



Figura 1.9 Una tipica rete domestica

Accesso wireless ad ampio raggio: 3G e LTE

Sempre più spesso, dispositivi come iPhone, BlackBerry e Android vengono utilizzati per inviare e-mail, navigare sul Web, twittare e scaricare musica mentre si è in giro. Questi dispositivi utilizzano la stessa infrastruttura wireless utilizzata per la telefonia cellulare per inviare/ricevere pacchetti attraverso una stazione base gestita dal provider della rete cellulare. A differenza del WiFi, l'utente deve trovarsi nel raggio di qualche decina di chilometri (anziché qualche decina di metri) dalla stazione base.

Le società di telecomunicazioni hanno fatto enormi investimenti nel cosiddetto wireless di terza generazione (3G), che fornisce accesso a Internet wireless ad ampio raggio a commutazione di pacchetto con velocità superiori a 1 Mbps. Ma si stanno già diffondendo tecnologie di accesso ad ampio raggio a velocità ancora più elevate, una quarta generazione (4G) di reti wireless ad ampio raggio. L'LTE (che sta per "Long-Term Evolution", candidato al premio per il brutto acronimo dell'anno) ha le sue radici nella tecnologia 3G e può potenzialmente raggiungere velocità superiori a 10 Mbps. Nelle distribuzioni commerciali sono state registrate velocità di downstream LTE di molte decine di Mbps. Nel Capitolo 6 tratteremo i principi di base delle reti wireless e della mobilità, nonché le tecnologie WiFi, 3G e LTE (e altro ancora!).

1.2.2 Supporti fisici

Nella sottosezione precedente abbiamo fornito una panoramica di alcune delle più importanti tecnologie di accesso alla rete Internet. Nel descrivere queste tecnologie, abbiamo indicato anche i supporti fisici utilizzati. Ad esempio, abbiamo detto che l'HFC utilizza una combinazione di cavo in fibra e cavo coassiale. Abbiamo detto che DSL ed Ethernet utilizzano cavi di rame. E abbiamo detto che le reti di accesso mobile utilizzano lo spettro radio.

In questa sottosezione forniamo una breve panoramica di questi e altri mezzi di trasmissione comunemente utilizzati in Internet.

Per definire cosa si intende per mezzo fisico, riflettiamo sulla breve vita di un bit. Consideriamo un bit che viaggia da un sistema finale, attraverso una serie di link e router, verso un altro sistema finale. Questo povero bit viene fatto girare e trasmesso molte, molte volte! Il sistema finale di partenza trasmette il bit e poco dopo il primo router della serie lo riceve; il primo router trasmette il bit e poco dopo il secondo router lo riceve e così via. In questo modo il nostro bit, quando viaggia dalla sorgente alla destinazione, passa attraverso una serie di coppie trasmettitore-ricevitore. Per ogni coppia trasmettitore-ricevitore, il bit viene inviato propagando onde elettromagnetiche o impulsi ottici attraverso un **mezzo fisico**. Il mezzo fisico può assumere diverse forme e non deve essere necessariamente dello stesso tipo per ogni coppia trasmettitore-ricevitore lungo il percorso. Esempi di mezzi fisici sono il doppino di rame, il cavo coassiale, il cavo multimodale in fibra ottica, lo spettro radio terrestre e lo spettro radio satellitare. I mezzi fisici si dividono in due categorie: **mezzi guidati** e **mezzi non guidati**. Nei mezzi guidati, le onde sono guidate lungo un mezzo solido, come un cavo in fibra ottica, un filo di rame a coppie intrecciate o un cavo coassiale. Con i mezzi non guidati, le onde si propagano nell'atmosfera e nello spazio, come in una LAN wireless o in un canale satellitare digitale.

Prima di entrare nel merito delle caratteristiche dei vari tipi di media, però, è necessario spendere qualche parola sui loro costi. Il costo effettivo del collegamento fisico (filo di rame, cavo in fibra ottica e così via) è spesso relativamente basso rispetto agli altri costi della rete. In particolare, il costo della manodopera associata all'installazione del collegamento fisico può essere di ordini di grandezza superiore al costo del materiale. Per questo motivo, molti costruttori installano doppino, fibra ottica e cavo coassiale in ogni stanza di un edificio. Anche se inizialmente viene utilizzato un solo mezzo, è molto probabile che in un prossimo futuro se ne possa utilizzare un altro e quindi si risparmi denaro non dovendo posare altri cavi in futuro.

Filo di rame intrecciato

Il mezzo di trasmissione guidato meno costoso e più comunemente utilizzato è il doppino di rame. Da oltre cento anni viene utilizzato dalle reti telefoniche. Infatti, oltre il 99% delle connessioni cablate dalla cornetta del telefono alla centralina telefonica locale utilizza il doppino di rame. La maggior parte di noi ha visto il doppino nelle proprie case e negli ambienti di lavoro. Il doppino è costituito da due fili di rame isolati, ciascuno spesso circa 1 mm, disposti a spirale in modo regolare. I fili sono attorcigliati tra loro per ridurre le interferenze elettriche di coppie simili vicine. In genere, un certo numero di coppie viene riunito in un cavo avvolgendo le coppie in uno schermo protettivo. Una coppia di fili costituisce un singolo collegamento di comunicazione. Il **doppino non schermato (UTP)** è comunemente utilizzato per

reti di computer all'interno di un edificio, cioè per le LAN. Le velocità di trasmissione dei dati per le LAN che utilizzano il doppino telefonico variano oggi da 10 Mbps a 10 Gbps. Le velocità di trasmissione dei dati che si possono ottenere dipendono dallo spessore del filo e dalla distanza tra il trasmettitore e il ricevitore.

Quando la tecnologia a fibre ottiche è emersa negli anni '80, molti hanno denigrato il doppino a causa della sua velocità di trasmissione relativamente bassa.

Alcuni ritenevano addirittura che la tecnologia a fibre ottiche avrebbe sostituito completamente il doppino. Ma il doppino non si è arreso così facilmente. La moderna tecnologia a doppino, come il cavo di categoria 6a, può raggiungere velocità di trasmissione dati di 10 Gbps per distanze fino a cento metri. Alla fine, il doppino si è imposto come soluzione dominante per le reti LAN ad alta velocità.

Come discusso in precedenza, il doppino è comunemente utilizzato anche per l'accesso residenziale a Internet. Abbiamo visto che la tecnologia dei modem dial-up consente di accedere a velocità fino a 56 kbps sul doppino. Abbiamo anche visto che la tecnologia DSL (digital subscriber line) ha permesso agli utenti residenziali di accedere a Internet a decine di Mbps su doppino telefonico. (quando gli utenti vivono vicino al modem dell'ISP).

Cavo coassiale

Come il doppino, il cavo coassiale è composto da due conduttori di rame, ma i due conduttori sono concentrici anziché paralleli. Grazie a questa struttura e a speciali isolamenti e schermature, il cavo coassiale può raggiungere elevate velocità di trasmissione dei dati. Il cavo coassiale è piuttosto comune nei sistemi televisivi via cavo. Come abbiamo visto in precedenza, i sistemi di televisione via cavo sono stati recentemente abbinati ai modem via cavo per fornire agli utenti residenziali un accesso a Internet con velocità di decine di Mbps. Nella televisione via cavo e nell'accesso a Internet via cavo, il trasmettitore sposta il segnale digitale su una banda di frequenza specifica e il segnale analogico risultante viene inviato dal trasmettitore a uno o più ricevitori. Il cavo coassiale può essere utilizzato come **mezzo condiviso** guidato. In particolare, un certo numero di sistemi finali può essere collegato direttamente al cavo e ciascuno di essi riceve ciò che viene inviato dagli altri sistemi finali.

Fibre ottiche

Una fibra ottica è un mezzo sottile e flessibile che conduce impulsi di luce, ogni impulso dei quali rappresenta un bit. Una singola fibra ottica può supportare velocità di trasmissione enormi, fino a decine o addirittura centinaia di gigabit al secondo. Sono immuni alle interferenze elettromagnetiche, hanno un'attenuazione del segnale molto bassa fino a 100 chilometri e sono molto difficili da intercettare. Queste caratteristiche hanno reso la fibra ottica il mezzo di trasmissione guidato preferito per le lunghe distanze, in particolare per i collegamenti con l'estero. Molte delle reti telefoniche a lunga distanza negli Stati Uniti e altrove utilizzano oggi esclusivamente la fibra ottica. La fibra ottica è anche prevalente nella spina dorsale di Internet. Tuttavia, l'elevato costo dei dispositivi ottici, come trasmettitori,

ricevitori e switch, ne ha ostacolato l'impiego per il trasporto a breve distanza, ad esempio in una LAN o in una rete di telecomunicazioni.

casa in una rete di accesso residenziale. Le velocità di collegamento standard Optical Carrier (OC) vanno da 51,8 Mbps a 39,8 Gbps; queste specifiche sono spesso indicate come OC- n , dove la velocità di collegamento è pari a n 51,8 Mbps. Gli standard in uso oggi includono OC-1, OC-3, OC-12, OC-24, OC-48, OC-96, OC-192, OC-768. [Mukherjee 2006, Ramaswamy 2010] forniscono una copertura di vari aspetti delle reti ottiche.

Canali radiofonici terrestri

I canali radio trasportano segnali nello spettro elettromagnetico. Sono un mezzo interessante perché non richiedono l'installazione di cavi fisici, possono penetrare i muri, fornire connettività a un utente mobile e possono potenzialmente trasportare un segnale per lunghe distanze. Le caratteristiche di un canale radio dipendono in modo significativo dall'ambiente di propagazione e dalla distanza su cui deve essere trasportato il segnale. Le considerazioni ambientali determinano la perdita di percorso e lo shadow fading (che diminuiscono la potenza del segnale quando questo viaggia su una distanza e intorno/attraverso oggetti ostruenti), il multi path fading (dovuto alla riflessione del segnale da parte di oggetti interferenti) e l'interferenza (dovuta ad altre trasmissioni e segnali elettromagnetici).

I canali radio terrestri possono essere classificati a grandi linee in tre gruppi: quelli che operano su distanze molto brevi (ad esempio, con uno o due metri); quelli che operano in aree locali, tipicamente da dieci a qualche centinaio di metri; e quelli che operano in aree ampie, con distanze di decine di chilometri. I dispositivi personali come le cuffie a filo, le tastiere e i dispositivi medici operano su brevi distanze; le tecnologie LAN senza fili descritte nella Sezione 1.2.1 utilizzano canali radio locali; le tecnologie di accesso cellulare utilizzano canali radio ad ampio raggio. I canali radio sono trattati in dettaglio nel Capitolo 6.

Canali radio satellitari

Un satellite di comunicazione collega due o più trasmettitori/ricevitori di microonde a terra, noti come stazioni terrestri. Il satellite riceve le trasmissioni su una banda di frequenza, rigenera il segnale utilizzando un ripetitore (di cui si parlerà più avanti) e trasmette il segnale su un'altra frequenza. Per le comunicazioni si utilizzano due tipi di satelliti: i **satelliti geostazionari** e i **satelliti in orbita bassa (LEO)**.

I satelliti geostazionari rimangono permanentemente sopra lo stesso punto della Terra. Questa presenza stazionaria si ottiene ponendo il satellite in orbita a 36.000 chilometri sopra la superficie terrestre. Questa enorme distanza dalla stazione di terra, attraverso il satellite, fino alla stazione di terra, introduce un sostanziale ritardo di propagazione del segnale di 280 millisecondi. Ciononostante, i collegamenti satellitari, che possono operare a velocità di centinaia di Mbps, sono spesso utilizzati in aree prive di accesso a Internet via DSL o via cavo.

I satelliti LEO sono posizionati molto più vicino alla Terra e non rimangono permanentemente sopra un punto della Terra. Ruotano intorno alla Terra (proprio come la Luna) e possono comunicare tra loro e con le stazioni a terra. Per fornire un servizio continuo

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