

基于 SIW 的 Ka 波段 CTS 天线设计

江彪 汪敏 莫燕红 吴文

(南京理工大学电光学院, 南京 210094)

摘要: 提出了一种基于 SIW 的连续横向结 CTS (Continuous Transverse Stub) 天线设计方法。这种方法采用固定规格的介质板材, 利用标准 PCB 工艺加工制作, 解决了实验室研究中加工精度与研制成本的矛盾, 为 CTS 进一步研究提供了实验手段。设计了一种 Ka 波段的 CTS 平板波导缝隙阵列天线。结果表明: $46.24\text{mm} \times 46.24\text{mm}$ 口径 CTS 天线阵列增益达到 24.3dBi , 在 34.44GHz - 35.49GHz 频段内, 反射系数 $S_{11} < -10\text{dB}$ 。

关键词: SIW, 平板 CTS 天线阵列, Ka 波段

Design on Ka-Band CTS Antenna Using SIW Technology

JIANG Biao, WANG Min, MO Yan-hong, WU Wen

(School of Electronic and Optical Engineering, NUST, Nanjing 210094)

Abstract: In this paper, a CTS (continuous transverse stub) antenna using SIW(substrate integrated waveguide) technology is proposed. To reach a compromise between fabrication accuracy and cost, substrates with fixed specifications and standard PCB processing technology are adopted, which provides an effective experimental method for the further research on CTS antennas. A Ka-band planar CTS antenna array is designed. Simulation results show that a bandwidth of 1.05GHz in terms of $S_{11} < -10\text{dB}$, a gain of 24.30dBi at 35GHz , and a corresponding efficiency of 73.21% have been achieved.

Key words: SIW, planar CTS array, Ka-band

引言

CTS 天线最初出现在上世纪九十年代, 美国休斯航空公司率先将 CTS(Continuous Transverse Stub)技术应用于矩形波导缝隙天线设计中, 并将平面 CTS 天线大量使用在其公司的产品中。CTS 天线因具有结构紧凑、重量轻、低成本、高增益、辐射效率高等优点, 而被广泛应用于雷达和通信中^{[1]-[3]}。CTS 结构可用于双极化、双波束、电控波束扫描等天线设计中, 仍然是一个研究的热点, 如最新研制的有共面波导馈电的 CTS 天线^{[4]-[5]}、同轴馈电的全向 CTS 阵列天线^{[6]-[8]}。

CTS 天线在大批量生产中一般采用压制、注塑等成熟的加工方法, 加工简单, 平均成本低廉。但对于小批量实验室研究来说, 则成本太高, 而不采用模具注塑的方法, 加工安装精度则无法保证。为此, 本文提出一种基于基片集成波导 SIW 结构设计 CTS 天线阵列的方法。这种天线利用介质基板作为平板波导传输, 将 SIW 结构代传统平板波导 CTS 天线中的横向枝节, 并采用多层介质板印制技术, 不仅制作简单, 降低了研究成本, 而且保证了加工精度。本文设计了一种 8mm 波段口径尺寸为 $8\lambda_g \times 8\lambda_g$ SIW 结构 CTS 天线阵列, 仿

真结果表明: 天线反射系数 $S_{11} < -10\text{dB}$ 的阻抗带宽为 34.45GHz - 35.49GHz ; 在 35GHz 获得的最大增益为 24.30dBi , 对应天线效率为 73.21% 。

1 CTS 天线单元设计

1.1 CTS 天线工作原理

典型的平板波导 CTS 天线如图 1 所示, 它由多个有限高的辐射横向枝节、一个平行板波导传输线和线性馈源构成。平行板波导结构的纵向电流被横向枝节切断, 能量从辐射枝节中耦合出来, 并以线极化波向自由空间辐射。CTS 单元模型图和它的等效传输线电路图如图 2 (a)、(b) 所示。



图 1 典型波导 CTS 天线

根据 CTS 单元等效传输线模型计算可得, 单元散射系数为

$$S_{11} = S_{22} = \frac{\alpha}{1 + \alpha}, \quad (1)$$

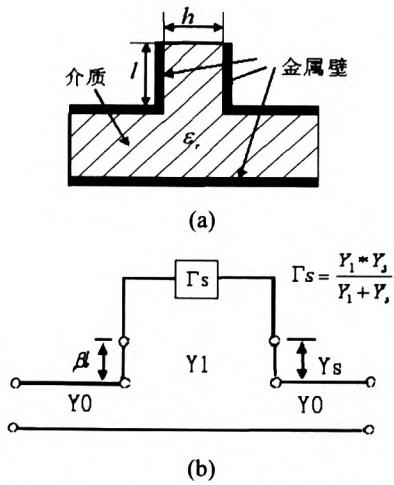


图 2 (a) CTS 单元 (b) 等效传输线模型

$$S_{12} = S_{21} = \frac{1}{1 + \alpha}, \quad (2)$$

耦合系数

$$|K|^2 = 1 - \frac{1 + |\alpha|^2}{|1 + \alpha|^2}, \quad (3)$$

其中：

$$\alpha = \left(\frac{h}{2b} \right) \left[\frac{1 + \Gamma_s e^{-j2\beta l}}{1 - \Gamma_s e^{-j2\beta l}} \right],$$

天线单元是通过控制辐射单元枝节的高度 l 和平行板枝节间隙宽度 h 来控制电长度 βl 和特性导纳 Y_1 。由以上公式可见，通过调整枝节缝隙宽度 h 和平行板波导高度 b 的比值可调节耦合值 $|K|^2$ ，即每个单元辐射的能量。

本文设计 8mm 波段的 SIW 结构 CTS 天线阵列。因此，首先对平板波导和枝节中填充介质的 CTS 单元进行分析，平板波导选择 $\epsilon_r=2.2$ ，厚度为 1.524mm 的 DiClad 880。以端口输入能量为 1，辐射出 1/8 能量为例，通过对枝节高度进行仿真优化可得枝节缝隙宽度约 1.01mm，上层填充介质 DiClad 880 时，不同高度对反射系数影响如图 3。结果表明：厚度为 1.1mm 时，辐射 1/8 能量时，反射系数为 $S_{11}=-23.60$ dB，与理论公式计算所得结果 $S_{11}=-23.13$ dB 接近，而厚度为 1.27mm 介质板时，反射系数 $S_{11}=-20.25$ dB，与计算值 -23.13dB 相差比较大，所以不同高度枝节对反射系数是有影响的。

1.2 SIW 结构 CTS

通过单元研究可知：枝节的高度会影响 CTS

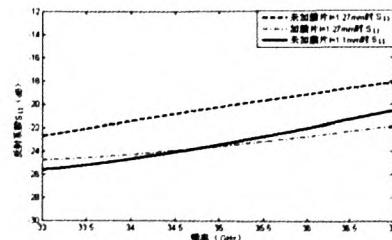


图 3 加膜片和未加膜片 CTS 单元回波损耗比较

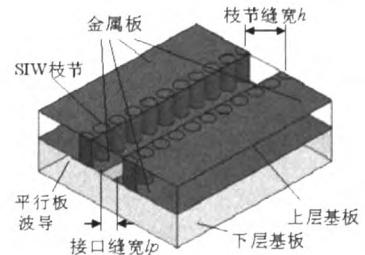


图 4 SIW 结构 CTS 单元

单元的谐振。在利用 SIW 结构设计 CTS 天线时，由于受现有商用板材厚度规格固定的限制，所以我们只能选取若干固定厚度板材，这显然会影响枝节谐振性能，从而影响单元的反射特性。对此，本文提出了在枝节接口处加载金属膜片，进行电抗调节，如图 4 所示。通过调节枝节缝隙宽度 h 和延长中间地板接口缝宽度 l_p ，使辐射相同能量时，反射系数与 1.1 中公式计算值近似。现在以输入能量为 1，辐射出 1/8 能量为例，选取 1.27mm 厚度的 DiClad 880 的介质基板，通过仿真比较可得如图 3 所示曲线。未加膜片时，厚度为 1.27mm 介质板辐射 1/8 能量需要的辐射枝节缝隙宽度 h 为 1.01mm，仿真得反射系数为 $S_{11}=-20.25$ dB，加膜片调节后，接口缝宽度 l_p 为 0.35mm，缝隙宽度 h 为 0.91mm，得到能量为 -9.03dB，反射系数 $S_{11}=-23.46$ dB，与理论计算结果接近，可见这种设计方法可行，且具有较好的灵活性。

2 天线阵列的设计

2.1 行驻波阵列设计

天线通过组阵可以获得较高的增益，对于边射阵列，口径场为均匀分布时，天线可获得最大增益。对于直线阵有两种形式：谐振式与非谐振式。谐振式特点：谐振式阵列为同相阵，最大方向指向阵面的法线方向。工作频率改变时，天线匹配迅速恶化，因此，端馈谐振式阵列带宽只有百分之几，且阵元数越多，带宽越窄。在非谐振

式中, 波导末端接匹配负载, 波导中近似传输行波, 天线能在较宽的频带上保持良好的匹配, 但波束最大方向偏离阵面法线方向, 且匹配负载会吸收一定的功率。非谐振式要使得天线每个单元的辐射功率值相等, 应该让每个单元的辐射效率逐次增大, 相应地增大枝节缝隙的宽度。当单元天线辐射能量较大时, 枝节缝隙宽度会开得很大, 如辐射 1/3 能量时, 缝隙的宽度已经达到 3.75mm, 影响散射特性, 且在阵元数较少时, 辐射效率较低。

为使天线既有较大的带宽, 又有很好的辐射效率, 本文采用了行驻波结合的设计方法, 设计了一个指向角偏离法线 1° 的 8 元 CTS 行驻波阵。相邻单元间距约为 λ_g , 在波导末端设置短路活塞, 短路活塞与终端缝隙中心相距 $\lambda_g/2$ 。首先将 CTS 等效为如图 5 所示的串联电路。对于谐振阵, 一般令 $Z_{g1}=Z_{g2}=\cdots=Z_{gN}$, 第 n 个单元对应的输入阻抗 $Z_{in,n}=nZ_0/N$ 时整个阵列输入端口获得匹配。非谐振阵列输入输出端口阻抗视为波导特性阻抗 Z_0 使单元反射最小。

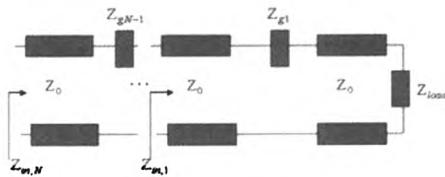


图 5 等效串联电路图

本文通过对输入阻抗 $Z_{in,n}$ 进行优化调节, 使之不必等于 nZ_0/N , 以谐振式 CTS 天线阵列最后一个单元为例, 进行仿真分析可得如下图 6 特性: 当 $Z_{in,1}=6\Omega$, 枝节缝隙宽为 1.01mm 时的带宽明显小于 $Z_{in,1}=20\Omega$, 枝节缝隙宽度为 2.5mm 时带宽。可见通过调节 $Z_{in,n}$, 可以使带宽加宽。

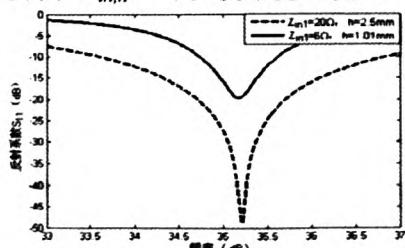


图 6 端口输入阻抗不同时反射系数

根据这个特性, 本文提出一种通过调节每个单元的增益和带宽之间折中的方法, 设计了一个 $8\lambda_g \times 8\lambda_g$ 口径行驻波天线。设计参数如下: 下层介质基板厚 1.524mm, 上层介质基板厚 1.27mm, 单元间距 $\lambda_g=5.78\text{mm}$ 。使用软件对各个缝隙宽度

进行了优化, 得到天线的各个缝隙宽度如表 1, 最后一个单元能量全部辐射, 波导缝隙宽度 2.5mm, SIW 缝隙宽度 2.62mm。天线总的口径尺寸为 $46.24\text{mm} \times 46.24\text{mm}$ 。

表 1 天线各个缝隙宽度

	辐射能量比 (dB)	波导缝隙宽度(mm)	SIW 缝隙宽度(mm)
1	-12.19	0.64	1.07
2	-11.84	0.68	1.10
3	-11.07	0.78	1.17
4	-9.53	0.93	1.34
5	-8.54	1.07	1.5
6	-8.10	1.18	1.57
7	-6.60	1.63	1.96

2.2 仿真结果

CTS 阵列整体优化设计中, 与缝隙垂直的侧面使用理想磁壁边界设置, 末端短路。仿真得到 CTS 天线阵列反射系数 S_{11} 参数曲线如图 7 所示。从图中可看出, 反射系数 S_{11} 在 34.45GHz-35.49GHz 范围内均小于 -10dB, 相对带宽为 3.0%。图 8 所示为工作频率 35GHz 时的 CTS 阵列辐射方向图。从图中可看出, 天线的最大波束基本指向法线方向 (偏角为 1°), E 面副瓣电平为 -10.45dB, H 面副瓣电平为 -13.2dB。天线增益为 24.30dBi, 对应口径效率为 73.21%。

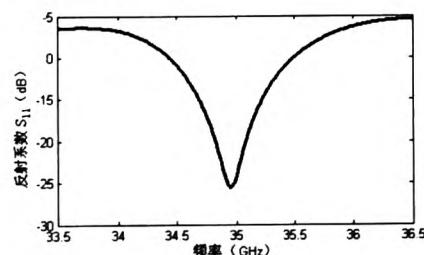


图 7 CTS 天线阵列反射系数

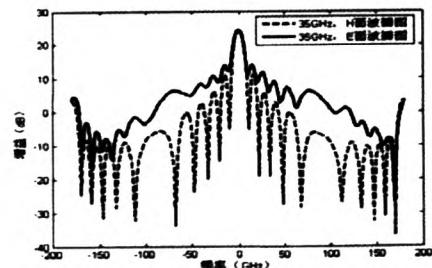


图 8 CTS 阵列天线方向图

3 结论

本文主要将 SIW 技术应用于 CTS 天线阵列的设计, 解决了实验室研究 CTS 天线中加工精度和研制成本矛盾。设计了一个 8 元 Ka 波段 CTS 阵列, 口径尺寸为 $46.24\text{mm} \times 46.24\text{mm}$, 指向角偏 1 度, 最大增益 24.30dBi, 对应口径效率为 73.21%。验证了设计方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] W.W. Milroy. Continuous transverse stub (CTS) element devices and methods of making same.U.S[P]. Patent 5266961, 29 Aug. 1991.
- [2] Lemons, A., Lewis, R., Milroy, W.W., Robertson, R.S., Coppedge, S.B. and Kastle, T.A [C].W-Band CTS Planar Array. IEEE MIT-S International Microwave Symposium Digest. 1999:651-654
- [3] Magdy F. Iskander, Zhijun Zhang, Zhengqing Yun. New Phase Shifters and Phased Antenna Array Designs Based on Ferroelectric Materials and CTS Technologies [J] . IEEE Trans on Microwave Theory Technique, 2001, 49(12):2547-2553
- [4] W. Kim and M. Iskander. A New Coplanar Waveguide Continuous Transverse Stub(CPW-CTS) Antenna for Wireless Communications[J].IEEE Antennas and Wireless Prop. Letters.2005,4:172-174
- [5] Wayne Kim and Magdy F. Iskander. A Multi-Element Coplanar Waveguide Continuous Transverse Stub(CPW-CTS) Antenna for Wireless Communication [J]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium.2005:259-262
- [6] Zhijun Zhang, Magdy Iskander and Zhengqing Yun. Coaxial Continuous Transverse Stub (CTS) Array[C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium.2000,1:332-335
- [7] Robert Isom, Magdy F. Iskander, Zhengqing Yun, and Zhijun Zhang. Design and Development of Multiband Coaxial Continuous Transverse Stub (CTS) Antenna Arrays[J].IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2004,52(8): 2180-2184
- [8] Magdy F. Iskander, Zhijun Zhang, Zhengqing Yun, and Robert Isom. Coaxial Continuous Transverse Stub (CTS) Array[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2001,11(12):489-491

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>