

Capa de Enlace

- 5.1 Introducción y servicios
- 5.2 Detección y corrección de errores
- 5.3 Protocolos de acceso múltiple
- 5.4 **Direccionamiento de Capa de Enlace**
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches de Capa de Enlace
- 5.7 PPP

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-1

LAN

- Recordar que LAN (*Local Area Network*) es una red concentrada en un área geográfica concreta que podemos asimilarla a una oficina, un piso, un edificio, un campus.
- Recordar además:
 - PAN
 - MAN, WAN
- Velocidades típicas actuales: 10 Mbps, 100 Mbps, 1 Gbps.
- Ya es una realidad: 10 Gbps en cobre.

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-2

Direcciones MAC

- Direcciones IP de 32 bits:
 - direcciones de la *capa de red*
 - utilizada para llevar el datagrama a la subred IP destino
- Dirección MAC (o LAN o física o hardware o del adaptador o "Ethernet"):
 - función: *llevar la trama de una interfaz a otra interfaz físicamente conectada (misma red)*
 - Direcciones MAC de 48 bits (en la mayoría de las redes LAN)
 - grabada en la ROM de la NIC; en algunos casos (cada vez más) configurable por software

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-3

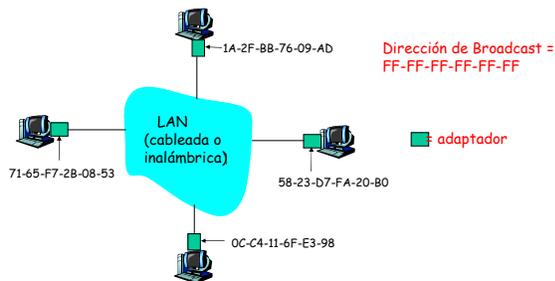
Direcciones MAC

- asignación de direcciones MAC administrada por IEEE
- los fabricantes compran porciones del espacio de direcciones MAC (para asegurar unicidad)
 - OUI (*Organizationally Unique Identifier*): 3 primeros octetos, asignados a las compañías (*company_id*)
 - <http://standards.ieee.org/regauth/oui/index.shtml>
 - Restantes 3 octetos (*NIC Specific*): administrados por cada compañía
- Dirección MAC plana → portable
 - puedo mover la tarjeta de una LAN a otra
- Dirección IP jerárquica → no portable
 - la dirección depende de la subred IP a la que el nodo está conectado

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-4

Direcciones MAC

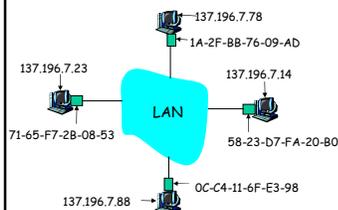
Cada adaptador en la LAN tiene una dirección LAN única



Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-5

ARP: Address Resolution Protocol

Pregunta: ¿Cómo determinamos la dirección MAC de B, conociendo la dirección IP de B?



- Cada nodo IP (host, router) en la LAN tiene una tabla ARP
- Tabla ARP: mapeo de direcciones IP/MAC para algunos nodos de la LAN
 - dirección IP; dirección MAC; TTL
 - TTL (*Time To Live*): tiempo después del cual el mapeo de direcciones debe ser olvidado (por ejemplo, 20 min)

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-6

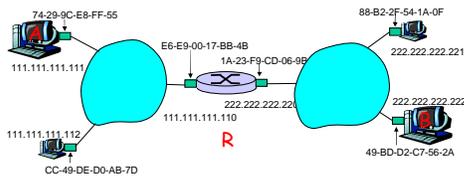
Protocolo ARP: en la misma red LAN

- A quiere enviar un datagrama a B, y la dirección MAC de B no está en la tabla ARP de A.
- A realiza un **broadcast** de un paquete **ARP query**, conteniendo la dirección IP de B
 - Dirección MAC destino = FF-FF-FF-FF-FF-FF
 - Todas las máquinas en la LAN reciben el **ARP query**
- B recibe el paquete ARP y responde a A con su dirección MAC (**ARP reply**)
 - La trama es enviada a la dirección MAC de A (**unicast**)
- A salva (*cache*) el par direcciones IP-MAC en su tabla ARP hasta que la información se considere vieja (*timeout*)
- ARP es "plug-and-play":
 - Los nodos crean (bajo demanda) sus tablas ARP sin intervención del administrador de la red
- RFC 826
- ¿ARP es análogo a DNS?

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-7

Direccionamiento: *routing* hacia otra LAN

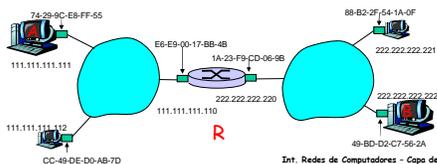
datagrama desde A hasta B, vía R
 asumimos que A conoce la dirección IP de B



- dos tablas ARP en el router R, una para cada red IP (LAN)

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-8

- A crea el datagrama IP con origen A, destino B
- A utiliza ARP para obtener la dirección MAC de R para 111.111.111.110
- A crea una trama con la dirección MAC de R como destino; la trama contiene el datagrama IP "A-to-B"
- La NIC de A envía la trama
- La NIC de R recibe la trama
- R quita el datagrama IP de la trama Ethernet, observando que está destinado a B
- R consulta la tabla de *forwarding* para identificar la interfaz de salida
- R utiliza ARP para obtener la dirección MAC de B
- R crea una trama que contiene el datagrama IP "A-to-B" y la envía a B



Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-9

Capa de Enlace

- 5.1 Introducción y servicios
- 5.2 Detección y corrección de errores
- 5.3 Protocolos de acceso múltiple
- 5.4 Direccionamiento de Capa de Enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches de Capa de Enlace
- 5.7 PPP

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-10

Ethernet

Tecnología LAN cableada dominante:

- Creada "en los 70" (Metcalfe & Boggs)
- NICs baratas (USD 5) y switches baratos
- Primera tecnología LAN ampliamente utilizada
- Más simple y barata que *token* LANs y ATM
- Velocidades: 10 Mbps - 10 Gbps

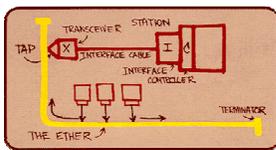
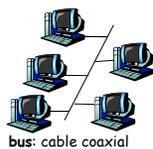


Diagrama de Ethernet de Robert Metcalfe

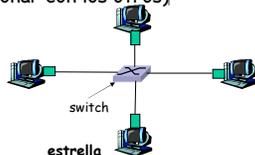
Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-11

Topología en estrella

- la topología en bus fue popular hasta mediados de los 90
 - todos los nodos en el mismo dominio de colisión (pueden colisionar con cualquiera de los otros)
- hoy: prevalece la topología *estrella*
 - **switch** activo en el centro (desde "fines de los 90")
 - cada "spoke" corre el protocolo Ethernet (los nodos no pueden colisionar con los otros)



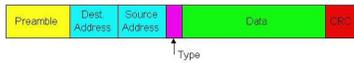
bus: cable coaxial



Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-12

Estructura de la trama Ethernet

- El adaptador del emisor encapsula el datagrama IP (u otro paquete de protocolo de capa de red) en una **trama Ethernet**



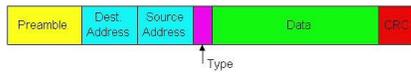
Preamble:

- siete bytes con el patrón 10101010 seguido por un byte con el patrón 10101011
- utilizado para despertar al receptor y sincronizar los relojes de emisor y receptor

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-13

Estructura de la trama Ethernet (más)

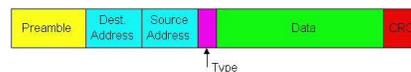
- **Direcciones:** 6 bytes cada una
 - si el adaptador recibe una trama con dirección destino la suya o la dirección de *broadcast*, (ej. paquete ARP), pasa los datos en la trama al protocolo de capa de red
 - en otro caso, el adaptador descarta la trama
- **Type:** 2 bytes
 - multiplexación
 - indica el protocolo de la capa superior (casi siempre IP pero otros es posible, p.e., IPX, AppleTalk)



Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-14

Estructura de la trama Ethernet (más)

- **Data:** de 46 a 1500 bytes
- **CRC:** 4 bytes
 - CRC-32
 - chequeado en el receptor, si un error es detectado, la trama es descartada
 - Para calcularlo se utiliza todo menos el "Preamble"



Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-15

Ethernet: servicio no confiable, no orientado a conexión

- ❑ **No orientado a conexión:** No hay *handshaking* entre las NICs de emisor y receptor
- ❑ **No confiable:** la NIC que recibe no envía ACKs o NAKs a la NIC emisora
 - el flujo de datagramas pasados a la capa de red puede tener huecos (datagramas perdidos)
 - los huecos serán llenados si la aplicación utiliza TCP
 - en otro caso, la aplicación verá los huecos
- ❑ Protocolo MAC de Ethernet: **CSMA/CD**
- ❑ La detección de colisiones es un servicio de Capa Física

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-16

Algoritmo CSMA/CD de Ethernet

1. La NIC recibe un datagrama de la capa de red; crea una trama, y la pone en el buffer del adaptador
2. Si la NIC determina que el canal está libre por *96 bit times*, comienza la transmisión de la trama (no hay *slots*) Si está ocupado, espera hasta que el canal esté libre y luego transmite
3. Si la NIC transmite la trama entera sin detectar otra transmisión, ¡éxito!
4. Si la NIC detecta otra transmisión cuando está transmitiendo, aborta y envía una señal *jam* de 48 bits
5. Después de abortar (o sea, después de transmitir la *jam signal*, la NIC entra en la fase **exponential backoff**: después de la n^{a} colisión para la misma trama, la NIC elige K aleatorio de $\{0,1,2,\dots,2^{n-1}\}$ donde $m = \min(n,10)$. La NIC espera $K \cdot 512 \text{ bit times}$, y vuelve al Paso 2

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-17

CSMA/CD de Ethernet (más)

- ❑ No existe ningún tipo de coordinación entre los adaptadores de una red Ethernet
- Señal Jam:** asegura que todos los otros transmisores estén enterados de la colisión; 48 bits
- Bit time:** tiempo necesario para transmitir un bit. 0.1 μs para 10 Mbps Ethernet; for $K=1023$, el tiempo de espera es de aprox. 50 msec
- Exponential Backoff:**
- ❑ **Objetivo:** adaptar los intentos de retransmisión a la carga actual estimada
 - alta carga: la espera aleatoria debe ser mayor
 - ❑ primera colisión: selecciona K de $\{0,1\}$; retardo es $K \cdot 512 \text{ bit time} = K \cdot \text{slot Time}$
 - ❑ después de la segunda colisión: selecciona K de $\{0,1,2,3\}$...
 - ❑ después de 10 colisiones, selecciona K de $\{0,1,2,3,4,\dots,1023\}$
 - ❑ después de 16 **colisiones consecutivas** para la misma trama, se descarta

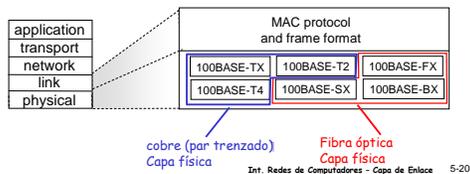
Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-18

Más sobre Ethernet

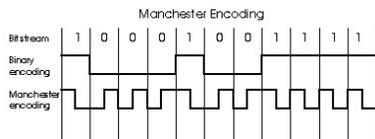
- En una red LAN Ethernet, el tiempo se alternan momentos "libre", "transmisión" y "colisión"
- Notación: **RRRBase- TTT**
 - **RRR**: Velocidad
 - 10: 10 Mbps
 - 100: 100 Mbps
 - ...
 - **Base**: Se transmite en **bandabase** (un solo canal de comunicación en el medio físico)
 - **TTT**: especificación relativa al medio físico en uso
 - 5, 2: coaxial, 500 o 200 metros
 - T: par trenzado (UTP)
 - FX: Fibra óptica
 - ...

802.3 Ethernet Standards: Capas de Enlace y Física

- **varios** diferentes estándares Ethernet
 - protocolo MAC y formato de trama único
 - diferentes velocidades: 2 Mbps, 10 Mbps, 100 Mbps, 1 Gbps, 10 Gbps
 - diferentes medios físicos: fibra óptica, cable



Codificación Manchester



- Utilizado en 10BaseT
- Cada bit tiene una transición
- Permite que los relojes de los nodos emisores y receptores siempre estén sincronizados entre sí
 - No se requiere un reloj centralizado, global

Capa de Enlace

- 5.1 Introducción y servicios
- 5.2 Detección y corrección de errores
- 5.3 Protocolos de acceso múltiple
- 5.4 Direccionamiento de Capa de Enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches de Capa de Enlace
- 5.7 PPP

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-22

Dominios

- Dominio de colisión
 - Porción de la red hasta donde se propaga una colisión
- Dominio de broadcast
 - Porción de la red hasta donde se propaga un broadcast

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-23

Hubs

... repetidores de Capa Física ("tonto"):

- los bits que llegan en un *link* salen por *todos* los otros *links* a la misma velocidad
- todos los nodos conectados al *hub* pueden colisionar con los otros
- no existe *buffering* de tramas
- no hay CSMA/CD en el *hub*: la NIC del *host* detecta las colisiones



Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-24

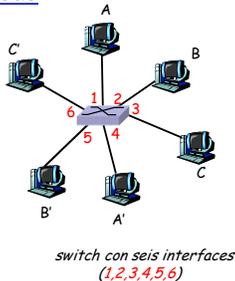
Switch

- dispositivo de Capa de Enlace: más "inteligente" que los *hubs*, tienen un rol *activo*
 - almacenamiento, envío de tramas Ethernet
 - examina la dirección MAC destino de la trama entrante, realiza un envío *selectivo* de la trama a uno o más *links* de salida; cuando la trama será enviada en un segmento, utiliza CSMA/CD para acceder al segmento
- *transparente*
 - los *hosts* no se "enteran" de la presencia de los *switches*
- *plug-and-play, self-learning*
 - los *switches* no necesitan ser configurados (para su operación básica)

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-25

Switch: permite múltiples transmisiones simultáneas

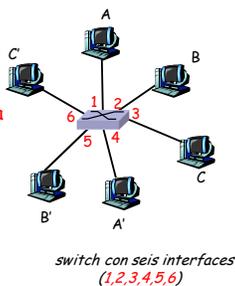
- Los *hosts* tienen conexiones dedicadas, directas al *switch*
- Los *switches* hacen *buffer* de las tramas
- El protocolo Ethernet es utilizado en *cada link* entrante, pero no hay colisiones; *full duplex*
 - cada *link* su propio dominio de colisión
- *switching*: A-to-A' and B-to-B' simultáneamente, sin colisiones
 - no posible con *hub*



Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-26

Tabla del Switch

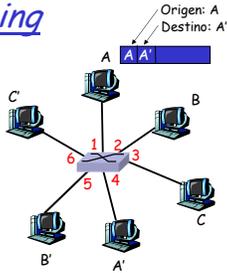
- *P:* ¿Cómo sabe un switch que A' es alcanzable a través de la interfaz 4 y B' a través de la interfaz 5?
- *R:* cada switch tiene una *tabla de switch*, con cada entrada:
 - (dirección MAC del host, interfaz por donde alcanzar al host, time stamp)
 - algo similar a una tabla de *routing*
- *P:* ¿Cómo las entradas son creadas y mantenidas en la tabla del switch?
 - ¿Parecido en algo a un protocolo de *routing*?



Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-27

Switch: *self-learning*

- el switch *aprende* qué *hosts* puede ser alcanzado a través de qué interfaces
 - cuando una trama es recibida, el switch "aprende" la ubicación del emisor: el segmento LAN de entrada
 - registra el par emisor/ubicación en la tabla del switch



Dir. MAC	interfaz	TTL
A	1	60

Tabla del switch (inicialmente vacía)

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-28

Switch: *filtering/forwarding de tramas*

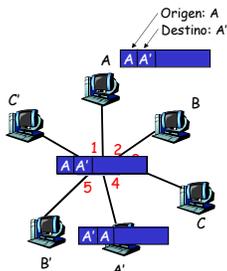
Cuando una trama es recibida:

1. registra el link asociado con el host que envía
2. busca en la *switch table* utilizando la dirección MAC destino
3. **if** encuentra una entrada para el destino
 - then** {
 - if** destino en segmento de donde arribó la trama
 - then** descartar la trama
 - else** forward de la trama en la interfaz indicada
 - }**
 - else flood** → *forward en todas las interfaces menos en la que arribó*

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-29

Ejemplo: *Self-learning forwarding*

- Destino de la trama desconocido: *flood*
- Ubicación del destino conocida: *envío selectivo*



Dir. MAC	interfaz	TTL
A	1	60
A'	4	60

Tabla del switch (inicialmente vacía)

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-30

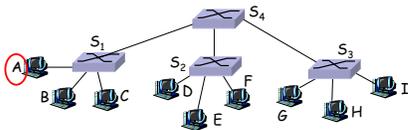
Evolución de las redes LAN Ethernet

- Ha pasado de *half-duplex* a *full-duplex*
- "Han dejado de existir las colisiones"

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-31

Interconectando switches

- Los switches se pueden conectar entre sí

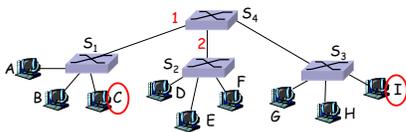


- **P:** enviando de A a G - ¿de qué forma S₁ conoce cómo enviar la trama destinada a G a través de S₄ y S₃?
- **R:** *self-learning* (trabaja de la misma forma que en el caso de un solo *switch*)

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-32

Ejemplo: *self-learning* multi-switch

Suponga que C envía una trama a I; I responde a C



- **P:** muestre las tablas de los switches y el *forwarding* de las tramas en S₁, S₂, S₃, S₄

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-33

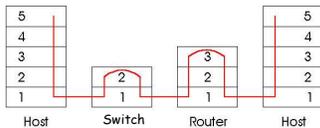
Técnicas de conmutación de tramas

- ❑ Técnicas utilizadas por los *switches* para pasar la trama desde el puerto de entrada hasta el puerto de salida
- ❑ Se decide en función de la DA
- ❑ Dos grandes familias
 - *Cut-through*
 - Sólo espera la *Destination Address*
 - No realiza FCS (Frame-Check-Sequence)
 - *Store & Forward*
 - Espera toda la trama
 - Realiza FCS

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-34

Switches vs. Routers

- ❑ ambos son dispositivos *store-and-forward*
 - routers: dispositivos de capa de red (examina encabezados de capa de red)
 - switches: dispositivos de capa de enlace
- ❑ los routers mantienen tablas de routing, implementan algoritmos de *routing*
- ❑ los switches mantienen tablas de switch, implementan filtrado, algoritmos de aprendizaje



Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-35

Segmentando redes LAN...

- ❑ "Teoría de Darwin de las redes LAN" © :
 - la evolución del *hub* al *switch*
 - existió un dispositivo intermedio que vivió poco: el *bridge*
- ❑ **Hub**
 - Capa Física
 - 1 dominio de colisión y 1 dominio de broadcast
- ❑ **Bridge**
 - Capa de Enlace de Datos
 - 1 dominio de colisión en cada puerta y 1 dominio de broadcast
- ❑ **Switch**
 - Capa de Enlace de Datos
 - 1 dominio de colisión en cada puerta y 1 dominio de broadcast
 - Pero además, mayor
 - cantidad de puertas que un bridge
 - capacidad de conmutación de tramas que un bridge

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-36

Eficiencia de CSMA/CD

- t_{prop} = retardo propagación entre 2 nodos en la LAN
- t_{trans} = tiempo para transmitir una trama

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

- Ejemplo
 - *veloc.*: 10 Mbps; *dist. entre nodos*: 2,5 Km; *retardo de prop.*: 2×10^8 m/s; *tamaño de trama*: 72 bytes
 - entonces, $t_{prop} = 12,5 \mu s$, $t_{trans} = 57,6 \mu s$
 - finalmente, **eficiencia = 0,48**
- mejor *performance* que ALOHA y además... simple, barato, descentralizado

Int. Redes de Computadores - Capa de Enlace 5-37
