

**M149 - ESAME DI STATO DI ISTITUTO TECNICO INDUSTRIALE**

Indirizzo: ELETTRONICA E TELECOMUNICAZIONI

CORSO DI ORDINAMENTO

**Tema di:** TELECOMUNICAZIONI

*Testo valevole per i corsi di ordinamento e per i corsi del progetto "SIRIO"*

**Tema 2**

Un segnale dati, costituito da un'onda quadra, modula a 1200 bit/s una portante sinusoidale di periodo 0,1 ms effettuando una modulazione digitale ASK-OOK (Amplitude Shift Keying – On Off Keying) con un modulatore bilanciato a due diodi.

Il candidato, formulate le necessarie ipotesi aggiuntive:

1. disegni lo schema elettrico del modulatore e ne illustri il funzionamento;
2. scelga il tipo d'onda quadra e le ampiezze della portante e della modulante;
3. disegni in opportuna scala lo spettro di modulazione, indicando il valore delle ampiezze delle righe;
4. Indichi il valore della banda passante e ne giustifichi l'estensione;
5. illustri un sistema di demodulazione, che possa rilevare il segnale dati in ricezione;
6. esprima delle considerazioni in riferimento all'effettiva utilizzazione del sistema di trasmissione proposto indicandone limiti e pregi nelle prestazioni.

Il candidato, infine, utilizzando un modulatore bilanciato a quattro diodi effettui una modulazione 2PSK (Phase Shift Keying) e confronti le caratteristiche delle due modulazioni.

**Soluzione tema n° 2**  
(a cura del prof. Onelio Bertazioli)

Per la trattazione dettagliata delle tematiche inerenti il tema d'esame si rimanda alle Unità 1, 4, 5, 7, 8 del libro di testo

**Onelio Bertazioli**  
**Telecomunicazioni vol. B (2ª edizione)**  
**Zanichelli**

1. La modulazione digitale di ampiezza OOK consiste nell'emettere la portante in corrispondenza di un "1" logico e nel non trasmettere nulla in corrispondenza di uno "0" logico (Unità 8 par. 8.5). La modulazione può quindi essere ottenuta in vari modi: moltiplicando un segnale con codifica NRZ unipolare ( $1 \rightarrow +V_o$  [V];  $0 \rightarrow 0$  [V], Unità 7 par. 7.2.1), per la portante, oppure inviando la portante in ingresso a un interruttore elettronico comandato dal segnale dati ( $1 \rightarrow$  interruttore chiuso,  $0 \rightarrow$  interruttore aperto). In quest'ultimo caso l'interruttore può essere realizzato con una variante del modulatore bilanciato presentato nella figura 5.4 di pag. 101 (Unità 5, par. 5.3) in cui si impiegano solamente due diodi, il cui stato di apertura e chiusura è determinato dal segnale dati (con codifica NRZ bipolare:  $1 \rightarrow +V_o$  [V];  $0 \rightarrow -V_o$  [V]), figura 1.

Il principio di funzionamento è quindi il seguente: quando i diodi sono in conduzione in uscita si ha la portante, mentre quando i diodi sono in interdizione in uscita non si ha nulla. Il modulatore realizza in questo modo la modulazione OOK.

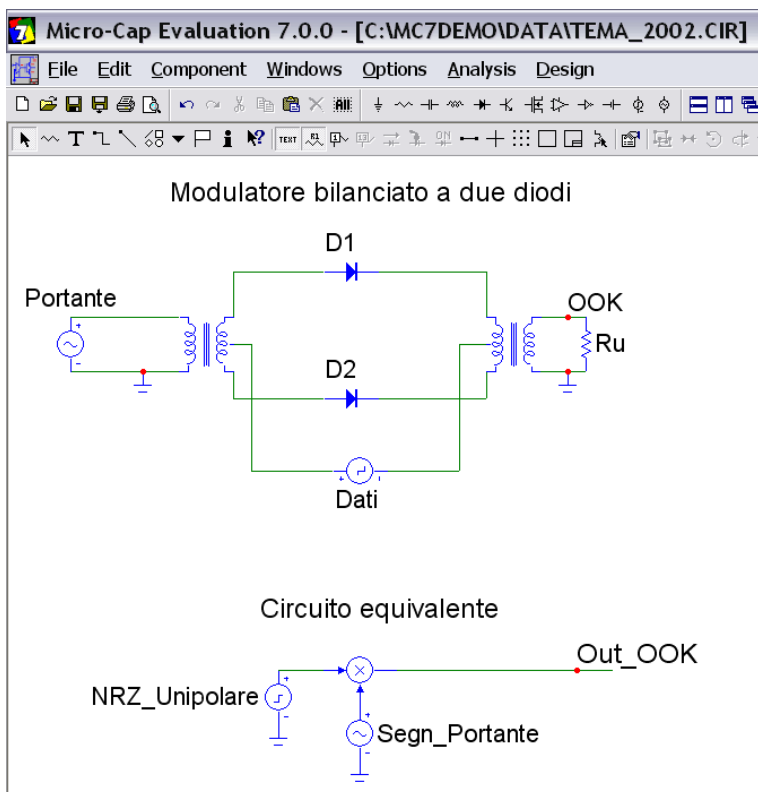


Figura 1 Modulatore OOK e suo circuito equivalente

2. Nel circuito di figura 1 il segnale dati ha il compito di determinare lo stato di conduzione o di interdizione dei diodi. A questo scopo è preferibile utilizzare un segnale dati con codifica NRZ bipolare, in modo da fissare con precisione lo stato di conduzione o interdizione dei diodi stessi, i quali non devono essere influenzati da transistori o segnali spuri. Inoltre l'ampiezza del segnale dati,  $|V_o|$ , deve essere molto maggiore di quella della portante, in quanto quest'ultima non deve influenzare lo stato di conduzione dei diodi.

Come segnale dati si sceglie perciò un'onda quadra a valor medio nullo avente un'escursione di 10 V, da  $V_0=+5V$  a  $-V_0=-5V$ , cioè un segnale digitale con codifica NRZ bipolare, mentre l'ampiezza della portante viene presa pari a:

$$A_p = |V_0|/10 = 0,5 \text{ V.}$$

In figura 4 si riporta una simulazione al computer (effettuata tramite la versione demo del programma MicroCap, scaricabile gratuitamente dal sito [www.spectrum-soft.com](http://www.spectrum-soft.com)) che evidenzia come l'uscita del modulatore di figura 1 sia effettivamente un segnale modulato OOK.

3. Analogamente a quanto indicato nell'Unità 5, par. 5.3, e nell'Unità 8 par. 8.5, lo spettro del segnale modulato può essere ricavato facilmente se si considera il segnale modulato stesso come ottenuto da un circuito equivalente che effettua il prodotto tra la portante e un segnale a onda quadra con codifica NRZ unipolare avente ampiezza  $A=1$  [V], come mostrato in figura 1.

Il segnale modulato si può quindi esprimere nel seguente modo:

Come indicato dalla formula (1.9) di pag. 9 (Unità 1), il segnale a onda quadra NRZ unipolare può essere espresso in serie di Fourier nel seguente modo:

$$s_{NRZ}(t) = \frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi} \cos(\omega_o t) - \frac{2A}{3\pi} \cos(3\omega_o t) + \frac{2A}{5\pi} \cos(5\omega_o t) + \dots$$

L'ampiezza dell'onda quadra,  $s_{NRZ}(t)$ , è  $A=1$  mentre la sua frequenza fondamentale è  $f_o=(1/2t_{bit})=600$  Hz, per cui sostituendo si ottiene la seguente espressione:

$$s_{NRZ}(t) = 0,5 + \frac{2}{\pi} \cos(2\pi \cdot 600 \cdot t) - \frac{2}{3\pi} \cos(2\pi \cdot 1800 \cdot t) + \frac{2}{5\pi} \cos(2\pi \cdot 3000 \cdot t) + \dots$$

La portante,  $s_p(t)$ , è invece caratterizzata da  $A_p=0,5$  V;  $f_p=10$  kHz.

Sostituendo si ottiene:

$$s_{OOK}(t) = 0,25 \cos(2\pi \cdot 10^4 \cdot t) + \frac{1}{\pi} \cos(2\pi \cdot 10^4 \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot 600 \cdot t) - \frac{1}{3\pi} \cos(2\pi \cdot 10^4 \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot 1800 \cdot t) + \dots$$

Ricordando che  $\cos(x) \cdot \cos(y) = 0,5 \cos(x+y) + 0,5 \cos(x-y)$  è possibile esprimere la relazione precedente come somma di sinusoidi nel seguente modo:

$$s_{OOK} = 0,25 \cos(2\pi \cdot 10^4 \cdot t) + \left\{ \frac{0,5}{\pi} \cos[2\pi \cdot (10^4 - 600) \cdot t] + \frac{0,5}{\pi} \cos[2\pi \cdot (10^4 + 600) \cdot t] \right\} + \\ - \left\{ \frac{0,5}{3\pi} \cos[2\pi \cdot (10^4 - 1800) \cdot t] + \frac{0,5}{3\pi} \cos[2\pi \cdot (10^4 + 1800) \cdot t] \right\} + \dots$$

Lo spettro è quindi composto da:

- riga a  $f_p=10$  kHz e ampiezza 250 mV;
- coppia di righe laterali a frequenza  $f_p+f_o=10,6$  kHz;  $f_p-f_o=9,4$  kHz con ampiezza 160 mV;
- coppia di righe laterali a frequenza  $f_p+3f_o=11,8$  kHz;  $f_p-3f_o=8,2$  kHz con ampiezza 53 mV; ecc.

La simulazione al computer di figura 6, in cui si determina lo spettro del segnale modulato OOK, conferma i risultati trovati. Anche tramite il programma di simulazione MODIGIT, contenuto nel CDROM per il docente allegato al libro di testo citato, si ottengono gli stessi risultati, come illustrato in figura 7. Il programma calcola la frequenza della prima armonica come  $f_0=1/T_{\text{simulazione}}$ , per cui prendendo  $T_{\text{sim}}=12t_{\text{bit}}=12(1/1200)=0,01$  [s] si ha  $f_0=100$  Hz. Le componenti principali del segnale modulato sono così l'armonica N. 100, di frequenza 10 kHz e ampiezza 0.2493 V, e le armoniche 94 e 106 aventi rispettivamente frequenza 9,4 kHz e 10,6 kHz. Lo spettro evidenzia la presenza di piccole componenti spettrali indesiderate, che nascono per via dei salti di fase presenti nel segnale modulato dovuti al fatto che il tempo di bit non è un multiplo intero del periodo della portante.

4. Poiché l'OOK è una modulazione digitale per essa non esiste il vincolo del conservare la forma esatta del segnale modulante durante il processo di modulazione e demodulazione. E' infatti sufficiente riconoscere senza ambiguità la presenza di un "1" o di uno "0" associati ai due stati di modulazione per demodulare e riottenere senza errori il segnale dati (si vedano anche l'Unità 6 pag. 137 e l'Unità 7 pag. 169). Come banda del segnale modulato si può così anche assumere la banda che comprende le prime due righe laterali:  **$B=10600-9400=1200$  Hz**. Più in generale se il segnale digitale non è un'onda quadra, ma varia in modo casuale, la sua frequenza massima (si veda l'Unità 8) viene di solito considerata pari al bit rate ( $R_s$ ):  **$f_{\text{max}}=(1/t_{\text{bit}})=R_s$** , dove  $\tau=t_{\text{bit}}$  è la durata di un impulso (si veda l'Unità 1). In generale, quindi, essendo la modulazione OOK una variante della modulazione di ampiezza si può assumere come banda del segnale modulato il seguente valore:  **$B=2f_{\text{max}}=2400$  Hz**.
5. Poiché l'OOK può essere considerata una variante della modulazione di ampiezza AM è possibile utilizzare per la demodulazione un rivelatore di involuppo seguito da un filtro passa basso<sup>1</sup> che ha la funzione di eliminare il ripple (si veda l'Unità 5 par. 5.6.1). In figura 2 si riporta il circuito di demodulazione, mentre in figura 8 si mostrano le forme d'onda di: segnale modulato OOK, segnale in uscita dal rivelatore di involuppo, segnale in uscita dal filtro. Si vede chiaramente che inviando il segnale demodolato a un circuito di campionamento e decisione, pilotato dal clock di ricezione, è possibile riconoscere senza errori gli "1" e "0". Come circuito di decisione si potrebbe utilizzare un flip-flop di tipo D, come indicato nella figura 7.11 a pag. 180.

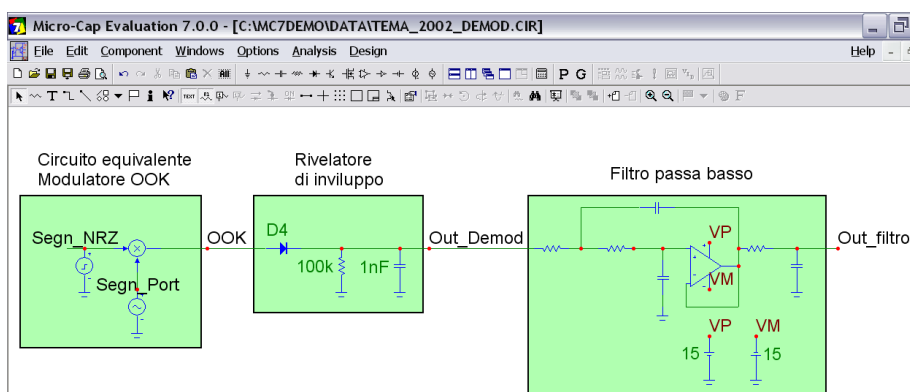


Figura 2 Demodulatore OOK.

6. Come indicato nella tab. 8.1 di pag. 190, il sistema di trasmissione proposto risulta obsoleto, in quanto la modulazione OOK da un lato è molto sensibile ai disturbi (dei picchi di rumore possono facilmente mascherare gli "0" producendo errori in ricezione) e dall'altro ha una bassa efficienza spettrale (impiega solo due stati).

<sup>1</sup> Si è utilizzato un filtro passa basso attivo in quanto la portante ha frequenza bassa (10 kHz), per cui le componenti del ripple sono vicine a quelle del segnale dati. Il filtro deve quindi avere una pendenza elevata, non ottenibile con un normale filtro RC.

Nel passato il pregio di questa modulazione poteva essere la semplicità circuitale del modulatore e del demodulatore. Oggi però non è più un problema realizzare circuiti integrati a elevata complessità e a basso costo.

Sostituendo il modulatore bilanciato a 2 diodi con quello a 4 diodi, illustrato nella figura 5.4 di pagina 111, si realizza una modulazione 2PSK (Unità 8 par. 8.6.1), figura 3. Con questo circuito si ottiene una modulazione 2PSK in cui il segnale modulato ha la stessa fase della portante quando si trasmette un "1", in quanto i diodi D1 e D2 sono in conduzione mentre D3 e D4 sono interdetti, mentre il segnale modulato è sfasato di  $180^\circ$  rispetto alla portante quando si trasmette uno "0", in quanto ora sono in conduzione i diodi D3 e D4 mentre D1 e D2 sono interdetti (figura 9).

Come indicato nella tab. 8.1 di pag. 190, essendo una modulazione angolare la 2PSK ha una elevata resistenza ai disturbi per cui può essere utilizzata per trasmettere su canali particolarmente disturbati. La modulazione 2PSK può anche essere considerata come una modulazione digitale d'ampiezza (2ASK) in cui il modulato viene ottenuto moltiplicando un segnale digitale con codifica NRZ bipolare con la portante (si vedano le figure 5.5 di pag 102 e 8.3 di pag. 191). Ne consegue che l'occupazione di banda della 2PSK è la stessa dell'OOK. Ciò è confermato dalla figura 10 in cui si riporta lo spettro del segnale modulato 2PSK.

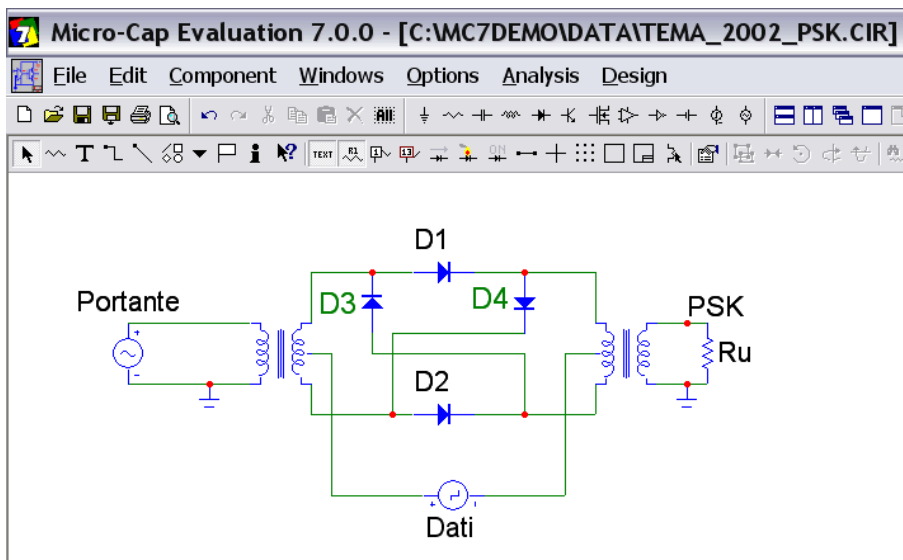


Figura 3 Modulatore 2PSK.

## Appendice

### Simulazioni al computer per la verifica dei risultati trovati

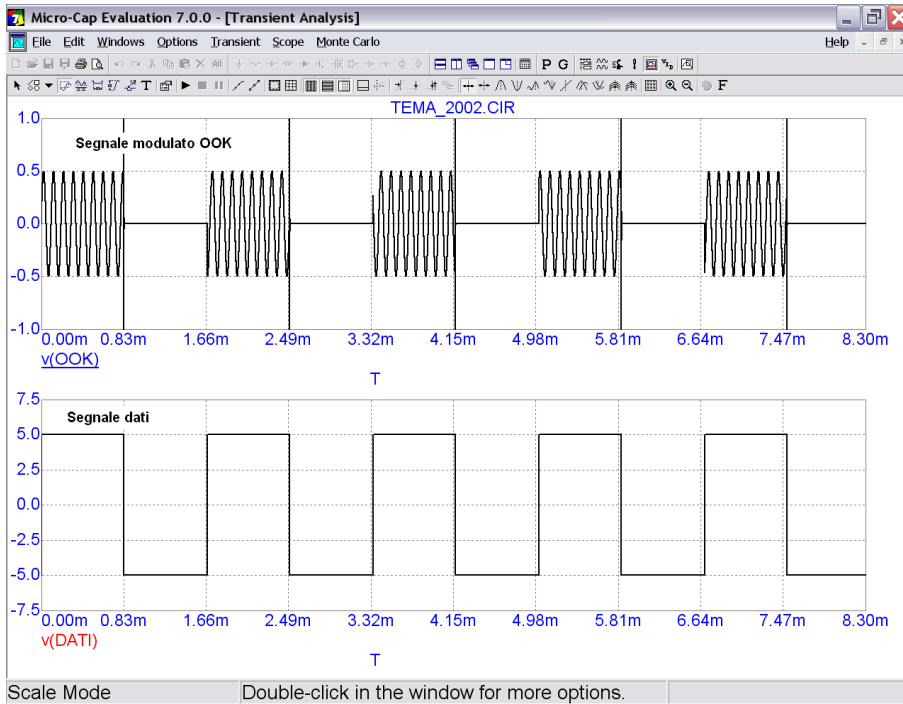


Figura 4 Segnale modulato OOK ottenuto con il modulatore bilanciato

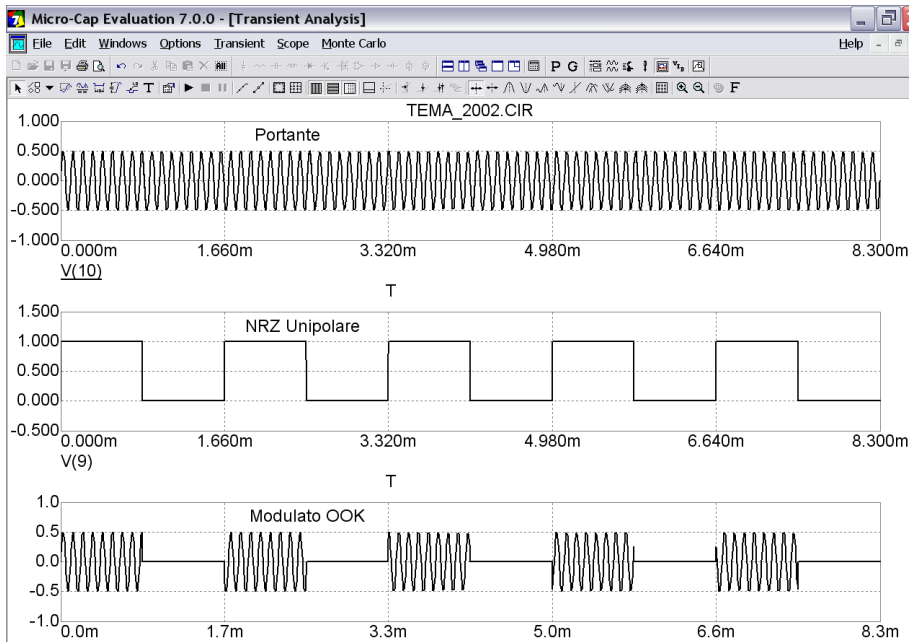


Figura 5 Modulato OOK ottenuto dal circuito equivalente

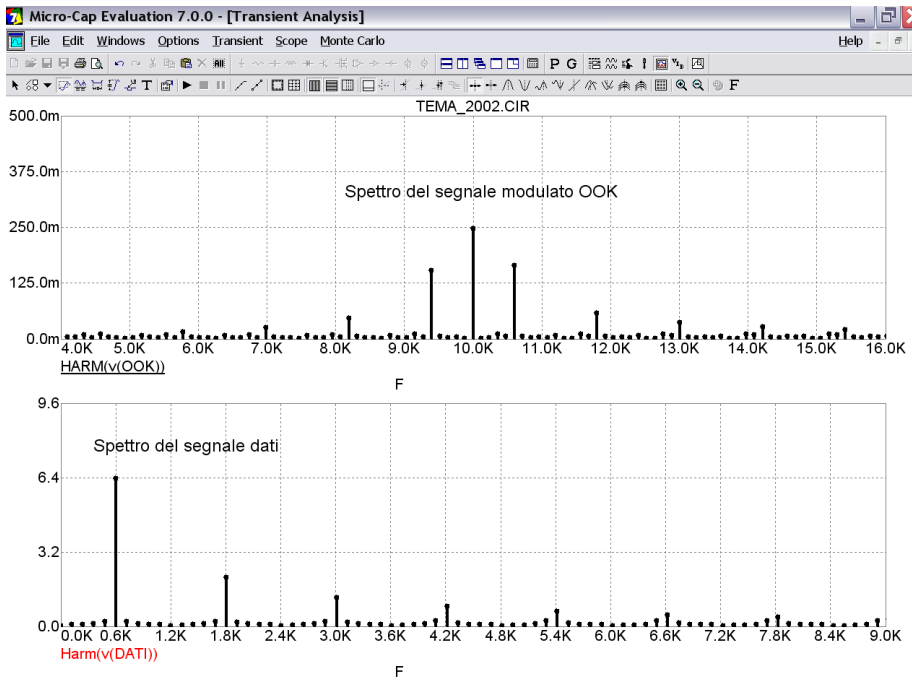
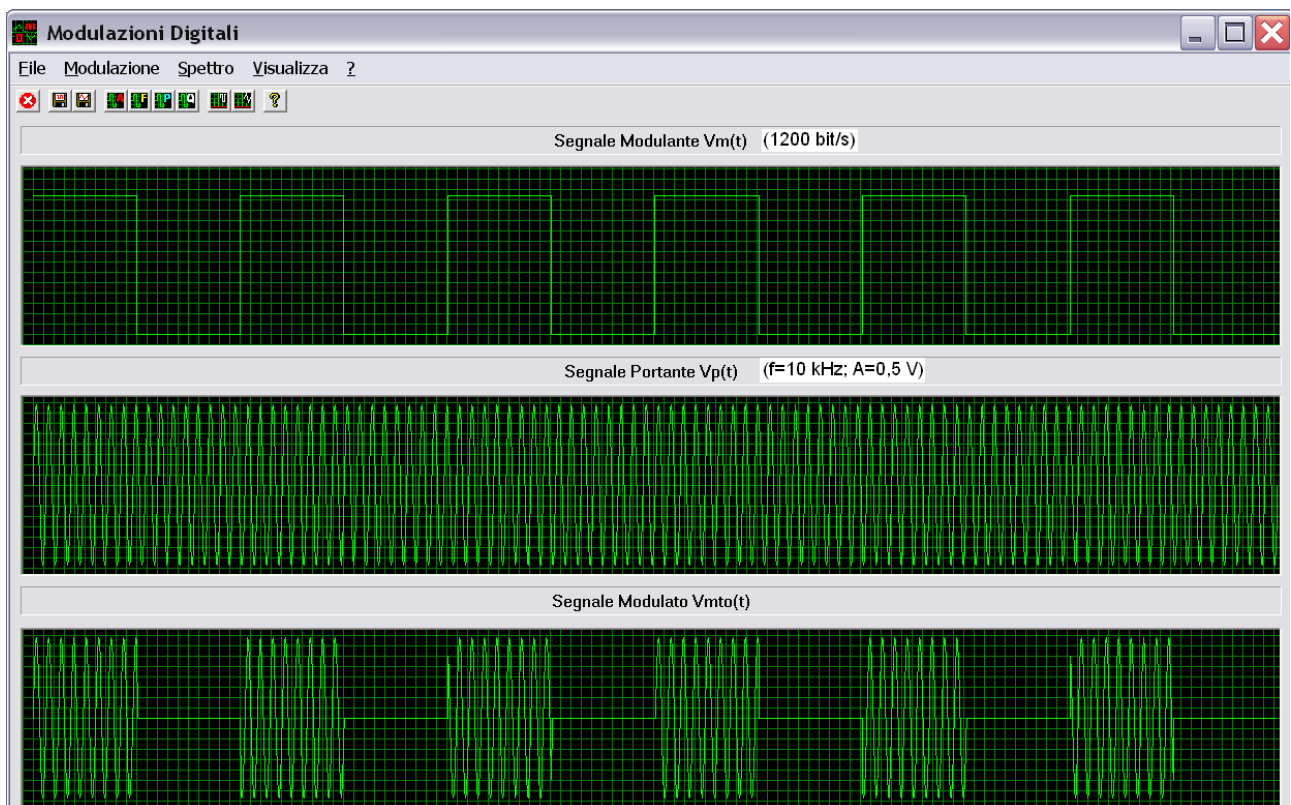


Figura 6 Spettro del segnale modulato OOK e spettro del segnale dati.



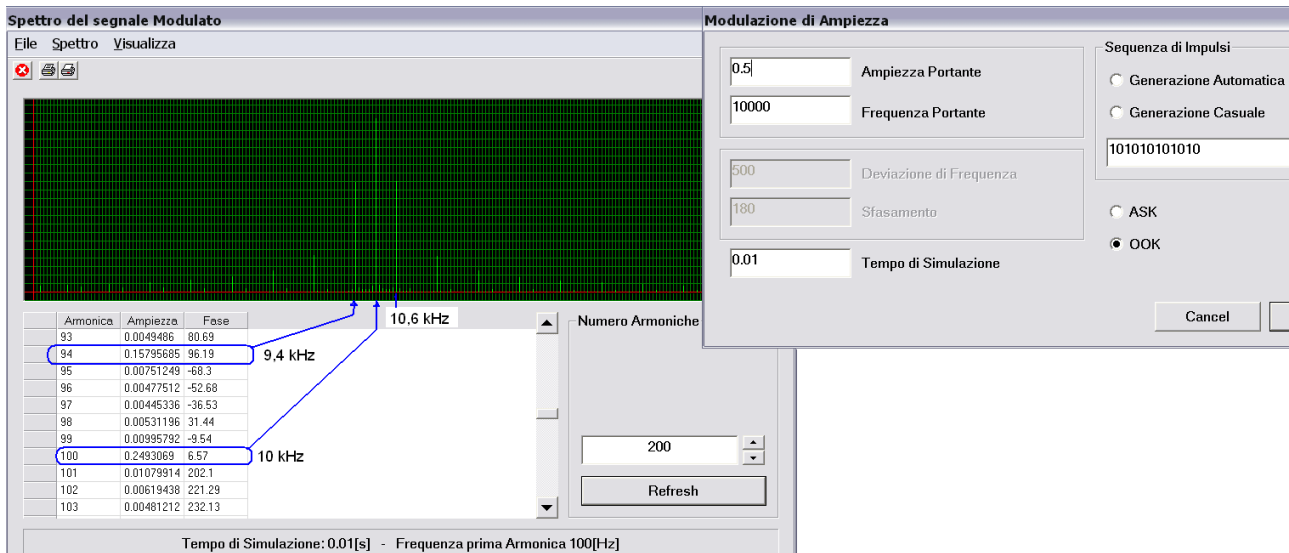


Figura 7. Segnale modulato OOK e suo spettro determinati con il programma MODIGIT.

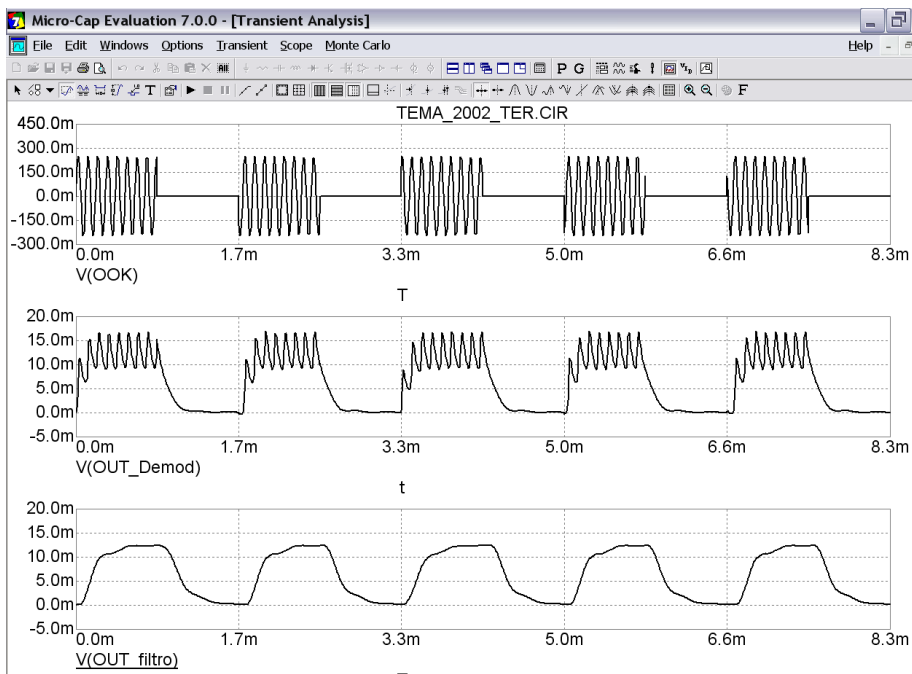


Figura 8, Segnale modulato OOK, segnale in uscita dal rivelatore di inviluppo e segnale uscente dal filtro passa basso del demodulatore.



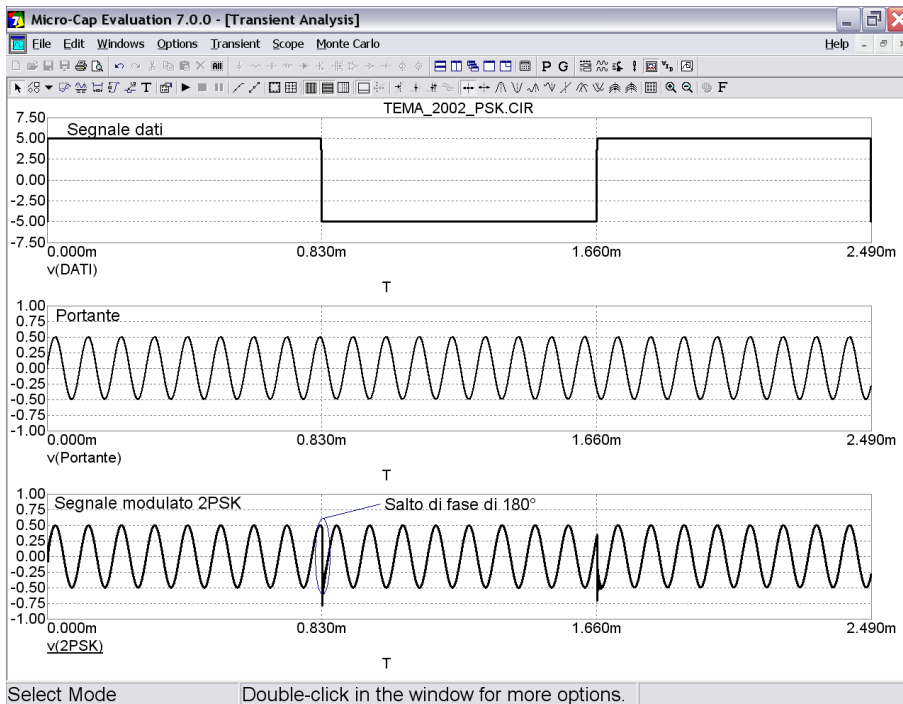


Figura 9 Segnale dati, portante e segnale modulato 2PSK.

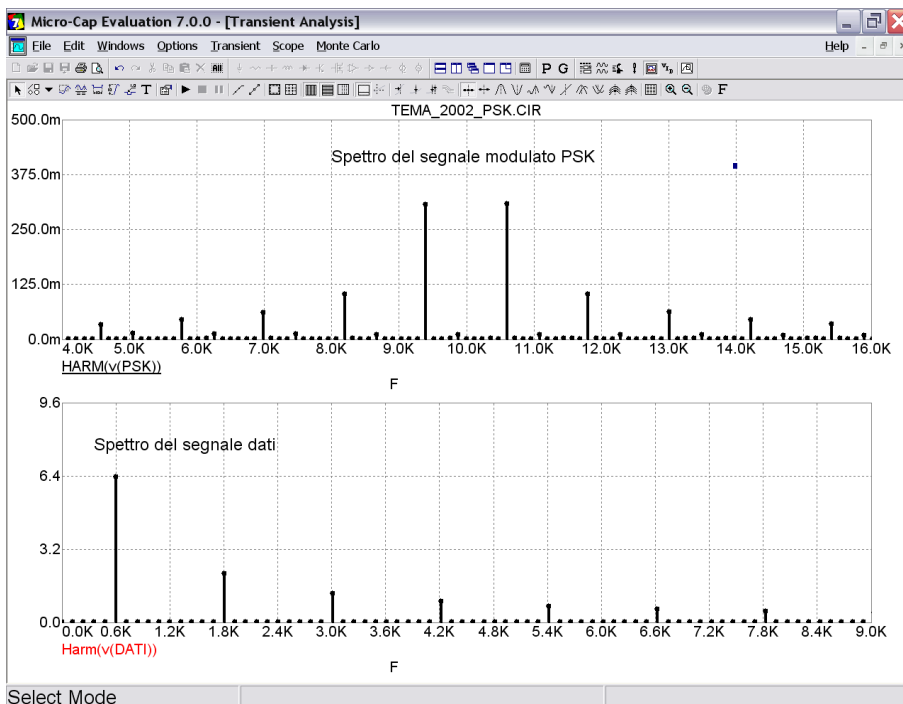


Figura 10 Spettro del segnale modulato 2-PSK e spettro del segnale dati.

Le forme d'onda e gli spettri possono essere determinati anche tramite il programma di simulazione MODIGIT, contenuto nel CDROM per il docente allegato al libro di testo, ottenendo gli stessi risultati, come illustrato in figura 11. Anche qui non essendo la frequenza della portante ( $f_p=10$  kHz) un multiplo intero del bit rate (1200 bit/s) in un tempo di bit non si ha un numero intero di cicli della portante, il che determina dei salti di fase nel segnale modulato. I salti di fase determinano così la nascita di componenti spettrali indesiderate. Come illustrato in figura 12, se si portasse la frequenza della portante a 12 kHz non si avrebbero più le componenti spettrali spurie.

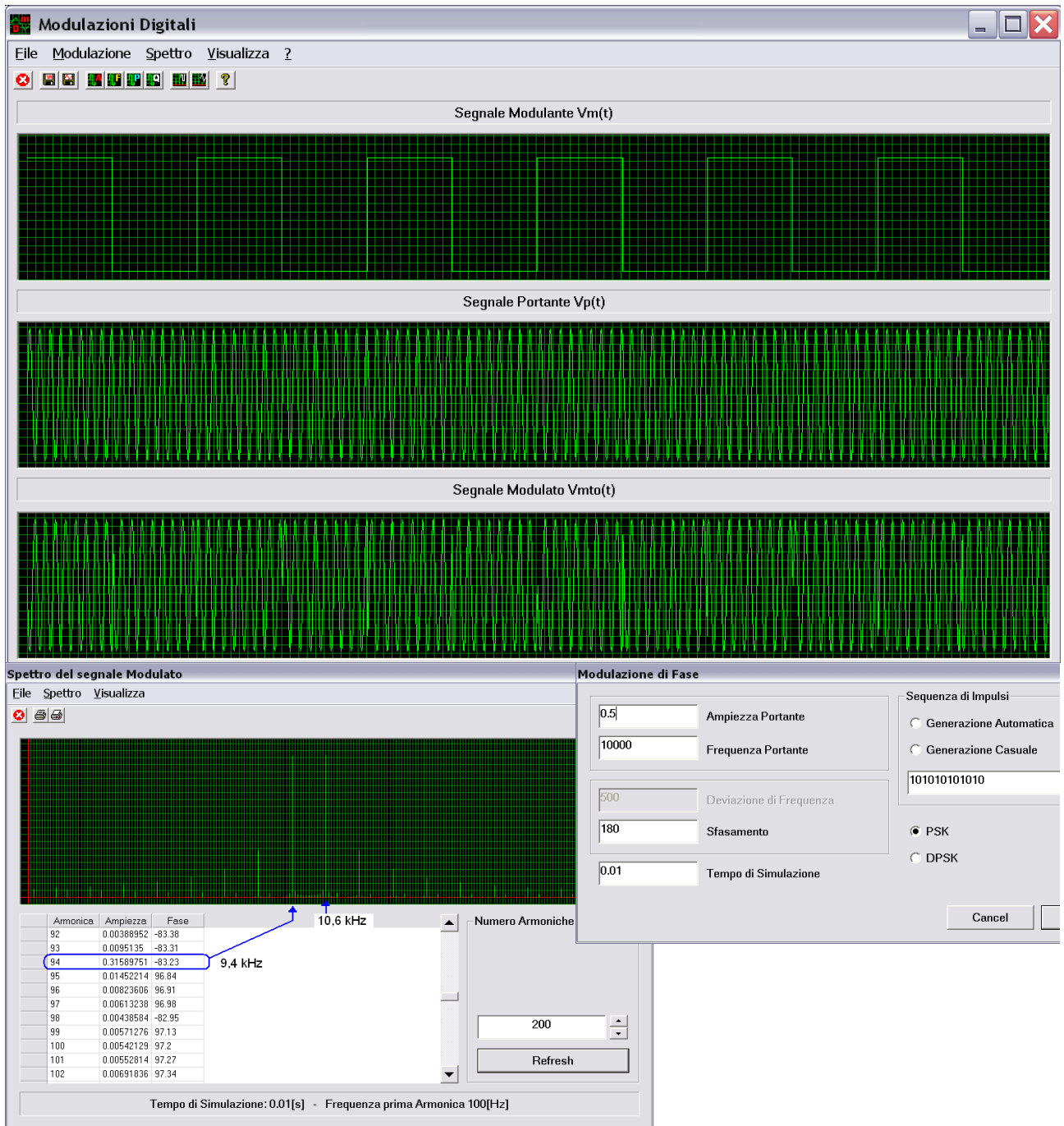


Figura 11 Modulato 2PSK e suo spettro ottenuti con il programma MODIGIT.

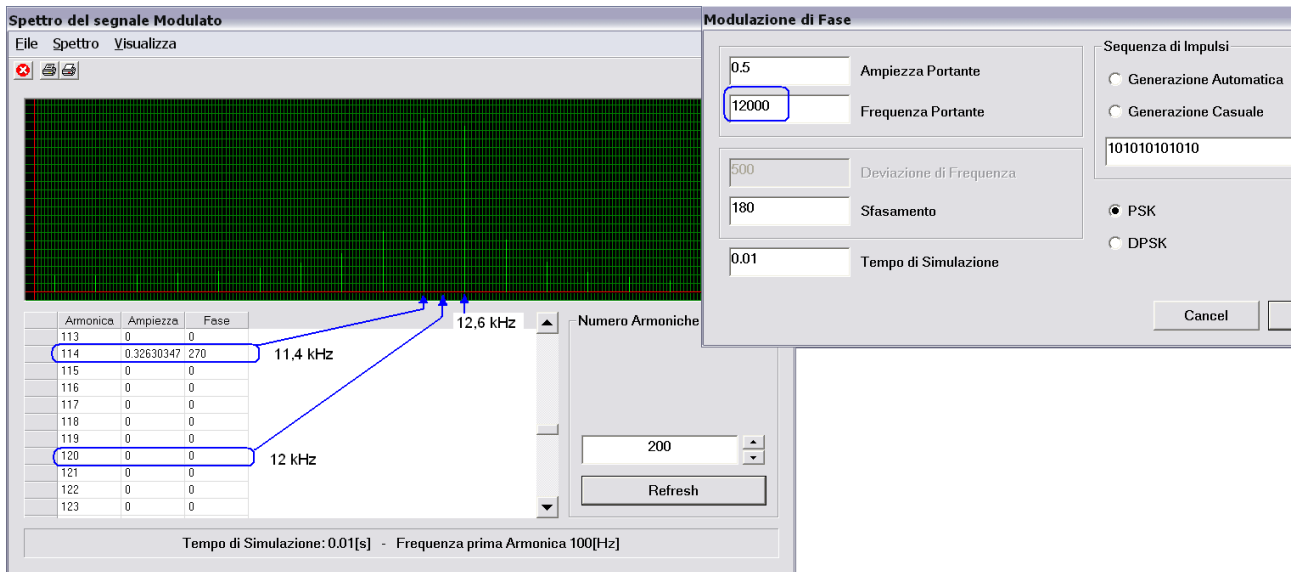


Fig. 12 Spettro del segnale modulato 2PSK con frequenza della portante pari a 12 kHz.