DATA LINK - STRATO 2

- protezione ai disturbi → forward error correction (FEC)
- ritrasmissione → automatic repeat request (ARQ)
- accesso al mezzo condiviso → multiple access ← deterministic / controlled / random

La codifica FEC introduce una ridondanza controllata sul flusso di bit, organizzandoli in parole di codice, al fine di poter correggere fino ad un certo numero di errori per parola causati dal canale di trasmissione → capacità di correzione

+ ridondanza ⇒ + overhead, + capacità correzione

La ritrasmissione rileva se ci sono / permangono possibili errori e chiede agli strati superiori di ritrasmettere una parte dell'informazione

Le tecniche di accesso multiplo regolano la trasmissione sul mezzo di propagazione quando questo è utilizzato da più utenti.

Cenni su FEC

Codici lineari (n, k, t)

$n \geq k$

k bit info $\rightarrow$ n bit codeword $\qquad R_c = \frac{k}{n}$ code-rate

t capacità di correzione, dipende da n e R_c.

Esempio: codice a ripetizione $(3, 1, 1..)$

<u>codifica</u>

$0 \rightarrow 000$

$1 \rightarrow 111$

spazio parole di codice

<u>decodifica</u> a maggioranza

≥ 2 zeri $\rightarrow 0$

≥ 2 uni $\rightarrow 1$

$0 \rightarrow 000 \xrightarrow{0 \text{ errori}} 000 \rightarrow 0$

$1 \rightarrow 111 \longrightarrow 111 \rightarrow 1$

$0 \rightarrow 000 \xrightarrow{1 \text{ errore}} \left.\begin{matrix} 001 \\ 010 \\ 100 \end{matrix}\right\} \rightarrow 0$

$1 \rightarrow 111 \longrightarrow \left.\begin{matrix} 011 \\ 101 \\ 110 \end{matrix}\right\} \rightarrow 1$

✓ correzione

$0 \rightarrow 000 \xrightarrow{2 \text{ errori}} \left.\begin{matrix} 011 \\ 101 \\ 110 \end{matrix}\right\} \rightarrow 1$

$1 \rightarrow 111 \xrightarrow{2 \text{ errori}} \left.\begin{matrix} 001 \\ 010 \\ 100 \end{matrix}\right\} \rightarrow 0$

~ rilevazione

$0 \rightarrow 000 \xrightarrow{3 \text{ errori}} 111 \rightarrow 1$

$1 \rightarrow 111 \longrightarrow 000 \rightarrow 0$

capacità di correzione $t=1$
+ rilevazione secondo errore → ARQ

$$t = \left\lfloor \frac{d_{min}-1}{2} \right\rfloor \quad ; \quad d_{min} \leq n-k+1$$

È necessario dimensionare la parola di codice e il suo contenuto informativo per ottenere il desiderato trade-off fra efficienza nell'uso delle risorse e probabilità di errore.

In generale, la costruzione dei codici lineari presenta:

(n, k, t)

$\underline{x}$ $1 \times k$ info

$\underline{c}$ $1 \times n$ codeword

$\underline{\underline{G}}$ $k \times n$ matrice generatrice

$$\boxed{\underline{c} = \underline{x}\,\underline{\underline{G}}}$$

$$\underline{\underline{G}} = \Big[\underbrace{\underline{\underline{I}}}_{k} \,\Big|\, \underbrace{\underline{\underline{P}}}_{n-k}\Big]\Big\}k$$

costruzione sistematica

$\underline{\underline{G}}$ rango k, $\underline{\underline{I}}$ matr. identità $k \times k$, $\underline{\underline{P}}$ matrice parità $k \times (n-k)$

Si trasmette $\underline{c}$ e si riceve $\underline{r} = \underline{c} + \underline{e}$ (errore)

In ricezione si verifica la correttezza dell'informazione e si correggono gli errori con tecniche di decodifica basate su <u>sindromi di errore</u>.

Una particolare famiglia di codici lineari è quella dei codici ciclici che si realizzano mediante shift register
↓
cyclic redundancy check (CRC)

RITRASMISSIONE

Qualora rimangano errori non correggibili si può richiedere una ritrasmissione

⇓

meccanismi/strategie ARQ
Automatic Repeat request

Rispetto a FEC, l'ARQ richiede una ridondanza inferiore

$$\# \text{ errori rilevabili} = d_{min} - 1$$
$$\# \text{ errori correggibili} = \left\lfloor \frac{d_{min}-1}{2} \right\rfloor \qquad d_{min} \leq n-k+1$$

Le strategie di ARQ prevedono che si trasmetta un acknowledgment (ACK) per confermare ricezione corretta o un non acknowledgment (NACK) per indicare ricezione non corretta.

In una rete può capitare che un pkt venga distrutto o perso e quindi che si attenda invano un ACK/NACK ⇒ stallo (deadlock) da evitarsi prevedendo un <u>timeout</u> cioè un intervallo di tempo dalla trasmissione passato il quale non si attende più un ACK/NACK e si forza la ritrasmissione del pkt.

Parametri caratteristici strategia ARQ

t_T : Tempo totale di trasmissione (medio) di un pkt
(singole trasm + ritrasmissioni)

ρ : fattore utilizzo = $\dfrac{\text{tempo trasm. singolo}}{t_T}$

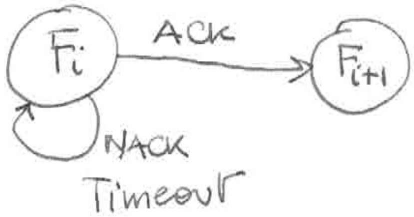
η : efficienza = $\dfrac{\text{tempo trasm. parte info singolo}}{t_T}$

t_F : tempo trasm. singolo pkt, t_I = tempo trasm singolo info ⇒ $\rho = \dfrac{t_F}{t_T}$
t_O = tempo trasm. overhead $\eta = \dfrac{t_I}{t_T}$

Vedremo tre strategie di ARQ.
F_i i-esimo frame (pkt)

- stop & wait

- si trasm. F_i e si attende la risposta
  - * ACK ⇒ si trasmette F_{i+1}
  - * NACK ⇒ si ritrasmette F_i
  - * Timeout ⇒ si ritrasmette F_i

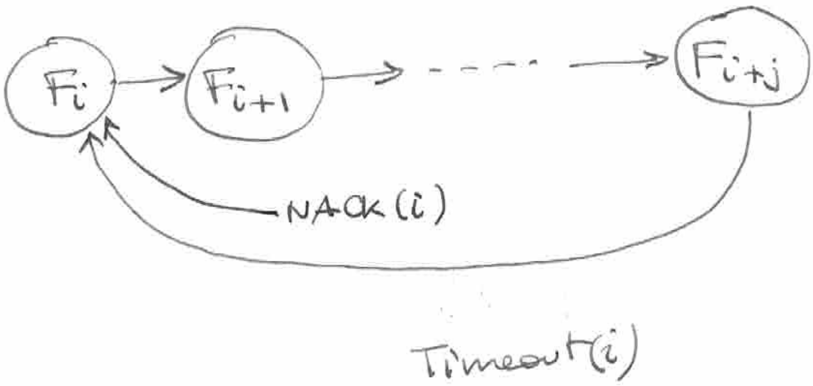


Il "wait" per ogni pkt può rendere il canale molto sottoutilizzato e per questo si è pensato alla prossima strategia

• go back N

Evita l'attesa dell'ACK dopo ogni trasmissione.
È fra le tecniche più usate

- si trasmettono in continuazione pkt
  * se dopo altre N-1 trasmissioni non è arrivato un ACK/NACK scatta il timeout e si ritrasmette dal primo degli N
  * se arriva ACK sul pkt i allora la finestra trasla a partire dal successivo
  * se arriva NACK sul primo si ritrasmette tutto dal primo

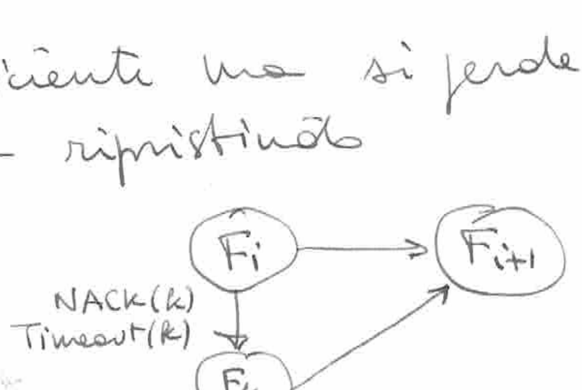


$j = N-1$

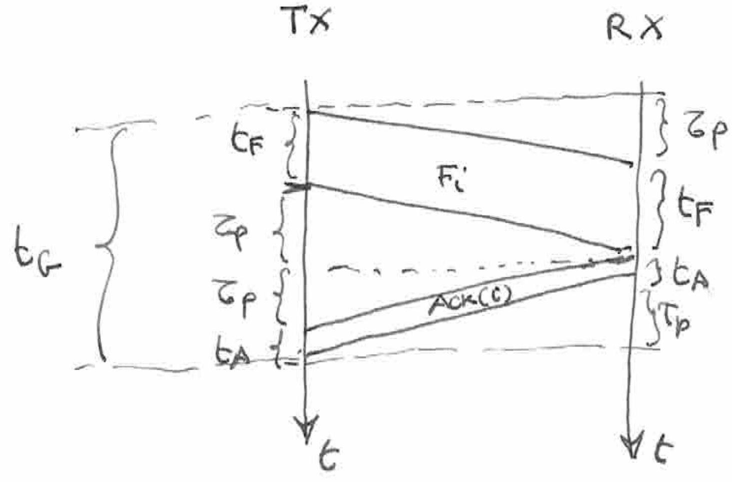
• selective repeat

Rispetto al go back N si ritrasmette solo il pkt che risulta errato o per cui scatta il timeout

Più efficiente ma si perde ordine sui pkt che va ripristinato



Prestazioni strategia Stop & wait



τ_p ritardo di propagazione

t_F durata singolo pkt

t_A durata pkt ACK (/NACK)

t_G tempo complessivo per la trasmissione di un pkt indip. da errori o ritrasmissioni

$$t_G = t_F + \tau_p + t_A + \tau_p = t_F + t_A + 2\tau_p$$

$t_\emptyset$ timeout

$$t_\emptyset \geq t_A + 2\tau_p$$

$$t_T = t_G + \mathbb{E}\{t_{RITRASM.}\}$$

$p = \mathbb{P}\{$pkt errato$\}$

$P_i = \mathbb{P}\{$pkt corretto alla $i+1$ trasm.$\}$ $\Rightarrow$ i ritrasm.

t_i = tempo speso in ritrasm. con # pkt errati o persi pari a i

$$t_i = i\, t_G$$

$$P_i = p^i (1-p)$$

$$\mathbb{E}\{t_{RITRASM.}\} = \sum_{i=\emptyset}^{+\infty} t_i P_i = t_G (1-p) \overbrace{\sum_{i=\emptyset}^{+\infty} i\, p^i}^{\frac{p}{(1-p)^2}} = t_G \frac{p}{1-p}$$

$$t_T = t_G \left[1 + \frac{p}{1-p} \right] = \frac{t_G}{1-p}$$

$$\begin{cases} t_\phi = t_A + 2\tau_p \\ \text{ACK/NACK privi di errore} \end{cases} \Rightarrow t_G = t_F + t_\phi$$

$$t_T = \frac{t_F + t_\phi}{1-p} = \frac{t_F + t_A + 2\tau_p}{1-p}$$

c vel. di trasm. bit/s.

$F = c\, t_F$

$A = c\, t_A$

$\tau_p = \alpha\, t_F$ $\qquad \alpha = \frac{\tau_p}{t_F}$ rit. di propagazione normalizzato alla durata del pkt

$$\boxed{t_T = \frac{t_F}{1-p} \left[1 + \frac{A}{F} + 2\alpha \right]}$$

$$\rho = \frac{t_F}{t_T} = \frac{t_F (1-p)}{t_F + t_\phi}$$

$\xrightarrow{p \to 0}$ $\frac{t_F}{t_F + t_\phi}$ attese ineliminabili di ACK/NACK o timeout

$\xrightarrow{t_\phi \to 0}$ $1-p$ limitato dagli errori sul canale di trasmissione

$I = c\,t_I$ lungh. parte info nel pkt

$O = c\,t_O$ lungh. parte overhead nel pkt

$$\rho = \frac{t_F(1-p)}{t_F+t_\phi} = \frac{\frac{F}{c}(1-p)}{\frac{F}{c}+\frac{A}{c}+2\tau_p}$$

$$= \frac{F(1-p)}{F+A+2c\tau_p}$$

$$p = 1-\underbrace{(1-P_b)^F}_{\text{prob. ricostruz. corretta del pkt}} \overset{P_b \downarrow\downarrow}{\simeq} 1-\left(1-FP_b+o(P_b^2)\right) \simeq FP_b$$

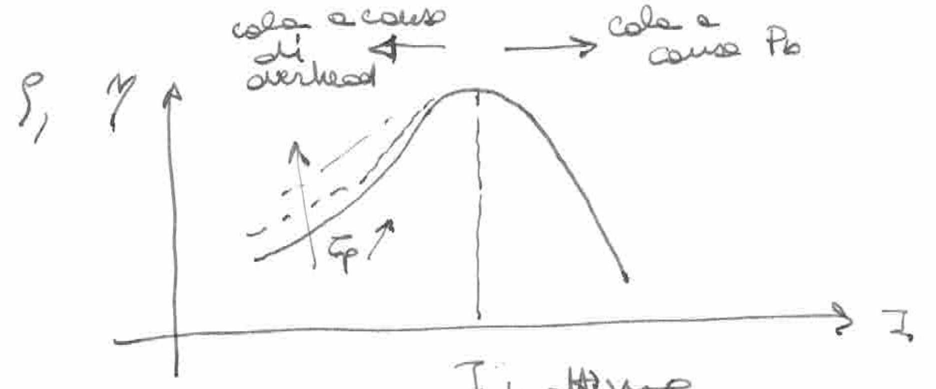
errori bit indip.

utilizzo $\rho \simeq \dfrac{F(1-FP_b)}{F+A+2c\tau_p} = \dfrac{(I+O)(1-(I+O)P_b)}{I+2O+2c\tau_p}$

$F = I+O$

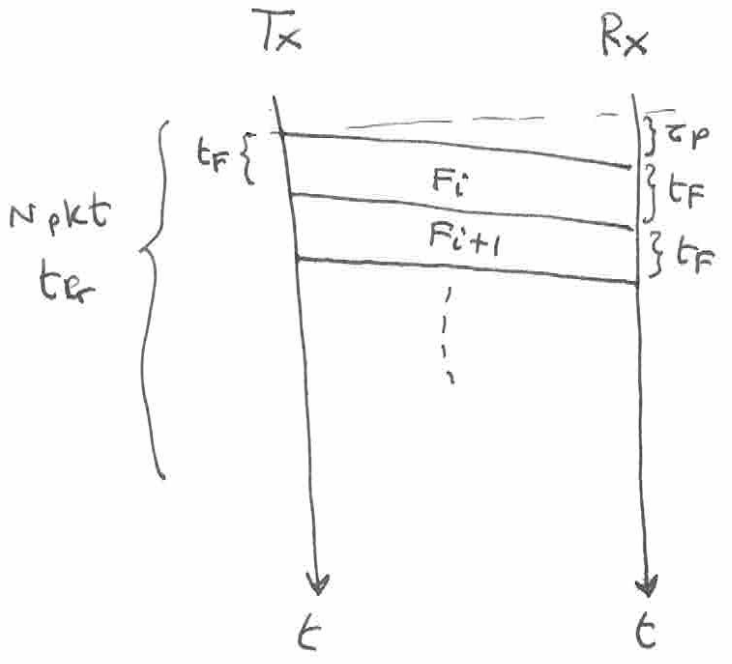
$A = O$

efficienza $\eta = \dfrac{t_I}{t_T} = \dfrac{t_I}{t_F}\dfrac{t_F}{t_T} = \dfrac{I}{I+O}\rho = \dfrac{I(1-(I+O)P_b)}{I+2O+2c\tau_p}$



$O \ll I$, $c\tau_p \ll 1$, $P_b \ll 1$ $\Rightarrow$ $I_{opt} \simeq \sqrt{\dfrac{2(O+c\tau_p)}{P_b}}$

Prestazioni strategia Go-back-N



vengono trasmessi N-1 pkt successivi a F_i senza che il trasmettitore attenda un Ack

$$t_\phi = (N-1)\, t_F$$

$t_\phi \geq t_A + 2\tau_p \rightarrow$ cond. stringente $t_\phi = t_A + 2\tau_p$

$(N-1)t_F = t_A + 2\tau_p$ (time out stringente)

Tempo totale per la trasm. di N pkt

$$t_G = N t_F = t_F + t_\phi = t_F + t_A + 2\tau_p$$

$$t_i = i N t_F = i\, t_G$$

$$P_i = p^i (1-p)$$

$$E\{t_{RITRASM}\} = \sum_{i=\phi\ (=1)}^{+\infty} t_i P_i = \sum_{i=\phi}^{+\infty} t_G (1-p)\, i p^i$$

$$= t_G (1-p) \sum_{i=\phi}^{+\infty} i p^i = t_G (1-p) \frac{p}{(1-p)^2} = \frac{t_G\, p}{1-p}$$

$$t_T = t_F + E\{t_{RITRASM}\} = t_F + t_G \frac{p}{1-p}$$

$$t_T \xrightarrow[p\to\emptyset]{} t_F \quad \Rightarrow \quad \rho \xrightarrow[p\to\emptyset]{} 1$$

$$t_T = t_F + (\underbrace{t_F + t_A + 2\tau_p}_{t_\emptyset}) \frac{p}{1-p}$$

timeout stringente $t_\emptyset = t_A + 2\tau_p$

$$t_T = t_F + (t_F + t_\emptyset) \frac{p}{1-p} = t_F\left(1 + \frac{p}{1-p}\right) + t_\emptyset \frac{p}{1-p}$$

$$= t_F \frac{1}{1-p} + t_\emptyset \frac{p}{1-p}$$

$$= \frac{t_F + t_\emptyset p}{1-p}$$

$$t_T = \frac{t_F}{1-p}\left[1 + \frac{(t_A + 2\tau_p)}{t_F}\, p\right]$$

$$= \frac{t_F}{1-p}\left[1 + \frac{A}{F}p + 2\alpha p\right]$$

fattore di utilizzo

$$\rho = \frac{t_F}{t_T} = \frac{t_F(1-p)}{t_F + t_\emptyset p} \quad \begin{cases} \xrightarrow{p\to\emptyset} 1 & \text{non è limitato da ACK/NACK} \\ \xrightarrow{t_\emptyset \to \emptyset} 1-p & \text{limitato da errori su ricostruz. del pkt} \end{cases}$$

P_b dato

$p \simeq F P_b$

C vel. trasm. [bit/sec.]

$$\rho \simeq \frac{F/C\,(1 - F P_b)}{F/C + F P_b\left(\frac{A}{C} + 2\tau_p\right)} = \frac{F(1 - F P_b)}{F + F P_b (A + 2C\tau_p)}$$

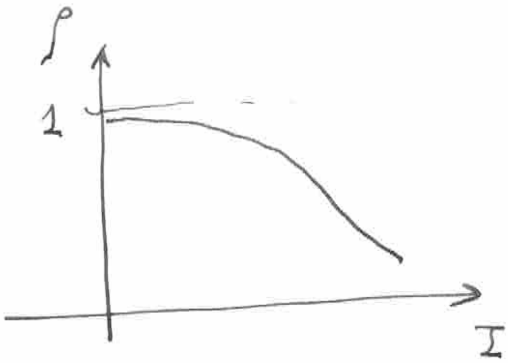
$A = 0$

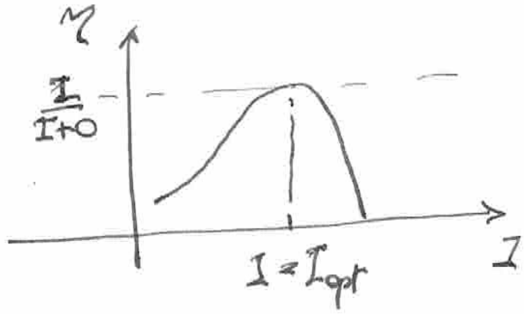
$$\rho = \frac{F\,(1 - F P_b)}{F + F P_b\,(O + 2c\tau_p)} = \frac{1 - F P_b}{1 + P_b\,(O + 2c\tau_p)}$$

$F = I + O$

$$\boxed{\rho = \frac{1 - (I+O) P_b}{1 + (O + 2c\tau_p) P_b}} \leftarrow I,\ O,\ P_b,\ \tau_p$$

Efficienza $\eta = \frac{t_I}{t_T} = \frac{t_F}{t_T}\,\frac{t_I}{t_F} = \rho \cdot \frac{I}{I+O}$





$$O \ll I \Rightarrow I_{opt} \simeq \sqrt{\frac{O}{P_b}}$$

Prestazioni strategia Selective Repeat

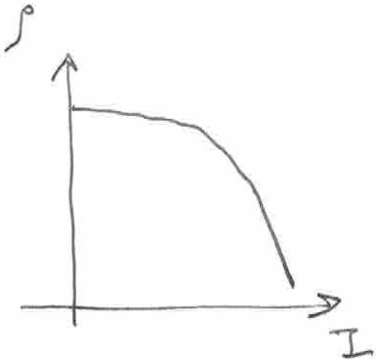
Come Go-back-N ma $t_i = i\, t_F$

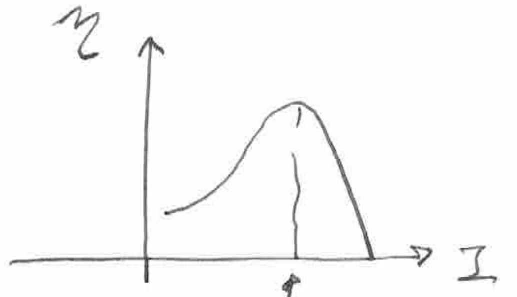
$$t_T = t_F + \sum_{i=0}^{+\infty} t_i P_i = t_F + t_F(1-p)\sum_{i=0}^{+\infty} i p^i = \frac{t_F}{1-p}$$

$$\rho = \frac{t_F}{t_T} = 1-p \simeq 1 - F P_b = 1-(I+O)P_b$$

$$\eta = \frac{I}{I+O}\rho = \frac{I}{I+O}\left[1-(I+O)P_b\right] = \frac{I}{I+O} - I P_b$$

$$= \frac{I(1-P_b)}{I+O}$$





$I_{opt} \simeq \sqrt{\frac{O}{P_b}}$