

星载高增益毫米波 SAR 相控天线阵设计

叶 声, 苏 醒, 张天乐, 徐显文, 张丽娜, 欧阳尚荣

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘 要: 介绍了一种高增益、高效率的星载毫米波合成孔径雷达(SAR)有源相控天线阵的设计。天线单元采用了窄边开缝的波导缝隙天线,辐射缝隙与波导宽边垂直,天线具有效率高、匹配良好的特点。在方位向,波导缝隙天线组成直线阵,直线阵内采用折叠的波导功分器降低了直线阵的剖面高度。在距离向,波导缝隙直线阵紧密排布,形成一维相扫阵列。定标网络及馈电网络均采用波导形式并集成于天线阵列背面,其中,定标网络通过定向耦合器改善了定标通道的一致性及带内起伏特性,馈电网络通过魔T结构改善各有源通道间的隔离度。以距离向84个直线阵为一个子阵列,最终设计的天线全阵在方位向共包含8个子阵列,总体尺寸是 $595.8\lambda_0 \times 56\lambda_0$ (λ_0 是中心频率在自由空间中的波长)。实测天线带内最高增益为54.37 dBi,辐射效率65.2%。天线阵列具有高增益、高效率的优点,同时结构简洁紧凑,适用于星载毫米波SAR系统。

关键词: 毫米波; 相控阵; 低剖面; 波导天线; 高增益; 合成孔径雷达(SAR)

中图分类号: TN 82

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.03.017

Design of Spaceborne High Gain Millimeter Wave SAR Phased Antenna Array

YE Sheng, SU Xing, ZHANG Tianle, XU Xianwen, ZHANG Lina, OUYANG Shangrong

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: The design of a spaceborne millimeter wave synthetic aperture radar (SAR) phased antenna array with high gain and high efficiency is introduced. The antennas are narrow wall slotted waveguide ones with high efficiency and good matching capacities, in which the radiation slots are vertical with the waveguide wide edges. In the azimuth direction, the slotted waveguide antennas form a linear array, and a folded waveguide divider is adopted to reduce the profile height of the array. In the range direction, several slotted waveguide linear antenna arrays are closely arranged to form a one-dimensional phase scanning array. The waveguide calibration network and feed network both adopt the waveguide form, and are integrated at the back of the antenna array. The directional coupler is adopted in calibration to improve the channel consistency, and the magic T structure is adopted in the feed network to improve the channel isolation. The whole antenna array contains 8 subarrays, each of which contains 84 linear arrays in the range direction. The total size of the whole array is $595.8\lambda_0 \times 56\lambda_0$, where λ_0 is the wavelength of the central frequency in free space. The measured maximum gain of the antenna in the band is 54.37 dBi, and the radiation efficiency is 65.2%. The antenna array has the advantages of high gain and high efficiency and a simple and compact structure, and is suitable for spaceborne millimeter wave SAR system.

Key words: millimeter wave; phased array; low profile; waveguide antenna; high gain; synthetic aperture radar (SAR)

0 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)因其全天候、全天时、高分辨的对地观测能力而广泛应用于微波测绘、遥感等领域,是目前最前

沿的对地观测技术之一^[1-6]。随着科学技术的不断发展,小型化、多功能化以及高度集成化将是未来SAR系统的发展趋势^[7-11]。天线位于SAR系统的最前端,其电性能直接影响了SAR的工作特性,其结

收稿日期:2022-02-28; 修回日期:2022-04-04

作者简介:叶 声(1983—),男,博士,工程师,主要研究方向为高效率阵列天线设计等。

构大小则往往决定了整机的集成度。毫米波天线具有结构尺寸小的优点,极大地缩小系统体积。然而毫米波频段的传输损耗也较大,天线子系统需要具有较高的增益来补偿链路上的损失^[12-13]。传统的金属反射面天线与喇叭天线具有增益高、效率高、宽带等性能,但天线的剖面往往过高,且需要一个较大的支撑结构,难以集成到小型化的系统中^[14-15]。基于介质材料的微带天线具有剖面低、易共形的优点,在各种军用民用等领域得到了广泛应用,如文献[16-18]采用电磁偶极子实现了宽带高增益的毫米波天线;文献[19-20]采用多层介质板过孔模拟了开口喇叭,所设计的天线单元在 60 GHz 频段增益大于 8 dBi。然而微带天线在毫米波频段的损耗会增加,当组成阵列时会影响阵列的辐射效率,因此阵列一般采用基片集成波导实现馈电网络^[21-22]。基于金属波导结构的缝隙天线具有损耗小、增益高、效率高的优点,且性能稳定,适于星载毫米波 SAR 系统设计。传统的波导窄边缝隙天线为了有效激励辐射场,辐射缝隙需要旋转一定的角度,抬高了天线交叉极化电平^[23-25]。此外,对有源通道数目较大的相控阵天线,阵面与射频前端之间仍需通过大量的射频连接器及同轴电缆连接,一方面增加了损耗,降低了天线的实际增益,另一方面提高了系统的复杂度。

本文围绕星载毫米波 SAR 对于高性能天线子系统的需求,研究设计了高增益高效率的波导缝隙相控阵天线。天线采用与波导宽边垂直的辐射缝隙结构,同时优化设计了波导馈电及定标网络。

1 天线单元与直线阵

天线单元结构如图 1 所示,天线采用金属波导缝隙结构。单元缝隙开在了波导的窄边,波导的尺寸为 $a \times b$,壁厚为 0.8 mm。与传统的倾斜缝隙天线不一样,这里采用非倾斜缝隙结构,即辐射缝隙方向与波导宽边方向垂直^[26]。缝隙切入波导宽边的深度为 t ,缝隙的宽度为 W 。为了有效激励起波导内的辐射模式,在每个缝隙的两端加入金属扰动块。扰动块长为 L_s ,宽为 W_s ,高度为 H_s 。相邻缝隙的扰动块成反对称放置。图 1 中显示了单元数为 2×12 的一段直线阵,为了保证阵列口径的均匀性,直线阵内缝隙的参数一致,各缝隙均匀排布,间距为 d 。能量从波导的一端馈入,波导的另一端短路,各缝隙等效为串联馈电。

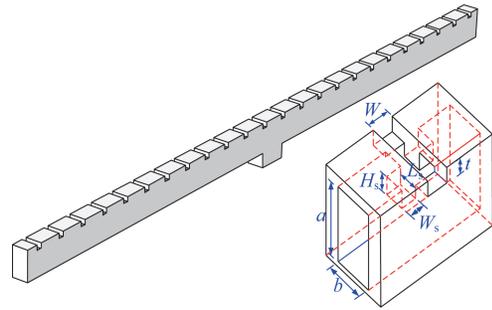


图 1 天线单元及直线阵图

Fig. 1 Diagram of the antenna element and the linear antenna array

为了保证阵列的紧凑特性,选用减高波导,尺寸为 $a=0.6\lambda_0$, $b=0.25\lambda_0$ 。各缝隙等幅同相馈电,因此缝隙间距 d 为 $\lambda_g/2$ (λ_g 为中心频率的波导波长)。根据缝隙的谐振条件,由如下公式确定缝隙切入的深度 t :

$$2 \times t + b = \lambda_g / 2 \quad (1)$$

扰动块的高度 H_s 及长度 L_s 决定了波导对其所在辐射缝隙的馈电能量大小,同时又影响着端口的阻抗特性。采用商业仿真软件 HFSS 对直线阵进行建模并仿真 H_s 及 L_s 对于直线阵驻波的影响,直线阵含 24 个缝隙单元,并从中心馈电,仿真结果如图 2 和图 3 所示。随着 H_s 从 $0.13\lambda_0$ 增加到 $0.17\lambda_0$,天线中心频率的电压驻波比 (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR) 从约 2.5 开始下降,在 $H_s=0.15\lambda_0$ 有最小值 1.1,随后增大至 >3 。随着 L_s 从 $0.09\lambda_0$ 上升至 $0.13\lambda_0$,中心频率的 VSWR 下降再上升,在 $L_s=0.11\lambda_0$ 时,带内的 VSWR 平均较小。单元的最终结构参数见表 1。

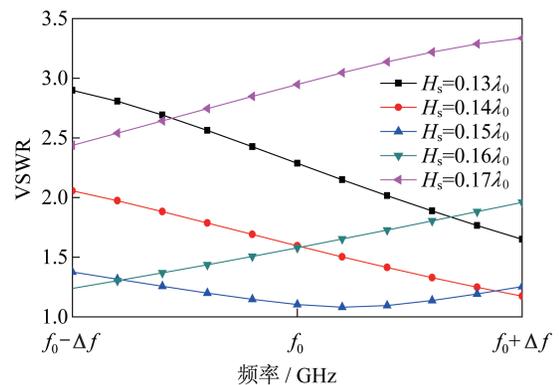


图 2 不同 H_s 对直线阵 VSWR 的影响

Fig. 2 Effects of H_s on the VSWR of the linear antenna array

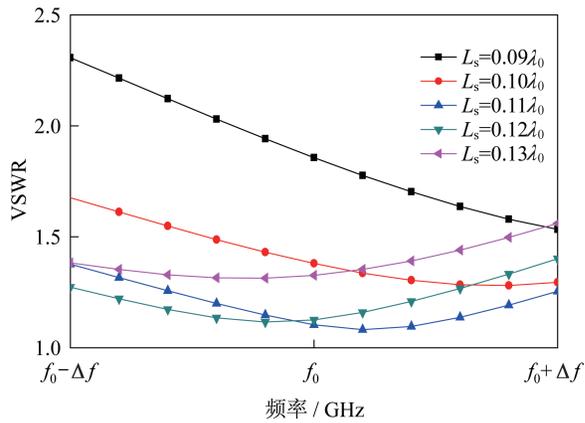


图 3 不同 L_s 对直线阵 VSWR 的影响

Fig.3 Effects of L_s on the VSWR of the linear antenna array

表 1 天线单元结构参数

Tab.1 Parameters of the antenna element

参数	a	b	H_s	L_s	W_s	t	W
值	$0.6\lambda_0$	$0.25\lambda_0$	$0.15\lambda_0$	$0.11\lambda_0$	$0.06\lambda_0$	$0.04\lambda_0$	$0.12\lambda_0$

由所设计的直线阵沿长边放置,结合波导功分器可在方位向组成更大的直线阵列以得到更高的增益。功分网络有 2 种实现形式,如图 4 所示。若采用 H 面 T 型结波导功分器,两级功分器高度过高,如图 4(a) 所示。若采用 E 面 T 型结波导功分器,通过在波导的宽边进行折叠,能有效降低了整体功分器的高度,如图 4(b) 所示。

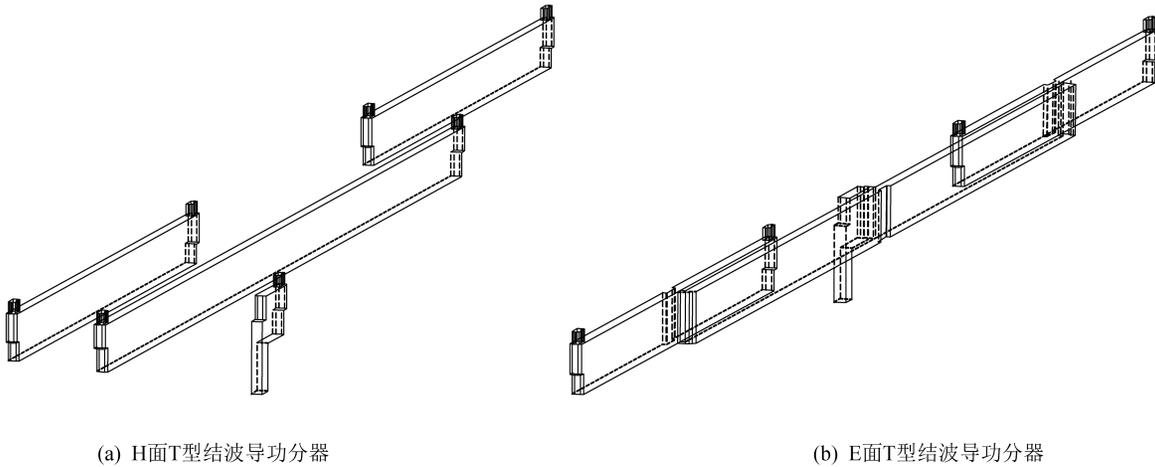
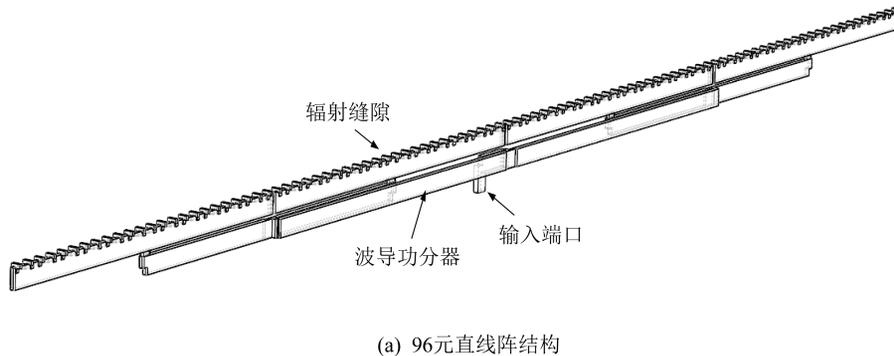


图 4 T 型结波导功分器

Fig.4 T-junction waveguide power divider

最终设计的天线直线阵列如图 5(a) 所示,阵列含 96 个缝隙单元。仿真结果如图 5(b) 和图 5(c) 所示,直线阵的电压驻波比在带内小于 1.3。阵列的仿

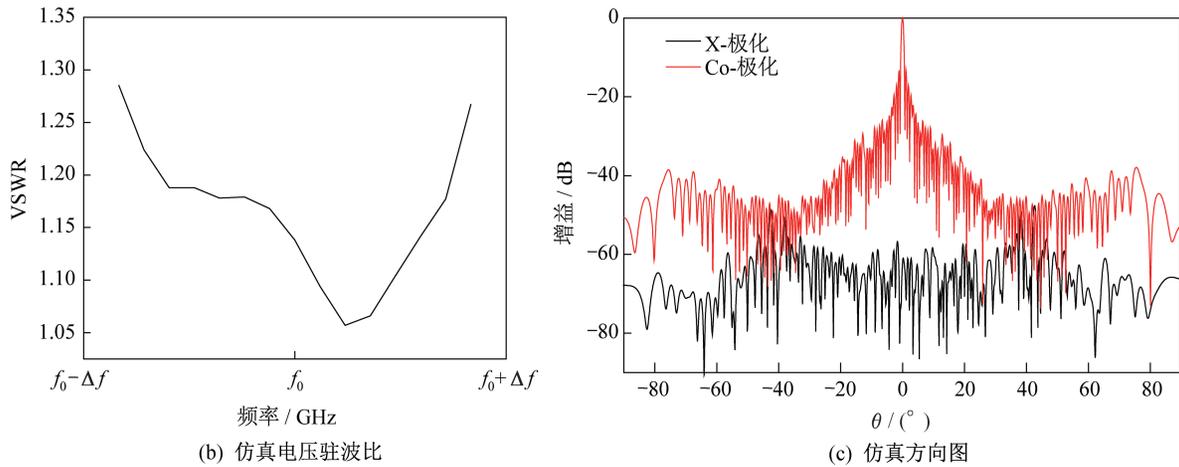
真增益为 27 dB,仿真的主极化(Co-极化)和交叉极化(X-极化)方向图的对比如图 5(c) 所示,交叉极化小于 -47 dB,表明天线具有良好辐射特性。



(a) 96 元直线阵结构

图 5 96 元直线阵结构及仿真性能

Fig.5 Structure of the 96-element linear array and its simulated performance



续图 5 96 元直线阵结构及仿真性能

Continued fig. 5 Structure of the 96-element linear array and its simulated performance

2 天线子系统

2.1 系统布局

有源相控阵天线的组成框架如图 6 所示。相控阵沿方位向由 1×8 个子阵列组成,每个子阵列内包含 84 个直线阵,沿距离向并排放置,间距为 $0.67\lambda_0$,每个直线阵后端接 T/R 组件形成有源通道,全阵共 672 个有源通道。天线收发分时工作,通过 T/R 组

件的内置开关进行收发状态切换,全阵的 T/R 组件通过馈电网络进行连接,并汇总至雷达信号输入/输出端口。相控阵前端包括天线直线阵、T/R 组件、子阵列的馈电及定标网络和全阵列的馈电及定标网络。各部组件的连接关系如图 6 所示。在天线直线阵的端口集成了耦合器,定标信号由耦合器进入有源通道或从有源通道输出至终端,从而能对各通道的幅相特性进行在轨监测。

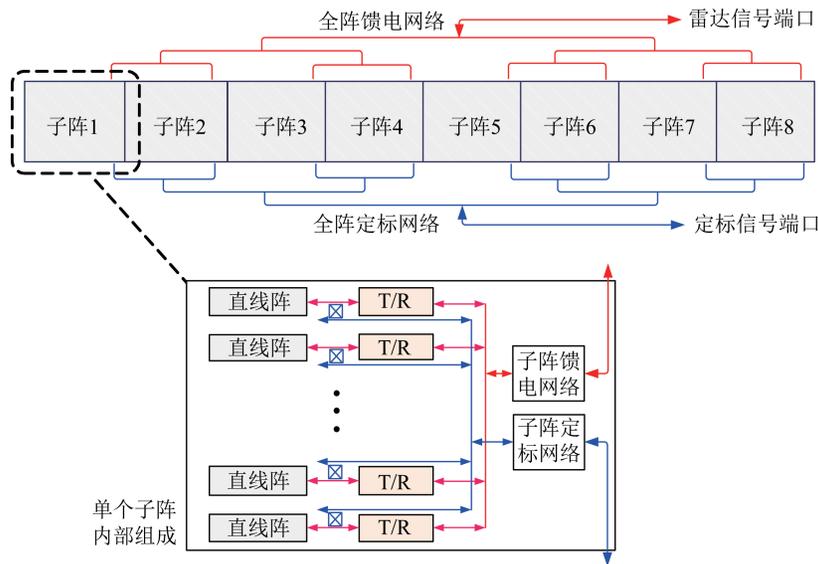


图 6 相控阵天线框架

Fig. 6 Diagram of the phased antenna array

图 6 所示的相控阵包括了数量众多的直线阵、T/R 组件、馈电及定标网络,各部组件之间的连接是影响阵列集成的关键因素。若采用传统的同轴电缆进行射频连接,则需大量的电缆及转换接头,存在以

下不足:提高了阵列内的传输损耗及噪声;提高了阵列的复杂度,扩大了占用空间;降低了通道间的一致性;提高了加工成本,尤其是部分电缆需严格配相;各电缆间相互缠绕,存在电磁兼容方面的风险。

为了克服所述的不足之处,这里采用波导功分器来实现所有的射频传输网络,并从结构上考虑和波导天线阵面紧集成。在连接上,T/R组件采用盲插的射频接头,并以整个天线阵作为安装载体,紧扣于天线背面;天线和射频网络的连接则采用标准的波导端口,各个网络以天线阵面作为安装载体,集成于阵面背面。通过此方式,整个射频前端紧密的集成在一起,且不需要使用同轴电缆。

2.2 波导网络

天线的射频网络主要包括定标及馈电网络。对于子阵列内的定标网络,其耦合端口设置在直线阵的馈电端口。定标过程如下:发射定标时,T/R

组件的输出射频信号大部分经波导管进入直线阵并往外辐射,小部分作为定标信号经波导管上的耦合口进入定标网络并传输至SAR的后端处理单元,接收定标过程则与上述相反。实际工作时,由于天线本身无法实现完全的阻抗匹配,馈往直线阵的返回波也会通过耦合端口进入定标网络形成干扰信号,从而恶化各定标通道的一致性及其带内起伏特性。本方案使用紧凑的定向耦合器对干扰信号进行隔离,如图7(a)所示。波导管上设置了两个耦合小孔,从辐射端口返回的干扰信号经耦合口进入定标波导时,将馈往匹配层并被吸波材料吸收。使用HFSS对该耦合器进行仿真如图7(b)所示,耦合系数在带内起伏小于0.3 dB。

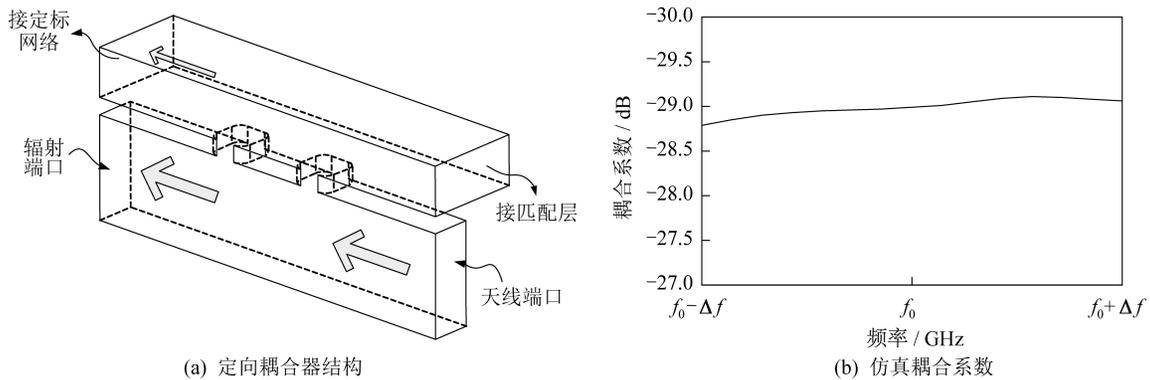


图7 定向耦合器结构图及仿真的耦合系数

Fig. 7 Directional coupler structure and simulated coupling coefficients

子阵的定标网络最终设计如图8所示。网络是一个84路的功分器,由若干波导T形结级联组成。

定向耦合器集成在功分器的末端,通过耦合端口与84路天线直线阵连接。

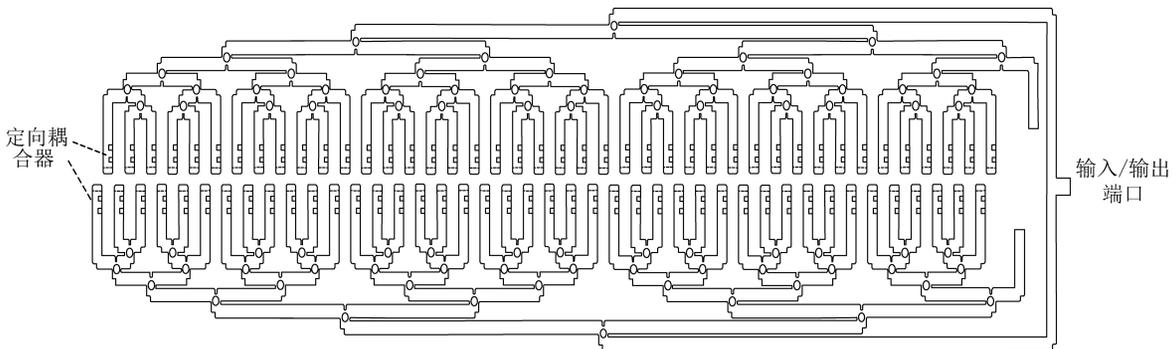


图8 子阵定标网络结构

Fig. 8 Structure of the subarray calibration network

子阵内的馈电网络由多级T形结功分器进行级联而成。为了保证各有源通道之间相互隔离,T形结功分器采用波导魔T结构,如图9(a)所示,仿真的S参数如图9(b)所示,在带内反射系数小于

-25 dB,隔离度大于20 dB,在中心频率大于35 dB。最终合成的子阵馈电网络结构为一个28路的功分器,如图10所示,各分端口分别接一个3通道的T/R组件。

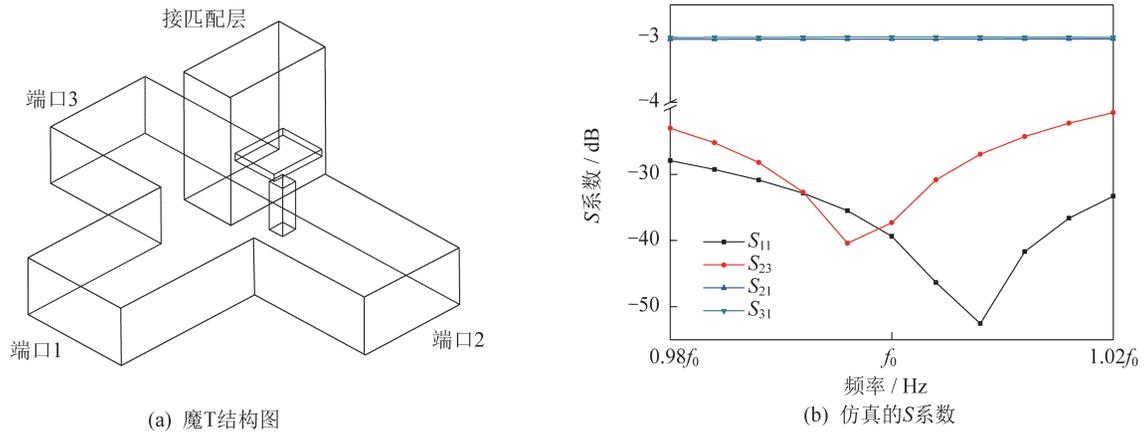


图 9 魔 T 结构及仿真 S 系数

Fig. 9 Magic T structure and simulated S parameters

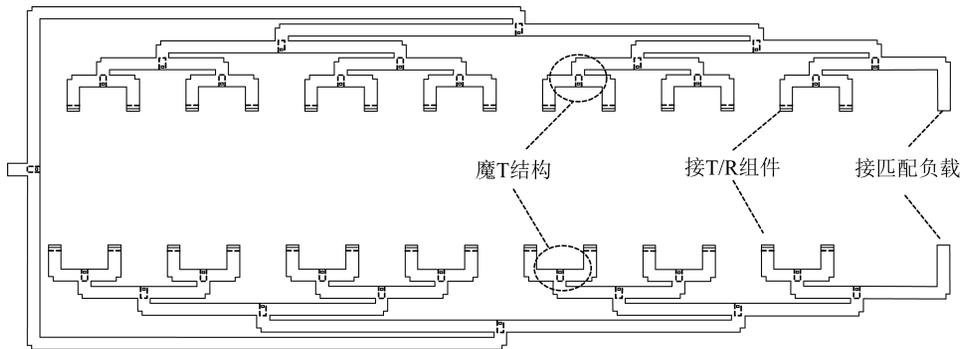


图 10 子阵馈电网络结构

Fig. 10 Structure of the subarray feed network

全阵的馈电及定标网络均为 8 路的波导功分器,类似地,由多级 T 型结功分器组成,T 型结采用波导魔 T 结构。全阵与子阵的不同网络之间的连接通过 BJ320 标准波导接口进行装配。

2.3 系统集成

基于所设计的天线与波导网络,一个用于星载毫米波 SAR 的相控阵天线射频前端结构如图 11 所

示。其中子阵的定标及馈电网络与 84 路直线阵集成一体化加工并焊接,以减少人工装配带来的误差,最终形成 8 个子阵列。各子阵列先安装在碳纤维框架上,T/R 组件通过 SMP 接插件平扣于子阵背面,中间是配以控温的铝蜂窝金属板。全阵的馈电及定标网络跨过碳纤维框架并与各个子阵列内的网络端口连接,两者通过金属螺钉紧密固定,最终形成完整阵面。整个天线子系统不使用射频同轴电缆,结构紧凑,传输损耗小且各通道一致性良好。

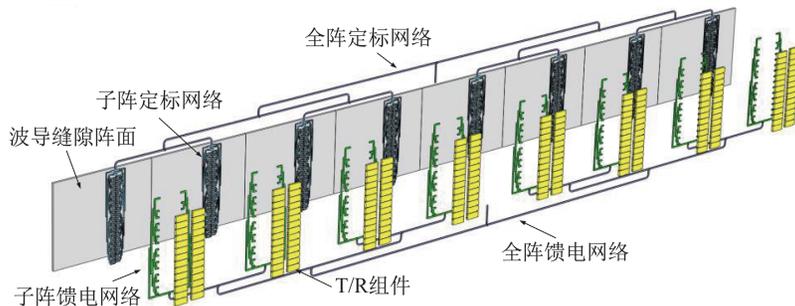


图 11 天线全阵的装配

Fig. 11 Assembly diagram of the antenna array

3 实验结果及分析

对天线进行加工,实物如图 12 所示。方向图测试在平面近场进行。由于天线是收发共阵,接收、发射分时工作,测试过程中,利用探头分别测得每路收/发通道的相位及幅度,然后对组件的收/发通道进行移相和衰减,最后分别测出天线的近场电场数据,并推算出对应的远场方向图。当天线工作在接收状态时,测试结果如图 13 所示。当天线工作在发射状态时,测试结果如图 14 所示。图中同时给出了阵列在距离向扫描至 15° 时的方向图。实测方向图与仿真基本吻合,扫描范围内旁瓣小于 -12 dB,差异主要是由加工精度及有源器件工作状态的不一致性导致的。采用标准增益喇叭作对比测试可得到阵列天线的等效全向辐射功率(Effective Isotropic Radiated Power, EIRP)值,由于各 T 通道的发射功率值为已知值,

取全阵平均值得 P 值,根据 $EIRP=G+P$ 可计算天线的增益值 G ,天线的增益约为 54.37 dBi,口径效率 65.2% ,表明了天线设计的有效性。

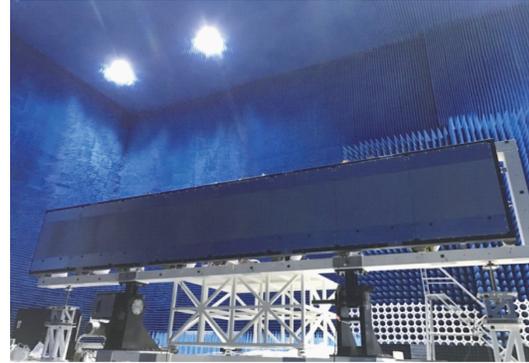


图 12 全阵天线子系统集成的结构

Fig. 12 Structure of the whole antenna array subsystem integration

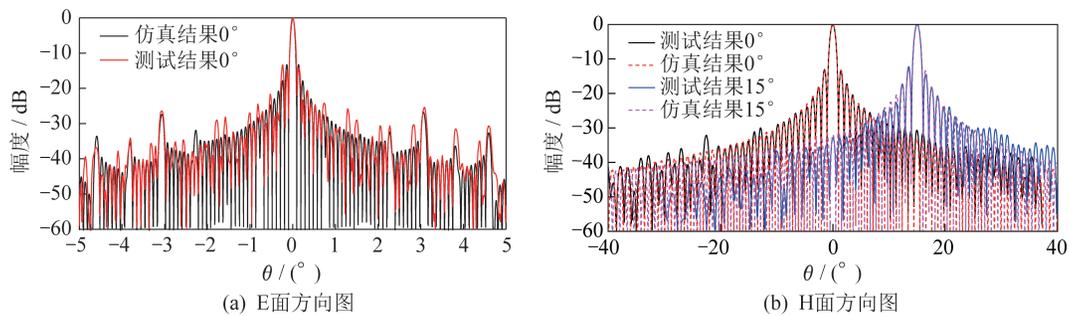


图 13 阵列天线工作在接收时的方向图

Fig. 13 Farfield patterns of the antenna array at the receiving state

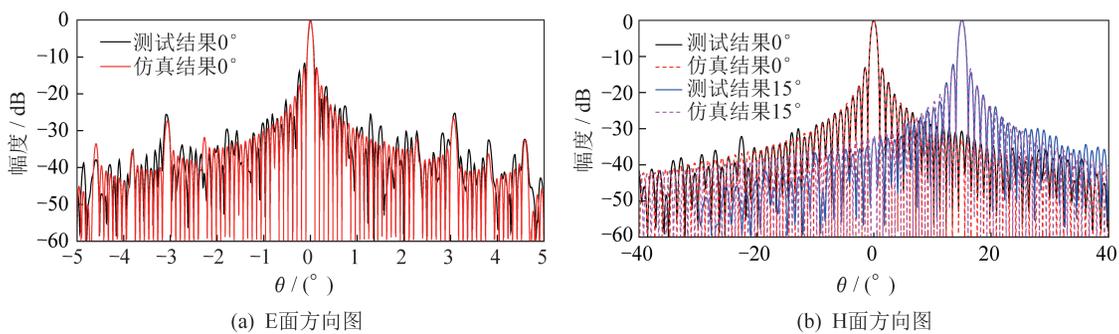


图 14 阵列天线工作在发射时的方向图

Fig. 14 Farfield patterns of the antenna array at the transmitting state

4 结束语

本文介绍了一个结构紧凑的高增益星载毫米波 SAR 有源相控阵天线设计。天线采用了非倾斜辐射缝隙的波导窄边开缝结构,提高了直线阵的增益,进一步采用波导结构设计天线的馈电网络及定

标网络,减小了网络的传输损耗并提高了各通道的一致性。

仿真及实测的结果均表明,所设计的相控阵天线具有高增益、高效率特性,且天线在距离向具有 $\pm 15^\circ$ 的扫描能力,天线在结构上具有紧凑、低剖

面的优点,所设计的天线子系统可以用于未来的星载毫米波SAR系统中。

参考文献

- [1] AMANI M, GHORBANIAN A, ASGARIMEHR M, et al. Remote sensing systems for ocean: a review (part 1: passive systems) [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15(1): 210-234.
- [2] ZHANG H, LEI L, NI W, et al. Explore better network framework for high-resolution optical and SAR image matching [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60(1): 1-18.
- [3] ZHU X X, MONTAZERI S, GISINGER C, et al. Geodetic SAR tomography [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(1):18-35.
- [4] 顾约翰,陶佳慧,张瑞港,等.机载毫米波InSAR获取DEM[J].上海航天,2021,38(增刊1):20-25.
- [5] 陈翔,王辉,郑世超,等.双星Ka波段调频连续波SAR技术研究[J].上海航天,2021,38(增刊1):61-66.
- [6] 王辉,袁英男,郑世超,等.Ka波段调频连续波SAR综合信息获取需求分析[J].上海航天,2021,38(增刊1):49-55.
- [7] 付玉龙,王辉,李金亮,吴思利,等.毫米波高精度干涉SAR卫星及关键技术[J].上海航天,2021,38(增刊1):8-12.
- [8] 李春升,王伟杰,等.星载SAR技术的现状与发展趋势[J],电子与信息学报,2016,38(1):229-240.
- [9] ZHAO L B, LIU J, ZHAO C J, et al. Considerations of spaceborne SAR system design [C]// IET International Radar Conference. Xi'an, China: IEEE Press, 2013:1-6.
- [10] 张润宁,王旭莹,王志斌.星载高分宽幅SAR技术发展趋势分析[J].航天器工程,2022,31(1):1-9.
- [11] 王辉,赵凤军,邓云凯.毫米波合成孔径雷达的发展及其应用[J].红外与毫米波学报,2015,34(4):452-459.
- [12] WANG H, DAI S, ZHENG S, et al. Moving target detection method of the Ka FMCW SAR based on DPCA [C]// Signal Processing Symposium (SPSymo). Serock, Poland: IEEE Press, 2017:1-4.
- [13] WANG H, DAI S, ZHENG S. Airborne Ka-band digital beamforming SAR system and flight test [C]// International Workshop on Remote Sensing with Intelligent Processing (RSIP). Shanghai, China: IEEE Press, 2017:1-4.
- [14] ZHOU M, PALVIG M F, SØRENSEN S B, et al. Design of Ka-band reflectarray antennas for high resolution SAR instrument [C]// 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Copenhagen, Denmark: IEEE Press, 2020:1-5.
- [15] 马小飞,李洋,肖勇,等.大型空间可展开天线反射器研究现状与展望[J],空间电子技术,2018,2(1):16-26.
- [16] LI M J, LUK K M. Wideband magneto-electric dipole antenna for 60 GHz millimeter-wave communications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(7):3276-3279.
- [17] ZHANG N, YUE Z, LIU Y, et al. A wideband low-profile millimeter-wave magneto-electric dipole-like array with low transmission loss feed network [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(2): 277-281.
- [18] CHANG Y C, HSU C C, MAGRAY M I, et al. A novel dual-polarized wideband and miniaturized low profile magneto-electric dipole antenna array for millimeter-Wave 5G applications [J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2021, 2(1): 326-334.
- [19] GHASSEMI N, WU K. Millimeter-wave integrated pyramidal horn antenna make of multilayer printed circuit board (PCB) process [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(9):4432-4435.
- [20] GONG L, FU Y, CHAN K Y, et al. An SIW horn antenna fed by a coupled mode emulating pyramidal horn antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(1):33-42.
- [21] PARK S J, PARK S O. LHCP and RHCP substrate integrated waveguide antenna arrays for millimeter-wave applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16(1):601-604.
- [22] MENCARELLI D, MORINI A, PRUDENZANO F, et al. Broadband single-layer slotted array antenna in SIW technology [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15(1): 263-265.
- [23] LI T, MENG H, DOU W. Design and implementation of dual-frequency dual-polarization slotted waveguide antenna array for Ka-band application [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13(1):1317-1320.
- [24] 史嘉,丁君,兰建锋,等.新型X波段波导缝隙阵列天线的设计[J].微波学报,2016,32(3):6-10.
- [25] 邵特,房少军,傅世强,等.一种波导窄边裂缝天线缝隙倾角的改进方法[J].电波科学学报,2018,33(1):21-26.
- [26] 鲁加国,张洪涛,汪伟,等.一种双频多极化共口径波导天线阵列[J].西安电子科技大学学报,2022,49(2):1-7.