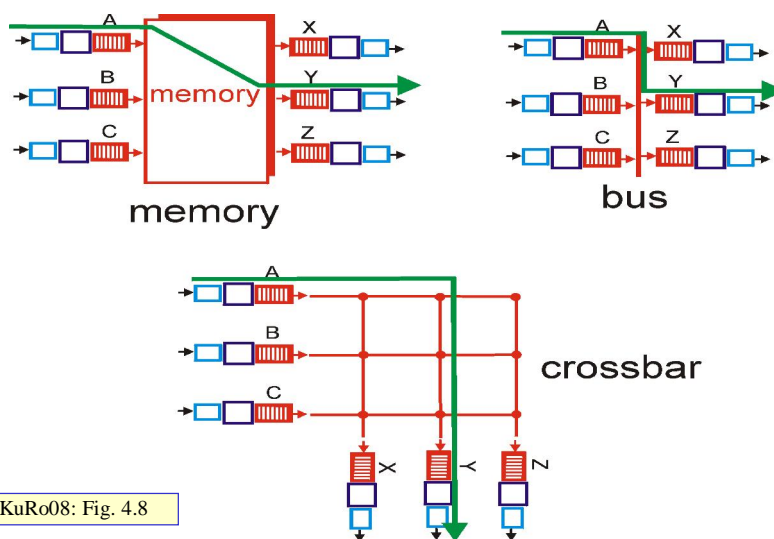
QoS (Quality of Service) (ei käsitellä tällä kursilla!)

Suorittaa linkki- ja fyysisen kerroksen operaatiot

Tietoliikenteen perusteet /2008/ Liisa Marttinen

19

Kolme erilaista kytkentätapaa:



Tietoliikenteen perusteet /2008/ Liisa Marttinen

20



KytKentä muistin kautta

n "Tavallinen" tietokone reitittimenä

- n Sisääntulo: keskeytys, CPU kopioi paketin muistiin, tutkii minne on menossa
- n Ulosmeno: CPU kopioi paketin muistista
- n Väylä pullonkaula: 2 kopiointia per paketti

n Linkkikerros ja fyysinen kerros laitetointoja

n Jonot keskusmuistissa



KytKentä väylän kautta

n Sisääntulo siirtää paketin väylän kautta suoraan ulosmenoporttiin

n Vain yksi kytKentä aktiivinen kerrallaan

- n Väylä edelleen pullonkaula

n Väylänopeus rajoittaa kytKentänopeutta

- n Gbps nopeudet, riittävä LAN- ja yritysverkoilla



KytKentä kytkentäverkon kautta

- n RistikytKentä (crossbar switch)
 - n $2 \cdot N$ väylää yhdistää N sisääntuloa ja N ulosmeno
 - n Valitse vaaka- ja pystylinja
- n Jos sama ulosmeno/sisääntulo, odotus sisääntuloportissa
 - n Sisääntulo voi pilkkoa paketin pienemmiksi soluiksi (cell) ja välittää yksi kerrallaan
 - n Ulostulo kokoaa solut taas paketeiksi
- n Suuri siirtonopeus
 - Esim. Cisco 12000: 64 Gbps



Reititysprosessori

- n Suorittaa reititysprotokollaa
 - n Reititysinformaation välitystä reitittimeltä toiselle
 - n RIP, OSPF, BGP,...
 - n Esim. 5 minuutin välein
- n Sisääntulot toimittavat reititysprotokollien paketit prosessorille
- n Ylläpitää porttien reititustauluja
 - n Kun muuttuu, uusi kopio kullekin portille
- n Hallinta- ja ylläpitotoimintoja
 - n Reitittimelläkin voi olla suoritettavana sovelluksia



Pakettien hylkäys

n Kun puskuritila ei riitä

- n Hylkää saapuva paketti (drop-tail) tai joku muu ..
- n Se kummassa jonossa paketit hylätään, riippuu kytkennän ja linjan nopeuden suhteista
- n **RED** (Random Early Detection): hylkää jo ennenkuin puskuritila täyttyy

n Siirtovirhe

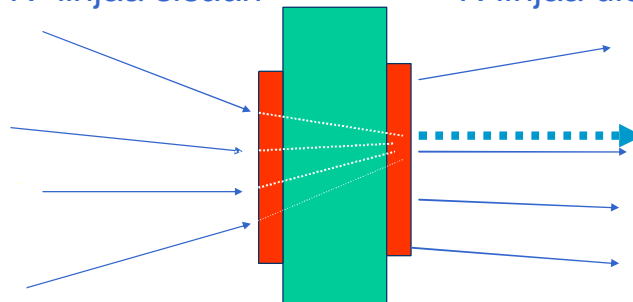
- n Linkkikerros saa hylätä virheellisen
- n Verkkokerros saa hylätä virheellisen (**ICMP-protokolla**)

n Paketin elinaika (Time-to-live , TTL)



N linjaa sisään

N linjaa ulos

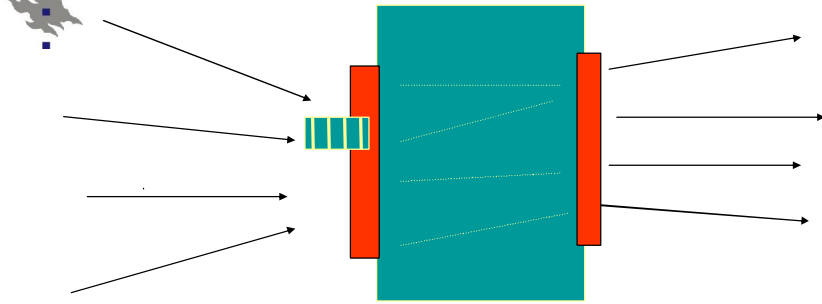


Kytkin toimii riittävällä nopeudella, joten sisääntulossa ei tarvitse jonottaa.

Yhdelle linjalle liian paljon liikennettä => ulosmenoportin puskuritila täyttyy ja paketteja katoaa!

■ N linjaa sisään

N linjaa ulos



Jos kytkin ei toimi tarpeeksi nopeasti, sisääntuloportteihin syntyy jonoja.

Esim. Ristikäinkytkimessä paketti joutuu odottamaan, jos samaan kohteeseen on menossa useita paketteja. Jonottava paketti voi tukkia tien myös muilta saman portin paketeilta, jotka muuten voisivat edetä kytkimessä.

(head-of-the-line-blocking)

Tietoliikenteen perusteet /2008/ Liisa Marttinen 27

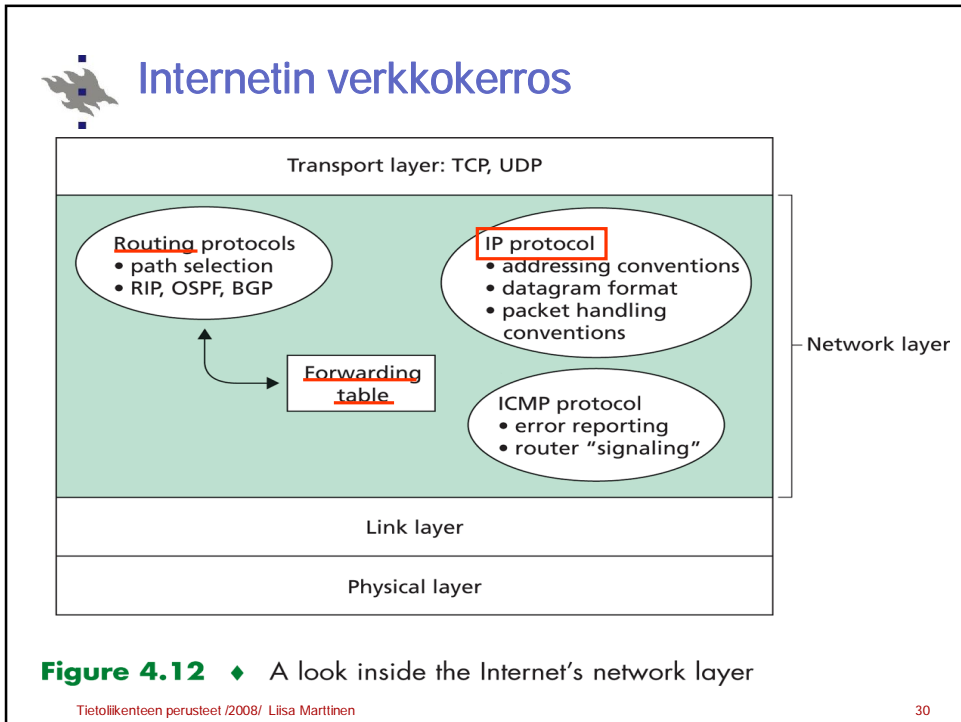
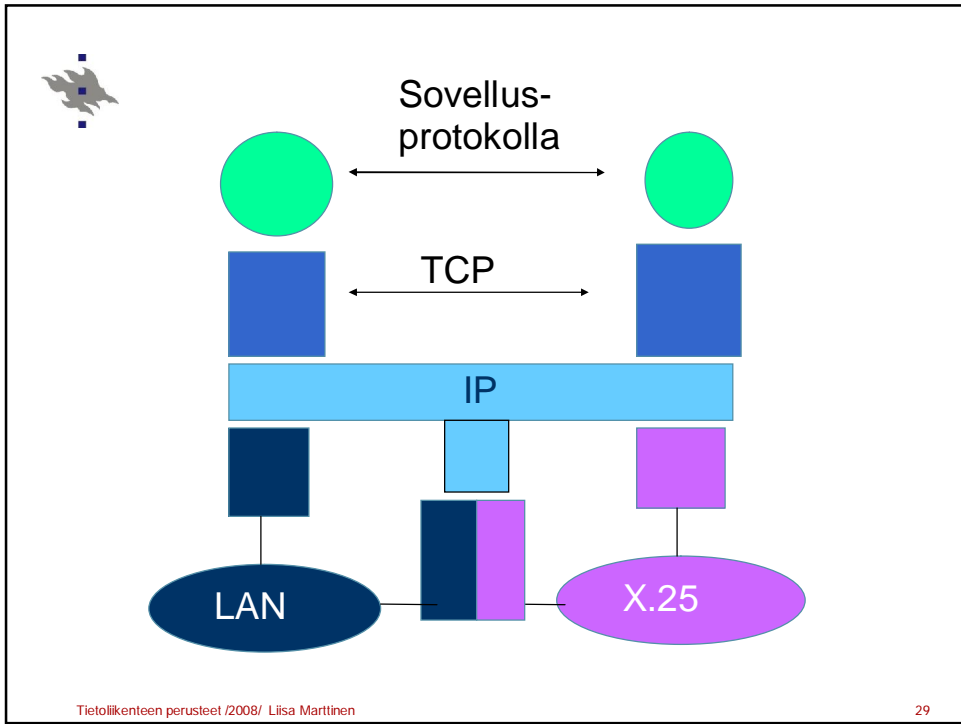
■ Verkkokerros

IP-protokolla

Ch 4.4

RFC 791

Tietoliikenteen perusteet /2008/ Liisa Marttinen 28





Internetin verkkokerros

n Tällä kurssilla:

- n IPv4 ja reitityksen periaatteet
 - Etäisyysvektorireititys
 - Linkkitilareititys

Internet-protokollat kurssilla:

n IPv6, ICMP

n Reititysprotokollat

- n Reititustaulujen (forwarding table) ylläpitämistä varten
Erillään tavallisten pakettien lähetyksestä
- n RIP (Routing Information Protocol): etäisyysvektorialgoritmi
- n OSPF (Open Shortest Path First): linkkitila-algoritmi
- n BGP (Border Gateway Protocol): hierarkkinen, autonomisten alueiden välinen algoritmi



Internetin verkkokerros

n ICMP (Internet Control Message Protocol)

- n Protokolla, jolla isännät ja reitittimet vaihtavat verkkokerroksen kuulumisia
- n Tavallaan verkkokerroksen päällä: IP-paketissa kuljetuskerroksen tietojen sijasta ICMP-dataa
- n Virheraportointi: unreachable host/network/port/protocol
Reititin ei tiedä, minne toimittaisi ...
- n Kaiutus: echo request / reply
tätä ping ja traceroute käyttävät RTT:n mittaamisessa

n IPv6

- n Uudistettu versio IP-protokollasta, 128 bitin IP-osoite
- n mm. kiinteänkokoinen otsake, ei tarkistussummaa,
- n pakettien paloittelu jo lähettäjän koneessa



IP-protokolla

- n Verkkokerros siirtää kuljetuskerroksen segmentit lähdekoneelta kohdekoneelle
- n Tehtävässä tarvitaan
 - n Osoitteet (lähettäjä, vastaanottaja)
 - n Tieto ylemmän kerroksen protokollasta (UDP, TCP tai joku muu), jotta osaa antaa oikealle rutiinille
 - n Liian ison IP-paketin paloittelu tarvittaessa pienemmiksi IP-paketeiksi
 - n 'Harhautuneiden' pakettien hävittäminen (time-to-live)
 - n Tarkistukset (checksum)
- n Hyviä ominaisuuksia (?)
 - n Siirtopalvelun eriyttäminen erityyppisille sovelluksille
 - n Lähdereititys (source routing): lähettäjä määrää reitin, paketissa tieto siirtopolusta



IP-paketin rakenne (IPv4)

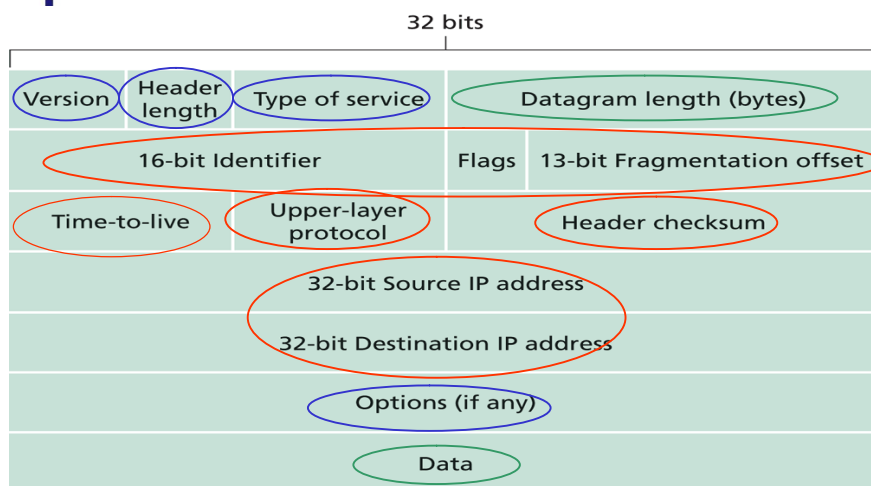


Figure 4.13 ♦ IPv4 datagram format



IP-otsake

- n Versionumero
 - n IPv4 vai IPv6, kummallakin erilainen otsake
- n Otsakkeen pituus (header length)
 - n Vaihtelevan pituinen optiokenttä, **mininimi on 20 B**
- n TOS-kenttä (Type of Service)
 - n Varattu halutun palvelun kertomiseen:
 - Nopeus, luotettavuus, kapasiteetti; ääni vs. tiedosto
 - n Yleensä ei ole käytössä (osa käytössä uusissa reitittimissä)
- n IP-paketin pituus (Datagram length)
 - n Koko IP-paketin pituus tavuina, maksimi 65535 B
 - n Tavallisimmin 576-1500 B
- n Paketin tunniste (16-bit identifier), lippuja (flags), palan paikka (fragmentation offset)
 - n Paketin pilkkomiseen pienemmiksi ja kokoamiseen takaisin isoksi



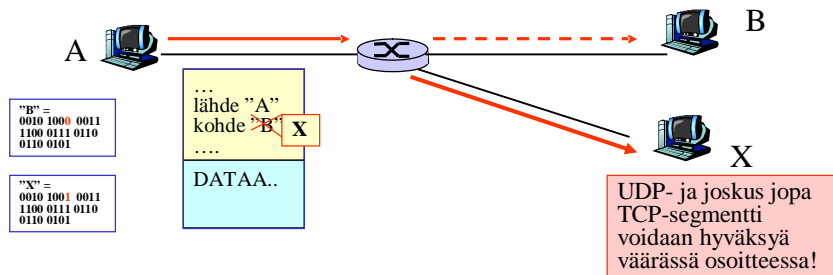
IP-otsake (jatkuu)

- n Elinaika (time-to-live, TTL)
 - n Rajoittaa paketin elinaikaa, maksimi 255
 - n Vähenee joka hypyllä reitittimestä toiseen, kun TTL=0, hylätään
- n Kuljetettu protokolla (Upper-layer protocol)
 - n Kumpi kuljetuskerroksen protokolla (TCP=6, UDP=17) vai kenties verkkokerroksen sisäistä dataa (ICMP, reititysprotokolla)
- n Otsikon tarkistussumma (Header checksum)
 - n Vain otsakkeelle (Internet checksum)
 - n Tarkista ja laske uusi joka reitittimessä (TTL, Options)
 - n Hylkää virheellinen paketti
- n Osoitteet (Source IP Address, Destination IP Address)
 - n Lähteen ja kohteen IP-osoitteet
- n Optiot (Options)
 - n Laajennuksia: mm. lähdereitys, harvoin käytetty



IP-otsakkeen tarkistussumma

Miksi tarkistussumma IP-otsakkeelle?



Miksi vain otsakkeelle?
TCP:llä ja UDP:llä omat tarkistussummat.



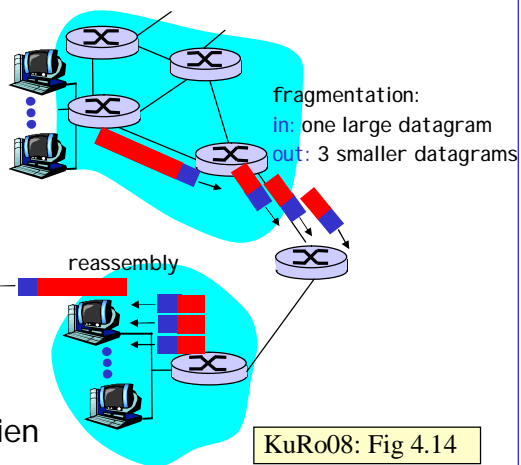
IP-pakettien paloittelu (fragmentointi)

Maximum transfer Unit (MTU)

suurin mahdollinen IP-paketti
eri linkeillä eri koko
Esim. Ethernet 1500 B

Liian iso paketti pilkottava reitittimessä pienemmiksi paketeiksi (fragmenteiksi), jotka **kohdekone** kokoaa voivat kukin kulkea eri reittiä

IP-otsakkeessa kentät yhteenkuuluvien fragmenttien tunnistamiseksi





IP-pakettien fragmentointikentät

- n **Paketin tunniste** (16-bit identifier)
 - n Sama kaikissa IP-paketin fragmenteissa
- n **Lippuja** (flags)
 - n **DF-bitti** (Don't fragment) kieltää paloittelun, esim. jos vastaanottaja ei kykene kokoamaan
 - n **MF-bitti** (More fragments)
 - 0= paketin viimeinen fragmentti, 1= ei vielä viimeinen
- n **Fragmentin sijaintipaikka** (13-bit Fragmentation Offset)
 - n paikka alkuperäisessä IP-paketissa siirtymänä paketin alusta
 - n 13 bittiä => 8192 eri arvoa; Jotta pystyisi käsittelemään täysimittaiset segmentit (= max 65535 tavua) => siirtymä esitetään 8 tavun monikertoina => fragmenttien myös oltava 8 tavun monikertoja (paitsi viimeinen)
- n IPv6 ei käytä fragmentointia

Tietoliikenteen perusteet /2008/ Liisa Marttinen

39



Esimerkki

length	ID	fragflag	offset
=4000	=x	=0	=0

4000 tavun IP-paketti:
dataa 3980 B
MTU 1500 B

Yhdestä IP-paketista tulee
3 pienempää IP-pakettia

1480 B dataa
20 B IP-otsaketta

offset = 1480/8

length	ID	fragflag	offset
=1500	=x	=1	=0

length	ID	fragflag	offset
=1500	=x	=1	=185

length	ID	fragflag	offset
=1040	=x	=0	=370

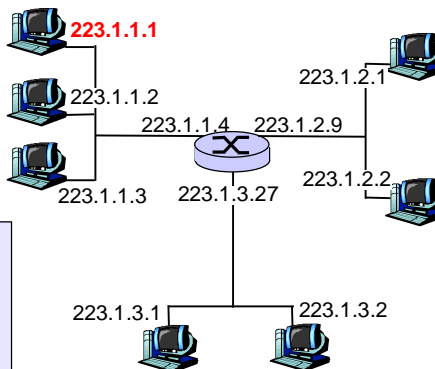
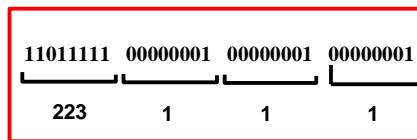
0	1480	2860
1. Pala: 1480 tavua	2. Pala: 1480 tavua	3. Pala: 1020 tavua

Tietoliikenteen perusteet /2008/ Liisa Marttinen

40

IP-osoitteet

- n 32 bittinen tunniste isäntäkoneille ja reitittimien linkeille
 - verkko liittymän tunniste
- n Reitittimellä useita liittymiä
 - kullakin oma IP-osoite
- n Myös isäntäkone voi olla liitettyinä useaan verkkoon

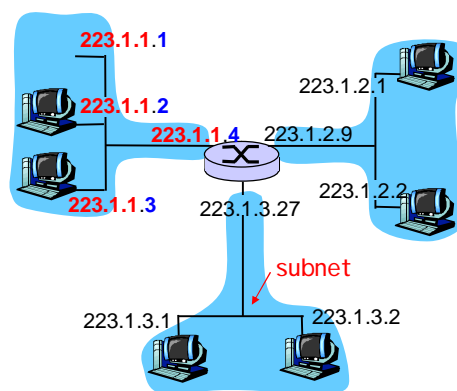


KuRo08:Fig 4.15

ICANN Internet Corporation for Assigned names and Numbers
verkkonumerot palvelun tarjoajille,
nämä edelleen aliverkoiksi

Aliverkot

- n Osoitteen osat
 - aliverkon numero (alkuosa)
 - koneen numero (loppuosa)
- n Aliverkon koneet voivat kommunikoida ilman reititystä
 - Linkkikerros osaa lähettää koneelta toiselle
 - Esim. Ethernet
- n Aliverkkoa merkitään notaatiolla, jossa lopussa on verkko-osan pituus
 - Esim. 223.1.1.0 /24 subnet mask
 - eli verkko-osoite 24 bittä ja koneosoite 8 bittä



network consisting of 3 subnets

KuRo08: Fig 4.15



Aliverkot

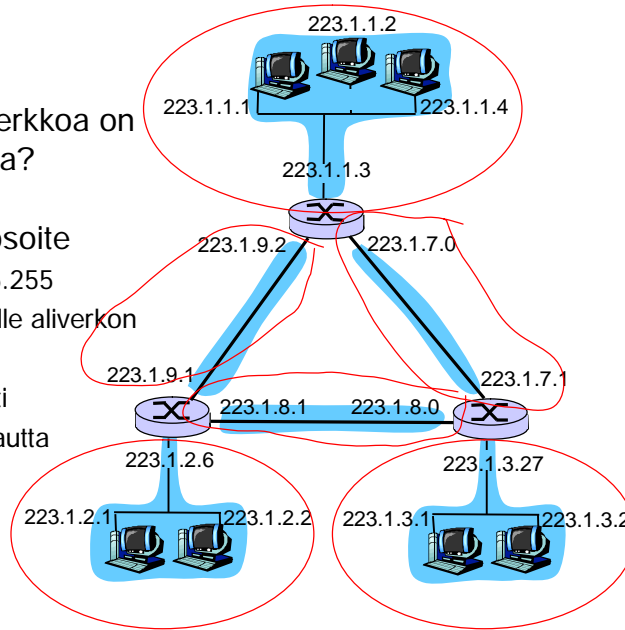
n Montako aliverkkoa on tässä kuvassa?

n Yleislähetysosoite

n 255.255.255.255

n Paketti kaikille aliverkon koneille.

n Mahdollisesti reitittimen kautta muillekin



CIDR: Classless InterDomain Routing

n Verkko-osa voi olla minkä tahansa kokoinen

Vanha luokallinen osoite: A-luokka 8 b, B-luokka 16 b, C-luokka 24 b

n Formaatti: a.b.c.d/x

x ilmoittaa verkko-osan bittien lukumäärän (prefix)

Esim. Organisaatio, jolla 2000 konetta varaa $2048 = 2^{11}$ konenumeroa, jolloin verkko-osaa varten jää 21 bittiä

Yritys voi vielä itse jakaa viimeiset 11 bittiä aliverkko-osoitteeksi ja koneosoitteeksi. Tämä jako ei näy ulkopuolelle.





Koneen IP-osoite

n Palveluntarjoaja saa verkkonumeronsa ICANN:lta isona lohkona

n voi jakaa saamansa osoiteavaruuden (osoitelohkon) edelleen aliverkkoihin

esim. Kukin organisaatio saa aliverkon, jossa on numerot 512 koneelle

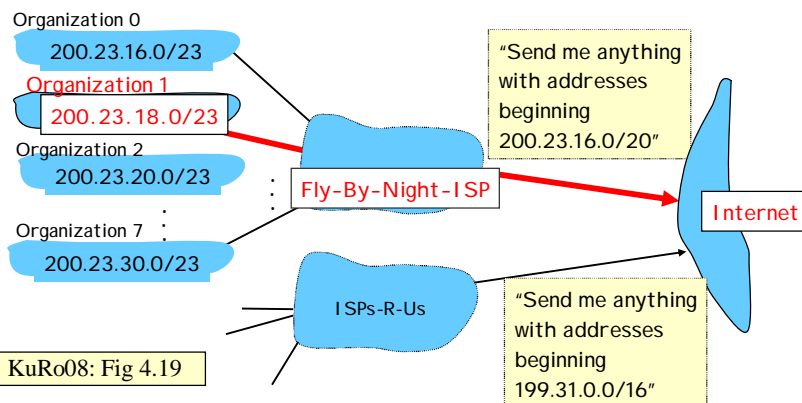
ISP's block	<u>11001000</u>	<u>00010111</u>	<u>00010000</u>	00000000	200.23.16.0/20
Organization 0	<u>11001000</u>	<u>00010111</u>	<u>00010000</u>	00000000	200.23.16.0/23
Organization 1	<u>11001000</u>	<u>00010111</u>	<u>00010010</u>	00000000	200.23.18.0/23
Organization 2	<u>11001000</u>	<u>00010111</u>	<u>00010100</u>	00000000	200.23.20.0/23
...
Organization 7	<u>11001000</u>	<u>00010111</u>	<u>00011110</u>	00000000	200.23.30.0/23



Hierarkkinen osoite

n CIDR luo reititystä helpottavan hierarkian

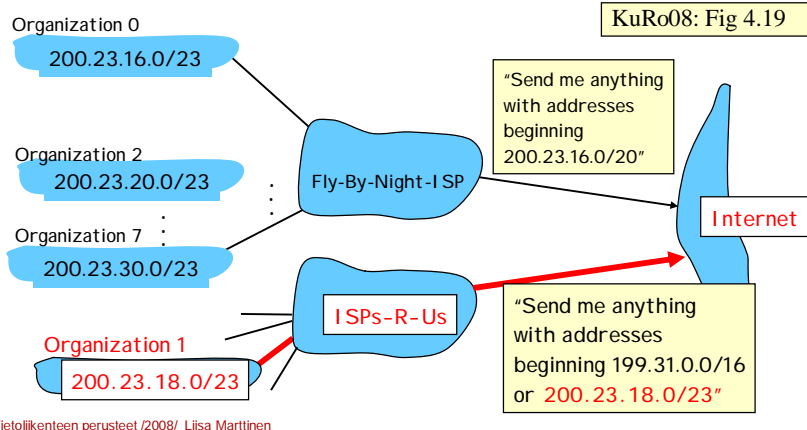
n Aggregointi (yhdistäminen): yhteinen alkuosa => samaan suuntaan





Jos palveluntarjoaja (ISP) vaihtuu?

- IP-osoitteet voi säilyttää
- Uudelta ISP:ltä tarkempi reititysohje
- Pisin sopiva alkuosa määrää reitityksen (longest prefix match)

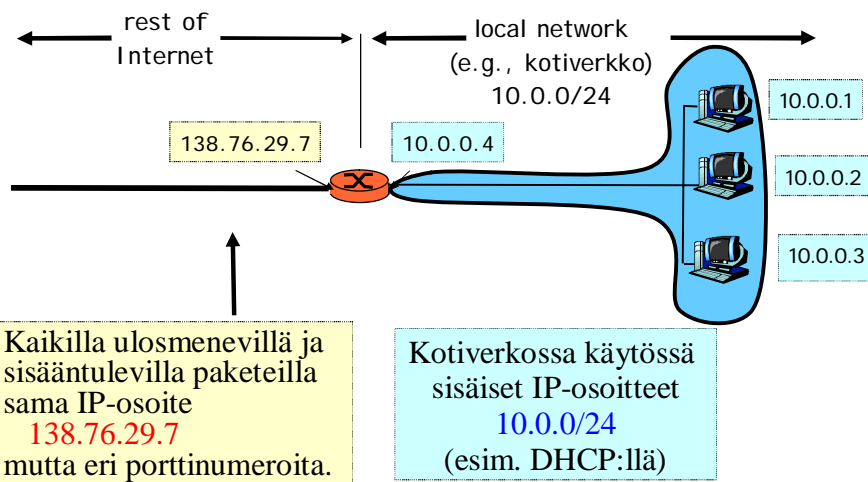


Koneen IP-osoite

- Koneen IP-osoite konfiguroidaan (usein) käsin koneelle
- Tai yhä useammin saadaan automaattisesti käyttäen **DHCP**:tä (Dynamic Host Configuration Protocol)
 - Eri osoite eri kerroilla tai pysyvämpi osoite
 - DHCP-palvelija vastaa
 - antaa koneen käyttöön IP-osoitteen (rajallinen elinaika)
 - antaa DNS-tiedot
 - yms
 - Palvelun tarjoaja: pienempi numeromäärä riittää
 - WLAN
 - "wash-and-go", "plug-and-play"



NAT: Network Address Translation



NAT-reititin

n Ulosmenevät paketit

- n Korvaa lähdekoneen IP-osoite ja porttinumero NAT-koneen IP-osoitteella ja NAT-koneen valitsemalla porttinumerolla
- n Päivitä NAT-muunnostaulu

n Sisääntulevat paketit

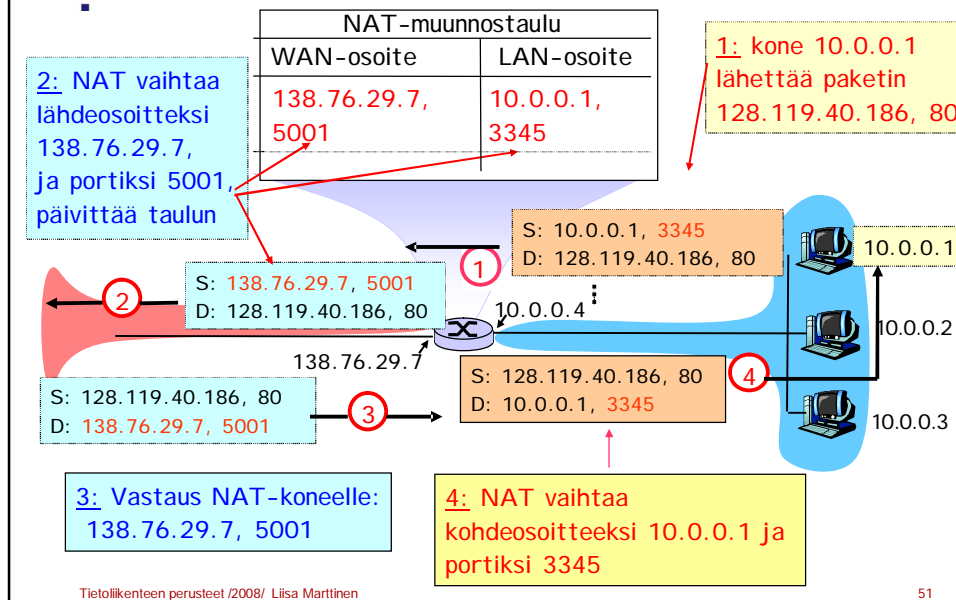
- n NAT-koneelle NAT:n antamaan porttiin
- n Korvaa NAT:n muunnostaulun avulla paketissa oleva IP-osoite ja portti
- n Välitä paketti perille

n NAT-muunnostaulu

- n (IP-osoite, portti) (NAT-koneen osoite, NAT:n portti)



NAT: Esimerkki



NAT: Kommentteja / kritiikkiä

Hyödyt

- n Kotiverkko tarvitsee ISP:ltä vain yhden IP-osoitteen
- n Voi muuttella vapaasti kotikoneiden IP-osoitteita
- n Turvallisuus: ulospäin muille näkyy vain yksi kone

Kritiikkiä

- n Reitittimien tulisi toimia vain verkkotasolla, porttinumerot ovat kuljetuskerroksen asioita
- n Rikkoo päästä-päähän idean (prosessien välinen yhteys)
- n Onko ohjelmoijaan huomioitava NAT:n olemassaolo?
 - Peer-to-peer
 - NAT:n takana oleva palvelin (esim. www portissa 80)?
- n Pula IP-osoitteista hoidettava ottamalla käyttöön IPv6, jossa 128 bitin osoitteet



Verkkokerros

Reititysalgoritmit



Reititysalgoritmi

- n **Etsi edullisimmat reitit lähdekoneelta kohdekoneille**
 - n Käytetään reititystaulun muodostamiseen
 - Mille linkille paketti seuraavaksi siirretään tältä reitittimeltä
- n **Reititysalgoritmi, joka tarvitsee täydellisen tiedon verkosta**
 - n Ennen laskentaa käytössä koko kuva verkosta:
 - Kaikki linkkiyhteydet solmujen välillä ja niiden kustannukset
 - Käytännössä vain tietystä autonomisesta alueesta
 - n Parhaat reitit lasketaan joko keskitetysti tai hajautetusti
 - n **Linkkitila-algoritmi** (link-state algorithm)
- n **Reititysalgoritmi, jolle riittää epätäydellinen kuva verkosta**
 - n Aluksi reititin tietää vain niistä koneista, joihin itse on yhdistetty
 - n Iteratiivinen algoritmi: reititin vaihtaa tietoja naapuriensa kanssa ja saa tietoa muusta verkosta
 - n **Etäisyysvektorialgoritmi** (distance vector algorithm)



Reititysalgoritmin muita ominaisuuksia

n Dynaaminen vs. staattinen

- n Miten nopeasti huomaa linkkien muutokset ja muuttaa reititystä
- n Miten tiuhaan tietoja päivitetään
- n Miten usein muutoksia

n Kuormituksen huomioiva vs. ei

- n Linkin ruuhkautuneisuus voi vaikuttaa sen kustannukseen
- n Nykyalgoritmit eivät ota kuormitusta huomioon
 - Tosin kyllä epäsuorasti linkin hitautena ('kustannuksena')



Verkko graafina (graph)

Verkko $G = (N, E)$

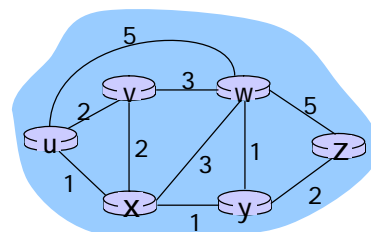
N = solmujen (nodes) joukko

E = linkkien (edges) joukko

(x, y) on linkki solmujen x ja y välillä

$c(x, y)$ = linkin kustannus

kaistanleveys, ruuhkaisuus, raha, ..



KuRo08; Fig. 4.27

$C(x_1, x_2, \dots, x_p)$ = reitin (route) kustannus

$$= C(x_1, x_2) + C(x_2, x_3) + \dots + C(x_{p-1}, x_p)$$

Mikä on huokein reitti kuvan solmusta u solmuun z ?



1) Linkkitila: Dijkstran algoritmi

- n Aluksi kaikilla reitittimillä on tiedossa verkon rakenne ja kaikkien linkkien kustannukset
 - n Kaikki reitittimet lähettävät tietonsa naapureistaan ja linkkikustannuksista naapureihin (mitatut /havaitut) joko kaikille muille tai jollekin keskussolmulle, joka välittää tiedon muille
- n Reititin laskee **Dijkstran algoritmilla** edullisimman kustannuksen kaikkiin muihin kohteisiin
 - n Kokoaa näistä oman reititystaulunsa
- n Merkinät

$C(x,y)$ linkin x,y kustannus; jos eivät naapureita = ∞

$D(v)$ toistaiseksi edullisin kustannus solmuun v

$p(v)$ solmun v edeltäjä reitillä

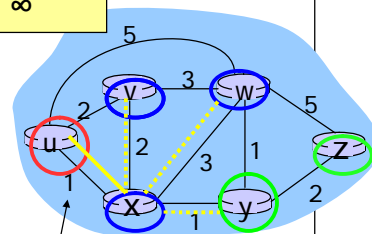
N = solmujen joukko, N' = jo käsitellyjen solmujen joukko



Dijkstran algoritmi

- 1 **Initialization:**
- 2 $N' = \{u\}$
- 3 for all nodes v
- 4 if v adjacent to u
- 5 then $D(v) = c(u,v)$
- 6 else $D(v) = \infty$
- 7
- 8 **Loop**
- 9 find w not in N' such that $D(w)$ is a minimum
- 10 add w to N'
- 11 update $D(v)$ for all v adjacent to w and not in N' :
- 12 $D(v) = \min(D(v), D(w) + c(w,v))$
- 13 /* new cost to v is either old cost to v or known shortest path cost to w plus cost from w to v */
- 14
- 15 **until all nodes in N'**

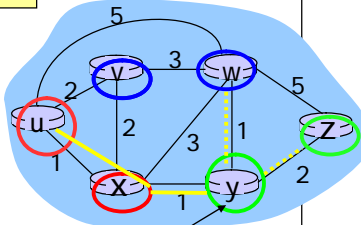
$D(v)=2, D(w)=5, D(x)=1$
 $D(y) = \infty, D(z) = \infty$



Dijkstra algoritmi 2

$D(x)=1, D(v)=2, D(w)=4, D(y) = 2, D(z)=\infty$

$D(x)=1, D(v)=2, D(w)=3, D(y) = 2, D(z)=4$



8 **Loop**

- 9 find w not in N' such that $D(w)$ is a minimum
- 10 **add w to N'**
- 11 update $D(v)$ for all v adjacent to w and not in N' :
- 12 $D(v) = \min(D(v), D(w) + c(w,v))$
- 13 /* new cost to v is either old cost to v or known
- 14 shortest path cost to w plus cost from w to v */
- 15 **until all nodes in N'**

Tietoliikenteen perusteet /2008/ Liisa Marttinen

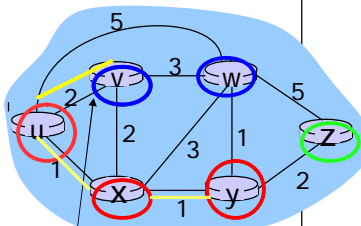
59

Dijkstra algoritmi 3

$D(x)=1, D(v)=2, D(w)=4, D(y) = 2, D(z)=\infty$

$D(x)=1, D(y) = 2, D(v)=2, D(w)=3, D(z)=4$

$D(x)=1, D(y) = 2, D(v)=2, D(w)=3, D(z)=4$



8 **Loop**

- 9 find w not in N' such that $D(w)$ is a minimum
- 10 **add w to N'**
- 11 update $D(v)$ for all v adjacent to w and not in N' :
- 12 $D(v) = \min(D(v), D(w) + c(w,v))$
- 13 /* new cost to v is either old cost to v or known
- 14 shortest path cost to w plus cost from w to v */
- 15 **until all nodes in N'**

Tietoliikenteen perusteet /2008/ Liisa Marttinen

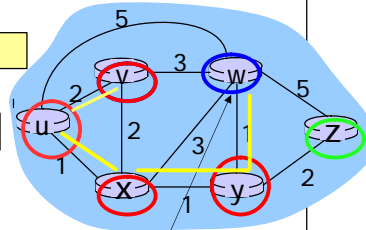
60

Dijkstra algoritmi 4

$D(x)=1, D(v)=2, D(w)=4, D(y)=2, D(z)=\infty$

$D(x)=1, D(y)=2, D(v)=2, D(w)=3, D(z)=4$

$D(x)=1, D(y)=2, D(v)=2, D(w)=3, D(z)=4$



8 **Loop**

9 find w not in N' such that $D(w)$ is a minimum

10 **add w to N'**

11 update $D(v)$ for all v adjacent to w and not in N' :

12 $D(v) = \min(D(v), D(w) + c(w,v))$

13 /* new cost to v is either old cost to v or known

14 shortest path cost to w plus cost from w to v */

15 **until all nodes in N'**

Tietoliikenteen perusteet /2008/ Liisa Marttinen

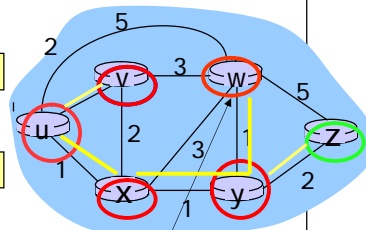
61

Dijkstra algoritmi 4

$D(x)=1, D(y)=2, D(v)=2, D(w)=3, D(z)=4$

$D(x)=1, D(y)=2, D(v)=2, D(w)=3, D(z)=4$

$D(x)=1, D(y)=2, D(v)=2, D(w)=3, D(z)=4$



8 **Loop**

9 find w not in N' such that $D(w)$ is a minimum

10 **add w to N'**

11 update $D(v)$ for all v adjacent to w and not in N' :

12 $D(v) = \min(D(v), D(w) + c(w,v))$

13 /* new cost to v is either old cost to v or known

14 shortest path cost to w plus cost from w to v */

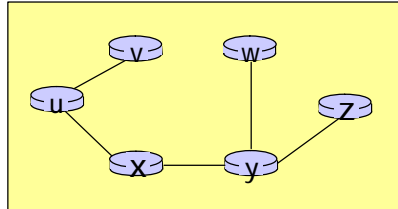
15 **until all nodes in N'**

Tietoliikenteen perusteet /2008/ Liisa Marttinen

62

Lyhyimmät reitit ja reititystaulukko

Resulting shortest-path tree from u:



KuRo08: Fig. 4.28

Resulting forwarding table in u:

destination	link
v	(u,v)
x	(u,x)
y	(u,x)
w	(u,x)
z	(u,x)

Tietoliikenteen perusteet /2008/ Liisa Marttinen

63

2) Etäisyysvektoreititys (distance vector)

n Arpanet-verkon alkuperäinen reititysalgoritmi

- n Käytössä useissa Internetin reititysprotokollissa
RIP, BGP, Novell IPX, ISO IDRP

n Interaktiivinen, hajautettu ja asynkroninen

n Tiedot tarkentuvat asteittain, iteratiivisesti

- n Tietyin väliajoin, linkin tilan vaihtuessa, naapurin tietojen muuttuessa, ..

n Kukin solmu laskee itsenäisesti, mutta saa tietoa naapureiltaan

- n Tietää / arvioi kustannuksen omiin naapureihinsa
- n Kuulee naapureiden kustannukset muihin kohdesolmuihin, jotka nämä puolestaan ovat kuulleet omilta naapureiltaan
- n Valitsee kullekin kohdesolmulle kuulemansa edullisimman reitin

Tietoliikenteen perusteet /2008/ Liisa Marttinen

64

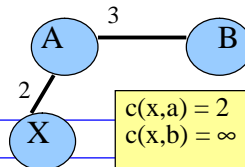


Etäisyysvektoreireitys (jatkuu)

- n Kullakin reitittimellä etäisyysvektori sen tuntemiin solmuihin
 - n Reititystaulu, jossa kullekin kohteelle ulosmenolinkki ja kustannus (etäisyys)
 - Aika /etäisyys kohteeseen, hyppyjen lukumäärä, arvioitu viive,..
- n Reititin tietää /mittaa kustannuksen omiin naapureihinsa
- n Jos muutoksia, lähettää etäisyysvektorinsa naapureilleen
- n Kun saa naapurinsa etäisyysvektorin, päivittää oman etäisyysvektorinsa
 - n Tietoja uusista solmuista => lisää taulukkoon uudet kohteet
 - n Tietoja jo tunnetuista solmuista: valitse kustannuksiltaan edullisin reitti



Etäisyysvektoreireitys



$$c(x,a) = 2$$

$$c(x,b) = \infty$$

$$D_a^a(B) = 3$$

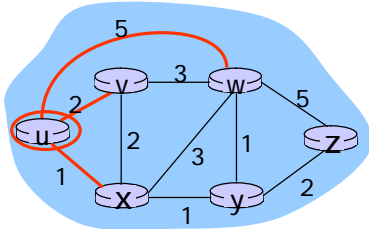
$$D_x^a(B) = 2 + 3 = 5$$

Merkinnät

- $c(x,v)$ kustannus solmusta x naapuriin v ,
jos v ei ole x :n naapuri, $c(x,v) = \infty$
- $D_x(y)$ edullisimman x :stä y :hyn johtavan reitin kustannus
- n Kukin solmu ylläpitää omaa etäisyysvektoria kaikkiin tuntemiinsa kohteisiin $D_x = [D_x(y): y \in N]$
 - n edullisin tiedetty kustannus solmusta x kuhunkin solmuun y
- n Sekä saa naapureiltaan niiden etäisyysvektorit

$$D_v(y) = [D_v(y): y \in N] = \text{Naapurin } v \text{ tiedot edullisimmista kustannuksista kuhunkin solmuun } y$$
- n $D_x(y) = \min \{c(x,v) + D_v(y)\}$ (Bellman-Ford)
 - n Kustannus solmusta x naapurisolmuun v ja sieltä solmuun y
 - n Reittejä useita (eri naapureiden kautta); valitaan edullisin eli pienin kustannus

Esimerkki 1



Kohde	kust.	linkki
Z	4	X:ään

Jos on jo saatu selville, että
 $D_v(z) = 5, D_x(z) = 3, D_w(z) = 3$

$$D_u(z) = \min \{ c(u,v) + d_v(z), \\ c(u,x) + d_x(z), \\ c(u,w) + d_w(z) \} \\ = \min \{ 2 + 5, \\ 1 + 3, \\ 5 + 3 \} = 4$$

Kun paketti on matkalla solmusta u solmuun z, se tulee seuraavaksi lähettää solmuun x, joka tuotti tuon minimin => talleta tieto omaan etäisyysvektoriin (= reititystauluun)

ESIMERKKI 2.

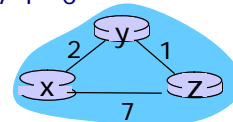
Alussa kukin solmu tuntee vain etäisyydet naapureihinsa itsensä kautta:

Node x table		cost to		
		x	y	z
from	x	0	2	7
from	y	∞	∞	∞
from	z	∞	∞	∞

Node y table		cost to		
		x	y	z
from	x	∞	∞	∞
from	y	2	0	1
from	z	∞	∞	∞

Node z table		cost to		
		x	y	z
from	x	∞	∞	∞
from	y	∞	∞	∞
from	z	7	1	0

Sitten solmut lähettävät omat reittinsä toisilleen ja laskevat uudet parhaat reitit.



Esimerkiksi solmu x:

	x	y	z
x	0	2	3
y	2	0	1
z	7	1	0

$$D_x(y) = \min\{c(x,y) + D_y(y), c(x,z) + D_z(y)\} \\ = \min\{2+0, 7+1\} = 2$$

$$D_x(z) = \min\{c(x,y) + D_y(z), c(x,z) + D_z(z)\} \\ = \min\{2+1, 7+0\} = 3$$



Esimerkki 2 jatkuu:

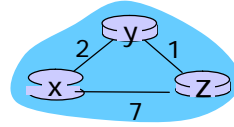
Samalla tavalla toimivat solmut y ja z:

y: cost to

	x	y	z
from x	0	2	7
from y	2	0	1
from z	7	1	0

Z: cost to

	x	y	z
from x	0	2	7
from y	2	0	1
from z	3	1	0



Solmut lähettävät taas tietonsa toisilleen ja laskevat uudet uudet lyhimmät reitit.

X: cost to

	x	y	z
from x	0	2	3
from y	2	0	1
from z	3	1	0

Y: cost to

	x	y	z
from x	0	2	3
from y	2	0	1
from z	3	1	0

Z: cost to

	x	y	z
from x	0	2	3
from y	2	0	1
from z	3	1	0



$$D_x(y) = \min\{c(x,y) + D_y(y), c(x,z) + D_z(y)\} = \min\{2+0, 7+1\} = 2$$

$$D_x(z) = \min\{c(x,y) + D_y(z), c(x,z) + D_z(z)\} = \min\{2+1, 7+0\} = 3$$

node x table

	x	y	z
from x	0	2	7
from y	∞	∞	∞
from z	∞	∞	∞

	x	y	z
from x	0	2	3
from y	2	0	1
from z	7	1	0

	x	y	z
from x	0	2	3
from y	2	0	1
from z	3	1	0

node y table

	x	y	z
from x	∞	∞	∞
from y	2	0	1
from z	∞	∞	∞

	x	y	z
from x	0	2	7
from y	2	0	1
from z	7	1	0

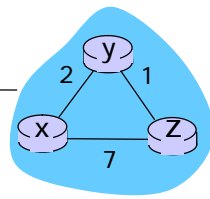
	x	y	z
from x	0	2	3
from y	2	0	1
from z	3	1	0

node z table

	x	y	z
from x	∞	∞	∞
from y	∞	∞	∞
from z	7	1	0

	x	y	z
from x	0	2	7
from y	2	0	1
from z	3	1	0

	x	y	z
from x	0	2	3
from y	2	0	1
from z	3	1	0



Hyvä uutinen etenee nopeasti

Aluksi yhteys A:han on poikki ja sitten linkki AB toimii taas

Tieto etenee joka vaihdossa yhden linkin yli

	Etäisyys A:han			
	$D_B(A)$	$D_C(A)$	$D_D(A)$	$D_E(A)$
	ääretön	ääretön	ääretön	ääretön
1	1	ääretön	ääretön	ääretön
1	1	2	ääretön	ääretön
1	1	2	3	ääretön
1	1	2	3	4

Tietoliikenteen perusteet /2008/ Liisa Marttinen 71

Huono uutinen etenee hitaasti!

Linkki AB katkeaa => etäisyys äärettömäksi

Joka vaihdossa 'paras arvio' huononee vain yhdellä = reitityssilmukka

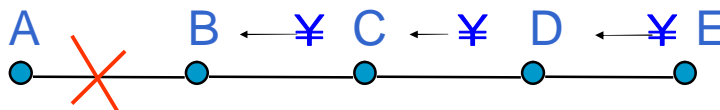
Count-to-infinity -ongelma

	$D_B(A)$	$D_C(A)$	$D_D(A)$	$D_E(A)$
	ääretön	2	3	4
3	3	2	3	4
3	3	4	3	4
5	5	4	5	4
5	5	6	5	6
7	7	6	7	6
7	7	8	7	8
jne	jne			

Etäisyys A:han

Tietoliikenteen perusteet /2008/ Liisa Marttinen 72

Huono uutinen etenee nopeasti:
“poisoned reverse”



Ratkaisu count-to-infinity-ongelmaan!

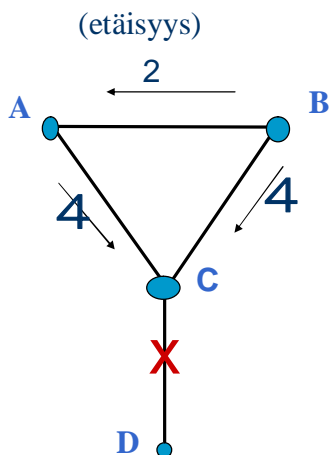
Ilmoita etäisyys äärettömäksi naapurille, jonka kautta linkki kulkee. Kerro muille oikea etäisyys.

Etäisyys A:han

$D_B(A)$	$D_C(A)$	$D_D(A)$	$D_E(A)$
∞	2	3	4
∞	∞	3	4
∞	∞	∞	4
∞	∞	∞	∞

Tieto etenee joka vaihdossa yhden linkin yli

Ratkaisu ei toimi aina!



Linkki CD katkeaa, A ja B ilmoittavat C:lle, ettei D:hen pääse (käytössä ‘poisonous reverse’ eli etäisyys “ääretön”)

C päättelee (oikein), että D:tä ei voi saavuttaa ja kertoo tämän A:lle ja B:lle eli että $c(C,D) = \infty$

Mutta A kuulee B:ltä, että sillä on etäisyys 2 D:hen => A:n oma etäisyys D:hen := 3 ja tämä reitti ei kulje C:n kautta! => kerrotaan C:lle.

C kertoo B:lle, ...



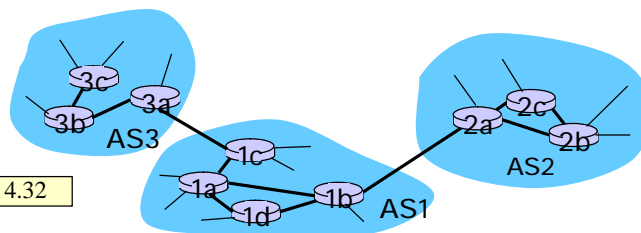
3) Hierarkkinen reititys

- n Reitityksen skaalautuus?
 - n Isossa verkossa runsaasti reitittämiä
 - Kaikki eivät voi tuntea kaikkia muita
 - Reititystaulut suuria, reittien laskeminen raskasta
 - Reititystietojen vaihtaminen kuluttaa linjakapasiteettia
- n Autonomiset järjestelmät AS (Autonomous Systems)
 - n Internet - verkkojen verkko
- n Intra-AS routing
 - n Kukin verkko päättää itse sisäisestä reitityksestään
 - n RIP, OSPF
- n Inter-As routing
 - n AS:t ilmoittelevat toisilleen, mihin muihin AS:iin niistä pääsee
 - n BGP (Border Gateway Protocol)



Hierarkkinen reititys

- n Yhdyskäytävä (gateway router)
 - n Sovittu, mikä reititin keskustelelee naapuriverkon (-verkkojen) kanssa
 - n ulkoatuleva/ ulosmenevä paketti reitittyy yhdyskäytävään
 - n AS:n sisäinen reititys huolehtii paketin AS:n koneelle tai AS:n läpi toiselle AS:lle



KuRo08: Fig 4.32

Kertauskysymyksiä

- n Keskeisimmät IP-osakkeen tiedot?
- n Paketin paloittelu
- n Millainen on IP-osoite?
- n Reitittimen arkkitehtuuri?
- n Longest prefix match?
- n CIDR
- n NAT:n toiminta
- n Miten reititin saa reititystiedot?
- n Linkkitila-algoritmi, Dijkstran algoritmi
- n Etäisyysvektorialgoritmi, count-to-infinity-ongelma



ks. kurssikirja s. 417