Tietoliikenteen perusteet

Verkkokerros

Kurose, Ross: Ch 4.1- 4.5

Sisältöä

- Verkkokerros
- Reititin
- IP-protokolla
- Reititysalgoritmit

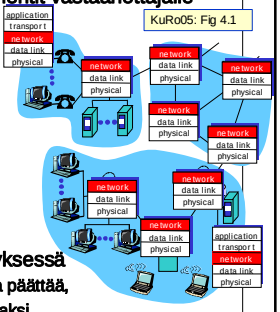
Oppimistavoitteet:
- Osata selittää, kuinka IP-paketteja välitetään verkossa
- Tietää, mitä tietoja sisältyy IP-pakettiin (ja miksi)
- Osata selittää reitittimien rakenne ja toiminta
- Osata kuvailla, kuinka reitittimet kokoavat reititystietonsa = linkkitila- ja etäisyysvektorialgoritmien toimintaideat

Verkkokerros

Verkkokerroksen tehtävät

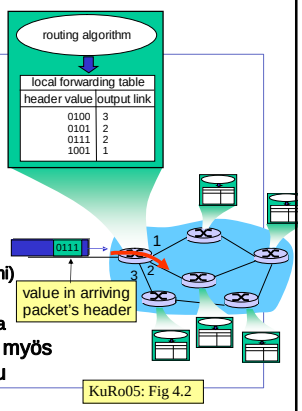
Verkkokerros

- Toimittaa kuljetuskerroksen segmentit vastaanottajalle
- Lähettäjä
  - luo segmenteistä verkkokerroksen IP-paketteja
  - Lisää otsaketietoja: mm. IP-osoitteet
- Reitittäminen
  - Isäntä – reititin ... reititin -
- Vastaanotto
  - Poista otsake
  - Anna segmentti kuljetuskerrokselle
- Verkkokerros toimii etenkin reitityksessä
  - Reititin tutkii IP-paketin otsakkeen ja päättää, mihin linkkiin se lähetetään seuraavaksi



Reititin

1) Välittää paketin reitittimen sisääntulosta johonkin ulosmenolinkkiin
   - Katsoo reititystaulusta minne
2) Kertoo muille reitittimille reitittämiseen liittyviä tietoja
   - Reittien selvittäminen
   - Reititystaulun ylläpito
   - Oma protokolla (reititysalgoritmi) tätä varten
   - Käsin konfigurointi on hankalaa
3) Piirikytkentäisessä verkossa myös yhteydenmuodostus ja purku



KuRo05: Fig 4.2

Miksi verkkokerros?

- Verkko fyysisesti hyvin heterogeeninen
  - Linkeillä voi olla eri teknologiat
  - Linkin yli kuljetettavan kehyksen (frame) koko erilainen
  - Palvelu: yhteydellinen / yhteydetön
  - Osoittaminen: yksitasoinen/hierarkkinen
  - Monilähetys /yleislähetys
  - Toiminnot: virheenkäsittely, vuolvonta, ruuhkanvalvonta, yhteyden laatu / takuu (QoS), turvaus, laskutus, ..
- Internetin verkkoprotokolla IP on verkkokerroksen yhteinen kieli
- Isäntäkoneiden ja reitittimien osattav IP (Internet Protocol)
  - Verkkokerros osaa keskustella erilaisten linkkien kanssa

Verkon palvelun laatu

Network Archtecture	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 rate	yes	in order	maintained	congestion will not occur
ATM	ABR	guaranteed minimum	none	in order	not maintained	congestion indication provided

KuRo05:Table 4.1

Verkkokerros ~ reitittäminen

- **Reititin** (router)
  - Osaa muunnokset siihen kytkettyjen teknologioiden välillä
  - Sisääntulolinkki ja ulosmenolinkki voivat ollat eri teknologiaa
  - Välittää verkkokerroksen otsakkeen perusteella (IP-osoite)
  - Laitteistotoimintona tai osin ohjelmallisesti
- **Kytkin** (switch)
  - Sekä sisääntulolinkki että ulosmenolinkki ovat samaa teknologiaa
  - Lähiverkon sisällä välitys linkkikerroksen otsakkeen perusteella
  - Poikkeuksetta aina laitetason toimintona

Pakettikytkentäinen verkko

- Joko **datagrammiverkkona** (Internet)
  - Sanoman jokainen paketti reititetään erikseen
    - kohteen IP-osoitteen perusteella
  - "Tyhmä verkkokerros": vain pakettien välitys koneelta koneelle
  - "Fiksut isäntäkoneet": virheenvalvonta, vuonvalvonta, järjestys
- tai **virtuaalipiiriverkkona**
  - Sanoman jokainen paketti kulkee samaa reittiä pitkin
    - linkkiin liitetyn virtuaalipiirinumeron perusteella
  - Signallointiprotokolla: yhteydenmuodostus, ylläpito, purku
    - yhteyden tietoja reitittimessä (virtuaalipiirin muunnostaulukko)
    - mahd. myös kaistavarausta
  - Fiksu verkkokerros: vuonvalvonta, virhevalvonta, järjestys
  - tyhmät isäntäkoneet: vrt. Puhelin
  - ATM-verkot (Asynchronous Transfer Mode), X.25-verkot

Internetin verkkokerros

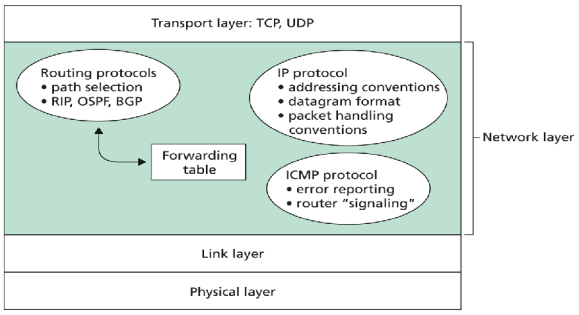


Figure 4.12 ♦ A look inside the Internet's network layer

Internetin verkkokerros

- Tällä kurssilla
  - **IPv4 ja reitityksen periaatteet**
- Internet-protokollat kurssilla
  - IPv6, reititysprotokollat, ICMP
- Reititysprotokollat
  - Reititystaulujen (forwarding table) ylläpitämistä varten
    Erillään tavallisten pakettien lähetyksestä
  - RIP (Routing Information Protocol): etäisyysvektorialgoritmi
  - OSPF (Open Shortest Path First): linkkitila-algoritmi
  - BGP (Border Gateway Protocol): hierarkkinen, autonomisten alueiden välinen algoritmi

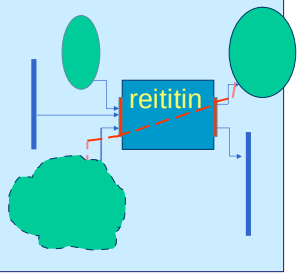
Internetin verkkokerros

- ICMP (Internet Control Message Protocol)
  - Protokolla, jolla isännät ja reitittimet vaihtavat verkkokerroksen kuulumisia
  - Tavallaan verkkokerroksen päällä: IP-paketissa kuljetuskerroksen tietojenb sijasta ICMP-dataa
  - Virheraportointi: unreachable host/network/port/protocol
    Reititin ei tiedä, minne toimittaisi ...
  - Kaiutus: echo request / reply
    tätä ping ja traceroute käyttävät RTT:n mittaamisessa
- IPv6
  - Uudistettu versio IP-protokollasta, 64 bitin IP-osoite
  - mm. kiinteänkokoinen otsake, ei tarkistussummaa,
  - pakettien paloittelu jo lähettäjän koneessa

Verkkokerros

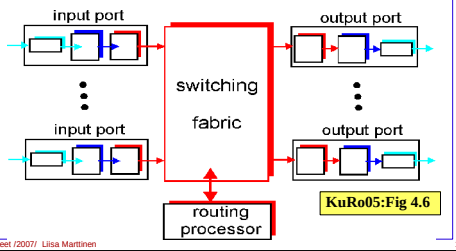
Reititin

Ch. 4.3



Reitittimen arkkitehtuuri

- Kaksi tehtävää
  - Välitä paketteja tulolinkeistä ulosmenolinkkeihin
  - Suorita reititysalgoritmia / protokollaa
- Portti ~verkkokortti
  - Useita portteja niputettu yhteen linjakorteiksi (line card)

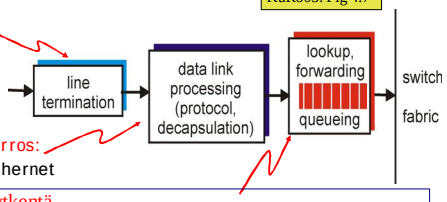


KuRo05:Fig 4.6

Sisääntuloportti (input port)

KuRo05: Fig 4.7

Fyysinen kerros
bittitason esitys



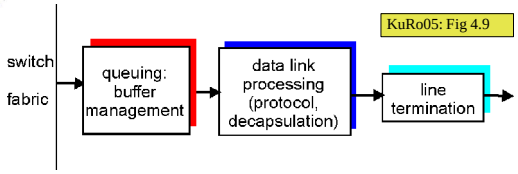
Linkkikerros:
e.g., Ethernet

Hajautettu kytkentä
Esim. kullakin portilla on kopio reititystaulusta, voi tutkia itse
Content Addressable Memory (CAM), assosiatiivinen haku,
longest prefix match

Tavoite: paketti ulos sisääntulon nopeudella
Jonotus: jos ulosmeno hitaampi kuin sisääntulo tai joku
muu siirtää samaan ulostuloon
myös HOL (head-of-line blocking)

Ulosmenoportti (output port)

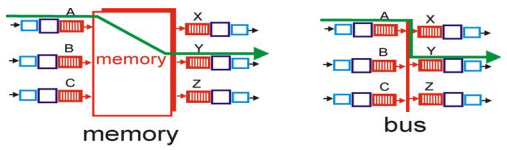
KuRo05: Fig 4.9

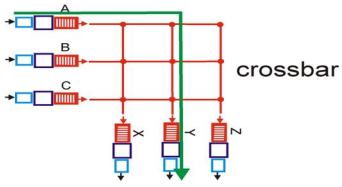


Puskuroi, jos paketteja tulee nopeammin kuin ulosmenon siirtonopeus salli
Sisääntulo nopeampi tai monesta samaan kohteeseen
Voi käyttää priorisointia (packet scheduling)
FCFS (First Come First Serviced), WFQ (Weighted Fair Queuieng),...
QoS (Quality of Service) **(ei käsitellä tällä kurssilla!)**

Suorittaa linkki- ja fyysisen kerroksen operaatiot

Kolme erilaista kytkentätapaa:





Kytkentä muistin kautta

- "Tavallinen" tietokone reitittimenä
  - Sisääntulo: keskeytys, CPU kopioi paketin muistiin, tutkii minne on menossa
  - Ulosmeno: CPU kopioi paketin muistista
  - Väylä pullonkaula: 2 kopiointia per paketti
- Linkkikerros ja fyysinen kerros laitetoimintoja
- Jonot keskusmuistissa

Kytkentä väylän kautta

- Sisääntulo siirtää paketin väylän kautta suoraan ulosmenoporttiin
- Vain yksi kytkentä aktiivinen kerrallaan
  - Väylä edelleen pullonkaula
- Väylänopeus rajoittaa kytkentänopeutta
  - Gbps nopeudet, riittävä LAN- ja yritysverkoilla

Kytkentä kytkentäverkon kautta

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

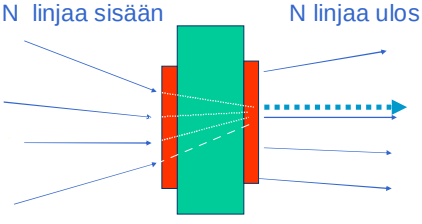
Reititysprosessori

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

Pakettien hylkäys

- Kun puskuritila ei riitä
  - Hylkää saapuva paketti (drop-tail) tai joku muu ..
  - Se kummassa jonossa paketit hylätään, riippuu kytkennän ja linjan nopeuden suhteista
  - RED (Random Early Detection): hylkää jo ennenkuin puskuri täyttyy
- Siirtovirhe
  - Linkkikerros saa hylätä virheellisen
  - Verkkokerros saa hylätä virheellisen
- Paketin elinaika (Time-to-live , TTL)

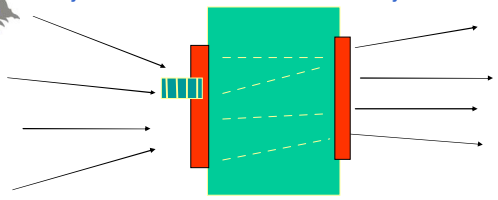
N linjaa sisään — N linjaa ulos



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. Ristikkäinkytkimessä 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.

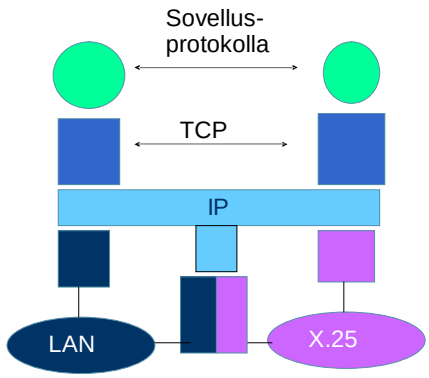
(head-of-the-line-blocking)

Verkkokerros

IP-protokolla

Ch 4.4

RFC 791



IP-protokolla

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

IP-paketin rakenne (IPv4)

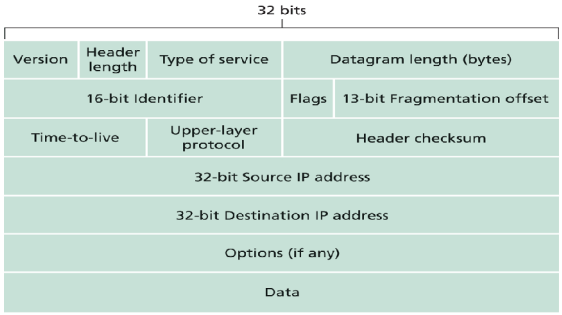


Figure 4.13 ◆ IPv4 datagram format

IP-otsake

- Versionumero
  - IPv4 vai Ipv6, kummallakin erilainen otsake
- Otsakkeen pituus (header length)
  - Vaihtelevan pituinen optiokenttä, **mininimi on 20 B**
- **TOS-kenttä (Type of Service)**
  - **Varattu halutun palvelun kertomiseen:**
    - **Nopeus, luotettavuus, kapasiteetti; ääni vs. tiedosto**
  - **Yleensä ei ole käytössä (osa käytössä uusissa reitittimissä)**
- **IP-paketin pituus (Datagram length)**
  - **Koko IP-paketin pituus, maksimi 65535 B**
  - **Tavallisimmin 576-1500 B**
- **Paketin tunniste (16-bit identifier), lippuja (flags), palan paikka (fragmentation offset)**
  - **Paketin pilkkomiseen pienemmiksi ja kokoamiseen takaisin isoksi**

IP-otsake (jatkuu)

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

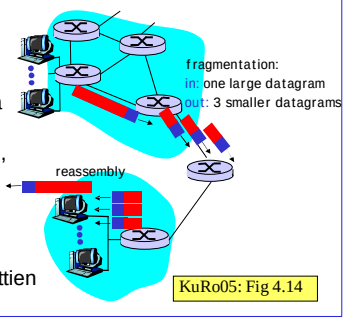
IP-pakettien paloittelu (fragmentointi)

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



KuRo05: Fig 4.14

IP-pakettien fragmentointikentät

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

Esimerkki

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

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

Yhdestä IP-paketista tulee 3 pienempää IP-pakettia

length =1500	ID =x	fragflag =1	offset =0
length =1500	ID =x	fragflag =1	offset =185
length =1040	ID =x	fragflag =0	offset =370

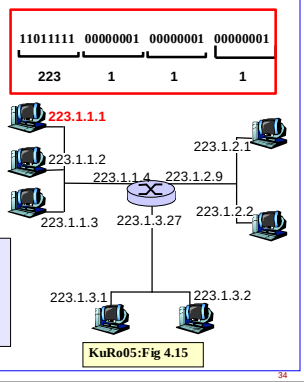
1480 B dataa
20 B otsaketta

offset = 1480/8

IP-osoitteet

- 32 bittinen tunniste isäntäkoneille ja reitiimien linkeille
  - verkkoliittymän tunniste
- Reitittimellä useita liittymiä
  - kullakin oma IP-osoite
- Myös isäntäkone voi olla liitettynä useaan verkkoon

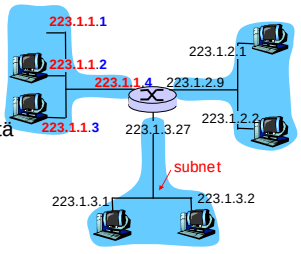
ICANN Internet Corporation for Assigned names and Numbers verkkonumerot palvelun tarjoajille, nämä edelleen aliverkoiksi



KuRo05:Fig 4.15

Aliverkot

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

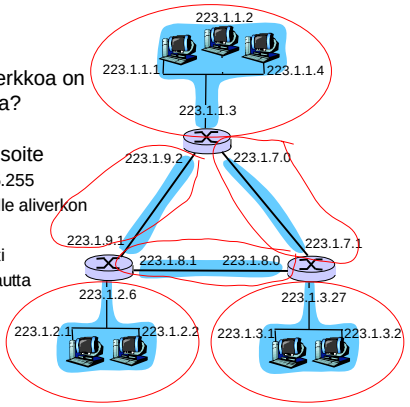


network consisting of 3 subnets

KuRo05:Fig 4.15

Aliverkot

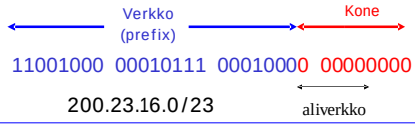
- Montako aliverkkoa on tässä kuvassa?
- Yleislähetysosoite
  - 255.255.255.255
  - Paketti kaikille aliverkon koneille.
  - Mahdollisesti reitittimen kautta muillekin



CIDR: Classless InterDomain Routing

- Verkko-osa voi olla minkä tahansa kokoinen
  - Vanha luokallinen osoite: A-luokka 8 b, B-luokka 16 b,C-luokka 24 b
- Formaatti: a.b.c.d/x
  - x ilmoittaa verkko-osan bittienlukumäärän (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.



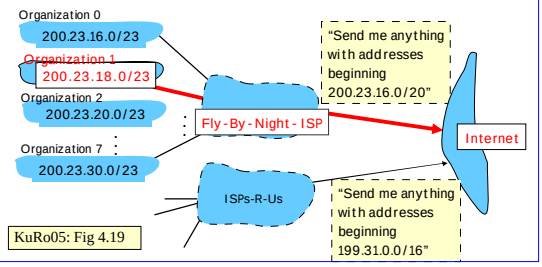
Koneen IP-osoite

- Palveluntarjoaja saa verkkonumeronsa ICANN:lta isona lohkona
- voi jakaa saamansa osoiteavaruuden (osoitelohkon) edelleen aliverkkoihin
  - esim. Kukin organisaatio saa aliverkon, jossa on numerot 512 koneelle

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

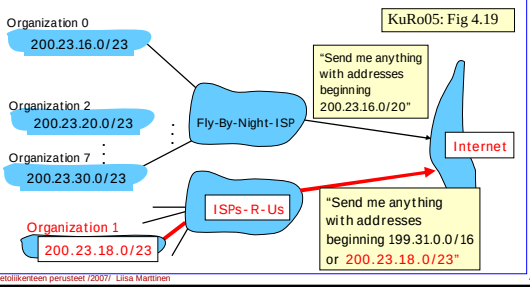
Hierarkkinen osoite

- CIDR luo reititystä helpottavan hierarkian
  - Aggregoint: yhteinen alkuosa => samaan suuntaan



Jos palveluntarjoaja (ISP) vaihtuu?

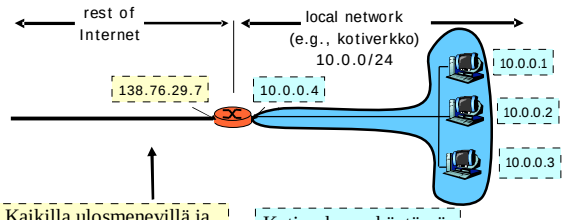
- IP-osoitteet voi säilyttää
  Uudelta ISP:ltä tarkempi reititysohje
  - Pisin sopiva alkuosa määrää reitityksen (longest prefix match)



Koneen numero

- Koneen numero konfiguroitu kiinteästi koneelle
  - Pysyy samana
- Tai saadaan käyttäen DHCP:tä (Dynamic Host Configuration Protocol)
  - Eri numero eri kerroilla
  - 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"

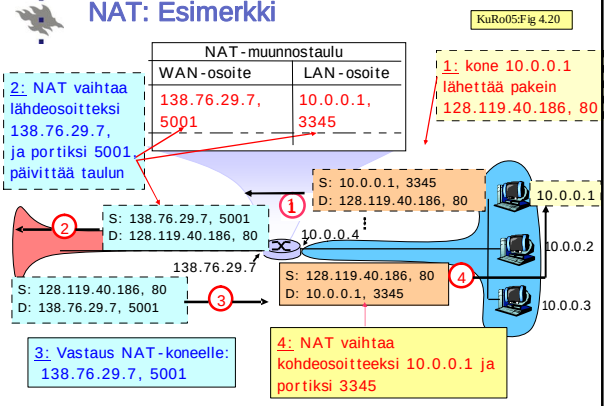
NAT: Network Address Translation



NAT-reititin

- Ulosmenevät paketit
  - Korvaa lähdekoneen IP-osoite ja porttinumero NAT-koneen IP-osoitteella ja NAT-koneen valitsemalla porttinumerolla
  - Päivitä NAT-muunnostaulu
- Sisääntulevat paketit
  - NAT-koneelle NAT:n antamaan porttiin
  - Korvaa NAT:n muunnostaulun avulla paketissa oleva IP-osoite ja portti
  - Välitä paketti perille
- NAT-muunnostaulu
  - (IP-osoite, portti) (NAT-koneen osoite, NAT:n portti)

NAT: Esimerkki



NAT: Kommentteja / kritiikkiä

- Hyödyt
  - Kotiverkko tarvitsee ISP:ltä vain yhden IP-osoitteen
  - Voi muutella vapaasti kotikoneiden IP-osoitteita
  - Turvallisuus: ulospäin muille näkyy vsin yksi kone
- Kritiikkiä
  - Reitittimien tulisi toimia vain verkkotasolla, porttinumerot ovat kuljetuskerroksen asioita
  - Rikkoo päästä-päähän idean (prosessien välinen yhteys)
  - Onko ohjelmoijaan huomioitava NAT:n olemassaolo?
    - Peer-to-peer
    - NAT:n takana oleva palvelin (esim. www portissa 80)?
  - Pula IP-osoitteista hoidettava ottamalla käyttöön IPv6, jossa 64 bitin osoitteet

Verkkokerros

Reititysalgoritmit

Reititysalgoritmi

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

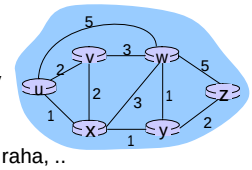
Reititysalgoritmin muita ominaisuuksia

- Dynaaminen vs. staattinen
  - Miten nopeasti huomaa linkkien muutokset ja muuttaa reititystä
  - Miten tiuhaan tietoja päivitetään
  - Miten usein muutoksia
- Kuormituksen huomioiva vs. ei
  - Linkin ruuhkautuneisuus voi vaikuttaa sen kustannukseen
  - 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, ..

$C(x_1,x_2, ..., x_p)$ = reitin (route) kustannus
$= C(x_1,x_2) + C(x_2,x_3) + ... + (x_{p-1},x_p)$

Mikä on huokein reitti kuvan solmusta u solmuun z?
Reititysalgoritmi selvittää!

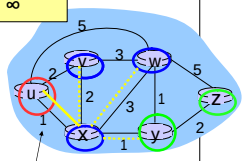
1) Linkkitila: Dijkstran algoritmi

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

Merkinnät
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 käsiteltyjen solmujen joukko

Dijkstran algoritmi

D(v)=2, D(w) = 5, **D(x)=1**
D(y) = ∞ , D(z)= ∞

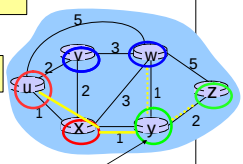


1 ***Initialization:***
2 N' = **{u}**
3 for all nodes v
4 if v **adjacent** to u
5 then **D(v) = c(u,v)**
6 else D(v) = ∞
7
8 ***Loop***
9 find w not in N' such that D(w) is a minimum
10 add w to N'
11 update D(v) for all v adjacent to w and not in N' :
12 D(v) = min(D(v), D(w) + c(w,v))
13 /* new cost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

Dijkstran algoritmi 2

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

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



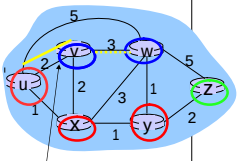
8 ***Loop***
9 find w not in N' such that D(w) is a minimum
10 add w to N'
11 update D(v) for all v adjacent to w and not in N' :
12 D(v) = min(D(v), D(w) + c(w,v))
13 /* new cost to v is either old cost to v or known
14 shortest path cost to w plus cost from w to v */
15 ***until all nodes in N'***

Dijkstran algoritmi 3

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

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



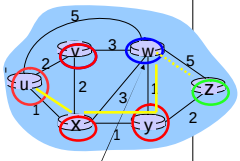
8 ***Loop***
9 find w not in N' such that D(w) is a minimum
10 add w to N'
11 update D(v) for all v adjacent to w and not in N' :
12 D(v) = min(D(v), D(w) + c(w,v))
13 /* new cost to v is either old cost to v or known
14 shortest path cost to w plus cost from w to v */
15 ***until all nodes in N'***

Dijkstran algoritmi 4

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

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

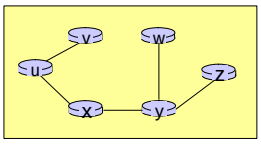
D(x)=1, D(y) = 2 ,D(v)=2, D(w)=3, D(z)=4



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'***

Lyhyimmät reitit ja reititystaulukko

Resulting shortest-path tree from u:



Resulting forwarding table in u:

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

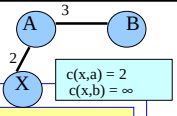
2) Etäisyysvektorireititys (distance vector)

- **Arpanet-verkon alkuperäinen reititysalgoritmi**
  - Käytössä useissa Internetin reititysprotokollissa RIP, BGP, Novell IPX, ISO IDRP
- **Interaktiivinen, hajautettu ja asykroninen**
- **Tiedot tarkentuvat asteittain, iteratiivisesti**
  - Tietyin väliajoin, linkin tilan vaihtuessa, naapurin tietojen muuttuessa, ..
- **Kukin solmu laskee itsenäisesti, mutta saa tietoa naapureiltaan**
  - Tietää / arvioi kustannuksen omiin naapureihinsa
  - Kuulee naapureiden kustannukset muihin kohdesolmuihin, jotka nämä puolestaan ovat kuulleet omilta naapureiltaan
  - Valitsee kullekin kohdesolmulle kuulemansa edullisimman reitin

Etäisyysvektorireititys (jatkuu)

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

Etäisyysvektorireititys



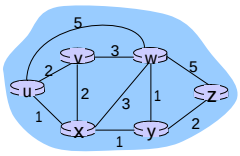
Merkinnät

c(x,v) kustannus solmusta x naapuriin v,
jos v ei ole x:n naapuri, c(x,v) = ∞

$D_x(y)$ **edullisimman x:stä y:hyn johtavan reitin kustannus**

- **Kukin solmu ylläpitää omaa etäisyysvektoria kaikkiin tuntemiinsa kohteisiin $D_x = [D_x(y): y \in N]$**
  - **edullisin tiedetty kustannus solmusta x kuhunkin solmuun y**
- **Sekä saa naapureiltaan niiden etäisyysvektorit $D_v(y) = [D_v(y): y \in N]$ = Naapurin v tieto edullisimmasta kustannuksesta kuhunkin solmuun y**
- **$D_x(y) = \min \{c(x,v) + D_v(y)\}$**
  - **Kustannus solmusta x solmuun v ja sieltä solmuun y**
  - **Reittejä useita (eri naapureiden kautta); valitaan edullisin eli pienin kustannus**

Esimerkki 1



Helposti nähdään, 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 matkalla solmusta u solmuun z, se tulee seuraavaksi 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)

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

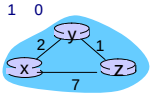
Node y table (cost to)

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

Node z table (cost to)

from \ to	x	y	z
x	∞	∞	∞
y	∞	∞	∞
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:

from \ cost to	x	y	z
x	0	2	7
y	2	0	1
z	7	1	0

z:

from \ cost to	x	y	z
x	0	2	7
y	2	0	1
z	3	1	0

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

X:

from \ cost to	x	y	z
x	0	2	3
y	2	0	1
z	3	1	0

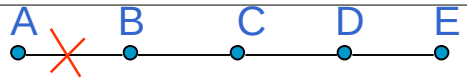
Y:

from \ cost to	x	y	z
x	0	2	3
y	2	0	1
z	3	1	0

Z:

from \ cost to	x	y	z
x	0	2	3
y	2	0	1
z	3	1	0

Hyvä uutinen etenee nopeasti



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

Etäisyys A:han

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

Tieto etenee joka vaihdossa yhden linkin yli

Huono uutinen etenee hitaasti

Linkki AB katkeaa => etäisyys äärettömäksi

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

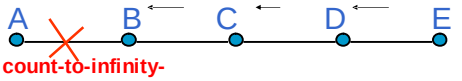
Joka vaihdossa 'paras arvio' huononee vain yhdellä = reitityssilmukka

Count-to-infinity -ongelma

Etäisyys A:han

Huono uutinen etenee nopeasti

"poisoned reverse"



Ratkaisu count-to-infinity-ongelmaan!

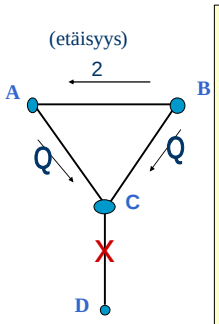
Ilmoita etäisyys äärettömäksi naapurille, jonka kautta linkki kulkee. Kerro muille oikea etäisyys.

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 (etäisyys ääretön eli poisonous reverse)

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

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.

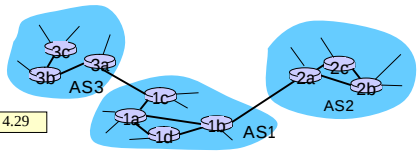
C kertoo B:lle, ...

3) Hierarkkinen reititys

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

Hierarkkinen reititys

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



KuRo05: Fig 4.29

Kertauskysymyksiä

- Keskeisimmät IP-osakkeen tiedot?
- Reitittimen arkkitehtuuri?
- Longest prefix match?
- CIDR?
- NAT?
- Miten reititin saa reititystiedot?
- Linkkitila- vs. etäisyysvektorialgoritmi

ks. kurssikirja s. 400