

谱域法分析微带线电流分布特性

王 巍¹, 陈 丹¹, 李文成¹, 李 凯¹, 孙江宏²

(1. 重庆邮电大学光电工程学院 重庆 南岸区 400065; 2. 北京信息科技大学机械工程系 北京 海淀区 100085)

【摘要】用改进的谱域法分析微带线的电流分布特性,并用切比雪夫多项式做基函数来表示切向电流分布,得到了较宽频率范围内的切向电流分布特性,再根据这些特性在不同频段上取适当数量的基函数对有效相对介电常数进行了计算,与其他数值计算方法相比,该方法不仅可以得到高精度的计算结果,还可以在相应频段减少计算时间,计算结果与HFSS仿真结果在 $h/\lambda_0 \leq 0.7$ 范围内很接近。

关键词 切比雪夫多项式; 电流分布; 微带线; 谱域法
中图分类号 TN817 **文献标识码** A

Analysis of Current Distribution of Microstrip Lines with Spectral Domain Approach

WANG Wei¹, CHEN Dan¹, LI Wen-cheng¹, LI Kai¹, and SUN Jiang-hong²

(1. College of Electronics Engineering, Chongqing University of Post and Telecommunications Nan'an Chongqing 400065;
2. College of Mechanic Engineering, Beijing Information Science and Technology Haidian Beijing 100085)

Abstract The current distribution characteristics of microstrip lines are investigated with the improved spectral domain analysis method. The Chebyshev polynomial as basis functions is used to generate the expression for the tangential current distributions on microstrip lines, tangential current distribution characteristics within wider frequency range are obtained, and the effective relative permittivity is calculated with required basis functions in different range of frequency. Compared with the other numerical methods, this method can not only obtain high accurate results but also reduce the compute time in the corresponding frequency band. Simulation results show a good agreement with the calculated results within the range of $h/\lambda_0 \leq 0.7$.

Key words Chebyshev polynomials; current distribution; microstrip lines; spectral domain approach

微带线近年来在微波电路、毫米波电路和MMIC中得到了广泛的应用,而微带线的色散特性是设计时需要重点考虑的。因而,许多学者对微带线的色散特性研究产生了极大的兴趣,研究了各种计算方法,力求能找到一个精度较高且计算量较小的计算方法^[1-2]。数值计算方法,如有限元法(FEM)和矩量法(MoM)等可以得到非常精确的结果,然而计算过程非常耗时。基于MoM的谱域法(SDA)可以用来求解多层结构的电磁场积分方程,且可以集中考虑各层中材料特性的影响,因而成为目前研究微带线较好的方法之一^[3-5]。对各种介质材料组成的微带线均可采用这种方法进行理论分析,器件的行为可由传输结构的相位特性决定(如相移、耦合、延迟等)。其中,谱域法首先由文献[6]分析微带线的传播特性,选取了比较简单的基函数,得出了比较精确

的结论,从而证明了该方法的可行性。文献[7]提出采用Chebyshev多项式作为基函数,取代原有的简单形式的基函数,对原有的SDA算法进行了改进,并分析了电流分布情况。

本文在文献[7]的研究基础上,采用谱域法对微带线上的色散特性进行研究,在分析了有效相对介电常数后再计算电流分布,取Chebyshev多项式为基函数,尝试在不同频段上取适当数量的基函数计算有效相对介电常数,并采用仿真软件HFSS对其进行了仿真验证。

1 谱域法计算电流分布

微带线的结构如图1所示,假设微带在 x 和 z 轴方向均匀且无限延伸,金属带条的厚度忽略不计,衬底介质为无耗电介质,金属带条和接地层均为理想

收稿日期: 2008-01-07; 修回日期: 2008-07-15

基金项目: 国家杰出青年基金(60425101); 教育部新世纪优秀人才计划(NCET-04-0896)

作者简介: 王 巍(1967-), 男, 博士, 教授, 主要从事微波集成电路设计及RFIC设计方面的研究。

导体, 金属带条的宽度为 w , 衬底的介质厚度为 h , 介电常数为 $\epsilon_0\epsilon_1$, 磁导率为 $\mu_0\mu_1$ ($\mu_1=1$), 其中, ϵ_0 为真空介电常数, μ_0 为真空磁导率。电场强度 $\mathbf{E}=\mathbf{E}(x,y,z)e^{j\omega t}$, 相应磁场强度 $\mathbf{H}=\mathbf{H}(x,y,z)e^{j\omega t}$ 。

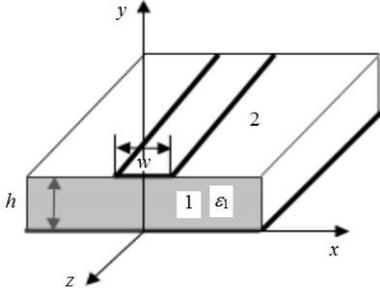


图1 微带线结构

谱域格林函数由文献[6]给出。基函数的选取对计算精度和效率有很大影响, 对于主模, $\mathbf{I}_z(x)$ ($\mathbf{I}_x(x)$)是关于 y - z 平面的偶(奇)函数^[6], 取基函数为 $T_n(x)$ 、 $U_n(x)$ ($T_n(x)$ 、 $U_n(x)$ 为切比雪夫第一、二类多项式, $n=1,2,L$):

$$\mathbf{I}_{xm}(x) = U_{2n-1}(2x/w)\sqrt{1-(2x/w)^2} \quad (1a)$$

$$\mathbf{I}_{zn}(x) = T_{2(n-1)}(2x/w)/\sqrt{1-(2x/w)^2} \quad (1b)$$

将式(1)进行傅里叶变换得到 $\mathbf{I}_x(\xi)$ 和 $\mathbf{I}_z(\xi)$, 再用已知的基函数 $\mathbf{I}_{zm}(\xi)$ 和 $\mathbf{I}_{xm}(\xi)$ 来展开未知量 $\mathbf{I}_x(\xi)$ 和 $\mathbf{I}_z(\xi)$, 即令:

$$\mathbf{I}_x(\xi) = \sum_{m=1}^M c_m \mathbf{I}_{xm}(\xi) \quad (2a)$$

$$\mathbf{I}_z(\xi) = \sum_{m=1}^N d_m \mathbf{I}_{zm}(\xi) \quad (2b)$$

然后用文献[6]中的方法可得系数 c_m 和 d_m 的矩阵方程。在计算矩阵方程中谱域积分式时, 采用文献[8]中的方法, 先得到谱域格林函数式的近似表达式, 再计算谱域积分, 然后得到关于未知系数 c_m 和 d_m 表示的齐次方程组式。系数 c_m 和 d_m 有非零解的条件是其矩阵行列式等于零, 据此可以决定每个频率的相位常数 β , 再将得到的 β 代回矩阵方程式计算出系数 c_m 和 d_m , 就可得到电流分布 $\mathbf{I}_z(x)$ 和 $\mathbf{I}_x(x)$ 。

2 数值计算及结果分析

2.1 电流分布特性

图2是归一化电流分布与微带线尺寸宽高比(w/h)的关系图。计算过程中, 本文对文献[7]的理论进行了修正, 并引用了文献[8]中有效相对介电常数计算方法计算出系数 c_m 和 d_m , 最后得到电流分布图。从图中可以看出, 归一化横向电流分布最大值随微带线横截参数的增大逐渐向金属带条边缘靠近; 而

归一化纵向电流分布在较大的范围内变化幅度较小, 在靠近金属带条边缘时急剧增加, 与文献[7]的数值计算结果基本吻合, 在 $w/h>1$ 时则出现了偏差。

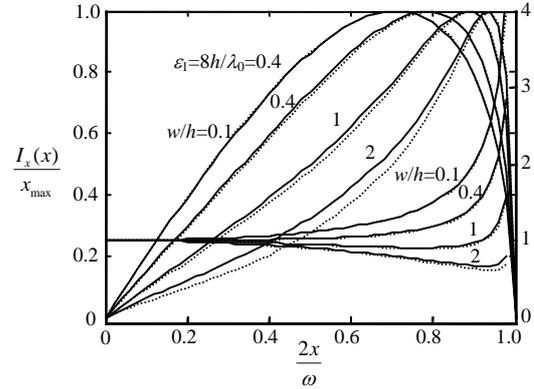


图2 归一化电流分布与微带尺寸宽高比(w/h)关系图
(实线为文献[7]的结果, 虚线为本文结果)

图3是归一化电流分布与频率的关系图。与图2的变化规律相似, 归一化电流分布随频率增大, 横向电流分布的最大值分布逐渐靠近金属带条边缘, 而纵向电流分布则是在金属带条边缘迅速增加。在频率 $h/\lambda_0<0.4$ 时, 本文的计算结果与文献[7]非常接近, 而在 $h/\lambda_0>0.4$ 时则出现较大偏差, 其原因可能是计算中所采用的相位常数 β 的精度值在不同的频率范围内的精度不同。图3的结果与文献[9]中的结果比较可知, $w/h=2$ 时, 微带线的归一化电流分布随频率的变化比 $w/h=1$ 时变化更快。

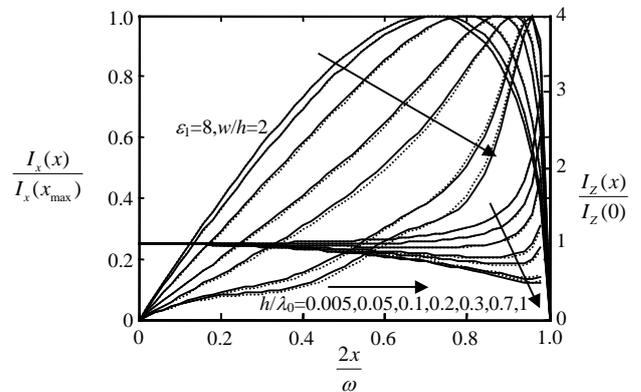


图3 归一化电流分布与频率关系图

(实线为文献[7]的结果, 虚线为本文结果)

图4是归一化电流分布与衬底相对介电常数的关系图, 归一化电流分布随衬底相对介电常数的增大, 横向电流分布的最大值分布逐渐靠近金属带条边缘, 而纵向电流分布则是在金属带条边缘迅速增加。在 $\epsilon_1<13$ 时, 本文得到的结果与文献[7]的结果非常接近, 而在 $\epsilon_1>13$ 时则出现了偏差。

图5是归一化电流分布与基函数数目关系, 从图中可知, 在频率为 $h/\lambda_0=0.2$ 时, M 、 N 的取值分别为

$M=N=2$ 和 $M=N=3$ 时, 电流分布曲线非常接近; 而在频率为 $h/\lambda_0=1$ 时, $M=N=3$ 和 $M=N=7$ 时两者间的结果相差很大, 这表明基函数数目过少会产生较大的误差。据此可以推断出, 在低频时取少量的基函数就可以达到足够的精度, 而在高频时则要使基函数的数目增加以提高计算精度。

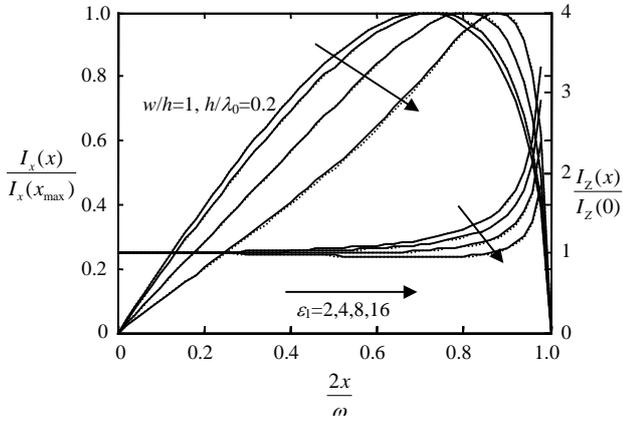


图4 归一化电流分布与衬底相对介电常数关系图 (实线为文献[7]的结果, 虚线为本文结果)

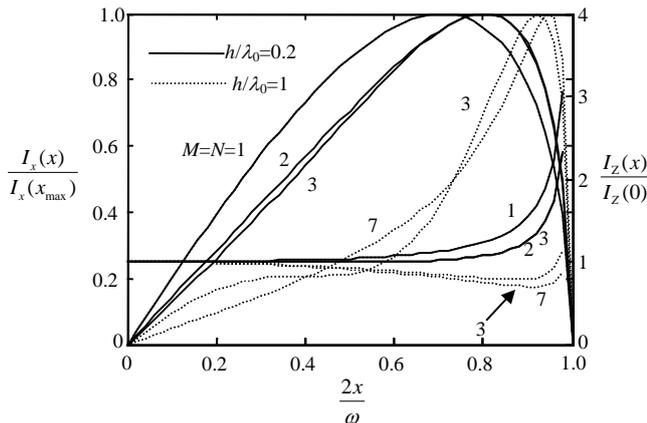


图5 归一化电流分布与基函数数量关系图 (实线为文献[7]的结果, 虚线为本文结果)

图6是电流分布与频率的关系图, 从图中可知: 与纵向电流分布相比, 横向电流分布的相对变化量要大1~2个数量级, 而纵向电流分布的幅值比横向电流分布大1~2个数量级, 但上述结论成立的前提是在 h/λ_0 较小时, 随着频率的升高上述关系不存在。

从文献[6]也看出零阶近似与二阶近似计算的相对介电常数在频率 $f < 15$ GHz时很接近, 但大于15 GHz时则出现较大偏差。

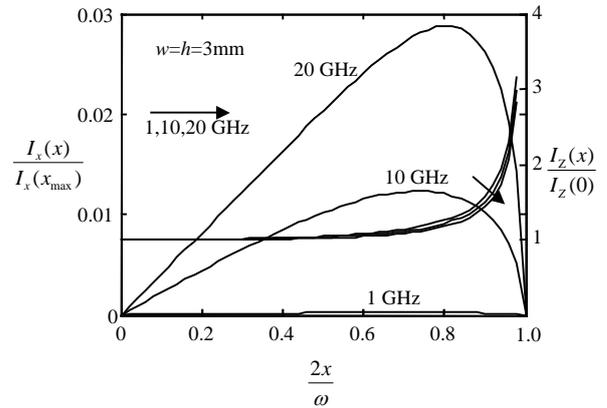


图6 电流分布与频率的关系图

2.2 有效相对介电常数

根据上面分析的电流分布特性再来计算有效相对介电常数, 在 $0 < h/\lambda_0 \leq 0.2$ 时, 取 $M=1, N=2$; 在 $0.2 < h/\lambda_0 \leq 0.4$ 时, 取 $M=3, N=4$; 在 $0.4 < h/\lambda_0 \leq 1$ 时, 取 $M=7, N=7$ 。先计算出相位常数 β , 然后得到有效相对介电常数, 如表1所示。

由表1可知, 本文理论计算得到的有效相对介电常数与仿真结果的精度在频率为 $0 < h/\lambda_0 \leq 0.7$ 范围内时非常接近(最大误差为0.138 29%), 而在频率很高($h/\lambda_0 \geq 0.7$)时误差较大(最大误差为0.498 76%), 其原因是: (1) 基函数取值($M、N$)较少时而不能更准确地近似电流分布, 因而需要增加基函数的数量, 但是基函数取得过多将大大增加计算时间, 从而降低计算效率; (2) 在计算谱域积分时用到文献[8]中的假设, 即取 ζ 为固定值, 而实际上随着频率的增加, k_0 也在增大, 因此在频率很高时误差较大。当然, HFSS软件在仿真模型时, 是以有限代替无限模型, 同时网格剖分、端口设置、收敛迭代次数方面也将影响结果精度。但从表1可知本文结果与软件HFSS仿真非常接近, 精度很高。

表1 有效相对介电常数 ϵ_{eff} ($\epsilon_1=8、w/h=1$)

计算方法	$h/\lambda_0=$ 0.005 00	$h/\lambda_0=$ 0.050 00	$h/\lambda_0=$ 0.100 00	$h/\lambda_0=$ 0.300 00	$h/\lambda_0=$ 0.700 00	$h/\lambda_0=$ 1.000 00
文献[8], $M=5, N=4$	5.475 20	6.131 60	6.757 20	7.655 10	7.915 10	7.955 60
文献[9], $M=N=4$	5.467 80	6.127 20	6.757 60	7.659 10	7.916 40	7.956 20
文献[10]	5.471 00	6.130 00	6.753 00	7.654 00	7.914 00	7.948 00
本文方法	5.476 00	6.132 80	6.758 80	7.659 70	7.915 70	7.958 00
HFSS $w=h=3$ mm	5.478 42	6.129 79	6.762 24	7.665 94	7.926 43	7.986 88
$w=h=5$ mm	5.480 14	6.130 07	6.762 98	7.665 28	7.926 62	7.983 64

3 小结

本文采用改进的谱域法分析了微带线的电流分布特性,基函数选取切比雪夫多项式并结合谱域积分中的渐进提取法进行分析。根据分析得到电流分布特性,在不同频段选择适当数量的基函数来近似电流分布从而得出有效相对介电常数。

通过分析可以得到如下结论:横向电流分布最大值随微带线横截尺寸参数和衬底相对介电常数的增大、频率的升高而逐渐向金属带条的边缘靠近,纵向电流分布则在金属带条的边缘附近急剧增大;在频率低时可以取少量的基函数来近似电流分布,而在频率高时要取更多数目的基函数来达到一定的计算精度;在频率较低时,横向电流分布的相对变化量比纵向电流分布的大,而纵向电流分布的幅值比横向电流分布大。根据以上的分析再在不同频段选择适当数量的基函数计算有效相对介电常数,计算结果与软件HFSS在常用频段($h/\lambda_0 \leq 0.7$)的仿真结果之间的最大误差仅为0.138 29%,可见本文所采用方法的有效性。该法也可应用于计算多层介质结构的平面传输线的色散特性。

参 考 文 献

[1] MATHEW V. Computation of dispersion in microstrip line with anisotropic substrate and overlay[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2005, 26(4): 563-573.

- [2] HOLLOWAY C L, KUESTER E F. Closed-form expressions for the current densities on the ground planes of asymmetric stripline structures[J]. IEEE Trans Electromagnetic Compatibility, 2007, 49(1): 49-57.
- [3] KROWNE C M. Dyadic Green's function modifications for obtaining attenuation in microstrip transmission layered structures with complex media[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2002, 50(1): 112-122.
- [4] HOLLOWAY C L, KUESTER E F. Closed-form expressions for the current density on the ground plane of a microstrip line, with application to ground plane loss[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1995, 43(5): 1204-1208.
- [5] FARINA M, ROZZI T. Spectral domain approach to 2D-modelling of open planar structures with thick lossy conductors[J]. IEEE on Microwaves, Antennas and Propagation, 2000, 147(5): 321-324.
- [6] ITOH T, MITTRA R. Spectral-domain approach for calculating the dispersion characteristics of microstrip lines [J]. IEEE Trans on MTT, 1973, 21(7): 496-499.
- [7] KOBAYASHI M, SEKINE H. Closed-form expressions for the current distributions on open microstrip lines[J]. IEEE Trans on MTT, 1991, 39(7): 1115-1118.
- [8] PARK S O, BALANIS C A. Dispersion characteristics of open microstrip lines using closed-form asymptotic extraction[J]. IEEE Trans on MTT, 1997, 45(3): 458-460.
- [9] KOBAYASHI M, IJIMA T. Frequency dependent characteristics of current distribution on microstrip lines[J]. IEEE Trans on MTT, 1989, 37(4): 799-801.
- [10] SHIH C, WU R B, JENGG S K, et al. A full-wave analysis of microstrip lines by variational conformal mapping technique[J]. IEEE Trans on MTT, 1988, 36(3): 576-581.

编辑 漆 蓉

· 科研成果专利介绍 ·

近贴式透明全息防伪膜及其制作方法

近贴式透明全息防伪膜属于全息防伪薄膜技术。该产品是由具有全息图案的有机薄膜层、点阵状的金属泊镜面层和粘结层构成。使用该产品具有既能看到防伪标志的全息图案,又能通过透明防伪薄膜观察到被防伪物的表面细节,适用于各种有效专用证、卡、券,有利于识别假冒伪造各种证、券、商标的非法行为。制作上采用了成熟的网点印刷工艺、化学镀工艺和真空蒸镀工艺,生产成本低、技术易掌握,利于厂家成批生产。

透明激光全息护卡膜

透明激光全息护卡片膜是一种防伪薄膜,由印有全息图案的有机薄膜和由金属材料、以及高、低折射介质材料形成的光干涉效应图案保护层,以及粘结层构成。使用该薄膜贴附在或包装在被防物上,透过薄膜不但能观察到被防物的表面细节,而且压印在激光全息图案的薄膜上又具有光干涉效应,从而防止了用复印或印刷的办法复制伪造物品的可能性。该薄膜特别适用于有效专用证件、有价证券的塑封,有利识别、防止和打击假冒伪造行为。