

文章编号: 1671-7449(2022)03-0260-05

一种星载 Ka 频段圆极化振子天线阵列设计

常俊德, 邢斯瑞, 易进

(长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130000)

摘要: 针对 Ka 频段卫星通信系统的需求, 设计了一种应用于卫星通信的星载 Ka 频段圆极化振子天线阵列。天线单元采用非对称双臂振子单元形式, 十字交叉振子采用自相移结构来实现圆极化。天线阵列采用三角形排布的方式, 通过调整布阵时天线单元旋转相位, 来实现阵列的右旋圆极化。仿真结果表明: 天线阵列驻波比除阵面四周由于边缘效应引起的驻波比偏大外, 其余都小于 1.5; 天线阵列的轴比小于 2.3 dB; 扫描 60° 时, 天线增益下降小于 5 dB, 表明天线阵列具有较高辐射功率。该天线阵列可作为相控阵天线的馈源, 在卫星通信系统具有良好的应用前景。

关键词: Ka 频段; 天线阵列; 圆极化; 卫星通信

中图分类号: TN821⁺.4 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1671-7449.2022.03.013

Design of a Spaceborne Ka Band Circularly Polarized Dipole Antenna Array

CHANG Junde, XING Sirui, YI Jin

(Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130000, China)

Abstract: In order to meet the needs of Ka band satellite communication system, a Ka band circularly polarized dipole antenna array for satellite communication is designed. The antenna element is in the form of asymmetric double arm dipole element, and the cross oscillator uses a self-phase shift structure to achieve circular polarization. The right-hand circular polarization of the array is realized by adjusting the rotation phase of the antenna elements. The simulation results show that the VSWR of the array is less than 1.5 except for the larger VSWR caused by the edge effect around the array. The axial ratio of the antenna array is less than 2.3 dB. When scanning at 60°, the antenna gain decreases by less than 5 dB, indicating that the antenna array has a higher radiation power. As the feed source of the phased array antenna, the antenna array has a good application prospect in satellite communication systems.

Key words: Ka band; antenna array; circular polarization; satellite communication

0 引言

现代化的科技进步使得无线通信无处不在, 天线的应用范围越来越广, 在无线通信领域几乎都能看到天线的身影。天线的发展过程也是由单个天线的使用到很多天线组成阵列来增强天线的性能^[1-2]。阵列天线的应用很广, 目前不仅应用于单一的增强

性能, 还主要应用于电子扫描、合成孔径雷达、相控阵天线等等。此外, 天线的频段使用范围也已经由低频段在向高频段发展, 目前, 星载阵列天线的频段已由 X 频段逐渐向 Ka 频段改变^[3-5]。

常用星载毫米波天线主要有微带天线、振子天线及波导天线 3 种形式。微带天线具有宽带、轻质、易于加工和成本低等优势, 但是微带天线阵面的防

收稿日期: 2021-07-13

作者简介: 常俊德(1990—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事卫星通信系统研究。E-mail: 1210339322@qq.com.

护设计比较复杂,而且对电性能影响较大^[6];波导天线具有电性能高效、结构强度高,低频段加工工艺成熟,单元互耦较小等优点,但在 Ka 频段,其加工难度大,内部的圆极化形成结构相对精细,不利于将天线进行单独加工^[7];振子天线具有高效、加载聚酰亚胺介质材料后的耐空间环境适应性强、可以单独加工、采用旋转馈电后容易实现良好的轴比特性^[8-9]。鉴于以上 3 种天线单元的优缺点,本设计选择耐辐照加载聚酰亚胺材料的振子天线作为天线阵列的基本辐射单元。

针对目前卫星通信系统高频段、宽带宽、宽波束的需求^[10-11],本文设计了一种星载 Ka 频段圆极化振子天线发射阵列。天线单元采用非对称双臂振子单元形式,选择耐辐照加载聚酰亚胺材料,十字交叉振子采用自相移结构来实现圆极化。天线阵列采用三角形排布的方式,通过调整布阵时天线单元旋转相位来实现阵列的右旋圆极化。设计的振子阵列天线可实现较好的圆极化、宽波束,适合组阵,并且性能可靠、结构简单。

1 天线单元设计与仿真

天线单元采用非对称双臂振子单元形式,选择耐辐照加载聚酰亚胺材料,接口为 SMP 接口形式,天线极化形式为右旋圆极化,天线单元尺寸为 $6.7\text{ mm} \times 6.7\text{ mm} \times 6.5\text{ mm}$,天线单元结构如图 1 所示。

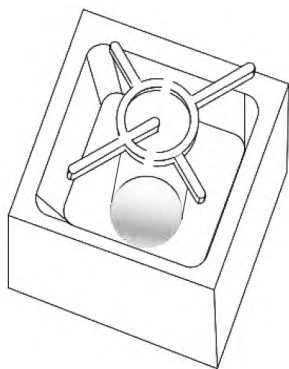


图 1 天线单元三维结构图

Fig. 1 Three dimensional structure of antenna unit

十字交叉振子通过两个在空间上相互正交的幅度相等、相位相差 90° 的电流形成圆极化辐射。实现相位相差 90° 可以通过双馈电结构实现,也可以通过单馈电自相移结构实现。双馈电方式需要 90° 移相器或者馈电巴伦来实现圆极化,如采用此种方式组阵,会增加馈电结构复杂度。因此,本案采用单馈电自相移方式实现十字交叉振子的

圆极化。辐射振子本身取不同电长度时,其上电流会表现出不同相位。当对称振子电长度接近半个波长时,其输入阻抗近似纯电阻,加激励电压时,馈电处电流的初始相位可认为是 0° ;若振子长度小于半个波长时,其输入阻抗呈容性,馈电处电流相位相对于 0° 表现出超前性;若振子电长度大于半个波长时,其输入阻抗会呈现感性,其馈电处电流相位相对于 0° 表现出滞后性。

如图 2 所示,正交放置的振子同时馈电时,适当调节两对振子的长度,可使其上电流相位差正好满足 90° ,两对振子相对于馈电点的摆放位置不同,可产生左旋或者右旋圆极化辐射。设计中,将两振子谐振频率调节到发射频段附近,并将长臂和短臂位置互换,则辐射右旋圆极化波。

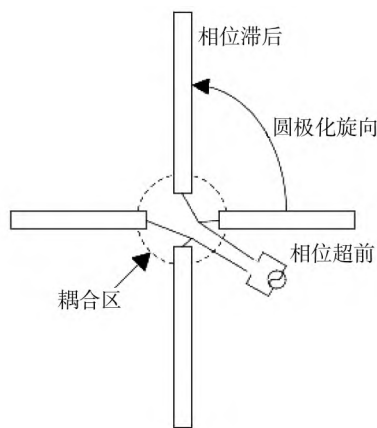


图 2 十字交叉振子产生圆极化馈电方式

Fig. 2 Circular polarization mode of crossed oscillator

利用 HFSS 仿真软件对天线单元进行性能仿真,仿真结果如图 3~图 5 所示,在工作频段 $19.2\text{ GHz} \sim 21.2\text{ GHz}$ 内,驻波比小于 1.21,增益大于 6 dB,带内轴比最低为 0.187 dB,在 41.5% 的频率带宽内,右圆极化的轴比均在 2 dB 以下,表征了天线单元具有很好的极化效率和极化纯度。

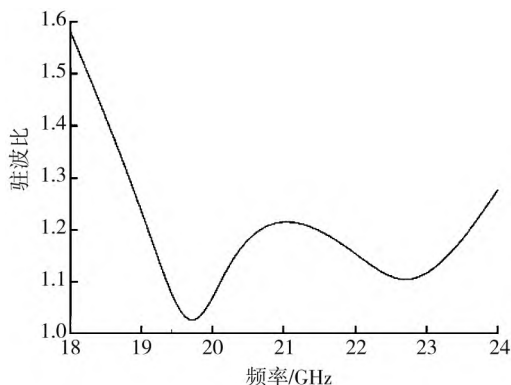


图 3 天线单元驻波比曲线

Fig. 3 VSWR curve of antenna element

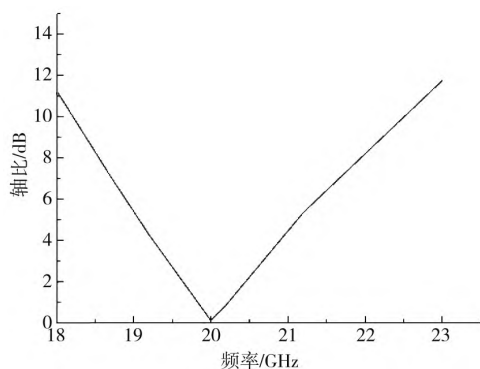


图4 天线单元轴比曲线

Fig. 4 Axial ratio curve of antenna element

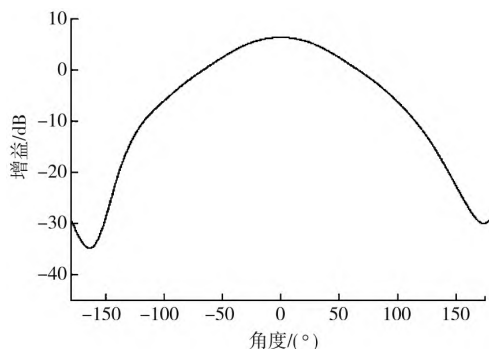


图5 天线单元方向图

Fig. 5 Antenna element pattern

天线单元实物加工出来后,对天线单元的方向图进行实测,结果如图6所示。

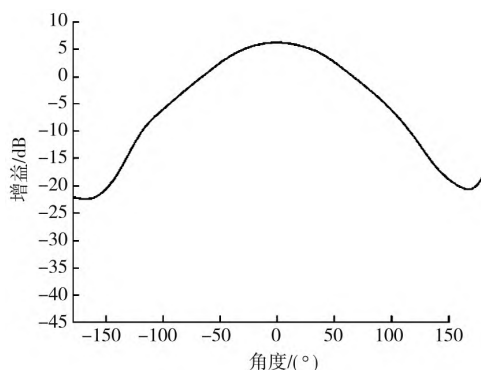


图6 天线单元实测方向图

Fig. 6 Measured pattern of antenna unit

通过图5和图6的仿真方向图和天线实测方向图可以看出,天线单元实现效果较好,天线单元实测增益和仿真结果相近,并且,天线单元在波束边缘具有更好的增益效果。

2 天线阵列设计与仿真

2.1 天线阵列设计

天线阵列设计采用三角形排布的方式,如图7所示,在不出现栅瓣的情况下,尽可能地将

单元的间距拉大,以实现较大的阵面增益,天线阵面设计实现宽角(60°)扫描范围。其不出现栅瓣时的阵元间距可以用下式估算选取^[12]

$$d_x = \frac{2\lambda}{\sqrt{3}(1 + |\sin\theta|)},$$

$$d_y = \frac{2\lambda}{1 + |\sin\theta|},$$

式中: λ 是最高工作频率所对应的自由空间波长; θ 为最大扫描角度。

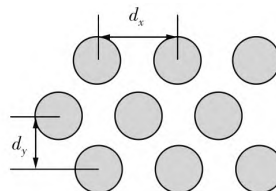


图7 阵面排布示意图

Fig. 7 Schematic diagram of array arrangement

本文设计采用旋转馈电方式组成16单元发射天线阵列,阵列结构如图8所示,实物图如图9所示。经计算得到阵列单元间距 $d_x = 8.8$ mm, $d_y = 15.2$ mm。天线阵列选择多元法实现圆极化,具体采用4个天线单元为一组,作为阵列基础单元来实现宽角扫描圆极化阵列。对于发射右旋天线,每个单元的右旋极化相位(以左下角单元相位为基准)为 $90^\circ, 0^\circ, 270^\circ, 180^\circ$ 。

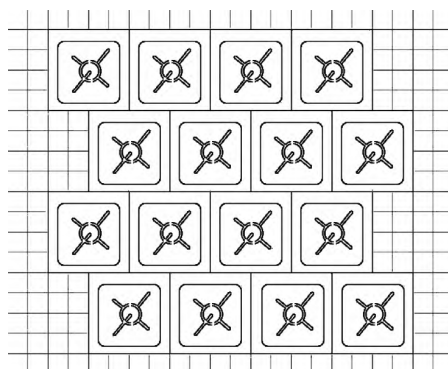


图8 天线阵列结构图

Fig. 8 Structure diagram of antenna array



图9 天线阵列实物图

Fig. 9 Physical drawing of antenna array

2.2 天线阵列仿真

通过 HFSS 仿真软件对16单元发射天线阵列进行性能仿真,仿真结果如图10~图15所示。

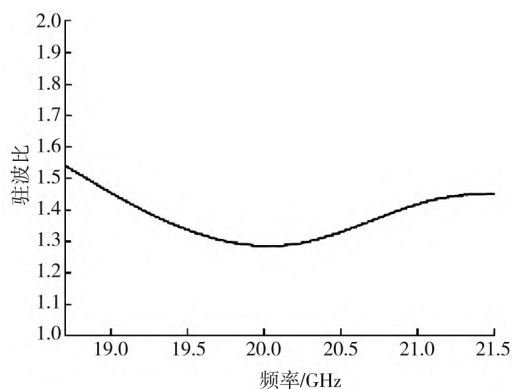


图 10 阵列法向驻波比曲线

Fig. 10 Schematic diagram of array arrangement

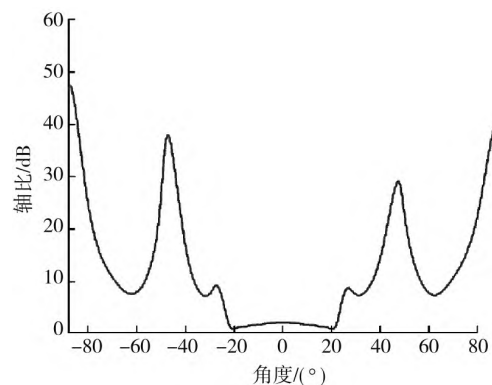


图 11 阵列法向轴比曲线

Fig. 11 Array normal axis ratio curve

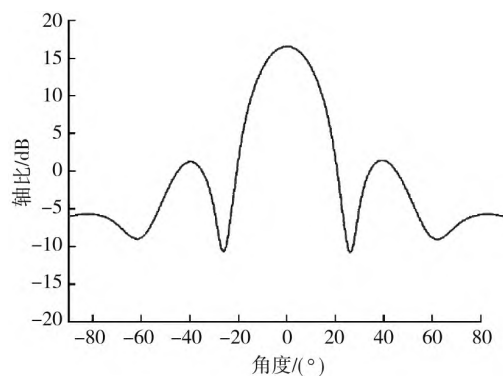


图 12 阵列法相方向图

Fig. 12 Array method to get along with the pattern

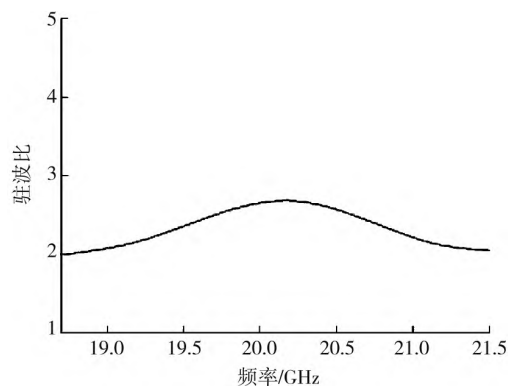


图 13 阵列扫描 60°驻波比曲线

Fig. 13 Array scanning 60 degree standing wave ratio curve

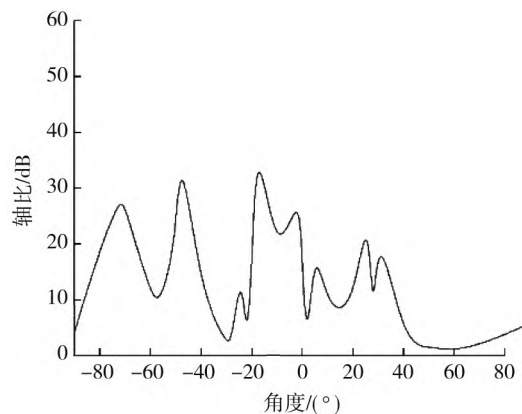


图 14 阵列扫描 60°轴比曲线

Fig. 14 Array scanning 60 degree axis ratio curve

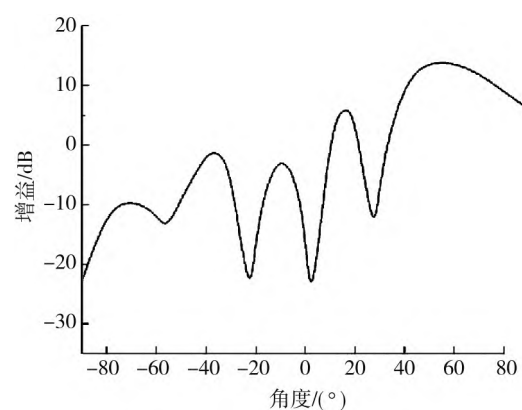


图 15 阵列扫描 60°方向图

Fig. 15 Array scanning at 60 degrees pattern

通过仿真结果可知,阵列驻波比除了阵面四周由于边缘效应引起的驻波比偏大外,其余都小于 1.5。在整个扫描空域内,天线阵列的轴比小于 2.3 dB,表明天线具有很好的圆极化特性。通过方向图仿真结果可以看出,扫描 60°时,天线增益下降小于 5dB,表明天线阵列具有较高的辐射功率。

天线阵列实物加工出来后,对天线阵列的方向图进行实测,结果如图 16、图 17 所示。

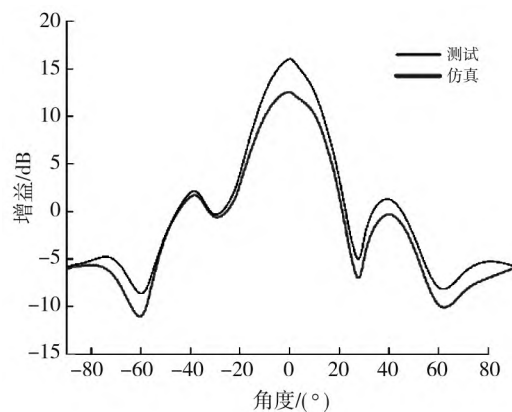


图 16 阵列法向实测方向图

Fig. 16 Array normal measured pattern

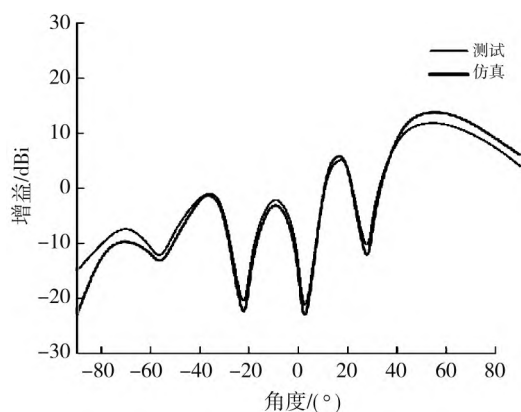


图 17 阵列扫描 60° 实测方向图

Fig. 17 Array scanning 60 degree measured pattern

通过图 16 和图 17 的天线实测和仿真方向图可以看出, 天线方向图中天线的增益实测和仿真值相比, 波束范围内误差在 4 dB 内, 波束边缘误差在 7 dB 内. 结果表明, 天线阵列的实现效果较好, 天线阵列实测增益和仿真结果相近, 并且天线阵列在波束边缘具有更好的增益效果.

3 结 论

本文针对 Ka 频段卫星通信系统的需求, 设计了一种星载 Ka 频段圆极化振子天线发射阵列, 天线阵列极化方式为右旋圆极化. 除了阵面四周由于边缘效应引起的天线阵列驻波比偏大外, 其余都小于 1.5. 天线阵列具有良好的圆极化特性和较高的辐射功率. 该振子阵列天线可实现较好的圆极化、宽波束, 适合组阵, 并且性能可靠、结构简单, 在卫星通信系统具有良好的应用前景.

参考文献:

- [1] 黄迎春, 张涛, 张福顺. 高增益宽带圆极化微带天线阵研究[J]. 现代电子技术, 2009, 32(7): 22-24.
HUANG Yingchun, ZHANG Tao, ZHANG Fushun. Research on high-gain broadband circularly polarized microstrip antenna array[J]. Modern Electronic Technology, 2009, 32(7): 22-24. (in Chinese)
- [2] 梁云杰. 现代无线通信技术的现状分析及其发展展望[J]. 信息通信, 2017(1): 263-264.
LIANG Yunjie. Current situation analysis and development prospect of modern wireless communication technology[J]. Information Communications, 2017(1): 263-264. (in Chinese)
- [3] WONG H, LAU K L, LUK K M. Design of dual-polarized L-probe patch antenna arrays with high isolation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(1): 45-52.
- [4] ZHI R, HAN M, BAI J, et al. Miniature multiband antenna for WEAN and X-band satellite communication application[J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2018, 75: 13-18.
- [5] 王煜. 美军受保护卫星通信现状及未来发展研究[J]. 无线通信技术, 2018, 44(3): 236-241.
WANG Yu. Research on the status quo and future development of protected satellite communications in the U. S. army[J]. Wireless Communication Technology, 2018, 44(3): 236-241. (in Chinese)
- [6] 赵丽娟, 邵晓亮, 邹永庆. 一种新型宽带圆极化微带天线的设计[J]. 现代电子技术, 2009, 32(24): 91-92.
ZHAO Lijuan, SHAO Xiaoliang, ZOU Yongqing. Design of a novel broadband circularly polarized microstrip antenna[J]. Modern Electronic Technology, 2009, 32(24): 91-92. (in Chinese)
- [7] CHEN H D, SIM C Y D, KUO S H. Compact broadband dual coupling-feed circularly polarized RFID microstrip tag antenna mountable on metallic surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(12): 5571-5577.
- [8] BIAN L, GUO Y X, ONG L C, et al. Wideband circularly polarized patch Antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(9): 2682-2686.
- [9] HU Y, HAO Y, H K, et al. Radar Cross section reduction of a microstrip antenna based on polarization conversion metamaterial[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 80-83.
- [10] 王丽君. 高通量卫星通信系统设计因素分析[J]. 卫星应用, 2015(5): 38-39.
WANG Lijun. Analysis of design factors of high throughput satellite communication system[J]. Satellite Applications, 2015(5): 38-39. (in Chinese)
- [11] DENG H, PENG F, YUAN J, et al. High Throughput satellite system capacity analysis and application forecast[J]. Aerospace China, 2016, 17(4): 30-40.
- [12] 吕栋雷, 曹志耀, 王玮. 一种计算相控阵天线阵元间距的方法[J]. 军事运筹与系统工程, 2007, 21(2): 1672-8211.
LV Donglei, CAO Zhiyao, WANG Wei. A method of calculating element spacing of phased array antenna[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2007, 21(2): 1672-8211. (in Chinese)