

copertura di un'area, è necessario mettere in orbita molti satelliti. Attualmente sono in fase di sviluppo molti sistemi di comunicazione a bassa quota. La pagina web Lloyd's satellite constellations [Wood 2012] fornisce e raccoglie informazioni sui sistemi di costellazione satellitare per le comunicazioni. La tecnologia satellitare LEO potrebbe essere utilizzata in futuro per l'accesso a Internet.

1.3 Il nucleo della rete

Dopo aver esaminato i margini di Internet, approfondiamo l'analisi del nucleo della rete, la rete di commutatori e collegamenti a pacchetto che interconnette i sistemi finali di Internet. La Figura 1.10 evidenzia il nucleo della rete con linee spesse e ombreggiate.

1.3.1 Commutazione di pacchetti

In un'applicazione di rete, i sistemi finali si scambiano **messaggi** tra loro. I messaggi possono contenere tutto ciò che il progettista dell'applicazione desidera. I messaggi possono svolgere una funzione di controllo (ad esempio, i messaggi "Hi" nell'esempio di handshaking della Figura 1.2) o possono contenere dati, come un messaggio di posta elettronica, un'immagine JPEG o un file audio MP3. Per inviare un messaggio da un sistema finale di origine a un sistema finale di destinazione, l'origine spezza i messaggi lunghi in pezzi di dati più piccoli, detti **pacchetti**. Tra la sorgente e la destinazione, ogni pacchetto viaggia attraverso collegamenti di comunicazione e **commutatori di pacchetti** (di cui esistono due tipi principali, i **router** e i **commutatori di livello link**). I pacchetti vengono trasmessi su ogni collegamento di comunicazione a una velocità pari alla velocità di trasmissione *completa* del collegamento. Quindi, se un sistema finale sorgente o un commutatore di pacchetti invia un pacchetto di L bit su un collegamento con velocità di trasmissione R bit/sec, il tempo di trasmissione del pacchetto è L/R secondi.

Trasmissione Store-and-Forward

La maggior parte degli switch a pacchetto utilizza la **trasmissione store-and-forward** agli ingressi dei collegamenti. La trasmissione store-and-forward significa che il packet switch deve ricevere l'intero pacchetto prima di poter iniziare a trasmettere il primo bit del pacchetto sul collegamento in uscita. Per analizzare più in dettaglio la trasmissione store-and-forward, si consideri una semplice rete costituita da due sistemi finali collegati da un singolo router, come mostrato nella Figura 1.11. Un router avrà tipicamente molti collegamenti incidenti. Un router avrà in genere molti collegamenti incidenti, poiché il suo compito è quello di passare un pacchetto in entrata su un collegamento in uscita; in questo semplice esempio, il router ha il compito piuttosto semplice di trasferire un pacchetto da un

collegamento (in ingresso) all'unico altro collegamento collegato. In questo esempio, la sorgente ha tre pacchetti, ciascuno composto da L bit, da inviare alla destinazione. Nell'istante di tempo mostrato nella Figura 1.11, la sorgente ha trasmesso una parte del pacchetto 1 e la parte anteriore del pacchetto 1 è già arrivata al router. Poiché il router impiega il sistema store-and-forwarding, in questo istante di tempo non può trasmettere i bit che ha ricevuto, bensì

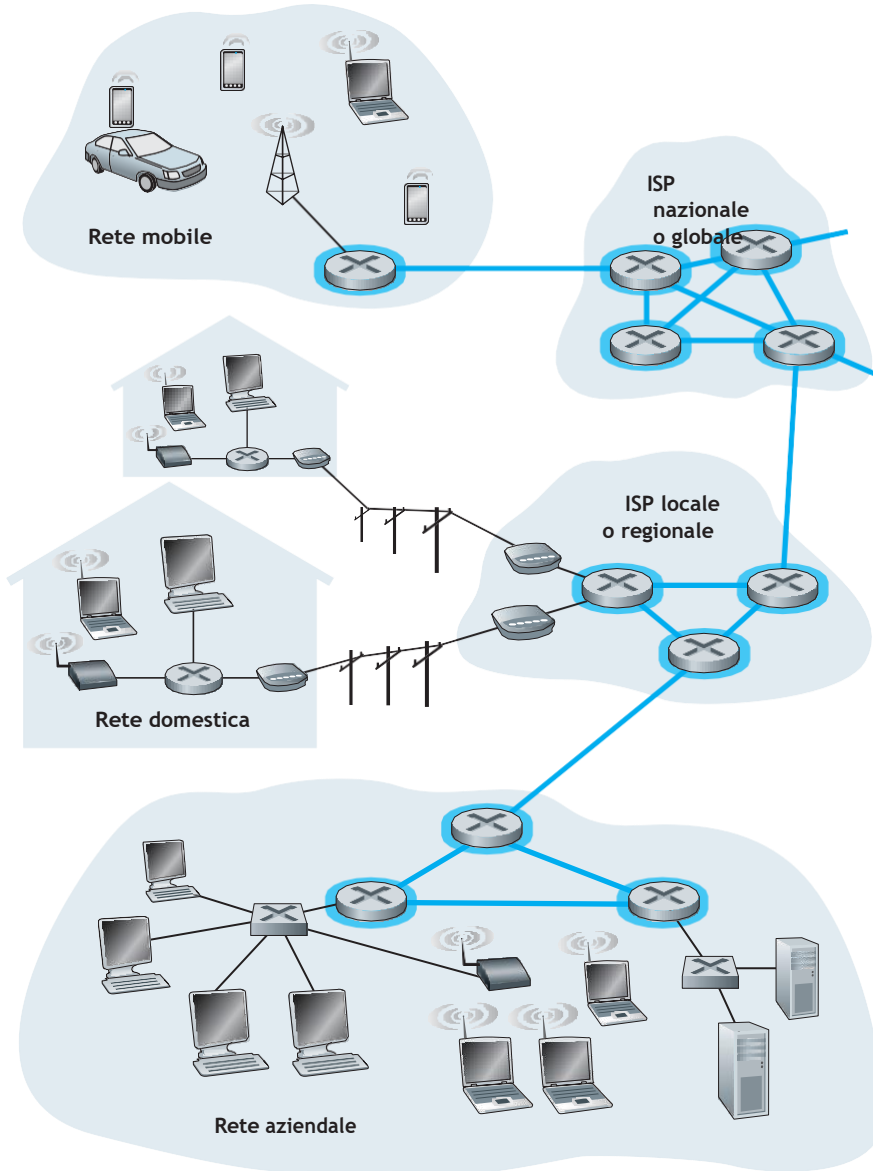


Figura 1.10 Il nucleo della rete

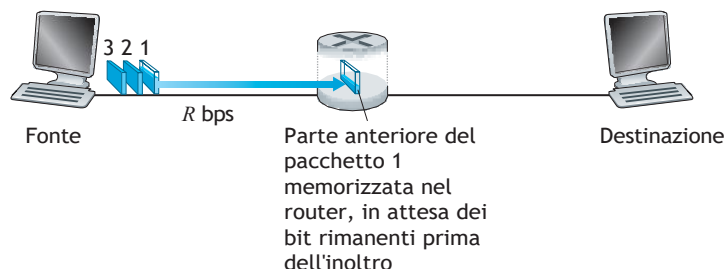


Figura 1.11 Commutazione di pacchetto store-and-forward

deve prima bufferizzare (cioè "memorizzare") i bit del pacchetto. Solo dopo aver ricevuto *tutti i* bit del pacchetto, il router può iniziare a trasmetterlo (cioè "inoltrarlo") sul collegamento in uscita. Per comprendere meglio la trasmissione store-and-forward, calcoliamo il tempo che intercorre tra l'inizio dell'invio del pacchetto da parte della sorgente e la ricezione dell'intero pacchetto da parte della destinazione. (In questo caso ignoreremo il ritardo di propagazione, ossia il tempo necessario ai bit per attraversare il filo a una velocità prossima a quella della luce, che sarà discusso nella Sezione 1.4). La sorgente inizia a trasmettere al tempo 0; al tempo L/R secondi, la sorgente ha trasmesso l'intero pacchetto e l'intero pacchetto è stato ricevuto e memorizzato dal router (poiché non c'è ritardo di propagazione). Al tempo L/R secondi, poiché il router ha appena ricevuto l'intero pacchetto, può iniziare a trasmettere il pacchetto sul collegamento in uscita verso la destinazione; al tempo $2L/R$, il router ha trasmesso l'intero pacchetto e l'intero pacchetto è stato ricevuto dalla destinazione. Pertanto, il ritardo totale è $2L/R$. Se invece lo switch inoltrasse i bit non appena arrivano (senza prima ricevere l'intero pacchetto), allora il ritardo totale sarebbe L/R , poiché i bit non vengono trattenuti dal router. Ma, come vedremo nella Sezione 1.4, i router devono ricevere, memorizzare ed *elaborare* l'intero pacchetto prima di inoltrarlo.

Ora calcoliamo il tempo che intercorre da quando la sorgente inizia a inviare il primo pacchetto a quando la destinazione ha ricevuto tutti e tre i pacchetti. Come prima, al tempo L/R il router inizia a inoltrare il primo pacchetto. Ma al tempo L/R anche la sorgente inizierà a inviare il secondo pacchetto, poiché ha appena finito di inviare l'intero primo pacchetto. Quindi, al tempo $2L/R$, la destinazione ha ricevuto il primo pacchetto e il router ha ricevuto il secondo. Analogamente, al tempo $3L/R$, la destinazione ha ricevuto i primi due pacchetti e il router ha ricevuto il terzo. Infine, al tempo $4L/R$ la destinazione ha ricevuto tutti e tre i pacchetti!

Consideriamo ora il caso generale dell'invio di un pacchetto dalla sorgente alla destinazione su un percorso costituito da N collegamenti ciascuno di velocità R (quindi, ci sono $N-1$ router tra la sorgente e la destinazione). Applicando la stessa logica di cui sopra, vediamo che il ritardo end-to-end è:

$$d_{end@to@en} = N \frac{L}{R} \quad (1.1)$$

Si può ora cercare di determinare quale sarebbe il ritardo dei pacchetti P inviati su una serie di N collegamenti.

Ritardi di accodamento e perdita di pacchetti

Ogni commutatore di pacchetti ha più collegamenti collegati. Per ogni collegamento collegato, lo switch di pacchetti dispone di un **buffer di uscita** (chiamato anche **coda di uscita**), che memorizza i pacchetti che il router sta per inviare a quel collegamento. I buffer di uscita svolgono un ruolo fondamentale nella commutazione di pacchetti. Se un pacchetto in arrivo deve essere trasmesso su un collegamento ma trova il collegamento occupato dalla trasmissione di un altro pacchetto, il pacchetto in arrivo deve attendere nel buffer di uscita. Pertanto, oltre ai ritardi di memorizzazione e inoltro, i pacchetti subiscono **ritardi di accodamento** nel buffer di uscita. Questi ritardi sono variabili e dipendono dal livello di congestione della rete. Poiché lo spazio del buffer è finito, un pacchetto in arrivo può scoprire che il buffer è completamente pieno di altri pacchetti in attesa di trasmissione. In questo caso, si verificherà una **perdita di pacchetti**: il pacchetto in arrivo o uno dei pacchetti già in coda verrà abbandonato.

La Figura 1.12 illustra una semplice rete a commutazione di pacchetto. Come nella Figura 1.11, i pacchetti sono rappresentati da lastre tridimensionali. La larghezza di una lastra rappresenta il numero di bit del pacchetto. In questa figura, tutti i pacchetti hanno la stessa larghezza e quindi la stessa lunghezza. Supponiamo che gli host A e B stiano inviando pacchetti all'host E. Gli host A e B inviano prima i loro pacchetti attraverso collegamenti Ethernet a 10 Mbps al primo router. Il router indirizza poi i pacchetti al collegamento a 1,5 Mbps. Se, in un breve intervallo di tempo, la velocità di arrivo dei pacchetti al router (convertita in bit al secondo) supera 1,5 Mbps, si verificherà una congestione al router, poiché i pacchetti si accodano al buffer di uscita del collegamento prima di essere trasmessi sul collegamento. Ad esempio, se gli host A e B inviano ciascuno un burst di cinque pacchetti contemporaneamente, la maggior parte di questi pacchetti rimarrà in attesa nella coda. La situazione è del tutto analoga a molte situazioni quotidiane, ad esempio quando si fa la fila allo sportello di una banca o si aspetta davanti a un casello. Esamineremo questo ritardo di accodamento in modo più dettagliato nella Sezione 1.4.

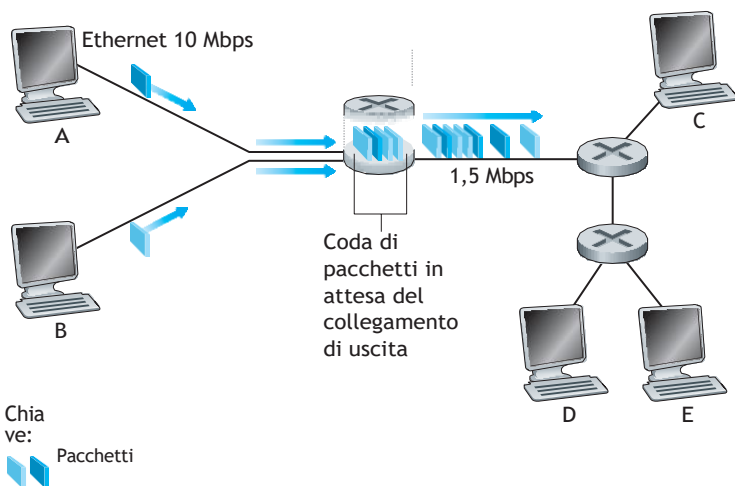


Figura 1.12 Commutazione di pacchetto

trasporta il traffico da/verso i server di Google. Come illustrato nella Figura 1.15, la rete privata di Google tenta di "bypassare" i livelli superiori di Internet effettuando il peering (regolamento gratuito) con gli ISP di livello inferiore, collegandosi direttamente con loro o collegandosi con gli IXP [Labovitz 2010]. Tuttavia, poiché molti ISP di accesso possono ancora essere raggiunti solo transitando attraverso reti di livello 1, anche la rete di Google si connette agli ISP di livello 1 e paga questi ultimi per il traffico che scambia con loro. Creando una propria rete, un fornitore di contenuti non solo riduce i pagamenti agli ISP di livello superiore, ma ha anche un maggiore controllo sul modo in cui i suoi servizi vengono forniti agli utenti finali. L'infrastruttura di rete di Google è descritta in modo più dettagliato nella Sezione 7.2.4.

In sintesi, l'Internet di oggi - una rete di reti - è complessa, composta da una dozzina di ISP di primo livello e da centinaia di migliaia di ISP di livello inferiore. La copertura degli ISP è varia: alcuni si estendono su più continenti e oceani, mentre altri si limitano a regioni geografiche ristrette. Gli ISP di livello inferiore si collegano agli ISP di livello superiore e gli ISP di livello superiore si interconnettono tra loro. Gli utenti e i fornitori di contenuti sono clienti degli ISP di livello inferiore e gli ISP di livello inferiore sono clienti degli ISP di livello superiore. Negli ultimi anni, anche i principali fornitori di contenuti hanno creato le proprie reti e si collegano direttamente agli ISP di livello inferiore, ove possibile.

1.4 Ritardo, perdita e throughput nelle reti a commutazione di pacchetto

Nella sezione 1.1 abbiamo detto che Internet può essere vista come un'infrastruttura che fornisce servizi alle applicazioni distribuite in esecuzione sui sistemi finali. Idealmente, vorremmo che i servizi Internet fossero in grado di spostare tutti i dati che vogliamo tra due sistemi finali, istantaneamente, senza alcuna perdita di dati. Purtroppo, questo è un obiettivo ambizioso e irraggiungibile nella realtà. Le reti di computer, invece, limitano necessariamente il throughput (la quantità di dati al secondo che possono essere trasferiti) tra i sistemi finali, introducono ritardi tra i sistemi finali e possono effettivamente perdere pacchetti. Da un lato, è spiacevole che le leggi fisiche della realtà introducano ritardi e perdite e limitino il throughput. D'altra parte, poiché le reti di computer hanno questi problemi, ci sono molte questioni affascinanti che riguardano il modo in cui affrontarli: più che sufficienti per riempire un corso sulle reti di computer e per motivare migliaia di tesi di dottorato! In questa sezione inizieremo a esaminare e quantificare il ritardo, la perdita e il throughput nelle reti di computer.

1.4.1 Panoramica del ritardo nelle reti a commutazione di pacchetto

Ricordiamo che un pacchetto parte da un host (la sorgente), passa attraverso una serie di router e termina il suo viaggio in un altro host (la destinazione). Mentre un pacchetto viaggia da un nodo (host o router) al nodo successivo (host o router)

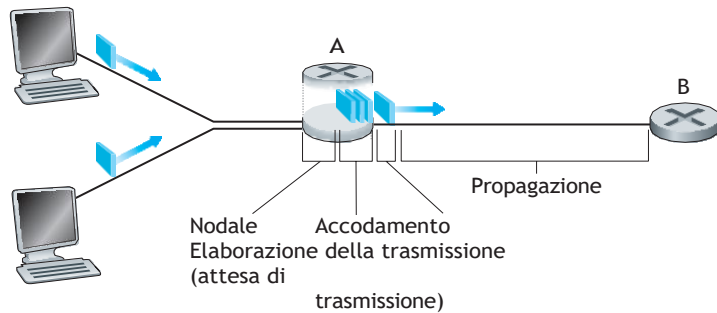


Figura 1.16 Il ritardo nodale del router A

Il pacchetto subisce diversi tipi di ritardo in *ogni* nodo del percorso. I più importanti di questi ritardi sono il **ritardo di elaborazione nodale**, il **ritardo di accodamento**, il **ritardo di trasmissione** e il **ritardo di propagazione**; insieme, questi ritardi si accumulano per dare un **ritardo nodale totale**. Le prestazioni di molte applicazioni Internet, come la ricerca, la navigazione sul Web, la posta elettronica, le mappe, la messaggistica istantanea e il voice-over-IP, sono fortemente influenzate dai ritardi della rete. Per comprendere a fondo la commutazione di pacchetto e le reti di computer, dobbiamo capire la natura e l'importanza di questi ritardi.

Tipi di ritardo

Analizziamo questi ritardi nel contesto della figura 1.16. Come parte del percorso end-to-end tra la sorgente e la destinazione, un pacchetto viene inviato dal nodo a monte attraverso il router A al router B. Il nostro obiettivo è quello di caratterizzare il ritardo nodale del router A. Si noti che il router A ha un collegamento in uscita che porta al router B. Questo collegamento è preceduto da una coda (nota anche come buffer). Quando il pacchetto arriva al router A dal nodo a monte, il router A esamina l'intestazione del pacchetto per determinare il collegamento in uscita appropriato per il pacchetto e quindi indirizza il pacchetto verso questo collegamento. In questo esempio, il collegamento in uscita per il pacchetto è quello che porta al router B. Un pacchetto può essere trasmesso su un collegamento solo se non c'è nessun altro pacchetto in corso di trasmissione sul collegamento e se non ci sono altri pacchetti che lo precedono nella coda; se il collegamento è attualmente occupato o se ci sono altri pacchetti già in coda per il collegamento, il pacchetto appena arrivato si unirà alla coda.

Ritardo di elaborazione

Il tempo necessario per esaminare l'intestazione del pacchetto e determinare dove indirizzare il pacchetto fa parte del **ritardo di elaborazione**. Il ritardo di

elaborazione può includere anche altri fattori, come il tempo necessario per verificare la presenza di errori a livello di bit nel pacchetto che si sono verificati durante la trasmissione dei bit del pacchetto dal nodo a monte al router A. Ritardi di elaborazione

nei router ad alta velocità sono in genere dell'ordine dei microsecondi o meno. Dopo questa elaborazione nodale, il router indirizza il pacchetto alla coda che precede il collegamento al router B. (Nel Capitolo 4 studieremo i dettagli del funzionamento di un router).

Ritardo di accodamento

In coda, il pacchetto subisce un **ritardo di accodamento** in attesa di essere trasmesso sul collegamento. La lunghezza del ritardo di accodamento di un determinato pacchetto dipende dal numero di pacchetti precedenti che sono in coda e in attesa di essere trasmessi sul collegamento. Se la coda è vuota e nessun altro pacchetto è in fase di trasmissione, il ritardo di accodamento del nostro pacchetto sarà pari a zero. Se invece il traffico è intenso e molti altri pacchetti sono in attesa di essere trasmessi, il ritardo di accodamento sarà lungo. Vedremo tra poco che il numero di pacchetti che un pacchetto in arrivo può aspettarsi di trovare è funzione dell'intensità e della natura del traffico in arrivo alla coda. In pratica, i ritardi di accodamento possono essere dell'ordine dei microsecondi o dei millisecondi.

Ritardo di trasmissione

Supponendo che i pacchetti siano trasmessi in modo first-come-first-served, come avviene nelle reti a commutazione di pacchetto, il nostro pacchetto può essere trasmesso solo dopo che tutti i pacchetti arrivati prima di lui sono stati trasmessi. La lunghezza del pacchetto è indicata con L bit e la velocità di trasmissione del collegamento dal router A al router B con R bit/sec. Ad esempio, per un collegamento Ethernet a 10 Mbps, la velocità è $R = 10$ Mbps; per un collegamento Ethernet a 100 Mbps, la velocità è $R = 100$ Mbps. Il **ritardo di trasmissione** è L/R . È il tempo necessario per spingere (cioè trasmettere) tutti i bit del pacchetto nel collegamento. Nella pratica, i ritardi di trasmissione sono tipicamente dell'ordine dei microsecondi o dei millisecondi.

Ritardo di propagazione

Una volta che un bit viene spinto nel collegamento, deve propagarsi al router B. Il tempo necessario per propagarsi dall'inizio del collegamento al router B è il **ritardo di propagazione**. Il bit si propaga alla velocità di propagazione del collegamento. La velocità di propagazione dipende dal mezzo fisico del collegamento (fibra ottica, doppino di rame e così via) ed è compresa nell'intervallo di

Da 2 -108 metri/sec a 3 -108 metri/sec

che è uguale o leggermente inferiore alla velocità della luce. Il ritardo di propagazione è la distanza tra due router divisa per la velocità di propagazione. Cioè, il ritardo di propagazione è d/s , dove d è la distanza tra il router A e il router B e s è la velocità di propagazione del collegamento. Una volta che l'ultimo bit del pacchetto si è propagato al nodo B, esso e tutti i bit precedenti del pacchetto

copertura di un'area, è necessario mettere in orbita molti satelliti. Attualmente sono in fase di sviluppo molti sistemi di comunicazione a bassa quota. La pagina web Lloyd's satellite constellations [Wood 2012] fornisce e raccoglie informazioni sui sistemi di costellazione satellitare per le comunicazioni. La tecnologia satellitare LEO potrebbe essere utilizzata in futuro per l'accesso a Internet.

1.3 Il nucleo della rete

Dopo aver esaminato i margini di Internet, approfondiamo ora il nucleo della rete, la rete di commutatori e collegamenti a pacchetto che interconnette i sistemi finali di Internet. La Figura 1.10 evidenzia il nucleo della rete con linee spesse e ombreggiate.

1.3.1 Commutazione di pacchetti

In un'applicazione di rete, i sistemi finali si scambiano **messaggi** tra loro. I messaggi possono contenere tutto ciò che il progettista dell'applicazione desidera. I messaggi possono svolgere una funzione di controllo (ad esempio, i messaggi "Hi" nell'esempio di handshaking della Figura 1.2) o possono contenere dati, come un messaggio di posta elettronica, un'immagine JPEG o un file audio MP3. Per inviare un messaggio da un sistema finale di origine a un sistema finale di destinazione, l'origine spezza i messaggi lunghi in pezzi di dati più piccoli, detti **pacchetti**. Tra la sorgente e la destinazione, ogni pacchetto viaggia attraverso collegamenti di comunicazione e **commutatori di pacchetti** (di cui esistono due tipi principali, i **router** e i **commutatori di livello link**). I pacchetti vengono trasmessi su ogni collegamento di comunicazione a una velocità pari alla velocità di trasmissione *completa* del collegamento. Quindi, se un sistema finale sorgente o un commutatore di pacchetti invia un pacchetto di L bit su un collegamento con velocità di trasmissione R bit/sec, il tempo di trasmissione del pacchetto è L/R secondi.

Trasmissione Store-and-Forward

La maggior parte degli switch a pacchetto utilizza la **trasmissione store-and-forward** agli ingressi dei collegamenti. La trasmissione store-and-forward significa che il packet switch deve ricevere l'intero pacchetto prima di poter iniziare a trasmettere il primo bit del pacchetto sul collegamento in uscita. Per analizzare più in dettaglio la trasmissione store-and-forward, si consideri una semplice rete costituita da due sistemi finali collegati da un singolo router, come mostrato nella Figura 1.11. Un router avrà tipicamente molti collegamenti incidenti. Un router avrà in genere molti collegamenti incidenti, poiché il suo compito è quello di passare un pacchetto in entrata su un collegamento in uscita; in questo semplice esempio, il router ha il compito piuttosto semplice di trasferire un pacchetto da un collegamento (in ingresso) all'unico altro collegamento collegato. In questo esempio, la sorgente ha tre pacchetti, ciascuno composto da L bit, da inviare alla destinazione. Nell'istante di tempo mostrato nella Figura 1.11, la sorgente ha

trasmesso una parte del pacchetto 1 e la parte anteriore del pacchetto 1 è già arrivata al router. Poiché il router impiega il sistema store-and-forwarding, in questo istante di tempo non può trasmettere i bit che ha ricevuto, bensì

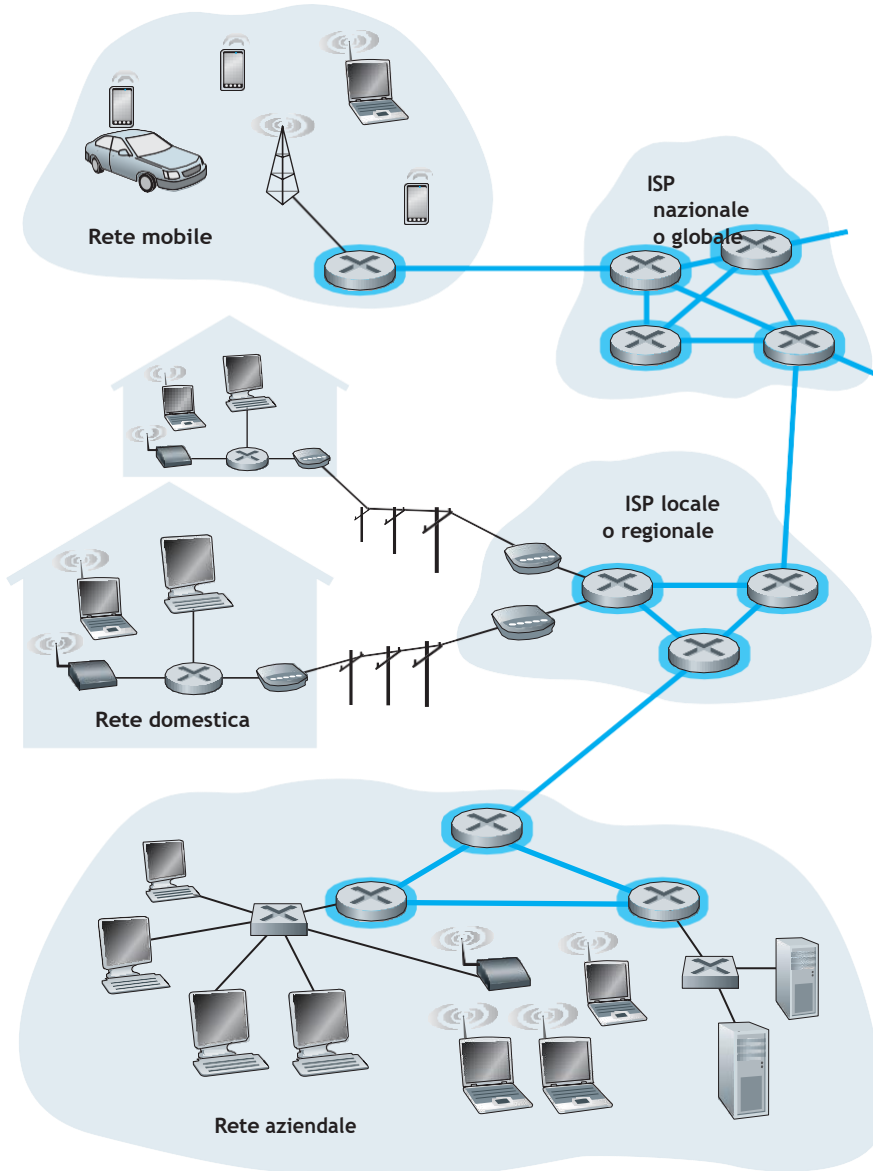


Figura 1.10 Il nucleo della rete

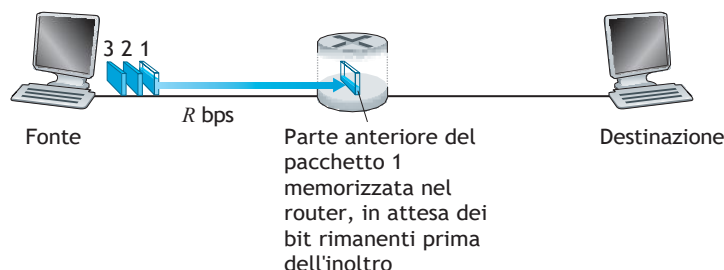


Figura 1.11 Commutazione di pacchetto store-and-forward

deve prima bufferizzare (cioè "memorizzare") i bit del pacchetto. Solo dopo aver ricevuto *tutti i* bit del pacchetto, il router può iniziare a trasmetterlo (cioè "inoltrarlo") sul collegamento in uscita. Per comprendere meglio la trasmissione store-and-forward, calcoliamo il tempo che intercorre tra l'inizio dell'invio del pacchetto da parte della sorgente e la ricezione dell'intero pacchetto da parte della destinazione. (In questo caso ignoreremo il ritardo di propagazione, ossia il tempo necessario ai bit per attraversare il filo a una velocità prossima a quella della luce, che sarà discusso nella Sezione 1.4). La sorgente inizia a trasmettere al tempo 0; al tempo L/R secondi, la sorgente ha trasmesso l'intero pacchetto e l'intero pacchetto è stato ricevuto e memorizzato dal router (poiché non c'è ritardo di propagazione). Al tempo L/R secondi, poiché il router ha appena ricevuto l'intero pacchetto, può iniziare a trasmettere il pacchetto sul collegamento in uscita verso la destinazione; al tempo $2L/R$, il router ha trasmesso l'intero pacchetto e l'intero pacchetto è stato ricevuto dalla destinazione. Pertanto, il ritardo totale è $2L/R$. Se invece lo switch inoltrasse i bit non appena arrivano (senza prima ricevere l'intero pacchetto), allora il ritardo totale sarebbe L/R , poiché i bit non vengono trattenuti dal router. Ma, come vedremo nella Sezione 1.4, i router devono ricevere, memorizzare ed *elaborare* l'intero pacchetto prima di inoltrarlo.

Calcoliamo ora il tempo che intercorre da quando la sorgente inizia a inviare il primo pacchetto a quando la destinazione ha ricevuto tutti e tre i pacchetti. Come prima, al tempo L/R il router inizia a inoltrare il primo pacchetto. Ma al tempo L/R anche la sorgente inizierà a inviare il secondo pacchetto, poiché ha appena finito di inviare l'intero primo pacchetto. Quindi, al tempo $2L/R$, la destinazione ha ricevuto il primo pacchetto e il router ha ricevuto il secondo. Analogamente, al tempo $3L/R$, la destinazione ha ricevuto i primi due pacchetti e il router ha ricevuto il terzo. Infine, al tempo $4L/R$ la destinazione ha ricevuto tutti e tre i pacchetti!

Consideriamo ora il caso generale dell'invio di un pacchetto dalla sorgente alla destinazione su un percorso costituito da N collegamenti ciascuno di velocità R (quindi, ci sono $N-1$ router tra la sorgente e la destinazione). Applicando la stessa logica di cui sopra, vediamo che il ritardo end-to-end è:

$$d_{end@to@end} = N \frac{L}{R} \quad (1.1)$$

Si può ora cercare di determinare quale sarebbe il ritardo dei pacchetti P inviati su una serie di N collegamenti.

Ritardi di accodamento e perdita di pacchetti

Ogni commutatore di pacchetti ha più collegamenti collegati. Per ogni collegamento collegato, lo switch di pacchetti dispone di un **buffer di uscita** (chiamato anche **coda di uscita**), che memorizza i pacchetti che il router sta per inviare a quel collegamento. I buffer di uscita svolgono un ruolo fondamentale nella commutazione di pacchetti. Se un pacchetto in arrivo deve essere trasmesso su un collegamento ma trova il collegamento occupato dalla trasmissione di un altro pacchetto, il pacchetto in arrivo deve attendere nel buffer di uscita. Pertanto, oltre ai ritardi di memorizzazione e inoltro, i pacchetti subiscono **ritardi di accodamento** nel buffer di uscita. Questi ritardi sono variabili e dipendono dal livello di congestione della rete. Poiché lo spazio del buffer è finito, un pacchetto in arrivo può scoprire che il buffer è completamente pieno di altri pacchetti in attesa di trasmissione. In questo caso, si verificherà una **perdita di pacchetti**: il pacchetto in arrivo o uno dei pacchetti già in coda verrà abbandonato.

La Figura 1.12 illustra una semplice rete a commutazione di pacchetto. Come nella Figura 1.11, i pacchetti sono rappresentati da lastre tridimensionali. La larghezza di una lastra rappresenta il numero di bit del pacchetto. In questa figura, tutti i pacchetti hanno la stessa larghezza e quindi la stessa lunghezza. Supponiamo che gli host A e B stiano inviando pacchetti all'host E. Gli host A e B inviano prima i loro pacchetti attraverso collegamenti Ethernet a 10 Mbps al primo router. Il router indirizza poi i pacchetti al collegamento a 1,5 Mbps. Se, in un breve intervallo di tempo, la velocità di arrivo dei pacchetti al router (convertita in bit al secondo) supera 1,5 Mbps, si verificherà una congestione al router, poiché i pacchetti si accodano al buffer di uscita del collegamento prima di essere trasmessi sul collegamento. Ad esempio, se gli host A e B inviano ciascuno un burst di cinque pacchetti contemporaneamente, la maggior parte di questi pacchetti rimarrà in attesa nella coda. La situazione è del tutto analoga a molte situazioni quotidiane, ad esempio quando si fa la fila allo sportello di una banca o si aspetta davanti a un casello. Esamineremo questo ritardo di accodamento in modo più dettagliato nella Sezione 1.4.

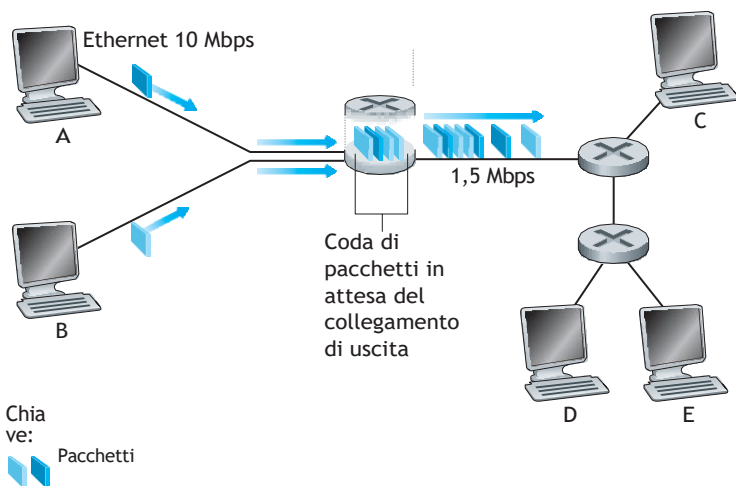


Figura 1.12 Commutazione di pacchetto

trasporta il traffico da/verso i server di Google. Come illustrato nella Figura 1.15, la rete privata di Google tenta di "bypassare" i livelli superiori di Internet effettuando il peering (regolamento gratuito) con gli ISP di livello inferiore, collegandosi direttamente con loro o collegandosi agli IXP [Labovitz 2010]. Tuttavia, poiché molti ISP di accesso possono ancora essere raggiunti solo transitando attraverso reti di livello 1, anche la rete di Google si connette a ISP di livello 1 e paga questi ISP per il traffico che scambia con loro. Creando una propria rete, un fornitore di contenuti non solo riduce i pagamenti agli ISP di livello superiore, ma ha anche un maggiore controllo sul modo in cui i suoi servizi vengono forniti agli utenti finali. L'infrastruttura di rete di Google è descritta in modo più dettagliato nella Sezione 7.2.4.

In sintesi, l'Internet di oggi - una rete di reti - è complessa, composta da una dozzina di ISP di primo livello e da centinaia di migliaia di ISP di livello inferiore. La copertura degli ISP è varia: alcuni si estendono su più continenti e oceani, mentre altri si limitano a regioni geografiche ristrette. Gli ISP di livello inferiore si collegano agli ISP di livello superiore e gli ISP di livello superiore si interconnettono tra loro. Gli utenti e i fornitori di contenuti sono clienti degli ISP di livello inferiore e gli ISP di livello inferiore sono clienti degli ISP di livello superiore. Negli ultimi anni, anche i principali fornitori di contenuti hanno creato le proprie reti e si collegano direttamente agli ISP di livello inferiore, ove possibile.

1.4 Ritardo, perdita e throughput nelle reti a commutazione di pacchetto

Nella sezione 1.1 abbiamo detto che Internet può essere vista come un'infrastruttura che fornisce servizi alle applicazioni distribuite in esecuzione sui sistemi finali. Idealmente, vorremmo che i servizi Internet fossero in grado di spostare tutti i dati che vogliamo tra due sistemi finali, istantaneamente, senza alcuna perdita di dati. Purtroppo, questo è un obiettivo ambizioso e irraggiungibile nella realtà. Le reti di computer, invece, limitano necessariamente il throughput (la quantità di dati al secondo che possono essere trasferiti) tra i sistemi finali, introducono ritardi tra i sistemi finali e possono effettivamente perdere pacchetti. Da un lato, è spiacevole che le leggi fisiche della realtà introducano ritardi e perdite e limitino il throughput. D'altra parte, poiché le reti di computer hanno questi problemi, ci sono molte questioni affascinanti che riguardano il modo in cui affrontarli: più che sufficienti per riempire un corso sulle reti di computer e per motivare migliaia di tesi di dottorato! In questa sezione inizieremo a esaminare e quantificare il ritardo, la perdita e il throughput nelle reti di computer.

1.4.1 Panoramica del ritardo nelle reti a commutazione di pacchetto

Ricordiamo che un pacchetto parte da un host (la sorgente), passa attraverso una serie di router e termina il suo viaggio in un altro host (la destinazione). Mentre un pacchetto viaggia da un nodo (host o router) al nodo successivo (host o router)

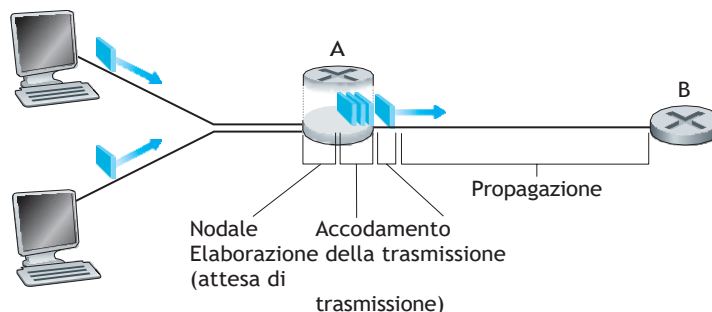


Figura 1.16 Il ritardo nodale del router A

Il pacchetto subisce diversi tipi di ritardo in *ogni* nodo del percorso. I più importanti di questi ritardi sono il **ritardo di elaborazione nodale**, il **ritardo di accodamento**, il **ritardo di trasmissione** e il **ritardo di propagazione**; insieme, questi ritardi si accumulano per dare un **ritardo nodale totale**. Le prestazioni di molte applicazioni Internet, come la ricerca, la navigazione sul Web, la posta elettronica, le mappe, la messaggistica istantanea e il voice-over-IP, sono fortemente influenzate dai ritardi della rete. Per comprendere a fondo la commutazione di pacchetto e le reti di computer, dobbiamo capire la natura e l'importanza di questi ritardi.

Tipi di ritardo

Esploriamo questi ritardi nel contesto della Figura 1.16. Come parte del percorso end-to-end tra la sorgente e la destinazione, un pacchetto viene inviato dal nodo a monte attraverso il router A al router B. Il nostro obiettivo è quello di caratterizzare il ritardo nodale del router A. Si noti che il router A ha un collegamento in uscita che porta al router B. Questo collegamento è preceduto da una coda (nota anche come buffer). Quando il pacchetto arriva al router A dal nodo a monte, il router A esamina l'intestazione del pacchetto per determinare il collegamento in uscita appropriato per il pacchetto e quindi indirizza il pacchetto verso questo collegamento. In questo esempio, il collegamento in uscita per il pacchetto è quello che porta al router B. Un pacchetto può essere trasmesso su un collegamento solo se non c'è nessun altro pacchetto in corso di trasmissione sul collegamento e se non ci sono altri pacchetti che lo precedono nella coda; se il collegamento è attualmente occupato o se ci sono altri pacchetti già in coda per il collegamento, il pacchetto appena arrivato si unirà alla coda.

Ritardo di elaborazione

Il tempo necessario per esaminare l'intestazione del pacchetto e determinare dove indirizzare il pacchetto fa parte del **ritardo di elaborazione**. Il ritardo di

elaborazione può includere anche altri fattori, come il tempo necessario per verificare la presenza di errori a livello di bit nel pacchetto che si sono verificati durante la trasmissione dei bit del pacchetto dal nodo a monte al router A. Ritardi di elaborazione

nei router ad alta velocità sono in genere dell'ordine dei microsecondi o meno. Dopo questa elaborazione nodale, il router indirizza il pacchetto alla coda che precede il collegamento al router B. (Nel Capitolo 4 studieremo i dettagli del funzionamento di un router).

Ritardo di accodamento

In coda, il pacchetto subisce un **ritardo di accodamento** in attesa di essere trasmesso sul collegamento. La lunghezza del ritardo di accodamento di un determinato pacchetto dipende dal numero di pacchetti precedenti che sono in coda e in attesa di essere trasmessi sul collegamento. Se la coda è vuota e nessun altro pacchetto è in fase di trasmissione, il ritardo di accodamento del nostro pacchetto sarà pari a zero. Se invece il traffico è intenso e molti altri pacchetti sono in attesa di essere trasmessi, il ritardo di accodamento sarà lungo. Vedremo tra poco che il numero di pacchetti che un pacchetto in arrivo può aspettarsi di trovare è funzione dell'intensità e della natura del traffico in arrivo alla coda. In pratica, i ritardi di accodamento possono essere dell'ordine dei microsecondi o dei millisecondi.

Ritardo di trasmissione

Supponendo che i pacchetti siano trasmessi in modo first-come-first-served, come avviene nelle reti a commutazione di pacchetto, il nostro pacchetto può essere trasmesso solo dopo che tutti i pacchetti arrivati prima di lui sono stati trasmessi. La lunghezza del pacchetto è indicata con L bit e la velocità di trasmissione del collegamento dal router A al router B con R bit/sec. Ad esempio, per un collegamento Ethernet a 10 Mbps, la velocità è $R = 10$ Mbps; per un collegamento Ethernet a 100 Mbps, la velocità è $R = 100$ Mbps. Il **ritardo di trasmissione** è L/R . È il tempo necessario per spingere (cioè trasmettere) tutti i bit del pacchetto nel collegamento. Nella pratica, i ritardi di trasmissione sono tipicamente dell'ordine dei microsecondi o dei millisecondi.

Ritardo di propagazione

Una volta che un bit viene spinto nel collegamento, deve propagarsi al router B. Il tempo necessario per propagarsi dall'inizio del collegamento al router B è il **ritardo di propagazione**. Il bit si propaga alla velocità di propagazione del collegamento. La velocità di propagazione dipende dal mezzo fisico del collegamento (fibra ottica, doppino di rame e così via) ed è compresa nell'intervallo di

Da 2 -108 metri/sec a 3 -108 metri/sec

che è uguale o leggermente inferiore alla velocità della luce. Il ritardo di propagazione è la distanza tra due router divisa per la velocità di propagazione. Cioè, il ritardo di propagazione è d/s , dove d è la distanza tra il router A e il router B e s è la velocità di propagazione del collegamento. Una volta che l'ultimo bit del pacchetto si è propagato al nodo B, esso e tutti i bit precedenti del pacchetto

vengono memorizzati nel router B. L'intero