

Gli scopi delle reti:

- Accesso alle informazioni
- Condivisione di risorse
- Facilitazione della comunicazione

Fornisce una comunicazione:

- Affidabile
- Efficiente
- Scalabile
- In grado di connettere ambienti applicativi diversi

Rileva e corregge automaticamente:

- Dati corrotti
- Dati persi
- Duplicazioni di dati (se si perde l'ack)
- Distribuzione con ordine diverso pacchetti

Trova cammini ottimali da una specifica sorgente a una specifica destinazione.

Due nodi: problemi di comunicazione fisica

- elettrici,
- ottici,
- onde elettromagnetiche

Più di due nodi: molti problemi nuovi

- Indirizzamento
- Commutazione
- Instradamento
- Alta Affidabilità

Un possibile modello fisico che implementa la definizione data di rete di telecomunicazione deve prevedere la presenza:

- **hosts** (stazioni) dispositivi autonomi connessi a una rete
- **links** (collegamenti trasmissivi), tipicamente **punto-a-punto**, interconnessi fra loro tramite nodi di commutazione
- **nodi di commutazione** (Network switch), il cui compito è quello di riconoscere le richieste per l'apertura di una connessione e fare in modo che i dati, relativi a tale connessione, arrivino al nodo di destinazione

Prende il nome di Data Terminal Equipment (brevemente **DTE**) il complesso costituito dal sistema, dal terminale dalle relative risorse collegati in rete per la trasmissione dei dati.

Il DTE può essere dunque un supercalcolatore, un semplice PC o anche semplicemente un qualsiasi oggetto connesso in rete come utente finale.

Si può perciò affermare che lo scopo della rete è l'interconnessione dei vari DTE per la condivisione delle risorse, lo scambio di dati e la cooperazione tra i processi applicativi.

Un circuito fisico è detto **punto-a-punto** quando collega due soli nodi di rete

Un circuito fisico **multipunto** consiste nel connettere più di due nodi sullo stesso canale fisico

All'opposto delle reti multipunto e punto-a-punto si collocano le cosiddette **reti broadcast**: queste sono dotate di un unico canale di comunicazione che è condiviso da tutti gli elaboratori. Brevi messaggi (spesso chiamati **pacchetti**) inviati da un elaboratore sono ricevuti da tutti gli altri elaboratori. Un indirizzo all'interno del pacchetto specifica il destinatario.

Quando un elaboratore riceve un pacchetto, esamina l'indirizzo di destinazione; se questo coincide col proprio indirizzo, il pacchetto viene elaborato, altrimenti viene ignorato. Le reti broadcast, in genere, consentono anche di inviare un pacchetto a tutti gli elaboratori, usando un opportuno indirizzo.

si parla in questo caso di **broadcasting**. In tal caso tutti prendono in considerazione il pacchetto.

Un'altra possibilità è inviare il pacchetto ad un sottoinsieme degli elaboratori: si parla in questo caso di **multicasting** e succede che solo gli elaboratori del suddetto sottoinsieme prendono in considerazione il pacchetto, che invece viene ignorato dagli altri. In ciascun pacchetto è presente un bit che indica che si tratta di una trasmissione in

multicasting, mentre i rimanenti bit contengono l'indirizzo del gruppo destinatario ed ovviamente i dati. In particolare, il bit che indica o meno il multicasting appartiene allo stesso campo contenente l'indirizzo: se N sono i bit di tale campo, quindi, solo N-1 sono riservati all'indirizzo vero e proprio.

Il flusso trasmissivo, lungo una linea di comunicazione, può avvenire in 3 modi diversi:

- Il caso più semplice è quello della trasmissione **simplex**: i dati viaggiano, in questo caso, in una sola direzione
- Nella trasmissione **half-duplex**, invece, i dati possono viaggiare in entrambe le direzioni, ma non contemporaneamente. È il modo classico di operare dei terminali conversazionali, che prevede l'invio di una richiesta, la ricezione della risposta e, sulla base di quest'ultima, l'invio di una ulteriore richiesta e così via.
- Il modo più completo e anche più complesso è quello della trasmissione **full-duplex**: in questo caso, i dati possono viaggiare, contemporaneamente, in entrambe le direzioni.

Commutazione: è quell'operazione che predispone il percorso che le informazioni emesse dal mittente devono seguire per raggiungere il destinatario esistono fondamentalmente due tipi di commutazione:

- **commutazione di pacchetto**
- **commutazione di circuito**.

La commutazione di **pacchetto** si basa sulla suddivisione del messaggio in più unità autonome, ciascuna corredata delle opportune informazioni di controllo:

- identificativi del mittente e del destinatario
- numero d'ordine del pacchetto all'interno dell'intero messaggio;

Capacità di instradamento autonoma nei singoli organi di commutazione della rete:

Ogni pacchetto è instradato indipendentemente (e su percorsi differenti). La rete non ne garantisce l'inoltro e la ricezione nel giusto ordine. Utilizzo ottimale delle risorse in ragione del principio di **multiplexing statistico**.

Commutazione di circuito

Tramite una serie di dispositivi di commutazione intermedia si determina una connessione fisica diretta, anche se effettivamente priva di continuità elettrica/optica, che simula un unico cavo/canale tra le due stazioni che necessitano di comunicare. Tale connessione è assegnata permanentemente ed unicamente alla coppia di stazione ed è mantenuta fino al termine della comunicazione; Caratteristiche della commutazione di circuito sono:

- la presenza di un tempo di attivazione della connessione (variabile in funzione del traffico e della distanza delle due stazioni)
- la bassa efficienza nell'uso del mezzo in quanto la connessione rimane "instaurata" anche quando i due utenti momentaneamente non la utilizzano per comunicare.

La commutazione di pacchetto è in media più scalabile e ottimizza la gestione delle risorse. È estremamente efficiente per il trasporto di pacchetti di piccole dimensioni (e-mail, login, transazioni www) che comportano trasferimenti di alcune centinaia di KB. Però è evidente l'inadeguatezza della commutazione di pacchetto per il trasporto di grandi quantità di informazioni (diversi Tera o Petabytes) sulla rete. Gestire decisioni di instradamento ogni 1500 Bytes per trasferire ad es. 1.5TB di dati richiederebbe di reiterare le stesse decisioni circa un bilione di volte su tutti i router coinvolti. È inoltre praticamente impossibile riservare risorse in anticipo o fare ingegneria del traffico scegliendo i percorsi. La logica del multiplexing statistico non scala su grandi volumi.

Un Data Switching Equipment (brevemente DSE) o **nodo di commutazione** è un nodo intermedio della rete, senza alcuna funzione di supporto diretto agli utenti, la cui principale funzione è quella di commutare (switch) il traffico tra due o più DTE non direttamente collegati tra loro. La commutazione avviene attraverso la cross-connessione fra due interfacce, temporanea o semipermanente

Sulla base di opportuni criteri e di adeguate informazioni di servizio, un DSE sceglie dunque la strada (detta **percorso di rete**) che i messaggi devono seguire per arrivare alla loro destinazione. A parte i malfunzionamenti, il DSE può operare una scelta di percorso anche in ragione del carico delle linee: questo problema rientra nel vasto campo del cosiddetto **controllo della congestione**.

Prende il nome di **topologia di rete** la configurazione geometrica dei collegamenti tra i vari componenti della rete. Esistono vari tipi di topologie, la scelta dei quali è legata al conseguimento di alcuni obiettivi fondamentali:

- Massima Affidabilità (Tasso di guasti e ridondanza)
- Scalabilità (Margini di crescita)
- Alto Rendimento Complessivo (banda e latenza)

- Minimi Costi di startup ed esercizio

Il traffico di dati va dai nodi dei livelli più bassi verso i nodi intermedi o verso il nodo del livello più alto. Quest'ultimo è in genere il nodo più potente dell'intera struttura, visto che deve provvedere alle richieste di tutta la rete. Spesso, è responsabile della gestione completa della rete, è anche possibile che ci sia una cooperazione, per la gestione ed il controllo della rete, tra il nodo principale e alcuni o tutti i nodi del livello immediatamente inferiore: per esempio, a tali sistemi di livello inferiore possono essere affidati compiti gestionali specifici oppure limitati ad una specifica sottorete.

La topologia a rete gerarchica presenta fundamentalmente i seguenti inconvenienti:

- il nodo principale, se è sovraccarico di lavoro, può diventare un collo di bottiglia per l'intera rete, il che comporta un rallentamento dei servizi per tutti gli utenti;
- inoltre, la caduta del nodo principale rende inoltre inutilizzabile l'intera rete.

A quest'ultimo inconveniente si può però ovviare adottando una politica di back-up: bisogna cioè mettere in grado uno o più altri nodi della rete di svolgere le stesse funzioni del nodo principale nel momento in cui questo dovesse venire a mancare

La configurazione a **stella** è simile a quella ad albero, con la fondamentale differenza che non c'è alcuna distribuzione funzionale, ossia non ci sono livelli diversi: in altre parole, tutte le funzioni riguardanti gli utenti periferici sono realizzate nel nodo centrale. Questa topologia presenta, accentuati, gli stessi pregi e difetti della struttura ad albero.

Questa configurazione è diventata popolare in quanto è adottata dalle reti locali di tipo **Ethernet**. La caratteristica è che c'è un unico cavo che collega tutte le stazioni

La trasmissione di una stazione viene ricevuta da tutte le altre. In qualche modo, è l'analogo del bus che viene usato nelle architetture dei moderni calcolatori:

- il bus è l'insieme di cavi elettrici che mettono in comunicazione tutti i dispositivi (CPU, memoria, periferiche) da cui il calcolatore è costituito.
- In questo caso mette in comunicazione i vari nodi di rete

In ogni istante solo un elaboratore può trasmettere, mentre gli altri devono astenersi, in maniera del tutto analoga a quanto avviene in un singolo calcolatore, dove il bus è a disposizione di un dispositivo (CPU o periferica) per volta; è necessario un meccanismo di arbitraggio per risolvere i conflitti quando due o più elaboratori vogliono trasmettere contemporaneamente; l'arbitraggio può essere centralizzato o distribuito

Il vantaggio fondamentale della **configurazione a dorsale** è nella tecnologia di accesso, il quale, nel caso di rete locale, è davvero molto semplice. I principali inconvenienti sono invece i seguenti:

- i potenziali problemi di prestazioni dovuti al fatto che unico portante trasmissivo serve tutte le stazioni;
- una eventuale interruzione del portante mette fuori uso l'intera rete;
- la mancanza di punti di concentrazione rende difficoltosa l'individuazione di eventuali punti di malfunzionamento.

Questa configurazione è stata resa popolare dalle prime **LAN** (Local Area Network) di tipo Token-Ring o FDDI.

La trasmissione è in questo caso unidirezionale (i dati viaggiano cioè solo in un senso), ma, essendo l'anello un circuito chiuso su se stesso, è possibile inviare un messaggio da qualsiasi stazione verso qualsiasi altra. In un ring ogni bit circumnaviga l'anello; anche qui è necessario un meccanismo di arbitraggio. Un importante pregio di questa topologia è che apre ottime prospettive per l'utilizzo della **fibra ottica**.

Quest'ultima topologia consiste nel collegare le varie stazioni con diversi circuiti

Una topologia di questo tipo assicura buone prestazioni in quanto il traffico viene ripartito sui vari percorsi. Inoltre, essa conferisce una elevata affidabilità all'intera struttura, proprio grazie alla presenza di percorsi multipli. Allo stesso tempo, però, i costi dei collegamenti possono anche essere elevati ed inoltre la gestione della struttura è chiaramente più complessa rispetto agli altri casi esaminati.

Un **protocollo** è una serie di norme, convenzioni e tecniche per lo scambio di dati, comandi e informazioni di controllo tra due elementi. Esistono molti **livelli** di protocolli: si va dal livello più basso, che regola il modo di trasmettere i segnali sulla linea (protocollo di connessione), al livello più alto, che indica come interpretare dati e comandi a livello applicativo, passando per una serie variabile di ulteriori livelli

Una volta individuata la stazione (DTE) destinazione, bisogna stabilire quale strada usare per connetterla alla stazione (DTE) sorgente. Questa scelta compete al cosiddetto protocollo di instradamento (routing protocol) che quindi si aggiunge al protocollo di linea necessario al passaggio di dati su ciascuna linea. In altre parole, solo dopo la scelta del percorso interviene il protocollo di linea per la gestione dei singoli collegamenti. Tale protocollo viene usato tante volte quante sono le linee che costituiscono il percorso fissato.

Queste sono le principali autorità nel mondo degli standard:

- PTT (Post, Telephone and Telegraph): amministrazione statale che gestisce i servizi trasmissivi (in Italia è il Ministero delle Poste e delle Telecomunicazioni);
- CCITT (Consultative Committee for International Telegraph and Telephone): organismo internazionale che emette le specifiche tecniche che devono essere adottate dalle PTT. E' entrato da poco a far parte dell'ITU (International Telecommunication Union);
- ISO (International Standard Organization): il principale ente di standardizzazione internazionale, che si occupa fra l'altro anche di reti;
- ANSI (American National Standards Institution): rappresentante USA nell' ISO;
- UNINFO: rappresentante italiano, per le reti, nell'ISO;
- IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers): organizzazione professionale mondiale degli ingegneri elettrici ed elettronici; ha gruppi di standardizzazione sulle reti;
- IRTF (Internet Research Task Force): comitato rivolto agli aspetti di ricerca a lungo termine in merito alla rete Internet;
- IETF (Internet Engineering Task Force): comitato rivolto agli aspetti di ingegnerizzazione a breve termine della rete Internet;
- IAF (Internet Architecture Board): comitato che prende le decisioni finali su nuovi standard da adottare per Internet, di solito proposti da IETF o IRTF.

Le reti locali (**Local Area Network, LAN**), in genere: sono possedute da una organizzazione (reti private); hanno un'estensione che arriva fino a qualche km; si distendono nell'ambito di un singolo edificio o campus; sono usatissime per connettere PC o workstation

Le velocità trasmissive sono comprese nell'intervallo 10 Mb/s e 10 Gb/s. Il mercato delle medie prestazioni è ormai dominato da IEEE 802.3 (evoluzione di Ethernet), mentre quello delle alte prestazioni è in grande fermento per i molti contendenti: RPR, Carrier Ethernet a 10 Gb/s e SDH/SONET. Tutte queste reti adottano come mezzo trasmissivo preferenziale il doppino di rame e la fibra ottica per le dorsali.

Le **reti geografiche** (Wide Area Network, **WAN**) si estendono a livello di una nazione, di un continente o dell'intero pianeta.

- collegano diversi sistemi elaborativi, spesso distanti centinaia o anche migliaia di chilometri (per cui si parla di reti geografiche);
- spesso il numero di terminali collegati è molto elevato (dell'ordine delle migliaia);
- hanno spesso una struttura a maglia ed una configurazione dei collegamenti a volte complessa;
- le linee vengono affittate dal gestore pubblico, per cui si tende ad ottimizzarne lo sfruttamento; in questi casi, la struttura a maglia serve a garantire strade alternative nel caso di indisponibilità di qualche componente o per ripartire il traffico su più percorsi;
- A scopo di interoperabilità sono basate su tecnologie di comunicazione standardizzate dal CCITT

A metà tra le LAN e le WAN si collocano le **reti metropolitane** (Metropolitan Area Network, **MAN**), che hanno un'estensione tipicamente urbana (quindi anche molto superiore a quella di una LAN); sono generalmente pubbliche.

Le prestazioni classiche raggiunte sono comprese tra i 2 Mb/s e i 10 Gb/s. Fino a qualche anno fa erano basate essenzialmente sulle tecnologie delle reti geografiche, utilizzate però su scala urbana. Recentemente, si è affermata la tecnologia Ethernet su scala metropolitana (carrier ethernet), che è effettivamente utilizzato in varie realizzazioni fino a 10 Gb/s.

Una caratteristica comune di WAN e LAN riguarda il modo con cui può avvenire la comunicazione tra due DTE della rete. Ci sono infatti due modi:

- Connection oriented mode (orientato alla connessione)
- Connectionless mode (non orientato alla connessione)

La prima modalità è tipica della commutazione di circuito, la seconda di quella di pacchetto

Nel **connection oriented mode** (orientato alla connessione):

- i due DTE, prima di effettuare lo scambio di dati, si assicurano della presenza reciproca in linea;
- fatta questa verifica, viene instaurata la connessione (o colloquio o sessione), la quale dura per tutto il tempo necessario allo scambio dati;
- non appena tale scambio è terminato, anche la connessione viene abbandonata.

La connessione è continuamente gestita dal software dei due DTE, il quale svolge diverse funzioni:

- gestione del ritmo di interscambio (quindi della velocità di trasmissione),
- controllo delle regole dello scambio,
- capacità di interrompere la controparte (per inviare un messaggio urgente),
- controllo degli errori ed eventuale loro correzione.

Tutti questi controlli assumono importanza critica nelle WAN, data la bassa affidabilità delle linee.

Nel **connectionless mode** (senza connessione) un DTE può inviare un messaggio all'altro DTE anche se questo non è presente in linea; è come affidare le lettere alla posta, sperando che vengano consegnate. Il vantaggio è che non sono necessari servizi di controllo o di supporto, il che può essere vantaggioso per le LAN, mentre non è molto opportuno per le WAN, per i citati problemi di scarsa affidabilità.

Il problema principale del connectionless mode riguarda il controllo degli errori che, sia pure raramente, possono verificarsi: infatti, non essendoci controlli immediati durante la trasmissione, il DTE sorgente non può sapere come è andata la trasmissione. D'altra parte, l'onere dei controlli ripetitivi spesso diventa inutile sulle reti ad alta affidabilità, dove gli errori sono decisamente pochi. La soluzione cui si può pensare è allora quella di affidare il controllo degli errori direttamente alle applicazioni, il che alleggerisce i protocolli di linea, che possono occuparsi solo del trasporto dei dati, nonché anche i nodi intermedi, che devono occuparsi solo di instradare i dati sui percorsi desiderati. Quest'ultimo concetto è di importanza cruciale.

Due DTE della rete comunicano tramite due nodi intermedi, ad es. DSE1 e DSE2. Se affidiamo il controllo degli errori ai protocolli di linea, ciascun DSE, ricevendo un pacchetto di dati, ne controlla sempre la correttezza: se non ci sono errori, il pacchetto viene instradato, altrimenti viene inviato al mittente un messaggio che richiede la ritrasmissione. Se il collegamento è ad alta velocità, il DSE non può concedersi il lusso di effettuare questi controlli; l'unica sua funzione deve essere quella di prendere i dati in arrivo ed instradarli senza operazioni intermedie di eccessiva complessità. Da qui l'opportunità di demandare alle applicazioni il controllo degli errori, lasciando ai DSE solo compiti marginali, eseguibili mediante circuiti dedicati molto veloci. Questi problemi rientrano nel vasto campo di problemi di **controllo di congestione del flusso** di una rete di telecomunicazioni. Controllare la velocità del trasmittente rispetto al destinatario

Una **internetwork** è formata quando reti diverse (sia LAN che MAN o WAN) sono collegate fra loro. A prima vista, almeno in alcuni casi, la cosa è apparentemente uguale alla definizione di WAN vista precedentemente. Alcuni problemi, però, sorgono quando si vogliono connettere fra di loro reti progettualmente diverse (spesso incompatibili fra loro). In questo caso si deve ricorrere a speciali apparecchiature, dette **gateway** (o router multiprotocollo), che, oltre ad instradare i pacchetti da una rete all'altra, effettuano le operazioni necessarie per rendere possibili tali trasferimenti

Bisogna inoltre evitare la confusione sui seguenti termini:

- sottorete** (subnet): nel contesto di una WAN è l'insieme dei DSE e delle linee di trasmissione;
- rete** (network): è l'insieme costituito da una subnet e da tutti gli host collegati;
- internetwork**: è una collezione di più network, anche non omogenee, collegate per mezzo di gateway.

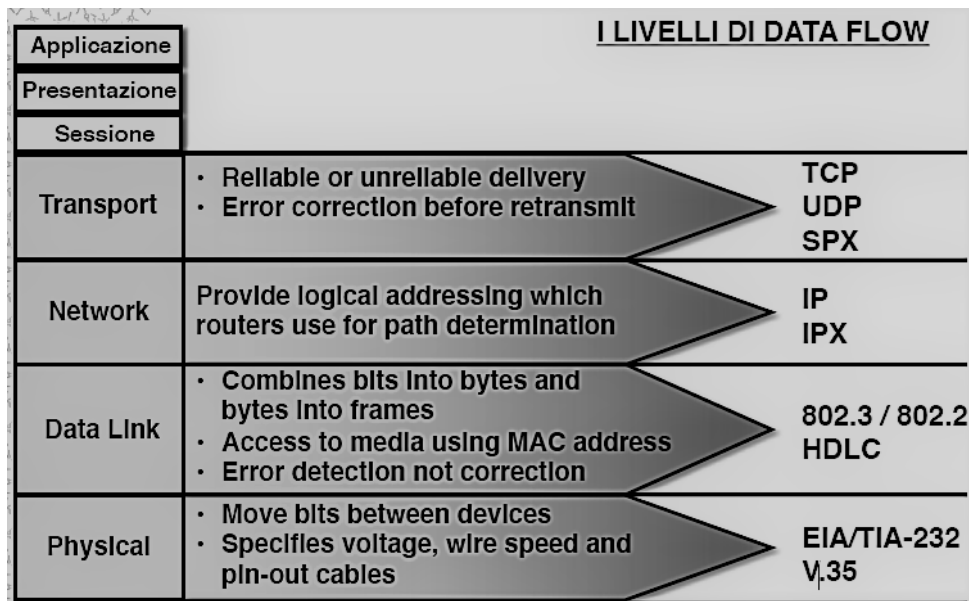
È bene sottolineare una differenza importante:

- internet** (con la i minuscola) è sinonimo di internetwork, cioè la interconnessione di più reti generiche;
- Internet** (con la I maiuscola) per riferirci alla specifica internetwork, basata su protocollo TCP/IP, che ormai tutti conoscono.

ISO – International Standard Organization

OSI – Open System Interconnection

Livello: viene introdotto un certo grado di astrazione. I livelli devono corrispondere a funzioni definite. Le funzioni devono considerare l'insieme degli standard. I confini dei livelli devono minimizzare il flusso informazioni. Il numero di livelli deve essere ottimale



Livello Fisico

Riguarda la trasmissione bit sul canale fisico di trasmissione

Coinvolge aspetti di tipo:

- elettrico (linee comunicazione, propagazione onde, ...)
- comunicazione (simplex, half-, full-duplex, ...)
- meccanico (standards connettori, ...)

Data Link Layer

Trasforma la linea fisica o "grezza" in una linea in cui gli errori di trasmissione vengano sempre segnalati.

Divide le informazioni in *pacchetti* e li trasmette attraverso il mezzo fisico, attendendo un segnale di "avvenuta ricezione" detto anche *ack*. Gestisce l'eventuale duplicazione dei frame ricevuti, causata dalla perdita dell'*ack*.

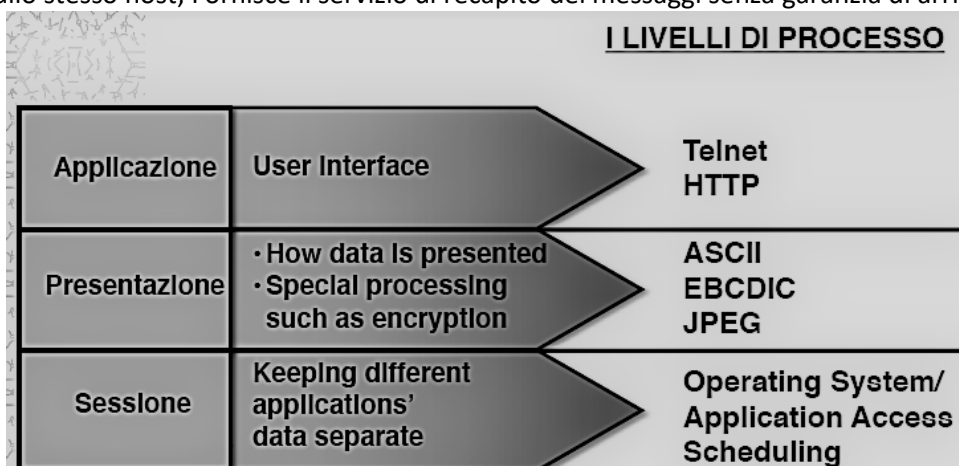
Sincronizza un mittente veloce con un ricevente lento. Gestisce l'accesso al canale di trasmissione condiviso

Network Layer

Gestisce l'indirizzamento universale dei nodi in rete; Gestisce l'instradamento dei pacchetti; Può gestire congestione e controllo di flusso; Gestisce l'accounting dei pacchetti sulle reti a pagamento; Implementa interfacce per la comunicazione tra reti di tipo diverso

Transport Layer

Assicura un servizio privo di errori end to end con l'ordine corretto di ricomposizione; Gestisce l'invio di messaggi a più applicazioni sullo stesso host; Fornisce il servizio di recapito dei messaggi senza garanzia di arrivo



Application Layer

Implementa specifici servizi applicativi che interfacciano direttamente l'utente:

- Domain Name System,
- Posta elettronica,
- Emulazione di terminale
- World Wide Web,
- File Transfer
- Multimedialità Streaming,
- File System distribuiti, ecc.

Presentation Layer

Le funzionalità di questo layer si limitano alla traduzione dei dati che viaggiano sulla rete in formati astratti. Queste informazioni vengono poi riconvertite nel formato proprietario della macchina destinataria; Può gestire operazioni di compressione o cifratura di flusso

Session Layer

Controlla il dialogo tra due macchine: la comunicazione non può essere sempre full-duplex, questo layer tiene traccia di chi è il turno attuale; Gestisce il controllo dei token; Gestisce la sincronizzazione del trasferimento dei dati; Gestisce specifiche sessioni end-to-end verso applicazioni

ARPANET (TCP/IP) e OSI

I vantaggi di TCP/IP su ISO sono fundamentalmente due, ma di importanza colossale:

1. Lo stack TCP/IP è enormemente più semplice dello stack OSI
2. Quando nacque OSI, TCP/IP era già presente nel mondo accademico

I segnali sono variazioni di grandezze fisiche che trasportano informazioni.

Le telecomunicazioni studiano la trasmissione di informazioni a distanza per mezzo di segnali che possono essere di vario tipo: **acustico, elettrico, luminoso, elettromagnetico, ecc.** I segnali elettrici trasmessi da una linea possono essere essenzialmente di due tipi:

- **ANALOGICI:** Sono analogici quei segnali che, al variare del tempo, possono assumere tutti i valori compresi fra i valori massimo e minimo consentiti dal canale di comunicazione.
- **DIGITALI:** Con il termine digitale, o numerico, si intende invece un segnale che può assumere solo due valori, o comunque soltanto un numero discreto di valori

Segnale periodico: Si ripete nel tempo

Periodo: Tempo necessario affinché il segnale si ripeta

Segnale aperiodico: Cambia senza una regolarità nel tempo

Un segnale oscillante viaggia più a lungo della corrente diretta. Dunque, nelle telecomunicazioni si utilizza un'onda sinusoidale. Ampiezza: valore assoluto dell'intensità massima

– **Periodo:** tempo necessario al segnale affinché si ripeta

– **Frequenza:** numero di ripetizioni nell'unità di tempo

Frequenza e velocità

– La frequenza è direttamente legata alla velocità di trasmissione

– Segnale di 80 Hz è "più veloce" di un segnale di 40 Hz

La frequenza è la velocità con cui un segnale cambia rispetto al tempo. Cambiamenti frequenti implicano una frequenza alta, cambiamenti lenti implicano una frequenza bassa

Lunghezza d'onda:

– Mette in relazione il periodo (o frequenza) con la velocità di propagazione c del segnale sul mezzo

– Quindi è funzione del mezzo (oltre che del segnale)

Rappresenta la distanza (lo spazio) che un ciclo del segnale occupa sul mezzo trasmissivo

Valori discreti si ottengono facendo variare, nel modo quanto più brusco possibile, il valore del segnale da un livello all'altro.

Il termine **trasmissione**, nel campo delle telecomunicazioni e dell'informatica, indica il processo e le modalità/tecniche finalizzate all'invio di informazione, tramite impulsi elettrici e **segnali** codificati, su un canale fisico di comunicazione da un mittente ad uno o più destinatari. L'aspetto di un segnale reale inviato si discosta parzialmente da quello ideale. Quando si invia un segnale, ad esempio elettrico, lungo un canale di comunicazione, esso viene ricevuto diverso dalla sua configurazione di partenza, infatti l'energia elettrica tende a dissiparsi con la distanza. Ciò può comportare un'interpretazione sbagliata o una perdita del segnale. I principali fenomeni che caratterizzano il deterioramento del segnale in trasmissione sono:

• Attenuazione

• Distorsione

– Cambiamento della forma del segnale

– Differente velocità di propagazione delle singole onde sinusoidali

All'inizio del XIX secolo Jean-Baptiste Fourier ha dimostrato che: una funzione periodica $y(t)$ è sviluppabile in una serie costituita da un termine costante **A0** e da una somma di infinite sinusoidi. Dunque, un segnale variabile nel tempo è di fatto equivalente ad una somma di funzioni sinusoidali aventi ciascuna una propria ampiezza e frequenza. Si può quindi rappresentare un segnale $g(t)$ di durata T in un modo diverso, e cioè attraverso il suo spettro di frequenze, ossia attraverso la sua scomposizione in sinusoidi. Qualunque segnale è dunque caratterizzato da un

intervallo di frequenze nel quale sono comprese le frequenze delle sinusoidi che lo descrivono. Esso va sotto il nome di banda di frequenza (**frequency band**) del segnale.

Un segnale numerico di periodo **T** può essere sviluppato in serie di **Fourier** in una somma di infinite sinusoidi di ampiezza variabile.

Lo studio dello sviluppo in serie e dell'integrale di **FOURIER**, però, ci dice che lo spettro di un segnale **ALEATORIO**, costituito da impulsi discreti rettangolari, comprende la componente continua e larghezza di banda teoricamente infinita

Un segnale numerico aleatorio si sviluppa secondo uno **spettro** a bande

Le componenti di Fourier del segnale o armoniche vengono attenuate in maniera differente dal mezzo trasmissivo. I mezzi fisici sono caratterizzati da una **banda passante**: l'intervallo di frequenze che il mezzo fisico è in grado di trasmettere senza alterarle oltre certi limiti.

Ogni canale trasmissivo di consente di norma il passaggio solo di alcune componenti in frequenza del segnale ed escludendone altre; Si comporta di fatto come un filtro passa-banda; È definita pertanto larghezza di banda **B** l'insieme delle frequenze che un canale di telecomunicazioni fa passare.

Perché un segnale sia ricevuto come è stato trasmesso, è necessario che la banda passante sia uguale o più ampia della banda di frequenza del segnale stesso. Altrimenti, il segnale viene privato di alcune delle sue armoniche, e viene quindi distorto, cioè alterato. Se un numero sufficiente di armoniche arriva a destinazione, il segnale è comunque utilizzabile.

Alcuni segnali sono intrinsecamente discreti, ad esempio le quotazioni di borsa, definite ad intervalli di tempo regolari, oppure i numeri derivanti dalle estrazioni del lotto, oppure le misure di temperatura fatte ad intervalli di tempo discreti. Sono anche discreti i segnali ottenuti dal campionamento nel tempo di segnali continui, ad esempio, riferendoci al caso dei segnali acustici. In tal caso il segnale discreto si può ottenere dai campioni del segnale continuo prelevati ad intervallo di tempo costante (campionamento uniforme). Un segnale, sia a tempo discreto che a tempo continuo è un numero reale, quindi definito con continuità, eventualmente in un determinato intervallo di valori. Se però questi segnali vanno immagazzinati in un computer o elaborati con apparecchiature digitali allora essi vanno discretizzati (quantizzazione). Questa volta è discreto il valore che i segnali possono assumere.

Per convertire un segnale continuo nel tempo in un segnale discreto, ne valutiamo l'ampiezza a intervalli di tempo regolari o **campioni**

IL teorema del campionamento (o teorema di Nyquist) afferma che: **dato un segnale $x(t)$ a banda limitata B , si può ricostruire completamente il segnale a partire da un campionamento del segnale se la frequenza di campionamento è $F \geq 2B$**

Con l'ausilio di questa relazione riuscì a stabilire che considerando di usare un numero **V** di livelli trasmissivi equiprobabili, dato che la quantità di informazione associata è esprimibile come **$Q = \log_2 V$** , allora la massima quantità di informazione trasmessa in un canale non rumoroso, dato un segnale costituito da **V** livelli, è di **$2BQ$** . Il teorema del campionamento è sostanzialmente la stessa cosa della legge sulla massima capacità di un canale privo di rumore:

- se il livello del segnale trasmesso rappresenta una sequenza di simboli, la massima capacità di trasferimento la otteniamo quando ogni campione identifica un simbolo
- ne segue che al massimo siamo in grado di identificare $2B$ simboli

Usando un codice in cui si trasmettono quattro livelli diversi di tensione invece di due, per ogni livello in arrivo l'informazione sarà di due bit e non di uno solo e poiché il tempo di arrivo di un livello di tensione è sempre lo stesso, perché determinato dallo stesso criterio di **NYQUIST**, otterremo che, mentre la velocità di modulazione rimane la stessa, la velocità di trasmissione invece raddoppia.

Aumentando il numero dei livelli di tensione, è possibile aumentare la quantità di informazione che va a destinazione nello stesso tempo. Ma aumentare il numero dei livelli, a parità di tensione massima, comporta che il singolo livello diventa sempre più piccolo, finché in ricezione non sia più distinguibile dal rumore, sempre presente. Esiste comunque un limite massimo all'aumento dei livelli definito, analiticamente da una formula determinata da **C. SHANNON**

Il rumore è una forma di energia indesiderata che si somma al segnale utile degradandone il contenuto informativo, ed impedendo così di rilevare, in ricezione, tutto l'insieme delle informazioni trasmesse.

Esistono vari tipi di rumore che interessano il campo dell'Elettronica e delle Telecomunicazioni e che si schematizzano come segue:

- **Rumore bianco** - Forma di rumore il cui spettro comprende energia a tutte le frequenze dello spettro elettromagnetico ed equamente distribuita.
- **Rumore di intermodulazione** - Rumore prodotto dalla non linearità dei dispositivi elettronici e che consiste nella presenza, nel segnale in uscita dal dispositivo, di armoniche indesiderate non presenti nel segnale in ingresso.
- **Rumore di modo comune o di modo normale** - Rumore presente in ingresso ad uno strumento di misura insieme al segnale da misurare e non separabile da questo.
- **Rumore di quantizzazione** - Perdita di informazione che ha luogo durante la trasformazione di un segnale analogico in digitale, ad esempio nel **P.C.M.**
- **Rumore termico** - Rumore dovuto all'agitazione termica degli elettroni presenti in una resistenza. È funzione della temperatura ma è anche un rumore bianco.

Larghezza di banda in hertz

- Si riferisce alla larghezza di banda delle frequenze utilizzate per la trasmissione

Larghezza di banda in bps

- Velocità alla quale possiamo spedire bit

Ovviamente sono direttamente collegate

- La relazione dipende dal tipo di trasmissione

Throughput

Misura quanto velocemente possiamo spedire i dati su una rete

Diverso dalla larghezza di banda perché il throughput è una misura effettiva

Latenza (ritardo)

Misura quanto tempo occorre a trasferire un intero messaggio

- Tempo misurato dal primo bit spedito all'ultimo bit arrivato

- Tempo di trasmissione
 - Tempo per immettere i dati sul mezzo
- Tempo di propagazione
 - Tempo necessario al segnale per propagarsi sul mezzo trasmissivo
- Tempo di attesa ed inoltro
 - Attesa nei nodi intermedi
 - Tempo necessario al nodo intermedio per smistare il messaggio

La trasmissione dei segnali è detta **analogica** se il segnale viene trasmesso senza curarsi del suo significato

- in questo caso la trasmissione si limita a recapitare il segnale, eventualmente amplificandolo in intensità quando necessario

La trasmissione digitale tiene conto del contenuto dei dati se si deve intervenire per amplificare il segnale

- il segnale non viene semplicemente amplificato, ma viene interpretato, si estrae il contenuto informativo e si rigenera il segnale tramite apparati detti ripetitori

– questo può essere fatto a prescindere dal tipo di segnale (numerico o analogico), che a sua volta può rappresentare dati analogici o numerici

vantaggi della trasmissione digitale:

- immunità maggiore alla alterazione dei dati verso lunghe distanze
- omogeneizzazione della trasmissione per diverse tipologie di dato
- sicurezza e riservatezza

svantaggi della trasmissione digitale

- costi superiori
- maggiore complessità dell'elettronica
- richiede rinnovo di infrastrutture già esistenti

Una volta generato il segnale da trasmettere, questo può essere immesso direttamente sul canale; in questo caso si parla di trasmissione in banda base: il segnale che trasporta le informazioni ed il segnale sulla linea sono identici. Vi sono diverse circostanze che rendono opportuno trasmettere il segnale in modo che occupi una banda differente di frequenze; questo tipo di trasmissione si realizza tramite un processo di modulazione

La rappresentazione di dati numerici con segnali numerici è normalmente fatta tramite sequenze di impulsi discreti di tensione di una certa durata temporale.

Il dato binario è codificato in modo da far corrispondere al valore di un bit un determinato livello del segnale

Il ricevitore deve sapere quando inizia e finisce il bit, leggere il valore del segnale al momento giusto, determinare il valore del bit in base alla codifica utilizzata

La migliore valutazione si ottiene campionando il segnale al tempo corrispondente a metà bit

Sono possibili diverse scelte di codifica, con caratteristiche differenti che possono migliorare le prestazioni della trasmissione

Le caratteristiche determinanti sono:

– spettro del segnale:

- componenti ad alta frequenza richiedono una banda maggiore
- l'assenza di componente continua è preferibile
- spettro concentrato nel centro della banda

– **sincronizzazione temporale**: il ricevitore deve essere sincronizzato con il trasmettitore per identificare i bit; alcune codifiche facilitano questa funzione

– **rilevazione di errore**: funzione caratteristica dei livelli superiori, ma può essere utile anche a livello fisico

– solidità del segnale rispetto ad interferenza o rumore

– costo e complessità di realizzazione

La codifica unipolare RZ (Return to Zero) prevede la trasmissione di un segnale di lunghezza T per ogni bit. Il segnale è nullo in corrispondenza del bit 0, mentre è un impulso di tensione di durata $T/2$ per il bit 1

• La codifica unipolare NRZ (Non Return to Zero) differisce dalla RZ perché il livello di tensione per il bit 1 rimane alto per tutta la durata del bit

La codifica NRZ ha i pregi:

– facile da progettare e realizzare

– utilizzo efficiente della larghezza di banda (la potenza è concentrata tra 0 ed $R/2$, dove R è la capacità trasmissiva in bit/s (transmission rate))

• Difetti:

– esiste una componente continua

– lunghe sequenze di bit di uguale valore producono un segnale continuo senza transizioni: il ricevitore può perdere la sincronia

La codifica AMI ha i seguenti vantaggi rispetto alla NRZ:

– risolve il problema della sequenza di bit 1, che presentano sempre una transizione utilizzabile in ricezione per sincronizzare (ma resta il problema per sequenze di 0)

– La componente continua è di fatto azzerata

– utilizza a parità di transmission rate una larghezza di banda inferiore

– errori isolati possono essere evidenziati come violazione del codice

Vi sono anche svantaggi:

– utilizza 3 livelli, quindi ogni simbolo potrebbe trasportare più informazione

– a parità di bit rate richiede circa 3 dB in più rispetto alla NRZ

Utilizzata in diversi casi su linee punto-punto (ISDN)

La codifica Manchester utilizza due livelli di tensione; il bit 1 è rappresentato da un segnale $-V$ per mezzo periodo, $+V$ per il seguente mezzo periodo; il bit 0 è rappresentato in modo opposto ($+V$ per il primo mezzo periodo, $-V$ per il restante mezzo periodo)

La codifica Manchester differenziale utilizza lo stesso tipo di rappresentazione, ma rappresenta il bit 1 come variazione rispetto alla codifica del bit precedente

Vantaggi:

– sincronizzazione: ogni bit ha una transizione in mezzo, che può essere utilizzata per la sincronizzazione dal ricevitore

– totale assenza di componente continua

– rivelazione di errore (in assenza della transizione prevista)

• Svantaggi:

– richiede un segnale a frequenza doppia rispetto al bit rate: 1 bit richiede 2 baud, quindi richiede una banda doppia

L'utilizzo più diffuso della codifica Manchester è negli standard 802.3 (ethernet) e 802.5 (token ring) sia su coassiale che su doppino

Una modifica della AMI per risolvere il problema della sequenza di zeri è la B8ZS (Bipolar with 8 Zeros Substitution). Stessa logica per la HDB3 (High Density Bipolar 3 zeros)

Le due codifiche hanno sempre componente continua nulla (le violazioni sono alternate)

Hanno un efficiente utilizzo della banda, con la potenza concentrata a metà della banda, come con AMI, è possibile riconoscere gli errori singoli; Generalmente utilizzate nella trasmissione dati ad elevata distanza

La modulazione è un processo con il quale il segnale da trasmettere (segnale modulante) viene utilizzato per modificare nel tempo le caratteristiche di un segnale ausiliario sinusoidale (portante)

Questa operazione ha la caratteristica di generare un segnale che ha una occupazione di banda dell'ordine di grandezza di quella del segnale modulante, centrata però intorno alla frequenza del segnale portante

Utilizzando una portante ad alta frequenza si può quindi spostare la banda necessaria alla trasmissione delle informazioni in un intervallo più opportuno per la trasmissione stessa

Spesso per la trasmissione sono preferibili determinati intervalli di frequenza

– ad esempio, la trasmissione via ponte radio (a vista) richiede una antenna; la dimensione della antenna deve essere dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda; per trasmissioni a 1 KHz $\lambda = 300$ Km, per trasmissioni a 1 GHz $\lambda = 30$ cm

– per trasmettere i segnali radio si può sfruttare la riflessione multipla dalla ionosfera, che riflette bene frequenze di 5-30 MHz

Un altro vantaggio è legato alla possibilità di trasmettere più comunicazioni differenti e contemporanee sullo stesso mezzo, trasferendo le bande relative alle diverse comunicazioni in zone differenti della banda utile per la trasmissione (multiplexing a divisione di frequenza)

Il segnale modulante viene utilizzato per modulare le caratteristiche della portante:

– ampiezza: il segnale viene utilizzato per modificare il valore della ampiezza della portante (modulazione di ampiezza)

– frequenza: il segnale modulante modifica istante per istante la frequenza della portante (modulazione di frequenza)

– fase: il segnale modulante cambia la fase della portante (modulazione di fase)

Partendo da un segnale numerico (ad esempio un segnale NRZ) si può modulare in ampiezza una portante sinusoidale moltiplicando la sua ampiezza per il segnale numerico (ASK: Amplitude Shift Keying)

Il segnale numerico può essere utilizzato per modulare in frequenza una portante sinusoidale, modificando la sua frequenza in funzione del segnale modulante (FSK: Frequency Shift Keying), cioè facendo corrispondere due frequenze ai due valori del bit. Requisito importante nella FSK è la continuità di fase negli istanti di transizione da una frequenza all'altra.

Il segnale numerico può modulare in fase una portante sinusoidale associando un certo valore di fase ad un certo valore di bit (PSK: Phase Shift Keying). Nell'esempio in figura al bit 1 si associa un cambio di fase, al bit 0 nessun cambio di fase. La variazione sistematica è realizzata sulla fase del segnale

Nella modulazione PSK bifase (BPSK) vista prima si ha una sola portante e quindi i due valori numerici uno e zero sono fatti corrispondere a due fasi diverse della stessa frequenza: 0° e 180° .

Possiamo fare certamente meglio utilizzando modulazioni polifase:

- Si ottiene una migliore efficienza del canale modulando in modo che ogni simbolo trasporti più bit
- La modulazione polifase si realizza effettuando una codifica preliminare dei bit provenienti dal terminale, raggruppandoli in parole di n bit e facendo corrispondere a ciascuna delle 2^n parole possibili una determinata fase della frequenza portante.

Nella modulazione QPSK (Quadrature PSK) si utilizzano quattro angoli di fase per trasmettere due bit per simbolo;

Per aumentare la velocità di trasmissione, mantenendo costante la velocità di modulazione, invece di trasmettere solo due valori angolari, 0° e 180° , si trasmette un maggior numero di angoli diversi fra loro, e per consentire una più facile demodulazione in ricezione, si fa variare anche l'ampiezza del segnale modulato dando luogo così alla modulazione QAM.

Le più moderne modulazioni numeriche, quelle quindi che determinano grandi velocità di trasmissione, sono quindi modulazioni di fase e di ampiezza. Quindi la codifica dei bit non viene solo affidata alla variazione di **fase**, ma anche a quella di **ampiezza**

Multiplexing: Permette di spedire insieme dati di varie comunicazioni, su un solo canale

A divisione di tempo (TDM)

- modalità deterministica (banda dedicata e ritardo fisso)
- modalità statistica (banda e delay variabili e migliore sfruttamento del mezzo)

• A divisione di spazio (SDM)

- Dati inviati su media fisicamente separati

• A divisione di frequenza (FDM e WDM)

- Usa differenti frequenze o lunghezze d'onda per differenziare i dati trasmessi

• Per codifica (CDM)

- La differenziazione dei dati trasportati è ottenuta utilizzando diversi tipi di codifica

SDM: Una connessione fisica per trasmissione

TDM: La stessa connessione utilizzata per 4 trasmissioni distinte

- Richiede taratura dei flussi e uso di Multiplexer e demultiplexer
- Meno efficiente ma ottimizza l'uso dei mezzi trasmissivi

Il multiplexing a divisione di tempo è utilizzato quando si dispone di un canale digitale capace di un elevato tasso di trasmissione dati in cui poter trasmettere contemporaneamente un insieme di comunicazioni a tasso inferiore. Si mischiano i dati delle diverse comunicazioni, inframezzando i bit delle diverse trasmissioni. Di fatto si divide la disponibilità del canale in periodi temporali, e si dedicano a turno i diversi periodi a diversi flussi trasmissivi. Ogni canale logico occupa tutto il mezzo per un certo intervallo di tempo

Ogni intervallo temporale si chiama slot e può contenere uno o più bit relativi ad un flusso indipendente

Il flusso dei dati è organizzato in trame (frame)

Una trama è l'insieme di slot temporali che contiene almeno un bit per ciascuna trasmissione

Anche in questo caso il flusso relativo ad una singola trasmissione è detto canale

Esistono essenzialmente due metodi di **multiplazione**

- **Deterministico:** ogni canale di comunicazione è identificato dalla sua posizione in termini di slot temporali all'interno della trama. Questa correlazione fissa fra il canale di comunicazione e il relativo timeslot è il principale svantaggio del TDM deterministico: se il canale non è usato comunque occupa il timeslot inviando un pattern idle
- **Statistico:** non esiste correlazione fra canale di comunicazione e relativo timeslot. La capacità del mezzo è distribuita statisticamente fra gli utenti che ne concorrono all'uso. È necessario uno schema separato di taratura e indirizzamento per garantire le associazioni dinamiche: se un canale non è usato gli altri canali possono disporre della sua capacità trasmissiva.

TDM deterministico

Le trame hanno la stessa taglia - Ordinamento garantito

- Non sono necessari schemi di indirizzamento né di bufferizzazione
- Richiede Sincronismo
- Cattiva utilizzazione del mezzo trasmissivo

TDM statistico – Multiplazione Statistica

- Trame di taglia differente
- Necessita di uno schema di indirizzamento e di bufferizzazione
- Dipendente dal protocollo
- Ottimo utilizzo del mezzo trasmissivo

Frequency Division Multiplexing

- Usa la trasmissione in banda passante, dividendo lo spettro in bande di frequenza separate, una per canale
- Nessuna coppia di canali può condividere la stessa porzione di spettro

Tipicamente, per ovviare a fenomeni di interferenza si tende a dislocare i range di frequenze assegnati ai diversi canali in modo da riservare uno spazio (bande di separazione o di guardia) fra gli stessi

Nella trasmissione parallela di dati, la banda di frequenza disponibile è generalmente suddivisa in molti canali. Allo scopo di eliminare l'interferenza intercanale, gli spettri dei sotto canali non devono sovrapporsi: questo però non consente un utilizzo efficiente della banda disponibile. La sovrapposizione spettrale può essere permessa a patto di sfruttare relazioni di ortogonalità tra i canali. Nella modulazione multi-portante (MCM) il flusso di dati è diviso in più sotto flussi (substream), ognuno dei quali ha un bit rate molto più basso e ogni substream è usato per modulare una diversa portante (carrier). Utilizzando portanti ortogonali (OFDM) non si ha l'interferenza intercanale.

Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Nelle tecniche di modulazione multiportante:

la trasmissione delle informazioni non avviene più attraverso un unico flusso supportato da una sola portante, bensì suddividendo il flusso dati ad elevato rate in appositi sotto flussi tutti paralleli tra loro (in numero pari a M), detti anche sotto canali, ciascuno dei quali con una propria specifica sotto portante.

La velocità di trasmissione dei dati di un singolo sotto canale risulta inferiore, rispetto al caso mono portante, e la banda necessaria è minore rispetto alla banda di coerenza del canale.

- modulazione a multi-portante, che utilizza un numero elevato di sotto portanti tra loro ortogonali.
- Ciascuna portante è modulata con una modulazione di tipo convenzionale (ad esempio, una QAM) con un basso symbol rate.
- Gli algoritmi OFDM sono generati usando la trasformata di Fourier veloce.
- E' possibile trasmettere su più canali in parallelo usando sotto portanti ortogonali caratterizzate da una rate inferiore
- Si sovrappongono multiple frequenze nello stesso range
- Il Massimo di una sotto portante ha luogo a una frequenza dove tutte le altre sotto portanti assumono un valore nullo

Code Division Multiplexing

La moltiplicazione è realizzata moltiplicando in trasmissione l'informazione binaria generata da una sorgente per un'opportuna parola di codice detta chip. La sequenza in uscita dal moltiplicatore sarà successivamente modulata e infine trasmessa sul canale. In ricezione il segnale ricevuto dal ricevitore sarà costituito dalla somma vettoriale (comprensiva di modulo e fase) di tutti i segnali trasmessi dalle singole sorgenti di informazione, con in più un eventuale termine dovuto al rumore termico. Se i chip delle sorgenti sono ortogonali tra loro, l'estrazione dell'informazione associata a ciascuna sorgente potrà essere fatta in maniera complementare alla trasmissione moltiplicando il segnale ricevuto con il particolare codice associato alla sorgente che si vuole estrarre e integrando successivamente il segnale ottenuto in un intervallo di tempo pari alla durata del bit di informazione.

Ciò permette di ottenere un segnale che è dato dalla somma di un segnale di ampiezza dominante, (o utile, associato alla sorgente da estrarre), e di un segnale di ampiezza minore, costituito da una combinazione fra rumore termico e quelli associati alle altre sorgenti

Il codificatore CDM è costituito principalmente da due parti, la prima che divide la sequenza di bit generata da un codificatore (opzionale) in k repliche, e la seconda parte che moltiplica ogni replica generata per un termine $d[k]$, chiamato CHIPPING CODE di lunghezza k .

Ogni bit del chipping code (ad es +1 o -1) viene moltiplicato con le repliche della sequenza iniziale in modo da generare un codice in base alla sequenza di partenza. In ricezione, quindi, il segnale potrà essere decodificato soltanto da chi avrà il codice di canalizzazione esatto.

Mezzo trasmissivo

- qualsiasi elemento capace di trasportare informazione da una sorgente ad una destinazione
- Informazione
 - Rappresentata dai segnali
- Mezzi trasmissivi
 - Cavi
 - Etere (trasmissione senza fili)

È possibile classificare i mezzi trasmissivi in due categorie

- **Mezzi guidati**: elettrici, ottici
- **Mezzi non guidati**: onde radio, laser via etere, suono, raggi X
- Ogni mezzo è tipicamente caratterizzato da:
 - Larghezza di banda
 - Delay
 - Costo
 - Facilità di installazione e manutenzione

I mezzi trasmissivi elettrici rappresentano ancora oggi il mezzo più diffuso, e nell'ambito delle reti locali assumono fondamentale importanza soprattutto per la realizzazione di infrastrutture per la trasmissione di segnali all'interno degli edifici. Dovendo trasportare il segnale in forma di energia elettrica, è necessario che le caratteristiche elettriche del mezzo siano tali da rendere massima la trasmissione dell'energia da un estremo all'altro e minima la dissipazione in altre forme (ad esempio calore, irradiazione elettromagnetica). Con l'attuale tecnologia è possibile realizzare mezzi trasmissivi elettrici di caratteristiche sufficientemente elevate da permettere la trasmissione dei dati a velocità superiori a 1000 Mb/s.

Un mezzo trasmissivo elettrico **ideale**, che trasporti tutta l'energia del segnale trasmesso senza attenuazione né distorsione, **non esiste**. Un mezzo trasmissivo elettrico **ottimale** è caratterizzato da bassa resistenza, bassa capacità e bassa induttanza, cioè è un mezzo poco dispersivo e poco dissipativo. In tale mezzo **quasi tutta la potenza** inviata sul canale dal trasmettitore **arriva al ricevitore** ed il segnale non viene distorto.

"**foglio**" (*foil*): si tratta di un foglio di alluminio molto sottile (da 0.05 mm a 0.2 mm) che avvolge il cavo immediatamente sotto alla guaina di protezione esterna.

- Poiché l'alluminio presenta elevata resistenza elettrica rispetto al rame, e, a spessori così ridotti, una notevole fragilità, lungo il foglio scorre un filo di rame nudo, detto *drain*, che garantisce continuità elettrica anche in caso di eventuali crepe; tale filo è utilizzato per il collegamento di terra;

- "**calza**" (*braid*): treccia di fili di rame che avvolgono il cavo in due direzioni opposte.

- Presenta una conducibilità molto migliore del foglio di alluminio, ma la copertura non è completa, in quanto in corrispondenza degli intrecci rimangono inevitabilmente dei fori nello schermo.

Il **doppino** è il mezzo trasmissivo classico della telefonia e consiste in due fili di rame ricoperti da una guaina isolante e ritorti (o "binati" o "twisted") detti comunemente "coppia".

I doppini sono nati come mezzo trasmissivo a banda molto ridotta (la banda fonica usata nella telefonia è inferiore a 4 KHz), ma negli ultimi anni hanno raggiunto prestazioni una volta raggiungibili soltanto con i cavi coassiali. I miglioramenti sono stati ottenuti realizzando nuovi materiali isolanti, curando la geometria delle coppie (anche tramite l'adozione di particolari guaine esterne), mettendo a punto sofisticati algoritmi di differenziazione dei passi di binatura e aumentando la sezione dei conduttori. Attualmente i doppini possono competere nelle medie velocità (10 - 1000 Mb/s) e sulle brevi distanze (inferiori a 100 m) con le fibre ottiche.

La binatura serve a ridurre i disturbi elettromagnetici. Infatti, se i passi di binatura fossero uguali, ogni conduttore di una coppia si troverebbe sistematicamente affiancato, ad ogni spira, con uno dei due conduttori dell'altra coppia, e quindi verrebbe a cadere l'ipotesi di perfetta simmetria della trasmissione bilanciata. I campi elettromagnetici generati dalle due coppie interferirebbero reciprocamente con un considerevole peggioramento della **diafonia**. La diafonia è un fenomeno di accoppiamento elettrico tra mezzi trasmissivi vicini non isolati adeguatamente. Il segnale trasmesso su un cavo genera per induttanza un segnale corrispondente nel cavo vicino, che si sovrappone al segnale trasmesso in quest'ultimo. Si può verificare anche nella trasmissione con mezzi non guidati, quando un segnale emesso da una antenna si disperde durante la propagazione nell'aria; la parte dispersa può giungere in prossimità di un'altra antenna.

Le caratteristiche che hanno tuttavia inciso maggiormente sulla diffusione del doppino sono:

- la compatibilità con la telefonia
- la facilità di posa in opera
 - la connettorizzazione a perforazione di isolante è semplice, veloce ed economica, anche se alle alte velocità rappresenta un elemento critico, in quanto è il punto in cui le coppie devono essere per forza sbinare

I doppini di uso più comune prevedono la coesistenza nello stesso cavo di **multiple coppie** di conduttori binati, tipicamente **4 coppie**.

- Esistono varie versioni di doppino:

- **STP** (*Shielded Twisted Pair*), versione con uno schermo per ogni coppia più uno schermo globale;
- **FTP** (*Foiled Twisted Pair*), versione con un unico schermo (normalmente in foglio di alluminio) per tutto il cavo;
- **UTP** (*Unshielded Twisted Pair*) versione non schermata.

I parametri elettrici operativi di qualsiasi cavo variano con il variare della frequenza di trasmissione. Occorre chiedersi, per una data applicazione, a quale frequenza sia opportuno operare per decidere se un cavo sia adeguato all'applicazione stessa. È stata creata una classificazione che prevede sette *categorie*, in base alle applicazioni per le quali i cavi sono idonei.

- La categoria 1 è quella dei cavi peggiori, la 7 quella dei migliori.

- Ogni categoria è idonea a fornire tutti i servizi offerti da quelle inferiori.

- La **categoria 1** (*Telecommunication*) comprende i cavi adatti unicamente a telefonia analogica.

- La **categoria 2** (*Low Speed Data*) comprende i cavi per telefonia analogica e digitale (ISDN) e trasmissione dati a bassa velocità (per esempio linee seriali).

- La **categoria 3** (*High Speed Data*) è la prima categoria di cavi adatti a realizzare reti locali fino a 10 Mb/s, in particolare per soddisfare gli standard 10BaseT di 802.3 e Token-Ring a 4Mb/s.

- La **categoria 4** (*Low Loss, High Performance Data*) comprende i cavi per LAN Token-Ring fino a 16 Mb/s.

- La **categoria 5** (*Low Loss, Extended Frequency, High Performance Data*) comprende cavi per applicazioni fino a 100 Mb/s, su distanze di 100 metri.

- La **categoria 6** (*Low Loss, High Frequency, High Performance Data*) comprende i migliori cavi disponibili, per applicazioni fino a 1000 Mb/s, su distanze di 100 metri.
- La **categoria 7** (ISO/IEC 11801 Class F), nome informale. Lo standard specifica 4 STP all'interno di un unico cavo, per velocità fino a 10Gb/s

I cavi di categoria 6 rappresentano oggi lo stato dell'arte nel campo del cablaggio delle LAN. Tutti gli standard di rete a velocità di 100 Mb/s maggiori con trasmissione su due coppie prevedono l'uso di cavi di categoria 5 o superiore. Oggi sono diffusi cablaggi secondo la categoria 6, ed è stata standardizzata anche la categoria 7 per applicazioni ad altissime velocità.

Il **cavo coassiale** ha avuto per lungo tempo notevole diffusione nelle reti locali; per esempio è stato utilizzato in due diverse versioni dello standard 802.3 (Ethernet) e per il collegamento di terminali IBM.

Ora è caduto in disuso nelle LAN, eliminato dallo standard ISO/IEC 11801 per i cablaggi strutturati e sostituito dalle fibre ottiche nella fascia ad alte prestazioni e dai doppini in quella a medie prestazioni, mentre continua ad essere utilizzato nelle reti geografiche (micro-coassiale).

Cavo coassiale a banda base: Consiste in un filo di rame rigido circondato da una garza metallica che funge da schermo. L'impedenza tipica dei cavi coassiali (*coax*) è di 50Ω. La larghezza di banda dipende dalla lunghezza del cavo: per lunghezze di 1 km sono possibili velocità che variano da 1 a 2 Gbps. Si possono avere anche cavi più lunghi, ma occorre ridurre la velocità di trasmissione e frammentare ai tratti di cavo degli amplificatori di segnale.

Cavo coassiale a larga banda: Consiste in un cavo identico a quello in banda base, ma con un sistema di trasmissione diverso. Su coassiale in banda larga, la trasmissione avviene in analogico, cioè in maniera del tutto simile alla trasmissione televisiva. La larghezza di banda in questo caso è di 300 Mhz, con lunghezze anche di 100 km.

La trasmissione **power line** (o a onde convogliate) è una tecnologia per la trasmissione dati che utilizza la rete di alimentazione elettrica come mezzo trasmissivo. Si realizza sovrapponendo al trasporto di corrente elettrica, continua o alternata a bassa frequenza (50 Hz in Europa e gran parte dell'Asia e dell'Africa, 60 Hz in altre regioni del mondo), un segnale a frequenza più elevata che è modulato dall'informazione da trasmettere. La separazione dei due tipi di correnti si effettua grazie al filtraggio e separazione degli intervalli di frequenze utilizzate.

Fibre ottiche

Consistono in un cavo composto da un'anima trasparente di silicio avvolto in un rivestimento di vetro con indice di rifrazione diverso. Tutta la parte in vetro è ricoperta da una guaina di plastica nera. Le fibre sono normalmente raggruppate insieme intorno ad un filo di metallo che facilita la posa del cavo.

Dalla soluzione delle equazioni di Maxwell si ricava che l'energia si propaga nella fibra in un numero discreto di configurazioni. Queste configurazioni sono chiamate modi e ogni singolo modo ha sue caratteristiche di propagazione. La larghezza di banda in questo caso è di oltre 30.000 GHz. L'attuale limite di trasmissione è dovuto semplicemente al fatto che un sistema a fibra ottica necessita di due conversioni: la prima da elettrico a luce, e la seconda luce ad elettrico.

Si definisce **rifrazione** *“il fenomeno per cui un raggio luminoso (non perpendicolare alla superficie di contatto) passando da un mezzo trasparente ad un altro, anch'esso trasparente, di diversa densità, cambia direzione nel punto in cui attraversa la superficie di separazione dei due mezzi”*.

Secondo la legge di Snell per valori dell'angolo di incidenza superiori a un certo valore critico, si ha riflessione totale (effetto **non desiderato**). L'apertura numerica (NA) indica la quantità di luce che è possibile lanciare all'interno della fibra senza che questa venga riflessa. È quindi caratterizzata da un angolo limite che varia in funzione degli indici di rifrazione del core e del cladding. Maggiore sarà l'angolo di accettazione, più alta sarà l'apertura numerica della fibra, cioè la quantità di luce che si riesce ad introdurre

Un raggio di luce (**modo**) generato da un emettitore (diodo led, laser) si muove attraverso il core in linea retta fino a che raggiunge il bordo e quindi il cladding. In tale punto c'è un cambiamento improvviso di densità che fa cambiare l'angolo di propagazione del raggio, che procede così in avanti nel core e così via... Il tempo di propagazione varia da modo a modo con l'angolo di incidenza.

- Il modo assiale ha il ritardo minore in quanto compie il tragitto più breve
- il modo con un angolo di ingresso prossimo all'angolo di accettazione ha il ritardo maggiore in quanto compie un percorso più lungo, a causa del numero maggiore di riflessioni che subisce

Questo fenomeno provoca una distorsione (**dispersione modale**) in quanto l'energia associata ai diversi modi giunge all'uscita in tempi diversi facendo sicché la forma dell'impulso in uscita risulta allargata rispetto a quella di ingresso. All'interno di una fibra la luce può propagarsi in accordo a diversi modi (fasci di fotoni) simultanei o non simultanei in dipendenza dal tipo di fibra utilizzata:

- **Fibre ottiche multimodali:** propagazione secondo diversi modi e percorsi simultanei

- **step-index** (o a indice di variazione a gradino/scatto)
- **graded-index** (o a indice di variazione graduale)
- **Fibre ottiche mono modali:** propagazione in un unico modo
 - La fibra si comporta come una guida d'onda
 - Maggiori distanze coperte
 - Nessuna dispersione modale

Parte dell'energia luminosa che si propaga lungo la fibra viene assorbita dal materiale o si diffonde in esso, costituendo quindi una perdita ai fini del segnale trasmesso. Il rapporto tra la potenza ottica trasmessa e quella ricevuta, dopo aver percorso una lunghezza di fibra di riferimento, definisce l'attenuazione della fibra stessa, in funzione della lunghezza d'onda e del tipo di fibra

Minore è l'attenuazione maggiore la distanza utile per la trasmissione

Le fibre ottiche sono utilizzate per scopi di telecomunicazioni per distanze superiori a qualche chilometro e velocità di trasmissione superiori ai 100 Mbit/s nelle bande attorno a:

- 1300 nm (II finestra)
- 1550 nm (III finestra, minimo assoluto dell'attenuazione)

La banda trasmissiva nelle due finestre è circa 25000 GHz

Le fibre più utilizzate sono

- Fibra standard ITU-T **G.652** (ottimizzata per l'uso in II finestra)
- Fibra standard ITU-T **G.653** (Dispersion Shifted, ottimizzata per l'uso in III finestra)
- Fibra a dispersione non nulla ITU-T **G.655** (ottimizzata per DWDM in III finestra)

Nel caso di fibra G.652, i sistemi WDM Nx2.5-Gbit/s sono limitati dalla dispersione cromatica e di polarizzazione

Nel caso di fibra G.653, i sistemi WDM Nx2.5-Gbit/s sono limitati dal FWM

Wavelength Division Multiplexing

Consente di veicolare più lunghezze d'onda λ (oggi fino a 320) all'interno del medesimo portante fisico, ciascuna con capacità trasmissiva fino a 40 Gbps (OC768), dipendentemente dalla qualità della fibra e degli apparati di trasmissione. Le tecniche WDM sono più naturali nel dominio fotonico. La divisione della banda disponibile in canali è comunque necessaria in quanto il canale ottico, anche se attraversa solo punti di commutazione operanti nel dominio fotonico, è attestato nel dominio elettronico. Nel caso di puro WDM, è possibile offrire agli utenti canali trasparenti end-to-end, chiamati *lightpath*. Se le distanze coperte sono grandi, può essere necessario Rigenerare i segnali, operazione cui è sovente associata una Risincronizzazione e una Risagomatura (si parla di 3R) nel caso di segnali numerici. Possiamo avere *lightpath trasparenti* (tutto ottici) o *opachi* (che ammettono 3R, 2R, o 1R, in ottica o in elettronica).

I moltiplicatori/demoltiplicatori ottici sono componenti passivi in grado di moltiplicare/demoltiplicare i segnali colorati caratterizzati da diverse lunghezze d'onda

Possono essere realizzati con le seguenti modalità

- Filtri di Fabry Perot
- Reticoli: di Bragg, in fibra, in schiere di fibra ottica (AWG)
- Filtri acusto-ottici
- Interferometri Mach-Zehnder

Il **Transponder**: Effettua una traslazione del segnale ottico utente convertendolo in una frequenza compatibile con la griglia di funzionamento del sistema DWDM. I transponder disponibili commercialmente sono "fully tunable", ovvero i laser possono essere sintonizzati via software su qualsiasi delle 80 lunghezze d'onda disponibili nella griglia di funzionamento.

La trasmissione attraverso la fibra ottica può essere effettuata con due diverse modalità

- Con LED Light Emission Diode sulle fibre Multimodali
- Con Laser (classe 2) sulle fibre Monomodali
- Con i VCSEL, (vertical cavity - surface emitting lasers) laser a semiconduttore che, hanno un sistema ottico non particolarmente complesso che permette l'emissione del fascio laser perpendicolarmente alle superfici di crescita dei semiconduttori, con ridotta difficoltà costruttiva, dimensioni inferiori necessità di potenze di alimentazione inferiori.

Le due diverse modalità di trasmissione hanno costi molto diversi e possono essere utilizzate per applicazioni specifiche anche a seconda della finestra di utilizzo

La potenza totale emessa da un trasmettitore è distribuito su un range di lunghezze d'onda diffuse intorno al centro d'onda. Questo range e la larghezza di spettro, misurato in nanometri. La larghezza di spettro varia da stretta (alcuni nanometri) a larga (da decine a centinaia di nanometri) dipendente dal tipo di sorgente utilizzata (Laser o LED). Larghe ampiezze di spettro portano a incrementare la dispersione.

Una differenza importante nell'impiego di LED, VCSEL e LASER risiede anche nella maniera in cui queste sorgenti lanciano impulsi di luce nelle fibre. Un LED realizza una condizione di lancio detta "**Overfilled Launch**" (illumina completamente il nucleo di una fibra multimodale, con molti modi copre l'intero diametro di una MMF). I VCSEL sono più focalizzati dei LED nell'immettere potenza ottica nella fibra. Il diametro del fascio luminoso del LASER impiegato per gli apparati 1000BaseLX è ancor più ridotto.

I ricevitori: Trasformano segnale luminoso in segnale elettrico. Sono dei fotodiodi con funzionamento opposto rispetto ai LED. Sono dispositivi che hanno una finestra di ricezione ampia (lo stesso fotorelevatore è in grado di convertire segnali luminosi a diverse lunghezze d'onda).

L'aria: L'aria è un buon mezzo di trasmissione, in particolare le onde radio sono facili da generare, possono viaggiare per lunghe distanze e penetrano facilmente negli edifici. Inoltre, sono omnidirezionali, quindi il trasmettitore e il ricevitore non devono essere allineati.

Elemento irradiante o ricevente: è l'antenna vera e propria che realizza la trasduzione

Feeder di antenna: è il mezzo trasmissivo utilizzato per collegare il trasmettitore o il ricevitore con l'antenna

Dispositivi di diramazione o circolatore: è utilizzato quando si vuole impiegare l'antenna sia per trasmettere che per ricevere; consente di separare la trasmissione dalla ricezione

Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS): tecnologia di trasmissione a "frequenza diretta" a banda larga, nella quale ogni bit viene trasmesso come una sequenza ridondante di valori (chip). Indicato per la trasmissione e la ricezione di segnali deboli. Consente l'interoperabilità delle reti wireless attuali

Spettro diffuso (Spread Spectrum): Il trasmettitore opera continui "salti" di frequenza (*frequency hopping*). Origine militare, difficile da individuare e disturbare

La **radiodiffusione** viene utilizzata generalmente per la trasmissione analogica di segnali radio-televisivi in modalità broadcast. Utilizza due tecniche trasmissive differenti in funzione della regione di frequenze:

- nella regione fino al MHz (VLF, LF ed MF) il segnale si propaga seguendo la curvatura terrestre ed attraversa bene gli ostacoli: una stazione trasmittente può essere ricevuta fino a 1000 Km di distanza; oltre l'attenuazione (proporzionale all'inverso del quadrato della distanza) diviene eccessiva
- nella regione dal MHz al GHz (HF, VHF e UHF) il segnale viene assorbito dalla superficie della terra, ma viene riflesso molto bene dalla ionosfera; i segnali vengono quindi inviati verso il cielo raggiungono la stazione ricevente dopo la riflessione

La banda di frequenza delle microonde (1-40 GHz) ha la caratteristica di poter utilizzare antenne paraboliche di dimensioni maneggevoli (fino a qualche metro di diametro) per poter collimare e dare direzione all'emissione. Si può quindi realizzare una comunicazione punto-punto tra sorgente e destinazione con allineamento ottico delle antenne: la trasmissione è rettilinea, ed è indispensabile la visibilità tra le antenne delle stazioni comunicanti. Questa tecnica di trasmissione va in competizione con le linee in coassiale e via fibra ottica

- per le lunghe distanze, quando l'alternativa con mezzo guidato risulta troppo costosa o impossibile per motivi morfologici
- per le brevi distanze (ad esempio per connettere due palazzi vicini di una stessa compagnia) come alternativa alla stesura di una fibra qualora si dovesse attraversare suolo pubblico o di altra proprietà, per evitare le complicazioni connesse alle autorizzazioni

Utilizzando diverse stazioni ripetitrici si riescono a coprire distanze elevate (svariate centinaia di Km); una singola tratta può coprire in condizioni favorevoli fino a qualche centinaio di Km

Ponti radio

Data la dipendenza dell'attenuazione dalla distanza, per le tratte lunghe si utilizzano generalmente due bande di frequenza: 2-6 GHz e 10-14 GHz. Le connessioni a breve distanza possono utilizzare le frequenze più alte (fino a 40 GHz) per le quali si hanno i vantaggi:

- antenne più piccole
- fascio più collimato (quindi minore necessità di potenza)
- minori problemi di interferenza per lo scarso utilizzo di trasmissioni in quella regione di frequenza

Generalmente utilizzati per trasmissioni analogiche (fonia, televisione) o digitali (per reti private o utilizzate dalle compagnie telefoniche fornitrici di servizi). Le diverse bande di frequenza sono suddivise in canali di diversa larghezza (non uniformi nei diversi paesi), con canali tra i 7 MHz (a 2 GHz) ed i 220 MHz (a 18 GHz), e tassi trasmissivi che vanno dai 12 ai 274 Mbps (in funzione della banda disponibile e del livello di modulazione utilizzato, solitamente QAM-x)

Le **microonde** sono radioonde ad alta frequenza. Sono in grado di attraversare gli ostacoli e si propagano in tutte le direzioni ma le distanze di trasmissione sono regolamentate. Sono poco costose e non richiedono diritti di passaggio;

I raggi infrarossi sono onde di lunghezza millimetrica; sono relativamente direzionabili e non passano attraverso i solidi (questo è uno svantaggio ma anche un vantaggio perché non interferiscono con sistemi vicini). Esistono due tecnologie: a infrarossi diretti e a diffusione. Nella modalità a infrarossi diretti trasmettitore e ricevitore devono essere perfettamente allineati per potersi illuminare reciprocamente con un fascio di luce (i raggi infrarossi sono una forma di luce); la trasmissione è punto a punto. Nella modalità a diffusione la radiazione luminosa emessa da una stazione viene diffusa in tutte le direzioni e rimbalza su soffitto e pavimenti, venendo riflessa verso tutte le altre stazioni; la trasmissione è di tipo broadcast.

Utili per comunicazioni a piccola distanza (telecomandi); Più sicure delle onde radio, non richiedono licenza; Proposte per LAN interne con infrastruttura fissa (beacon); Non utilizzabili in esterno per la presenza di emissioni solari

Lightwave Transmission

Più costosa di quella a infrarossi (IR), richiede maggior potenza e disperde più calore. La luce è direzionata in un fascio molto stretto e usata a distanze maggiori degli IR. Come per gli IR, i raggi non possono attraversare gli ostacoli; se usati all'esterno bisogna ricordare che non possono attraversare pioggia o nebbia

Il satellite si comporta come una stazione ripetitrice del segnale di un ponte radio

Il segnale viene inviato dalla stazione terrestre al satellite (uplink), che lo rimanda a terra verso la stazione o le stazioni riceventi (downlink), generalmente utilizzando frequenze differenti. Un satellite opera su più bande di frequenza, con la tecnologia FDM; i singoli canali si chiamano transponder (canali tra 15 e 500 MHz di banda). Sui canali il satellite può fare TDM per gestire diverse comunicazioni. Le bande utilizzate sono quelle tra 1 e 10 GHz. Il sovraffollamento delle frequenze spinge attualmente verso l'utilizzo di bande a frequenza superiore, nonostante che i problemi di attenuazione atmosferica divengano sempre più importanti

GEO (Geostationary Earth Orbit): satelliti a 36000 Km di quota in orbita equatoriale, che appaiono in posizione fissa nel cielo

- questi satelliti sono adatti alla trasmissione dati in quanto il puntamento delle antenne sono fisse
- per motivi di interferenza i satelliti vengono distanziati di due gradi, quindi si possono avere al massimo 180 satelliti
- la trasmissione dati deve tenere conto del ritardo di propagazione del segnale, che è pari a 0.25 secondi (inefficienti i protocolli con controllo degli errori e ritrasmissione dei pacchetti)

MEO (Medium Earth Orbit): satelliti a 18000 Km di quota, con 6 ore di periodo dell'orbita

- inadatti per la trasmissione dati

LEO (Low Earth Orbit): tra 750 e 1500 Km di quota

- molto veloci nel transito, ma vicini, quindi si ha poco ritardo e si richiede poca potenza in trasmissione

Il **Data Link Layer** (anche livello di collegamento dati, o più semplicemente: livello 2) ha la funzione principale di fornire allo strato di rete servizi per il recapito di dati al nodo direttamente adiacente sulla rete. Il compito del data link layer è quindi quello di organizzare il trasferimento dei dati tra due apparati adiacenti, e di fornire una interfaccia definita per consentire allo strato di rete di accedere ai servizi offerti. Apparati adiacenti significa logicamente connessi da un "canale" che trasmette i bit da una parte e li riceve dall'altra, nell'ordine di trasmissione. Il data link layer utilizzerà i servizi dello strato fisico per il recapito dei dati al suo processo paritario sul calcolatore ricevente, ma logicamente la comunicazione avverrà direttamente con il processo di data link layer remoto come sia fatto il "canale" non è argomento che riguardi il data link layer, ma lo strato fisico: non importa se ci sia un cavo, una fibra, una sequenza di mezzi differenti con interposti ripetitori, convertitori elettrico/ottici, modem, multiplexer, antenne o altro

Per realizzare le sue funzioni il data link layer riceve i dati dallo strato di rete (pacchetti), li organizza in trame (frame) eventualmente spezzando in più frame il blocco di dati ricevuto dal livello 3, aggiunge ad ogni frame una intestazione ed una coda (header e trailer), e passa il tutto allo strato fisico per la trasmissione. In ricezione il data link layer riceve i dati dallo strato fisico, effettua i controlli necessari, elimina header e trailer, ricombina i frame e passa i dati ricevuti allo strato di rete

Normalmente la progettazione dello strato 2 fornisce allo strato di rete i servizi

- trasmissione dati senza riscontro e senza connessione
- trasmissione dati affidabile senza connessione
- trasmissione affidabile con connessione

La classe di servizio non affidabile senza connessione è adatta su linee di elevata qualità

- il controllo sugli errori e la ritrasmissione di frame errati comporta una inefficienza in termini di numero di bit trasmessi rispetto ai dati, con riduzione del tasso utile ed aumento della probabilità di errore
- il controllo può essere demandato ai livelli superiori a vantaggio della efficienza del livello di data link
- generalmente questi servizi sono utilizzati su rete locale
- servizi non affidabili sono utilizzati anche per il traffico voce e video

La classe di servizio affidabile con connessione è adatta su linee più frequentemente soggette ad errori

- demandare il controllo e la ritrasmissione ai livelli superiori (che generalmente trasmettono pacchetti costituiti da più frame) in caso di elevata probabilità di errore potrebbe causare la ritrasmissione di molti pacchetti, mentre al livello due può essere sufficiente la ritrasmissione del singolo frame
- Implementa meccanismi di riscontro per verificare la necessità di ritrasmissioni
- tipicamente utilizzata su linee a grande distanza (connessioni WAN), anche se la fibra ottica riduce notevolmente questo problema

Il data link layer deve quindi poter offrire le diverse classi di servizio, per soddisfare le diverse esigenze conseguenti alle diverse circostanze

Per poter svolgere le sue funzioni il data link layer dovrà curare i seguenti aspetti:

- la organizzazione del flusso di bit in frame, con controllo per la sincronizzazione, inserimento e rimozione di header e trailer, riordinamento dei frame in ricezione
- organizzare il trasferimento dei dati in modo da gestire eventuali errori di trasmissione, utilizzando codici di correzione degli errori o codici di identificazione degli errori e gestendo la ritrasmissione dei frame errati
- realizzare il controllo di flusso, per utilizzare in modo efficiente il canale trasmissivo impedendo al contempo ad un trasmettitore veloce di sovraccaricare un ricevitore lento

Per trasportare i bit il Data Link Layer utilizza i servizi dello strato fisico

Lo strato fisico non può garantire il trasferimento privo di errori, che dovranno essere gestiti dal DLL

Per fare ciò il DLL organizza i bit in frame, ed effettua i controlli per ogni frame

La gestione del frame deve prevedere in primo luogo la possibilità del ricevente di identificare il frame, quindi si devono adottare regole per delimitarlo e poterne identificare i limiti in ricezione

Esistono diverse tecniche

- conteggio dei caratteri
- byte di flag, e byte stuffing
- bit(s) di flag di inizio, e fine e bit stuffing

I pacchetti sono iniziati e terminati con una sequenza speciale di bit detta delimitatore o flag-byte

Per evitare che il flag byte possa trovarsi all'interno dei dati del pacchetto, possiamo fare ricorso a 2 differenti tecniche:

- **Riempimento di caratteri (Byte Stuffing)**
- **Riempimento di bit (Bit Stuffing)**

La tecnica di **byte stuffing** consiste nell'inserimento di 1 byte (ESC) addizionale ogni qual volta nei dati compare il carattere delimitatore o il carattere ESC stesso

La tecnica di **bit stuffing** consiste nell'inserire uno 0 addizionale ogni qualvolta cinque 1 consecutivi seguono uno 0 nei dati, per evitare che il destinatario interpreti una possibile sequenza di 0111110 nei dati come delimitatore.

Può capitare che una sorgente sia in grado di trasmettere ad un tasso più alto della capacità di ricevere a destinazione. Senza controllo, questo implica che la destinazione inizierebbe a scartare frame trasmessi correttamente per mancanza di risorse (tempo di processamento, buffer). Il protocollo deve poter gestire questa situazione e prevedere meccanismi per rallentare la trasmissione. Tipicamente il protocollo prevederà dei frame di controllo con cui il ricevente può inibire e riabilitare la trasmissione di frame, cioè il protocollo stabilisce quando il trasmettente può inviare frame

L'implementazione del data link layer prevederà la realizzazione della interfaccia con i livelli adiacenti, ad esempio due procedure *from-network-layer()* e *to-network-layer()* per scambiare dati con il livello superiore, e due procedure analoghe per scambiare dati con lo strato fisico. In aggiunta sarà prevista una procedura *wait-for-event()* che metterà il data link layer in attesa di un evento. Questo evento sarà in generale la segnalazione, da parte di uno dei due livelli adiacenti, che sono disponibili dei dati. Infine, saranno definite procedure per il trattamento dei dati

In ricezione, il data link layer verrà svegliato per prelevare dati dallo strato fisico, processarli, e passarli allo strato di rete. Di fatto il DDL in ricezione non sarà in grado di rispondere ad eventi per il tempo che intercorre tra la chiamata

alla procedura *from-physical-layer()* e la fine della procedura *to-network-layer()*. In questo intervallo di tempo, dati in arrivo saranno messi in buffer, in attesa di essere processati. Poiché il tempo di elaborazione non è nullo, si deve gestire l'eventualità che i dati arrivino troppo velocemente

Un semplice meccanismo può essere quello di valutare i tempi di risposta del ricevente, ed inserire dei ritardi nel processo di trasmissione per adattarlo alla capacità di ricezione. Il problema è che il tempo di processamento in ricezione non è una costante e può dipendere dal numero di linee che il nodo ricevitore deve gestire. Basarsi sul caso peggiore comporta un grosso limite di efficienza.

Il frame data link prevede un'intestazione (header) e una coda (trailer) aggiunti al pacchetto passato dal livello di rete

Ipotizziamo che

- il canale sia privo di errori
- il traffico dati scorra in una direzione sola, dal trasmittente (A) al ricevente (B), cioè protocollo simplex

Il protocollo stop-and-wait prevede che A, dopo aver inviato il frame, si fermi per attendere un riscontro.

B, una volta ricevuto il frame, invierà ad A un frame di controllo, cioè un frame privo di dati, allo scopo di avvisare A che può trasmettere un nuovo frame.

Il frame di riscontro indica generalmente con il termine ACK (ACKnowledge) o RR (Receiver Ready).

Va osservato che il traffico dati è simplex, ma i frame devono viaggiare nelle due direzioni, quindi il canale fisico deve essere almeno half-duplex

Il numero di sequenza (seq) impedisce che il ricevente accetti un pacchetto duplicato (inviato in caso di perdita dell'ack). Nel caso di ricezione con errore si aspetta lo scadere del timeout. Protocollo PAR (Positive Acknowledgement with Retransmission) o anche ARQ (Automatic Repeat reQuest). Il tempo di timeout non deve essere troppo corto per evitare continue ritrasmissioni. Il protocollo può fallire se un ack ritarda ad arrivare e nel frattempo scade il timeout e si ritrasmette (si perde il sincronismo dell'ack). Dipende dal fatto che l'ack è anonimo (senza seq)

Quando il canale di comunicazione permette l'invio di dati in entrambe le direzioni contemporaneamente è possibile definire protocolli di comunicazione detti full duplex. In caso di linea full duplex il canale trasmette frame di dati in un verso e frame di ACK relativi alla comunicazione nel verso opposto, mischiati tra loro. I frame saranno distinti da una informazione contenuta nell'header del frame, che etichetta i frame come "dati" o come "frame di controllo"

Per motivi di efficienza spesso si utilizza una tecnica (detta "piggybacking") per evitare di dover costruire e trasmettere un frame di ACK:

- si dedica un campo dell'header di un frame di dati per trasportare l'ACK della trasmissione in senso inverso
- Quando si deve trasmettere un ACK, si aspetta di dover trasmettere un frame di dati che possa trasportare l'informazione di ACK. Se non ci sono dati da inviare, si dovrà comunque inviare un frame di ACK prima che scada il timeout del trasmittente
- questo implica il dover utilizzare un altro timer per decidere dopo quanto tempo inviare comunque l'ACK in caso di mancanza di dati da inviare in senso inverso

I protocolli a finestra scorrevole (sliding window) permettono di inviare più di un frame prima di fermarsi per attendere il riscontro, fino ad un valore massimo W fissato a priori

Poiché in ricezione possono arrivare più frame consecutivi, i frame devono essere numerati per garantire in ricezione che non si siano persi frame: saranno dedicati n bit di controllo per la numerazione, ed i frame potranno avere numero da 0 a $2^n - 1$. In ricezione non è necessario riscontrare tutti i frame: il ricevente può attendere di ricevere un certo numero di frame (fino a W) prima di inviare un solo riscontro cumulativo

La numerazione dei frame è in modulo 2^n , cioè il frame successivo a quello numerato $2^n - 1$ avrà come identificativo il numero 0. Per non avere sovrapposizione dei numeri identificativi tra i frame in attesa di riscontro, questi non dovranno essere in numero maggiore di 2^n , quindi si avrà sempre $W \leq 2^n$; in funzione del protocollo usato si potranno avere restrizioni maggiori

Questo tipo di protocolli necessita di maggiori risorse di buffer:

- in trasmissione devono essere memorizzati i frame inviati in attesa di riscontro, per poterli ritrasmettere in caso di necessità
- ad ogni riscontro ricevuto, vengono liberati i buffer relativi ai frame riscontrati, per occuparli con i nuovi frame trasmessi
- a seconda del protocollo anche in ricezione si deve disporre di buffer, ad esempio per memorizzare frame fuori sequenza;

- ad ogni riscontro inviato, i frame riscontrati vengono passati allo strato di rete ed i relativi buffer vengono liberati per poter accogliere nuovi frame in arrivo

ed una maggiore complessità di calcolo

La dimensione della finestra (W) può essere fissata a priori dal protocollo, ma esistono protocolli che permettono di modificarne il valore dinamicamente tramite informazioni di controllo del protocollo

In trasmissione si deve tenere conto dei frame inviati e non riscontrati, e del numero massimo di frame che possono essere ancora inviati prima di dover fermare la trasmissione

Si utilizza una sequenza di numeri, indicanti gli identificativi dei frame

In questa sequenza di numeri si tiene conto di una finestra che contiene l'insieme dei frame che il trasmittente è autorizzato ad inviare

Con il procedere della trasmissione la finestra scorre in avanti:

- inizialmente la finestra ha limiti 0 e W-1
- ad ogni frame inviato, il limite inferiore della finestra cresce di una unità; quando la finestra si chiude (cioè quando sono stati inviati W frame in attesa di riscontro) la trasmissione deve fermarsi
- per ogni frame riscontrato, il limite superiore della finestra si sposta in avanti di una unità (o più se si è ricevuto un riscontro cumulativo), permettendo al trasmittente di inviare nuovi frame

La dimensione della finestra di trasmissione varia, ma non può mai superare il valore di W

In ricezione si deve tenere conto dei frame ricevuti di cui non è stato ancora inviato l'ACK, e del numero di frame ancora accettabili. Si utilizza una finestra analoga a quella in ricezione: la finestra contiene i numeri dei frame accettabili. Il limite inferiore è il numero del frame successivo all'ultimo ricevuto, mentre il limite superiore è dato dal primo non ancora riscontrato più W. Ad ogni nuovo frame ricevuto il limite inferiore della finestra cresce di una unità, mentre ad ogni acknowledge inviato il limite superiore avanza di una unità. La dimensione della finestra non può eccedere il valore di W (tutti i frame ricevuti sono stati riscontrati). Quando la finestra si azzerà significa che si devono per forza inviare i riscontri, perché la ricezione è bloccata. Qualsiasi frame ricevuto con numero fuori dalla finestra di ricezione sarà buttato via. La finestra in ricezione non deve necessariamente avere la stessa dimensione della finestra in trasmissione

Ogni frame spedito contiene un numero progressivo a n bit

- **La finestra di trasmissione** del mittente corrisponde ai frame che può ritrasmettere
- **La finestra di ricezione** del ricevente che indica i frame che può accettare

Il mittente mantiene in un buffer di dimensione w tutti i frame nella finestra nel caso debbano essere ritrasmessi. Quando il buffer è pieno (non si sono ricevuti ack) il livello data link del mittente non accetta più pacchetti dal livello di rete. Se w=1 si ha un protocollo stop-and-wait (si aspetta l'ack prima di spedire un nuovo frame). Il protocollo stop-and-wait spreca banda per le attese in caso di mezzo fisico con ritardo non trascurabile

L'utilizzo di un protocollo sliding window permette di utilizzare meglio la linea, ma complica il problema di gestire gli errori:

- il trasmittente, prima di accorgersi che un frame è stato ricevuto con errore, ha già inviato altri frame
- in ricezione possono quindi arrivare frame corretti con numero di sequenza successivo ad un frame rigettato (non ricevuto)

Esistono due protocolli che gestiscono in modo differente questa situazione:

- protocollo go-back-N
- protocollo selective reject

Questi protocolli prevedono l'invio sia di frame ACK (per riscontrare un frame), indicati anche come RR (Receiver Ready), che NAK (Not Acknowledged), indicato anche come REJ (REject), utilizzato per informare il trasmittente che è stato ricevuto un frame fuori sequenza. Sia gli ACK (RR) che i REJ riportano l'indicazione del numero di sequenza del frame che è atteso in ricezione (quello successivo all'ultimo riscontrato). Questi protocolli implementano anche frame di controllo RNR (Receiver Not Ready) che impongono al trasmittente di fermarsi fino alla ricezione di un nuovo RR; questi possono essere utilizzati come ulteriore controllo di flusso, per gestire situazioni non di errore ma di congestione o temporanea sospensione dell'attività in ricezione

Protocollo go-back-N: segue la logica che in ricezione vengano rifiutati tutti i frame successivi ad un frame danneggiato o mancante

Esistono due possibilità:

- frame errato: in questo caso B scarta il frame:
 - se A non invia frame successivi, non accade nulla fino allo scadere del timer di A, quindi A ricomincia ad inviare frame a partire dal primo non riscontrato
 - se A invia frame successivi, B risponde con un REJ dei frame ricevuti, in modo da notificare ad A che il frame indicato nel REJ è andato perso; al primo REJ ricevuto, A ricomincia dal primo frame non riscontrato

ACK errato: in questo caso B ha accettato il frame:

- se A non invia frame successivi, allo scadere del timer:
 - A invia nuovamente il frame; B lo rifiuta (duplicato) ma invia nuovamente l'ACK
 - alternativamente, al timeout A può inviare un frame di controllo per chiedere conferma dell'ultimo frame ricevuto correttamente, a cui B risponde con l'ACK relativo
- se A invia frame successivi, B risponde con l'ACK del frame successivo; poiché' gli ACK sono cumulativi,

l'ACK del frame successivo riscontra anche quello di cui A non ha ricevuto l'ACK, quindi il trasferimento dati continua senza interruzioni

Poiché' i riscontri sono cumulativi, la dimensione della finestra deve essere $W \leq 2^n - 1$; infatti

- supponiamo di avere $n=3$ (quindi numeri da 0 a 7) e scegliamo per W il valore 8
- A invia il frame 7, e riceve ACK0 (riscontro del frame 7)
- poi A invia i frame da 0 a 7, e riceve ACK0
- A non può sapere se tutti i frame sono stati ricevuti (ACK0 è il riscontro dell'ultimo frame inviato) o sono stati tutti perduti (ACK0 è il riscontro ripetuto del primo frame inviato precedentemente)
- Se nell'esempio la finestra è $W = 7$, A può inviare frame da 0 a 6; a questo punto
- se sono arrivati tutti, A riceverà ACK7
- se sono andati tutti persi, A riceverà ACK0 quindi con $W \leq 2^n - 1$ non c'è ambiguità

Il protocollo **selective reject** prevede che in ricezione possano essere accettati frame fuori sequenza, utilizzando un meccanismo di ritrasmissione selettiva dei frame errati; in questo modo si riduce ulteriormente il numero di frame ritrasmessi, mantenendo la caratteristica di recapitare allo strato di rete i dati nell'ordine corretto. In ricezione i frame fuori ordine (ma dentro la finestra) vengono mantenuti nei buffer fino a che non siano stati ricevuti tutti i frame intermedi

Quando si ha un frame perduto, B riceverà il frame successivo fuori sequenza, al quale risponderà con un ACK relativo al frame perduto. A non ritrasmette tutti i frame successivi a quello, ma solo quello perduto, quindi proseguirà con la normale sequenza. B ha memorizzato i frame successivi, ed alla ricezione del frame ritrasmesso libererà tutti i buffer inviando un ACK relativo all'ultimo frame ricevuto correttamente. In caso di perdita dell'ACK, sarà il timeout di A a generare un frame di sollecito di ACK per B, che risponderà di conseguenza

La ricezione non sequenziale limita ulteriormente la massima dimensione della finestra in funzione del numero di bit per la numerazione del frame. Come prima, supponiamo di avere 3 bit, ed una finestra a dimensione 7 (idonea per il protocollo go-back-N)

- A trasmette da 0 a 6, B risponde con ACK7 e sposta la sua finestra in (7,0,1,2,3,4,5)
 - l'ACK7 si perde; dopo il timeout A ritrasmette il frame 0
 - B accetta 0 come un nuovo frame (ipotizza che il 7 sia andato perduto) e trasmette NACK7
 - A riceve NACK7, lo identifica come un errore di protocollo e chiede la ripetizione del riscontro, a cui B risponde con un ACK7
 - A ritiene a questo punto che i frame da 0 a 6 siano arrivati tutti e riparte con i nuovi: 7,0,1, ...
 - A riceve 7 (OK) ma lo 0 nuovo lo interpreta come duplicato di quello ricevuto precedentemente e lo butta; quindi si prosegue in questo esempio lo strato di rete riceve il frame 0 vecchio al posto del frame 0 nuovo
- Per eliminare l'ambiguità è necessario che le finestre in trasmissione e ricezione non si sovrappongano; questo si ottiene imponendo che la finestra abbia dimensione $W \leq 2^{(n-1)}$, cioè la metà dello spazio di indirizzamento dei frame

Un campo finito con q elementi su cui sono definite due operazioni aritmetiche (addizione e moltiplicazione) che godono della proprietà commutativa ed associativa viene chiamato **Campo di Galois** ed indicato con **GF(q)**. **GF(q)** è chiuso rispetto all'addizione e moltiplicazione. In generale q deve essere sempre primo o potenza di numeri primi. Le operazioni di somma e moltiplicazione vengono calcolate utilizzando i concetti aritmetici tradizionali con l'applicazione di un'ulteriore operazione di **mod q**.

Una sequenza di N bit può essere rappresentata tramite un polinomio a coefficienti binari, di grado pari a N-1, tale che i suoi coefficienti siano uguali ai valori dei bit della sequenza

La tecnica consiste nel considerare i dati (m bit) da inviare come un polinomio di grado m-1

Trasmettitore e ricevitore si accordano sull'utilizzo di un polinomio generatore G(x) di grado r. Il trasmettitore aggiunge in coda al messaggio una sequenza di bit di controllo (CRC) in modo che il polinomio associato ai bit del frame trasmesso, costituito dall'insieme di dati e CRC, sia divisibile per G(x). In ricezione si divide il polinomio associato ai dati ricevuti per

G(X)

- se la divisione ha resto nullo, si assume che la trasmissione sia avvenuta senza errori
- se la divisione ha resto non nullo, sono certamente avvenuti errori

Esistono due tipi di collegamenti di rete:

- Collegamento punto-punto (P2P)
 - Impiegato per connessioni su lunga distanza
 - Collegamenti punto-punto tra Ethernet e host.
- Collegamento broadcast (cavo o canale condiviso)
 - Ethernet tradizionale
 - HFC in upstream
 - Wireless LAN 802.11

Allocazione statica (FDM o TDM)

non è efficiente in ambienti altamente dinamici
numero di stazioni variabile
carico variabile (stazioni inattive)

Allocazione dinamica (risoluzione dei conflitti di accesso)

Collisione: due segnali trasmessi simultaneamente si sovrappongono e il segnale risultante sarà confuso
Le stazioni possono rilevare le collisioni
Una collisione corrisponde ad un errore di trasmissione

Si genera una **collisione** quando i nodi ricevono due o più frame contemporaneamente

Protocolli di accesso multiplo: Protocolli che fissano le modalità con cui i nodi regolano le loro trasmissioni sul canale condiviso. La comunicazione relativa al canale condiviso deve utilizzare lo stesso canale!

Si possono classificare in una di queste tre categorie:

- Protocolli a suddivisione del canale (*channel partitioning*)
 - Suddivide un canale in "parti più piccole" (slot di tempo, frequenza, codice).
- Protocolli ad accesso casuale (*random access*)
 - I canali non vengono divisi e si può verificare una collisione.
 - I nodi coinvolti ritrasmettono ripetutamente i pacchetti.
- Protocolli a rotazione ("*taking-turn*" o "collision-free")
 - Ciascun nodo ha il suo turno di trasmissione, ma i nodi che hanno molto da trasmettere possono avere turni più lunghi.

TDMA: accesso multiplo a divisione di tempo: Suddivide il canale condiviso in *intervalli di tempo*. Gli slot non usati rimangono inattivi

FDMA: accesso multiplo a divisione di frequenza: Suddivide il canale in bande di frequenza. A ciascuna stazione è assegnata una banda di frequenza prefissata.

Il protocollo ad **accesso casuale** definisce:

- Come rilevare un'eventuale collisione.
- Come ritrasmettere se si è verificata una collisione

Slotted ALOHA

Assumiamo che:

- Tutti i pacchetti hanno la stessa dimensione.
- Il tempo è suddiviso in slot; ogni slot equivale al tempo di trasmissione di un pacchetto.

- I nodi iniziano la trasmissione dei pacchetti solo all'inizio degli slot.
- I nodi sono sincronizzati.
- Se in uno slot due o più pacchetti collidono, i nodi coinvolti rilevano l'evento prima del termine dello slot.

Operazioni:

- Quando a un nodo arriva un nuovo pacchetto da spedire, il nodo attende fino all'inizio dello slot successivo.
- *Se non si verifica una collisione*: il nodo può trasmettere un nuovo pacchetto nello slot successivo.
- *Se si verifica una collisione*: il nodo la rileva prima della fine dello slot e ritrasmette con probabilità p il suo pacchetto durante gli slot successivi.

Pro

- Consente a un singolo nodo di trasmettere continuamente pacchetti alla massima velocità del canale.
- È fortemente decentralizzato, ciascun nodo rileva le collisioni e decide indipendentemente quando ritrasmettere.
- È estremamente semplice.

Contro

- Una certa frazione degli slot presenterà collisioni e di conseguenza andrà "sprecata".
- Un'alta frazione degli slot rimane vuota, quindi inattiva.

L'**efficienza** è definita come la frazione di slot vincenti in presenza di un elevato numero di nodi attivi, che hanno sempre un elevato numero pacchetti da spedire.

Aloha puro: più semplice, non sincronizzato. Quando arriva il primo pacchetto: lo trasmette immediatamente e integralmente nel canale broadcast.

CSMA: si pone in ascolto prima di trasmettere: Se rileva che il canale è libero, trasmette l'intero pacchetto. Se il canale sta già trasmettendo, il nodo aspetta un altro intervallo di tempo.

Si utilizza la codifica Manchester per i segnali i bit sono codificati da transizioni (usa il doppio della banda)

Le collisioni *possono* ancora verificarsi: Il ritardo di propagazione fa sì che due nodi non rilevino la reciproca trasmissione

collisione: Quando un nodo rileva una collisione, cessa immediatamente la trasmissione.

nota: La distanza e il ritardo di propagazione giocano un ruolo importante nel determinare la probabilità di collisione.

La collisione viene rilevata ascoltando il canale e verificando che il segnale ricevuto corrisponda a quello trasmesso senza interferenze. Basta una minima sovrapposizione dei due pacchetti per farli andare persi.

CSMA 1-persistente

Il più semplice di questi protocolli ha il seguente funzionamento:

– quando un calcolatore ha dati da trasmettere, ascolta il segnale presente sul mezzo trasmissivo

- se trova il canale libero, trasmette il frame
- se trova il canale occupato, continua ad ascoltare fino a che il canale non si libera, e poi trasmette il frame

– in caso di collisione, la stazione aspetta un tempo casuale e ripete l'algoritmo

Il protocollo si chiama 1-persistente perché quando trova il canale occupato, resta in ascolto continuamente, ed appena il canale si libera trasmette con probabilità 1 (sempre)

Con questo protocollo acquista grande importanza il ritardo di propagazione del segnale tra due stazioni

– infatti, quando una stazione inizia a trasmettere, una seconda stazione potrebbe voler trasmettere, ed ascolta il canale

– se il segnale trasmesso dalla prima stazione non ha ancora avuto il tempo di propagarsi fino alla seconda stazione, questa troverà il canale libero e trasmetterà, generando una collisione

Maggiore è il ritardo di propagazione, più numerose saranno le collisioni dovute alla eventualità sopra descritta

– nota: questa situazione si presenterà sempre ed indipendentemente dal ritardo di propagazione qualora due stazioni volessero trasmettere mentre una terza sta trasmettendo: alla fine della trasmissione della terza stazione, le due stazioni in attesa si metteranno sempre a trasmettere contemporaneamente

Come slotted aloha, questo protocollo non interferisce con le trasmissioni già in atto

A differenza di slotted aloha, questo protocollo non prevede di dover attendere la time slot successiva, evitando ad esempio di lasciare inutilizzata una slot temporale per il tempo di durata della slot stessa

Inoltre CSMA 1-persistente non richiede la sincronizzazione delle stazioni connesse alla rete

CSMA non persistente

Si differenzia dal precedente per il fatto che una stazione, quando vuole trasmettere ma trova il canale occupato, non resta ad ascoltare in continuazione, ma attende un tempo casuale e riprova

Questo meccanismo riduce sensibilmente le collisioni dovute al fatto che due stazioni vogliano trasmettere durante la trasmissione di una terza:

– ora le stazioni attenderanno generalmente tempi diversi prima di ritentare

– la prima che ritenta troverà il canale libero e trasmetterà

– la seconda troverà nuovamente il canale occupato, quindi non interferirà ed aspetterà ancora

Questo protocollo alza notevolmente l'efficienza di utilizzo del canale con l'aumento del carico, cioè delle stazioni connesse alla rete

Il problema principale di questo protocollo è che in condizioni di elevato carico il tempo che intercorre tra l'istante in cui la stazione vuole trasmettere e l'istante in cui riesce a trasmettere può crescere enormemente

CSMA p-persistente

In questa ultima versione del protocollo a rilevamento della portante, il tempo è suddiviso in slot temporali come nello slotted aloha

In questo caso, chi desidera trasmettere ascolta il canale continuamente e quando lo trova libero

– trasmette con probabilità p , oppure attende la slot successiva con probabilità $(1-p)$

– alla slot successiva, se libera, trasmette nuovamente con probabilità p o aspetta la successiva con probabilità $1-p$, e così via

– in caso di collisione, o se durante i tentativi di trasmissione qualche altra stazione inizia a trasmettere, la stazione attende un tempo casuale e ripete l'algoritmo

Questo protocollo è una via di mezzo tra il protocollo 1-persistente (a cui tende per p che tende ad 1) e quello non persistente

Come nel caso di CSMA non persistente, ad elevato carico e per bassi valori di p cresce l'efficienza di utilizzo della linea ma cresce il ritardo di trasmissione rispetto all'arrivo dei dati dallo strato di rete

Per alti valori di p l'efficienza di utilizzo della linea decresce rapidamente con l'aumentare del carico

Il protocollo opera in tre diverse fasi:

- **carrier sense**: (rilevazione della trasmissione): ogni stazione che deve trasmettere ascolta il bus e decide di trasmettere solo se questo è libero (*listen before talking*);

- **multiple access**: nonostante il carrier sense è possibile che due stazioni, trovando il mezzo trasmissivo libero, decidano contemporaneamente di trasmettere; la probabilità di questo evento è aumentata dal fatto che il tempo di propagazione dei segnali sul cavo non è nullo, e quindi una stazione può credere che il mezzo sia ancora libero anche quando un'altra ha già iniziato la trasmissione;

- **collision detection**: se si verifica la sovrapposizione di due trasmissioni si ha una "collisione"; per rilevarla, ogni stazione, mentre trasmette un pacchetto, ascolta i segnali sul mezzo trasmissivo, confrontandoli con quelli da lei generati (*listen while talking*).

A seguito di un'avvenuta collisione si intraprendono le seguenti azioni:

- la stazione trasmittente sospende la trasmissione e trasmette una sequenza di *jamming* (interferenza trasmissiva) per comunicare a tutte le stazioni di rilevare l'avvenuta collisione

- le stazioni in ascolto, riconoscendo il frammento di collisione costituito dalla parte di pacchetto trasmessa più la sequenza di **jamming**, scartano i bit ricevuti;

- la stazione trasmittente ripete il tentativo di trasmissione dopo un tempo pseudo-casuale per un numero di volte non superiore a 16.

Protocollo a mappa di bit elementare:

– sulla rete ci sono N stazioni, numerate da 0 a $N-1$

– alla fine della trasmissione di un frame inizia un periodo di contesa, in cui ogni stazione, andando per ordine di indirizzo, trasmette un bit che vale 1 se la stazione deve trasmettere, 0 altrimenti

– al termine del periodo di contesa (privo di collisioni in quanto ogni stazione aspetta il suo turno) tutti hanno appreso quali stazioni devono trasmettere, e le trasmissioni procedono un frame alla volta sempre andando per ordine

– se una stazione riceve dati da trasmettere quando la fase di prenotazione è terminata, deve attendere il successivo periodo di contesa per prenotare la propria trasmissione

L'efficienza di questo protocollo è bassa per grandi valori di N e basso carico trasmissivo;

– in queste condizioni una stazione deve attendere tutti gli N bit delle altre stazioni (delle quali la maggior parte o la totalità non desidera trasmettere) prima di poter trasmettere

In condizioni di carico elevato l'overhead dovuto agli N bit di prenotazione si distribuisce sui $\sim N$ frame da trasmettere, riducendo l'inefficienza complessiva del protocollo

Token ring (standard IEEE 802.5)

– questo protocollo prevede l'utilizzo di una topologia ad anello

– sull'anello circola un piccolo frame, detto token (gettone) che le stazioni ricevono da una parte e ritrasmettono dall'altra in continuazione

– una stazione è autorizzata a trasmettere dati solo quando è in possesso del token

- la stazione riceve il token, lo trattiene ed inizia a trasmettere dati
- terminata la trasmissione, ritrasmette il token in coda ai frame di dati

– esistono specifiche a 4 e 16 Mbps

Esiste una versione modificata del token ring standardizzata per trasmissione su doppio anello in fibra ottica, detto FDDI (Fiber Distributed Data Interface) a 100 Mbps

L'IEEE ha sviluppato uno standard molto simile, dedicato alle topologie a bus (token bus: IEEE 802.4)

– in questo protocollo il problema aggiuntivo è determinato dalla necessità di configurare un ordine sequenziale delle stazioni, che viene fatto in una fase di inizializzazione del protocollo

Il token è una sequenza particolare di bit che circola sull'anello quando tutte le stazioni sono inattive. Quando una stazione vuole trasmettere, si impossessa del token e lo rimuove dall'anello. Una sola stazione può trasmettere (quella che possiede il token)

Il protocollo token ring (come tutti quelli a turno) è poco efficiente in condizioni di basso carico

– la stazione che deve trasmettere deve attendere di ricevere il token (o in generale deve attendere il suo turno) prima di poterlo fare, anche se il canale non è occupato

In condizioni di carico elevato, quando tutti vogliono trasmettere, l'efficienza del protocollo sfiora l'unità

– il solo overhead è dovuto alla necessità che ha una stazione di identificare il token prima di poter trasmettere

– in questi protocolli il token è scelto in modo opportuno per minimizzare l'overhead

Una importante caratteristica di questo genere di protocolli è la possibilità di valutare un tempo massimo di ritardo per le trasmissioni

– una stazione che desidera trasmettere dovrà attendere al più N tempi di trasmissione (uno per stazione, nel caso tutti debbano trasmettere) prima che tocchi nuovamente ad essa

– questo permette l'utilizzo del protocollo in situazioni in cui i tempi di risposta possono essere determinanti (ad esempio una catena di montaggio)

Il progetto IEEE 802 definisce un insieme di standard per le LAN e le MAN, relativamente ai livelli data link e fisico.

IEEE 802.1: È lo standard contenente le specifiche generali del progetto 802; esso è composto da molte parti, tra cui:

– 802.1 Part A (Overview and Architecture);

– 802.1 Part B (Addressing Internetworking and Network Management);

– 802.1 Part D (MAC Bridges).

IEEE 802 introduce l'idea che le LAN e le MAN devono fornire un'interfaccia unificata verso il livello Network (livello rete), pur utilizzando tecnologie trasmissive differenziate. Per ottenere tale risultato, il progetto IEEE 802 suddivide il livello Data Link in due sottolivelli:

– LLC (*Logical Link Control*);

– MAC (*Media Access Control*).

Il sottolivello LLC è comune a tutte le LAN, mentre il MAC è peculiare di ciascuna LAN, così come il livello fisico al quale è strettamente associato. Il sottolivello LLC è l'interfaccia unificata verso il livello Network ed è descritto nell'apposito standard IEEE 802.2, mentre i vari MAC sono descritti negli standard specifici di ogni rete locale (ad esempio il MAC CSMA/CD è descritto nello standard IEEE 802.3). Nel seguito, per facilità di lettura, si parlerà solo di reti locali (LAN), ma quanto detto vale ovviamente anche per le reti metropolitane (MAN), comprese anch'esse nel progetto IEEE 802.

Il sottolivello **MAC** è specifico di ogni LAN e risolve il problema della condivisione del mezzo trasmissivo. Esistono vari tipi di MAC, basati su principi diversi, quali la contesa, il token, la prenotazione e il round-robin. Il MAC è indispensabile in quanto a livello 2 (Data Link) le LAN implementano sempre una sottorete trasmissiva di tipo broadcast in cui ogni sistema riceve tutti i frame inviati dagli altri.

Trasmettere in broadcast, cioè far condividere un unico canale trasmissivo a tutti i sistemi, implica la soluzione di due problemi:

• in trasmissione, verificare che il canale sia libero prima di trasmettere e risolvere eventuali conflitti di più sistemi che vogliano utilizzare contemporaneamente il canale;

• in ricezione, determinare a quali sistemi è effettivamente destinato il messaggio e quale sistema lo ha generato. La soluzione del primo problema è data dai vari algoritmi di MAC che, per poter soddisfare il requisito "apparecchiature indipendenti", devono essere algoritmi distribuiti su vari sistemi e non necessitare di un sistema master.

La soluzione del secondo problema implica la presenza di indirizzi a livello MAC (quindi nella MAC-PDU) che trasformino trasmissioni broadcast in:

– trasmissioni punto-a-punto, se l'indirizzo di destinazione indica un singolo sistema;

- trasmissioni punto-gruppo, se l'indirizzo di destinazione indica un gruppo di sistemi;
- trasmissioni effettivamente broadcast, se l'indirizzo di destinazione indica tutti i sistemi.

Il MAC deve anche tener conto della topologia della LAN, che implica leggere variazioni sulle possibili modalità di realizzazione del broadcast: con topologie a bus, è un broadcast a livello fisico (elettrico), mentre con topologie utilizzando canali punto-a-punto, quali l'anello, è un broadcast di tipo logico.

Le reti locali hanno canali sufficientemente affidabili, quindi non è in genere necessario effettuare correzione degli errori. Se ciò fosse richiesto, sarebbe il sottolivello LLC ad occuparsene essendo il MAC sempre connectionless.

Nelle reti locali, al livello 2 OSI, sono presenti due tipi di PDU corrispondenti ai due sottolivelli LLC e MAC.

–Una Protocol Data Unit (**PDU**) è l'unità d'informazione o pacchetto scambiata tra due peer entities in un protocollo di comunicazione di un'architettura di rete a strati.

Il formato della LLC-PDU è comune a tutte le reti locali, mentre quello della MAC-PDU è peculiare di ogni singolo MAC.

Tuttavia alcuni campi principali, rappresentati in figura, sono presenti in tutte le MAC-PDU. In particolare una MAC-PDU contiene due indirizzi (SAP), uno di mittente (MAC-SSAP) e uno di destinatario (MAC-DSAP), un campo INFO contenente la LLC-PDU (cioè il pacchetto di livello LLC) e una FCS (*Frame Control Sequence*) su 32 bit, cioè un codice a ridondanza ciclica (CRC) per l'identificazione di errori di trasmissione.

I protocolli MAC visti fin qui non esauriscono le funzioni del data link layer. Le specifiche dei protocolli MAC devono essere filtrate per poter offrire allo strato di rete una interfaccia analoga ai protocolli delle linee punto-punto. IEEE ha definito le specifiche di un sottostrato del data link layer che fornisce verso l'alto questa interfaccia, appoggiandosi sopra il sottostrato MAC: il Logical Link Control

La funzione principale del LLC definito da IEEE è di mascherare allo strato di rete le specifiche dei protocolli 802 utilizzati a livello di MAC, in modo da offrire allo strato superiore una interfaccia uniforme

Un esempio del suo utilizzo è quello di implementare un servizio orientato alla connessione, o non connesso ma affidabile per la comunicazione a livello 2. Lo strato di rete passa i suoi dati al LLC, che aggiunge un suo header con le informazioni di numerazione del frame, riscontro etc. Quindi il LLC passa al sottostrato MAC il campo dati che il MAC gestisce con le sue specifiche. In ricezione il MAC recapita il frame al LLC che rimuove l'header e passa i dati allo strato di rete. Il formato dell'header ed i meccanismi di funzionamento del LLC ricalcano quelli dell'HDLC

Ethernet

Detiene una posizione dominante nel mercato delle LAN cablate.

- È stata la prima LAN ad alta velocità con vasta diffusione.
- Più semplice e meno costosa di token ring, FDDI e ATM.
- Sempre al passo dei tempi con il tasso trasmissivo

Quasi tutte le odierne reti Ethernet sono progettate con topologia a stella.

L'adattatore trasmittente incapsula i datagrammi IP in un pacchetto Ethernet.

Indirizzo di destinazione: 6 byte

– Quando un adattatore riceve un pacchetto contenente l'indirizzo di destinazione o con l'indirizzo broadcast (es.: un pacchetto ARP), trasferisce il contenuto del campo dati del pacchetto al livello di rete.

– I pacchetti con altri indirizzi MAC vengono ignorati.

Campo tipo: consente a Ethernet di supportare vari protocolli di rete (in gergo questa è la funzione di "multiplexare" i protocolli).

Controllo CRC: consente all'adattatore ricevente di rilevare la presenza di un errore nei bit del pacchetto.

Il bit IG definisce se il frame è indirizzato ad una singola stazione (unicast) o a un gruppo di stazioni (multicast). Un indirizzo composto da tutti 1 è riservato per il broadcast (il frame è ricevuto da tutte le stazioni)

Tutte le stazioni vedono il frame e lo accettano se l'indirizzo destinazione è compatibile con quello a loro assegnato. Se la trasmissione è unicast solo la stazione con l'indirizzo specificato nel campo destinazione del frame accetta il pacchetto. Le altre stazioni lo scartano.

Il riconoscimento dell'indirizzo è a livello hardware.

Se l'interfaccia è configurata in modo promiscuo, accetta tutti i pacchetti (snoop di rete).

Campo di tipo

Segue un campo di 2 byte che serve ad indicare al ricevente cosa deve fare del frame ricevuto

- generalmente il livello 2 viene utilizzato da più protocolli dello strato di rete simultaneamente
- il campo type indica al ricevente a quale processo deve essere recapitato il frame

Il **campo dati** trasporta le informazioni del protocollo di livello 3 ed ha dimensione variabile, con un limite superiore. La sua dimensione massima è di 1500 byte, e fa sì che la lunghezza massima del frame Ethernet sia 1518 byte (preambolo escluso)

- il valore massimo è determinato dal fatto che il transceiver deve ospitare l'intero frame in RAM, ed al momento della definizione dello standard la RAM era più costosa di oggi

Lo standard prevede che un frame Ethernet non possa essere inferiore a 64 byte

In caso di necessità il campo dati è seguito da un campo di **riempimento** costituito da tutti 0 per fare in modo che la somma dati+riempimento sia di almeno 46 byte

- è compito dei livelli superiori forzare il campo dati ad essere almeno di 46 byte, od introdurre un indicatore di lunghezza per discriminare i dati dal riempimento

Lunghezza del frame

Un frame valido deve essere lungo almeno 64 byte

Se si tolgono i 6+6 riservati agli indirizzi, i 2 per il campo length e i 4 del checksum, il campo dati deve avere almeno 46 byte (eventuale padding)

La lunghezza minima di un pacchetto deve garantire che la trasmissione non termini prima che il primo bit abbia raggiunto l'estremità più lontana e sia tornata indietro una eventuale collisione (per rilevare la collisione)

Exponential Back-off: L'algoritmo adatta l'attesa al numero di stazioni che vogliono trasmettere; Un intervallo di slot di attesa alto diminuisce la probabilità che due stazioni collidano di nuovo ma introduce un ritardo medio elevato

Come gli altri protocolli CSMA anche Ethernet presenta le seguenti caratteristiche

- in condizioni di basso carico i tempi di ritardo sono contenuti e l'efficienza assomiglia al CSMA 1-persistente con la miglioria legata al fatto che c'è rilevazione della collisione
- in condizioni di carico elevato crescono le collisioni, ma l'algoritmo di backoff esponenziale fa sì che le stazioni mutino il loro comportamento rendendo il protocollo simile ad un CSMA p-persistente con p sempre più piccolo
- quindi al crescere del carico l'andamento dell'efficienza tende ad appiattirsi su una percentuale di valore non nullo
- c'è una forte dipendenza dalla dimensione media dei frame trasmessi; più piccolo è il frame, più pesa l'overhead del periodo di contesa rispetto al periodo di trasmissione riuscita

L'insieme di protocolli Ethernet domina tuttora saldamente il mercato delle LAN

La velocità di trasmissione originariamente era 10 Mbit/s su cavo coassiale

Ethernet è evoluta su diversi mezzi trasmissivi (coassiale, doppino, fibra) fino a 10 Gbit/s (Gigabit Ethernet), passando da trasmissioni nel dominio elettrico a trasmissioni su fibra

Ethernet, alle diverse velocità e per i diversi mezzi trasmissivi, è sempre stata standardizzata per permettere schede di interfaccia a basso costo, pensate per essere utilizzate in un PC

Sul mezzo condiviso la condizione di "assenza di trasmissione" è necessariamente identificata da assenza di segnale

Non sono quindi possibili codifiche che utilizzino il segnale a 0 volt per identificare un bit

La necessità di trasferire l'informazione di clock assieme al segnale ha portato alla invenzione della codifica Manchester già vista

Lo standard Ethernet utilizza la codifica Manchester con segnali a +0.85 V e -0.85 V (altri protocolli, come token ring, fanno uso della codifica Manchester differenziale)

Attualmente, molti adattatori Ethernet sono a 10/100 Mbps; possono quindi utilizzare sia 10BaseT sia 100BaseT. La lettera T è l'iniziale di Twisted Pair (doppino intrecciato).

Ogni nodo ha una diretta connessione con l'hub (topologia a stella); la massima distanza tra un adattatore e il centro stella è di 100m.

Gigabit Ethernet

Uso formato di trama 802.3

Uso protocollo MAC CSMA-CD (trasmissione punto punto con switch)

Operazioni half duplex e full duplex

Backward compatibility con mezzi fisici già installati (fibre mono e multimodali, doppino)

Aumenta di un fattore 10 dimensione minima di pacchetto con padding di simboli speciali

Codifiche in Gigabit Ethernet

Su fibra si utilizza una codifica nota come 8B/10B: una sequenza di 8 bit è codificata utilizzando 10 bit:

- 1024 codeword per 8 bit: c'è margine per scegliere opportunamente le codeword in modo che
 - non ci siano mai più di 4 bit uguali consecutivi
 - non ci siano mai più di sei 0 o sei 1
- spesso una sequenza ha più codeword associate, e viene scelta la migliore in funzione delle precedenti inviate per mantenere alternanza tra 0 ed 1 ed annullare la componente continua che passa nell'elettronica di conversione ottico/elettrico

Su rame si utilizzano tutte le quattro coppie del cavo UTP in modalità duplex con un simbolo a 5 livelli

- ogni ciclo di clock trasmette 5 simboli per coppia: 2 bit più un bit usato per segnali di controllo su ciascuna coppia
- 8 bit per ciclo a 125 MHz danno il throughput di 1 Gbps
- la modalità di trasmissione duplex si realizza con una elettronica complessa finalizzata al trattamento del segnale per separare l'ingresso dall'uscita

Poiché lo standard ammette la connessione di una stazione GE con una FE o Ethernet, è stato introdotto un meccanismo per il controllo di flusso a livello MAC

Lo switch comunica all'interfaccia GE della stazione di sospendere le trasmissioni di frame utilizzando un frame Ethernet normale, con tipo 0x8808 (seguito da parametri nel campo dati, indicanti tra l'altro per quanto tempo sospendere la trasmissione)

Un meccanismo analogo esiste nelle specifiche di Fast Ethernet

Repeater e Hub

Per costruire reti più ampie diversi cavi possono essere connessi con ripetitori

Un ripetitore **opera al livello fisico** amplificando e ritrasmettendo il segnale in modo bidirezionale

Un ripetitore multiporta (> 2) è spesso definito **hub**

È possibile interconnettere più hub in un singolo **dominio di collisione**

Bridge e Switch

Permettono di connettere più LAN mantenendo la suddivisione a livello data link

Si possono collegare LAN operanti con protocolli diversi

Si creano **domini di collisione separati** diminuendo il carico di ciascuna sottorete (il traffico locale rimane confinato nella sottorete)

Si può aumentare la dimensione della LAN (es. lunghezza delle linee) frazionando la rete in segmenti

Si confinano i malfunzionamenti dovuti a stazioni difettose

Aumentano la sicurezza dei dati - uso "malizioso" del modo promiscuo (il traffico interno ad una sottorete non è visibile dalle altre collegate con bridge/switch)

Transparent Bridging

Il bridge osserva in modo promiscuo il traffico delle LAN a cui è connesso

Osservando il traffico costruisce una tabella hash interna (**MAC address table**) che associa ogni indirizzo MAC alla porta corrispondente del bridge (**backward learning**)

Con la tabella il bridge decide se scartare il frame (la destinazione è la stessa porta di arrivo) o ritrasmetterlo su un'altra linea oppure in broadcast

Il **dominio di collisione** è confinato alla singola porta (fra switch e dispositivo)

In caso di trasmissione **full-duplex** non ci saranno collisioni dato che il dispositivo collegato e lo switch possono inviare e ricevere allo stesso tempo.

Bridges e switches possono essere combinati per estendere le LAN:

- Congiungendo diversi segmenti di rete in un unico dominio di broadcast
- Creando topologie di rete più complesse attraverso la combinazione di segmenti broadcast e punto-punto

Per sapere su quale porta debba essere trasmesso il frame, lo switch deve creare e mantenere aggiornata una tabella relativa alla associazione tra indirizzo di destinazione e porta

La costruzione manuale di questa tabella sarebbe troppo costosa in termini di gestione della rete, ed è stato opportunamente inventato un meccanismo di auto apprendimento

Inizialmente questa tabella è vuota, e lo switch deve inoltrare ciascun frame ricevuto su tutte le porte connesse

Poiché i frame contengono l'indirizzo del mittente, ad ogni frame che arriva lo switch impara che la stazione che ha inviato il frame è raggiungibile attraverso la porta da cui è arrivato il frame stesso

Con il passare del tempo lo switch riempie la tabella e può svolgere la sua funzione in modo sempre più efficiente

Tutti i frame broadcast e multicast continueranno a dover essere trasmessi su tutte le porte connesse (tranne quella di provenienza), così come i frame destinati ad indirizzi non presenti nella tabella

L'aggiunta di stazioni connesse viene gestita dallo switch automaticamente attraverso il meccanismo di auto apprendimento

Il backward learning

Al boot le tabelle sono vuote

Se un pacchetto ha una destinazione sconosciuta viene emesso su tutte le porte eccetto quella di provenienza

In ogni caso viene usato l'indirizzo di provenienza per definire la posizione del mittente nella tabella

Per gestire topologie dinamiche viene memorizzato anche il momento di arrivo dell'ultimo frame da un dato indirizzo. Periodicamente vengono eliminate le linee più vecchie

Dopo pochi messaggi le tabelle sono a regime e la struttura raggiunge la piena efficienza

In ragione delle loro specifiche caratteristiche implementative ed operative gli switches possono essere divisi in due tipologie fondamentali:

Cut-through

Per ogni trama una volta letto il datalink header viene immediatamente stabilita una crossconnessione fra porta di origine e destinazione

I bit cominciano a transitare prima del fine trama

Passano anche le trame errate o malformate

Store-and-forward

Prima di commutare la trama la stessa è letta completamente e bufferizzata dallo switch

Viene controllato il CRC prima dell'invio

In caso di errore il frame è scartato

Permette di filtrare il traffico malformato

Richiede capacità di memorizzazione

Port-based switching

Ad ogni porta corrisponde un solo indirizzo MAC

Segment-based switching

Ad ogni porta corrispondono più indirizzi

Shared Memory

Memorizza i pacchetti in una memoria comune a tutte le porte

Invia i pacchetti in memoria alla porta destinazione

Switching Matrix o Fabric

Utilizza una matrice di commutazione

In base all'indirizzo e al contenuto della tabella viene attivata la connessione necessaria

Bus-Architecture

Ha un BUS interno condiviso ad alta velocità

La comunicazione interna usa TDMA

Terminologia: $n \times m$ switch

ha n inputs and m outputs

Obiettivi

– Massimo throughput

– Scalabilità (rispetto a n)

Porte e Fabrics

– Porte

- Contengono le componenti (circuiti di controllo, HW di interfaccia) di trasmissione/ricezione
- Prevedono meccanismi di bufferizzazione per le trame in attesa di trasmissione o ricezione

– Switching Matrix o Fabric

- Recapita le trame in input su una porta verso una di output (più efficientemente possibile)
- Può effettuare bufferizzazione delle trame (*internal buffering fabric*).

Shared Memory/Bus Switch

Limitata scalabilità (le risorse condivise si saturano col carico)

Grande disponibilità di spazio di bufferizzazione

Realizzati tramite componenti COTS (es. PC)

In grado di scrivere una trama alla volta in memoria o sul bus condiviso

In presenza di n porte il trasferimento TDM Mux-memoria deve essere n volte più veloce della capacità del link

Crossbar Switch

Concettualmente semplice (ogni input connesso a ogni possibile output)

Possibili problemi di contesa (dipendenti dall'implementazione)

La complessità delle porte di uscita aumenta più velocemente di quella delle porte in ingresso

Un crossbar switch “perfetto” può teoricamente commutare trame concorrentemente da tutte le n porte di input a tutte le m porte di output

Logica di switching completamente centralizzata

- Costo elevato dovuto al numero di switching points
- La complessità della matrice cresce quadraticamente con il numero di porte di input/output ports, N , i.e., cresce come $O(N^2)$
- Ha la proprietà di essere *non-blocking*

Multistage interconnection network (MIN)

- Crossbar spezzata in diversi stadi che consistono di crossbars più piccole
- La complessità cresce come $O(N \times \log N)$, dove N è il numero di porte
- Le connessioni Inter-stadio sono rappresentate da un insieme di funzioni di permutazione

Riduzione del numero di switching points a discapito delle prestazioni

- La topologia diventa potenzialmente *blocking*
- Possono verificarsi fenomeni di *Contesa* in presenza di cammini dove differenti origini e destinazioni condividono uno o più linee

Bufferizzazione

Può ridurre il throughput (fino al 59% quando gli arrivi sono uniformemente distribuiti).

È fondamentale per gestire la **QoS** (non si può sempre usare FIFO o RR)

È indispensabile in presenza di possibili contese

- Porte di input (contesa sulla fabric)
- fabric buffers interni (contesa sulle output ports)
- Porte di output (contesa sui links)

Ogni porta di output ha un buffer dedicato

I Buffers avvengono riempiti in logica round-robin (da uno **shifter**)

L'ordine di arrivo è preservato

Si può identificare a quale VLAN appartenga una trama in arrivo:

– in base alla linea di arrivo (**Associazione Statica**)

- in questo caso ogni linea appartiene ad una sola VLAN, lo switch è realmente equivalente ad uno switch multiplo

- se due switch interconnessi debbono trasferire traffico di due VLAN dovranno essere connessi da due linee, ciascuna appartenente ad una VLAN
- uno stesso ramo non può appartenere a due vlan differenti in quanto non si saprebbe a quale VLAN assegnare i frame provenienti da quel ramo

– **in base al MAC address di provenienza (Associazione Dinamica)**

- non si può basarsi sul MAC address di destinazione perché non si potrebbe sapere a quale VLAN assegnare i frame broadcast
- in questo caso è possibile avere linee appartenenti a due VLAN contemporaneamente, perché non è la porta di arrivo o di destinazione a determinare la VLAN
- La modalità condiziona le prestazioni (statica è più efficiente)

Il comitato 802 ha standardizzato un protocollo per l'utilizzo delle VLAN (802.1Q)

La standardizzazione ha provocato la modifica del frame Ethernet con l'aggiunta di una etichetta che definisce l'appartenenza del frame ad una determinata VLAN

Il frame 802.1Q ha, dopo il campo destination address, due byte con valore 0x8100, seguito da due byte di Tag contenente il numero di 12 bit identificativo della VLAN, quindi dalla lunghezza del campo dati e dal resto del frame.

VLAN Trunking Protocol (VTP)

- Un sistema/protocollo che diffonde le informazioni di configurazione delle VLAN information
- Garantisce la consistenza delle configurazioni delle VLAN all'interno di un singolo dominio amministrativo
- VTP manda gli annunci solo sulle trunk ports

Access Layer

- Connette gli utenti finali alla rete garantendo banda dedicata su ogni porta.

Distribution Layer

- Eroga servizi di broadcast control, sicurezza e connessione ad altre reti.

Core Block

Il traffico tra switch blocks deve transitare attraverso il core block

Dato che le VLANs sono terminate a livello di distribuzione i links **non possono essere trunk links**.

Un minimo di 2 dispositivi deve essere presente nel core block a scopo di ridondanza

Lo spanning tree risolve i problemi di loops

Collapsed Core

Consolidamento dei livelli di distribuzione e core in un sololivello

- Prevalente nei campus di piccole o medie dimensioni
- Ogni switch di accesso ha un uplink ridondato alla distribuzione.
- Tutte le subnets terminano su porte di questo livello

Dual Core

Necessario in presenza di 2 o più switch blocks e sono richieste connessioni ridondanti

Mette a disposizione il doppio dei paths e della banda.

Ogni switch block è collegato in maniera ridondante a tutti gli switches di core consentendo coppie di path distinte al medesimo costo

ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) è lo standard per fornire all'abbonato un accesso digitale a banda più elevata di quanto non sia possibile con il modem

La linea telefonica terminale è costituita da un doppino su cui viene normalmente trasmessa la voce. Questa trasmissione si realizza applicando un filtro passa basso a 4 KHz

Tuttavia il doppino ha una capacità di banda che raggiunge il MHz (dipende dalla lunghezza del tratto terminale, che può variare in base alla situazione tra poche centinaia di metri a diversi Km)

Lo spettro disponibile viene suddiviso in 256 canali da 4 KHz (fino a 60 Kbps ciascuno):

- Il canale 0 viene riservato per la telefonia
- I successivi 4 canali non vengono utilizzati per evitare problemi di interferenza tra la trasmissione dati e quella telefonica
- I restanti canali vengono destinati al traffico dati. Alcuni per il traffico uscente (upstream), altri per il traffico entrante (downstream)

Il modem ADSL riceve i dati da trasmettere e li splitta in flussi paralleli da trasmettere sui diversi canali, genera un segnale analogico in banda base per ciascun flusso (con una modulazione QAM fino a 15 bit/ baud a 4000 baud/s) e li trasmette sui diversi canali utilizzando la modulazione di frequenza

In teoria l'ampiezza di banda disponibile consente un traffico pari a 13.44 Mbps, ma non tutti i canali sono capaci di trasmettere a piena banda. L'operatore decide quale servizio offrire.

Generalmente vengono dedicati alcuni canali per il traffico entrante, ed altri (meno) per il traffico uscente (da qui il termine *Asymmetric*)

Le singole portanti, modulate in QAM sono spaziate a 4.3 KHz.

La banda fra 26 e 138 KHz è riservata al traffico in upstream mentre quella da 138 a 1104 (552) KHz è riservata al downstream

Nella tradizionale architettura di accesso ADSL i servizi di connettività dati e telefonica sono erogati in un **central office** da cui si dipartono i collegamenti in rame di «ultimo miglio» verso gli utenti finali (local loop)

- Lo splitter separa in modo efficace la componente dati da quella voce
- Il DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) ha il compito è quello di moltiplicare centinaia o migliaia di accessi ADSL utente in un'unica interfaccia ad alta densità verso la rete di trasporto dati (tipicamente raccordata in fibra)
- La centrale telefonica gestisce la tradizionale commutazione nel mondo PSTN

Esistono molte soluzioni, in cui la fibra arriva fino ad un certo livello di "profondità" (vicinanza all'utente); da quel punto il collegamento prosegue in rame

Differenti soluzioni comportano diversi livelli di investimento e capacità offerta all'utente

Tipicamente quando il DSLAM si sposta verso gli utenti la telefonia viene fatta confluire sulla parte dati in logica Voice over IP (VoIP) eliminando la telefonia analogica tradizionale

L'architettura dipende anche dalla situazione urbanistica

FTTx indica delle architetture, non degli standard

Chiaramente il local loop in rame diventa il collo di bottiglia che limita la capacità di comunicazione dei collegamenti di accesso

- Maggiore e la lunghezza minore la capacità di trasmissione sul doppino (attenuazione e rumore)
- Bisogna quindi minimizzarne la lunghezza

Ciò si ottiene portando la fibra verso i punti di erogazione dell'accesso

Si parla quindi di "Fiber To The" ...

- FTTO: Office
- FTTC: Curb
- FTTCab: Cabinet
- FTTB: Building
- FTTH: Home
- FTTD: Desktop

Passive Optical Networks (PON)

Il mezzo di trasmissione resta la fibra ottica sull'intera tratta

La topologia è di tipo Point-to-Multipoint con struttura ad albero.

La rete di distribuzione ottica utilizza solo dispositivi che non hanno bisogno di essere alimentati:

- attenuatori e connettori ottici,
- splitter: un accoppiatori ottici

PON: OLT e ONU

• (Optical Line Terminal) OLT e (Optical Network Unit) ONU sono i dispositivi attivi che realizzano le trasmissioni:

- l'OLT, nel Central Office, collega la rete di accesso alle WAN;
- l'ONU interfaccia i dati di utente alla rete di accesso.

Tutte le ONU condividono lo stesso canale upstream

- Non possono scambiare dati fra loro
- Possiamo avere collisioni sullo splitter

PON: Splitter

Uno splitter consente di due fibre fuse fra loro in modo da portare il segnale su due diramazioni a scapito di un certo grado di attenuazione

Possiamo combinare più fusione in cascata ottenendo splitter multipli

A ogni split del segnale su due diramazioni, la sua potenza si riduce di $10\log(0.5)=3dB$

Perdita: $\sim 3dB \times \log_2(\#ONU_s)$

PON: gestione traffico downstream

Il downstream è definito come il traffico che scorre dall'OLT alle ONU.

Allo splitter il flusso dati trasmesso dall'OLT viene replicato in tutti i collegamenti destinati alle ONU.

L'OLS schedula il traffico su diversi time slot in logica TDM

L'ONU estrae selettivamente i pacchetti che le sono stati destinati

La rete si comporta come un mezzo condiviso.

PON: gestione traffico upstream

L'upstream è definito come il traffico che scorre dalle ONU all'OLT.

La rete si comporta come un collegamento punto-punto.

Il traffico in upstream è gestito utilizzando la multiplexazione a divisione di tempo (TDM)

L'accesso al mezzo è gestito mediante un meccanismo che fa uso di Polling

Ogni OLT riceve trame a potenze molto differenti

- Gestione attenta del sincronismo
- Controllo della qualità del segnale

A tutte le ONU viene assegnato un intervallo temporale

- Gli intervalli hanno tutti la stessa durata
- In alternativa la banda viene assegnata in funzione delle esigenze delle ONU

Le OLT inviano i dati in downstream su lunghezze d'onda di 1,510 nm

Le ONTs inviano il traffico upstream su lunghezze d'onda di 1,310 nm nei time slots loro assegnati

Finora gli standard proposti per le PON sono tre, e utilizzano unicamente la multiplexazione TDM.

1. BPON (ATM-based Broadband PON): ITU-T, serie G.983. Massimo bit rate in upstream 622Mbps.
2. GPON (Gigabit-capable PON): ITU-T, serie G.984. Bit rate massima di 1.25Gbps in upstream, 2.5Gbps in downstream.
3. EPON (Ethernet PON): IEEE 802.3ah. Bit rate di 1Gbps in entrambe le direzioni.

Reti wireless

Motivazioni:

- principalmente la diffusione di computer portatili, per offrire mobilità senza perdita di connessione
- un altro fattore è l'estensibilità della rete senza necessità di cablaggio

Bande trasmissive ISM

- lo strato fisico è realizzato con la trasmissione omnidirezionale in modulazione digitale di una portante
- esistono bande di frequenza dedicate all'utilizzo senza necessità di registrazione ed allocazione
 - queste bande si chiamano ISM (Industrial, Scientific, Medical)
 - la legislazione specifica determinate caratteristiche obbligatorie per utilizzare queste bande, come ad esempio la potenza massima di trasmissione e l'utilizzo di tecniche trasmissive spread spectrum
- le bande utilizzate nelle trasmissioni wireless sono a 2.4 GHz ed a 5 GHz

Vantaggi del Wireless

- Costi ridotti
- Meno problemi legati alle distanze (impiego di più AP o *wireless relaying*)
- Mobilità delle postazioni della rete

L'IEEE ha definito diversi standard nel corso del tempo per le trasmissioni wireless

- Questi standard sono
 - IEEE 802.11 con tre differenti tecniche trasmissive (IR, FHSS, DSSS) e velocità ad 1 o 2 Mbps nella banda a 2.4 GHz
 - IEEE 802.11b a velocità 1, 2, 5.5 e 11 Mbps nella banda a 2.4 GHz
 - IEEE 802.11a con velocità fino a 54 Mbps nella banda a 5 GHz

- IEEE 802.11g fino a 54 Mbps nella banda a 2.4 GHz
- IEEE 802.11n (WiFi 4) fino a 300 Mbps con tecnologia MIMO nella banda a 2.4 e 5 GHz
- IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) fino a 1 Gbps con tecnologia MIMO nella banda a 5 GHz
- IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) fino a 10 Gbps con tecnologia MIMO nella banda a 1, 5 e 7 GHz

Tecniche a divisione di spettro (SST):

1. FH – salto in frequenza (Frequency Hopping)
2. DS – sequenza diretta (Direct Sequence)

Occupano più banda del necessario ma

- Aumentano l'immunità al rumore (DS)
- Aumentano la sicurezza della comunicazione

802.11 FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum):

utilizza 79 canali ad 1 MHz a partire da 2.4 GHz con la tecnologia Frequency Hopping: la trasmissione salta ad intervalli temporali definiti (minori di 400 ms) da una frequenza ad un'altra secondo una sequenza pseudocasuale nota a tutti

la banda disponibile è 1 MHz

questa tecnica fornisce sicurezza (impossibile seguire la comunicazione senza conoscere la sequenza pseudocasuale) e solidità contro il multipath fading (quando arriva il segnale riflesso la ricezione è già spostata su un altro canale)

supporta standard ad 1 e 2 Mbps, con codifiche a 2 o 4 simboli con (G)FSK

802.11 DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

Per far fronte al rumore si usa la tecnica "chipping":

Ogni bit è convertito in una serie di bit ridondanti (chip)

- il tempo di un bit viene suddiviso in m intervalli temporali
- il valore trasmesso è la combinazione in or esclusivo dei bit dei dati (di durata T_b) combinati con una sequenza pseudocasuale o predefinita di bit, ciascuno di durata $T_c = T_b/m$, detti chip

lo standard opera nella banda a 2.4 GHz ed utilizza una sequenza fissa di 11 chip (sequenza di Barker) per codificare un bit di dati

la banda disponibile è divisa in 14 canali di 5 MHz, a partire da 2.412 GHz

- le stazioni debbono essere configurate per determinare il canale utilizzato
 - non tutti i canali sono disponibili in tutti i paesi
 - in USA il canale 14 è proibito, in Spagna sono ammessi solo il 10 e l'11, in Italia sono tutti ammessi
- le antenne trasmettono a 11 MHz; con modulazioni PSK a 2 o 4 livelli e 11 chip per bit lo standard permette trasmissioni a 1 o 2 Mbps

- poiché l'ampiezza di banda del segnale inviato è intorno ai 22 MHz, nonostante i filtri dell'elettronica per non interferire due trasmissioni indipendenti nella stessa area debbono utilizzare canali separati da almeno 5 canali

DSSS:

- Codifica ridondante è più immune ai rumori
- Maggiore spreco di banda (30 MHz per canale)
- Possibilità di arrivare a 11 Mbps

FHSS:

- Più sicura
- Molto limitata in banda (1 MHz)
- Impossibile usarla nel Wi-Fi ad alti bit-rate

Dynamic Rate Shifting:

- Data Rates adattati automaticamente alla natura del canale
- Quando:
 - Luoghi rumorosi
 - Necessarie distanze maggiori

Come esempio consideriamo tre stazioni A, B e C tali che B sia a portata di A e di C, ma A e C non possano rilevare le rispettive trasmissioni

Se C sta trasmettendo dati a B, A non potrà rilevare l'occupazione del canale in quanto è fuori portata

A inizierà a trasmettere ed il suo segnale arriverà a B interferendo con i dati che C sta trasmettendo

Questo è detto problema della **stazione nascosta**

Se nelle stesse ipotesi supponiamo che A stia trasmettendo verso un'altra destinazione, e che B desideri inviare dati a C

B ascolta il canale e lo trova occupato, quindi non trasmette

In realtà il canale sarebbe disponibile (nella ipotesi che la destinazione della trasmissione di A sia fuori dalla portata di B) perché in C i segnali non interferirebbero

Questo è il problema della **stazione esposta**

L'inefficacia del protocollo CSMA deriva dal fatto che per le trasmissioni wireless quello che conta è l'interferenza in prossimità del ricevente, mentre l'analisi della portante che può fare una stazione è solo in prossimità di sé stessa, cioè del trasmittente

Il protocollo **MACA** (Multiple Access with Collision Avoidance) tenta di risolvere il problema nel seguente modo:

- il trasmittitore A invia un piccolo frame (RTS: Request To Send) al ricevitore B
 - il frame RTS contiene la richiesta di trasmettere un frame a B, specificandone la lunghezza
- il ricevitore B trasmette un piccolo frame di conferma (CTS: Clear To Send) ad A, con le stesse informazioni del RTS
- quando A riceve il CTS trasmette il frame di dati a B

Tutte le stazioni che ricevono il frame RTS sanno che

- B risponderà con un CTS
- in seguito, A trasmetterà un frame di dati di lunghezza specificata in RTS

Queste stazioni attenderanno senza trasmettere un tempo sufficiente alla trasmissione dei dati

Le stazioni nascoste non vedono il frame RTS, ma vedono il frame CTS, quindi sanno che

- trasmesso il CTS B dovrà ricevere il frame di dati, di lunghezza specificato nel CTS

Queste stazioni attenderanno senza trasmettere per il tempo necessario alla trasmissione del frame di A (che loro non vedranno in quanto nascoste, ma sanno che ci sarà)

Collisioni saranno possibili se un frame RTS venisse trasmesso contemporaneamente verso una destinazione collocata nel campo di ricezione dei due trasmittenti: i due frame andranno perduti

In questo caso la stazione che non riceve il CTS dopo un timeout applica l'algoritmo di backoff esponenziale binario e ritenta

Exponential Backoff Algorithm 1

Risolve i contenziosi del canale

- Ogni stazione sceglie un numero random (n) compreso tra 0 e m
- Attende ($n \times \text{slot time}$) prima di riprovare
- Ad ogni collisione m aumenta in maniera esponenziale
- Slot Time:
 - definito in modo che ogni stazione possa determinare se un'altra ha acceduto al canale nello slot precedente
 - questo riduce $P(\text{collisione})$ della metà

Exponential Backoff Algorithm 2

Eseguito nei seguenti casi:

- Tx trova il mezzo occupato
- Dopo ogni ritrasmissione
- Dopo una trasmissione andata a buon fine

Non viene eseguito:

- una stazione vuole tx un nuovo pacchetto ed il mezzo è libero

Il protocollo **MACAW** (MACA per Wireless) introduce migliorie specifiche per le applicazioni wireless

- nella maggior parte dei casi la mancanza di ACK a livello 2 provoca la ritrasmissione solo a livello 4, con grossi ritardi
- per questo motivo è stato introdotto l'utilizzo di frame di ACK con meccanismo stop-and-wait

- si è anche notato che CSMA può essere utilizzato per impedire ad una stazione di trasmettere un RTS durante la trasmissione di un altro RTS verso la stessa destinazione
- infine, si è modificato l'algoritmo di backoff in modo da applicarlo separatamente ai diversi flussi trasmissivi

802.11 supporta due modalità operative:

- DCF (Distributed Coordination Function)
 - prevede la comunicazione tra stazioni senza un arbitraggio centralizzato
 - questa modalità prevede la contesa del mezzo e la gestione delle collisioni
 - nota come rete ad hoc
- PCF (Point Coordination Function)
 - prevede che ci sia una stazione base che coordina la trasmissione di tutti
 - in questa modalità non ci sono collisioni perché l'ordine delle trasmissioni è determinato dalla stazione di controllo

Tutte le schede wireless devono supportare la trasmissione DCF, mentre quella PCF è opzionale (ma molto diffusa)

Protocollo in modalità DCF

In questa modalità si utilizza il protocollo CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance) che opera in due modi

- la stazione controlla se il canale è libero (per quello che può vedere)
 - se è libero trasmette (senza collision detection)
 - se è occupato, aspetta che si liberi e trasmette
 - se si verifica una collisione (rilevata) utilizza il backoff esponenziale binario e ritenta
- la seconda modalità è derivata da MACAW, con utilizzo di RTS, CTS ed ACK per ogni frame trasmesso
 - l'interfaccia della stazione che rileva un RTS o un CTS rivendica per sé un canale virtuale NAV (Network Allocation Vector) che impedisce alla stazione di trasmettere per tutto il tempo che deve durare la trasmissione in preparazione, fino all'ACK

Poiché le reti wireless sono molto rumorose, il protocollo prevede la possibilità di spezzare il frame in frammenti, ciascuno trasmesso e riscontrato individualmente

i frammenti vengono inviati tutti di seguito, senza bisogno di invio di RTS

le stazioni in ascolto utilizzeranno il NAV per attendere solo fino al primo riscontro: per evitare collisioni con gli altri frammenti si utilizza un meccanismo che vedremo più avanti

Protocollo in modalità PCF

Nella modalità PCF la stazione base sonda le altre stazioni per vedere se hanno frame da trasmettere

La trasmissione è regolata ed autorizzata dalla stazione base e non avvengono collisioni

Il protocollo specifica la modalità di interrogazione, e prevede che le stazioni si registrino con la stazione base per entrare nel meccanismo delle interrogazioni

La stazione base regola tutto il meccanismo della trasmissione, comprese le informazioni sulle sequenze di salto di frequenza (per FHSS) e le temporizzazioni

Il protocollo, ottimizzato per i computer portatili, prevede anche che la stazione base possa imporre alla stazione mobile di mettersi in modalità di sospensione, al fine di risparmiare batteria

802.11 prevede un meccanismo di attesa a tempi differenziati che permette la **coesistenza** di PCF e DCF

– terminata una trasmissione, inizia un periodo di tempo detto SIFS (Short InterFrame Spacing), dopo il quale può trasmettere solo:

- una stazione che ha ricevuto l'ACK di un frammento ed invia un altro frammento (in questo modo la stazione potrà trasmettere tutti i frammenti senza perdere il controllo del canale)
 - una stazione che ha ricevuto un RTS ed invia un CTS (gli altri aspettano)
 - una stazione che ha ricevuto una interrogazione (in modalità PCF) e può rispondere (solo lei)
- in ogni caso c'è sempre al massimo una stazione che può trasmettere dopo un intervallo SIFS, quindi non ci possono essere collisioni
- l'intervallo SIFS permette alle stazioni con trasmissioni in corso (dopo un frammento, dopo un RTS, dopo una interrogazione) di portare a termine la trasmissione
- il secondo intervallo temporale in ordine di lunghezza è detto PIFS (PCF IFS); se nessuno ha trasmesso tra lo scadere del SIFS e lo scadere del PIFS, sono autorizzate le trasmissioni che la stazione base utilizza in modalità PCF per interrogare le stazioni
- in questo modo la stazione base ha la priorità su tutto il traffico "non in corso"

- esiste un meccanismo per evitare che una stazione base allochi per sempre il canale con trasmissioni di interrogazione, lasciando spazio alle eventuali trasmissioni DFS
- il terzo intervallo di tempo è detto DIFS (DCF IFS): se nessuno ha trasmesso frame PCF entro la scadenza del DIFS, iniziano le regole di contesa relative alle trasmissioni in modalità DCF
 - questo è il momento per poter trasmettere un frame RTS
- L'ultimo intervallo (EIFS: Extended IFS) è utilizzato (alla priorità più bassa) dalle stazioni che hanno ricevuto un frame danneggiato per annunciare il fatto

CD non utilizzabile in WLAN:

- ***Non si è sicuri che ogni WT ascolti tutte le altre WT della BSS***

CA Collision Avoidance

- Tx ascolta il canale
 - Carrier Sense (CS)
 - Se Tx trova il mezzo libero per un tempo DIFS (Distributed Inter Frame Space) trasmette
 - Tx trasmette un breve messaggio di controllo RTS (Request to Send)
 - Lunghezza del MSG
 - Mittente e Destinatario
 - L'AP riceve l' RTS e risponde, dopo un tempo SIFS, con un breve messaggio CTS (Clear to Send)
- Tutte i WT che "vedono" i messaggi RTS e/o CTS settano il NAV-Network Allocation Vector alla durata della trasmissione
- Virtual Carrier Sense
- Nota:
 - CTS è visto sicuramente da tutte le WT della BSS
 - Tx riceve il CTS ed inizia la sua Tx
 - Rx riceve il msg e controlla il CRC: se OK risponde con un ACK
 - Se Tx non riceve ACK entro un tempo T1, ritrasmette il msg

CA: Caratteristiche

- Brevi messaggi (RTS e CTS):
 - a) Minor P() di collisioni
 - b) Minor costo di una collisione
- Ogni WT sa che il canale è occupato
 - RTS è visto dai WT vicini a Tx
 - CTS è visto da tutti (mandato dall'AP)
- Se il pacchetto dati è piccolo non conviene usare RTS/CTS

Esistono tre tipi di **frame**

- dati: dedicati al trasferimento dei dati dei protocolli superiori
- gestione: dedicati alle funzioni di gestione della cella, quali associazione, autenticazione, interrogazione
- controllo: sono i frame ACK, RTS, CTS

La struttura del frame di dati è costituita da diversi campi

- frame control: definisce la versione del protocollo, il tipo di frame, se il frame proviene o è diretto alla rete di distribuzione (Ethernet, ad esempio), se sarà seguito da altri frammenti, se è una ritrasmissione, se è stata utilizzata crittazione
- durata: specifica per quanto tempo il frame occuperà il canale
- quattro indirizzi, che definiscono
 - destinazione del frame (per il recapito)
 - sorgente del frame (usato per l'ack)
 - stazione base di partenza del frame
 - stazione base di arrivo del frame
- queste distinzioni servono, ad esempio, per distinguere il fatto che il frame 802.11 è trasmesso da A verso l'access point B, ma la destinazione è la stazione C che si trova sulla rete cablata oltre l'access point
- Il campo sequenza numerica i frammenti
- Infine, i dati (fino a 2312 byte) ed il checksum con CRC a 32 bit

I frame di gestione hanno un formato simile, ma solo due campi address in quanto il loro traffico è confinato entro la cella

I frame di controllo non hanno campo dati né sequenza; l'informazione del controllo inviato (RTS, CTS, ACK) è contenuto nel campo subtype dei byte di controllo di frame

Modalità *ad hoc* (o *infrastructureless*)

I computer possono comunicare direttamente l'uno con l'altro solo grazie alla propria interfaccia di rete *wireless*

- Semplice da configurare
- È semplice aggiungere nuove postazioni
- Non è possibile alcuna gestione centralizzata
- Ideale per piccole reti

Modalità AP (o *infrastructured*)

La comunicazione in rete avviene grazie ad **Access Point (AP)** hardware o software che sono parte integrante della rete WLAN, e per mezzo delle interfacce di rete *wireless* installate e configurate su ciascuna postazione in modo da comunicare con specifici AP per collegarsi a specifiche WLAN

- Più complessa da configurare
- Richiede AP hardware o software nel progetto della rete
- È possibile la gestione centralizzata (a vantaggio anche della sicurezza)
- Ideale per reti più grandi

Le reti wireless sono connesse alla rete cablata (una qualche rete 802.x) tramite una stazione che ha funzioni di bridge (converte il protocollo tra 802.11 ed il protocollo della rete cablata)

- Questa stazione è detta **access point**
- L'access point ha anche funzioni di stazione di controllo della cella per le trasmissioni in modalità PCF
- È possibile realizzare topologie di estensione della rete tramite una catena di access point che rimpallano la trasmissione wireless di un frame fino a raggiungere la rete cablata

802.11 - Architettura

- Il sistema è suddiviso in celle (BSS – Basic Service Set)
- Ogni cella ha il suo Access Point (AP)
- Ogni WT (Wireless Terminal) è dentro una cella e agganciato ad un AP
- Gli AP sono collegati ad un Distribution System (DS)
- L'insieme delle celle può essere visto come una rete (ESS – Extended Service Set)

AP

- Gestiscono la cella (BSS)
- Interfacciano WLAN con altre LAN (bridge)
- Implementati Hw e Sw
- Esistono AP-Router (bridging a livello di rete)

- Es. router wifi-ADSL

WT - Terminali mobili

- Notebook
- Cellulari

Mode Ad-hoc

comunicazione punto a punto tra due WT senza passare da un AP (IBSS, Independent-BSS)

• Infrastructure Mode

i terminali comunicano tra loro tramite un AP (BSS-ESS)

Un WT può passare da un AP ad un altro in modo del tutto trasparente (**roaming**)

Ogni AP periodicamente invia un **frame beacon**, per notificare ai client sia la propria presenza, sia informazioni sulla configurazione e sulla sicurezza.

I client periodicamente inviano in *broadcast* e su tutti i canali, una **probe-request frame** attendendosi una **probe-response frame** dagli AP vicini, con lo scopo di individuare potenziali destinatari di *roaming*, per compilarli opportune liste da consultare per il roaming.

L'**autenticazione 802.1x** è una soluzione di livello 2 per gestire l'accesso alla rete, basato sul controllo a livello di porta usando le **Port Access Entity (PAE)**. Sostanzialmente definisce un *framework* per l'autenticazione che utilizza protocolli esistenti, come **EAP** e **RADIUS**, trasformando i messaggi di diversi tipi di autenticazione in appropriati *frame*.

I protocolli di autenticazione che possono essere impiegati sono essenzialmente di due tipi:

- **End to End**: quando sono coinvolte due macchine collegate virtualmente, ma non fisicamente comunicanti (ad esempio **EAP**).
- **Point to Point**: quando sono coinvolte due macchine direttamente connesse (ad esempio EAPoL, ma anche, astrattamente **RADIUS**).

Nel *framework* 802.1x vengono definiti 3 attori del processo di autenticazione:

Supplicant (PAE) chi desidera accedere ai servizi della rete fornendo le credenziali

Authenticator (PAE) chi applica le *security policies* prima di concedere l'accesso alla rete

Authentication Server chi verifica le credenziali di accesso alla rete

EAP è un protocollo di trasporto di meccanismi generici di autenticazione tra due *peer*. Da solo non realizza nessuna autenticazione, ma dentro ad EAP possono essere veicolati dei metodi di autenticazione specifici, si hanno così:

- EAP-MD5
- LEAP
- PEAP
- EAP-MSCHAPv2
- EAP-TLS
- EAP-TTLS

RADIUS è un protocollo **AAA (Authentication, Authorization and Accounting)** che si basa su un modello *client/server*. Anche RADIUS è un protocollo di trasporto di meccanismi di autenticazione, ma può veicolare anche altri contenuti (*attributi RADIUS*) che servono a scopi specifici.

Anche se lo standard 802.1x non specifica quale tipo di server di autenticazione deve essere implementato, RADIUS rappresenta lo standard *de facto* in 802.1x, rendendo sicuro il canale tra *Authentication Server* e *Authenticator*.

Autenticazione 802.1x: le fasi

Fase 1

• Il *Supplicant*, contenuto nel terminale WN, richiede all'*Authenticator*, contenuto nell'AP, l'accesso alle risorse della LAN. L'*Authenticator* richiede al terminale WN le credenziali d'accesso. In questa fase la connessione alla wired LAN tra *Supplicant* ed *Authenticator* avviene tramite la **uncontrolled port** che permette **solo traffico EAP**

Fase 2

• L'*Authenticator* inoltra le credenziali all'*Authentication Server* attraverso la **uncontrolled port** usando il protocollo **RADIUS**.

Fase 3

• Dopo l'avvenuta autenticazione, l'*Authentication Server* comunica all'*Authenticator* di spostare il terminale WN sulla **controlled port** permettendo l'accesso alle risorse della LAN.