

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2022.06.007

面向低轨卫星的双圆极化宽带宽角扫描阵列研究

周祺磊¹, 夏良新¹, 傅光¹, 刘能武¹, 房亮²

(1. 西安电子科技大学 天线与微波技术重点实验室, 西安 710071;

2. 航空工业济南特种结构研究所, 济南 250023)

摘要:随着卫星通信技术的日益成熟,相控阵天线被广泛应用于低轨卫星系统,提出了一种面向低轨卫星通信的新型双圆极化宽带宽角扫描阵列天线。阵列天线单元采用一种金属栅格加载的对称阵子,其工作宽带为17 GHz~21 GHz,相对带宽超过21%,同时金属栅格加载方法可有效展宽对称阵子波束宽度,从而在工作频段内使E面和H面波束宽度均超过140°。通过上述宽带宽波束对称阵子作为阵列天线单元,形成8×8的64单元阵面。然后,阵列天线单元经过旋转组阵,实现了双圆极化特性。由于天线单元具有宽带、宽波束性能,有效拓展了阵列波束扫描角度,即在不同旋向下,均能实现二维±60°的波束扫描。阵列在低频17 GHz工作时,法向波束增益为18.2 dB,当扫描离轴角为60°时,增益下降2.8 dB,轴比小于2 dB。在高频21 GHz时,法向增益为19.6 dB,当扫描离轴角为60°时,增益下降3.7 dB,轴比小于3 dB,具备良好的宽带宽角覆盖性能,从而在低轨卫星通信中具有广阔的应用前景。

关键词:双圆极化;宽波束;宽频带;宽角扫描

中图分类号:V443

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2022)06-0048-07

Research on dual circularly-polarized wideband wide-beam scanning array for low-orbit satellites

ZHOU Qilei¹, XIA Liangxin¹, FU Guang¹, LIU Nengwu¹, FANG Liang²

(1. Key Laboratory of Antenna and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. AVIC Research Institute for Special Structure of Aeronautical Composite, Jinan 250023, China)

Abstract: With the increasing maturity of satellite communication, the phased array antennas are widely used in low-earth satellite systems. This paper has proposed a new dual circularly-polarized (CP) wideband and wide-beam scanning array for low-orbit satellite communication. Initially, the array element adopts a metal grid-loaded dipole antenna, thus increasing its working bandwidth of about 17 GHz ~ 21 GHz (21%). Meanwhile, the grid-loaded metal contributes to widen the half-power beamwidths (HPBW) of the element, which simultaneously increases the E- and H-plane HPBW to above 140°. Next, the grid-loaded dipoles are employed to form up the 8×8 array. After that, the array element is rotated to realize the double CP performance. Owing to the wideband and wide-HPBW of the CP element, the beam scanning angle of the array is effectively expanded to above ±60° in two-dimensional. Finally, as the array is working in the lower band of 17 GHz, the broadside gain reaches to about 18.2 dB. When the scanning angle is about 60°, the gain reduction is only about 2.8 dB and the axial ratio keeps of less than 2 dB. As the array is working in the higher frequency of 21 GHz, the broadside gain is maintained of about 19.6 dB. When the scanning angle is about 60°, the gain reduction is about 3.7 dB and the axial ratio keeps of less than 3 dB. As such, the designed array has the attractive wideband and wide-beam

收稿日期:2022-08-25; 修回日期:2022-10-11

基金项目:国家自然科学基金青年项目(编号:62271364)

引用格式:周祺磊,夏良新,傅光,等.面向低轨卫星的双圆极化宽带宽角扫描阵列研究[J].空间电子技术,2022,19(6):48-54. ZHOU Q L, XIA L X, FU G, et al. Research on dual circularly-polarized wideband wide-beam scanning array for low-orbit satellites[J]. Space Electronic Technology, 2022, 19(6): 48-54.

scanning performance, thus can be well applied in low-orbit satellite communications.

Key words: dual circularly-polarized; wide beam; wide band; wide beam scanning

0 引言

近年来,低轨卫星系统对宽带宽角扫描天线的需求不断提升,例如在无线通信系统中,基站天线需要广覆盖特性;在雷达系统中,宽带宽波束天线可对平台周围所有方位目标进行全面探测。然而,传统宽角扫描阵列天线的伺服电机扫描方式,导致系统响应速度无法满足各种应用场景下响应速度的需求,也无法同时实现对多个目标的通信与跟踪。

在此背景下,相控阵天线的设计概念应运而生。相控阵是一种通过改变阵列天线最大叠加方向,实现波束扫描的天线技术,具备快速扫描、高增益等优点,还可以通过射频后端轻松实现多个波束的同时接收与发射,从而与多个目标进行通信与探测。为实现宽角扫描覆盖,传统方法是通过缩小天线间距来避免栅瓣产生,然而其会造成单元间耦合增强,扫描时有源驻波升高,交叉极化恶化等问题,从而使相控阵天线在大角度扫描下受到了很大限制。此外,由于相控阵天线需要对每个单元的相位进行控制,复杂的组件会使得成本大幅上升。

目前能够有效提升相控阵宽角覆盖的技术主要采用通过宽波束单元组阵的形式,根据方向图乘积定理,宽波束单元可以有效提升大角度扫描下的增益下降。对宽角扫描相控阵的研究国外起步较早,自二十世纪60年代提出利用有耗网络改善相控阵扫描的阻抗匹配,从而拓宽一维扫描范围到 $\pm 60^\circ$ ^[1]。

当前,国内外主要采用3种形式展宽波束,首先随着算法的发展与进步,2017年通过算法寄生像素层单元结构,使得微带天线的波束宽度大幅度展宽^[2]。除此之外,垂直电流辐射和等效的磁流环,其极化与金属地板垂直可以有效的展宽天线的波束宽度,腔体的加载,金属圆环的加载,单极子的加载等^[3-11]。在此基础上,常规的八木天线通过引向器使得其具有定向高增益性能,若天线上增加一个起到反射作用的寄生,则天线的波束可以实现展宽^[12]。

采用宽波束天线作为单元能够很大程度上拓宽天线阵列的扫描角度,然而天线阵列的增益与单元增益密切相关,当采用宽波束天线作为阵元时,过低的单元增益使得整体阵面增益降低。除此之

外,采用多波束天线作为天线阵列单元,当阵列覆盖不同扫描角度时,可分别使用天线不同的波束来覆盖。四点馈电的圆环微带和多模式工作的微带天线形成多波束天线单元^[13-14]。

鉴于此,在一定覆盖角度范围内增大波束扫描范围则能够减少所需阵面数目,可以大幅降低整个低轨卫星系统的成本。文章提出了一种基于金属栅格加载的宽带宽波束天线技术。其核心思想是通过弯折阵子臂展宽天线E面半功率波束宽度,并通过加载金属栅格实现宽带与宽波束工作特性(17 GHz ~ 21 GHz)。此外,通过旋转布阵技术,给阵中单元不同初始相位,最终实现了天线阵的双圆极化辐射,波束覆盖角度保持在 $\pm 60^\circ$ 。上述阵列天线在低轨卫星通信系统中具备广阔的应用前景。

1 阵列单元设计

在卫星通信系统中,微带天线因其低剖面、易加工、精度高等特点而备受关注。然而,微带天线的属性导致其阻抗带宽限制。其次,传统微带天线的E、H面波束宽度仅为 $70^\circ \sim 80^\circ$,无法满足宽带宽扫描需求。相较于微带天线,对称阵子天线具备宽频带和宽波束辐射特性。因此,本文所设计的宽带宽角扫描天线阵采用了一种开槽线巴伦馈电的对称阵子单元,其中槽线巴伦是一种在同轴外皮上开缝隙的电结构,在阵子下方通过 $1/4$ 波长的短路到开路的转变方法实现双臂电流平衡。所设计的天线单元采用纯金属材料,阵子臂在末端向下弯折,从而产生垂直电流并实现波束宽度的有效拓展,整体结构如图1所示。

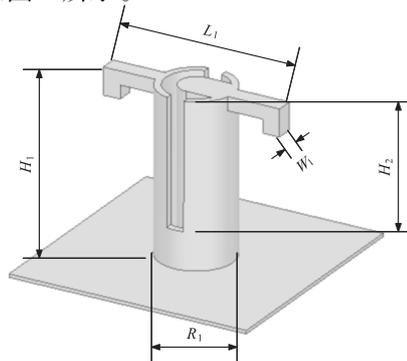


图1 基于开槽线巴伦馈电的对称阵子天线结构
Fig. 1 Symmetrical element antenna structure based on slotted wire Balun feeding

由图 1 可知,对称阵子天线采用开槽线巴伦馈电,阵子臂整体长度为 L_1 ,阵子高度为 H_1 ,槽线对应的同轴外径为 R_1 ,槽线深度为 H_2 ,阵子宽度为 W_1 ,详细参数如表 1 所列。

表 1 开槽线巴伦馈电的对称阵子天线参数表

Tab.1 Symmetrical element antenna parameter table for slotted wire Balun fed

变量名称	H_1	L_1	R_1	W_1	H_2
变量值/mm	4.8	5.2	1.8	0.5	3.7

根据上述结构,对天线单元进行建模、仿真与分析,其阻抗特性如图 2 所示。由图 2 可知,天线单元在工作频段 17 GHz ~ 21 GHz 范围内电压驻波比均小于 2,从而实现了良好阻抗匹配。

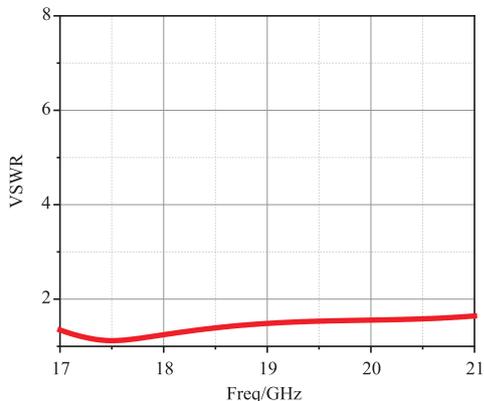


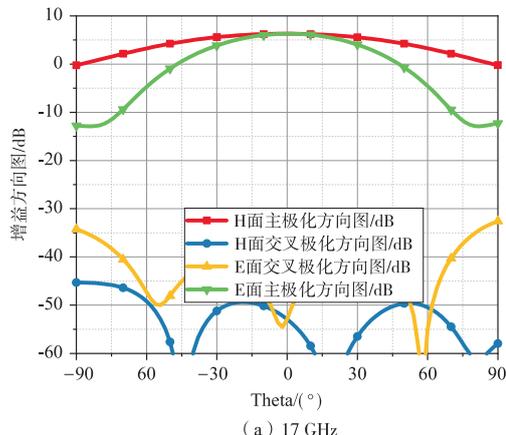
图 2 基于开槽线巴伦的对称阵子天线电压驻波比

Fig.2 Voltage standing wave ratio of symmetric element antenna based on slotted wire Balun

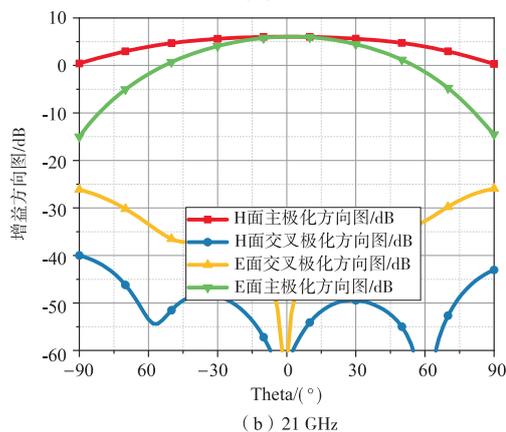
除阻抗特性外,基于开槽线巴伦的对称阵子天线在低频和高频的方向图如图 3 所示。由图 3 可知,天线在频带范围内具有良好的辐射特性,在 17 GHz 时,天线增益为 6.29 dB,H 面波束宽度为 120° ,E 面波束宽度为 67° ;在 21 GHz 时,天线增益为 6.05 dB,H 面波束宽度为 138° ,E 面波束宽度为 77° 。与传统对称阵子相比,基于开槽线巴伦的折叠对称阵子在工作频段内的 H 面波束宽度均超过了 120° ,E 面波束宽度均小于 80° 。针对二维圆极化波束扫描,若两个面波束宽度相差过大,当阵列扫描至大角度时,不同极化分量的幅度差异会导致其交叉极化性能显著恶化。

为解决上述难题,本文提出了一种金属栅格加载技术,其有效拓展了对称阵子的 E 面半功率波束

宽度,整体结构如图 4 所示,其中金属栅格整体高度为 $H_3 = 4.8\text{ mm}$,中间挖掉的栅格宽度为 $W_2 = 1.4\text{ mm}$,高度为 $H_4 = 4.2\text{ mm}$ 。



(a) 17 GHz



(b) 21 GHz

图 3 基于开槽线巴伦对称阵子天线方向图

Fig.3 Slotted line based Balun symmetric antenna pattern

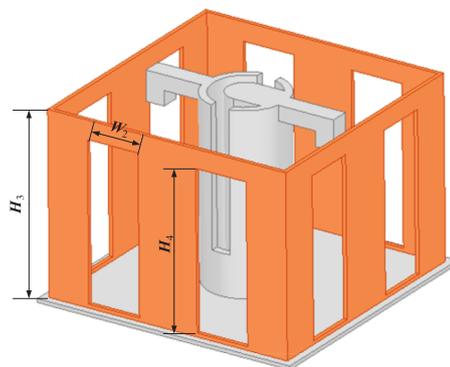


图 4 基于金属栅格加载的宽波束对称阵子天线
Fig.4 Wide-beam symmetric array sub-antenna based on metal grid loading

图 5 给出了金属栅格上电流分布情况,由图 5 可知,天线在加载金属栅格后,阵子辐射金属栅格顶端激励起的垂直电流可有效展宽对称阵子天线 E 面波束宽度。

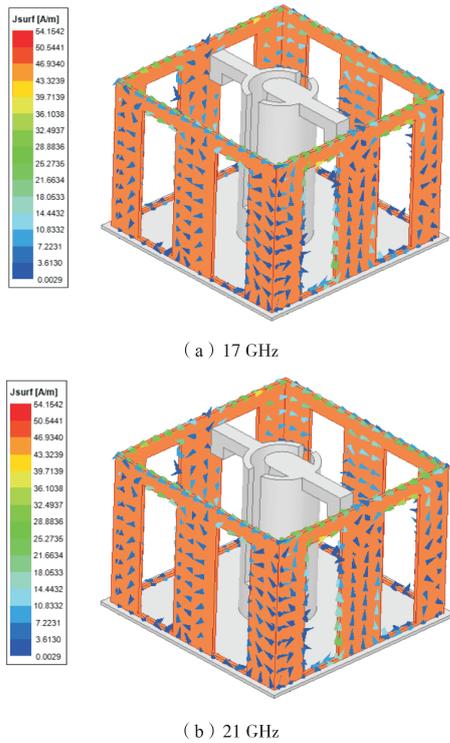


图 5 金属栅格上电流示意图

Fig. 5 Schematic diagram of current flow on metal grid

为进一步验证上述方法的有效性,图 6 仿真了天线在金属栅格加载后的 E 面波束宽度。由图 6 可知,加载了栅格的对称阵子,天线在 17 GHz 时,天线增益为 4.2 dB,E、H 面的半功率波束宽度分别为 139°和 142.5°。天线在 21 GHz 时,增益为 4.6 dB,E、H 面的半功率波束宽度分别为 113.7°和 155.4°。总之,相较于加载金属栅格之前,天线在 17 GHz 工作下的 E 面半功率波束宽度从 67°展宽至 142°;天线在 21 GHz 工作下的 H 面半功率波束宽度从 77°展宽至 155°。据此通过金属栅格的加载,实现了对称阵子天线单元波束宽度的展宽,为阵列宽角扫描奠定了设计基础。

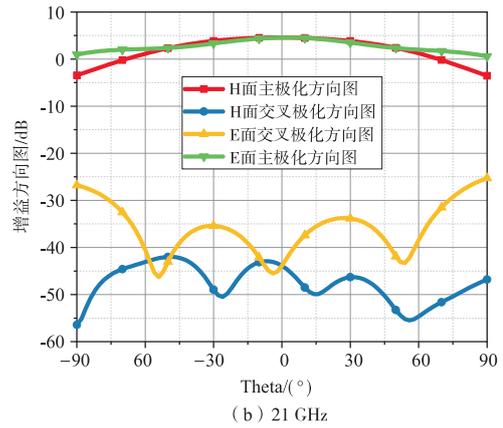
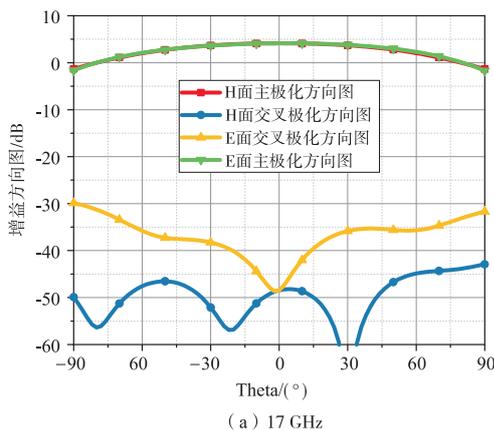


图 6 基于金属栅格加载的宽波束对称阵子天线方向图
Fig. 6 Pattern of wide-beam symmetric array sub-antenna based on metal grid loading

2 双圆极化天线阵列设计

双圆极化天线阵列通常采用双圆极化单元组阵的形式实现。若采用传统双极化单元,则需要更多的通道,从而导致成本过高、应用受限。本文提出了一种顺序排布的阵列布阵方法,其通过赋予天线单元不同的相位,可以实现对阵列极化的切换,阵面顺序排布方式如图 7 所示。

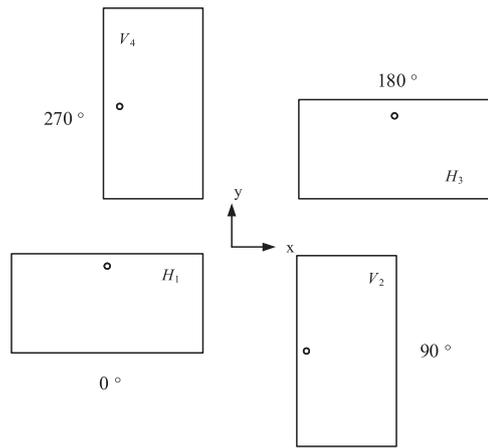


图 7 顺序旋转布阵阵列示意图

Fig. 7 Schematic diagram of sequential rotation array

当单元数为 4 个时,馈电相位分别为 0°、90°、180°、270°时,当天线单元的幅度分别为 H_1 、 V_2 、 H_3 、 V_4 ,且贴片天线中心距离为 d 时,当单元幅度 $H_1 = V_2 = H_3 = V_4$,阵列辐射出来的总场为:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{total}} &= H_1 e^{-jk_0 d \sin \theta} e^{j0^\circ} + V_2 e^{jk_0 d \sin \theta} e^{j90^\circ} \\
 &+ H_3 e^{-jk_0 d \sin \theta} e^{j180^\circ} + V_4 e^{jk_0 d \sin \theta} e^{j270^\circ} = \\
 &(H_1 e^{j0^\circ} + V_2 e^{j90^\circ}) (e^{-jk_0 d \sin \theta} + e^{jk_0 d \sin \theta}) \\
 &= (H_1 + jV_2) 2 \cos(k_0 d \sin \theta) \quad (1)
 \end{aligned}$$

根据式(1)推导过程,顺序馈电的阵列可以实现右旋圆极化辐射。

同理,若阵列顺序采用馈电时,馈电相位为 0°、270°、180°、90°时,根据式(1)可实现左旋圆极化。采用顺序旋转馈电技术,阵列天线单元采用单一的线极化单元就可实现阵列天线的双圆极化辐射。通过布阵可以有效增加减少通道数量,有效缩减相控阵天线的成本,使其具备更强的竞争力。

基于上述原理,采用顺序布阵,阵列间距选择为 6.6 mm,形成 8 × 8 的阵列,整体阵列布阵与初始相位如图 8 所示。

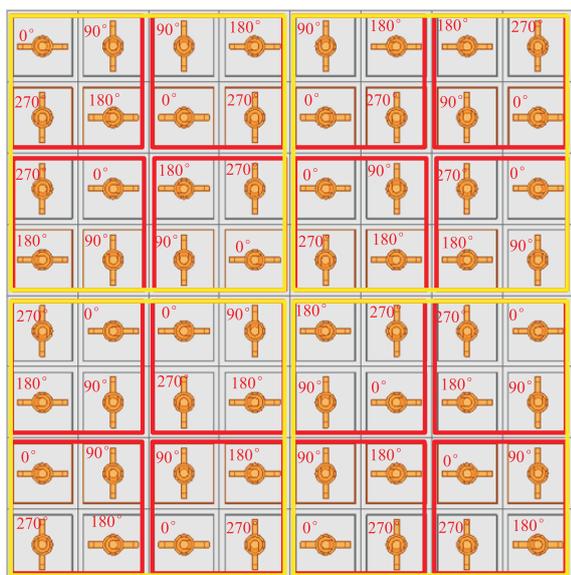
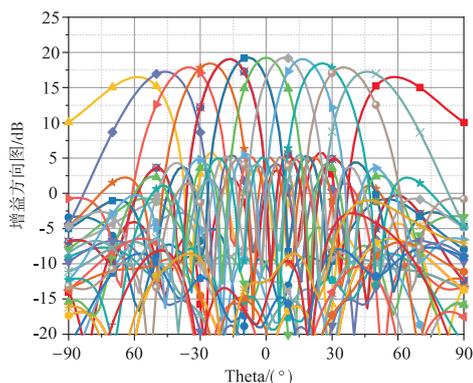


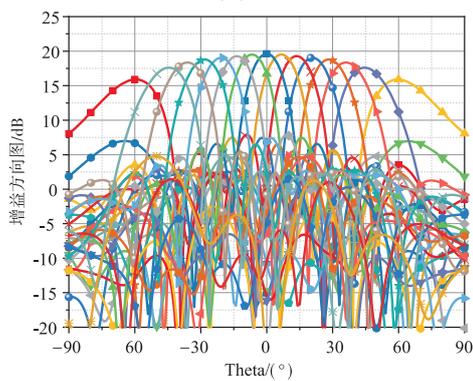
图 8 天线阵列布阵规律与初始相位示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the arrangement law and initial phase of the antenna array

为了能够最大限度的保证阵列双圆极化性能,通过多层顺序布阵来实现整体阵面排布。首先,以 4 个单元作为一组,进行顺序馈电形成初级子阵,如图 8 中红色框中所示,其次以一个初级子阵为单元,进行顺序馈电布阵,形成次级子阵,即图 8 中黄色框所示。最终以次级子阵为单元,进行顺序馈电,形成最终阵面。采用上述布阵方案,对阵列天线进行仿真计算分析。图 9 给出 17 GHz 和 21 GHz 时,天线阵面波束指向不同角度时的方向图,当扫描离轴到 60°时,天线阵列波束宽度随着离轴角增大而展宽,增益随着离轴角的增大而下降。17 GHz、21 GHz 阵列轴比方向图分别如图 10、图 11 所示。



(a) 17 GHz



(b) 21 GHz

图 9 阵列扫描增益方向图
Fig. 9 Array Scanning Gain Pattern

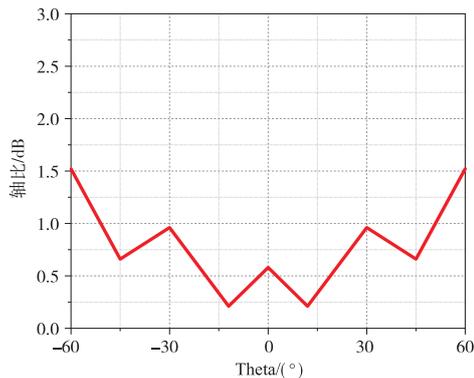


图 10 17 GHz 阵列轴比方向图
Fig. 10 Axis ratio pattern of 17 GHz array

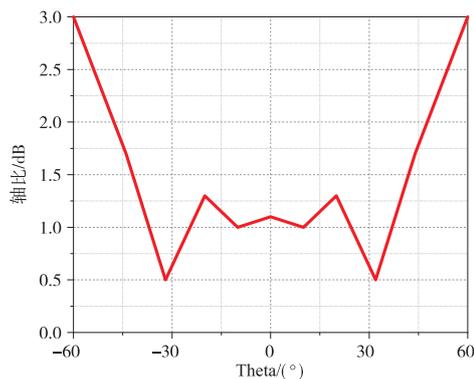


图 11 21 GHz 阵列轴比方向图
Fig. 11 Axis ratio pattern of 21 GHz array

对于阵列扫描,其有源驻波对天线的辐射性有着决定性影响,以阵中中心单元对其扫描 60° 时,不同频率的有源驻波为例,给出本文所提出的阵列扫描后的有源驻波,如图12所示。

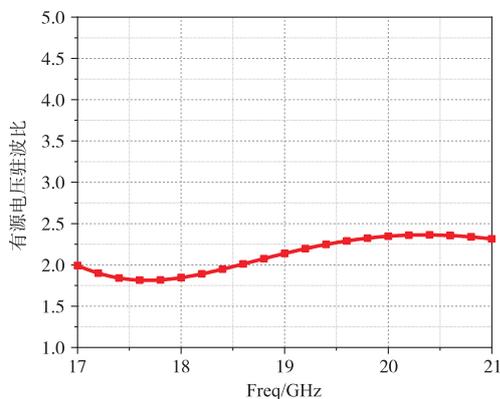


图12 阵中单元的有源驻波

Fig. 12 Active standing waves of elements in the array

在17 GHz频点工作时法向波束增益为18.2 dB,当扫描离轴角为 60° 时,增益下降2.8 dB;轴比优于2 dB,在高频21 GHz时,法向增益为19.6 dB,当扫描离轴角为 60° 时,增益下降3.7 dB,轴比小于3 dB。阵列可实现二维扫描,在宽频带内,在离轴角 60° 的范围内,增益稳定,下降4 dB以内,同时可实现轴比小于3 dB。在低频段,更能实现增益下降小于3 dB。据此结果,天线阵列可具有良好的宽角覆盖性能。在阵列具有良好的辐射性能的同时,阵中天线单元具有良好的阻抗匹配,在扫描至 60° 时,仍然在全频段内小于3。

3 结论

文章提出了一种通过基于金属栅格加载的波束展宽方法,其通过金属栅格顶端产生的感应电流大幅拓展了天线E面波束宽度。同时,采用折叠对称阵子作为辐射单元,克服了传统微带天线的窄带与窄波束缺陷,从而为阵列宽频带、宽角覆盖奠定了基础。此外,通过多层次的顺序馈电技术,实现了宽带宽角扫描圆极化布阵,最大程度的减少了相控阵天线的成本,使得其具有更强的竞争优势。仿真结果表明:天线阵在工作频段17 GHz~21 GHz范围内实现了离轴角 60° 的二维宽波束覆盖,增益下降4 dB以内,且轴比保持小于3 dB特性,从而具有良好的宽角覆盖性能,鉴于此,文章所设计的圆极化扫描天线阵在低轨卫星通信系统中具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] HANNAN P, LERNER D, KNITTEL G. Impedance matching a phased-array antenna over wide scan angles by connecting circuits [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1965, 13(1): 28-34.
- [2] DUAN X D, LI R L. A novel center-fed dual-band circularly polarized antenna for GNSS applications [C]//2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2014.
- [3] 沈湘,姜兴,彭麟,等.基于同轴背馈的宽波束圆极化天线[J].微波学报,2018,34(S1):152-154.
- [4] PAN Z K, LIN W X, CHU Q X. Compact wide-beam circularly-polarized microstrip antenna with a parasitic ring for GNSS application [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(5): 2847-2850.
- [5] 姜兴,沈湘,彭麟,等.宽角扫描的圆极化相控线阵[J].电波科学学报,2019,34(5):552-557.
- [6] 王阳.圆极化宽带宽角扫描相控阵的研究[D].成都:电子科技大学,2021.
- [7] SUN B F, DING X, CHENG Y F, et al. 2-D wide-angle scanning phased array with hybrid patch mode technique [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(4): 700-704.
- [8] DÍAZ J D, SALAZAR-CERRENO J L, ORTIZ J A, et al. A cross-stacked radiating antenna with enhanced scanning performance for digital beamforming multifunction phased-array radars [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(10): 5258-5267.
- [9] DING Z F, XIAO S Q, LIU C R, et al. Design of a broadband, wide-beam hollow cavity multilayer antenna for phased array applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 1040-1043.
- [10] PAL A, MEHTA A, MIRSHEKAR-SYAHKAL D, et al. 2×2 phased array consisting of square loop antennas for high gain wide angle scanning with low grating lobes [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(2): 576-583.
- [11] 王兵,王志愿,杨钰琦,等.一种基片集成波导馈电的毫米波磁电偶极子天线设计[J].空间电子技术,2021,18(4):53-57.
- [12] SU C W, HUANG S K, LEE C H. CP microstrip antenna with wide beamwidth for GPS band application [J]. Electronics Letters, 2007, 43(20): 1062.
- [13] CHALOUN T, ZIEGLER V, MENZEL W. Design of a dual-polarized stacked patch antenna for wide-angle scanning

- reflectarrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation Letters, 2016, 64(8): 3380-3390.
- [14] CHENG Y F, DING X, SHAO W, et al. 2-D planor wide-angle scanning-phased array based on wide-beam elements [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16(1): 876-879.

作者简介:周祺磊(1996—),陕西西安人,西安电子科技大学博士研究生。主要研究方向为宽带大角度扫描阵列天线。E-mail: 20021110068@xidian.edu.cn

通讯作者:刘能武(1988—),湖南常德人,博士、西安电子科技大学副教授。目前为止,以第一作者或共同作者在 IEEE TAP、IEEE ACCESS、IEEE AWPL、IET AP 等国际期刊和会议上发表学术论文 40 余篇。主要从事单腔多模天线、宽带天线、低剖面天线、新型天线、5G 天线等方面的理论分析与研究。E-mail: nwlui@xidian.edu.cn