

STUDIO DEL COMPORTAMENTO BISTABILE DI RETICOLI NON LINEARI CON TECNICA FD-TD

Luca Saccomandi

Dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica, Università di Bologna
Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna
lsaccomandi@deis.unibo.it

Abstract

The transmission properties of a one-dimensional grating with a Kerr non linearity, at operating frequencies close to the upper edge of the stop-band, have been investigated using the Finite Difference Time Domain (FD-TD) technique. Results show that the structure exhibits a bistable behaviour: transitions from strong reflection to nonlinearity-induced transparency and viceversa are found, leading to high-intensity field localisation within the grating. In the limit of shallow gratings, FD-TD results are in good agreement with those based on Coupled-Mode Theory (CMT).

INTRODUZIONE

Nei sistemi di telecomunicazione a portante ottica i dispositivi basati sull'uso di reticoli, strutture nelle quali la distribuzione d'indice ha caratteristiche di periodicità in una, due o anche tre dimensioni, stanno trovando moltissime applicazioni. Come noto, il funzionamento di queste strutture è legato al fatto che, se le onde riflesse da due disomogeneità consecutive sono in fase tra loro, allora, a causa della periodicità complessiva della struttura, esse sono in fase anche con quelle riflesse dalle disomogeneità lontane un numero intero di periodi dalle precedenti. Le onde riflesse, perciò, si sommano coerentemente. La struttura risulta quindi complessivamente riflettente in un range di lunghezze d'onda dipendente, con il coefficiente di trasmissione, dalla profondità della modulazione d'indice considerata, dalla periodicità del reticolo e dalla sua lunghezza. Viceversa, se tale accordo di fase non esiste, tutte le riflesse si cancellano tra loro ed il sistema praticamente non attenua quella lunghezza d'onda. I filtri per selezionare lunghezze d'onda nei sistemi a moltiplicazione di lunghezza d'onda (WDM) sono un esempio tipico di strutture di questo tipo e sono realizzati con varie tecnologie (in fibra o per sovrapposizione di strati di materiali diversi).

Anche in prospettiva futura, le strutture periodiche hanno la loro importanza, soprattutto pensando a dispositivi basati su materiali non lineari. In questo caso, infatti, la non linearità modifica enormemente il funzionamento rispetto al caso lineare, rendendo possibile, per esempio, comportamenti con caratteristiche di *bistabilità*. Nel presente lavoro si farà riferimento proprio a situazioni di questo tipo, considerando una struttura realizzata con materiali che presentano non linearità di tipo Kerr. In prospettiva, applicazioni assai importanti riguardano la possibile realizzazione di linee di ritardo, funzioni logiche, memorie e filtri per la reiezione del rumore tutto ottici.

È sempre possibile, separando il valore dell'ampiezza longitudinalmente variabile e le forme trasversali dei campi, ricondursi a situazioni monodimensionali, tali

cioè da avere variazioni in una sola direzione, quella di propagazione. In questo caso il campo è descritto in termini di onde piane. Il confinamento trasversale viene tenuto in conto tramite opportuni coefficienti correttivi facilmente calcolabili e legati all'integrale di ricoprimento tra i modi presenti nelle diverse parti della struttura. Senza perdere generalità, nel seguito si farà quindi riferimento a reticoli *monodimensionali*.

Finora queste strutture sono state studiate usando teorie ben consolidate, ma approssimate, come la CMT. In questo lavoro vengono quindi presentati, e confrontati con la CMT, risultati ottenuti con un approccio più generale, basato sulla tecnica numerica FD-TD. Questo metodo, infatti, risolvendo direttamente le equazioni di Maxwell nel dominio del tempo, non richiede alcuna ipotesi semplificativa nel problema elettromagnetico [1] ed è, per le sue proprietà, particolarmente adatto ad investigare i transitori e le caratteristiche di stabilità delle configurazioni di campo all'interno delle strutture esaminate.

DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA

Nel seguito si è considerato un reticolo con indice medio $n_0 = 2$, salto d'indice $\Delta n = 10^{-1}$ e coefficiente della parte non lineare dell'indice $n_{21} = 3 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ (caratteristico delle fibre). Una periodicità $\Lambda = 0.25 \text{ }\mu\text{m}$ è stata scelta per avere lunghezza d'onda di Bragg $\lambda_B = 1 \text{ }\mu\text{m}$. Il reticolo è lungo $L = 100 \Lambda$.

Il coefficiente di trasmissione della struttura (Figura 1) mostra la presenza di una banda di trasmissione proibita (band-gap) centrata sulla frequenza $f_B = 3.0 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ corrispondente alla lunghezza d'onda di Bragg per la quale è stato pensato.

RISULTATI

I risultati qui presentati sono esempi rappresentativi ottenuti per due frequenze di lavoro $f_1 = 3.0433 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ ed $f_2 = 3.0361 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ che cadono all'interno della banda proibita vicino al suo limite superiore ($f_{ls} = 3.0456 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$).

I valori dell'intensità dei campi incidente e trasmesso sono normalizzati attraverso il fattore $(\chi L)^{-1} = 2.1 \cdot 10^{17} \text{ W/m}^2$.

In Figura 2 è mostrato il comportamento bistabile del reticolo. Aumentando progressivamente l'intensità del campo elettrico incidente (processo di salita), quando esso raggiunge il valore normalizzato di 0.288, il sistema passa da uno stato di forte riflessione ad uno stato ad elevata trasmettenza, come indicato dalla transizione della linea continua. Al contrario, il passaggio inverso, che si ottiene diminuendo il valore dell'intensità di campo incidente (processo di discesa), segue un altro percorso, caratterizzato dalla linea tratteggiata. I percorsi di salita e discesa sono diversi, così come è diverso il profilo del campo all'interno del reticolo durante l'evoluzione. L'involuppo del campo perde, infatti, il suo rapido andamento esponenzialmente decrescente tipico dello stato (lineare) di forte riflessione (Figura 3a) penetrando progressivamente all'interno del reticolo e raggiungendo una configurazione localizzata che può essere considerata il precursore di un'onda solitaria nota come *gap soliton*. Il campo completo relativo a quest'ultima situazione è mostrato in Figura 3b per un valore di intensità incidente pari a 0.144, raggiunto nel percorso discendente.

Come accennato in precedenza la tecnica FD-TD permette inoltre di caratterizzare i transitori e la stabilità temporale di ogni configurazione ingresso-uscita. Le Figure 4a e 4b mostrano le evoluzioni temporali dell'intensità di campo in uscita dal reticolo corrispondenti ai valori dell'ingresso responsabili, rispettivamente, della transizione verso lo stato ad alta trasmettenza e verso quello di forte riflessione. In

entrambi i casi l'algoritmo di calcolo al termine converge e l'uscita raggiunge uno stato stazionario. I risultati trovati sono in buon accordo con quelli presenti in letteratura [2], [3] ottenuti tramite la CMT. Spostando il punto di lavoro verso una frequenza più bassa, ma comunque sempre interna al band-gap (f_2), i calcoli FD-TD mettono in evidenza che, aumentando l'intensità in ingresso, il sistema esce nuovamente dallo stato di bassa trasmissione ma non si assesta su una configurazione stabile poiché in uscita viene generato un treno di impulsi ad alta intensità (il fenomeno è noto in letteratura come *self-pulsing* [2], [3]). L'intensità di campo in uscita ha un comportamento periodico, come mostrato in Figura 5, con periodo ~ 1.1330 picosecondi, più corto di quello ottenuto usando l'approccio CMT.

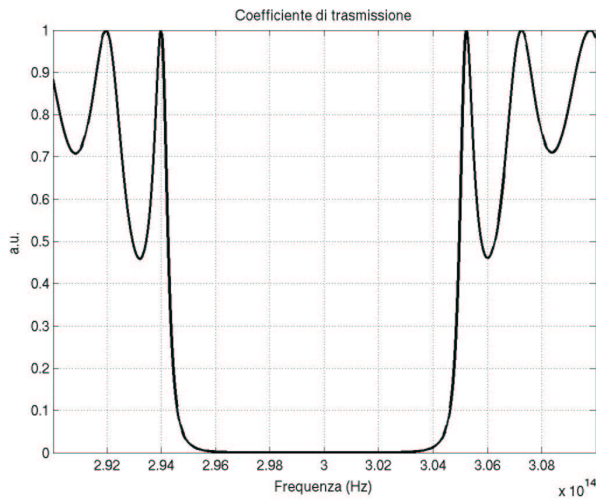


Figura 1: Coefficiente di trasmissione del reticolo lineare.

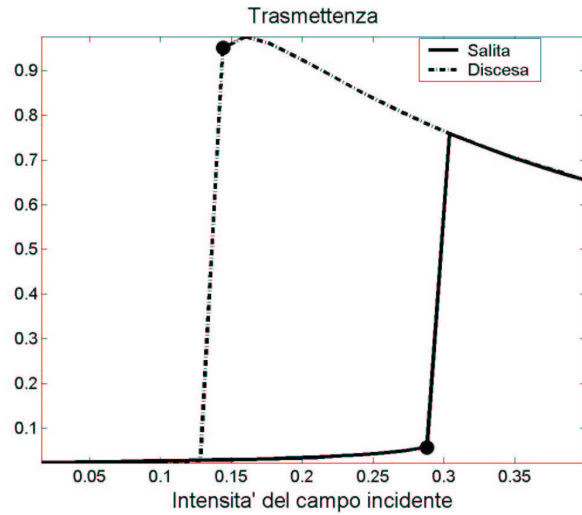
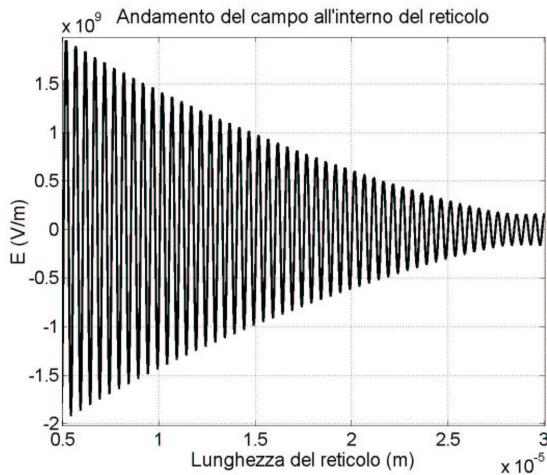
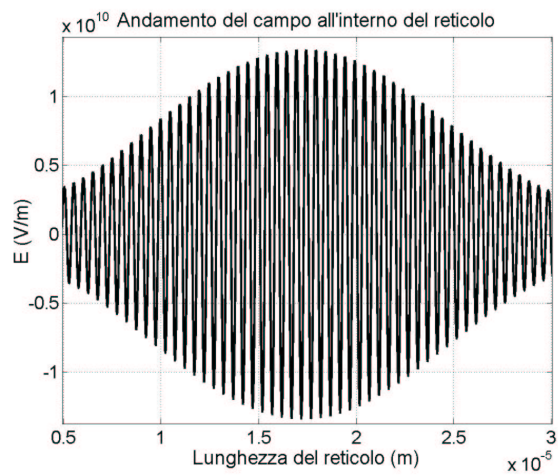


Figura 2: Comportamento bistabile della struttura originato dall'eccitazione della non linearità di tipo Kerr.



(a)



(b)

Figura 3: Andamento del campo all'interno del reticolo (a) nello stato di forte riflessione tipico del caso lineare (b) nello stato trasparente, prima di saltare nuovamente nello stato a bassa trasmissione.

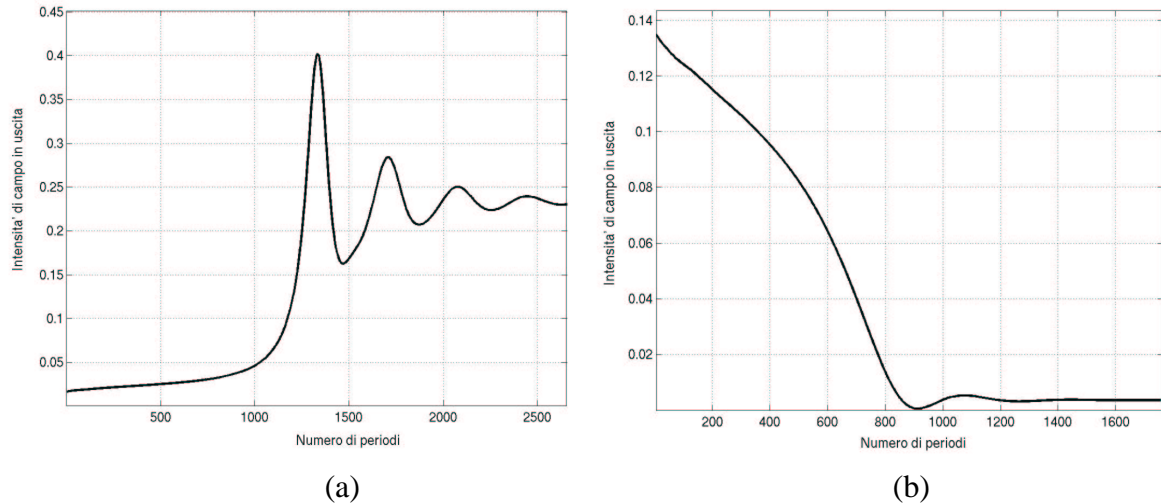


Figura 4: Transitori dell' intensità di campo in uscita relativi al salto (a) sul ramo ad elevata trasmettenza (b) su quello di forte riflessione, alla frequenza di lavoro f_1 .

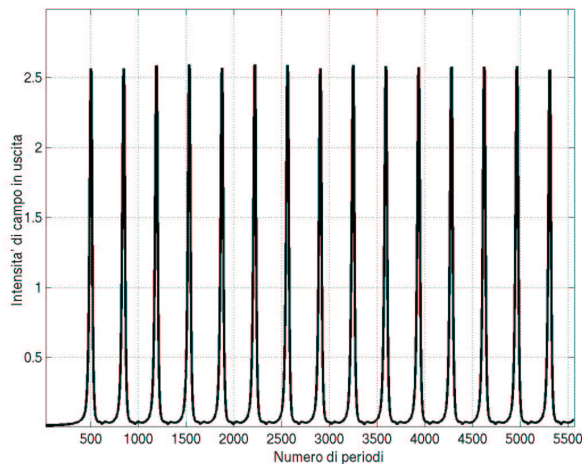


Figura 5: Treno di impulsi ad alta intensità generato all'uscita del reticolo, uscendo dallo stato stabile di forte riflessione (per una frequenza di lavoro f_2).

CONCLUSIONI

La tecnica FD-TD é stata utilizzata con successo per mostrare un comportamento *bistabile* ed un caso di *self-pulsing* in un reticolo con una non linearità di tipo Kerr. Tali comportamenti sono già stati mostrati in letteratura utilizzando la CMT, ma questo confronto ha permesso di validare l'approccio tramite FD-TD, che è più generale in quanto non richiede le ipotesi semplificative che stanno alla base della CMT stessa. Esso risulta quindi di applicabilità maggiore ed apre così la strada allo studio di strutture che non permetterebbero, a rigore, un approccio CMT.

RINGRAZIAMENTI

Lavoro svolto con finanziamento MIUR. Desidero inoltre ringraziare Stefano Trillo e Gaetano Bellanca per le utili discussioni.

BIBLIOGRAFIA

1. G. Bellanca, R. Semprini, P. Bassi, Opt. And Quant. Electron. 29, 233 (1997).
2. C. M. de Sterke, J. E. Sipe, Phys. Rev. A 42, 2858 (1990).
3. C. M. de Sterke, Phys. Rev. A 45, 8252 (1992).