



Introduzione alle Reti:
Definizioni e concetti preliminari.
Il nucleo di una rete. La commutazione.
Accesso multiplo al canale.
Instradamento.

Ing. Nadia Ranaldo

1

Definizioni e concetti preliminari

2



Larghezza di banda (bandwidth)

■ Due definizioni:

■ Trasmissione analogica:

- La differenza tra le frequenze per le quali le prestazioni di un dispositivo ricadono entro limiti specificati
- Intervallo di frequenze che un canale di comunicazione è in grado di trasmettere efficacemente
- Unità di misura
 - 1 MHz = 10^6 Hz

■ Trasmissione digitale:

- La quantità di dati che può essere inviata attraverso una connessione di rete nell'unità di tempo, misurata in bit per secondo (bps) - nota come *bit rate*
- Unità di misura
 - 1 Mbps = 10^6 bit per secondo

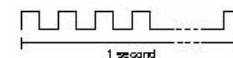
3



Larghezza di banda (bandwidth)

- L'equivalenza fra i due tipi di banda è data dall'operazione di **campionamento** necessaria per trasformare un segnale analogico in uno digitale: per farlo dobbiamo stabilire la frequenza di campionamento e il numero di bit di ciascun campione, stabilendo così una banda digitale "*equivalente*" a quella analogica.

- La larghezza di banda è legata alla larghezza di un bit (nella trasmissione digitale)



1 Mbps (ogni bit è largo 1 μ s)



2 Mbps (ogni bit è largo 0.5 μ s)

- Esempi: La larghezza di banda di una rete Ethernet è di 10 Mbps (10BaseT) o 100 Mbps (100BaseT), di una Gigabit Ethernet è di 1 Gbps

4

Throughput

- La larghezza di banda rappresenta la velocità di trasmissione massima su di un circuito
 - Non considera il sovraccarico dovuto ai protocolli di livello superiore o il degrado prestazionale dovuto alle inefficienze del sistema
- Il **throughput** rappresenta l'effettiva velocità di trasmissione del sistema di comunicazione
 - La capacità di trasmissione effettivamente utilizzata
 - Rappresenta l'ammontare di dati spostato con successo da un punto ad un altro di un sistema in un dato intervallo di tempo
 - Varia in base al progetto del sistema, al tipo di configurazione, ed al punto nello stack dei protocolli in cui viene eseguita la misura

5

Throughput: esempio

- Esempio
 - Una sorgente che trasmette ad un destinatario dati organizzati in pacchetti attraverso un link con bit rate R bps
 - La sorgente trasmette un pacchetto alla volta, perché alterna a periodi di trasmissione, periodi di inattività in cui aspetta che il destinatario invii un riscontro di corretta ricezione (ack).
 - si assume per semplicità che un ack sia un pacchetto di dimensione pari a quello dati
 - Il canale è quindi impegnato per metà del tempo (la sorgente trasmette pacchetti), mentre per l'altra metà rimane libero (la sorgente attende i riscontri per ogni pacchetto trasmesso)
 - Il throughput del link è di $R/2$ bps: la sorgente trasmette i pacchetti alla massima velocità del canale, cioè R bps, ma lo fa in un tempo **doppio** rispetto a quanto basterebbe se non attendesse i riscontri. Il canale potrebbe trasmettere R bit/s, ma di fatto ne trasmette solo $R/2$.

6

Ritardo (delay) (1)

- Tempo necessario perché un pacchetto inviato da un nodo A giunga ad un nodo B
- Componenti del ritardo su di un link di comunicazione:
 - Ritardo = ritardo di propagazione + ritardo di trasmissione
- Ritardo di propagazione**
 - Quando un nodo trasmette un pacchetto ad un altro nodo, i bit del pacchetto impiegano un certo tempo per giungere a destinazione. Questo tempo è detto ritardo di propagazione
 - Dipende dalla velocità fisica del link e dalla lunghezza in metri del link
 - Solitamente, la velocità fisica del link è la velocità della luce nel mezzo
 - Sia d la lunghezza del link, sia v la velocità fisica del link, allora

$$d_{\text{prop}} = d / v$$

- Tipicamente il ritardo di propagazione è trascurabile nelle reti LAN, e nell'ordine dei millisecondi nelle reti WAN

7

Ritardo (delay) (2)

- Ritardo di trasmissione**
 - Il ritardo di trasmissione è l'ammontare del tempo richiesto per trasmettere tutti i bit del pacchetto sul link
 - in pratica, questo ritardo si misura in microsecondi o in millisecondi
 - Sia L la lunghezza in numero di bit del pacchetto, sia R la larghezza di banda del link, in bit al secondo (bps), allora il ritardo di trasmissione è pari a

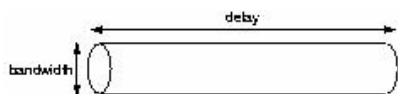
$$d_{\text{tras}} = L / R$$

- Il **ritardo end-to-end** include l'overhead software
 - L'overhead software può essere dominante quando le distanze sono piccole
- A volte viene usato il RTT (**Round Trip Time**)
 - Tempo necessario affinché un pacchetto di un bit dal nodo A arrivi al nodo B e ritorni al nodo A

8

Capacità di un canale di comunicazione

- La larghezza di banda e il ritardo di propagazione hanno un'importanza relativa
 - Per messaggi di piccole dimensioni è importante il ritardo di propagazione
 - Per messaggi di grandi dimensioni è importante la larghezza di banda
- Il prodotto **ritardo di propagazione x larghezza di banda** caratterizza la **capacità** di un canale di comunicazione
 - Esempio: Ritardo = 100 ms, Thr = 45 Mbps $\rightarrow C = 562$ KB



9

Il nucleo di una rete La commutazione



10

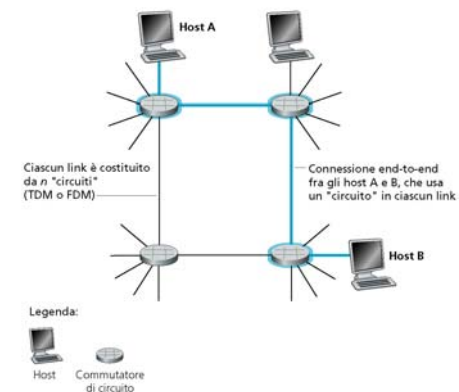
Commutazione di circuito e commutazione di pacchetto

- Sono possibili due approcci per il funzionamento di una rete:
 - Commutazione di circuito**
 - Le risorse per la comunicazione (canali di comunicazione e commutatori) sono **riservate** per la durata di una sessione di trasmissione. Non si presentano ritardi
 - Es. reti telefoniche
 - I commutatori sul percorso tra mittente e destinatario mantengono lo **stato** della connessione per tutta la durata della comunicazione
 - Commutazione di pacchetto**
 - Le risorse **non sono riservate**, pertanto è possibile che per inviare un messaggio durante una sessione di comunicazione si debba aspettare (per accedere ad un link di comunicazione)
 - Es. Internet

11

Commutazione di circuito

- Prima di trasmettere dati è necessario stabilire una connessione
- Ogni connessione determina la creazione di un canale tra **chiamante** e **chiamato (circuito)**
- Tale canale è usato esclusivamente da chi ha attivato la connessione per l'intera durata di questa
- Pertanto, il canale, riservato ad una coppia di entità comunicanti, è caratterizzato da una **velocità di trasmissione costante**
- Ogni collegamento (link) tra due commutatori (router) può gestire **n** circuiti contemporanei
- A ciascun circuito viene dedicata $1/n$ della larghezza di banda del link per la durata del circuito

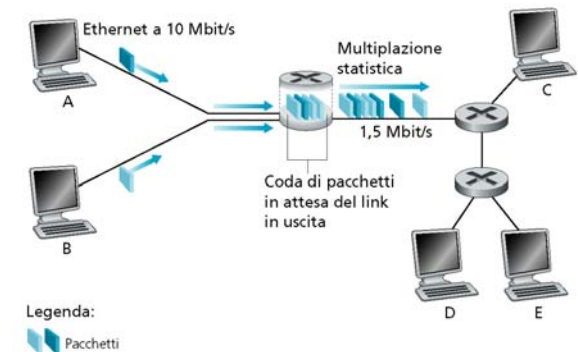


Commutazione di pacchetto (1)

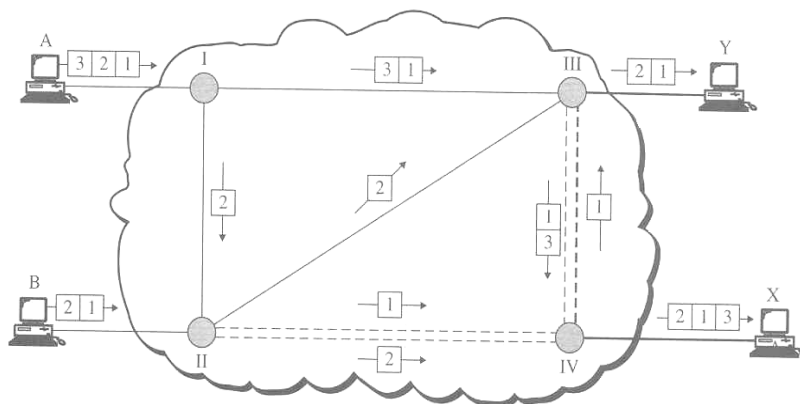
- La commutazione di circuito consuma troppa banda
 - I canali sono allocati anche quando non c'è comunicazione
- Con la commutazione di pacchetto, il mittente spezza i messaggi in piccoli **pacchetti**
- Ogni pacchetto attraversa diversi **router** per arrivare a destinazione
- Ogni pacchetto viaggia alla **massima velocità** consentita dal canale fisico
- Ogni router è collegato a molti link
- Per ciascun link il router ha un **buffer di uscita** (o coda di uscita)
 - Memorizza i pacchetti che il router deve spedire su quel determinato link
 - Se un pacchetto in arrivo richiede di essere trasmesso attraverso un link ma trova il link occupato dalla trasmissione di un altro pacchetto, il pacchetto in arrivo deve aspettare nel buffer di uscita (**ritardo di coda**) 13

Commutazione di pacchetto (2)

- Congestione di rete**: il carico di un router raggiunge un valore critico
 - Il router inizia ad accodare i pacchetti ed il ritardo aumenta
- Se un pacchetto in arrivo trova il buffer completamente pieno può avvenire la **perdita di pacchetti** (o il pacchetto in arrivo o uno già in coda)



Commutazione di pacchetto (3)



Commutazione di pacchetto (4)

- Molti router usano la trasmissione **store-and-forward** per trasmettere ogni pacchetto che arriva su un link di ingresso
 - Il router deve ricevere l'intero pacchetto prima di poter cominciare a trasmettere il primo bit sul link di uscita
- I router **store-and-forward** introducono un **ritardo store-and-forward** all'ingresso di ciascun link lungo il percorso del pacchetto
 - Proporzionale alla lunghezza in bit del pacchetto
 - Ritardo store-and-forward = L/R
 - L = num. di bit, R = larghezza di banda del link in uscita (bps)
- Un ritardo ulteriore è dovuto all'attesa nelle code di uscita in presenza di congestione (il ritardo di consegna è imprevedibile)

Commutazione di pacchetto vs commutazione di circuito

- I sostenitori della commutazione di circuito affermano che la commutazione di pacchetto
 - non è adatta per servizi **real-time** (videoconferenze) a causa del suo ritardo variabile ed imprevedibile
- I sostenitori della comm. di pacchetto affermano che questa tecnica
 - consente una migliore condivisione del canale di comunicazione
 - è più **efficiente**
 - è più **semplice** e **meno costosa** da realizzare
- Perché è più efficiente? Si consideri un link da 1 Mbps e utenti che trasmettono solo per il 10 % del tempo di connessione
 - Con la comm. di circuito, 10 utenti possono utilizzare una ampiezza di banda di 100 kbps. Non è possibile gestire più utenti
 - Con la comm. di pacchetto se gli utenti attivi sono 10 le prestazioni sono analoghe a quelle della comm. di circuito.
 - Se gli utenti attivi sono > 10 si può avere congestione, perché la velocità dei pacchetti in arrivo supera la capacità in uscita dal link e la coda in uscita comincia a crescere
 - Se gli utenti potenziali sono > 10, la probabilità di avere più di 10 utenti attivi contemporaneamente è molto bassa
 - Pertanto, è possibile avere **più utenti potenziali** garantendo ad ognuno di essi le stesse prestazioni della commutazione di circuito
- La tendenza attuale è quella di impiegare la commutazione di pacchetto

17

Commutazione di messaggio e commutazione di pacchetto

- Nelle reti moderne i messaggi inviati da un host sono suddivisi in molti piccoli pacchetti
- Se un messaggio è inviato interamente si parla di **commutazione di messaggio**
- Nella commutazione di messaggio ogni router deve ricevere l'intero messaggio prima di rispedirlo (store and forward)



- Nella commutazione di pacchetto i messaggi sono divisi in **pacchetti** ed ognuno attraversa i router in modo indipendente (la rete effettua la trasmissione dei messaggi in **pipeline**)

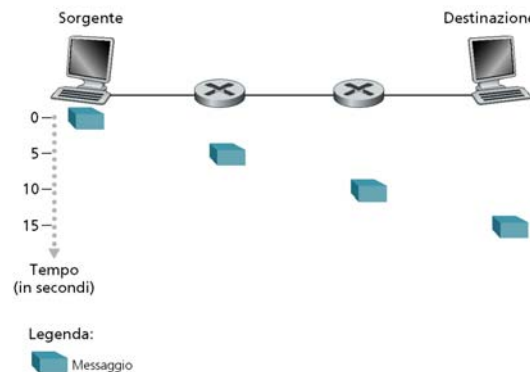


- La commutazione di pacchetto consente la trasmissione con un ritardo store-and-forward **molto più basso** di quello presente nelle reti a commutazione di messaggio

18

Esempio (1)

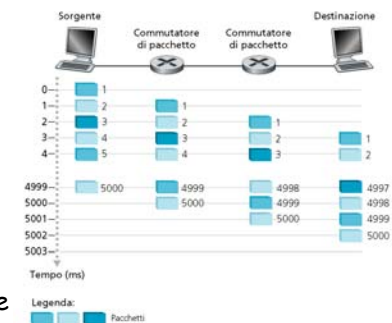
- Si consideri la trasmissione di un messaggio di 7.5×10^6 bit su di una rete con due router e tre link sui quali è possibile trasmettere a **1.5 Mbps**
- In assenza di congestione il tempo impiegato per trasmettere il messaggio con la commutazione di messaggio sarà $(L/R) \cdot Q$; L= dim. messaggio, R= velocità di trasmissione, Q = numero dei link $\rightarrow (7.5/1.5) \cdot 3 = 15$ sec.



19

Esempio (2)

- Supponiamo che il messaggio venga diviso in 5000 pacchetti di 1.5×10^3 bit ognuno
- Se non vi è congestione, per ogni link è necessario 1 ms per la trasmissione di un pacchetto
- Ma mentre il primo pacchetto si sposta dal primo router al secondo, il secondo pacchetto viene trasmesso sul primo link
- Il secondo pacchetto raggiunge il primo router dopo 2 ms
- Il pacchetto n. 5000 raggiunge il primo router dopo 5000 ms
- Pertanto il tempo totale di trasmissione è $5000 \text{ ms} + 2 \text{ ms} = 5002 \text{ ms}$
- Circa **1/3** del tempo impiegato con la commutazione di messaggio



20

Commutazione di messaggio e commutazione di pacchetto: Vantaggi e svantaggi

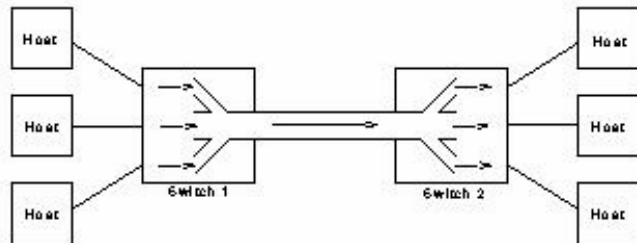
- La commutazione di messaggio esegue una trasmissione sequenziale
 - Mentre un nodo (sorgente o router) sta trasmettendo, gli altri nodi restano inattivi
- La commutazione di pacchetto lavora con una trasmissione in **parallelo** (ovvero con **pipeline**)
 - Quando il primo pacchetto ha raggiunto l'ultimo router, i tre nodi trasmettono contemporaneamente un diverso pacchetto
- Problema degli errori sui bit:
 - Quando un router rileva un errore in un pacchetto, di solito lo scarta
 - Se il messaggio è frammentato e un bit in un pacchetto è alterato, sarà scartato solo un pacchetto
- Svantaggio della commutazione di pacchetto rispetto alla commutazione di messaggio
 - Sono necessarie informazioni di controllo inserite nell'header del pacchetto
 - Con frammentazione, il sovraccarico dovuto all'intestazione rispetto alla quantità di byte di dati trasferiti è maggiore

21

Accesso multiplo al canale nelle reti a commutazione di circuito e di pacchetto

Condivisione del canale

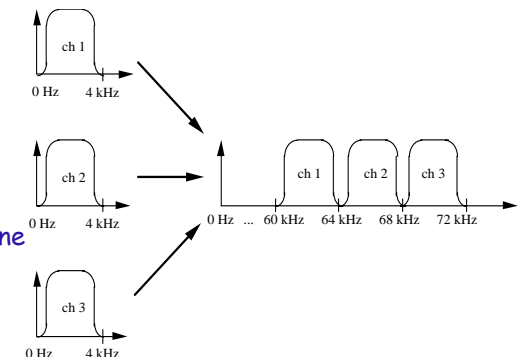
- La creazione di n circuiti logici in un canale di comunicazione fisico è realizzabile con tecniche diverse:
 - FDM (Commutazione di circuito - trasmissione analogica)
 - TDM (Commutazione di circuito - trasmissione digitale)
 - SM (Commutazione di pacchetto - trasmissione digitale)



23

Frequency Division Multiplexing (FDM)

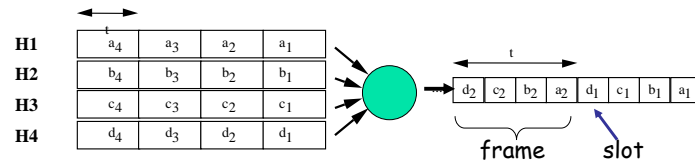
- Lo spettro di frequenze di un link è **suddiviso** tra le connessioni stabilite sul link stesso
- Nelle reti telefoniche, tipicamente, la banda di ogni connessione è di 4 kHz
- Ogni canale telefonico è **innalzato in frequenza** fino a raggiungere la banda assegnatagli (usando la modulazione)
- FDM è adatto alla trasmissione di segnali analogici
- Per i segnali digitali è usato il TDM



24

Time Division Multiplexing (TDM)

- I bit provenienti da diversi link vengono prelevati a turno da ciascuno di essi ed inviati su di un unico link in uscita ad alta velocità



- Il tempo è suddiviso in intervalli (**frame**) di durata prefissata e ciascun frame in un numero fisso di **slot**
- I canali che usano TDM possono trasmettere direttamente solo segnali **digitali**
- I segnali analogici sono trasmessi su canali digitali dopo una codifica tramite PCM (**Pulse Code Modulation**)
 - La codifica PCM è impiegata per consentire la trasmissione del segnale vocale nelle reti telefoniche
 - I canali impiegati presentano un bit rate (n. di bit per secondo) di 64 kbps (= 8KHz di campionamento x 8 bit per campione)
 - 8000 campioni per secondo (125 μs/campione) sono sufficienti per catturare tutta l'informazione dal canale telefonico con una banda di 4kHz (teorema di Nyquist)

25

Esempio

- Quanto tempo **T** è richiesto per l'invio di un file di 640.000 bit dall'host **A** all'host **B** su una rete a commutazione di circuito?
 - Tutti i link della rete hanno una velocità di 1,536 Mbps
 - Ogni link usa il TDM a 24 slot
 - Per stabilire il circuito end-to-end prima che **A** possa cominciare a trasmettere il file occorrono 500 ms
- Ciascun circuito ha una velocità di trasmissione di:

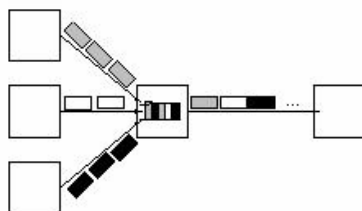
$$1.536\text{kbps}/24=64\text{ kbps}$$
- Tempo per trasmettere il file sul circuito:

$$(640.000\text{ bit})/(64\text{ kbps}) = 10\text{ s}$$
- Tempo totale di trasmissione: = 10 s + 500 ms = 10.5 s
- Nota: tempo di trasmissione è indipendente dal numero di link

26

Statistical Multiplexing (SM)

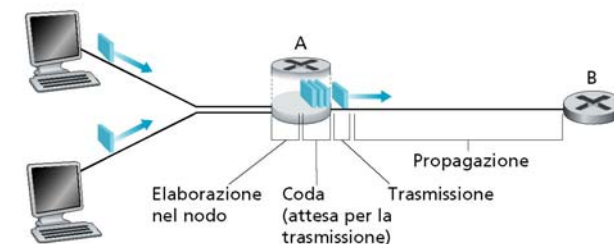
- Funziona come TDM ma l'allocazione del canale alle sorgenti non è fissata ma basata sulla domanda
- Il canale viene riassegnato ad ogni pacchetto
- Vi può essere alternanza tra pacchetti provenienti da sorgenti diverse
- I pacchetti in arrivo alla coda di un router possono essere selezionati per l'elaborazione in modi diversi:
 - Lo scheduling dei pacchetti è tipicamente FIFO
 - Sono possibili: il Round-robin e scheduling che garantiscono una migliore qualità del servizio (QoS)
- Si può presentare overflow dei buffer nei router



27

Ritardi presenti nelle reti a commutazione di pacchetto

- Ogni pacchetto nell'andare da una sorgente ad una destinazione attraversa dei router che ne ritardano la consegna
- Ciascun router introduce i seguenti ritardi:
 - Ritardo di trasmissione
 - Ritardo di propagazione
 - Ritardo di elaborazione sul router
 - Ritardo di accodamento



28

Ritardo di elaborazione

- Il ritardo di elaborazione (d_{proc}) è il tempo richiesto per esaminare l'intestazione di un pacchetto e per determinare dove instradarlo (algoritmo di routing)
 - Può comprendere altri fattori, come, ad esempio, il tempo per controllare eventuali errori a livello di bit nel pacchetto
 - Nella figura d_{proc} è il tempo per individuare il link di uscita dal router A
- Il ritardo di elaborazione di un router ad alta velocità è tipicamente dell'ordine di microsecondi o inferiore
- Dopo questa elaborazione, il pacchetto viene inviato alla coda in uscita per il link cui è destinato

29

Ritardo di accodamento

- Un pacchetto proveniente da un computer nell'andare verso il router B può essere accodato nella relativa coda del router A
- Quando è accodato, il pacchetto deve restare in attesa per un certo tempo prima di iniziare ad essere trasmesso sul link
- Questo tempo è detto **ritardo di accodamento** (d_{queue})
- Questo ritardo dipende dal numero degli altri pacchetti arrivati prima e che aspettano di essere trasmessi sullo stesso link
 - Quindi dipende fortemente dalla **condizione di traffico** della rete (media), e dal **tipo di traffico** stesso (varianza)
 - In una rete ben calibrata, usualmente, questo ritardo è nell'ordine dei millisecondi o dei microsecondi
 - Se non esistono altri pacchetti nella coda e nessuno è in fase di trasmissione, esso è nullo
- Quando il pacchetto è il primo della coda, ed il link è libero, il pacchetto inizia ad essere trasmesso

30

Analisi dei ritardi presenti nelle reti a commutazione di pacchetto

- Il **ritardo di trasmissione** (d_{trans}) è il tempo necessario per trasmettere un pacchetto (L/R ; L = dimensione del messaggio, R = velocità di trasmissione -bit rate- in bps di ogni link)
 - Non dipende dalla distanza tra router ma solo dalla **dimensione del pacchetto** e dalla velocità di trasmissione dei link
- Il **ritardo di propagazione** (d_{prop}) è il tempo necessario affinché un bit dal mittente arrivi al destinatario
 - È legato alla velocità di propagazione dei segnali in un mezzo trasmissivo (una frazione della velocità della luce): $2 \cdot 10^8 \text{ m/s} \div 3 \cdot 10^8$
 - Dipende dalla **distanza** tra i router
- Pertanto
$$d_{router} = d_{proc} + d_{queue} + d_{trans} + d_{prop}$$
 - d_{prop} è trascurabile per router non molto distanti
 - d_{trans} è trascurabile quando la velocità di trasmissione è elevata (es. reti LAN)
 - d_{proc} è spesso trascurabile e comunque dipende dalla velocità di elaborazione dei router e dalla dimensione delle tabelle di instradamento
 - d_{queue} può variare da pacchetto a pacchetto

31

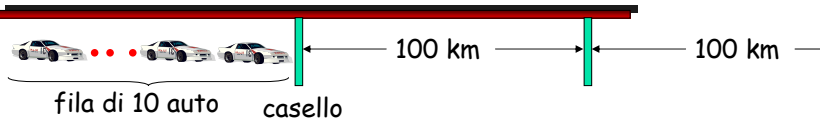
Analogia con un'autostrada (1)



- Un casello ogni 100 km
- Le auto viaggiano (si propagano) a 100 km/h
- Un casello impiega 12s per servire un'auto (tempo di trasmissione)
- Auto ~bit fila ~ pacchetto
- L'intera fila deve essere allineata al casello prima di essere spedita
- D: quanto tempo impiega il casello ad inviare l'intera fila sul tratto successivo dell'autostrada?**
 - Analogo al ritardo di trasmissione in un router
- R: $12 \text{ s} \cdot 10 = 120 \text{ s} = 2 \text{ m}$
- D: Quanto tempo impiega un'auto ad andare dall'uscita di un casello al casello successivo?**
 - Analogo al ritardo di propagazione
- R: $100 \text{ km} / (100 \text{ km/h}) = 1 \text{ h} = 60 \text{ m}$
- D: Quanto tempo impiega l'ultima auto ad arrivare al casello successivo dal momento in cui è di fronte al casello?**
- R: ritardo di trasmissione + ritardo di propagazione. = 62 m

32

Analogia con un'autostrada (2)



- Le auto viaggiano a 1000 km/h
- Un casello impiega 1 m per servire un'auto
- In questo caso le auto della fila iniziano ad arrivare al casello successivo prima che tutte siano state servite dal primo casello
- Il ritardo di trasmissione (per servire l'intera fila) è di 10 m
- Il ritardo di propagazione è di 6 m
- Quindi dopo 7 m, la prima auto è al secondo casello, mentre le ultime tre sono ancora al primo casello
- Questa situazione può verificarsi anche in un router
 - I primi bit di un pacchetto possono arrivare ad un router mentre molti dei bit rimanenti sono ancora in attesa di essere trasmessi dal router precedente

33

Ritardo di accodamento (d_{queue}) (1)

- Per caratterizzare d_{queue} si utilizzano misure statistiche
 - Media del ritardo
 - La varianza
 - Probabilità che superi un valore specifico
- d_{queue} dipende da:
 - Velocità di arrivo del traffico alla coda
 - Velocità di trasmissione del link
 - Natura del traffico
 - Periodico o a raffiche (burst)
- Si supponga che λ sia la frequenza media di arrivo ad un router di pacchetti che devono essere inoltrati sullo stesso link di uscita (pacchetti/s)
- Si supponga che la capacità della coda sia molto grande (infinita)
- R è la velocità di trasmissione ed L è il numero di bit di ciascun pacchetto
- Quindi la velocità media con cui i pacchetti arrivano ad accodarsi è di λL bps

34

Ritardo di accodamento (d_{queue}) (2)

- Il ritardo di accodamento è legato all'intensità del traffico, caratterizzata dal seguente rapporto:

$$it = \lambda L / R$$

- Se $it > 1$ la coda associata al link di uscita crescerà indefinitamente
 - La velocità media di arrivo dei bit alla coda supera la velocità a cui possono lasciarla
 - La coda tende a crescere senza limiti e l'entità del ritardo si approssima all'infinito

35

Ritardo di accodamento (d_{queue}) (3)

- Se $it \leq 1$, il ritardo di accodamento dipende dalla natura del traffico
 - Se ogni pacchetto arriva periodicamente ogni L/R s, $d_{queue} = 0$ (assenza di coda)
 - Se arrivano a raffica, ad esempio N pacchetti ogni $L \times N / R$ s, d_{queue} varia per ogni pacchetto:
 - il primo pacchetto avrà $d_{queue} = 0$
 - il secondo $d_{queue} = L/R$
 - l' N -simo $d_{queue} = (N-1) \times L/R$
 - Il ritardo medio sarà quindi

$$\bar{d}_{queue} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (n-1) \frac{L}{R} = \frac{L}{R} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} n = \frac{L}{R} \frac{1}{N} \frac{(N-1)N}{2} = \frac{L}{R} \frac{(N-1)}{2}$$

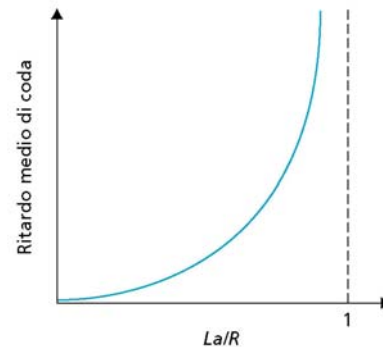
36

Ritardo di accodamento (d_{queue}) (4)

- In realtà il processo di arrivo dei pacchetti non è facilmente caratterizzabile

- In maniera indipendente da esso si può dire che:

- se $La/R \ll 1$, $d_{queue} \cong 0$
- se $La/R \cong 1$, d_{queue} tende a crescere esponenzialmente
 - Ci saranno intervalli di tempo in cui la velocità supera la velocità di trasmissione e si formerà la coda (ipotizzando l'esistenza di una coda non limitata)



37

Perdita di pacchetti e ritardo end-to-end

- I buffer nei router sono di dimensione **limitata**
- Pertanto il ritardo di accodamento non tende ad infinito
 - I pacchetti che arrivano quando la coda è piena vengono **scartati**
 - La quantità di pacchetti persi aumenta con l'aumentare dell'intensità di traffico
 - Le prestazioni di una rete non sono caratterizzate solo dal ritardo di accodamento ma anche dalla **percentuale di pacchetti persi**
- Il ritardo end-to-end rappresenta il ritardo complessivo da una sorgente ad una destinazione
 - Se il percorso che il pacchetto segue è lungo m nodi ed è composto dai nodi q_1, \dots, q_m allora

$$d_{end-end} = d_{nodo}(q_1) + \dots + d_{nodo}(q_m)$$

- In presenza di traffico irregolare è difficile quantificare il ritardo end-to-end
- Solo nell'ipotesi di rete non congestionata ($L*a/R \ll 1$) il ritardo end-to-end su un percorso di $Q-1$ router è facilmente quantificabile (router con ritardi uguali)

$$d_{end-to-end} = Q * (d_{proc} + d_{trans} + d_{prop})$$

38

Ritardo e router in Internet

Tre misure di ritardo verso www.google.it

Perdita di pacchetti nella rete

```

Nadia@Nadia ~
$ traceroute www.google.it
Rilevazione instradamento verso www.l.google.com [66.249.87.99]
su un massimo di 30 punti di passaggio:
 1  1401 ms * * * 10.205.38.4
 2  441 ms 427 ms 449 ms 10.205.38.2
 3  371 ms 449 ms 439 ms 192.168.0.102
 4  359 ms 428 ms 440 ms 10.205.38.65
 5  351 ms 444 ms 439 ms 10.205.38.170
 6  333 ms 439 ms 449 ms host237-8.pool8536.interbusiness.it [85.36.8.237]
 7  350 ms 520 ms 648 ms r-rn198-n111.opb.interbusiness.it [151.99.99.149]
 8  439 ms 477 ms 441 ms r-rn83-v14.opb.interbusiness.it [151.99.29.203]
 9  435 ms 1133 ms 381 ms rom3-ibs-resid-11-it.rom.seabone.net [213.144.177.169]
10  205 ms 199 ms 220 ms linx-lon1-racc1.lon.seabone.net [195.22.209.109]
11  200 ms 219 ms 220 ms 195.66.224.125
12  205 ms 219 ms 219 ms 66.249.87.99
Rilevazione completata.
Nadia@Nadia ~
$
    
```

39

Instradamento nelle reti a commutazione di pacchetto

40

Instradamento: datagram (1)

- Sulla base di come avviene la scelta del percorso, le reti a commutazione di pacchetto possono dividersi in
 - Reti datagram (indirizzo di destinazione)
 - IP
 - Reti a circuiti virtuali (numeri di circuiti virtuali)
 - X.25, frame relay, ATM
- Nelle reti datagram ogni pacchetto contiene l'indirizzo del destinatario
- Quando un pacchetto arriva ad un router, questo ne estrae l'indirizzo di destinazione ed interrogando le tabelle di instradamento individua il prossimo link a cui affidare il pacchetto (link di uscita)
- Come per il sistema postale l'indirizzo ha una struttura gerarchica
 - Il router esamina una porzione dell'indirizzo e invia il pacchetto a un router adiacente
- Le reti datagram **non conservano** in ogni router le informazioni di stato relative ad una connessione

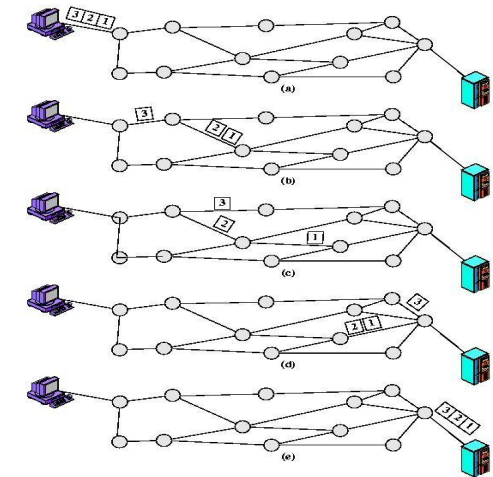
41

Instradamento: datagram (2)

Host di destinazione Numero interfaccia

A	0
B	1
C	2

Esempio di tabella di instradamento di un router



42

Instradamento: circuiti virtuali (1)

Un circuito virtuale (CV) consiste di:

- Un percorso tra sorgente e destinazione (link e router)
- Numeri di circuito virtuale (uno per ciascun link)
 - Scelta indipendente del router da altri router
- Una tabella di conversione di numeri di circuito virtuale per ogni router
- Quando viene stabilita una connessione tra una sorgente e una destinazione, vengono selezionati dei numeri di circuito virtuale in base ai quali viene aggiunta una riga ad una tabella di conversione presente su ogni router
- Quando un CV si estingue le voci corrispondenti in ciascuna tabella lungo il percorso vengono rimosse
- Ogni pacchetto viene spedito con un numero di CV
- Durante l'attraversamento di ogni router il numero di CV in un pacchetto viene cambiato sulla base delle informazioni presenti nelle tabelle di conversione di quel router
- I router **devono mantenere** le informazioni di stato delle connessioni in corso

43

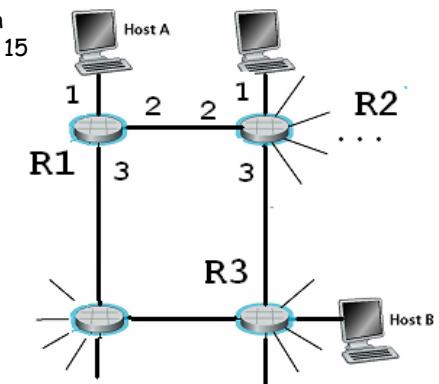
Instradamento: circuiti virtuali (2)

• Es. scelto il percorso A-R1-R2-R3-B con numeri di CV su ciascun link: 12, 22, 32 e 15

Interfaccia # CV Interfacci #CV
di ingresso ingresso a di uscita uscita

1	12	2	22
2	14	3	34
1	15	2	21

Esempio di tabella di conversione per il router R1



44

Tassonomia delle reti di telecomunicazione

- Le reti basate su CV sono sempre orientate alla connessione
- Le reti datagram possono offrire servizi orientati alla connessione oppure non orientati alla connessione (vedi la rete Internet)

