

RETI DI CALCOLATORI 1

Facoltà di Scienze Statistiche

Università di Padova

Prof. Massimo Maresca

a.a. 2001-2002

Rete di Calcolatori

- Sistema che consente ad ciascun calcolatore, o **nodo**, l'**invio/ricezione di dati** verso/da altri nodi identificati da appositi **indirizzi**

ARGOMENTI:

- Tipologie di Reti: estensione, topologia
- Commutazione: reti a pacchetto, a circuito
- Routing
- Connessioni
- Internetworking

APPROCCI AL NETWORKING

- **DALLE TELECOMUNICAZIONI**
- **DALL'INFORMATICA**
- **CONVERGENZA NELLE COSIDDETTE
“INFORMATION AND COMMUNICATION
TECHNOLOGIES”**
- **NUOVE TIPOLOGIE DI APPARATI DI
TIPO INFORMATICO GRADUALMENTE
RIMPIAZZANO GLI OBSOLETI APPARATI
DI TLC**

Tipologie di Rete: Estensione

- Reti Locali (Local Area Networks, LAN):
 - Calcolatori all'interno dello stesso edificio
 - Piano di indirizzi locale
- Reti Geografiche (Wide Area Networks, WAN)
 - Calcolatori distanti (città, regioni, nazioni diverse)
 - Piano di indirizzi distribuito
- [Reti Metropolitane (Metropolitan Area Networks , MAN)]
 - (es. campus)

Reti locali: caratteristiche

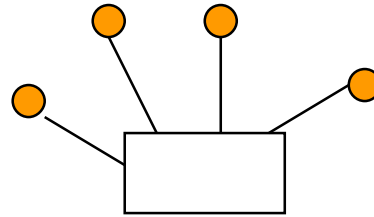
- Elevata velocità di trasmissione dei dati, bassi ritardi
- Realizzate su supporto privato
- Connessione diretta degli elaboratori degli utenti
- Dimensione limitata (1KM)

Reti geografiche: caratteristiche

- Velocità medio-bassa (da 9.6 Kbps a qualche Mbps) e quindi ritardi elevati
- Realizzate su supporto pubblico
- Richiedono elaboratori dedicati alla comunicazione (*router*)
- Distanza coperta molto elevata (1000KM)

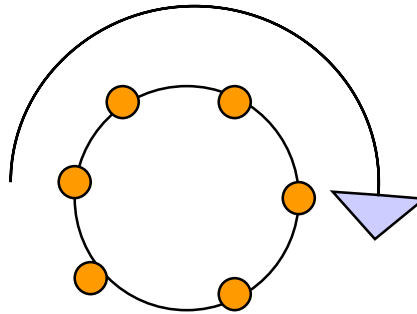
Topologie LAN

- Stella



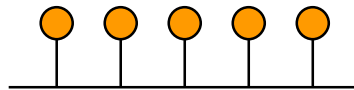
Un
arbitra e
smista i dati di ogni nodo

- Anello



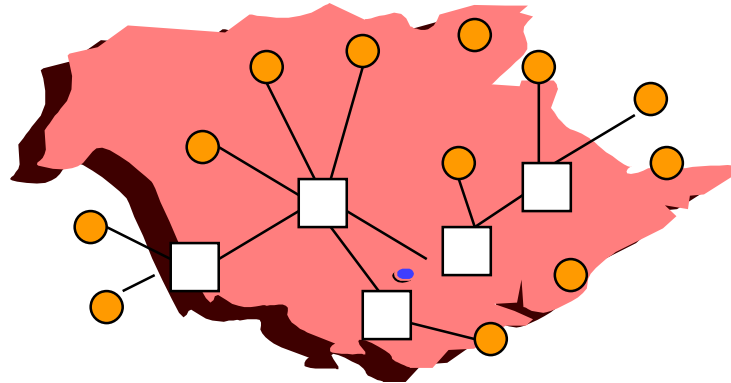
Una
viene ritrasmessa di nodo
in nodo e ciascun nodo
accoda o sottrae i propri
dati alla sequenza

- Bus



Tutti i nodi trasmettono su
e
sospendono la trasmissione
quando si accorgono di
interferire l'uno con l'altro

Topologia WAN



- Le WAN sono caratterizzate da
 - Nodi di Rete (□) (es. router) interconnessi tramite link geografici (es. linee dedicate) punto-a-punto.
 - Nodi Terminali (●) collegati alla rete tramite “punti di accesso” .

Tipi di Commutazione

- **COMMUTAZIONE DI PACCHETTO**
 - Copiatura di ciascun pacchetto da una porta di ingresso ad una porta di uscita decisa sulla base dell'indirizzo destinazione del pacchetto. (es. IP)
- **COMMUTAZIONE DI CIRCUITO**
 - Copiatura di un flusso di bit da una porta di ingresso ad una porta di uscita decisa sulla base di una identificazione del flusso (es. PSTN)
- **CIRCUITO VIRTUALE**
 - Commutazione di pacchetto in cui il pacchetto porta un identificatore di connessione anziché l'indirizzo destinazione (es. ATM)

Commutazione di pacchetto:

pro e contro

Vantaggi:

- Concorrenza di più connessioni
- Utilizzo di percorsi alternativi in caso di guasto anche durante una connessione
- Costo basso grazie alla condivisione

Svantaggi:

- Impossibile garantire la *capacità* di ciascuna connessione
- Possibilità di avere congestione del canale
- Problemi di sicurezza dovuti alla condivisione del mezzo

Commutazione di Circuito:

pro e contro

Vantaggi:

- Capacità del canale garantita
- Più facile controllare la sicurezza
- Non esiste *overhead* di interpretazione dell'indirizzo

Svantaggi:

- Costo elevato a causa della allocazione privata del canale
- Perdita della connessione se il canale ha un guasto

TIPI DI COMUNICAZIONE

- **SIMPLEX, HALF/FULL DUPLEX**
- **CONNECTION ORIENTED (CIRCUITO VIRTUALE)**
 - **REQUEST**
 - **INDICATION**
 - **RESPONSE**
 - **CONFIRMATION**
- **CONNECTIONLESS (DATAGRAM, UNRELIABLE/ACKNOWLEDGED DATAGRAM)**

TERMINOLOGIA

- **POINT-TO-POINT COMMUNICATION**
- **BROADCAST COMMUNICATION**
- **MULTICAST COMMUNICATION**

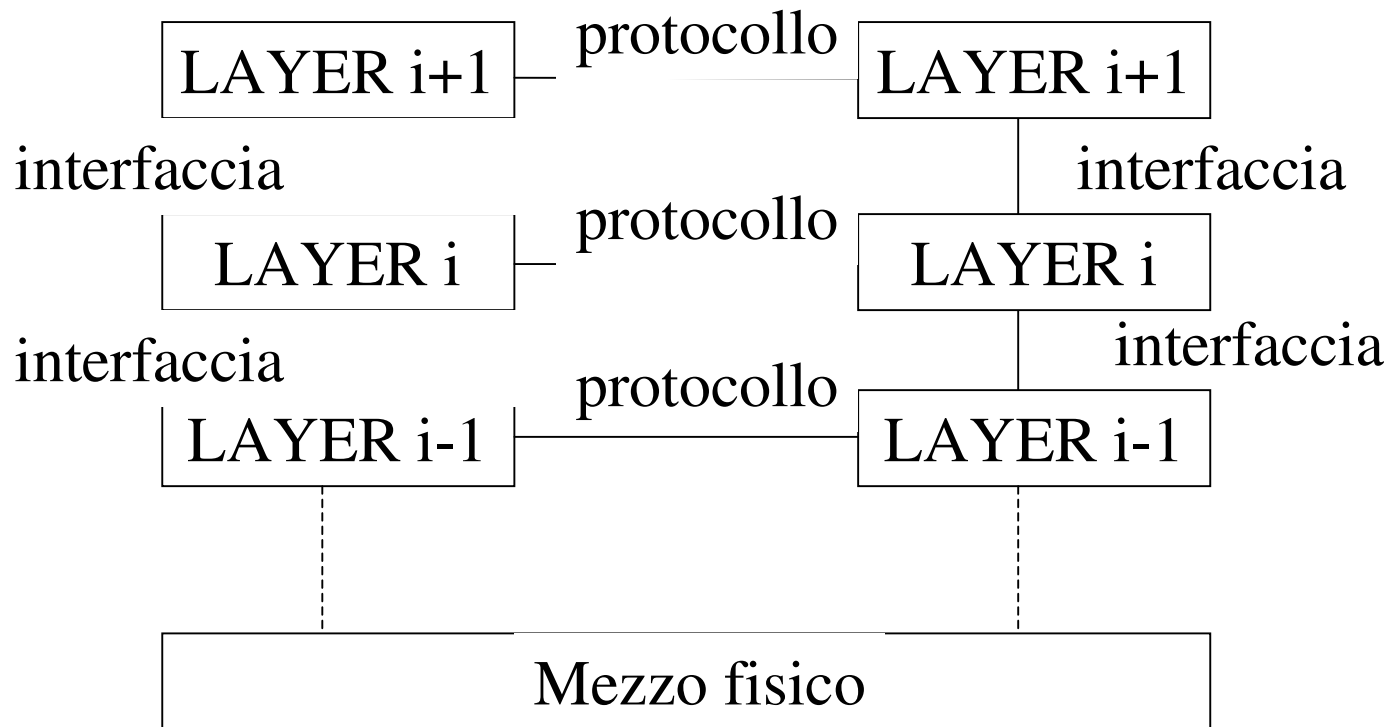
TERMINOLOGIA

- **STORE AND FORWARD**
- **CONDIVISIONE DEI CANALI TRASMISSIVI**
- **MULTIPLEXING STATICO: A LIVELLO DI TRAMA (TDM)**
- **MULTIPLEXING DINAMICO: A LIVELLO DI MESSAGE/PACKET/FRAME/CELL**

INTERWORKING/INTERNETWORKING

- **INTERCONNESSIONE TRA DIVERSE RETI**
- **INTERWORKING: TERMINE GENERICO
UTILIZZATO DALLE COMUNITA' DELLE
TELECOMUNICAZIONI**
- **INTERNETWORKING: TERMINE
UTILIZZATO DALLA COMUNITA'
INTERNET**

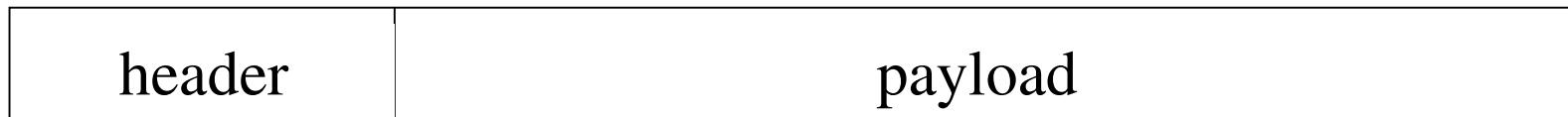
GERARCHIE DI PROTOCOLLI



- Protocol/Interface/Service Data Unit

PROTOCOLLI

- ASPETTI SINTATTICI: STRUTTURA DELLE PDU

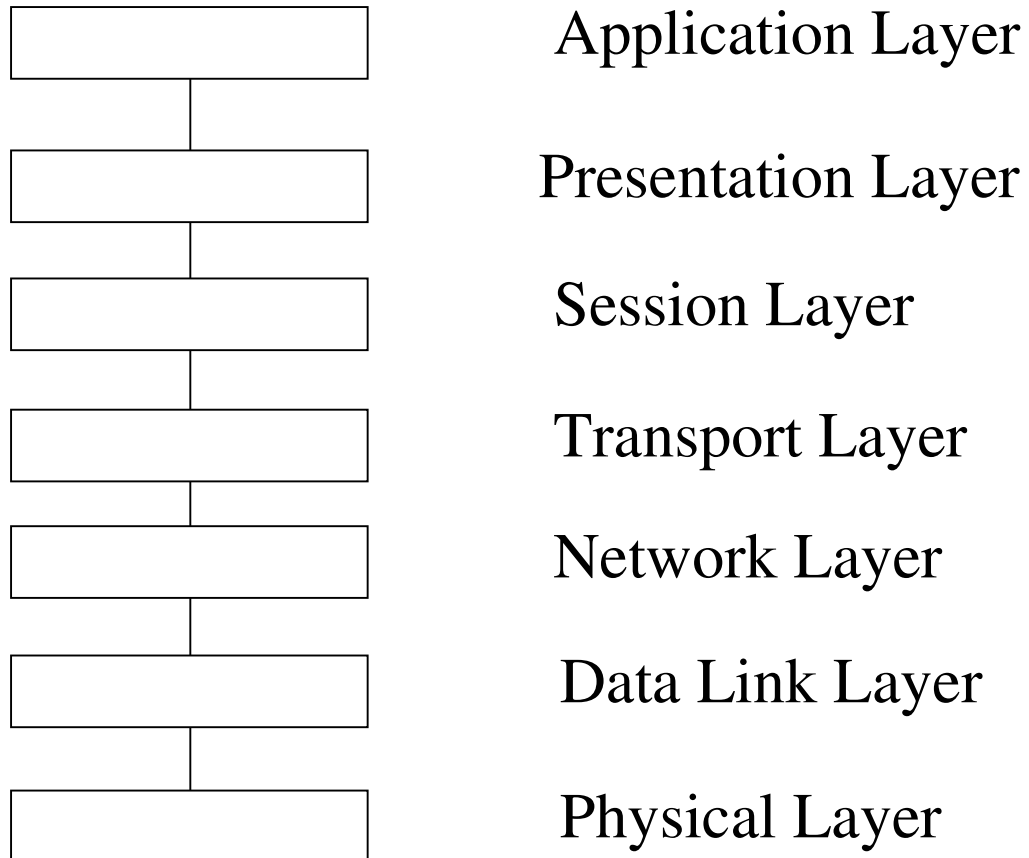


- ASPETTI SEMANTICI: REGOLE DI INTERAZIONE

LIVELLI, ENTITA', SAP

- LIVELLI
 - CONVENZIONI PER L'AGGREGAZIONE DI SERVIZI E FUNZIONI
- ENTITA' DI LIVELLO i
 - MODULO SW (TPICAMENTE) CHE FORNISCE SERVIZI ED ESEGUE FUNZIONI DI LIVELLO i
- SERVICE ACCESS POINTS (SAP)
 - ASTRAZIONE CHE DEFINISCE IN CHE MODO E ATTRAVERSO QUALE IDENTIFICATORE UN PROGRAMMA UTILIZZATORE PUO' FRUIRE DI UN DETERMINATO SERVIZIO

ISO/OSI



MODELLO ISO-OSI

- Modello di Riferimento Standard per l'Interconnessione di Sistemi Aperti (nodi di una Rete di Calcolatori)

ARGOMENTI:

- Obiettivi
- Struttura a livelli del Modello
- Presentazione di ciascun livello

Obiettivi del Modello OSI

- Identificazione delle Funzionalità necessarie ad un sistema in rete: dalla trasmissione di bit alla interoperazione di applicazioni
- Definizione delle Relazioni tra le varie funzionalità individuate
- Conformità con gli standard di architetture già esistenti
- Livello di astrazione tale da poter essere utile a descrivere architetture diverse

I Sette Livelli Osi

- Le Funzionalità: sono sette
- Le Relazioni: la funzionalità i -ma fornisce servizi solo alla funzionalità $(i+1)$ -ma.
- Ogni Sistema Aperto si modella come una “pila” di 7 livelli di funzionalità posti uno sopra l’altro
- Ogni livello si avvale del livello sottostante attraverso *service access point* (SAP)

Modello di Passaggio Dati

- Sistema Aperto Trasmettitore
 - Il livello $N+1$ passa i dati (Service Data Unit, SDU) al livello N
 - Il livello N incapsula quella SDU in una (Protocol Data Unit, PDU) di livello N
- Sistema Aperto Ricevente
 - Il livello N riceve la PDU di livello N dal livello $N-1$
 - Il livello N estrae la SDU di livello $N+1$ e la passa al livello $N+1$ che la vede come PDU

Livello 1: Fisico

- Servizio di trasporto bit:
 - Tipo di mezzo (doppino, fibra ottica, coassiale, etc.)
 - Tipo di modulazione (tensioni, frequenze, etc.)
 - Tipi di connettori (es. RJ-45, BNC, DB25, etc.)
 - Tipo di codifica (AMI, NRZ, Manchester)
 - Information Rate (es. 64 Kbps, 10 Mbps, 1 Gbps)

Livello 2: Collegamento Dati

- Servizio di tipo Controllo di Accesso del Mezzo
 - Arbitraggio del mezzo (es. CSMA/CD, Token)
 - Trasporto di frames in Trame di linea (es. HDLC)
- Servizio di Controllo del Collegamento
 - Controllo/Correzione di Errore (es. CRC, FCS)
 - Meccanismi di Acknowledgment (es. PPP)

Livello 3: Rete

- Servizio di Indirizzamento
 - Piano di indirizzamento (es. NUA X.25, IP)
- Servizio di Instradamento
 - Recapito informazione a destinazione
 - Su base statica: tabelle di routing
 - Su base dinamica
 - Sulla base del controllo dello stato del Link
 - Sulla base di informazioni di distanza della destinazione

Livello 4: Trasporto

- Servizio di canale end-to-end
 - Supporto a canali di tipo stream (es. TCP)
 - Supporto a canali di tipo datagram (es. UDP)
 - Controllo di Errore end-to-end
 - Acknowledgment/Windowing end-to-end
 - Multiplexing di canale all'interno di un nodo (es. ports)
 - Controllo di Congestione end-to-end
 - Controllo di Flusso end-to-end

Livello 5: Sessione

- Servizi di trasmissione dati orientati alle applicazione
- Esempi:
 - Chiamate a Procedure Remote (es. Unix RPC)
 - Oggetti Remoti (es. CORBA, RMI)
 - Transazioni (es. SQL)

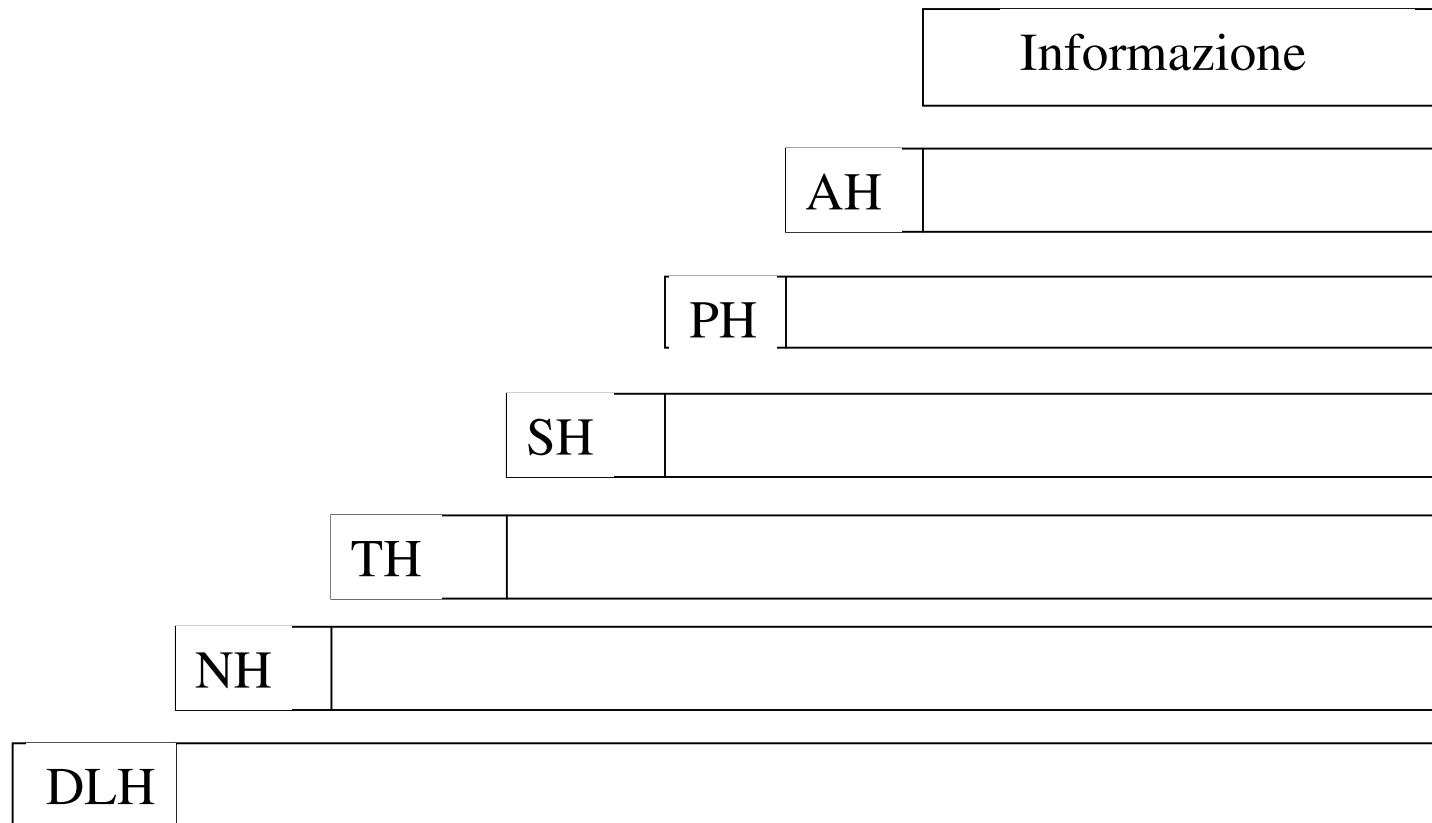
Livello 6: Presentazione

- Servizio di Conversione dati per applicazioni, ad es.:
 - ASCII to bin
 - ASCII to EBCDIC
 - MIME, UUENCODING
- Servizio di Compressione dati
- Servizio di Crittografia dati, ad es.:
 - RSA (chiave asimmetrica)
 - DES (chiave simmetrica)

Livello 7: Applicazione

- Servizio di comunicazione tra applicazioni
 - HTTP per il WWW
 - SMTP per invio della posta
 - FTP per lo scambio di files
 - TELNET per terminali remoti virtuali
 - POP / IMAP per la gestione della casella postale
 - SNMP per il monitoraggio degli apparati di rete

STRUTTURA DELLE PDU NEL MODELLO OSI



Elementi dei livelli osi

- Protocol Identifier: identificatore di protocollo tra entità comunicanti
- Multiplexing (Demultiplexing): (N)-Funzione che usa una (N-1)-connessione per supportare più (N)-connessioni (viceversa)
- Splitting (Recombining): (N)-funzione che usa più (N-1)-connessioni per supportare più (N)-connessioni

Elementi dei livelli osi

- Flow control: Funzione che controlla il flusso dei dati tra layer adiacenti o all'interno di un layer
- Segmenting (Reassembling): (N)-funzione che mappa una (N)-SDU in molte (N)-PDU (viceversa)
- Blocking (Deblocking): Funzione di una (N)-entity che mappa più (N)-SDU in una (N)-PDU

Elementi dei livelli osi

- Concatenation (Separation): Funzione di una (N)-entity che mappa più (N)-PDU in una (N)-SDU (viceversa)
- Sequencing: Funzione di (N)-layer che preserva l'ordine delle data units trattate
- Acknowledgement: Funzione di (N)-layer che una (N)-entity ricevente usa per segnalare la ricezione di una PDU
- Reset: Funzione di (N)-layer che riporta le (N)-entities allo stato iniziale.

Livello Fisico

- Trasmissione: codifica dei segnali (analogica, digitale)
- Sincronizzazione (bit, byte, time slot)
- Framing
- Mezzi trasmissivi e cablaggi passivi
- Aspetti funzionale, operativo, elettrico e meccanico

ALCUNE DEFINIZIONI

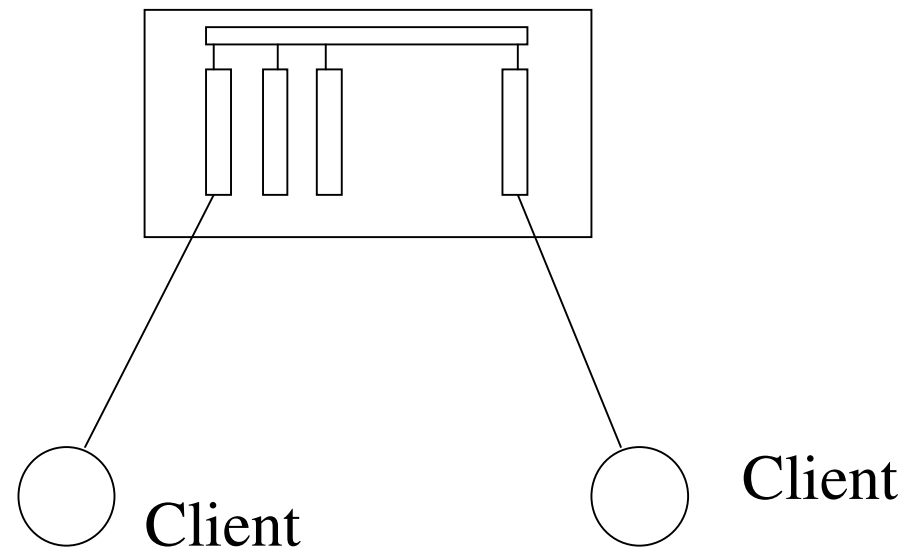
- DTE - Data Terminal Equipment
- DCE - Data Circuit terminating Equipment
- Trasmissione analogica e digitale
- I protocolli di Liv. Fis.si collocano sia tra DTE e DCE, sia tra DCE e DCE.

TOPOLOGIE

- LOGICHE: BUS, RING, MAGLIE
- FISICHE: ALBERO (STELLA DI STELLE) ISO DIS 11801
 - Campus Distributor
 - Building Distributor
 - Floor Distributor
 - Telecommunication Outlet

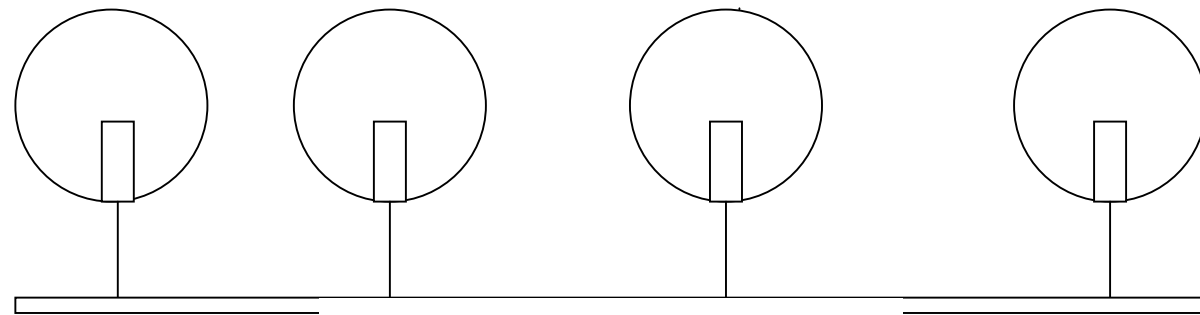
TOPOLOGIE A STELLA

- HUB

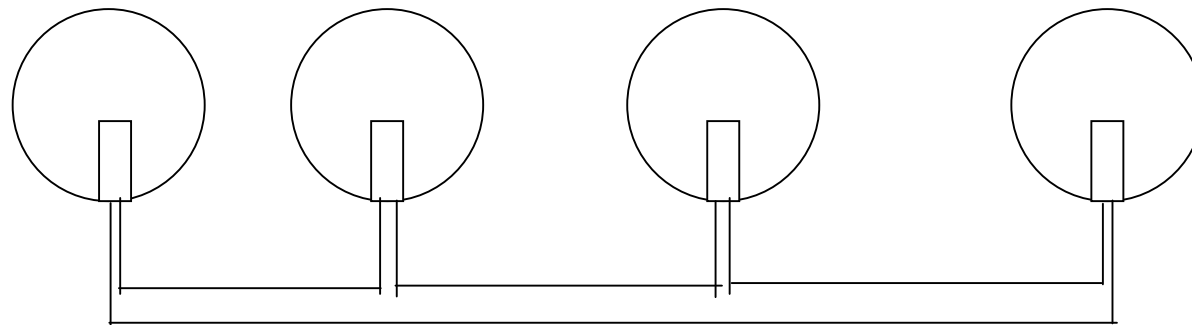


TOPOLOGIE DISTRIBUITE

- BUS e RING



Bus - shared medium



Anello

Mezzi trasmissivi per le reti Campus/LAN

- Cavi in rame Unshielded Twisted Pair (UTP) Cat. 3 e Cat. 5 (8 fili)
- Cavi coassiali (Coax/Broadband)
- Fibre ottiche (multimodali e monomodali)
- Wireless (Radio, Microonde, Infrarosso)

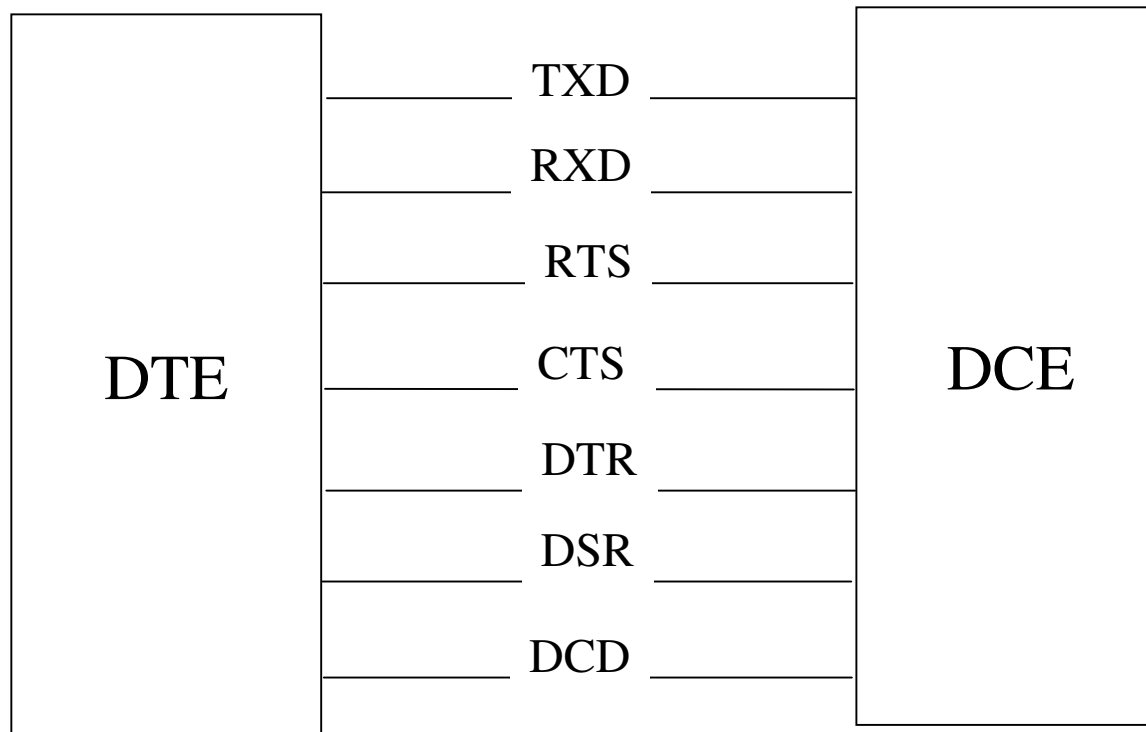
LINEE TELEFONICHE

- Dial-up (Switched) Lines (Commutate)
- Leased (Dedicated) Lines (Dedicate)
- Modem (Auto-Dial, Auto-Answer)
- Comandi (Hayes) Esempi:
 - Go Off-Hook
 - Send Break
 - Dial
 - Set
- I Modem sono dispositivi dotati di capacità di elaborazione

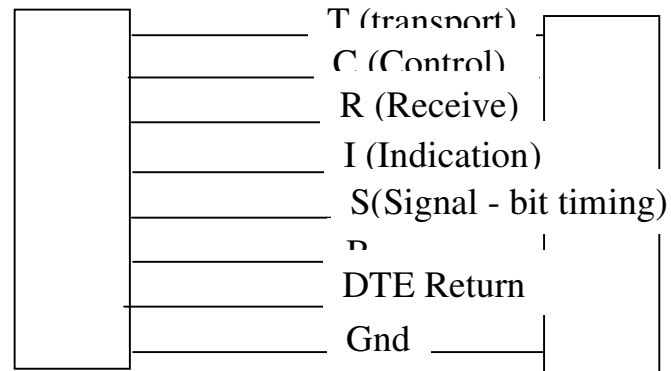
SEGNALI DI CONTROLLO A LIVELLO FISICO

- Segnali di Handshake per la verifica dell'esistenza della connessione
- Segnali di Handshake per il controllo del flusso (diverso da OSI)
- Segnale di Indication per lo stream di fi bit in arrivo

EIA RS 232 / CCITT V.24



X.21

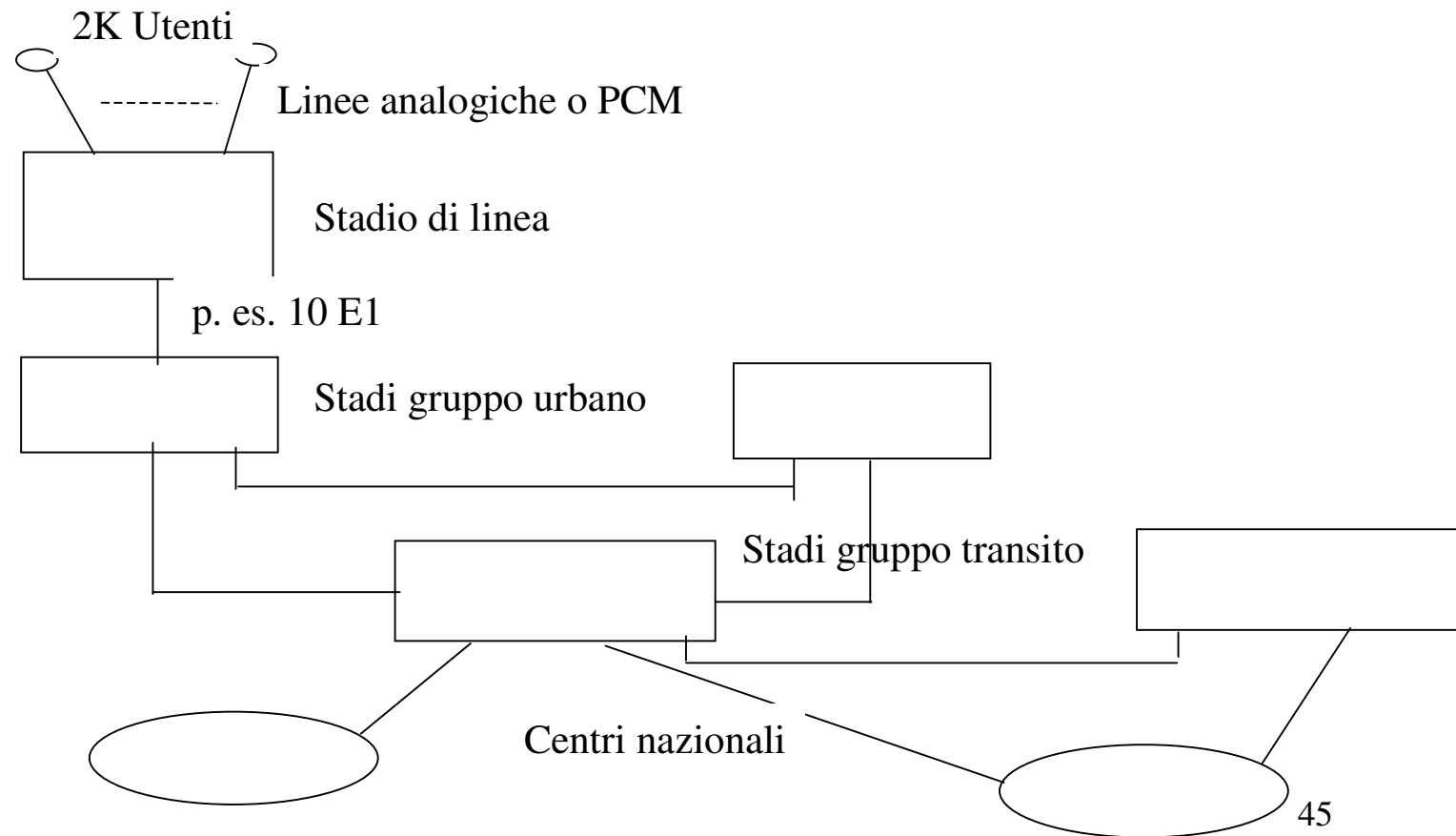


Step	C	I	Event in Telephony Analogy	DTE sends on T	DCE sends on R
0	Off	Off	No connection – line idle	1	1
1	On	Off	DTE picks up phone	0	
2	On	Off	DCE gives dial tone		“+++++++”
3	On	Off	DTE dials phone number	Address	
4	On	Off	Remote phone rings		Call progress
5	On	On	Remote phone picked up		1
6	On	On	Conversation	Data	Data
7	Off	On	DTE says goodbye	0	
8	Off	Off	DCE says goodbye		0
9	Off	Off	DCE hangs up		1
10	Off	Off	DTA hangs up	1	

Rete Telefonica Nazionale

Struttura Gerarchica

Aree di commutazione : 60K-80K utenti



USO DELLE FREQUENZE NELLA TRASMISSIONE FULL DUPLEX

- Split channel modem
- La banda è divisa in sottocanali il segnale è modulato in ogni sottocanale (es. Originate/Answer)

ORIGINATE		
TX	1070 Hz	SPACE
	1270 Hz	MARK
RX	2025 Hz	SPACE
	2225 Hz	MARK

DUPLEX

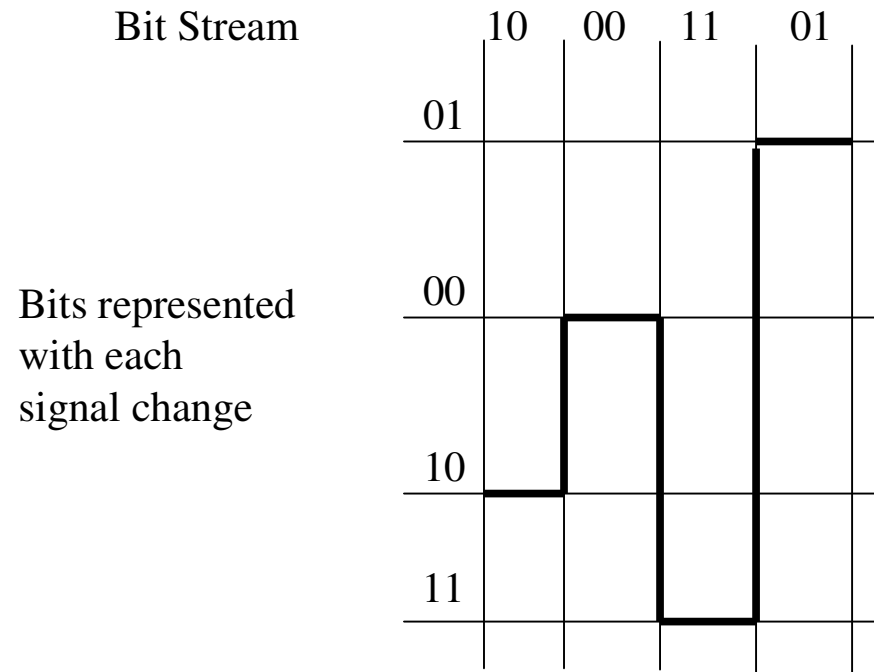
- HALF DUPLEX: Trasmissione in entrambe le direzioni ma non simultaneamente
- FULL DUPLEX: Trasmissione bidirezionale simultanea
- NOTA: A seconda della velocità di cambiamento di direzione una trasmissione HDX può essere vista come FDX

BAUD e BIT RATE

- BAUD: Frequenza di variazioni al secondo sulla linea
- BIT/S: Quantità di informazione effettivamente trasmessa
- Se ad ogni bit corrisponde un livello e se non vengono trasmessi bit di servizio

$$\text{BAUD} = \text{BIT/S}$$

BAUD E BIT RATE



SINCRONIZZAZIONE

- Problema di difficile formalizzazione in considerazione dei diversi livelli
 - a livello di bit
 - a livello di time-slot
 - a livello di frame
 - a livello di superframe
- L'obiettivo è quello di fare sì che i Livelli Fisici possano ricostruire i segnali ricevuti
- Tecniche:
 - Trasmissione clock esterno
 - Recovery del clock dal segnale
 - Disponibilità dello stesso clock

TRASMISSIONE ASINCRONA

- Un carattere è delimitato da
 - Uno START BIT
 - Uno o 'più STOP BIT
 - Il Trasm. E il Ric. hanno clock indipendenti, di pari frequenza
 - E' possibile però che la frequenza non sia **esattamente** la stessa
 - La trasm. asincrona è possibile se:
 - la lunghezza del blocco e
 - la differenza dei due clock
- sono tali da non consentire
- né la perdita di un bit
 - né la doppia ricezione di un bit

TRASMISSIONE SINCRONA

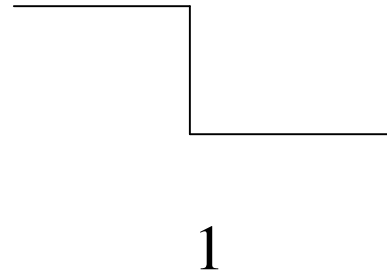
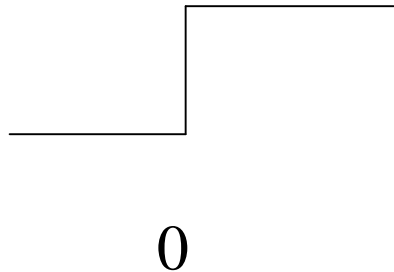
- Diversi caratteri vengono raggruppati e trasmessi back-to-back
- Ogni blocco è delimitato da caratteri “sync”
- C'è una relazione temporale tra TX e RX
- La temporizzazione può essere fornita
 - Attraverso una linea separata di clock
 - ricavando il clock dal segnale in RX
 - Regolando finemente un clock esistente con il clock ricavato dal segnale

SINCRONIZZAZIONE

- IL PROBLEMA E' QUELLO DI TRASMETTERE **MESSAGGI**
- UN MESSAGGIO PUO' ESSERE
 - UN CARATTERE
 - UN INSIEME DI BIT DI LUNGHEZZA NON PREDEFINITA
- SINCRONIZZAZIONE
 - DI BIT
 - DI TIME-SLOT
 - DI MESSAGGIO

CODICI DI LINEA

- NRZ
 - DUE DIVERSI LIVELLI ASSOCIATI A 1 E 0
- NRZI
 - VARIAZIONE ASSOCIATA A 0
 - NON VARIAZIONE ASSOCIATA A 1
- MANCHESTER



ALTERNATE MARK INVERSION

- IMPULSI DI POLARITA' DIVERSA PER GLI 1
 - SINCRONIZZAZIONE
 - NEUTRALITA' ELETTRICA
- B8ZS: BIPOLAR 8 ZERO SUBSTITUTION
8 ZERI CONSEC. -> VIOLAZIONE A SECONDA
DELL'IMPULSO PRECED.
POSIT: 000+-0-+
NEGAT: 000-+0+-
- HDB3: HIGH DENSITY BIPOLAR ORDER 3
0000 -> 000V OPPURE 100V
DOVE V E' UNA VIOLAZIONE SCELTA CHE
SUCCESSIVI V SI ALTERNINO IN POLARITA'

PDH - US : T1 CARRIER

(PLESIOCHRONOUS DIGITAL HIERARCHY)

- PER FONIA E PER DATI
- TRAMA (FRAME DI LIVELLO FISICO)
 - 24 CANALI PCM
 - 1 BIT PER SINCRONIZZAZIONE DI TRAMA

$$24 * 8 \text{ bit} + 1 \text{ bit} = 193 \text{ bit}$$

$$193 \text{ bit} * 8K \text{ 1/sec} = 1.544.000 \text{ bit/sec}$$

SINCRONIZZAZIONE DI TRAMA

- FRAME (DI LIVELLO FISICO): 24 TIME SLOT A 8 BIT

UN INSIEME DI BIT A 0 E A 1 ALTERNATI PERMETTE DI DISTINGUERE I FRAME (OGNI TIME SLOT TRASPORTA UNA CONNESSIONE VOCEO DATI INCLUSA LA SEGNALAZIONE)

- SUPERFRAME: 12 FRAME

IL BIT PATTERN 100011011100 PERMETTE DI DISTINGUERE I SUPERFRAME (LA SEGNALAZIONE E' TRASPORTATA NELLA 6° E NELLA 12° TIME SLOT)

JITTER

- NASCE DAL COMPORTAMENTO DELLE LINEE E DEGLI APPARATI E SI RIFERISCE ALLA VARIAZIONE NELLA TEMPORIZZAZIONE DEL SEGNALE RICEVUTO
- E' NECESSARIO CHE ANCHE IL CLOCK RICAVALTO SEGUA IL JITTER, IN MODO DA NON PERDERE BIT IN RICEZIONE O ACQUISIRNE IN ECCESSO

COMPENSAZIONE DEL JITTER CLOCK ELEVATO IN TRASMISSIONE

- VELOCITA' T1: 1544000 +/- 75 bit/sec
- IN TRASMISSIONE PER IL MULTIPLEXING VIENE UTILIZZATO IL CLOCK MASSIMO IN MODO DA POTER CONTENERE IL SEGNALE IN QUALUNQUE CASO

Gerarchia - PDH

Multiplexing

- MULDEM (MULTIPLEXER DEMULTIPLEXER) CARATTERIZZATO DALLA NATURA PLESIOCRONA DEL SEGNALE
- CLOCK INDIPENDENTI

Speed for the 1544Hierarchy		Speed for the 2.048 Hierarchy
1.544		2.048
6.312		8.448
32.064 (Japan)	44.736 (USA)	34.638

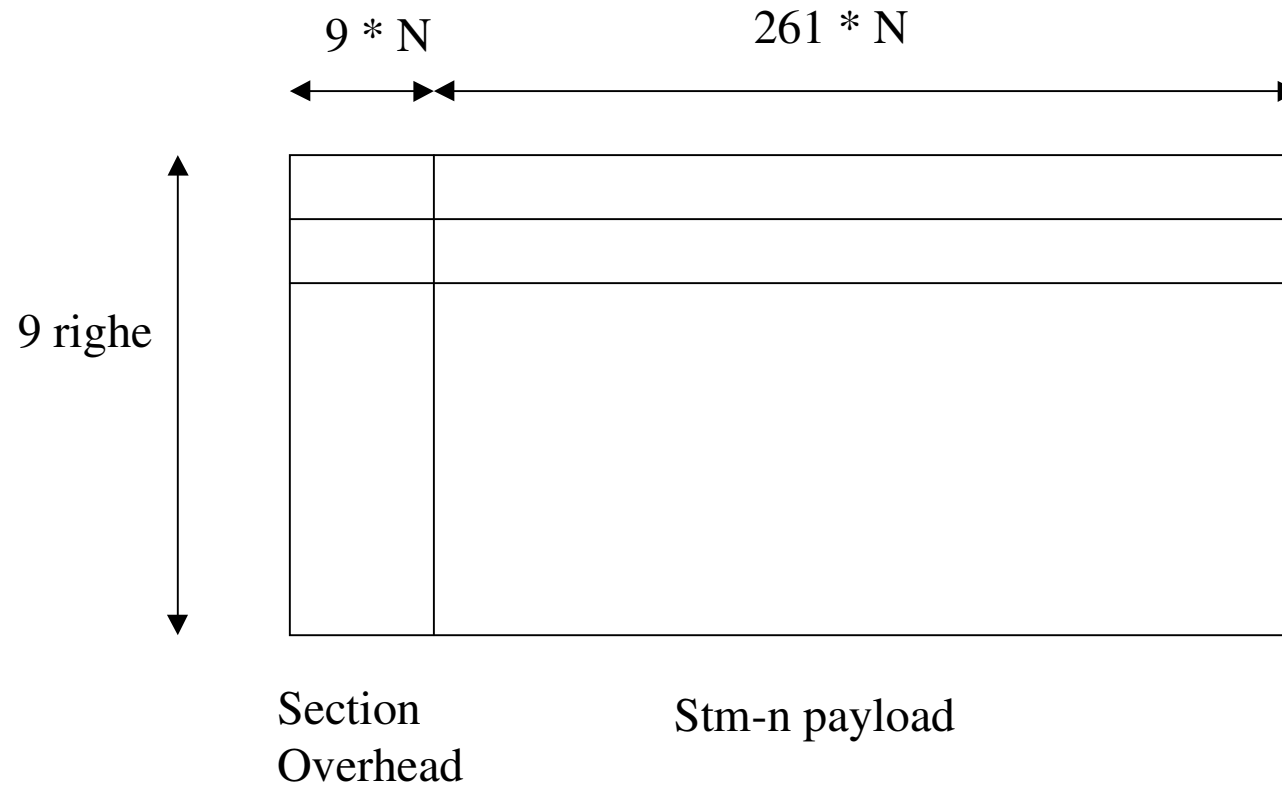
SYNCHRONOUS DIGITAL HIERARCHY (SDH/Sonet)

- Usata per la trasmissione sincrona ad alta velocità (es. 10Gbps) su fibra ottica o su canale radio
- Add/Drop semplificato
- Elevata disponibilità e possibilità di gestione
- Affidabilità
- Standard internazionale

GERARCHIA - SDH/Sonet

- 155.52 Mbps
- 622.08 Mbps
- 2488.32 Mbps

SDH



$$270 * 9 * 8 * 8K = 155.52 \text{ Mbps} \text{ ----- STM-1 - OC-3}$$

SDH

- Section overhead
 - Regenerator Section Overhead (RSOH)
 - Multiplexer Section Overhead (MSOH)
 - Puntatori alle Tributary Units
- Tributary Units (Virtual Containers)
 - Path Overhead
 - Container

SINTESI LIVELLO FISICO

- Aspetti meccanici (cablaggi passivi, cavi, connettori, topologie...)
- Aspetti elettrici (tensioni, correnti, segnali, modulazioni ...)
- Linee commutate e linee dedicate
- Sincronizzazione a livello di bit (trasm. asincrona, plesiocrona, sincrona) e a livello di byte/frame (es. T1)
- Aspetti di controllo (segnalazione)

Data Link Layer

- Si vuole realizzare uno scambio di dati **affidabile** tra due sistemi
 - connection oriented
 - per esempio per multiplexare più connessioni di livello 2 sulla stessa connessione fisica
 - connectionless
 - per esempio se le funzionalità di connessione sono a livelli superiori

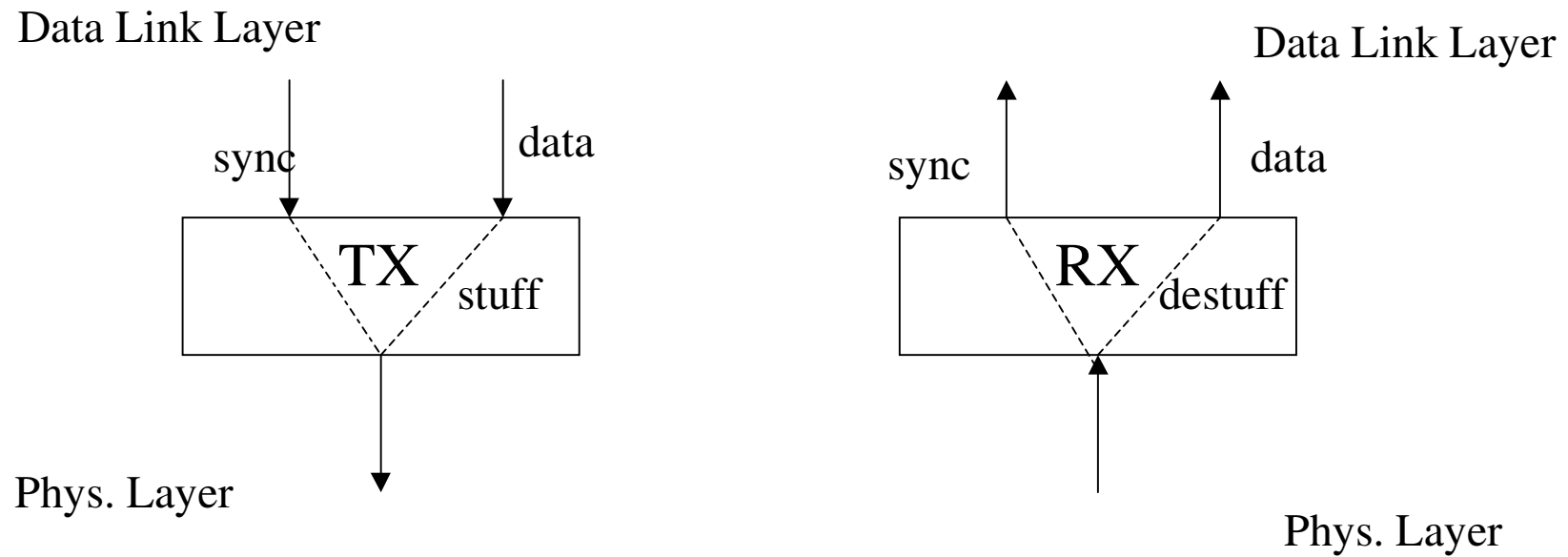
Framing

- La prima cosa da realizzare nel Data Link Layer è la suddivisione di uno stream di bit in Frame
- Un Frame di livello Data Link è diverso da un Frame di livello fisico
- La delimitazione viene fatta attraverso una sincronizzazione di qualche tipo
 - Trasmissione di caratteri o sequenze di bit
 - Violazione del livello fisico

Trasmissione di caratteri i sequenze di bit

- Caratteri SOH, STX, ETX
- Sequenze SYN 01111110
- Necessità di consentire la trasmissione degli stessi caratteri/sequenze di bit nel payload
- Escaping/Stuffing

Bit stuffing



Affidabilità

- Controllo di errore
 - Positive Acknowledgement and Retransmission (PAR)
 - Parità
 - CRC
 - Ridondanza

Connessione di livello 2



Contenuti del Frame di Livello 2

- Identificatore connessione o identificatori end-point
- Controllo di connessione
- Informazioni per il controllo degli errori
- payload

Progetto di una DL-Entity

- Necessità di un sistema operativo in Tempo Reale equipaggiato con
 - Risposta alle interruzioni in tempo reale
 - Supporto per la sincronizzazione e per lo scambio dati tra processi
 - Supporto per la gestione dei timeout
 - Supporto per l'attivazione, la disattivazione e la sospensione dei processi

Progetto di una DL-Entity

- La DL_Entity è uno dei **Processi** concorrenti nel sistema
- Anche la N_Entity e la PH-Entity sono processi concorrenti nel sistema
- I tre processi si scambiano dati utilizzando le facility messe a disposizione dal Sistema Operativo

```

void protocol ()
{
    seq_nr next_frame_to_send;           /*variabili di stato*/
    seq_nr ack_expected;
    seq_nr frame_expected;
    frame r;
    packet buffer[MAX_SEQ+1];
    seq_nr nbuffered;
    seq_nr i;
    event_type event;

    enable_network_layer();              /*inizializzazione dello stato*/
    ack_expected=0;
    next_frame_to_send=0;
    frame_expected=0;
    nbuffered=0;

```

```
while (true) {                                     /* main loop */
    wait_for_event(&event);
    swicth (event) {

        case network_layer_ready:    /* arrivo di un nuovo pacchetto */
            from_network_layer(&buffer[next_frame_to_send]);
            nbuffered=nbuffered+1;
            send_data(next_frame_to_send, frame_expected, buffer);
            inc (next_frame_to_send);
            break;
```

```
case frame_arrival:                                /* arrivo di un nuovo frame */
    from_physical_layer(&r);
    if (r.seq==frame_expected) {
        to_network_layer(&r.info);
        inc(frame_expected);
        while (between(ack_expected, r.ack, next_frame_to_send)) {
            nbuffered=nbuffered-1;
            stop_timer(ack_expected);
            inc (ack_expected);
        }
        break;
```

```

    case cksum_err: /*notifica di un errore di cksum in ricezione*/
        break;

    case timeout: /*notifica dello scatto di un timeout*/
        next_frame_to_send=ack_expected;
        for (i=1; i <= nbuffered; i++) {
            send_data(next_frame_to_send, frame_expected, buffer);
            inc(next_frame_to_send);
        } /* end of switch */

    if (nbuffered < MAX_SEQ) /*controllo di flusso*/
        enable_network_layer();
    else
        disable_network_layer();
} /* end of while */
} /* end of function */

```

```
static void send_data(seq_nr frame_nr, seq_nr, frame_expected, packet_buffer[])
{
    frame s;
    s.info=buffer[frame_nr];
    s.seq.=frame_nr;
    s.ack=(frame_expected+MAX_SEQ) % (MAX_SEQ+1);
    to_physical_layer(&s);
    start_timer(frame_nr);
}
```

```
# define MAX_PKT 1024
# define MAX_SEQ 7

typedef enum {frame_arrival,
             cksum_err,
             timeout,
             network_layer_ready} event_type;

typedef enum {false, true} boolean;
typedef unsigned int seq_nr;
typedef struct {unsigned char data[MAX_PKT]; } packet;
typedef enum{data, ack, nak} frame_kind;

typedef struct {
    frame_kind kind;
    seq_nr seq;
    seq_nr ack;
    packet_info;
} frame;
```



```
void wait_for_event(event_type *event);
```

```
void from_network_layer(packet *p);  
void to_network_layer(packet *p);
```

```
void from_physical_layer (frame *r);  
void to_physical_layer (frame *s);
```

```
void start_timer (seq_nr k);  
void stop_timer (seq_nr k);
```

```
void enable_network_layer(void);  
void disable_network_layer(void);
```

```
# define inc(k) if (k< MAX_SEQ) k=k+1; else k=0;
```

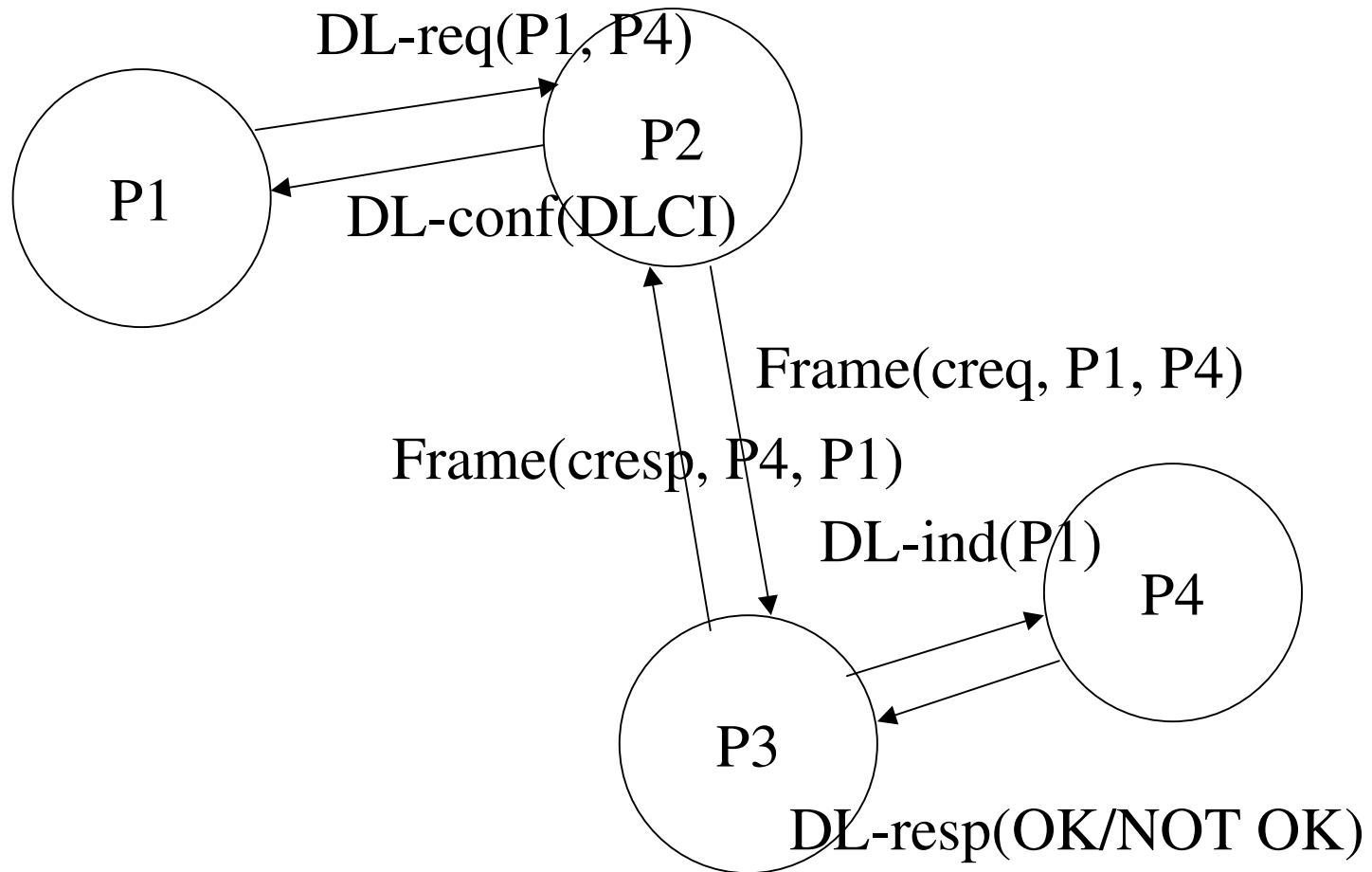
DL- Connection

- Soluzione 1: L'entità corrisponde ad un processo. In questo caso bisogna discriminare tra primitive di controllo e primitive di scambio dati
- Soluzione 2: L'entità non corrisponde necessariamente ad un processo, ma può corrispondere a più processi

DL-Connection

- Si può dividere tra
 - Dati
 - scambi di informazioni per i livelli superiori
 - Controlli
 - Segnalazione
 - Gestione
 - attivazioni/disattivazioni, monitoraggio, ...

Connessioni



Medium Access Control (MAC)

- Modello composto da N stazioni che generano e trasmettono frame
- Un solo canale, con allocazione dinamica, per tutte le comunicazioni
- Possibilità di collisioni
- Divisione di tempo (Continua, Slotted)
- Carrier Sense

MAC - Evoluzione

- Aloha: tutte le stazioni inviano frame, rilevano collisioni grazie al PH-Layer, in caso di collisione attendono un tempo casuale e ritrasmettono.
- Carrier Sense Multiple Access (CSMA)
- CSMA/CD (Collision Detection)

Collisioni

Sia T il max tempo di propagazione tra due stazioni.

Se la stazione $S1$ inizia a trasmettere al tempo $T1$ e quella più lontana da essa ($S2$) inizia a trasmettere al tempo $T2 < T1 + T$, ci può essere collisione.

$S2$ se ne accorge e smette subito di trasmettere.

$S1$ si accorge della collisione dopo un altro tempo T e quindi in totale dopo $2T$.

Se la velocità di propagazione è circa 200K Km/s , il tempo per percorrere 1KM è di circa 5 microsecondi .

IEEE 802

- IEEE 802.2 describe il Logical Link Control (LLC)
- IEEE 802.3 describe il CSMA/CD (Ethernet)
- IEEE 802.4 describe il Token Bus
- IEEE 802.5 describe il Token Ring

IEEE 802.3

Nome	Cavo	Max. Segment	Nodi/Seg.
10Base5	Thick Coax	500 m	100
10Base2	Thin Coax	200 m	30
10Base-T	Twisted Pair	100 m	1024
10Base-F	Fiber Optics	2000 m	1024

P		DST	SRC	LEN	DATA	PAD	FCS
---	--	-----	-----	-----	------	-----	-----

P = Preamble

DST = Destination Address

SRC = Source Address

LEN = Length of Data Field

DATA = payload

PAD = Byte aggiuntivi

FCS = CRC

IEEE 802.3

- Preamble : 7 bytes ciascuno 10101010, cioè 56 bit. Con il Manchester encoding si ha un'onda quadra a 10MHz per 5.6 microsecondi.
- START OF FRAME: 10101011
- DST, SRC: 6 bytes in totale.
- LEN: 2 bytes
- DATA: 0-1500 byte
- PAD: 0-46 byte (Min. Frame Len = 64)
- FCS: 4 bytes

Minimum Length

LUNGHEZZA MASSIMA DELLA RETE 2.5 KM

MAX NUMERO DI REPEATER: 4

T MAX PER RILEVAZIONE COLLISIONE (IEEE 802.3):
51.2 microsecondi corrispondenti a 64 bytes (a 10MBps)

A VELOCITA' MAGGIORI TMAX RIMANE
COSTANTE E LA DIMENSIONE MINIMA DEL
FRAME CRESCE (p. es. a 1GBPS è di 6400 bytes)

RITRASMISSIONE

- Binary Exponential Backoff
- Dopo una collisione il tempo è diviso in slot di 51.2microsec
- Dopo la prima collisione ogni stazione aspetta 0 o 1 slot (con eguale probabilità) e ritrasmette
- Dopo la seconda collisione ogni stazione aspetta 0, 1, 2, o 3 slot (con eguale probabilità) e ritrasmette

RITRASMISSIONE

- Dopo i collisioni viene scelto un numero a caso tra 0 e 2^i
- Dopo 10 collisioni c'è una saturazione tra 0 e 1023

IEEE 802.5 - Token Ring

- Data Rate RMbps: 1 bit ogni $1/R$ sec
- $R=200\text{m/microsec}$ \rightarrow ogni bit occupa $200/R$ metri sul ring (ad es. un ring di 1000m può contenere 5 bit contemporaneamente)
- Ogni interfaccia ha un buffer di 1 bit ed introduce un ritardo di 1 bit. IL bit può essere modificato

IEEE 802.5 - Token Ring

- Uno speciale bit pattern chiamato **token** (3 **byte**) circola per il ring. Quando una stazione vuole trasmettere deve acquisire il token e rimuoverlo dal ring. Solo una stazione per volta può trasmettere.
- Il ring deve avere dimensioni tali (lunghezza e bit di ritardo) per contenere il token

Fiber Distributed Data Interface (FDDI)

- High Performance Token Ring (100Mbps)
basato su fibre ottiche su distanze fino a
200Km e con fino a 1000 stazioni connesse
- Usato come backbone per
l'interconnessione di più LAN
- Due fibre ottiche una in senso orario ed una
in senso antiorario (per maggiore
affidabilità)

High Level Data Link Control (HDLC)

Link Access Procedure (LAP)

- Protocollo di linea - ISO 3309/4335, ANSI X3.66
- Half/Full Duplex
- Bit oriented (bit stuffing)
- Point to Point - Point to Multipoint
- Stazioni
 - Primary
 - Secondary
 - Combined

HDLC

- Configurazione del canale
 - Unbalanced
 - una stazione primaria
 - una o più stazioni secondarie
 - Symmetrical
 - corrispondente a due stazioni virtuali unbalanced
 - Balanced
 - due stazioni combined connesse point to point

HDLC

- Modi operativi
 - NRM - Normal Response Mode (PtP, PtM)
 - La secondary station deve ricevere un poll prima di trasmettere. Poi trasmette anche più frame, ma dopo l'ultimo aspetta un altro poll.
 - ARM - Asynchr. Response Mode (non usato)
 - La secondary station può trasmettere quando ne ha bisogno (in HD solo in Idle Channel in FD sempre)
 - Asynchronous Balanced Mode
 - ABM - Asynchr. Balanced Mode (per le combined station)
 - nessun vincolo sulle trasmissioni

HDLC

- Trasmissione continua di Flag 01111110 in assenza di frame
- Tra 7 e 15 bit a 1 indicano un problema sul link
- Sopra 15 bit a 1 indicano channel idle (per il supporto della trasmissione HD)

HDLC

Formato Frame

01111110	Address 8/16	Control 8/16	Data - Variable	FCS 16/32	01111110
----------	-----------------	-----------------	--------------------	--------------	----------

Address: Usato nelle linee point-multipoint

Control: Numeri, Acknowledgements,

Data: Payload

Checksum: Controllo CRC

HDLC

Address

- Identifica le stazioni primarie e/o secondarie attraverso un indirizzo unico
- In una configurazione unbalanced l'indirizzo sia dei comandi che delle risposte è quello delle stazioni secondary
- In una configurazione balanced
 - i frame command contengono dst address
 - i frame response contengono src address

HDLC

Formato Control Field

A)	0	N(S)	P/F	N(R)
----	---	------	-----	------

B)	1	0	SC	P/F	N(R)
----	---	---	----	-----	------

C)	1	1	UN	P/F	UN
----	---	---	----	-----	----

A) Information Frame

B) Supervisory Frame

C) Unnumbered Frame

SC = Supervisory Code

UN = Unnumbered Code

P/F = Poll Final

N(S) = Send Seq. Num

N(R) = Rec. Seq. Num.

HDLC

Data

- Prevista inizialmente solo nei frame di tipo Information
- Prevista però anche nei frame Unnumbered per supportare un modo di operare di tipo connectionless a livello DL

HDLC - Control Field

- Information Frame: usato per trasmettere dati ed acknowledgements, richieste di ritrasmissione
- Supervisory Frame: usato come un information frame con l'esclusione della trasmissione di dati
- Unnumbered Frame: inizializzazione e disconnessione del link, trasmissioni di dati connectionless

HDLC - Flow Control

- Due variabili di stato
 - $V(S)$: prossimo frame da trasmettere
 - $V(R)$ prossimo frame atteso
- Procedura
 - Quando il ricevitore riceve un frame, confronta $N(S)$ con $V(R)$, se è = incrementa $V(R)$, mette $V(R)$ in un frame di acknowledge, altrimenti predispone un Reject o Selective Reject

HDLC - P/F bit

- Si tratta di un bit chiamato P per le Primary Station ed F per le Secondary Station
- Primary Station usa $P=1$ per sollecitare risposte da Secondary Station
- Secondary Station usa $F=1$ per rispondere ad un Poll e per segnalare la fine di un insieme di frame consecutivi.

HDLC - Supervisory e Unnumbered

- Supervisory Commands
 - Receiver Ready (RR), Reject (REJ), Receiver Not Ready (RNR), Selective Reject (SREJ).
- Unnumbered
 - Unnumbered Information (UI), Request Disconnect (RD), Disconnect (DISC), Reset (RSET) Set XXX YYY Mode (SNRM, SARM, SABM)

Point-to-Point Protocol (PPP)

- Data Link Layer per WAN nelle tecnologie Internet
- RFC 1661 etc.
- Error Detection, supporto di più protocolli di livello superiore, permette la negoziazione di indirizzi IP (Network), permette l'autenticazione

PPP

- Nasce da HDLC
- PPP mette a disposizione:
 - Un metodo di framing
 - Un modo di negoziare i parametri del link - Link Control Protocol (LCP)
 - Un modo di negoziare le opzioni dei livelli superiori - Network Control Protocol (NCP)

PPP

- Character oriented
- Framing con carattere 01111110
- Address: 11111111
- Control: Unnumbered Information per default (controllo degli errori ma non ritrasmissione)
- Protocol: 1/2 byte per la definizione del protocollo di livello superiore (LCP, NCP, IP, IPX, AppleTalk, ...)
- Payload: fino a 1500 byte
- Checksum: 2/4 byte

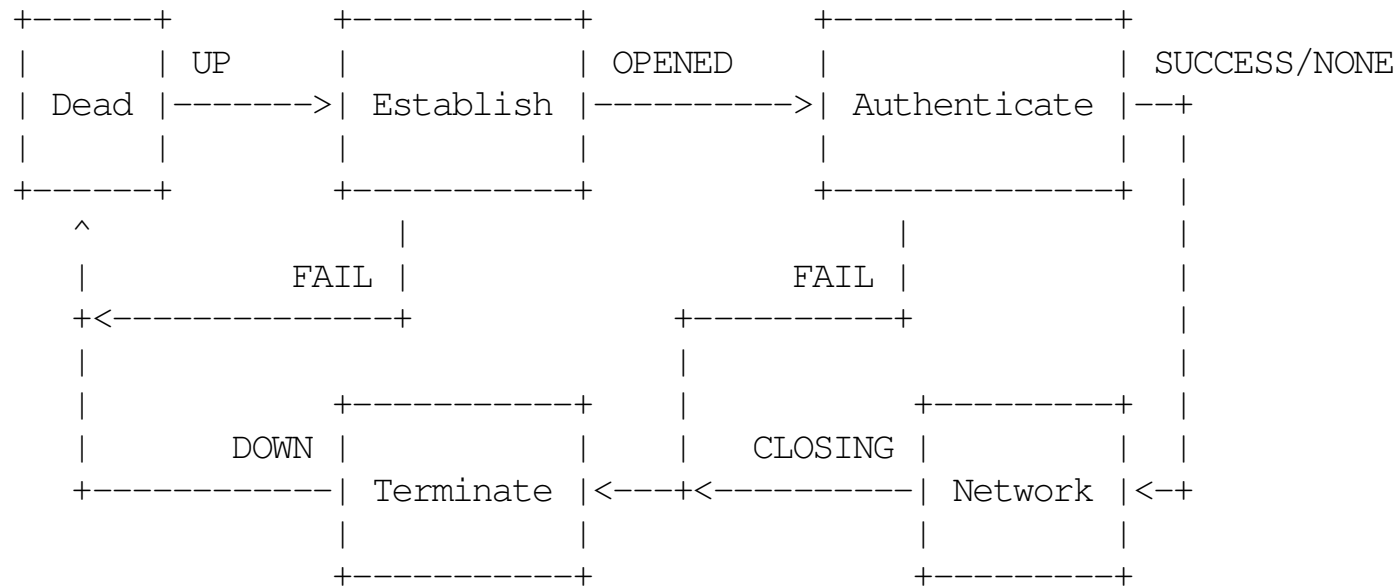
PPP

- Simple link between peers
- Full Duplex simultaneous bidirectional
- Encapsulation for multiplexing different NLP
- Self configuration through option negotiation
- Encapsulation for multiplexing different Network Layer Protocol

Protocol

- LSB del Byte meno significativo = 1
- LSB del Byte più significativo = 0
- Codici:
 - C021 LCP
 - C023 PSP
 - C025 LQP
 - C223 CHAP
 - 00CF NLPID

PPP - Sequenza di stati



LCP Packets

- Link Configuration packets used to establish and configure a link (Configure-Request, Configure-Ack, Configure-Nak and Configure-Reject).
- Link Termination packets used to terminate a link (Terminate-Request and Terminate-Ack).
- Link Maintenance packets used to manage and debug a link (Code-Reject, Protocol-Reject, Echo-Request, Echo-Reply, and Discard-Request).

LCP Packet

Code	Identifier	Length	Data
------	------------	--------	------

- 1 Configure-Request
- 2 Configure-Ack
- 3 Configure-Nak
- 4 Configure-Reject
- 5 Terminate-Request
- 6 Terminate-Ack
- 7 Code-Reject
- 8 Protocol-Reject
- 9 Echo-Request
- 10 Echo-Reply
- 11 Discard-Request

LCP Packet

- **Identifier:** The Identifier field is one octet, and aids in matching requests and replies. When a packet is received with an invalid Identifier field, the packet is silently discarded without affecting the automaton.
- **Length:** The Length field is two octets, and indicates the length of the LCP packet, including the Code, Identifier, Length and Data fields. The Length **MUST NOT** exceed the MRU of the link. Octets outside the range of the Length field are treated as padding and are ignored on reception. When a packet is received with an invalid Length field, the packet is silently discarded without affecting the automaton.
- **Data:** The Data field is zero or more octets, as indicated by the Length field. The format of the Data field is determined by the Code field.

Configure Request

- An implementation wishing to open a connection MUST transmit a Configure-Request. The Options field is filled with any desired changes to the link defaults.
- Identifier: The Identifier field MUST be changed whenever the contents of the Options field changes, and whenever a valid reply has been received for a previous request.

ECHO REQUEST REPLY

- LCP includes Echo-Request and Echo-Reply Codes in order to provide a Data Link Layer loopback mechanism for use in exercising both directions of the link. This is useful as an aid in debugging, link quality determination performance testing, and for numerous other functions.
- Echo-Request and Echo-Reply packets **MUST** only be sent in the LCP Opened state. Echo-Request and Echo-Reply packets received in any state other than the LCP Opened state **SHOULD** be silently discarded.

Option Configuration

- The options indicate additional capabilities or requirements of the implementation that is requesting the option. An implementation which does not understand any option SHOULD interoperate with one which implements every option.
- A default is specified for each option which allows the link to correctly function without negotiation of the option, although perhaps with less than optimal performance.
- Except where explicitly specified, acknowledgement of an option does not require the peer to take any additional action other than the default.
- It is not necessary to send the default values for the options in a Configure-Request.

Options

- Maximum Receive Unit
- Async-Control Char. Mapping
- Authentication Protocol
- Quality Protocol
- Magic Number
- Protocol Field Compression
- Address Contro Field Compression

Restart Timer

- There is one special timer used by the automaton. The Restart timer is used to time transmissions of Configure-Request and Terminate-Request packets. Expiration of the Restart timer causes a Timeout event, and retransmission of the corresponding Configure-Request or Terminate-Request packet. The Restart time **MUST** be configurable, but **SHOULD** default to three (3) seconds.

Restart Timer

- Only the Send-Configure-Request, Send-Terminate-Request and Zero-Restart-Count actions start or restart the Restart timer. The Restart timer is stopped when transitioning from any state where the timer is running to a state where the timer is not running.
- The Restart timer SHOULD be based on the speed of the link. The default value is designed for low speed (2,400 to 9,600 bps), high switching latency links (typical telephone lines). Higher speed links, or links with low switching latency, SHOULD have correspondingly faster retransmission times.

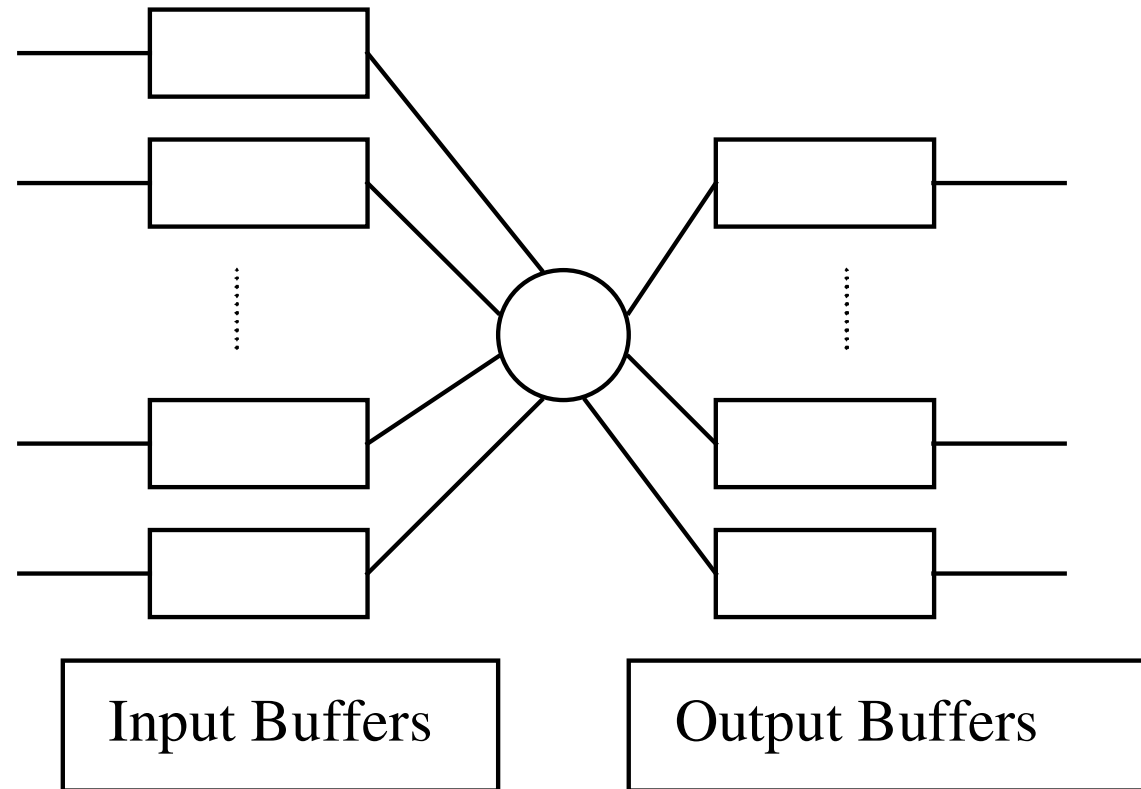
Restart Timer

- Instead of a constant value, the Restart timer MAY begin at an initial small value and increase to the configured final value. Each successive value less than the final value SHOULD be at least twice the previous value. The initial value SHOULD be large enough to account for the size of the packets, twice the round trip time for transmission at the link speed, and at least an additional 100 milliseconds to allow the peer to process the packets before responding. Some circuits add another 200 milliseconds of satellite delay. Round trip times for modems operating at 14,400 bps have been measured in the range of 160 to more than 600 milliseconds.

Network Layer

- Necessità di effettuare Packet Relay:
Routing
- Routing dei pacchetti
 - Effettuato “on the fly” e quindi con requisiti elevati di velocità
- Predisposizione delle tabelle per il routing
 - Effettuato ogni tanto e quindi con requisiti elevati di completezza
- Controllo di Congestione

Packet relay



Routing (Instradamento)

- Tecniche adattive (on line) / statiche (off line)
- Riferimento Algoritmo di Dijkstra per il shortest path basato sul
 - Principio di ottimalità: Se un nodo J è sul percorso ottimo da I a K allora anche il percorso JK è ottimo

Percorso Minimo in un Grafo

- 1. Dato un grafo non orientato con costi associati agli archi si cerca la distanza tra S e D
- 2. Si parte dal nodo destinazione S
- 3. Si esaminano tutti i nodi adiacenti e si marciano con la coppia (costo minimo, prossimo nodo verso S)
- 4. Si identifica il nodo del grafo con costo minimo e lo si dichiara definitivo
- 5. Si parte da questo e si ricomincia dal passo 2 finché non si è arrivati a D

Altre tecniche di routing

- Flooding (esaustivo/selettivo)
 - Ogni pacchetto viene inviato su tutte le porte tranne che su quella da cui è arrivato
 - Meccanismi per evitare il sovraccarico della rete
 - Contatore con distanza S-D (O diametro della rete)
 - Verifica di tag nei pacchetti in modo da fermare eventuali ritrasmissioni

Altre tecniche di routing

- Vettori di distanza
- Ogni router contiene informazioni circa la distanza verso tutti gli host e la scambia con i vicini

Congestion Control

- Supponiamo
 - Data Rate 155Mb/sec
 - Distanza 10K Km
 - Velocità di trasmissione 100K Km/sec
- Si ha:
 - Ritardo end-to-end = 0.1 sec
 - Quantità di dati nella rete = 15.5 Mbit

Congestion Control

- Il traffico tende ad essere “bursty”, il che causa la cosiddetta “congestione”, che corrisponde essenzialmente al riempimento dei buffer dei router
- Questioni principali
 - Rivelazione di congestione
 - Passaggio dell’informazione agli agenti appropriati
 - Attuazione delle azioni di recovery

Congestion Control

- Rivelazione di congestione (detection)
 - % di pacchetti persi per “buffer pieno”
 - lunghezza media delle code
 - numero di pacchetti ritrasmessi per time-out
 - ritardo medio dei pacchetti
 - varianza del ritardo dei pacchetti

Congestion Control

- Passaggio dell'informazione all'agente appropriato
 - Host sorgente
 - Tutti i router attraverso un bit espressamente previsto nella sintassi del protocollo
 - Probing

Congestion Control

- Attuazione delle azioni di recovery
 - Open/Closed loop
 - Aumentare le risorse
 - Diminuire il traffico

Congestion Control

- Traffic shaping/policing
 - regolazione e monitoraggio del rate e quindi della burstiness del traffico
 - Leaky bucket algorithm
 - Fixed/variable size packets
- Flow specification
 - accordo tra source, receiver, network
 - Elementi: packet size, rate, delay, loss

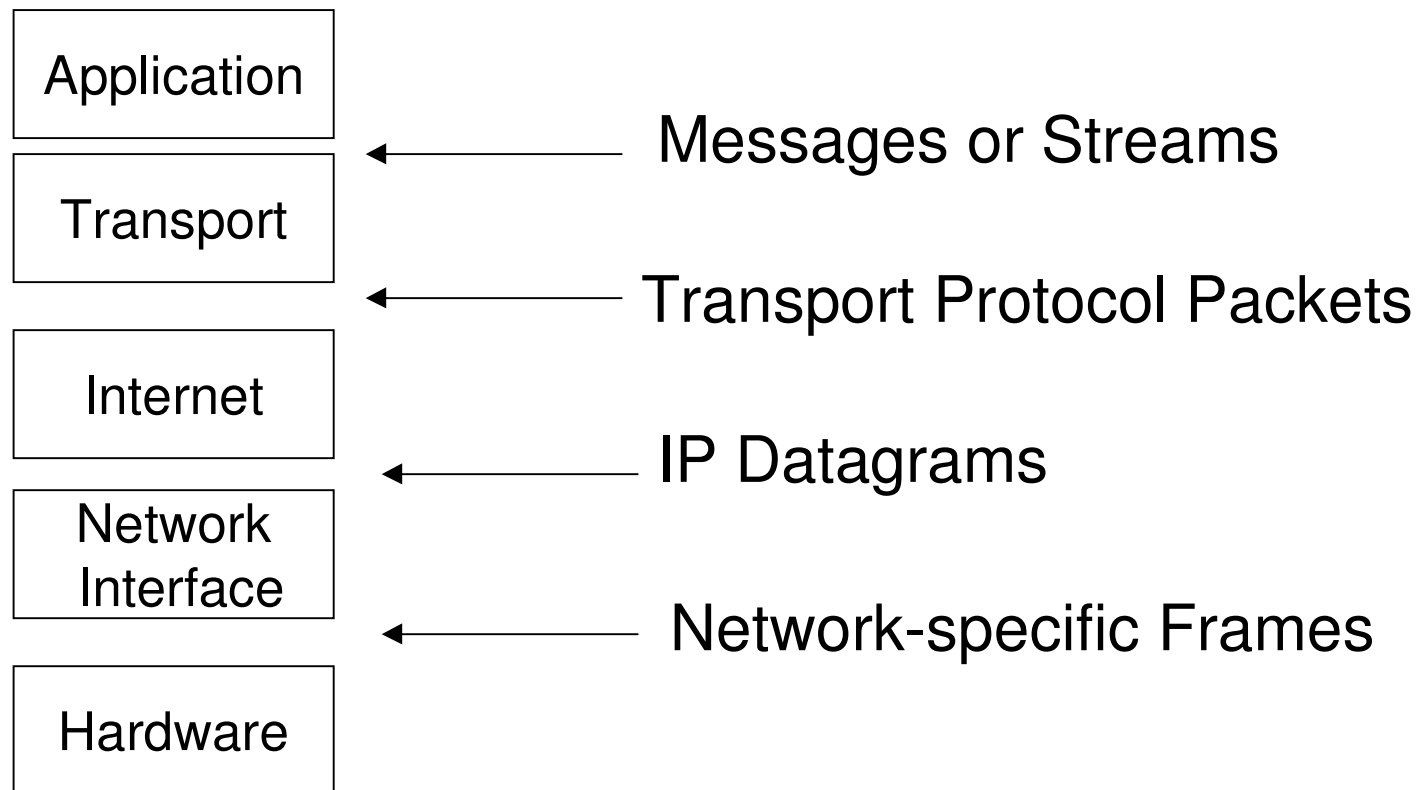
Congestion Control

- Admission control per Virtual Circuit subnets
- Choke packets (source host, hop by hop)
- Fair Queueing
- Weighted Fair Queueing
- Load Shedding

Congestion Control

- Delay/Jitter control

Layering in IP



Routing Table

Kernel IP routing table

Routing Table di polare.laser.dist.unige.it:

Destination	Gateway	Mask	Iface
130.251.12.0	*	255.255.255.0	eth0
172.16.0.0	laser-igw.laser	255.255. 0.0	eth0
127.0.0.0	*	255. 0. 0.0	lo
default	laser-gw.laser	0 . 0. 0.0	eth0

DNS:

Name: polare.laser.dist.unige.it

Address: 130.251.12.10

Name: laser-igw.laser.dist.unige.it

Address: 130.251.12.253

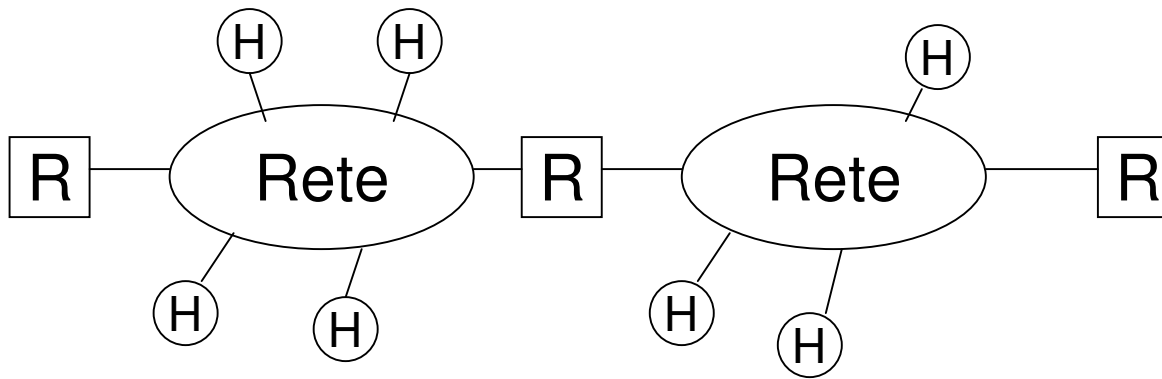
Name: laser-gw.laser.dist.unige.it

Address: 130.251.12.254

Layering in IP

- Link-Level vs End-to-end reliability
- Localizzazione dell'intelligenza (routing, flow control, acknowledgement)
 - Network vendor
 - Hosts

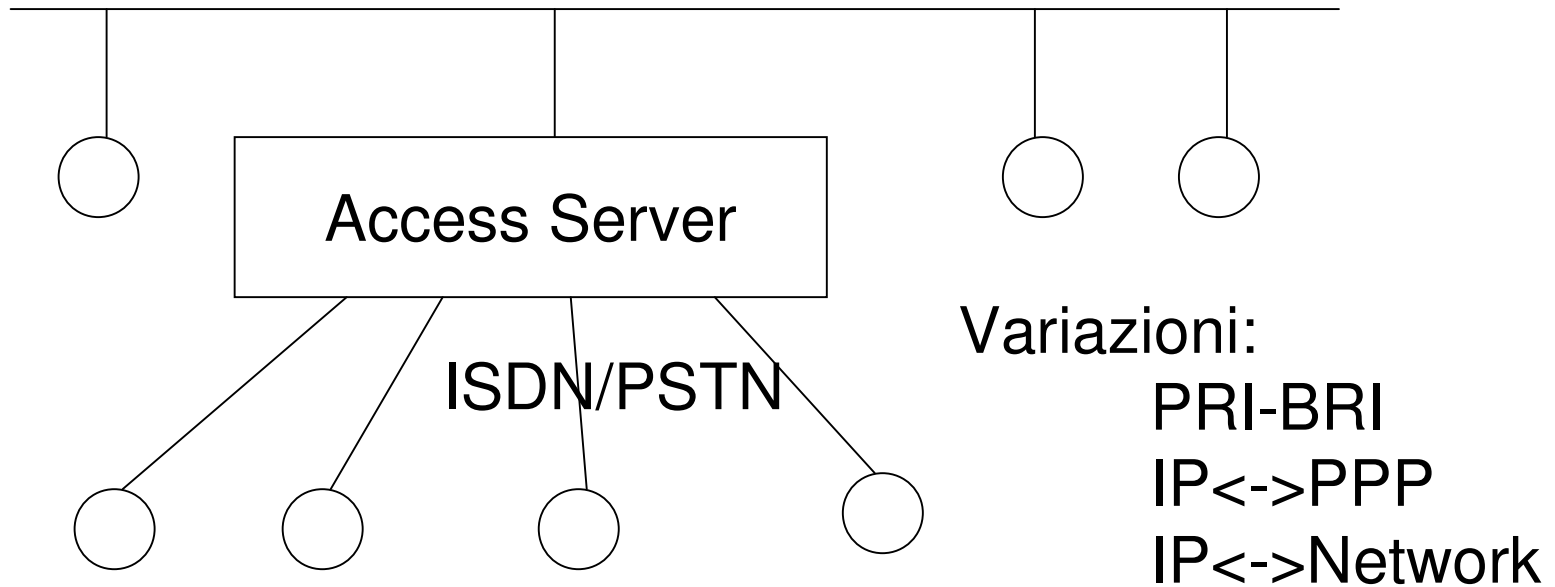
Struttura di una rete IP



Che cosa è una Rete:

- LAN
- WAN

Accesso a rete IP



Confini importanti nel TCP/IP

- Confine tra programma applicativo e rete
 - Transport
 - Internetwork
 - Network Interface/Data Link
- Confine tra programma applicativo e sistema
 - Programma - sistema operativo
 - Sistema operativo -interfaccia

Protocolli a livello di trasporto

- Process to Process Communication
- Il concetto di Port
 - Confronto con SAP-OSI
 - Confronto con Higher Level Protocol Selection
- User Datagram Protocol (UDP)
 - Connectionless
- Transmission Control Protocol (TCP)
 - Connection oriented, Reliable

Protocolli a livello di trasporto

User Datagram Protocol

- Servizio di trasporto connectionless basato sull'uso del protocollo IP.
- Mentre IP trasporta datagram tra host, UDP trasporta datagram tra applicazioni

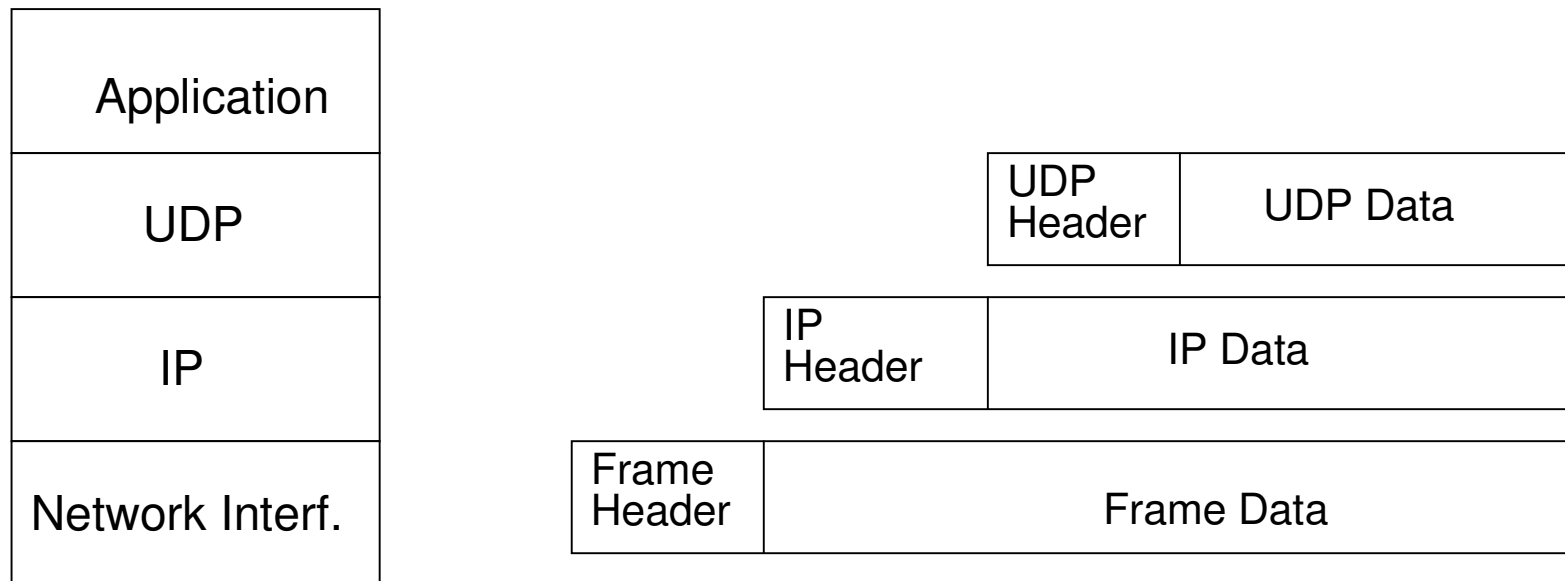
Protocolli a livello di trasporto

User Datagram Protocol

0	16	31
UDP Source Port		UDP Destination Port
Message Length		Checksum (optional)
Payload		

Protocolli a livello di trasporto

User Datagram Protocol



Protocolli a livello di trasporto

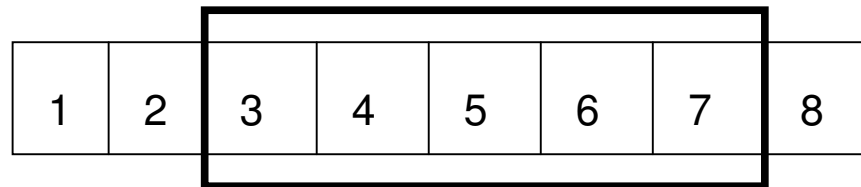
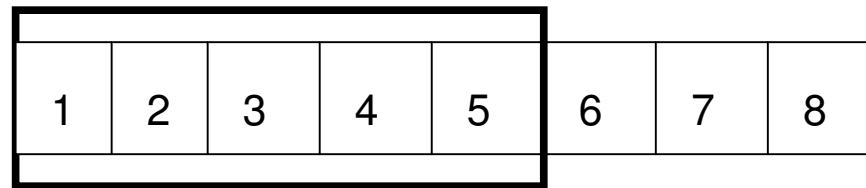
Transmission Control Protocol

- Servizio di trasporto affidabile (end-to-end)
- Full duplex
- Servizio basato su flussi non strutturati (stream)
- Connection Oriented - Virtual circuit
- Buffered - Buffer indipendenti in trasmissione in ricezione

Protocolli a livello di trasporto

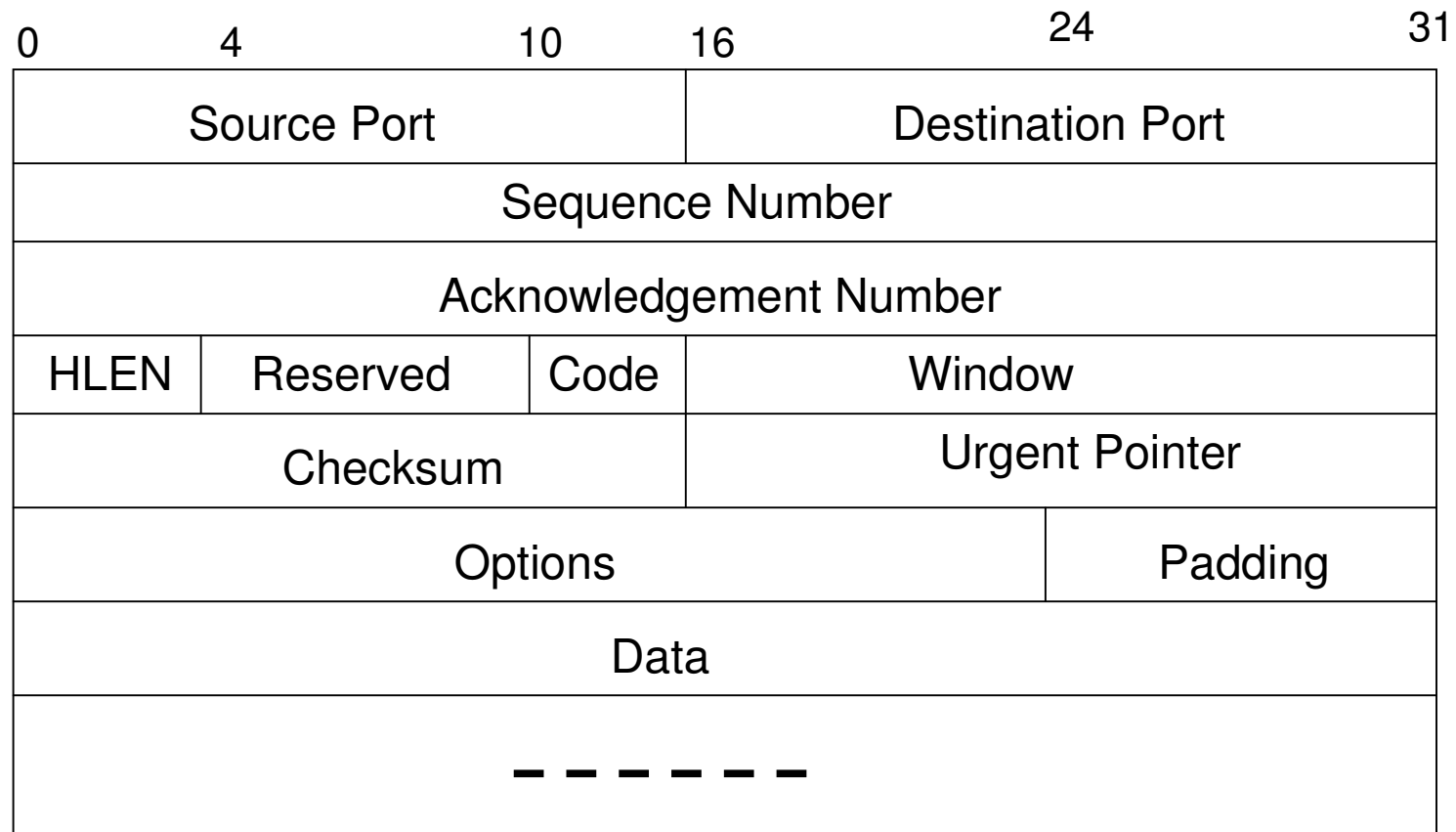
Transmission Control Protocol

- Affidabilità attraverso
- Positive Acknowledgement and Retransmission
- Sliding Windows (pipelining)



Protocolli a livello di trasporto

Transmission Control Protocol



Protocolli a livello di trasporto

Transmission Control Protocol

Code Bits:	URG	Urgent pointer is valid
	ACK	Acknowledgement valid
	PSH	Push request
	RST	Reset
	SYN	Synchronize Seq. Num.
	FIN	End of byte stream

Protocolli a livello di trasporto

Transmission Control Protocol

- Timeout and retransmission
 - Adattivo - Monitoraggio della prestazione di ogni connessione ed aggiustamento timeout
 - Rilevazione Round Trip Time
 - Aggiornamento del valore stimato (filtraggio)

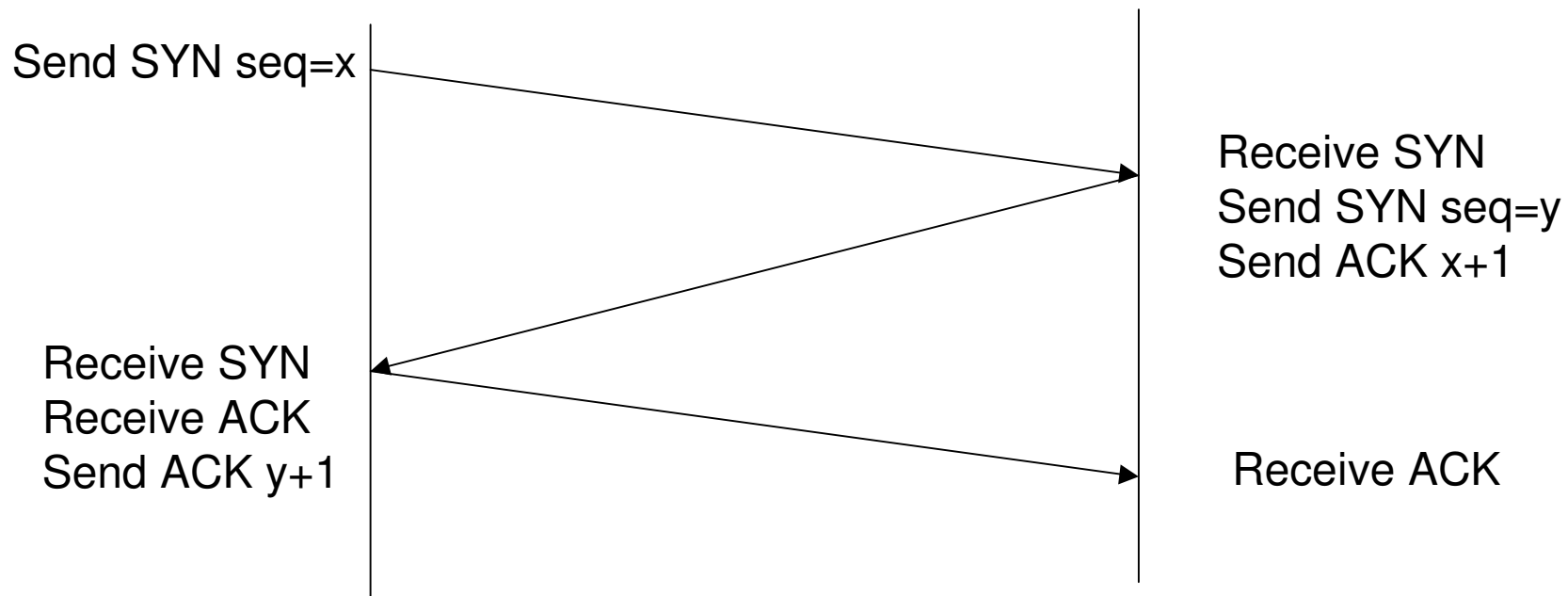
Protocolli a livello di trasporto

Transmission Control Protocol

- Risposta alla congestione fatta attraverso il controllo di flusso
 - Multiplicative Decrease Congestion Avoidance: alla perdita di un segmento si dimezza la congestion window
 - Slow-Start recovery: si comincia con un singolo segmento e si incrementa la congestion windows di 1 segmento ad ogni acknowledgement

Protocolli a livello di trasporto

Transmission Control Protocol



Three Way Handshaking

Servizi Trasportati da TCP/IP

Cenni

- Servizi infrastrutturali
 - Routing (IGP, EGP)
 - DNS
- Servizi applicativi
 - Terminale remoto
 - Trasferimento di file
 - Posta elettronica
 - Accesso a siti Web
- Servizi per la cooperazione tra applicazioni
 - object broker

Domain Name System

- Gestione nomi mnemonici invece che numerici
- Domini gerarchici (gTLD, ccTLD)
- Risoluzione

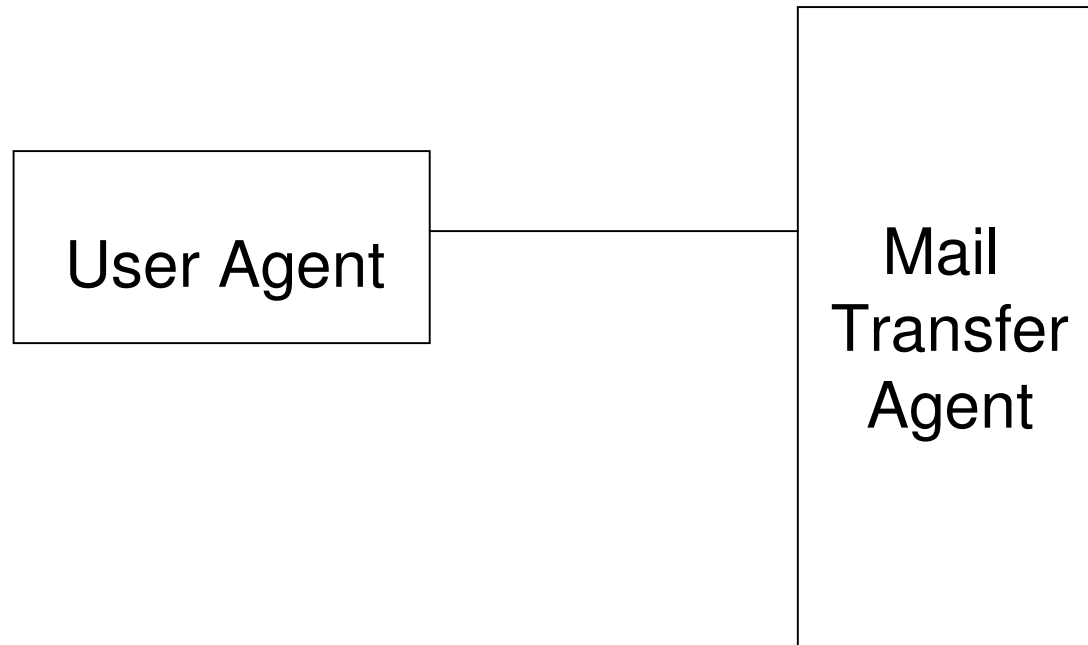
Servizio di terminale remoto

- Protocollo di livello applicativo telnet
- Negoziazione delle caratteristiche della connessione di livello applicativo
- Negoziazione dei caratteri di controllo e dell'eco
- Non emulazione del terminale

Servizio di trasferimento file

- Protocollo ftp
- Negoziazione della connessione di livello applicativo
- Comandi di base per l'analisi delle directory
- Interfaccia verso il client

Servizio di posta elettronica



Servizi di posta elettronica

- Funzioni di base
 - Composizione di messaggi
 - Trasferimento dei messaggi alla destinazione
 - Reporting
 - Visualizzazione di messaggi in arrivo
 - Gestione dei messaggi ricevuti
- Uso di mailboxes, mailing list

User Agent

- Send/Read email
- Gestione Address Book
- Formattazione dei messaggi (RFC 822)
 - To:, Cc:, Bcc:, From:, Sender:, Received:,
Return Path:
- Forwarding/Bouncing

Accesso a siti Web

- Protocollo di livello applicativo http
- Linguaggi per il markup dei documenti (html, xml)
- Linguaggi di scripting (ASP, Javascript ..)
- Applet
- Attivazione applicazioni informatiche

Servizi per la cooperazione tra applicazioni informatiche

- Modelli ad alto livello per i sistemi informativi distribuiti
- Socket
- Remote Procedure Call
- Oggetti Distribuiti
- Accesso remoto a basi di dati
- Middleware