

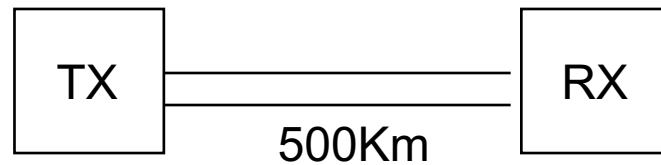
Fondamenti di Internet e Reti

Esercizi

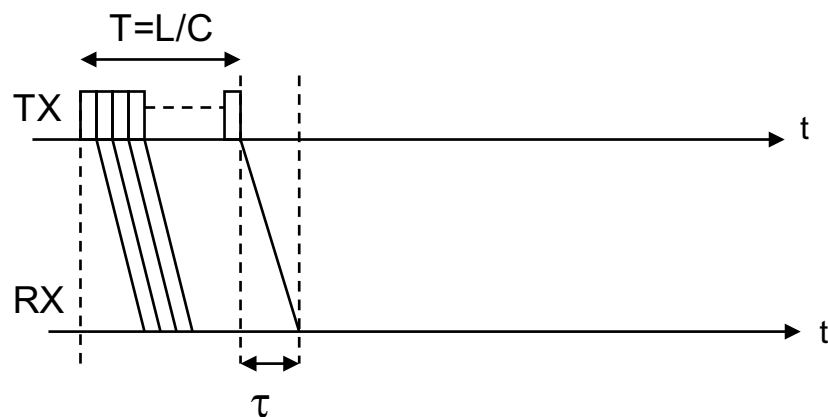
1 - Esercizi sui ritardi di pacchetto, sorgenti di traffico e livello fisico

1.1 - Esercizio

Un sistema trasmissivo della velocità di 100 [kb/s] presenta una lunghezza di 500 [km]. Si calcoli il tempo che intercorre fra la trasmissione del primo bit e la ricezione dell'ultimo bit di un pacchetto lungo 2000 [bit], assumendo che il ritardo di propagazione sia di 5 [μ s/km].



Soluzione:



Il tempo di trasmissione è: $T = 2000 \text{ [bit]} / 100 \text{ [kb/s]} = 20 \text{ [ms]}$

mentre il tempo di propagazione è

$$\tau = 5 \text{ [}\mu\text{s/km]} \cdot 500 \text{ [km]} = 2500 \text{ [}\mu\text{s]} = 2.5 \text{ [ms]}$$

Il tempo cercato è dunque di

$$T + \tau = 22.5 \text{ [ms]}.$$

1.2 - Esercizio

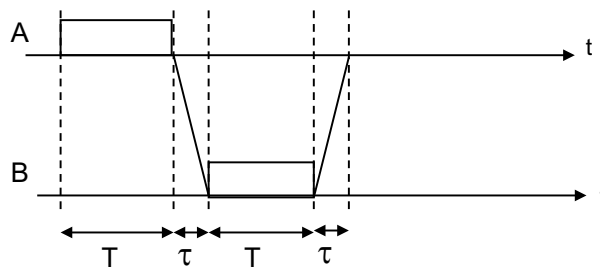
Un pacchetto di 10000 [bit] viene inviato dal nodo A alla velocità di 100 [kb/s] su un collegamento di 100 [km]. Il pacchetto viene ricevuto tutto in B e poi viene rimandato al mittente A alla stessa velocità di trasmissione.

Si calcoli l'intervallo di tempo che intercorre fra la trasmissione del primo bit in A e la ricezione dell'ultimo bit, sempre in A, assumendo che la velocità del segnale sia di 200.000 [km/s].

Si ripeta il conto nel caso in cui la velocità di trasmissione sia di 10 [Gb/s].



Soluzione



Il tempo cercato si può esprimere come:

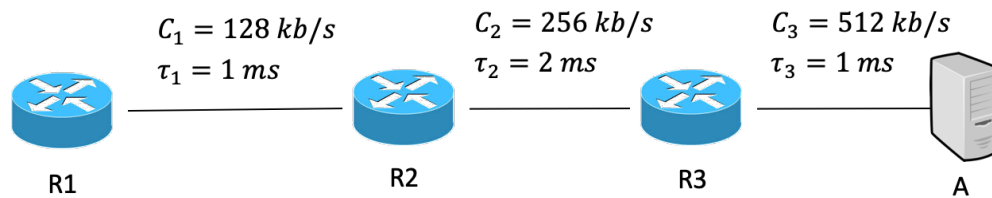
$$T = 2(T + \tau) = 2 \left(\frac{10[kb]}{100 [kb/s]} + \frac{100 [Km]}{200.000 [Km/s]} \right) = 2(100 [ms] + 0.5 [ms]) = 201 [ms]$$

Nel caso in cui la velocità del collegamento sia 1[Gb/s], si ha:

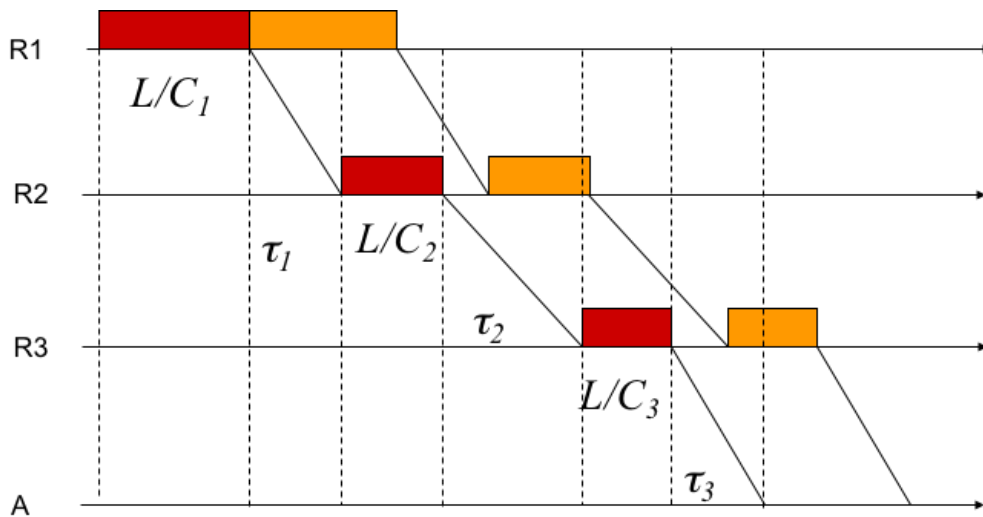
$$T = 2(T + \tau) = 2 \left(\frac{10[kb]}{10 [Gb/s]} + \frac{100 [Km]}{200.000 [Km/s]} \right) = 2(0.001 [ms] + 0.5 [ms]) = 1.002 [ms]$$

1.3 - Esercizio

Si consideri la rete in figura. Al tempo $t=0$ la coda di uscita di R1 ha 2 pacchetti diretti ad A. Assumendo lunghezza dei pacchetti di $L=512$ [bits], si indichi per ciascun pacchetto l'istante in cui viene completamente ricevuto a destinazione.



Soluzione



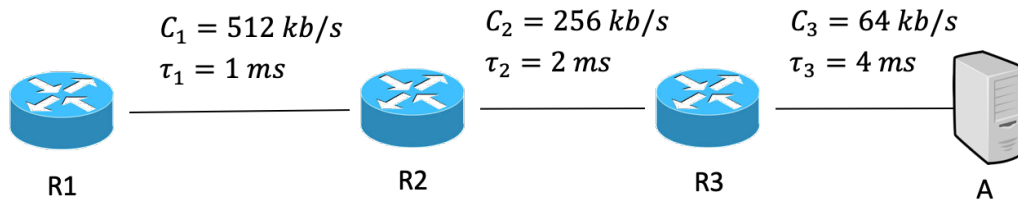
Non abbiamo casi di accodamento. Ad ogni nodo attraversato, il secondo pacchetto finisce la propria ricezione dal nodo precedente dopo che il primo pacchetto ha finito la propria trasmissione verso il nodo successivo. In questo modo, appena finita la ricezione, il secondo pacchetto può essere immediatamente ritrasmesso verso il nodo successivo.

$$T_1 = \frac{L}{C_1} + \tau_1 + \frac{L}{C_2} + \tau_2 + \frac{L}{C_3} + \tau_3 = 4 + 1 + 2 + 2 + 1 + 1 = 11 \text{ ms}$$

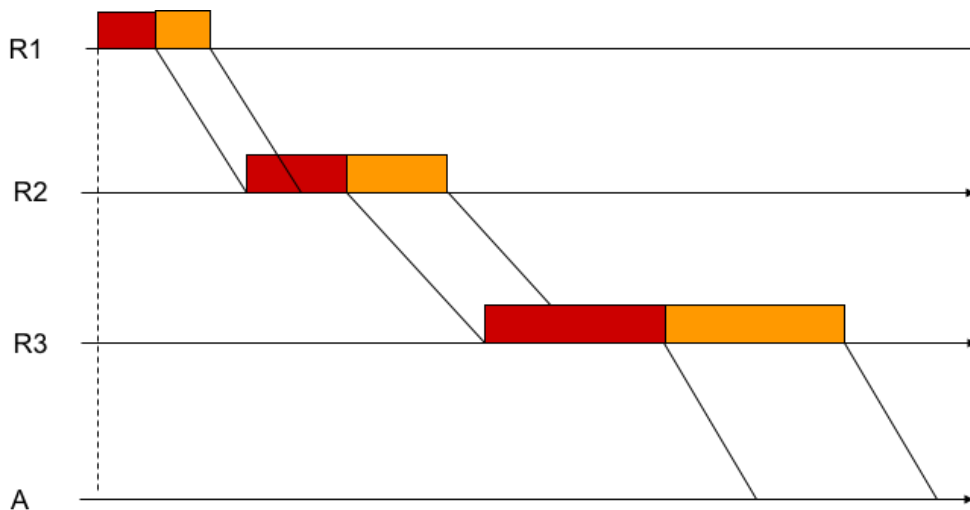
$$T_2 = \frac{2L}{C_1} + \tau_1 + \frac{L}{C_2} + \tau_2 + \frac{L}{C_3} + \tau_3 = 15 \text{ ms}$$

1.4 - Esercizio

Si consideri la rete in figura. Al tempo $t=0$ la coda di uscita di R1 ha 2 pacchetti diretti ad A. Assumendo lunghezza dei pacchetti di $L=512$ [bits], si indichi per ciascun pacchetto l'istante in cui viene completamente ricevuto a destinazione.



Soluzione



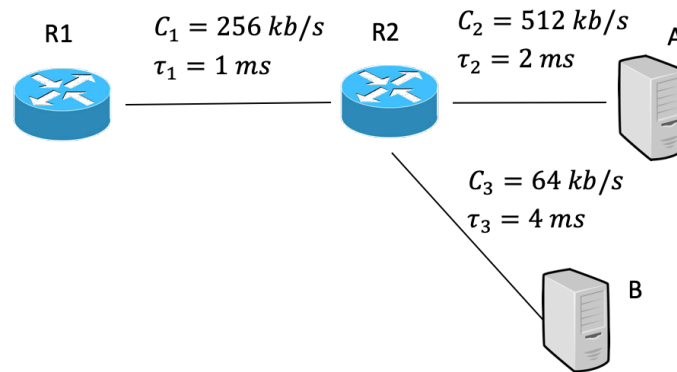
Il link tra R2 e R3 ha una velocità (rate) trasmissiva minore del link tra R1 e R2, dunque il secondo pacchetto finisce la propria ricezione nel nodo R2 mentre il primo pacchetto è ancora in trasmissione da R2 a R3. Il secondo pacchetto non può essere immediatamente ritrasmesso verso R3, ma deve attendere la fine della trasmissione del primo pacchetto, che sta occupando l'interfaccia trasmissiva tra R2 e R3. Il secondo pacchetto viene dunque accodato in attesa che l'interfaccia si liberi. Lo stesso accade nel collegamento successivo.

$$T_1 = \frac{L}{C_1} + \tau_1 + \frac{L}{C_2} + \tau_2 + \frac{L}{C_3} = 1 + 1 + 2 + 2 + 8 + 4 = 18 \text{ [ms]}$$

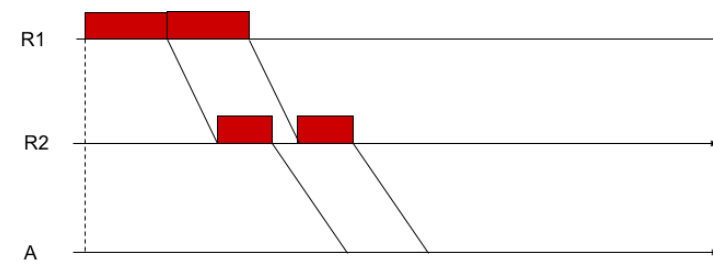
$$T_2 = \frac{L}{C_1} + \tau_1 + \frac{L}{C_2} + \tau_2 + \frac{2L}{C_3} = T_1 + \frac{L}{C_3} = 26 \text{ [ms]}$$

1.5 - Esercizio

Si consideri la rete in figura. Al tempo $t=0$ la coda di uscita di R1 ha 4 pacchetti diretti rispettivamente A, A, B, B. Assumendo lunghezza dei pacchetti di $L=512$ [bits], si indichi per ciascun pacchetto l'istante in cui viene completamente ricevuto a destinazione.

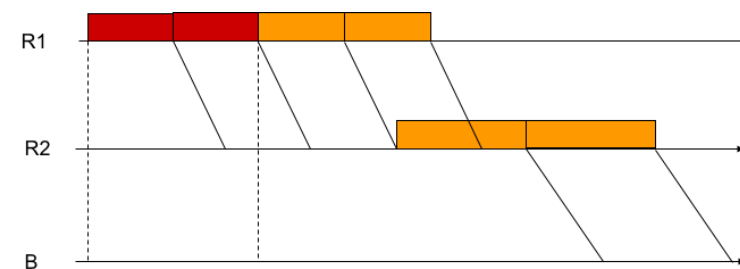


Soluzione



$$T_1 = \frac{L}{C_1} + \tau_1 + \frac{L}{C_2} + \tau_2 = 2 + 1 + 1 + 2 = 6 \text{ ms}$$

$$T_2 = \frac{L+L}{C_1} + \tau_1 + \frac{L}{C_2} + \tau_2 = 8 \text{ ms}$$



Una volta ricevuti al nodo R2, i pacchetti diretti ad A e B verranno gestiti in maniera indipendente. Infatti, i primi verranno accodati in uscita all'interfaccia tra R2 e A, mentre i secondi all'interfaccia tra R2 e B.

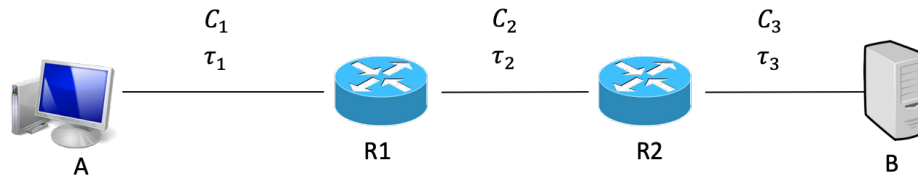
Dato che il link R2-B ha una velocità trasmissiva minore del link R1-R2, i pacchetti diretti a B verranno accodati in uscita da R2

$$T_3 = \frac{L+L+L}{C_1} + \tau_1 + \frac{L}{C_3} + \tau_3 = 6 + 1 + 8 + 4 = 19 \text{ ms}$$

$$T_4 = T_3 + \frac{L}{C_3} = 19 + 8 = 27 \text{ ms}$$

1.6 - Esercizio

Si consideri la rete in figura.

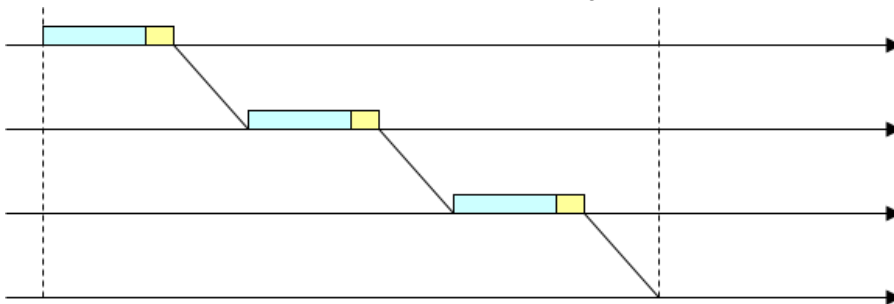


- Si calcoli in forma parametrica il tempo necessario a trasmettere un pacchetto da A a B (header h , dati D).
- Si assume di dividere il pacchetto in 2 frammenti. Si calcoli in forma parametrica il tempo necessario per trasmettere tutti i frammenti. Si assuma: $C_2 \leq C_1 \leq C_3$.
- Qual è il numero n di frammenti che minimizza il ritardo?
- Nel caso la lunghezza dell'header sia trascurabile che espressione assume il ritardo al crescere di n ?

Soluzione

a) La lunghezza di ogni pacchetto è data dalla somma dei bit di header e di dati

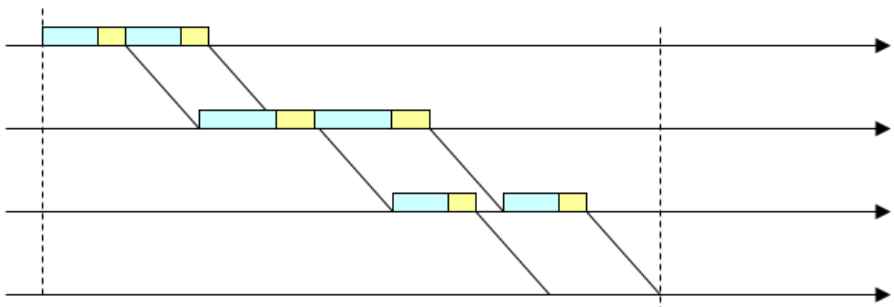
$$T = \frac{h+D}{C_1} + \tau_1 + \frac{h+D}{C_2} + \tau_2 + \frac{h+D}{C_3} + \tau_3$$



b) Ogni frammento sarà formato da una parte dati pari alla metà della parte dati del pacchetto originario, mentre la lunghezza dell'header rimane uguale. Ogni frammento avrà bisogno del proprio header per poter essere processato dai nodi intermedi.

$$d = D/2$$

$$T = \frac{h+d}{C_1} + \tau_1 + \frac{2(h+d)}{C_2} + \tau_2 + \frac{h+d}{C_3} + \tau_3$$



c) Nell'espressione parametrica la dimensione di ciascuno degli n frammenti sarà pari ad l/n della dimensione del pacchetto originario

$$T = \frac{h + D/n}{C_1} + \tau_1 + \frac{n(h + D/n)}{C_2} + \tau_2 + \frac{h + D/n}{C_3} + \tau_3 =$$

$$= \left(\frac{h}{C_1} + \tau_1 + \frac{D}{C_2} + \tau_2 + \frac{h}{C_3} + \tau_3 \right) + \frac{D}{nC_1} + \frac{nh}{C_2} + \frac{D}{nC_3}$$

Troviamo il punto di minimo:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{h}{C_2} - \frac{D}{n^2 C_1} - \frac{D}{n^2 C_3} = 0$$

$$n^* = \sqrt{\frac{C_2}{h} \left(\frac{D}{C_1} + \frac{D}{C_3} \right)}$$

Esempio numerico:

$$C_1 = 1 \text{ Mb/s}$$

$$C_2 = 900 \text{ kb/s}$$

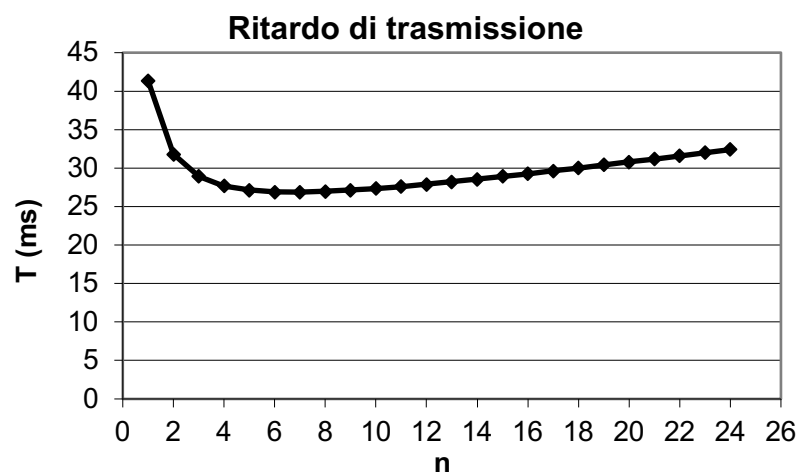
$$C_3 = 1 \text{ Mb/s}$$

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 3 \text{ ms}$$

$$h = 400 \text{ b}$$

$$D = 10000 \text{ b}$$

$$n^* = \sqrt{\frac{C_2}{h} \left(\frac{D}{C_1} + \frac{D}{C_3} \right)} = 6.71$$



d) L'espressione del ritardo diventa:

$$T = \frac{D/n}{C_1} + n \frac{D/n}{C_2} + \frac{D/n}{C_3} + \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = \frac{D/n}{C_1} + \frac{D}{C_2} + \frac{D/n}{C_3} + \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$$

Al crescere di n , il primo e il terzo termine possono essere trascurati e il ritardo diventa:

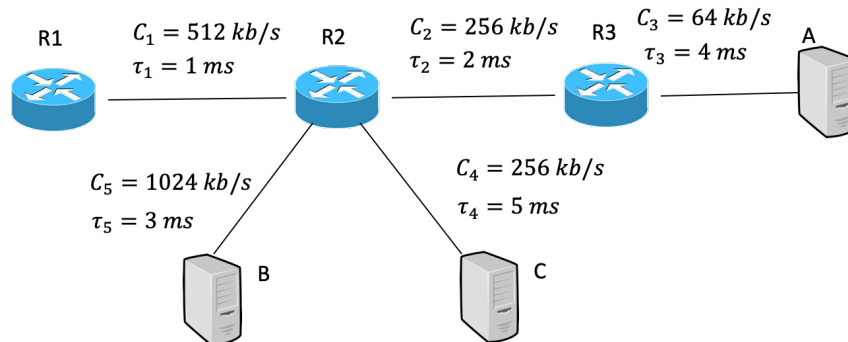
$$T = \frac{D}{C_{min}} + \tau_{tot}$$

Dove con C_{min} si è indicata la capacità di collegamento minima lungo il percorso (collo di bottiglia), e con τ_{tot} il ritardo di propagazione totale lungo il percorso.

Questo indica che nel trasferimento di una grossa quantità di dati (ad es. un lungo file) diviso in molti pacchetti (dei quali si può trascurare la lunghezza dell'header), il ritardo può essere approssimato con il tempo di trasmissione dei dati sul collegamento più lento più il tempo di propagazione complessivo.

1.7 - Esercizio

Si consideri la rete in figura. Al tempo $t=0$ la coda di uscita di R1 ha 6 pacchetti diretti rispettivamente A, A, B, B, C, C. Assumendo lunghezza dei pacchetti di $L=512$ [bits], si indichi per ciascun pacchetto l'istante in cui viene completamente ricevuto a destinazione.



Soluzione

Il primo pacchetto arriva al nodo A senza incontrare altri pacchetti in rete. Il secondo pacchetto, sempre diretto a A, verrà accodato, dato che i link successivi al primo hanno un rate trasmissivo minore.

$$T_1 = \frac{L}{C_1} + \tau_1 + \frac{L}{C_2} + \tau_2 + \frac{L}{C_3} + \tau_3 = 18 \text{ ms}$$

$$T_2 = T_1 + \frac{L}{C_3} = 26 \text{ ms}$$

I pacchetti diretti a B vengono trasmessi da R1 dopo quelli diretti a A, e da R2 in poi ne diventano indipendenti. Non c'è accodamento tra i pacchetti di B perché il link R2-B ha un rate trasmissivo maggiore di R1-R2

$$T_3 = \frac{3L}{C_1} + \tau_1 + \frac{L}{C_5} + \tau_5 = 7.5 \text{ ms}$$

$$T_4 = \frac{4L}{C_1} + \tau_1 + \frac{L}{C_5} + \tau_5 = 8.5 \text{ ms}$$

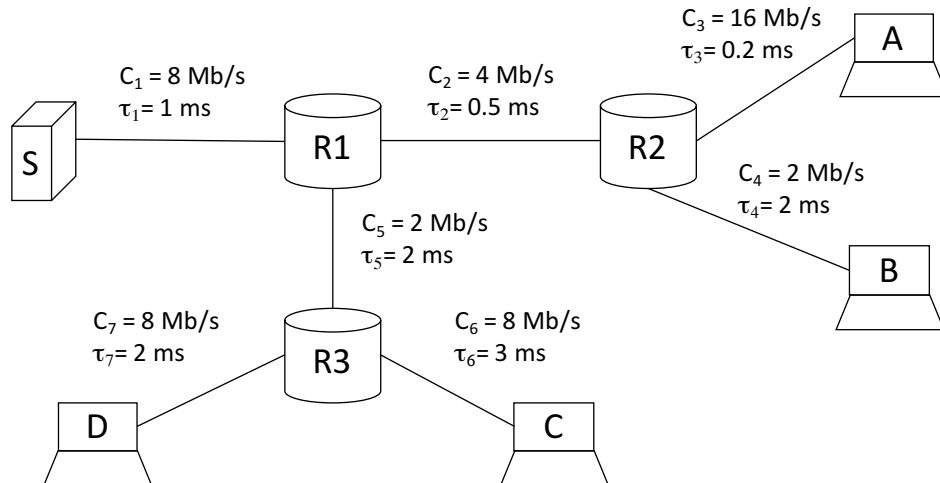
I pacchetti diretti a C vengono trasmessi da R1 dopo quelli diretti a A e B, e da R2 in poi ne diventano indipendenti. Dato che R2-C ha un rate trasmissivo minore di R1-R2, abbiamo accodamento tra i pacchetti diretti a C.

$$T_5 = \frac{5L}{C_1} + \tau_1 + \frac{L}{C_4} + \tau_4 = 13 \text{ ms}$$

$$T_6 = T_5 + \frac{L}{C_4} = 15 \text{ ms}$$

1.8 - Esercizio (esempio da tema d'esame)

In una rete a commutazione di pacchetto al tempo $t=0$ sono presenti 8 pacchetti in S diretti rispettivamente alle seguenti destinazioni: A, A, B, A, C, C, D, D. Calcolare il tempo di ricezione di ciascuno dei pacchetti assumendo che i pacchetti abbiano le seguenti dimensioni: pacchetti verso A, $L_A=1000$ [byte]; pacchetti verso B, $L_B=2000$ [byte]; pacchetti verso C, $L_C=500$ [byte]; pacchetti verso D, $L_D=1000$ [byte].



Soluzione

$$T_1^A = \frac{L_A}{C_1} = \frac{8 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^6} = 1 \text{ ms}$$

$$T_2^A = \frac{L_A}{C_2} = 2 \text{ ms}$$

$$T_3^A = \frac{L_A}{C_3} = 0.5 \text{ ms}$$

$$T_1^B = \frac{L_B}{C_1} = 2 \text{ ms}$$

$$T_2^B = \frac{L_B}{C_2} = 4 \text{ ms}$$

$$T_4^B = \frac{L_B}{C_4} = 8 \text{ ms}$$

$$T_1^C = \frac{L_C}{C_1} = 0.5 \text{ ms}$$

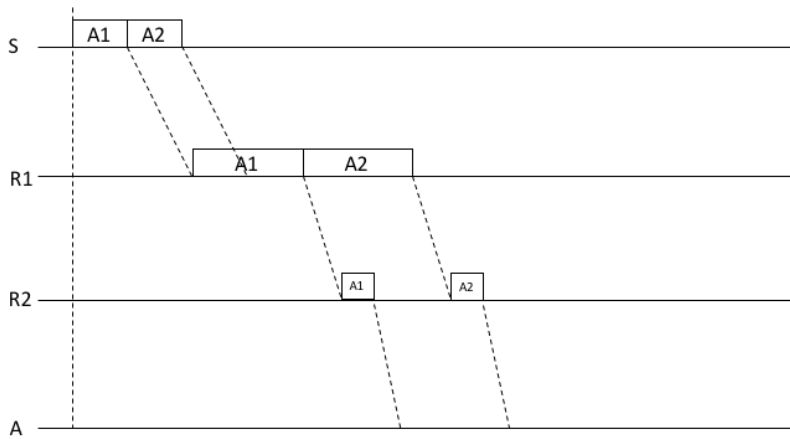
$$T_5^C = \frac{L_C}{C_5} = 2 \text{ ms}$$

$$T_6^C = \frac{L_C}{C_6} = 0.5 \text{ ms}$$

$$T_1^D = \frac{L_D}{C_1} = 1 \text{ ms}$$

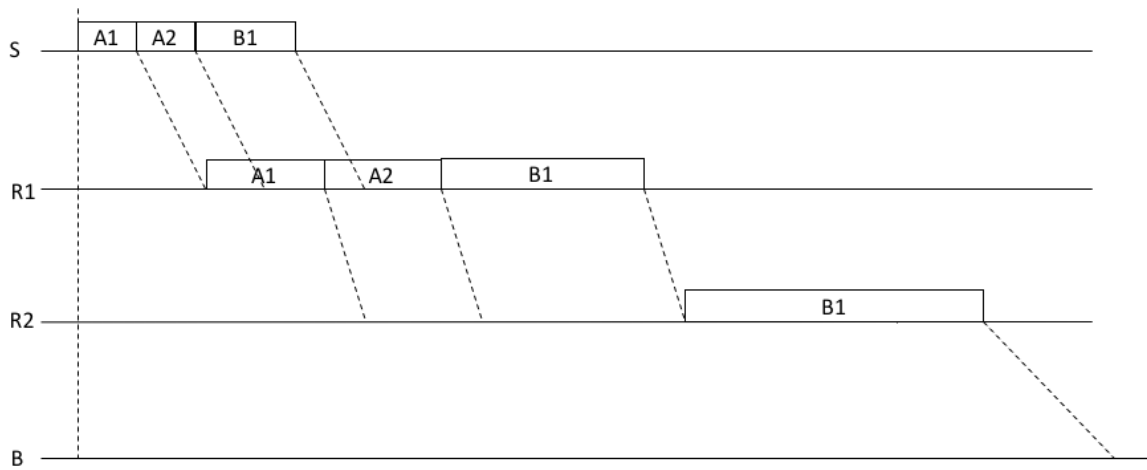
$$T_5^D = \frac{L_D}{C_5} = 4 \text{ ms}$$

$$T_7^D = \frac{L_{CD}}{C_7} = 1 \text{ ms}$$

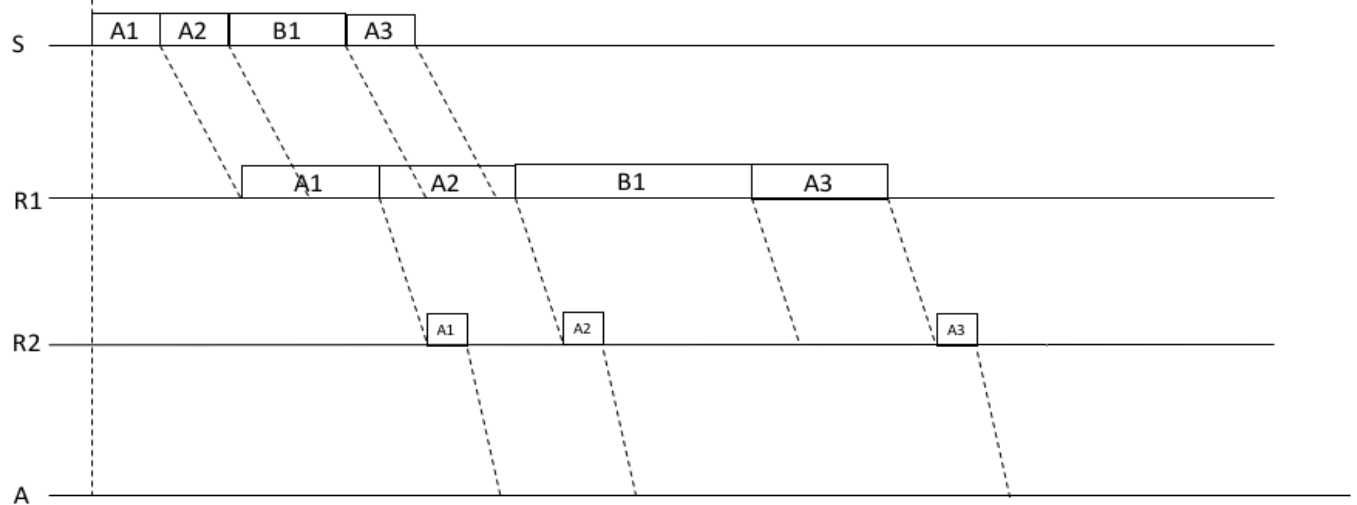


$$T_{A1} = T_1^A + \tau_1 + T_2^A + \tau_2 + T_3^A + \tau_3 = 5.2 \text{ ms}$$

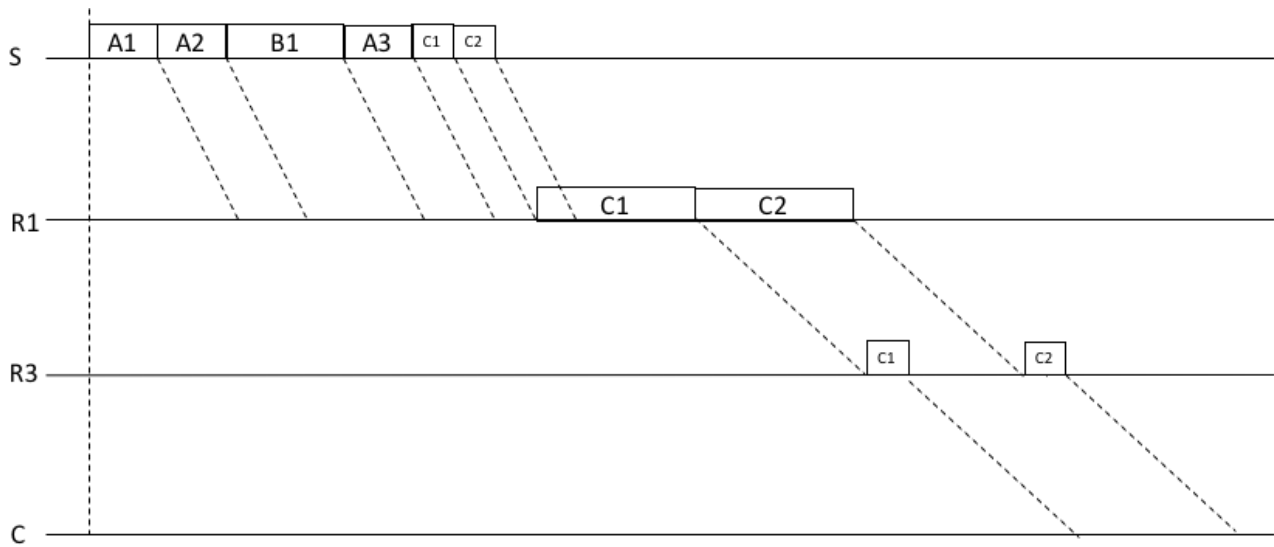
$$T_{A2} = T_{A1} + T_2^A = 7.2 \text{ ms}$$



$$T_{B1} = T_1^A + \tau_1 + 2T_2^A + T_2^B + \tau_2 + T_4^B + \tau_4 = 1 + 1 + 2 \times 2 + 4 + 0.5 + 8 + 2 = 20.5 \text{ ms}$$

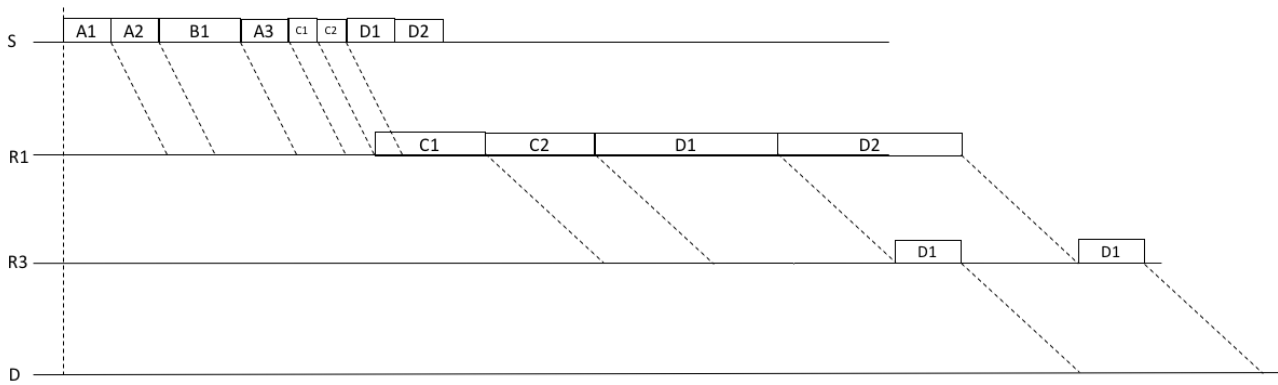


$$T_{A3} = T_1^A + \tau_1 + 3T_2^A + T_2^B + \tau_2 + T_3^A + \tau_3 = 1 + 1 + 3 \times 2 + 4 + 0.5 + 0.5 + 0.2 = 13.2 \text{ ms}$$



$$T_{C1} = 3 T_1^A + T_1^B + T_1^C + \tau_1 + T_5^C + \tau_5 + T_6^C + \tau_6 = 14 \text{ ms}$$

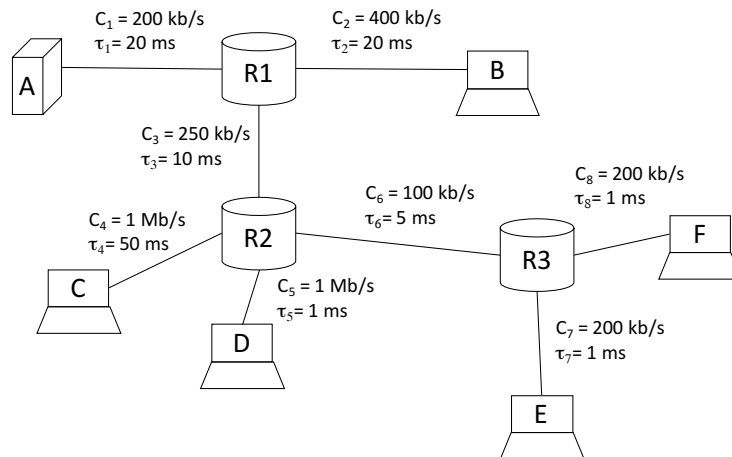
$$T_{C2} = T_{C1} + T_5^C = 16 \text{ ms}$$



$$T_{D1} = 3 T_1^A + T_1^B + T_1^C + \tau_1 + 2T_5^C + T_5^D + \tau_5 + T_7^D + \tau_7 = 19.5 \text{ ms}$$

$$T_{D1} = T_{D1} + T_5^D = 23.5 \text{ ms}$$

1.9 - Esercizio (esempio da tema d'esame)



Nella rete a commutazione di pacchetto in figura, al tempo $t=0$ sono presenti 5 pacchetti in A diretti rispettivamente alle seguenti destinazioni: C, D, E, F, E. Calcolare l'istante di fine ricezione degli ultimi 3 pacchetti a destinazione assumendo che i pacchetti abbiano le seguenti dimensioni: pacchetti verso C, $L_C = 375$ [byte]; pacchetti verso D, $L_D = 250$ [byte]; pacchetti verso E, $L_E = 375$ byte; pacchetti verso F, $L_F = 125$ [byte].

Soluzione

$$T_1^C = \frac{L_C}{C_1} = \frac{375 * 8 \text{ bit}}{200 \text{ kbps}} = 15 \text{ ms}$$

$$T_3^C = \frac{L_C}{C_3} = \frac{375 * 8 \text{ bit}}{250 \text{ kbps}} = 12 \text{ ms}$$

$$T_1^D = \frac{L_D}{C_1} = \frac{250 * 8 \text{ bit}}{200 \text{ kbps}} = 10 \text{ ms}$$

$$T_3^D = \frac{L_D}{C_3} = \frac{250 * 8 \text{ bit}}{250 \text{ kbps}} = 8 \text{ ms}$$

$$T_1^E = \frac{L_E}{C_1} = \frac{375 * 8 \text{ bit}}{200 \text{ kbps}} = 15 \text{ ms}$$

$$T_3^E = \frac{L_E}{C_3} = \frac{375 * 8 \text{ bit}}{250 \text{ kbps}} = 12 \text{ ms}$$

$$T_6^E = \frac{L_E}{C_6} = \frac{375 * 8 \text{ bit}}{100 \text{ kbps}} = 30 \text{ ms}$$

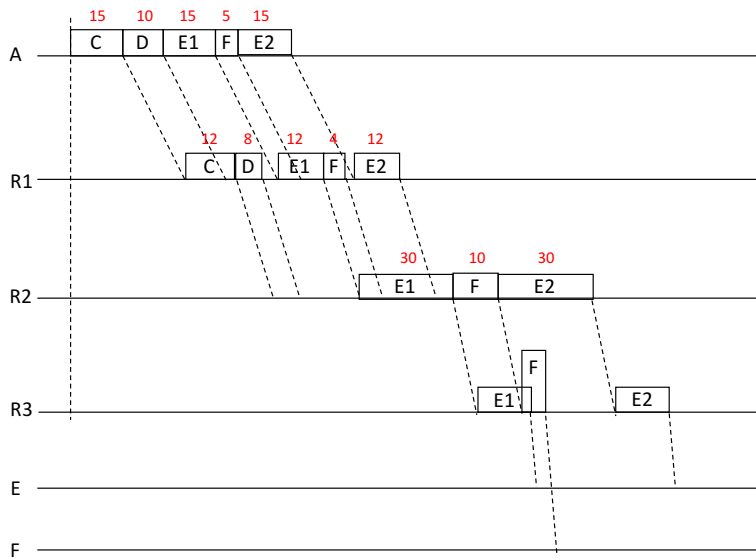
$$T_7^E = \frac{L_E}{C_7} = \frac{375 * 8 \text{ bit}}{200 \text{ kbps}} = 15 \text{ ms}$$

$$T_1^F = \frac{L_F}{C_1} = \frac{125 * 8 \text{ bit}}{200 \text{ kbps}} = 5 \text{ ms}$$

$$T_3^F = \frac{L_F}{C_3} = \frac{125 * 8 \text{ bit}}{250 \text{ kbps}} = 4 \text{ ms}$$

$$T_6^F = \frac{L_F}{C_6} = \frac{125 * 8 \text{ bit}}{100 \text{ kbps}} = 10 \text{ ms}$$

$$T_8^F = \frac{L_F}{C_8} = \frac{125 * 8 \text{ bit}}{200 \text{ kbps}} = 5 \text{ ms}$$



$$T_{E1} = T_1^C + T_1^D + T_1^E + \tau_1 + T_3^E + \tau_3 + T_6^E + \tau_6 + T_7^E + \tau_7$$

$$= 15 + 10 + 15 + 20 + 12 + 10 + 30 + 5 + 15 + 1 = 133 \text{ ms}$$

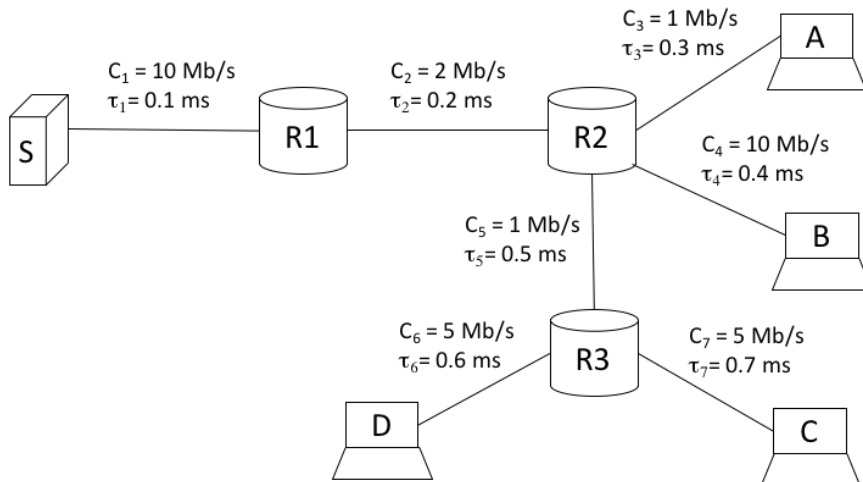
$$T_F = T_1^C + T_1^D + T_1^E + \tau_1 + T_3^E + \tau_3 + T_6^E + T_6^F + \tau_6 + T_8^F + \tau_8$$

$$= 15 + 10 + 15 + 20 + 12 + 10 + 30 + 10 + 5 + 5 + 1 = 133 \text{ ms}$$

$$T_{E2} = T_{E1} + T_6^E + T_6^F = 133 + 30 + 10 = 173 \text{ ms}$$

1.10 - Esercizio (esempio da tema d'esame)

In una rete a commutazione di pacchetto al tempo $t=0$ sono presenti 6 pacchetti in S diretti rispettivamente alle seguenti destinazioni: A, A, B, B, C, D. Calcolare il tempo di ricezione di ciascuno dei pacchetti assumendo che i pacchetti abbiano le seguenti dimensioni: pacchetti verso A, $L_A=1250$ [byte]; pacchetti verso B, $L_B=250$ [byte]; pacchetti verso C, $L_C=1250$ [byte]; pacchetti verso D, $L_D=1250$ [byte].



Soluzione

$$T_{A1} = T_1^A + \tau_1 + T_2^A + \tau_2 + T_3^A + \tau_3 = 16.6 \text{ ms}$$

$$T_{A2} = T_{A1} + T_3^A = 26.6 \text{ ms}$$

$$T_{B1} = T_1^A + \tau_1 + 2 T_2^A + T_2^B + \tau_2 + T_4^B + \tau_4 = 12.9 \text{ ms}$$

$$T_{B2} = T_{B1} + T_2^B = 13.9 \text{ ms}$$

$$T_{C1} = T_1^A + \tau_1 + 2 T_2^A + 2 T_2^B + T_2^C + \tau_2 + T_5^C + \tau_5 + T_7^C + \tau_7 = 31.5 \text{ ms}$$

$$T_{D1} = T_1^A + \tau_1 + 2 T_2^A + 2 T_2^B + T_2^C + \tau_2 + T_5^C + T_5^D + \tau_5 + T_6^D + \tau_6 = 39.4 \text{ ms}$$

1.11 - Esercizio

Quanti metri è “lungo” nel mezzo trasmissivo il segnale corrispondente ad un pacchetto di lunghezza $L = 75$ byte durante la trasmissione su di un canale radio di capacità $C = 64$ Mbit/s (velocità di propagazione pari alla velocità della luce nel vuoto)?

Quanto dura la sua trasmissione?

Soluzione

- $v = c \cong 300.000$ km/s
- $L = 75$ byte = 600 bit; $C = 64$ Mbit/s
- Durata: $T = L / C = (600 / 64) \mu\text{s} = 9.375 \mu\text{s}$
- Lunghezza: $l = T \cdot v = (0.3 \cdot 9.375) \text{ km} = 2.8125 \text{ km}$

1.12 - Esercizio

Un sistema sonar misura la distanza di eventuali ostacoli in base al ritardo tra la partenza di un impulso e la ricezione dell'eco. Si assuma un valore di velocità di propagazione del suono nell'acqua costante pari a 1480 m/s.

- a) Se l'impulso ha durata $T = 0.34$ ms, calcolare la lunghezza in acqua dell'onda acustica corrispondente.
- b) Se lo strumento misura i tempi di ritardo con una tolleranza di ± 1.5 ms, determinare il corrispondente errore di misura sulle distanze

Soluzione

- a) La lunghezza dell'onda acustica corrispondente ad un impulso di durata T è la distanza percorsa da un segnale in propagazione a velocità v nel tempo T , ed è quindi data da:
 $L = v \cdot T = (1480 \cdot 0.34 \cdot 10^{-3}) \text{ m} = 50.32 \text{ cm}$
- b) Lo strumento misura il tempo X di andata e ritorno sorgente-ostacolo (2τ). Quindi:
 $X = 2\tau = 2 d / v \Rightarrow \Delta X = 2 \Delta d / v \Rightarrow \Delta d = \Delta X \cdot v / 2 = (1.5 \cdot 1480 / 2) \text{ mm} = 1.11 \text{ m}$

1.13 - Esercizio

Quanti pacchetti di dimensione $L = 100$ byte si trovano “in volo” durante la trasmissione su di un canale radio di capacità $C = 80$ Mb/s (velocità di propagazione pari alla velocità della luce nel vuoto) e lunghezza fisica 27 km? Tra i vari pacchetti c'è un tempo di pausa, ovvero un tempo che intercorre tra la trasmissione dell'ultimo bit di un pacchetto e la trasmissione del primo bit del pacchetto successivo, che è pari a $20 \mu\text{s}$.

Quanti secondi dura la trasmissione del singolo pacchetto?

Soluzione

- $v = c \cong 300000 \text{ km/s}$
- $L = 100 \text{ B} = 800 \text{ b}$; $C = 80 \text{ Mb/s}$
- Durata: $T = L / C = (800 / 80) \mu\text{s} = 10 \mu\text{s}$
- Lunghezza:
 $l (\text{pacchetto}) = T \cdot v = (0.3 \cdot 10) \text{ km} = 3 \text{ km}$
 $\Delta (\text{interarrivo}) = T_{\text{int}} \cdot v = (0.3 \cdot 20) \text{ km} = 6 \text{ km}$
- $D = 27 \text{ km}$
- Nr pacchetti in volo $= D / (l + \Delta) = 27 \text{ km} / (3+6) \text{ km} = 3$ pacchetti

1.14 - Esercizio

Un codificatore vocale trasforma il segnale vocale in un flusso binario a $R_b = 64 \text{ kb/s}$. Assumendo che i bit generati siano inseriti in pacchetti dati da 160 B, calcolare:

- La velocità di generazione di pacchetti in pacchetti al secondo
- Il tempo tra la generazione di un pacchetto e il successivo
- Assumendo che ad ogni pacchetto venga aggiunto un header di $h = 20 \text{ B}$ prima di essere trasmesso in rete, calcolare la velocità media del flusso di pacchetti in kb/s.

Soluzione

La lunghezza dei pacchetti di dati è pari a $L_d = 160 \cdot 8 = 1280 \text{ b}$.

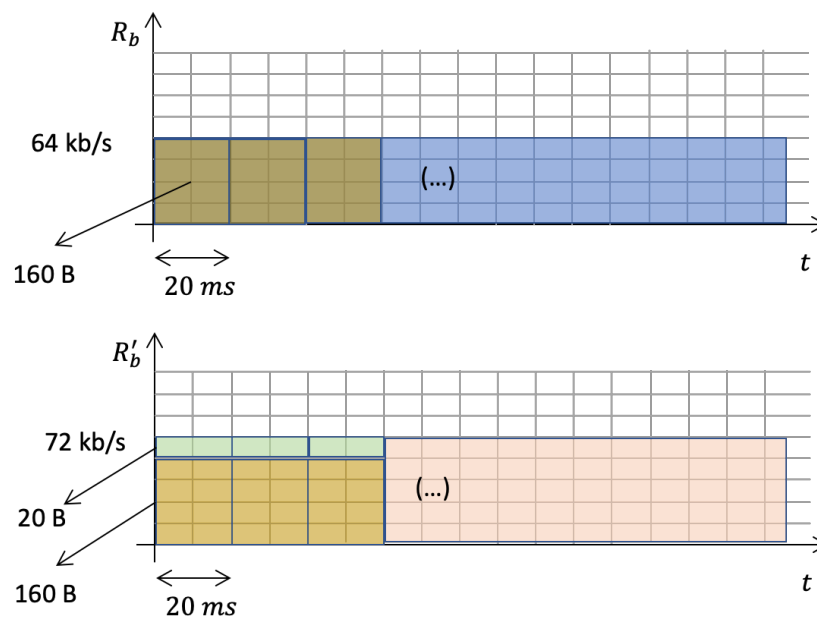
La velocità di generazione dei pacchetti è dunque pari a $R_p = \frac{R_b}{L} = 50 \text{ pacchetti/s}$, e il tempo tra la generazione di un pacchetto e il successivo $T = \frac{1}{R_p} = 0.02 \text{ s} = 20 \text{ ms}$.

Dopo l'aggiunta dell'header la lunghezza dei pacchetti diventa $L_{d+h} = (160 + 20) \cdot 8 = 1440 \text{ b}$.

La velocità media del flusso di pacchetti diventa dunque pari a:

$$R'_b = R_p L_{d+h} = 1440 \cdot 50 = 72 \text{ kb/s}$$

Una rappresentazione grafica della sorgente di traffico può essere utile:



1.15 - Esercizio

Un sensore microfónico d'ambiente per la misurazione del livello medio di rumore converte il segnale in digitale con una velocità di $R_b = 1\text{ Mb/s}$. Il sensore non trasmette in modo continuo, ma ad intermittenza generando ad intervalli regolari dei blocchi da $L_b = 10\text{ kB}$ ogni $T = 200\text{ ms}$.

Calcolare:

- L'intervallo di tempo di inattività del sensore tra due blocchi consecutivi
- La velocità media di generazione di bit del sensore

Soluzione

Il tempo di generazione di un blocco è pari a:

$$T_b = \frac{L_b}{R_b} = \frac{8 \cdot 10 \cdot 10^3}{10^6} = 80\text{ ms}$$

E dunque il tempo di inattività tra un blocco e l'altro è pari a:

$$T_s = T - T_b = 120\text{ ms}$$

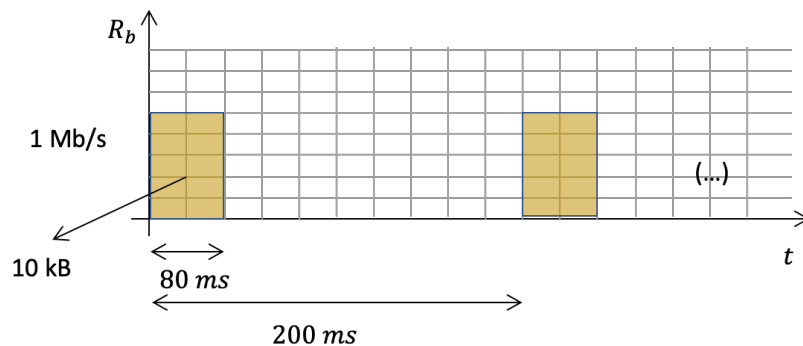
La velocità media di generazione è pari a:

$$R'_b = \frac{L_b}{T} = \frac{8 \cdot 10 \cdot 10^3}{200 \cdot 10^{-3}} = 0.4\text{ Mb/s}$$

che è anche pari a:

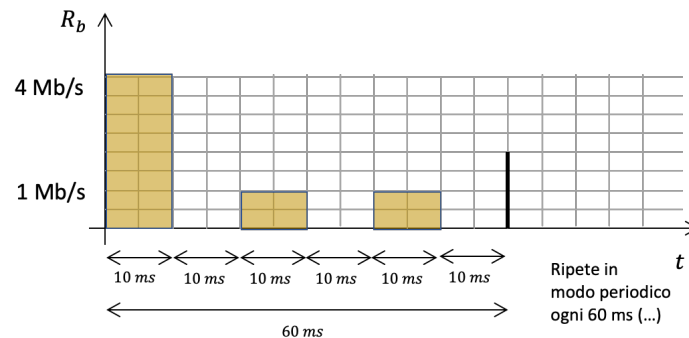
$$R'_b = R_b \frac{T_b}{T_b + T_s} = 1 \cdot \frac{80}{200} = 0.4\text{ Mb/s}$$

La rappresentazione grafica corrispondente è:



1.16 - Esercizio

Il codificatore video di una telecamera genera bit a velocità variabile, corrispondente a fotogrammi (frame) di immagini a diverso contenuto di pixel, secondo il diagramma mostrato in figura.



Si assuma che i bit generati vengano messi in pacchetti dati di massimo $D = 1500 \text{ b}$ e che se alla fine del fotogramma il pacchetto che non ha raggiunto la sua lunghezza massima venga comunque creato con lunghezza inferiore.

Si calcoli:

- Quanti pacchetti vengono generati nei primi 60 ms e con quale lunghezza
- La velocità media di generazione di bit della telecamera
- La velocità media dei pacchetti generati assumendo che ciascuno di essi abbia un header di 40B

Soluzione

Il primo fotogramma viene generato alla velocità di 4 Mb/s in 10 ms e quindi genera una quantità di bit pari a $L_1 = (4 \cdot 10^6) \cdot (10 \cdot 10^{-3}) = 40.000 \text{ b}$ che corrispondono a un numero di pacchetti di lunghezza massima pari a:

$$N_1 = \left\lfloor \frac{L_1}{D} \right\rfloor = 26$$

e ad un ultimo pacchetto di lunghezza pari a:

$$D' = L - N_1 D = 1000 \text{ b}$$

per un totale di $P_1 = 27$ pacchetti.

In modo analogo per il secondo fotogramma abbiamo $L_2 = (1 \cdot 10^6) \cdot (10 \cdot 10^{-3}) = 10.000 \text{ b}$ che corrispondono ad un numero di pacchetti di lunghezza massima pari a:

$$N_2 = \left\lfloor \frac{L_2}{D} \right\rfloor = 6$$

e ad un ultimo pacchetto di lunghezza pari a:

$$D' = L - N_2 D = 1000 \text{ b}$$

per un totale di $P_2 = 7$ pacchetti.

Il terzo fotogramma è uguale al secondo.

In totale sono stati generati un numero di bit pari a:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 = 60.000 \text{ b}$$

in un intervallo $T = 60 \text{ ms}$. Quindi la velocità media risulta pari a:

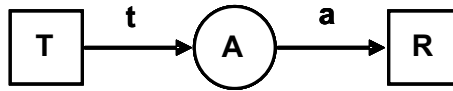
$$R'_b = \frac{L}{T} = 1 \text{ Mb/s}$$

A ciascuno dei $P = P_1 + P_2 + P_3 = 41$ pacchetti vengono aggiunti $40 \text{ B} = 320 \text{ b}$ per un totale di $H = 41 \cdot 320 = 13.120 \text{ b}$ per una velocità media pari a:

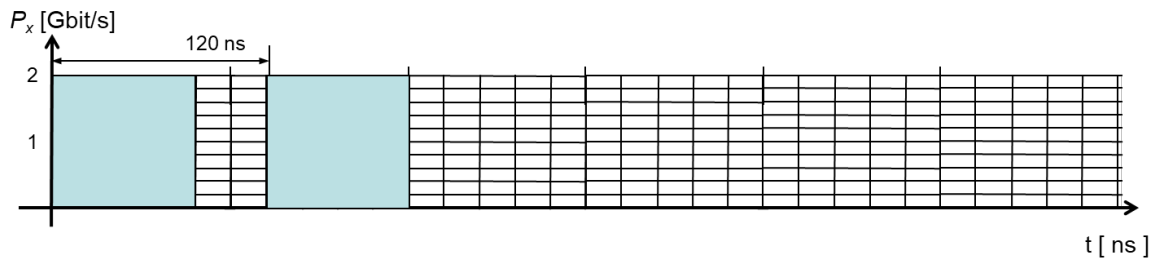
$$R'_b = \frac{L + H}{T} = 1.22 \text{ Mb/s}$$

1.17 - Esercizio

I due terminali **T** ed **R** sono collegati attraverso un nodo **A** come in figura.



T emette 2 pacchetti di dimensione $P = 20$ byte su un canale di capacità $P_T = 2$ Gbit/s. Gli istanti di inizio trasmissione dei pacchetti al terminale **T** sono distanti 120 ns, come mostrato nella figura sottostante.



Ogni pacchetto generato da **T** viene ricevuto da **A** e ritrasmesso verso il terminale **R** su un canale a velocità $P_A = 1.6$ Gb/s dopo aver aggiunto ai P byte del pacchetto un overhead di H byte, con $H/P = 1/5$. Il nodo **A** non inizia a trasmettere un pacchetto sull'interfaccia di uscita prima che non lo abbia interamente ricevuto dall'interfaccia di ingresso. Si considerino nulli i tempi di elaborazione. Per ciascuno dei due pacchetti emessi dal terminale **T**, si calcoli l'istante di ricezione al terminale **R**. Le lunghezze dei collegamenti siano $l_t = 36$ m e $l_a = 8$ m e il ritardo di propagazione di $5 \mu\text{s/km}$.

Soluzione

I due pacchetti emessi da **T** sono trasmessi a partire dagli istanti $t_1 = 0$ e $t_2 = 120$ ns, rispettivamente.

$$T_T = P/P_T = 20 \text{ byte} / 2 \text{ Gbit/s} = 80 \text{ ns}$$

$$\tau_t = l_t/v \text{ con } 1/v = 5 \text{ ns/m} \Rightarrow \tau_t = (36 \cdot 5) \text{ ns} = 180 \text{ ns}$$

$$\tau_a = l_a/v \text{ con } 1/v = 5 \text{ ns/m} \Rightarrow \tau_a = (8 \cdot 5) \text{ ns} = 40 \text{ ns}$$

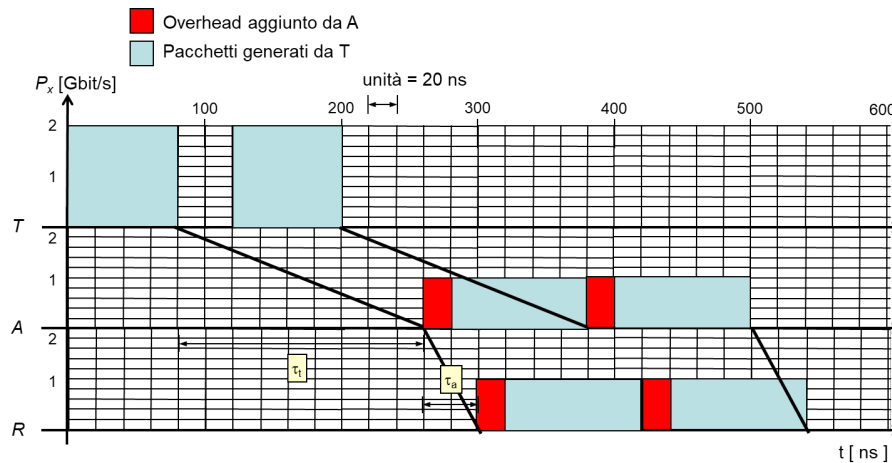
$$H/P = 1/5 \Rightarrow H = 4 \text{ byte}$$

$$T_A = (H+P)/P_A = 24 \text{ byte} / 1.6 \text{ Gbit/s} = 120 \text{ ns}$$

$$T_{R1} = t_1 + T_T + \tau_t + T_A + \tau_a = 420 \text{ ns}$$

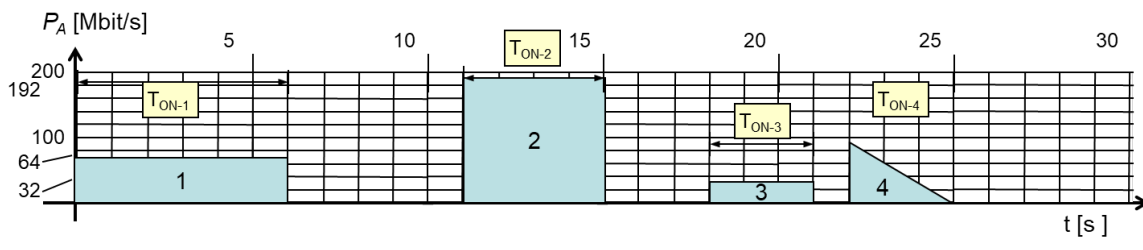
$$T_{R2} = t_2 + T_T + \tau_t + T_A + \tau_a = t_1 + T_T + \tau_t + 2T_A + \tau_a = 540 \text{ ns}$$

Si noti che gli istanti di fine trasmissione del primo pacchetto in **A** e di fine ricezione del secondo pacchetto in **A** coincidono \Rightarrow il secondo pacchetto può essere subito trasmesso da **A**, non appena interamente ricevuto.



1.18 - Esercizio

Si consideri una sorgente A il cui profilo di emissione di traffico è mostrato nella figura sottostante.

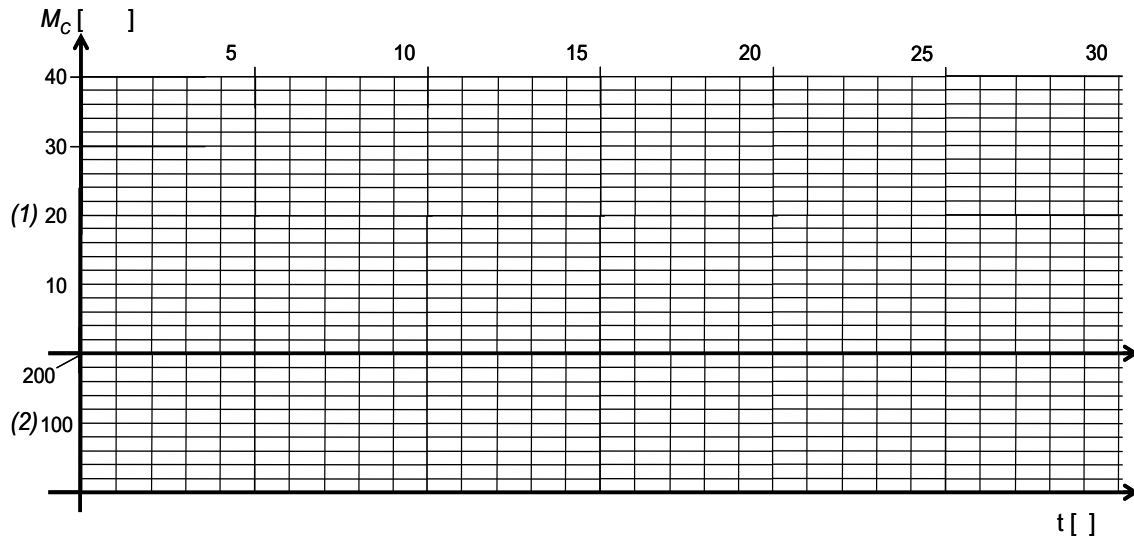


Nei

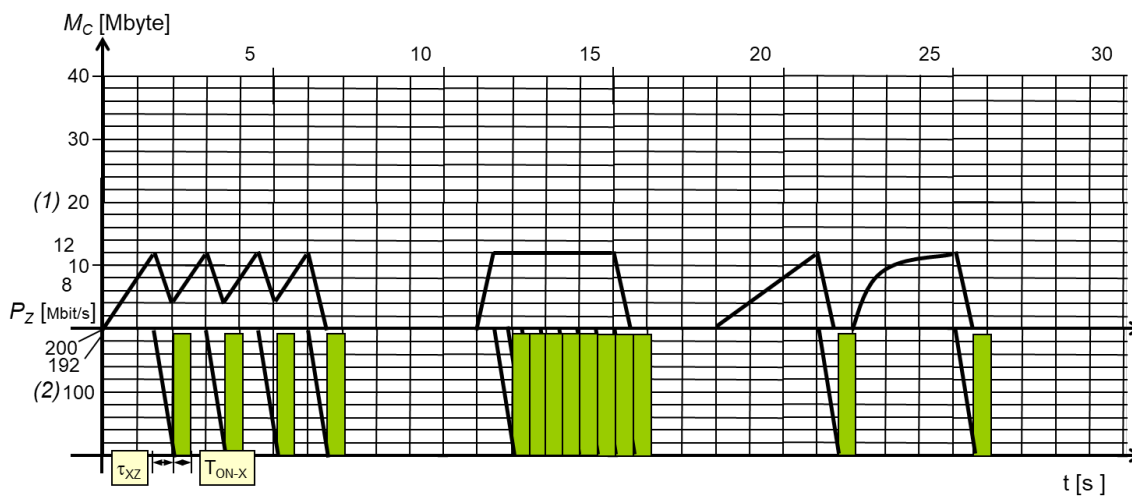
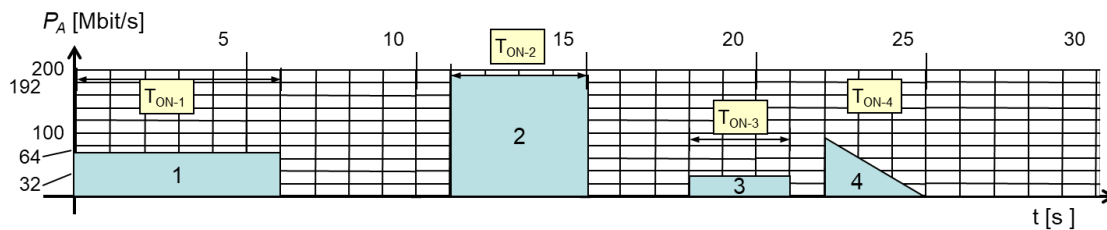
primi $T = 21$ s la sorgente emette 3 blocchi (burst) di dati di dimensione variabile L_1 , L_2 e L_3 bit, con velocità di trasmissione rispettivamente pari a P_1 , P_2 e P_3 (costanti per ciascun burst). Si abbia:

- $L_1 = 48$ Mbyte ; $L_2 = 96$ Mbyte; $L_3 = 12$ Mbyte
- $P_1 = 64$ Mbit/s; $P_2 = 192$ Mbit/s; $P_3 = 32$ Mbit/s
- Gli istanti di inizio trasmissione dei tre pacchetti siano $t_1 = 0$, $t_2 = 11$ s, $t_3 = 18$ s.

- Infine a $t = 22$ s, A emette un burst di dati per un tempo $T_{ON-4} = 3$ s con velocità di emissione che decresce linearmente da $P_4 = 64$ Mbit/s all'inizio del burst a 0 Mbit/s alla fine.
- Si supponga che A sia collegata direttamente (collegamento di lunghezza trascurabile) ad un nodo di accesso X di una rete a commutazione di pacchetto che trasmette al nodo successivo Z tramite un collegamento satellitare. L'interfaccia di uscita del nodo è di capacità $P_X = 192$ Mbit/s. X è collegato a Z tramite una tratta di lunghezza $l_{TS} = 36000$ km in salita e una tratta uguale in discesa. Il nodo trasmette un pacchetto verso Z non appena ha accumulato nel buffer dell'uscita XZ un numero di byte pari a $L_X = 12$ Mbyte di informazione generati da A (l'overhead introdotto da X è trascurabile). La capacità del buffer è illimitata.
- Rappresentare nei due diagrammi sottostanti, rispettivamente: (1) il livello di riempimento M_X del buffer dell'uscita XZ del nodo X; (2) il profilo di ricezione (arrivo dei pacchetti) della destinazione Z specificando, per ciascun pacchetto, gli istanti di fine ricezione al nodo Z.



- $L_4 = P_4 \cdot T_{ON-4} / 2 = (64 \cdot 3 / 2) \text{ Mbit} = 12 \text{ Mbyte}$
- $T_{ON-1} = L_1 / P_1 = 6 \text{ s}$; $T_{ON-2} = L_2 / P_2 = 4 \text{ s}$; $T_{ON-3} = L_3 / P_3 = 3 \text{ s} = T_{OFF-2}$
- $T_{ON-X} = L_X / P_X = (12 \cdot 8 / 192) \text{ s} = 0.5 \text{ s}$
- $\tau_{XZ} = 2 \cdot l_{TS} / c = (2 \cdot 36000 / 300000) \text{ s} = 0.24 \text{ s} (\cong 0.5 \text{ s per comodità di rappresentazione sul grafico})$
- Vengono emessi in tutto da X 14 pacchetti di durata 0.5 s, ricevuti da Z agli istanti:
 $t = \{2; 3.5; 5; 5.5; 12; 12.5; 13; 13.5; 14; 14.5; 15; 15.5; 21.5; 26.5\}$



1.19 - Esercizio

Un segnale musicale di banda pari a $B = 22 \text{ kHz}$ viene campionato a frequenza di Nyquist e convertito in digitale usando $l = 512$ livelli. Il flusso ottenuto viene immesso in pacchetti di lunghezza pari a $L = 1000 B$ a cui sono aggiunti $h = 60 B$ di header.

Calcolare:

- La velocità del segnale musicale digitale
- La velocità media del flusso di pacchetti

Soluzione

La frequenza di campionamento è pari a:

$$F_c = 2B = 44 \text{ kHz}$$

Il numero di bit per ciascuno campione è pari a:

$$b = \log_2(l) = 9$$

Per una velocità del segnale musicale digitale pari a:

$$R_b = F_c b = 396 \text{ kb/s}$$

che corrisponde ad una velocità di pacchetti al secondo pari a:

$$R_p = \frac{R_b}{L} = 49.5 \text{ pacchetti/s}$$

Una volta aggiunto l'header la velocità media del flusso di pacchetti diventa:

$$R'_b = (L + h)R_p = 419.76 \text{ kb/s}$$

1.20 - Esercizio

Un convertitore video per vecchie cassette analogiche codifica le immagini in digitale usando per ciascun frame (fotogramma) un numero di pixel pari a 640×480 , $b = 24 \text{ bit}$ per pixel per ciascuno dei tre colori fondamentali (codifica RGB), e una frequenza di frame (fotogrammi) di $F_f = 50 \text{ Hz}$.

Calcolare:

- La velocità del segnale video digitale
- La banda del segnale analogico di ogni singolo colore assumendo un campionamento alla frequenza di Nyquist

Soluzione

Il numero totale di pixel per frame è pari a:

$$p = 640 \cdot 480 = 307.200 \text{ pixel}$$

Il numero totale di bit per fotogramma è pari a:

$$L = 3pb = 22.12 \text{ Mb}$$

e quindi la velocità media del segnale digitale è pari a:

$$R_b = L \cdot F_f = 1.1 \text{ Gb/s}$$

La frequenza di campionamento del segnale video risulta pari a:

$$F_c = p \cdot F_f = 15.36 \text{ MHz}$$

e quindi la banda $B = F_c/2 = 7.68 \text{ MHz}$

1.21 - Esercizio

Un segnale audio di banda $B = 15 \text{ kHz}$ viene campionato alla frequenza di Nyquist, convertito in digitale con 16 bit per campione, e trasmesso con una modulazione 16-QAM. Si calcoli la banda occupata dal segnale assumendo una efficienza spettrale η di 1 simbolo al secondo per Hz.

Soluzione

La frequenza di campionamento risulta pari a:

$$F_c = 2B = 30 \text{ kHz}$$

Con 16 bit per campione, la velocità (rate) del segnale digitale è:

$$R_b = 16F_c = 480 \text{ kb/s}$$

Con la modulazione 16-QAM ogni simbolo trasporta 4 bit e dunque la banda del segnale modulato risulta pari a:

$$B_m = \frac{R_b}{4\eta} = 120 \text{ kHz}$$