

文章编号: 1001- 2486(2008) 05- 0086- 04

## 一种分析广义脊形传输器件的新型数值方法\*

刘建闽<sup>1,3</sup>, 王雁桂<sup>2</sup>, 黎全<sup>2</sup>, 向钰<sup>3</sup>, 刘建斌<sup>4</sup>(1. 厦门大学, 福建 厦门 361005; 2. 国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073;  
3. 湖南人文科技学院, 湖南 娄底 417000; 4. 美国国家仪器公司, 上海 201203)

**摘要:** 利用 Compact 2-D 频域有限差分(FDFD)法分析广义脊形传输器件特性, 得到的本征方程只涉及 4 个横向场分量, 与同时处理 6 个场分量的本征问题相比, 大大降低了 CPU 时间, 同时由给定的工作频率  $f$  求解相移常数  $\beta$ , 易于实际应用。针对广义脊形传输器件的复杂结构, 本文划分了不同的子区。几种代表性的脊形波导传输结构分析结果与其他方法一致, 表明了本文分析思路的可行性。

**关键词:** 频域有限差分; 广义脊形波导; 本征值

中图分类号: O441.3 文献标识码: A

## A Novel Numerical Analysis Method for Generalized Ridge Transmission Devices

LIU Jian-min<sup>1,3</sup>, WANG Yan-gui<sup>2</sup>, LI Quan<sup>2</sup>, XIANG Yu<sup>3</sup>, LIU Jian-bin<sup>4</sup>

(1. Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. Hunan Institute of Humanities, Science and Technology, Loudi 417000, China; 4. US National Instruments, Shanghai 201203, China)

**Abstract:** A compact two-dimensional(2-D) finite-difference frequency-domain method is used to analyze propagation characteristics of generalized ridge waveguides for the first time. Only four transverse field components are involved in the final resulting eigenvalue problem, so the required CPU time is reduced considerably as compared to the approaches by which six field components are comprised. Additionally, the feature of finding the phase constant for a given frequency is more pertinent in practical applications. To deal with the generalized ridge waveguides, we divide complex structure into several regular sub-regions, and apply the compact 2-D FDFD method respectively in every sub-region only by setting boundary conditions accordingly. Finally, the calculated numerical results in the current study show good agreement with the published ones in this field.

**Key words:** finite difference frequency domain (FDFD); generalized ridge waveguide; eigenvalue

脊形传输器件具有工作频带宽、主模截止频率低、波阻抗低等诸多优点, 广泛应用于微波、毫米波技术以及电子对抗设备中等。人们已提出多种方法分析不同的脊形波导结构(本文称为广义脊形波导), 文献[1]将 T 型分块(TB)法用于分析广义脊形波导; 文献[2]分析了属于脊槽(Ridge-trough)型波导(RTW)的四种结构; 文献[3]则分析了非对称双脊形波导(ADRW)。如何高效、精确、方便地分析广义脊形波导, 仍是目前微波以及毫米波技术中的一个研究热点。广义脊形波导结构复杂, 特别是一些非对称结构, 采用常规的解析方法如模式匹配法、横向谐振法等分析较为困难, 因此常采用传输线矩阵法、积分方程法及时域有限差分法等数值方法。

文献[5]在文献[4]利用 Yee 网格在空域、时域上离散化 Maxwell 方程的基础上, 把网格在传播方向上的宽度设置为零, 利用二维网格进行简化, 相应的 2-D FDTD 方法较三维方法大大减少了计算所需的 CPU 时间和存储空间, 但它们都需要提供相移常数  $\beta$  作为输入参数, 然后通过离散傅立叶变换求出波导中传输模式的特征频率, 另外  $\beta$  作为输入参数与 FDTD 算法的数值稳定性有关。为解决这些问题, 文

\* 收稿日期: 2008- 05- 24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10504043)

作者简介: 刘建闽(1976—), 男, 高级工程师, 在职博士生。

献[6]提出了新型的2-D频域有限差分(FDFD)算法,直接由给定的工作频率计算相移常数。最近文献[7]采用紧凑型的两维网格(Compact 2-D)方法分析了规则波导,得到的特征方程只涉及4个横向场分量,进一步提高了计算速度。本文首次将Compact 2-D FDFD方法用于分析广义脊形波导传输特性,将复杂的波导结构划分成不同的子区,针对几何性质相似的子区编写通用的2-D FDFD子程序,再利用各子区交界处场量连续条件得到最后的本征方程。针对多种不同结构进行仿真后的数值结果与已有的数据吻合得较好。

## 1 理论分析

几种常见的广义脊形波导结构如图1所示。由于这些结构横截面上的理想导体边界以及脊棱处的分界面均可在直角坐标系下写出,因此可在直角坐标系下利用Compact 2-D网格对广义脊形波导空间中的4个横向场分量进行离散化处理。与传统的FDTD方法相同,Compact 2-D FDFD法仍然从Maxwell方程出发。为处理方便,令 $\hat{H}' = \mathbf{H} \cdot \sqrt{\epsilon_0}$ 和 $\hat{E}' = \mathbf{E} / \sqrt{\epsilon_0}$ ,对Maxwell两个旋度方程进行归一化,则有

$$-jk_0 \hat{H} = \Delta \times \hat{E}, \quad jk_0 \hat{E} = \Delta \times \hat{H} \quad (1)$$

式中省略了变换后的上标,其中 $k_0 = 2\pi/\lambda$ , $\lambda$ 为工作波长。假设广义脊形波导沿 $z$ 轴方向均匀且导波沿正 $z$ 方向传播,则波导内的电磁场分布可表示为

$$\mathbf{E}(x, y, z) = [E_x(x, y)\hat{x} + E_y(x, y)\hat{y} + E_z(x, y)\hat{z}]e^{-j\beta z} \quad (2)$$

$$\mathbf{H}(x, y, z) = [H_x(x, y)\hat{x} + H_y(x, y)\hat{y} + H_z(x, y)\hat{z}]e^{-j\beta z} \quad (3)$$

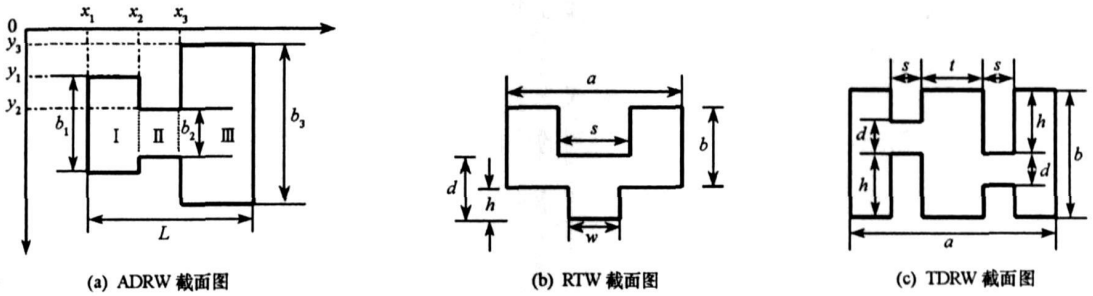


图1 广义脊形波导截面图

Fig. 1 Cross section of generalized ridge waveguide

基于Yee网格定义以及式(2),(3)对式(1)进行离散化,则

$$\begin{cases} H_x(i, j) = j \frac{1}{k_0 h_y} [E_z(i, j+1) - E_z(i, j)] - \frac{\beta}{k_0} e^{j\Delta} E_y(i, j) \\ H_y(i, j) = -j \frac{1}{k_0 h_x} [E_z(i+1, j) - E_z(i, j)] + \frac{\beta}{k_0} e^{j\Delta} E_x(i, j) \\ H_z(i, j) = j \frac{1}{k_0 h_x} [E_y(i+1, j) - E_y(i, j)] - j \frac{1}{k_0 h_y} [E_x(i, j+1) - E_x(i, j)] \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \epsilon E_x(i, j) = -j \frac{1}{k_0 h_y} [H_z(i, j) - H_z(i, j-1)] + \frac{\beta}{k_0} e^{j\Delta} H_y(i, j) \\ \epsilon E_y(i, j) = j \frac{1}{k_0 h_x} [H_z(i, j) - H_z(i-1, j)] - \frac{\beta}{k_0} e^{j\Delta} H_x(i, j) \\ \epsilon E_z(i, j) = -j \frac{1}{k_0 h_x} [H_y(i, j) - H_y(i-1, j)] + j \frac{1}{k_0 h_y} [H_x(i, j) - H_x(i, j-1)] \end{cases} \quad (5)$$

式中 $h_x, h_y, h_z$ 分别代表网格 $x, y, z$ 方向上的宽度; $\Delta = -\beta h_z/2$ 。当 $h_z$ 为0时,Yee网格退化成Compact 2-D网格。相应地,由式(4),(5)可得

$$\frac{\beta}{k_0} E_x(i, j) = -\frac{1}{k_0^2 \epsilon h_x h_y} [H_x(i, j-1) - H_x(i+1, j-1) - H_x(i, j) + H_x(i+1, j)]$$

$$+ \frac{1}{k_0^2 \epsilon h_x^2} H_y(i-1, j) + \left(1 - \frac{2}{k_0^2 \epsilon h_x^2}\right) H_y(i, j) + \frac{1}{k_0^2 \epsilon h_x^2} H_y(i+1, j) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\beta}{k_0} E_y(i, j) &= \frac{1}{k_0^2 \epsilon h_x h_y} [H_y(i-1, j) - H_y(i, j) - H_y(i-1, j+1) + H_y(i, j+1)] \\ &\quad - \frac{1}{k_0^2 \epsilon h_y^2} H_x(i, j-1) - \left(1 - \frac{2}{k_0^2 \epsilon h_y^2}\right) H_x(i, j) - \frac{1}{k_0^2 \epsilon h_y^2} H_x(i, j+1) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\beta}{k_0} H_x(i, j) &= \frac{1}{k_0 h_x h_y} [E_x(i-1, j) - E_x(i, j) - E_x(i-1, j+1) + E_x(i, j+1)] \\ &\quad - \frac{1}{k_0^2 h_x^2} E_y(i-1, j) - \left(\epsilon - \frac{2}{k_0^2 h_x^2}\right) E_y(i, j) - \frac{1}{k_0^2 h_x^2} E_y(i+1, j) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\beta}{k_0} H_y(i, j) &= -\frac{1}{k_0^2 h_x h_y} [E_y(i, j-1) - E_y(i+1, j-1) - E_y(i, j) + E_y(i+1, j)] \\ &\quad + \frac{1}{k_0^2 h_y^2} E_x(i, j-1) + \left(\epsilon - \frac{2}{k_0^2 h_y^2}\right) E_x(i, j) + \frac{1}{k_0^2 h_y^2} E_x(i, j+1) \end{aligned} \quad (9)$$

归纳式(6)~(9)可得以下本征值问题:

$$[A]X = \lambda [B]X \quad (10)$$

式中  $\lambda = \beta/k_0$ ,  $X = \left\{ \dots E_x(i, j) \dots, \dots E_y(i, j) \dots, \dots H_x(i, j) \dots, \dots H_y(i, j) \dots \right\}^T$ ,  $[B]$  为一单位矩阵。

由于广义脊形波导结构比较复杂, 本文根据具体情况将广义脊形波导划分成  $N$  个规则的子区, 子区内部的网格可以直接利用上文的公式求解, 导体表面上切向电场和法向磁场为零的边界条件可以直接使用, 则对应  $N$  个子区分别有

$$[A]_i X_i = \lambda [B]_i X_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

利用各子区交界处场量连续条件, 将不同子区得到的(11)式合并, 并相应调整系数矩阵  $[A]_i$ , 可得最后的本征方程。

## 2 数值结果

为证明 Compact 2-D FDFD 法对求解广义脊形波导传播特性的有效性, 对图 1(a) 的 ADRW 结构, 若  $x_1 = 0, x_2 = 2, x_3 = 3, y_1 = 0.5, y_2 = 1.5, y_3 = 0, b_1 = 3, b_2 = 1, b_3 = 4, L = 4.5$  (单位: cm), 可将 ADRW 划分为 I、II、III 三个子区, 并导出相应的本征方程。图 2 示出了该波导中前 5 个低次模式的相移常数和衰减常数随着频率的变化曲线, 结果表明在相当大的频率范围内, 本文方法与文献[3]结果吻合, 而相移常数和衰减常数曲线的交接处对应相关模式的截止频率, 也与文献结果完全吻合。若在图 1(a) 的 ADRW 结构中, 取  $x_1 = 0, x_2 = 2.5, x_3 = 7.5, y_1 = 0, y_2 = 2.5, y_3 = 0, b_1 = 5, b_2 = 2.5, b_3 = 5, L = 10$  (单位: mm),

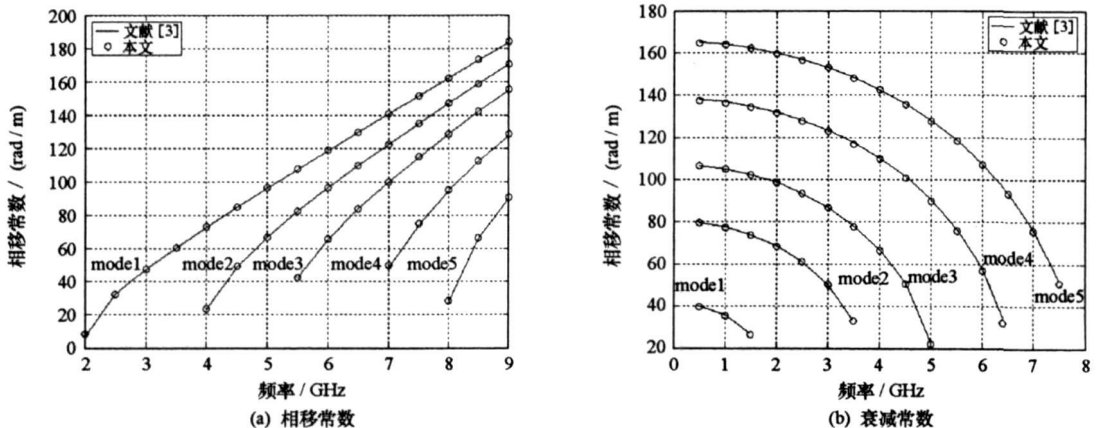


图 2 ADRW 色散特性

Fig. 2 Dispersion characteristics of ADRW

此时的结构即对应通常的单脊形波导。类似地,以分析 ADRW 结构的过程为基础,将结构适当变化,即可分析其他的广义脊形波导对图 1(b) 的 RTW 结构(其中  $a = 10\text{mm}$ ,  $b = 0.45a$ ,  $h = 0.4b$ ,  $d = 0.6b$ ,  $s = 0.4a$ ,  $w = 0.2a$ ) 以及图 1(c) 的 TDRW 结构(其中  $a = 10\text{mm}$ ,  $b = 0.5a$ ,  $h = 0.7b$ ,  $t = 0.375a$ ,  $s = 0.125a$ ,  $d = 0.1b$ ), 图 3、图 4 和图 5 分别给出了上述 3 种结构的相移常数随频率的变化曲线, 与有关文献的结果吻合得较好。

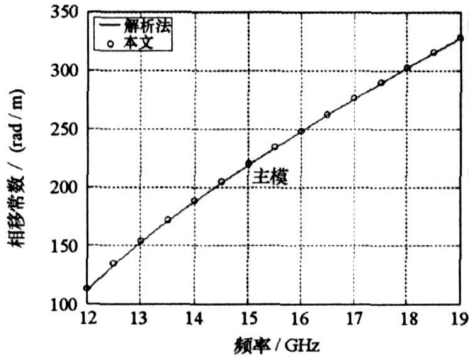


图 3 单脊形波导色散特性

Fig. 3 Dispersion characteristics of single ridge waveguide

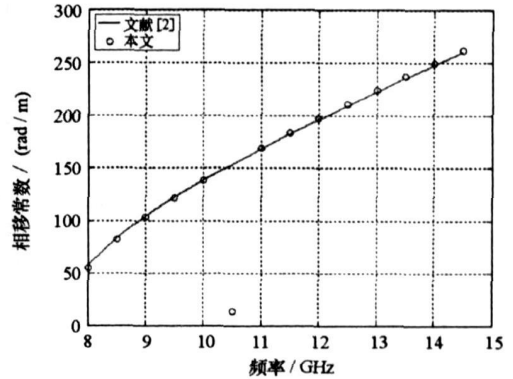


图 4 RTW 色散特性

Fig. 4 Dispersion characteristics of RTW

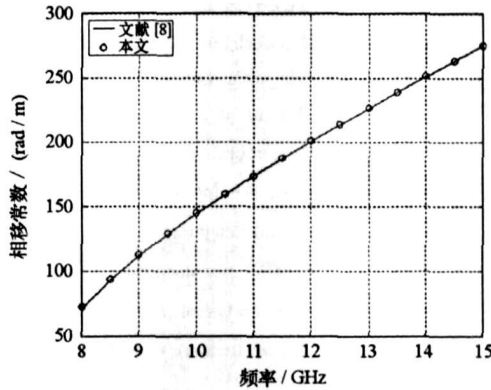


图 5 TDRW 色散特性

Fig. 5 Dispersion characteristics of TDRW

### 3 结论

采用 Compact 2-D FDFD 法对广义脊形波导结构进行了分析, 计算结果具有较高的精度, 同时分析过程具有明显的优点: 由给定的工作频率  $f$  求解相移常数  $\beta$ , 符合实际的分析思路; 求解的本征方程只涉及 4 个横向场分量, 求解速度和所需存储空间都更加经济; 求解本征方程的思路避免了稳定性的考虑<sup>[6]</sup>; 划分子区后, 编制的 2-D FDFD 程序具有通用性, 能够方便地根据不同的结构变化设定相应边界条件。因此, 本文的工作对广义脊形波导的特性分析以及工程设计有一定的指导意义。

### 参考文献:

- [1] Yong H C, Hyo J E. Analysis of a Ridge Waveguide Using Overlapping T-Blocks[J]. IEEE Trans on MTT, 2002, 50(10): 2368- 2373.
- [2] Debatosh G, Pradip K S. Some Characteristics of Ridge-trough Waveguide[J]. IEEE Trans on MTT, 1997, 45(3): 449- 453.
- [3] Lenivenko V A. Propagation Characteristics of Asymmetric Double Ridge Waveguide[C]//Microwave Conference, 2000 Asia- Pacific, 2000: 1235- 123.
- [4] Choi D H, Hofer W J R. The Finite-difference-time domain-method and its Applications to Eigenvalue Problems[J]. IEEE Trans on MTT, 1986, 34(12): 1464- 1470.
- [5] Asi A, Shafai L. Dispersion Analysis of Anisotropic Inhomogeneous Waveguides Using Compact 2DFDFD[J]. Electron. Lett., 1992, 28(7): 1451- 1452.
- [6] Lui M L, Chen Z. A Direct Computation of Propagation Constant Using Compact 2-D Full-wave Eigen-based Finite-difference Frequency-domain Technique[C]//Proc. Int. Comput. Electromagn. Its Applicat. Conf., Beijing, China, 1999: 78- 81.
- [7] Zhao Y J, Wu K L, Cheng K K M. A Compact 2-D Full-wave Finite-difference Frequency-domain Method for General Guided Wave Structures[J]. IEEE Trans on MTT, 2002, 50(7): 1844- 1848.
- [8] Dasgupta D, Saha P K. Rectangular Waveguide with Two Double Ridges[J]. IEEE Trans on MTT, 1983, 31(11): 938- 941.