

Analysis and Design of Compact Stepped Waveguide Twists

Massimo Baralis, Riccardo Tascone, Augusto Olivieri,
Oscar Antonio Peverini, Renato Orta e Giuseppe Virone

IRITI-CNR, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino

Email: massimo.baralis@polito.it

Abstract

Rectangular waveguide twists are components that provide an on-axis rotation of the transverse waveguide section, to allow the connection between two devices with differently oriented ports. Usually, a continuous and slow rotation is adopted in order to achieve high values of return loss. In this paper, a new twist configuration is presented, obtained by the direct connections of rectangular waveguides with differently rotated cross-sections. It presents the following advantages: 1) easy fabrications with high control on the relative rotation angles; 2) reduction of device dimensions. In order to accurately analyze and design these devices, the Mode Matching is adopted in conjunction with a new set of numerically synthesized basis functions, derived from a Fourier basis by the application of the singular value decomposition. Very high return loss and good agreement between computations and measurements are achieved.

INTRODUZIONE

Lo scopo di questo lavoro è il progetto di dispositivi compatti che realizzino una rotazione in asse di una guida d'onda rettangolare, al fine di connettere componenti alle microonde con porte orientate diversamente.

Nella costruzione di radiometri per osservazioni astrofisiche nasce l'esigenza della massima compattezza di tutti i dispositivi in guida d'onda e di specifiche severe. Questa esigenza viene esasperata quando i dispositivi, al fine di ridurre la cifra di rumore, si trovano all'interno di una "zona fredda", mantenuta a bassa temperatura mediante apparati criogenici. L'utilizzo di dispositivi commerciali, per la connessione di dispositivi che presentano porte ruotate, comporterebbe un aumento delle dimensioni degli scudi termici.

Allo stato dell'arte tali transizioni sono realizzate in modo progressivo mediante una lenta e continua rotazione (o in generale deformazione) in asse di un tratto di guida rettangolare, al fine di ridurre al minimo la perturbazione. Queste transizioni risultano però lunghe alcune lunghezze d'onda guidate e la loro realizzazione non è banale, in particolar modo a frequenze elevate. Più recentemente sono stati presentati dispositivi che permettono di ridurre le dimensioni e, allo stesso tempo, di migliorare le prestazioni; la rotazione in asse non avviene più in modo graduale, ma mediante la successione di tratti di guida, e si sfrutta l'interferenza delle discontinuità per ottenere l'adattamento nella banda di interesse. In [1] i diversi tratti di guida non sono ruotati ma

vengono modificati nelle dimensioni e la rotazione totale può solo essere di 90° mentre successivamente [2] è stato proposto un dispositivo che permettesse di ottenere rotazioni arbitrarie, attraverso la cascata di tratti di guida rettangolare ruotati, intervallati da tratti di guida circolare; in entrambi i casi la singola discontinuità consiste nell'interfacciamento di due guide con geometria convenzionale attraverso un'apertura rettangolare, ed è quindi di facile studio.

La nuova configurazione che qui si propone (Fig. 1) è invece ottenuta mediante la connessione diretta di tratti di guida rettangolare ruotati. L'angolo di rotazione può essere controllato con accuratezza anche in applicazioni ad alta frequenza. Gli angoli di rotazione e le lunghezze di ciascun tratto di guida sono determinati mediante una tecnica di sintesi simile a quelle adottata per i filtri (ad esempio [3]), con l'aggiunta del vincolo dell'angolo di rotazione totale. Rispetto a quanto proposto in [2] migliora l'adattamento e la realizzazione risulta più semplice, dal momento che non sono più richiesti i tratti di guida circolare a separare i tratti di guida rettangolare, ma si complica notevolmente lo studio elettromagnetico, dal momento che si deve individuare un insieme di funzioni di base definito sull'apertura A_0 (Fig. 2).

Il metodo di analisi sviluppato per questo problema è basato sul Mode Matching, e si avvale di un insieme di funzioni di apertura sintetizzate numericamente, derivato dalle funzioni bidimensionali di Fourier mediante l'applicazione dell'algoritmo della decomposizione ai valori singolari. L'efficienza di questo metodo è legata al fatto che gli integrali di proiezione dei modi sull'apertura e quelli utilizzati nella sintesi delle funzioni di base sono tutti riconducibili ad un unico integrale di superficie, facilmente valutabile analiticamente; l'approssimazione numerica interviene esclusivamente nell'operazione di troncamento del numero di modi e di funzioni di apertura.

FUNZIONI DI BASE SINTETIZZATE NUMERICAMENTE

La matrice scattering generalizzata della discontinuità prodotta dalla connessione di due tratti di guida ruotati viene calcolata attraverso la tecnica del Mode Matching. Tale tecnica richiede la conoscenza dello spettro modale della guida che ha per sezione trasversale l'apertura A_0 (vedi Fig. 2). Un aspetto importante nell'applicare tale metodo è la disponibilità per via analitica delle matrici di proiezione. A tal fine si consideri l'insieme dalle funzioni bidimensionali di Fourier:

$$f_{p,q}(x, y) = P_{A_0}(x, y) \cdot e^{jP\left(\frac{p}{a_0}x + \frac{q}{b_0}y\right)},$$

dove $P_{A_0}(x, y)$ è la funzione caratteristica definita sull'apertura A_0 inscritta nel rettangolo di dimensioni a_0 e b_0 ; questo insieme fornisce una descrizione completa ma ridondante, un suo

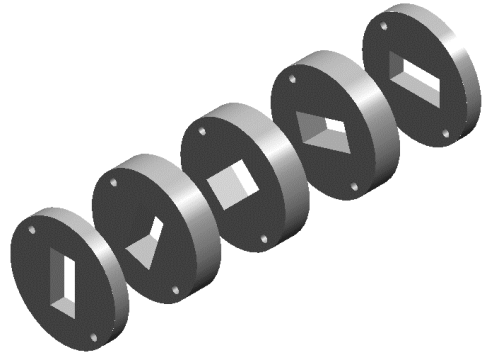


Figura 1 Vista esplosa di una transizione di 90° ottenuta mediante l'inserimento di 3 tratti di guida ruotati.

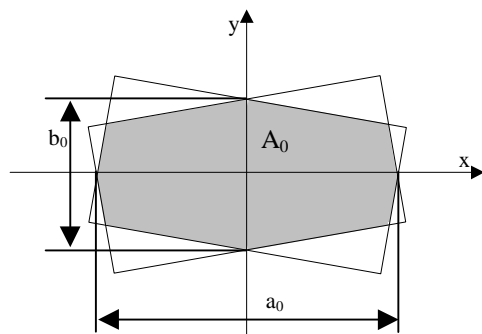


Figura 2 Transizione tra due guide d'onda arbitrariamente ruotate e apertura risultante.

utilizzo come insieme di funzioni di base causerebbe un mal condizionamento della matrice del sistema. Per ottenere un sistema di funzioni ortonormali sul dominio, si può considerare la decomposizione ai valori singolari della matrice di proiezione:

$$C_{mn} = \langle f_m, f_n \rangle = \int_{\Sigma} P_{A_0}(\vec{r}) \cdot e^{j(-\vec{k}_m + \vec{k}_n)\vec{r}} d\vec{r} = \tilde{P}_{A_0}(\vec{k}_n - \vec{k}_m) \Rightarrow \underline{\underline{C}} = \underline{\underline{V}}_C \underline{\underline{S}}_C \underline{\underline{V}}_C^H$$

dove $\tilde{P}_{A_0}(\vec{k})$ è la trasformata bidimensionale di Fourier di $P_{A_0}(x, y)$; tenendo di $\underline{\underline{V}}_C$ solo le colonne corrispondenti ai valori singolari più significativi si definisce un set ortonormale $g_m(\vec{r}) = \sum_n P_{nm}^C f_n(\vec{r})$ dove $\underline{\underline{P}}^C = \underline{\underline{V}}_C \underline{\underline{S}}_C^{-1/2}$. Le matrici di proiezione dei modi delle due guide su questo nuovo insieme di funzioni non risultano ancora di rango massimo. Si definiscono quindi due nuovi insiemi di funzioni $\{h_l^N(\vec{r})\}$ e $\{h_l^D(\vec{r})\}$, a partire dal set di funzioni $g_m(\vec{r})$, che soddisfino rispettivamente la condizione di Neumann e di Dirichlet; si può dimostrare che le matrici di trasformazione coincidono con il kernel rispettivamente della matrice:

$$\underline{\underline{B}}^N = \underline{\underline{P}}^{CH} \left[\underline{\underline{K}}_x \underline{\underline{C}} \underline{\underline{K}}_x + \underline{\underline{K}}_y \underline{\underline{C}} \underline{\underline{K}}_y - \underline{\underline{C}} (\underline{\underline{K}}_x^2 + \underline{\underline{K}}_y^2) \right] \text{ e della sua hermitiana; } \underline{\underline{K}}_x \text{ e } \underline{\underline{K}}_y \text{ sono}$$

le matrici diagonali che contengono le componenti cartesiane della frequenza spaziale. Pertanto, valutando un'unica decomposizione ai valori singolari $\underline{\underline{B}}^N = \underline{\underline{U}}_B \underline{\underline{S}}_B \underline{\underline{V}}_B^H$ e tenendo di $\underline{\underline{U}}_B$ e $\underline{\underline{V}}_B$ solo le colonne corrispondenti ai valori singolari minori di una certa soglia, si possono costruire le matrici di trasformazione ${}^N \underline{\underline{P}}^B = \underline{\underline{V}}_B$ e ${}^D \underline{\underline{P}}^B = \underline{\underline{U}}_B$ che definiscono gli insiemi di funzioni che soddisfano le condizioni al contorno:

$$h_l^N(\vec{r}) = \sum_m {}^N P_{ml}^B g_m(\vec{r}) \quad \text{e} \quad h_l^D(\vec{r}) = \sum_m {}^D P_{ml}^B g_m(\vec{r})$$

Utilizzando questo insieme di funzioni, possono quindi essere definite le funzioni generatrici $\Psi_k(\vec{r}) = \sum_l {}^N X_l^k h_l^N(\vec{r})$ e $\Phi_k(\vec{r}) = \sum_l {}^D X_l^k h_l^D(\vec{r})$

L'equazioni di Helmholtz vengono risolte attraverso le equazioni agli autovalori:

$$\left({}^N \underline{\underline{P}}^{BH} \underline{\underline{P}}^{CH} \underline{\underline{K}}^2 \underline{\underline{P}}^C \quad {}^N \underline{\underline{P}}^B \right) {}^N \underline{\underline{X}}^k - k_{t_k}^2 {}^N \underline{\underline{X}}^k = 0 \quad \text{per i modi TE,}$$

$$\left({}^D \underline{\underline{P}}^{BH} \underline{\underline{P}}^{CH} \underline{\underline{K}}^2 \underline{\underline{P}}^C \quad {}^D \underline{\underline{P}}^B \right) {}^D \underline{\underline{X}}^k - k_{t_k}^2 {}^D \underline{\underline{X}}^k = 0 \quad \text{per i modi TM,}$$

dove k_{t_k} è la costante critica di propagazione del k-esimo modo nella guida di sezione A_0 .

RISULTATI

Per convalidare il metodo di analisi presentato, è stato realizzato un dispositivo in WR75 che realizzi la cascata di due rotazioni, separati da un tratto di guida lungo 8.03 mm. Sono state effettuate le misure per diversi angoli di rotazione; si riportano due casi in cui

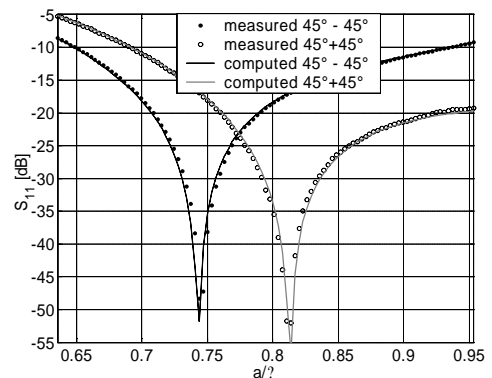
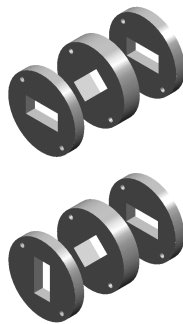


Figura 3 Analisi e misure per il modo fondamentale del coefficiente di riflessione della cascata di due rotazioni di 45°.

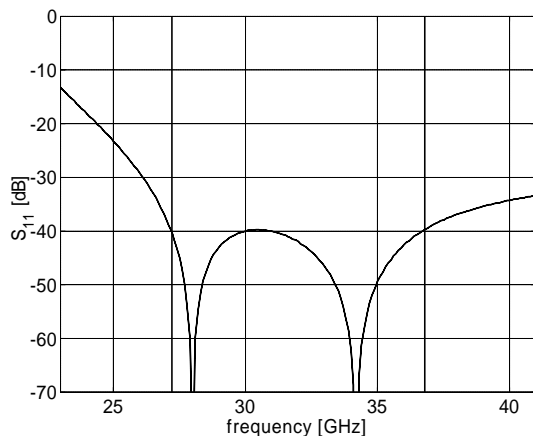


Figura 4 Dispositivo ottimizzato a 2 cavità in WR28 per una rotazione totale di 45°: analisi per il modo fondamentale del coefficiente di riflessione.

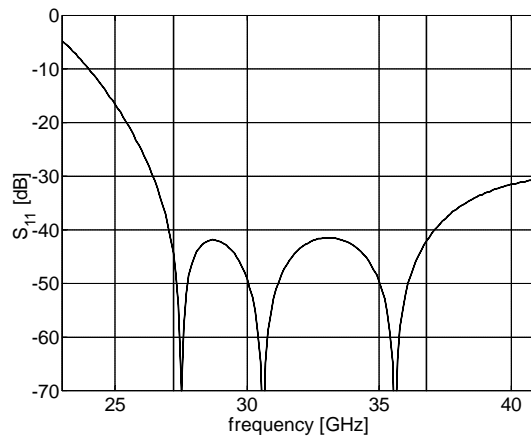


Figura 5 Dispositivo ottimizzato a 3 cavità in WR28 per una rotazione totale di 90°: analisi per il modo fondamentale del coefficiente di riflessione.

entrambi gli angoli di rotazione sono di 45 gradi, in un caso con verso discorde, ottenendo una rotazione totale nulla, nell'altro caso con verso concorde, ottenendo una rotazione totale di 90 gradi. Nell'ipotesi di interazione monomodale entrambe le configurazioni offrono lo stesso risultato poiché i parametri scattering della singola rotazione non dipendono dal verso. In realtà, come evidenziato dalla figura 3, il comportamento è significativamente diverso a causa dell'interazione multimodale; la figura mostra anche il buon accordo tra simulazione e misura. Per mezzo di questo strumento si sono progettati diversi twist. In figura 4 è riportato il coefficiente di riflessione di un twist di 45 gradi in WR28. Il dispositivo è realizzato con due tratti di guida, entrambi di lunghezza 3.49 mm con rotazione di 13.4, 18.2, 13.4 gradi. Si noti il livello del coefficiente di riflessione inferiore a -40 dB in una larghezza di banda del 30%. In figura 5 è riportato il parametro S_{11} di un twist con una rotazione di 90 gradi che offre un coefficiente di riflessione inferiore a -42 dB sempre in una banda del 30% mediante 3 tratti di guida in WR28, in questo caso lunghi rispettivamente 3.49, 3.47, 3.49 mm per una lunghezza totale di 10.45 mm e con angoli di rotazione di 16.9, 28.1, 28.1, 16.9 gradi. Concludendo, la configurazione proposta permette di ridurre notevolmente le dimensioni di tali componenti e presenta una geometria facilmente realizzabile anche a frequenze elevate.

Bibliografia

- [1] J. Bornemann, "Design of integrated waveguide twist components", *IEE Proceedings Microwaves Antennas and Propagation*, vol.142, n.4, pp. 345-349, Aug. 1995.
- [2] P.I. Alonso-Juaristi, J. Esteban, J.M. Rebollar, "Design of compact waveguide twists", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol.45, n.5, pp. 636-639, May 1997.
- [3] R.Tascone, P.Savi, D.Trinchero, R.Orta, "Scattering Matrix Approach for the Design of Microwave Filters", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol.48, n.3, pp. 423-430, Mar 2000.