

· 天馈系统 ·

中图分类号: TN82

文献标志码: A

文章编号: 1004-7859(2013)12-0060-04

一种 K 频段宽波束圆极化相控阵天线

韩国栋¹, 康一丁², 武伟¹, 杜彪¹, 陈如山³

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081)

(2. 中国人民解放军空军航空大学 信息对抗系, 长春 130022)

(3. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘要:设计了一种适用于雷达、通信等领域的介质加载圆极化波导阵列天线,天线的圆极化信号通过隔板移相器的方式实现,设计的天线在 K 频段内驻波比小于 2,交叉极化低于 25 dB,单元增益在带内大于 5 dB,波束宽度大于 100°,能够满足阵列扫描的要求。加工天线后实测结果与仿真结果吻合一致,该阵列天线既适合固定波束阵列天线,又适合具有相扫功能的阵列天线。

关键词:K 频段;相控阵;介质加载;圆极化

A Study on K-band Circularly Polarized Phased Array Antenna

HAN Guodong¹, KANG Yiding², WU Wei¹, DU Biao¹, CHEN Rushan³

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

(2. Department of Information Countermeasure of the Aeronautical,
University of the China People Liberation Airforce, Changchun 130022, China)

(3. School of Electronic Engineering and Opto-electric Technology, NUST, Nanjing 210094, China)

Abstract: A kind of circularly polarized waveguide phased array antenna loaded with the dielectric material of K band is designed for radar, communication. The circular signal is produced by step wall shifter which is arranged inside the waveguide antenna. The antenna in array has a series of advantage, such as VSWR less than 2 and low cross polarization less than 25 dB. The gain of element antenna is greater than 5 dB, and beam width is more than 100 degrees. The results obtained from the simulation model and the manufactured agree much well. And the antenna arrays not only can be applied in single beam system, but also in the phased scanning occasion.

Key words: K-band; phased array; dielectric loading; circularly polarized

0 引言

随着天线技术的发展以及不同应用领域日益提高的需要,圆极化相控阵天线由于具有强大的功能,灵活的工作方式,无惯性波束扫描,已成为许多军用相控阵天线或卫星应用的主要天线形式^[1-2]。

目前,国内外许多科研单位对毫米波二维有源相控阵天线展开了诸多研究。其中:美国哈里斯公司研发的 K 频段通信相控阵天线,采用收发分开的天线孔径,能实现 $\pm 60^\circ$ 的波束扫描,使用的是普通的印制板天线^[3],德国研发的 SNTANA 毫米波二维有源相控阵天线采用低温共烧陶瓷(LTCC)工艺,从天线单元、TR 组件到馈电网络全实现了一体化高密度集成^[3]。而国内诸如中电集团的第十研究所、第二十九研究所等也在 K 频段二维有源相控阵天线方面开展了大量的研究^[4]。

能实现 K 频段相控阵天线的单元有多种形式,如:

利用空间旋转实现圆极化宽角扫描为微带贴片天线^[5];利用双线极化天线和圆极化电桥实现圆极化信号的振子或者 Vivaldi 天线等^[6-7]。但上述方法由于要增加四端口电桥,故会引入较大的插损,降低了天线阵列的效率。

综合考虑天线的效率、可实现性等因素,本文提出一种实现宽角扫描的波导天线形式,即通过方形口面和内部的圆极化器来实现圆极化信号的收发功能。在单元内部采用极化隔板移相器,实现极化分集,采用介质加载的方式以减小单元体积。设计的天线在 K 频段内的有源驻波比小于 2,交叉极化低于 25 dB,单元增益在带内大于 5 dB,波束宽度大于 100°,能够满足阵列扫描的要求。

1 介质加载矩形波导单元设计

设计的波导形式的天线如图 1 所示,在内部设置锯齿形宽带极化器,对输入的线极化信号进行移相,并进行矢量分解,形成相位相差 90°的线极化。

通信作者: 韩国栋 Email: laorieshan@163.com
收稿日期: 2013-07-20 修订日期: 2013-09-22

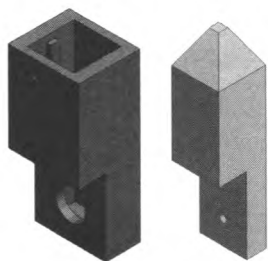


图1 波导结构与加载介质的示意图

该天线主要由方形金属波导壁、加载介质、隔板移相器、馈电端口等四部分组成。

按计算的截止频率为 22 GHz, 这样, 波导辐射器需要介质加载, 介质选取介电常数为 2.2 的聚四氟乙烯材料, 进行介质加载可满足所需要的频率在波导中主模传输。

在设计隔板移相器时, 通过分析其两端口的 S 参数, 得到影响该类型天线轴比的影响因素, 并对其进行优化, 得到所要分析的参数^[8], 如图 2 所示。

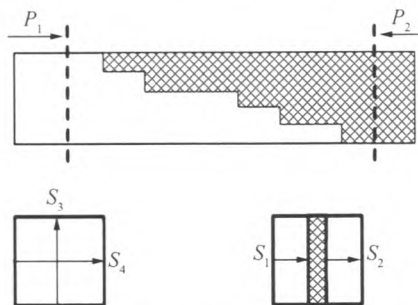


图2 加载隔板移相器的天线分解

定义隔片圆极化器的四个端口, 一般地, 根据隔片圆极化器的结构对称性和基本特性可以得到它的 S 参数为

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{12} & S_{22} & -S_{13} & S_{14} \\ S_{13} & -S_{13} & S_{33} & S_{34} \\ S_{14} & S_{14} & S_{34} & S_{44} \end{bmatrix} \quad (1)$$

由隔片圆极化器的无耗特性得到

$$S_{11} S_{11}^* = S_{22} S_{22}^* \quad (2)$$

由隔片圆极化器的特点可知, 由端口 4 入射的电场矢量与薄导体隔片相垂直, 隔片对端口 4 入射的信号基本没有影响, 它的作用是仅仅将此信号等幅同相地平分到端口 1 和端口 2。因此, 可以近似地得到

$$S_{44} = S_{34} = 0 \quad (3)$$

由 S 参数的无耗性

$$2|S_{13}|^2 + |S_{33}|^2 + |S_{34}|^2 = 1 \quad (4)$$

由 $S_{34}=0$ 得

$$|S_{13}|^2 = 1/2(1 - |S_{33}|^2) \quad (5)$$

将 $|S_{14}| = 1/\sqrt{2}$ 和式(5)由 S 参数的无耗特性得

$$|S_{12}|^2 = 1/2|S_{33}|^2 - |S_{11}|^2 \quad (6)$$

由式(6)可知, 膜片极化器的关键技术指标端口隔离 $|S_{21}|$ 主要是由与隔片平行的入射信号(即端口 3)的驻波引起的, 只要通过隔片形状的优化设计, 尽可能的降低端口 3 的驻波, 才能提高隔片圆极化器的两个旋向之间的隔离度。

隔片圆极化器的轴比主要由两个因素影响: 一是 S_{13} 和 S_{14} 的幅度不一致产生的; 二是由 S_{13} 和 S_{14} 相差偏离 90° 引起的。

由 S_{13} 和 S_{14} 的幅度不一致产生的轴比

$$AR_1 = 20\lg |S_{13}/S_{14}| = 10\lg(1 - |S_{33}|^2) \quad (7)$$

由 S_{13} 和 S_{14} 相差偏离 90° 引起的轴比为

$$AR_2 = 20\lg \left| \frac{S_{11} + S_{14}}{S_{13} - S_{14}} \right| \quad (8)$$

可以看出, 当 S_{13} 和 S_{14} 相差 90° 时, 由相位引起的轴比为 0。

至此, 对天线单元的设计基本完成, 后面只要将其加入周期边界进行优化设计即可。

2 阵列仿真计算

对 64 个单元组成的有源子阵进行仿真分析, 如图 3 ~ 图 7 所示。观察阵中单元的有源驻波比、波束宽度以及轴比的变化。从图 4 和图 5 的单元有源驻波比和隔离度看出, 端口的驻波比在带内均小于 2。端口隔离度小于 -40 dB。辐射单元方向图在自由空间的波束宽度达 110° , 在波束宽度内轴比小于 1, 能够满足工程上阵列扫描的要求。

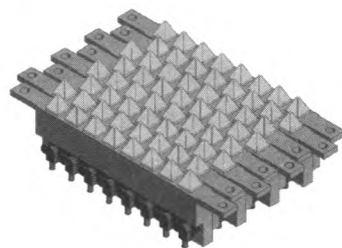


图3 仿真的阵列模型

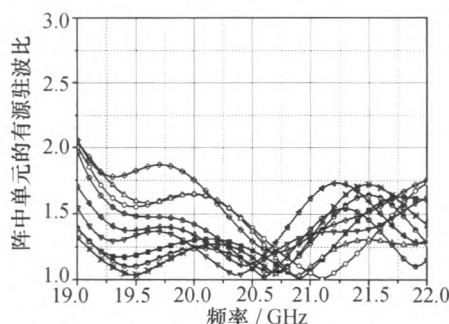


图4 阵中单元有源驻波比

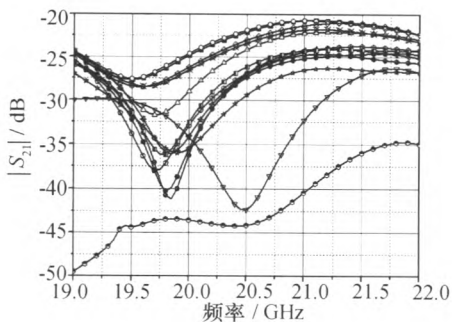


图5 各端口的隔离度

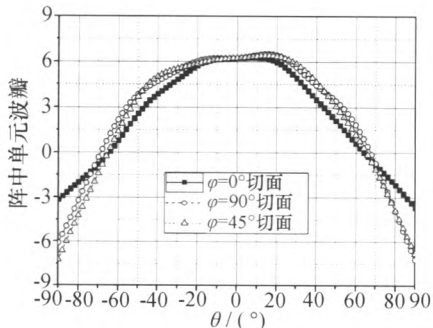


图6 阵中单元波瓣

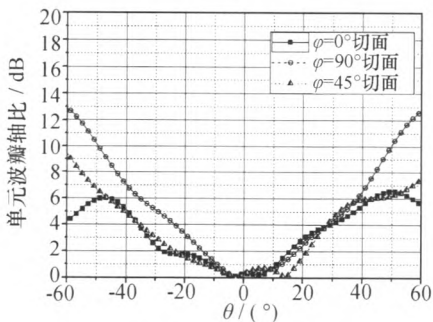


图7 阵中单元的轴比

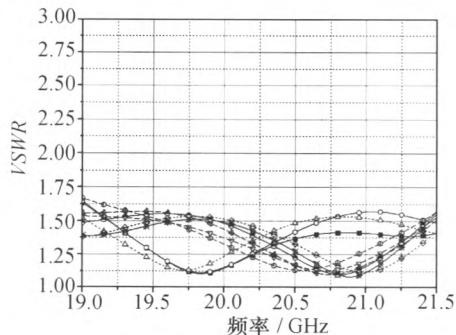


图9 阵列单元有源驻波比的测试结果(法向)

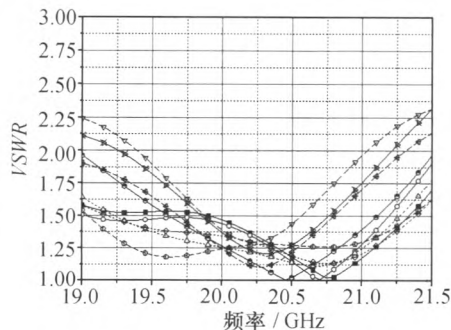


图10 阵列单元有源驻波比的测试结果(扫描30°)

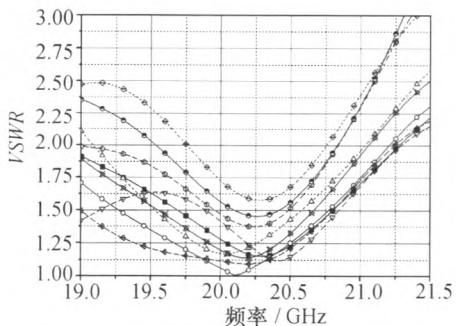


图11 阵列单元有源驻波比的测试结果(扫描50°)

3 加工试验结果

对天线单元和小型阵列进行整体加工,并通过测试系统对阵中单元以及阵列特性进行测试。在测试阵中单元有源驻波比时,未测单元的后端连接匹配负载,待测单元连接波导过渡,并转化为同轴接头,如图8所示。图9~图11为不同扫描方向的有源驻波比,从测试结果看,大部分单元法向时有源驻波比低于1.7,在扫描到50°后,单元的有源驻波比小于3.0。

在阵列波瓣的测试中,首先选取待测阵中单元,将不测试单元的后端连接负载。测试环境为暗室,信号由发射喇叭发射待测极化的信号,并设置频率,由待测单元接收信号,将阵面单元的波瓣一并测试出。然后,通过理论计算的方式进行合成,如图12、图13所示。从测试结果看,在±50°扫描范围内副瓣低于-15 dB,增益下降小于3 dB。

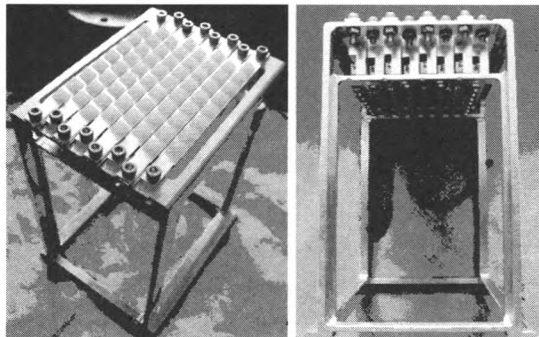


图8 波导辐射器相控阵天线

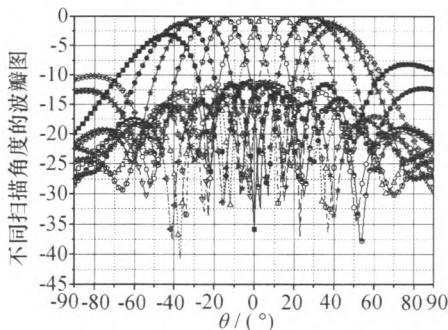
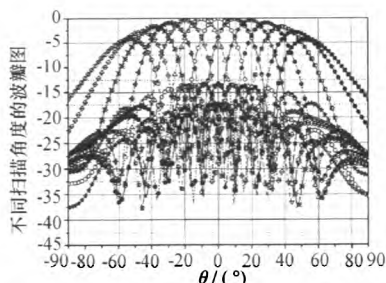


图12 $\varphi=0^\circ$ 切面上波束扫描测试图

图 13 $\varphi=90^\circ$ 切面上波束扫描测试图

值得注意的是,由于在测试过程中暂时没有圆极化发射信号系统,因此,没有顾及圆极化的测试,这部分工作将在后续进一步开展。

4 结束语

本文通过采用介质加载和极化隔板的方式实现了波导单元辐射圆极化信号的设计工作,设计的天线在K频段具有良好的辐射特性,在卫星通信、雷达等领域具有较高的实用价值,对于研究圆极化天线阵列具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] Holzwarth S, Litschke O, Simon W, et al. Highly integrated 8×8 antenna array demonstrator on LTCC with integrated RF circuitry and liquid cooling[C]// Proceedings of the 4 European Conference on Antennas and Propagation. Barcelona: IEEE Press, 2010: 1–4.
- [2] Mailloux R J. Phased array antenna handbook[M]. New York: Artech House, Inc, 2005.
- [3] Huang J A. Ka-band circularly polarized high-gain micros-

(上接第59页)

- [8] Sturm C, Zwick T, Wiesbeck W. An OFDM system concept for joint radar and communications operations[C]// Vehicular Technology Conference. Barcelona: IEEE Press, 2009: 1–5.
- [9] Sturm C, Braun M, Zwick T, et al. A multiple target Doppler estimation algorithm for OFDM based intelligent radar systems[C]// In Proceedings 7th European Radar Conference. Paris, France: IEEE Press, 2010.
- [10] Sturm C, Zwick T, Wiesbeck W, et al. Performance verification of symbol-based OFDM radar processing[C]// In Radar Conference. Washington, DC: IEEE Press, 2010: 60–63.
- [11] Sit Y L, Sturm C, Reichardt L, et al. The OFDM joint radar-communication system: an overview[C]// SPACOMM 2011: The Third International Conference on Advances in Satellite and Space Communications. Budapest: IEEE Press, 2011.
- [12] Robertson M, Brown E R. Integrated radar and communications based on chirped spread-spectrum techniques[C]// IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Philadelphia, U. S.: IEEE Press, 2003: 611–614.
- [13] Xu S J, Chen B, Zhang P. Radar-communication integration based on DSSS techniques[C]// IEEE International Conference on Signal Processing. Beijing, China: IEEE Press, 2006: 16–20.
- [14] Xu S J, Chen Y, Zhang P. Integrated radar and communi-

trip array antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995,43(1): 113–116.

- [4] 何海丹,何庆强. 毫米波相控阵天线高密度集成设计技术[C]// 2013 全国微波毫米波会议论文集. 北京: 电子工业出版社, 2013: 1–4.
He Haidan, He Qingqiang. High density integrated design of a millimeter-wave phased array[C]// The National Conference of Microwave and Millimeter Wave. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 1–4.
- [5] Lin S, Eron M, Turner M, et al. Development of wideband low-loss directional coupler with suspended stripline and microstrip line[J]. Electronics Letters, 2011, 47(25): 1377–1379.
- [6] Thiele E, Taflove A. FD-TD analysis of Vivaldi flared horn antennas and arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994,42(5): 633–641.
- [7] Bui L, Mitchell A, Ghorbani K, et al. Wide-band photonicly phased array antenna using vector sum phase shifting approach[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005,53(11): 3589–3595.
- [8] 徐继东. 隔片圆极化器的设计及S参数的分析[J]. 现代雷达, 2005,27(8): 52–54.
Xu Jidong. S-matrix analysis and design of septum polarizer[J]. Modern Radar, 2005,27(8): 52–54.

韩国栋 男,1980年生,博士,高级工程师。研究方向为计算电磁学、天线理论与设计技术等。

康一丁 女,1982年生,硕士,讲师。研究方向为信息对抗,信息处理等。

杜彪 男,1962年生,研究员。研究方向为反射面天线、馈源和阵列天线。

陈如山 男,1965年生,教授。研究方向为微波毫米波电路和系统、计算电磁学等。

cation based on DS-UWB[C]//IEEE Ultra wideband and Ultra short Impulse Signals, Sevastopol, Ukraine: IEEE Press, 2006:142–144.

- [15] Jamil M, Zepernick H J, Pettersson M I. On integrated radar and communication systems using opermann sequences[C]// IEEE International Conference on Military Communication, San Diego: IEEE Press, 2008.
- [16] Surender S C, Narayanan R M, Das C R. Performance analysis of communications & radar coexistence in a covert UWB OSA system[C]// Global Telecommunications Conference. Miami, USA: IEEE Press, 2010.
- [17] Surender S C, Narayanan R M. UWB noise-OFDM netted radar: physical layer design and analysis[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 47(2): 1380–1400.
- [18] Cheng Xingbo, Wang Xiaomo, Xu Shanfeng, et al. A novel radar waveform compatible with communication[C]// IEEE ICCP2011 Proceedings. China, Chengdu: IEEE Press, 2011.
- [19] Chen Xingbo, Wang Xiaomo, Zhang Zhao, Xu Shanfeng. A communication with LFM carrier modulated by MSK scheme[C]// IEEE ICCP2012 Proceedings. Nanjing, China: IEEE Press, 2011.

陈兴波 1977年生,博士研究生。研究方向为信号检测与参数估计,雷达通信综合化系统设计。

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)，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>