第 38 卷第 1 期
2019 年 2 月

红 外 与 毫 米 波 学 报
J. Infrared Millim. Waves

Vol. 38, No. 1
February, 2019

文章编号: 1001 - 9014(2019)01 - 0074 - 05

DOI: 10.11972/j.issn.1001 - 9014.2019.01.013

W 波段双极化单脉冲天线设计

孟洪福*, 陈 阳, 窦文斌

(东南大学 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了探测目标的极化特性, 研制了工作在 *W* 波段的双极化单脉冲卡塞格伦天线. 天线由主反射面、副反射面、馈源喇叭、正交模耦合器及和差器组成. 天线主反射面口径为 *137 mm*, 馈源为五喇叭形式, 正交模耦合器采用渐变波导匹配方案, 和差器通过平面型定向耦合结构实现. 通过将馈源喇叭、正交模耦合器及和差器集成设计, 减小了连接损耗, 压缩了天线纵向尺寸. 测试结果表明, 天线驻波带宽约 *3.7 GHz*, 极化隔离度优于 *35 dB*, 和波束增益大于 *37.9 dBi*, 副瓣电平优于 *-15 dB*, 差波束零深优于 *-25 dB*. 天线在 *W* 波段实现了较好地双极化单脉冲性能.

关 键 词: 毫米波; 单脉冲; 双极化; 卡塞格伦天线

中图分类号: TN823 + .28 **文献标识码:** A

Design of dual-polarized monopulse antenna at W-band

MENG Hong-Fu*, CHEN Yang, DOU Wen-Bin

(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to detect the polarization properties of the target, a dual-polarized monopulse Cassegrain antenna at W-band is proposed. The antenna is composed of the main-reflector, the sub-reflector, the feed horns, the orthomode transducer, and the sum-differential network. The aperture diameter of the antenna is 137 mm, the feed contains five horns, the orthomode transducer is designed using the tapered waveguide, and the sum-differential network is realized by the planer coupler. The feed horns, orthomode transducer, and sum-differential network are integrated designed to reduce the insertion loss and compress the size of the antenna. The measured results show that the impedance bandwidth of the antenna is about 3.7 GHz, the polarization isolation is greater than 35 dB, the maximal gain of the sum beam is about 37.9 dBi, the sidelobe level is below -15 dB, and the null depth of the differential beam is better than -25 dB. The antenna shows good dual-polarized monopulse performance at W-band.

Key words: millimeter wave, monopulse, dual-polarized, Cassegrain antenna

PACS: 84.40.Ba

引言

雷达通过接收目标反射的电磁波信号对目标进行探测识别. 由于多数目标对不同极化的电磁波具有不同的散射特征, 因此若能同时接收目标反射的主极化和正交极化电磁波, 则可以更充分地对目标进行探测. 例如, 对金属栅条状目标, 极化方向与金属栅条垂直的电磁波将会很好的透射, 反射的主极化信号很小而难以探测, 而此时极化方向与金属栅条平行的正交极化电磁波则大部分将被金属栅条反射, 因此雷达接收到的正交极化信号会很强, 从而提高了雷达对目标的探测能力[1].

与微波相比, 毫米波的频率更高、频带更宽, 具有更高的角分辨率和距离分辨率, 在雷达系统中得到越来越广泛的应用. 国内外对 W 波段雷达天线进行了许多研究, 如偏馈反射面天线[2-3]、多波束天线[4]、单脉冲天线[5-6]等. 对 W 波段的多极化天线, 文献[7]采用介质集成波导实现了双圆极化, 文献

收稿日期: 2018-04-01, **修回日期:** 2018-09-05 **Received date:** 2018-04-01, **revised date:** 2018-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(61671146, 61101020)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61671146, 61101020)

作者简介(Biography): 孟洪福(1981-), 男, 四川遂宁人, 副教授, 博士, 主要研究领域为毫米波亚毫米波理论与技术、天线理论与技术. E-mail: menghongfu@163.com

* **通讯作者(Corresponding author):** E-mail: menghongfu@163.com

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[8-9] 通过四个馈源移相方式实现了双圆极化单脉冲性能.

设计了一个工作在 W 波段的双线极化单脉冲卡塞格伦天线,天线主要包括主反射面、副反射面、馈源喇叭、正交模耦合器及和差器. 馈源采用紧凑的平面型和差器和渐变波导匹配的正交模耦合器集成设计,减小了连接损耗,压缩了天线结构尺寸,有利于毫米波双极化单脉冲雷达系统的小型化.

1　天线设计

当雷达工作频率提高到 W 波段,微带天线、波导缝隙阵列等单脉冲天线形式受介质损耗、加工精度等因素影响,难以保证性能. 卡塞格伦反射面天线具有结构简单、机械加工性能优越、电性能指标良好等优点,在毫米波单脉冲天馈系统中得到了较多的研究应用.

卡塞格伦单脉冲天线包括主反射面、副反射面、馈源喇叭及和差器等. 为了实现卡塞格伦天线的双极化性能,需要在天线的馈源结构中设计正交模耦合器,实现两个正交极化的电磁波信号的收发. 因此,所设计的双极化单脉冲天线包括主反射面、副反射面、馈源喇叭、和差器和正交模耦合器,如图 1 所示. 天线主反射面和副反射面按照卡塞格伦空间位置关系布置,五喇叭馈源位于主反射面中心底部,穿过底部与和差器和正交模耦合器连接. 天线的双极化性能是由正交模耦合器激励馈源喇叭的中间喇叭实现,因此正交模耦合器占用馈源的中心区域,主极化波导口从馈源下方输出,正交极化波导口从馈源侧面输出; 天线的俯仰差波束是由馈源喇叭的上下两个喇叭通过 3 dB 耦合器做差形成,而方位差波束是由左右两个喇叭做差形成,因此和差器中的两个 3 dB 耦合器分别占用馈源前后区域和左右区域,俯仰差和方位差波导口从馈源两个侧面输出,不干涉中心区域的正交模耦合器结构,充分利用了馈源内部结构空间,压缩了馈源结构尺寸,实现了馈源集成设计. 在结构加工设计时,将和差器中的两个 3 dB 耦合器及输出波导设计于同一水平层,而将正交模耦合器的正交极化通道设计于上一个水平层,将馈源分为三层加工,并通过定位和装配,实现馈源的集成制作.

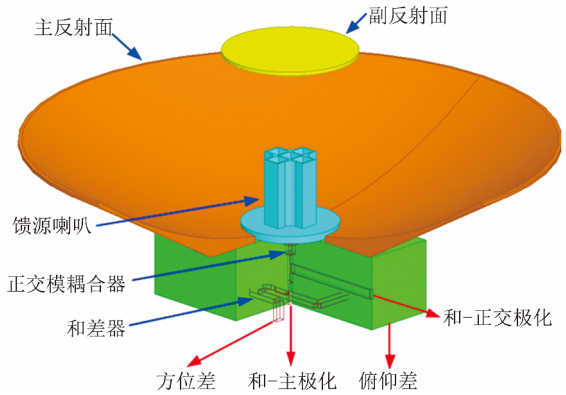


图 1　双极化单脉冲天线结构示意图

Fig. 1　Schematic structure of the dual-polarized monopulse antenna

1.1　卡塞格伦反射面

如图 2 所示,标准卡塞格伦天线主要由主反射面、副反射面和馈源三部分组成. 其中,主反射面是一个旋转抛物面; 副反射面是一个旋转双曲面,通过支撑杆与主反射面固定连接; 馈源可以采用多种型式的喇叭. 双曲面实焦点 F 与抛物面的焦点重合,凸面朝向抛物面和馈源喇叭,馈源喇叭的相位中心被置于凸面所对的双曲面虚焦点 F'. D_p 是抛物面的直径,f_p 是抛物面的焦距,Ψ_0 是抛物面的半张角,D_h 是双曲面的直径,f_h 是双曲面的焦距,φ_0 是馈源对副面的半照射角,L_v 是双曲面的顶点与邻近的焦点的距离.

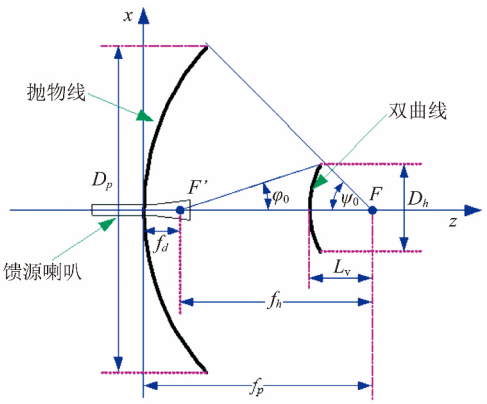


图 2　卡塞格伦天线的几何参数

Fig. 2　Geometry parameters of the Cassegrain Antenna

卡塞格伦天线的七个参数中,需要确定四个独立的参数. 首先需要确定主面的焦径比 f_p/D_p. 较小的焦径比其优点在于遮挡比小,馈源伸前量小等; 而较大的焦径比可提高馈源偏焦工作时的性能,抛物面深度小,交叉极化小等. 然后,确定卡塞格伦天线的放大率 M. 当 M 取得大时,口径场分布更为均匀,口径效率和副面透明率也有所提高; M 取得小时,双曲面弯曲小,交叉极化分量也较小. 最后,确定副面直径 D_h. 对于给定的主面直径 D_p 和馈源方向图,

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

若保持副面边缘照射电平不变，则 D_h 越小，副瓣电平就越低，但 D_h 太小，天线的绕射效率又太大；D_h 太大，副面的透明效率又太小，遮挡效应增大. 所以，存在最佳遮挡比的 D_h/D_p，使得天线的效率达到最大. 设计过程中，副面边缘照射电平一般取 -10 ~ -15 dB，以控制天线的漏溢.

天线口径为 137 mm，焦距 50 mm，期望副瓣电平 -15 dB. 根据以上原则，设计得到天线主反射面母线方程为：

$$x^2 = 4 \times 50 \times z \quad , \quad (1)$$

副反射面母线方程为：

$$\frac{z^2}{10.4^2} - \frac{x^2}{17.1^2} = 1 \quad . \quad (2)$$

1.2 馈源喇叭及和差器

卡塞格伦单脉冲天线的馈源有四喇叭、五喇叭、多模喇叭等多种形式. 为了实现双极化收发，并使正交极化性能与主极化性能尽可能一致，馈源喇叭需要具有水平和垂直对称性，因此宜采用方形或圆形口径. 四喇叭馈源需要对每个通道接收的信号进行极化分离，结构复杂，而多模喇叭需要同时控制喇叭内的和差模式和极化性能，设计困难. 因此，采用中心为方形口径的五喇叭馈源，其结构简单，且双极化性能一致性好.

五喇叭馈源中，中心方形喇叭为双极化收发共用，发射时它向空间辐射能量，接收时同时接收主极化和正交极化电磁波，形成和波束. 左右两个喇叭接收主极化电磁波，通过和差器形成方位面差波束；上下两个喇叭接收主极化电磁波，通过和差器形成俯仰面差波束.

传统 W 波段和差器多采用魔 T 结构实现. 由于魔 T 的四个波导出口分别位于四个方向，和差器结构尺寸大. 采用文献[10]中的改进型平面 3 dB 耦合器，结合传输波导 90 度移相结构，可以实现性能优越、结构简单的平面型和差器. 该平面型和差器的两个 3 dB 耦合电桥分别位于馈源的左侧和下方，不占用馈源中心位置，为中心喇叭连接的正交模耦合器布置预留了空间，结构尺寸紧凑.

五喇叭馈源及和差器示意如图 3 所示.

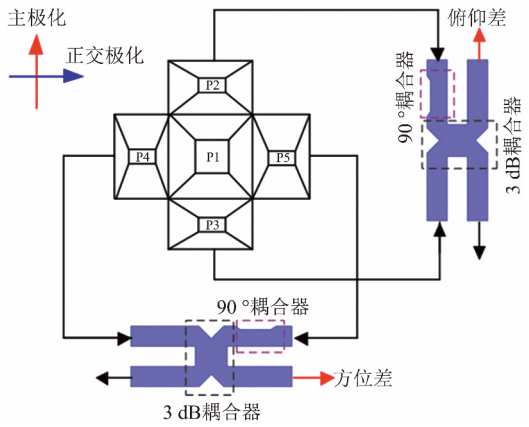


图 3 五喇叭馈源及和差器示意图

Fig. 3 Schematic diagram of five-horn feed and sum-differential network

1.3 正交模耦合器

如图 3 所示，中心方形喇叭 P1 接收到的主极化和正交极化电磁波需要通过正交模耦合器分离[11，12]. 为了实现馈源的集成设计，需要一种结构简单的正交模耦合器. 所设计的 W 波段正交模耦合器如图 4(a) 所示. 正交模耦合器的公共端口 1 为方形口径，与公共端口直接相对的端口为主极化端口 2，通过波导宽边渐变实现主极化模式的匹配. 与公共端口垂直的端口为正交极化端口 3，在距离正交极化端口约 $3\lambda_g/4$ 的位置，设置不连续台阶，通过采用波导宽度和高度渐变优化设计的方法，使正交极化信号在主极化波导中被反射，在正交极化端口位置形成最大场，激励电磁波向正交极化端口传输，实现极化分离. 设计中需要对匹配台阶和渐变波导段迭代优化，以满足驻波和极化隔离性能要求. 对正交模耦合器公共端口输入的主极化和正交极化电磁场进行仿真，得到如图 4(b) 和(c) 所示的电场分布.

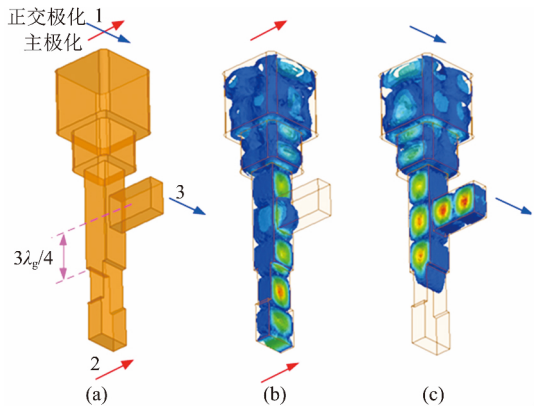


图 4 正交模耦合器模型及仿真电场分布，(a) 模型，(b) 主极化，(c) 正交极化

Fig. 4 Model and simulated electrical field distribution of the orthomode transducer, (a) model, (b) co-polarization, and (c) orthogonal polarization

2 测试结果及分析

2.1 正交模耦合器

正交模耦合器是天线实现双极化的关键部件，

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对其进行了单独研制和测试. 对图 4 的正交模耦合器模型,设计输入输出均为 WR10 矩形波导口,UG387 法兰. 采用矢量网络分析仪,对正交模耦合器进行了测试,结果如图 5 所示. 正交模耦合器在 91.2 ~ 95.7 GHz 的频带范围内,主极化插入损耗均小于 0.5 dB,正交极化插入损耗均小于 0.7 dB,回波损耗均优于 15 dB,极化隔离约 35 dB. 表明正交模耦合器性能良好,满足双极化天线要求.

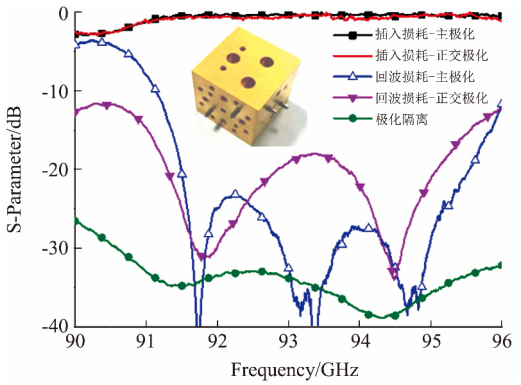


图 5　正交模耦合器的测试结果
Fig. 5　Measured S-parameter of the orthomode transducer

2.2　天线

对所设计的 W 波段双极化单脉冲天线进行了实物研制,天线及集成馈源实物分别如图 6(a) 和(b) 所示. 天线主反射面和副反射面分开加工,通过支撑杆连接. 馈源喇叭、和差器和正交模耦合器通过分层加工、定位装配实现集成,再与天线主反射面连接安装. 天线口径 137 mm,总高度 70 mm,重量约 400 克.

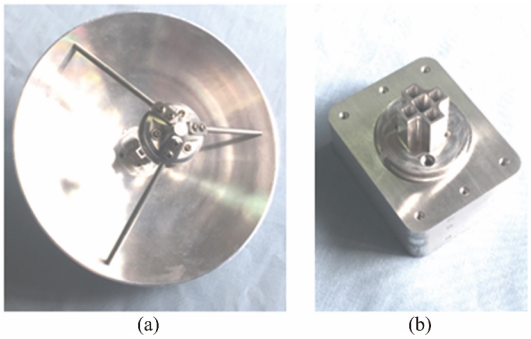


图 6　W 波段双极化单脉冲天线,(a) 天线,(b) 集成馈源
Fig. 6　Prototype of the W band dual-polarization monopulse antenna, (a) antenna and (b) integrated feed

对研制的 W 波段双极化单脉冲天馈的主极化端口驻波、正交极化端口驻波以及主极化端口与正交极化端口之间的极化隔离进行了测试,结果如图 7. 天线在 91.2 ~ 94.9 GHz 的频带范围内,主极化和正交极化端口回波损耗均优于 15 dB,主极化端口与正交极化端口极化隔离度优于 35 dB.

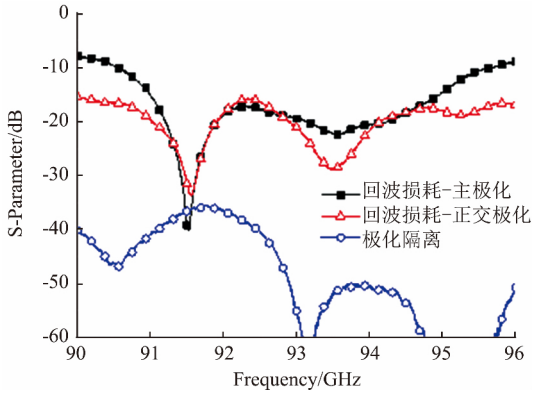


图 7　双极化单脉冲天线端口驻波及极化隔离测试结果
Fig. 7　Measured S-parameters of the dual-polarization monopulse antenna

在毫米波频段暗室中,对天线和差波束方向图进行了测试,中心频点 93GHz 的结果如图 8 和图 9 所示. 图 8 中,天线的主极化和正交极化的和波束方向图在俯仰面和方位面均吻合较好,在工作频带内主极化和波束增益达到 37.9 dBi,波束宽度约 1.5 度,俯仰面和方位面副瓣电平均优于 - 15 dB,正交极化和波束增益约 37.6 dBi,波束宽度和副瓣电平与主极化相当. 扣除正交模耦合器的插入损耗等,天线口径效率达到 40%. 在图 9 中,主极化的俯仰面和方位面差波束零深均优于 - 25 dB,差波束不平衡度小于 1 dB,和差矛盾约 4 dB,具有较好的单脉冲和差性能.

3　结论

在传统单一线极化卡塞格伦单脉冲天线的基础上,通过将紧凑的平面型和差器和渐变波导匹配的正交模耦合器集成设计,实现了一种工作于 W 波段的双极化卡塞格伦单脉冲天线. 天线和差波束性能良好,极化隔离度高,结构尺寸紧凑. 双极化单脉冲天线可以同时接收目标反射的主极化和正交极化电磁波,获取更多的目标信息,有利于提高对目标的探测识别精度.

References

[1] LI Zhang-Feng, HU Bing, ZHAO Guo-Qiang, *et al*. A W-

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

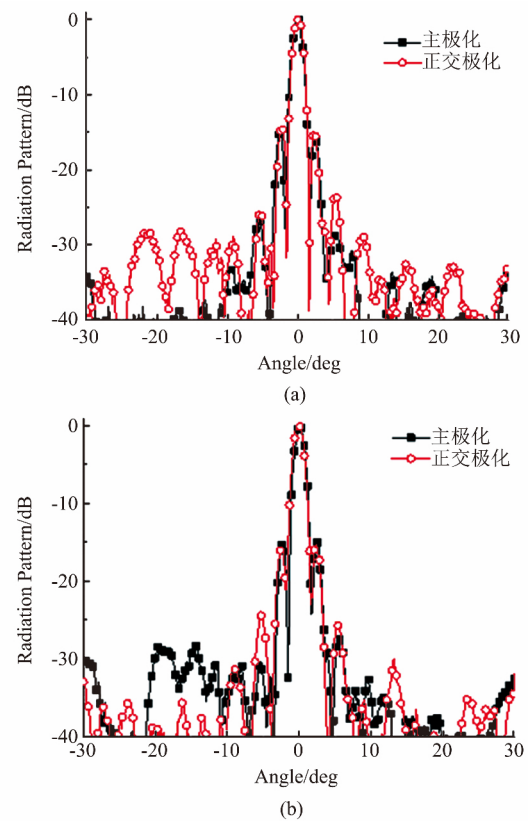


图8 双极化单脉冲天线主极化和正交极化和波束方向图测试结果,(a) 俯仰面,(b) 方位面

Fig. 8 Measured sum radiation patterns of the dual-polarization monopulse antenna, (a) EL, (b) AZ

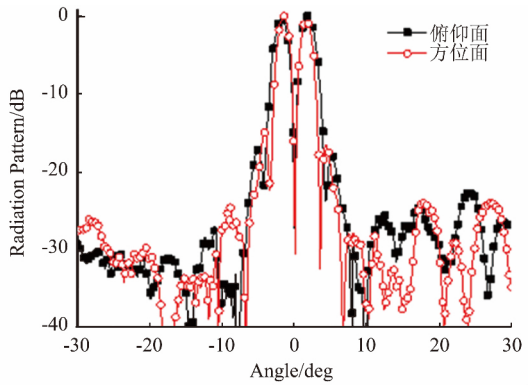


图9 双极化单脉冲天线主极化差波束方向图测试结果

Fig. 9 Measured co-polarization difference radiation patterns of the dual-polarization monopulse antenna

band digital variable polarimetric radar for target characteristic measurement [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (李璋峰,胡冰,赵国强,等,W波段数字变极化目标特性测量雷达. 红外与毫米波学报), 2017, **36**(1):35-41.

[2] CHEN Xin, QU Jin, PAN Wen-Wu, *et al*. The shaped millimeter-wave antenna with offset feed and dual-reflector [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (陈鑫,屈劲,潘文武,等. 毫米波赋形偏馈反射面天线技术. 红外与毫米波学报), 2012,**31**(1):42-46.

[3] PENG Shu-Sheng, WU Li, LI Xiang-Qin. Design of 300mm W-band radiometer offset-feed reflector antenna [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (彭树生,吴礼,李向芹. 300 mm口径W波段辐射计偏馈反射面天线设计. 红外与毫米波学报), 2013, **32**(6):545-549.

[4] CHEN Qi-Ke, LI Liang-Chao, FAN Yong, *et al*. Design of W-band 16 elements full sampling focal plane linear array [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (陈其科,李良超,樊勇,等. W波段16元完全采样焦平面线性阵列天线设计. 红外与毫米波学报), 2013, **32**(1):23-27.

[5] CHENG Yu-Jian, HONG Wei, WU Ke, 94 GHz substrate integrated monopulse antenna array [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2012, **60**(1):121-129.

[6] ZHENG Pei, ZHAO Guo-Qiang, JIN Cheng, *et al*. W-band high aperture efficiency monopulse Cassegrain antenna based on aperture field approach [J]. *J. . Infrared Millim. Waves*, (郑沛,赵国强,金城,等. 基于口面场方法的W波段高口面效率单脉冲卡塞格伦天线. 红外与毫米波学报), 2015, **34**(6): 700-704.

[7] CHENG Yu-Jian, WANG Jun, LIU Xiao-Liang. 94GHz substrate integrated waveguide dual-circular-polarization shared-aperture parallel-plate long-slot array antenna with low sidelobe level [J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2017, **65**(11), 5855-5861.

[8] ZHENG Pei, ZHAO Guo-Qiang, XU Shen-Heng, *et al*. Design of a W-band full-polarization monopulse Cassegrain antenna [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, **16**: 99-103.

[9] ZHENG Pei, HU Bing, XU Shen-Heng, *et al*. A W-band high-aperture efficiency multipolarized monopulse Cassegrain antenna fed by phase microstrip patch quad [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, **16**: 1609-1613.

[10] WANG Yan-Xun, Researches on antenna and beam transformation by using quasi-optical technique [D], Nanjing: Southeast University Dissertation, (王彦勋,准光技术在天馈及波束变换中的应用研究,南京: 东南大学博士学位论文), 2015.

[11] YAO Chang-Fei, ZHOU Ming, Luo Yun-Sheng, *et al*. Development of a W band orthomode transducer [J]. *Journal of Microwaves*, (姚常飞,周明,罗运生,等. W波段宽带正交模转换器研制. 微波学报), 2012, **28**(5):76-80.

[12] Pisano Giampaolo, Pietranera Luca, Isaak Kate, *et al*. A broadband WR10 turnstile junction orthomode transducer [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2007, **17**(4), 286-288.

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net