

Rete: livello fisico e collegamento dati

Indice

1. Livello fisico
 - 1.1 Definizioni
 - 1.2 Rete telefonica pubblica commutata
 - 1.3 Altre tipologie di rete
2. Livello del collegamento dati
 - 2.1 Servizi
 - 2.2 Protocolli
3. PPP

Rete: livello fisico

Definizioni - 1

- **Baud:** velocità del segnale → numero di configurazioni rappresentabili per unità di tempo (p.es. 1 s.)
 - La codifica di ciascuna configurazione (il segnale) determina il numero di *bit* trasmessi per 1 s.
 - Segnale 0/1 → 1 *bit* → 1 **baud** = *bit rate*
 - Segnale 0..7 → 3 *bit* → 3 **baud** = *bit rate*
 - Dato un **baud** b, l'invio di N *bit* richiede N/b s (bps)

Rete: livello fisico

Definizioni - 2

- **Decibel (dB):** $10 \log_{10}$ volte il rapporto tra la potenza del segnale **S** e quella del disturbo **N**
 - $S/N = 10 \rightarrow 10 \text{ dB}$; $S/N = 1000 \rightarrow 30 \text{ dB}$
- **Teorema di Shannon:** la massima capacità di un canale dati disturbato è $= \phi \log_2 (1+S/N)$ bps
 - Con ϕ frequenza trasmittiva (banda) del canale
 - $\phi = 3 \text{ kHz}$; $30 \text{ dB} \rightarrow \sim 30 \text{ kbps}$

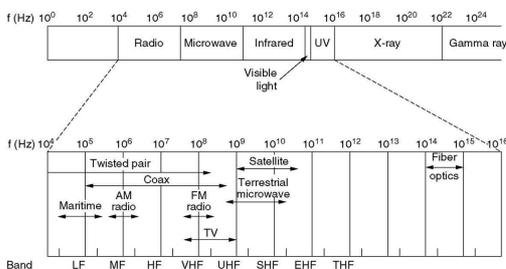
Rete: livello fisico

Definizioni - 3

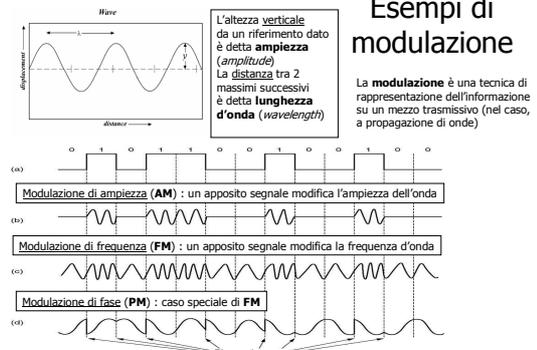
- **Twisted pair (TP):** due sottili fili di rame isolati legati in configurazione ad elica (*twisted*) per ottenere minima interferenza
 - Tipica applicazione: linee telefoniche
- **Cavo coassiale:** anima di rame avvolta in materiale isolante
 - Banda larga, segnale analogico, amplificato, 2 cavi paralleli per bidirezionalità
- **Fibra ottica:** sorgente che emette luce, fibra vetro di come veicolo trasmissivo, rivelatore
 - Singola fibra per singolo (flusso di) *bit*
- Senza fili (**wireless**): diffusione (**broadcast**) di onde elettromagnetiche

Rete: livello fisico

Lo spettro elettromagnetico



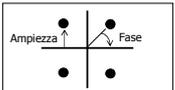
Esempi di modulazione



Rete: livello fisico

Rete telefonica pubblica commutata - 1

- **Ramo locale (local loop)**, connessione **TP**, analogica, tra terminale utente e nodo locale
 - Immissione e ricezione mediante dispositivo di **modulazione/demodulazione (modem)** che effettua conversione digitale ↔ analogico
 - L'uso combinato di più modulazioni permette di emettere più *bit* per *baud*



L'uso combinato di **AM** e **PM** dà luogo a 4 possibili configurazioni di segnale (= 2 *bit*) per *baud*

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 306

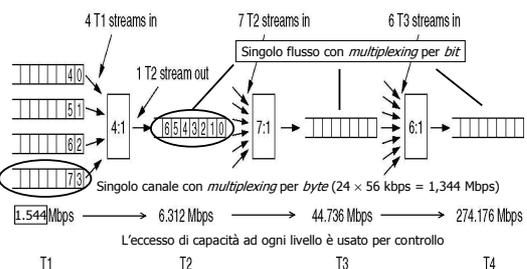
Rete: livello fisico

Rete telefonica pubblica commutata - 2

- **Connessione a pagamento (toll connecting trunk)** digitale tra nodo locale e nodo centrale (**toll office**) con registrazione dei costi
 - Centrali organizzate gerarchicamente per ampiezza crescente di area controllata
 - La medesima linea portante (**trunk**) viene condivisa (**multiplexed**) per più conversazioni simultanee
 - A **divisione di frequenza (FDM)**, tecnologia analogica
 - A **divisione di tempo (TDM)**, ricava dal segnale analogico codici numerici ad 8 *bit* campionati a 125 μs → **codec**
 - La **trama (frame)** ottenuta su 1 periodo di campionamento viene suddivisa in 24 canali da 8 *bit* (7 dati, 1 controllo) ciascuno
 - Ne risulta una capacità trasmissiva di $7 \times (1 \text{ s.} / 125 \mu\text{s}) = 56.000 \text{ bps}$ per canale

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 307

Esempio di commutazione a divisione di tempo (USA)



Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 308

Rete: livello fisico

Rete telefonica pubblica commutata - 3

- **Centrali di smistamento (switching office)** collegate tra loro e con nodi centrali con banda molto larga
 - Connessione dedicata ∇ comunicazione (**circuit switching**)
 - Oppure più comunicazioni su ogni singola connessione fissa, (**packet switching**) in modalità *store-and-forward*
 - Pacchetti a dimensione fissa → più facile dimensionare la memoria dei **router**

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 309

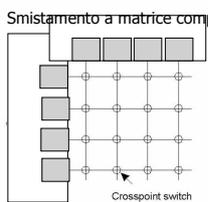
Rete: livello fisico

Rete telefonica pubblica commutata - 4

- 3 possibili tecniche di smistamento
 - A **matrice completa (crossbar)** $N \times N$: troppe connessioni fisiche; non scala
 - A **divisione di spazio**: meno connessioni fisiche; massimo numero di comunicazioni simultanee determinato dalle connessioni dei livelli interni
 - Esempio: 3 livelli : $N/n (n \times k) \rightarrow k (N/n \times N/n) \rightarrow (k \times n) N/n$
 - A **divisione di tempo**: permutazione della frazione di informazione periodica di canale (*time slot*) di ogni trama ordinata (*frame*) di ingresso → canale in ingresso connesso a canale di uscita

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 310

Esempi di interconnessioni



Smistamento a matrice completa

Crosspoint switch

Connessione 4x4 con 16 smistatori 4x4



Smistamento a divisione di spazio

2x2 switch

Connessione 4x4 con 4 smistatori 2x2

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 311

Rete: livello fisico Altre tipologie di rete

- Esistono svariate altre modalità di connessione tra i nodi di una rete di elaboratori
 - Rete mobile terrestre (p.es.: **GSM**, *Global System for Mobile Communications*)
 - Reti satellitari
 - Reti via cavo, con condivisione del canale tra TV, radio e dati
- Schemi complessi di condivisione, per lo più basati su **TDM**

Livello fisico e di collegamento dati

Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega

Pagina 312

Rete: livello del collegamento dati Servizi - 1

- Veicola sul livello fisico le unità informative ricevute dal livello rete, correggendo gli eventuali errori di trasmissione fisica
 - Il livello fisico non offre garanzie di consegna né tantomeno di consegna corretta
 - La soluzione è inviare unità dati delimitate (**frame**) sulle quali si possa effettuare verifica di correttezza
 - Trame prefissate con # di caratteri che la compongono
 - Delimitate da simboli noti e separatori
 - Usando ridondanza eventualmente fornita dal livello fisico

Livello fisico e di collegamento dati

Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega

Pagina 313

Rete: livello del collegamento dati Servizi - 2

- 3 tipologie di servizio trasmissivo offerte al livello di rete
 - Senza connessione e senza conferma
 - Il nodo mittente invia **frame (trame)** indipendenti su percorsi non prestabiliti, senza aspettare conferma di ricezione
 - Velocità più importante di qualità
 - Senza connessione con conferma
 - Come sopra, con conferma di ricezione per ciascuna trama
 - La conferma a questo livello è più veloce e meno onerosa che ai livelli superiori
 - Con connessione e con conferma
 - La connessione è ottenuta assegnando un ordinamento alle trame e preservandolo nella trasmissione
 - Massima affidabilità, massimo costo

Livello fisico e di collegamento dati

Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega

Pagina 314

Rete: livello del collegamento dati Trattamento degli errori trasmissivi - 1

- **Errore** → dato letto ≠ dato scritto
 - **Cardinalità n**: differenza in **n bit** tra letto e scritto
- Codici di **rilevazione/correzione** d'errore
 - **C (codeword) = D (dati) + P (controllo)**
 - Errore rilevato → dati scartati
 - Errore corretto → dati sostituiti
- **Distanza** → # **bit** differenti tra parole di uguale lunghezza
 - Determinata da XOR tra le 2 parole
 - Distanza **d** → **d** errori convertono una parola nell'altra

Livello fisico e di collegamento dati

Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega

Pagina 315

Rete: livello del collegamento dati Trattamento degli errori trasmissivi - 2

- **Distanza di Hamming dH (1915-98)**
 - Il **minimo** delle distanze tra tutte le configurazioni legali di un codice (**codeword**)
 - Codice con dH **d+1** **rileva** errori di cardinalità **d**
 - Non bastano **d** errori per cambiare una **codeword** legale in un'altra legale
 - Codice con dH **2d+1** **corregge** errori di cardinalità **d**
 - La **codeword** illegale con **d** errori è **sostituita** dalla **codeword** legale a minor distanza

Livello fisico e di collegamento dati

Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega

Pagina 316

Rete: livello del collegamento dati Trattamento degli errori trasmissivi - 3

- **Rilevazione di errore** → **codice di parità**
 - **Parità pari**: il # di 1 in **C** è pari
 - **Parità dispari**: il # di 1 in **C** è dispari
 - Codice con dH ≥ 2 → rileva ≥ 1 errori singoli
- **Esempio (D: 3 bit, P: 1 bit, dH: 2)**
 - **C** legali
 - 0000, 0011, 0101, 0110, 1001, 1010, 1100, 1111
 - **C** illegali
 - 0001, 0010, 0100, 0111, 1000, 1011, 1101, 1110

Livello fisico e di collegamento dati

Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega

Pagina 317

Rete: livello del collegamento dati
Trattamento degli errori trasmissivi - 4

- **Correzione di errore**
 - **Esempio** (C : 10 bit, dH : 5 → correzione fino a 2 errori)
 - C_e legali
 - 000000000, **000011111**, 111110000, 111111111
 - C_e letto, ma illegale
 - 000000111
 - $d(C_e, C_i) = \{C_e \text{ XOR } C_i\}_{i=1..4} = \{3, 2, 8, 7\}$
 - C_{i2} è il codice a distanza minore
 - Se l'errore è solo doppio, allora C_e può essere corretto in C_{i2} , altrimenti C non consente correzione

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 318

Rete: livello del collegamento dati
Trattamento degli errori trasmissivi - 5

- **Codice di rilevazione di errore**
 - Quando il rapporto D/C è troppo oneroso si usa il metodo CRC (*cyclic redundancy code*)
 - Codice di controllo (*checksum*) aggiunto a D
 - **Checksum** di k bit calcolato come resto R della divisione, in aritmetica a modulo 2, di un **polinomio noto G** di grado k per D esteso a dx con k bit posti a 0
 - Il polinomio G , detto **generatore**, codificato come stringa di $k+1$ bit visti, da sx a dx , come i suoi coefficienti
 - Esempio di G standard di grado 16 ($k = 16 + 1$ bit)
 - **CRC-16** = $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1 \rightarrow 11000000000000101$
 - La trama T inviata è R sottratto da D esteso a dx
 - L'errore in ricezione apparirà come $T + E$ dove E ha 1 per ogni bit invertito (mentre $T/G = 0$)

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 319

Rete: livello del collegamento dati
Trattamento degli errori trasmissivi - 6

$C = 1101011011$
 $G = 10011$ di grado $k=4 \rightarrow x^4 + x + 1$
 $C_e = C$ esteso a dx di $k=4$ bit posti a 0

L'aritmetica polinomiale è svolta in modulo 2. Addizione e sottrazione sono XOR

T inviato è dato da $[C_e - Rem]$ in modulo 2 ($Rem = G/C_e \rightarrow 11010110111110$)

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 320

Rete: livello del collegamento dati
Protocolli - 1

- **Problemi da risolvere**
 - **Bilanciamento** dei flussi e delle capacità dei livelli gerarchicamente adiacenti (rete, fisico)
 - Per non sovraccaricare alcuno e per limitare il bisogno di memoria temporanea
 - Supporto di **traffico bi-direzionale** (*full-duplex*)
 - Ogni nodo può essere simultaneamente mittente e destinatario
 - Gestione degli **errori** e delle **conferme** di ricezione
 - Arrivi ritardati e/o mancati
 - **Interallacciamento** (*interleaving*) ottimale nell'invio di trame dati e trame controllo

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 321

Rete: livello del collegamento dati
Protocolli - 2

- **SWP: finestre scorrevoli, sliding windows**
 - Stessa connessione fisica per invio dati (*forward*) e conferme di ricezione (*reverse*)
 - **Piggybacking**: conferma allegata alla 1^a trama dati emessa nella direzione giusta
 - Aggiunge ritardo, ma risparmia una trama
 - Il mittente che attende conferma deve tollerare il ritardo
 - Ciascuna trama in uscita ha numero d'ordine
 - Il mittente può emettere solo le trame con numero d'ordine in un intervallo (finestra) dato
 - Lo stesso vale per la ricezione del destinatario

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 322

Rete: livello del collegamento dati
Protocolli - 3

- **SWP dal lato mittente**
 - **Intervallo** = numero d'ordine di trame consecutive inviate/da inviare ed in attesa di conferma
 - L'intervallo è inizialmente vuoto, ha capienza fissa, raggiunta la quale il protocollo **blocca** il mittente
 - \forall nuovo pacchetto arrivato dal livello rete, il numero d'ordine avanza di 1 e l'intervallo si amplia di 1 valore
 - \forall conferma di ricezione l'intervallo si riduce di $n \geq 1$ valori, dal suo limite inferiore fino al numero d'ordine della trama confermata
 - Ogni trama di numero d'ordine compreso nell'intervallo deve essere mantenuta in memoria fino alla conferma, in previsione di un possibile reinvio
 - Ogni trama non confermata entro un tempo limite (**time-out**) deve essere rimessa

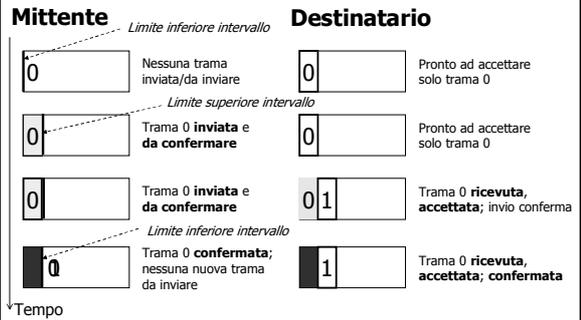
Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 323

Rete: livello del collegamento dati Protocolli - 4

- **SWP** dal lato destinatario
 - L'intervallo, sempre di massima ampiezza, racchiude il numero d'ordine delle trame accettabili
 - Ogni trama in arrivo con numero d'ordine fuori dall'intervallo viene scartata
 - La trama di numero d'ordine minore nell'intervallo viene accettata e passata al livello rete, inviando conferma al mittente e spostando di 1 in avanti il limite inferiore dell'intervallo
 - Questo preserva l'ordine di invio al livello rete

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 324

Esempio di **SWP** (intervalli di capienza 1)



Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 325

Rete: livello del collegamento dati Protocolli - 5

- **SWP** con intervalli $w = 1$ forza sincronizzazione tra mittente e destinatario
- Il ritardo nell'arrivo della conferma può essere molto lungo, con conseguente emissione di inutili duplicati
- Meglio scegliere $w > 1$ (**pipelining**), che però richiede gestione intelligente delle ritrasmissioni
 - **go-back-n**: il destinatario scarta tutte le trame successive alla prima in errore (corrotta o fuori ordine)
 - Equivale a $w = 1$ per il destinatario
 - Il mittente deve retrocedere alla 1a trama non confermata
 - **Selective-repeat (SRP)**: il destinatario conserva e conferma le trame successive a quella erronea fino al re-invio da parte del mittente, dopo di che le passa al livello rete
 - Richiede molta memoria per conservare trame
- Ciascuna trama ha un suo specifico **time-out**

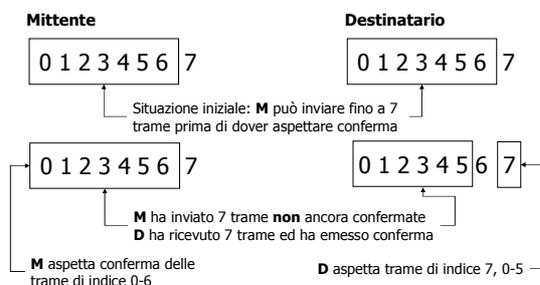
Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 326

Rete: livello del collegamento dati Protocolli - 6

- **SRP** dal lato destinatario
 - Conferma al mittente ed invio al livello rete di tutte le sequenze di trame pervenute in ordine corretto
 - L'intervallo di ricezione avanza corrispondentemente
 - **Salvataggio** in memoria locale, senza conferma, di trame pervenute fuori ordine (per errori o ritardi)
 - L'intervallo di ricezione non avanza
 - Le trame non confermate saranno prima o poi re-inviolate dal mittente
 - \forall sequenza correttamente ricostituita, conferma di tutte quelle in sequenza, consegna al livello rete ed avanzamento dell'intervallo di ricezione

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 327

Esempio di **SRP** ($w = 7$, indice di trama su 3 bit)



Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 328

Rete: livello del collegamento dati Problematiche causate da SRP - 1

- **D** non può sapere se **M** abbia effettivamente ricevuto le conferme inviate
- Le conferme possono essere perse così che **M** potrebbe rimettere trame già accettate da **D**
 - Lo stesso indice di trama può allora assumere significato diverso per **M** (= ripetizione) e per **D** (= nuovo) se **D** sovrapponesse il proprio nuovo intervallo a quello precedente
 - Nell'esempio, $w(D_{prima}) \cap w(D_{dopo}) = \{0, \dots, 5\}$ così che 6 indici hanno significato ambiguo per **D**

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 329

Rete: livello del collegamento dati
Problematiche causate da SRP - 2

- **D** deve saper distinguere trame ripetute e trame nuove
 - Gli indici corrispondenti devono essere in insiemi diversi
- Meglio allora che l'intervallo di ricezione di **D** abbia ampiezza \leq metà del massimo numero d'ordine di trama
 - In questo modo, per **D**, l'intervallo delle trame confermate non può sovrapporsi con quello delle nuove trame accettabili

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 330

Rete: livello del collegamento dati
PPP - 1

- **Point-to-Point Protocol (PPP)**
 - La sua struttura di trama ne identifica chiaramente gli estremi e consente rilevazione di errori
 - 1 trama = N byte (caratteri) per N intero (*padding di bit*)
 - 2 protocolli interni per configurarsi alla connessione fisica in uso ed al tipo di livello rete sovrastante
 - **LCP** (*Link Control Protocol*) → connessione fisica
 - **NCP** (*Network CP*) → livello rete (IP od altro)
 - Consente connessioni non permanenti (*dial-up*)
 - Le prime e le ultime trame di ciascuna connessione trasportano informazioni di controllo **LCP** ed **NCP**

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 331

Rete: livello del collegamento dati
PPP - 2

- **Esempio:** connessione TCP/IP, via **modem**, tra PC (nodo mittente, **M**) ed ISP (nodo *router*, **R**)
 - Selezione dei parametri di configurazione della connessione PPP tra **M** ed **R**
 - Le trame contengono informazioni **LCP** di controllo
 - Assegnazione di un indirizzo IP ad **M**
 - Uno tra quelli disponibili ad **R**, assegnato solo per la connessione corrente
 - Le trame contengono informazioni **NCP** di controllo per richiedere (**M**) e specificare (**R**) l'indirizzo IP
 - Fine della connessione
 - Rilascio dell'indirizzo IP → trame con informazioni **NCP**
 - Rilascio della connessione fisica → trame con informazioni **LCP**

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 332

Rete: livello del collegamento dati
PPP - 3

- Trama **PPP** è suddivisa in 6 campi
 - **Delimitatore (flag)**, 2×1 B, obbligatorio, a contenuto fisso, posto in testa ed in coda alla trama
 - **Indirizzo + Controllo**
 - **Modalità non numerata** : $1+1$ B, a contenuto fisso
 - I nodi a livello 2 non hanno indirizzo, le trame non hanno numero di sequenza
 - Possono essere omessi da configurazione **LCP** (2 B di controllo risparmiati per trama)
 - **Modalità numerata** : $2 \times 1-2$ B, con identificatore di nodo
 - Le trame hanno numero di sequenza
 - **Protocollo**, obbligatorio
 - $1-2$ B, definiscono il **tipo** di pacchetto trasportato, inclusi **LCP** ed **NCP**, oltre ad **IP**, **AppleTalk** ed altri
 - Può essere ridotto ad 1 B da configurazione **LCP**

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 333

Rete: livello del collegamento dati
PPP - 4

- Trama **PPP** ... (segue)
 - **Dati (payload)**, ampiezza variabile, con massimo fissato da configurazione **LCP**
 - Può richiedere *padding*
 - **Controllo (checksum)**, 2-4 B
 - Ampiezza fissata da configurazione **LCP**
- PPP è un **contenitore di protocolli** che utilizzano trame
 - Si adatta a più connessioni fisiche, a diversi livelli di rete, e consente vari formati interni

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 334

Rete: livello del collegamento dati
PPP - 5

Formato di 1 trama **PPP** completa per modalità non numerata

Bytes	1	1	1	1 or 2	Variable	2 or 4	1
	Flag	Address	Control	Protocol	Payload	Checksum	Flag
	01111110	11111111	00000011	Protocol	Payload	Checksum	01111110

Delimitatori (2 B) —————

Livello fisico e di collegamento dati Architettura degli Elaboratori 2 - T. Vardanega Pagina 335