

文章编号: 1001-9014(2004)05-0371-03

介质纤维束波导电磁波传播特性分析

田加胜, 董天临, 占腊民, 石 坚

(华中科技大学 电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 介质纤维束波导是一种圆柱介质波导阵列. 根据已建立的二维周期介质理论, 对矩形排列的圆柱介质波导阵列进行了数值计算和分析, 得出了电磁波在圆柱介质波导阵列中传播的一些特征, 并且和矩形介质波导阵列电磁波传播特性作比较, 结果较为满意.

关键词: 二维周期介质; 介质纤维束波导; 圆柱介质波导阵列; 矩形介质波导阵列

中图分类号: TN929; TN252 **文献标识码:** A

ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION IN DIELECTRIC FIBER BUNCHED WAVEGUIDE

TIAN Jia-Sheng, DONG Tian-Lin, ZHAN La-Ming, SHI Jian

(Dept. of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China)

Abstract: Dielectric fiber bunched waveguide is a kind of cylindric dielectric waveguide array (CDWA). Based on the established theory for two-dimensionally periodic medium, electromagnetic wave propagation in cylindric dielectric waveguide array which was arrayed by a rectangular array was calculated and analyzed. The characteristics of wave propagation in cylindric dielectric waveguide array were presented. Besides, these characteristics were compared with those of wave propagation in rectangle dielectric waveguide array. And the results are satisfying.

Key words: two-dimensionally periodic medium; dielectric fiber bunched waveguide; cylindric dielectric waveguide array; rectangular dielectric waveguide array

引言

介质纤维束波导 (DFBW) 是一种圆柱介质波导阵列 (CDWA), 是一种二维周期介质. 周期介质具有独特的电磁特性: 阻带和通带交替出现, 在阻带频率范围内, 电磁波传播被截止. 周期介质广泛应用于微波、毫米波^[1] 和光波等领域.

DFBW 是一种周期介质, 对周期介质和周期结构理论的研究, 自从十九世纪以来一直是人们研究的热点^[2,3]. 研究主要集中在两个方面: 特征值问题和边值问题. 理论上, 边值问题以对应特征值问题的结果为基础, 即当确定了特征值问题解的空间后, 那么对应边值问题的解就是该空间的一个特解. 然而, 除了一维周期介质和周期结构的特征值问题和有关边值问题都有比较令人满意的求解方法和结果外,

对于一般调制的、类似于 DFBW 的二维周期介质的特征值问题的求解, 至今仍未有十分满意的求解方法; 但一些文献^[4] 所得的无穷项递推色散方程很难估计截取项与计算精度的关系, 致使数值计算过程十分复杂. 另外, 象 DFBW 类调制系数较大的周期介质, 如采用微扰理论则精度远远不够. 从电磁理论角度看, 对 DFBW 特征值问题求解是彻底了解其电磁特性的有效途径. 因此, 求解 DFBW 特征值问题是一项十分有意义的工作.

文献[5]提出的二维周期介质特征值问题的分析方法, 计算十分有效且收敛较快[6]. 本文主要利用该方法来研究 DFBW (CDWA) 电磁特性.

1 特征值方程

对于一个二维平面 (xoy), 二维周期介质的相对

收稿日期: 2003-11-03, 修回日期: 2004-03-17

Received date: 2003-11-03, revised date: 2004-03-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60171014); 华中科技大学电子与信息工程系青年教师基金资助项目 (0101181191).

作者简介: 田加胜 (1970-), 男, 湖北大冶人, 华中科技大学电子与信息工程系讲师, 博士, 主要从事电磁场理论与微波技术等方面研究.

介电常数在一个周期单元内分布一般为:

$$\epsilon_r(x, y) = \epsilon_r(x + P_x, y + P_y) \quad (1)$$

其中 P_x, P_y 分别为 x, y 方向上的周期长度. 按照 Floquet 定理, 二维周期介质中电场应为:

$$\vec{E}(x, y, z) = \sum_{m, n} \vec{E}_{mn} \psi_{mn}(x, y) \exp(-jk_z z) \quad (2)$$

这里

$$\psi_{mn}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{ab}} \exp(-jk_{xm} x - jk_{yn} y) \quad (3)$$

为 Floquet 模式函数,

$$k_{xm} = k_x + 2m\pi/a \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (4)$$

$$k_{yn} = k_y + 2n\pi/b \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (5)$$

分别为某次空间谐波(m, n)的波数. 考虑到电场满足

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = k_0^2 \epsilon_r(x, y) \vec{E} \quad (6)$$

于是将方程式(2)代入(6)并利用 Floquet 模式函数正交性可得

$$(\vec{k}_{ij} \cdot \vec{k}_{ij} \mathbf{I} - \vec{k}_{ij} \vec{k}_{ij}) \vec{E}_{ij} - k_0^2 \sum_{m, n} P_{ijmn} \vec{E}_{mn} = 0 \quad (7)$$

$$\text{其中 } P_{ijmn} = \int_s \epsilon_r(x, y) \psi_{mn}(x, y) \psi_{ij}^*(x, y) ds \quad (8)$$

式(7)中 \mathbf{I} 为三阶单位阵. 式(7)为求解 DFBW 特征值方程. 当纵向波数 $k_z = 0$ 时, 式(7)可简化为 TE 模(相对 z 轴而言)特征方程和 TM 模特征方程:

TE 模特征方程

$$(\vec{k}_{ij} \cdot \vec{k}_{ij} \mathbf{I} - \vec{k}_{ij} \vec{k}_{ij}) \vec{E}_{ij} - k_0^2 \sum_{m, n} P_{ijmn} \vec{E}_{imn} = 0 \quad (9)$$

\mathbf{I} 为二阶单位阵, 且

$$\vec{E}_{imn} = \vec{x}_0 E_{imn} + \vec{y}_0 E_{ymn} \quad (10)$$

TM 模特征方程

$$(\vec{k}_{ij} \cdot \vec{k}_{ij}) E_{zij} - k_0^2 \sum_{m, n} P_{ijmn} E_{zmn} = 0 \quad (11)$$

对于 $k_z \neq 0$ 时, 相对于 z 轴而言的 TE 模和 TM 模是相互耦合的, 将方程式(7)简化成两模式对应的特征方程比较困难.

2 数值计算结果

DFBW 一种比较常见的结构形式是矩形排列的 DFBW 如图 1 示. 按图 1 所建立的模型有

$$P_{ijmn} = \sum_{p=1}^2 \frac{1}{ab} \epsilon_{rp} \iint_{s_p} \exp[-j(k_{xm} - k_{xi})x - j(k_{yn} - k_{yi})y] ds \quad (12)$$

如果直角坐标系原点建立在圆心处如图 2 所示, 则矩形排列的圆柱介质波导阵列的周期单元面积分

$$P_{ijmn} = \frac{\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2}}{ab} \cdot J_1(wr) \quad (13)$$

其中 $w = [(k_{xm} - k_{xi})^2 + (k_{yn} - k_{yi})^2]^{1/2}$, r 为圆的半径. J_1 第一类一阶贝塞耳函数. 将式(13)代入式(7)可得 DFBW 色散方程.

调制系数不同, CDWA 色散特性的变化特征与矩形介质波导阵列(RDWA)一致^[7]. 在此不再重研. 下面我们着重讨论介质圆柱横截面圆的面积的变化给横向波矢量色散特性带来的影响.

图 3 所示的色散曲线都包含有 TE 模、TM 模两种模式(其中 $k_z = 0$). 在一个周期单元内, 随着介质 ϵ_{r1} 圆面的面积的缩小(或半径 r 的变小), 空间谐波的相互作用变得越来越强烈, 色散曲线背离未扰动色散曲线(图中细实线表示), 结果在交叉点处形成较大的阻带(图 3(b)示). 随着阻带的逐渐拉大, TE 模色散曲线中心部分向外扩展形成近似正方形, TM 模则向内变成椭圆形. 然而, 当半径 r 进一步缩小, 空间谐波相互作用减弱, 原来变得较大的阻带又很快缩小, TM 模、TE 模色散曲线都越来越接近无扰动色散曲线(图 3(d)示). 显然, 其中一种介质面积的缩小, 即介质扰动范围的缩小所表现出的色散特性和介质调制系数变小等效.

最后要指出的是当介质 ϵ_{r1} 圆的面积在周期单元中占的比例与只有两种介质的 RDWA 周期单元中不同介质区域所占比例大约相同时, 它们两者的色散曲线差异很小. 这点既可从它们色散曲线图中可看出, 也可从计算表达式 P_{ijmn} 比较得出. 表中数据也可证明它们之间相差很小(周期单元中只有两种不同的介质). 显然, 由于介质圆面的面积变化是连续, 即从图 3(a)变化到图 3(d)是连续的, 所以总存在一点或某一大小的介质圆面, 使得 CDWA 的色散特性与 RDWA 的色散特性相差很小, 甚至几乎相同. 所以我们研究矩形排列的 CDWA 色散特性, 可借助 RDWA 色散特性的研究可初步得到. DFBW(CDWA)波的传播特征和 RDWA 波的传播特征没有本质的区别.

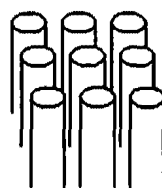


图 1 DFBW (CDWA) 立体图
Fig. 1 DFBW (CDWA) cubic configuration

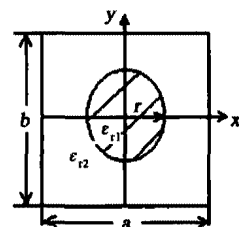


图 2 DFBW (CDWA) 周期单元
Fig. 2 A unit cell of DFBW (CDWA)

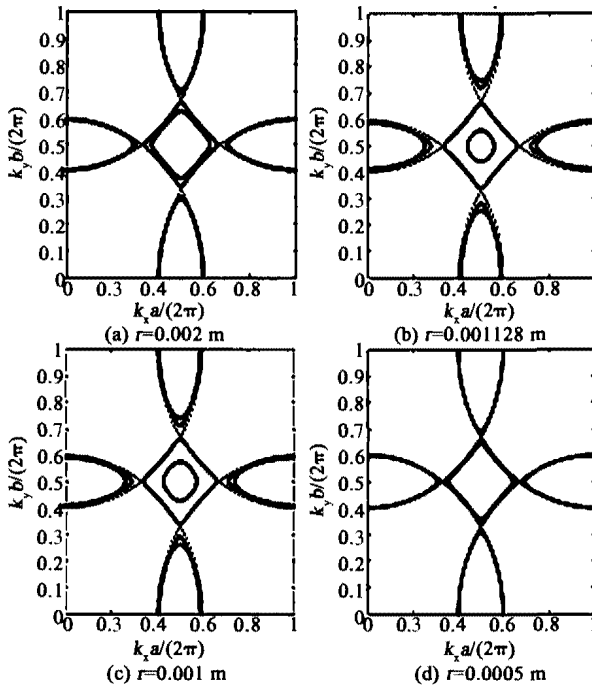


图 3 CDWA 色散图($a = b = 0.004\text{m}$, $\epsilon_{r1} = 2.0$, $\epsilon_{r2} = 1.0$)
Fig. 3 CDWA dispersion relations

表 1 圆形和矩形介质波导阵列比较 ($0 < k_x a / (2\pi) < 1$)
Table 1 Comparisons between CDWA and RDWA

波导阵列横截面形状	圆形	矩形	
$\epsilon_{r1} = 2.0$ 和 $\epsilon_{r2} = 1.0$ 区面积比	1: 3	1: 3	
$k_x a / (2\pi)$	0.5	0.5	
$k_y b / (2\pi)$	对应第一个根(TM 模)	0.252017	0.254416
	对应第二个根(TE 模)	0.280341	0.283167
	对应第三个根(TE 模)	0.339377	0.339726
	对应第四个根(TE 模)	0.440307	0.436671
	对应第五个根(TE 模)	0.559693	0.563329
	对应第六个根(TE 模)	0.660623	0.660274
	对应第七个根(TE 模)	0.719659	0.716833
	对应第八个根(TE 模)	0.747983	0.745584

3 结语

本文对 DFBW (CDWA) 进行了数值计算和分析. 其色散特性和 RDWA 相似. 一方面, 在介质调制系数逐渐变大情况下, 色散曲线逐渐背离无扰动色散曲线, 形成较大的阻带. 另一方面, 在周期单元内, 当介质圆柱面所占面积比从小变大时, 空间谐波的相互作用先逐渐增强, 然后又逐渐减弱; 相应色散曲线先逐渐背离无扰动色散曲线, 形成越来越大的阻带, 然后又逐渐接近无扰动色散曲线, 阻带缩小. 特别是在单元内 DFBW 和 RDWA 的两种不同介质分布面积比相同时, 色散特性几乎完全一致. 这无疑给 DFBW 的研究提供了一种间接研究方法. 本文对 DFBW 电磁波传播特性的研究将会对 DFBW 的导波和辐射提供一些理论依据.

REFERENCES

- [1] Cyril Cheype, Cédric Serier, Marc Thèvenot, et al. An electromagnetic bandgap resonator antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2002, **50** (9): 1285—1290.
- [2] Rahmat-Samii Y, Mosallaei H. Electromagnetic band-gap structures; classification, characterization, and applications[J]. *11th International Conference on Antennas and Propagation*, 17 - 20 April 2001, Conference Publish IEE 2001, (480): 560—564.
- [3] Fiedziuszko S Jerry, Hunter Ian C, Itoh Tatsuo, et al. Dielectric materials devices and circuits[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50** (3): 7067—20.
- [4] DONG Tian-Lin. Propagation of electromagnetic waves in two-dimensionally periodic media[D]. *Ph. D. Thesis, Polytechnic Institute of New York*, June 1985.
- [5] Tian Jia-Sheng, Dong Tian-Lin. General approach to guidance in two-dimensionally periodic medium[J]. *Infrared Millim Waves*, 2002, **23**(3): 459—463.
- [6] Tian Jia-sheng, Dong Tian-lin. The Convergence of the Eigen Equation for Dielectric Waveguide Array[J]. *Infrared Millim Waves*, 2003, **24**(4): 613—618.
- [7] Dong Tian-lin, Tian Jia-sheng. Characteristic Electro-magnetic Fields in Dielectric Waveguide Array [J]. *Infrared Millim Waves*, 2000, **21**(12): 2047—2054.