Aalto-yliopisto
Perustieteiden
korkeakoulu

Linkkikerros 1: perusteet

CSE-C2400 Tietokoneverkot

04.03.2014

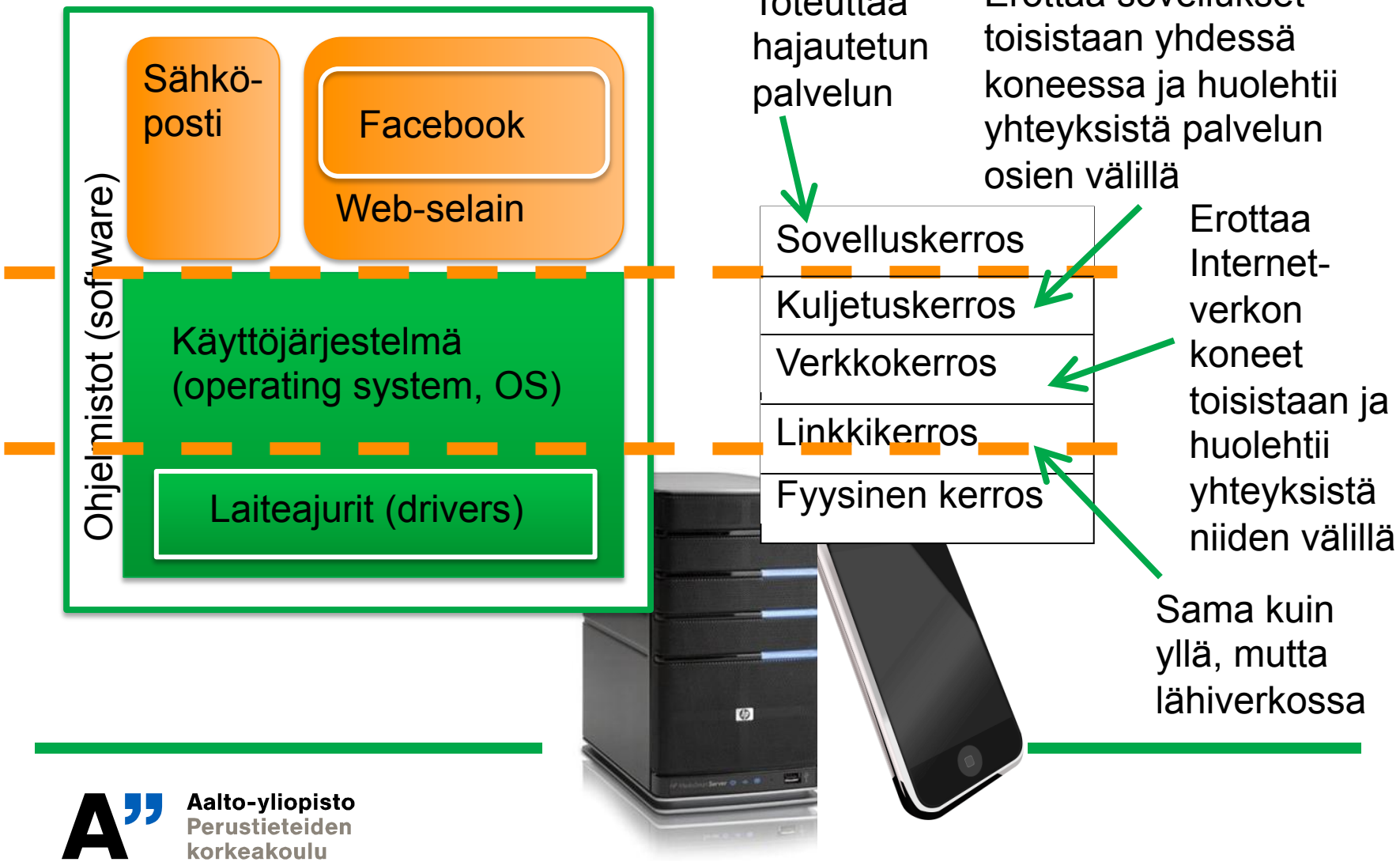
Matti Siekkinen

Osa sisällöstä adaptoitu seuraavista lähteistä: J.F. Kurose and K.W. Ross: Computer Networking: A Top-Down Approach 6th ed. -kirjan lisämateriaali

Viime luennoilla

- Verkkokerros on Internetissä käytännössä IP
  - v4 ja v6
- IP toteuttaa epäluotettavan ja tilattoman pakettien välityspalvelun
  - Ylemmät protokollat hoitaa tarvittaessa luotettavuuden ym.
- IP-osoitteet hallinnoitu luonnonvara
  - Voidaan jakaa aliverkoiksi bittirajojen kohdalta
  - NATin avulla yksityiset osoiteavaruudet käyttöön
- Reitittimet siirtelevät IP-paketteja verkossa
  - Pakettien välitys (forwarding)
  - Reititys (routing)
    - Inter-domain (BGP) ja intra-domain (OSPF, RIP, …)

Internet-protokollapino



Sisältö

- Linkkikerros
- Virheenkorjaus
  - Pariteetit, tarkistesummat ja CRC
- Jaetut linkit: monipääsyprotokollat (multiple access)
  - Lähiverkko (LAN)
- Linkkikerroksen osoitteet
  - Myös ARP
- Ethernet

Tämän luennon jälkeen…

Ymmärrätte:

- Linkkikerroksen tehtävän
- Linkkikerroksen osoitteistuksen
  - MAC osoitteet ja ARP
- Yleisimmät virheenkorjausmenetelmät
  - CRC virheenkorjaus
- Monipääsymenetelmät
  - Erityisesti satunnaispääsyprotokollat (random access)

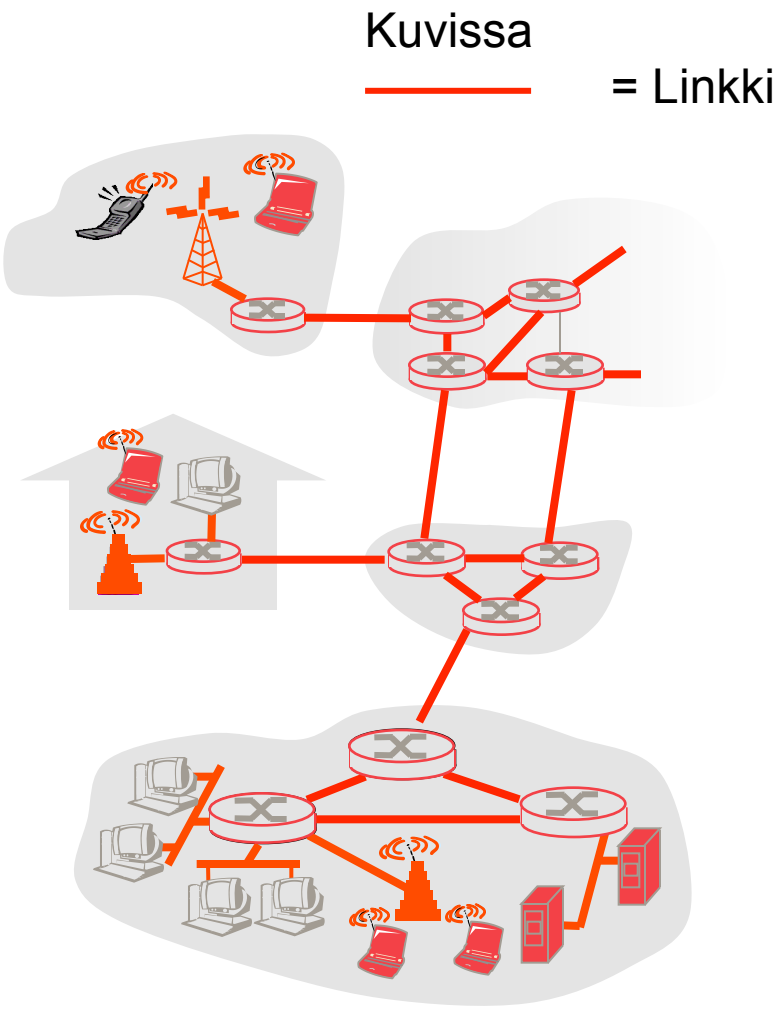
Tiedostatte:

- Mikä on Ethernet
- Muut monipääsymenetelmät (kanavanjako ja vuorottelu)

Linkkikerros: terminologiaa

- Päätelaitteet ja reitittimet ovat solmuja
- Viereisiä solmuja yhdistävät tietoliikennekanavat linkkejä
  - langallisia tai langattomia
- Linkkikerroksen ”paketti” on kehys

linkkikerroksen vastuulla on siirtää datagrammi yhdestä solmusta viereiseen solmuun linkin yli

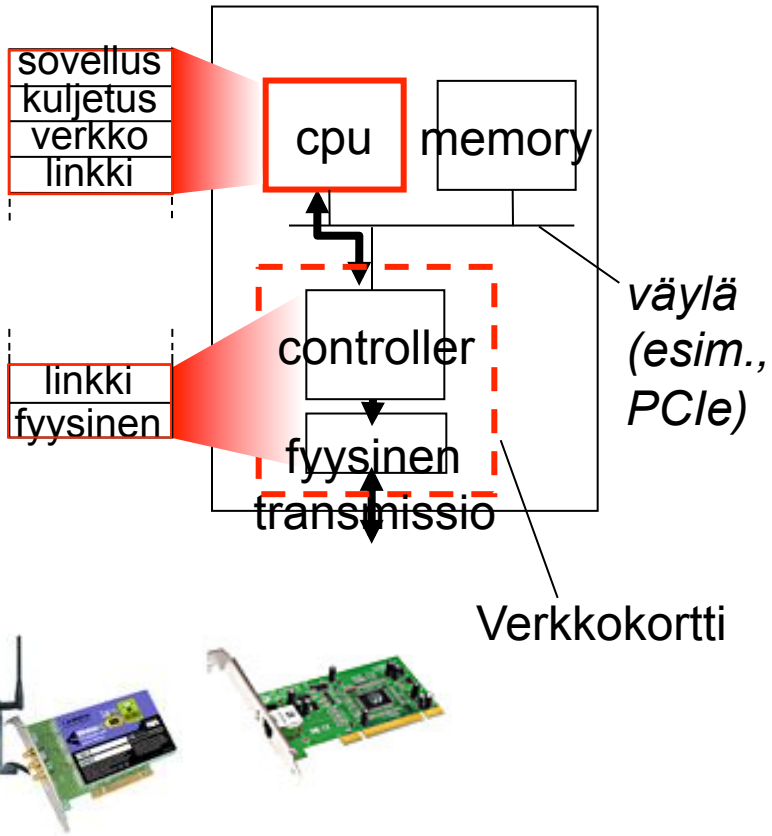


Linkkikerroksen palvelut

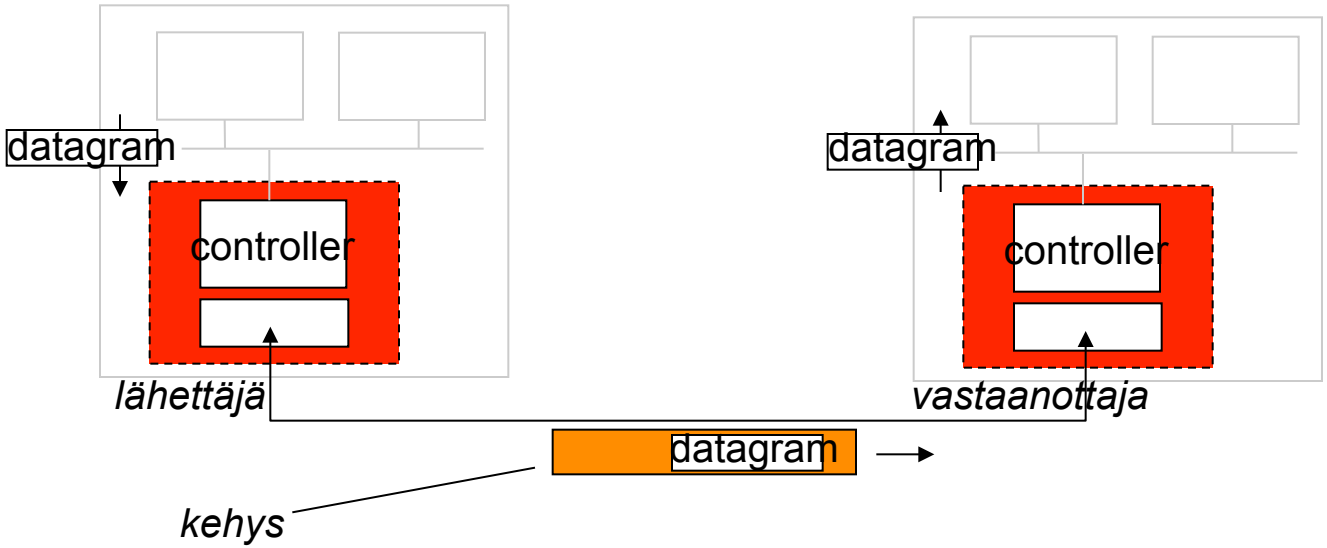
- Kehystys, siirtotielle pääsy:
  - Kapseloi IP-paketin kehykseen ja lisää kehyksen otsakkeen ja loppuosan
  - Siirtokanavalle pääsyn kontrolli jos jaettu media
  - Käytetään MAC-osoitteita (ei IP-osoitteita!)
- Luotettava tiedonsiirto vierekkäisten solmujen välillä
  - Virheiden havaitseminen
  - Virheenkorjaus joidenkin linkkien välillä
- Vuonhallinta
  - Odottelu vierekkäisten vastaanottajien ja lähettäjien välillä
  - Esim. Ethernetin PAUSE-kehys
- Half-Duplex tai Full-Duplex (siirtosuuntien hallinta)
  - Half-duplex: lähetys vuorotellen
  - Full-duplex: molemmat vastaanottaa ja lähettää samaan aikaan

Missä linkkikerros on toteutettu?

- Jokaisessa päätelaitteessa ja verkkolaitteessa
- ”Verkkokortti” (Network Interface Card, NIC)
  - Ethernet tai 802.11 kortti/adapteri
  - Toteuttaa linkki- ja fyysisen kerroksen
  - Asennetaan tietokoneen väylään
    - Esim. PCIe
  - Usein sulautettuna, ei erillinen kortti
    - laptop, kännykkä
- Osa linkkikerroksesta softaa joka ajetaan CPU:ssa
  - Esim. paketin välitys IP-kerrokselle
- Yhdistelmä rautaa, softaa, ja sulautettua ohjelmistoa
  - ”Software meets hardware”



Viestintä linkin yli



- Lähettävä puoli:
  - Kapseloi datagrammin kehykseen
  - Lisää virheenkorjausbitit, vuon ohjaus, jne.
- Vastaanottava puoli
  - Tutkii mahdolliset siirtovirheet, vuon ohjauksen, jne.
  - Kaivaa datagrammin, ja antaa sen ylemmälle kerrokselle (IP) vastaanottopäässä

Mikä on lähiverkko?

- Lähiverkko (Local Area Network, LAN) voi olla langallinen tai langaton (WLAN)
  - Esim. Ethernet- tai Wi-Fi-verkko
- Maantieteellisesti rajatulla alueella toimiva verkko
  - Esim. koti, toimisto, yliopistokampuksen osa
- Layer-2 (linkkikerros) verkko
  - Verkkolaitteet eivät toteuta IP-protokollaa
  - Ei IP-reitittimiä, pelkästään linkkikerroksen kytkimiä, hubeja, toistimia

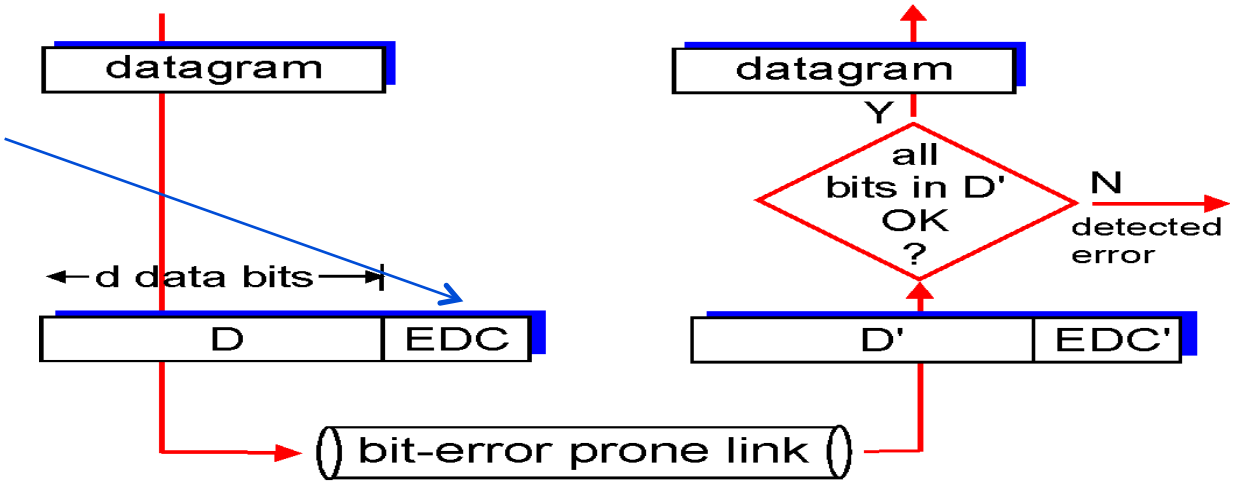
Sisältö

- Linkkikerros
- Virheenkorjaus
  - Pariteetit, tarkistesummat ja CRC
- Jaetut linkit: monipääsyprotokollat (multiple access)
  - Lähiverkko (LAN)
- Linkkikerroksen osoitteet
  - Myös ARP
- Ethernet

Virheiden havainnointi ja korjaus

- Linkkikerroksella usein toteutetaan vaikka TCP hoitaa
  - Vältetään TCP ruuhkanhallinnan reagointi
  - Nopeampi reagointi virheisiin (kuljetuskerros on end2end!)
  - Vähemmän turhaa liikennettä (virheellisiä paketteja ei välitetä)

Error Detection ja Correction bitit

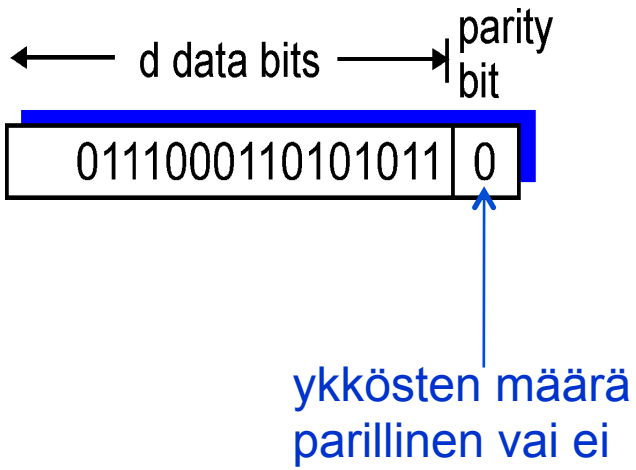


Virheiden havainnointi ja korjaus

- Joskus vain virheen havainnointi, ei korjausta
  - Esim. Ethernet
- Erityisesti langattomilla linkeillä siirtovirheitä voi tulla paljon
  - Signaalin vaimennus, kohina, interferenssi
  - Pyritään myös korjaamaan virheet
- Virheen havaitseminen ei ole 100% luotettavaa
  - Enemmän virheenkorjausbittejä → suurempi hav. todennäköisyys

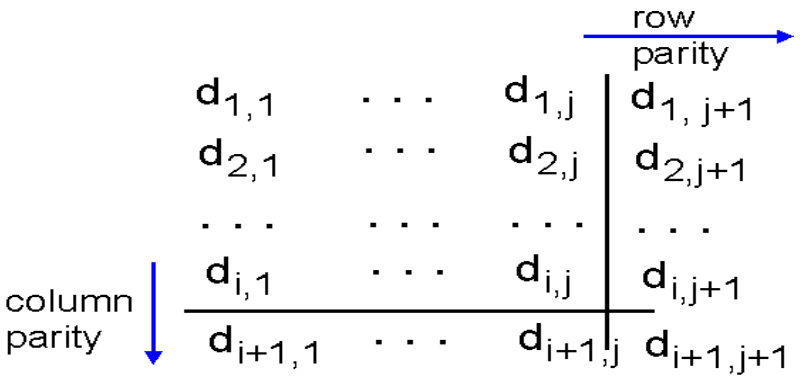
Pariteettitarkistus

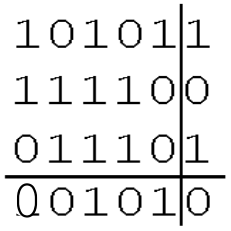
- *Yhden bitin pariteetti*:
  - Havaitsee parittoman määrän bittivirheitä

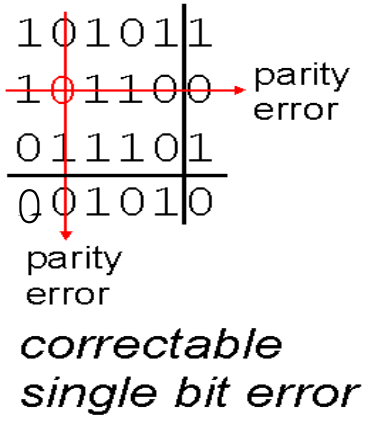


Pariteettitarkistus

- *Kaksiulotteinen pariteetti:*
  - Havaitsee ja korjaa yhden bitin virheet
  - Havaitsee useamman bitin virheet (muttei korjaa)
  - Pitää lähettää enemmän virheenkorjausbittejä

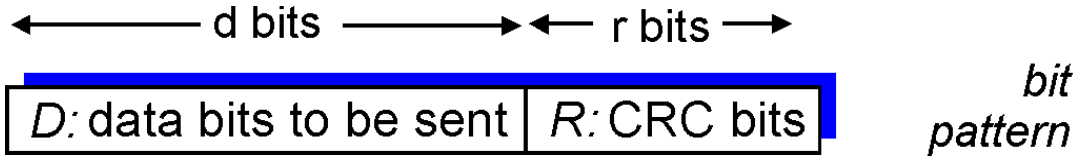






Cyclic Redundancy Check (CRC)

- Voi havaita kaikki purskeiset virheet r+1 bittiin asti
- Laajalti käytössä
  - Ethernet, 802.11 WiFi, ATM
- Tarkastellaan databittejä, D, binäärinumerona
- Valitaan r+1 bittijono (generaattori), G
  - lähettäjä ja vastaanottaja sopii
  - käytetään standardoituja generaattoreita
- Lähettäjä valitsee r CRC bittiä (R ao. kuvassa), siten, että
  - <D,R> täsmälleen jaettavissa G:llä (modulo 2), eli jakojäännös nolla
- Vastaanottaja jakaa <D,R> G:llä
  - Jos jakojäännös ei nolla → havaittu virhe



$D * 2^r \quad XOR \quad R$ *mathematical formula*

CRC esimerkki

Halutaan:

$D \cdot 2^r$ XOR R = nG

On yhtä kuin:

$D \cdot 2^r$ = nG XOR R

Toisin sanoen:

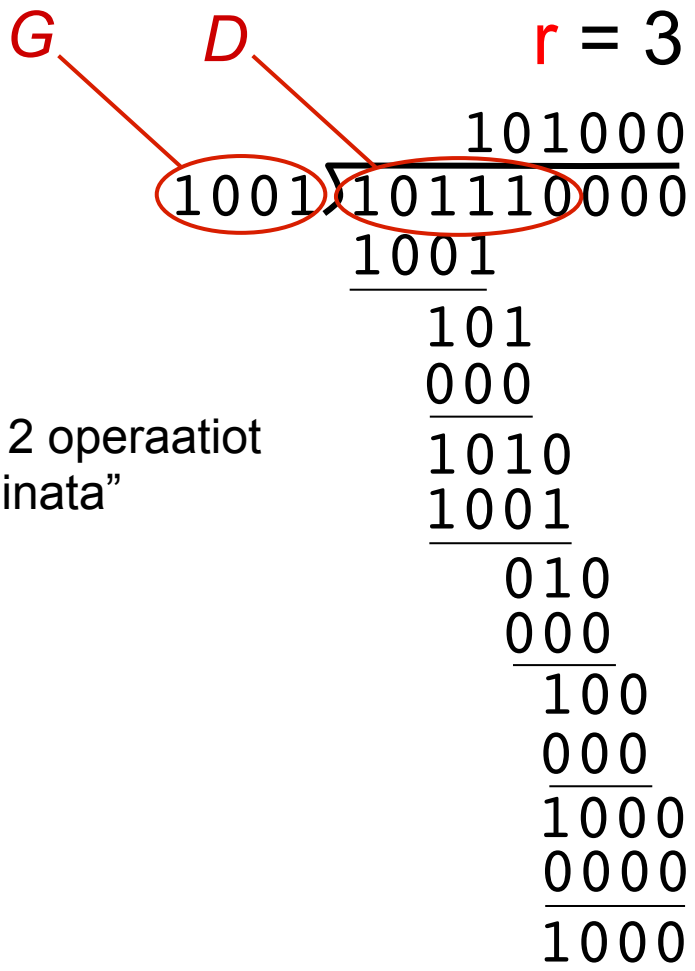
jos jaamme $D \cdot 2^r$ G:llä, saadaan jakojäännös R

$$R = \text{jakojäännös} \left[\frac{D \cdot 2^r}{G} \right]$$

Lähetettäessä jakojäännös lisätään datan perään

Vastaanottaja jakaa koko datan samalla G:llä, ja jos jakojäännös nolla, ei havaittuja virheitä

modulo 2 operaatiot
→ ei “lainata”



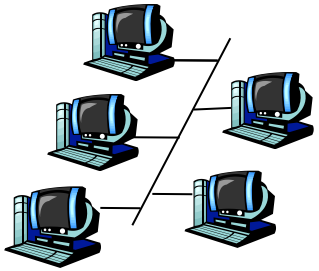
Sisältö

- Linkkikerros
- Virheenkorjaus
  - Pariteetit, tarkistesummat ja CRC
- Jaetut linkit: monipääsyprotokollat (multiple access)
  - Lähiverkko (LAN)
- Linkkikerroksen osoitteet
  - Myös ARP
- Ethernet

Linkit ja resurssit

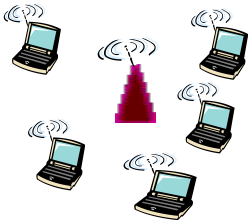
Kahdentyyppisiä “linkkejä”:

- Pisteestä-pisteeseen (point-to-point)
  - PPP linkit modeemiyhteyksille, esim. ADSL
  - point-to-point linkit Ethernet kytkimen ja tietokoneiden välillä
- Yleislähetys (broadcast) (jaettu johto tai radiotaajuus)
  - ”Vanhanaikainen” Ethernet (jossa työasemat kiinni samassa kaapelissa)
  - 802.11 WLAN eli langaton lähiverkko
  - Langattomat mobiiliverkot
    - GPRS, UMTS
  - Kaapelimodeemit, Bluetooth

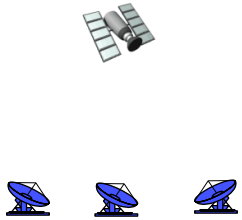


Yhteinen (jaettu) kaapeli (esim., kaapeloitu Ethernet)

Jaettu RF-taajuus (esim., 802.11 WiFi)



jaettu RF (satelliitti)



ihmiset cocktail kutsuilla (jaettu ilmatila, akustinen)

Monipääsyprotokollat

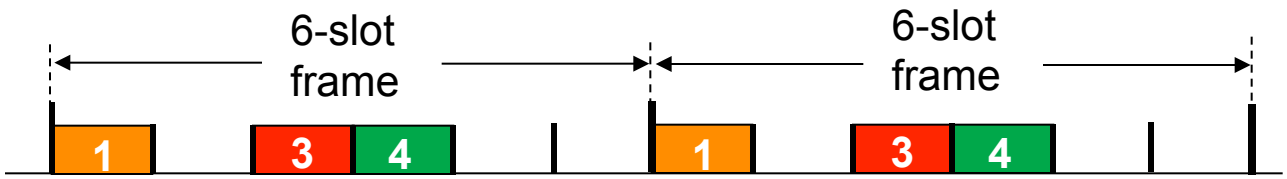
- Yksi jaettu lähetyskanava
- Monipääsyprotokolla koordinoi kuka saa käyttää milloinkin jaettua kanavaa
- Ideaali monipääsyprotokolla:
  - Yksi lähettäjä → saa koko kaistan
  - M samanaikaista lähettäjää → jokainen saa R/M kaistan
    - R on kanavan koko kapasiteetti
  - Ei kellojen synkronointia, aikavälejä
  - Täysin hajautettu
    - Ei koordinaattorisolmua (single point of failure)
  - Yksinkertainen ja halpa

Monipääsyprotokollat

- Kanavan osittaminen
  - Jaetaan kanava pienempiin osiin (aikavälejä, taajuuksia, CDMA-koodeja)
  - Allokoidaan yksi osa tietyn solmun yksinomaiseen käyttöön
  - Esim. piirikytkentäinen tietoliikenne: Puhelinverkko, GSM, 3G..
- “Vuorottelu”
  - Solmut saavat vuoroja lähettää, mutta solmut joilla on enemmän lähetettävää saavat pidempiä vuoroja
  - Esim. IBM Token-Ring
- Satunnainen pääsy (Random access)
  - Kanavaa ei jaeta, sallitaan törmäykset
  - “toivutaan törmäyksistä”
  - Esim. Ethernet ja WLAN

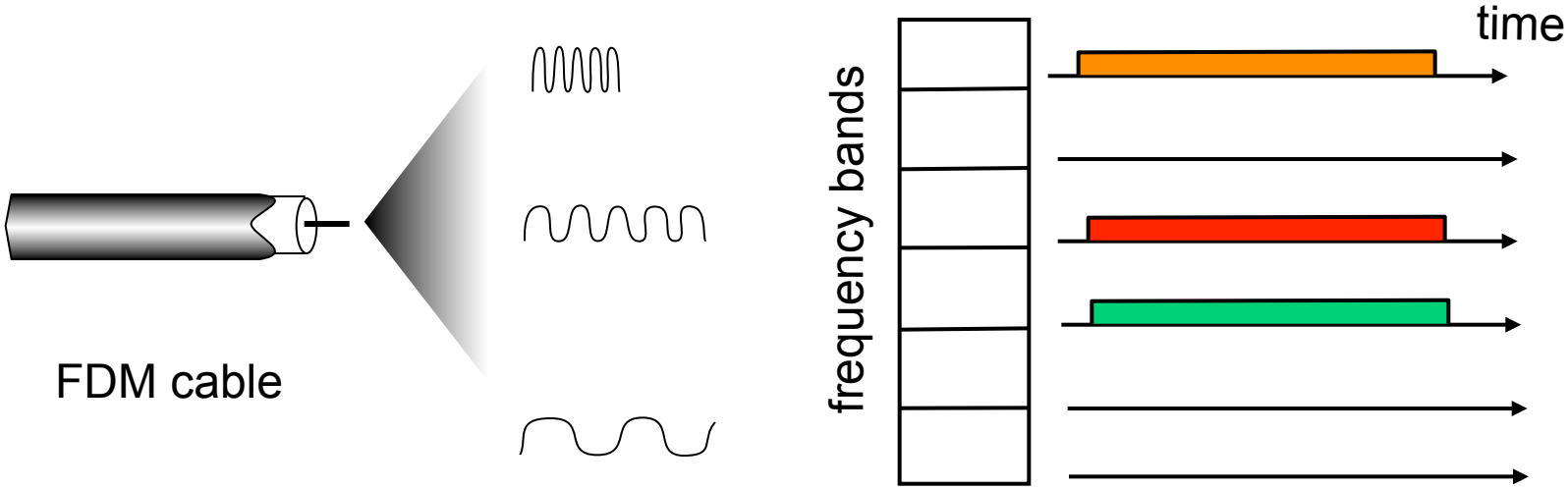
Kanavan osittaminen: TDMA

- TDMA: time division multiple access
- kierroksittainen pääsy kanavaan
- jokainen laite saa määritellyn mittaisen aikaikkunan (time slot) joka kierroksella
  - pituus = paketin lähetysaika
- käyttämättömät ikkunat laskevat kanavan käyttöastetta
- esim: 6-laitteen LAN, 1,3,4 lähettävät paketin, 2,5,6 idlaavat



Kanavan osittaminen: FDMA

- FDMA: frequency division multiple access
- kanavan koko spektri jaettu pienemmiksi taajuusalueiksi
- jokaiselle laitteelle annetaan tietty taajuusalue
- käyttämättömät taajuusalueet alentavat koko kanavan käyttöastetta
- esim: 6-laitteen LAN, 1,3,4 lähettää paketin, 2,5,6 idlaa



Random Access: Törmäykset (collisions)

- Ei sovittuja lähetysaikatauluja solmujen välillä
  - Kukin solmu voi lähettää koska haluaa
- "Törmäys": Kaksi tai useampi solmu lähettää samaan aikaan
  - vastaanottajat kuulevat kaikki lähetykset yhtä aikaa
  - vastaanottajat eivät pysty erottelemaan eri lähetyksiä toisistaan
    - muuten kyseessä olisi jaettu kanava
- Törmäyksen aikana lähetetty data ”korruptoituu”
  - Pitää lähettää uudelleen

Random Access protokollat

- Periaatteet:
  - Pyritään varmistamaan ettei törmäyksiä tapahdu
  - Pyritään joko tunnistamaan törmäykset tai välttämään niitä
- Protokolla määrittelee:
  - Kuinka törmäyksiä vältetään
  - Kuinka törmäykset tunnistetaan
  - Kuinka törmäyksistä toivutaan
- Esimerkkiprotokollia:
  - (slotted) ALOHA
  - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA,
    - CSMA = Carrier Sense Multiple Access, CD= Collision Detection, CA = Collision Avoidance
    - Käytetään Ethernetissä ja WLAN:issa

Slotted ALOHA

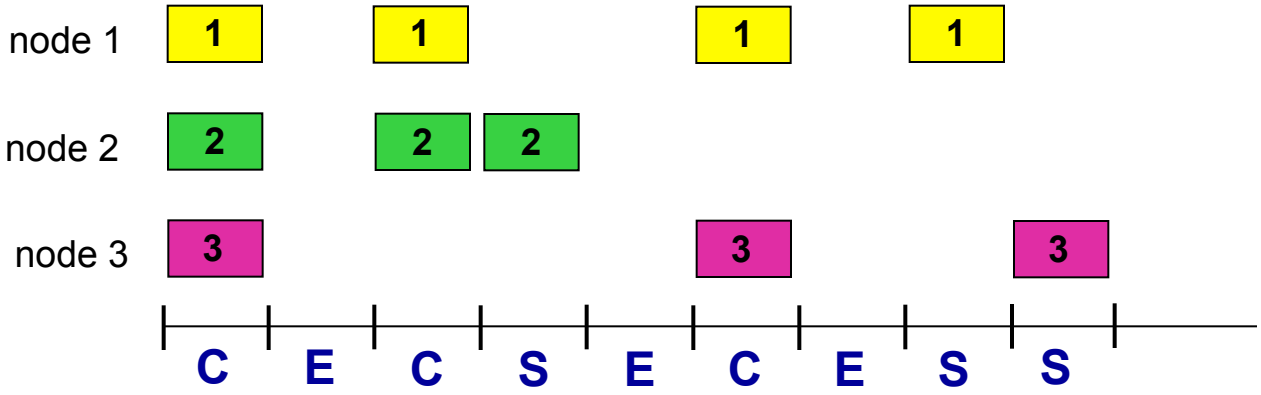
oletukset:

- kaikki kehykset samankokoisia
- aika jaettu vakiokokoisiin slotteihin
  - yhden kehyksen lähettämiseen kuluva aika
- laitteet alkavat lähettää vain aikaslotin alussa
- laitteet ovat synkronoituja
- 2 tai useampi lähettäjä per slotti → kaikki lähettäjät havaitsevat törmäyksen

toiminta:

- uusi kehys lähetettävänä → lähetä seuraavassa slotissa
- ei törmäystä → lähetä uusi kehys seuraavassa slotissa
- törmäys → uudelleenlähetä kehys jokaisessa seuraavassa slotissa todennäköisyydellä p kunnes ei törmäystä

Slotted ALOHA



Hyvät puolet:

- yksi aktiivinen laite voi koko ajan käyttää koko kanavaa
- laajalti hajautettu protokolla: laitteet pitää olla syknroonissa (slotit)
- yksinkertainen

Huonot puolet:

- törmäykset laskee käyttöastetta
- vapaat slotit laskee käyttöastetta
- laitteet voisivat tunnistaa törmäyksen ennen kuin koko slotti käytetty
- kellojen synkronointi

Slotted ALOHA: tehokkuus

tehokkuus: keskimääräinen osuus onnistuneista lähetyksistä (monta laitetta, joilla kaikilla monta kehystä lähetettävänä)

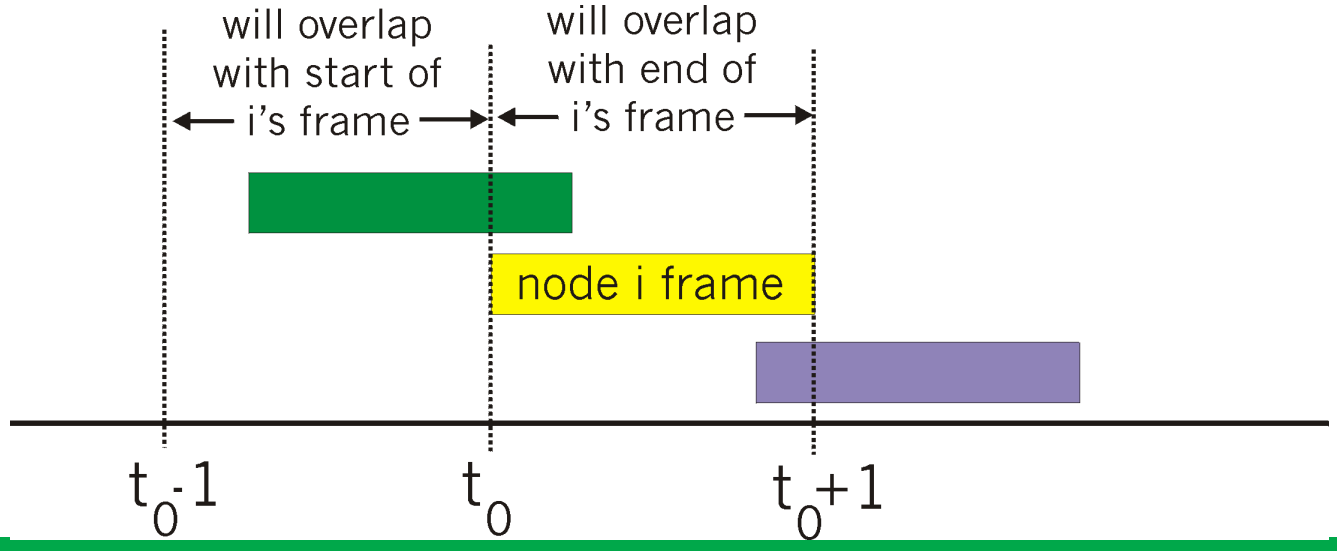
- *oletus: N* laitetta joilla monta kehystä lähetettävänä, jokainen lähettää seuraavassa slotissa todennäköisyydellä *p*
- todenäköisyys että yksittäinen lähetys onnistuu = $p(1-p)^{N-1}$
- todennäköisyys että *jonkin laitteen* lähetys onnistuu = $Np(1-p)^{N-1}$
- max tehokkuus: etsi p* joka maksimoi $Np(1-p)^{N-1}$ (saadaan: $p^*=1/N$)
- monta laitetta: laske lausekkeen $Np^*(1-p^*)^{N-1}$ raja-arvo kun N lähestyy ääretöntä:

max tehokkuus = 1/e = .37

→ parhaimmillaan kanava käytössä hyödyllisesti vain 37% ajasta!

Pure (unslotted) ALOHA

- unslotted Aloha: laitteet ei synkronoitu → yksinkertaisempi kuin slotted ALOHA
- kun uusi kehys → lähetä välittömästi
- törmäyksen todennäköisyys suurempi:
  - ajanhetkellä t0 lähetetty kehys törmää kaikkiin aikavälillä [t0-1,t0+1] lähetettyihin kehyksiin



Pure ALOHA: tehokkuus

P(yksittäinen lähetys onnistuu) = P(laite lähettää)

ja P(yksikään toinen laite ei lähetä aikavälillä $[t_0-1,t_0]$

ja P(yksikään toinen laite ei lähetä aikavälillä $[t_0,t_0+1]$

$$= p \cdot (1-p)^{N-1} \cdot (1-p)^{N-1}$$

$$= p \cdot (1-p)^{2(N-1)}$$

… etsitään optimiarvo p:lle ja annetaan $n \rightarrow \infty$

$$= 1/(2e) = .18$$

vielä kehnompi kuin slotted Aloha!

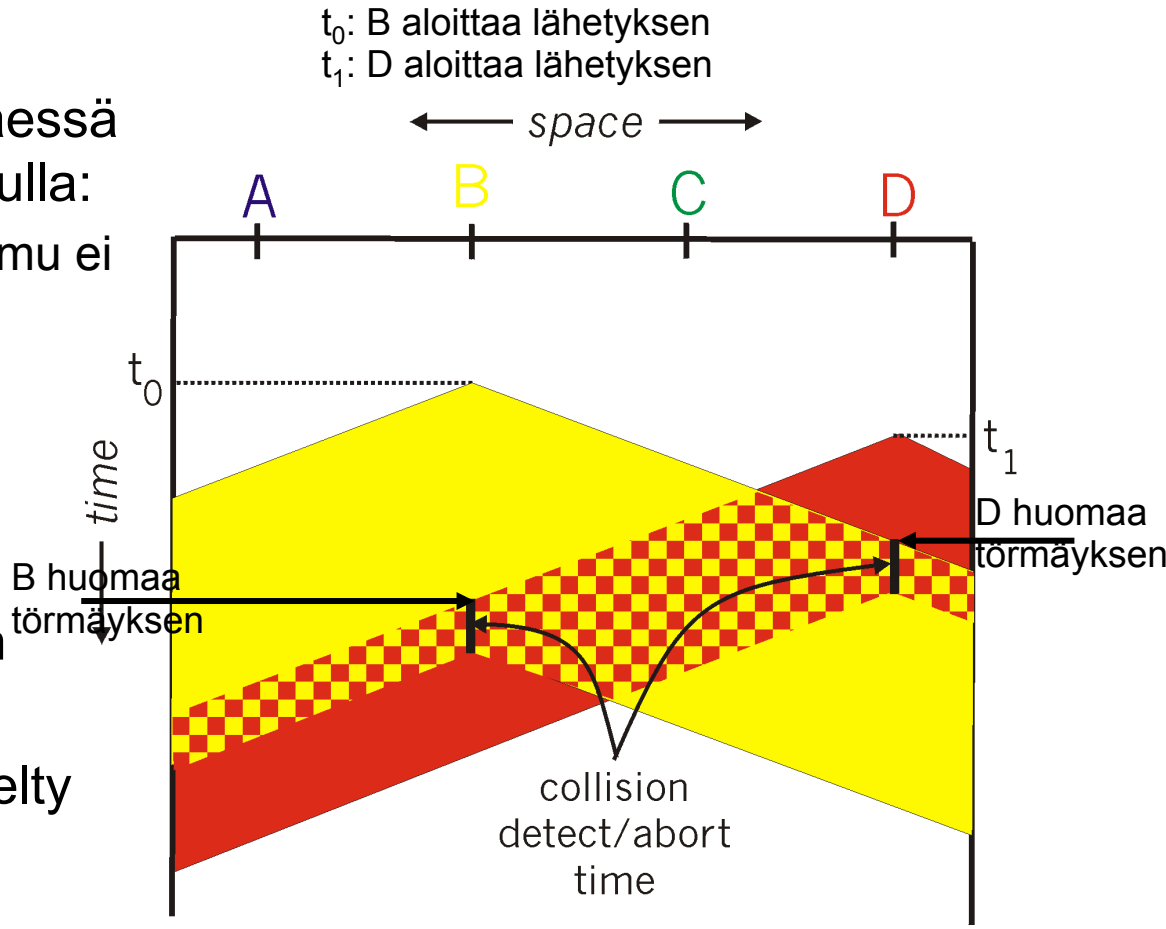
CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

CSMA: Ennen lähetystä kuunnellaan onko siirtotiellä signaalia:

- Jos kanava on vapaa:
  - lähetetään koko kehys
- Jos kanava on varattu:
  - viivästetään lähetystä
- Analogia ihmisten välisessä keskustelussa: Älä keskeytä toista!

CSMA: törmäykset

- Vaikka siirtotie on lähetettäessä vapaa törmäyksiä voi silti tulla:
  - Etenemisviiveen takia solmu ei tiedä, että toinen on jo aloittanut lähetyksen
  - Samaan aikaan aloittavat
- Etäisyys ja etenemisviive vaikuttavat törmäystodennäköisyyteen
- Kaapelin maksimipituus ja paketin minimikoko määritelty



CSMA/CD (collision detection)

CSMA/CD: kanavan kuuntelu, viivästetään lähetystä kuten CSMA:ssa

- törmäykset havaitaan lyhyessä ajassa
- siirto keskeytetään heti törmäyksen jälkeen, jolloin kanavan hukkakäyttö pienenee

- Törmäysten havaitseminen (Collision Detection, CD) :
  - langallinen linkki: mitataan samanaikaisesti vastaanotetun signaalin voimakkuutta ja verrataan lähetettyyn
  - langattomat linkit (WLAN): käytännössä mahdotonta
    - full duplex radioita ei ole (pl. tutkimusprotot)
    - signaalin vaimenemisen vuoksi ei havaita kaikkia törmäyksiä (hidden terminal)

Ethernetin CSMA/CD

1. Vastaanota IP-paketti ja luo kehys
2. Carrier Sense (CS)
   - Kanava on vapaa → lähetä kehys
   - Kanava varattu → odota kunnes vapaa ja sitten lähetä
3. Collision Detection (CD)
   - Havaitaan toinen lähetys → keskeytä lähetys ja lähetä ruuhkasignaali (jam signal)
     - Varmistetaan, että kaikki muut lähettäjät ovat selvillä törmäyksestä
4. Jos törmäys → exponentiaalinen peruutus (exponential backoff)
   - Adaptoidaan uudelleenlähetysyritykset arvioituun silloiseen kuormaan
     - Paljon lähetyksiä → pidempi odotus
   - m:nnen törmäyksen jälkeen valitse K:n satunnaisesti väliltä {0,1,2,…,2m-1}
     - Satunnainen viive jottei yhtäaikaiset lähettäjät ole synkassa
   - Odota K*512 bitin aikaa, ja palaa sitten vaiheeseen 2

CSMA/CD: tehokkuus

- T_{prop} = max siirtoviive (propagation delay) 2 laitteen välillä lähiverkossa
- t_{trans} = max kokoisen kehyksen lähetykseen kuluva aika

$$efficiency = \frac{1}{1 + 5t_{prop}/t_{trans}}$$

- tehokkuus → 1
  - kun t_{prop} → 0
  - kun t_{trans} → ∞
- parempi tehokkuus kuin ALOHA, yksinkertainen, halpa toteuttaa ja hajautettu!

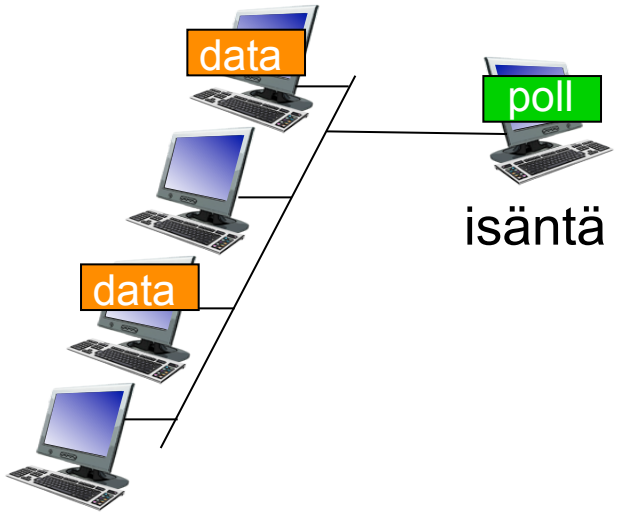
“Vuorottelu” -protokollat

- kanavan osittamiseen perustuvat protokollat:
  - jakaa kanavan tehokkaasti kun kuormaa paljon
  - tehottomia matalalla kuormalla: kanavapääsyviive, 1/N kaistaa allokoitu kun vain yksi aktiivinen lähettäjä!
- satunnaispääsyprotokollat:
  - tehokkaita matalalla kuormalla: yksi lähettäjä saa koko kanavan
  - iso kuorma: törmäykset aiheuttavat overheadia
- “vuorottelu” -protokollat
  - pyrkivät yhdistämään parhaat puolet ylläolevista

“Vuorottelu” -protokollat

pollaus:

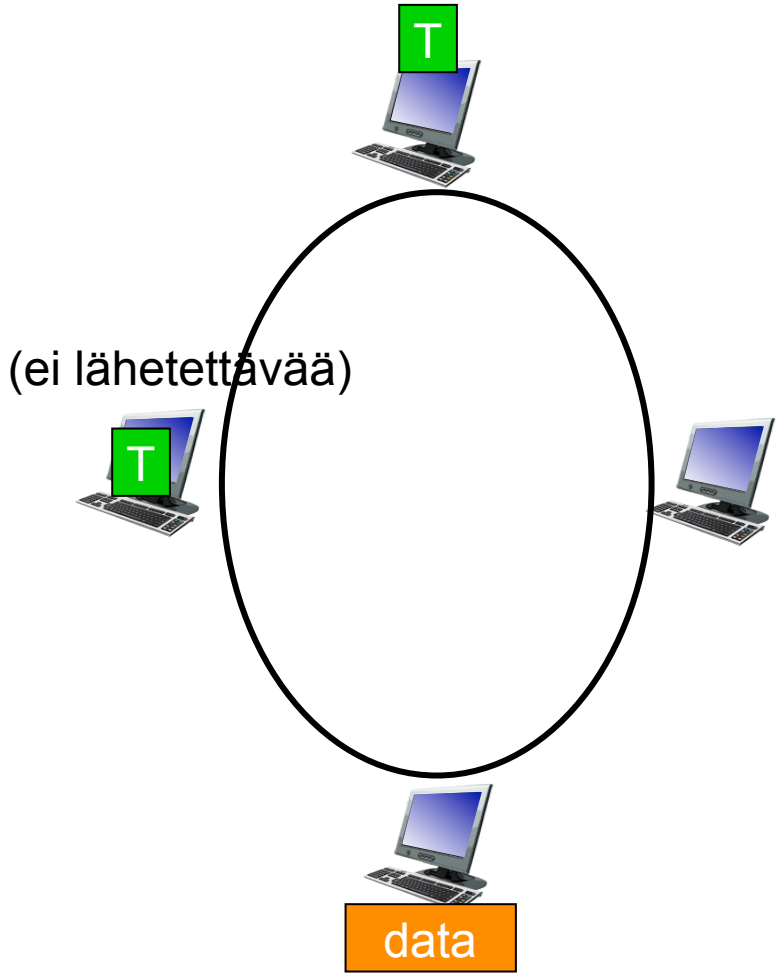
- isäntälaite “kutsuu” orjalaitteet lähettämään vuorollaan
- tyypillisesti käytössä “tyhmien” orjalaitteiden kanssa
- ongelmia:
  - pollaus overhead
  - viive
  - single point of failure (isäntä)



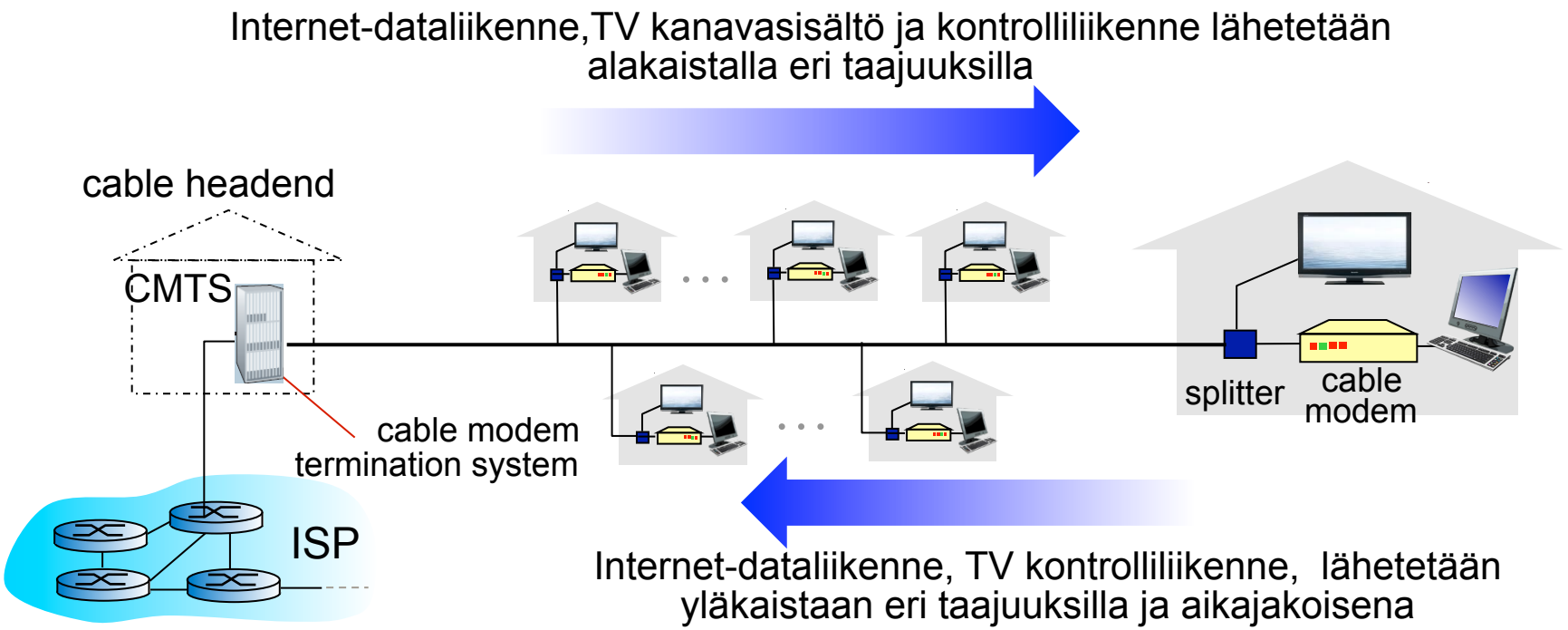
“Vuorottelu” -protokollat

token passing:

- token (poletti) välitetään laitteelta seuraavalle
- token viesti
- ongelmia:
  - token overhead
  - viive
  - single point of failure (token)



Kaapeliverkko



- alakaista (downstream) koostuu useista 40Mbps kanavista (broadcast)
  - yksi CMTS lähettää kanaville
- yläkaista myös useita 30 Mbps kanavia
  - monipääsy: käyttäjät kilpailevat yläkaistan kanavien aikasloteista

Kaapeliverkko

DOCSIS: data over cable service interface spec

- FDM jakaa ylä- ja alakaistan kanaviin
- TDM käytetään yläkaistassa: osa sloteista allokoidaan, osasta kilpaillaan (satunnaispääsy)
  - alakaistan MAP-kehys: kertoo yläkaistan slottien allokoinnin
  - tietyt slotit varattu yläkaistan slottiallokointipyyntöihin: lähetetään satunnaispääsyn mukaisesti (binary backoff)
- Euroopassa käytössä EuroDOCSIS
  - Joitain eroja jenkkiversioon

MAC protokollat: yhteenveto

- *kanavan osittaminen*, ajallisesti, taajuusalueisiin tai koodeihin
  - Time Division, Frequency Division
- *satunnaispääsy (dynaaminen)*,
  - ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
  - carrier sensing: helppoa langallisissa verkoissa (wire), vaikeaa langattomissa
  - CSMA/CD käytössä Ethernetissä
  - CSMA/CA käytössä 802.11 (Wi-Fi)
- *vuorottelu*
  - isäntälaitteen pollaukseen perustuva tai tokenin välittäminen
  - bluetooth, FDDI, token ring

Sisältö

- Linkkikerros
- Virheenkorjaus
  - Pariteetit, tarkistesummat ja CRC
- Jaetut linkit: monipääsyprotokollat (multiple access)
  - Lähiverkko (LAN)
- Linkkikerroksen osoitteet
  - Myös ARP
- Ethernet

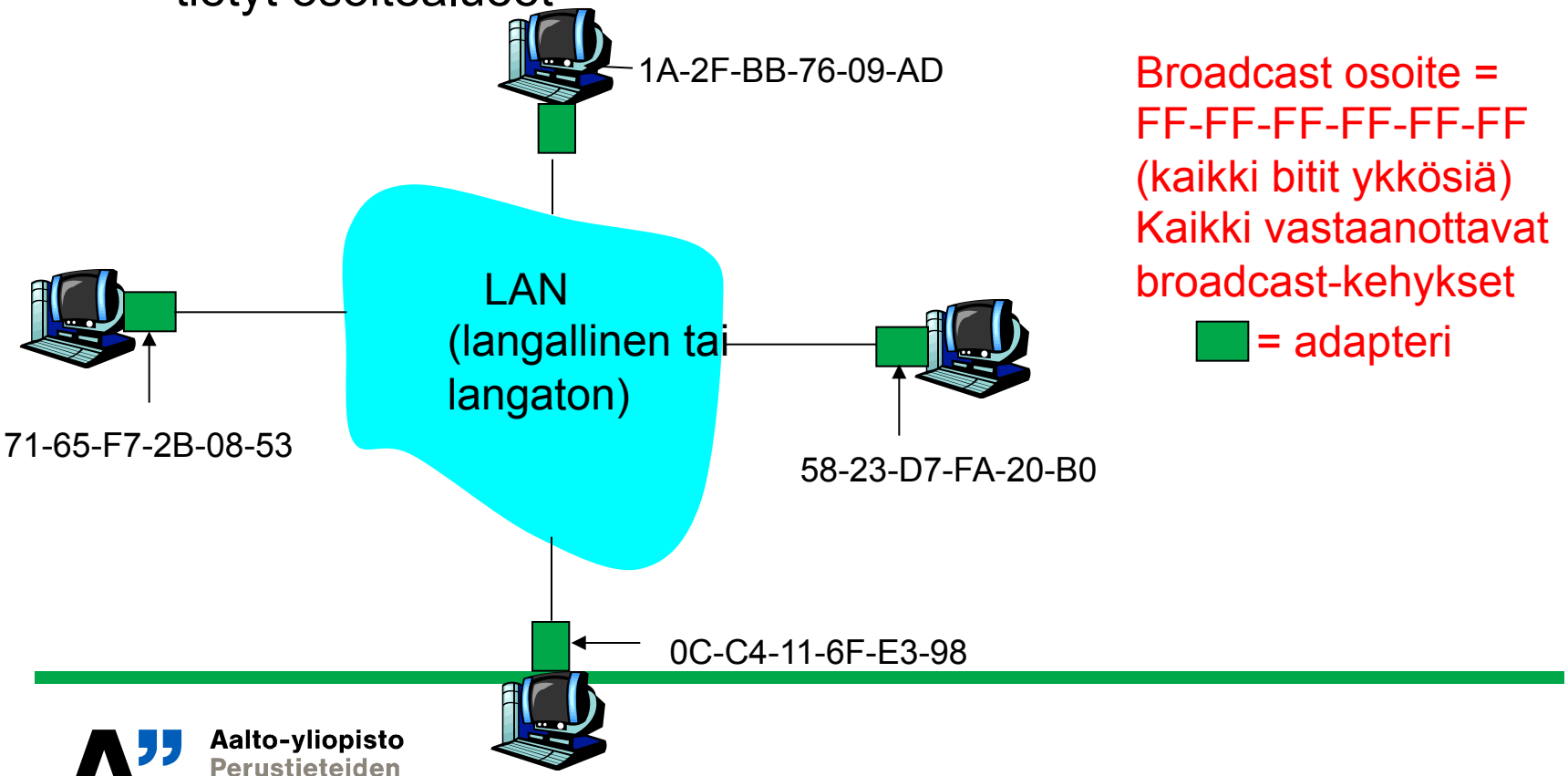
MAC osoite

- Linkkikerroksella käytössä MAC-osoitteet
- IP osoite on *verkkokerroksen* osoite
  - Käytetään paketin ohjaamisessa kohdeverkkoon
- MAC osoite
  - Tehtävä: saada kehys viedyksi yhdestä liitännästä toiseen fyysisesti kytkettyyn liitäntään *(sama verkko)*
  - 48-bittinen MAC-osoite (useimmissa LAN:eissa)
    - tallennettu verkkokortin (NIC) ROM:iin, joskus ohjelmallisesti muutettavissa
    - tarkoitus on ettei se muutu

MAC osoite

Jokaisella (MAC osoitteita käyttävällä) verkkoadapterilla (kortillla) on uniikki MAC osoite.

Verkkokorttien ja tietokoneiden valmistajat saavat käyttöönsä tietyt osoitealueet



Broadcast osoite =
FF-FF-FF-FF-FF-FF
(kaikki bitit ykkösiä)
Kaikki vastaanottavat
broadcast-kehykset

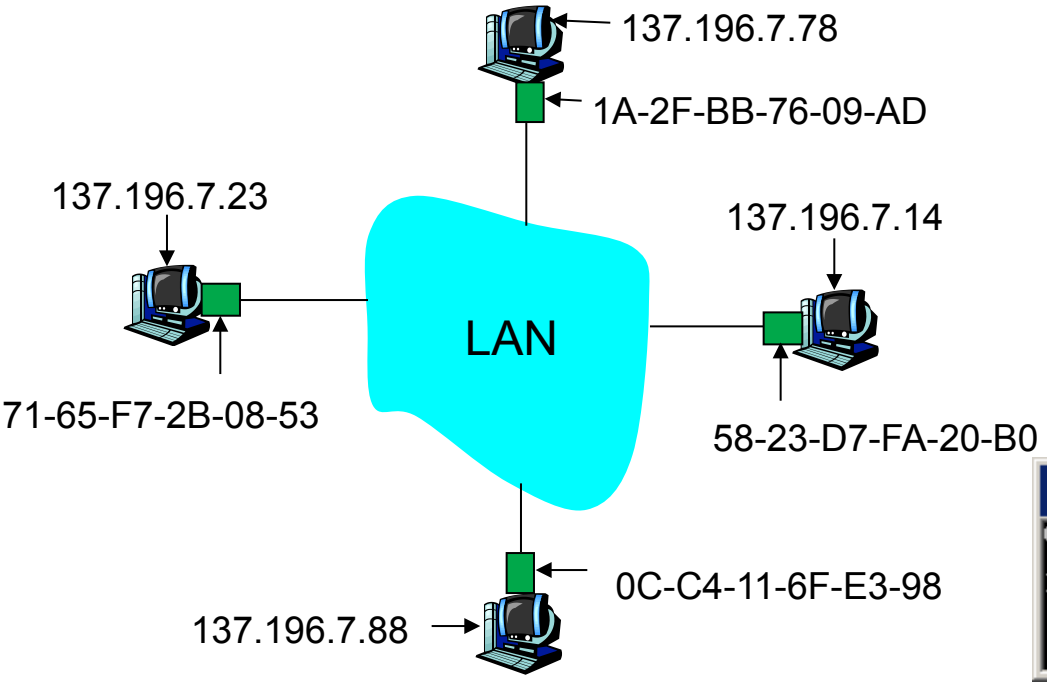
= adapteri

MAC osoite

- MAC osoitteiden allokaatiota hallinnoi IEEE
- Analogia:
  - MAC-osoite ←→ sotu
  - IP-osoite ←→ postiosoite
- MAC-osoite ei vaihdu siirryttäessä verkosta toiseen
- IP-osoite vaihtuu kun vaihdetaan verkkoa
  - Osoite riippuu IP-aliverkosta, mihin laite on kytketty
  - Osoitehierarkia mahdollistaa tehokkaan reitityksen

ARP: Address Resolution Protocol

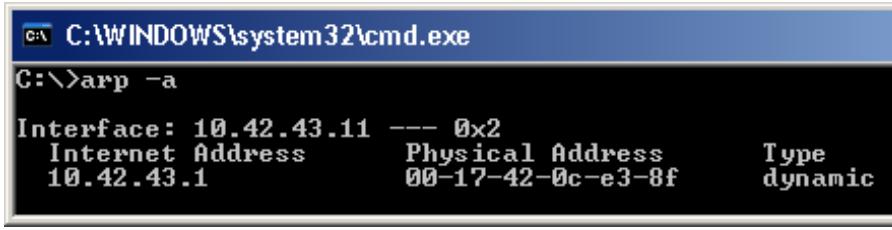
Kuinka selvitetään B:n MAC osoite kun tiedetään B:n IP-osoite?



- Jokaisessa IP-laitteessa (tietokone, reititin) LAN:issa on ARP taulu
- ARP taulu: IP/MAC osoitteiden mappaus LAN solmuille

  < IP osoite; MAC osoite; TTL>

  – TTL (Time To Live): aika jonka jälkeen osoitteiden kytkentä unohdetaan (tyypillinen 20 min)



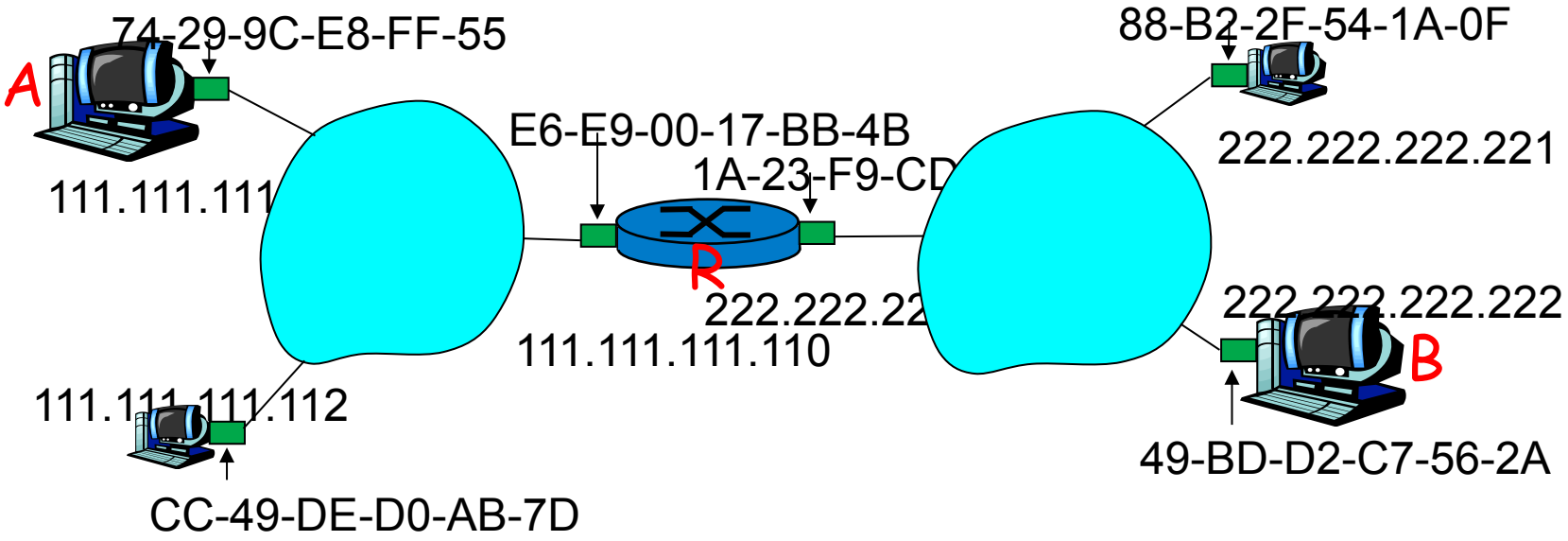
ARP: Sama lähiverkko

- A lähettää IP-paketin B:lle
- A ei tiedä B:n MAC-osoitetta
  - Ei ole (vielä) ARP-taulussa

1. A lähettää ARP kyselypaketin, jossa B:n IP osoite
   - Yleislähetys: kohde MAC osoite = FF-FF-FF-FF-FF-FF
   - LAN:in kaikki koneet vastaanottavat ARP kyselyn
2. B vastaa A:lle
   - B:n oma MAC-osoite vastauksessa
   - kohdeosoite on A:n MAC osoite (unicast)
3. A tallentaa osoiteparin ARP-tauluunsa
   - Pitää säännöllisesti virkistää, muuten unohdetaan (soft state)

ARP: toiseen lähiverkkoon

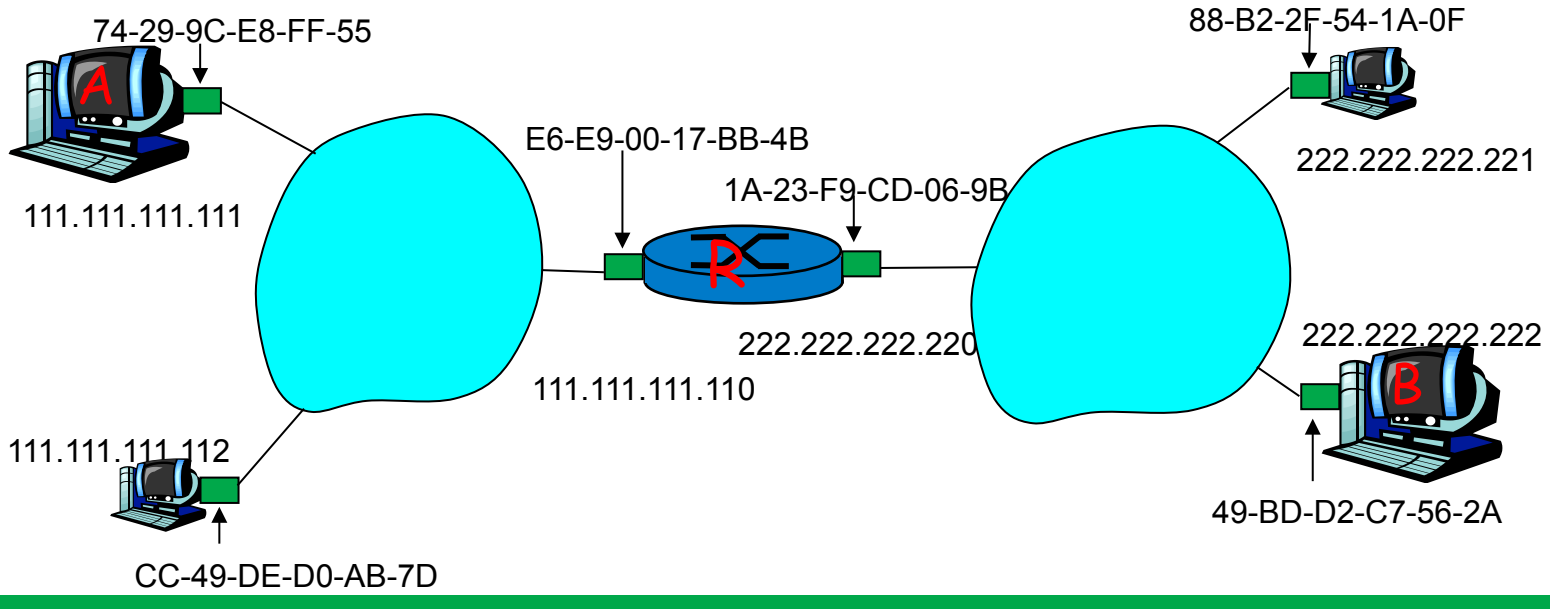
- Lähetetään paketti A:sta B:hen R:n kautta
- A tietää B:n IP-osoitteen (DNS kysely)



- kaksi ARP taulua reitittimessä R, yksi kummallekin IP verkolle (LAN)

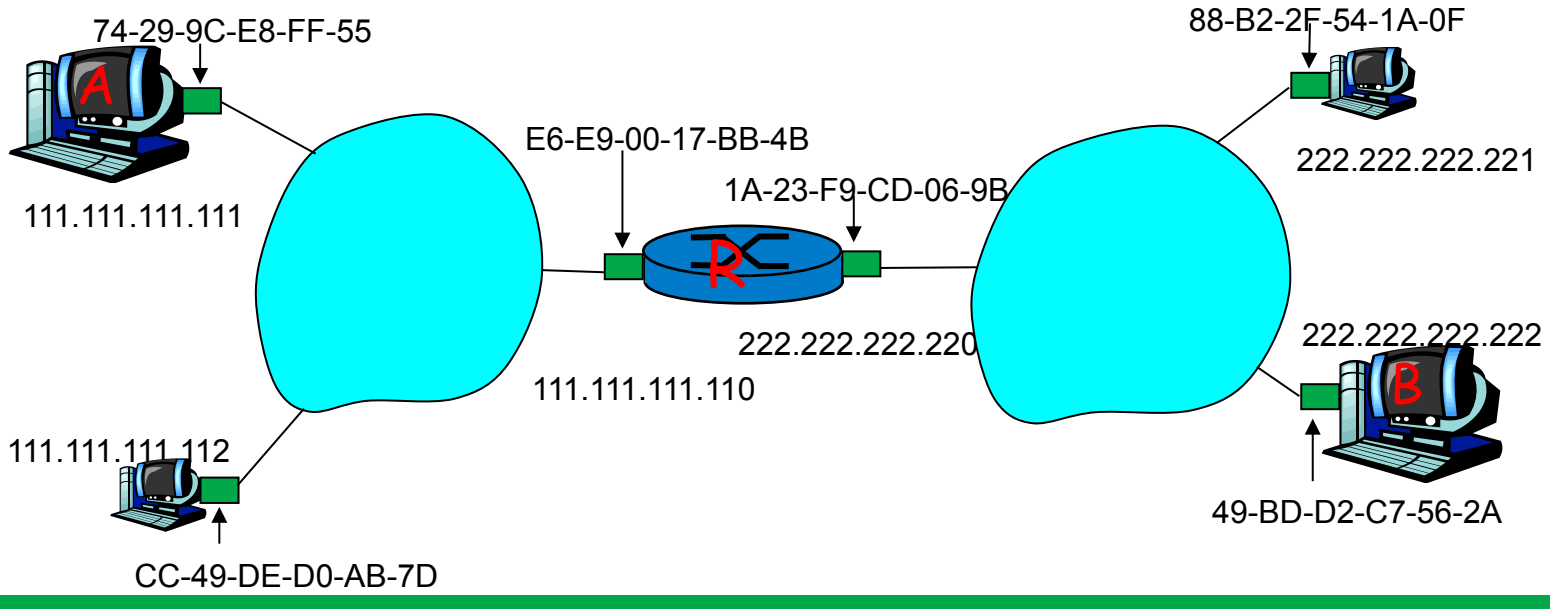
ARP: toiseen lähiverkkoon

1. A luo IP paketin: lähdeosoite A, kohdeosoite B
2. A:n reititystaulu kertoo, että oman verkon ulkopuolinen liikenne R:n kautta
   - A tietää R:n IP osoitteen: manuaalisesti konffattu tai reititysprotokollan avulla
3. A käyttää ARP:aa saadakseen selville R:n MAC osoitteen
   - 111.111.111.110 vastaava MAC osoite



ARP: toiseen lähiverkkoon

4. A luo linkkikerroksen kehyksen ja lähettää sen R:n MAC osoitteeseen
   - sisältö: lähetettävä IP-paketti
5. R dekapseloi IP-paketin kehyksestä → näkee, että kohdeosoite on B
6. R käyttää ARP:aa saadakseen B:n MAC osoitteen
7. R luo linkkikerroksen kehyksen ja lähettää sen
   - Sisältö: A→B IP-paketti
   - Kohdeosoite: B:n MAC osoite



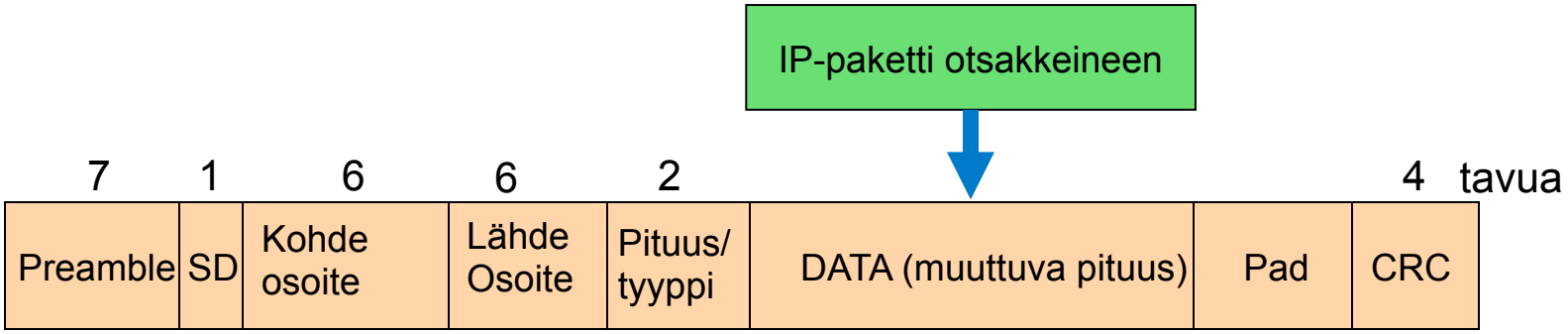
Sisältö

- Linkkikerros
- Virheenkorjaus
  - Pariteetit, tarkistesummat ja CRC
- Jaetut linkit: monipääsyprotokollat (multiple access)
  - Lähiverkko (LAN)
- Linkkikerroksen osoitteet
  - Myös ARP
- Ethernet

Ethernetin historiaa

- Eniten käytössä oleva langallinen LAN teknologia
- Kehitys:
  - 1970 ALOHAnet radioverkko käyttöön Hawajin saarilla
  - 1973 Metcalf ja Boggs kehittävät ideasta Ethernetin, kilpavarausverkon
  - 1979 DIX Ethernet II Standardi (Digital, Intel, Xerox ->DIX)
  - 1985 IEEE 802.3 LAN Standardi (10 Mbps)
  - 1995 Fast Ethernet (100 Mbps)
  - 1998 Gigabit Ethernet
  - 2002 10 Gigabit Ethernet
  - 2010 100/40 Gigabit Ethernet
- 1 GbE peruskauraa tänä päivänä päätelaitteille
- 10 GbE nyt käytössä high end verkoissa (esim. datakeskuksissa)
- 100 GbE tuotteita on jo esim. runkoverkon reitittimille muttei vielä pitkään aikaan päätelaitteisiin
  - Extreme Networksin 100G kytkinmoduulin hinta $35,000 per portti

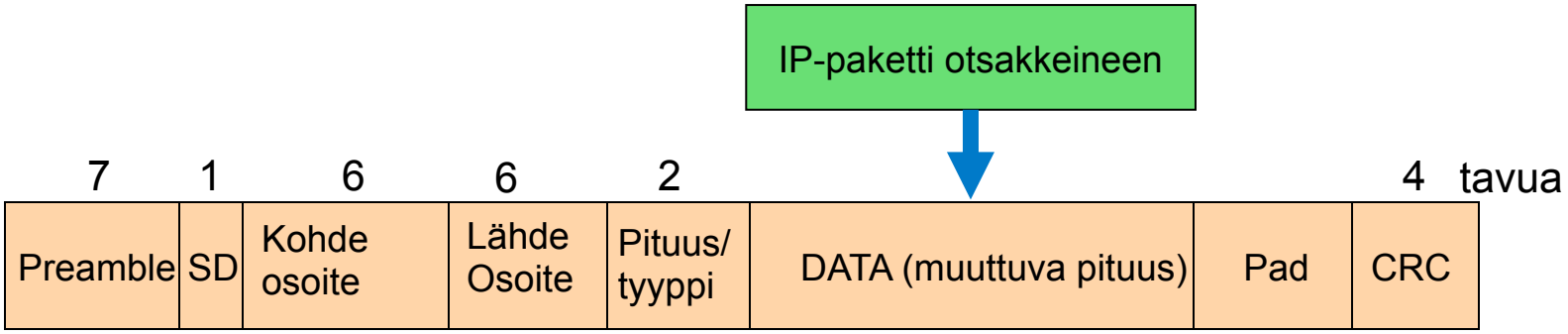
Ethernet-kehyksen rakenne



Yhteensä 64 - 1518 tavua

- Preamble (Alkutahdistus)
  - toistaa 10101010-kuviota
  - Käytetään vastaanottimen synkronointiin lähettäjän kellon nopeuteen
  - SD aloittaa itse kehyksen tavulla 10101011

Ethernet-kehyksen rakenne



Yhteensä 64 - 1518 tavua

- Osoitteet ovat 48-bittisiä MAC-osoitteita
  - vo-osoite oma tai yleislähetys (esim. ARP) → välitetään verkkokerrokselle
  - muutoin hylätään kehys
- Pituus/tyyppi: verkkokerroksen protokollatyyppi tai kehyksen pituus
  - Pituus ei välttämätön parsimiselle sillä kehyksen loppu tunnistetaan
- Padding (täytebitit) varmistaa, että kehys on vähintään 64 tavua
- CRC kattaa osoitteet, pituuden, informaation ja täytebitit
  - Virheellinen kehys hylätään

Ethernetin MAC-osoitteistus

- Voidaan lähettää täsmälähetyksiä (unicast), ryhmälähetyksiä (multicast) tai yleislähetyksiä (broadcast)
  - Ekan tavun 1. (vähiten merkitsevä) bitti kertoo onko kyseessä täsmälähetys (0) vai ryhmälähetys (1)
  - Yleislähetys on osoitteelle ff:ff:ff:ff:ff:ff (kaikki bitit 1)
  - Erityisesti ARP ja DHCP käyttää yleislähetystä
- Ekan tavun 2. bitti kertoo onko kyseessä paikallinen (vaihdettava) vai globaali (kiinteä) osoite
  - Ylläpitäjät voi määritellä ”locally administered” osoitteet
- 3 ensimmäistä tavua (miinus kaksi ensimmäistä bittiä) on Organizationally Unique Identifier (OUI)
- 3 viimeistä tavua on valmistajan valittavissa

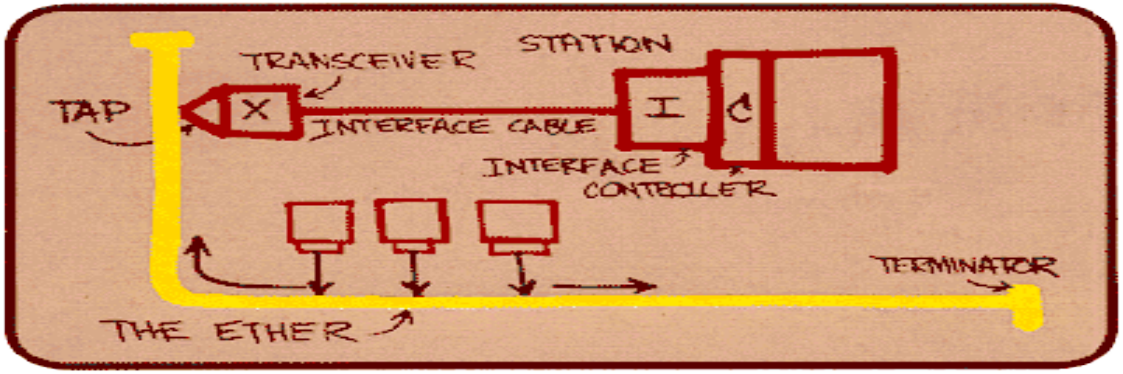
Ethernet-palvelu

- Yhteydetön
  - Ei kättelyä (handshaking) lähettävän ja vastaanottavan NIC:in välillä
  - Ei pidetä tilaa
- Epäluotettava
  - Vastaanottava NIC ei lähetä kuittauksia lähettäjälle
  - Vialliset paketit hylätään
  - TCP lähettää lopulta uudelleen
- Ethernetin MAC protokolla: unslotted CSMA/CD with binary backoff

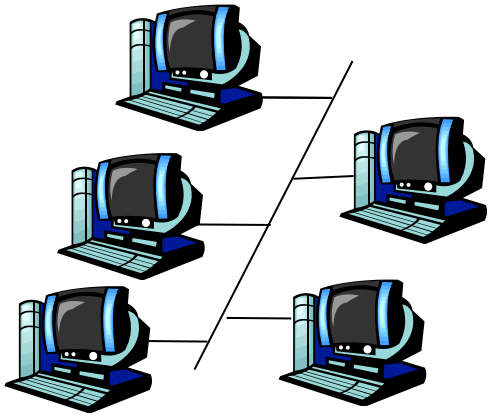
Ethernet-väylä

- Väylätopologia (yhteinen jaettu kaapeli) suosittu 90-luvun puoliväliin asti
  - Kaikki solmut samassa “mediassa” ja törmäyksiä sattuu
  - Koaksiaalikaapeli
  - Terminaattori (päätevastus) kaapelin päässä

Metcalfin piirros

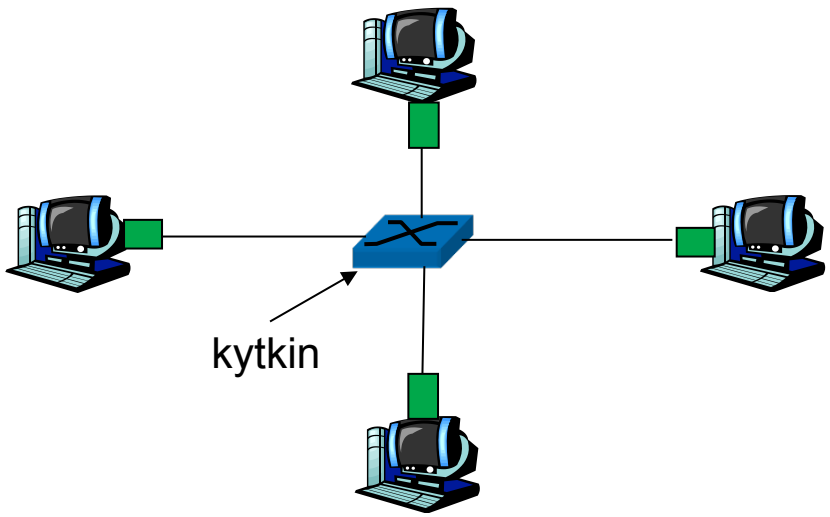


väylä (bus)



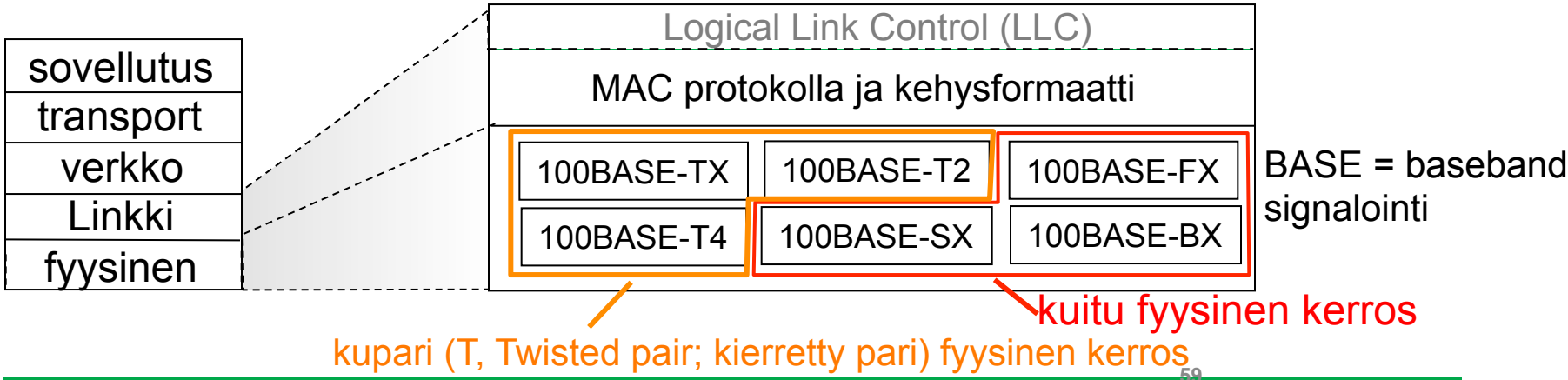
Ethernetin tähtitopologia

- Nykyään käytetään tähtitopologiaa (star)
  - Aktiivinen *kytkin (switch)* keskellä
- ”Kytketty Ethernet” (switched Ethernet)
  - Jokainen osallistuja (“haara”) käyttää omaa Ethernet protokollaa (solmut eivät törmää keskenään)



Ethernetin linkki & fyysinen kerros

- 802.3 on Ethernetin standardi
  - Määrittelee fyysisen kerroksen ja linkkikerroksen MAC-osan
- Monia eri lisäyksiä (amendments) jotka tuotu säännöllisesti standardiin
  - Yhteinen MAC-protokolla ja kehysformaatti
  - Erilaisia nopeuksia: 2 Mbps – 100Gbps
  - Erilaisia siirtoteitä (media): kuitu, kaapeli
  - Esim. 802.3ab: 1000BASE-T Gbit/s Ethernet over twisted pair at 1 Gbit/s



Yhteenveto

- Periaatteet datalinkki kerroksen palveluissa:
  - virheiden havainnointi, korjaus
  - usein epäluotettava palvelu (Ethernet), joskus luotettava (Wi-Fi)
- Monipääsyprotokollia tarvitaan jaetuissa kanavissa
  - Kanavan osittaminen (matkapuh.verkot), satunnaispääsy (Ethernet ja Wi-Fi), ”vuorottelu”
- MAC osoitteet
  - Uniikkeja, ei vaihdu kuten IP osoitteet
  - ARP: IP → MAC osoitteenhaku
- Ethernet
  - Yleisin langallinen lähiverkkoteknologia
  - IEEE 802.3 standardi, erilaisia versioita (siirtonopeus, fyysinen siirtotie)

Seuraavalla luennolla linkkikerroksen verkoista lisää

- Kytkin ja keskitin
- Spanning Tree Protocol (STP)
- Virtual LAN (VLAN)
- MPLS
- (ehkä) Tiedonsiirron perusteita ja fyysinen kerros

Lyhenteitä ja terminologiaa