

Argeo Deotto

PROPAGAZIONE DELLE ONDE E.M. NELLE GUIDE D'ONDA

L'avvento della TV-SAT ha portato alla diffusione delle tecniche proprie delle comunicazioni a microonde anche nel settore degli impianti d'antenna TV domestici. Nei paragrafi che seguono ci limiteremo ad una trattazione essenziale della propagazione guidata delle onde elettromagnetiche in funzione proprio di queste applicazioni.

A frequenza relativamente bassa, al di sotto di 1-2GHz, i segnali possono venir trasferiti tra le diverse sezioni di un sistema tramite i cavi coassiali. Alle frequenze più alte, le attenuazioni manifestate da queste linee di trasmissione divengono eccessive a causa:

- della radiazione elettromagnetica,
- delle perdite dielettriche,
- dell'effetto pelle nei conduttori.

Il metodo più efficace per trasmettere segnali a frequenze superiori a qualche GHz risulta quello che ricorre all'impiego delle guide d'onda. Si tratta sostanzialmente di tubi conduttori di sezione rettangolare, quadrata o circolare, riempiti di aria o di materiale dielettrico, nei quali le onde elettromagnetiche si propagano con particolari configurazioni dei campi, determinate dalle loro dimensioni meccaniche trasversali e dalla frequenza di lavoro.

Per ogni configurazione (modo) dell'onda, la guida presenta una frequenza di taglio, al di sotto della quale la propagazione diventa impossibile. In generale, quanto più

grande è la guida, tanto più bassa è la *frequenza di taglio* per i vari modi. L'onda che corrisponde alla più bassa frequenza di taglio è denominata onda principale. Naturalmente le dimensioni della guida d'onda sono scelte in modo da favorire la propagazione del modo principale.

In particolare, quando in un sistema è richiesta una configurazione di campo a simmetria circolare, si ricorre all'impiego di guide d'onda circolari.

Propagazione nella guida d'onda

Un'onda elettromagnetica, per poter esistere all'interno di una guida, deve contemporaneamente soddisfare alle equazioni di Maxwell ed alle condizioni ai limiti, che impongono l'annullamento delle componenti tangenziali del campo elettrico lungo le pareti della guida (supposte perfettamente conduttrici). Una soluzione esatta del campo

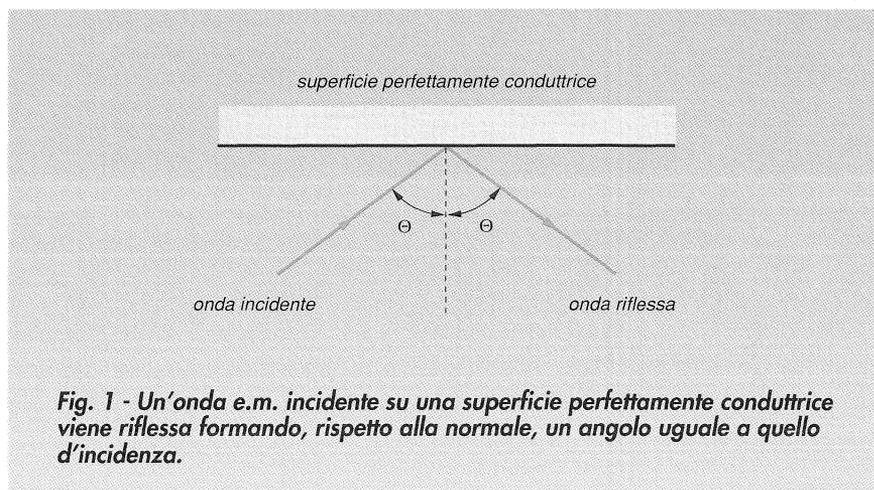


Fig. 1 - Un'onda e.m. incidente su una superficie perfettamente conduttrice viene riflessa formando, rispetto alla normale, un angolo uguale a quello d'incidenza.

esistente nella guida costituisce perciò un'espressione matematica piuttosto complessa. E' tuttavia possibile comprendere molte delle proprietà delle guide per mezzo di una semplice rappresentazione fisica del meccanismo della propagazione.

Ricordiamo innanzitutto che un'onda elettromagnetica, ad una sufficiente distanza dalla sorgente, presenta le componenti elettrica (E) e magnetica (H) del campo, tra loro ortogonali, disposte su un piano normale alla direzione di propagazione, quindi senza componenti longitudinali. In sintesi si tratta di onde elettromagnetiche trasversali (TEM). Di questo tipo è ad esempio l'onda che si propaga lungo una linea di trasmissione.

Riflessioni successive

Quando un'onda incide su una superficie riflettente, viene da questa riflessa e la sua direzione di propagazione forma un angolo rispetto alla normale uguale a quello di incidenza, esattamente come nel caso dei raggi luminosi (Fig. 1). In particolare, in corrispondenza del punto P di incidenza, il campo elettrico risultante deve essere nullo e perciò la sua fase si rovescia.

Facendo riferimento alla Fig. 2, che fotografa la situazione in un certo istante, osserviamo come nei punti dove i fronti d'onda si incontrano si avrà un massimo o uno zero, a seconda che lo sfasamento reciproco risulti nullo o di 180°. Così, nei punti Q e Q', il campo risultante dalla combinazione dell'onda incidente e di quella riflessa varierà tra un massimo in senso positivo e uno in senso negativo. Nei punti T e T', invece, le componenti incidente e riflessa del campo sono sempre in opposizione di fase, per cui il campo risultante è nullo.

Questa situazione si presenta anche per tutti i punti che giacciono sulla retta che unisce T a T', indicata

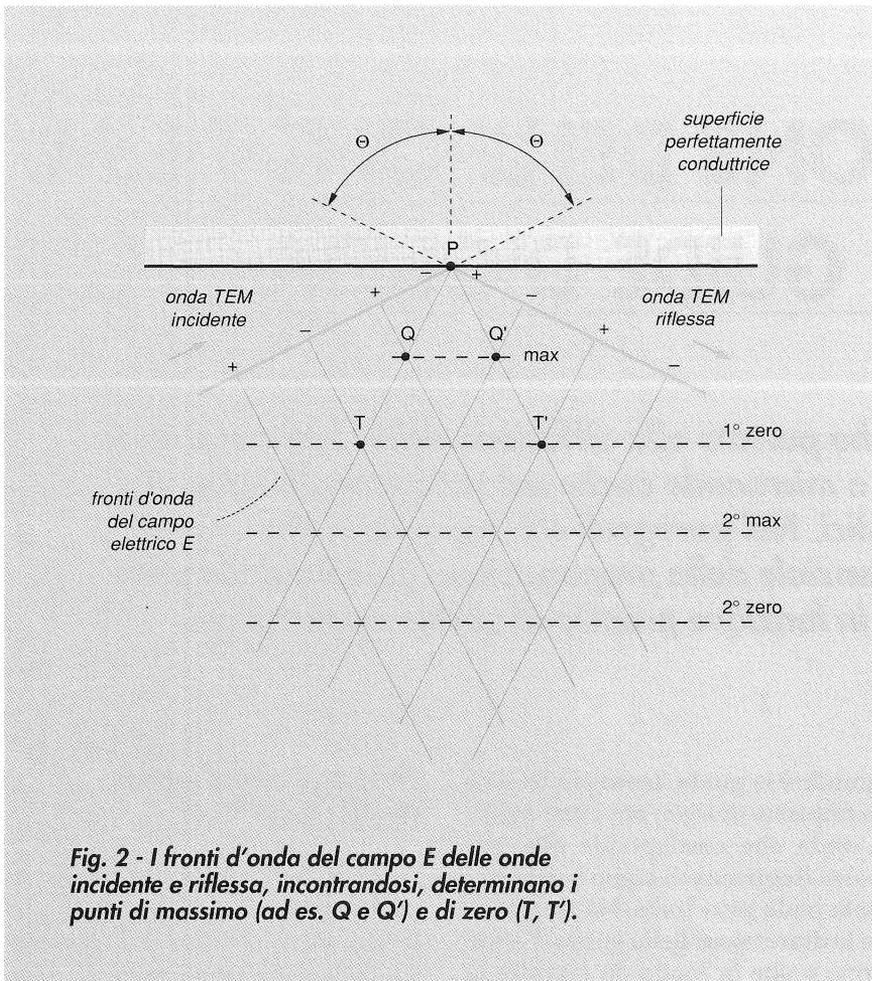


Fig. 2 - I fronti d'onda del campo E delle onde incidente e riflessa, incontrandosi, determinano i punti di massimo (ad es. Q e Q') e di zero (T, T').

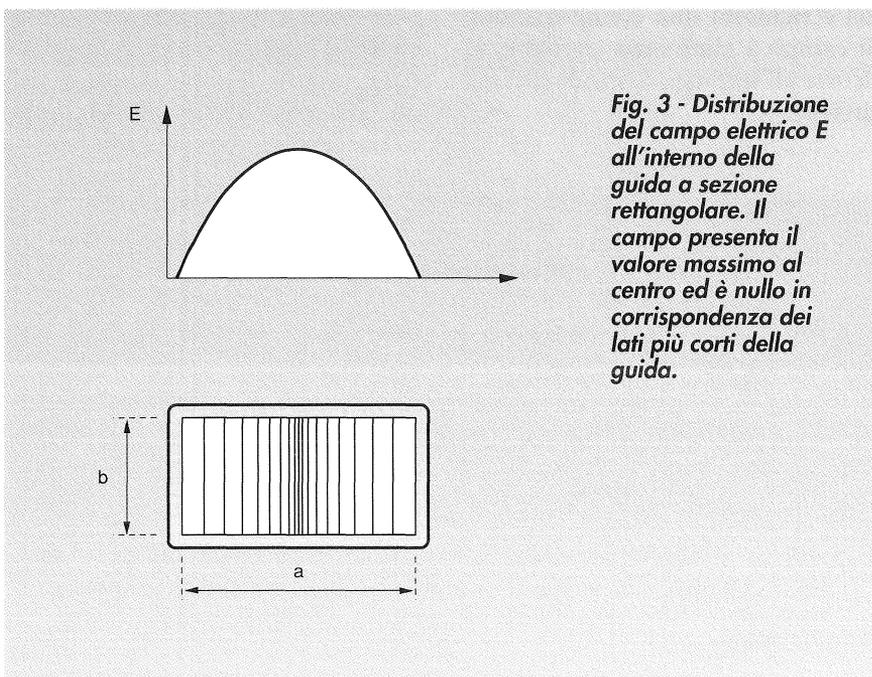


Fig. 3 - Distribuzione del campo elettrico E all'interno della guida a sezione rettangolare. Il campo presenta il valore massimo al centro ed è nullo in corrispondenza dei lati più corti della guida.

a tratteggio sempre in Fig. 2. Per questo motivo, se disponiamo in questa posizione un secondo piano perfettamente riflettente, parallelo al primo, le successive riflessioni tra le due pareti non modificheranno la distribuzione del campo, che presenterà valore nullo in corrispondenza delle superfici riflettenti e massimo al centro (Fig. 3). Il fronte d'onda verrà così continuamente riflesso tra le due pareti conduttrici, dando luogo ad un'onda stazionaria che rimbalza tra le due pareti e ad un'onda progressiva che si propaga lungo l'asse della guida.

Condizione di propagazione

La condizione perché ciò si verifichi è che tra l'angolo di incidenza Θ , la lunghezza d'onda in aria λ_0 e la distanza a tra le pareti riflettenti sussista la relazione, deducibile dalla Fig. 4:

$$\cos \Theta = \frac{\lambda_0}{2 \cdot a}$$

Quindi, per una data larghezza della guida (a), esiste un solo valore dell'angolo Θ per il quale il segnale con lunghezza d'onda λ_0 può propagarsi, dando luogo ad una distribuzione di campo elettromagnetico cui corrispondono un'onda stazionaria nel senso della larghezza e un'onda progressiva in quello dell'asse della guida.

Quando, per una data frequenza, è soddisfatta la condizione di propagazione, il campo elettromagnetico all'interno della guida presenta la distribuzione indicata in Fig. 5, nella quale il campo elettrico è trasversale (modo TE del primo ordine o TE₁₀).

Fig. 5 - Distribuzione del campo elettrico all'interno di una guida rettangolare nei modi TE₁₀.

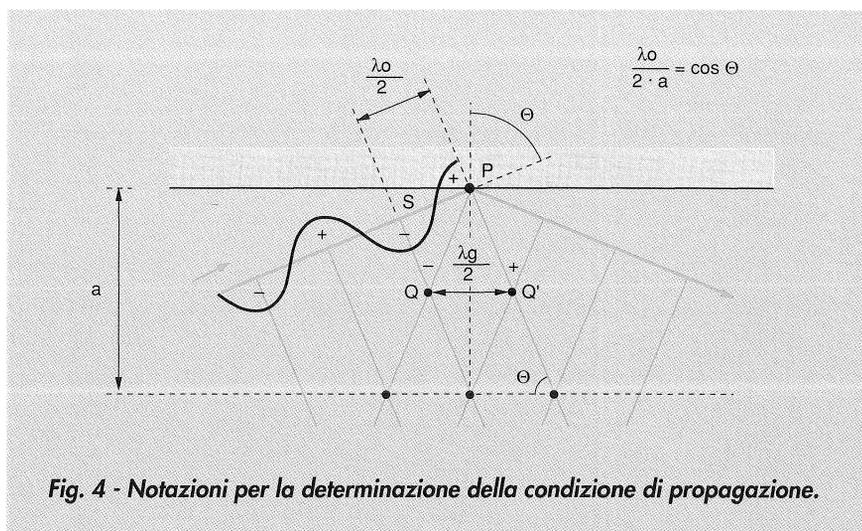


Fig. 4 - Notazioni per la determinazione della condizione di propagazione.

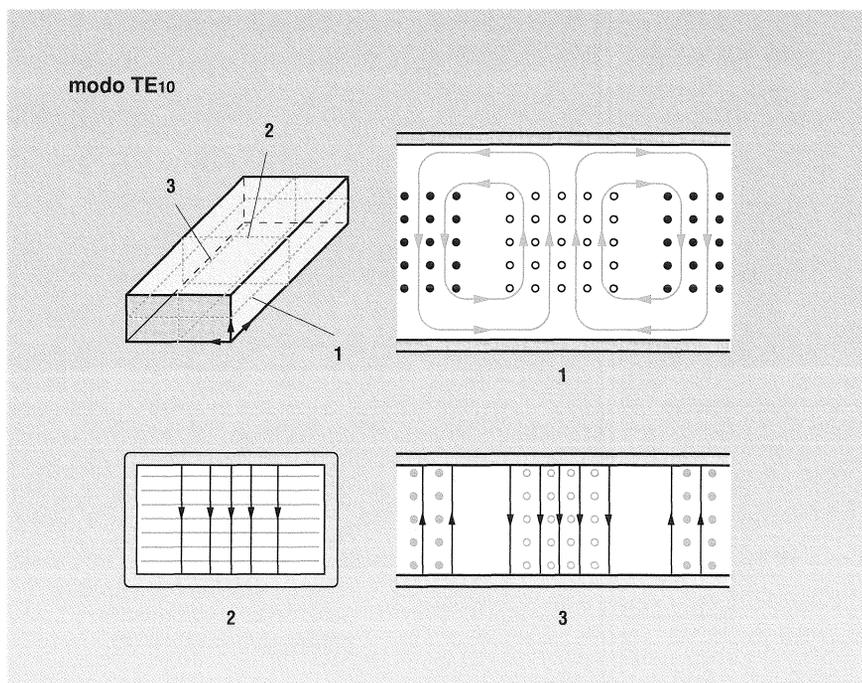
Lunghezza d'onda di taglio

Sempre dalla condizione di propagazione, si ricava che, quando $\Theta = 90^\circ$, $\lambda = \lambda_c = 2a$. Questa lunghezza d'onda è detta di taglio per la guida, nel modo fondamentale TE₁₀, e rappresenta la frequenza limite al di sotto della quale non si ha più propagazione di energia lungo la guida.

La guida d'onda opera pertanto

come filtro passa-alto, con frequenza di taglio pari a c/λ_c , determinata dalla dimensione trasversale della guida.

Il fatto che le guide d'onda debbano avere dimensioni paragonabili alla lunghezza d'onda λ limita il loro impiego pratico esclusivamente alle frequenze estremamente elevate. A frequenza di lavoro molto maggiori di quella di taglio, sono possibili modi di propagazione di



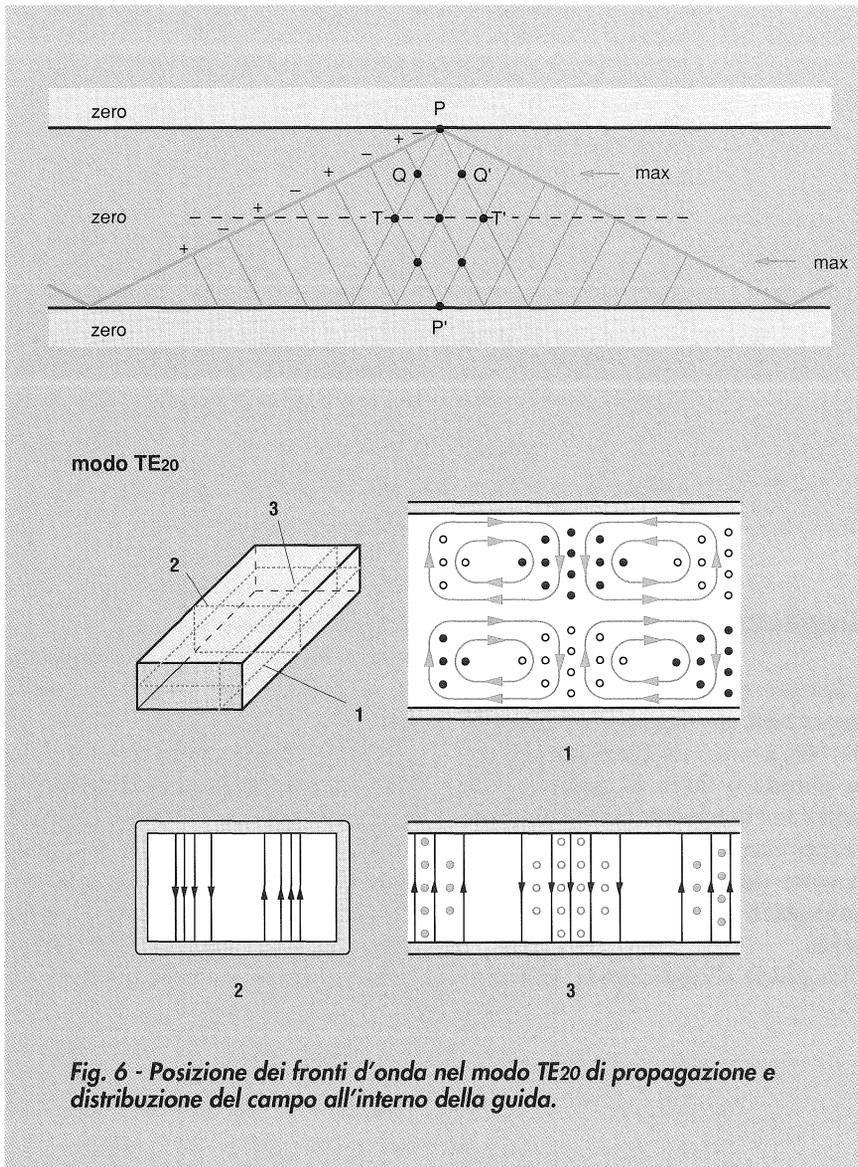


Fig. 6 - Posizione dei fronti d'onda nel modo TE₂₀ di propagazione e distribuzione del campo all'interno della guida.

ordine più elevato, in quanto può accadere che nella larghezza della guida trovino posto due coppie di massimi, separate ovviamente da una linea di zeri, come indicato in Fig. 6. Il modo corrispondente è detto TE₂₀ e può originarsi a partire da una frequenza doppia di quella di taglio del modo fondamentale TE₁₀. Esso corrisponde a due distribuzioni del primo ordine, poste fianco a fianco, con polarità invertite.

Velocità di fase e velocità di gruppo

Per l'onda progressiva all'interno della guida, sempre in riferimento alla Fig. 4, con semplici considerazioni trigonometriche si trova che la distanza tra i punti di massimo con lo stesso segno, quindi il doppio del segmento QQ', vale:

$$QQ' = \frac{SP}{\sin \Theta}$$

o, in termini di lunghezza d'onda:

$$\frac{\lambda_g}{2} = \frac{SP}{\sin \Theta} = \frac{\lambda_0}{2 \cdot \sin \Theta}$$

quindi:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sin \Theta}$$

Ciò significa che la lunghezza d'onda dell'onda progressiva nella guida risulta maggiore di quella λ_0 presentata nel vuoto o, in altri termini, visto che la frequenza non cambia, che la velocità di propagazione nella guida, detta *velocità di fase*, è maggiore di quella della luce. Risulta infatti:

$$\frac{\text{velocità di fase}}{\text{velocità della luce}} = \frac{1}{\sin \Theta}$$

Si tratta di una velocità apparente, non associata alla propagazione dell'energia, che si sposta invece

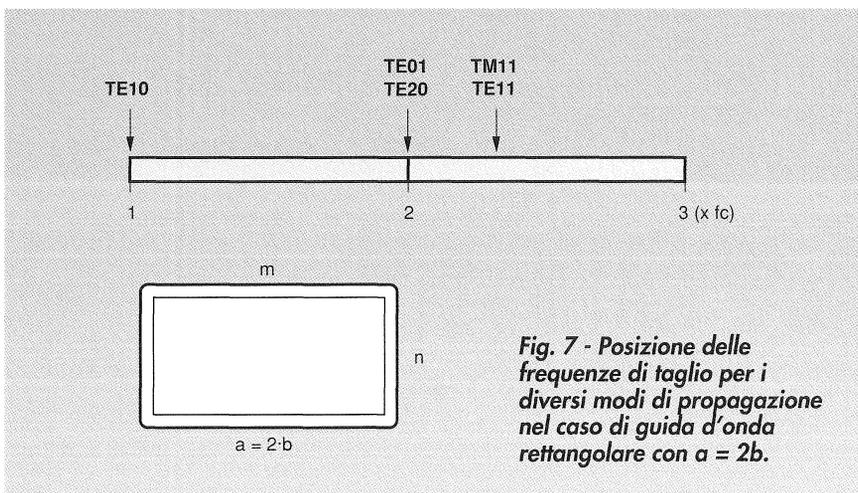


Fig. 7 - Posizione delle frequenze di taglio per i diversi modi di propagazione nel caso di guida d'onda rettangolare con $a = 2b$.

lungo l'asse con una velocità inferiore a quella della luce, in quanto le onde componenti viaggiano in direzioni oblique rispetto all'asse. La corrispondente *velocità di gruppo* è detta di *gruppo* ed il suo valore è dato dalla relazione:

$$\frac{\text{velocità di gruppo}}{\text{velocità della luce}} = \sin \Theta$$

Modi di propagazione

Per caratterizzare il generico modo di propagazione viene adottata la notazione a due indici m-n, che denotano, rispettivamente, il numero di semiperiodi della distribuzione dei campi lungo le direzioni trasversali corrispondenti alla base (a) e all'altezza (b) della guida.

Per il generico modo TE_{mn} (o TM_{mn}), la frequenza di taglio risulta definita dalla relazione:

$$f_{c(mn)} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

La Fig. 7 riassume i valori della frequenza di taglio riferita a quella più bassa del modo fondamentale, per i modi di propagazione più bassi.

Poiché il modo TE₁₀ è quello dominante per la guida rettangolare, le dimensioni a e b vengono scelte per favorire questo modo e sopprimere quelli di ordine più elevato (TE₂₀, TE₃₀, ecc).

Per la gamma SHF utilizzata dai satelliti TV (10,95 a 12,75 GHz) vengono utilizzate guide d'onda rettangolari WR75 per le quali a = 19,05mm e b = 9,53mm. Le frequenze di taglio nelle due dimensioni sono 7,87GHz (per il modo TE₁₀) e 15,74GHz (per il modo TE₀₁) e comunque uguali o superiori a quest'ultima frequenza per i modi di ordine superiore, come si può facilmente calcolare. Ciò significa che il solo modo di propagazione possibile per i segnali TV-SAT, nella guida WR75, è il TE₁₀.

Questa caratteristica della guida rettangolare viene sfruttata nei di-

positivi OMT (Orthogonal Mode Transducer) per separare i segnali trasmessi dai satelliti con polarizzazioni lineari ortogonali, dei quali ci siamo occupati in un precedente intervento.

Guide d'onda circolari

La trasmissione delle onde elettromagnetiche può avvenire anche attraverso guide d'onda di sezione circolare. In questo caso, la simmetria cilindrica della guida non privilegia alcuna direzione radiale della sezione.

Le configurazioni dei campi saranno sempre quelle fornite dalle equazioni di Maxwell che dovranno soddisfare ancora alle condizioni al contorno:

- il campo elettrico E forma un angolo di 90° o è di valore nullo in corrispondenza delle superfici conduttrici,
- il campo magnetico H ha linee di forza chiuse e parallele alle su-

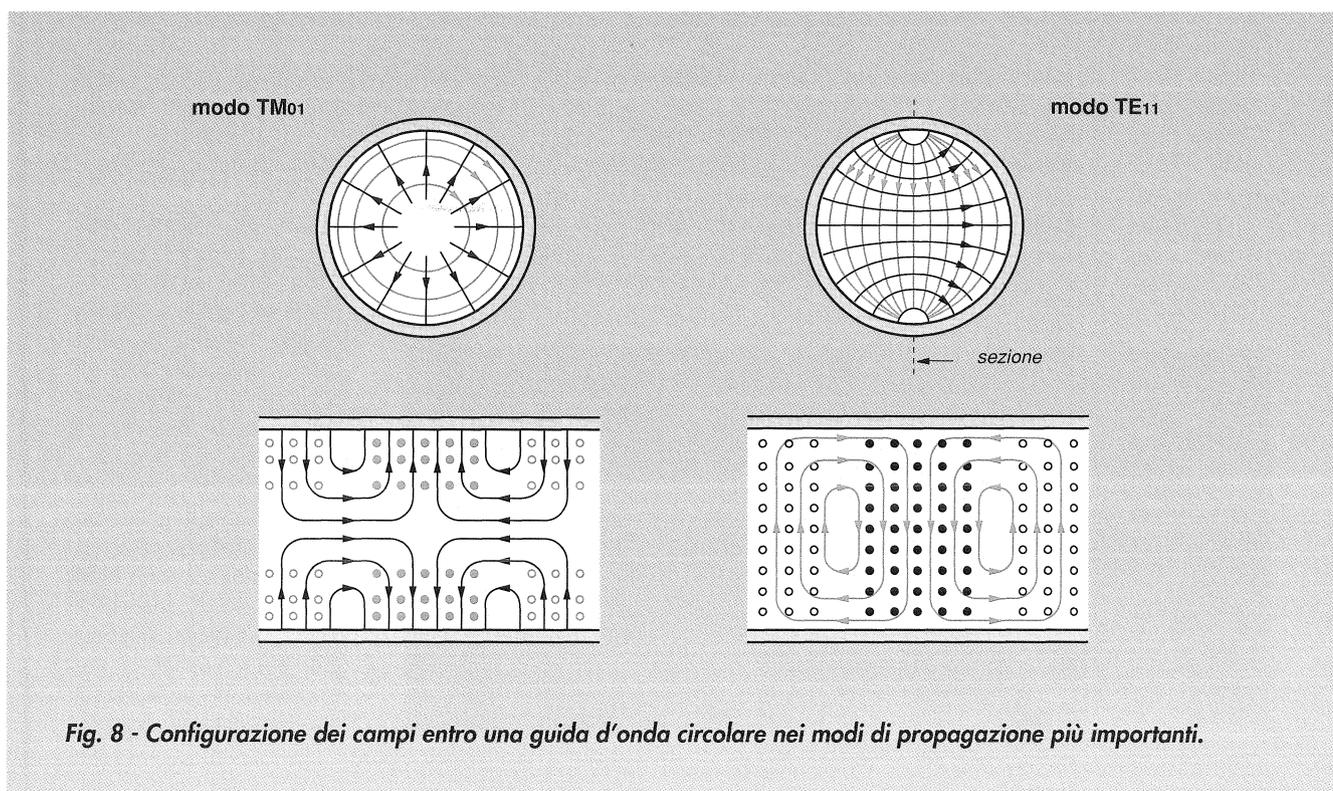


Fig. 8 - Configurazione dei campi entro una guida d'onda circolare nei modi di propagazione più importanti.

perfici conduttrici,

- i campi E e H sono ortogonali tra loro e formano un angolo di 90° rispetto alla direzione di propagazione.

In Fig. 8 sono riportate le distribuzioni dei campi corrispondenti ai modi fondamentali in una guida circolare.

Per queste guide, il modo dominante, cioè quello per cui è più bassa la frequenza di taglio, è il TE_{11} . La distribuzione corrispondente viene ottenuta distorcendo quella dominante della guida rettangolare fino a trasformare la sezione da rettangolare a circolare.

La lunghezza d'onda di taglio

della guida circolare è 1,71 volte il suo diametro e risulta perciò 1,17 volte ($2/1,71$) maggiore della dimensione a della guida rettangolare avente la stessa frequenza di taglio.

Quindi la guida circolare ha l'inconveniente di essere alquanto più pesante e ingombrante, però ha il vantaggio di una minor attenuazione e di una maggior capacità di potenza rispetto alla guida rettangolare.

Nelle applicazioni TV-SAT, le guide d'onda circolari vengono utilizzate quando è necessario far transitare segnali con polarizzazioni lineari e circolari complementari,

come ad esempio tra l'illuminatore ed il dispositivo di selezione delle polarità.

Nella gamma 10,95-12,75GHz, vengono normalmente impiegate le guide C120, che hanno un diametro di 17,47mm e presentano una frequenza di taglio di 10GHz.

Per il passaggio dalla guida circolare a quella rettangolare viene usata una transizione che raccorda gradualmente le due forme geometriche per un tratto della lunghezza di circa un quarto d'onda. La perdita introdotta da questi dispositivi è di qualche decimo di dB.