

# 基于 FDTD 的宽带微带天线的研究\*

车仁信, 程鑫, 纪颖

(大连交通大学电气信息学院, 大连 116028)

**【摘要】** 用时域有限差分法(FDTD)对微带天线建模,用仿真软件 empire 获取数据,可以在宽频范围内观察微带天线的辐射过程,方便的获得天线的输入阻抗、带宽和方向图等特性,利用 Matlab 对仿真数据进行后处理可以得到方向性系数等参数。文中用该方法设计了一个中心频率为 10.37 GHz,相对带宽 21.7% 的宽带微带天线,得到了较好的参数。为工程实际中微带天线的设计与分析提供了参考。

**【关键词】** 时域有限差分法; 宽带微带天线; 仿真

中图分类号: TN957.2、TN82 文献标识码: A

## A Study on Broadband Microstrip Antenna Based on FDTD Method

CHE Ren-xin, CHENG Xin, JI Ying

(Dept. of Electrical & Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

**【Abstract】** The model is constructed by using finite-difference time-domain(FDTD) method, and the data are obtained with software empire. By using it, we may observe the process of the microstrip antenna radiation within the broadband range, and may easily get the input impedance, bandwidth and radiation pattern of the antenna. Then we may get the directivity coefficient of the antenna after processing the simulation data by using Matlab. paper designs a microstrip antenna whose centric frequency is 10.37 GHz and relative bandwidth is 20.7%, have received better parameter. Design and analysis of the microstrip antenna to the engineering practice have offered reference.

**【Key words】** finite-difference time-domain method; broadband microstrip antenna; simulation

### 0 引言

微带天线是近年来发展非常迅速的一种新型天线,但微带天线有其固有缺陷,即其阻抗带宽较窄,一般微带天线的带宽仅有 5% 左右<sup>[1]</sup>。微带天线的窄频带特性成了限制其广泛应用的主要障碍,因此,展宽微带天线的带宽具有十分重要的意义。本文是以同轴探针顶部附加小的圆形电容片对微带天线进行馈电的方法来展宽带宽。目前有多种分析这种微带天线的方法,常用的有传输线法、谐振腔模型法、矩量法、有限元法及时域有限差分法<sup>[2-3]</sup>。时域有限差分法(FDTD)用被称为 Yee 氏网格的空间离散式,把带时间变量的 Maxwell 旋度方程转化为差分格式的一种新的电磁场时域计算方法<sup>[4]</sup>。作为一种电磁场的数值计算方法,时域有限差分法在计算微带贴片天线的特性上具有一些很突出的优点:

(1) 适合模拟各种复杂电磁结构,用 FDTD 的离散空间网点可以较精确的模拟微带天线(阵)的实际

结构;

(2) 易于得到计算空间场的暂态分布情况,这既便于定性理解其工作的物理过程,又便于得到供定量分析的有关电参量;

(3) 通过一次时域计算,即可得到一个频域上的天线参量(如输入阻抗、辐射图等)和宽频信息;

(4) 由于微带天线的几何结构尺寸一般不会出现比工作频带上的最短波长大很多,因此不会出现需用巨额数量网格的问题,亦即分析计算时不会出现存储量过大的问题。

本文用 FDTD 法对微带天线进行分析时,采用了完全匹配层(PML)边界,非均匀网格划分等,和构造测量盒子等技术,使得能较精确的获得天线的各项参数。本文应用该方法对 10.37 MHz 的宽带微带天线进行了设计分析,得到了很好的天线参数。

### 1 天线模型设计

微带天线的结构如图1所示,通过同轴探针顶部

\* 收稿日期: 2005-09-26 修订日期: 2006-04-15

基金项目: 铁道部专项资助项目(J2000Z052)和辽宁省教育厅科学研究计划资助项目(2004D024)。

附加小的平面电容片对微带天线进行馈电来补偿探针引起的电感,设电容片与贴片间介质的厚度为 $h_2$ ,并假定探针的高度和直径分别为 $h_1$ 和 $d$ ,电容片的直径为 $D$ ,贴片长和宽分别为 $L$ 和 $W$ ,馈电位置、各层介质厚度和相对介电常数如图1所示。

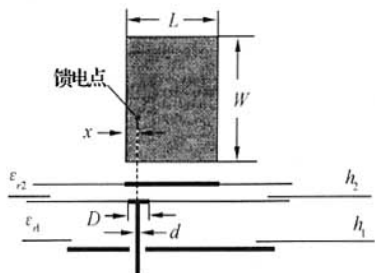


图1 双层宽带微带天线示意图

微带天线探针的电感可以表示为<sup>[5-7]</sup>

$$X_L = \frac{\eta}{\pi} \tan(0.5k_1h_1) \ln\left(\frac{2.25}{k_1d}\right) \quad (1)$$

$$\eta = 120\pi \sqrt{\frac{\mu_{r1}}{\epsilon_{r1}}}, k_1 = 2\pi f_r \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}}}{c} \quad (2)$$

式(1)中 $\eta$ 和 $k_1$ 分别是特性阻抗和介质中的波数,式(2)中 $f_r$ 是谐振频率, $c$ 为真空中的光速。

为了补偿探针电感,在探针顶部串联一个电容并使其满足谐振条件

$$2\pi f_r CX_L = 1 \quad (3)$$

贴片的电容为

$$C = \epsilon_0 \epsilon_{r2} \left[ \frac{\pi D^2}{4h^2} + 2D \ln\left(\frac{0.38D}{h_2}\right) \right] \quad (4)$$

等效相对介电常数为

$$\epsilon_r = \frac{h_1 + h_2}{h_1/\epsilon_{r1} + h_2/\epsilon_{r2}} \quad (5)$$

所以贴片宽度和长度分别为

$$W = \frac{c}{2f_r} \left( \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta L \quad (7)$$

式中

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + \frac{10.0h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$\Delta L = 0.412h \left( \frac{\epsilon_r + 0.3}{\epsilon_r - 0.258} \right) \left( \frac{W/h + 0.264}{W/h + 0.8} \right) \quad (9)$$

$$h = h_1 + h_2 \quad (10)$$

万方数据

## 2 设计实例

### 2.1 参数优化

以时域有限差分法(FDTD)为原理建立天线模型,如图2所示。探针从接地板穿孔引入,构成底馈方式。用FDTD对所设计的天线进行计算,并通过仿真结果对模型的尺寸进行调整优化,最后的天线参数如下: $L=6.5$  mm,  $W=9.7$  mm,  $\epsilon_{r1}=2.2$ ,  $\epsilon_{r2}=2.6$ ,  $h_1=2.1$  mm,  $h_2=0.4$  mm,  $d=0.4$  mm,  $D=1.12$  mm,  $x=1$  mm。

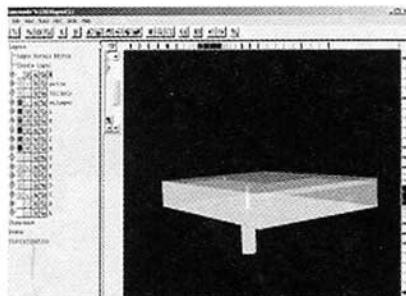


图2 在empire中的天线模型

### 2.2 数值计算结果

对于优化设计的天线模型,用时域有限差分法进行计算分析时,为得到准确的数值,在天线的每个贴片辐射边沿配置一个测量盒子,由测量值可得每个贴片的辐射相对大小和相位;再构建一个远区辐射场的测量盒子,从而获得远区辐射情况。由测量和计算结果得到天线的输入阻抗、反射系数、E面H面方向图变化关系如图3~6所示。3D图像如图7~10所示。

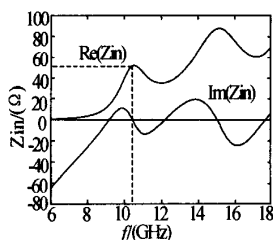


图3 天线的输入阻抗曲线

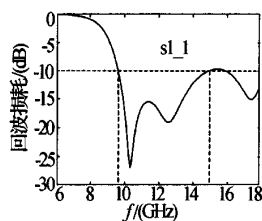


图4 天线反射系数曲线

### 2.3 结果分析

由图3可看出贴片的第一谐振点为10.44 GHz,且天线在这个频率点的输入阻抗为51.5 Ω。由图4可以知道回波损耗也就是反射系数 $|s_{11}| \leq -10$  dB的阻抗带宽为5.25 GHz,频率从9.64 GHz~14.89 GHz,因此中心频率取为12.26 GHz则相对带宽为42.8%(5.25/12.26)。由于电压驻波比(VSWR) $\rho = (1 + |s_{11}|)/(1 - |s_{11}|)$ ,所以也就是 $\rho \leq 2$ 的带宽。

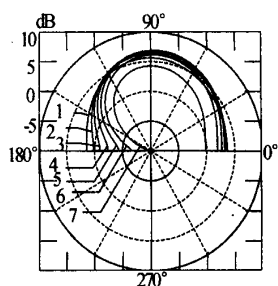


图5 天线E面方向图随频率的变化,1-7依次为9.25, 10, 10.5, 11, 11.5, 12, 13 GHz

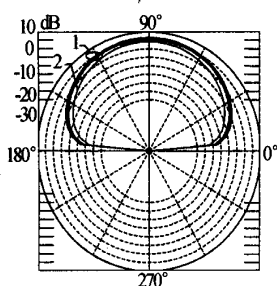


图6 天线H面方向图随频率的变化,1为9.25 GHz至12 GHz,2为13 GHz

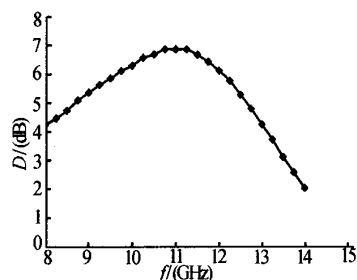


图11 天线方向性系数随频率变化曲线

## 2.4 方向性系数

将FDTD获取的数据导入Matlab中,利用Matlab强大的计算功能进行计算,可得到各种性能参数。图11所示为天线的方向性系数在8 GHz~14 GHz的频率范围内的变化曲线图,先增大然后减小,最大值在11 GHz附近,为6.88 dB。取频率的范围为9.25 GHz~11.5 GHz,方向性系数波动1.24 dB,中心频率为10.37 GHz,带宽为21.7% (2.25/10.37)。

## 3 结 语

设计宽频带、高增益、小型化的微带天线是目前的研究热点方向<sup>[11]</sup>。本文在建立天线的初步模型的基础上,用时域有限差分法对天线建模,仿真计算天线的辐射,由仿真结果来调整模型尺寸结构,然后再仿真,再调整,这是一个不断反馈的过程,直到找到合乎要求的天线参数。对天线分析设计尤其对结构复杂天线分析设计来说,这是一种方便、快速、有效的方法。特别是3D图形,可形象的展示天线的动态辐射状态。

## 参 考 文 献

- [1] Carve K R, Mink J W. Microstrip antenna technology[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1981, AP-29(1): 2-24.
- [2] Steven (Shichang) Gao, Alistair Sambell. Dual-polarized broad-band microstrip antennas fed by proximity coupling [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(1): 526-530.
- [3] Ahmed A K, Kai F Lee, Mok W C, et al. A wide-band small size microstrip antenna proximately coupled to a hook shape probe[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(1): 59-65.
- [4] 葛德彪, 闫玉波著. 电磁场时域有限差分法[M]. 西安: 西电出版社, 2002.
- [5] Blischke M A, Chen K M, Rothwell E J. Broadband analysis of a single post-fed circular patch antenna[J]. URSI Radio Science Meeting Abstracts, 1989(6): 32.

(下转第74页)



图7  $t_1$ 时刻近区场



图8  $t_2$ 时刻近区场

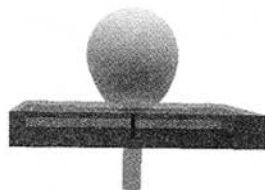


图9  $t_3$ 时刻远区场

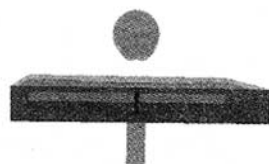


图10  $t_4$ 时刻远区场

由图5可以看出随着频率的升高,E面最大辐射方向(90°)的方向系数先增大后又减小,在10.5 GHz附近取得最大值,方向图形状在12 GHz以上有较大的畸变。而由图6看出从9.25 GHz~12 GHz天线H面方向图基本没有多大改变,到13 GHz就有较明显的改变,方向系数减小。由图5、图6还可以看出在10.5 GHz天线E面半功率波束宽度(HPBW)为81.2°,H面半功率波束宽度为117.3°,与理论值很接近,理论值<sup>[8]</sup>为 $\theta_{BE} = 89.6^\circ$ ,  $\theta_{BH} = 114.6^\circ$  ( $\theta_{BE} = 2\cos^{-1}(1/(2 + k_0 W))^{1/2}$ ,  $\theta_{BH} = 2\cos^{-1}(7.03/(3k_0^2 L^2 + k_0^2 h^2))^{1/2}$ )。

3D图形如图7~10所示,可见所设计天线的近区场及远区场动态情况。近区场凋落波型<sup>[9]</sup>是主要成分,表面波占主要地位,能量主要集中在介质层附近,如图7~8所示。表面波是柱面波,这也形象的证实了参考文献[10]的理论。由图9、图10可见,远区辐射场的交变电磁能量能够由近及远形成辐射,其辐射场强最大值可达2.338 V/m,可见这类天线具有较高的效率。 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ 时间是任选的,以示其变化。图形是动态的,可取不同角度任意多幅,限于篇幅,仅取4幅。

性,通过 $[A_{1\text{天}} + \Phi_{1\text{天}}]$ 可以推算出当前波位下的天线方向图。

通过对一个含有 40 只 TR 组件和 40 个天线子阵的 X 波段有源相控阵天线的测试,对上述测试方法进行了试验验证。在微波暗室对该天线分别用近场测试方法得到天线扫描  $18^\circ$  的方向图,如图 3 所示。用逐个 TR 组件内定标的方法测得每个 TR 组件的幅相特性,对此数据处理得到天线扫描  $18^\circ$  的方向图,如图 4 所示。

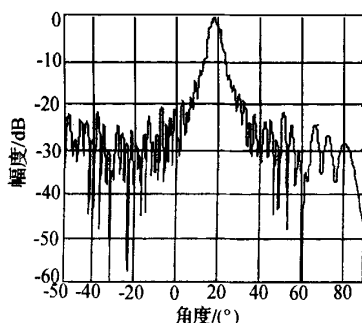


图 3 通过近场探头扫描获取的天线方向图

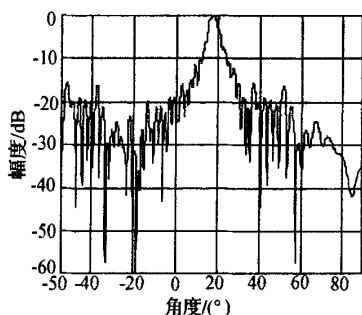


图 4 通过内定标获取的天线方向图

从图中可以看出两者是非常接近的,这说明通过逐个 TR 组件内定标来初步监测天线波束性能是可行的,但准确的天线性能测量还是要通过远场外定标的方法来测量,因为内定标方法得到的天线性能精度是达不到辐射定标要求的<sup>[2-3]</sup>。逐个 TR 组件的定标只能用于监测 TR

组件的失效情况和定性分析天线性能。

要完成逐个组件的定标,在地面测试中需对几百个耦合器和几百路定标网络校准,这本身就是很复杂的工作,但是该内定标系统能检验每个 TR 组件的功能和基本性能,是非常有用的功能。在轨飞行时检测出失效的 TR 组件可以将其关闭,由地面评估 TR 组件失效对天线方向图的影响,及时调整系统工作参数。

#### 4 结 语

通常内定标可以用于测量发射功率和接收增益的因温度变化或元器件老化引起的相对变化,用于监测 TR 组件的失效情况和定性分析天线性能。内定标提供的雷达设备性能变化方面的辅助数据,有助于提高图像数据处理质量和精度。但内定标设备与雷达设备一样会有同样类型的误差,因此内定标设备主要是进行系统随时间漂移的相对测量,要提高测量精度需保障内定标设备尽可能小的温度变化特性及寿命期内小的性能变化。

#### 参 考 文 献

- [1] Marco Schwerdt, David Hounam. Calibration concept for the terraSAR-X instrument [J]. IEEE 2003, (2): 4 509 - 4 511.
- [2] 魏钟铨等. 合成孔径雷达卫星[M]. 第 1 版. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] Francis Soualle, Martin Stangl. Correlation based characterization of phased array components[J]. IEEE, 2003, (X): 235 - 240.

辛培泉 男, 1964 年生, 高级工程师, 1985 年毕业于西安电子科技大学微波专业。从事机载和星载雷达技术研究, 研究项目是星载 SAR 总体技术。

何东元 男, 1975 年生, 工程师, 1997 年毕业于武汉大学微波专业。从事星载雷达天线和总体技术研究, 近期的研究项目是星载 SAR 总体技术。

(上接第 70 页)

- [6] Newman E H, Pozar D M. Electromagnetic modeling of composite wire and surface geometries[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1978, AP-26(6): 784 - 789.
- [7] Fong K S, Puse H F, Withers M J. Wideband multilayer coaxial-fed microstrip antenna element[J]. Electronics Letters, 1985, 21(11): 497 - 499.
- [8] 鲍尔 I J 著. 微带天线[M]. 梁联倬译. 北京: 电子工业出版社, 1986.
- [9] 钟顺时. 微带天线理论与应用[M]. 西安: 电子科技大学出版社, 1991.

万方数据

- [10] 张 钧, 刘克成. 微带天线理论与工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

- [11] Choon Sae Lee, Kuo-Hua Tseng. Radiation efficiency of electrically small microstrip antennas with width discontinuities[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(2): 871 - 873.

车仁信 女, 1956 年生, 副教授, 硕士, 硕士导师。主要研究方向为微带天线的数值计算及工程应用。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>