DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.01.006

小型化星载 Ku 频段宽带扇形波束圆极化天线

李 姣,郝文倩,张虎勇,李 果

(中国电子科技集团公司第三十九研究所,西安 710065)

摘 要:为适应星载天线小型化、宽带、高性能的发展趋势,提出一种小型化星载 Ku 频段宽带扇形 波束圆极化天线。通过在 H 面扇形喇叭口处加入曲折线圆极化器实现天线圆极化,将传统平面圆 极化器变为半圆柱形,天线的包络尺寸减小近 36%。同时,在喇叭口处增加介质透镜,在有限尺寸 内将球面波调节为平面波。半圆柱极化器和介质透镜的设计可共同调节入射波束角度,提升天线 的宽角波束覆盖性能。利用 CST 软件建立模型进行仿真,仿真结果表明:天线结构紧凑、波束覆盖 范围宽,俯仰面大于 11.3 dBi 的增益覆盖范围达 90°。半圆柱极化器的设计为星载天线的小型化、 低成本设计提供新的思路。

关键词:小型化;扇形波束夭线;曲折线 中图分类号:TN82;V443 文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2023)01-0035-06

Compact spaceborne Ku-band broadband fan-beam circular polarized antenna

LI Jiao, HAO Wenqian, ZHANG Huyong, LI Guo (No. 39 Research Institute of CETC, Xi'an 710065, China)

Abstract: A compact spaceborne Ku-band wideband fan beam circularly polarized antenna is proposed in this paper. It has a meander-line polarizer (MLP) which located in front of the horn to achieve circular polarized characteristics. By using a semi cylindrical circular polarizer, the size of the antenna is reduced by nearly 36%. Meantime, to adjust the spherical wave to a plane wave within a limited size, a dielectric lens is added at the edge of horn. The design of semi cylindrical polarizer and dielectric lens can jointly adjust the incident beam angle and improve the wide-angle beam coverage performance of the antenna. To validate the design theory, a Ku-band circular polarized antenna is designed and simulated by CST. The antenna has compact structure and wide beam gain is greater than 11.3 dBi which the beam width of the elevation plane is more than 90°. The design of semi cylindrical polarizer provides a new idea for the miniaturization and low-cost design of spaceborne antenna.

Key words: compact; fan-beam antennas; meander-line

0 引言

近年来,随着雷达系统、电子对抗以及卫星通 信系统的飞速发展,扇形波束天线在测高设备、星 载辐射计、星载反射面、移动通信基站、室内局域无 线网络等方面应用愈加广泛。为了调高目标的搜 索和识别能力,对扇形波束天线的要求也越来越高。设计在两个主平面波束宽度宽窄比大、小型化、宽带的圆极化扇形波束天线具有重要意义^[1-3]。 目前常见的扇形波束的天线主要有3种^[4-10]: 反射面式、阵列式及诱镜式扇形波束天线。反射面

收稿日期:2022-05-10; 修回日期:2022-08-05

基金项目:陕西省科技厅一般项目 - 工业领域(编号:2021GY - 105)

引用格式:李姣,郝文倩,张虎勇,等. 小型化星载 Ku 频段宽带扇形波束圆极化天线[J]. 空间电子技术,2023,20(1):35-40. LI J,HAO W Q, ZHANG H Y, et al. Compact spaceborne Ku band broadband fan-beam circular polarized antenna[J]. Space Electronic Technology, 2023,20(1):35-40.

式扇形波束天线体积较大、重量较重;阵列式扇形 波束天线带宽窄、结构复杂:透镜式扇形波束天线 介质材料损耗大,重量也相对较重,目前的扇形波 束天线多为线极化天线,圆极化天线较少,文献 [11]利用圆极化喇叭和透镜实现圆极化扇形波束, 尺寸大,重量较重。而文献[12-13]利用曲折线极 化器实现圆极化,但其为平面极化器,尺寸较大,且 未实现扇形波束。本文提出的一种小型化星载 Ku 频段宽带扇形波束圆极化天线,其结构紧凑、包络 尺寸小、重量轻、俯仰面的波束宽度大于100°,大幅 提升宽角波束覆盖区域,与以往通过波导圆极化器 来实现圆极化方式不同,本设计将传统平面圆极化 器改变为曲面实现圆极化性能,通过半圆弧的曲面 构型和喇叭天线中的透镜,将入射波由球面波调节 为平面波,天线的包络尺寸缩小近36%,提升天线 的宽角波束覆盖性能。

1 天线设计

H 面扇形喇叭天线可以通过逐渐增大波导宽边 保持窄边不变实现扇形波束,通过这种渐变方式,波 导阻抗与空气阻抗能很好的匹配,喇叭口处嵌入红色 部分的三层透镜组件,第一层和第三次的介电常数为 2,第二层的介电常数为4,喇叭口面四周有一圈扼流 槽,可对喇叭的口面电流进行调节。H 面扇形喇叭天 线的几何结构和参数如图1所示,根据文献[14]可以 得到各个参数的取值。如式(1)、(2)、(3)所列,其中 A为喇叭口面宽度, $R_{\rm H}$ 为喇叭深度, $2\alpha_{\rm H}$ 为喇叭张角, $L_{\rm H}$ 为扇形喇叭锥角顶点到口面的长度, $R_{\rm I}$ 为扇形喇 叭锥角顶点到口面的距离。





图1 H 面扇形喇叭几何模型图



$$L_{\rm H}^2 = R_1^2 + (\frac{A}{2})^2 \tag{1}$$

$$\alpha_{\rm H} = \tan^{-1}(\frac{A}{2R_1}) \tag{2}$$

$$R_{\rm H} = (A - \alpha) \sqrt{\left(\frac{l_{\rm H}}{A}\right)^2 - \frac{1}{4}} \tag{3}$$

喇叭口面上增加扼流槽,扼流槽由套在喇叭外 沿的沟槽来实现,槽深一般为1/4 波长,中心波导内 传输 TE₁₀模,喇叭开口辐射电流丰要包括波导内壁 电流、喇叭开口电流、喇叭外壁电流。喇叭外壁电 流对天线的方向图影响很大,采用扼流槽可以控制 喇叭口外壁电流,以达到方位面降低副瓣的目的。

由于H面扇形波导的口面相差较大,在喇叭天 线内嵌入介质透镜,通过合理设计透镜表面的形状 和介质的介电常数,选择损耗低的介质作为透镜材 料,透镜形状中间厚,四周薄。从扇形喇叭口辐射 出的球面波经过透镜后减速,球面波在透镜中间部 分路径长,四周部分路径短。因此,球面波经过透 镜后就变成平面波,辐射变成定向的,调节喇叭口 面辐射出电磁波的相速,将球面波调节为平面波, 如图2所示,调节后的平面波经过多层曲折线实现 圆极化特性。



图 2 介质透镜工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of dielectric lens

多层曲折线圆极化器的基本原理是入射波 的平行分量(平行于曲折线的轴线)和垂直分量 经过极化器后的传输系数的幅度相位不一致。 相当于对平行分量和垂直分量分别进行了加权, 加权后可以实现任意极化到任意极化的转换。 极化器通常是多层金属层级联结构,其中金属层 等效为一个电纳,介质层等效为一段传输线。该 极化器是由多层曲折线栅片间隔一定距离而形 成的,间隔部分采用介质泡沫进行填充。为了避 免直接照射平面多层曲折线极化器产生的入射 波的入射角度混乱,缩减整个天线包络的同时更 好的匹配喇叭口辐射出的平面波。平面曲折线 极化器可实现该功能,但平面曲折线极化器包络 尺寸较大,为了有效减小包络尺寸,该设计采用4 层半圆柱形的柱面曲折线栅片,将喇叭天线的线 极化转变为圆极化,如图3所示。





2 天线仿真分析

根据上述理论进行仿真设计和优化,整个设计 过程首先设计了H面扇形喇叭天线,其次通过喇叭 口的透镜尺寸调整电磁波相速度,再次加入平面曲 折线极化器改变天线的极化,最后为了减小天线的 包络尺寸,将平面曲折线极化器设计为半圆柱形曲 折线极化器,天线包络由原来的110 mm×125.6 mm ×219 mm,缩小为114 mm×80 mm×219 mm,整个天 线的包络尺寸缩小了 36%,设计过程如图 4 所示。 喇叭天线不加透镜和加透镜的方向图仿真曲线对 比如图 5(a)所示,仿真结果表明加入透镜后天线增 益变高,验证了透镜对电磁波的相位调节作用。天 线分别加平面极化器和半圆柱极化器的仿真曲线 对比如图 5(b)所示,仿真结果可以看出天线加平面 极化器和曲折线极化器的性能基本相当,但曲折线 极化器可以有效减小天线的包络,天线更加紧凑。



图4 天线设计过程示意图





图 5 天线设计过程中方向图对比曲线

Fig. 5 Comparison simulated pattern of antenna design process

天线优化后的设计模型如图 6 所示, 仿真 结果曲线如图 7、图 8 所示。天线综合设计性能 预估值如表 1 所列。根据天线仿真设计结果, Ka频段宽度扇形波束圆极化天线的整个带宽 内的驻波比 ≤ 1.85, 天线轴向增益 ≥ 11.98 dBi, ± 45°内的E面增益 ≥ 11.31 dBi, ±4°内的H面增益 ≥ 11.15 dBi;俯仰面高增益 波束宽度达 90°以上。

表 1 天线性能仿真结果 Tab. 1 Result of the simulated antenna

频率/GHz	轴向增益/dBi	E 面增益预估/dBi(±45°)	H 面增益预估/dBi(±4°)	轴比/dB	驻波比
12.75	11.98	11.97	11.15	≤3.5 dB	
15.275	13.08	12.46	12.10	$(13.75 \sim 14.5 \mathrm{GHz})$	≤1.85
17.8	13.70	11.31	12.02	≤4.4dB(其他频段)	



图 6 Ku 频段扇形波束圆极化天线仿真模型图 Fig. 6 Simulation model of proposed Ku-band wideband fan beam circularly polarized antenna



图 7 Ku 频段天线驻波比仿真曲线

Fig. 7 Simulated VSWR result of Ku-band antenna



图 8 圆极化天线不同频点的方向图和轴比仿真曲线

Fig. 8 Simulated pattern and AR results of the proposed circularly polarized antenna with different frequencies

如表2所列,对比了本天线和其他两种不同的 扇形波束天线的性能,本文提出的天线为波导形 式,在相同频段下与微带阵列相比横向尺寸较小, 与微带天线单元相比具有更宽的带宽和较高的 增益。

Tab. 2 Comparison with some reported Fan-beam antennas								
	天线形式	频段/GHz	有效尺寸 $/\lambda_0$	3 dB 波束宽度/(°)	轴向增益/dBi			
文献[8]	微带阵列	9.5~10.9	11.450 × 10.178 × 0.095	60°/10°	≥18.2			
文献[15]	微带单元	5.7~5.9	0.25×0.25	160°/45°	≥3.6			
本文设计	喇叭天线	12.75~17.8	5.8×4.07×11.15	100°/10°	≥11.9			

表 2 不同扇形波束天线对比

3 天线的星载结构设计

天线的结构组成分为两部分,主要由宽角线极 化喇叭加多层曲折线圆极化器组成。天线总重量 约 0.4kg,外形包络尺寸为 114 mm × 80 mm × 219 mm,其整体结构外形如图 9 所示。



Fig. 9 Structure of the proposed antenna

宽角线极化喇叭天线采用波导腔体馈电方式, 主要由波导同轴转换、台阶过渡、锥形过渡、喇叭口 及透镜组成。波导同轴转换采用标准外购件,并提 供天线对外电气接口。台阶过渡、锥形过渡、喇叭 口均由铝合金板材机加工成形,并采用螺钉连接方 式安装固定。透镜组件用聚酰亚胺材料制成,内外 两层介电常数和密度、强度不同,上表面紧贴喇叭 口凸台,下表面端部卡在锥形过渡口,安装透镜时 在其表面与铝合金制件之间涂沫 J133 胶固定。

圆极化器采用多层曲折线覆铜板制成,厚度 0.2 mm,其柔性保证可以弯曲成柱状,采用基材蚀 刻法在铜箔上加工曲折线,4 层覆铜板用4层聚酰 亚胺泡沫材料支撑,形成图7所示的夹层结构,夹层 之间用胶粘法固定,胶膜厚度控制在0.1 mm 以内, 泡沫材料介电常数很小为1.13~1.14,其中内层实 心,加工有凹槽与喇叭口相配。圆极化器与喇叭用 支口结构、胶粘以及绳索绑扎浸胶组合方式固定, 在保证连接可靠性的前提下尽量避免金属连接件 的使用,从而减小对电性能造成的不良影响。整个 设计均采用具有飞行经历的原材料,具有良好的星 载环境适应性。

4 结论

本文设计了一种小型化星载 Ku 频段宽带扇形 波束圆极化天线,体积小、重量轻、便于加工制作。 该天线带宽大于 1.4 倍频,采用锥形过渡的 Ku 频 段线极化喇叭和透镜组件实现扇形波束覆盖,利用 柱面曲折线极化器实现了圆极化特性,同时,大幅 缩小天线的包络尺寸,增大天线的波束覆盖区域, 实现宽角扇形波束内的高增益效果。

参考文献:

- [1] 郎姝燕,林文明.星载微波散射计两种体制的比较[J]. 海洋技术学报,2017,36(1):19-23.
- [2] 林文明.星载扇形波束扫描微波散射计系统研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中 心),2011.
- [3] 王建晓,尚社,宋大伟,等.星载反射阵天线应用现状与 发展趋势[J].空间电子技术,2021,18(4):45-52.
- [4] 林岩. 一种能产生扇形波束的赋形抛物面天线[J]. 火 力与指挥控制,2008,33(2):124-126.
- [5] 林岩. 一种新型扇形波束天线[J]. 微波学报,2003,19 (3):63-66+91.

- [6] 夏燕超,王彦,郭灵.一种 X 波段扇形波束天线的设计 与仿真[J].机电工程技术,2022,51(4):85-88.
- [7] 周云峰. 一种扇形波束微带阵列天线: CN209929464U [P]. 2020-01-10.
- [8] WANG H, DONG X F, SHEN J, et al. Fan-beam antenna design based on metasurface lenses[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2021,31(4):1-8.
- [9] WU X D, LAURIN J J. Fan-beam millimeter-wave antenna design based on the cylindrical luneberg lens [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(8): 2147-2156.
- [10] 孔祥辉. 高增益透镜加载扇形波束天线[D]. 西安: 西

安电子科技大学,2014.

- [11] 廖元寿. 新型宽带扇形波束圆极化天线[J]. 电子对抗 技术,1992,7(6):1-5.
- [12] 任王,吴锡东,刘国栋. Ka 频段回折线型宽带圆极化器 设计[J]. 微波学报,2012,28(S1):86-88.
- [13] 商锋,樊红宛,李亚军. 宽带曲折线圆极化器的分析与 设计[J]. 西安邮电大学学报,2017,22(5):78-83.
- [14] WARREN L S, GARY A T. 天线理论与设计[M]. 朱守 正,安同一,译. 北京:人民邮电出版社,2006.
- [15] MADDIO S. A novel circularly polarized fan-beam antenna for 5.8 ghz dsrc applications [J]. Progress in Electromagnetics Research M,2020,98:55-65.
- 作者简介:李姣(1990—),陕西合阳人,硕士,工程师。主要研究方向为星载天线及微波无源器件设计。 E-mail:jiaoli_xd@ foxmail.com