



# Funzioni e protocolli

Luca Veltri

(mail.to: luca.veltri@unipr.it)

Corso di Reti di Telecomunicazione, a.a. 2012/2013

<http://www.tlc.unipr.it/veltri>

## Protocolli e funzioni

- Con il passare del tempo sono stati definiti nel passato e verranno definiti nel futuro sempre nuovi protocolli con lo scopo di adattarsi a nuove esigenze
  - nuove applicazioni
  - nuovi strati (soprattutto come sotto-strato del livello applicativo)
  - nuovi formati (ascii, binari, ASN.1, XML, etc.)
- I principi su cui si basano le funzioni base che possono essere realizzate rimangono quasi sempre le stesse
- In questa sezione verranno definite e analizzate le principali funzioni che vengono realizzate dai protocolli di comunicazione

2

## Principali funzioni

- Trasmissione/Ricezione
- Delimitazione delle UI
- Sequenzializzazione
- Multiplexazione
- Accesso multiplo
- Indirizzamento
- Commutazione
- Rivelazione di errore
- Recupero di errore
- Controllo di flusso
- Controllo di congestione
- Compressione e/o criptaggio dei dati
- Autenticazione
- Gestione della mobilità
- altre..

## Delimitazione

3

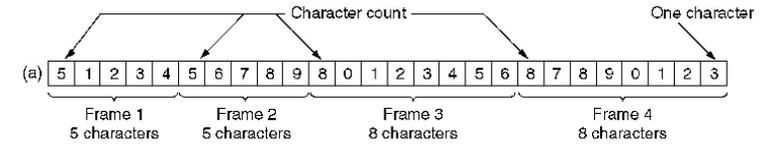
## Delimitazione

- Delimitazione delle UI all'interno di un flusso o blocco di bit/byte
  - per riconoscere/distinguere l'inizio e fine di ciascuna UI
- Funzione eseguita in genere quando uno strato si deve interfacciare con uno strato sottostante di tipo Stream oriented
  - in molti casi implementata sopra i protocolli di strato PH, ma anche sopra protocolli di trasporto come TCP, TLS o altri di tipo Stream
- Modalità di implementazione:
  - **Conteggio di caratteri (byte) o delle cifre binarie**
    - tramite campi indicatori della lunghezza della UI; oppure
    - tramite UI di lunghezza fissa
  - **Inserimento di delimitatori (di inizio e fine)**
    - inserimento di simboli speciali/riservati (e.g. manchester, 4/5, etc)
    - inserimento di simboli (sequenze di bit o byte) non riservati, + funzione bit- o char- stuffing
- Sono ovviamente possibili combinazioni delle stesse
  - **esempio, delimitatori di inizio + conteggio dei caratteri per la fine**

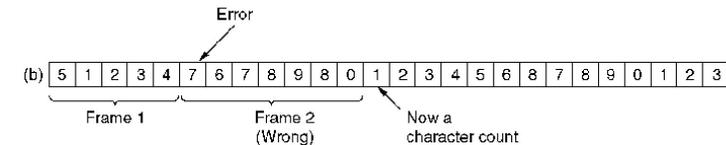
5

## Metodo del conteggio di caratteri

- Esempio
  - **inserimento della lunghezza della UI come primo byte**
- Esempio di comunicazione senza errori



- Esempio di comunicazione con 1 errore nel campo lunghezza



6

## Inserimento di simboli di inizio e fine UI

- L'inizio e la fine della UI vengono identificati con speciali campi delimitatori (detti anche flag) composti da particolari sequenze di bit o da caratteri di controllo
- Esempi:

Campo di delimitazione (01111110)

01111110 1011101011110100011 01111110 00100

Caratteri/flag di inizio (SF) e fine (EF)



- Problema:
  - **bisogna evitare che i delimitatori appaiano all'interno delle trame**

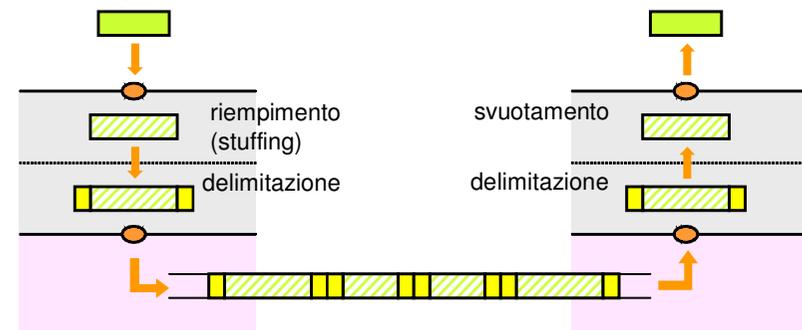
Soluzioni:

- 1) i delimitatori sono caratteri non ammessi (simboli riservati)
- 2) bit-stuffing/char-stuffing

7

## bit-stuffing & char-stuffing

- Obiettivo del bit/char stuffing: eliminare (mascherare) eventuali presenze dei simboli delimitatori all'interno della UI
- Normalmente gli algoritmi utilizzati operano sul blocco dati da inviare in modo sequenziale
  - **operando in modo sequenziale sui simboli elementari (bit o byte) componenti la UI**

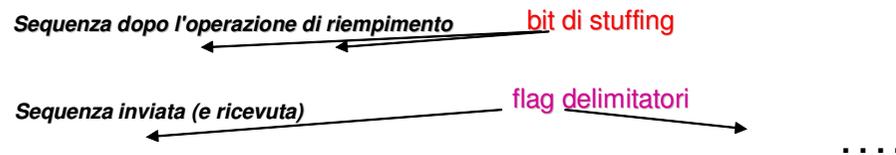


8

## bit stuffing: esempio

- Flag di delimitazione di inizio e di fine: 01111110
- Algoritmo di bit-stuffing:
  - stuffing: dopo ogni cinque "1" consecutivi, aggiungere uno "0"
  - de-stuffing: dopo cinque "1" togliere lo "0" seguente
- Utilizzato da HDLC, LAPB, X.25

Sequenza originaria di cifre binarie



Sequenza dopo l'operazione di svuotamento

9

## char stuffing: esempio

- Char di delimitazione di inizio e di fine: END (decimal 192)
- Stuffing:
  - If a data byte is the same code as END char, a two byte sequence of ESC (decimal 219) + 220 is sent instead (i.e. 192 → 219+220)
  - If a data byte is the same code as ESC char, a two byte sequence of ESC+221 is sent instead (i.e. 219 → 219+221)

Sequenza originaria di cifre binarie



Sequenza dopo l'operazione di svuotamento

10

## Esempi di delimitazione (1/2)

- RS-232
  - trasmissione seriale asincrona
  - delimitazione attraverso approccio misto
    - bit di start (1 transizione alto-basso) e conteggio dei bit (8 bits) per la fine
- PCM
  - trasmissione sincrona (plesiocrona)
  - delimitazione attraverso conteggio dei bit e dei bytes (allineamento di byte e allineamento di trama)
- Ethernet
  - delimitazione attraverso "simboli" speciali
    - codifica di manchester (Ethernet 10Mb/s): bit di start dopo preambolo e assenza di carrier per la fine della trama
    - codifica 4B/5B (Ethernet 100Mb/s): in altri casi, utilizzo di simboli riservati
- SLIP
  - delimitazione attraverso carattere di END alla fine (e opz. anche all'inizio)
    - utilizzo di char stuffing ESC (gli stessi dell'esempio precedente)

11

## Esempi di delimitazione (2/2)

- HDLC, LAPB, X.25
  - delimitazione tramite Flag (01111110)
    - utilizzo di bit stuffing
- HTTP
  - delimitazione tramite flag di fine message header (linea vuota = CRLF), più conteggio dei caratteri del payload
  - ovvero [RFC 2616]:
    - Any response message which does not include a message-body (such as the 1xx, 204, and 304 responses) is always terminated by the first empty line (CRLF) after the header fields
    - If a Content-Length header field is present, its decimal value in OCTETs represents the body (payload) length

12

## Frammentazione/aggregazione

### Frammentazione

- Funzione che permette di incapsulare e spedire una unica SDU tramite di due o più PDU
  - In ricezione viene eseguita la funzione opposta (riasseblamento)



- Se sono previsti nodi intermedi le funzioni di frammentazione e riasseblamento possono essere svolte
  - solo nei nodi terminali
  - sia nei terminali che nei nodi intermedi

14

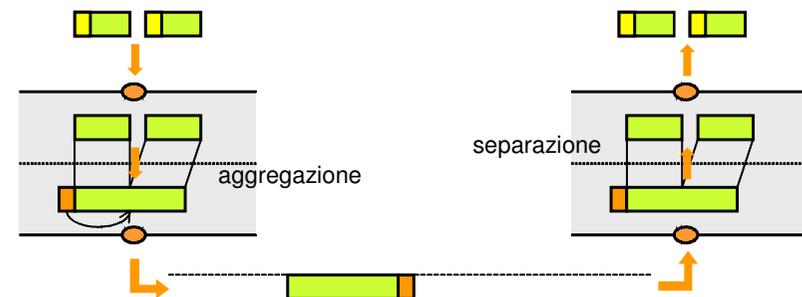
### Frammentazione (cont.)

- Tale funzione viene normalmente svolta da un (N)-protocollo (che la supporta) quando:
  - il (N-1)-protocollo sottostante ha una dimensione massima di (N-1)-SDU, minore della dimensione della (N)-SDU
  - si vuole limitare la dimensione complessiva delle (N)-PDU
- Un limite alla dimensione delle SDU (o PDU) può essere utile per:
  - limitare il tempo di trasmissione delle UI
  - limitare il tempo di attraversamento di un nodo di commutazione
  - limitare la probabilità di errore delle UI (frame/packet error rate)
    - a parità di BER (bit error rate), il packet error rate cresce al crescere della dimensione delle UI
- In un protocollo, la dimensione massima di SDU (se presente) viene spesso indicata come MTU
  - Maximum Transfer Unit (o anche Maximum Transmission Unit)

15

### Aggregazione

- Funzione che permette di incapsulare e spedire due o più SDU attraverso una sola PDU
  - In ricezione viene eseguita la funzione opposta (separazione)



- Se vengono aggregate SDU di utenti (del servizio) diversi, allora tale funzione viene svolta insieme a quella di moltiplicazione

16

## Controllo di sequenza

### Controllo di sequenza/Risequenzializzazione

- Recupero in ricezione della corretta sequenza delle UI inviate, in modo da consegnare le UI allo strato superiore nel corretto ordine
- Utilizzo di numeri di sequenza delle UI
  - **alle UI emesse viene aggiunto un numero di sequenza (in ordine crescente e modulo N)**
    - vengono contate direttamente le UI, oppure
    - vengono contati i byte emessi; in questo caso nelle UI viene inserito il numero di sequenza del primo byte trasportato (e.g. TCP)
- Le UI fuori sequenza possono essere memorizzate in ricezione e opportunamente riordinate, oppure scartate
- In caso di perdita, alcuni protocolli legano la funzione di controllo di sequenza con quella di recupero di errore

18

## Multiplazione

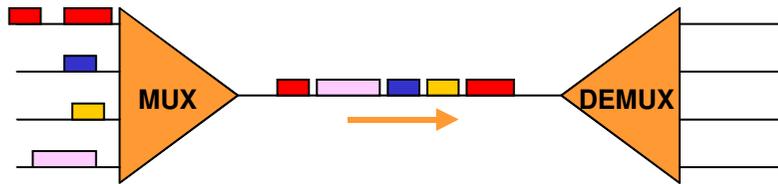
### Multiplazione

- Per una risorsa trasmissiva, definisce il modo secondo cui le UI condividono logicamente la capacità di trasferimento
  - **la risorsa trasmissiva può essere logica (coincidente con il servizio di trasferimento offerto dallo strato sottostante) o fisica (il canale trasmissivo)**
  - **viene svolta dalle entità alla pari estreme alla risorsa stessa**
- In generale tale funzione può essere vista come la multiplazione di più flussi all'interno di un unico flusso (flusso multiplato)
- Si applica ogni qualvolta
  - **un strato deve inviare su una uscita UI ricevute da ingressi differenti**
  - **uno strato deve gestire più flussi di strato superiore (relativi a protocolli differenti o ad un unico protocollo) multiplandoli nello stesso flusso di UI verso lo strato inferiore**
- La maggior parte dei protocolli offrono questa funzionalità
  - **e.g. PCM/PDH, SDH, Ethernet, IP, TCP, UDP**

20

## Multiplicazione

- La funzione di moltiplicazione è in generale svolta, in modo cooperativo, da due entità operanti alle estremità del canale moltiplicato che svolgono rispettivamente il ruolo di moltiplicatore e di demoltiplicatore
  - il moltiplicatore deve provvedere affinché le UI emesse accedano al canale moltiplicato in modo ordinato (senza sovrapposizioni/collisioni) e in accordo ad opportune strategie di assegnazione della risorsa ai singoli flussi (flussi tributari)
  - il demoltiplicatore deve essere in grado di identificare le UI che gli pervengono (funzione di identificazione e indirizzamento)



21

## Multiplicazione

- Nel caso di protocolli di strato PH si possono distinguere i seguenti schemi di moltiplicazione:
  - Time Division Multiplexing (TDM)
  - Space Division Multiplexing (SDM)
  - Frequency Division Multiplexing (FDM)
  - Code Division Multiplexing (CDM)
- Nel caso di protocolli di livello superiore al PH, si considerano in genere solo schemi di moltiplicazione TDM
  - l'occupazione della risorsa da parte di una UI avviene in un intervallo di tempo che non si sovrappone con quelli relativi alle altre UI
  - Eventuali contese di utilizzazione possono essere risolte tramite code di attesa (buffer + algoritmi di scheduling) o perdita
  - In alcuni casi è possibile operare anche in modalità SDM, sfruttando più connessioni o interfacce

22

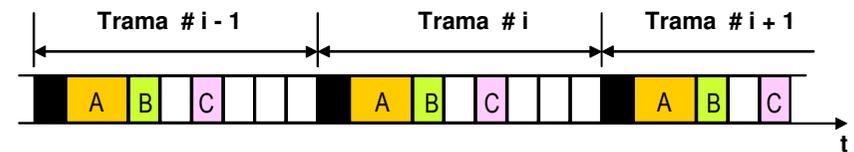
## Multiplicazione

- Si possono evidenziare 2 differenti approcci TDM
  - **Multiplicazione statica (sincrona)**
    - i flussi vengono moltiplicati in modo sincrono (con una cadenza temporale regolare)
    - esempi, PCM/PDH, SDH
  - **Multiplicazione dinamica (asincrona/statistica)**
    - i flussi vengono moltiplicati tra loro senza una precisa cadenza temporale
      - strategia FIFO
      - strategie WFQ/CBQ
- Alla strategia di moltiplicazione può essere legata la funzione di identificazione delle UI (indirizzamento)
  - moltiplicazione sincrona → identificazione/indirizzamento implicito
  - moltiplicazione asincrona → identificazione esplicita (indirizzi)

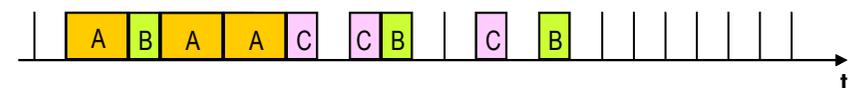
23

## Multiplicazione sincrona e asincrona

Esempio di moltiplicazione sincrona



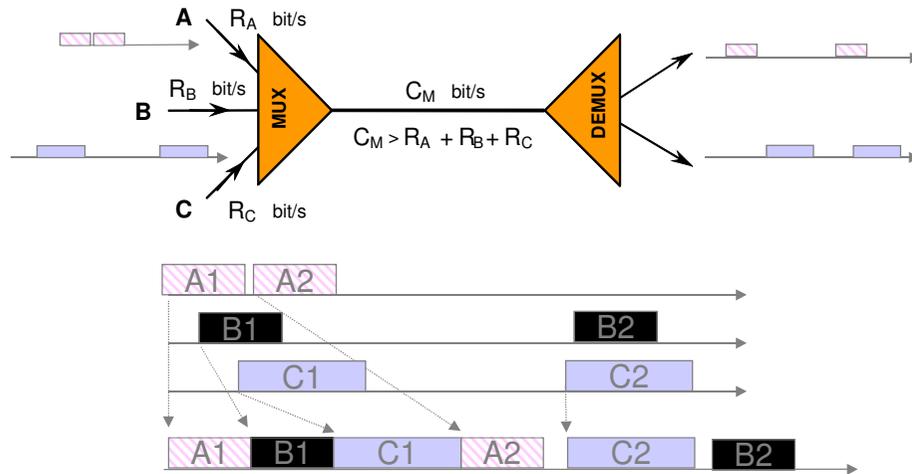
Esempio di moltiplicazione asincrona



(è necessario indirizzamento esplicito delle UI)

24

## Canale multiplato



25

## Controllo di Accesso Multiplo

## Accesso Multiplo

- Quando:
  - **accesso diretto ad un mezzo trasmissivo condiviso (a divisione di tempo)**
  - **la trasmissione è di tipo broadcast (un sistema trasmette e tutti gli altri possono ricevere)**
- Quando un sistema trasmette diventa proprietario temporaneamente dell'intera capacità trasmissiva
- Occorre un meccanismo per arbitrare l'accesso al mezzo trasmissivo: Controllo di accesso al mezzo
  - **Medium Access Control (MAC)**
- E' necessaria la presenza di indirizzi per stabilire chi sono il reale destinatario e il mittente della trasmissione

27

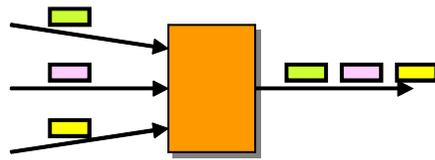
## Controllo di Accesso Multiplo (MAC)

- Simile alla funzione di moltiplicazione, ma in questo caso il flusso multiplato è gestito da entità distribuite (e non da un'unica entità concentrata)
  - **moltiplicazione → soluzione concentrata**
  - **accesso multiplo → soluzione distribuita**
- Tipico dei protocolli di accesso ad un mezzo fisico condiviso da diverse stazioni
  - **spesso nelle LAN**
  - **e.g. controllo di accesso ad bus, ad una risorsa radio, etc.**
- Modalità
  - **discipline ad accesso controllato (senza collisione)**
  - **discipline ad accesso casuale (con collisione)**

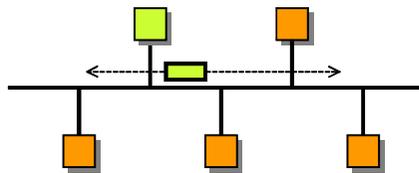
28

## Multiplicazione e accesso multiplo

- Multiplicazione



- Accesso multiplo



29

## Controllo di Accesso Multiplo (MAC)

- Modalità

- **Accesso controllato (senza collisione)**

- un nodo prima di trasmettere acquisisce esplicitamente il controllo della rete (ovvero il diritto a trasmettere)
- non possono verificarsi 'collisioni'
- spesso gestito tramite la presenza di un *token*

- **Accesso casuale (con collisione)**

- non c'è un'acquisizione esplicita del diritto a trasmettere
- possono verificarsi collisioni
- le collisioni possono essere gestite in modo diverso a seconda del tipo di protocollo

- Esempi: Aloha, CSMA/CD (Ethernet), CSMA/CA (WiFi), FDDI

30

## Accesso controllato

- Si distinguono i casi di:

- controllo centralizzato

- **Una delle stazioni (primaria) provvede ad abilitare ognuna delle altre (secondarie) ad emettere**

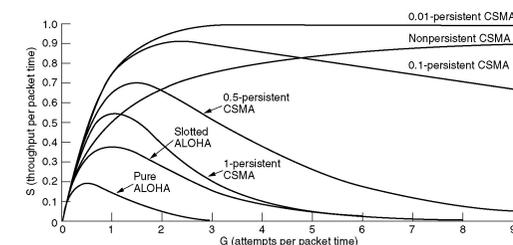
- controllo distribuito

- **Il controllo passa ordinatamente da stazione a stazione**
- **Le stazioni non attive non assorbono risorse**
- **Si consegue un'efficiente ripartizione della capacità di trasferimento del mezzo di comunicazione fra le sole stazioni attive**
- **tipico dei protocolli a token (e.g. Token Ring, FDDI)**

31

## Protocolli ad accesso casuale

- Ogni stazione emette quando ha una UI pronta
- Se il mezzo è libero la emissione ha successo, altrimenti (collisione) occorre riprovare successivamente
- Se il traffico generato dalle stazioni aumenta, cresce anche il numero delle collisioni
  - **ciò può limitare fortemente il traffico globale smaltito dal sistema**



32

## Indirizzamento e risoluzione degli indirizzi

### Identificazione/indirizzamento

- Identificazione delle UI in modo da determinare
  - **entità sorgente**
    - indispensabile per determinare il mittente
  - **entità di destinazione**
    - indispensabile per la funzione di commutazione e demultiplazione
- Deve essere possibile determinare i SAP sorgente e destinazione (indirizzo del S-SAP e del D-SAP) o gli eventuali CEP (Connection End Point)
- Modalità
  - **indirizzamento implicito**
    - in base alla posizione spaziale e/o temporale della UI all'interno di una struttura di multiplazione (trama multiplata)
    - eventualmente con l'ausilio di opportuni puntatori e unità di riempimento/stuffing (per ridurre le esigenze di sincronismo)
    - e.g. PCM/PDH, SDH

34

### Identificazione/indirizzamento

- Modalità (cont.)
  - **indirizzamento esplicito**
    - presenza nella UI dell'indirizzo completo del SAP/CEP
    - oppure, tramite la presenza nella UI di un identificatore di circuito virtuale (VCI, label, etichetta), a cui è associata la coppia di SAP/CEP
    - esempi di indirizzamento completo: Ethernet, IP
    - esempi di VCI: X.25, ATM, MPLS
- I protocolli CO, hanno inoltre la necessità di identificare la sorgente e destinazione in fase di instaurazione
  - esempio: numeri di telefono nella rete telefonica

35

### Piani di indirizzamento

- Esistono differenti piani di indirizzamento
- Questi possono essere di tipo
  - **gerarchico su base geografica (e.g. PSTN)**
  - **gerarchico su base non geografica (e.g. Ethernet)**
- Possono essere di tipo
  - **numerico**
    - e.g. numeri di telefono, indirizzi IP
  - **mnemonico**
    - e.g. URI/URL (esempio: <http://www.unipr.it/veltri>)

36

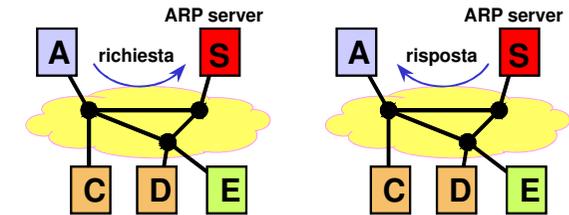
## Risoluzione degli indirizzi

- Ogni qual volta si deve rilanciare un pacchetto di un protocollo N da un nodo ad un altro bisogna conoscere l'indirizzo del protocollo (N-1) sottostante del nodo successivo a livello N
- E' quindi necessaria una funzione di mappaggio da indirizzi di livello N ad indirizzi di livello (N-1), se utilizzati
  - questa funzione può essere svolta sulla base di una tabella di mapping
  - non è necessario nei collegamenti punto punto in cui l'indirizzamento a livello (N-1) diventa inutile o non è presente
- Mapping statico
  - la tabella di associazione viene predisposta staticamente (ad esempio rete X.25, ISDN, etc.)
- Mapping dinamico
  - la tabella viene costruita dinamicamente attraverso un opportuno protocollo ARP (Address Resolution Protocol)
  - due approcci possibili per il mapping dinamico:
    - centralizzato: utilizzo di server di risoluzione (ARP server)
      - tipicamente su reti non broadcast
    - distribuito: utilizzo di comunicazioni broadcast (e.g. nelle LAN)
      - solo per reti con supporto di comunicazioni broadcast

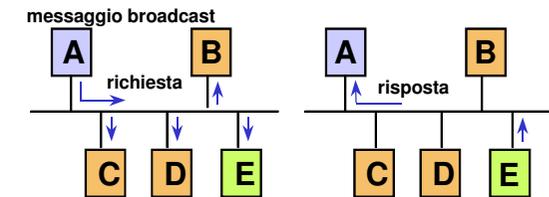
37

## Risoluzione dinamica degli indirizzi

- Statico: utilizzo di server di risoluzione (ARP server)



- Dinamico: utilizzo di comunicazioni broadcast



38

## Commutazione

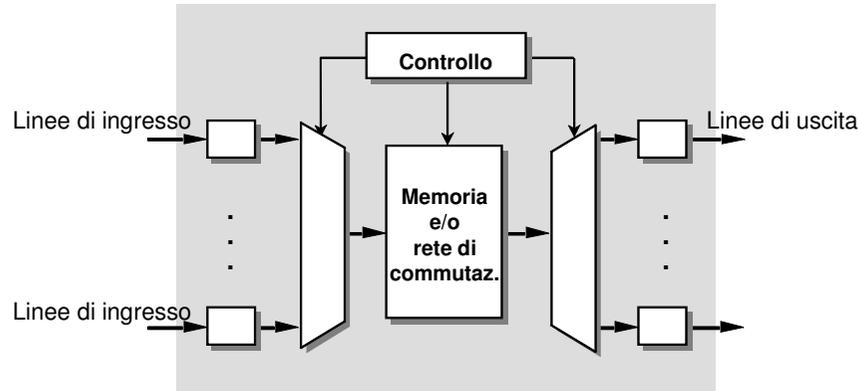
- E' la funzione che permette alle UI di attraversare i nodi di rete (nodi di commutazione) e raggiungere il nodo (o i nodi) di destinazione, seguendo un percorso di rete dal terminale sorgente al terminale/i di destinazione
- Consiste nell'associazione logica tra una terminazione d'ingresso e una particolare terminazione d'uscita del nodo per la durata necessaria al trasferimento della UI stessa



40

## Nodi di commutazione

- Schema generale di un commutatore a divisione di tempo



41

## Commutazione

- Si compone di due funzioni:
  - **INSTRADAMENTO (Routing)**, funzione decisionale (intelligente) che ha lo scopo di stabilire il ramo di uscita verso cui deve essere inoltrata la UI pervenuta da un ramo d'ingresso
    - avviene attraverso la consultazione di opportune tabelle di instradamento (tabelle di routing)
    - tali tabelle possono essere configurate staticamente o dinamicamente
    - l'istradamento dipende dalla UI (in genere dipende dal destinatario/i della UI)
    - tale funzione può introdurre un ritardo di elaborazione
  - **ATTRAVERSAMENTO (Forwarding)**, funzione attuativa (più "meccanica", spesso implementata in HW), che ha lo scopo di trasferire una UI da un ramo d'ingresso ad uno di uscita in accordo a quanto deciso dalla funzione di instradamento
    - può avvenire direttamente (tramite un percorso interno), o attraverso un immagazzinamento e rilancio (ogni UI viene memorizzata prima di essere rilanciata verso l'uscita)
    - è caratterizzato da un ritardo di attraversamento che può essere costante o variabile

42

## Commutazione CO e CL

- La funzione di instradamento può essere effettuata:
  - durante la fase di instaurazione della connessione (per servizi di trasferimento orientati alla connessione)
  - indipendentemente per ciascuna UI (per servizi di trasferimento senza connessione)
- Ciò corrisponde a due differenti modalità di commutazione
  - commutazione CO (utilizzata solo da protocolli CO)
  - commutazione CL

43

## Commutazione CL (a datagramma)

- Nel caso di commutazione CL (o a datagramma), le UI vengono rilanciate dai nodi di commutazione in modo indipendente l'una dall'altra
  - ogni UI viene elaborata singolarmente
  - sulla UI viene eseguita la funzione di instradamento
    - individuazione del ramo attraverso cui inoltrare la UI, oppure
    - o equivalentemente, scelta del nodo successivo verso cui rilanciare la UI
  - tale funzione viene di solito svolta tramite consultazione di opportuna tabella di instradamento (routing table)
  - le tabelle di routing riportano per varie possibili destinazioni la direzione verso cui rilanciare le UI con tale destinazione
    - l'identificativo del ramo di uscita, oppure
    - l'identificativo del nodo successivo


44

## Commutazione CL (a datagramma) (cont.)

- Nelle tabelle di routing, come possibili destinazioni possono essere presenti gli identificativi dei singoli nodi o delle (sotto)reti che li contengono
  - **nel secondo caso deve essere possibile riconoscere dall'indirizzo di destinazione delle UI la loro eventuale appartenenza a specifiche (sotto)reti**
    - questo dipende dal sistema di indirizzamento utilizzato
    - in tal caso si parla di instradamento gerarchico
    - questo ha come obiettivo quello di semplificare la funzione di instradamento soprattutto in presenza di reti di grandi dimensioni
- Nelle tabelle di routing la direzione può essere specificata attraverso vari campi
  - nodo successivo (next-hop), interfaccia, metrica, etc.
- Se non è possibile individuare alcuna direzione, la UI viene scartata

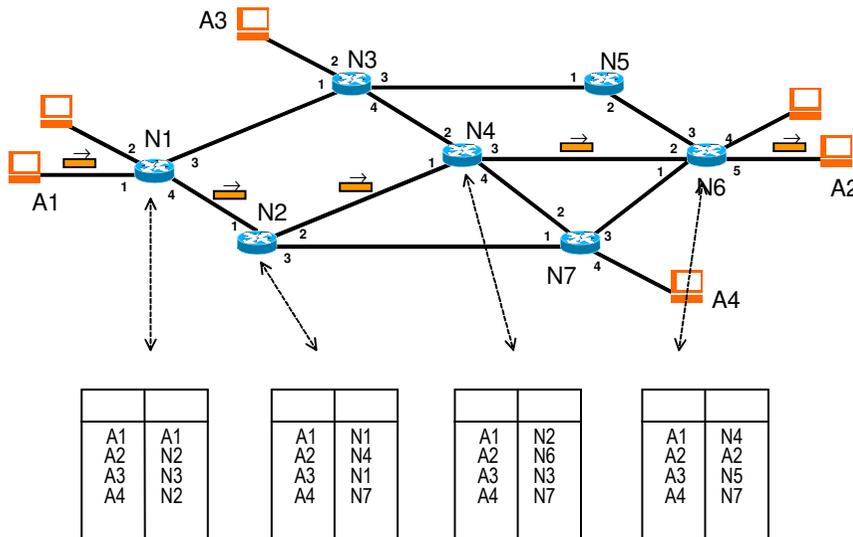
45

## Commutazione CL (a datagramma) (cont.)

- Il percorso attraverso la rete è il risultato della funzione di instradamento eseguito in successione dai vari nodi di commutazione intermedi incontrati
- La funzione di instradamento può avere risultati diversi in momenti diversi
  - **UI dirette alla stessa destinazione possono in generale seguire percorsi differenti**
  - **per la stessa ragione, UI diretti a stessa destinazione possono arrivare in ordine differente rispetto a quello di partenza**

46

## Esempio di commutazione CL (a datagramma)



47

## Commutazione CO

- Nel caso di commutazione CO, la funzione di instradamento viene eseguita durante la fase di instaurazione della connessione
  - **in questa fase viene scelto il percorso che seguiranno le UI all'interno della rete dal nodo sorgente al nodo di destinazione**
  - **spesso questo percorso viene instaurato in modo progressivo nodo per nodo tramite tabelle di instradamento**
    - ogni nodo decide in base a delle tabelle di instradamento (routing) verso quale nodo rilanciare il flusso di UI
  - **le tabelle di instradamento sono del tutto simili a quelle utilizzate nella commutazione CL**
    - la differenza sta nel fatto che in questo caso queste sono consultate solo durante la fase di instaurazione
  - **il risultato della funzione di instradamento viene memorizzato in una ulteriore tabella**
    - tabella di commutazione (switching table)
    - questa viene consultata durante la fase di trasferimento delle UI, per la funzione di attraversamento

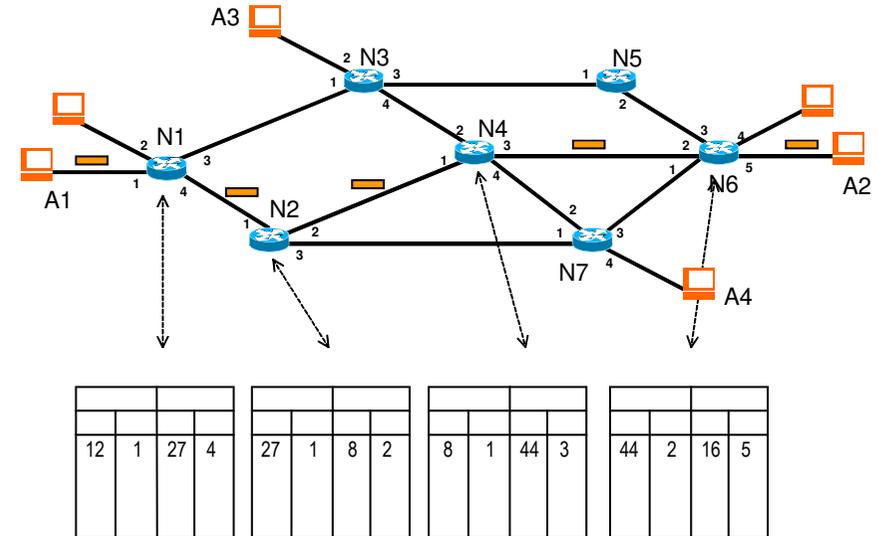
48

## Commutazione CO (cont.)

- Nel caso di moltiplicazione statistica, durante la fase di instaurazione vengono anche scelti gli identificatori di connessione o circuito virtuale (VCI, label, tag, etichette) utilizzati successivamente per il trasferimento e commutazione delle UI
  - tali VCI vengono scelti e associati ramo per ramo
- Durante la fase di trasferimento dati
  - le UI vengono identificate su ogni ramo mediante gli identificatori di circuito virtuale (VCI) scelti durante la fase di instaurazione
  - su ogni ramo le UI avranno in generale un VCI diverso
  - quindi i nodi di commutazione, durante la funzione di attraversamento, modificano il VCI delle UI ricevute in accordo al ramo di uscita su cui rilanciano le UI stesse

49

## Esempio di Commutazione CO



50

## Istradamento statico o dinamico

- Un aspetto importante legato all'istradamento è la modalità con cui le relative tabelle vengono calcolate e aggiornate
  - **routing statico**
    - le tabelle sono create e mantenute staticamente sulla base della gestione della rete (spesso attraverso una configurazione manuale delle stesse)
  - **routing dinamico**
    - le tabelle sono aggiornate automaticamente dai nodi sulla base di informazione di routing scambiata periodicamente dai nodi stessi (protocolli di routing)
- Esempi di protocolli di routing:
  - **Spanning Tree (Ethernet),**
  - **RIP, OSPF (IP)**

**Controllo di errore:  
rivelazione, correzione, e recupero**

51

## Controllo di errore

- La funzione di controllo di errore si occupa genericamente di rilevare gli errori subiti dalle UI durante il loro trasferimento ed eventualmente ripristinare il corretto flusso informativo
- Può aver a che fare con errori di vario tipo
  - **errori trasmissivi o procedurali, duplicazione, alterazione dell'ordine o perdita di UI**
- Tale funzione in realtà si può comporre di una o più delle seguenti funzioni:
  - **rivelazione di errore**
    - rilevare in ricezione eventuali errori nelle UI ricevute (in genere dovuti a errori trasmissivi)
  - **correzione di errore**
    - correggere eventuali errori di bit o byte all'interno delle UI
  - **recupero di errore**
    - in presenza di errori riportare alla normalità il flusso di UI trasferite tra due entità, tramite ritrasmissione delle UI stesse

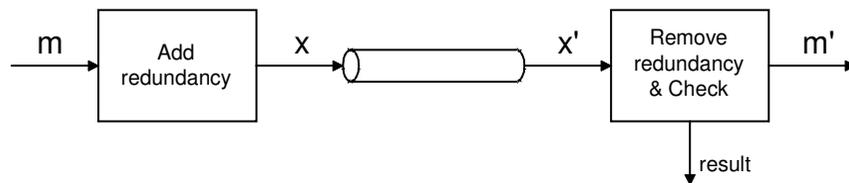
53

## Rivelazione di errore

- Ha come obiettivo quello di rilevare in ricezione eventuali errori nelle UI ricevute (in genere errori trasmissivi)
- Normalmente si basa sull'aggiunta nelle UI in trasmissione di ridondanza (codice di rivelazione di errore all'interno del PCI)
  - **utilizzata in ricezione per rivelare la presenza di errori (non per correggerli)**
- Può essere la base di una eventuale funzione di recupero errore
  - **permettendo il ricevitore di verificare la corretta ricezione o, nel caso contrario, chiedere la ritrasmissione (vedi recupero di errore)**
- Stesso principio dell'uso di MIC (Message Integrity Check) o MAC (Message Authentication Code) usato come protezione da attacchi che tentano di modificare i dati scambiati
  - **la differenza tra un codice di rivelazione di errore e un MIC è che il primo deve rilevare solo modifiche casuali**

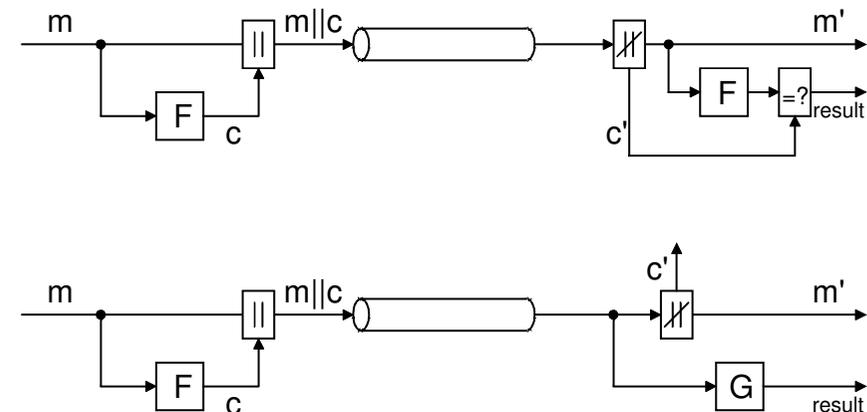
54

## Rivelazione di errore: schema generale



55

## Rivelazione di errore: schema con aggiunta di "checksum"



56

## Rivelazione di errore (cont.)

- La ridondanza richiesta per rivelare gli errori è molto più contenuta rispetto a quella che sarebbe richiesta per la funzione di correzione di errore
  - un'aggiunta di 16-32 bit è in genere sufficiente
- Esistono differenti meccanismi di generazione del codice di rivelazione di errore
  - controllo di parità
  - controllo di parità a blocchi
  - codici rivelatori d'errore polinomiali
- Esempi
  - campo CRC o FCS in Ethernet e in PPP, checksum in IP, in UDP e in TCP, etc.

57

## Rivelazione di errore: Controllo di parità

- Il più semplice codice a rivelazione di errore è il controllo di parità
  - per ogni blocco di N bit viene aggiunto un bit pari a 1 se il numero di 1 nel blocco è dispari, mentre viene aggiunto uno 0 se pari
  - se sono presenti k blocchi di N bit, verranno generati k bit di parità
  - tali bit possono essere singolarmente aggiunti di seguito a ciascun blocco o tutti insieme in punto preciso della UI (e.g. alla fine)
- Esempio (N=8)

10010010 1 10100011 0

oppure

10010010 10100011 10

- Il bit di parità permette di riconoscere errori in numero dispari

58

## Controllo di parità a blocchi

- Per rivelare errori a burst con i bit di parità, si può suddividere la sequenza di bit in k parole di N bit e organizzarla come una matrice kxN, con una parola per riga
- I bit di parità vengono calcolati sulle colonne
  - N bit di parità
- Se è presente un errore a burst di lunghezza  $h \leq N$ , questo influenzerà al più 1 bit per colonna
  - si riesce a rivelare l'errore

59

## Controllo di parità a blocchi (righe e colonne)

a) blocco di carattere originario e bit di parità

b) errore trasmissivo non rilevato dal controllo di parità

0	1	0	1	0	0	1	1
0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	1	1	1	0	1	0
1	1	0	0	0	1	0	1
0	0	0	1	0	1	1	1
0	1	1	0	1	0	1	0
1	0	0	0	1	1	0	1
0	1	0	1	0	0	0	0

Bit di parità per righe

Bit di parità per colonne

a)

0	1	0	1	0	0	1	1
0	1	0	0	1	0	0	0
0	0	1	1	1	0	1	0
1	1	0	0	0	1	0	1
0	1	0	1	0	0	1	1
0	1	1	0	1	0	1	0
1	0	0	0	1	1	0	1
0	1	0	1	0	0	0	0

b)

60

## Codici a somma complemento a 1 (Checksum)

- La sequenza di bit da proteggere viene suddivisa in k parole di N bit e organizzata come una matrice kxN, con una parola per riga
- le righe vengono sommate tra loro con aritmetica complemento a 1
- la somma, eventualmente complementata, è il codice rivelazione di errore (checksum)
- corrisponde al checksum usato per la rivelazione di errore dai protocolli IP, UDP, TCP, ed altri protocolli di Internet

**Esempio**

```

0100 0101 0000 0000
0000 0000 0011 0000
1100 0001 0000 0000
0100 0000 0000 0000
1000 0000 0000 0110
0000 0000 0000 0000
0000 0001 1001 1000
0001 0101 1110 1011
1010 0000 0100 1110
0001 1101 0011 1110
-----
1001 1011 0100 0111 = sum
0110 0100 1011 1000 = checksum
    
```

61

## Esempio di calcolo del Checksum

```

      1       1       1
      10111 0110 1111 100

0100 0101 0000 0000 + 45 00 +
0000 0000 0011 0000 00 30
1100 0001 0000 0000 C1 00
0100 0000 0000 0000 40 00
1000 0000 0000 0110 80 06
0000 0000 0000 0000 00 00
0000 0001 1001 1000 01 98
0001 0101 1110 1011 15 EB
1010 0000 0100 1110 A0 4E
0001 1101 0011 1110 1D 3E
----- = -----
somma parziale: 1001 1011 0100 0101 9B 45
riporto:                10      2
----- = -----
somma (complemento a 1): 1001 1011 0100 0111 9B 47 = 1001 1011 0100 0111

1001 1011 0100 0111 ⊕ 1001 1011 0100 0111 ⊕
1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111
----- = -----
checksum: 0110 0100 1011 1000 64 B8 = 0110 0100 1011 1000
    
```

62

## Codici a somma complemeto a 1 (Checksum)

### Trasmittitore

- tratta il contenuto dell'UI come una sequenza di interi a 16-bit mettendo a zero i bit relativi al checksum
- sum: somma (complemento a 1) del contenuto del segmento
- checksum: complemento della somma (0→1, 1→0)
- inserisce il valore della checksum nel campo checksum dell'header

### Ricevitore

- calcola la checksum del segmento ricevuto
- se la checksum calcolata è composta da sedici 1 (FF FF) allora la UI è rilevata corretta
- Nota: è possibile che venga rilevata corretta una UI errata

63

## Codici rivelatori di errore polinomiali (CRC)

- Codici polinomiali o anche Cyclic Redundancy Code (CRC)
- Le singole cifre binarie di una stringa da emettere sono trattate come coefficienti (di valore "0" o "1") di un polinomio P(x)
  - Le cifre binarie di una UI di lunghezza uguale a k cifre binarie sono quindi considerate come i coefficienti di un polinomio completo di grado k-1. In particolare, l'i-esimo bit della trama è il coefficiente X<sup>i-1</sup> di P(x)
- Le entità emittente e ricevente utilizzano un polinomio comune G(x), detto polinomio generatore, come divisore del polinomio P(x)

$$\frac{P(x)}{G(x)} = Q(x) + \frac{R(x)}{G(x)}$$

- dove:
  - Q(x) è il polinomio quoziente
  - R(x) è il polinomio resto
- La divisione viene effettuata in algebra modulo 2

64

## CRC

- La entità emittente inserisce i coefficienti del resto  $R(x)$  in un apposito campo del PCI della UI
- La entità ricevente esegue, con il polinomio generatore, la stessa operazione di divisione effettuata in emissione e confronta il resto ottenuto localmente con quello contenuto nella UI
- Se i due resti sono uguali, la UI è considerata corretta; altrimenti uno o più errori si sono verificati nel corso del trasferimento e la UI viene considerata errata (in genere viene scartata)

65

## CRC

- Si può dimostrare che scegliendo opportunamente  $G(x)$ , il CRC può rilevare sempre
  - Errori su un bit singolo
  - Errori su 2 bit se  $G(x)$  ha almeno 3 coefficienti non nulli
  - Errori su un numero dispari di bit se  $G(x)$  è divisibile per  $(x+1)$
  - Errori a "burst" (cioè consecutivi) con lunghezza del burst minore di  $r+1$  bit

66

## CRC

- I polinomi divisori  $G(x)$  più usati in Europa e Nord America sono rispettivamente:

$$G(x) = x^{16} + x^{15} + x^{12} + 1$$

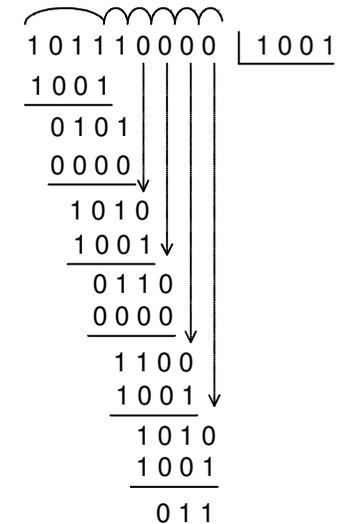
$$G(x) = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$$

- Tecnica usata per esempio in Ethernet o in altri protocolli di Livello 2 (Data Link)

67

## Esempio CRC

- $M$  = msg originale = 101110
- $G$  = polinomio generatore = 1001
- $r$  = 3 bit di ridondanza (grado del polinomio  $G$ )
- $Q$  = polinomio quoziente
- $R$  = resto = CRC = 011
- $P$  = msg inviato =  $M \parallel R$  = 101110011



$$\frac{x^r M(x)}{G(x)} = Q(x) + \frac{R(x)}{G(x)}$$

68

## Correzione di errore

- FEC (Forward Error Correction)
  - aggiunta di ridondanza in trasmissione
  - in ricezione si usa la ridondanza per rimediare ai bit errati (se in numero contenuto)
  - nessun riscontro di corretta ricezione → comunicazione unidirezionale
  - non c'è necessità di buffer per le UI inviate
  - teoria dei codici (codici a blocco, codici convoluzionali)
  - la ridondanza aggiunta è in genere maggiore di quella usata per la sola rivelazione
  - la ridondanza introdotta per correggere l'errore è costante (fissa)
    - al contrario dei meccanismi di recupero di errore che prevedono meccanismi di ack e ritrasmissione (vedi seguente)
- e.g. codice a ripetizione
  - ripetendo N volte lo stesso bit si correggono sino a  $N/2 - 1$  errori

69

## Recupero di errore

- Ha lo scopo di riportare alla normalità il flusso di UI trasferite tra due entità nel caso di errori di duplicazioni, di perdite di UI o di alterazioni nel loro ordine originale
- Controllo di errore che opera tramite ritrasmissione automatica
  - ARQ (Automatic Repeat Request)
- Meccanismi impiegati per la ritrasmissione:
  - 1) codici di rivelazione di errore
  - 2) uso di temporizzatori
  - 3) introduzione dei numeri di sequenza (SQN) delle UI
  - 4) uso di riscontri positivi (ACK) e/o negativi (NACK)
  - 5) uso di richieste di ri-emissione selettive (SEL REJ)
- Alcune tecniche: stop&wait, sliding window go-back-N or selective repeat
- Esempi: X.25/HDLC, TCP, SIP

70

## Procedure di recupero ARQ

### Automatic Repeat Request (ARQ)

- 1) modalità a riscontro positivo con riemissione (stop and wait)
  - finestra  $Tx=1$
- 2) modalità a finestra variabile (sliding window) con riemissione non selettiva (go-back-N)
  - finestra  $Tx=N (>1)$ , finestra  $Rx=1$
- 3) modalità a finestra variabile (sliding window) con riemissione selettiva (selective repeat)
  - finestra  $Tx=N (>1)$ , finestra  $Rx=K (>1)$

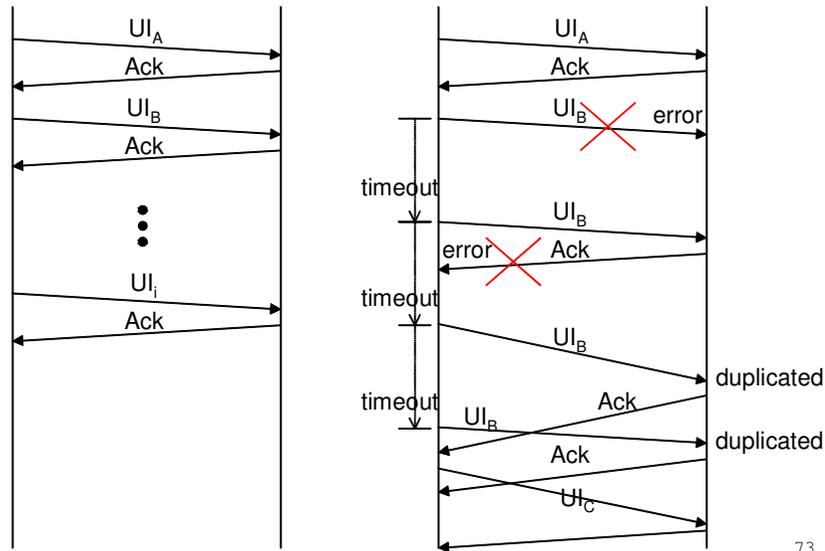
71

## Stop&Wait

- Per ogni verso della comunicazione le UI dati vengono inviate singolarmente (una per volta)
- Prima di inviare la successiva UI si attende un messaggio di riscontro (ACK)
- Il messaggio di riscontro è una UI, contenente dati diretti nel verso opposto o vuota, in cui è presente informazione di controllo di ACK (acknowledgment)
- Per poter far fronte ad eventuali casi di errore (mancanza di consegna di UI dati o ACK, o ricezione errata) è necessario attivare in trasmissione per ogni UI inviata un timeout di ritrasmissione
- Alla scadenza del timeout, se non è stato ricevuto alcun ACK, la UI viene ritrasmessa

72

## Stop&Wait con ACK e Timeout



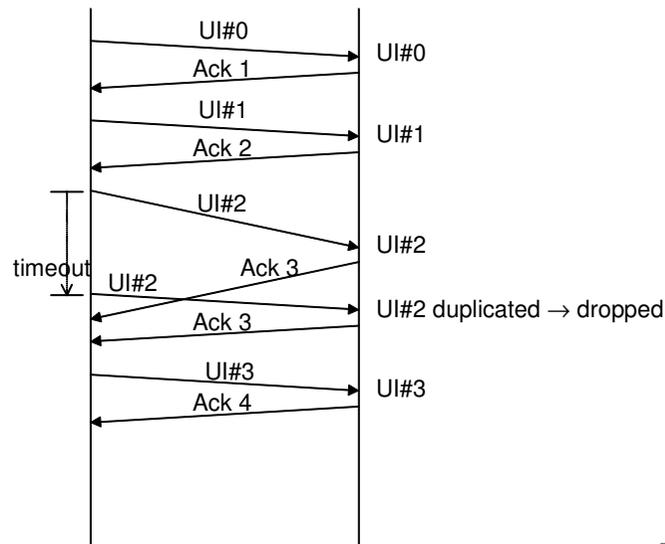
73

## Stop&Wait: SQN

- Per far fronte ad eventuali duplicazioni di UI dati e/o di ACK è importante utilizzare dei numeri sequenza (SQN)
  - impiegati come identificativi di UI
- Per i numeri di sequenza è normalmente riservato nel PCI (header) un numero di bit fissato (e limitato)
  - le UI sono quindi numerate modulo N
  - se k bit per SQN allora si ha  $N=2^k$
- Nel caso di Stop&Wait, il valore minimo di N è 2
  - se durante il trasferimento è mantenuta la sequenzialità delle UI è infatti sufficiente un solo bit per il conteggio del numero di sequenza

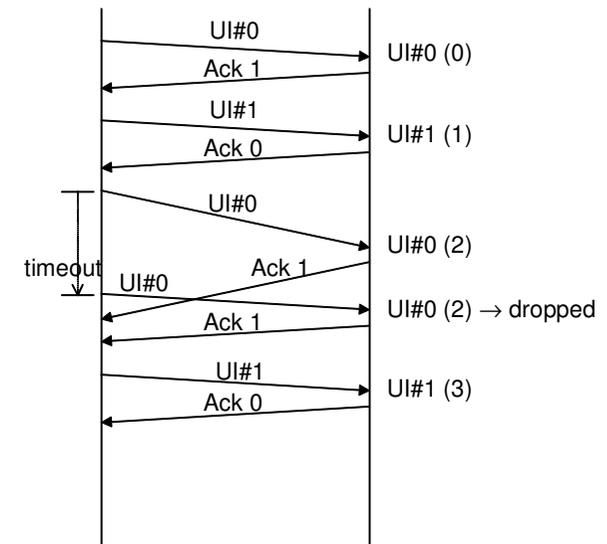
74

## Stop&Wait con ACK, Timeout, e SQN



75

## Stop&Wait con ACK, Timeout, e SQN



76

## Stop&Wait

- Il trasmettitore
  - invia una UI
  - attiva un orologio con un timeout fissato
  - si pone in attesa della conferma di ricezione (ACK)
  - se scade il timeout prima dell'arrivo del ACK, ripete la trasmissione
  - se riceve un ACK prima della scadenza del timeout, controlla il numero di sequenza e se corretto abilita la trasmissione della UI successiva
- Il ricevitore
  - riceve una UI
  - controlla la correttezza della UI
  - controlla il numero di sequenza
  - se la UI è corretta invia la conferma di ricezione (ACK)

77

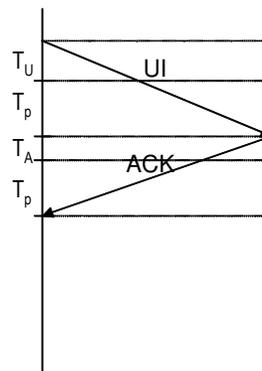
## Stop&Wait: Timeout

- Il timeout deve essere sufficientemente grande da consentire la trasmissione della UI e della relativa conferma (ACK)
- Un timeout troppo grande rallenta eventuali ritrasmissioni
- Il valore del timeout deve quindi approssimare per eccesso il ritardo A/R ovvero il RTT (Round Trip Time)
- La stima di tale valore è in genere un'operazione delicata

78

## Stop&Wait - prestazioni in assenza di errori

- Recupero di errore con modalità stop&wait
- Nell'ipotesi che non si verificano errori trasmissivi (UI dati e ACK sempre ricevuti correttamente)
- Indicando con:
  - $T_U$  = tempo di trasmissione di una UI dati
  - $T_A$  = tempo di trasmissione di un ACK
  - $T_p$  = tempo di trasferimento end-to-end nella rete, escluso il tempo di trasmissione introdotto dal nodo sorgente
    - nel caso di un unico ramo rappresenterebbe il tempo di propagazione
- Tempo complessivo necessario per inviare una UI e ricevere il riscontro:
  - $T_1 = T_U + T_p + T_A + T_p = T_U + T_A + 2 T_p$



79

- Grado di utilizzazione massimo del canale di comunicazione
  - valore max in assenza di errori (e di ritrasmissioni)
  - $\rho = T_U / T_1 = T_U / (T_U + T_A + 2T_p)$
- Se  $T_U = T_A$ 
  - $\rho = 1 / (2 + 2T_p / T_U)$
  - se  $T_U \gg T_p$ ,  $\rho \rightarrow 1/2$
  - se  $T_U \ll T_p$ ,  $\rho \rightarrow 0$
- Se  $T_U \gg T_A$ 
  - $\rho = 1 / (1 + 2T_p / T_U)$
  - se  $T_U \gg T_p$ ,  $\rho \rightarrow 1$
  - se  $T_U \ll T_p$ ,  $\rho \rightarrow 0$
- Se  $T_p \gg T_U$ 
  - $\rho \approx 0$

80

## Stop&Wait - prestazioni in presenza di errori

- Recupero di errore con modalità stop&wait
- Ipotesi:
  - La sorgente non riceve degli ACK (UI o ACK errati/persi)
  - Indipendenza statistica degli eventi di UI e ACK persi
  - $\Pr\{\text{non si riceva un ACK relativo ad una UI dati inviata}\} = p$
- Tempo medio per inviare una UI e ricevere il riscontro:
  - $a = \text{numero di tentativi per inviare una UI e ricevere il riscontro}$
  - $P_a(1) = \Pr\{a=1\} = 1-p$
  - $P_a(2) = p(1-p)$
  - $P_a(k) = p^{k-1}(1-p)$
  - valore medio di  $a = E\{a\} = \sum k p^{k-1}(1-p) = (1-p) \sum k p^{k-1} = (1-p) \sum d(p^k)/dp = (1-p) d(\sum p^k)/dp = (1-p) d(1/(1-p))/dp = (1-p) / (1-p)^2 = 1/(1-p)$
  - tempo medio  $E\{T\} = (E\{a\}-1)TO + T_1 = TO p/(1-p) + T_1$

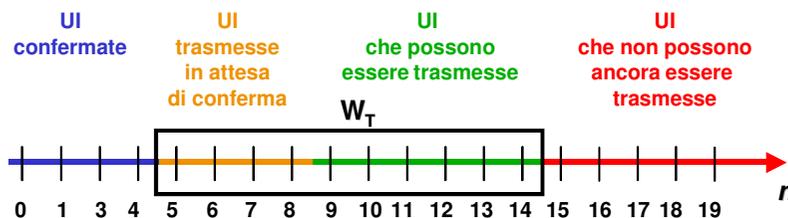
81

- Se timeout di ritrasmissione  $TO$  circa uguale al tempo complessivo  $T_1$  necessario per inviare una UI e ricevere il riscontro ( $TO \approx T_1$ ):
  - $E\{T\} = (E\{a\}-1)TO + T_1 = E\{a\} T_1 = (T_U + T_A + 2T_p)/(1-p)$
- Rendimento o grado di utilizzazione del collegamento
  - $\rho = T_U / E\{T\} = (1-p) T_U / T_1$

82

## Sliding window

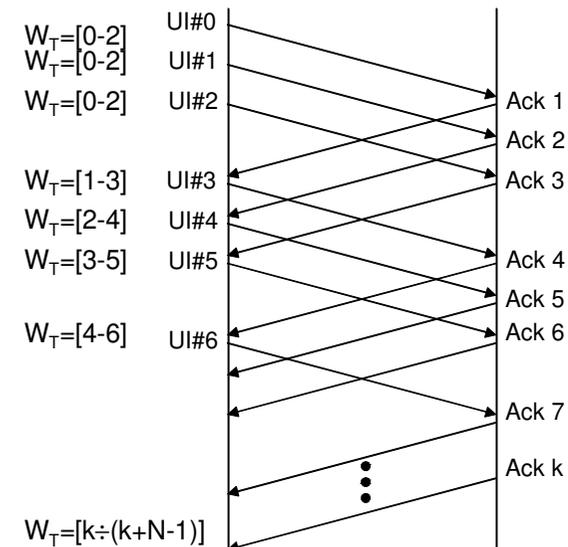
- Il throughput può essere aumentato consentendo al trasmettitore l'invio di  $N_T$  UI consecutive senza aspettare i relativi riscontri
- La gamma dei numeri di sequenza delle UI consecutive che possono essere emesse senza ricevere riscontro può essere considerata una "finestra" di dimensione  $N_T$  che si sposta in avanti di 1 per ogni ACK ricevuto



$W_T$ : finestra di trasmissione (dimensione  $N_T$ )

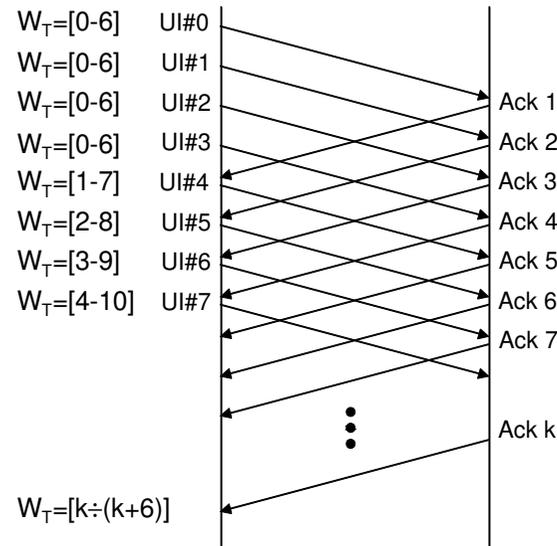
83

## Sliding window ( $N_T=3$ )



84

## Sliding window ( $N_T=7$ )



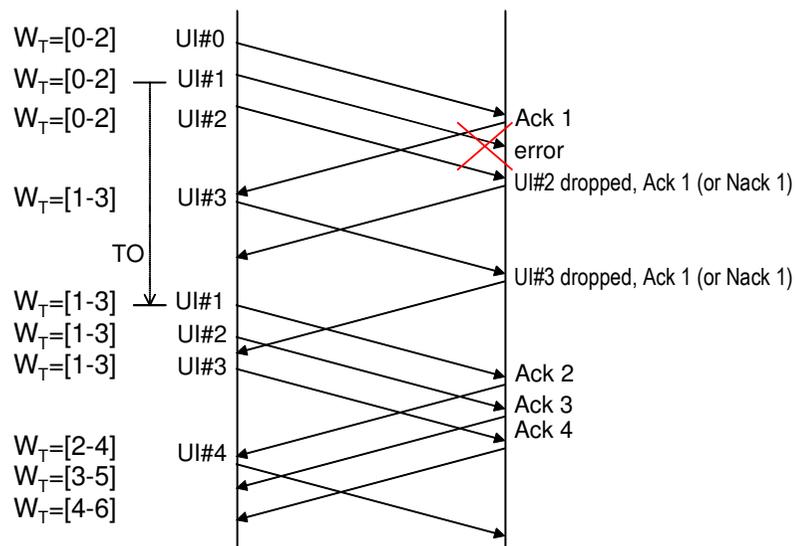
85

## Sliding window

- In genere si considerano ACK cumulativi
  - con **ACK- $i$**  si notifica la corretta ricezione di **TUTTE** le UI con **SNQ inferiore a  $i$**  (specificato nell'ACK)
  - se il trasmettitore riceve un **ACK- $k$**  con  $k$  maggiore della posizione più bassa della  $W_T$ , può avanzare la  $W_T$  fino alla posizione  $k$ , ignorando il fatto che alcuni ACK non siano ancora stati ricevuti
- Due tipi di protocolli sliding window
  - **Go-back-N**
  - **Selective repeat**
- Si differenziano sulla capacità del ricevitore di mantenere le UI ricevute fuori sequenza (successive rispetto a UI non ancora ricevute)
  - **finestra di ricezione  $W_R$** , indica la gamma di UI che possono essere ricevute anche non in sequenza

86

## Sliding window Go-Back-N ( $N_T=3$ )



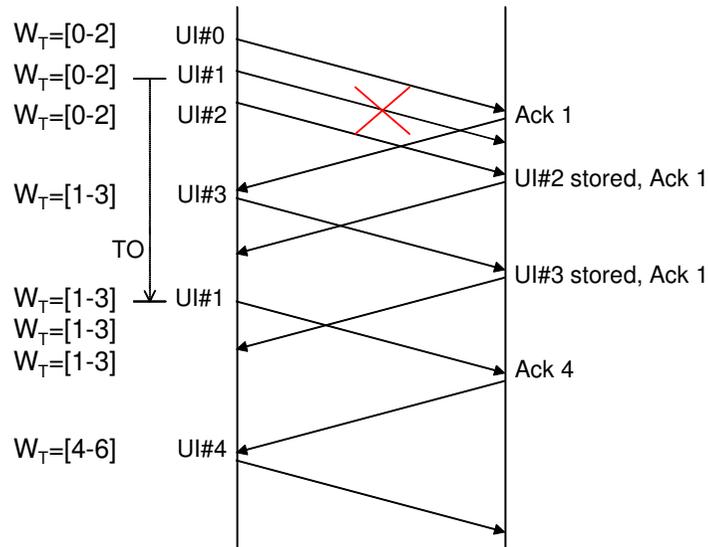
87

## Go-back-N

- Il trasmettitore
  - **invia fino ad  $N$  UI facendo di ognuna una copia**
  - **attiva un orologio per ogni UI**
  - **si pone in attesa delle conferme di ricezione (ACK)**
  - **se scade un timeout prima dell'arrivo delle conferme, ripete la trasmissione**
- Il ricevitore
  - **quando riceve una UI controlla la sua correttezza e il numero di sequenza**
  - **se la UI contiene il primo numero di sequenza non ancora ricevuto, viene consegnata ai livelli superiori, altrimenti viene scartata**
  - **invia la conferma di ricezione (ACK)**
- Nota: Equivale a Selective repeating con finestra di ricezione  $W_R=1$

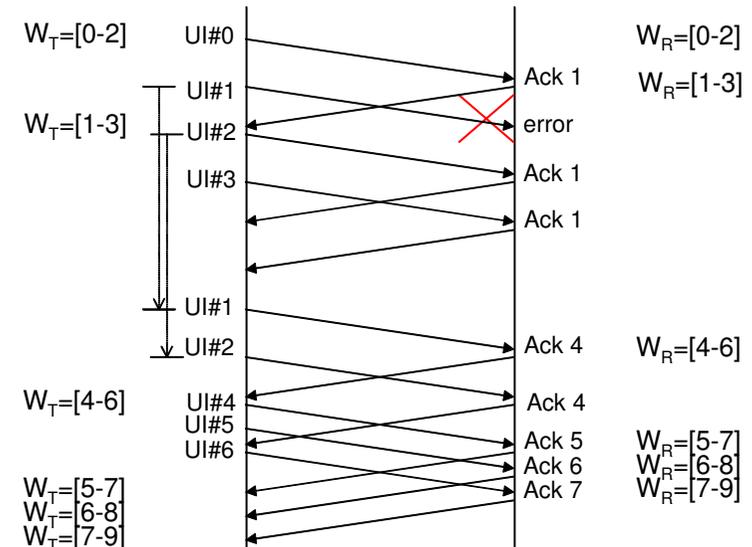
88

## Selective repeating



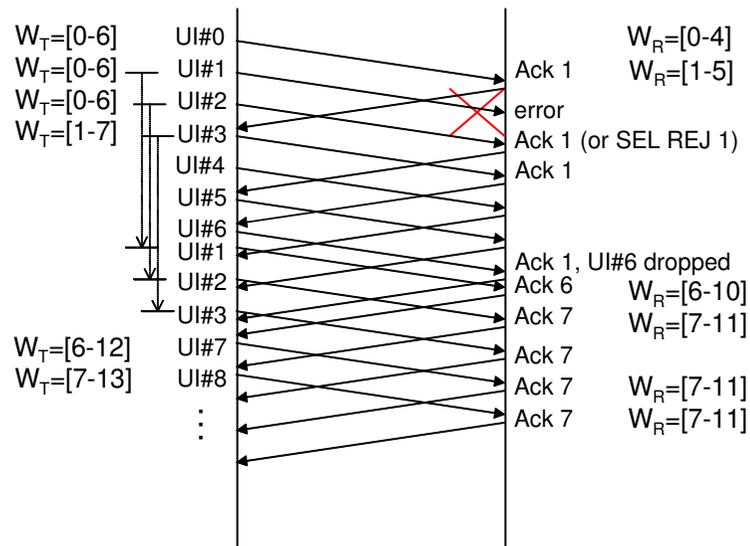
89

## Sliding window Selective repeating ( $N_T=3, N_R=3$ )



90

## Sliding window Selective repeating ( $N_T=7, N_R=5$ )



91

## Selective repeating

- Il trasmettitore
  - invia fino ad  $N$  UI
  - attiva un orologio per ogni UI
  - si pone in attesa delle conferme di ricezione (ACK)
  - se scade un timeout prima dell'arrivo della conferma, ripete la trasmissione della UI
- il ricevitore
  - riceve una UI e controlla la correttezza della UI e il numero di sequenza
  - se la UI è corretta e all'interno della finestra di ricezione invia un ACK
  - nell'ACK si richiede sempre la prima UI non ricevuta in sequenza (ovvero si conferma l'ultima UI ricevuta in sequenza)

92

## Piggybacking

- Se la comunicazione è di tipo bidirezionale, le stesse UI dati possono essere usate per inviare messaggi di ACK (controllo) relativi al flusso opposto
  - **multi protocolli di tipo ARQ prevedono che una UI possa essere:**
    - solo dati
    - solo controllo
    - contemporaneamente sia dati che controllo
- Per “piggybacking” si intende quella tecnica che ritarda leggermente l’invio di ACK relativi ad un flusso nell’attesa di eventuali UI dati nel verso opposto

93

## Sliding window - prestazioni in assenza di errori

- Recupero di errore con modalità sliding window
- Nell’ipotesi che non si verificano errori trasmissivi (UI dati e ACK sempre ricevuti correttamente)
- Indicando con:
  - $W_T$  = **dimensione della finestra di trasmissione**
- Il tempo complessivo  $T_N$  necessario per inviare  $N$  UI consecutive e correttamente riscontrate, nel caso che  $N < W_T$  è:
  - $T_N = N T_U + 2 T_p + T_A = (N-1) T_U + T_1$

94

- In generale, per qualsiasi valore di  $W_T$  e  $N$ , è possibile ricavare che:
  - **se  $T_1 \leq W_T T_U$ :**
    - $T = (N-1)T_U + T_1$
  - **se  $T_1 \geq W_T T_U$ :**
    - $T = ((N-1) \text{ div } W_T)T_1 + ((N-1) \text{ mod } W_T)T_U + T_{U1} = T_1(1 + ((N-1) \text{ div } W_T)) + T_U((N-1) \text{ mod } W_T)$   
con:
      - $x \text{ div } y = \lfloor x/y \rfloor$  = parte intera di  $x/y$
      - $x \text{ mod } y$  = resto della divisione  $x/y$

## Controllo di flusso

95

## Controllo di flusso

- Ha il compito di assicurare che il ritmo di arrivo delle UI non superi la capacità di memorizzazione e elaborazione della entità ricevente, in modo che non si verifichino perdite di informazione
  - **regolazione dell'emissione del flusso di dati di una entità emittente da parte della entità ricevente**
  - **dipende dalle capacità di memorizzazione del ricevente (buffer) e dalla sua velocità di elaborazione e smaltimento**
  - **spesso viene realizzata in interazione con la funzione di recupero di errore e/o di controllo di congestione**
- Tecniche:
  - **messaggi di riscontro tipo RR (Receiver Ready), RNR (Receiver Not Ready) (e.g. X.25), CTS (Clear to Send) (e.g. RS-232)**
  - **oppure tecniche di indicazione della flow window di ricezione (e.g. TCP)**

97

## Controllo di flusso: esempi

- Esempio: seriale RS-232
  - **RTS/CTS (Controllo di flusso HW)**
    - E' presente una coppia di fili corrispondenti ai segnali RTS (*Request To Send - pin 4*) e CTS (*Clear To Send - pin 5*). Quando un dispositivo ricevente rileva l'attivazione del segnale RTS da parte del dispositivo trasmittente ed è pronto per ricevere, allora risponde attivando il CTS. Per interrompere l'invio dei dati da parte del trasmettitore, il ricevitore può disattivare il segnale CTS, e riattivarlo quando sarà nuovamente in grado di ricevere i dati.
  - **XON/XOFF (Controllo di flusso SW)**
    - L'utilizzo dei caratteri XON e XOFF (codici 17 e 19 della tabella ASCII, talvolta identificati come DC1 e DC3 - *device control* numero 1 e 3 - e corrispondenti ai codici di controllo CTRL-Q e CTRL-S) permette di realizzare un controllo di flusso senza bisogno di segnali hardware dedicati, in quanto XON e XOFF viaggiano sugli stessi canali dei dati. Il ricevitore trasmette un XOFF quando non è più in grado di ricevere i dati e un XON quando è nuovamente in grado di riceverli

98

## Controllo di flusso: esempi

- Esempio: HDLC/X.25 livello 2
  - **controllo di flusso tramite trama (HDLC-PDU) di controllo RNR (Receiver Not Ready). È una trama utilizzata per indicare che la stazione è temporaneamente impossibilitata a ricevere nuovi I-frame (trame informative)**
  - **quando la stazione ricevente può ricominciare a ricevere UI invia una trama di controllo di tipo RR (Receive Ready)**
- Esempio: TCP
  - **controllo di flusso a finestra scorrevole di ampiezza variabile e operante a livello di ottetti (byte) numerati sequenzialmente**
  - **un segmento (TCP-PDU) di riscontro con ACK Number=n e Window=w significa che il trasmittente è autorizzato a trasmettere fino a ulteriori w ottetti a partire da n, ovvero fino all'ottetto numerato con n+w-1**

99

## Controllo di congestione

## Controllo di congestione

- Il controllo della congestione ha lo scopo di recuperare e/o evitare eventuali situazioni di sovraccarico nella rete
  - **regolazione dell'emissione dei dati in modo da ridurre il grado di congestione della rete**
- Tecniche:
  - **meccanismi con feedback dei nodi della rete**
  - **meccanismi end-to-end**
  - **routing adattativo**
  - **controllo di ammissione di chiamata (CAC), nel caso di comunicazioni CO**
- Esempi: ATM, TCP

101

## Altre funzioni

## Altre funzioni

- Interfacciamento Fisico
  - **connettori, cavi e mezzi fisici**
- Trasmissione/Ricezione
  - **modulazione/demodulazione, codifica di canale, codifica di linea, etc.**
- Adattamento/Compressione
  - **identificazione, riempimento, frammentazione o aggregazione, compressione, etc.**
  - **e.g. AAL, LLC, IP, L2TP, PPTP, IPSec, etc.**
- Traduzione di protocolli
  - **tanti problemi, e.g. indirizzamento, restrizioni sul formato, gestione errori, gestione QoS, ..**
  - **e.g. IEEE 802.1, NAT, NAT-PT (IPv4/IPv6), Media GWs, etc..**
- Instaurazione di chiamata (Call Setup)
  - **e.g. PPP, TCP, SIP**

103

## Altre funzioni (cont.)

- Gestione della mobilità
  - **Roaming, indirizzamento, paging, etc.**
  - **e.g. GSM/GPRS/UMTS, Mobile IP, SIP, etc.**
- Controllo della QoS
  - **gestione delle risorse per flusso o per classe di servizio**
  - **e.g. Intserv, Diffserv**
- Sincronizzazione/Equalizzazione
  - **Timestamps, playout buffer**
  - **e.g. RTP/RTCP, RTSP**
- Multicasting
  - **indirizzamento, routing**
  - **e.g. IP Multicast, SAP**
- Supporto della sicurezza
  - **Autenticazione, integrità, confidenzialità**
  - **e.g. IPSec, TLS/SSL**

104