SUPERFICI SELETTIVE IN FREQUENZA MULTI-STRATO APPLICATE A SCHIERE CILINDRICHE DI ANTENNE A SFASAMENTO PROGRESSIVO.

G. Gerini*, L. Zappelli**

* TNO-Physics and Electronics Laboratory, P.O. Box 96864, 2509 JG The Hague, The Netherlands, gerini@fel.tno.nl
** Dipartimento di Elettronica e Automatica, Università di Ancona, via Brecce Bianche 60121, Ancona, l.zappelli@ee.unian.it

Abstract

We present an efficient approach for the design of multi-layer planar and cylindrical arrays with integrated Frequency Selective Surfaces. The design of such arrays responds to the more and more demanding requirements on modern array antennas in terms of structural integration and reduced Radar Cross Section (RCS). The proposed approach is based on an Integral Equation Multi-mode Equivalent Network (MEN) formulation and the Unit Cell approach. The value of the results presented is in that, due to the modularity of this formulation, dielectric radomes and frequency selective screens in front of the array, as well as additional junctions and waveguide discontinuities (tuning or filtering elements) can be easily included in the analysis.

Introduzione

Un gran numero di sistemi militari usa antenne ad apertura montate su nave od aeromobile. Per ridurre i costi e migliorare le caratteristiche e.m. (RCS), sarebbe preferibile combinare più funzioni in una singola apertura. A tal fine le schiere di antenne a sfasamento progressivo con proprietà filtranti in frequenza sembrano particolarmente adatte ad ottenere le caratteristiche cercate. Al tempo stesso l'evoluzione nel settore della antenne sta puntando verso l'uso di antenne integrate, dove per "integrate" si deve intendere il fatto che il sistema di antenne deve essere introdotto in una piattaforma le cui dimensioni e forme sono imposte dall'aerodinamica e/o dai vincoli strutturali e/o spaziali. L'utilizzo di schiere di antenne conformi alle superfici, oltre agli evidenti benefici *strutturali*, comporta anche un certo numero di benefici *funzionali*, quali l'eliminazione di parti meccaniche in movimento, il potenziale aumento dell'apertura disponibile (con conseguente minore larghezza del fascio e maggiore guadagno d'antenna), maggiori angoli di ricerca e riduzione della RCS. Un approccio moderno alla realizzazione di schiere di antenne strutturalmente integrate in piattaforme a bassa RCS consiste nell'uso di strutture multi-strato con radome integrati e superfici selettive in frequenza. Per concludere, lo sviluppo tradizionale della componentistica hardware, basata sulla realizzazione e misura dei prototipi, comporta un notevole lasso di tempo con costi decisamente elevati. Perciò la possibilità di ottenere degli strumenti di progettazione che integrino tutte le richieste stanno diventando un requisito essenziale nel campo della progettazione di antenne integrate, nel senso precedentemente illustrato. Alla luce di quanto esposto, le antenne in microstriscia possono soddisfare pienamente le richieste del mercato. Accanto a tali strutture, grazie ai progressi tecnologici, negli ultimi anni sono state sviluppate delle schiere di antenne molto compatte e leggere che sfruttano delle guide d'onda irradianti nello spazio, integrate con moduli Rx/Tx. Ulteriori vantaggi risiedono nel fatto che i radiatori in guida d'onda sono ben noti nelle loro caratteristiche in termini di larghezza di banda, filtraggio, buon adattamento su banda larga. L'introduzione al loro interno di dielettrici può ridurre le dimensioni con ulteriori vantaggi [1].

Teoria: l'approccio con la "Multi-mode Equivalent Network" (MEN)

In questo contributo presentiamo uno strumento accurato ed efficiente per l'analisi di schiere di antenne conformi a superfici cilindriche, multi-strato, formate da radiatori in guida d'onda aperte, basato sulla formulazione "Multi-mode Equivalent Network" (MEN) [2], [3] e sul concetto di Cella Unitaria. La modularità di tale approccio permette l'analisi di strutture molto complesse, che comprendono sia strati dielettrici e schermi selettivi in frequenza (FSS) disposti dinanzi alle bocche irradianti, sia strutture filtranti o di sintonia poste all'interno delle guide d'onda. Nella prima formulazione, le FSS sono state considerate come schermi dotati di un certo spessore [3]; attualmente, si possono analizzare anche nel caso siano rappresentate da opportuni "patch" metallici [4]. Sfruttando la decomposizione di una struttura complessa nella cascata di sezioni di guide d'onda accoppiate tramite una superficie comune, sviluppando lo spettro modale di ciascuna regione (guida d'onda metallica, cella unitaria, FSS, …) si ottiene una rappresentazione in termini di una rete multi-modale equivalente basata su di una equazione integrale che rappresenta la discontinuità tra le varie regioni. I modi vengono divisi in "accessibili" e "localizzati": i primi sono quei modi eccitati dalla discontinuità che interagiscono con quella successiva, mentre i secondi sono gli infiniti modi rimanenti che rimangono localizzati nei pressi della discontinuità. Mentre i primi rappresentano le "porte" della rete multi-modale, i secondi sono contenuti nel nucleo dell'equazione integrale. La semplice cascata delle matrici Z/Y/S ottenute in tal modo permette di valutare le caratteristiche totali della struttura radiante. Grazie a questo approccio modulare, il processo di ottimizzazione risulta quanto mai semplice: soltanto quelle parti della struttura completa che devono essere effettivamente modificate vengono ottimizzate, mentre le altre rimangono inalterate nella loro rappresentazione a rete multi-modale. Concludendo, questo approccio consente di effettuare la progettazione di schiere integrate molto complesse, considerando l'intero sistema come una "unità" costituita da tanti pezzi ciascuno ben rappresentato. Il progettista può operare l'ottimizzazione avendo a disposizione notevoli opzioni e gradi di libertà.

Risultati

Il primo caso riportato in Fig. 2 riguarda il confronto con quanto già noto in letteratura [5] nel caso di una schiera planare di antenne formate da guide d'onda aperte (Fig. 1.a). I risultati sono praticamente coincidenti con quanto riportato in [5, pag. 189]. Passando al caso cilindrico (Fig. 1.b), si é realizzato un dimostratore caratterizzato da un cilindro di 70 cm di diametro con 135 aperture sull'intera circonferenza, alimentate da guide d'onda WR90, operanti in banda X. Il coefficiente di riflessione visto da una singola bocca ed il coefficiente di accoppiamento con una bocca superiore (nel caso di alimentazione di un solo elemento) sono riportati nella Fig. 3. I risultati teorici e sperimentali risultano anche qui in buon accordo. Il passo successivo è consistito nell'integrazione di due FSS nella schiera radiante planare o cilindrica. Il coefficiente di riflessione per il caso planare è riportato nella Fig. 4 al variare della frequenza e per diverse lunghezze della prima "cavità", delimitata dalla prima FSS e dal piano metallico della schiera. L'effetto delle lunghezza di questa cavità è quello di spostare la frequenza di risonanza della prima cavità e, quindi, della struttura globale. In termini di ottimizzazione, si può osservare che i gradi di libertà sono molteplici: le lunghezze delle due cavità L_1 e L_2 (L_2=25 mm in Fig. 4), le dimensioni delle aperture delle due FSS (in Fig. 4: 14x6 mm^2 per la prima FSS e 14x2 mm^2 per la seconda) e quelle sul piano della

schiera (in Fig. 4: 22.86x10.16 mm^2) ed, infine, lo spessore delle FSS (in Fig. 4: 2.5 mm per entrambe).
Nel caso di schiere cilindriche la situazione si complica, come mostrato in Fig. 5, in cui il coefficiente di riflessione valutato alla bocca delle WR90 viene riportato al variare della frequenza e per due casi cilindrici, che prevedono 100 elementi radianti il primo e 200 il secondo, lungo la circonferenza. In entrambi i casi si mantiene fissa la dimensione della cella unitaria radiale, ovvero la distanza tra gli elementi radianti, variando il raggio opportunamente. Per confronto viene riportato anche il caso planare, coincidente con il caso della Fig. 4 con L_1=29 mm. Lo scopo di questa figura è quello di mostrare l'effetto di taglio "graduale" dei modi radiali che vengono innescati dalla struttura cilindrica. Infatti, la cella unitaria, che, sotto l'ipotesi di periodicità della schiera, descrive la propagazione nello spazio esterno al cilindro, ha una configurazione radiale, che presenta dei modi dotati di una impedenza funzione della coordinate radiale. Tali impedenze cambiano la loro natura al variare della posizione passando da un comportamento quasi reattivo ad uno quasi resistivo. Tale comportamento, ben noto nelle strutture radiali e sferiche, prende il nome di "taglio graduale" ed il suo effetto è mostrato dai parametri S riportati nella Fig. 5 nel caso cilindrico. Sebbene la distanza tra gli elementi venga mantenuta costante, il differente raggio di curvatura del cilindro cambia le caratteristiche di propagazione nei due casi. Per raggi inferiori (numero di elementi radianti pari a 100) i modi di ordine superiore (curva S_{13}) entrano in propagazione prima di quanto accada per raggi superiori (numero di elementi pari a 200). Ciò degrada le caratteristiche filtranti globali della struttura per piccoli valori di raggio. Ovviamente, se il raggio tende a divenire molto grande, si ricade nel caso planare, riportato nella Fig. 5, dove questo problema non compare più dato che le frequenze di taglio dei modi sono fissate e tutti i modi di ordine superiore sono sotto taglio nella banda X.

Conclusioni

Si è presentato un approccio efficiente per la progettazione di schiere di antenne a sfasamento progressivo planari e cilindriche integrate con superfici selettive in frequenza, formando una struttura multi-strato. Sono state analizzate le caratteristiche di riflessione per il caso planare e cilindrico, confrontando i risultati con dati noti in letteratura o con dati sperimentali. Le proprietà filtranti di tali strutture sono state discusse e si è mostrato il ruolo significativo dei modi di ordine superiore al variare del raggio di curvatura.

Bibliografia

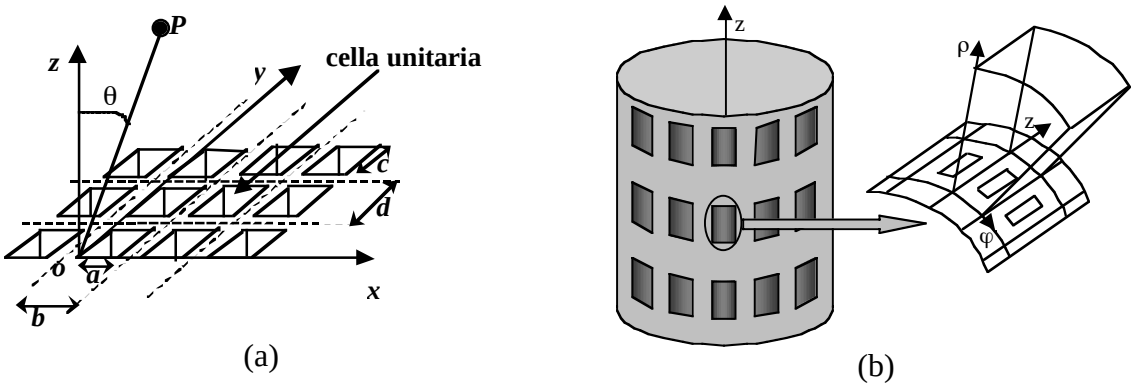
[1] J.A. Reddick III, R.K. Peterson, M. Lang, W.R. Kritzler, P. Piacente, W.P.Kornrumpf, "High Density Microwave Packaging Program Phase 1- Texas Instruments/ Martin Marietta Team, *Digest IEEE MTT-S*, May 1995.

[2] G. Gerini, G. Lastoria, M. Guglielmi, "Efficient Integral Equation Formulations for Admittance or Impedance Representations of Planar Waveguide Junctions", *Proceedings of the 1998 IEEE MTT-Symposium*, Baltimore, Maryland, June 1998.

[3] G. Gerini, L. Zappelli, "Cylindrical Conformal Arrays Loaded with Frequency Selective Screens", *Conference Proceedings of the 31st European Microwave Conference 2001*, London, U.K., September 2001.

[4] S. Monni, G. Gerini, A. Neto, "EFIE Based Multimode Equivalent Network for the Analysis of phased arrays integrated with FSS's", *Conference Proceedings of the 2002 URSI General Assembly*, Maastricht, The Netherlands.

[5] N. Amitay, V. Galindo, C.P. Wu, *Theory and Analysis of Phased Array Antennas*, Wiley-Interscience Ed., 1972.



(a) (b)

Fig. 1 : Schiera planare (a) e cilindrica (b) di antenne in guide d'onda aperte.

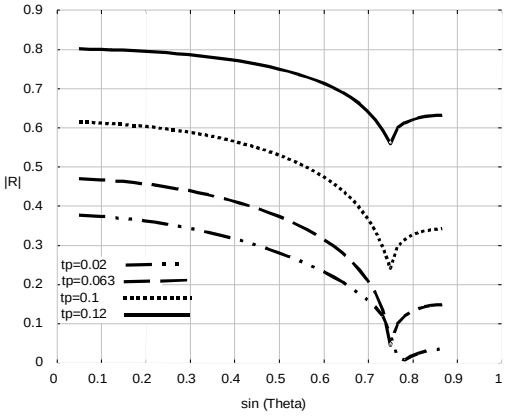


Fig. 2 : Coefficiente di riflessione visto dalle guide d'onda di una schiera planare al variare dell'angolo θ, per diversi valori di cella unitaria (t_p=(b-a)/b, c=d, b/λ=0.5714) [5, pag. 189].

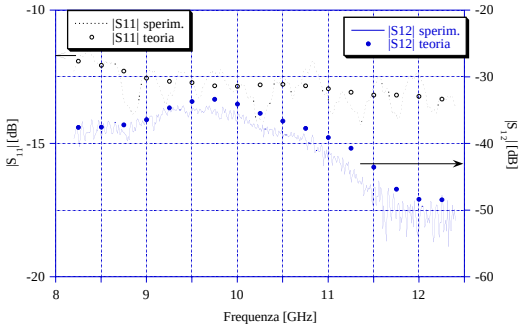


Fig. 3 : Confronto tra risultati teorici e sperimentali per una schiera cilindrica di guide aperte in banda X: S_{11} è il coeff. di riflessione alla guida di alimentazione, S_{21} è il coefficiente di accoppiamento con una guida adiacente sulla stessa colonna.

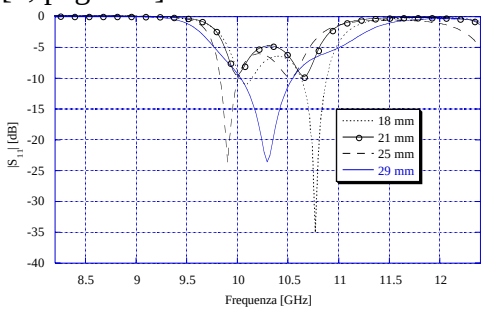


Fig. 4 : Coefficiente di riflessione visto dalle guide d'onda di una schiera planare, caricata con due FSS uguali, al variare della frequenza e della lunghezza della prima "cavità" (distanza tra il piano della schiera e la prima FSS).

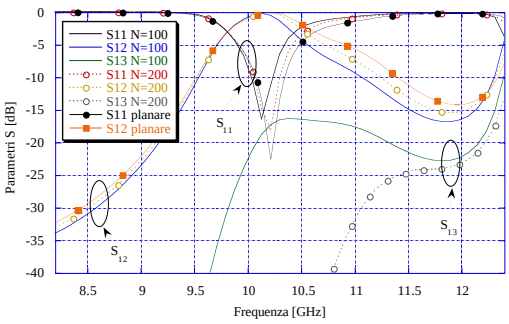


Fig. 5 : Parametri S di una schiera planare e cilindrica caricate con due FSS, al variare della frequenza e del numero di elementi irradianti.