

文章编号: 1009-3443(2008)01-0006-05

# X波段柱面共形基片集成波导纵向缝隙天线阵的实验

张颖松<sup>1,2</sup>, 洪伟<sup>1</sup>

(1. 东南大学 毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096; 2. 解放军理工大学 通信工程学院, 江苏南京 210007)

**摘要:** 利用基片集成波导SIW(substrate integrated waveguide)技术设计了一款X波段柱面共形的SIW纵向缝隙谐振天线阵。通过分析柱面共形的SIW的传输特性, 沿用传统矩形波导谐振缝隙天线阵的设计方法, 设计了柱面共形的SIW纵向缝隙谐振天线阵。该天线具有传统的矩形波导缝隙天线阵主瓣宽度窄、方向图可以赋形、交叉极化电平低等优异特性, 同时实现了天线的小型化、轻型化。由于基片集成波导完全集成于介质基片中, 使得天线与平面电路的馈电连接变得非常简单, 可以用微带直接馈电, 减少了中间馈电电缆以及馈电转接头的损耗, 从而使天线和平面电路的集成也成为可能。实验结果验证了这种设计方法的正确性。

**关键词:** 柱面共形; 基片集成波导; 缝隙阵天线

中图分类号: TN817 文献标识码: A

## Design and measurement of substrate integrated waveguide longitudinal slot array conformal antennas on cylindrical geometries

ZHANG Ying-song<sup>1,2</sup>, HONG Wei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Institute of Communications Engineering, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China)

**Abstract:** By etching longitudinal slots on the top metallic surface of the substrate integrated waveguide (SIW), an integrated slot-array conformal antennas on cylindrical geometries was proposed. The propagation characteristics of the SIW on cylindrical geometries were investigated firstly. With the aid of normal rectangular waveguide theory, an resonant rectangular waveguide slotted array conformal antenna on cylindrical geometries was designed. The whole antenna and feeding circuit were fabricated on a single substrate, which takes the advantages of small size, low profile, low cost, and integrability with plate microwave circuit and simple manufacturing, etc. A one-by-ten SIW slot array antenna at X-band was simulated with the simulation software CST. The design process and experimental results were presented. The simulation results and the experimental results agree with each other exactly.

**Key words:** cylindry conformal; SIW(substrate integrated waveguide); slot array antenna

天线的小型化、与平面电路的可集成化以及曲面共形, 一直以来都是天线领域研究和发展的方向。众所周知, 传统的矩形波导缝隙天线阵具有主瓣宽度窄、方向图可以赋形、交叉极化电平低等优异特

性, 在雷达和通信系统中有着广泛的应用。然而, 传统矩形波导缝隙阵列天线体积较庞大, 同时它难以和介质基片上的平面微波毫米波电路集成, 这些因素使得整个系统的体积比较大、设计成本高、结构复杂度高。微带贴片天线也是当前微波毫米波电路中常采用的形式, 但是在微波毫米波系统中, 微带天线较难获得高增益和宽工作频带, 而微带天线阵虽然可以获得较高的增益, 但是其复杂的馈电网络可能

收稿日期: 2006-12-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60621002).

作者简介: 张颖松(1973-), 男, 讲师; 研究方向: 天线技术; E-mail: yszhang@emfield.org.

花费比天线本身更多的时间和精力。所以在高频微波系统中,微带贴片天线也不是首选形式。基片集成波导SIW(substrate integrated waveguide)完全集成于介质基片中,它具有与矩形波导相似的传输特性。因此,利用SIW技术实现的SIW缝隙天线,一方面继承了传统矩形金属波导缝隙天线的优点,同时克服了传统矩形金属波导的缺点,能够将阵列天线和微波毫米波电路集成于同一块介质基片中。并可以利用传统的PCB加工技术实现,设计成本和生产成本比较低廉,从而很适合于高频微波毫米波系统的设计。很多学者对基片集成波导缝隙天线进行了研究并取得了较多的研究成果<sup>[1~5]</sup>。这些研究基本采用平面阵列结构。近几年来,作为相控阵天线的发展型,适合飞机与舰船等外形的共形阵天线正引起广泛注意<sup>[6]</sup>。共形阵天线是将原来平面结构的相控阵变为曲面结构,天线共形化具有如下优点:

- (1) 扩大波束扫描范围;
- (2) 提高天线安装的自由度;
- (3) 降低雷达散射截面积(RCS)。

本文在此基础上设计一个X波段的柱面共形SIW纵向缝隙天线阵。

## 1 柱面SIW的传播特性

传统波导谐振纵向缝隙天线阵,是由于缝隙切割了波导宽壁上的电流,在缝隙中形成位移电流,位移电流与波导内的磁场共同形成向空间辐射的源<sup>[7]</sup>。柱面SIW其实是一种扇面波导。图1给出了柱面SIW和同样长度微带线的散射参数仿真结果。可以看出,在9.5~11.5 GHz的带宽范围内,柱面SIW的驻波损耗都在-15dB以下;而在整个带

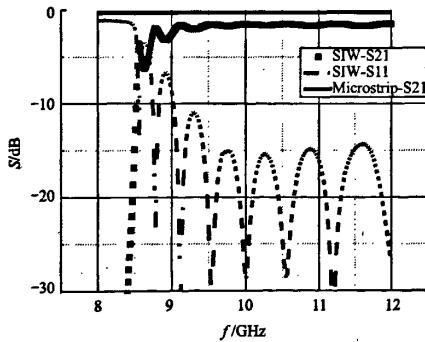


图1 柱面SIW和同长度微带线的S参数对比图

Fig. 1 Comparison of the S parameters between the conformal SIW on cylindrical geometries and microstrip

宽范围内其插入损耗在1.4 dB左右。与传统矩形波导相比,插损稍大,但由于SIW制作简便、可集成化等优点,在不影响部件的整体性能的前提下,可以用SIW代替传统的矩形波导实现射频无源器件及天线等。图2给出了柱面SIW单模传输即TE<sub>10</sub>传输时宽边上法向电场分布。可以看出其电场在宽边中心最强,四周逐渐减弱,并且间隔二分之一波导波长重复出现。图3给出了10 GHz频率时相移常数随波导宽度与柱面半径比值变化的关系(波导尺寸不变,圆柱半径由小变大),以及相同频率相同尺寸下的平面波导的相移常数。从图中可以看出,随着圆柱半径增大,扇面波导中的相移常数成减小趋势,趋近于平面波导的相移常数。由此可见,柱面SIW TE<sub>10</sub>传输传播特性与传统波导 TE<sub>10</sub>传输基本相同<sup>[8,9]</sup>。当然,两者传输其他模式也基本相同,这样就可以利用文献中得到的平面SIW与传统矩形波导的对应转换关系<sup>[10]</sup>来设计柱面SIW的元部件。

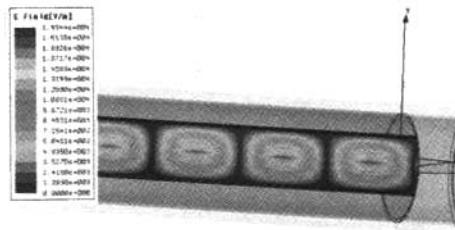


图2 柱面SIW单模传输时宽边电场分布

Fig. 2 Distribution of the electric field on SIW wide side

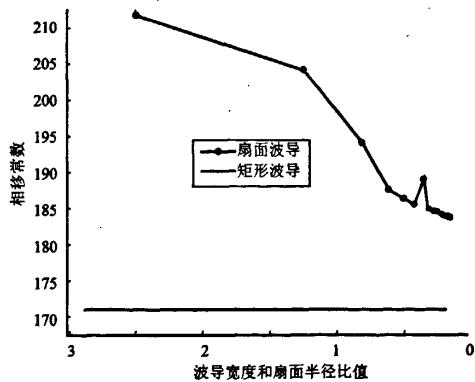


图3 柱面SIW单模传输时相移常数随波导宽边和圆柱半径比值变换曲线

Fig. 3 Comparison the phase-constant between the SIW on cylindrical geometries and planar SIW

## 2 柱面SIW 纵向缝隙天线阵的设计

既然柱面波导有着和传统矩形波导相类似的传播特性,可以考虑将传统的矩形波导纵向缝隙谐振天线阵移植到柱面SIW上,从而设计一种柱面共形的SIW 纵向缝隙天线阵。设计的天线阵结构如图4所示。SIW 口径选择参见文献[2,10]。为了测量方便,要求天线的输入阻抗等于 $50\Omega$ 。这样,在SIW 缝隙天线波导端口的输入阻抗与 $50\Omega$ 微带线存在匹配问题。为此采用微带渐变线做阻抗变换,这样,天线也可以和平面电路简单地直接相连。为了保持缝隙同相,各缝隙间距 $1/2$ 波导波长,并交替分布在波导宽边的中心线两侧。本文设计的是一种谐振阵,波导的终端采取短路,并且最后一条缝隙距终端的距离为 $1/4$ 波导波长,以使缝隙的中心场强最强。

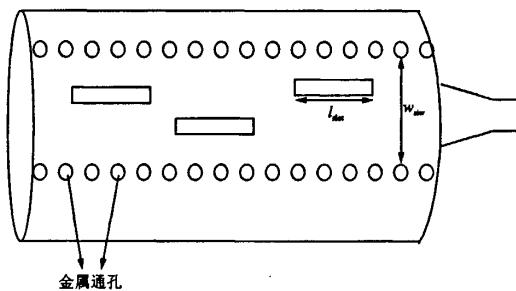


图4 天线结构图

Fig. 4 Structure of the antenna

缝隙的偏置和缝隙宽度以及缝隙的谐振长度按照文献[11]中R. S Elliot 提出的设计矩形波导纵向缝隙天线阵的公式迭代计算得到初值,再用仿真软件优化得到最终值。缝隙的数目则是根据所需天线的增益确定。

按照上述设计方法,本文设计了一条X波段柱面SIW  $1\times 10$  纵向缝隙谐振天线阵。介质基板采用Rogers RT/duriod 5880;介电常数2.2;介质厚度为0.5 mm;金属层厚度为0.036 mm;其损耗角正切在10 GHz 频率时为0.001。天线的具体结构参数,如表1 所示。其中: $d$  表示金属通孔的直径; $p$  表示金属通孔的周期(相临通孔间距离); $w_{taper}$  表示微带渐变线的宽度; $l_{taper}$  表示带渐变线的长度; $w_{slot}$  表示缝隙的宽度; $offset$  表示缝隙的中心线偏离波导宽边中心线的距离; $l_{slot}$  表示缝隙的长度; $w_{50}$  表示 $50\Omega$  微带渐变线的宽度。

表1 设计的天线结构参数表

Tab. 1 Structure parameters of the designed antennas

| mm          |            |          |             |
|-------------|------------|----------|-------------|
| $w_{siw}$   | $d$        | $p$      | $w_{taper}$ |
| 12.48       | 0.6        | 1.2      | 4.92        |
| $l_{taper}$ | $w_{slot}$ | $offset$ | $Offset$    |
| 12.82       | 0.3        | 0.14     | 0.17        |
| $l_{slot1}$ | $l_{slot}$ | $w_{50}$ |             |
| 13.25       | 12.85      | 1.35     |             |

## 3 仿真及实验结果

图5是设计的X波段柱面SIW  $1\times 10$  纵向缝隙谐振天线阵的实物照片。天线尺寸20 cm;天线弯曲附着在直径40 mm的柱面上等效波导的宽度12.08 mm;波导宽度与柱面半径比值为0.604。由图3可知,柱面SIW 波导与相同宽度的平面SIW 波导传播常数并不相同。因此,并不能简单地将平面SIW 的天线直接用于柱面SIW 天线的设计上,从而体现了柱面SIW 天线设计的必要性。

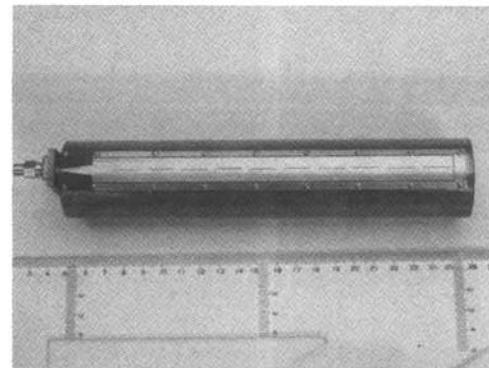


图5 设计天线的实物照片

Fig. 5 Top view of the structure of the proposed antenna

应用矢量网络分析仪对天线的散射参数进行了测量,在微波暗室中对此天线的方向图和增益进行了测量。图6给出了设计的X波段柱面SIW  $1\times 10$  纵向缝隙谐振天线阵的回波损耗的仿真及测试对比图。从图中可以看出,天线的 $-10\text{ dB}$  驻波带宽有420 MHz,仿真结果和测试结果吻合很好。测试结果的插损比仿真结果要大,测试结果包含SMA 接头和一对阴阳转接头的损耗。另外,由于在仿真建天线模型时,介质在柱面是均匀分布的,而实际天线是在平面基片上设计,然后把天线赋形到柱面上,也就是人

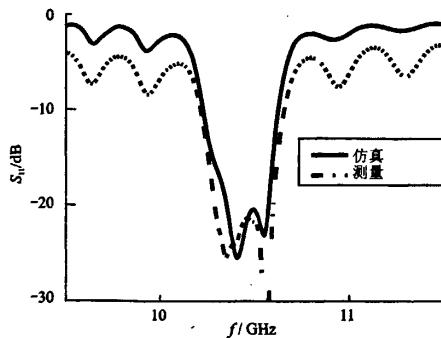


图 6 仿真及测试的天线回波损耗

Fig. 6 Simulated and measured return loss of the  
1×10 slot array antenna

为的把基片弯曲,从而造成介质的分布不均匀,使插入损耗增大。

图 7 给出了天线的全波仿真方向图以及带宽内 3 个频点的  $E$  面、 $H$  面方向图测试结果和仿真结果。从 3 个图中,可以看出天线的  $E$  面、 $H$  面方向图测试结果和仿真结果基本吻合;  $H$  面的方向图第 1 副瓣电平测试结果比仿真结果稍有提高,但是测试第 1 副瓣电平都在  $-10$  dB 以下。 $H$  面的 3 dB 波瓣宽度为  $8.7^\circ$ ,  $E$  面的 3 dB 波瓣宽度为  $108^\circ$ 。频率在  $10.4$  GHz 时,天线  $H$  面最大值指向法向;频率在  $10.3$  GHz 时,天线  $H$  面最大值指向偏离法向  $1^\circ$ (偏向馈源方向);频率在  $10.5$  GHz 时,天线  $H$  面最大值指向偏离法向  $2^\circ$ (偏向终端方向)。

表 2 给出了天线增益的仿真与测试结果。可以看出此天线在中心频率的增益为  $13.2$  dBi。

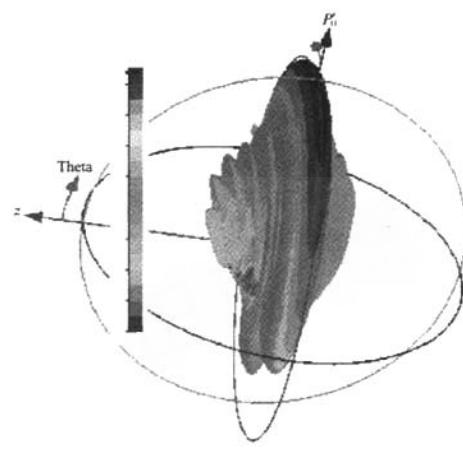
表 2 天线的增益测试及仿真结果

Tab. 2 Simulated and measured Gain of antenna

| $f/\text{GHz}$ | $G/\text{dBi}$ |       |
|----------------|----------------|-------|
|                | 测量             | 仿真    |
| 10.3           | 12.64          | 14.8  |
| 10.4           | 13.20          | 15.03 |
| 10.5           | 12.47          | 15.04 |

## 4 结语

本文用 SIW 技术设计了一条 X 波段柱面共形的缝隙天线阵,测试结果与仿真结果基本一致。SIW 缝隙天线可以把传统矩形波导天线主瓣宽度窄、方向图可以赋形、交叉极化电平低等优异特性发挥出来,同时克服了传统矩形波导天线体积大,加工成本高,以及与平面电路连接不方便等缺点。同时 SIW



(a) 天线的三维方向图

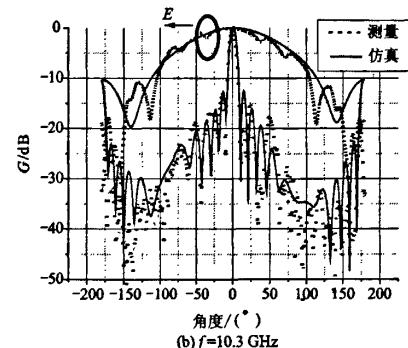
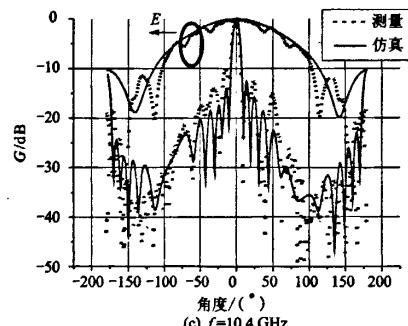
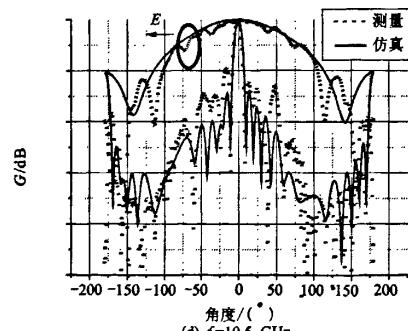
(b)  $f=10.3$  GHz(c)  $f=10.4$  GHz(d)  $f=10.5$  GHz

图 7 驻波带宽内不同频点天线方向图的仿真及测试

Fig. 7 Simulated and measured directory figure at frequencies in the bandwidth of return loss

容易与曲面共形的特性,可以很好地应用到波束扫描天线阵,从而可以克服平面波束扫描天线扫描范围受限的缺点。因此曲面共形的SIW技术在波束扫描天线阵的研究上有着良好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] LI Yan, WEI Hong. Simulation and experiment on SIW slot array antennas [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2004, 14(9):446-448.
- [2] 郝张成. 基片集成波导技术的研究[D]. 南京:东南大学,2005.
- [3] 颜力. 基片集成波导传输特性及阵列天线的理论与实验研究[D]. 南京:东南大学,2005.
- [4] LI Yan, WEI Hong, WU Ke. Simulation and experiment on substrate integrated monopulse antenna [C]. Washington DC: Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005.
- [5] DESLANDES D, WU Ke. A complete substrate integration of waveguide diplexer and antenna for low-cost millimeter-wave module[C]. Linz: Int Symp on Signals, Systems, and Electronics (ISSSE'04), 2004.
- [6] WESTERMAN C W, HARRINGTON V L. Analytic design of conformal slot arrays [J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 1983, 31(4):668-672.
- [7] STERN G J, ELLIOT R S. Resonant length of longitudinal slots and validity of circuit representation: theory and experiment [J]. IEEE Trans, Antennas Propag, 1985, 33 (11):1264-1271.
- [8] XU Feng, WU Ke. Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2005, 53(1):66-73.
- [9] SHENG Zhang-zhang, ZHI Yuan-yu, CAN Li, et al. Electromagnetic energy leakage characteristics of substrate integrated wave-guide[C]. Suzhou: APMC, 2005.
- [10] LI YAN, WEI Hong, WU Ke, et al. Investigations on the propagation characteristics of the substrate integrated waveguide based on the method of lines [J]. IEE Proc Microw Antennas Propag, 2005, 152(1):35-42.
- [11] ELLIOT R S. The design of small slot arrays [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 1978, 26 (2): 214-219.

(责任编辑:程群)

## 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>