

Lo strato di collegamento

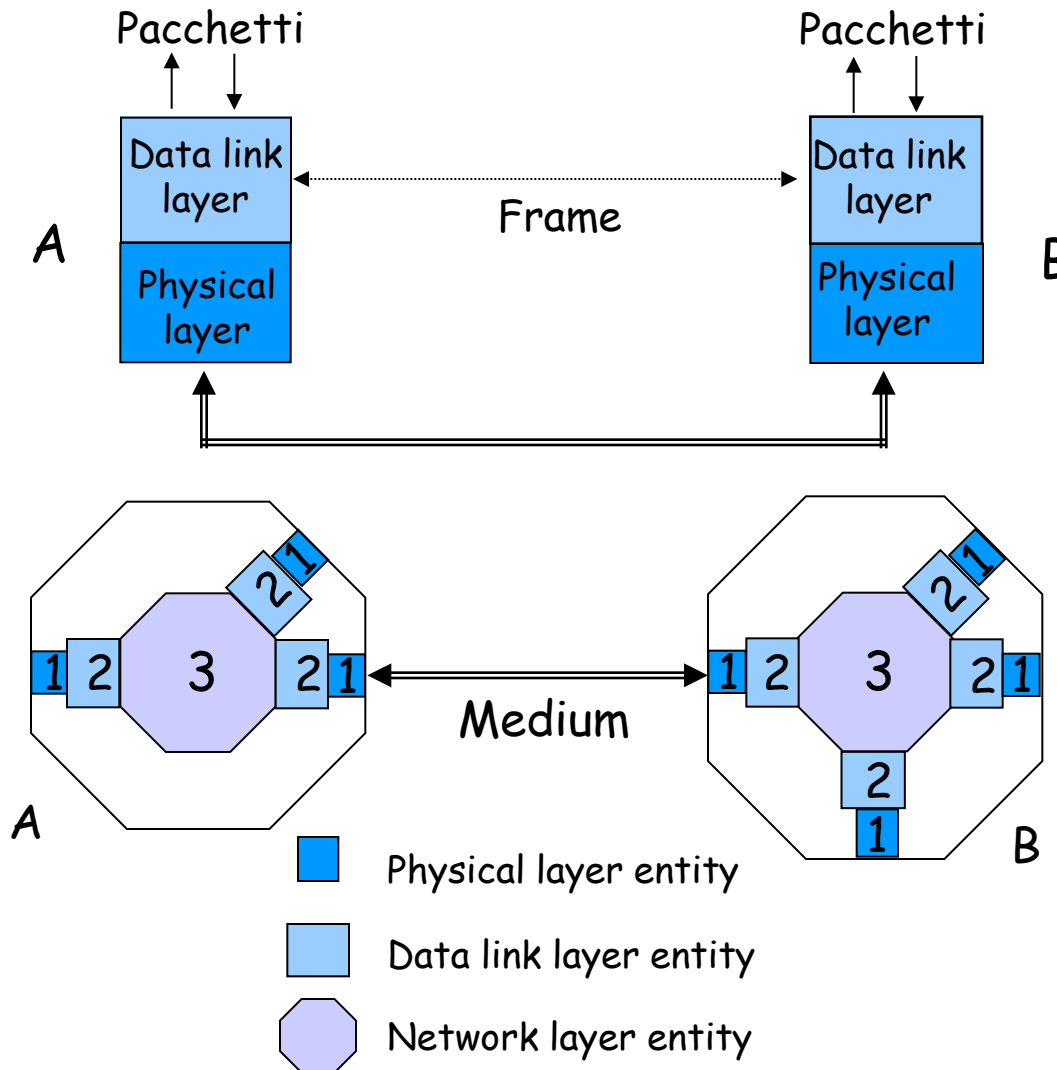
Parte 3

Controllo d'errore e controllo di flusso

End-to-End vs. Hop-by-Hop

- Una funzione può essere eseguita
 - da estremo a estremo (**end-to-end**) (**Strato di trasporto**)
 - tratta per tratta (**hop-by-hop**) (**Strato di Data link**)
- Esempi
 - Controllo d'errore eseguito in ogni hop del percorso di rete oppure solamente tra sorgente e destinazione
 - Controllo di flusso eseguito in ogni hop del percorso di rete oppure solamente tra sorgente e destinazione
- Quali sono i vantaggi e gli svantaggi dei due approcci ?

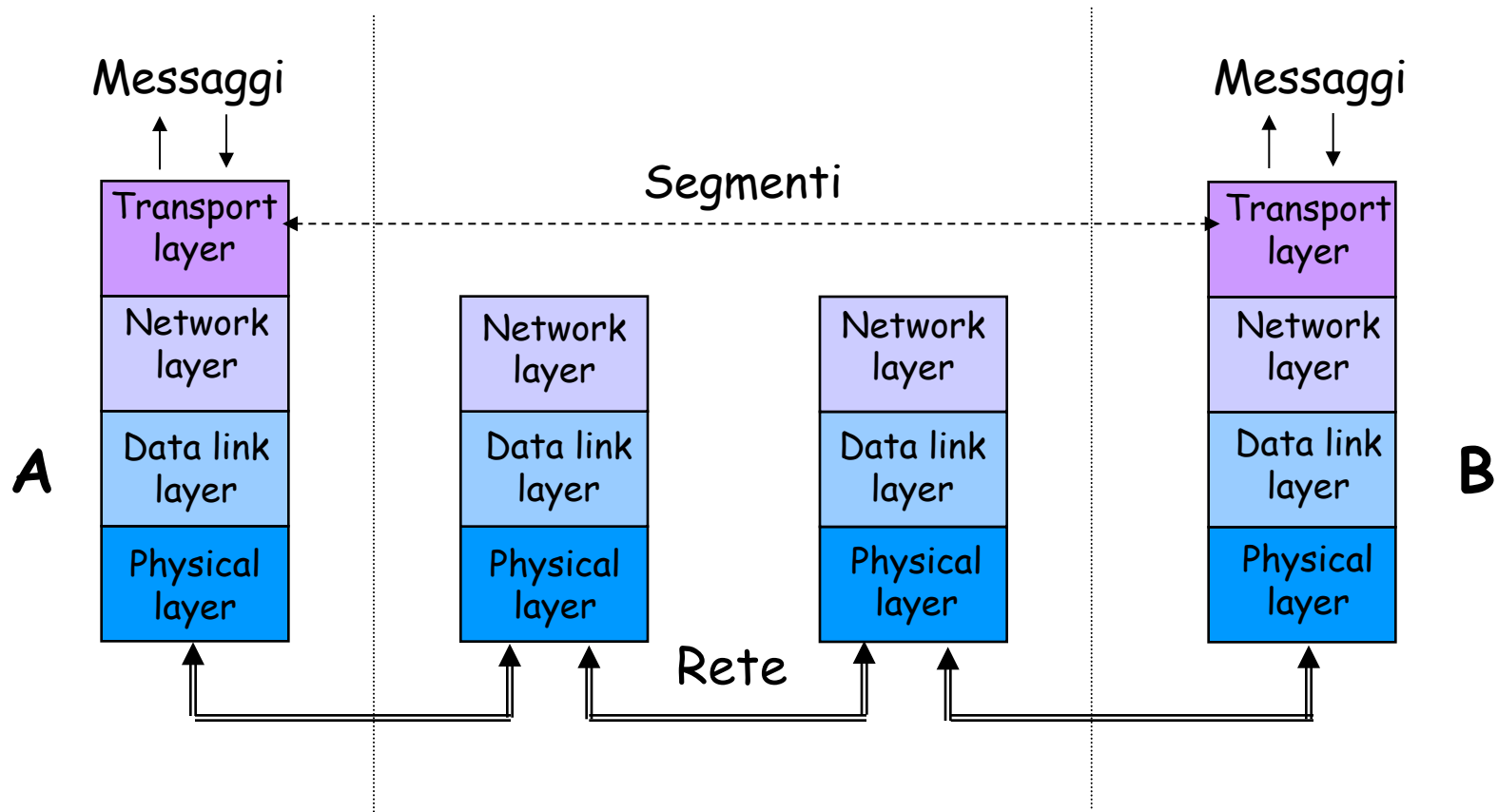
Controllo d'errore nello strato di Data Link



- Lo strato di data link opera punto-punto tra due elementi di rete direttamente connessi
- Le frame possono subire errori, ma è preservata la sequenza
- Lo strato di Data link esegue la rivelazione degli errori e la ritrasmissione delle frame errate
- Viene assicurato il trasferimento affidabile dei pacchetti

Controllo d'errore nello strato di Trasporto

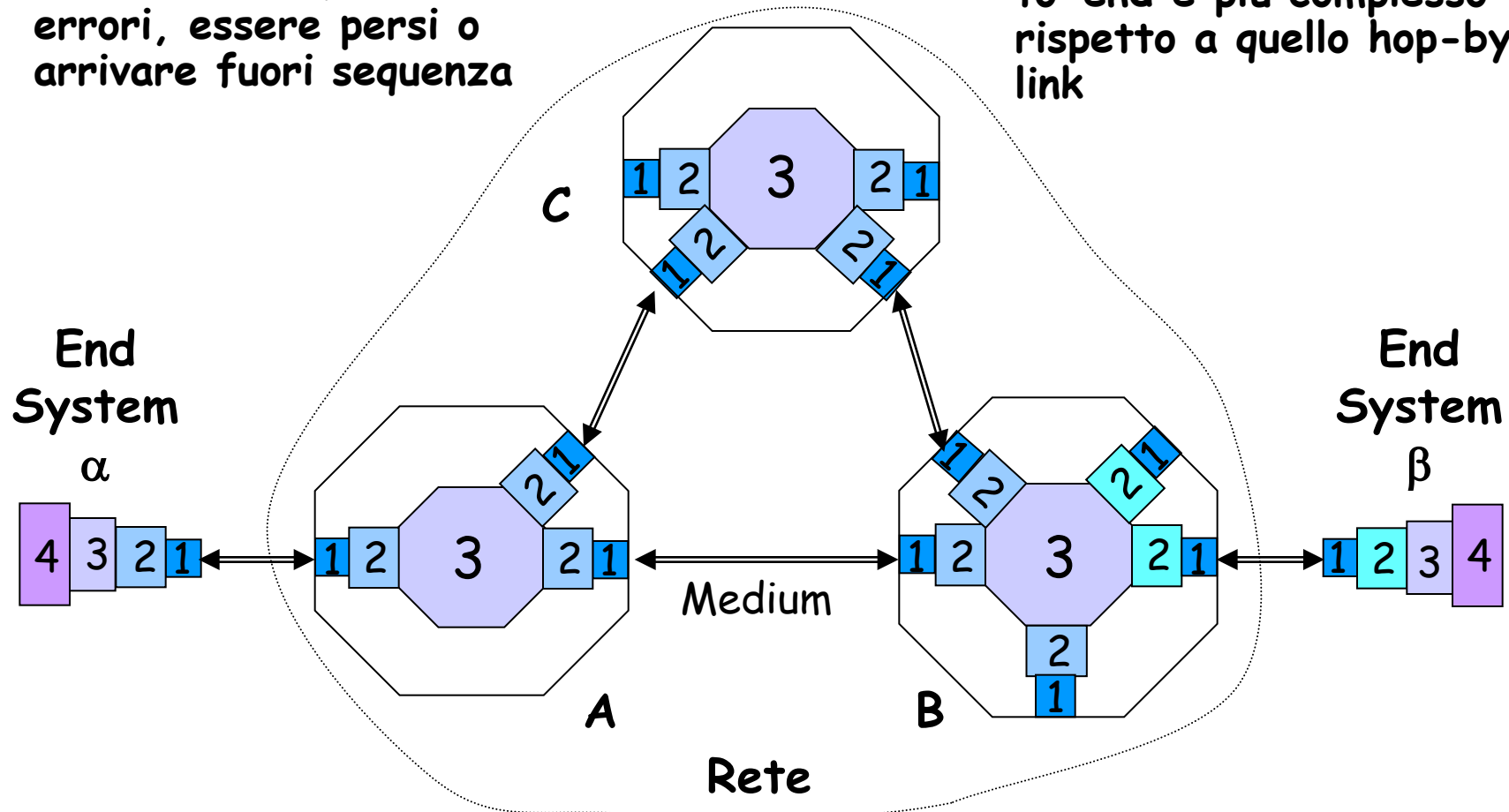
- Il protocollo di strato di trasporto (es. TCP) emette i segmenti ed esegue end-to-end sia la rivelazione d'errore che la ritrasmissione
- La rete è considerata inaffidabile



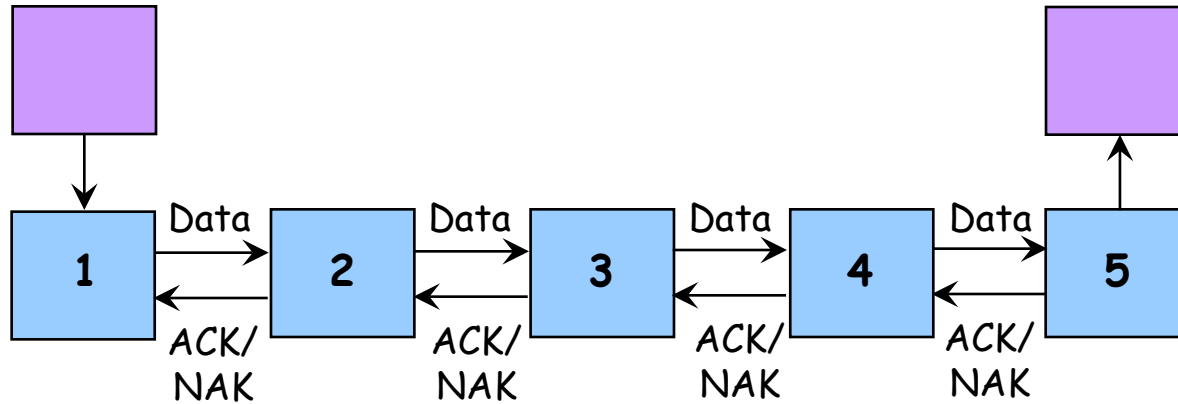
Controllo d'errore nello strato di Trasporto

- I segmenti possono subire ritardi elevati, subire errori, essere persi o arrivare fuori sequenza

- Il controllo d'errore end-to-end è più complesso rispetto a quello hop-by-link

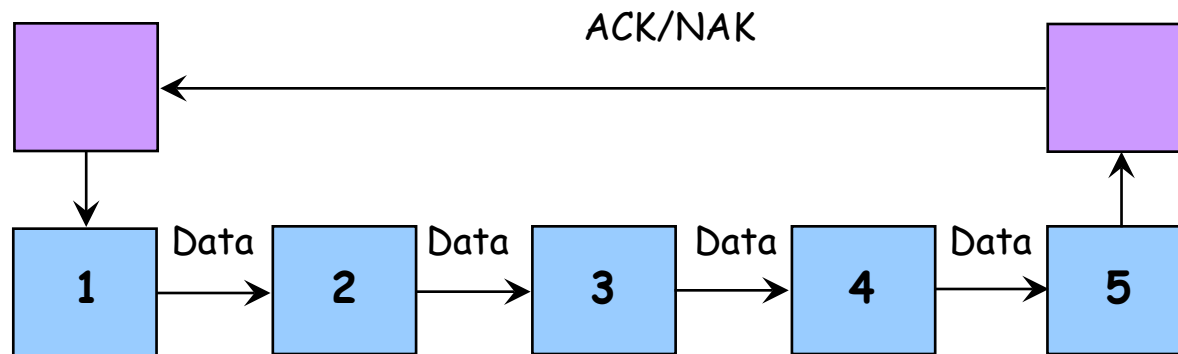


End-to-End vs. Hop-by-Hop



■ Hop-by-hop

- non può assicurare la correttezza end-to-end
- Recupero più veloce



■ End-to-end

- Semplicità delle procedure di rete
- Maggiore scalabilità

Automatic Repeat Request (ARQ)

Automatic Repeat Request (ARQ)

■ Obiettivo

- assicurare che una sequenza di PDU sia consegnata in ordine e senza errori o duplicazioni in presenza di un servizio offerto dagli strati sottostanti che introduce errori e/o perdite

■ Possibili procedure alternative

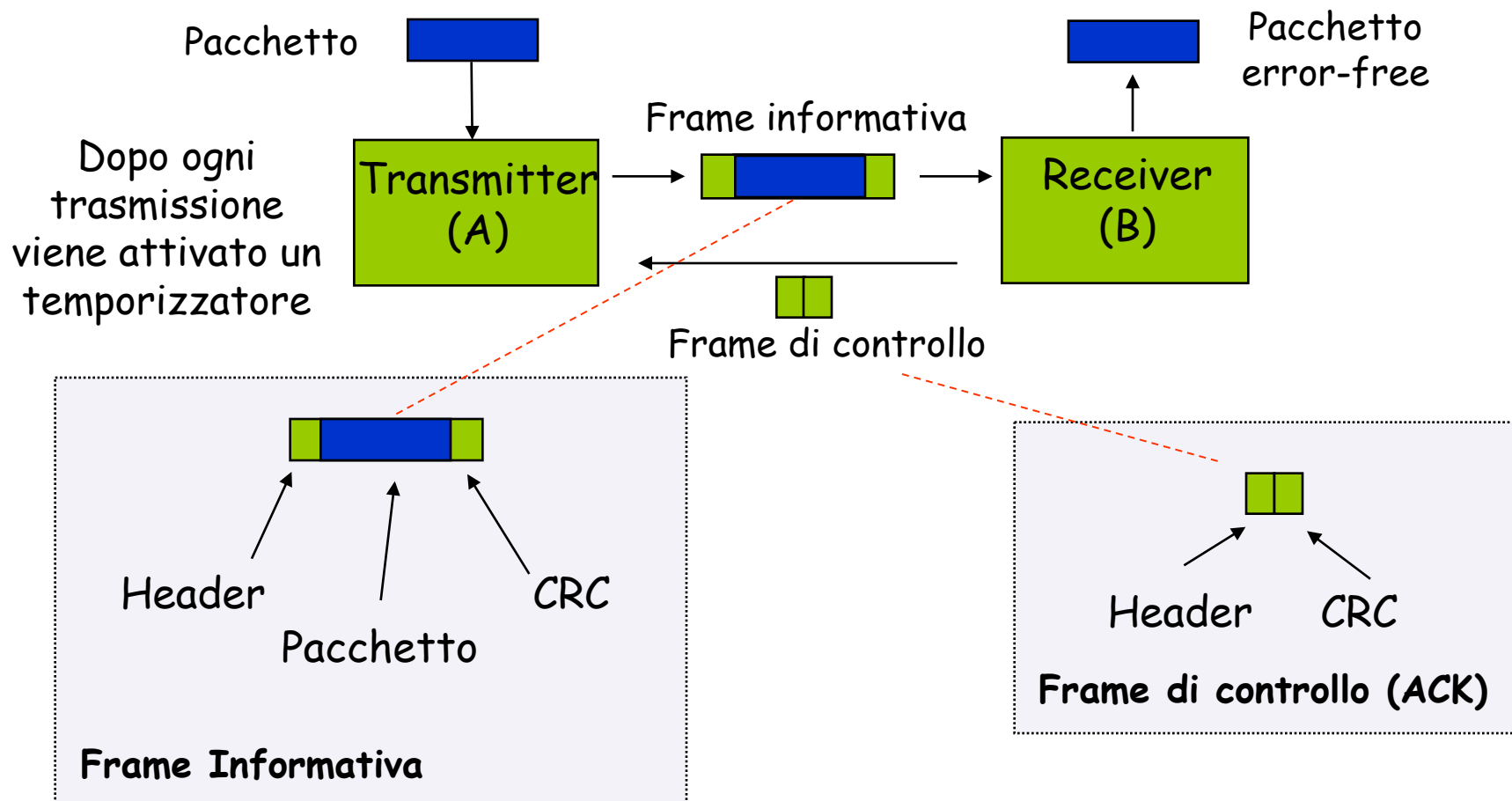
- Stop-and-Wait ARQ
- Go-Back N ARQ
- Selective Repeat ARQ

■ Elementi chiave delle procedure ARQ

- Codici di rivelazione d'errore
- Riscontri positivi (ACK)
- Riscontri negativi (NACK)
- Timeout

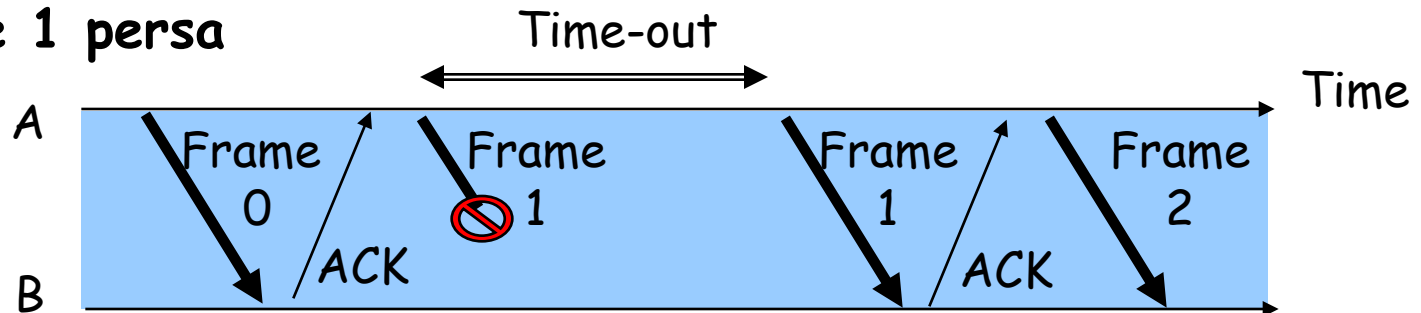
Stop-and-Wait ARQ

- L'entità A trasmette una frame ed aspetta l'ACK

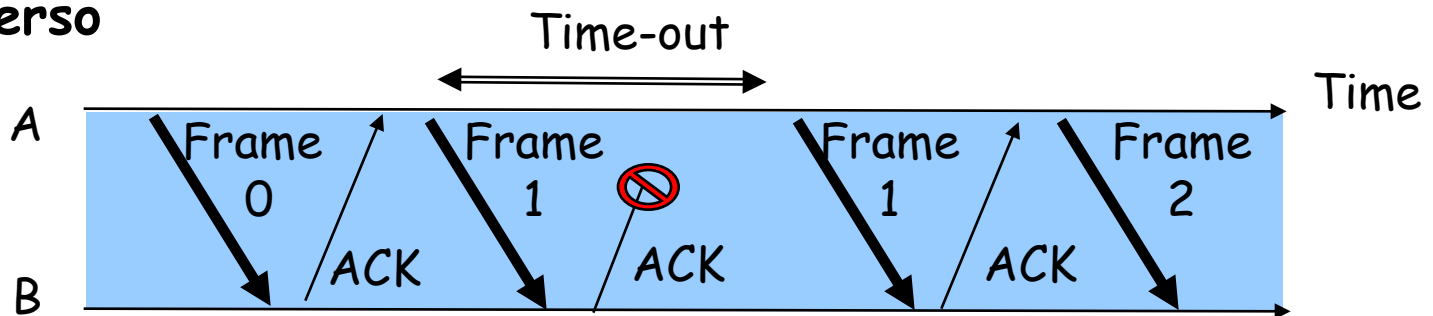


Numeri di Sequenza

Frame 1 persa



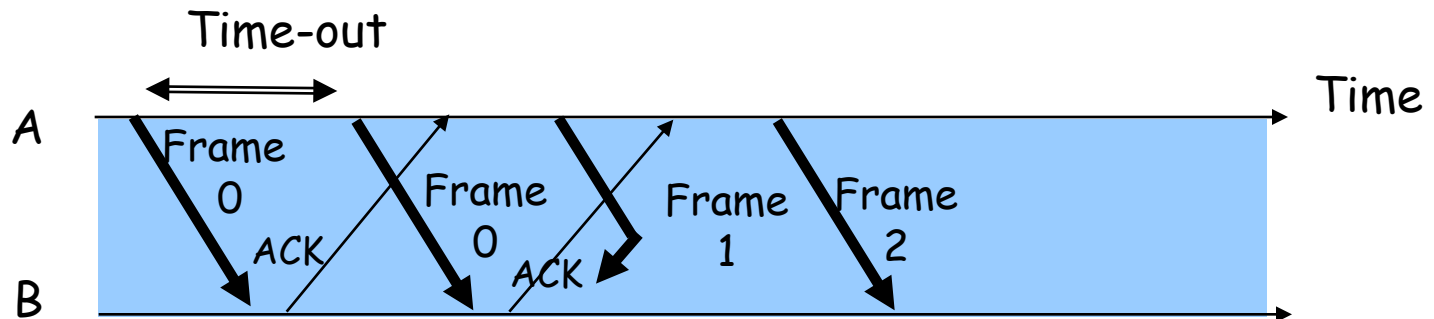
ACK perso



- L'entità emittente (A) si comporta sempre nello stesso modo
- Nel secondo caso, l'entità ricevente (B) riceve la frame 1 due volte (duplicazione)
- B rivela la duplicazione mediante il numero di sequenza (S_{last}) contenuto nell'header di ciascuna frame

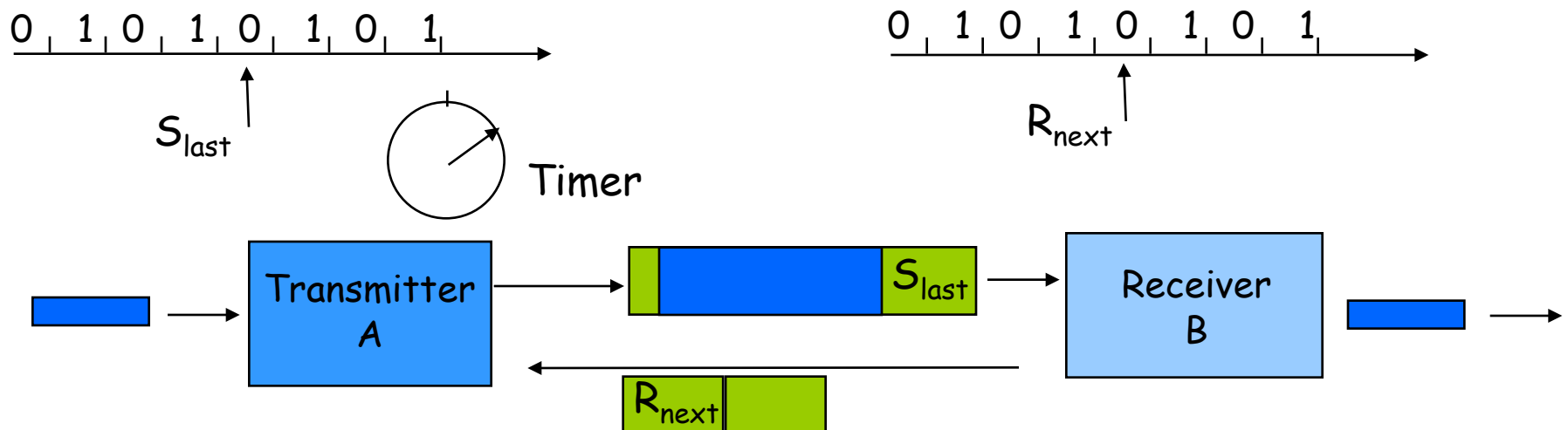
Numeri di Sequenza

Esaurimento prematuro del time-out

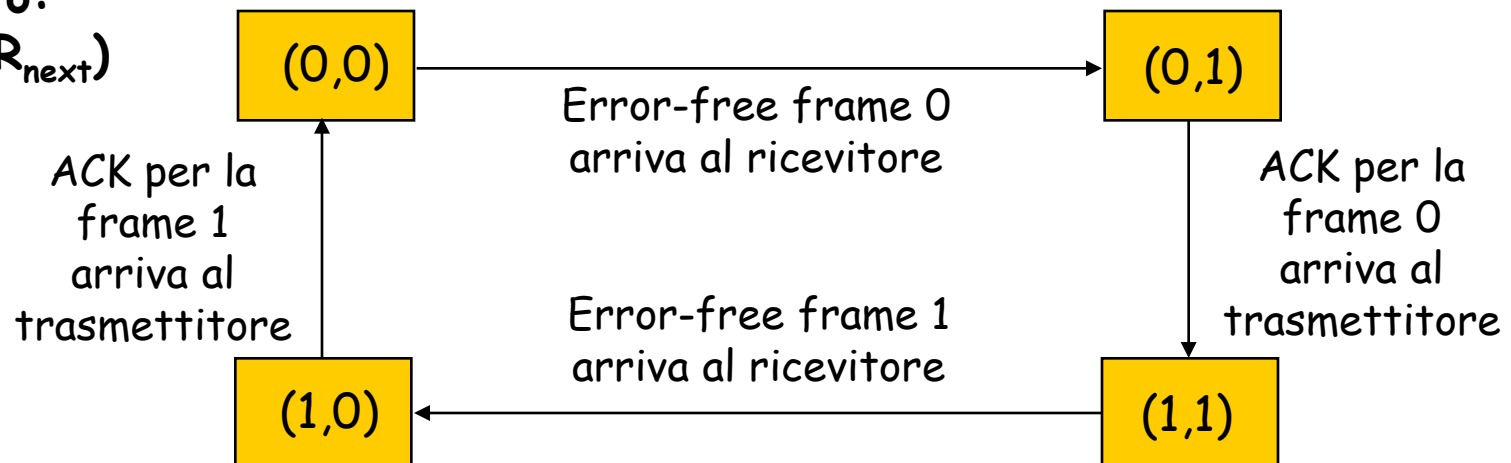


- **La stazione emittente interpreta in modo scorretto gli ACK**
 - Per a il secondo ACK riscontra la frame 1 che invece è persa
- **Occorre inserire il numero di sequenza anche negli ACK (R_{next})**
 - indica il numero di sequenza della prossima frame che il ricevitore si aspetta di ricevere
 - implicitamente riscontra tutte le frame con numero di sequenza $R' < R$

Numero di sequenza 1-Bit



Stato:
 (S_{last}, R_{next})



Stop-and-Wait ARQ (Trasmitter)

■ Stato Ready

- Attesa di una richiesta di invio di un pacchetto dallo strato superiore
- Quando arriva una richiesta, si trasmette la frame con numero di sequenza Slast e completa di CRC
- Transizione nello stato Wait

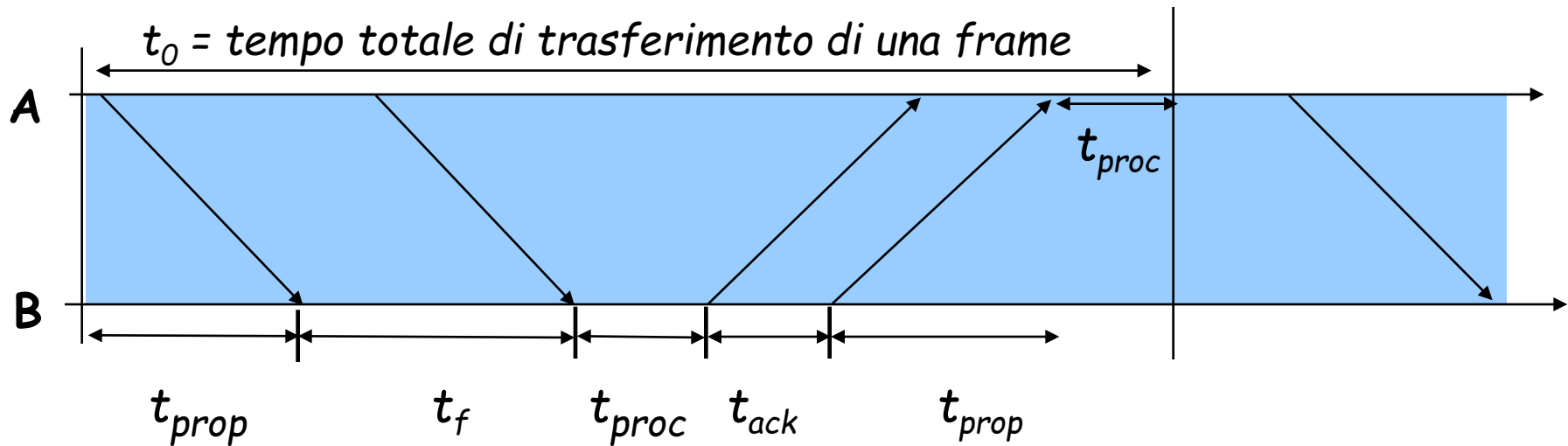
■ Stato Wait

- Attesa del riscontro della frame emessa o dell'esaurimento del timeout (la ricezione delle richieste dallo strato superiore sono bloccate)
- Se il timeout scade viene ritrasmessa la frame e viene riavviato il timer
- Se viene ricevuto un ACK
 - Se il numero di sequenza non è corretto l'ACK è ignorato
 - Se il numero di sequenza è corretto ($R_{next} = S_{last} + 1$), la frame è accettata e si torna nello stato Ready

Stop-and-Wait ARQ (Receiver)

- **Sempre nello stato Ready**
 - Attesa dell'arrivo di una nuova frame
 - Quando arriva una frame viene eseguito il controllo d'errore (CRC)
 - Se non sono rivelati errori e il numero di sequenza è corretto ($S_{last} = R_{next}$)
 - la frame è accettata
 - viene aggiornato il valore di R_{next}
 - viene emesso l'ACK con valore R_{next}
 - il pacchetto è consegnato allo strato superiore
 - Se non sono rivelati errori e il numero di sequenza non è corretto
 - la frame è scartata
 - viene emesso un ACK with R_{next} (ACK duplicato)
 - Se sono rivelati errori
 - la frame è scartata

Modello Stop-and-Wait ARQ



$$\begin{aligned}
 t_0 &= 2t_{prop} + 2t_{proc} + t_f + t_{ack} \\
 &= 2t_{prop} + 2t_{proc} + \frac{n_f}{R} + \frac{n_a}{R}
 \end{aligned}$$

Lunghezza di una frame (points to n_f)
 Lunghezza di un ACK (points to n_a)
 Bit rate canale (points to R)

Efficienza su un canale senza-errori

Rate di trasmissione efficace

bit di overhead

$$R_{eff}^0 = \frac{\text{numero di bit informativi consegnati a destinazione}}{\text{tempo totale necessario per la consegna dei bit informativi}} = \frac{n_f - n_o}{t_0},$$

Efficienza di trasmissione

$$\eta_0 = \frac{R_{eff}}{R} = \frac{\frac{n_f - n_o}{t_0}}{R} = \frac{1 - \frac{n_o}{n_f}}{1 + \frac{n_a}{n_f} + \frac{2(t_{prop} + t_{proc})R}{n_f}},$$

Effetto dell'overhead di una frame

Effetto di un ACK

Effetto del prodotto Banda-Ritardo

Esempio: Impatto del prodotto banda-ritardo

- $n_f = 1250$ byte = 10000 bits, $n_a = n_o = 25$ byte = 200 bit

2xDelayxBW Efficiency	1 ms 200 km	10 ms 2000 km	100 ms 20000 km	1 sec 200000 km
1 Mbit/s	10^3 88%	10^4 49%	10^5 9%	10^6 1%
1 Gbit/s	10^6 1%	10^7 0.1%	10^8 0.01%	10^9 0.001%

- La tecnica Stop-and-Wait non è efficiente in link ad alta velocità o con elevati ritardi di propagazione

Efficienza su un canale con errori

- Sia $1-P_f$ = probabilità che una frame arrivi senza errori
- $1/(1-P_f)$ = numero medio di trasmissioni necessarie per avere una trasmissione corretta di una frame
- $t_0/(1 - P_f)$ = tempo medio di trasferimento di una frame

$$\eta_{SW} = \frac{R_{eff}}{R} = \frac{\frac{n_f - n_o}{t_0}}{1 - P_f} = \frac{1 - \frac{n_o}{n_f}}{1 + \frac{n_a}{n_f} + \frac{2(t_{prop} + t_{proc})R}{n_f} (1 - P_f)}$$

Effetto della probabilità di perdita delle frame

Esempio: Impatto del Bit Error Rate

- $n_f=1250$ byte = 10000 bit, $n_a=n_o=25$ byte = 200 bit
- Calcolo dell'efficienza per un BER $p=0, 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}$

$$1 - P_f = (1 - p)^{n_f} \approx e^{-n_f p} \text{ per grandi valori di } n_f \text{ e per piccoli valori di } p$$

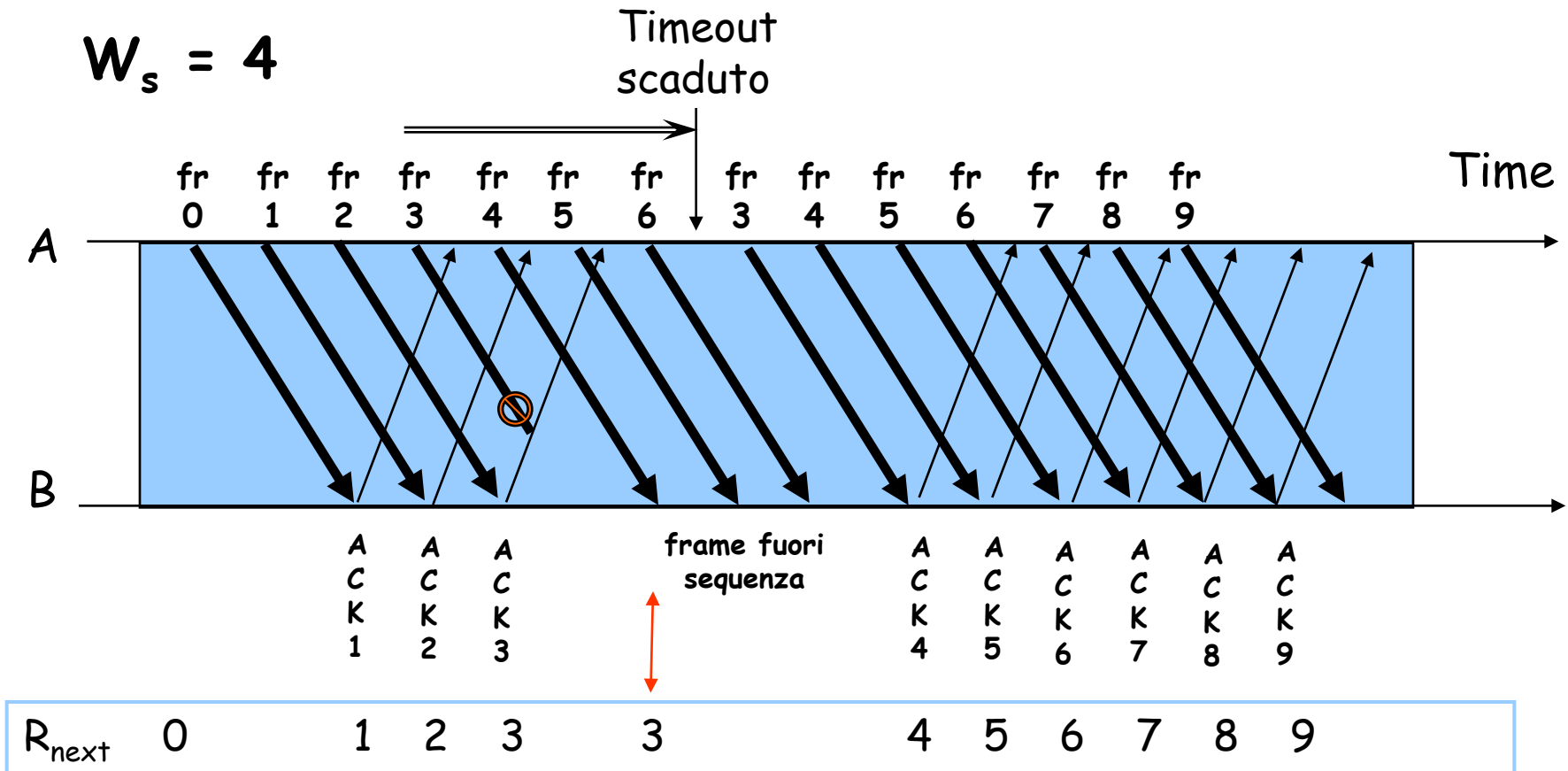
$1 - P_f$ Efficiency	0	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}
R=1 Mbps	1	0.99	0.905	0.368
$T_{\text{prop}}=1$ ms	88%	86.6%	79.2%	32.2%

- Gli errori introducono un effetto significativo quando il prodotto $n_f p$ si avvicina ad 1

Go-back N ARQ

- **Miglioramento del protocollo Stop-and-Wait**
- **Elimina le attese dei riscontri**
 - Il canale è mantenuto occupato inviando altre frame
 - Utilizza una **finestra in trasmissione** di ampiezza W_s frame
 - Usa m bit per la numerazione delle frame
- **Se vengono ricevuti gli ACK delle frame emesse prima di esaurire la finestra, la finestra è aggiornata e la trasmissione delle frame può continuare**
- **Se la finestra si esaurisce, la trasmissione viene interrotta in attesa degli ACK**
- **Se non sono ricevuti ACK, allo scadere di un timeout le frame della finestra vengono ritrasmesse**

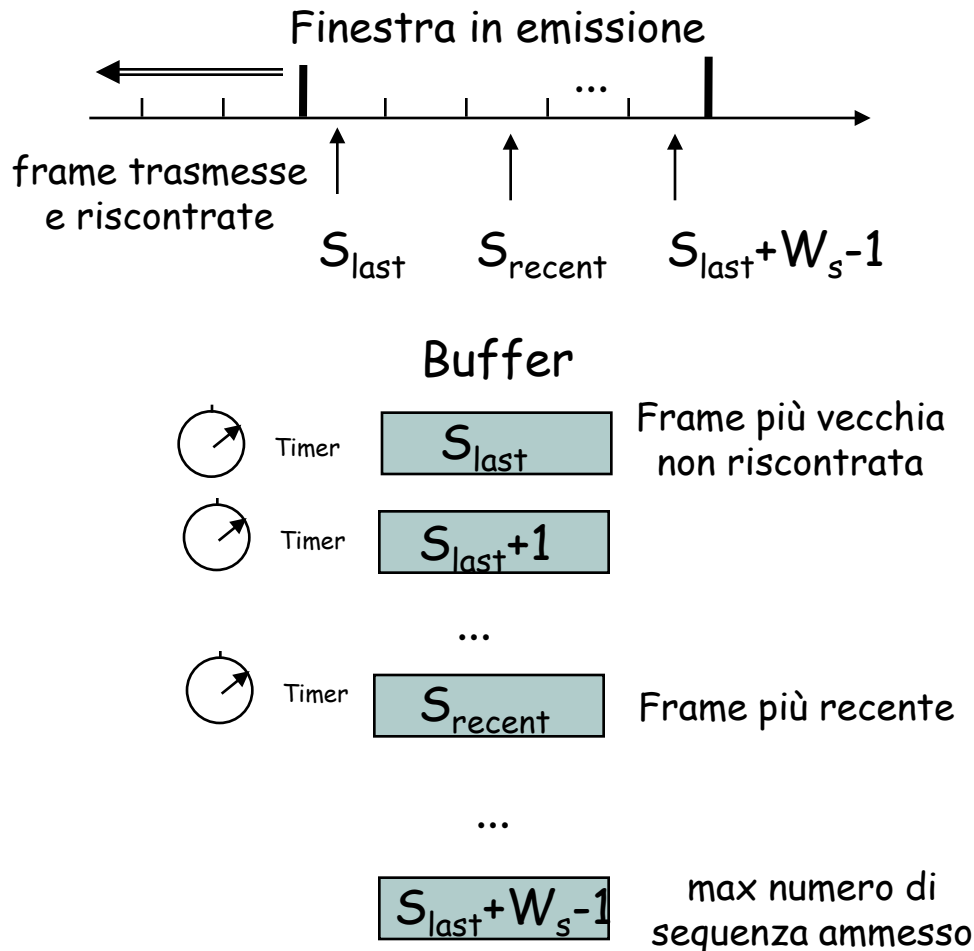
Go-back-N ARQ



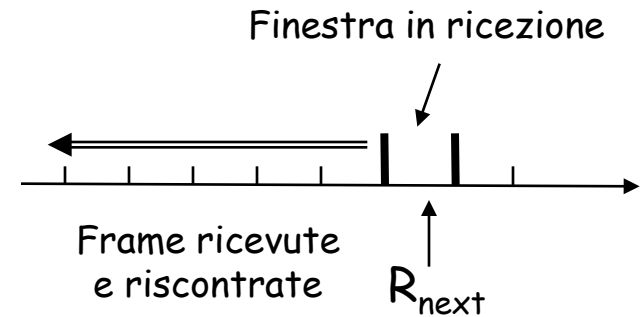
- Le frame con errori e fuori sequenza sono scartate

Go-Back-N Transmitter & Receiver

Transmitter



Receiver

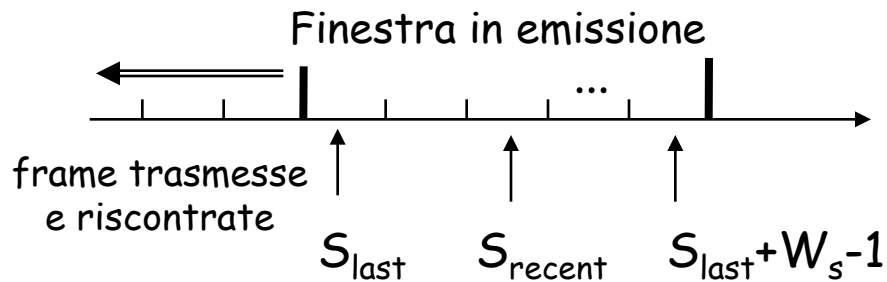


Il Receiver accetta solo frame corrette e in sequenza (con numero di sequenza = R_{next})

Quando arriva una nuova frame in sequenza, viene incrementato di uno R_{next} , quindi la finestra in ricezione slitta di una unità

Sliding window

Transmitter

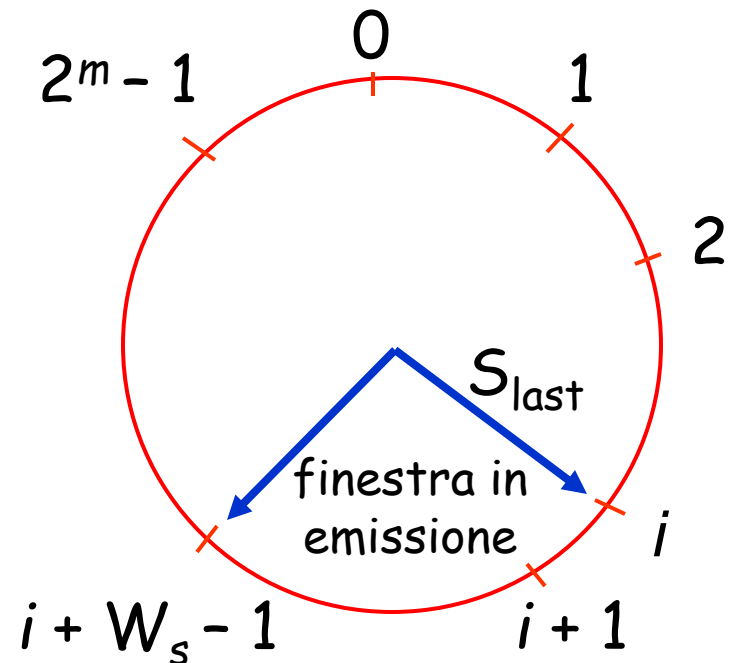


Il Transmitter attende gli ACK
(con numero di sequenza $S \geq S_{last}$)

Quando arriva un ACK, con
numero di sequenza S , viene
posto $S_{last} = S$

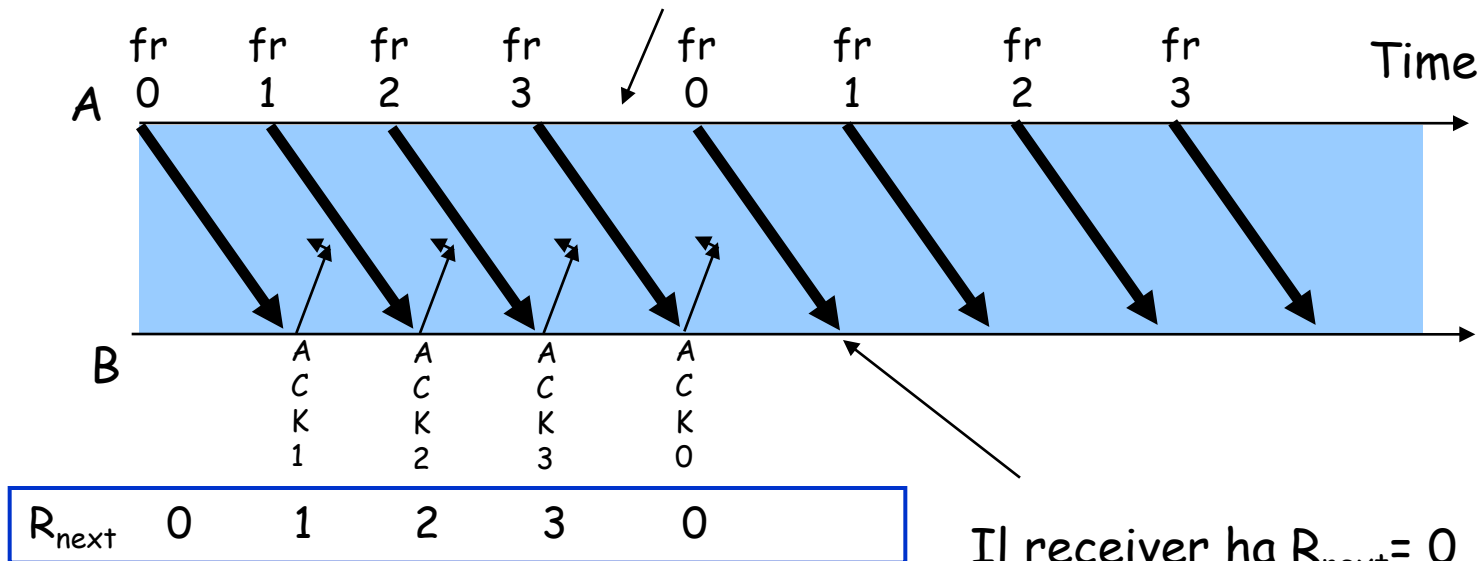
L'estremo superiore della
finestra sarà quindi $S_{last} + W_s - 1$

Numeri di sequenza a m bit
modulo $M = 2^m$



Dimensione massima della finestra

$$W_s = M = 2^m = 4$$

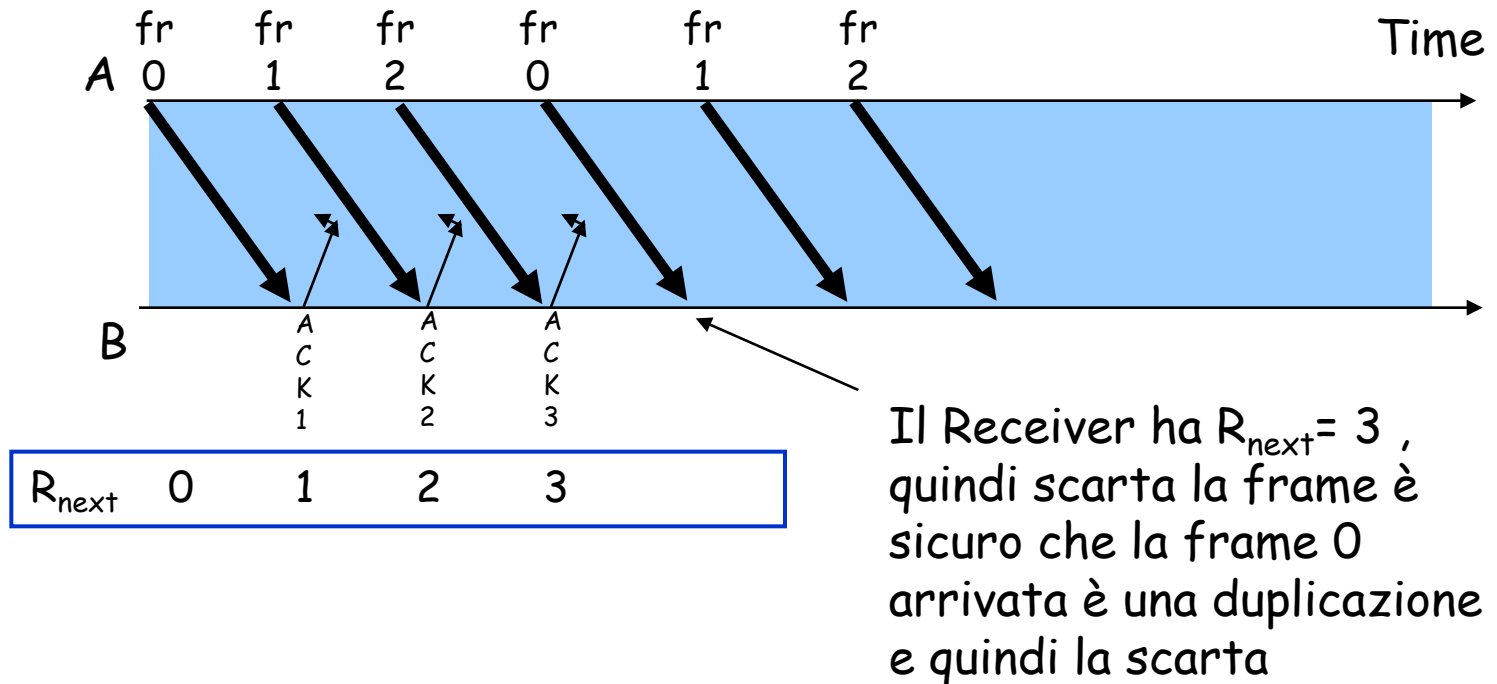


Il massimo valore della finestra è uguale a $W_s = M = 2^m$

Il receiver ha $R_{next} = 0$, ma non è in grado di distinguere se il suo ACK per la frame 0 è stato ricevuto e quindi la frame arrivata è nuova oppure si tratta della ritrasmissione della vecchia frame 0

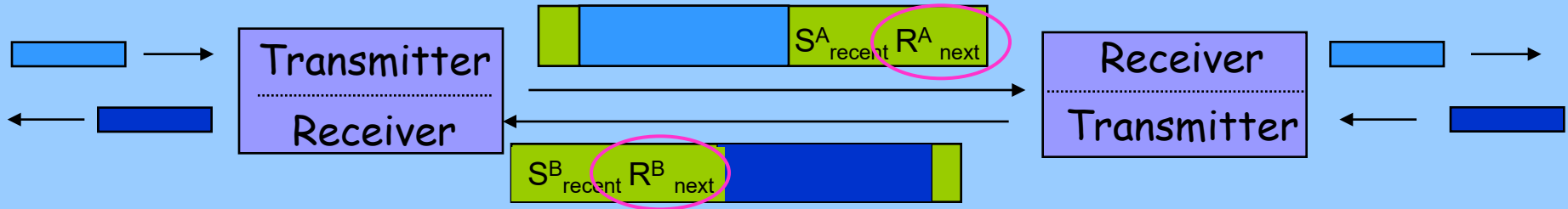
Dimensione massima della finestra

$$W_s = M = 2^m - 1 = 3$$

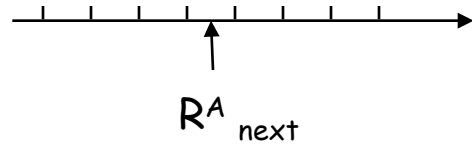


Il massimo valore della finestra è uguale a $W_s = M - 1 = 2^m - 1$

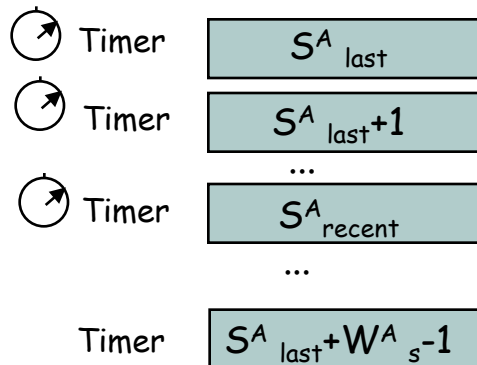
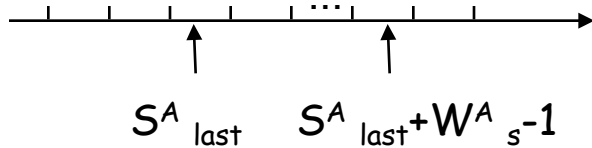
Piggybacking



"A" finestra in ricezione



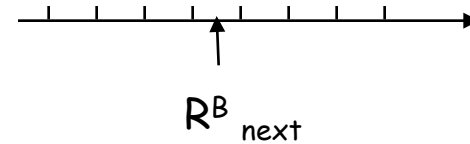
"A" Finestra in trasmissione



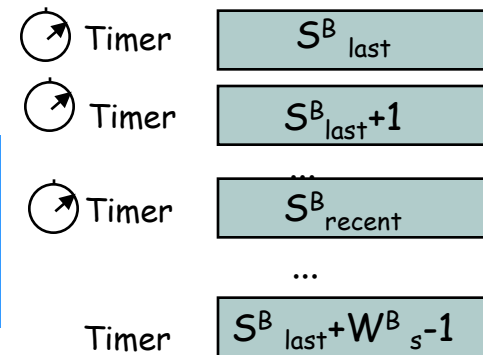
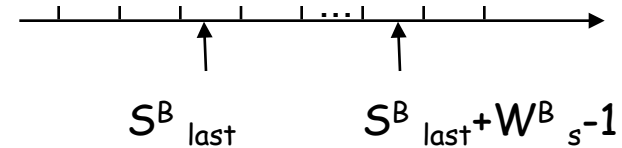
Buffer

Le frame fuori
sequenza sono
scartate

"B" finestra in ricezione

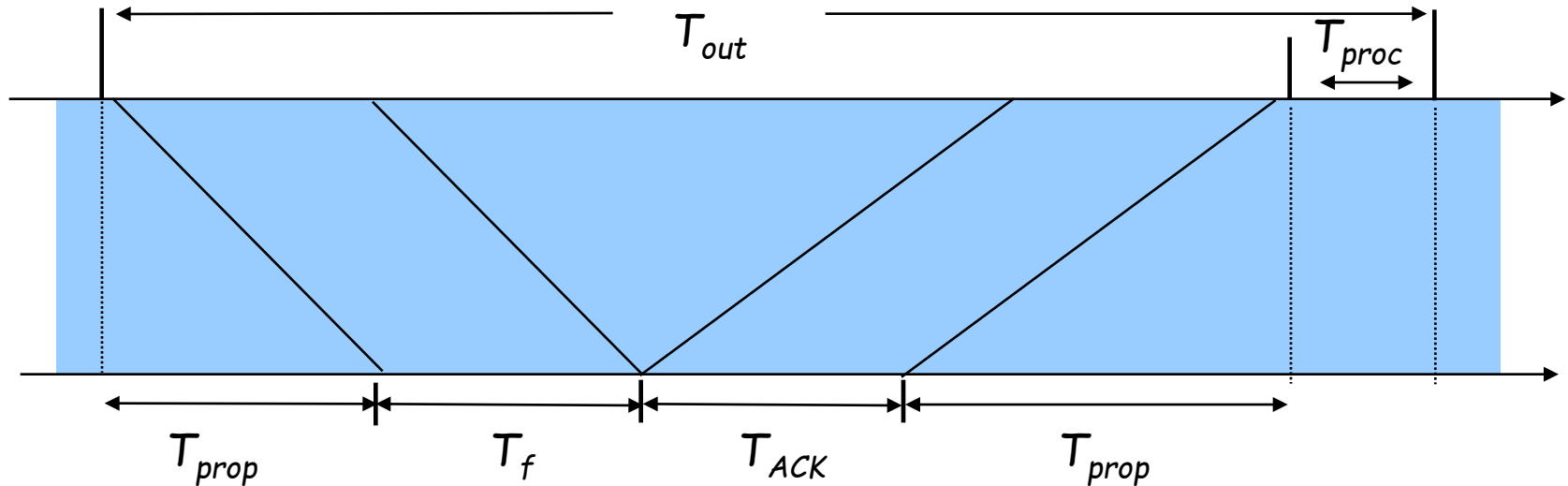


"B" Finestra in trasmissione



Buffer

Dimensionamento della finestra e del timeout



- Il valore del Timeout (T_{out}) deve essere la somma delle seguenti componenti
 - due tempi di propagazione + un tempo di processing = $2 T_{prop} + T_{proc}$
 - Un tempo di trasmissione di una frame informativa T_f
 - Un tempo di trasmissione della frame ACK, T_{ACK}
- W_s deve essere grande abbastanza da poter mantenere il canale occupato per tutto il periodo T_{out}

Dimensione della finestra vs. prodotto banda-ritardo

Frame = 1250 bytes = 10,000 bits, $R = 1$ Mbps		
$2(t_{\text{prop}} + t_{\text{proc}})$	$2 \times \text{Delay} \times \text{BW}$	Window
1 ms	1000 bits	1
10 ms	10,000 bits	2
100 ms	100,000 bits	11
1 second	1,000,000 bits	101

Efficienza del Go-Back-N

Tempo di trasferimento di una frame

$$t_{GBN} = t_f (1 - P_f) + P_f \left\{ t_f + \frac{W_s t_f}{1 - P_f} \right\} = t_f + P_f \frac{W_s t_f}{1 - P_f}$$

Efficienza

$$\eta_{GBN} = \frac{\frac{n_f - n_o}{t_{GBN}}}{R} = \frac{1 - \frac{n_o}{n_f}}{1 + (W_s - 1)P_f} (1 - P_f)$$

Impatto del BER su GBN

- $n_f = 1250$ bytes = 10000 bits, $n_a = n_o = 25$ bytes = 200 bits
- Random bit errors with $p = 0, 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}$
- $R = 1$ Mbps, Delay = 100 ms
- $1 \text{ Mbps} \times 100 \text{ ms} = 100000 \text{ bits} = 10 \text{ frames} \rightarrow W_s = 11$

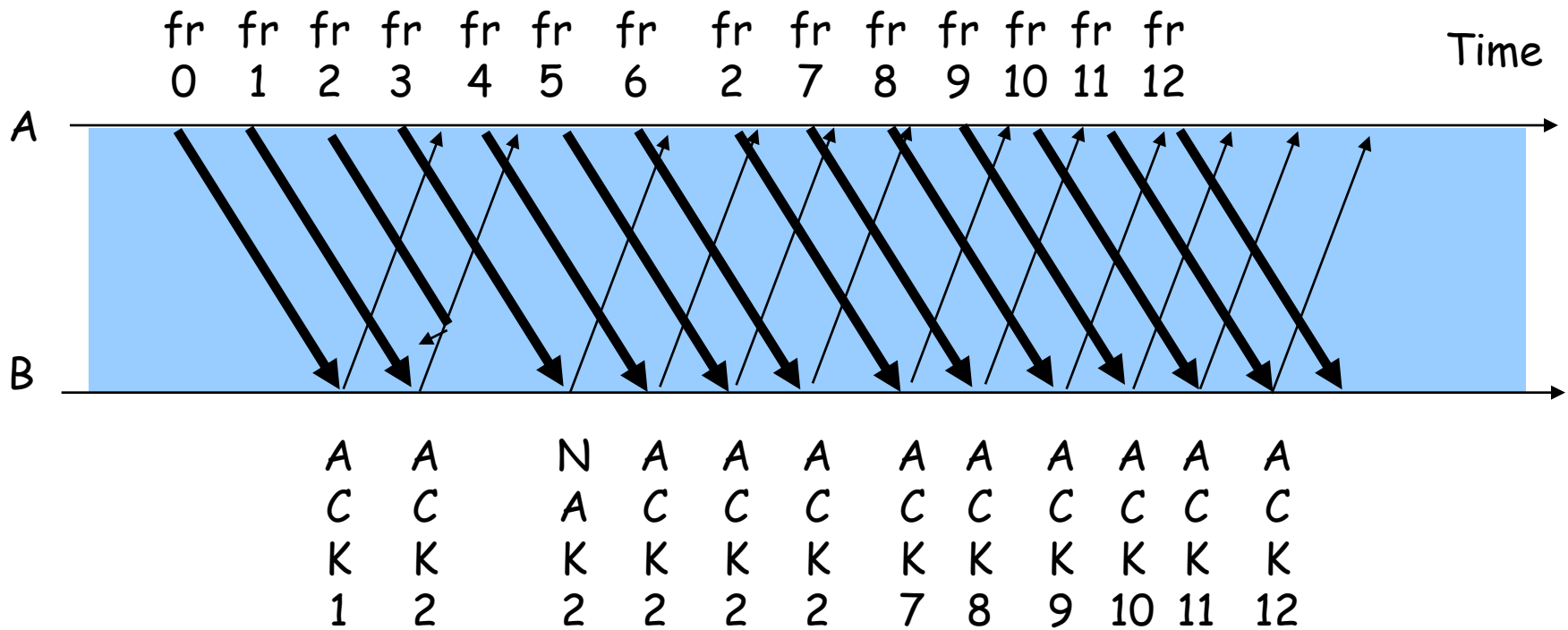
Efficiency	0	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}
S&W	8.9%	8.8%	8.0%	3.3%
GBN	98%	88.2%	45.4%	4.9%

- Go-Back-N è migliore di S&W nei casi di elevato valore del prodotto banda ritardo
- Go-Back-N diviene inefficiente se il BER cresce

Selective Repeat ARQ

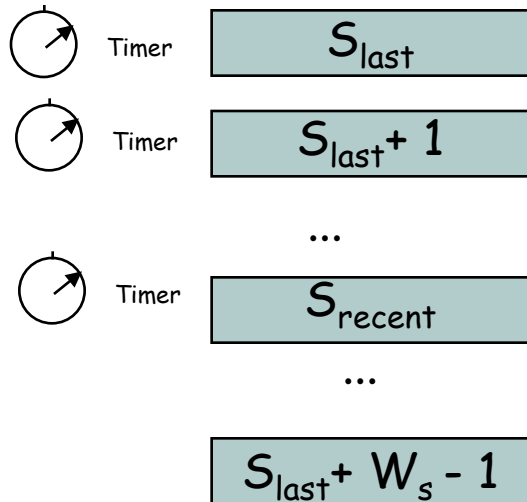
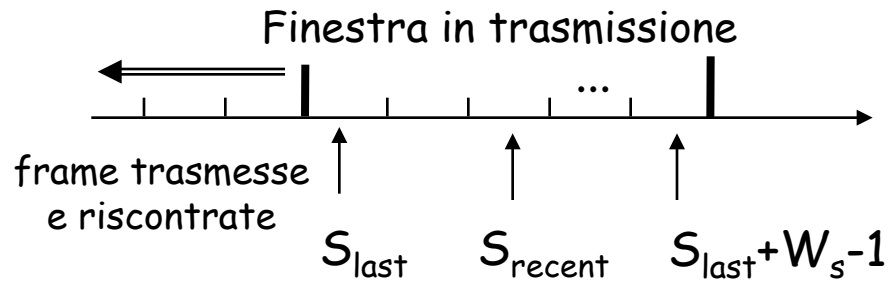
- **Go-Back-N ARQ è inefficiente poichè, in caso di ritrasmissione, è riemesso un numero elevato di frame, anche se ricevute correttamente dal receiver**
- **Selective Repeat ritrasmette solo le frame che sono state perse**
 - l'esaurimento del Timeout determina la ritrasmissione solo del frame corrispondente
 - La ricezione di un NAK causa la ritrasmissione della trama non riscontrata più vecchia
- **Il Receiver gestisce una finestra in ricezione che indica i numeri di sequenza che possono essere accettati**
 - Frame corrette, ma fuori sequenza con numero di sequenza compreso nella finestra in ricezione non sono scartate, ma sono bufferizzate
 - Un arrivo di una frame con Rnext determina lo scorrimento della finestra in trasmissione

Selective Repeat ARQ



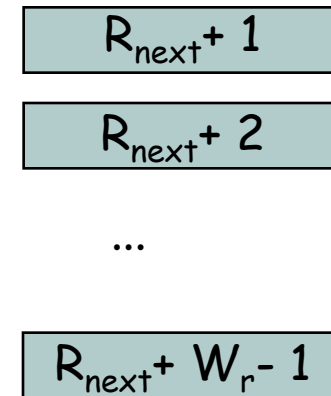
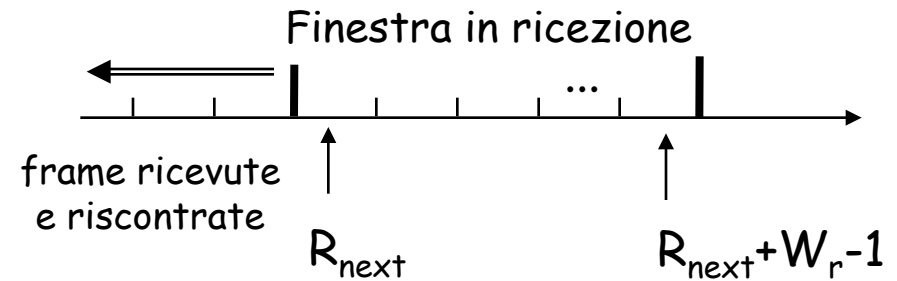
Selective Repeat ARQ

Transmitter



Buffer

Receiver

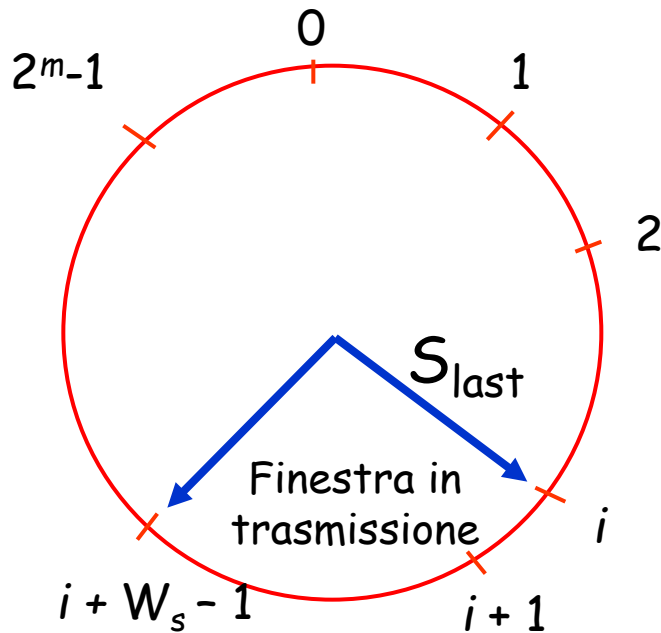


Buffer

massimo numero
di sequenza
accettato

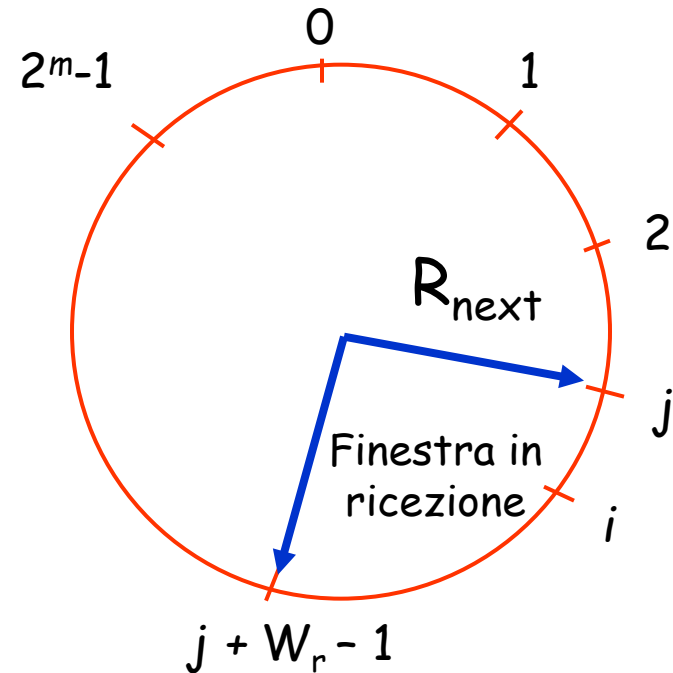
Finestre in trasmissione e ricezione

Transmitter



I limiti della finestra si spostano in avanti di k se arriva un ACK con $R_{next} = S_{last} + k$
 $k = 1, \dots, W_s - 1$

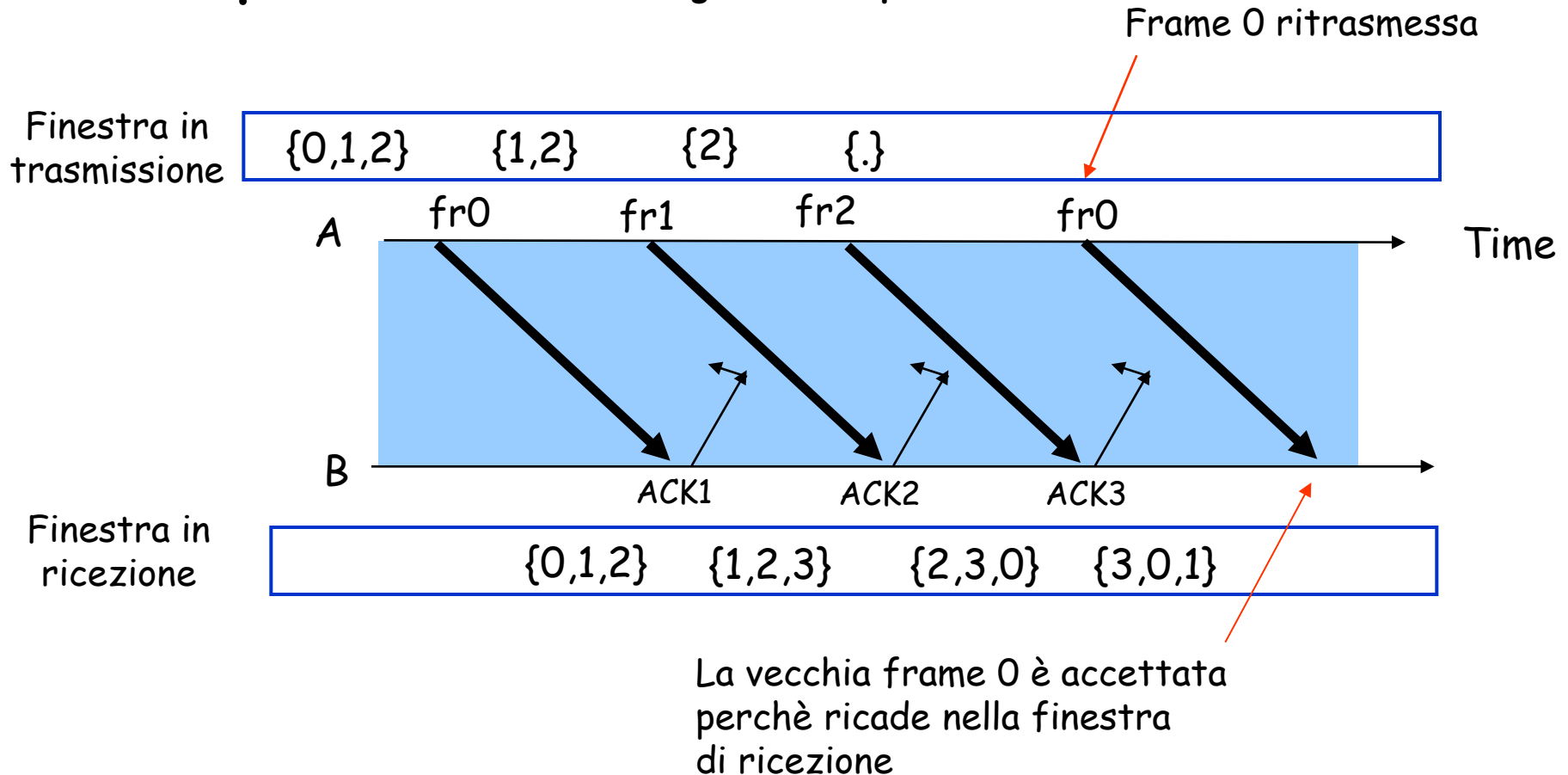
Receiver



I limiti della finestra si spostano in avanti di 1 se arriva una frame con numero di sequenza = R_{next}

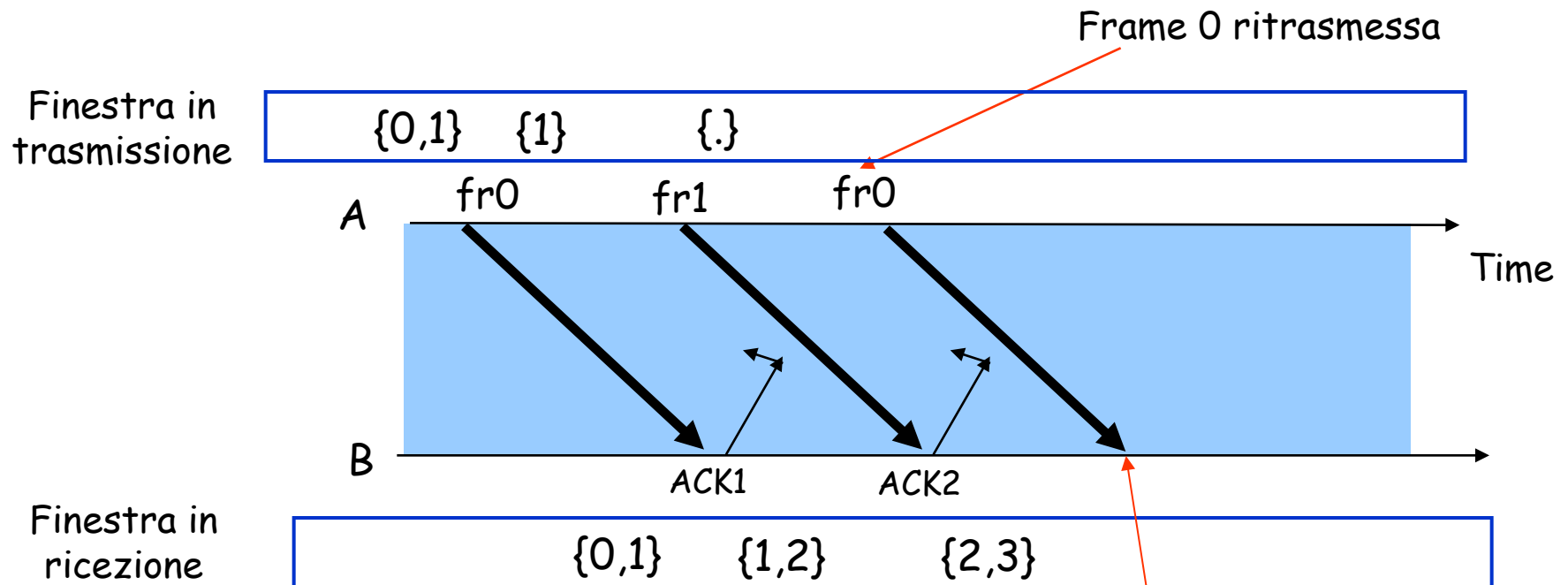
Valori massimi di W_s e W_r

■ Esempio: $M=2^2=4$, $W_s=3$, $W_r=3$



Valori massimi di W_s e W_r

■ Esempio: $M=2^2=4$, $W_s=2$, $W_r=2$



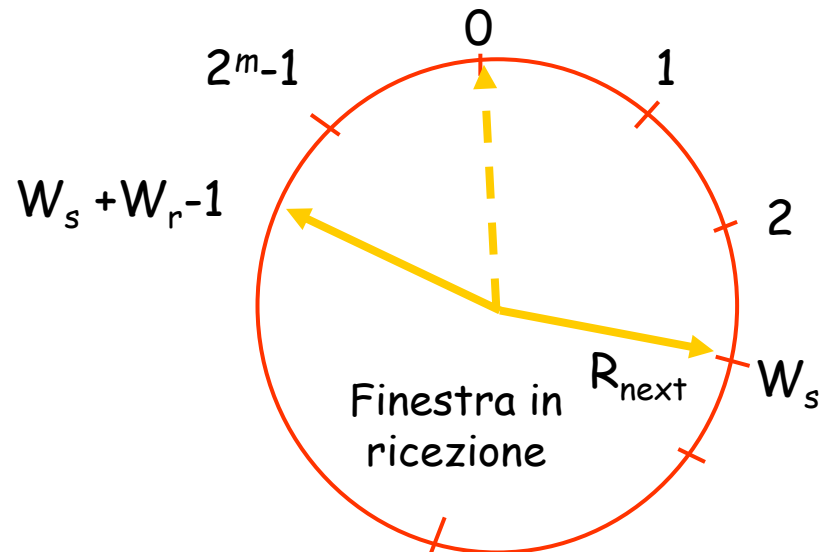
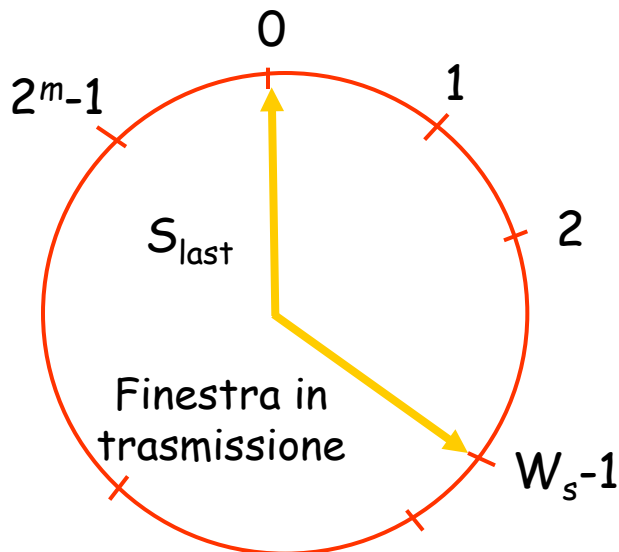
Il massimo valore permesso è

$$W_s + W_r = 2^m$$

La vecchia frame 0 è rifiutata
perchè ricade fuori dalla
finestra di ricezione

Perchè $W_s + W_r = 2^m$

- Il Transmitter emette le frame da 0 a $W_s - 1$; la finestra di trasmissione è vuota
- Tutte le frame arrivano al receiver
- Tutti gli ACKs sono persi
- Il Transmitter riemette la frame 0
- La finestra di ricezione inizia a $\{0, \dots, W_r\}$
- La finestra di ricezione slitta a $\{W_s, \dots, W_s + W_r - 1\}$
- Il ricevitore rifiuta la frame 0 perchè è fuori dalla finestra di ricezione



Efficienza del Selective Repeat

- Assumiamo P_f = frame loss probability
- Il numero di trasmissioni richieste per trasferire una frame è

$$1/(1-P_f)$$

- Il tempo di trasferimento è quindi

$$t_f / (1-P_f)$$

- L'efficienza è data da

$$\eta_{SR} = \frac{\frac{n_f - n_o}{t_f / (1 - P_f)}}{R} = \left(1 - \frac{n_o}{n_f}\right)(1 - P_f)$$

Esempio: Impatto del BER sul Selective Repeat

- $n_f=1250$ bytes = 10000 bits, $n_a=n_o=25$ bytes = 200 bits
- Random bit errors with $p=0, 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}$
- $R = 1$ Mbps, Delay = 100 ms

Efficiency	0	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}
S&W	8.9%	8.8%	8.0%	3.3%
GBN	98%	88.2%	45.4%	4.9%
SR	98%	97%	89%	36%

- Il Selective Repeat ha prestazioni migliori rispetto a GBN e S&W, ma l'efficienza diminuisce al crescere del BER

Confronto tra i metodi ARQ

- Assumiamo n_a e n_o trascurabili rispetto a n_f , e

$$L = 2(t_{prop} + t_{proc})R/n_f = (W_s - 1)$$

Selective-Repeat

$$\eta_{SR} = (1 - P_f)(1 - \frac{n_o}{n_f}) \approx (1 - P_f)$$

Go-Back-N

$$\eta_{GBN} = \frac{1 - P_f}{1 + (W_s - 1)P_f} = \frac{1 - P_f}{1 + LP_f}$$

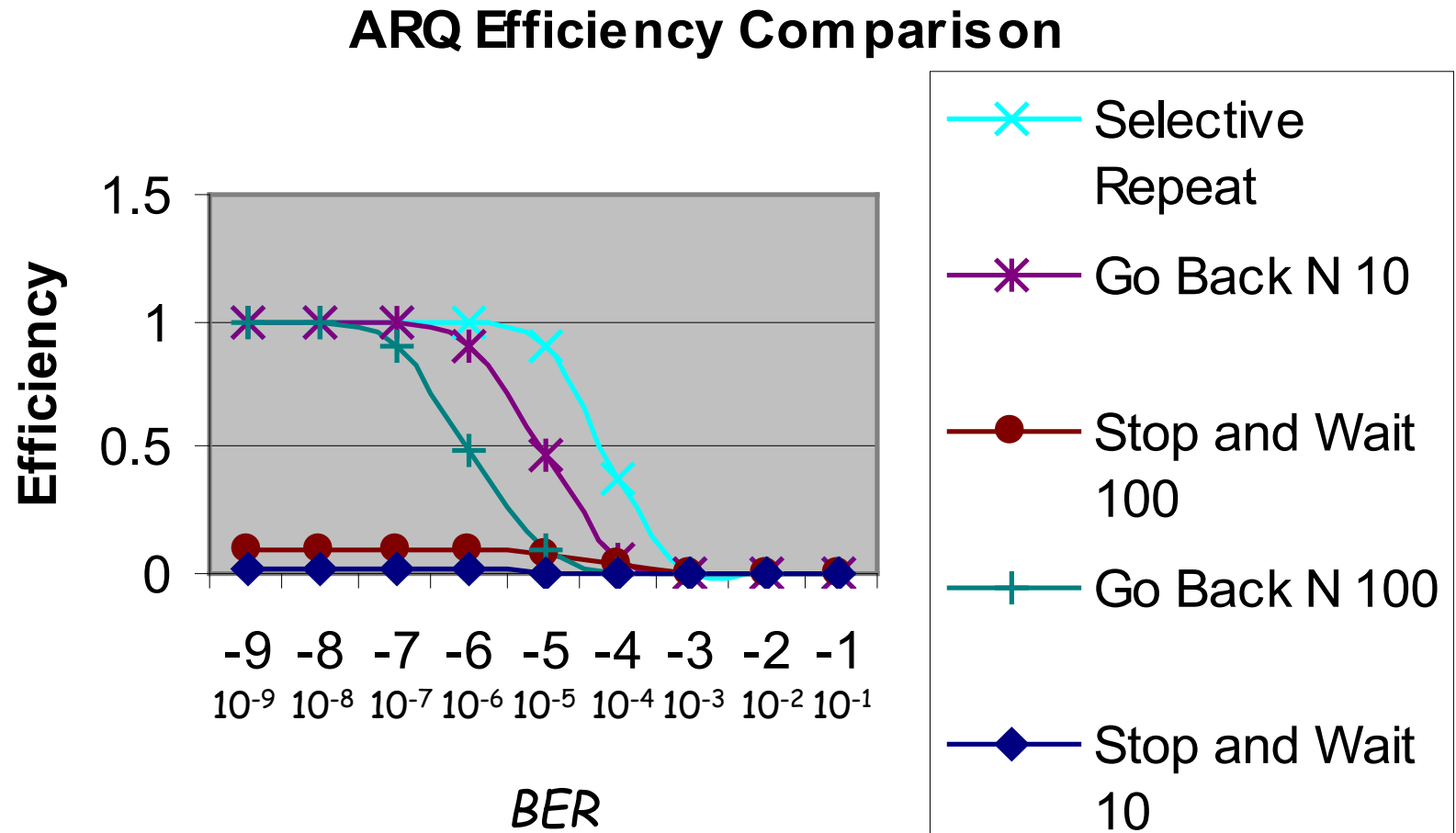
per $P_f \approx 0$,
SR & GBN uguali

Stop-and-Wait

$$\eta_{SW} = \frac{(1 - P_f)}{1 + \frac{n_a}{n_f} + \frac{2(t_{prop} + t_{proc})R}{n_f}} \approx \frac{1 - P_f}{1 + L}$$

per $P_f \rightarrow 1$,
GBN & SW uguali

Efficienza ARQ



Prodotto banda ritardo = 10, 100