

# 基片集成波导槽阵列天线的仿真研究

栾秀珍, 谭克俊, 房少军

(大连海事大学信息科学技术学院, 大连 辽宁 116026)



**摘要:** 提出了一种介质谐振器加载的基片集成波导槽阵列天线结构, 并给出了简单、快速的设计方法。通过 Ansoft HFSS 仿真软件进一步优化, 可得到性能优良的天线设计结果。利用所给设计方法具体设计了一种 K 波段圆柱形介质谐振器加载的四元横向槽阵列天线, 仿真计算结果表明该天线具有大约 450MHz 的-10dB 回波损耗带宽, 最大增益为 11.8dB, 且辐射效率达 92%。

**关键词:** 介质谐振器; 基片集成波导; 阵列天线; 回波损耗; 增益; 效率

中图分类号: TN817 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2008)06-1642-03

## Simulation on Substrate Integrated Waveguide Slot Array Antenna

LUAN Xiu-zhen, TAN Ke-jun, FANG Shao-jun

(College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** A novel substrate integrated waveguide slot array antenna loaded with dielectric resonators was proposed, and a simple and quick design approach for this antenna was given. With the help of Ansoft HFSS for further optimization design, good results could be obtained. Using the design approach proposed, a substrate integrated waveguide four-element transverse slot array antenna loaded with cylindrical dielectric resonators at K-band was designed. The simulation results show that the bandwidth of -10dB return loss is about 450MHz, and the maximum gain of 11.8dB and radiation efficiency of 92% are obtained.

**Key words:** dielectric resonator; substrate integrated waveguide; array antenna; return loss; gain; efficiency

## 引言

传统的矩形波导槽阵列天线在雷达、通信系统中有着广泛的应用。然而由于传统的矩形波导体积大, 为立体结构, 故难以与微波和毫米波平面电路集成。1998 年日本学者 J. Hirokawa 和 M. Ando 提出了一种被称作为基片集成波导的结构<sup>[1]</sup>, 该结构具有与微带线类似的平面结构, 但由于能减小介质损耗和抑制表面波损耗, 故应用到高频波段时具有较低的损耗。通过简单的转换结构, 基片集成波导可以很容易地与微带线进行连接<sup>[2]</sup>, 因此基片集成波导一问世便引起了人们的极大兴趣, 并对其进行了广泛的研究。目前, 基片集成波导已成功地应用于一些微波和毫米波电路(如滤波器<sup>[3]</sup>等)的设计中, 但目前针对基片集成波导的研究主要集中在 X 波段, 实际上它还可以进一步应用到更高频段, 如 K 波段和毫米波段等。另外, 基片集成波导在天线领域的应用研究目前还很少, 文献[4]报道了一种工作在 X 波段的基片集成波导纵向槽阵列天线的设计, 本文提出了一种新型基片集成波导槽阵列天线, 该天线为横向槽阵列天线, 工作在 K 波段, 且基于介质谐振器的高辐射特性, 本文还用介质谐振器对每个槽天线进行加载以提高天线的辐射效率。由于介质

谐振器和波导槽天线同时具有谐振特性, 这种连接可产生两个互相耦合的谐振器, 当两谐振器谐振频率配合适当时还可增加整个天线的带宽。另外, 基片集成波导到微带传输线的转换在文献[2]中采用的是渐变的微带线结构, 而且目前几乎所有基片集成波导的应用中都是采用这种结构。本文采用阶梯阻抗变换结构实现从基片集成波导到微带线的转换, 仿真计算结果表明该结构同样可以得到较宽的阻抗带宽。该天线阵及其馈电系统可被制作在同一介质基片上, 因此与传统的介质谐振器波导槽阵列天线<sup>[5]</sup>相比具有体积小、剖面低、易于集成的优点。

槽波导天线在自由空间的辐射已经被广泛研究, 矩形波导宽壁槽激励的介质谐振器天线的辐射在文献[5]中采用的分析方法是矩量法, 基片集成波导槽阵列天线在文献[6]中采用的是修正的 Elliott 法进行分析, 其中包含了内部的高次模耦合。本文针对介质谐振器加载的介质基片集成波导槽阵列天线提出了一种简单、快速的设计方法, 利用该法可得到天线的初始设计结果, 通过 Ansoft HFSS 仿真软件进一步优化, 可得到性能优良的天线设计结果。利用该法, 本文具体设计了一种工作在 K 波段的圆柱形介质谐振器加载的四元横向槽阵列天线, 并给出了该天线的仿真计算结果。

## 1 理论和设计方法

介质谐振器加载的基片集成波导槽阵列天线的结构如图 1 所示, 其中, 基片集成波导通过在介质基片中加两排平

收稿日期: 2006-12-28

修回日期: 2007-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(60771032); 国家“863”项目(2006AA12A110)。

作者简介: 栾秀珍(1963-), 女, 山东青岛人, 博士, 教授, 研究方向为微波及毫米波电路与天线。

行的短路针来实现。基片集成波导的宽度、短路针的直径及间距分别用“ $a$ ”、“ $d$ ”和“ $p$ ”表示, 它们将决定基片集成波导中波的传播常数和辐射损耗。阵列天线由基片集成波导宽壁上的四个横向槽构成, 每个槽加载一个具有高辐射效率的圆柱形介质谐振器。

基片集成波导可等效成介质填充的传统矩形波导<sup>[7]</sup>, 因此可采用与传统波导一样的方法进行分析。等效波导的归一化等效宽度由以下经验公式给出

$$\bar{a} = \xi_1 + \frac{\xi_2}{\frac{p}{d} + \frac{(\xi_1 + \xi_2 - \xi_3)}{\xi_3 - \xi_1}} \quad (1)$$

其中, 短路针直径“ $d$ ”选择等于或小于最大工作频率的二十分之一波导波长, 间距“ $p$ ”等于或小于二倍短路针直径, 且

$$\xi_1 = 1.0198 + \frac{0.3465}{\frac{a}{p} - 1.0684}$$

$$\xi_2 = -0.1183 - \frac{1.2729}{\frac{a}{p} - 1.201}$$

$$\xi_3 = 1.0082 - \frac{0.9163}{\frac{a}{p} + 0.2152}$$

于是等效矩形波导宽度为

$$a_{eq} = a\bar{a} \quad (2)$$

因为基片集成波导垂直壁的长度就是基片厚度  $h$ , 水平长度远大于基片厚度( $a_{eq} \gg h$ ), 所以基片集成波导的截止频率由(2)式中的  $a_{eq}$  决定<sup>[8]</sup>。

$$f_{cnn} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a_{eq}}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2} \rightarrow f_{c10} = \frac{1}{2a_{eq}\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (3)$$

其中  $\epsilon$  和  $\mu$  分别为介质基片的介电常数和磁导率。所以参数“ $a$ ”可由工作频率和式(1)~(3)决定。

因为波导宽壁上的横向槽主要由波导主模  $TE_{01}$  模的横向磁场激励, 所以横向磁场在槽位置的强度控制其激励及耦合到外部空间的能量。由于在同样情况下电磁场为驻波分布时磁场在波腹处的大小是行波分布时的二倍, 所以为了得到最大激励, 基片集成波导中的电磁场应为驻波分布, 这可以

通过在基片集成波导的终端加一排短路针使波导短路来实现。为了得到最大耦合, 槽应置于磁场驻波的波腹处, 即应离基片集成波导终端二分之一波长整数倍的位置。为使天线阵在  $+z$  轴方向得到最大增益, 各槽天线应同相激励, 故相邻槽天线应相距一个波长的整数倍。

为了增加天线阵的辐射效率, 每个槽都加载了一个圆柱形介质谐振器, 圆柱底面圆心位于槽中心以确保激励  $HEM_{11\delta}$  模和避免可能的交叉激励。波导槽可被看成是一个谐振器, 与介质谐振器一起可构成两个耦合的谐振器, 适当选择两谐振器的谐振频率可增加天线阵的频带宽度。

因为阶梯阻抗变换器将实阻抗转换成 50 欧姆, 所以, 基片集成波导的输入端应选在电压驻波的波节点或波腹点处。考虑到基片集成波导比 50 欧姆微带线宽, 所以将基片集成波导的输入端选在电压波节点。天线的其他参数可借助 Ansoft HFSS 电磁仿真软件进行优化得到。

## 2 天线设计及仿真结果

本文利用上述方法具体设计了一个中心频率为 20GHz 的圆柱形介质谐振器加载的基片集成波导四元横向槽阵列天线, 如图 1 所示。所得天线的设计结果如表 1 所示, 天线的总尺寸仅为 57.5mm×15mm×3.016mm。

表 1 天线结构参数(单位: 毫米)

$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$w_s$	$L_s$	$R$	$H$	$d$	$p$
5.5	11	11	11	0.3	3	4	2	0.5	1
$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$a$	$h$
2.4	2.4	2.4	5.3	6	5	4	2.8	10	1

由所设计天线的结构及各个尺寸, 利用 Ansoft HFSS 仿真软件计算可得该天线的回波损耗如图 2 所示。由图可见该天线的中心工作频率为 20GHz, -10dB 回波损耗带宽大约为 450MHz。

天线在中心频率( $f_0 = 20GHz$ )的辐射方向性图的仿真计算结果如图 3 所示。由图可见天线的最大增益为 11.8dB, 且可算得此时天线的辐射效率为 92%。

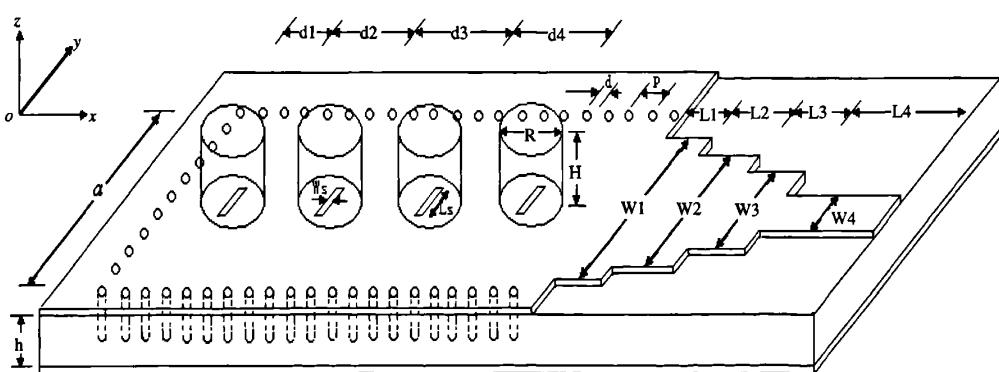


图 1 介质谐振器加载的基片集成波导槽阵列天线结构图

图4给出了未加载介质谐振器时天线的回波损耗随频率的变化曲线。由图可见,此时天线中心频率发生了偏移,带宽明显降低,且此时算得的天线的辐射效率仅为80%。因此,介质谐振器能改变天线的谐振频率、带宽及辐射效率。

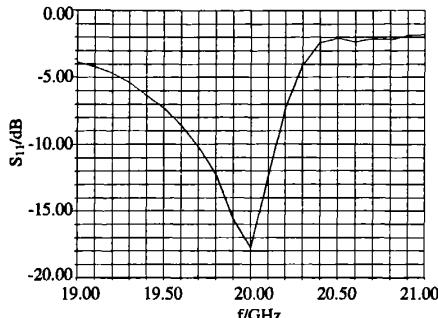


图2 回波损耗随频率的变化

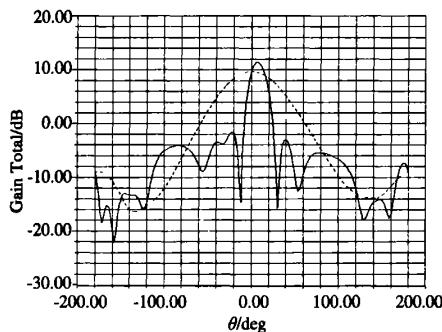


图3 天线在xoz面(—)和yoz面(--)的辐射方向性图

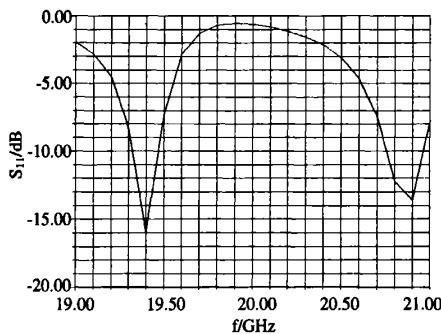


图4 无介质谐振器时天线的回波损耗随频率的变化

### 3 结论

本文介绍并设计了一个工作在20GHz的圆柱形介质谐振器加载的基片集成波导槽阵列天线。这种天线还可用其他形状的介质谐振器(如矩形介质谐振器)加载,且可用于更高工作频率,如30GHz。

与其他参考文献相比,本文提出的天线结构中,引入了介质谐振器,这对增加天线带宽和辐射有明显作用。这种天线具有平面结构和低损耗特性,特别适合应用于微波和毫米波集成电路中。

### 参考文献:

- [1] J Hirokawa, M Ando. Single-layer feed waveguide consisting of posts for plane TEM wave excitation in parallel plates [J]. IEEE Trans. Antennas Propagation (S0018-926X), 1998, Ap-46: 625-630.
- [2] D Deslandes, K Wu. Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form [J]. IEEE Microwave Wireless Components Lett. (S1531-1309), 2001, 11(2): 68-70.
- [3] D Deslandes, K Wu. Single substrate integration technique of planar circuits and waveguide filters [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech (S0018-9480), 2003, 51(2): 593-596.
- [4] Li Yan, Wei Hong, Guang Hua, Jixin Chen, Ke Wu, Tie Jun Cui. Simulation and Experiment on SIW Slot Array Antennas [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters (S1531-1309), 2004, 14(9): 446-448.
- [5] Islam A Eshrah, Ahmed A Kishk, Alexander B, Yakovlev Allen W Glisson. Theory and Implementation of Dielectric Resonator Antenna Excited by a Waveguide slot [J]. IEEE Transactions on antenna and propagation (S0018-926X), 2005, 53(1): 483-494.
- [6] R S Elliott, W R O'Loughlin. The design of slot arrays including internal mutual coupling [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., (S0018-926X), 1986, Ap-34: 1149-1154.
- [7] Cassivi, Y.; Perregnini, L.; Arcioni, P.; Bressan, M.; Wu, K.; Conciatori, G.; Dispersion Characteristics of substrate integrated rectangular waveguide [J]. IEEE Microwave wireless Compon. Lett. (S1531-1309), 2002, 12(9): 333-335.
- [8] Tae-Soon Yun, Hee Nam, Ki-Byouln Kim, Jong-Chul Lee. Iris Waveguide Bandpass Filter Using Substrate Integrated waveguide (SIW) for Satellite Communication [C]// APMC2005 Proceedings, 2005. Seoul, South Korea: RFIC Educ. & Res. Center, Kwangwoon Univ., Dec., 2005, 1: 4.

## 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,一直致力于专注于微波、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>