

文章编号 1005-0388(2013)06-1165-04

基片集成波导缝隙稀疏阵列天线的设计

卫杰¹ 何十全¹ 廖绍伟² 徐建华³

(1. 电子科技大学电子工程学院, 四川 成都 611731; 2. 上海贝尔实验室, 上海 201206;
3. 电子科技大学中山学院, 广东 中山 528402)

摘要 提出并分析了两类基于基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)的缝隙稀疏阵列天线。减少缝隙单元的数目,对于(基片集成)波导缝隙阵列天线具有重要的意义,可以简化设计、展宽带宽、降低加工工艺要求等。阵列天线稀疏化明显降低了缝隙单元间的互耦,使得低副瓣天线的设计更容易。全波仿真结果有效验证了设计的正确性和有效性。

关键词 缝隙阵列天线; 基片集成波导; 稀疏阵列; 低副瓣

中图分类号 TN820.15 **文献标志码** A

Design and analysis of SIW slot antenna sparse arrays

WEI Jie¹ HE Shiquan¹ LIAO Shaowei² XU Jianhua³

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu Sichuan 611731, China; 2. Alcatel-Lucent Shanghai Bell Research and Innovation, Shanghai 201206, China; 3. Zhongshan Institute, University of Electronic Science and Technology, Guangzhou Guangdong 528402, China)

Abstract Two types of longitudinal slot antenna sparse arrays based on substrate integrated waveguide (SIW) technology are proposed and investigated. This design method could lead to an enhanced bandwidth and a lower requirement for fabrication accuracy, while preserving acceptable radiation properties. Moreover, it is easy to realize low sidelobe levels (SLL) performance due to the lower internal and external mutual couplings. The full wave simulation results show that the sparse designs are effective and feasible.

Key words slot antenna array; substrate integrated waveguide (SIW); sparse array; low sidelobe levels (SLL)

引言

利用标准的印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)工艺加工制作的基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)是一种类似于传统矩形金属波导的准封闭平面导波结构^[1]。与传统波导相比,它具有结构紧凑、质量轻、易于集成和加工的优点。因此,基于 SIW 的缝隙阵列天线,近些年得到了广泛的研究和应用^[2-5]。SIW 宽边纵缝阵列天线是其中的一

种重要类型,它是通过调节缝隙的长度和相位分布,从而实现低副瓣和高增益设计。当设计一个具有较高增益的低副瓣缝隙阵列时,在满足一定的驻波条件情况下,要求阵列边缘处缝隙的辐射导纳很小,即偏置很小,此时缝隙的辐射特性对偏置量非常敏感,尤其是在高频段,这造成了成品率低,有时甚至无法实现的问题。另外,众所周知,当阵列单元较多时,采用经典的 Elliott 迭代设计流程,将是一个非常耗时的过程^[6-7]。

收稿日期: 2013-01-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(No. 60871057); 中央高校基本科研基金(No. ZYWX2012J014)

联系人: 卫杰 E-mail:jweiuestc@hotmail.com

针对这些问题,文中提出了两类 SIW 缝隙稀疏阵列天线的解决办法,简化了设计、改善了性能、降低了成本和工艺要求等。分析和仿真结果验证了该方法的正确性和有效性。

1 天线的结构

与传统的金属矩形波导不同,SIW 传输线的设计与加工更灵活,通过适当选取介质材料、波导宽度、孔距等参数,SIW 中的 TE_{10} 模波导波长 λ_g 可以设计在 $0.65\lambda_0$ 至 $1.75\lambda_0$ 之间。这使得我们可以对 SIW 缝隙阵列天线进行稀疏化设计,其拓补结构如图 1 所示。稀疏阵 I:当 λ_g 在 $0.65\lambda_0$ 至 $1.75\lambda_0$ 之间时,如果将相邻波导分支上的缝隙,采用蛇形布阵的三角拓补结构,可以保证方向图中不出现栅瓣。值得一提的是本方法同样可以用于金属矩形波导缝隙阵列天线,此时为实现各缝隙的同相激励,相邻 SIW 分支中缝隙应沿分支中心线交错排列。稀疏阵 II:当 $0.65\lambda_0 < \lambda_g < 0.8\lambda_0$ 时,不同 SIW 分支中的缝隙则可以采用传统矩形拓补结构布阵,此时缝隙间距为一个波导波长,沿分支中心线同侧排列。

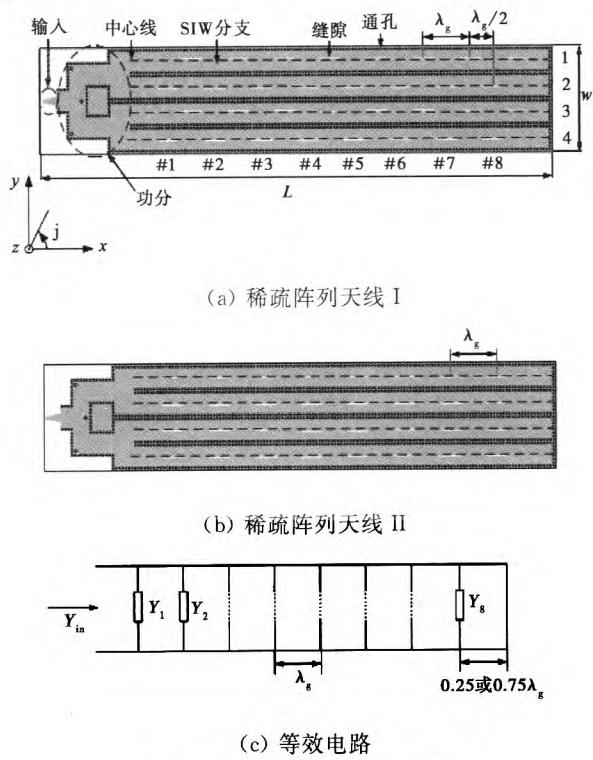


图 1 SIW 宽边纵缝稀疏阵列天线

根据谐振阵列输入驻波比(R_{VWR})与辐射缝隙的数量 N 及带宽 B 之间的关系式^[8]

$$R_{VSW} = 1 + \frac{2}{a^2} + \frac{2}{a} \sqrt{1 + \frac{1}{a^2}}, \quad (1)$$

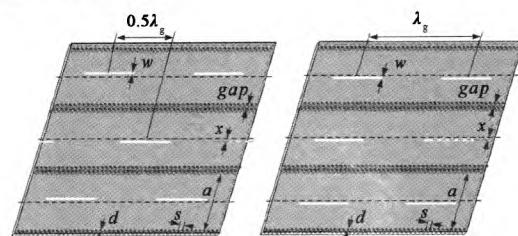
$a = 1 + \frac{(\pi NB)^2}{3 \times 10^4} / \frac{\pi NB}{300} \left[1 + \frac{(\pi NB)^2}{2 \times 10^4} \right]$, 可以预计, 4×8 的 SIW 缝隙稀疏阵列与传统的 4×16 的阵列相比, 缝隙的数量减少了一半, 在具有类似辐射特性和匹配条件下, 稀疏阵列的带宽将得到扩展, 而缝隙偏置量也将变大, 这更易于阵列天线的设计和加工。

2 SIW 缝隙稀疏阵的设计

将辐射 SIW 分支中的缝隙间距确定为一个 TE_{10} 模波导波长 λ_g , 对 SIW 缝隙阵列天线进行稀疏化设计。具体步骤:首先,根据馈电方式和设计参数如介质材料、天线工作频率、波瓣宽度、副瓣大小等要求,选择不同的稀疏化策略,进而设计 SIW 传输线;其次,建立缝隙单元的等效模型及其参数提取;最后,进行阵列综合与设计。

2.1 SIW 传输线的设计

选定工作在 10 GHz 的 4×8 的 SIW 缝隙稀疏阵列作为设计示例。设计中选用 1.524 mm RO4350B 作为介质板,如图 2 所示,其它主要参数为: $a = 11.5$ mm, $s = 0.9$ mm, $d = 0.5$ mm, $w = 0.2$ mm。通过计算可得^[1]: 自由空间中波长 $\lambda_0 = 30$ mm, $\lambda_g \approx 22.8$ mm, $OQ \approx 12$ mm, $OP \approx 12.4$ mm, $PQ \approx 17.26$ mm, 矢量 PQ 大概在 $\varphi = 45^\circ$ 方向上。如图 2(a) 所示,如果将相邻的三个呈三角分布的缝隙视为一个基本辐射单元,单元在 PQ 方向上间距最大,约为 $0.58\lambda_0$, 满足无栅瓣的条件。如图 2(b) 所示,如果采用矩形拓补结构,由于缝隙单元间距为 λ_g , 约为 $0.76\lambda_0$, 也满足无栅瓣的条件。



(a) 三角形拓补 (b) 矩形拓补

图 2 稀疏化拓补结构

2.2 缝隙单元等效模型及导纳的提取

与传统金属矩形波导缝隙阵列天线类似,当 SIW 宽边纵缝的偏置适中时,传输线内缝隙两边的前后向散射波具有对称性。此时,其等效为传输线上的并联导纳,如图 3 所示,归一化的等效导纳可以表示为^[5]

$$\frac{Y(x, y)}{G_0} = \frac{G_r(x, l_r)}{G_0} \cdot \frac{G(x, y) + jB(x, y)}{G_r(x, l_r)} = g(x) \cdot [h_r(y) + jh_i(y)]. \quad (2)$$

式中: x 是缝隙偏置; $y = l/l_r(x)$ 是缝隙长度与其谐振长度的比值; $g(x) = G_r/G_0$ 是归一化谐振导纳; $h_r(y)$ 和 $h_i(y)$ 分别代表归一化等效导纳的实部和虚部。由图 3(c)可以看出, 当偏置 x 小于 0.2 mm 时, 缝隙谐振长度变化十分剧烈, 特别是小于 0.1 mm 时, 缝隙已经跨过 SIW 的中心线, 此时模型已不再成立。与此对应的是图 3(b)中的等效谐振导纳, 其小于 0.02 的部分将不能实现, 这就客观上制约了天线的设计, 尤其是窄波束、低副瓣天线。而阵列的稀疏化可以在一定程度解决这一矛盾。

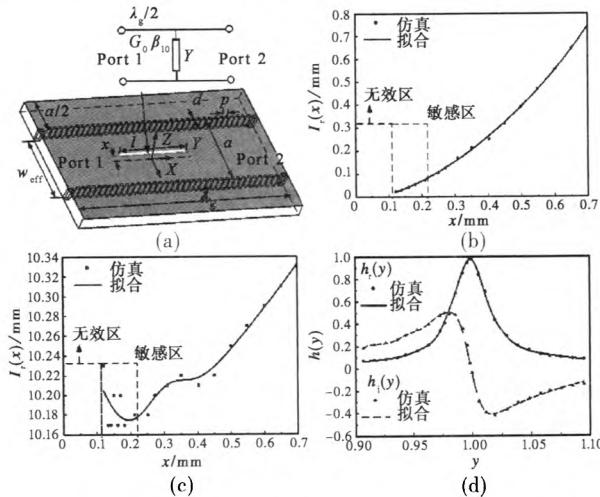


图 3 SIW 宽边纵缝单元等效电路模型及参数提取

2.3 稀疏阵列天线的设计

阵列的稀疏化, 将原有的缝隙单元减少了一半, 单元间隔也增加了近乎一倍, 同时大大地减小了外部耦合和内部高次模对缝隙谐振特性的影响。这使我们可以考虑在 Elliott 迭代设计流程的基础上, 忽略耦合的影响, 从而简化设计过程。需要强调的是即便采用严格的 Elliott 迭代设计方法, 其设计难度和迭代时间都将大大降低。最后, 对两类 4×8 的 SIW 缝隙稀疏阵列进行了简化设计。以稀疏阵 I 为例, 首先, 将两个相邻的 SIW 分支视为一个弯曲的线阵, 在单元缝隙导纳提取结果的基础上, 利用 MATLAB 计算出 25 dB 泰勒分布所需的缝隙偏置和长度参数。然后, 将蛇形曲线阵通过 1 分 4 的等幅功分器扩展成一个 4×8 的稀疏面阵。如图 4 所示, 蛇形曲线阵在 H 面实现了准泰勒的口径分布。另外, 图 5 给出了两种稀疏阵的插入损耗和方向性系数, 图 6 给出了天线的 10 GHz 方向图。结果表明: 在 X 波

段两种稀疏阵列天线在没有调试的情况下, 直接实现了 3.4% 左右的相对带宽, E 面 SLL 也都在 -13.5 dB 左右(与设计吻合); 同时, 稀疏阵列天线 I 和 II 的 H 面 SLL 分别达到 -23.5 dB(基本吻合)和 -17.5 dB。

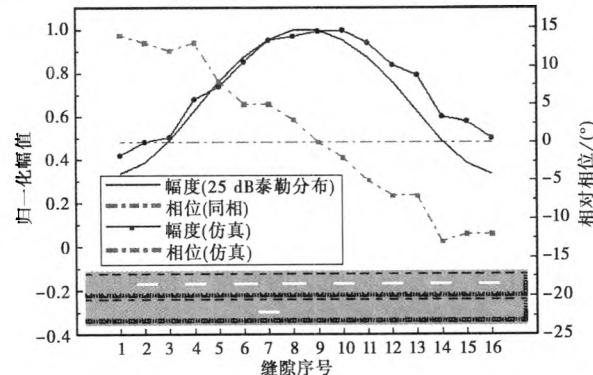


图 4 稀疏阵 I 缝隙中心电场幅值和相对相位

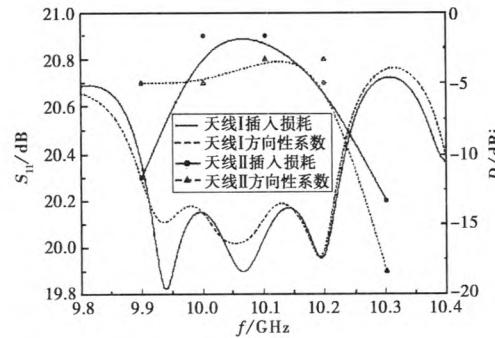


图 5 两类稀疏阵列天线的插入损耗和方向性系数

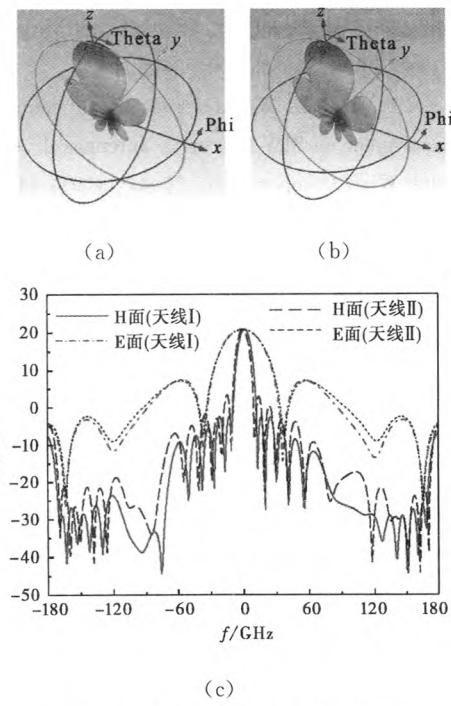


图 6 两类稀疏阵列天线的方向图

3 稀疏阵列天线性能评价

稀疏阵列天线 I: 通过对比, 可以发现稀疏阵列天线 I 与设计指标基本吻合, 这是因为采用的三角交错拓扑结构, 缝隙单元间的外部耦合更小. 这种稀疏化设计方法, 极大地简化了设计, 对于大型的 SIW 或传统金属矩形波导缝隙阵列天线的设计具有重要的参考意义.

稀疏阵列天线 II: 尽管稀疏阵列天线 II 的副瓣与既定的设计指标具有一定的差距, 但这仅仅是在不考虑互耦, 且无任何优化的情况下得到的结果. 对于稀疏阵列天线 II, 若采用多层中心馈电方式, 将非常适合于频率更高或阵列更大的场合.

4 结 论

文中提出的两种稀疏化阵列拓扑结构对于 SIW 或传统金属矩形波导缝隙阵列天线的设计都具有的参考意义, 为今后高性能 SIW 缝隙大型面阵的研制奠定了技术基础. 理论分析和仿真实验验证了其可行性和由此带来的好处, 如简化了设计和降低了加工要求. 另一方面, 稀疏化也是展宽匹配带宽和低副瓣带宽的有效途径.

参考文献

- [1] DESLANDES D, WU K. Accurate modeling, wave mechanisms, and design considerations of a substrate integrated waveguide[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2006, 54(6): 2516-2526.
- [2] YAN L, HONG W, HUA G, et al. Simulation and experiment on SIW slot array antennas[J]. IEEE Microw Wirel Compon Lett, 2004, 14(9): 446-448.
- [3] 徐俊峰, 洪伟, 蒲振起, 等. 平衡馈电基片集成波导缝隙阵列全向天线[J]. 电波科学学报, 2008, 23(2): 207-210.
XU Junfeng, HONG Wei, KUAI Zhenqi, et al. Substrate integrated waveguide (SIW) slot array omni-directional antenna with balanced feeding [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(2): 207-210. (in Chinese)
- [4] 余晨, 洪伟, 周健义. 基片集成波导全向滤波天线多天线阵列[J]. 电波科学学报, 2012, 27(2): 301-306.
YU Chen, HONG Wei, ZHOU Jianyi. Substrate integrated omnidirectional filntenna MIMO array[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(2): 301-306. (in Chinese)
- [5] 余晨, 洪伟, 翟国华, 等. 基片集成波导混合功率分配器馈电对数周期天线[J]. 电波科学学报, 2011, 26(3): 437-441.
YU Chen, HONG Wei, ZHAI Guohua, et al. SIW hybrid power divider fed periodic antenna array [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(3): 437-441. (in Chinese)
- [6] ELLIOTT R S. An improved design procedure for small arrays of shunt slots[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1983, 31(1): 48-53.
- [7] ELLIOTT R S, LOUGHLIN W R O. The design of slot arrays including internal mutual coupling [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1986, 34(9): 1149-1154.
- [8] HAMADALLAH M. Frequency limitations on broadband performance of shunt slot arrays [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1989, 37(7): 817-823.

作者简介



卫杰 (1982—), 男, 四川人, 博士生, 主要研究领域为天线、微波电路与系统和计算电磁学等.

何十全 (1984—), 男, 四川人, 博士, 主要研究领域为复杂结构目标电磁辐射与散射的高效算法研究等.

廖绍伟 (1981—), 男, 四川人, 博士, 主要研究领域为天线、计算电磁学、微波电路等.



徐建华 (1962—), 男, 重庆人, 博士生导师, 主要研究领域为电磁学、微波技术与天线、微波电真空器件等.

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)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)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),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>