

Appendice

Proposte per esercitazioni di laboratorio

Verifica delle caratteristiche fisiche e di installazione di una linea

Facendo riferimento al CAPITOLO 3 PARAGRAFI 4, 5, 6 e 7 e ai LABORATORI DIDATTICI 1 e 2 è possibile realizzare in pratica le seguenti esperienze di laboratorio sulle linee:

- individuazione di problemi di integrità e interconnessione nei cavi tramite misure ecometriche;
- misura dei parametri caratteristici di un cavo;
- velocità di propagazione e fattore di velocità;
- impedenza caratteristica;
- analisi dell'onda stazionaria e calcolo del ROS.

Tali esperienze possono anche essere simulate tramite MicroCap.

Materiali

Generatore di funzione con frequenze fino ad almeno 10 MHz e con la possibilità di variare il duty cycle dei segnali a onda quadra; oscilloscopio (preferibilmente digitale); spezzoni di cavo coassiale preferibilmente di lunghezza pari ad almeno 25 m, uno di impedenza caratteristica $Z_0 = 50 \Omega$ e almeno uno con $Z_0 = 75 \Omega$; due resistenze da 100 Ω e/o un potenziometro da 200 Ω (possibilmente multigiro di precisione); connettore a T. In alternativa si può utilizzare il software di simulazione MicroCap (anche in versione Evaluation/Student).

1 Individuazione di problemi di integrità e interconnessione nei cavi tramite misure ecometriche

Si desidera valutare l'integrità di un cavo coassiale avente caratteristiche note e la sua corretta interconnessione con generatore e carico. Nell'esperienza viene utilizzato un cavo coassiale RG 213, lungo 25 m e avente le seguenti caratteristiche (rilevabili dal catalogo del costruttore, si veda anche la TABELLA 2 del CAPITOLO 3):

- impedenza caratteristica¹ $Z_0 = 50 \pm 2 \Omega$;
- velocity ratio 66%;
- capacità per unità di lunghezza 100 ± 2 pF/m ;
- attenuazione = 1,8 dB/100m a $f_{rif} = 10$ MHz.

In alternativa si può utilizzare un cavo RG58/U che differisce dall'RG 213 per le minori dimensioni e per la maggiore attenuazione, che per esempio può essere di 4,7 dB/100m a $f_{rif} = 10$ MHz.

¹ Si ammette una tolleranza di $\pm 2 \Omega$.

Realizziamo il banco di misura di FIGURA A.1, che simula l'impiego di uno strumento denominato TDR (*Time Domain Reflectometer*) o ecometro.

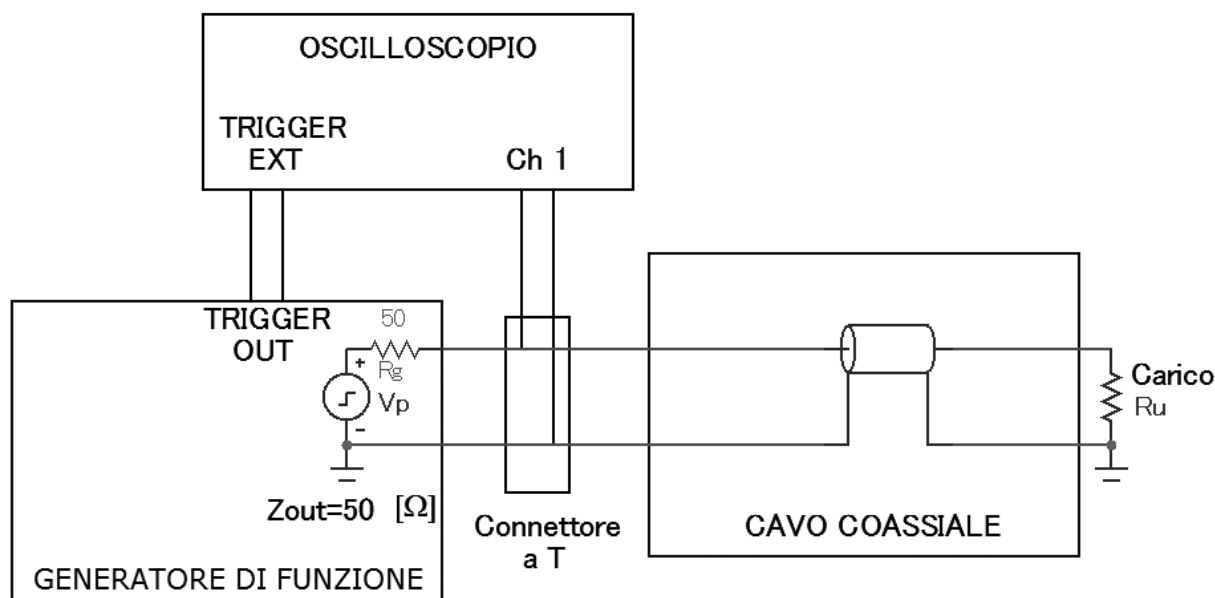


FIGURA A.1 Banco per l'effettuazione di misure ecometriche.

Principio su cui si basano le misure

Una linea disadattata sul carico o che presenta delle discontinuità di impedenza determina una riflessione del segnale che giunge in ciascun punto disadattato. I parametri con cui si può valutare l'entità del disadattamento sono:

- coefficiente di riflessione $\rho_v = \frac{Z_u - Z_0}{Z_u + Z_0}$;
- attenuazione di riflessione o return loss $A_r = -20 \log(|\rho_v|)$ dB;
- rapporto d'onda stazionaria, VSWR o ROS $= \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + |\rho_v|}{1 - |\rho_v|}$.

Se si invia in ingresso alla linea un impulso avente durata, τ , inferiore al doppio del tempo di propagazione e ampiezza sufficiente a rendere l'attenuazione trascurabile (o comunque non eccessiva) è possibile rilevare distintamente l'impulso riflesso e, analizzandolo, capire il tipo di problema che si ha nonché la distanza dal generatore a cui vi è il problema.

La durata, τ , dell'impulso e la sua ampiezza vanno quindi scelti in relazione alla lunghezza del cavo.

Si deve tenere conto che, poiché un impulso di durata τ ha una banda valutabile qualitativamente come $B \cong 1/\tau$, a parità di ampiezza, se si diminuisce τ da un lato diminuisce l'ampiezza delle componenti spettrali del treno di impulsi (CAPITOLO 1, LABORATORIO DIDATTICO 1) e dall'altro aumenta l'attenuazione del cavo, in quanto aumenta la frequenza massima, per cui non è possibile impiegare impulsi di durata molto breve se il cavo presenta un'attenuazione consistente in quanto essi potrebbero essere totalmente attenuati.

Procedimento

a) Note le caratteristiche del cavo fornite dal costruttore è possibile determinare i seguenti parametri:

- il fattore di velocità $F_v = \frac{v_{\%}}{100} = 66/100 = 0,66$ e la velocità di propagazione dei segnali $v_p = 0,66 \cdot 3 \cdot 10^8 = 1,98 \cdot 10^8$ m/s;
- il tempo di propagazione e il tempo di andata e ritorno (Δt):

$$t_p = \frac{l}{v_p} = \frac{25}{1,98 \cdot 10^8} \cong 0,126 \mu\text{s} \rightarrow \Delta t = 2t_p \cong 0,252 \mu\text{s}$$

- l'attenuazione del cavo alla frequenza di 1 MHz, frequenza fondamentale del segnale a treno di impulsi, che si calcola con la FORMULA 3.14:

$$A_{cavo} \cong \left(\frac{A_{sp}}{l_{rif}} \cdot \sqrt{\frac{f_s}{f_{rif}}} \right) \cdot l = \left(\frac{1,8}{100} \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6}} \right) \cdot 25 \cong 0,14 \text{ dB}$$

l'attenuazione del cavo alla frequenza di 5 MHz, frequenza massima considerata per un impulso di durata $\tau = 0,2 \mu\text{s}$, vale:

$$A_{cavo} \cong \left(\frac{A_{sp}}{l_{rif}} \cdot \sqrt{\frac{f_s}{f_{rif}}} \right) \cdot l = \left(\frac{1,8}{100} \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6}} \right) \cdot 25 \cong 0,32 \text{ dB}$$

l'attenuazione si può ritenere trascurabile.

Il generatore può quindi essere impostato per produrre un treno di impulsi aventi durata (τ) e periodo (T) tali da soddisfare la condizione che permette di rendere distinguibili gli impulsi riflessi da quelli forniti dal generatore:

$$\tau < \Delta t < T$$

Definiamo ora le caratteristiche del generatore e del segnale da esso prodotto:

- impedenza di uscita $Z_{OUT} = 50 \Omega$;
 - segnale a treno di impulsi (ottenibile variando il duty cycle di un'onda quadra unipolare) caratterizzato da: ampiezza di un impulso $A = 5 \text{ V}$; periodo $T = 1 \mu\text{s}$; durata di un impulso $\tau = 0,2 \mu\text{s}$, corrispondente a un duty cycle $D = 20\%$.
- b) Visualizziamo il segnale fornito dal generatore a vuoto, collegando direttamente l'oscilloscopio al generatore e verifichiamo che il segnale abbia effettivamente le caratteristiche desiderate. Se il generatore è in grado di fornire anche il segnale di trigger colleghiamo l'uscita TRIGGER OUT del generatore all'ingresso TRIGGER EXT (trigger esterno) dell'oscilloscopio in modo da ottenere un segnale visualizzato più stabile. A seconda della qualità del generatore il segnale può presentare una certa distorsione (FIGURA A.2, a pagina seguente).
- c) Colleghiamo il generatore al cavo coassiale sotto esame e poniamo in parallelo l'oscilloscopio (verificando che l'impedenza dell'oscilloscopio sia sufficientemente elevata da essere assimilabile a un circuito aperto, per esempio dovrebbe essere $R_{IN} \cong 1 \text{ M}\Omega$), inviando il segnale presente in ingresso al cavo anche al canale 1 (CH1) dell'oscilloscopio.

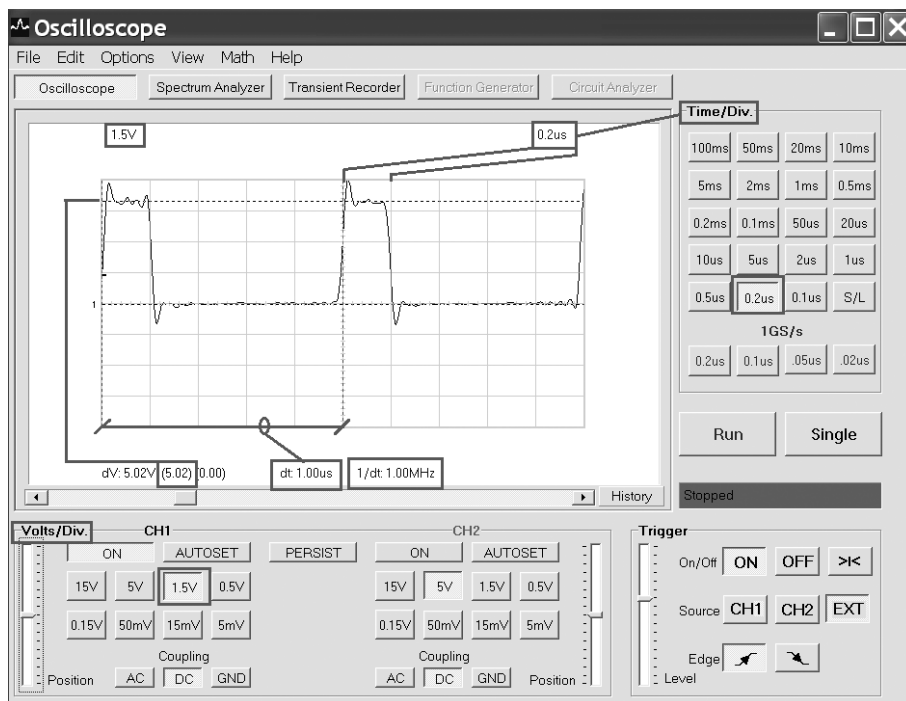


FIGURA A.2 Segnale fornito dal generatore a vuoto.

d) Impostiamo l'oscilloscopio in modo da avere una buona visualizzazione dei segnali e analizziamo il segnale prodotto. Al variare del carico (per esempio utilizzando delle resistenze da $100\ \Omega$ poste in parallelo o in serie, nonché cortocircuitando o lasciando aperta la terminazione del cavo) possiamo distinguere i seguenti casi.

- **Linea adattata, chiusa su un carico** $Z_u = 50\ \Omega$ (FIGURA A.3A, a pagina seguente). Gli impulsi in ingresso al cavo hanno ampiezza pari alla metà di quelli prodotti dal generatore a vuoto $A_{IN} \cong 2,5\ \text{V}$, possono essere distorti ma non si evidenziano impulsi riflessi; in realtà se il processo di produzione del cavo da parte del costruttore non è stato accurato si possono avere delle modifiche dell'impedenza lungo il cavo, dovute per esempio a variazioni locali nella geometria dei conduttori e/o a disomogeneità dei materiali; in questo caso si hanno delle piccole riflessioni la cui entità viene quantificata misurando l'*attenuazione di riflessione strutturale* o *Structural Return Loss* (SRL), che spesso è un dato del costruttore; più alta è l'SRL e migliore è il cavo; inoltre a frequenze molto elevate anche i connettori possono causare riflessioni.
- **Linea disadattata, chiusa su un carico** $Z_u > 50\ \Omega$ (FIGURA A.3B, a pagina seguente). Sull'oscilloscopio si evidenziano degli impulsi riflessi aventi la *stessa polarità* di quelli forniti dal generatore; l'ampiezza degli impulsi riflessi aumenta all'aumentare di Z_u .
- **Linea a circuito aperto** (il carico è stato scollegato, FIGURA A.3C, a pagina seguente). Sull'oscilloscopio si evidenziano degli impulsi riflessi aventi la stessa polarità di quelli forniti dal generatore e ampiezza sostanzialmente uguale (se l'attenuazione è trascurabile come in questo caso).

- **Linea disadattata, chiusa su un carico** $Z_u < 50 \Omega$. Sull'oscilloscopio si evidenziano degli impulsi riflessi aventi la *polarità opposta* rispetto a quelli forniti dal generatore; l'ampiezza degli impulsi riflessi aumenta al diminuire di Z_u .
- **Linea con terminazione in cortocircuito** (FIGURA A.3D). Sull'oscilloscopio si evidenziano degli impulsi riflessi aventi *polarità opposta* rispetto a quelli forniti dal generatore e ampiezza sostanzialmente uguale.

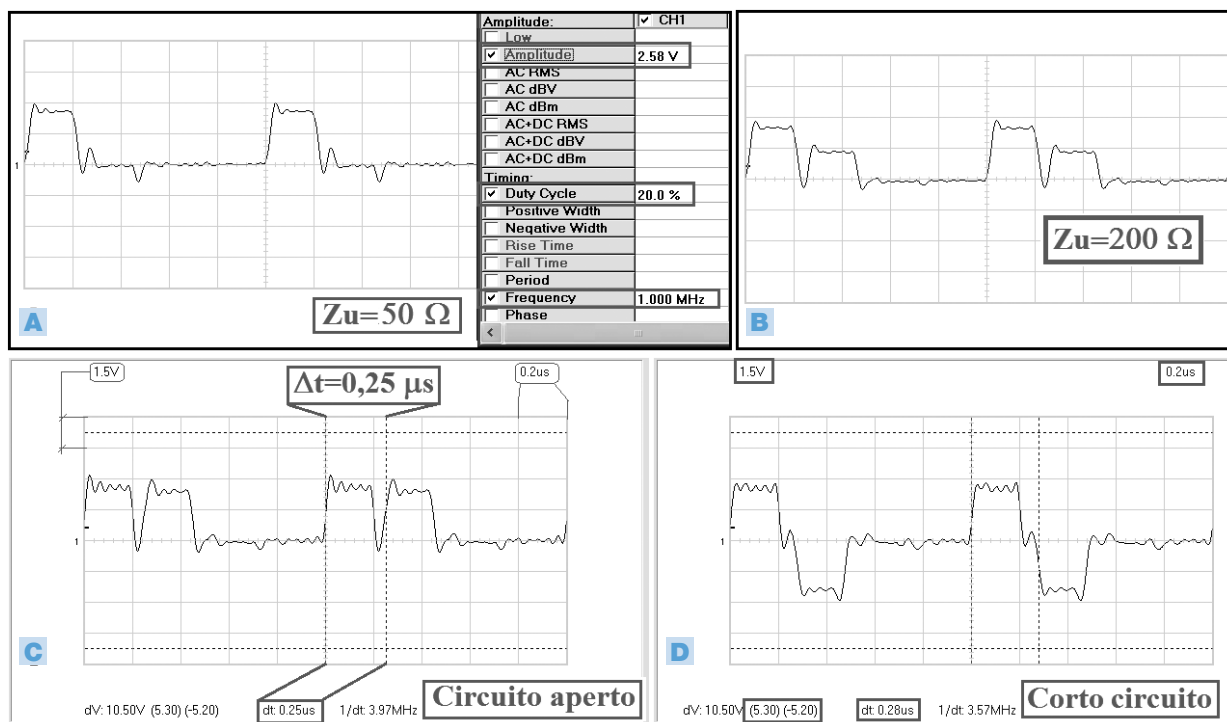


FIGURA A.3 Segnale in ingresso al cavo al variare del carico applicato in uscita.

Determinazione della lunghezza del cavo o della distanza alla quale si è verificato un danneggiamento

Nel caso in cui la lunghezza del cavo non sia nota oppure si debba determinare la distanza alla quale si è verificato un danneggiamento del cavo (per esempio è stato interrotto) è possibile determinare ciò misurando il tempo di ritardo Δt fra impulso trasmesso e impulso riflesso che giunge in ingresso. La misura del ritardo andrebbe effettuata fra due punti del segnale posti all'incirca a metà dell'ampiezza dell'impulso, in modo da minimizzare l'effetto delle distorsioni. Per esempio dalla FIGURA A.3 si rileva che nel caso di cavo con terminazione aperta (interrotto) si misura un ritardo di $\Delta t \cong 0,25 \text{ ns}$ per cui, nota la velocità di propagazione v_p , si calcola la lunghezza del cavo (o la distanza del punto di interruzione) con la formula

$$l = v_p \cdot \frac{\Delta t}{2} = (1,98 \cdot 10^8) \cdot \frac{0,25 \cdot 10^6}{2} \cong 25 \text{ m}$$

Se si dispone di un oscilloscopio digitale è possibile porre il trigger in modalità *SINGLE shot* per visualizzare e memorizzare un singolo evento, facilitando così la misura.

Determinazione della velocità di propagazione e del fattore di velocità

Se è nota la lunghezza del cavo ma non la velocità di propagazione è possibile calcolarla come $v_p = \frac{2l}{\Delta t} = \frac{50}{0,25 \cdot 10^{-6}} \cong 2 \cdot 10^8$ m/s; si ricavano così la velocità percentuale (o rapporto di velocità, velocity ratio) e il fattore di velocità $v_{\%} = \frac{v_p}{c} = \frac{2 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^8} \cdot 100 \cong 66 \%$; $F_v = \frac{v_{\%}}{100} \cong 0,66$.

Metodo alternativo per la misura di Δt

La determinazione di Δt e quindi del tempo di propagazione ($t_p = \Delta t/2$) può anche essere effettuata impiegando un'onda quadra invece di un treno di impulsi; per esempio nel caso di terminazione aperta si può operare nel seguente modo:

- si invia in ingresso un segnale a onda quadra con un periodo T molto maggiore del ritardo introdotto dalla linea, per esempio $T = 10 \mu\text{s}$ a cui corrisponde una frequenza fondamentale di 100 kHz;
- l'onda quadra si propaga lungo il cavo e quando il suo fronte di salita arriva sulla terminazione aperta viene totalmente riflessa e ritorna sul generatore in fase, sommandosi al segnale emesso dal generatore stesso, per cui si ha un brusco innalzamento della tensione di ingresso², il cui valore all'incirca raddoppia (se l'attenuazione è trascurabile);
- l'intervallo di tempo $\Delta t = 2 t_p$ può essere determinato misurando l'intervallo di tempo che intercorre fra il fronte di salita del segnale fornito dal trasmettitore e l'istante in cui si verifica il brusco aumento della tensione in ingresso. Come mostrato in FIGURA A.4, il valore trovato coincide con quello misurato tramite gli impulsi riflessi.

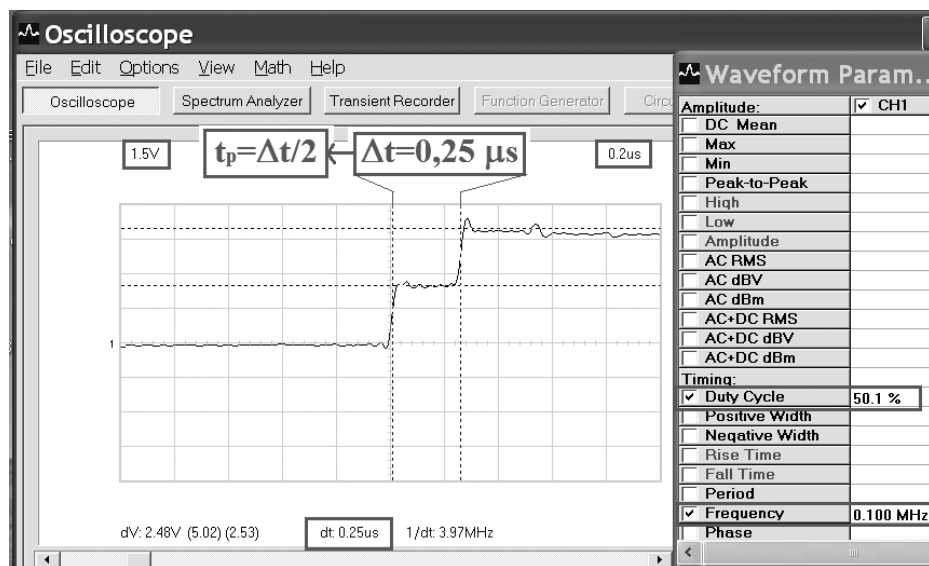


FIGURA A.4 Misura del ritardo di propagazione applicando un segnale a onda quadra.

² Se la linea fosse terminata su un cortocircuito allora si noterebbe una brusca diminuzione del segnale in ingresso alla linea, che tenderebbe a zero.

1.1 Simulazione con MicroCap

È anche possibile simulare la prova con MicroCap, seguendo le indicazioni dei LABORATORI DIDATTICI 1 e 2 del CAPITOLO 3. Per il cavo coassiale utilizziamo il componente TLINE con modello *Lossy* (linea reale che attenua), a cui si impongono i seguenti valori: PART = Cavo_RG213; MODEL = Cavo_50; Lossy. I valori di R , L , C possono essere determinati nel seguente modo.

- Il valore di C lo si determina dal catalogo del costruttore $C = 101$ pF/m, per tenere conto della tolleranza indicata dal costruttore; se il valore di C non è fornito, ma è nota la velocità di propagazione, lo si determina con la seguente relazione³ $C = \frac{1}{v_p \cdot Z_0} = \frac{1}{1,98 \cdot 10^8 \cdot 50} = 101$ pF/m.

- Noto il valore di C e di Z_0 è possibile determinare il valore di L utilizzando la relazione $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ da cui si ha:

$$L = Z_0^2 \cdot C \rightarrow L = 50^2 \cdot (101 \cdot 10^{-12}) \cong 253 \text{ nH/m}$$

- Il valore di R può essere determinato con la seguente relazione⁴:

$$R = \alpha_N \cdot 2 \cdot Z_0 = \frac{\alpha_{\text{dB}}}{8,686} \cdot 2 \cdot Z_0 \Rightarrow R = \frac{0,006}{8,686} \cdot 100 = 0,069 \Omega/\text{m}$$

dove α_N è la costante di attenuazione espressa in Neper/m, il cui valore può essere determinato dividendo per 8,686 il valore della costante di attenuazione α (in dB/m) che a 1 MHz vale: $\alpha = \frac{A_{\text{cavo}}}{l_{\text{cavo}}} = \frac{0,14}{25} \cong 0,006$ dB/m.

Specifichiamo anche la lunghezza (*LENght*) del cavo⁵ espressa in metri: LEN = 25. Per maggiore chiarezza inseriamo il testo *IN* e *OUT* rispettivamente in ingresso e in uscita dalla linea.

Come generatore utilizziamo un generatore di impulsi (*Analog primitives*, *Waveform Sources*, **PULSE SOURCE**) configurato per fornire il segnale a treno di impulsi sopra indicato, ottenuto ponendo nella fase di inserimento del generatore⁶ P1 = 0; P2 = 1E-9, P3 = 200ns; P4 = 200.1ns; P5 = 1us.

Con l'opzione *STEPPING* dell'analisi *Transient* è possibile far variare il valore di R_u , per esempio fra $R_u = 0$ e $R_u = 100 \Omega$ a passi di 25Ω , per avere conferma della presenza o meno degli impulsi riflessi nonché della loro polarità: non vi sono impulsi riflessi solo se $R_u = 50 \Omega$ (FIGURA A.5).

³ Infatti per una linea si ha $v_p = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ e $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$, da cui si ha $L = Z_0^2 \cdot C$; sostituendo si ottiene $v_p = \frac{1}{\sqrt{Z_0^2 \cdot C^2}} \Rightarrow C = \frac{1}{v_p \cdot Z_0}$.

⁴ Nel caso di cavo RG 58 si ottiene $R = 0,173$.

⁵ Non mettiamo l'unità di misura «m» dopo il valore della lunghezza perché viene interpretata come «milli».

⁶ Non poniamo P1 = P2 = 0 (e P3 = P4) perché i segnali impulsivi di un generatore reale, che si vuole simulare, non hanno fronti perfettamente verticali bensì presentano tempi di salita e di discesa non nulli.

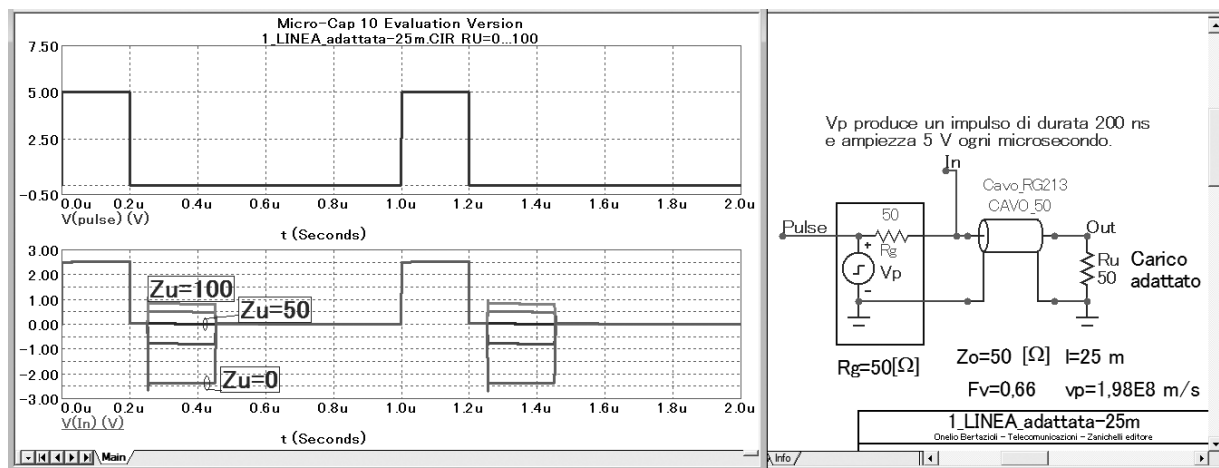


FIGURA A.5 Andamento del segnale fornito a vuoto dal generatore (in alto) e del segnale in ingresso al variare del carico.

1.2 Misura dell'impedenza caratteristica Z_0 della linea

Procedimento (si faccia riferimento al LABORATORIO DIDATTICO 2 del CAPITOLO 3) Impostare il banco di misura e la strumentazione come nella prova precedente, terminando la linea con un potenziometro da 200 Ω .

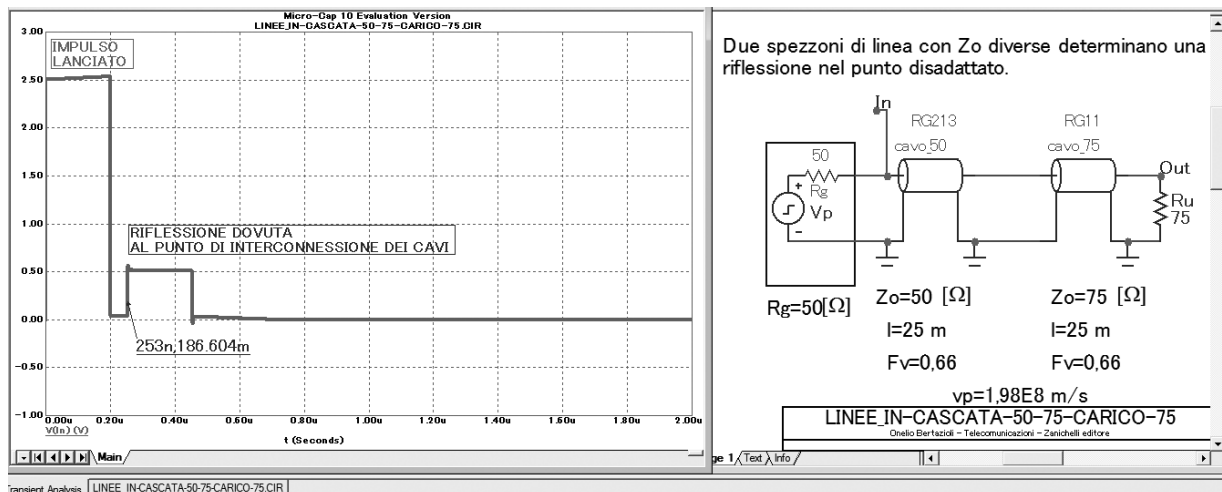
- 1) Chiudere completamente il potenziometro ($R \cong 0 \Omega$) e osservare la presenza di impulsi riflessi di polarità opposta rispetto a quelli trasmessi.
- 2) Regolare il potenziometro fino a osservare sull'oscilloscopio la scomparsa degli impulsi riflessi; ora la resistenza del potenziometro è uguale all'impedenza caratteristica della linea e quindi la linea risulta adattata, per cui gli impulsi si dissipano completamente sul carico.
- 3) Scollegare il potenziometro dalla linea e misurarne il valore con un multimetro; tale valore corrisponde all'impedenza caratteristica della linea.

1.3 Riflessioni causate da discontinuità di impedenza fra due cavi coassiali interconnessi

Analizziamo ora la situazione in cui, per errore, si interconnettono due spezzoni di cavo coassiale in cascata, aventi però impedenze caratteristiche diverse, per esempio un cavo RG213 ($Z_0 = 50 \Omega$) e un cavo RG11 ($Z_0 = 75 \Omega$). Si utilizzino cavi di lunghezza pari a circa 25 m.

- a) Il generatore presenta un'impedenza di uscita uguale alla Z_0 del primo coassiale, mentre il secondo coassiale è chiuso sul proprio carico adattato ($Z_u = 75 \Omega$).

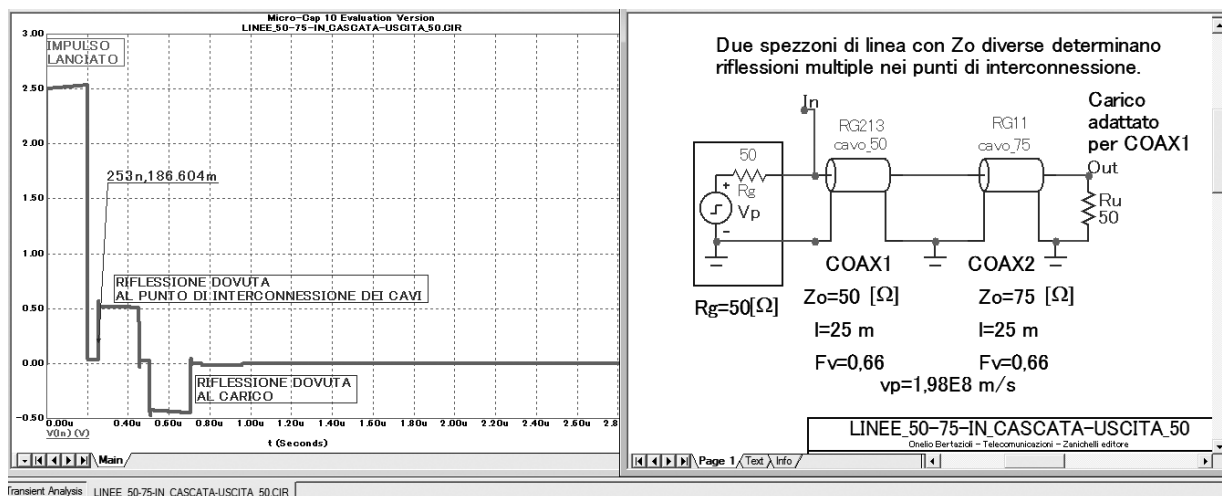
Problema rilevato: il punto di interconnessione dei due coassiali è disadattato in quanto la Z_{IN} del secondo coassiale è pari a $Z_{IN-2} = 75 \Omega$ per cui si ha una riflessione di segnale in quel punto (FIGURA A.6, a pagina seguente). Ciò permette anche di comprendere come eventuali imperfezioni costruttive di un cavo possono determinare riflessioni di segnale anche se il carico risulta nominalmente adattato.



b) Il secondo coassiale è terminato su un carico disadattato.

Problema rilevato: se anche il carico risulta disadattato si noteranno **riflessioni multiple** dovute al fatto che ogni punto disadattato determina una riflessione di segnale (FIGURA A.7).

FIGURA A.6 Linee con Z_0 diverse, ma con Z_u adattata per il secondo coassiale e Z_g adattata per il primo coassiale.



c) Entrambi i cavi coassiali sono disadattati in ingresso e in uscita per esempio perché $Z_g = 50 \Omega$ e $Z_{0-1} = 75 \Omega$; $Z_u = 75 \Omega$ e $Z_{0-2} = 50 \Omega$; di conseguenza risultano disadattati sia i punti di ingresso e uscita, dato che $Z_g \neq Z_{0-1}$ e $Z_u \neq Z_{0-2}$, sia il punto di interconnessione fra le due linee, in quanto l'impedenza d'ingresso della seconda linea è diversa dall'impedenza di uscita della prima linea.

Problema rilevato: se entrambi i cavi sono disadattati si noteranno numerose **riflessioni multiple** di ampiezza via via decrescente (FIGURE A.8 e A.9, a pagina seguente), dovute al fatto che ogni punto disadattato determina una riflessione di segnale e in questo caso anche il generatore determina una ulteriore riflessione del segnale che ritorna indietro dagli altri punti disadattati. Per evidenziare maggiormente il fenomeno si può lasciare a circuito aperto il secondo cavo.

FIGURA A.7 Linee con Z_0 diverse chiuse su un carico disadattato, ma con generatore adattato.

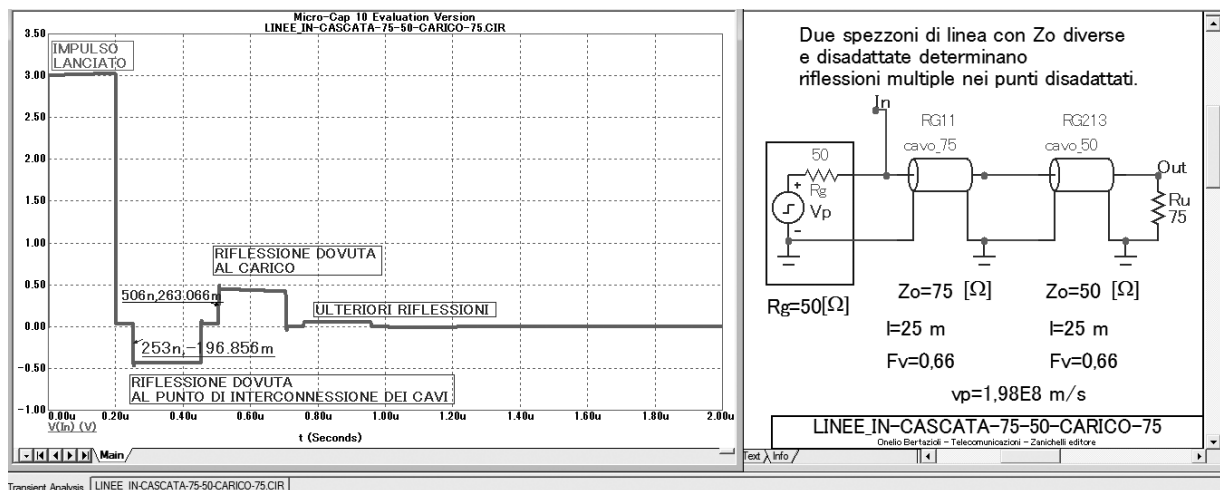


FIGURA A.8 Riflessioni multiple causate sia dall'interconnessioni di due cavi con Z_0 diversa sia dal disadattamento sul carico e sul generatore.

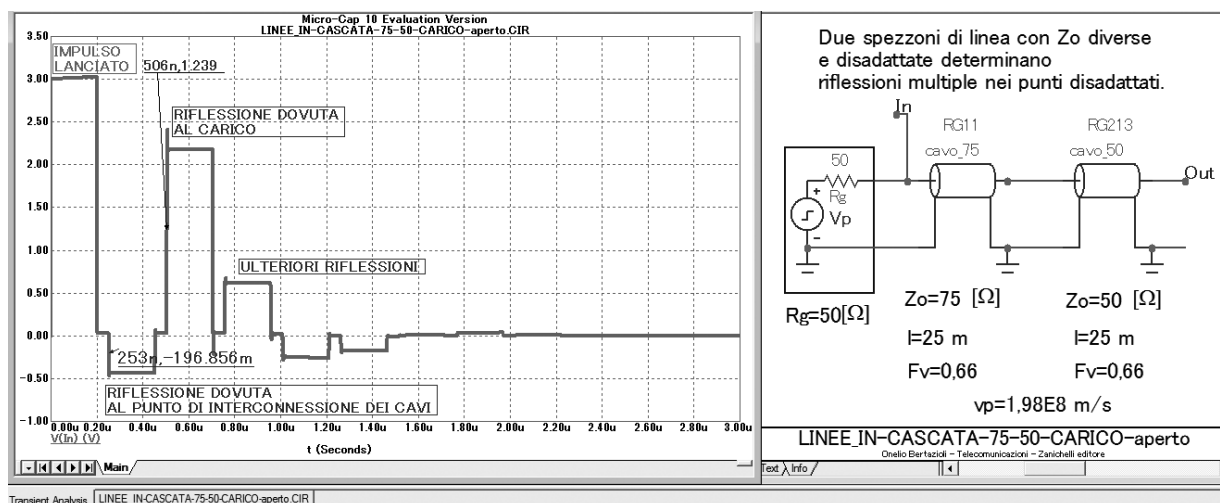


FIGURA A.9 Riflessioni multiple causate sia dall'interconnessioni di due cavi con Z_0 diversa sia dalla terminazione aperta.

Risultato delle simulazioni con MicroCap

Le esperienze possono anche essere svolte con MicroCap, aggiungendo un secondo cavo coassiale di tipo RG 11/U ottenuto configurando i seguenti valori (per unità di lunghezza) in TLINE: $C = 67,3$ pF; $L = 379$ nH, $R = 0,08$.

In questo modo si simula un cavo RG 11/U avente le seguenti caratteristiche: $Z_0 = 75 \Omega$, $v_v = 66\%$ ($F_v = 0,66$), attenuazione a 100 MHz = 6,5 dB/100m.

2 Verifica delle onde stazionarie nelle linee

In questa esperienza si studia il comportamento di una linea in regime sinusoidale, determinando le caratteristiche dell'onda stazionaria che si instaura lungo la linea quando è disadattata a causa della presenza contemporanea dell'onda diretta e dell'onda riflessa, che si sommano vettorialmente.

Procedimento

- 1) Si realizza il banco di misura di FIGURA A.1, ma si imposta il generatore di funzione per fornire un *segnale sinusoidale* di ampiezza 5 V e frequenza 2 MHz.
- 2) Si collega il generatore all'oscilloscopio e si misura la tensione (V_g) prodotta dal generatore a vuoto, la cui escursione picco-picco è di 10 V circa (FIGURA A.10). Infatti l'oscilloscopio presenta un'impedenza di ingresso molto elevata (dell'ordine dei $M\Omega$), assimilabile a un circuito aperto.
- 3) Si collega il generatore al cavo e si pone come carico una resistenza uguale all'impedenza caratteristica del cavo. Con l'oscilloscopio si misura la tensione in ingresso al cavo e si rileva un valore pari alla metà di quella di generatore a vuoto ($V_{IN} = V_g/2$). Si varia la frequenza del segnale in ingresso e si misura la tensione, che non deve presentare variazioni di ampiezza significative.
- 4) Si disconnette il carico e si lascia la terminazione del cavo a **circuito aperto** per valutare l'effetto del disadattamento: nasce un'onda riflessa che combinandosi vettorialmente con l'onda diretta determina l'instaurarsi dell'onda stazionaria.
- 5) Per verificare l'andamento dell'onda stazionaria si dovrebbe misurare l'ampiezza della tensione lungo tutta la linea, cosa che richiederebbe la messa a nudo dei conduttori in numerosi punti lungo tutto il cavo; si preferisce quindi osservare come varia l'ampiezza della tensione in ingresso alla linea quando *a parità di ampiezza* si varia la frequenza del segnale fornito dal generatore.
- 6) Partendo da una frequenza relativamente bassa, si nota che aumentando la frequenza si ha una diminuzione dell'ampiezza del segnale in ingresso alla linea fino a un valore minimo raggiunto a una certa frequenza f_N (il minimo tende a zero se l'attenuazione è trascurabile).
- 7) Alla frequenza f_N si ha così un **nodo** (cioè un minimo) dell'onda stazionaria all'ingresso e un ventre (un massimo) dell'onda stazionaria sulla terminazione aperta del cavo; la distanza tra ventre e nodo è di $\lambda/4$ (m), che a questa frequenza risulta uguale alla lunghezza l (m) della linea; la relazione che lega la frequenza f_N , la velocità di propagazione v_p e lunghezza della linea l è quindi:

$$f_N = \frac{v_p}{4l}$$

- 8) Aumentando la frequenza oltre f_N si rileva che l'ampiezza del segnale in ingresso tende di nuovo ad aumentare e in ingresso raggiunge il massimo, detto **ventre**, a una frequenza $f_v = 2f_N$, alla quale la lunghezza l della linea risulta uguale a $\lambda/2$.
- 9) Aumentando ulteriormente la frequenza si vedrà l'ampiezza della tensione d'ingresso calare e aumentare alternativamente, a seconda che all'ingresso della linea si stabilisca un nodo o un ventre dell'onda stazionaria di tensione.

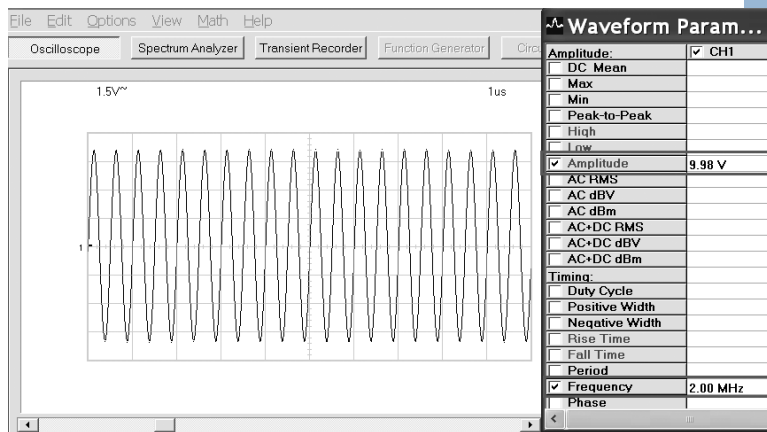


FIGURA A.10 Segnale prodotto dal generatore a vuoto: ampiezza picco-picco = 10 V, $f = 2$ MHz.

Nel caso in esame, in cui si impiega un cavo coassiale RG 213 lungo 25 m (che ha una velocità percentuale del 66%) si ottengono i seguenti risultati.

- La frequenza di segnale alla quale si ha un **nodo in ingresso e un ventre in uscita** perché risulta $l = \lambda/4$ è pari a $f_N = \frac{v_p}{4l} = \frac{0,66 \cdot 3 \cdot 10^8}{4 \cdot 25} \cong 2$ MHz.

Come mostrato in FIGURA A.11 a questa frequenza si rileva in ingresso una tensione molto piccola (minore di 0,3 V picco-picco), nonostante il generatore fornisca un segnale sinusoidale con escursione picco-picco di 10 V: l'impedenza d'ingresso del cavo è quindi assimilabile a un *cortocircuito* anche se la sua terminazione è a *circuito aperto*.

- La frequenza alla quale si ha un **ventre in ingresso e un nodo in uscita**, in quanto risulta $l = \lambda/2$, è $f_v = 2f_N = 4$ MHz; a questa frequenza si rileva in ingresso una tensione avente escursione picco-picco all'incirca uguale a quella di generatore (se l'attenuazione è trascurabile), (FIGURA A.12, a pagina seguente).

A questa frequenza il cavo presenta un'impedenza d'ingresso assimilabile a quella del *circuito aperto* che si ha in uscita.

- La frequenza di segnale alla quale si ha nuovamente un **nodo in ingresso e un ventre in uscita** in quanto risulta $l = (\lambda/2) + (\lambda/4) = 3\lambda/4$ è $f = 3f_N = 6$ MHz; a questa frequenza la tensione di ingresso ha ampiezza leggermente maggiore di quella che si ha a 2 MHz, in quanto l'attenuazione del cavo è aumentata per cui il segnale riflesso ritorna in ingresso più attenuato (FIGURA A.13, a pagina seguente). A questa frequenza la Z_{IN} del cavo è nuovamente molto piccola (vicina al cortocircuito).
- Portando la frequenza a 8 MHz si ha un **ventre in ingresso e un nodo in uscita** in quanto risulta $l = \lambda$.

Misurando il valore di picco rilevato in corrispondenza del ventre (massimo), pari a circa 5 V, e quello rilevato in corrispondenza del nodo (minimo), pari a circa 0,1 V, è anche possibile determinare il valore del ROS:

$$ROS = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{5}{0,14} = 33$$

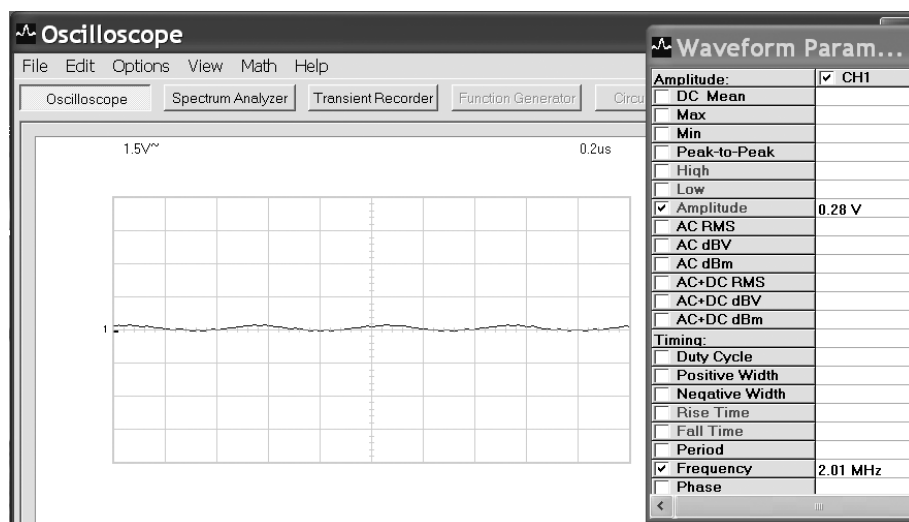


FIGURA A.11 Nodo di tensione in ingresso: ampiezza picco-picco < 0,28 V, $f = 2$ MHz.

Un valore così elevato di ROS sta appunto a indicare che la linea è terminata a circuito aperto (oppure è in cortocircuito), in quanto si ha la riflessione totale dell'onda incidente. Se l'attenuazione della linea fosse nulla allora si sarebbe avuto $V_{\max} = 5\text{ V}$, $V_{\min} = 0$ e $\text{ROS} = \infty$.

Una variante dell'esperienza può essere la seguente:

- si termina la linea su un cortocircuito, facendo variare la frequenza da 2 MHz e 4 MHz circa; si osserva che le frequenze a cui si verificano i nodi e i ventri dell'onda stazionaria risultano scambiate rispetto al caso di terminazione a circuito aperto.

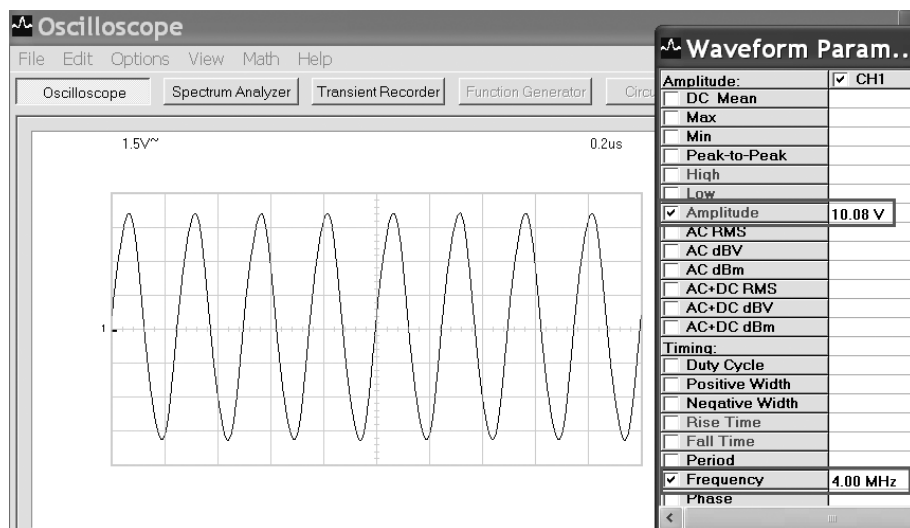


FIGURA A.12 Ventri di tensione in ingresso: ampiezza picco-picco = 10 V, $f = 4$ MHz.

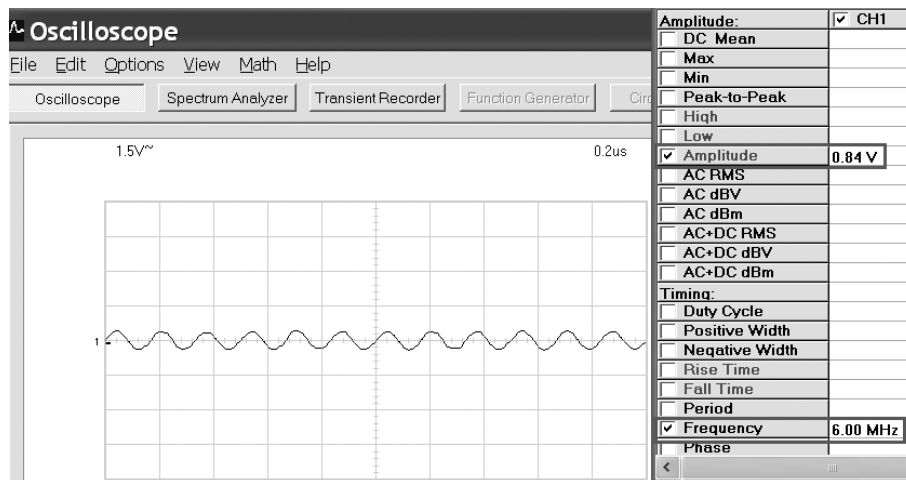


FIGURA A.13 Nodo di tensione in ingresso: ampiezza picco-picco = 0,84 V, $f = 6$ MHz.

2.1 Simulazione con MicroCap

In FIGURA A.14, a pagina seguente, si riporta una simulazione dell'esperienza effettuata con MicroCap. Il circuito è ottenuto cambiando il generatore, che ora è di tipo sinusoidale (SINE SOURCE) ed eliminando la resistenza di carico nel circuito di FIGURA A.5.

Il generatore viene configurato per produrre, a vuoto, un segnale con valore di picco $A_p = 5$ V, frequenza $f = 2$ MHz.

Con l'analisi *Transient* si fa tracciare l'andamento della tensione di generatore a vuoto e della tensione di ingresso al variare della frequenza. Le FIGURE A.14 e A.15, a pagina seguente, mostrano che:

- quando la frequenza è pari a $f_N = 2$ MHz l'onda stazionaria di tensione in ingresso presenta un **nodo**; infatti la lunghezza d'onda è pari

$$\lambda_N = \frac{v_p}{f_N} = \frac{0,66 \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^6} \cong 100 \text{ m, per cui la lunghezza del cavo è pari a } l = \lambda/4;$$

a questa frequenza la tensione in ingresso assume il valore di ampiezza minimo (**nodo**); infatti l'onda diretta giunge all'uscita e viene completamente riflessa, per cui quando ritorna in ingresso ha subito uno sfasamento totale pari a $\theta = \beta \cdot 2l = \frac{2\pi}{\lambda_N} \cdot \frac{2 \cdot \lambda_N}{4} = \pi$, dove $\beta = 2\pi/\lambda_N$ è la costante di fase (in rad/m); in ingresso l'onda riflessa è in opposizione di fase con l'onda diretta per cui si sottrae a essa determinando un minimo (nodo) dell'onda stazionaria;

- quando la frequenza del segnale è pari a $f_V = 4$ MHz si ha un **ventre** di tensione dell'onda stazionaria; infatti la lunghezza d'onda è pari a

$$\lambda_V = \frac{v_p}{f_V} = \frac{0,66 \cdot 3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^6} \cong 50 \text{ m, per cui la lunghezza del cavo è pari a } l = \lambda/2;$$

a questa frequenza si ha che la tensione in ingresso assume il valore di ampiezza *massimo* (ventre); lo sfasamento totale fra andata e ritorno è pari a $\theta = \beta \cdot 2l = \frac{2\pi}{\lambda_V} \cdot \frac{2 \cdot \lambda_V}{2} = 2\pi$; in ingresso l'onda riflessa è in fase con l'onda diretta per cui si somma a essa e determina un massimo (ventre) dell'onda stazionaria;

- quando la frequenza del segnale è pari a $f_{N'} = 6$ MHz si ha nuovamente un **nodo** di tensione dell'onda stazionaria; la lunghezza d'onda è pari

$$\lambda_{V'} = \frac{v_p}{f_{N'}} = \frac{0,66 \cdot 3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^6} \cong 33 \text{ m, per cui la lunghezza del cavo è pari a } l = 3\lambda/4;$$

la tensione in ingresso assume il valore di ampiezza *minimo* (nodo) poiché lo sfasamento totale fra andata e ritorno è pari a

$$\theta = \beta \cdot 2l = \frac{2\pi}{\lambda_{N'}} \cdot \frac{2 \cdot 3\lambda_{N'}}{4} = 3\pi, \text{ a meno di multipli di } 2\pi \text{ si ha così } \theta = \pi; \text{ in}$$

ingresso l'onda riflessa è in opposizione di fase con l'onda diretta per cui si sottrae a essa e determina un minimo (nodo) dell'onda stazionaria.

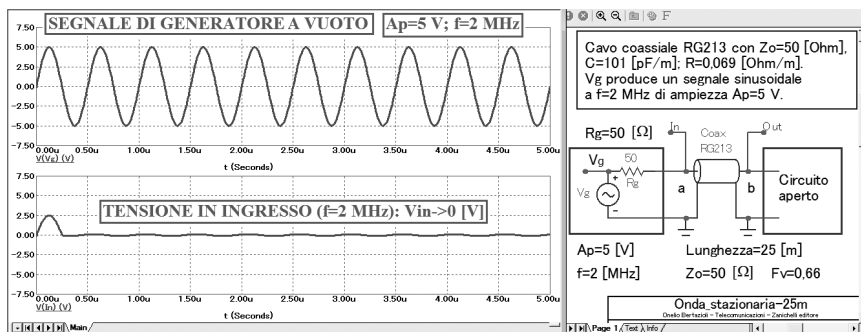


FIGURA A.14 Segnale prodotto dal generatore a vuoto e nodo di tensione in ingresso a $f = 2$ MHz.

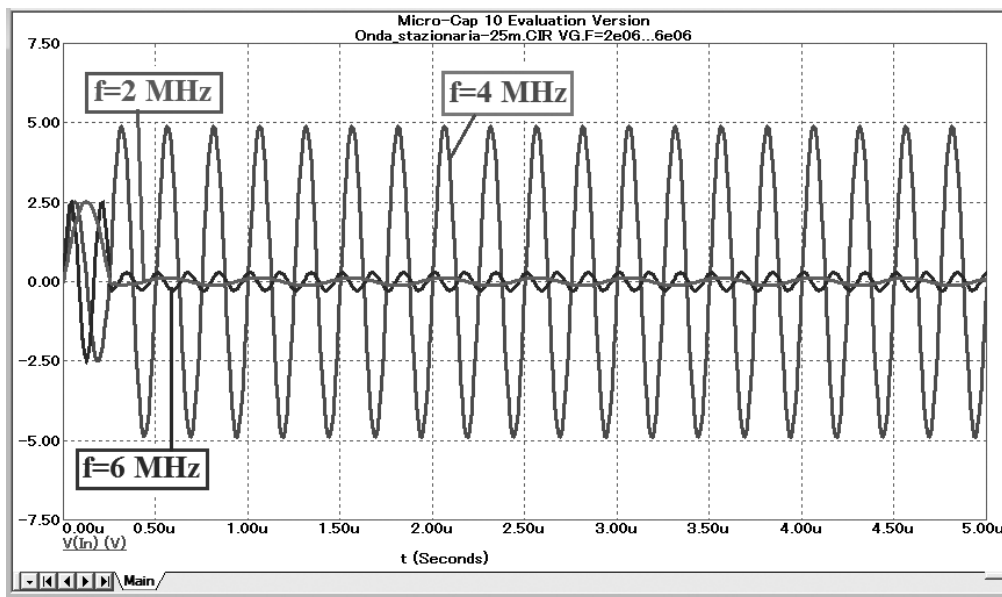


FIGURA A.15 Nodi e ventri dell'onda stazionaria dati dalla tensione di ingresso per $f_1 = 2$ MHz; $f_2 = 4$ MHz, $f_3 = 6$ MHz, ottenuti con lo STEPPING della frequenza di generatore fra 2 MHz e 6 MHz, a passi di 2 MHz.