

ANALISI DI ARRAY FASATI DI ANTENNE STAMPATE A ONDA LEAKY: NUOVE PROPRIETA' MODALI E INTERPRETAZIONE DEI RELATIVI FENOMENI RADIATIVI

P. Baccarelli, P. Burghignoli, F. Frezza, A. Galli e P. Lampariello

Università "La Sapienza" di Roma, Dipartimento di Ingegneria Elettronica
Via Eudossiana 18, 00184 Roma
E-mail: plamp@die.ing.uniroma1.it

Abstract

In this work a comprehensive investigation on the modal and radiative properties of linear arrays of microstrip leaky-wave antennas is presented, based on a rigorous spectral-domain formulation of the method of moments in the unit cell. A complete characterization of the array operation is achieved in the presence of an arbitrary phase shift between elements, and new interesting dispersion features have been found. In particular, a novel transition region between leaky and bound-wave ranges is shown to occur in the end-of-scanning region; the presence of grating-lobe phenomena has also been investigated, and is shown to be related to the excitation of a new, previously unknown leaky mode of the structure. Numerical simulations of the radiative properties of the studied arrays are reported and compared with those performed on finite arrays.

INTRODUZIONE

E' noto che un singolo radiatore a onda leaky gode della proprietà di generare un fascio direzionale il cui puntamento può essere variato nel piano di elevazione in funzione della frequenza di lavoro [1]. Allineamenti fasati di antenne a onda leaky consentono, al variare dello sfasamento tra i singoli elementi, la scansione di fasci a matita anche nel piano di azimut, descrivendo, sotto opportune condizioni, una superficie conica [2]. Un importante vantaggio delle configurazioni di antenne a onda leaky rispetto agli array planari bidimensionali convenzionali è rappresentato dalla drastica riduzione del numero di elementi e di sfasatori e dalla conseguente sensibile contrazione della complessità e del costo della rete di alimentazione. Anche se la maggior parte degli array a onda leaky sono stati inizialmente realizzati con elementi radianti derivati da guide d'onda metalliche parzialmente aperte [1,2], negli ultimi anni è notevolmente aumentato l'interesse per configurazioni stampate che consentono una più semplice integrazione con componenti attivi in tecnologia planare [3].

In questo lavoro viene presentato uno studio completo del comportamento radiativo di array stampati di antenne a onda leaky a microstriscia (vedi Fig. 1) in presenza di sfasamento arbitrario, mostrando in particolare nuove proprietà modali che consentono di chiarire il comportamento di questa classe di array in condizioni di fine scansione e di larga spaziatura fra gli elementi.

ANALISI COL METODO DEI MOMENTI NEL DOMINIO SPETTRALE

L'analisi numerica delle proprietà dispersive e radiative è basata su una formulazione rigorosa del metodo dei momenti nel dominio spettrale [4]: l'approccio proposto è particolarmente efficiente, permettendo di derivare i principali comportamenti radiativi di tali array attraverso la determinazione della costante di propagazione complessa e delle configurazioni di corrente dei modi leaky coinvolti. Vengono considerati array lineari di estensione planare infinita per i quali, sfruttando la periodicità lungo la direzione trasversa, è possibile restringere lo studio al singolo periodo spaziale della struttura (cella unitaria). La determinazione del comportamento modale di questi array è strettamente legata alle proprietà spettrali delle armoniche spaziali coinvolte nella rappresentazione secondo Floquet delle

correnti e dei campi. La scelta della determinazione *propria* (attenuazione all'infinito nella regione di spazio libero sopra l'array) o *impropria* (crescita esponenziale all'infinito) per ogni armonica spaziale seleziona la superficie di Riemann dove viene effettuata la ricerca numerica degli zeri dell'equazione di dispersione.

Il metodo proposto consente un'analisi di tipo “full-wave” anche in presenza di un arbitrario sfasamento tra gli elementi. La determinazione delle costanti di fase e di attenuazione dei modi leaky coinvolti, in funzione della frequenza operativa e dello sfasamento tra gli elementi, ha condotto a una caratterizzazione esauriente del processo di scansione bidimensionale (definizione della direzione e dell'ampiezza del fascio irradiato e del livello dei lobi laterali).

REGIONI DI TRANSIZIONE E GRATING LOBES

Un'attenzione particolare è stata rivolta al comportamento di fine scansione e soprattutto al problema del possibile insorgere di radiazioni spurie (“grating lobes”) in questo tipo di strutture, all'aumentare dello sfasamento o della distanza tra gli elementi [5].

L'indagine dei fenomeni di scansione dell'array mostrato in Fig. 1 è stata effettuata determinando la variazione delle costanti di fase (β_z/k_0) e di attenuazione (α_z/k_0) normalizzate del modo EH_1 perturbato in funzione dello sfasamento Φ tra gli elementi. Un caso tipico è presentato in Fig. 2; l'analisi è stata effettuata alla frequenza di 12.2 GHz per la quale, in assenza di sfasamento tra gli elementi dell'array, il modo operativo EH_1 si trova in regime di leakage spaziale. Si può notare che la costante di fase rimane pressoché invariata al crescere della frequenza, dando luogo a una scansione quasi conica del fascio irradiato, mentre la costante di attenuazione decresce monotonamente. Questo comportamento è tipico di numerosi array di antenne a onda leaky [1,2]. I valori elevati dello sfasamento corrispondono alla regione di fine scansione, in cui il fascio irradiato progressivamente si abbassa toccando il piano dell'array al termine della scansione stessa. Tuttavia, non è chiaro se lungo l'intera curva rappresentata in Fig. 2 il modo leaky rimanga *fisico* e che cosa avvenga incrementando ulteriormente lo sfasamento, oltre il valore per cui la costante di attenuazione si annulla.

Al fine di chiarire questo comportamento, abbiamo investigato le proprietà del modo coinvolto in tutto l'intervallo dei valori dello sfasamento e abbiamo rappresentato le curve di interesse insieme al bordo della regione di visibilità per l'armonica spaziale $n = 0$ (Fig. 3) [5]. La soluzione complessa impropria (linea a tratto e punto) dell'onda leaky (armonica $n = 0$ impropria) esce dallo spazio di visibilità dell'armonica $n = 0$ per $\Phi \cong 171^\circ$, entrando così in una regione in cui non è più *fisica*, cioè non contribuisce direttamente alla rappresentazione del campo [1]. Come può essere osservato in Fig. 3, la costante di attenuazione (linea a tratteggio) è differente da zero quando la curva della costante di fase interseca il bordo della regione di visibilità dell'armonica spaziale $n = 0$. Al crescere dello sfasamento, la costante di attenuazione diviene pari a zero e la soluzione complessa si divide in due rami reali impropri (linee a puntini), che sono ancora *non fisici* (corrispondono a onde superficiali improprie che divergono esponenzialmente all'infinito nella direzione y). Il ramo reale improprio più basso diviene tangente al bordo della regione di visibilità e nel punto di tangenza cambia la sua natura spettrale (l'armonica spaziale $n = 0$ diviene propria). La soluzione evolve quindi in una soluzione reale propria (linea continua), che è *fisica* e rappresenta un'onda superficiale della struttura periodica che si propaga e trasporta potenza come un modo guidato nel piano xz . Il comportamento modale rappresentato in Fig. 3 ricorda la regione di transizione che esiste tra il regime di leakage e quello guidato nei diagrammi di dispersione modale di numerose guide d'onda aperte [1]. In questo caso la transizione non avviene al variare della frequenza, ma al variare dello sfasamento imposto tra gli elementi adiacenti dell'array infinito.

Un argomento meritevole di ulteriore indagine teorica per gli array di antenne a onda leaky è rappresentato dal possibile insorgere di fenomeni radiativi spuri durante il processo di scansione. In particolare, è stato studiato il comportamento dispersivo del modo EH_1 di un array di microstrisce al crescere del periodo spaziale. In Fig. 4 è mostrato il comportamento

dispersivo di un allineamento per cui $d/\lambda_0 = 1$ alla frequenza di 12.5 GHz. Una valida interpretazione dell'insorgere dei grating lobes è stata data grazie alla scoperta di una nuova e ulteriore soluzione complessa impropria, ottenuta con le armoniche $n = 0, -1$ improprie (Fig. 4). Il modo EH_1 perturbato e il nuovo modo leaky hanno quasi la stessa costante di fase intorno a $\Phi \cong 0^\circ$; al crescere dello sfasamento la curva del primo modo si muove gradualmente verso l'alto, rimanendo sopra il bordo della regione di visibilità dell'armonica $n = -1$, mentre la costante di fase del nuovo modo rimane piatta e diviene *fisica* per $\Phi \cong 100^\circ$. Si può notare che le costanti di attenuazione dei due modi sono molto simili intorno a $\Phi \cong 0^\circ$, inoltre al crescere dello sfasamento la costante di attenuazione del modo EH_1 perturbato decresce monotonamente mentre quella del nuovo modo cresce in modo considerevole; tuttavia, essa rimane sufficientemente bassa da dare luogo ad apprezzabili fenomeni radiativi e a grating lobes, con una possibile degradazione di tutto il diagramma di radiazione.

Per poter verificare le proprietà radiative dell'array di microstrisce a onda leaky predette sulla base della precedente analisi dispersiva, sono state effettuate simulazioni numeriche full-wave per un array finito di N elementi di lunghezza finita L attraverso un software commerciale (*Ensemble*TM) basato sul metodo dei momenti nel dominio dello spazio. In particolare, abbiamo considerato una struttura con i parametri come in Fig. 4, di $N = 8$ elementi di lunghezza finita $L = 150$ mm lungo z . Per verificare l'effetto del nuovo modo leaky nei suoi regimi *fisici* e *non fisici*, sono stati simulati differenti casi di sfasamento alla frequenza di 12.5 GHz, per cui $L/\lambda_0 = 6.25$. Nelle Figg. 5(a) e 5(b) è mostrato il diagramma di radiazione normalizzato dell'array finito sopra descritto nel caso di sfasamento $\Phi = 160^\circ$. Il diagramma teorico ottenuto sulla base del nostro approccio modale è stato calcolato assumendo che la corrente su ogni striscia sia la corrente modale del nuovo modo leaky. In Fig. 5(a) sono mostrati i diagrammi di radiazione teorico e simulato (*Ensemble*) nel piano del fascio principale ($\varphi_m = 32^\circ$). L'angolo di puntamento è $\theta_m = 56^\circ$ in entrambi i diagrammi ed è predetto molto bene dalla nostra teoria. In Fig. 5(b) sono mostrati i diagrammi di radiazione teorico e simulato nel piano del grating lobe ($\varphi_m = -38^\circ$). L'angolo di puntamento è $\theta_m = 63^\circ$ in entrambi i diagrammi. L'eccellente accordo tra i diagrammi di radiazione teorici e simulati conferma che il nuovo modo leaky fornisce il contributo principale alla corrente sulle strisce.

CONCLUSIONI

Sulla base di un'analisi full-wave di array lineari infiniti di antenne a onda leaky a microstriscia, sono state presentate in questo lavoro nuove proprietà modali che consentono di chiarire il comportamento di tali array al variare della frequenza, dello sfasamento fra gli elementi e della loro spaziatura. La presenza di grating lobes, prevista sulla base dell'individuazione di un nuovo modo leaky, è stata verificata mediante la simulazione full-wave di array costituiti da un numero finito di elementi. L'acquisizione di tali risultati permette una più completa conoscenza delle proprietà radiative di questa classe di antenne a scansione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Galli, F. Frezza e P. Lampariello, *Leaky-wave antennas*, in J. G. Webster (Ed.), *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, Wiley, New York, NY, 2001.
- [2] P. Lampariello e A. A. Oliner, "A novel phased array of printed-circuit leaky-wave line sources", *Proc. 17th Microwave Conf.*, Roma, pp. 555-560, settembre 1987.
- [3] T. Itoh, "Active integrated antennas for wireless applications", *Proc. 1997 Asia-Pacific Microwave Conf.*, Hong Kong, pp. 309-312, dicembre 1997.
- [4] P. Baccarelli, P. Burghignoli, C. Di Nallo, F. Frezza, A. Galli, P. Lampariello e G. Ruggieri, "Full-wave analysis of printed leaky-wave phased arrays", *Int. J. RF and Microwave CAE*, vol. 12, pp. 272-287, maggio-giugno 2002.
- [5] P. Baccarelli, P. Burghignoli, F. Frezza, A. Galli e P. Lampariello, "The nature of the end-of-scanning region in printed-circuit arrays of leaky-wave antennas", accettato per la pubblicazione su *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*.

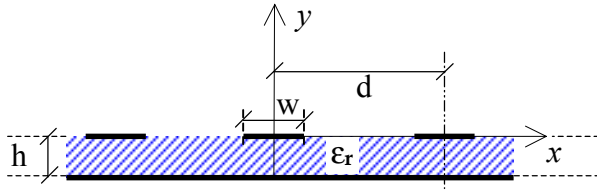


Fig. 1 – Array lineare infinito di antenne a onda leaky a microstriscia.

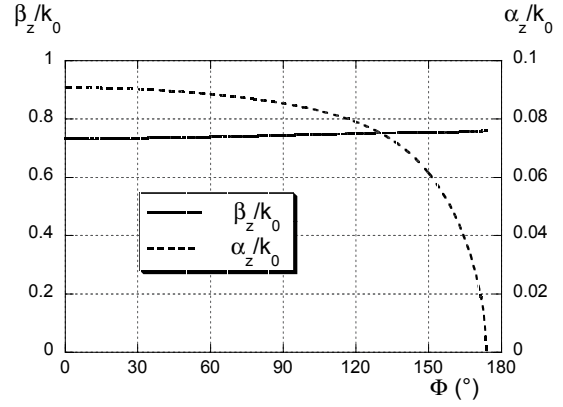


Fig. 2 – Costanti di fase e di attenuazione normalizzate del modo EH_1 perturbato, in funzione dello sfasamento fra gli elementi per un array del tipo in Fig. 1. *Parametri:* $\epsilon_r = 10.2$, $h = 0.635$ mm, $w = 3.3$ mm, $d = 18$ mm, $f = 12.2$ GHz.

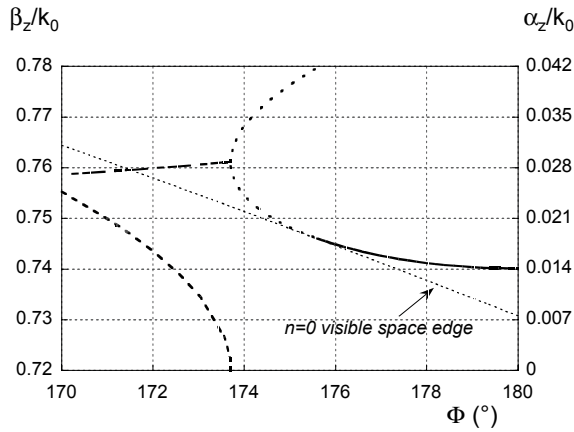


Fig. 3 – Dettaglio della regione di transizione con l'indicazione del bordo della regione di visibilità (visible space edge) per l'armonica spaziale $n = 0$. *Parametri:* come in Fig. 2.

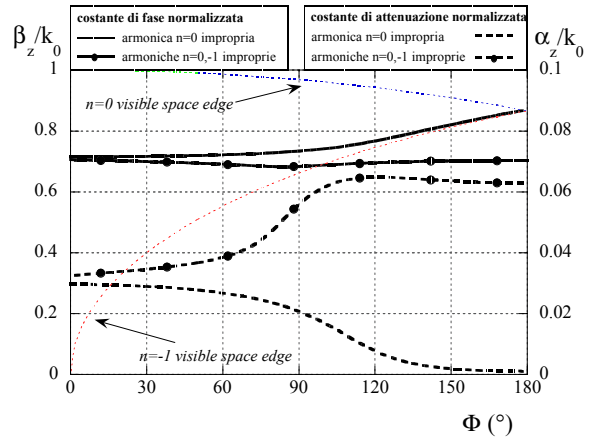


Fig. 4 – Costanti di fase e di attenuazione normalizzate del modo EH_1 perturbato e del nuovo modo leaky (linee con pallini), in funzione dello sfasamento fra gli elementi per un array del tipo in Fig. 1. *Parametri:* $\epsilon_r = 2.2$, $h = 0.508$ mm, $w = 8.5$ mm, $d = 24$ mm, $f = 12.5$ GHz.

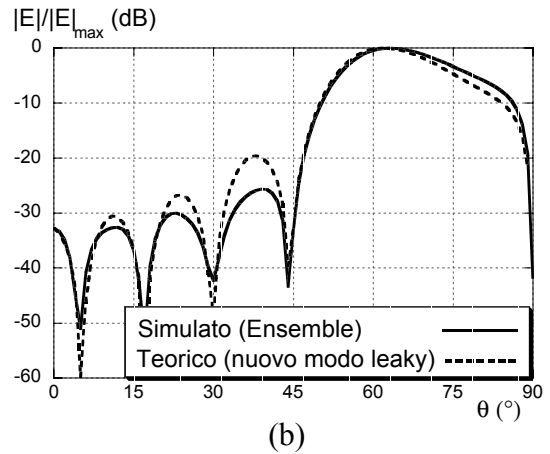
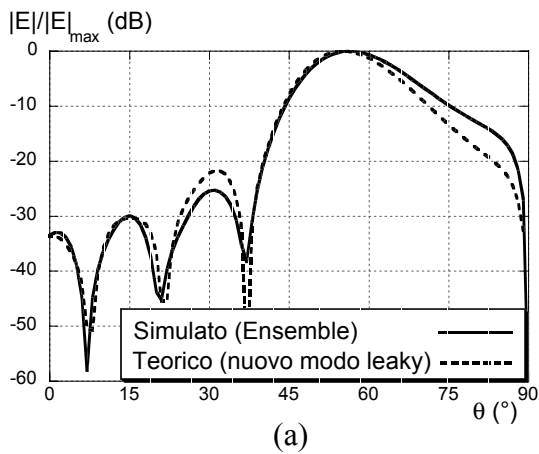


Fig. 5 – Confronto fra i diagrammi di radiazione simulati e teorici per un array come in Fig. 4, con un numero finito di elementi ($N = 8$). (a) Lobo principale; (b) grating lobe.