

可折叠宽带米波双极化相控阵天线设计

张娜曼*, 逯建伟, 张洪银, 卜宸, 闫开

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要:米波雷达,尤其是高机动米波双极化雷达,在地面防空系统中担任着重要角色。由于工作频率低、波长长,致使米波雷达天线阵列结构尺寸庞大笨重。兼顾实现良好的多功能电性能以及轻便、高机动性的阵列结构致使天线设计面临很大困难和挑战。为了解决天线阵面大工作口径与小运输口径需求之间的矛盾,文中以实现高机动天线阵列为目标,针对天线选型和可折叠结构设计展开了具体论述,提出并设计一种新型可折叠结构的宽带米波双极化相控阵天线单元,该设计方案切实可行,经过实物验证,具备良好电扫性能和高机动性结构特性,为大口径高机动米波双极化雷达的工程化设计奠定了技术基础。

关键词:可折叠;米波;双极化;偶极子;相控阵天线

中图分类号:TN821 文献标志码:A 文章编号:1004-7859(2022)07-0088-04

引用格式:张娜曼, 逯建伟, 张洪银, 等. 可折叠宽带米波双极化相控阵天线设计[J]. 现代雷达, 2022, 44(7): 88-91.

ZHANG Naman, LU Jianwei, ZHANG Hongyin, et al. Design of foldable wide-band meter-wave dual-polarization phased array antenna[J]. Modern Radar, 2022, 44(7): 88-91.

Design of Foldable Wide-band Meter-wave Dual-polarization Phased Array Antenna

ZHANG Naman*, LU Jianwei, ZHANG Hongyin, BU Chen, YAN Kai

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Meter-wave radar, especially the high-mobility meter-wave dual-polarization radar, plays a significant role in the development of ground-based air defense system. Due to the factors such as low frequency and long wavelength, the meter-wave radar suffers from large antenna size and bulky volume. The design of such antenna has encountered great difficulties and challenges to achieve both excellent multi-functional radiation quality and portable, high-mobility structure. To resolve the contradiction between the need of large working aperture and compact transporting aperture, this paper starts from the discussion about the selection and foldable design of antenna unit in detail, then a new design strategy for wide-band meter-wave dual-polarization phased array antenna is proposed, aiming at realizing high-mobility array. The proposed antenna is fabricated and experimentally verified. The measured results show that the proposed antenna features excellent scanning performance and high-mobility structure, which lays a technical foundation for the engineering design of large-aperture high-mobility meter-wave dual-polarization radar.

Key words: foldable; meter-wave; dual-polarization; dipole; phased array antenna

0 引言

国际上将甚高频波段(VHF)定义为米波波段,频率范围为30 MHz~300 MHz,波长为1 m~10 m。米波雷达在反隐身和抗反辐射导弹等方面具有先天优势,在地面防空系统中担任着重要角色。随着电子对抗、低空突防等军事技术的发展,防空体系中的地面雷达随之面临着严重威胁,高机动性对于提高地面雷达的生存能力至关重要。根据地面雷达机动性能的不同,在几分钟到半个小时内完成拆收或进入工作状态的雷达称为高机动性雷达^[1]。高机动性设计已逐渐成为地面雷达的基本要求。由于频率低、波长长、天线结构尺寸大等因素,米波雷达高机动性设计受到很大限制,

并且天线阵列口径越大,高机动性设计越困难。同时,随着雷达反隐身能力需求的提升,要求米波雷达同时具备双极化特性,致使天线单元、馈线电缆、收发组件等设备量增加一倍,米波双极化雷达的高机动设计难度愈发升级。作为雷达组成中占用口径最大的天线阵列,其快速、可靠的自动架设和撤收是实现米波雷达高机动设计的重要途径。本文研究了一种可折叠米波双极化天线单元,不仅能够具备宽带宽角扫描双极化电性能,亦能实现天线阵列的快速折叠和展开,为高机动米波双极化雷达的设计提供了新的技术途径。

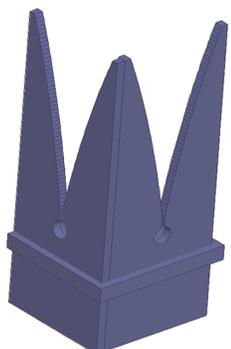
1 米波双极化相控阵天线高机动设计面临的问题

米波双极化相控阵天线阵面高机动性的实现,需

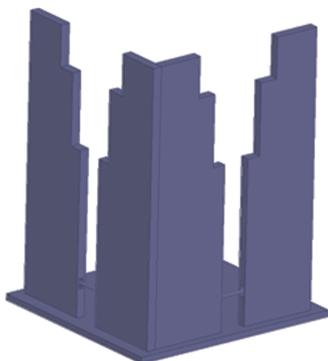
要考虑并解决的主要问题在于天线阵列大工作口径和小运输口径需求之间的矛盾。一方面, 天线阵列增益、雷达角分辨率等电性能与天线工作时的电口径直接相关, 米波波段波长长、天线结构尺寸大, 要实现相同增益和分辨率需要比高频波段的阵列具备更大的口径; 而另一方面, 受公路、铁路、运输机等运输方式的限制, 天线阵列在运输时, 却必须将天线运输口径限制在一定的装载尺寸范围内。在米波波段, 工作口径和运输口径的需求差异会非常明显。为解决上述矛盾, 最佳方式是通过天线阵列的自动展开和自动压缩设计来实现大阵列工作口径与小运输口径两种状态之间的转换, 可以将天线单元设计为可折叠形式, 工作时是一种展开状态, 运输时是另外一种压缩状态, 从根本上解决工作口径和运输口径的矛盾。因此设计具备宽带宽角双极化电性能和可折叠机械结构的天线单元是解决上述矛盾的重要途径。

2 天线单元的选型

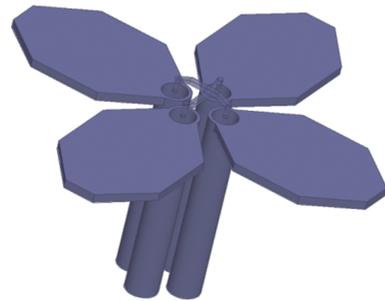
宽带米波双极化天线单元有多种形式可以选择^[2-5], 典型的三种形式如图 1 所示。从结构可折叠性和宽带波束扫描特性来看, 三种天线各有自己的优势和劣势。指数渐变槽天线和阶梯渐变槽线天线具有良好的超宽带特性, 但是其剖面较高; 平板天线具备比较单一的结构形式, 但宽带性能比渐变槽天线差。常见的三种宽带米波双极化天线单元性能对比如表 1 所示。



a) 双极化指数渐变槽天线



b) 双极化阶梯渐变槽线天线



c) 双极化平板天线

图 1 宽带米波双极化天线的种类

表 1 宽带双极化米波天线单元性能对比

序号	天线形式	剖面高度	优点	缺点
1	指数渐变槽天线	$>1/2$ 低频波长	带宽宽	剖面高, 不易折叠
2	阶梯渐变槽线天线	$>1/2$ 低频波长	带宽宽	剖面高, 不易折叠
3	平板天线	约 $1/4$ 低频波长	折叠结构易实现	带宽相对较窄

文献[6]中提到的即为米波双极化的指数渐变槽天线单元, 通过双极化单元分步折叠、阵列骨架分块折叠等措施, 实现了口径为 $18\text{ m} \times 6\text{ m}$ 的大型米波阵列天线 15 min 以内的快速自动化撤收或架设, 具有非常好的高机动性能, 但是该设计由于天线剖面较高, 天线阵面在运输状态时厚度较厚, 还有一定的优化空间。综合可折叠、宽带、剖面高度等性能, 本设计方案选择米波双极化平板天线作为天线阵元, 平板天线相比文献[6]中的指数渐变槽天线在剖面高度上具有更大的优势, 可降低至少一半的高度。文献[7]提到了平板天线作为宽带天线的应用, 尤其是在米波波段, 用金属片构成振子的两个臂, 两个臂可以等效为半径约 $0.25w$ 的圆柱振子 (w 为平板天线的振子臂边长)。该天线常用于电视发射天线, 在 6-12 频道, 驻波小于 1.2 的带宽可覆盖至少 150 MHz~ 300 MHz 两倍频的工作频率范围^[7], 基本满足宽带天线的使用需求。

3 天线单元的可折叠设计

针对米波双极化平板天线进行可折叠设计。该设计方案不同于文献[6]的倒伏折叠, 而是在振子臂上直接进行折叠设计, 同时, 天线振子臂的电流是和结构体平行的, 进行振子臂上的折叠设计时, 会造成电流的切割, 引起二次辐射, 因此需要在振子臂的折叠位置进行良好的电导处理。

可折叠米波双极化平板天线的结构示意图如图 2 所示。可折叠米波双极化平板天线主要由固定振子叶片、折叠振子叶片、同轴馈线、快锁型射频连接器、安装法兰等组成。两个振子叶片呈十字交叉放置, 振子叶

片与外导体焊接,整个天线单元包含的法兰和连接器采用一体化设计。固定振子叶片和折叠振子叶片共同组成双极化平板天线的振子臂,并且通过折叠叶片上的铰链结构实现天线单元的折叠和展开。振子叶片进行镂空设计,大幅减少阵面风载荷,镂空率 50%以上,重量减轻 1/2,整个天线阵列的风阻系统由 1.2 降至 0.8,大大降低阵面风载荷。

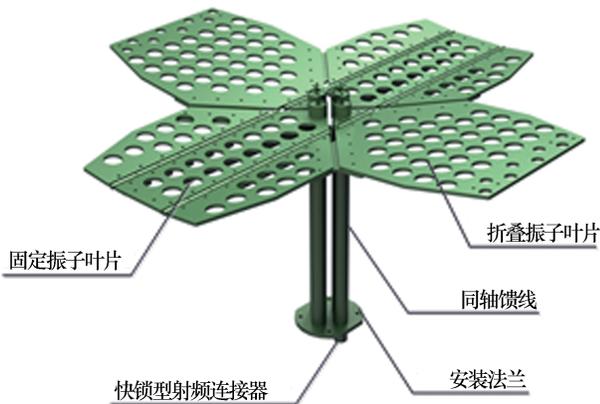


图2 米波双极化平板天线示意图

关于天线阵列的折叠技术,文献[8]展开论述了提高雷达机动性的 7 种途径,提出电机驱动的丝杆机构、液压和气压驱动机构等理念,可实现天线自动折叠,减少运输单元,满足运输条件。文献[9]专门论述阵面自动折叠与快速拼装,介绍了常见的“摇块折叠”、“前翻四连杆机构折叠”、“组合折叠”等方式。文献[10]中采用垂直伸缩式天线技术、天线展开随动锁定技术和液压闭环同步控制技术实现了大口径米波雷达天线工作状态和运输状态之间的相互快速转换,这种类似“手风琴”的结构对于单极化米波天线阵列的快速展开折叠是完全适用的。

综合以上文献中的技术现状,本设计方案采用了更具创新性的方法。采用活动桁架实现天线阵列被动折叠的方案,从而实现天线阵列的自动化折叠和展开。如图 3 所示,天线单元通过安装法兰固定在可移动的天线桁架上,同轴馈线的金属管形式可作为天线单元整体的刚性支撑,两个相邻天线单元的折叠振子叶片之间通过非金属介质实现刚度互联,在折叠振子叶片上安装角度限位板形成折叠初始角。天线单元的折叠为被动折叠,当活动桁架移动时,天线单元折叠振子叶片以及反射网通过铰链实现相互的折叠运动。该被动折叠具有显著的优势,省去了天线单元主动折叠所需的大量机构以及控制网络,并且当每个桁架上装配多个天线单元以及多个桁架同时运动时,可以实现大规模阵列的联动折叠,最终天线阵列折叠展收的尺寸比例可达 1:6。

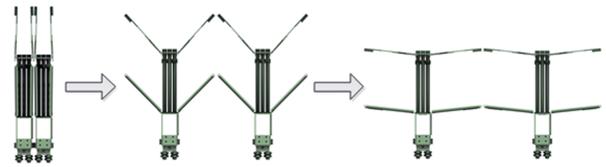


图3 米波双极化平板天线阵列折叠展开效果图

4 实物测试结果

根据以上设计,研制了可折叠宽带米波双极化平板天线实物,如图 4 所示,天线单元具备良好的结构可折叠特性。电讯测试结果如图 5-图 7 所示。 f_c 为工作频段的中心频点,图示横坐标频率对 f_c 做归一化处理。实测结果表明,天线单元具备良好的两倍频、宽带宽角扫描的米波波段相控阵天线电讯性能。

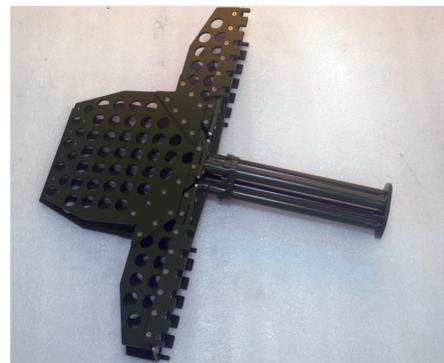


图4 天线单元实物照片

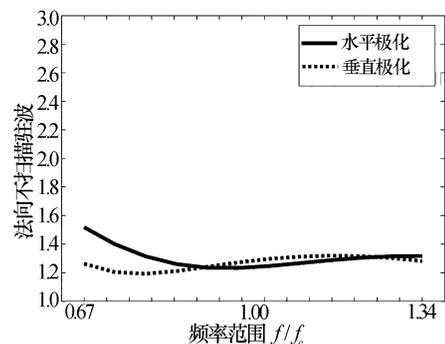


图5 天线单元法向有源驻波

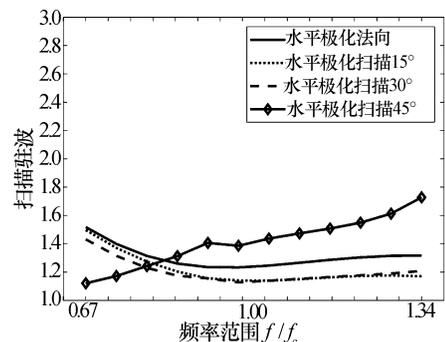


图6 水平极化天线单元扫描有源驻波

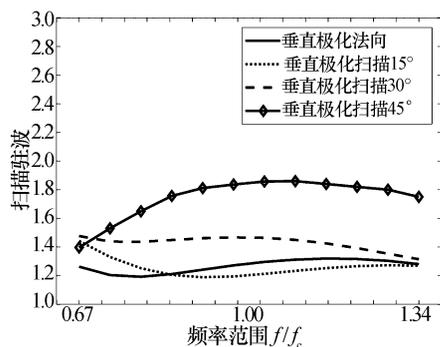


图7 垂直极化天线单元扫描有源驻波

5 结束语

本文从米波双极化相控阵天线阵面高机动设计面临的问题出发, 针对天线单元的选型和可折叠设计展开了具体论述, 并研制实物进行验证, 实测效果满足高机动的性能要求, 可实现大口径米波阵列天线 10 min 以内的快速自动化撤收或架设, 为提升大口径米波双极化雷达的机动性提供了一种新的设计方法。

参考文献

- [1] 林有才. 高机动性地面雷达的现状和未来发展趋势[J]. 电子科学技术评论, 2004(6): 35-38.
LIN Youcai. Present situation and future development trend of high mobility ground radar[J]. Review of Electronics Science and Technology, 2004(6): 35-38.
- [2] 于大群, 吴鸿超, 何丙发, 等. 一种宽带宽角双极化相控阵天线单元研究[J]. 现代雷达, 2011, 33(11): 59-62.
YU Daqun, WU Hongchao, HE Bingfa, et al. A antenna element for dual-polarized wide-band wide-angle phased array [J]. Modern Radar, 2011, 33(11): 59-62.
- [3] 张银龙, 楼建东, 杜晓燕, 等. 三角环对数周期天线的设计及分析[J]. 现代雷达, 2010, 32(8): 74-80.
ZHANG Yinlong, LOU Jiandong, DU Xiaoyan, et al. Design and analysis of triangle loop log-periodic antenna[J]. Modern Radar, 2010, 32(8): 74-80.
- [4] 赵后亮, 尹家贤. 一种新型宽带双极化微带贴片天线的设计[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(2): 214-218.
ZHAO Houliang, YIN Jiaxian. Design of novel broadband dual-polarized microstrip patch antenna[J]. Radar Science and Technology, 2013, 11(2): 214-218.
- [5] 于大群, 孙磊, 吴鸿超. 一种高隔离度交叉极化等相位中心双极化开槽天线设计[J]. 微波学报, 2020, 36(3): 26-30.
YU Daqun, SUN Lei, WU Hongchao. A high isolation low cross-polarization coincident phase center dual polarized flared notch antenna [J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(3): 26-30.
- [6] 魏志文, 陈虎, 陶晓瑛. 一种可折叠的米波超宽带天线阵列设计[J]. 现代雷达, 2017, 39(4): 73-76.
WEI Zhiwen, CHEN Hu, TAO Xiaoying. Design of flexible meter-wave ultra-wideband arrays [J]. Modern Radar, 2017, 39(4): 73-76.
- [7] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
LIN Changlu. Antenna engineering handbook[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [8] 胡长明, 罗超人. 从结构总体设计角度探讨提高地面雷达机动性的方法[J]. 电子机械工程, 1999(5): 11-14.
HU Changming, LUO Chaoren. Discussion on methods of improving the mobility of ground radars from the viewpoint of structure design [J]. Electronics Machinery Engineering, 1999(5): 11-14.
- [9] 唐宝富, 钟剑锋, 顾叶青. 有源相控阵雷达天线结构设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2016.
TANG Baofu, ZHONG Jianfeng, GU Yeqing. Antenna structure design of active phased array radar[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2016.
- [10] 孟国军, 陈建平, 杜勇, 等. 大口径米波雷达高机动技术研究及实现[J]. 机械与电子, 2018, 36(5): 13-17.
MENG Guojun, CHEN Jianping, DU Yong, et al. Research and implementation of high mobility technology for large caliber VHF radar [J]. Machinery & Electronics, 2018, 36(5): 13-17.

作者简介:

张娜曼 女, 1989年生, 硕士, 工程师, 研究方向为宽带及共形相控阵天线的设计和应用;

逯建伟 男, 1990年生, 硕士, 工程师, 研究方向为高机动相控阵雷达天线阵面结构设计;

张洪银 男, 1990年生, 博士, 工程师, 研究方向为宽带相控阵天线阵面的设计和应用;

卜震 男, 1990年生, 硕士, 工程师, 研究方向为高机动相控阵雷达天线阵面结构设计;

闫开 男, 1992年生, 硕士, 工程师, 研究方向为宽带相控阵天线的设计和应用。