

一种 FDTD 仿真软件提取波导 S 参数的方法

韩军, 刘长军, 闫丽萍, 华伟

(四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要:在计算矩形波导的 S 参数时, 一些基于 FDTD 方法的电磁场数值仿真软件只提供了激励点的 S 参数。在实际应用中, 针对波导往往要求计算截面间的 S 参数, 这使得不能直接利用该软件给出的结果。该文利用 FDTD 软件输出的稳态场分布, 通过计算坡印廷矢量提取波导的 S 参数。通过比较不同计算时间步、空间步长、负载、吸收边界等对本提取方法的影响, 验证了基于坡印廷矢量计算波导 S 参数的方法, 并对一个实例进行了计算。本方法也可用于圆波导、同轴线等类似结构中 S 参数的提取。

关键词:时域有限差分; 波导; 坡印廷矢量

中图分类号:TP31 **文献标识码:**A

A Method for Calculating S-parameters of Waveguide from Simulation Software Based on FDTD

HAN Jun, LIU Chang-jun, YAN Li-ping, HUA Wei

(School of Electronics & Information Science, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China)

ABSTRACT: Some electromagnetic simulation softwares based on Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method provide only S-parameters at the feed ports. Usually, it is hard to achieve S-parameters of a waveguide system directly from that kind of simulation software. A method for computing Poynting vector from the steady-state data saved by the software to obtain S-parameters is presented in this paper. Meanwhile, numerical errors are analyzed with different simulation conditions as time steps, grid sizes, loads and absorbing boundary conditions. It shows that the method is valid and practical. Water partially filled waveguide is commutated as an example by this method. Moreover, the method can be applied to calculating S-parameters of other microwave components, such as circular waveguide, coaxial line and so on.

KEYWORDS: FDTD; Waveguide; Poynting vector

1 引言

前段时间 Recom 公司出品了基于时域有限差分^[1,2]的电磁场数值计算软件 XFDTD 6.0。该软件与先前的版本 XFDTD 5.1 相比, 有了很大的改进, 如激励源的形式、基本结构模型有所增加, 模型窗口和计算参数的窗口之间的切换得到了改进。但是该软件在一定应用范围里仍有其不足之处。例如在矩形波导问题中, 不能直接在矩形波导中加上 TE₁₀ 模激励; 提取截面的 S 参数的时候, 便很难直接得到理想的计算结果。这对软件应用造成了很多不便。针对该软件的不足, 本文提出了一种利用坡印廷矢量的方法来计算波导的 S 参数的方法。经过不断的摸索, 得出了利用截面坡印廷矢量计算波导 S 参数的正确方法, 并用该方法提取了 BJ-22 波导^[3]的 S 参数。本方法计算结果比较理想, 精度可以得到很大的

提高。

2 基本结构和基本方法

2.1 基本结构

本文所计算的是 2.45GHz 的微波频段的信号, 因此采用国产 BJ-22 矩形波导, 其基本参数为: 频率范围 1.72~2.61GHz; 内截面尺寸宽边 a 为 109.2mm, 窄边 b 为 54.6mm, 壁厚为 2mm。波导长度设为 440mm。在激励方法上, 参考了实际情况与软件功能, 在距离波导一段大约四分之一波导波长的地方加一个导线, 导线垂直于波导宽边所在的平面, 其长度约为 b/2, 导线的一端位于波导横截面的中心位置, 另一端距离波导壁一个网格, 用于加激励。激励源为 2.45GHz 的串联电压信号。特征阻抗为 50 欧姆, 激励的方式采用软件提供的 Discrete Source。

2.2 基本方法

在计算波导截面的 S 参数^[4,5]时考虑到软件只提供激励

基金项目: NSFC 资助项目 (60301004)

收稿日期: 2004-05-26

点的 S 参数,对波导结构很难应用。因此本文借鉴一种利用坡印廷矢量来计算截面的 S 参数的方法^[6,7],实现了 XFDTD 软件中对波导结构 S 参数的计算。坡印廷矢量^[8]的定义为:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \tag{1}$$

其物理意义是代表了电磁场的功率密度。时谐场中的麦克斯韦方程组的表达式如下:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\vec{D} \tag{2a}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\vec{B} \tag{2b}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{2c}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \tag{2d}$$

由复坡印廷定理

$$\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}^*) = -j\omega(\vec{H}^* \cdot \vec{B} - \vec{E} \cdot \vec{D}) - \vec{E} \cdot \vec{J}^* \tag{3}$$

可以得到复坡印廷矢量定义为

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}^* \tag{4}$$

取其实际部的一半,即等于瞬时坡印廷矢量的时间平均值。

因此在截面上的坡印廷矢量的计算公式应当为:

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{2} Re[\vec{E} \times \vec{H}^*] \\ &= \frac{1}{2} (E_x \cdot H_y \cos(\varphi_{ex} - \varphi_{hy}) - E_y \cdot H_x \cos(\varphi_{ey} - \varphi_{hx})) \end{aligned} \tag{5}$$

其中 $\varphi_{ex}, \varphi_{ey}$ 分别表示 x, y 方向的电场分量的相位, $\varphi_{hx}, \varphi_{hy}$ 分别表示 x, y 方向磁场分量的相位。

该软件的 Steady - State Data 都是每个网格点上的电场、磁场、电场相位、磁场相位数值,通过每个网格点的这些数值可以得到坡印廷矢量的值,再加权求和便可以得到整个面上的功率流,其中权为网格的面积。

$$P = \int_S \vec{S} \cdot d\vec{s} \approx \sum_{i=1}^n \vec{S}_i \cdot \Delta\vec{s}_i \tag{6}$$

其中 P 表示通过该截面的功率, $\vec{S}_i$ 表示第 i 个网格的坡印廷矢量, $\Delta\vec{s}_i$ 表示第 i 个网格的面积,其中 n 为所要计算的截面的网格数目。

3 计算过程与计算结果分析

首先建立好模型,采用 BJ-22 矩形波导。波导中不加任何介质。加上激励源,计算的截面离源有一定的距离,所以特征阻抗的选取对计算结果没有影响,选为 50 欧姆。

3.1 不同计算时间步数对计算结果的影响

从理论上分析,由于在波导中不加任何的介质,而边界上是采用 Liao 氏吸收边界条件,因此空腔中的各个不同的截面上的功率值应当是相等的。本文针对不同的时间步 n 对相同结构的波导进行计算,得到图 1。通过对图 1 数据的分析可以知道,随着计算时间步的增加,曲线变得平滑,也就意味着不同截面之间的功率计算结果之间的差值变小。这里采用一种相对误差的定义方法来表示不同时间步之间计算结果误差的不同,公式如下:

$$E = \frac{P_{max} - P_{min}}{P} \times 100\% \tag{7}$$

计算得到不同计算时间步的相对误差如表 1 所示。

表 1 不同时间步传输功率相对误差分析

N	2000	4000	6000	8000	10000
误差%	7.4	2.7	1.0	1.0	0.7

从表 1 可以很明显的看出随着计算时间步的增加,相对误差逐渐的减小,而且其减小的幅度也随着时间步的增加而减小。由此得出一个基本结论:波导中场的稳定是需要一定时间的,如果计算时间步不是足够长,波导中的场就不能达到稳定,会带来较大的计算误差。可见如果用坡印廷矢量来计算波导的 S 参数,时间步的选取是很重要的。

3.2 不同空间步长对计算结果的影响

空间步长意味着网格划分的稀疏程度,从理论上讲,如果网格划分得越小,计算结果就越准确。但是随着网格的增大,由于计算量的减小,计算时间也减小,这对提高工作的效率是非常有意义的。在上面的计算模型里,空间步长为 1mm,其对应的时间步长为 1.926ps,则当计算时间步 10000 时,因此所计算的模型中,电磁波的传播时间为

$$T = n \times \Delta t = 0.1926 \mu s \tag{8}$$

当对网格进行了重新的划分,这个时间步长也将变化,时间步长与空间步长的变化关系一致。为了这个时候让计算的结果具有可比较性,电磁波应当也只传播时间 T ,要考虑到改变计算时间步。例如:当空间步长为 2mm 的时候,时间步长为 3.852ps,考虑到电磁波传播相同的时间,计算时间步应当选取为空间步长为 1mm 时的一半,即 5000 步。

本文计算了空间步长分别为 1mm、1.44mm、2mm,传播时间为 0.1926 μ s 的情况,归一化计算结果如图 2 所示。

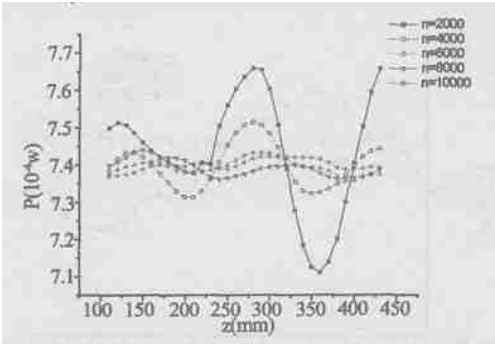


图 1 不同时间步时传输功率的比较

通过对上图的分析得到:在空间步长为 1mm、1.44mm、2mm 的时候的误差分别为 0.7%、0.6%、0.4%。计算结果的相对误差并不是像前面所分析的那样随着网格大小的增加而增加,反而随着网格的增加而减小。

3.3 不同负载对计算结果的影响

为了进一步验证方法的正确性和可用性,本文分别计算三种典型的情况,即开路、短路、和匹配的状况。针对改软

件,开路对应时在波导的一端接 PMC,短路接 PEC,匹配接的是吸收边界条件。计算的基本参数:几何结构同上,网格为 2mm,计算时间步都为 5000 步,结算结果如图 3 所示。

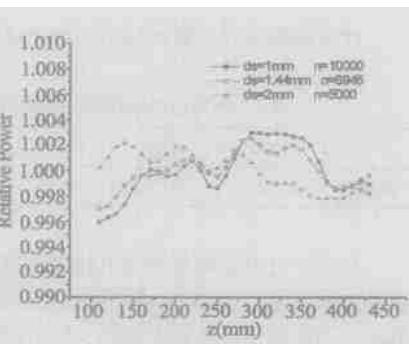


图 2 不同空间步长时传输功率归一化值

由图 3 的结果可知,该软件所给出的吸收边界条件、理想导体、理想导磁体在某些情况下不能达到理想的状态。这将对计算结果带来一定的误差。

3.4 不同吸收边界对结算结果的影响

XFDTD6.0 给出了两种吸收边界条件,分别为 Liao 氏吸收边界条件和 PML 吸收边界调节,这里对波导的两个端口采用两种不同吸收边界条件的结果进行比较,ds=2mm,PML 设为 8 层,我们采用同一台计算机进行计算,计算机的基本配置为: Celeron CPU, 2.0GHz, 256MB 的内存,计算结果如图 4 所示。

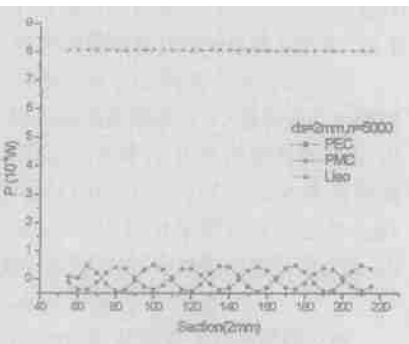


图 3 不同负载时系统的传输功率

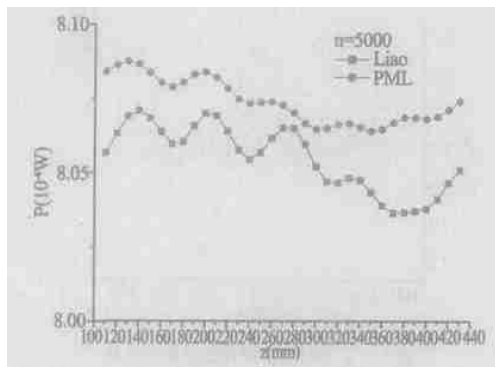


图 4 不同吸收边界条件对传输功率的影响

Liao 氏吸收边界条件的相对误差为 0.4%, 5000 时间步的计算耗时为 348 秒; PML 吸收边界条件的相对误差为 0.3%, 5000 时间步计算耗时为 613 秒。两者之间的相对误差都在允许的范围。由此可见,两者的误差都在允许的范围,且两者的计算绝对耗时区别不是很大,因此在以后的计算当中可以随意的选取两种吸收边界条件。

4 模拟计算实例比较

本文用这个方法计算了一个矩形波导中加一矩形的介质的情况,介质的导电率为 $1.45\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$, 相对介电常数为 78.78, 波导的两端均加的 Liao 氏吸收边界条件, 结构如图 5 所示, 其中 z 方向为波的传播方向,

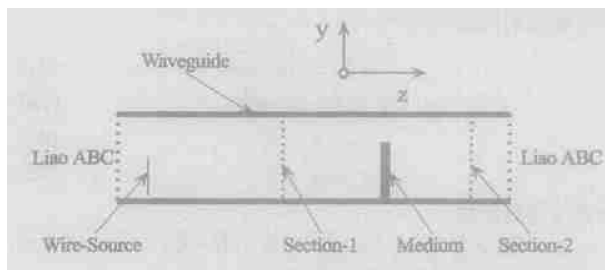


图 5 模拟计算波导系统结构图

分别计算了截面位置为 180mm 和 400mm 的两个面的 S 参数随着加入介质高度的变化而变化情况, 并与软件 HFSS 的计算结果进行比较。得到了如下的结果。

图 6 显示高度为 10mm 的时候两种软件的反射参数计算结果区别较大, 且本文提出的方法数值偏小, 可以得出当反射参数的数值较小的时候, 用本方法计算误差比较大。原

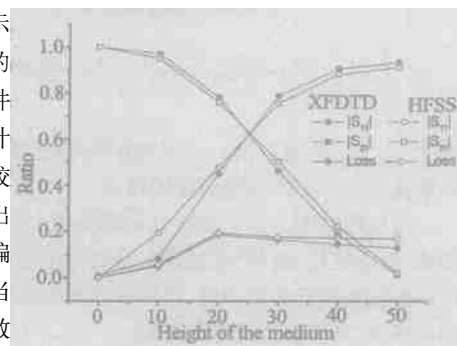


图 6 波导截面的 S 参数

和介质损耗模拟计算比较

因是在高度较低的时候, 波传播到 Liao 吸收边界的时候, 由于吸收边界条件不能完全地吸收电磁波, 将产生一定的反射, 这在图 4 的数据上得到体现。可见在该模型中, 高度为 10mm 的时候, 即反射参数比较小的时候, 吸收边界条件的反射对计算结果的影响比较大。

5 结论

从模拟计算结果来看, 本文计算结果与其它的基于频域算法的软件得到的结果相吻合, 说明本文所提出的依据坡印亭矢量针对 XFDTD 6.0 计算矩形波导的截面 S 参数的方法是可行的。

当使用该方法进行波导 S 参数计算的时候应当注意以下的问题: 吸收边界条件可以随意的选取。时间步的选取应当根据波导的结构在保证计算效率的前提下尽量地选取较大的计算时间步。结构的选取上应当选取计算截面有一定大小的系统。同时还要注意的是当反射系数不是很大的时候不适合用该方法进行计算。

本方法为解决以后的类似问题提供了新的思路和方法。

下一步要做的工作是在矩形波导中加入某种特定形状的水负载,在考虑温度对水的电参数影响的前提下,通过改变水的形状和高度来实现小反射和大动态范围透射的调节。通过这个方法实现一种低成本的微波输出功率连续可调方案,可以用于微波化学测试系统。

参考文献:

- [1] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [2] C Richard, Jr Booton. Computational methods for electromagnetics and microwaves [M]. A Wiley-Interscience publication, 1992.
- [3] 盛振华. 电磁场与微波技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 198.
- [4] 董树义. 微波测量技术[M]. 北京理工大学出版社, 1990.
- [5] Reinhold Ludwig, Pavel Bretchko. RF circuit design theory and applications[M]. Pearson Education, 2002.
- [6] Yu Zhiyuan, Simple and effective method for the reflection coefficient extraction in rectangular waveguide discontinuity analysis by the FDTD[J]. Microwave and Optical Technology Letters, May, 1997, 15(1):57-59.
- [7] Ozkar Mete, Lazzi Gianluca, Mortazawi. Study of design parameters in

waveguide-based spatial power combining amplifier arrays using FDTD [J]. IEEE MIT-S International Microwave Symposium Digest, 2001, 2:1403-1406.

- [8] 楼仁海, 符果行. 高等电磁理论[M]. 电子科技大学出版社, 1996.

[作者简介]



韩军(1980.1—)男(汉族),江苏金湖人,硕士研究生,主要从事于电磁场与微波技术研究;

刘长军(1973—),男(汉族),河北清河人,工学博士,副教授,主要从事电磁场与微波技术数值仿真的研究,2001年6月至2002年6月在韩国汉城国立大学数值分析专业开展博士后研究,已经在IEEE Trans.《科学通报》等国内外学术期刊上发表三十余篇论文;

闫丽萍(1972.3—),女(汉族),河北张家口人,博士,副教授,主要研究方向为电磁场数值计算、生物医学工程,在国内外学术期刊上发表文章十多篇;

华伟(1967.8—),男(汉族),山东高唐人,博士在职研究生,讲师,主要研究方向为生物医学工程。

(上接第75页)

- [6] 王卫安,王玉树. 矢量数据图形拓扑结构的生成及应用[J]. 测绘工程, 1999, 8(2):16-21.
- [7] Chen J, ZHAO R, LI Z. Describing Spatial Relations with Voronoi Diagram-based Nine Intersection Model[C]. Proceedings of the 9th International Symposium on Spatial Data Handling. Beijing: [s. n.], 2000, (4a):4-14.
- [8] 王杰臣. 多边形拓扑关系构建的栅格算法[J]. 测绘学报, 2002, 31(3):249-254.
- [9] 齐华. 自动建立多边形拓扑关系算法步骤的优化与改进[J].

测绘学报, 1997, 26(3):254-260.

[作者简介]



吴其昌(1980—),男(汉族),河南民权人,硕士研究生,主要研究方向:地理信息系统、空间分析;

陈天泽(1977—),男(汉族),湖南益阳人,助教,硕士,主要研究方向:嵌入式地理信息系统;

粟毅(1961—),男(汉族),湖南株洲人,教授,博士生导师,主要研究方向:SAR图像理解、探地雷达、地理信息系统。

(上接第79页)

参考文献:

- [1] 梅安新,等. 遥感导论[M]. 高等教育出版社,北京,2001.
- [2] 刘城霞. 数据融合系统中航迹关联和属性关联的研究[D]. 西安电子科技大学硕士学位论文,2002.
- [3] Samuel Blackman and Robert Popoli. Design and Analysis of Modern Tracking Systems[M]. Boston, Artech House, 1999. 797-801.
- [4] L David. Hall and James Llinas. Handbook of Multisensor Data Fusion [M]. CRC Press, 2001.
- [5] Ingemar J Cox and Sunita L Hingorani. An efficient implementation of Reid's multiple hypothesis tracking algorithm and its evaluation for the purpose of visual tracking[J]. IEEE, 1996-2, 18(2).

[作者简介]



王继阳(1980.10—),男(汉族),吉林省吉林市人,硕士生,目前从事战术态势分析方面的工作;

陆军(1970.9—),男(汉族),湖北仙桃人,博士,讲师,目前主要从事图像处理、C4ISR等方面的研究工作;

粟毅(1961.11—),男(汉族),湖南株洲人,博士,教授,长期从事雷达信号处理、目标识别等方面的研究工作,在国内外期刊及学术会议上发表学术论文50余篇。