

Reti di Calcolatori  
*definizioni, formule ed esempi*

Pietro Barbiero

Quest'opera contiene informazioni tratte da wikipedia (<http://www.wikipedia.en>) e dalle dispense relative al corso di Reti di Calcolatori tenuto dal professor del Dipartimento di del Politecnico di Torino (IT).



Quest'opera è stata rilasciata con licenza Creative Commons Attribuzione - Non commerciale - Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale. Per leggere una copia della licenza visita il sito web <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

# Indice

<b>I</b>	<b>Introduzione</b>	<b>11</b>
<b>1</b>	<b>Topologia e servizi</b>	<b>13</b>
1.1	Comunicazione	13
1.2	Telecomunicazione	13
1.3	Funzioni di rete	13
1.3.1	Segnalazione	13
1.3.2	Commutazione	13
1.3.3	Trasmissione	13
1.3.4	Gestione	13
1.4	Terminologia	14
1.4.1	Mezzo trasmissivo	14
1.4.2	Canale di trasmissione	14
1.4.3	Banda (o velocità di trasmissione)	14
1.4.4	Capacità di un canale	14
1.4.5	Traffico offerto	14
1.4.6	Traffico smaltito (throughput)	14
1.5	Topologia di una rete	14
1.5.1	Nodo	14
1.5.2	Canale	14
1.5.2.1	Canale punto-punto	15
1.5.2.2	Canale multi-punto	15
1.5.2.3	Canale broadcast	15
1.5.3	Topologia fisica	15
1.5.4	Topologia logica	15
1.6	Rappresentazione grafica di una rete	16
1.6.1	Topologie lineari	16
1.6.1.1	Rete lineare aperta (o daisy-chain)	16
1.6.1.2	Rete ad anello	16
1.6.1.3	Rete ad albero	16
1.6.1.4	Rete a stella attiva	17
1.6.1.5	Rete a stella passiva	17
1.6.2	Topologie a maglia	18
1.6.2.1	Rete a maglia completa	18
1.6.2.2	Rete a maglia parziale	18
1.6.3	Rete a bus	19
1.7	Servizi di rete	19
1.7.1	Rete dedicata	20
1.7.2	Rete integrata	20
1.7.3	Classificazione dei servizi di rete	20
1.8	Modelli di realizzazione di teleservizi	20
1.8.1	Modello client-server	20
1.8.2	Modello peer-to-peer	20

<b>2</b>	<b>Modi di trasferimento nelle reti</b>	<b>21</b>
2.1	Condivisione di canale	21
2.1.1	Multiplicazione	21
2.1.1.1	Frequency Division Multiplexing (FDM)	21
2.1.1.2	Time Division Multiplexing (TDM)	21
2.1.1.3	Code Division Multiplexing (CDM)	21
2.1.1.4	Multiplicazione di spazio	21
2.1.1.5	Multiplicazione statistica	22
2.1.2	Accesso multiplo	22
2.2	Commutazione (condivisione di nodo)	22
2.3	Commutazione di circuito	22
2.3.1	Topologia del nodo	23
2.3.2	Prestazioni	23
2.4	Commutazione di pacchetto datagram	23
2.4.1	Store and forward (ufficio postale)	24
2.4.2	Ritardi	24
2.4.2.1	Tempo di trasmissione (canale)	24
2.4.2.2	Tempo di propagazione (canale)	24
2.4.2.3	Tempo di trasferimento di pacchetto	24
2.4.2.4	Tempo di elaborazione e coda (nodo)	24
2.4.3	Dimensione dei pacchetti	25
2.4.3.1	Pipeline (conduttura)	25
2.4.3.2	Ritardo di pacchettizzazione	25
2.4.3.3	Probabilità di errore	25
2.4.3.4	Percentuale di informazione di controllo	26
2.4.4	Prestazioni	26
2.5	Commutazione di pacchetto a circuito virtuale	26
2.6	<i>Esercizi</i>	26
2.6.1	Pipeline	26
2.6.2	Tempo di trasferimento di un pacchetto	27
<b>3</b>	<b>Segnalazione e qualità delle reti</b>	<b>29</b>
3.1	Tipologie di canali	29
3.1.1	Canale controllato	29
3.1.2	Canale controllante	29
3.2	Segnalazione	29
3.2.1	Segnalazione associata al canale	29
3.2.1.1	Segnalazione associata al canale in banda	29
3.2.1.2	Segnalazione associata al canale fuori banda	29
3.2.2	Segnalazione a canale comune	29
3.3	Gestione	30
3.4	Indici di qualità di servizio	30
3.4.1	Reti CBR	30
3.4.2	Reti VBR	30
<b>II</b>	<b>Architetture di rete</b>	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>Modello OSI</b>	<b>33</b>
4.1	Protocollo di comunicazione	33
4.1.1	Composizione di protocolli	33
4.2	Architettura di rete	33
4.3	Modello OSI	33

4.3.1	Struttura OSI . . . . .	33
4.3.1.1	Sistema . . . . .	33
4.3.1.2	Strato (o livello) . . . . .	34
4.3.1.3	Sottosistema . . . . .	34
4.3.1.4	Entità . . . . .	34
4.3.1.5	Service Access Point (SAP) . . . . .	34
4.3.1.6	Connessione . . . . .	34
4.3.1.7	Protocollo . . . . .	34
4.3.1.8	Servizi di rete: CO e CL . . . . .	34
4.3.1.9	N-PDU . . . . .	34
4.3.1.10	Segmentazione . . . . .	35
4.3.2	Strati OSI . . . . .	35
4.3.2.1	Strato 1 o fisico . . . . .	35
4.3.2.2	Strato 2 o collegamento . . . . .	36
4.3.2.3	Strato 3 o rete . . . . .	36
4.3.2.4	Strato 4 o trasporto . . . . .	36
4.3.2.5	Strato 5 o sessione . . . . .	36
4.3.2.6	Strato 6 o presentazione . . . . .	36
4.3.2.7	Strato 7 o applicazione . . . . .	36
<b>5</b>	<b>Protocolli a finestra</b>	<b>37</b>
5.1	Codifica di canale (controllo errori) . . . . .	37
5.1.1	Bit di parità . . . . .	37
5.1.2	Parità di riga e colonna . . . . .	37
5.1.3	Codice a ripetizione . . . . .	37
5.1.4	Classificazione . . . . .	37
5.1.4.1	Forward Error Correction (FEC) . . . . .	37
5.1.4.2	Automatic Retransmission reQuest (ARQ) . . . . .	37
5.2	ACK (acknowledgment) . . . . .	37
5.2.1	Semantica degli ACK . . . . .	38
5.2.2	Piggybacking . . . . .	38
5.3	Finestre . . . . .	38
5.3.1	Finestra di trasmissione . . . . .	38
5.3.1.1	Classificazione dei pacchetti . . . . .	38
5.3.1.2	Sliding window . . . . .	38
5.3.2	Finestra di ricezione . . . . .	38
5.3.2.1	Classificazione dei pacchetti . . . . .	39
5.3.3	Posizioni relative $W_T - W_R$ . . . . .	39
5.4	RTT (Round Trip Time) . . . . .	39
5.5	Ciclo di trasmissione . . . . .	39
5.6	Efficienza . . . . .	39
5.7	Troughput . . . . .	39
5.8	Protocollo a finestra . . . . .	39
5.8.1	Modello di rete . . . . .	40
5.8.2	Stop&wait . . . . .	40
5.8.2.1	Efficienza . . . . .	41
5.8.2.2	Alternating bit protocol . . . . .	41
5.8.2.3	Canale non sequenziale . . . . .	41
5.8.3	Go back N . . . . .	42
5.8.3.1	Efficienza . . . . .	42
5.8.3.2	Dimensione di $W_T$ . . . . .	42
5.8.4	Selective repeat . . . . .	42

5.8.4.1	Dimensione di $W_T$ e $W_R$ . . . . .	43
5.8.4.2	Vantaggi rispetto al go back N . . . . .	43
5.9	<i>Esercizi</i> . . . . .	43
5.9.1	Stop&wait . . . . .	43
<b>III</b>	<b>Strato fisico</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>Strato fisico</b>	<b>47</b>
6.1	Mezzi trasmissivi . . . . .	47
6.1.1	Caratteristiche generali . . . . .	47
6.1.2	Mezzi elettrici . . . . .	47
6.1.2.1	Parametri elettrici . . . . .	48
6.1.3	Mezzi ottici . . . . .	48
6.1.4	Radio . . . . .	48
6.2	Trasmissione su mezzi fisici . . . . .	49
6.2.1	Codifiche di linea . . . . .	49
6.2.1.1	Codifica unipolare . . . . .	49
6.2.1.2	Codifica polare . . . . .	49
6.2.1.3	Codifica bipolare . . . . .	49
6.2.1.3.1	Codifica 8B6T . . . . .	49
6.2.1.3.2	Codifiche nBmB . . . . .	49
6.2.2	Modulazioni digitali . . . . .	50
<b>7</b>	<b>Reti di accesso e di trasporto</b>	<b>51</b>
7.1	Stream . . . . .	51
7.1.1	Downstream . . . . .	51
7.1.2	Upstream . . . . .	51
7.2	Collegamento utente-rete . . . . .	51
7.3	Reti di accesso . . . . .	51
7.3.1	Linea DSL . . . . .	51
7.3.1.1	Apparati delle linee DSL . . . . .	52
7.3.2	Architettura PON . . . . .	52
7.3.3	Architettura HFC . . . . .	52
7.3.4	Rete cellulare . . . . .	52
7.3.4.1	Generazioni delle reti cellulari . . . . .	53
7.3.5	Reti satellitari . . . . .	53
7.4	Reti di trasporto . . . . .	54
7.4.1	SONET/SDH . . . . .	54
<b>IV</b>	<b>Strato collegamento</b>	<b>55</b>
<b>8</b>	<b>Strato collegamento</b>	<b>57</b>
8.1	Trama . . . . .	57
8.2	Protocolli . . . . .	57
8.2.1	Uso dei protocolli . . . . .	57
8.2.2	Caratteristiche delle trame . . . . .	57
8.2.2.1	Stuffing . . . . .	58
8.3	Multipolazione di protocolli di strato superiore . . . . .	58

<b>9</b>	<b>Protocolli di strato 2 per reti pubbliche</b>	<b>59</b>
9.1	PPP	59
9.1.1	Incapsulamento	59
9.1.2	PPP-LCP	59
9.1.3	PPP-NCP	60
9.2	LAPF di Frame Relay	60
9.3	ATM	60
9.3.1	Caratteristiche delle celle	60
9.3.2	AAL	60
9.3.2.1	Caratteristiche delle celle	61
<b>10</b>	<b>Protocolli di strato 2 per reti locali (private)</b>	<b>63</b>
10.1	Sotto strati	63
10.2	LLC	63
10.2.1	Formato PDU	63
10.3	MAC	64
10.3.1	Indirizzo MAC	64
10.3.2	Famiglie di protocolli ad accesso multiplo	64
10.3.3	Funzionamento	64
10.4	CSMA	65
10.4.1	Finestra di vulnerabilità	65
10.4.2	Backoff	65
10.4.3	Dominio di collisione	65
10.4.4	CSMA-Collision Detection (CSMA-CD)	65
10.4.5	CSMA-Collision Avoidance (CSMA-CA)	66
10.5	Protocollo IEEE 802.3 (Ethernet)	66
10.5.1	Formato delle trame Ethernet	66
10.5.2	Formato delle trame IEE 802.3	67
10.5.3	Prestazioni	67
10.5.4	Rete IEE 802.3 oggi	67
<b>V</b>	<b>Strato rete</b>	<b>69</b>
<b>11</b>	<b>Strato rete</b>	<b>71</b>
11.1	Limiti dello strato collegamento	71





# Elenco delle figure

1.1	Reti lineari . . . . .	17
1.2	Reti a maglia . . . . .	18
1.3	Rete a bus . . . . .	19
2.1	Grafico spazio temporale . . . . .	22
2.2	Topologia del nodo . . . . .	23
2.3	Topologia del nodo . . . . .	24
2.4	Grafico spazio temporale . . . . .	25
4.1	Struttura OSI . . . . .	35
5.1	Protocollo a finestra (modello ARQ) . . . . .	40
5.2	Stop and wait . . . . .	41



# Parte I

## Introduzione



# Capitolo 1

## Topologia e servizi

### 1.1 Comunicazione

Una comunicazione è un trasferimento di informazioni secondo convenzioni prestabilite

### 1.2 Telecomunicazione

Una telecomunicazione è un trasferimento a distanza di segnali che rappresentano informazioni

### 1.3 Funzioni di rete

Una funzione di una rete di telecomunicazioni è un'operazione svolta all'interno della rete al fine di offrire servizi

#### 1.3.1 Segnalazione

La segnalazione è una funzione di rete che trasmette le informazioni che riguardano: l'apertura, il controllo e la chiusura delle connessioni della rete (digitazione del numero telefonico)

#### 1.3.2 Commutazione

La commutazione è una funzione di rete che gestisce la connessione tra due nodi di una rete che necessitano di un canale di trasmissione (può essere manuale o circuitale)

#### 1.3.3 Trasmissione

La trasmissione è una funzione di rete che gestisce il trasferimento di segnali tra i nodi della rete

#### 1.3.4 Gestione

La gestione è una funzione di rete che:

- permette l'allacciamento all'interno della rete di nuovi utenti
- aggiorna la rete
- riconfigura la rete in caso di guasti
- monitora le prestazioni della rete

- controlla gli apparati della rete

## 1.4 Terminologia

### 1.4.1 Mezzo trasmissivo

Un mezzo trasmissivo è un mezzo fisico in grado di trasportare un segnale

### 1.4.2 Canale di trasmissione

Un canale di trasmissione è una concatenazione di porzioni di mezzi trasmissivi

### 1.4.3 Banda (o velocità di trasmissione)

La banda di una rete telematica è una misura della quantità di dati (bit) che possono essere trasferiti in un dato periodo di tempo (s)

$$B \left[ \frac{\text{bit}}{\text{s}} \right] \quad (1.1)$$

### 1.4.4 Capacità di un canale

La capacità di un canale  $C$  è la banda massima di un canale di trasmissione (è limitata superiormente dalla banda fisica del canale)

### 1.4.5 Traffico offerto

Il traffico offerto è la quantità di dati per unità di tempo che una sorgente cerca di inviare in una rete

### 1.4.6 Traffico smaltito (throughput)

Il traffico smaltito è la porzione di traffico offerto che viene consegnata correttamente a destinazione dalla rete

$$\text{throughput} \leq C \quad (1.2)$$

## 1.5 Topologia di una rete

La topologia di una rete di telecomunicazione è la struttura della disposizione dei nodi e dei canali della rete

### 1.5.1 Nodo

Un nodo di una rete di telecomunicazione è un punto in cui avviene una commutazione

### 1.5.2 Canale

Un canale è un mezzo di trasmissione di segnali (unidirezionale o bidirezionale)

### **1.5.2.1 Canale punto-punto**

Un canale punto-punto è un canale che collega solo due nodi

### **1.5.2.2 Canale multi-punto**

Un canale multi-punto è un canale in cui più nodi (slaves) sono collegati ad un unico nodo (master)

### **1.5.2.3 Canale broadcast**

Un canale broadcast è un canale condiviso da tutti i nodi di una rete: l'informazione inviata da un nodo è ricevuta da tutti gli altri

## **1.5.3 Topologia fisica**

La topologia fisica di una rete è la topologia che riguarda i mezzi fisici di trasmissione

## **1.5.4 Topologia logica**

La topologia logica di una rete è la topologia che riguarda i canali di connessione logici (anche se non fisici) tra i nodi

## 1.6 Rappresentazione grafica di una rete

Una rete telematica può essere rappresentata graficamente tramite un grafo i cui vertici coincidono con i nodi della rete e i cui archi coincidono con i canali di trasmissione

$$G(V, A) : \quad V = \{\text{nodi}\}, A = \{\text{canali}\} \quad (1.3)$$

Gli archi diretti (orientati) coincidono con canali unidirezionali; gli archi non diretti (non orientati) coincidono con canali bidirezionali

### 1.6.1 Topologie lineari

#### 1.6.1.1 Rete lineare aperta (o daisy-chain)

Una rete lineare aperta è una rete in cui da ogni nodo partono due canali tranne dal primo e dall'ultimo nodo dai quali parte un solo canale; le sue caratteristiche sono:

- il numero dei canali è uguale al numero dei nodi meno uno:  $C = N - 1$
- vantaggi: numero di canali contenuto
- svantaggi: bassissima tolleranza ai guasti; solo i nodi adiacenti solo velocemente raggiungibili; a partire da un nodo esiste un solo modo per raggiungerne un altro

#### 1.6.1.2 Rete ad anello

Una rete ad anello è una rete lineare chiusa in cui ogni nodo è collegato al nodo precedente e al nodo successivo tramite due appositi canali; le sue caratteristiche sono:

- il numero dei canali è uguale al numero dei nodi:  $C = N$
- vantaggi: numero di canali contenuto; discreta tolleranza ai guasti; a partire da un nodo esistono due modi per raggiungerne un altro (se i canali sono non diretti)
- svantaggi: solo i nodi adiacenti solo velocemente raggiungibili

In caso di un solo guasto la rete ad anello è la più semplice topologia che garantisce la sopravvivenza della rete (a capacità dimezzata)

#### 1.6.1.3 Rete ad albero

Una rete ad albero è una rete lineare complessa formata dalla congiunzione di più catene lineari che non si intersecano; le sue caratteristiche sono:

- il numero dei canali è uguale al numero dei nodi meno uno:  $C = N - 1$
- vantaggi: numero di canali contenuto; discreta tolleranza ai guasti
- svantaggi: fragilità della rete in corrispondenza dei nodi padre; solo i nodi adiacenti solo velocemente raggiungibili; a partire da un nodo esiste un solo modo di raggiungerne un altro



#### 1.6.1.4 Rete a stella attiva

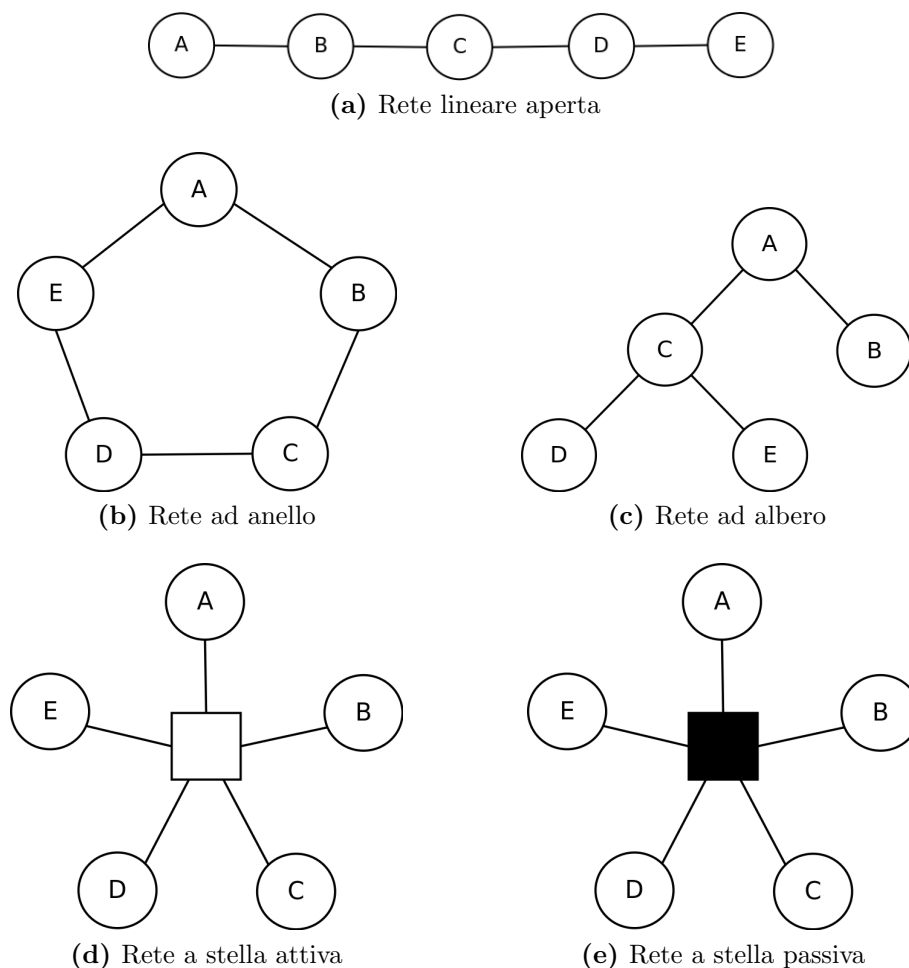
Una rete a stella attiva è una rete ad albero ad un solo livello: esiste un unico nodo padre (hub) da cui si dipartono catene lineari costituite da un unico nodo figlio (spoke); lo hub può anche non essere un nodo; le sue caratteristiche sono:

- il numero dei canali è uguale al numero dei nodi:  $C = N$  (se lo hub non è un nodo)
- vantaggi: numero di canali contenuto; i nodi sono velocemente raggiungibili; la complessità della scelta dei percorsi è demandata al solo nodo padre
- svantaggi: fragilità della rete in corrispondenza del nodo padre centrale; a partire da un nodo esiste un solo modo di raggiungerne un altro

#### 1.6.1.5 Rete a stella passiva

Una rete a stella passiva è una rete a stella in cui lo hub è un canale; le sue caratteristiche sono:

- il numero dei canali è uguale a uno (broadcast):  $C = 1$
- vantaggi: numero di canali bassissimo; i nodi sono velocemente raggiungibili
- svantaggi: fragilità della rete in corrispondenza dello hub; a partire da un nodo esiste un solo modo di raggiungerne un altro



**Figura 1.1:** Reti lineari

## 1.6.2 Topologie a maglia

### 1.6.2.1 Rete a maglia completa

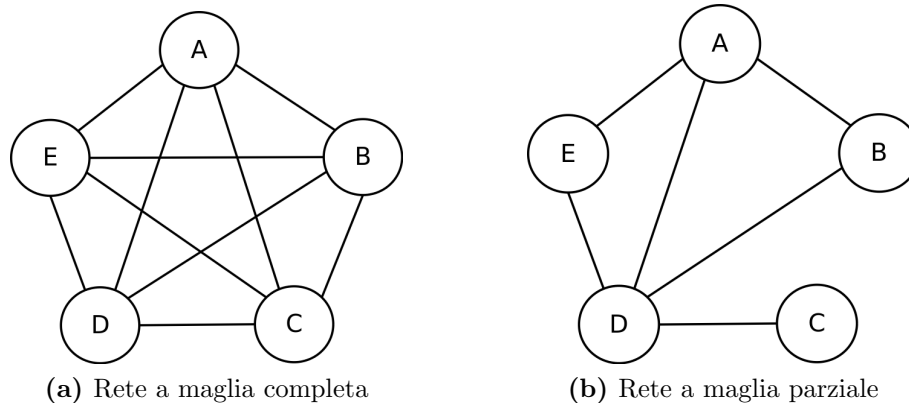
Una rete a maglia completa è una rete in cui ogni nodo è direttamente collegato a tutti gli altri nodi; le sue caratteristiche sono:

- il numero dei canali è uguale al semi prodotto tra il numero dei nodi e il numero dei nodi meno uno:  $C = \frac{1}{2}N(N - 1)$
- vantaggi: esistono molti percorsi tra due nodi (uno solo diretto); alta tolleranza ai guasti
- svantaggi: elevato numero di canali

### 1.6.2.2 Rete a maglia parziale

Una rete a maglia parziale è una rete in cui solo alcuni nodi sono connessi tra di loro in modo diretto; le sue caratteristiche sono:

- il numero dei canali è maggiore (o uguale) al numero di canali di una rete lineare e minore (o uguale) al numero di canali di una rete a maglia completa:  $N - 1 \leq C \leq \frac{1}{2}N(N - 1)$
- vantaggi: alta tolleranza ai guasti; numero di canali a scelta del progettista
- svantaggi: topologia non regolare; instradamento complesso (molti percorsi alternativi)

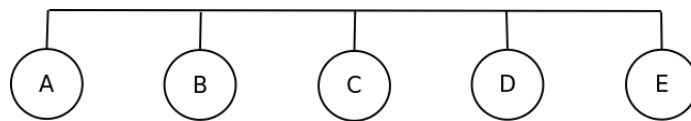


**Figura 1.2:** Reti a maglia

### 1.6.3 Rete a bus

Una rete a bus è una rete in cui tutti i nodi sono collegati tra di loro tramite un unico canale condiviso; le sue caratteristiche sono:

- il numero dei canali è uguale: al numero di nodi meno uno se il bus è attivo:  $C = N - 1$ ; a uno se il bus è passivo:  $C = 1$
- vantaggi: il bus è una struttura abbastanza robusta (se si rompe si creano due sotto reti) e scalabile (l'aggiunta di un nodo non comporta l'aggiunta di collegamenti); i nodi sono velocemente raggiungibili l'un l'altro
- svantaggi: occorre utilizzare meccanismi di controllo dell'accesso al bus per evitare che si verifichino interferenze tra i nodi



**Figura 1.3:** Rete a bus

Topologia	Distanza media $\left(d_m = \frac{\sum^n d_i}{n}\right)$	Capacità ( $C = n \text{ canali} \cdot C_i$ )	Portata massima canale per utente ( $t_{max}$ )	Portata massima nodo ( $L_N$ )
Lineare	$\frac{20}{12} = 1.66$	$3 \cdot 2B = 6B$	$8t \Rightarrow t \leq \frac{B}{4}$	$t = 7t \Rightarrow 7\frac{B}{4}$
Albero	$\frac{18}{12} = 1.5$	$3 \cdot 2B = 6B$	$6t \Rightarrow t \leq \frac{B}{3}$	$t = 9t \Rightarrow 3B$
Anello	$\frac{16}{12} = 1.33$	$4 \cdot 2B = 8B$	$2t \Rightarrow t \leq \frac{B}{2}$	$4t \Rightarrow 2B$

Tabella 1.1: Prestazioni di reti aventi topologie aventi: 4 nodi; traffico uniforme (ogni coppia di nodi si scambia  $t$  bit/s per un traffico totale di  $12t$ ); canali bidirezionali di capacità  $2B$

## 1.7 Servizi di rete

Un servizio di rete è ciò che viene offerto da un gestore ai propri clienti al fine di soddisfare un'esigenza di telecomunicazione

### 1.7.1 Rete dedicata

Una rete dedicata è una rete che fornisce un unico servizio

### 1.7.2 Rete integrata

Una rete integrata è una rete che fornisce più servizi

### 1.7.3 Classificazione dei servizi di rete

I servizi di rete si suddividono in:

- servizi portanti: forniscono il collegamento elementare utente-rete
- teleservizi: forniscono funzionalità e servizi aggiuntivi

## 1.8 Modelli di realizzazione di teleservizi

### 1.8.1 Modello client-server

Il modello client-server è un modello composto da due entità:

- il server: un elaboratore sempre attivo di indirizzo noto che fornisce un servizio
- il client: un elaboratore che si attiva a richiesta dell'utente e inoltra la richiesta di un servizio al server

### 1.8.2 Modello peer-to-peer

Il modello peer-to-peer è un modello composto da utenti paritetici che mettono a disposizione informazioni condivise

# Capitolo 2

## Modi di trasferimento nelle reti

### 2.1 Condivisione di canale

#### 2.1.1 Multiplazione

La multiplazione è un metodo di condivisione di un canale da parte di flussi di informazione diversi che accedono al canale dallo stesso punto

##### 2.1.1.1 Frequency Division Multiplexing (FDM)

La FDM è una tecnica di multiplazione in cui la banda disponibile viene suddivisa in una serie di bande di frequenza non sovrapposte ciascuna delle quali viene usata per trasmettere un segnale diverso

##### 2.1.1.2 Time Division Multiplexing (TDM)

La TDM è una tecnica di multiplazione in cui il tempo di accesso ad un canale viene suddiviso in intervalli di tempo non sovrapposti ciascuno dei quali viene utilizzato per trasmettere un segnale diverso

##### 2.1.1.3 Code Division Multiplexing (CDM)

La CDM è una tecnica di multiplazione in cui segnali diversi vengono trasmessi attraverso codici ortogonali tra di loro (ogni segnale sfrutta tutta la banda e il tempo di cui necessita); i codici dei segnali si sommano nel canale

e.g.:

$$\begin{aligned} \text{codice utente A : } & +1 + 1 - 1 - 1 = 1 & -1 - 1 + 1 + 1 = 0 \\ \text{codice utente B : } & +1 + 1 + 1 + 1 = 1 & -1 - 1 - 1 - 1 = 0 \end{aligned} \tag{2.1}$$

se  $A$  trasmette 1 e  $B$  trasmette 0 nel canale sarà presente il codice  $(+1 + 1 - 1 - 1) + (-1 - 1 - 1 - 1) = 00 - 2 - 2$ ; all'uscita del canale  $A$  fa il prodotto scalare tra il segnale presente nel canale e la sua parola di codice ( $A = 1$ ):  $\langle (00 - 2 - 2), (+1 + 1 - 1 - 1) \rangle = (0 + 0 + 2 + 2) = +4$  e siccome il risultato è positivo  $A$  riconosce di aver trasmesso 1; lo stesso accade con  $B$ :  $\langle (00 - 2 - 2), (+1 + 1 + 1 + 1) \rangle = (0 + 0 - 2 - 2) = -4 < 0 \implies B = 0$  (se il risultato della proiezione è 0 allora il segnale non stava trasmettendo dati)

##### 2.1.1.4 Multiplazione di spazio

La multiplazione di spazio è una tecnica di multiplazione in cui in luoghi diversi vengono trasmessi segnali diversi (e.g.: antenne diverse trasmettono segnali in luoghi diversi)

### 2.1.1.5 Multiplazione statistica

La multiplazione statistica è una tecnica di multiplazione in cui a ciascun segnale viene dedicato uno spazio di trasmissione proporzionale alla quantità di dati che cerca di trasmettere nel tempo

## 2.1.2 Accesso multiplo

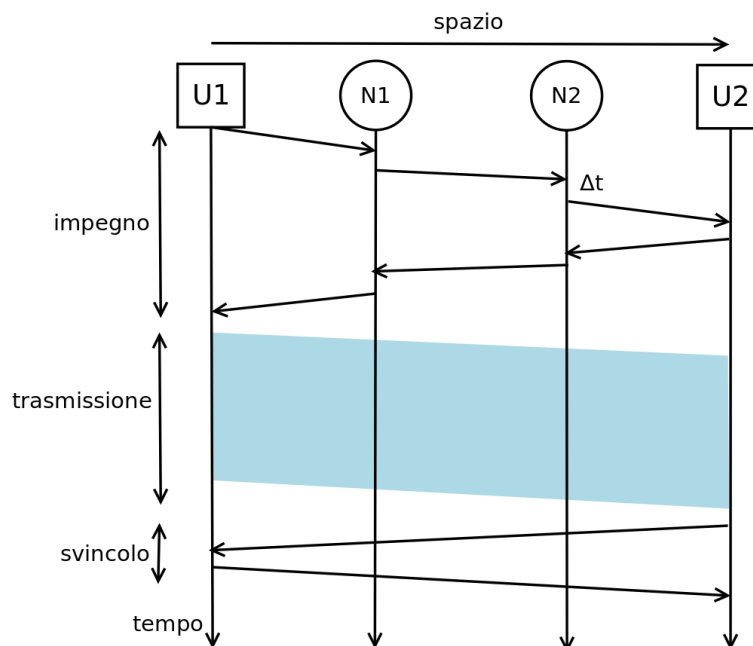
L'accesso multiplo è un metodo di condivisione di un canale da parte di flussi di informazione diversi che accedono e/o escono dal canale in punti diversi

## 2.2 Commutazione (condivisione di nodo)

La commutazione è un processo di interconnessione di unità funzionali (nodi, circuiti) per il tempo necessario al trasferimento di segnali

## 2.3 Commutazione di circuito

La commutazione di circuito è una tecnica di commutazione in cui: il circuito utilizzato per la trasmissione è di uso esclusivo di due utenti; le risorse vengono rilasciate su indicazione degli utenti al termine della trasmissione (svincolo)

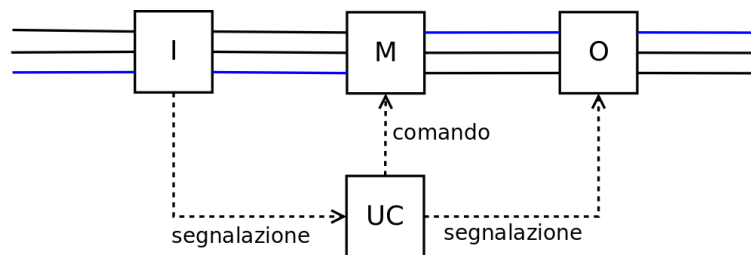


**Figura 2.1:** Grafico spazio temporale

### 2.3.1 Topologia del nodo

Il nodo progettato per una commutazione di circuito è composto da:

- interfaccia di ingresso: riceve un segnale e invia una richiesta all'unità di controllo
- unità di controllo: riceve una richiesta dall'ingresso e invia: una segnalazione ad un'interfaccia di uscita; un comando alla matrice di commutazione
- matrice di commutazione: riceve un comando dall'unità di controllo e crea il circuito necessario per collegare l'ingresso all'uscita desiderata
- interfaccia di uscita: riceve un segnale dall'unità di controllo e inoltra il segnale al destinatario



**Figura 2.2:** Topologia del nodo

### 2.3.2 Prestazioni

Le prestazioni di una rete a commutazione di circuito sono:

- vantaggi: banda costante garantita (risorse dedicate esclusivamente ai due utenti), ritardi di trasferimento dei nodi costanti, trasparenza del circuito, bassi ritardi nell'attraversamento dei nodi (durante la trasmissione)
- svantaggi: risorse dedicate solo ad una trasmissione, efficienza buona solo per trasmissioni non intermittenti, lungo tempo di apertura del circuito, nessuna conversione di formati, tariffazione in base al tempo di esistenza del circuito

## 2.4 Commutazione di pacchetto datagram

La commutazione di pacchetto datagram è una tecnica di commutazione in cui l'informazione da trasferire è suddivisa in:

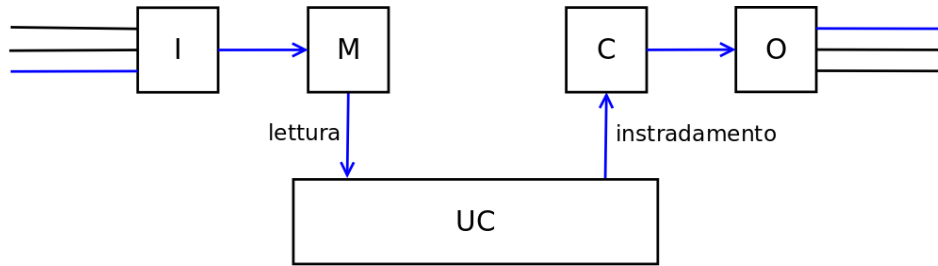
- Protocol Data Unit (PDU o unità dati o pacchetto o cella o segmento o messaggio) di dimensione fissa o variabile composta da
  - Protocol Control Information (PCI o header o intestazione o busta) di dimensione  $i$
  - Service Data Unit (SDU o dati utente o lettera) di dimensione  $s$

ogni pacchetto può viaggiare nella rete in modo indipendente dagli altri; l'utente che riceve l'informazione deve attendere che arrivino tutti i pacchetti e deve metterli insieme per ricostruire l'informazione di partenza

### 2.4.1 Store and forward (ufficio postale)

Lo store and forward è una tecnica in cui ogni nodo della rete riceve un pacchetto, lo memorizza, determina il canale su cui inoltrarlo, mette in coda il pacchetto per la trasmissione; le caratteristiche dello store and forward sono:

- occorre disporre dell'intestazione prima di poter effettuare l'instradamento
- l'instradamento richiede tempo
- occorrono forme di protezione da errori sull'intestazione
- le capacità dei mezzi trasmissivi possono non essere suddivise in canali uguali



**Figura 2.3:** Topologia del nodo

## 2.4.2 Ritardi

### 2.4.2.1 Tempo di trasmissione (canale)

Il tempo di trasmissione  $T_{TX}$  di un pacchetto è l'intervallo di tempo tra: l'istante in cui viene inoltrato il primo bit di un pacchetto e l'istante in cui viene inoltrato l'ultimo bit di un pacchetto

Dipende: dalla dimensione del pacchetto  $P$  (*bit*); dalla velocità di trasmissione del canale  $V_{TX}$  (*bit/s*)

$$T_{TX} = \frac{P}{V_{TX}} \quad (2.2)$$

### 2.4.2.2 Tempo di propagazione (canale)

Il tempo di propagazione  $T_{PX}$  è l'intervallo di tempo tra: l'istante in cui un bit viene inoltrato ad un nodo e l'istante in cui il bit viene ricevuto dal nodo

Dipende: dalla dimensione di un pacchetto lungo un canale  $M$ ; dalla velocità di trasmissione del canale

$$M = c \cdot T_{PX} = 2 \cdot 10^8 \cdot T_{PX} \quad (2.3)$$

### 2.4.2.3 Tempo di trasferimento di pacchetto

Il tempo totale in cui un pacchetto viene trasferito da un nodo ad un altro è la somma tra il tempo di trasmissione del pacchetto e il tempo di propagazione (relativo all'ultimo bit inviato)

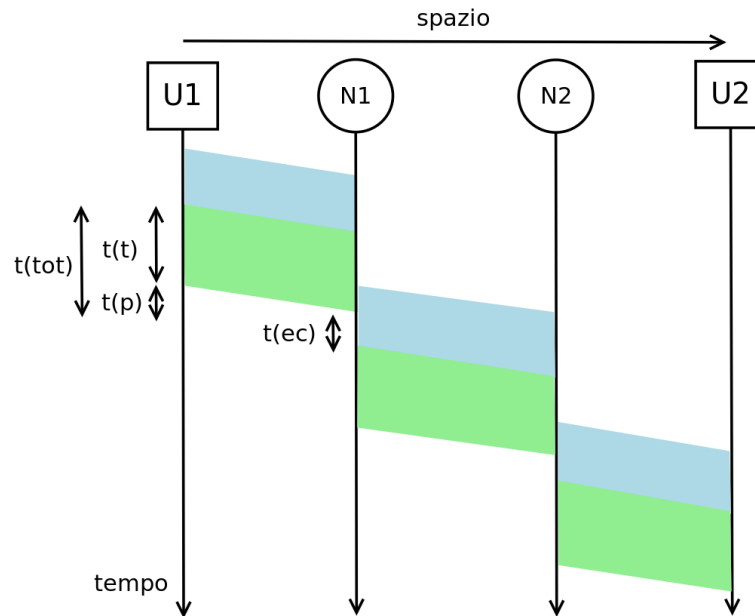
$$T_{tot} = T_{TX} + T_{PX} \quad (2.4)$$

### 2.4.2.4 Tempo di elaborazione e coda (nodo)

Il tempo di elaborazione e coda  $T_{ec}$  è l'intervallo di tempo tra: l'istante in cui l'ultimo bit di un pacchetto viene ricevuto da un nodo e l'istante in cui il primo bit del pacchetto viene inoltrato dal nodo

Dipende: dalla velocità dell'elaborazione del pacchetto; dal traffico generato dagli utenti (per la coda)





**Figura 2.4:** Grafico spazio temporale

### 2.4.3 Dimensione dei pacchetti

La dimensione dei pacchetti è determinata da:

- pipeline (meglio pacchetti piccoli)
- ritardo di pacchettizzazione (meglio pacchetti piccoli)
- probabilità di errore (meglio pacchetti piccoli)
- frazione di informazione di controllo (meglio pacchetti grandi)

#### 2.4.3.1 Pipeline (conduttura)

Il pipeline è un fenomeno dovuto alla commutazione a pacchetto in cui alcuni pacchetti di un'informazione viaggiano attraverso la rete mentre altri devono ancora entrarci (risparmiando tempo)

#### 2.4.3.2 Ritardo di pacchettizzazione

Il ritardo di pacchettizzazione è l'intervallo di tempo che intercorre tra: l'istante in cui viene inserito il primo bit nel pacchetto e l'istante in cui il pacchetto completo parte

Dipende: dalla dimensione del pacchetto

#### 2.4.3.3 Probabilità di errore

La probabilità di errore su un bit è  $p$ ; dati pacchetti di  $n$  bit, la probabilità che un pacchetto sia corretto è

$$p.p.c. = (1 - p)^n \propto \frac{1}{n} \quad (2.5)$$

Se c'è un errore su un pacchetto, il pacchetto è inutile: più il pacchetto è piccolo più la trasmissione è sicura

#### 2.4.3.4 Percentuale di informazione di controllo

La percentuale di informazione di controllo aumenta all'aumentare del numero dei pacchetti (ogni pacchetto deve avere la sua intestazione); è bene che la frazione di informazione di controllo sia minore di 0,1

$$f.i.c = \frac{i}{s+i} \leq 0,1 \quad (2.6)$$

#### 2.4.4 Prestazioni

Le prestazioni della commutazione a pacchetto sono:

- vantaggi: efficienza nell'utilizzo delle risorse anche in presenza di traffico intermittente, possibilità di controllo di correttezza lungo il percorso, possibilità di conversione (compressione dati), tariffazione in funzione del traffico trasmesso
- svantaggi: banda disponibile per ogni utente non è costante (non è dedicata), ogni pacchetto deve essere elaborato in ogni nodo, ritardo di trasferimento variabile

### 2.5 Commutazione di pacchetto a circuito virtuale

La commutazione di pacchetto a circuito virtuale è una tecnica di commutazione di pacchetto in cui la connessione avviene, grazie ad un accordo preliminare tra due utenti, in tre fasi:

- apertura della connessione
- trasferimento dati
- chiusura della connessione

Non è necessaria l'elaborazione di quei pacchetti nei nodi perchè la sorgente e la destinazione vengono dichiarati in apertura di connessione e restano costanti (ma i canali non sono dedicati come nella commutazione a circuito)

## 2.6 Esercizi

### 2.6.1 Pipeline

**Esercizio 1.** Dati due utenti e due nodi  $N1$  e  $N2$  connessi da tre canali aventi velocità di trasmissione  $V_{TX} = 80 \text{ kb/s}$  e tempo di propagazione ed elaborazione trascurabile, se l'utente  $A$  invia un file da  $10 \text{ kb}$  conviene che venga trasmesso con 1 pacchetto o con 10 pacchetti?

1) Conversioni

$$P_1 = 10 \text{ kb} = 10000 \text{ byte} = 80000 \text{ bit}$$

$$P_{10} = 1 \text{ kb} = 1000 \text{ byte} = 8000 \text{ bit}$$

$$V_{TX} = 80 \text{ kb/s} = 80000 \text{ byte/s} = 640000 \text{ bit/s}$$

2) Tempo di trasmissione con 1 pacchetto

$$T_{TX1} = \frac{P_1}{V_{TX}} = \frac{80000}{640000} = 0,125 \text{ s}$$

$$T_{tot1} = 3 \cdot T_{TX1} = 0,375 \text{ s}$$

3) Tempo di trasmissione con 10 pacchetti

$$T_{TX10} = \frac{P_{10}}{V_{TX}} = \frac{8000}{640000} = 0,0125 \text{ s}$$

$$T_{tot10} = T_{TX} + T_{PX} = 10 \cdot T_{TX10} + 3 \cdot T_{TX10} = 0,1625 \text{ s}$$

### 2.6.2 Tempo di trasferimento di un pacchetto

**Esercizio 2.** Dati: una rete lineare scarica composta da un singolo canale di capacità pari a 500 kbit/s; un nodo S che deve trasmettere un file di 8000 byte verso il nodo D; il tempo di propagazione sul canale di 5 ms (altri ritardi trascurabili); la dimensione massima dei pacchetti di 1500 byte incluse le intestazioni da 100 byte

Si determini il tempo di trasferimento di tutto il pacchetto

1) Conversione

$$P = 8000 \text{ byte} = 64000 \text{ bit}$$

$$P_i = 1500 \text{ byte} = 12000 \text{ bit}$$

$$P_I = 100 \text{ byte} = 800 \text{ bit}$$

$$T_{PX} = 5 \text{ ms} = 0,005 \text{ s}$$

$$V = 500 \text{ kbit/s} = 500000 \text{ bit/s}$$

2) Svolgimento

$$n_{pacchetti} = (int) \frac{P}{P_i - P_I} \quad [+1] = (int) \frac{64000}{12000 - 800} \quad [+1] = 5 \text{ da } 11200 \text{ bit} \quad [+1 \text{ da } 8000 \text{ bit}]$$

$$T_{TX5} = \frac{P}{V} = \frac{12000}{500000} = 0,024 \text{ s}$$

$$T_{TX1} = \frac{P - nP_i}{V} = \frac{8000}{500000} = 0,016 \text{ s}$$

3) Tempo di trasferimento del pacchetto

$$T_{tot} = n_{pacchetti} \cdot T_{TX5} + T_{TX1} + T_{PX} = 5 \cdot 0,024 + 0,016 + 0,005 = 0,141 \text{ s}$$



# Capitolo 3

## Segnalazione e qualità delle reti

### 3.1 Tipologie di canali

#### 3.1.1 Canale controllato

Un canale controllato è un canale che trasporta dati utente

#### 3.1.2 Canale controllante

Un canale controllante è un canale che trasporta informazioni di segnalazione

### 3.2 Segnalazione

Una segnalazione è uno scambio di informazioni che riguardano l'apertura, il controllo e la gestione delle comunicazioni di una rete di telecomunicazione

#### 3.2.1 Segnalazione associata al canale

##### 3.2.1.1 Segnalazione associata al canale in banda

Una segnalazione associata al canale in banda è una tecnica di segnalazione in cui il canale controllato e il canale controllante coincidono ma vengono usati in tempi diversi; in caso di necessità il canale controllante occupa una parte del canale per inviare segnalazioni urgenti (e.g.: cambio di antenna per cellulari)

##### 3.2.1.2 Segnalazione associata al canale fuori banda

Una segnalazione associata al canale fuori banda è una tecnica di segnalazione in cui il canale controllato e il canale controllante sono distinti (fisicamente o logicamente); serve per mantenere un controllo costante dei canali controllati (e.g.: monitoraggio della qualità del segnale da parte delle antenne sui cellulari)

#### 3.2.2 Segnalazione a canale comune

Una segnalazione a canale comune è una tecnica di segnalazione in cui un solo canale controllante controlla più canali controllati; le segnalazioni viaggiano a pacchetto (e.g.: telefonia fissa: non è necessaria una monitoraggio costante né urgente)

### 3.3 Gestione

La gestione di una rete consiste di diverse funzioni:

- gestione della configurazione
- gestione delle prestazioni
- gestione dei guasti
- gestione della sicurezza
- gestione della tariffazione

### 3.4 Indici di qualità di servizio

Gli indici di qualità di servizio di una rete sono:

- ritardo
- velocità
- probabilità di errore
- probabilità di perdita
- probabilità di blocco

#### 3.4.1 Reti CBR

Gli indici di qualità delle reti CBR (Costant Bit Rate: a banda costante) sono:

- ritardo massimo:  $\sim 10^{-1} s$
- velocità:  $\leq 64 kb/s$
- probabilità di errore:  $\leq 10\%$
- probabilità di blocco:  $\sim 0$

#### 3.4.2 Reti VBR

Gli indici di qualità delle reti VBR (Variable Bit Rate: a banda variabile) sono:

- ritardo massimo:  $\sim 10^3 s$
- velocità:  $\sim 13 kb/s$
- probabilità di errore:  $\sim 0\%$
- probabilità di blocco:  $\sim 0$

# Parte II

## Architetture di rete





# Capitolo 4

## Modello OSI

### 4.1 Protocollo di comunicazione

Un protocollo di comunicazione è una descrizione formale delle procedure adottate per assicurare la comunicazione tra due o più entità dello stesso livello gerarchico

#### 4.1.1 Composizione di protocolli

Un protocollo è definito da:

- semantica: insieme di comandi e risposte (e.g.: codifica ASCII: bit)
- sintassi: struttura di comandi e risposte (e.g.: codifica ASCII: lettera = gruppi di 8 bit)
- temporizzazione: sequenze temporali di comandi e risposte (e.g.: codifica ASCII: si parte dal primo bit della sequenza)

### 4.2 Architettura di rete

Un'architettura di rete è una gerarchia di protocollo di una rete

### 4.3 Modello OSI

Il modello OSI (Open System Interconnection) è il primo modello di architettura di rete a strati; il modello OSI descrive soltanto il comportamento sistemi (nodi) di una rete (non descrive i mezzi trasmissivi come i canali)

#### 4.3.1 Struttura OSI

##### 4.3.1.1 Sistema

Un sistema è un nodo o un terminale di una rete

I sistemi si suddividono in:

- sistemi terminali (utenti): hanno tutti gli strati dell'architettura
- sistemi di relay o di inoltro (nodi): hanno solo gli strati più bassi dell'architettura (1 – 3)

#### 4.3.1.2 Strato (o livello)

Uno strato è una parte di un sistema che individua, a livello logico, un aspetto della comunicazione; ogni strato è:

- fornitore di servizi per lo strato superiore
- utente di servizi degli strati inferiori

Ogni strato percepisce gli strati inferiori come una black box: è come se comunicasse direttamente con gli strati di pari livello degli altri sistemi

#### 4.3.1.3 Sottosistema

Un sottosistema è una parte di un sistema che appartiene ad un determinato strato

#### 4.3.1.4 Entità

Un'entità è un elemento attivo di un sottosistema che svolge funzioni tipiche dello strato cui appartiene e interagisce con altre entità dello stesso strato

#### 4.3.1.5 Service Access Point (SAP)

Un SAP è il punto in cui le entità di uno strato accedono ai servizi offerti dagli strati inferiori

#### 4.3.1.6 Connessione

Una connessione è una relazione logica per lo scambio di dati tra SAP appartenenti allo stesso strato in sistemi diversi

#### 4.3.1.7 Protocollo

Un protocollo è un insieme di regole che regola la connessione tra due entità dello stesso strato in sistemi diversi

#### 4.3.1.8 Servizi di rete: CO e CL

I servizi di una rete possono essere:

- CO (connection-oriented): si stabilisce un accordo preliminare tra rete e interlocutori (connessione), si trasferiscono i dati e infine si rilascia la connessione
- CL (connectionless): i dati vengono immessi nella rete senza un accordo preliminare

#### 4.3.1.9 N-PDU

Una N-PDU (N - Protocol Data Unit) è il pacchetto presente nello strato  $N$ -esimo composto da:

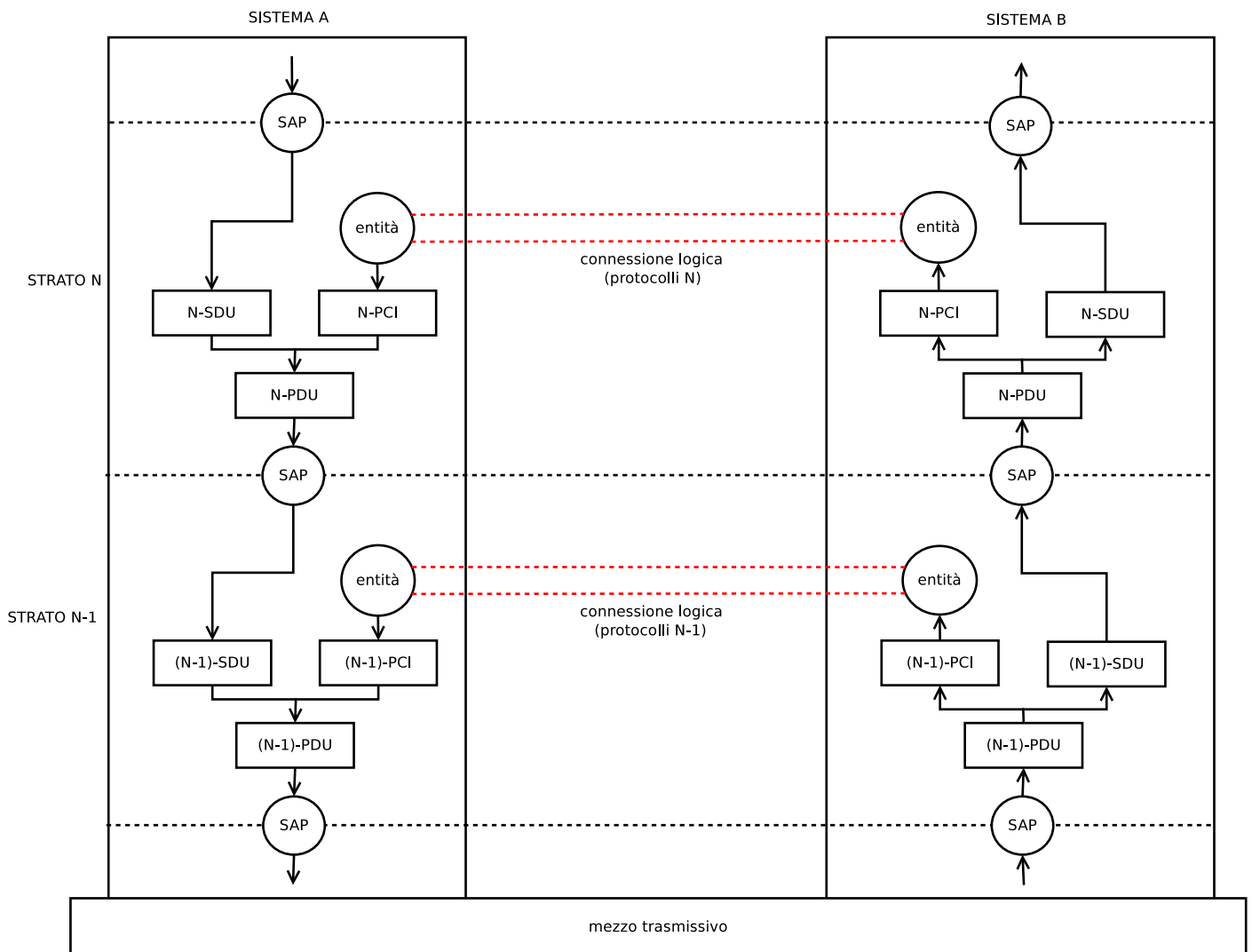
- N-SDU (N - Service Data Unit): i dati utente presenti nello strato  $N$ -esimo
- N-PCI (N - Protocol Control Information): le informazioni di controllo aggiunte/lette dalle entità presenti nello strato  $N$ -esimo

Ogni strato inferiore tratta la PDU dello strato superiore come una “busta chiusa” a cui aggiungere la sua PCI; al termine del percorso la PDU iniziale ha tante intestazioni quanti sono gli strati del sistema

#### 4.3.1.10 Segmentazione

La segmentazione è una tecnica utilizzata quando una SDU ha dimensioni troppo grandi per essere gestita in uno strato del sistema:

- nel sistema mittente: si segmenta (taglia a pezzetti) la SDU e si formano tante PDU ognuna con la sua PCI
- nel sistema ricevente: si concatenano le PDU segmentate ricostruendo la SDU originale



**Figura 4.1:** Struttura OSI

### 4.3.2 Strati OSI

#### 4.3.2.1 Strato 1 o fisico

Lo strato fisico ha le seguenti funzioni:

- traduce i bit in segnali (e viceversa)
- trasmette (e riceve) i segnali attraverso il mezzo trasmissivo

#### 4.3.2.2 Strato 2 o collegamento

Lo strato collegamento ha le seguenti funzioni:

- suddivide i bit in gruppi
- regola il flusso dei bit (temporizzazione)
- rileva e recupera gli errori di trasmissione

#### 4.3.2.3 Strato 3 o rete

Lo strato rete ha le seguenti funzioni:

- instrada i pacchetti nella rete (dal terminale mittente al terminale destinatario)
- effettua il calcolo della tariffa (legata alla lunghezza della strada)
- controlla il flusso globale della rete e segnala eventuali punti di congestione del traffico

#### 4.3.2.4 Strato 4 o trasporto

Lo strato trasporto ha le seguenti funzioni:

- numera i pacchetti da inviare e controlla l'ordine dei pacchetti ricevuti
- effettua un controllo degli errori
- esegue la moltiplicazione e la demoltiplicazione: gestisce i pacchetti provenienti da applicazioni diverse (mail, skype, browser)
- controlla il flusso globale della rete e segnala eventuali punti di congestione del traffico

#### 4.3.2.5 Strato 5 o sessione

Lo strato sessione ha le seguenti funzioni:

- gestisce la connessione con un altro sistema terminale (apertura, sospensione, sincronizzazione, ripresa, terminazione)
- maschera le interruzioni del servizio

#### 4.3.2.6 Strato 6 o presentazione

Lo strato presentazione ha le seguenti funzioni:

- trasforma la sintassi dei dati (formattazione)
- può effettuare una cifratura dei dati

#### 4.3.2.7 Strato 7 o applicazione

Lo strato applicazione fornisce alle applicazioni (mail, browser, skype) un'interfaccia per accedere all'ambiente OSI

# Capitolo 5

## Protocolli a finestra

### 5.1 Codifica di canale (controllo errori)

#### 5.1.1 Bit di parità

Il bit di parità è una tecnica di protezione da errori in cui ogni 8 bit di dati viene aggiunto (nella PCI) un bit di parità equivalente alla somma degli 8 bit:

- il mittente calcola il bit di parità e lo invia insieme ai bit di dati
- il ricevente calcola il bit di parità e lo confronta con il bit di parità ricevuto

#### 5.1.2 Parità di riga e colonna

La parità di riga e colonna è una tecnica di protezione da errori in cui viene calcolato un bit di parità per ogni riga e per ogni colonna di una matrice di bit 8x8 (permette di correggere errori singoli)

#### 5.1.3 Codice a ripetizione

Il codice a ripetizione è una tecnica di protezione da errori in cui ogni byte viene trasmesso  $n$  volte (permette di correggere errori a maggioranza)

#### 5.1.4 Classificazione

##### 5.1.4.1 Forward Error Correction (FEC)

Una codifica di canale FEC è una codifica di canale utilizzata per cercare di correggere gli errori in ricezione senza dover ritrasmettere i pacchetti (tanti bit di parità)

##### 5.1.4.2 Automatic Retransmission reQuest (ARQ)

Una codifica di canale ARQ è una codifica di canale utilizzata per cercare di rilevare gli errori in ricezione e chiedere la ritrasmissione dei pacchetti fallati (pochi bit di parità)

### 5.2 ACK (acknowledgment)

Un segnale ACK è un segnale emesso da un ricevitore per confermare la ricezione di un'informazione completa

### 5.2.1 Semantica degli ACK

La semantica degli ACK( $n$ ) può essere:

- cumulativa: l'ACK notifica la corretta ricezione di tutti i pacchetti con numero di sequenza inferiore a quello specificato nell'ACK;  $n$  indica il pacchetto atteso
- selettiva: l'ACK notifica la corretta ricezione di un pacchetto particolare;  $n$  indica il pacchetto ricevuto correttamente
- negativa (NACK): l'ACK notifica la richiesta di ritrasmissione di un pacchetto particolare;  $n$  indica il pacchetto da ritrasmettere (il ricevitore deve avere un orologio)

### 5.2.2 Piggybacking

Il piggybacking è una tecnica di trasmissione a finestra bidirezionale in cui gli ACK viaggiano insieme alle intestazioni di altri pacchetti (anche se non c'entrano niente)

## 5.3 Finestre

### 5.3.1 Finestra di trasmissione

Una finestra di trasmissione  $W_T$  rappresenta la quantità massima di PDU in sequenza che il trasmettitore è autorizzato a inviare in rete senza averne ricevuto riscontro (ACK)

#### 5.3.1.1 Classificazione dei pacchetti

I pacchetti possono essere classificati in base al loro stato:

- pacchetti confermati (di cui il trasmettitore ha ricevuto gli ACK; vengono eliminati dal trasmettitore)
- pacchetti dentro la finestra di trasmissione
  - pacchetti trasmessi in attesa di conferma (il trasmettitore li ha già inviati e ne sta aspettando gli ACK)
  - pacchetti in coda per la trasmissione (possono essere trasmessi)
- pacchetti che non possono ancora essere trasmessi (perché la coda della finestra è occupata)

#### 5.3.1.2 Sliding window

Lo sliding window è una tecnica di scorrimento della finestra in cui: per ogni pacchetto confermato (ed eliminato dalla finestra) entra nella finestra un nuovo pacchetto

### 5.3.2 Finestra di ricezione

Una finestra di ricezione  $W_R$  rappresenta la sequenza di PDU che il ricevitore è disposto ad accettare e memorizzare

### 5.3.2.1 Classificazione dei pacchetti

I pacchetti possono essere classificati in base al loro stato:

- pacchetti confermati (di cui il ricevitore ha inviato gli ACK; vengono passati agli strati superiori)
- pacchetti dentro la finestra di trasmissione (pacchetti attesi); vengono ricevuti e memorizzati anche se non arrivano in ordine
- pacchetti fuori sequenza (vengono scartati se ricevuti)

### 5.3.3 Posizioni relative $W_T - W_R$

La finestra di ricezione è un sottoinsieme della finestra di trasmissione e può comprendere (nel caso più estremo) la prima sequenza di pacchetti destinata ad entrare in blocco nella finestra di trasmissione (si verifica quando il ricevitore ha inviato tutti gli ACK ma essi sono ancora in viaggio)

## 5.4 RTT (Round Trip Time)

Il RTT è l'intervallo di tempo che intercorre tra l'invio di un pacchetto da parte del trasmettitore e la ricezione del relativo ACK

## 5.5 Ciclo di trasmissione

Il ciclo di trasmissione è il tempo che intercorre tra: l'istante in cui il trasmettitore comincia la trasmissione di una finestra e l'istante in cui il trasmettitore non trasmette più perché è in attesa di ACK che facciano scorrere la finestra

## 5.6 Efficienza

L'efficienza di un protocollo è definita come: il tempo impiegato per la trasmissione di un pacchetto diviso l'intervallo di tempo tra l'inizio della trasmissione e la conferma (ACK) del pacchetto (si può approssimare  $T_{TX}^{(ACK)} \sim 0$ )

## 5.7 Troughput

Il troughput (traffico smaltito) su un canale di capacità  $C$  è dato dal prodotto tra la capacità del canale e l'efficienza del protocollo

$$\theta = \eta C \propto \frac{W_T T_{TX}}{T_p} \quad (5.1)$$

## 5.8 Protocollo a finestra

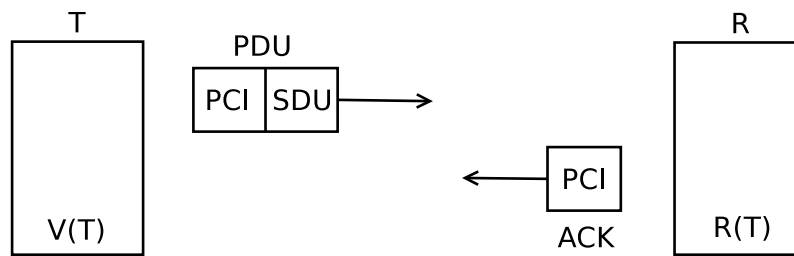
Un protocollo a finestra è un protocollo che ha le seguenti funzioni:

- recupera gli errori di trasmissione (con codifica ARQ)
- controlla il flusso della trasmissione
- effettua un controllo della sequenza dei pacchetti

### 5.8.1 Modello di rete

Le tecniche ARQ dei protocolli a finestra si basano su un modello di comunicazione unidirezionale in cui:

- il trasmettitore invia al ricevitore una PDU composta da una PCI e una SDU; la PCI è composta da:
  - bit di parità (della PCI e della SDU)
  - numero d'ordine del pacchetto  $N(T)$  (ogni pacchetto è numerato con un intero da 0 a  $N$ )
  - indirizzo del ricevitore
- il ricevitore risponde inviando un pacchetto ACK composto da:
  - bit di parità (della PCI)
  - numero d'ordine atteso  $N(R)$  (e.g.: se il ricevitore ha ricevuto il pacchetto 0 manda indietro il valore 1)
  - indirizzo del ricevitore
- il contatore  $V(T)$  memorizza il numero dell'ultimo pacchetto inviato dal trasmettitore
- il contatore  $V(R)$  memorizza il numero del pacchetto atteso dal ricevitore



**Figura 5.1:** Protocollo a finestra (modello ARQ)

### 5.8.2 Stop&wait

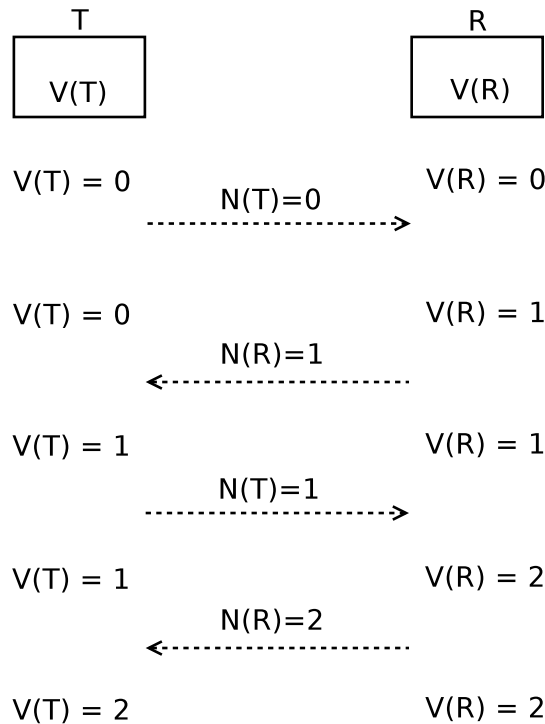
Lo stop&wait è un modello di protocollo a finestra (con  $W_T = W_R = 1$ ) in cui:

- il trasmettitore
  - salva la PDU
  - invia una copia della PDU
  - attiva un orologio (tempo di timeout) e si pone in attesa della conferma di ricezione (ACK)
    - se il timeout scade prima della ricezione dell'ACK invia un'altra copia della PDU
    - se il trasmettitore riceve l'ACK
      - controlla che l'ACK sia corretto (bit di parità)
      - controlla il numero di sequenza
        - se il numero di sequenza dell'ACK  $V(R) = V(T) + 1$  il trasmettitore invia la PDU successiva
        - se il numero di sequenza dell'ACK  $V(R) \neq V(T) + 1$  il trasmettitore invia un'altra copia della PDU
- il ricevitore



- controlla che la PDU sia corretta (bit di parità)
  - se la PDU è corretta controlla il numero di sequenza della PDU (deve corrispondere al numero atteso)
    - se  $V(T) = V(R)$  invia un ACK al trasmettitore con il numero di sequenza successivo e consegna la PDU agli strati superiori
    - se  $V(T) \neq V(R)$  invia una ACK al trasmettitore con lo stesso numero di sequenza

Quando trasmettitore o ricevitore verificano che il pacchetto ricevuto non è corretto (bit di parità) il pacchetto viene eliminato e procedono come se non l'avessero mai ricevuto



**Figura 5.2:** Stop and wait

### 5.8.2.1 Efficienza

L'efficienza dello stop&wait è data da il rapporto tra: il tempo di trasmissione di un pacchetto; la somma tra: il tempo di trasmissione del pacchetto, il tempo di propagazione del pacchetto e il tempo di propagazione dell'ACK

$$\eta = \frac{T_{TX}}{T_{TX} + 2T_p} \quad (5.2)$$

### 5.8.2.2 Alternating bit protocol

L'alternating bit protocol è una tecnica di numerazione in cui viene utilizzato un solo bit (i pacchetti sono numerati con cifre binarie alternate 0 – 1)

### 5.8.2.3 Canale non sequenziale

In una trasmissione con un canale non sequenziale (più strade disponibili) il protocollo stop&wait può bloccarsi (a causa dei ritardi e della perdita di pacchetti); è necessario implementare meccanismi per risincronizzare trasmettitore e ricevitore

Si possono ridurre i malfunzionamenti:

- usando più bit per la numerazione
- impostando un tempo di vita massimo per i pacchetti

### 5.8.3 Go back N

Il go back N è un modello di protocollo a finestra (con  $W_T > 1$  e  $W_R = 1$ ) in cui:

- il trasmettitore
  - salva  $N = W_T$  PDU
  - invia (una alla volta) le PDU
  - attiva un orologio per le  $N$  PDU; l'orologio viene resettato ogni volta che viene inviata una PDU
  - si pone in attesa delle conferme (ACK)
    - se il timeout scade prima della ricezione dell'ACK relativa alla PDU che ha settato il timer, ripete la trasmissione di tutte le PDU comprese nella finestra
- il ricevitore
  - controlla che la PDU sia corretta (bit di parità)
    - se la PDU è corretta controlla il numero di sequenza della PDU (deve corrispondere al numero atteso)
      - se  $V(T) = V(R)$  invia un ACK al trasmettitore con il numero di sequenza successivo e consegna la PDU agli strati superiori
      - se  $V(T) \neq V(R)$  invia una ACK al trasmettitore con lo stesso numero di sequenza

#### 5.8.3.1 Efficienza

L'efficienza del go back N dipende da:

- se  $W_T T_{TX} \geq T_{TX} + 2T_p$  allora (il trasmettitore trasmette sempre)

$$\eta = 1 \quad (5.3)$$

- se  $W_T T_{TX} < T_{TX} + 2T_p$  allora (il trasmettitore trasmette sempre)

$$\eta = \frac{W_T T_{TX}}{T_{TX} + 2T_p} \quad (5.4)$$

#### 5.8.3.2 Dimensione di $W_T$

La dimensione della finestra di trasmissione deve essere strettamente minore di  $W_T < 2^k$  dove  $k$  sono il numero di bit usati per la numerazione dei pacchetti

### 5.8.4 Selective repeat

Il selective repeat è un modello di protocollo a finestra (con  $W_T > 1$  e  $W_R > 1$ ) in cui:

- il trasmettitore
  - salva  $N = W_T$  PDU
  - invia (una alla volta) le PDU
  - attiva un orologio per le  $N$  PDU; l'orologio viene resettato ogni volta che viene inviata una PDU
  - si pone in attesa delle conferme (ACK)
    - se il timeout scade prima della ricezione dell'ACK relativa alla PDU che ha settato il timer, ripete la trasmissione di tutte le PDU comprese nella finestra

- il ricevitore
  - controlla che la PDU sia corretta (bit di parità)
  - se la PDU è corretta ed è compresa nella finestra di ricezione, controlla il numero di sequenza della PDU
    - se  $V(T) = V(R)$  invia un ACK al trasmettitore con il numero di sequenza successivo e consegna la PDU agli strati superiori (eventualmente insieme alle altre memorizzate nel buffer)
    - se  $V(T) < V(R)$  memorizza la PDU in un buffer e invia un ACK al trasmettitore con il numero di sequenza relativo all'ultima PDU ricevuta in sequenza

#### 5.8.4.1 Dimensione di $W_T$ e $W_R$

La dimensione delle finestre deve rispettare la seguente relazione

$$W_T + W_R \leq 2^k \quad (5.5)$$

dove  $k$  è il numero di bit utilizzati per la numerazione dei pacchetti

#### 5.8.4.2 Vantaggi rispetto al go back N

I vantaggi rispetto al go back N sono presenti quando:

- il RTT è minore del tempo di trasmissione della finestra di trasmissione
- il canale di trasmissione è molto numeroso e vi sono perdite di pacchetti frequenti

## 5.9 Esercizi

### 5.9.1 Stop&wait

**Esercizio 3.** *Dati: un canale di capacità  $C = 500 \text{ kbit/s}$ ; un file di 8000 byte dal nodo S al nodo D; un tempo di propagazione  $T_p = 10 \text{ ms}$ ; dimensione massima dei pacchetti pari a 1500 byte comprendenti 40 byte di intestazione; un protocollo stop&wait (con  $T_{TX}^{ACK} \sim 0$ )*

*Si determini il tempo necessario affinché D riceva tutto il file (senza errori di trasmissione)*

1) Conversioni

$$\begin{aligned}
 C &= 500 \text{ kbit/s} = 500000 \text{ bit/s} \\
 size_f &= 8000 \text{ byte} = 64000 \text{ bit} \\
 size_{p_{max}} &= 1500 \text{ byte} = 12000 \text{ bit} \\
 size_h &= 40 \text{ byte} = 320 \text{ bit} \\
 T_p &= 10 \text{ ms} = 0.01 \text{ s}
 \end{aligned} \quad (5.6)$$

2) Numero pacchetti e dimensione

$$n_p = (\text{int}) \frac{size_f}{size_{p_{max}} - size_h} = 5 \quad (5.7)$$

più un pacchetto di dimensione:  $size_{p^*} = size_f - n_p \cdot (size_{p_{max}} - size_h) = 5920 \text{ bit}$

3) *Tempi di trasmissione*

$$\begin{aligned} T_{TX} &= \frac{n_p}{C} = 0.024s \\ T_{TX^*} &= \frac{n_{p^*}}{C} = 0.012s \end{aligned} \tag{5.8}$$

4) *Ciclo di trasmissione*

$$T_{cycle} = T_{TX} + 2 \cdot T_p = 0.044s \tag{5.9}$$

5) *Tempo totale*

$$t = n_p \cdot T_{cycle} + (T_{TX^*} + T_p) = 0.242s \tag{5.10}$$

# Parte III

## Strato fisico



# Capitolo 6

## Strato fisico

### 6.1 Mezzi trasmissivi

#### 6.1.1 Caratteristiche generali

Il mezzo trasmissivo ottimo è caratterizzato da:

- impedenza (resistenza e capacità parassite) bassa (evita la dispersione di potenza)
- resistente alla sollecitazione di trazione
- flessibilità
- geometria regolare
- numero di conduttori (cavi) e distanza reciproca
- tipo di isolante
- tipo di schermatura

#### 6.1.2 Mezzi elettrici

I mezzi elettrici per la trasmissione dei segnali sono:

- doppino (twisted pair): composto da due fili di rame ritorti; le sue caratteristiche sono:
  - costi ridotti
  - installazione semplice
  - le tensioni di disturbo si sommano in modo uguale per entrambi i cavi: quindi la differenza tra le due tensioni è priva di disturbi:  $V_d = (V'_1 + V_r) - (V'_2 + V_r) = V'_1 - V'_2$
- cavo coassiale: composto da un conduttore centrale e da calze esterne di schermo; le sue caratteristiche sono:
  - costi elevati
  - difficoltà di installazione

### 6.1.2.1 Parametri elettrici

I parametri dei mezzi elettrici sono:

- impedenza:  $\propto f$
- velocità di propagazione di segnali:  $\sim 0.5 - 0.7c$
- attenuazione (rapporto tra potenza ricevuta e potenza trasmessa):  $P_{rx}/P_{tx}[dB] \propto d\sqrt{f}$
- diafonia (disturbo indotto da un cavo vicino):  $\propto d \rightarrow cost$

### 6.1.3 Mezzi ottici

La fibra ottica è un minuscolo e flessibile filo di vetro costituito da: due parti (core e cladding) con indice di rifrazione diversi; rivestimenti e guaine protettive

- funzionamento: per la legge di Snell il raggio luminoso (generato da un laser o un LED) introdotto nella fibra entro certi angoli rimane confinato nel core (viene riflesso e non rifratto)
- vantaggi
  - totale immunità da disturbi elettromagnetici
  - alta capacità trasmissiva (Terabit/s)
  - bassa attenuazione ( $\sim 0.1dB/km$ ): dipende dalla lunghezza d'onda utilizzata:
    - LED:  $0.8\mu m$
    - laser:  $1.3\mu m$  o  $1.55\mu m$
  - dimensioni ridotte
  - costi contenuti
- svantaggi
  - giunzioni difficili (adatte solo per collegamenti punto-punto)
  - ridotto raggio di curvatura

### 6.1.4 Radio

Un canale radio è un mezzo di trasmissione che propaga i segnali per mezzo di antenne

- caratteristiche
  - attenuazione
    - legge di Friis (dipende da frequenza  $f = c/\lambda$  e distanza  $d$ ):

$$\frac{P_{rx}}{P_{tx}} = G_t G_r \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (6.1)$$

- fenomeni atmosferici
- interferenze con altre stazioni radio
- ostacoli generano copie del segnale



## 6.2 Trasmissione su mezzi fisici

La trasmissione di informazioni a distanza si realizza associando simboli di informazione (composti da bit) a segnali diversi

### 6.2.1 Codifiche di linea

Una codifica di linea è una tecnica di codifica di linea che utilizza segnali digitali per la rappresentare informazioni digitali

#### 6.2.1.1 Codifica unipolare

Una codifica unipolare è una codifica di linea che utilizza un livello di tensione nullo per lo 0 logico e un livello di tensione positivo per l'1 logico

Le caratteristiche della codifica unipolare sono:

- componente continua (valor medio del segnale) non nulla  $\implies$  componente continua filtrata  $\implies$  perdita di potenza del segnale
- lunghe stringhe di bit uguali fanno perdere il sincronismo
- nelle fibre ottiche lunghe sequenze di 1 (luce) possono sovraccaricare il LED di trasmissione

#### 6.2.1.2 Codifica polare

Una codifica polare è una tecnica di codifica di linea che utilizza un livello di tensione negativo per lo 0 logico e un livello di tensione positivo per l'1 logico

Tipologie di codifiche polari:

- Non-Return-to-Zero (NRZ): non c'è transizione sul livello di tensione nullo
- Return-to-Zero (RZ): tra due bit consecutivi il segnale si ferma per un certo periodo sul livello di tensione nullo (migliora sincronismo)
- bifase: per ogni tempo di bit viene inviato un segnale con entrambe le polarità ma con un ordine diverso: 0 logico = tensione negativa + tensione positiva; 1 logico = tensione positiva + tensione negativa (la componente continua è quasi sempre 0; il trasmettitore deve avere una velocità doppia)

#### 6.2.1.3 Codifica bipolare

Una codifica bipolare (o AMI: Alternate Mark Inversion) è una tecnica di codifica di linea che utilizza una tensione nulla per lo 0 logico e due polarità opposte alternate per l'1 logico

**6.2.1.3.1 Codifica 8B6T** La codifica 8B6T è una codifica bipolare in cui: ognuna delle  $2^8 = 256$  parole da 8 cifre binarie viene mappata 1-a-1 con alcune tra le  $3^6 = 729$  parole da 6 cifre ternarie (1-0-1) che hanno valor medio nullo e livelli di tensione alternati

**6.2.1.3.2 Codifiche nBmB** Una codifica nBmB è una codifica bipolare in cui: ognuna delle  $2^8 = 256$  parole da 8 bit viene mappata 1-a-1 con alcune tra le  $2^{10} = 1024$  parole da 10 bit che hanno valor medio nullo e livelli di tensione alternati

### 6.2.2 Modulazioni digitali

Una modulazione digitale è una tecnica di rappresentazione di informazioni digitali mediante segnali analogici; l'informazione è contenuta in un segnale sinusoidale (segnale portante) di cui viene variata ampiezza e/o frequenza e/o fase attraverso un segnale modulante (composto dalle stringhe di bit di informazione)

Le modulazioni digitali sono classificate in:

- ASK (Amplitude Shift Keying)
- FSK (Frequency Shift Keying)
- PSK (Phase Shift Keying)
- QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

La sigla di una modulazione digitale è preceduta dal numero di simboli del segnale modulante (e.g: 64-QAM: modulazione di fase/ampiezza a 64 simboli (6 bit per simbolo))

# Capitolo 7

## Reti di accesso e di trasporto

### 7.1 Stream

Uno stream è un flusso di dati tra una sorgente e una destinazione

#### 7.1.1 Downstream

Un downstream (o downlink) è un flusso di dati che viaggia dalla rete verso un utente

#### 7.1.2 Upstream

Un upstream (o uplink) è un flusso di dati che viaggia da un utente verso la rete

### 7.2 Collegamento utente-rete

Il collegamento utente-rete è effettuato attraverso:

- rete di accesso (o di ultimo miglio): apparati e mezzi trasmissivi che collegano l'utente ad un nodo di accesso alla rete
  - residenziale
  - mobile (wi-fi)
  - istituzionale
- rete di trasporto: apparati e mezzi trasmissivi che collegano reciprocamente i nodi di accesso alla rete (interconnettono le reti di accesso)
  - metropolitana
  - nazionale
  - sovranazionale

### 7.3 Reti di accesso

#### 7.3.1 Linea DSL

Una linea DSL (Digital Subscriber Line: linea digitale per abbonati) è una famiglia di tecnologie di reti di accesso che fornisce una connessione dati ad alta velocità:

- Asymmetric DSL (ADSL): linea in cui la velocità di downstream ( $6 - 24$  Mb/s) è maggiore della velocità di upstream ( $1.5 - 3.5$  Mb/s)

- Very-High-Rate DSL (VDSL): linea DSL con una velocità in downstream molto alta (fino a 200 Mb/s e frequenza fino a 12 MHz)

La velocità è fortemente limitata dalla distanza tra l'abitazione dell'utente e il DSLAM

#### 7.3.1.1 Apparati delle linee DSL

Gli apparati delle linee DSL si possono clasificare in:

- apparati utente
  - filtro splitter: separa il segnale vocale (0 – 4 kHz) dai segnali dati (oltre i 25 kHz)
  - MODulatore e DEModulatore (MODEM): dispositivo in grado di trasformare un segnale digitale in analogico e viceversa rendendo i segnali idonei alla trasmissione su una rete analogica su bande adiacenti a quella fonica; demodula il segnale in upstream (25 – 160 kHz) e in downstream (oltre i 240 kHz)
- apparati di centrale
  - filtro/modem POTS (Plain Old Telephone System): separa il segnale vocale (0 – 4 kHz) dai segnali dati (oltre i 25 kHz)
  - DSL Access Multiplexer (DSLAM): riceve flussi di dati da abbonati di uno stesso fornitore del servizio di rete e ne effettua una multiplazione su un unico canale

#### 7.3.2 Architettura PON

Un'architettura PON (Passive Optical Networks) è un'architettura per la connettività di ultimo miglio in fibra ottica; esistono diverse architetture PON:

- FTTH (Fiber-To-The-Home): la fibra ottica viene portata fino all'interno dei singoli appartamenti
- FTTC (Fiber-To-The-Cabinet): la fibra ottica viene portata fino all'armadio di strada, il più vicino possibile alle abitazioni, da cui il segnale prosegue con una connessione VDSL

#### 7.3.3 Architettura HFC

Un'architettura HFC (Hybrid Fiber Coax) è un'architettura per la connettività in cui viene utilizzata l'infrastruttura della TV via cavo: fibra fino al quartiere e cavo coassiale broadcast (condiviso) alle singole abitazioni

#### 7.3.4 Rete cellulare

Una rete cellulare è una rete mobile a banda larga che consente una connessione in tutti i punti di un territorio suddiviso in celle ognuna delle quali è servita da una stazione di telecomunicazione diversa; la rete cellulare consente:

- roaming: rintracciabilità dell'utente sul territorio per fornire il servizio anche durante spostamenti
- handover: continuità della connessione nel passaggio da una cella di ripetizione del segnale ad un'altra

#### 7.3.4.1 Generazioni delle reti cellulari

Le reti cellulari si sono evolute in quattro generazioni:

- prima generazione (TACS)
  - tecnica di accesso: modulazione analogica
  - dimensioni celle:  $\sim 100$  km
  - caratteristiche: bassa qualità, bassa efficienza
- seconda generazione (GSM, GPRS, EDGE)
  - tecnica di accesso (digitale): FDMA/TDMA
  - dimensioni celle:  $\sim 37$  km
  - caratteristiche: alta sicurezza (telefonate cifrate), servizio dati (170 kb/s GPRS e 384 kb/s EDGE)
- terza generazione (UMTS, HSPA)
  - standard mondiale per integrare il servizio dati e il servizio voce
  - tecnica di accesso: FDMA/CDMA
  - caratteristiche: velocità elevata (2 Mb/s UMTS e 56 Mb/s HSPA), copertura ad ombrello (celle piccole potenti a cui vengono sovrapposte per sicurezza celle grandi meno potenti)
- quarta generazione (LTE)
  - tecnica di accesso: Orthogonal FDMA: ad ogni utente vengono assegnati più microcanali di frequenza e per un tempo limitati
  - caratteristiche: velocità molto elevata (250 Mb/s), antenne multiple in trasmissione e in ricezione (MIMO)

#### 7.3.5 Reti satellitari

Le reti satellitari sono reti per la comunicazione a distanza attraverso collegamenti radio tra stazioni ricetrasmittenti (a terra) e satelliti artificiali (in orbita):

- reti GEO (Geostationary Earth Orbit)
  - velocità del satellite: uguale alla terra
  - utilizzo: trasmissioni broadcast
  - ritardo: 270 ms
- reti MEO (Medium Earth Orbit)
  - velocità del satellite: maggiore della terra
  - utilizzo: GPS
  - ritardo: 100 ms
- reti GEO (Low Earth Orbit)
  - utilizzo: telefonia satellitare
  - ritardo: 5 ms

## 7.4 Reti di trasporto

### 7.4.1 SONET/SDH

SONET/SDH (Synchronous Digital Hierarchy) sono protocolli di trasporto usati per la moltiplicazione nel tempo di voce e dati con velocità fino ai Tb/s

# Parte IV

## Strato collegamento





# Capitolo 8

## Strato collegamento

### 8.1 Trama

La trama è il pacchetto dati interpretato dallo strato collegamento

### 8.2 Protocolli

I protocolli dello strato collegamento derivano dal protocollo SDLC della IBM e dallo standard ISO SDLC (derivato da SDLC):

- LAPx: obsolete
- LLC (Logical Link Control)
- PPP (Point-to-Point Protocol)
- LAPDm (Link Access Procedure for the mobile D-channel)

#### 8.2.1 Uso dei protocolli

I protocolli di strato 2 sono utilizzati in:

- reti pubbliche di accesso (tra il MODEM ADSL e l'ISP)
- reti private (locali)
- reti pubbliche di trasporto

#### 8.2.2 Caratteristiche delle trame

Le trame (PDU) dello strato 2 sono composte da:

- flag (delimitatore) iniziale: 8 bit (01111110) che delimitano l'inizio di una trama
- indirizzo: 8 bit per le configurazioni master-slave multipunto
- controllo: 8 – 16 bit per la numerazione dei pacchetti (usato solo con protocollo a finestra)
- dati:  $\geq 0$  bit per la 2-SDU
- CRC: 16 bit per il controllo di errori
- flag (delimitatore) finale: 8 bit (01111110) che delimitano la fine di una trama

### 8.2.2.1 Stuffing

Lo stuffing è una tecnica utilizzata per evitare che una sequenza di bit della SDU possa essere scambiata per un flag:

- bit stuffing (per logiche a multipli di bit)
  - il trasmettitore inserisce nella SDU un bit 0 dopo una sequenza di 5 bit 1
  - il ricevitore estrae la SDU ed elimina ogni bit 0 che segue 5 bit 1 consecutivi
- byte stuffing (per logiche a multipli di byte)
  - il trasmettitore inserisce nella SDU un byte 01111101 di escape prima di ogni byte uguale al flag o all'escape
  - il ricevitore estrae la SDU ed elimina tutti i byte di escape che precedono byte uguali al flag o all'escape

## 8.3 Multiplazione di protocolli di strato superiore

La multiplazione di protocolli di strato superiore è una funzionalità di uno strato che consiste in:

- ricevere la SDU scritta da un determinato protocollo dello strato superiore
- inserire nella PCI un codice che identifichi quale protocollo è stato utilizzato dallo strato superiore

# Capitolo 9

## Protocolli di strato 2 per reti pubbliche

### 9.1 PPP

Il Point to Point Protocol è utilizzato nei collegamenti punto-punto (e.g.: ADSL-ISP; in realtà dal DSLAM all'ISP il PPP viene trasportato dall'ATM)

Il PPP si occupa di:

- delimitare le PDU (e byte stuffing)
- rilevare errori
- multiplazione di più protocolli di strato 3
- controllare l'attività del collegamento
- negoziare l'indirizzo IP

Il PPP è composto da 3 sotto protocolli:

- incapsulamento
- Link Connection Protocol
- Network Control Protocol

#### 9.1.1 Incapsulamento

Le trame (PDU) del PPP sono di dimensione variabile e sono composte da:

- flag (delimitatore) iniziale: 8 bit (01111110) che delimitano l'inizio di una trama
- indirizzo: 8 bit (11111111) (non ha significato per il PPP ma resta per motivi di compatibilità)
- controllo: 8 bit (00000011) (non ha significato per il PPP ma resta per motivi di compatibilità)
- protocollo: 8 – 16 bit per il codice che identifica il protocollo utilizzato dallo strato superiore
- dati:  $\geq 0$  bit per la 2-SDU
- check: 16 – 32 bit per il controllo di errori
- flag (delimitatore) finale: 8 bit (01111110) che delimitano la fine di una trama

#### 9.1.2 PPP-LCP

Il protocollo PPP-LCP crea e abbatte il collegamento PPP

### 9.1.3 PPP-NCP

Il protocollo PPP-NCP interviene dopo l'autenticazione avvenuta con successo e si occupa di:

- definire le modalità di trasferimento delle unità dati (e.g.: dimensione massima della PDU)
- negoziare l'assegnazione di un indirizzo IP

## 9.2 LAPF di Frame Relay

Il protocollo LAPF utilizzato da Frame Relay è un protocollo punto-punto utilizzato dagli ISP per connettere i nodi di rete (DSLAM); LAPF si occupa di creare un circuito virtuale (attraverso delle PCI) per gli instradamenti fissi tra un ISP e i suoi DSLAM

## 9.3 ATM

Il protocollo Asynchronous Transfer Mode segmenta la trama ricevuta dal PPP in pacchetti da 48 byte (a cui ne aggiunge 5 di intestazione) e li trasporta dal DSLAM fino all'ISP

### 9.3.1 Caratteristiche delle celle

Le celle (PDU) del protocollo ATM sono di dimensione fissa (48 byte dati e 5 byte di intestazione) e sono composte da:

- GFC (Generic Flow Control): 4 bit
- VPI (Virtual Path Identifier): 8 – 12 bit per l'etichetta (per i nodi intermedi) che segna il percorso per tutte le celle che viaggiano da un certo DSLAM ad un certo ISP
- VCI (Virtual Circuit Identifier): 16 bit per l'etichetta che differenzia le celle provenienti da utenti diversi che hanno lo stesso VPI
- PT (Payload Type): 3 bit: 2 obsoleti; uno serve per identificare l'ultima cella di una trama PPP
- CLP (Cell Loss Priority): 1 bit (obsoleto)
- HEC (Header Error Code): 8 bit per la correzione di errori sull'intestazione
- dati:  $\geq 0$  bit per la 2-SDU

Le dimensioni fisse e ridotte delle celle consentono:

- bassa latenza
- basso ritardo di pacchettizzazione
- bassa complessità dei commutatori

### 9.3.2 AAL

Il sotto protocollo ATM Adaptation Layer è un protocollo usato da ATM che consente di gestire la segmentazione dello strato superiore (PPP o strato 3)

### 9.3.2.1 Caratteristiche delle celle

Le celle di AAL5 sono di dimensione fissa pari a 48 byte e sono composte da:

- dati:  $\geq 0$  bit per la 2-SDU
- lenght: 2 byte per la lunghezza della 2-SDU
- reserved: 2 byte
- CRC: 4 byte per il controllo di errori
- PAD (padding):  $n$  byte di padding per rendere il pacchetto divisibile per 48



# Capitolo 10

## Protocolli di strato 2 per reti locali (private)

### 10.1 Sotto strati

I sotto strati di livello 2 sono:

- LLC (Logical Link Control) derivato da HDLC
- MAC (Medium Access Control)

### 10.2 LLC

Il sotto strato LLC si occupa di:

- controllare il flusso dei pacchetti dai SAP del nodo sorgente ai SAP del nodo destinazione
- correggere errori

#### 10.2.1 Formato PDU

Le PDU LLC sono di lunghezza variabile e sono composte da:

- indirizzo DSAP (destinazione): 8 bit contiene il codice del SAP che deve ricevere i dati
- indirizzo SSAP (sorgente): 8 bit contiene il codice del SAP che ha generato i dati
- controllo: 8 – 16 bit
- dati:  $\geq 0$  bit per la 2-SDU
- SNAP PDU: 32 bit di intestazione aggiuntiva che indica il protocollo utilizzato dallo strato superiore

## 10.3 MAC

Il sotto strato MAC si occupa di:

- delimitare le trame
- moltiplicare le trame
- rilevare gli errori
- individuare il mittente e il destinatario locali di un pacchetto

### 10.3.1 Indirizzo MAC

Un indirizzo MAC identifica la scheda di rete locale di un dispositivo; un indirizzo MAC è composto da:

- Organization Unique ID: 3 byte assegnati dal costruttore al tipo di scheda di rete
- numerazione progressiva: 3 byte assegnati dal costruttore per numerare le schede di rete prodotte

Gli indirizzi MAC possono essere:

- unicast: se riferiti ad una singola stazione
- multicast: se riferiti a gruppi di stazioni
  - solicitation: per richiedere un servizio ad un gruppo
  - advertisement: per diffondere periodicamente informazioni di appartenenza ad un gruppo
- broadcast(FF-FF-FF-FF-FF-FF): se riferiti a tutte le stazioni

### 10.3.2 Famiglie di protocolli ad accesso multiplo

I protocolli ad accesso multiplo sono suddivisi in 3 famiglie:

- protocollo a slot con prenotazione (lento)
- protocollo ad accesso ordinato (costoso)
- protocollo a contesa o ad accesso casuale (Ethernet, WiFi):
  - trasmette un nodo alla volta utilizzando tutta la banda disponibile
  - è necessario gestire eventuali collisioni tra più nodi che cercano di trasmettere contemporaneamente (MAC)

### 10.3.3 Funzionamento

Una scheda MAC accetta i pacchetti che riceve se:

- unicast: l'indirizzo sorgente e destinazione coincidono
- multicast: il gruppo multicast è stato abilitato
- broadcast



## 10.4 CSMA

Il protocollo Carrier Sense Multiple Access è un protocollo che:

- se sente il canale libero trasmette
- se sente il canale occupato
  - CSMA 1-persistente: riprova appena il canale è libero
  - CSMA non-persistente: riprova dopo un tempo casuale
  - CSMA p-persistente: appena il canale è libero sceglie casualmente se: trasmettere (con probabilità  $p$ ) o rimandare (con probabilità  $1 - p$ )

Le collisioni si possono verificare comunque a causa dei ritardi di propagazione; la probabilità di collisione:

- aumenta all'aumentare della distanza tra le stazioni
- diminuisce all'aumentare della dimensione delle trame (ci sono meno contese)

Le collisioni possono essere gestite nei seguenti modi:

- le stazioni che hanno colliso aspettano un tempo casuale (backoff) prima di riprovare ad accedere al canale
- in caso di collisioni ripetute viene raddoppiato il massimo tempo di attesa casuale (backoff esponenziale)

### 10.4.1 Finestra di vulnerabilità

Una finestra di vulnerabilità è l'intervallo di tempo in cui l'invio di un pacchetto da parte di un nodo può collidere con altri pacchetti inviati da altri nodi

### 10.4.2 Backoff

Il backoff è il timeout casuale dopo il quale un nodo ritrasmette un pacchetto di cui non ha ancora ricevuto l'ACK

### 10.4.3 Dominio di collisione

Il dominio di collisione è una porzione di rete in cui, se due stazioni CSMA trasmettono in tempi ravvicinati, le due trame collidono

### 10.4.4 CSMA-Collision Detection (CSMA-CD)

Il CSMA-CD è un protocollo CSMA in cui vengono rilevate le collisioni  
Ogni stazione monitora il canale:

- se sente solo la propria trasmissione continua a trasmettere
- se sente altre trasmissioni contemporanee (collisione) interrompe la propria trasmissione

Non serve l'ACK purché la durata minima di trasmissione della trama sia superiore al massimo RTT nella rete: in questo modo la stazione rileva la collisione mentre sta ancora trasmettendo la propria trama

$$t_{TX_{min}} > RTT_{max} \quad (10.1)$$

Le prestazioni del CSMA-CD sono:

- si spreca meno banda (vengono sospese le trasmissioni con collisione)
- facile da implementare nelle reti LAN (Ethernet): si misura la potenza del segnale nel canale
- su reti piccole è molto efficiente
- la versione 1-persistente è ottima a basso carico (usata nelle reti Ethernet)
- difficile separare il traffico a diversa priorità

### 10.4.5 CSMA-Collision Avoidance (CSMA-CA)

Il CSMA-CA è un protocollo CSMA in cui si cerca di prevenire le collisioni

Il CSMA-CA funziona nel seguente modo:

- procedura di trasmissione
  - ogni stazione monitora in canale
    - se il canale resta libero per un periodo DIFS, la stazione inizia la trasmissione
    - se il canale è occupato (o lo diventa) la stazione sospende la procedura di trasmissione per un tempo casuale (backoff)
  - ogni stazione decrementa il backoff solo mentre il canale rimane libero
- procedura di ricezione
  - il ricevitore verifica la correttezza della trama
    - se la trama è corretta invia un ACK dopo un tempo SIFS < DIFS (pacchetto con priorità maggiore rispetto alle trame)
    - se il trasmettitore non riceve l'ACK entro un tempo di timeout estrae un tempo di backoff al cui termine ritrasmette la trama

Le prestazioni sono elevate su reti piccole (usato nelle reti WiFi 802.11)

## 10.5 Protocollo IEEE 802.3 (Ethernet)

Il protocollo IEEE 802.3 è un protocollo basato sul CSMA-CD 1-persistente in cui:

- in caso di collisione le stazioni interrompono la trasmissione e inviano una sequenza di jamming (avviso broadcast di avvenuta collisione)
- le stazioni che hanno colliso attendono un tempo casuale prima di provare a ritrasmettere la trama
- l'ACK è implicito (quando non si riceve un jamming)

### 10.5.1 Formato delle trame Ethernet

Il formato delle trame del protocollo Ethernet è composto da (dimensione totale deve essere almeno 64 byte):

- preambolo: 8 byte per sincronizzare mittente e destinatario
  - 7 stringhe 10101010
  - 1 stringa 10101011

- indirizzo DMAC (destinazione): 6 byte per l'indirizzo della scheda MAC destinazione
- indirizzo SMAC (sorgente): 6 byte per l'indirizzo della scheda MAC sorgente
- protocollo livello 3: 2 byte per identificare il protocollo utilizzato al livello 3 (valido solo se contiene un intero superiore a 1500)
- dati: 46 – 1500 byte per la 2-SDU
- controllo errori: 4 byte per il controllo di errori
- Inter Packet GAP: silenzio equivalente a 12 tempi di byte (per separare le trame)

### 10.5.2 Formato delle trame IEE 802.3

Il formato delle trame del protocollo IEE 802.3 è composto da:

- preambolo: 8 byte per sincronizzare mittente e destinatario
  - 7 stringhe 10101010
  - 1 stringa 10101011
- indirizzo DMAC (destinazione): 6 byte per l'indirizzo della scheda MAC destinazione
- indirizzo SMAC (sorgente): 6 byte per l'indirizzo della scheda MAC sorgente
- lunghezza della 2-SDU: 2 byte per la lunghezza della 2-SDU
- dati: 0 – 1500 byte per la 2-SDU
- padding: 0 – 46 byte aggiunti dal protocollo se la 2-SDU non riempie tutta la trama
- controllo errori: 4 byte per il controllo di errori
- Inter Packet GAP: silenzio equivalente a 12 tempi di byte (per separare le trame)

### 10.5.3 Prestazioni

Le prestazioni del protocollo IEE 802.3 sono:

- ottime quando ci sono poche collisioni
- semplicità
- basso costo
- non garantisce priorità

### 10.5.4 Rete IEE 802.3 oggi

La rete IEE 802.3 oggi ha le seguenti caratteristiche:

- utilizza connessioni punto-punto: cavi UTP full duplex (i segnali in ingresso e in uscita viaggiano su cavi separati) o fibre ottiche
- utilizza una topologia a stella; il centro stella può essere
  - hub (passivo): apparato che opera al livello 1 OSI: rigenera su tutte le porte di uscita il segnale ricevuto in ingresso

- switch (attivo): apparato che opera al livello 2 OSI: è un nodo store and forward che ritrasmette in modo selettivo sulle uscite le trame ricevute su una porta di entrata (elimina le collisioni)
- viaggia ad una velocità di 100 Gbyte/s
- è possibile collegare attraverso switch più reti locali per:
  - aumentare l'estensione geografica della rete
  - garantire una maggiore sicurezza (quello che avviene all'interno di una singola rete locale non è visibile dalle altre)

# Parte V

## Strato rete



# Capitolo 11

## Strato rete

### 11.1 Limiti dello strato collegamento

Lo strato collegamento ha i seguenti limiti su vasta scala:

- gestisce in modo non efficiente le ridondanze (pacchetti broadcast) nelle reti a maglia: Ethernet ha bisogno di una topologia ad albero o a stella gerarchica
- saturazione della memoria degli switch: ogni switch deve avere in memoria gli indirizzi di tutti i dispositivi della rete
- non riesce a limitare la propagazione del traffico broadcast