

一种Ka频段高效率圆极化宽角扫描波导缝隙相控阵天线

刘 斌^① 谷胜明^{*①} 孟明霞^① 史永康^① 丁克乾^①
徐 磊^① 杨雨田^① 陈筠力^②

^①(北京遥测技术研究所 北京 100076)

^②(上海航天技术研究院 上海 201109)

摘 要: 该文提出一种新型小尺寸、低剖面、“f”字型波导缝隙圆极化器,高度仅 $1/6$ 波长,宽度约 $2/5$ 波长。基于该圆极化器,设计了一种高效率、低剖面、圆极化脊波导缝隙线阵天线。为满足空间应用中对轻质、高效率、圆极化、 $\pm 60^\circ$ 宽角扫描相控阵天线的需求,采用该线阵天线作为阵元设计、仿真并实现了16阵元Ka频段脊波导缝隙相控阵天线。仿真和实测结果表明,该相控阵天线可实现1维 $\pm 60^\circ$ 宽角扫描。在扫描角范围内,相控阵天线的轴比小于4.1 dB,增益下降小于4.3 dB。在 0° 扫描角工作时,天线的实测增益为35.9 dBi,辐射效率接近85%。

关键词: 相控阵天线; 波导缝隙天线; Ka频段; 圆极化; 宽角扫描

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)06-1630-07

DOI: 10.11999/JEIT200392

A Circularly Polarized Wide-scan Waveguide Slot Phased Array Antenna with High Efficiency for Ka Band Application

LIU Bin^① GU Shengming^① MENG Mingxia^① SHI Yongkang^① DING Keqian^①
XU Lei^① YANG Yutian^① CHEN Junli^②

^①(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

^②(Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: A novel f-letter waveguide slot with small size and low-profile is presented in this paper. The height of the circular polarizer is only $\lambda_0/6$, and the width is about $2\lambda_0/5$. Based on the new circular polarizer, a circularly polarized ridge-waveguide slot linear array antenna with lower-profile and high aperture efficiency is designed. Using the linear array as the antenna cell, a 16-cells Ka-band circularly polarized wide-scan ridge-waveguide slot phased-array antenna with high efficiency and lightweight is designed, simulated and fabricated to achieve $\pm 60^\circ$ wide-scan for the space application. The simulated and measured results show that the phased-array antenna can achieve one-dimensional wide-angle beam-scanning with $\pm 60^\circ$ scan range. Across the scan coverage, the axial ratio is less than 4.1 dB and the gain variation is less than 4.3 dB. The measured antenna gain is higher than 35.9 dBi in the 0° scan-angle, and the corresponding efficiency near 85% are obtained.

Key words: Phased-array antenna; Waveguide slot antenna; Ka band; Circularly polarized; Wide-scan

1 引言

相比常见的微带和振子天线^[1,2],波导缝隙阵天线兼具高增益、高效率、低损耗、易散热、功率容量大、恶劣环境下适应能力强等优点。结合使用T/R组件,能够实现1维笔形波束相控扫描,因此在微波毫米波频段广泛应用于各种载荷SAR和通信系统中^[3-6]。

为克服云、雨的干扰,消除因电离层法拉第旋转效应引起的极化畸变影响,同时具备一定的波束

捷变能力,星载通信系统和雷达往往要求天线具有圆极化宽角相控扫描工作的能力。目前,公开报道的圆极化宽角扫描波导缝隙阵天线文献较少。文献[7-9]报道了几种加载偶极子和微带阵列的固定波束圆极化波导缝隙阵天线,介质材料的使用增加了天线的损耗,降低了天线在恶劣环境下的适应能力。文献[10-13]介绍了几种基于双缝隙和四缝隙的固定波束圆极化波导缝隙阵天线,由于缝隙尺寸大难以用于宽角扫描。文献[14]基于双缝辐射的频扫圆极化间隙波导缝隙阵天线扫描角范围仅 $\pm 15^\circ$ 。文献[15]介绍了一种加载寄生振子的波导缝隙相控阵天线,应用于美国“信使”水星探测,该天线在

收稿日期: 2020-05-19; 改回日期: 2020-10-24; 网络出版: 2020-10-29

*通信作者: 谷胜明 zgq8311@126.com

8.5 GHz $\pm$ 50 MHz频段能够实现 $\pm 45^\circ$ 圆极化宽角笔形波束扫描, 但该天线结构较为复杂, 扫描角范围仅 90° 。文献[16]提出了一种可加载在波导缝隙阵天线的四脊波导圆极化器, 但该圆极化器尺寸大, 难以应用于宽角相控扫描天线。

本文提出了一种新型小尺寸、低剖面、“f”字型波导缝隙圆极化器, 剖面高度仅 $1/6$ 自由空间波长, 可加载在线极化脊波导缝隙线阵上实现天线圆极化工作。采用设计的线阵天线作为阵元, 结合使用Ka频段16路T组件、Ka功分网络、电源和波控器, 设计、加工并装配完成了16阵元Ka频段圆极化脊波导缝隙1维相控阵天线, 可实现1维 $\pm 60^\circ$ 宽角圆极化扫描, 从而解决了在空间应用中对Ka频段轻质、高效率、圆极化、宽角扫描相控阵天线的需求。本文重点介绍圆极化波导缝隙阵天线的设计与实现, 关于相控阵天线内部的Ka频段16路T组件、Ka功分网络、电源和波控器的设计不在文中详述。

2 波导缝隙圆极化器的设计与分析

如图1(a)所示, “f”字型波导缝隙右旋圆极化器由“f”字型缝隙和波导耦合腔构成。其中, “f”字型缝隙由“一”字型缝隙和倒“Z”字型缝隙正交构成。如图1(b)所示, 当“f”字型缝隙翻转后, 该圆极化器可实现左旋圆极化。为便于用作波导缝隙线阵天线的圆极化器, “f”字型圆极化器采用如图1(b)所示横向缝隙进行馈电, 馈电缝隙与“一”字型缝隙的夹角为 45° 。为便于机械加工, 所有缝隙的两端和波导耦合腔的四角均进行倒圆角处理。

如图1所示, 该圆极化器的主要参数包括波导耦合腔的长度 couple_L 、宽度 couple_W 和高度 couple_H , “一”字型缝隙的长度 pslot-L , 倒“Z”字型缝隙的主枝节长度 zslot-mL 和分枝节长度 zslot-sL , 两种缝隙的宽度 slot-W 。当圆极化器

工作在Ka频段时, 为减轻重量, 两种缝隙和波导耦合腔的厚度即 couple_H 和 fsolt_H 均设计为 $\lambda_0/12$, 因此“f”字型圆极化器的总厚度仅为 $\lambda_0/6$, 其中 λ_0 为圆极化器工作中心频率下对应的自由空间波长。

对于如图1(a)所示缝隙馈电“f”字型波导圆极化器的辐射电场, 可等效为如图2所示两个馈电缝隙分别采用等幅同相的X极化和Y极化电场进行馈电所获取的辐射电场矢量叠加。采用商业电磁仿真软件ANSYS HFSS分别对图2所示两种极化电场馈电的“f”字型圆极化器进行仿真, 得到如图2(a)和图2(b)所示口面电场分布, 同时可以得到如图2(c)和图2(d)所示 $R=200$ mm处远场X极化和Y极化辐射电场的幅度方向图, 如图2(e)所示两种主极化辐射电场的相位方向图。从图2中可知, X(或Y)极化电场馈电“f”字型圆极化器时, 主辐射电场也呈现出相同极化; 且X极化电场馈电获取的X极化辐射电场与Y极化电场馈电获取的Y极化辐射电场相位差 90° , 即“f”字型圆极化器对两种正交极化馈电呈现出不同的等效传播常数, 从而实现圆极化辐射。

由于“f”字型圆极化器结构复杂, 难以给出等效传播常数的解析表达式以指导设计。因此, 采用仿真软件HFSS对影响轴比的主要参数 couple_L , couple_W , pslot-L , zslot-mL 和 zslot-sL 进行了仿真和优化, 仿真时缝隙宽度 slot-W 值设为 $0.67\lambda_0$ 。考虑到波导耦合腔的长度 couple_L 和宽度 couple_W 对圆极化器轴比的影响较小, 本文不再详细给出轴比随两种参数的变化曲线。图3(a)—图3(c)分别给出了该圆极化器3 dB轴比带宽随参数 pslot-L , zslot-mL 和 zslot-sL 的变化曲线。图3中可见, 3种参数对轴比值的影响均较大; 相比受 zslot-mL 值的影响, 轴比对 pslot-L 和 zslot-sL 参数的变化更敏感; 从图3中可知, 新型“f”字型圆极化的3 dB轴比带宽约为2.4%。

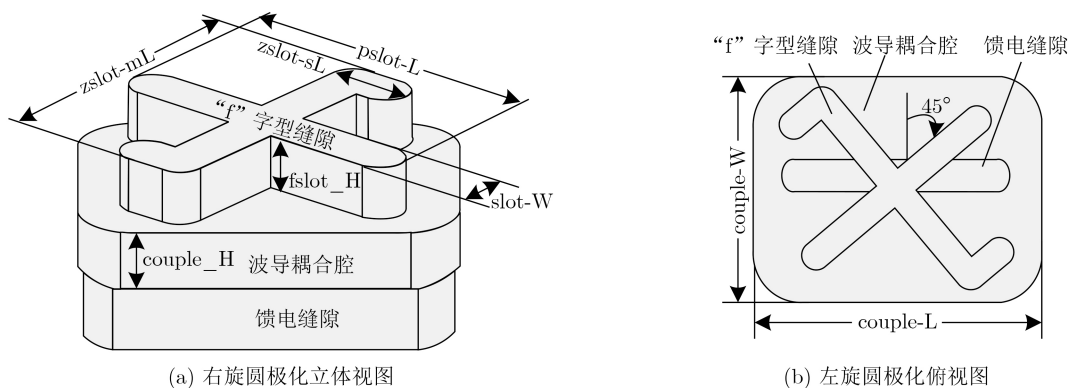


图1 “f”字型波导缝隙圆极化器波导空腔示意图

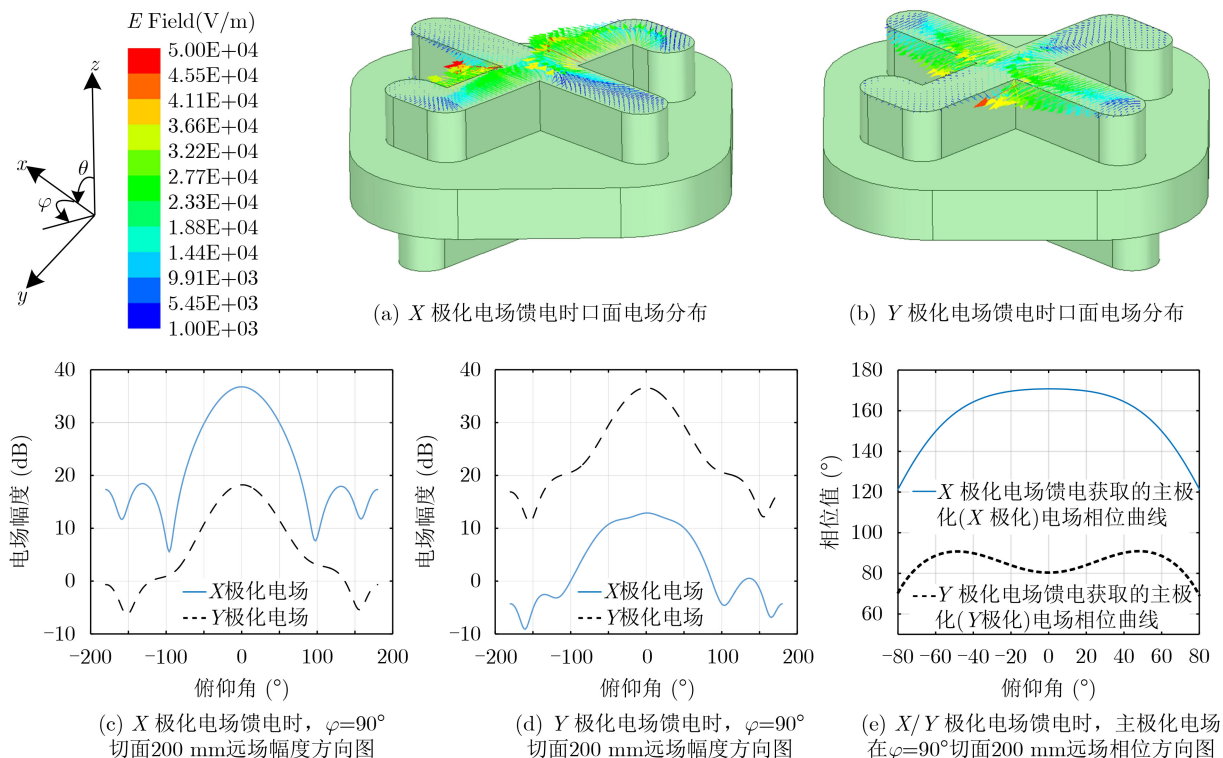


图2 “f” 字型波导缝隙圆极化器等效馈电时获取的电场分布及远场方向图

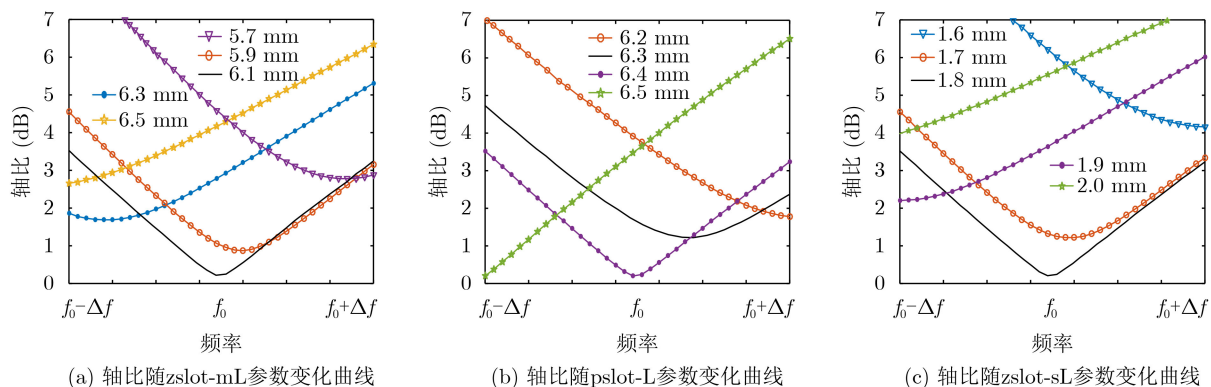


图3 “f” 字型波导圆极化器轴比仿真曲线

3 圆极化波导缝隙线阵阵元设计

为实现相控阵天线沿Y轴1维 $\pm 60^\circ$ 宽角扫描, 阵元采用如图4(a)所示线极化脊波导宽边纵向缝隙驻波线阵加载圆极化器的天线形式。为避免出现栅瓣, 线阵阵元之间的间隔应满足 $d_x \leq \lambda_{\min}/(1 + \sin \theta_{\max})$ 的要求, 式中 $\lambda_{\min}$ 为相控阵天线的最小工作波长, $\theta_{\max}$ 为天线最大波束扫描角度。由于天线窄频带工作, d_x 可选取为 $0.5\lambda_0$ 。考虑到金属壁的厚度, 脊波导的宽边尺寸设计为 $0.42\lambda_0$ 。参考文献[17], 为提高波导缝隙天线口面效率, 在波导纵向辐射缝隙上加载矩形辐射腔, 腔体的长度和宽度分别为 cav_L 和 cav_W 。为降低剖面高度, 辐射腔的厚度 cav_d 设计为 $0.83\lambda_0$ 。相邻矩形辐射腔的间距 dis_cav 等于纵向缝隙间距, 即脊波导半个波导波

长 $\lambda_g/2$ 。综合考虑脊波导宽边纵向缝隙天线的口面效率和结构限制, cav_W 值设计为 $0.42\lambda_0$, cav_L 值设计为 $0.64\lambda_0$, dis_cav 值设计为 $0.72\lambda_0$ 。为实现上述线极化线阵阵元圆极化工作, 如图4(b)所示, 在每一对纵向缝隙和辐射腔之间加载2.1节所述“f”字型波导圆极化器, 其中纵向缝隙作为圆极化器的馈电缝隙。

对于波导缝隙驻波线阵天线, 纵向缝隙的数量越多, 天线的阻抗和轴比带宽越窄。为实现高增益工作, 线阵天线采用脊波导一分四功分级联网络进行馈电, 并通过中心馈电的方式增大天线带宽, 以降低波导缝隙天线Ka频段工作时对加工精度的要求。为降低功分网络的剖面高度, 相邻层的脊波导采用文献[18]所述“Z”字型缝隙耦合馈电。图5所

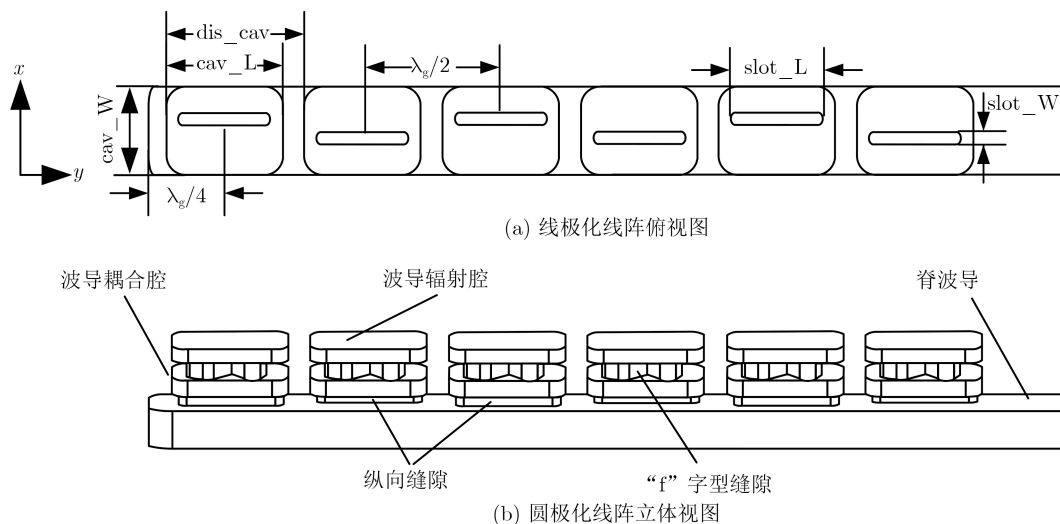


图4 脊波导宽边纵向缝隙驻波线阵天线空腔示意图

示为HFSS仿真获得的功分网络S参数仿真曲线,其中端口1为输入端口,端口2~5为4个输出端口。图5中可见,设计的功分网络带内反射系数小于-20 dB,且实现了4个端口的等功率分配。图6所示为圆极化脊波导宽边纵向缝隙驻波线阵天线在HFSS软件中的仿真模型,图6中线阵天线共计有64个圆极化波导辐射腔。为展示设计的Ka频段圆极化波导缝隙线阵天线性能,采用先分层机械加工再真空焊接的工艺完成了16根铝合金线阵天线的加工,加工完成的线阵天线剖面高度仅 $1.46\lambda_0$,实物照片如图7所示。图7中可见,沿X轴方向共计有16根圆极化脊波导缝隙线阵天线,由于两根线阵天线之间的间距为 $0.5\lambda_0$,因此天线辐射口面宽度为 $8\lambda_0$ 。考虑到每根线阵天线均包括64个间距为 $0.72\lambda_0$ 的圆极化波导辐射腔,故天线辐射口面长度为 $46.08\lambda_0$ 。

采用Keysight矢量网络分析仪N5224A对单根线阵天线阵元的驻波比进行测试,实测和仿真驻波比曲线如图8所示,图8中可见工作频段内仿真和实测驻波比均小于2,且实测值与仿真值一致性较好。由于Ka波段圆极化波导缝隙驻波线阵天线阵元沿X轴方向宽度仅 $0.5\lambda_0$,沿Y轴方向长度为 $46.08\lambda_0$,因此该线阵阵元具有沿 $\varphi=0^\circ$ 切面宽波束辐射,沿 $\varphi=90^\circ$ 切面窄波束辐射的特性。为进行波束性能验证,图9分别给出了采用HFSS仿真软件和远场暗室测试得到的单根线阵天线在工作频点 f_0 处的归一化增益和轴比方向图。从图9中可知,仿真

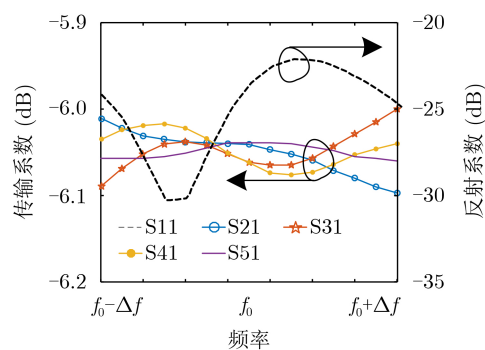


图5 脊波导功分网络S参数仿真曲线

轴比值为2.3 dB,实测轴比值为2.7 dB,两者的一致性较好;仿真得到的 $\varphi=0^\circ$ 切面3 dB波束宽度为 85.4° ,实测值为 101.4° 且实测曲线出现了上下起伏的波纹,这主要是由宽波束方向邻近阵元的互耦效应引起的; $\varphi=90^\circ$ 切面实测归一化增益曲线与仿真结果吻合得较好,仿真与实测副瓣电平值分别-13.4 dB和-12.9 dB,3 dB波束宽度均为 1.2° 。

4 Ka波导缝隙相控阵天线仿真和实测结果

为实现1维相控扫描,采用加工的16根波导缝隙线阵作为辐射阵面,将研制完成的Ka频段16路T组件、Ka功分网络、电源和波控器装配在辐射阵面背部,从而构成1维圆极化脊波导缝隙相控阵天线,该相控阵天线可沿图7所示 $\varphi=0^\circ$ 切面进行空间窄波束合成,并通过控制T组件输出相位实现沿 $\varphi=0^\circ$ 切面1维相控扫描。为获取相控波束扫描特

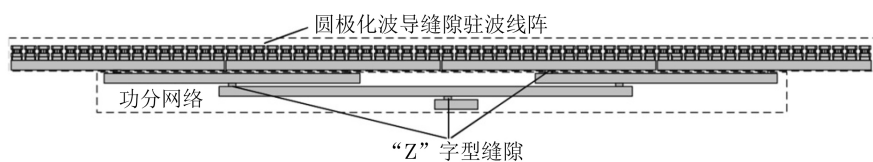


图6 线阵天线HFSS仿真模型

性,采用HFSS仿真软件对该相控阵天线进行全阵列建模仿真,得到如图10所示不同扫描角度时的增益曲线和如表1所示不同扫描角度时的轴比值。如图11所示,采用基于Keysight矢量网络分析仪5224A构建的平面近场暗室对研制完成的圆极化脊波导缝隙相控阵天线进行测试,可得到如图10和表1所示不同扫描角度时的增益曲线和轴比值。从图10可知,研制完成的16阵元Ka频段圆极化脊波导缝隙相控阵天线可实现1维 $\pm 60^\circ$ 宽角扫描;在扫描角范围内,实测增益和仿真值吻合得较好; 0° 扫描角时,实测增益值为35.9 dB, $\pm 60^\circ$ 扫描角实测增益分别为31.9 dB和31.6 dB,相比 0° 扫描角增益下降仅4.3 dB。根据口面天线增益计算公式 $\text{Gain} = 10 \lg(4\pi\eta LW/\lambda_0^2)$, 式中 η 为天线辐射效率, $L = 46.08\lambda_0$, $W = 8\lambda_0$ 分别为天线辐射口面长度和宽度,

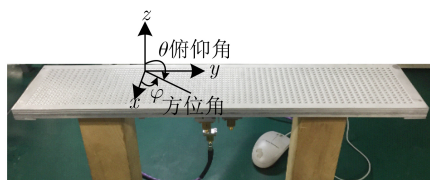


图7 Ka波段圆极化波导缝隙阵列天线实物照片

计算可得 0° 扫描角时该相控阵天线的辐射效率 η 接近85%。

从表1可知,在扫描角范围内仿真轴比值均小于3.4 dB,实测轴比值均小于4.1 dB。相比仿真值,所有扫描角度下的实测轴比均有所恶化,主要原因是波导缝隙圆极化器的加工误差。从图3可知,“f”字型波导圆极化器带宽较窄,且对参数pslot-L和zslot-sL敏感,特别是在Ka频段对加工误差更加敏感。此外,轴比的恶化还与线阵阵元之间的互耦有关,互耦产生的表面波效应一定程度上导致轴比的恶化。

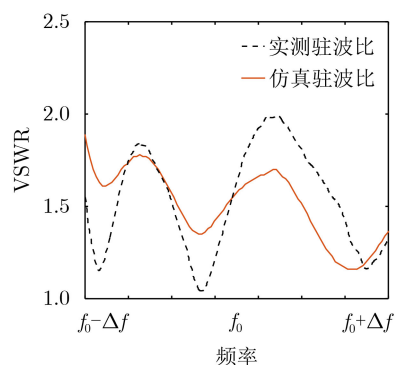


图8 圆极化波导缝隙阵列仿真和实测驻波比

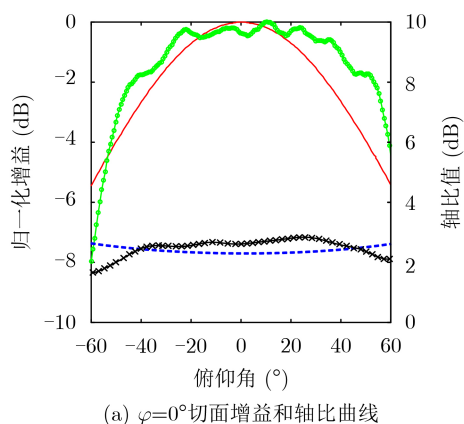
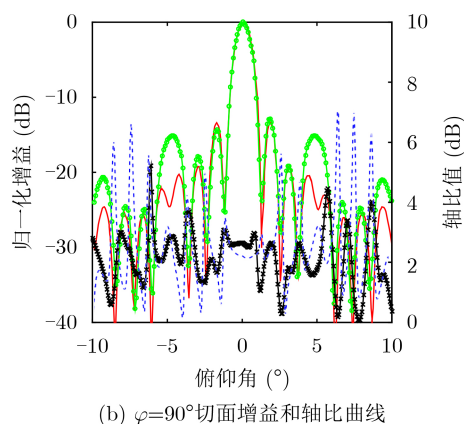
(a) $\varphi=0^\circ$ 切面增益和轴比曲线(b) $\varphi=90^\circ$ 切面增益和轴比曲线

图9 圆极化波导缝隙阵列天线归一化增益和轴比仿真与测试曲线

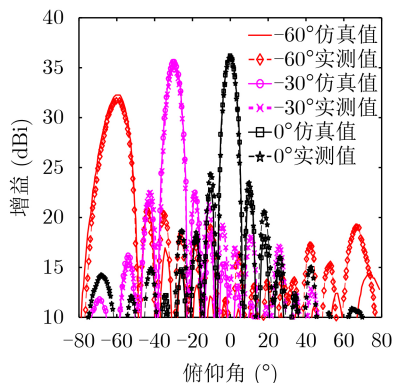
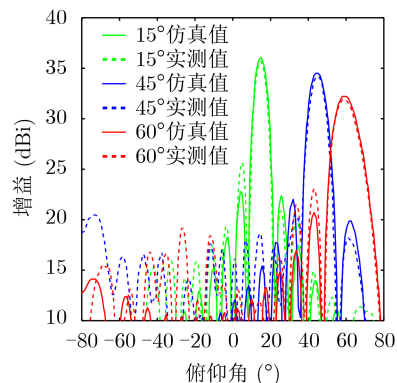
(a) $-60^\circ, -30^\circ, 0^\circ$ 扫描角时的增益曲线(b) $15^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 扫描角时的增益曲线图10 相控阵天线 f_0 频点处的仿真与实测增益曲线

表 1 圆极化波导缝隙相控阵天线 f_0 频点处的仿真与实测轴比值

扫描角度(°)	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60
仿真轴比(dB)	1.5	2.6	3.2	3.4	3.0	3.4	3.2	2.6	1.5
实测轴比(dB)	3.5	3.7	4.0	4.1	3.8	4.1	4.0	3.7	3.5

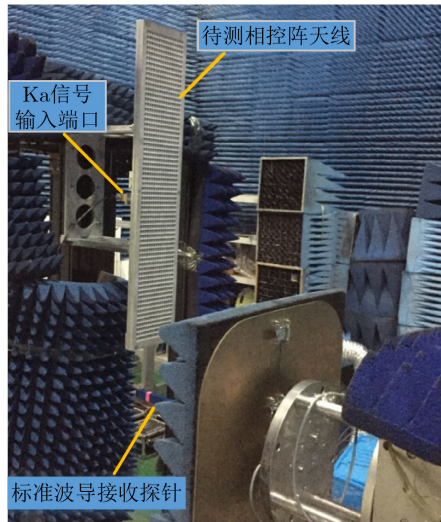


图 11 相控阵天线在平面近场暗室中的测试照片

5 结论

本文提出了一种新型低剖面、“f”字型波导缝隙圆极化器，剖面高度仅 $1/6$ 工作波长，宽度约 $2/5$ 工作波长。采用该圆极化器结合脊波导驻波缝隙线阵天线，设计、仿真、加工并实现了一种实测性能指标优异的Ka波段圆极化宽角扫描相控阵天线，能够实现 1 维 $\pm 60^\circ$ 宽角相控扫描。在扫描角范围内，相控阵天线的轴比均小于 4.1 dB，增益下降小于 4.3 dB。在 0° 扫描角工作时，相控阵天线实测增益为 35.9 dBi，辐射效率接近 85% 。当结合使用 1 维伺服机构时，通过 1 维波束机械扫描叠加 1 维波束相控扫描的方式，本相控阵天线可实现 2 维波束宽角扫描。相比传统双伺服驱动的 2 维波束扫描反射面天线，不仅能够节省 1 维伺服机构，还具有更加灵活的波束扫描工作模式；相比 2 维宽角扫描相控阵天线，能够大量减少T/R组件的数量，降低天线的成本和复杂度。此外，全金属结构的圆极化宽角扫描波导缝隙相控阵天线还具有恶劣环境适应能力强的优点，在星载通信和雷达系统中具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- [1] 李振亚, 竺小松, 张建华. 一种新颖的宽带圆极化单极天线[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(11): 2705–2711. doi: [10.11999/JEIT180094](https://doi.org/10.11999/JEIT180094).
LI Zhenya, ZHU Xiaosong, and ZHANG Jianhua. A novel broadband circularly polarized monopole antenna[J].

- Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(11): 2705–2711. doi: [10.11999/JEIT180094](https://doi.org/10.11999/JEIT180094).
- [2] 陆贵文, 李明鉴. 一种新型毫米波磁电偶极子天线阵列设计[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(10): 2517–2520. doi: [10.11999/JEIT150038](https://doi.org/10.11999/JEIT150038).
LUK K M and LI Mingjian. Novel millimeter-wave magneto-electric dipole antenna array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(10): 2517–2520. doi: [10.11999/JEIT150038](https://doi.org/10.11999/JEIT150038).
- [3] RAVINDRA V, AKBAR P R, ZHANG Miao, et al. A dual-polarization X-band traveling-wave antenna panel for small-satellite synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(5): 2144–2156. doi: [10.1109/TAP.2017.2676760](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2676760).
- [4] 孙吉利, 禹卫东, 邓云凯. 高分三号卫星SAR工作模式与载荷设计[J]. 航天器工程, 2017, 26(6): 61–67. doi: [10.3969/j.issn.1673-8748.2017.06.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-8748.2017.06.010).
SUN Jili, YU Weidong, and DENG Yunkai. Design of working modes and payload of SAR for GF-3 satellite[J]. *Spacecraft Engineering*, 2017, 26(6): 61–67. doi: [10.3969/j.issn.1673-8748.2017.06.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-8748.2017.06.010).
- [5] HERRANZ-HERRUZO J I, VALERO-NOGUEIRA A, FERRANDO-ROCHER M, et al. Low-cost Ka-band switchable RHCP/LHCP antenna array for mobile SATCOM terminal[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(5): 2661–2666. doi: [10.1109/TAP.2018.2806421](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2806421).
- [6] SHI Lei, BENCIVENNI C, MAASKANT R, et al. High-Efficiency and wideband aperiodic array of uniformly excited slotted waveguide antennas designed through compressive sensing[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(5): 2992–2999. doi: [10.1109/TAP.2019.2891647](https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2891647).
- [7] LI Yue, CHEN Zhining, QING Xianming, et al. Axial ratio bandwidth enhancement of 60-GHz substrate integrated waveguide-fed circularly polarized LTCC antenna array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(10): 4619–4626. doi: [10.1109/TAP.2012.2207343](https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2207343).
- [8] MIN K S, HIROKAWA J, SAKURAI K, et al. Single-layer dipole array for linear-to-circular polarisation conversion of slotted waveguide array[J]. *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, 1996, 143(3): 211–216. doi: [10.1049/ip-map:19960445](https://doi.org/10.1049/ip-map:19960445).
- [9] FERRANDO-ROCHER M, HERRANZ-HERRUZO J I,

- VALERO-NOGUEIRA A, *et al.* Circularly polarized slotted waveguide array with improved axial ratio performance[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(9): 4144–4148. doi: [10.1109/TAP.2016.2586492](#).
- [10] DIMITROV K C, LEE Y, MIN B W, *et al.* Circularly polarized t-shaped slot waveguide array antenna for satellite communications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(2): 317–321. doi: [10.1109/LAWP.2019.2961386](#).
- [11] MONTISCI G. Design of circularly polarized waveguide slot linear arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(10): 3025–3029. doi: [10.1109/TAP.2006.882201](#).
- [12] CHEN Peng, HONG Wei, KUAI Zhenqi, *et al.* A substrate integrated waveguide circular polarized slot radiator and its linear array[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2008, 8: 120–123. doi: [10.1109/LAWP.2008.2011062](#).
- [13] SANCHEZ-OLIVARES P and MASA-CAMPOS J L. Novel four cross slot radiator with tuning vias for circularly polarized SIW linear array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(4): 2271–2275. doi: [10.1109/TAP.2014.2299823](#).
- [14] AL SHARKAWY M and KISHK A A. Wideband beam-scanning circularly polarized inclined slots using ridge gap waveguide[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13: 1187–1190. doi: [10.1109/LAWP.2014.2331679](#).
- [15] WALLIS R E and CHENG Sheng. Phased-array antenna system for the MESSENGER deep space mission[C]. *Proceedings of IEEE Aerospace Conference Proceedings*, Big Sky, USA, 2001: 10–17. doi: [10.1109/AERO.2001.931694](#).
- [16] 王进, 杜彪, 孙立杰, 等. 宽带高性能四脊波导圆极化器设计[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(3): 611–618. doi: [10.11999/JEIT180423](#).
- WANG Jin, DU Biao, SUN Lijie, *et al.* Design of wideband high performance quad-ridge waveguide polarizer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(3): 611–618. doi: [10.11999/JEIT180423](#).
- [17] LU Xianlong, ZHANG He, GU Shengming, *et al.* A dual-polarized cross-slot antenna array on a parallel-plate waveguide with compact structure and high efficiency[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(1): 8–11. doi: [10.1109/LAWP.2017.2767073](#).
- [18] 孟明霞, 丁晓磊, 丁克乾, 等. 双极化赋形波束波导缝隙阵列天线研究[J]. *遥测遥控*, 2014, 35(6): 16–19, 28. doi: [10.13435/j.cnki.ttc.002660](#).
- MENG Mingxia, DING Xiaolei, DING Keqian, *et al.* Design of dual polarized shaped beam waveguide slot array antenna[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2014, 35(6): 16–19, 28. doi: [10.13435/j.cnki.ttc.002660](#).
- 刘 斌: 男, 1978年生, 研究员, 研究方向为卫星数传通信类载荷。
谷胜明: 男, 1984年生, 高级工程师, 研究方向为相控阵天线、毫米波与太赫兹成像。
孟明霞: 女, 1984年生, 高级工程师, 研究方向为阵列天线、相控阵天线。
史永康: 男, 1978年生, 研究员, 研究方向为阵列天线、相控阵天线。
丁克乾: 男, 1976年生, 研究员, 研究方向为阵列天线、相控阵天线。
徐 磊: 男, 1979年生, 高级工程师, 研究方向为反射面和相控阵天线。
杨雨田: 男, 1982年生, 高级工程师, 研究方向为相控阵雷达结构与热力学。
陈筠力: 男, 1971年生, 研究员, 研究方向为星载SAR和InSAR系统设计。

责任编辑: 余 蓉