

- o
- o
- o

4. Verkkokerros

- **sovelluskerros**
 - ‘asiakas’
- **kuljetuskerros**
 - ‘end-to-end’
- **verkkokerros**
 - ‘deliver packets given to it by its customers’
- **siirtoyhteyskerros**
- **peruskerros**

10.10.2001

1

- o
- o
- o

Verkkokerroksen palvelut

- **tavoitteet**
 - palvelut riippumattomia aliverkkojen tekniikasta
 - kuljetuskerros eristettävä aliverkkojen ominaisuuksista
 - lukumäärä
 - tyypit
 - topologia
 - kuljetuskerroksen käyttämät **verkko-osoitteet globaaleja**

10.10.2001

2

- o
- o
- o

connection-oriented ~ connectionless

- o
- o
- o

- **yhteydetön (Internet, 30 vuoden kokemus)**

- aliverkot ovat luonnostaan epäluotettavia

- tehtävä: bittien kuljetus
- operaatiot: send packet, receive packet
- virheen tarkistus, vuonvalvonta isäntäkoneille

- o
- o
- o

- **yhteydellinen (puhelin 100 vuoden kokemus)**

- muodostetaan yhteys, neuvotellaan parametrit (palvelunlaatu (QOS), kustannus)

- kaksisuuntainen kuljetus, paketit järjestyksessä

- vuonvalvonta, virhevalvonta

10.10.2001

3

- o
- o
- o

Virtuaalipiiri (virtual circuit)

- o
- o
- o

- **Pakettikytkentäinen verkko voidaan toteuttaa kahdella tavalla**

- datasähkeverkkona

- jokainen paketti käsitellään ja reititetään erikseen
- pakettien järjestys voi muuttua

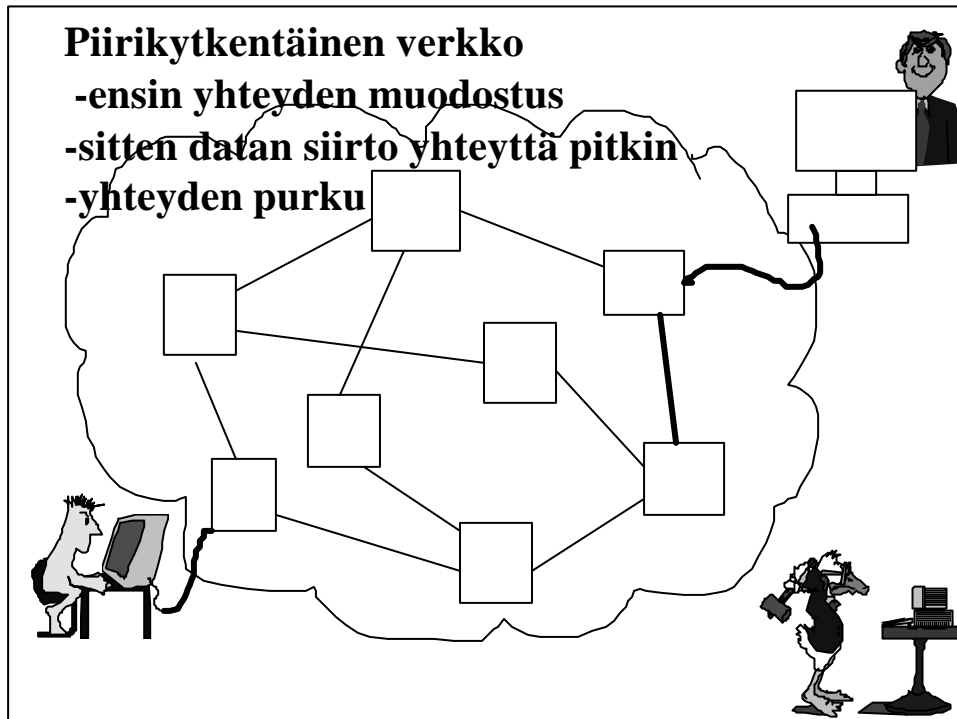
- virtuaalipiiriverkkona

- ~ piirikytkentäinen verkko
 - ensin yhteyden (virtuaalipiirin) muodostus
 - sitten pakettien lähettäminen yhteyttä pitkin

- ATM, X.25

10.10.2001

4



5.1. Verkkokerroksen tärkein tehtävä: reititys

- **(hajautettu) päätöksenteko reitistä**
 - yhteydellinen: alussa
 - yhteydetön: jatkuvasti
- **jatkuva muutosta verkossa**
 - rikkoutuvat komponentit, muuttuva topologia
- **ristiriitaisia vaatimuksia reititykselle**
 - optimaalisuus /reiluus (fairness)
- **reitityksen suorituskyky**
 - mean packet delay, network throughput

- o
- o
- o

Reititys algoritmi

- **Päättää, mikä reitti valitaan**
 - mihin paketti ohjataan seuraavaksi
- **dynaaminen verkkoympäristö => dynaaminen reititys**
 - jatkuvaan verkon tarkkailuun perustuva
 - Internetin reititys
 - muuttumaton ympäristö => käytetään kerran laskettuja reittejä tai sovittua lähetystapaa
 - tulvitus (flooding)
 - Dijkstran algoritmeilla lasketut lyhyimmät reitit

10.10.2001

7

- o
- o
- o

Tulvitus

- jokainen saapunut paketti lähetetään kaikille muille ulosmenoille
 - => **verkko täyttyy pian paketeista**
- eri tapoja tulvituksen lopettamiseen
 - käsitellään harjoituksissa
- käyttö
 - **tietyissä erityistilanteissa tilanteissa hyödyllinen**
 - käsitellään harjoituksissa

10.10.2001

8

- o
- o
- o

Dijkstran algoritmi

- **'lyhyin' reitti yhdestä solmusta muihin**
 - $A \rightarrow \{\text{muut solmut}\}$
- **kaariin liittyy kustannus**
 - kapasiteetti (bps)
 - viive: hyppyjä, aikaa
 - raha
 - virhetodennäköisyys

10.10.2001

9

- o
- o
- o

Algoritmi

- merkitään $D(v)$ on tähän asti tutkituista reiteistä lähtösolmusta A solmuun v halvin kustannus eli lyhyin pituus
- verkko $G = (V, E)$, V on solmujen joukko, E kaarten joukko
- olkoon $c(i,j)$ on kaaren (i,j) kustannus (> 0). Jos kaarta ei ole, $d(i,j)$ on ääretön
 - algoritmissa oletetaan, että kaikki kustannukset ovat ei-negatiivisiä

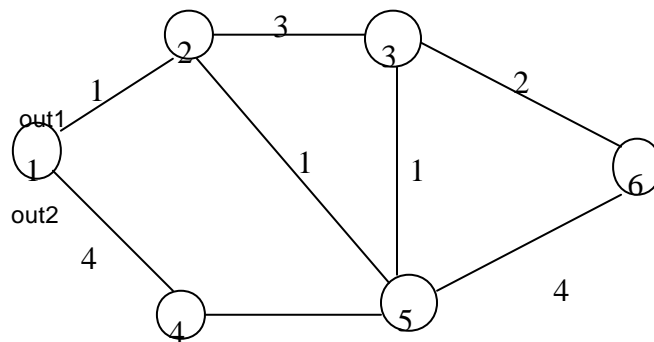
10.10.2001

10

1. $N := \{1\}; D(1) := 0; D(j) := d(j,1) \ (j \neq 1);$
2. while $N \neq V$ do
3. etsi solmu w , joka ei vielä ole
joukossa N ja jonka $D(w)$ on pienin
 N :ään kuulumattomista solmuista
4. $N := N \cup \{w\}$
5. kaikille muille P :hen kuulumattomille
solmuille $v \ D(v) := \min\{D(v), D(w) + c(w,v)\}$
6. end while
7. end

Esimerkki

- Tarkastellaan esimerkkinä verkkoa



1. $N = \{1\}$; $D(1) := 0$; $D(2) := 1$;
 $D(3) := \text{ääretön}$, $D(4) := 4$; $D(5) := \text{ääretön}$,
 $D(6) := \text{ääretön}$
3. pienin $D(v)$ on solmulla 2 (=1)
4. $N = \{1, 2\}$
5. $D(3) := 1 + 3 = 4$, $D(4) = 4$, $D(5) := 1 + 1 = 2$,
 $D(6) = \text{ääretön}$
3. pienin $D(v)$ on nyt solmulla 5 (=2)

4. $N = \{1, 2, 5\}$
5. $D(3) := 1 + 2 = 3$, $D(4) := 4$, $D(6) := 4 + 2 = 6$
3. pienin $D(v)$ solmulla 3 (=3)

4. $N = \{1, 2, 3, 5\}$
5. $D(4) := 4$, $D(6) := 2 + 3 = 5$;
3. Pienin $D(v)$ solmulla 4 (=4)

4. $N = \{1, 2, 3, 4, 5\}$
5. $D(6) := 5$
4. $N = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$

Löydetyt reitit ja kustannukset

- 1-> 2 :1
- 1-> 2->5->3: 3
- 1-> 4: 4
- 1->2->5: 2
- 1->2->5->3->6: 5

Solmu	linkki	kustann.
2	1	1
3	1	3
4	2	4
5	1	2
6	1	5

Solmulle 1

10.10.2001

15

Reititystaulu

- **Kukin reititin pitää kirjata reititiedoista**

- minne paketti seuraavaksi lähetetään

Kohde	minne lähetetään
Abc	reititin D, ulosmeno 2
...
Xyz	reititin T, ulosmeno 3

- **reitittimien tietojen hankinta ja ylläpito?**

- erityisen nopeasti muuttuvassa hyvin isossa verkossa

10.10.2001

16

Reititystietojen keruu

- kukin reititin kerää ‘kustannustietoja’ omasta ympäristöstään
 - esim. viiveet naapurireitittimiin
- ja vaihtaa tietoja muiden reitittimien kanssa
 - tai lähettää tiedot reitittimelle, joka keskitetysti laskee parhaat reitit
- kukin laskee esim. Dijkstran algoritmilla parhaat reitit koko verkosta
 - tai saa tarvitsemansa reititystiedot ne laskeneelta

10.10.2001

17

Etäisyysvektoreititys (distance vector)

- **Arpanetin alkuperäinen reititys**
 - vieläkin RIP jonkin verran käytössä Intenetissä
- **kullakin reitittimellä reititystaulu**
 - kullekin verkon reitittimelle
 - ulosmenolinja
 - aika/etäisyys kohteeseen
 - hyppyjen lkm
 - arvioitu viive
 - jononpituus
 - jokin mitattavissa oleva

10.10.2001

18

- o
- o
- o

reititystaulun ylläpito

- **tietojen vaihto naapurireitittimien kanssa**
 - tietyin aikavälein
 - tilan vaihtuessa
- **lasketaan uudet reittitaulut ('etäisyystaulut')**
 - 'kustannus' naapuriin + naapurin ilmoittama 'kustannus' kohteeseen
 - kullekin solmulle valitaan pienimmän 'kustannuksen' reitti

10.10.2001

19

- o
- o
- o

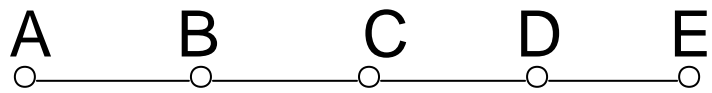
Ongelma: tietojen muuttumisnopeus

- **tietojen muuttamiseen kuluu aikaa**
- **reagoi melko nopeasti hyviin uutisiin**
 - uusi nopea reitti löytynyt/linkki jälleen pystyssä
 - tieto etenee joka vaihdossa yhden hypyn
- **reagoi hitaasti huonoihin uutisiin**
 - linkki nurin => etäisyys ääretön
 - joka vaihdossa 'paras arvio' huononee yhdellä
 - **count - to - infinity** -ongelma

10.10.2001

20

Hyvät uutiset etenevät nopeasti:

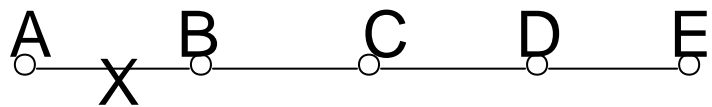


Aluksi yhteys A:han on poikki ja sitten linkki AB toimii taas:

	B	C	D	E
	ääretön	ääretön	ääretön	ääretön
1	ääretön	ääretön	ääretön	ääretön
1	2	ääretön	ääretön	ääretön
1	2	2	3	ääretön
1	2	2	3	4

10.10.2001

Huonot uutiset etenevät hitaasti:



Toimiva linkki katkeaa välillä AB:

	B	C	D	E
1	1	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

10.10.2001

22

Poisoned reverse (Split horizon)

- **raitkaisu 'count-to-infinity'-ongelmaan**

- reititystietoja vaihdettaessa

- ilmoitetaan etäisyys reitittimeen X äärettömäksi sille naapurille, jonka kautta tämä reitti kulkee

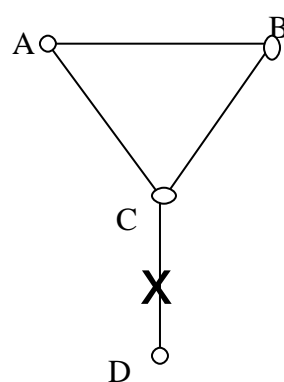
- muille kerrotaan oikea etäisyys

- **tieto etenee yhden hypyn joka vaihdolla!**

10.10.2001

23

- **ratkaisu ei toimi aina**



Linkki CD katkeaa,
A ja B ilmoittavat C:lle
ettei D:hen pääse

C pääättelee, että D:tä ei
voi saavuttaa

Kuitenkin A kuulee B:ltä,
että sillä on etäisyys 2
D:hen => oma etäisyys 3

10.10.2001

24

Linkkitilareititys (Link State Routing)

• reitittimen tehtävät

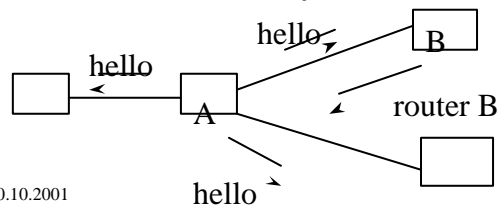
- selvitettävä naapurit ja niiden osoitteet
- mitattava etäisyys / kustannus naapureihin
- koottava tietopaketti ko. tiedoista
- lähetettävä tietopaketti kaikille reitittimille
- laskettava lyhin reitti kaikkiin muihin reitittämiin esim. Dijkstran algoritmilla

10.10.2001

25

Naapurien löytäminen

- reititin lähettää jokaiseen kaksipisteyhteyteen HELLO-paketin
- linjan toisessa päässä oleva reititin vastaa ja lähettää nimensä
 - router ID
 - nimien oltava yksikäsitteisiä koko verkossa



10.10.2001

26

- o
- o
- o

Etäisyyden mittaaminen

- **kaikille naapureille ECHO-paketti**
 - vastaanottajan palautettava paketti välittömästi
- **=> kiertoviive (round-trip-time)**
 - dynaaminen etäisyysmitta
- **pitäisikö ottaa kuormitus huomioon?**
 - kello käynnistetään , kun paketti viedään jonoon
 - kello käynnistetään, kun paketti lähtee
 - kuormitus mukana kuvaa todellista tilannetta
 - jos kuormitus mukana => reititys muuttaa kuormitusta
 - => reititys suosii huonoa reittiä

10.10.2001

27

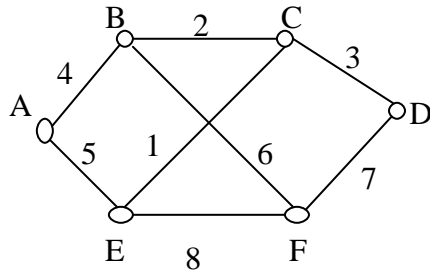
- o
- o
- o

Tietopaketin kokoaminen

- **muodostus**
 - tietyin aikavälein
 - kun muutoksia havaittu
- **sisältö**
 - reitittimen tunnus
 - paketin järjestysnumero
 - paketin ikä
 - ‘etäisyydet’ kuhunkin reitittimen naapuriin
 - Erilaisia etäisyysmittoja => eri reittejä eri liikenteelle

10.10.2001

28



B	
seq	
age	
A	4
C	2
F	6

Tietopakettien jakelu

- **käytetään tulvitusta (n. 10 minuutin välein)**
 - pidetään kirjaa jo nähdystä paketeista
 - reititin A, paketti 145
 => paketti lähetetään korkeintaan kerran
 - paketissa elinaikalaskuri (age, time-to-live)
 - väärät ja vanhentuneet tiedot katoavat aikanaan, vaikka reititin itse olisikin vikaantunut
- **tietopaketit kuitataan**
 - linjavirheiden takia
- **autentikointi paketteja vaihdettaessa**

- o
- o
- o

Miksi elinaikalaskuri on tarpeen?

- o
- o
- o

- **virheellinen järjestysnumero**

- kaatunut reititin aloittaa väärästä numerosta
 - edennyt jo pakettiin 204 ja aloittaa uudestaan paketista 0 => kaikki seuraavat paketit hylätään duplikaatteina pakettiin 205 saakka
- virhe tietopaketin seq-kentässä
 - 4 muuttuu virheellisesti 65540:ksi => seuraavat paketit hylätään pakettiin 65541 saakka

10.10.2001

31

- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o

- o
- o
- o

elinaikalaskuri (TTL-laskuri)

- o
- o
- o

- **laskuri vähenee ajan kuluessa**

- vähenee yhdellä sekunnin välein

- **paketti tuhotaan, kun laskuri = 0**

- vanhentunut (virheellinen) tieto poistetaan
- pitkäkö elinaika >> päivitysten väli
 - tuhotaan vain jos reititin kaatunut
 - usea (6) paketti on jäänyt saapumatta reitittimeltä

- **käytössä myös tulvituksessa**

- kukin reititin vähentää yhdellä

10.10.2001

32

- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o

- o
- o
- o

Lisäparannuksia

- **paketteja ei lähetetä välittömästi eteenpäin**
 - ne jätetään odottamaan
 - jos samalta reitittimeltä tulee muita paketteja, niistä valitaan vain yksi, tuorein edelleenlähetettäväksi

10.10.2001

33

- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o

- o
- o
- o

Reittitaulun laskeminen

- **kukin reititin laskee omat reittitaulunsa**
- **kaikki tarvittava tieto on saatu tietopakettien avulla**
 - kukin linkki molempiin suuntiin
- **laskeminen Dijkstran algoritmilla**
 - lyhyin reitti kuhunkin muuhun reitittimeen
 - isoissa verkoissa voi olla muisti- ja laskenta-aikaongelmia

10.10.2001

34

- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o

- o
- o
- o

ongelmia

- **väärin toimiva reititin**

- kertoo väärää tietoa
- ei välitä tietopaketteja
- väärentää tietopaketteja
- laskee reitit väärin

- **isossa verkossa aina joku toimii väärin**

- tavoitteena rajata ongelmat pienelle alueelle

10.10.2001

35

- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o

- o
- o
- o

Käyttö

- **paljon käytetty nykyisissä verkoissa**

- Internetin OSPF-protokolla
- ISO:n IS-IS -protokolla

10.10.2001

36

- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o

- o
- o
- o

Hierarkkinen reititys

- o
- o
- o

- **reitityksen skaalautuvuus**

- isossa verkossa runsaasti reitittimiä (Internet: miljoonia)

- reititystaulut suuria
- reittien laskeminen raskasta
- tietopaketit kuluttavat linjakapasiteettia

- **hallinta-autonomia => autonominen järjestelmä AS**

- organisaatio päättää omista asioistaan

- myös reitityksestä
 - oma sisäinen reititystapa

10.10.2001

37

- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o

- o
- o
- o

Reitityshierarkia

- **Ylimmällä tasolla AS**

- sama reititys AS:n sisällä

- tehokkuus tärkeää

- reititys AS:ien välillä

- ‘poliittinen asia’

- **AS:n sisällä alueita**

- jaetaan reitittimet ryhmiin (alueet, regions)

- kukin reititin tuntee kaikki alueensa sisällä

- tietää mikä reititin hoitaa liikenteen muihin alueisiin

10.10.2001

38

- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o

- o
- o
- o

Hierarkkisen reitityksen ongelmat

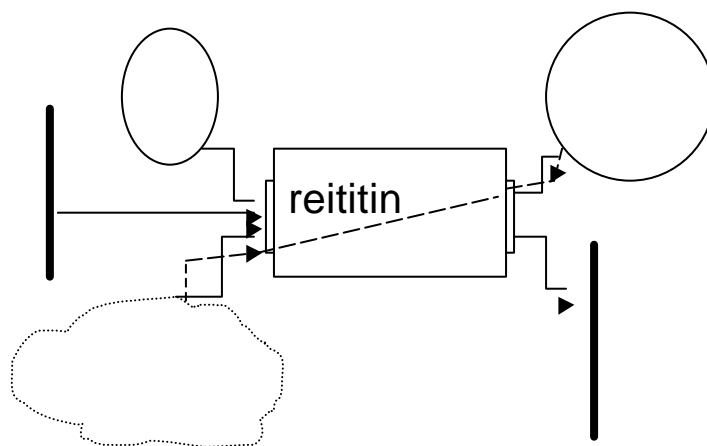
- **reititin pituus kasvaa**
 - aina ei voida käyttää optimaalista reittiä
 - yleensä siedettävä
- **hierarkiatasojen määrä**
 - suorituskyky
 - hallinto

10.10.2001

39

- o
- o
- o

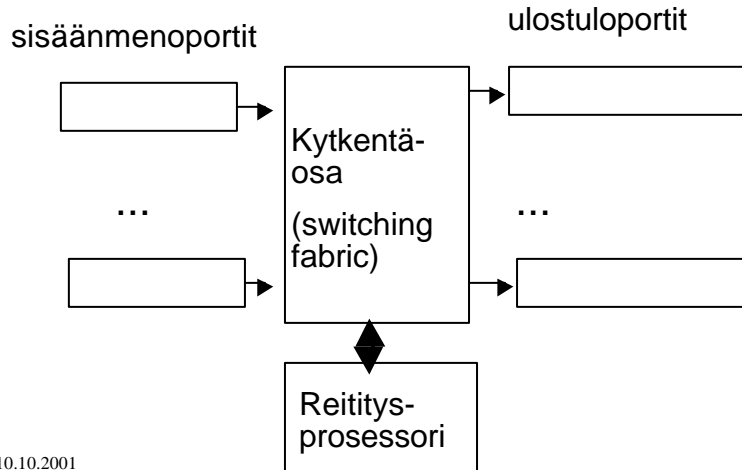
4.2. Reititin (Router)



10.10.2001

40

Reitittimen rakenne



10.10.2001

41

• Portit

– peruskerroksen toiminnot (PK)

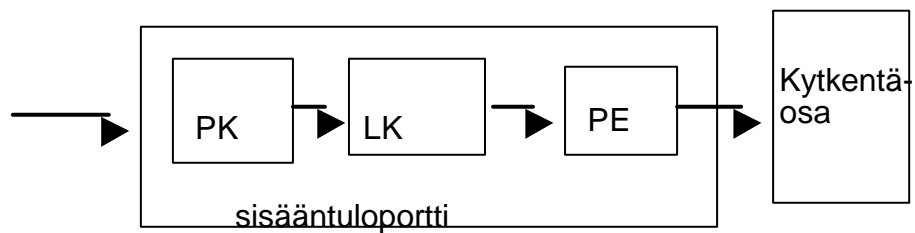
- fyysisen siirtoyhteyden pää

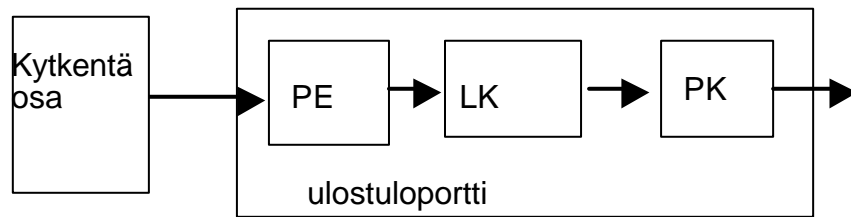
– linkkikerroksen toiminnot (LK)

- virhetarkistukset, vuonvalvonta,
- MAC-kerroksen toiminnot

– pakettien edelleenohjaaminen (PE)

- datapaketit kytkentäverkoston kautta oikeaan ulostuloportiin
- valvontapakettit (RIP, OSPF, BGP) reititysprosessorille





Vastaavasti kukin ulostuloportti tallettaa sen kautta eteenpäin lähtevät paketit ja suorittaa niille linkkikerroksen ja peruskerroksen vaatimat toimenpiteet.

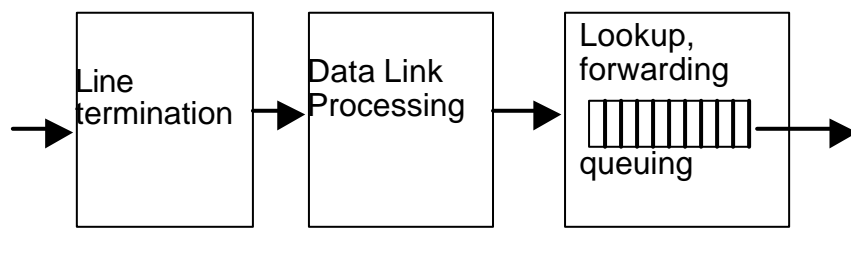
Käytännössä useita portteja on yhdistetty yhdeksi linjakortiksi (line card) reitittimen sisällä.

• **Reititysprosessori**

- suorittaa reititysprotokollaa
- RIP, OSPF, BGP, ..
- päivittää reititystauluja
- hallinta- ja ylläpitotoimintoja

• **KytKentäosa**

- yhdistää paketin sisääntuloportit ulostuloportteihin
- paketti siirtyy oikeaan verkkoon
- täysin reitittimen sisällä



Sisääntuloportin toiminta

Etsitään reititystaulusta kohdeosoitetta vastaava ulosmenoportti.

Yleensä kopio reititystaulusta talletettu porttiin ja reititysprosessori päivittää sitä. Näin kukin portti pystyy itse etsimään oikean ulosmenoportin.

Muuten paketti ohjataan reititysprosessorille, joka etsii reititystaulusta oikean portin (portti on pelkkä verkkokortti).

- **Runkolinjareitittimiltä vaaditaan hyvin suuria nopeuksia**

- miljoonia hakuja sekunnissa
- pitäisi pystyä toimimaan linjan nopeudella
 - OC48-linkki => 2.5 Gbps
 - jos paketin koko 256 tavua => noin miljoona hakua sekunnissa

- **erilaisia tekniikoita**

- talletetaan reititaulun alkiot puurakenteina

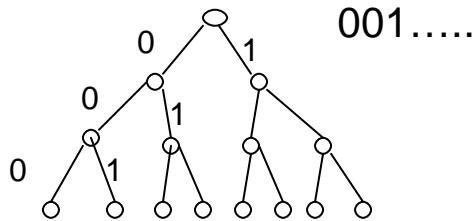
Osoitteen

1. bitti

2. bitti

3. bitti

jne



Kun $n = 32$ ei ole tarpeeksi nopea nykyisiin runkoreitittämiin!

- content addressable memory (CAM)
- välimuistin käyttö

KytKentäosa

• KytKentä muistin kautta

- portit tavallisia käyttöjärjestelmän I/O-laitteita
- keskeytys ilmoittaa paketin saapumisesta
- CPU kopioi paketin sisääntuloportista muistiin
- CPU tutkii osoitteen ja reitistystaulusta etsii vastaavan ulosmenoportin
- CPU kopioi paketin muistista tähän ulosmenoporttiin
- muistin saantinopeus rajoittaa toimintaa

• nykyiset reitittimet

- käyttävät linjakortin omia prosessoreita

- **Kytkentä väylän kautta**

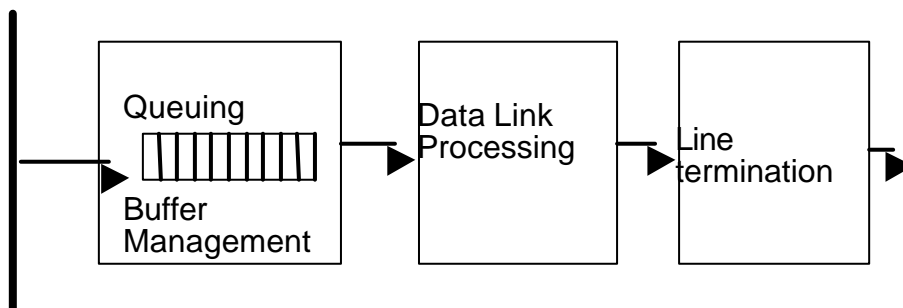
- sisääntuloportit siirtävät paketin väylän kautta suoraan oikeaan ulosmenoporttiin
- vain yksi paketti kerrallaan voi kulkea väylässä
- jos väylä on varattu, paketti joutuu odottamaan
- väylän nopeus rajoittaa kytkentänopeutta
 - Gbps nopeudet riittävät LANeille ja yritysverkoilla

- **Kytkentä kytkentäverkon kautta**

- ristikkäinkytkin (crossbar switch)
- $2N$ väylää, jotka yhdistävät N sisääntuloporttia N :ään ulosmenoporttiin
- voivat tukkeutua => odotusta sisäänmenoportissa
 - Cisco 12000: 64 Gbps

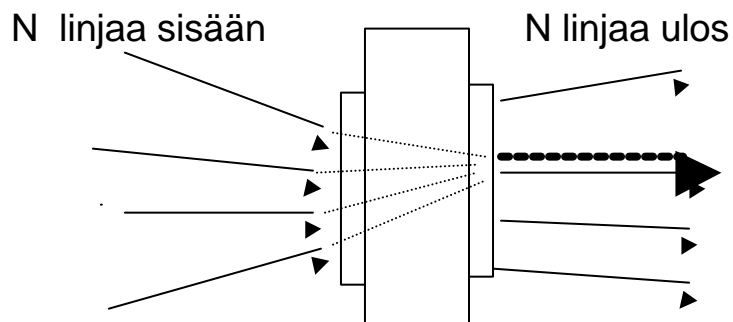
Ulosmenoportit

Ulosmenoportti lähettää paketin taas seuraavaan verkkoon



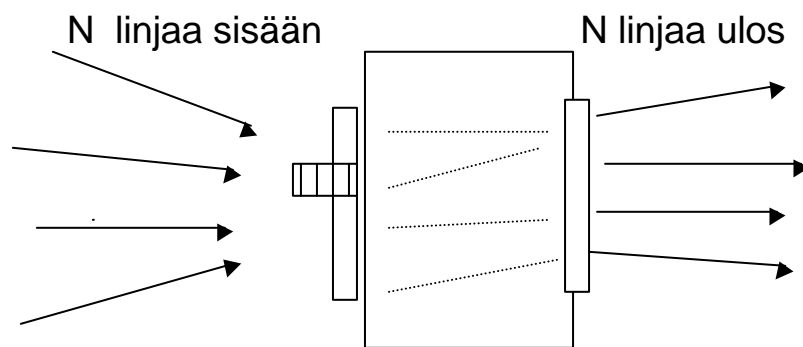
Jonotus reitittimessä

- **Sekä sisäänmeno- että ulostuloporttiin voi syntyä jonoa**
 - näissä jonoissa reititin voi kadottaa paketteja, kun puskuritila ei enää riitä
 - se kummassa jonossa paketit katoavat, riippuu kytkimen ja linjan nopeuden suhteista
 - jonoa voi syntyä myös, koska useasta lähteestä pyritään samaan kohteeseen



Kytкин toimii riittävällä nopeudella, joten sisääntulossa ei tarvitse jonottaa.

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



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)