引 用 格 式:LI Daojing,Cui Anjing,SUN Huifeng,*et al*.Research on target detection and remote sensing of the novel airshipborne radar[J].Remote Sensing Technology and Application,2025,40(4):795-801.[李道京,崔岸婧,孙慧峰,等.新体制艇载雷达目标探测与遥感应用研究[J].遥感技术与应用,2025,40(4):795-801.]
DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2025.4.0795

新体制艇载雷达目标探测与遥感应用研究

李道京[1],崔岸婧[1,2],孙慧峰[1],杨燕初[3]
(1.中国科学院空天信息创新研究院微波成像全国重点实验室,北京 100190;
2.中国科学院大学 电子电气与通信工程学院,北京 100049;
3.中国科学院空天信息创新研究院,北京 100190)

摘要:艇载雷达能连续对陆海空目标进行探测,也可在运动状态下以合成孔径雷达成像模式实施对地遥感监测。由于飞艇供电能力有限,需大尺寸天线才能实现远距目标探测和遥感监测,平台承重能力有限问题对天线轻量化也提出了很高的要求。针对中低空飞艇平台,本文提出了艇载稀疏阵列主被动结合雷达目标探测系统概念,利用地球同步轨道合成孔径雷达卫星作为外辐射源实施被动探测,在不同工作模式下分析了系统性能,给出了一种子阵天线结构稀疏阵列在艇身共形集成的安装方式,同时介绍了轻量天线阵面样件制作和艇身集成安装情况。给出的相关设计方案表明,该系统不仅性能良好,也具有一定的技术可行性。

关 键 词:艇载雷达;稀疏阵列;目标探测;外辐射源雷达;主被动复合探测;遥感监测
中图分类号:V274;TN951 **文献标志码**:A **文章编号**:1004-0323(2025)04-0795-07

1 引 言

飞艇可在高空长时间驻留,其巨大的体积可满足微波雷达大尺寸天线的布设要求,在飞艇平台上形成的艇载雷达能连续对陆海空目标进行探测。

艇载雷达的典型代表为美国的ISIS系统[1-2],以主动探测方式为主,由于其正式艇X波段有源阵天线面积拟达到5 725 m^2,重量密度达到2 kg/m^2,引领了国内外艇载雷达的技术发展。我国也开展了艇载主动雷达研究工作[3],侯颖妮等[4]对艇载稀疏阵列天线成像雷达技术进行了研究,滕秀敏等[5]研究了基于子阵天线结构稀疏阵列艇身共形设置问题,其主要应用方向为目标探测和对地成像。

ISIS系统对有源阵天线重量密度要求很高,其缩比艇X波段雷达天线面积为98 m^2,但由于缩比艇试验未能成功[6],其项目进展近年来已很少报道。ISIS项目进展受挫,在一定程度上给艇载雷达系统的发展带来了负面影响,需重新审视艇载雷达系统的技术思路并重视中低空飞艇平台的应用价值,在系统性能和技术可行性间进行折中处理,将大型复杂系统转化为分布式系统。

主动雷达系统要获得远的目标探测距离,除要使用大尺寸天线以外,还需要有较大的信号发射功率,对飞艇供电能力也有较高要求。在飞艇供电和承重能力均极为有限条件下,需采用大尺寸低重量密度天线并引入外辐射源低功耗被动探测方式才有可能满足目标探测应用需求。

周建卫等[7]提出了把共形稀疏阵列用于艇载外辐射源雷达的设想,设计了系统参数并分析了目标探测性能。分析表明,外辐射源高的等效全向辐射功率(Equivalent Isotropically Radiated Power,EIRP)和艇载接收天线的大面积,是保证其目标探测性能的基础。

使用地面外辐射源信号时,雷达受地球曲率的影响,其通视探测距离有限,为此可考虑使用天基

收稿日期:2024-10-14;**修订日期**:2025-03-24
基金项目:国家自然科学基金项目(61271422)。
通讯作者:李道京,研究员,主要从事雷达系统和信号处理技术研究。E-mail: lidj@mail.ie.ac.cn

外辐射源，双站观测结构条件下目标的雷达散射截面（Radar Cross Section，RCS）也较大，主要有遥感雷达卫星、全球卫星导航系统（Global Navigation Satellite System，GNSS）卫星和通信卫星[8]。考虑到落地功率密度问题，天基外辐射源应首选地球同步轨道合成孔径雷达（Geosynchronous Earth Orbit Synthetic Aperture Radar，GEO/SAR）卫星[9]。

主动雷达具有作用距离远，容易对目标测距测角定位的特点，但其波束覆盖范围小且功耗较大；被动雷达功耗较小，采用同时多波束接收可实现较大的覆盖范围，其没有目标测距能力问题通过多站交汇数据处理容易解决。现代雷达已具有明显的分布式多站组网结构、主被动复合探测发展趋势，艇载雷达也不例外。随着外辐射源雷达技术的发展，被动雷达有可能成为艇载雷达的主要工作方式，而采用多艇分布式多站结构扩大目标探测范围，显然容易工程实现。

目前重量密度小、能实现大尺寸的轻量天线波段在P和L波段，P波段具有较好的小目标探测性能，但其背景干扰较多，从实际应用条件考虑，目前艇载雷达应首先选用L波段并重点研发L波段轻量天线。

针对中低空飞艇平台，研究提出了L波段艇载稀疏阵列主被动结合雷达目标探测与遥感应用系统概念，设计了系统方案，分析了系统性能，给出了一种子阵天线结构稀疏阵列在艇身共形集成的安装方式，同时介绍了轻量天线阵面简易样件制作和集成安装情况。

2 系统体制

稀疏阵列雷达是指利用稀疏阵列天线孔径综合技术，通过空—时—频信号处理，以较高的空间分辨率和较少的设备体积重量实现运动目标探测的雷达系统，其全阵高空间分辨率波束形成中的孔径综合，可理解为子阵级接收的数字波束形成（Digital Beam Forming，DBF）处理。艇载雷达采用子阵天线结构稀疏阵列，有助于系统减重便于在艇身非刚性布设，较大阵列尺寸形成的窄波束，也有利于杂波抑制并提高目标定位精度。

为在有限的艇平台承重和供电能力条件下，形成满足应用需求的艇载雷达系统，考虑将雷达设计成主被动结合体制，被动探测采用GEO/SAR作为外辐射源。天基和空基形成的大角度双站结构，也有助于小目标探测。艇载主被动雷达目标探测示意如图1所示。

该系统具备主动雷达探测、被动雷达探测和主被动复合雷达探测3种工作模式：

（1）主动雷达探测。发射子阵波束在方位向/俯仰向扫描，每个接收子阵波束与发射子阵波束同步扫描，接收处理目标回波信号。

（2）被动雷达探测。接收子阵通过DBF处理形成俯仰向同时多波束，以扩大俯仰向瞬时波束覆盖范围，多个接收子阵波束在方位向同步扫描，接收处理目标外辐射源回波信号。

（3）主被动复合雷达探测。发射子阵和接收子阵的波束与扫描均和主动雷达探测工作模式相同，同时接收处理目标主动雷达回波信号和外辐射源回波信号。

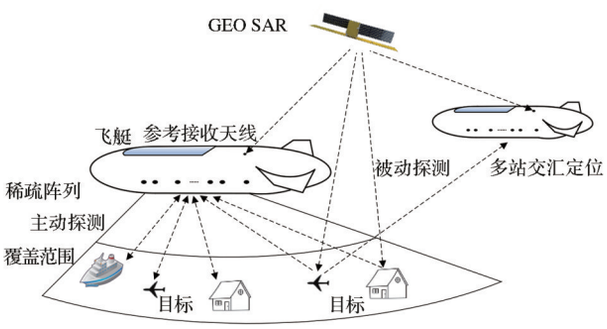


图1 艇载主被动雷达目标探测和ISAR/SAR成像示意图

Fig. 1 The target detection and ISAR/SAR imaging diagram of airshipborne active-passive radar

3 关键技术

艇载雷达关键技术主要包括：

（1）轻量大尺寸天线技术

天线面积直接影响艇载雷达的性能，目前看来要有一定的实用价值，艇载雷达天线面积至少也应在50～100 m^2量级，这对天线的轻量化提出了很高的要求。由于天线将以数字阵列[10]为主，器件需全面芯片化和微系统化，同时需考虑天线与艇身/气囊的共形集成安装[11-12]问题，轻量天线的制造及其安装是艇载雷达研制的关键环节。

大尺寸天线装载在飞艇上难免有阵列形变，故多子阵相位中心高精度测量和阵列误差补偿也就成为一项关键技术。目前单节点差分GNSS的位置测量精度约在3～5 cm量级，采用分布式位置和姿态测量系统（Position and Orientation System，POS）[13]可基本满足P和L波段阵列形变误差测量要求。

(2)低功耗信号采集和处理技术

主要内容包括雷达信号匹配滤波和相干积累、子阵天线的接收DBF处理、稀疏阵列孔径综合等。由于天线子阵数量和通道数较多,主被动同时探测时,数据量较大,需采用高速信号处理技术。针对子阵稀疏布设的特点,需在每个子阵设置用于信号采集和处理的微系统模块[14-15],以低功耗完成数字阵列的信号处理。微系统模块结构由现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array,FPGA)+数字信号处理(Digital Signal Processing,DSP)芯片+图形处理器(Graphics Processing Unit,GPU)组成,以完成对目标的实时探测。经数据传输后,全阵的孔径综合处理和ISAR/SAR成像处理通过高性能服务器+GPU在地面完成。

4　系统方案设计

4.1　组成和参数

艇载雷达系统主要由安装在艇身子阵天线结构稀疏阵列和安装在艇腹吊舱的中央电子设备两大部分组成,其中子阵天线包括数字阵列、信号采集和处理微系统模块(含分布式POS节点功能)等,中央电子设备包括基准信号产生单元、数据处理单元、系统控制和数传接口。雷达系统主要参数如表1所示。

表1　雷达系统主要参数

Table 1　Main parameters of the radar system

参数	数值	参数	数值
主被动雷达工作波段	L	主动雷达/外辐射源中心波长/ m	约0.3
平台高度/ km	7	通视距离/ km	约400
主动探测距离/ km	400(RCS=1 m^2)	被动探测距离/ km	200(RCS=1 m^2)

4.2　稀疏阵列阵型与参数

4.2.1　阵型设计

将如图2(a)所示2发10收子阵天线结构稀疏阵列,布设在艇身一侧,子阵数量为12,其中2个发射子阵用红色矩形表示,10个接收子阵用黄色矩形表示。为同时满足外辐射源雷达被动探测需求,稀疏阵列布设采用随机稀疏阵型。与此同时,在艇身上部要增设外辐射源参考接收天线,该天线在图2(a)中使用红色正方形表示。

2发10收稀疏阵列子阵天线布局设计为[T_1,T_2]+[1,2,4,6,9,10,12,14,16,17],其中T_1和T_2表示两个发射子阵,[1,2,4,6,9,10,12,14,16,17]使用等间隔阵列中的坐标表示随机稀疏排布接收子阵的位置。该接收阵列稀疏度约为40 %,其形成的等效相位中心和接收阵列对应的自相关函数如图2(b)和图2(c)所示。

上述结果表明,在主被动探测模式下,经孔径综合处理后,稀疏阵列等效相位中心分布已近似满阵,具有良好的测角性能。

4.2.2　阵列参数

子阵尺寸设计为2.8 m(方位)×1.6 m(俯仰),由16(方位)×8(俯仰)单元构成,面积约4.5 m^2。根据子阵的单元数,设计收发(Transmit-Receive,TR)峰值功率25 W,占空比10 %,TR平均功率2.5 W,子阵发射平均功率为320 W。若俯仰向采用8单元功分器馈电方式时,TR峰值功率应达到200 W。两子阵发射形成的全阵发射平均功率优于600 W。

在被动雷达探测模式下,由于外辐射源信号覆盖范围较大,设计接收子阵通过DBF处理在俯仰向同时形成4个波束,扩大瞬时探测范围至约50 °。

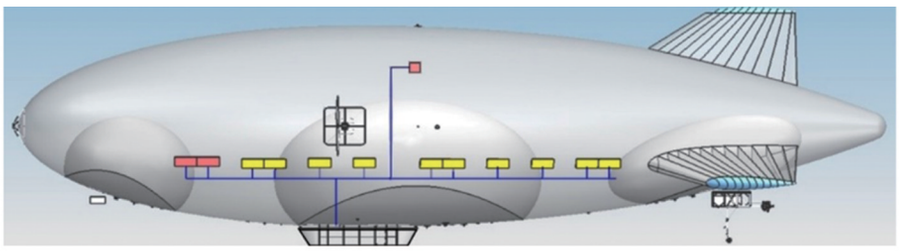
当发射子阵设计成收发双功能时,全阵接收面积增加至53.76 m^2,可实现2发12收。主动雷达拟使用频分正交信号,当距离分辨率为150 m时,信号带宽在MHz量级;当在ISAR/SAR成像模式下时,其信号带宽在30 MHz量级,对应的距离分辨率为5 m。被动雷达探测使用GEO SAR卫星信号,其系统信号带宽约为30 MHz。为此,主被动雷达天线带宽应不少于60 MHz。

稀疏阵列总长为2.8 m×22=61.6 m,宽1.6 m,其中10个接收子阵稀疏阵列长为47.6 m,经孔径综合处理形成的方位波束宽度为0.5 °。稀疏阵列参数如表2所示。

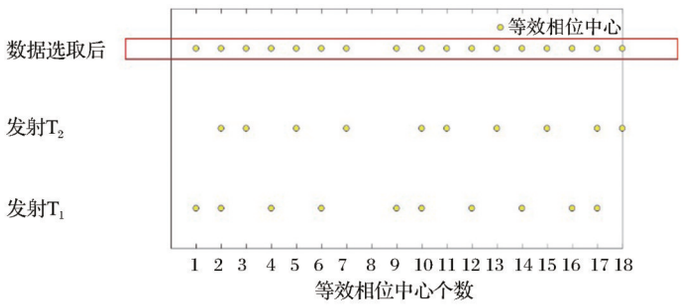
表2给出了单侧阵列天线的重量和功耗,为扩大观测范围,在艇身两侧均需布设阵列天线时,阵列天线的总重量在360 kg,总功耗为3 800 W。

若将子阵与中央电子设备连接电缆和光缆的重量控制在15 kg、中央电子设备的重量控制在10 kg、信号采集与处理模块的重量控制在25 kg,雷达系统的总重可控制在410 kg。

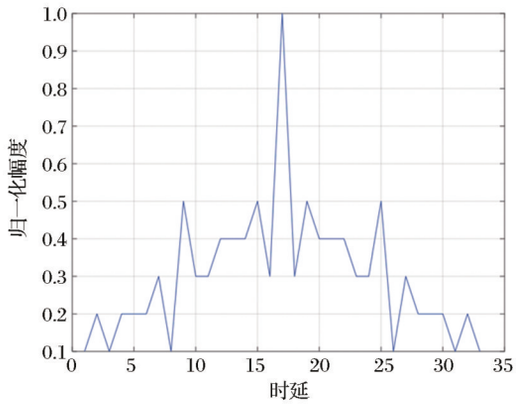
将中央电子设备的功耗控制在150 W、信号采



(a) 稀疏阵列布局



(b) 收发分置对应的接收阵列等效相位中心



(c) 接收阵列对应的自相关函数图

图 2 稀疏阵列布局、等效相位中心和接收阵列对应自相关函数

Fig.2 The sparse array layout, the equivalent phase centers and the autocorrelation function corresponding to the receiving array

表 2 稀疏阵列参数

Table 2 Parameters of the sparse array

参数	数值	参数	数值
子阵方位向波束宽度/°	7.5	子阵俯仰向波束宽度/°	13
全阵方位接收波束宽度/°	0.5	全阵俯仰接收波束宽度/°	13
波束方位扫描范围/°	±45	全阵发射平均功率 W	2×300
收发子阵重量密度/kg·m^{-2}	5	接收子阵重量密度/kg·m^{-2}	3
参考接收天线面积/m^2	0.3	参考接收天线重量/kg	1
单个收发子阵功耗/W	800	单个接收子阵功耗/W	30
阵列天线重量/kg	180	阵列天线功耗/W	1900

集与处理模块的功耗控制在 450 W，雷达系统的总功耗可控制在 4 400 W。

4.3 信号处理

本研究艇载主动雷达采用频分正交信号波形，其瞬时带宽较窄，同时考虑到被动雷达采用 GEO/SAR 卫星信号，系统总的信号带宽在 50 MHz 量级。

艇载雷达信号处理分为艇上实时信号处理和地面处理两个环节，同时涉及数据传输问题。艇上实时信号处理主要完成匹配滤波、相干积累、杂波抑制和目标探测功能。艇上实时信号处理后，仅需给地面下传目标检测后的较少数据。地面处理主要包括多子阵孔径综合处理、目标航迹相关、多帧信号处理和局部区域的检测前跟踪等，被动雷达的多站交汇目标定位处理也在地面完成。

5 系统性能分析

5.1 主动雷达目标探测

主动雷达系统参数如表 3 所示。

表 3 主动雷达系统参数

Table 3 Parameters of the active radar system

参数	数值	参数	数值
噪声系数 F_n/ dB	2.5	噪声温度 T_0/ K	300
波驻时间 T_s/ s	1	子阵面积 A_s/ m^2	2.8×1.6
系统损耗 L/ dB	12	全阵接收面积 A/ m^2	53.76
作用距离 R/ km	400	天线效率 η	0.5

用检测信噪比表示的 1 个子阵发射、全阵接收条件下的雷达方程如下：

$$\mathrm{SNR}=\frac{P_t\sigma G_t G_r T_s \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L k T_0 F_n} \tag{1}$$

其中：λ 为信号波长；P_t 为子阵发射平均功率；k 为波尔兹曼常数，接收天线增益 $G_r=4\pi\eta A/\lambda^2$，发射天线增益 $G_t=4\pi\eta A_s/\lambda^2$，$\sigma$ 为目标 RCS，SNR 为检测信噪比。根据上表所示参数计算分析，当 SNR=10 dB 时，对 RCS=1 m^2 的目标，全阵接收面积对应的主动雷达最大作用距离为 400 km。

5.2 被动雷达目标探测

假定 GEO/SAR 辐射源的高度为 36 000 km，被动雷达系统的噪声系数 F_n、噪声温度 T_0 和波驻时间

T_s、全阵接收面积 A、天线效率 η、和目标 RCSσ 均主动雷达系统相同，其他系统参数如表 4 所示。

表 4　被动雷达系统参数

Table 4　Parameters of the passive radar system

参数	数值	参数	数值
系统损耗 L/ dB	10	辐射源发射功率 P_t/ kW	16
检测信噪比 SNR/ dB	10	发射天线增益 G_t/ dB	42

根据信号从辐射源到接收机传播中的功率变化情况，由雷达方程可推导出

$$R_r R_t = \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \sigma T_s \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_0 F_n L SNR}} \tag{2}$$

其中：P_t 为辐射源发射功率；R_t 为目标到辐射源距离；R_r 为目标到接收天线距离。

在发现概率 P_d=0.5、虚警概率 P_f=10^{-4}～10^{-5} 的条件下，根据表 4 所示参数计算分析，对 RCS=1 m^2 的目标，基于 GEO/SAR 辐射源被动雷达最大作用距离为 200 km。

对 RCS 为 5 m^2 的目标，根据雷达方程，主动/被动雷达最大作用距离均大于 400 km。和主动雷达相比，被动雷达探测距离近，但其具有可同时 DBF 多波束宽覆盖接收能力，对目标探测也具有重要意义。

雷达系统在 L 波段的中心波长选为 0.3 m，对应中心频率 1 GHz，目标径向速度检测范围 20～1000 m/s 对应的多普勒频率范围为 133～6666 Hz。

主动雷达平均脉波重复频率（Pulse Repetition Frequency，PRF）拟选为 3 kHz，通过参差 PRF 解除距离和多普勒模糊。全阵获得的接收天线波束宽度优于 0.5°，其检测信噪比 SNR=10 dB 时，即可保证方位向测角精度优于 0.2°，在 200 km 处的测角定位精度优于 700 m；若主动雷达距离分辨率为 150 m，即可保证测距精度优于 100 m。

被动雷达主要用于目标探测和测角，其目标定位可通过多站交汇实现[16]，采用大尺寸稀疏阵列，有利于提高目标定位精度。

5.3　主动雷达海面舰船 ISAR 成像

海面舰船目标存在横摇/纵摇，这使主动雷达对其实现逆合成孔径雷达（Inverse Synthetic Aperture Radar，ISAR）成像成为可能。在 L 波段当发射信号带宽 30 MHz 时，目标 2°的横摇/纵摇角即可使 ISAR 成像分辨率优于 5 m，假定其转动周期和主动雷达波驻时间接近在 2 s 量级，当成像分辨率在 5 m 量级，成像信噪比 SNR=13 dB 时，对于 RCS=1 m^2 目标的成像距离可达到 400 km。

5.4　主/被动雷达对地 SAR 成像

主动雷达对地 SAR 成像时，当飞艇地速达到 20 m/s，瞬时阵长为 47.6 m，假定合成孔径时间为 60 s，总合成孔径长度为 1 247.6 m，对应的 100 km 距离目标成像方位向分辨率约 12 m，此时成像分辨率为 5 m×12 m。当地物散射系数为-30 dB 时，分辨单元的等效 RCS 为 0.06 m^2，此时成像信噪比可达到 40 dB。

将相对地速在 200 m/s 量级的 GEO/SAR 作为外辐射源，可在飞艇静止条件下，使用被动雷达实现对地 SAR 成像。假定合成孔径时间为 30 s，双站条件下的有效合成孔径长度为 3 023.8 m，对应的 100 km 距离目标成像方位向分辨率约 5 m，此时成像分辨率为 5 m×5 m。当地物散射系数为-30 dB 时，分辨单元的等效 RCS 为 0.025 m^2，此时成像信噪比可达到 15 dB。

上述分析表明，被动雷达在原理上具备良好的对地 SAR 成像性能，可在短时实现对地高分辨率成像，引入 GEO/SAR 卫星作为外辐射源，对提高雷达系统运动目标探测和对地 SAR 成像性能均具有重要意义。

但要说明的是，与单站结构雷达系统相比，外辐射源双站结构雷达系统的信号处理较为复杂，除涉及外辐射源信号的时间、空间和相位同步问题外，还有观测目标的距离估计问题。

双站结构雷达系统对地 SAR 成像的观测几何复杂但关系明确，这使得成像处理过程中的相关参数容易确定。随着双站雷达成像技术[17]的不断发展，本文被动雷达对地 SAR 成像和遥感监测的实现具有可行性。

6　轻量天线与集成安装

6.1　天线阵面样件

为验证关键技术，制作了如图 3 所示 P 波段基于 FR4 薄膜贴片＋PMI 泡沫支撑架的子阵天线阵面样件，其子阵阵面规模 8 单元（方位）×4 单元（俯仰），阵面样件重量密度约 1.5 kg/m^2。

6.2　天线安装方式

由于子阵天线尺寸较大，为便于运输，将子阵拆分成模块，多个模块拼接形成子阵后再整体铺装在艇身，天线样件在艇身的安装情况如图 4 所示。在艇身蒙皮上设置外罩，外罩选为蒙皮透波材料，通过外罩上翻将整个子阵托住并形成子阵天线罩，

上翻外罩的3个边采用尼龙搭扣与蒙皮连接。子阵背面设置尼龙搭扣与艇身蒙皮连接,提高整体强度。

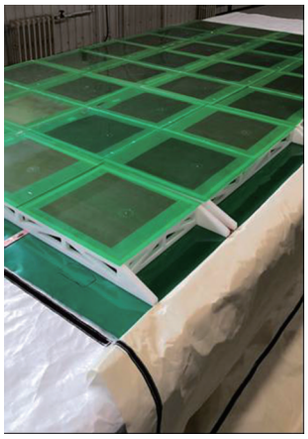


图3 天线阵面样件在桌面的组装情况

Fig.3 The assembly of the antenna array prototypes on the desk

图4 天线样件在艇身的安装情况

Fig.4 The installation of the antenna prototype on the hull

贴片天线厚度决定其频率范围,频率范围要求越大,其厚度也越大。P波段天线的厚度较高,改成L波段后阵面重量密度可能会增加,但子阵天线的厚度将减小,不仅可减少对艇身的气动影响,也便于在艇身集成安装。显然,这种子阵天线在艇身的集成安装方式,具有和艇体松耦合便于实施,规模也可灵活调整的特点。

7 结 语

考虑到现阶段艇载主动雷达实现远距离目标探测和遥感监测的难度,研究提出了中低空飞艇载稀疏阵列主被动结合雷达系统概念,其子阵天线结构稀疏阵列在艇身集成安装方式,为艇载雷达的研究实现提供了新的技术思路。

参考文献(References):

[1] CLARK T, JASKA E. Million element ISIS array[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. IEEE, 2010: 29-36. DOI: 10.1109/ARRAY.2010.5613396

[2] WILLIAMS R B, MAXHIMER K M, BRENNAN T, *et al*. Design of radar panel mounting hardware for ISIS radar antenna[C]//Proceedings of the 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. AIAA, 2013: AIAA2013-1843. DOI: 10.2514/6.2013-1843

[3] DONG Pengshu, LI Zongting, ZHANG Chaowei. Research on stratospheric airship SIAR system[J]. Radar Science and Technology, 2012, 10(5): 476-480.[董鹏曙, 李宗亭, 张朝伟. 平流层飞艇载综合脉冲孔径雷达系统研究[J]. 雷达科学与技术, 2012, 10(5): 476-480.]

[4] HOU Yingni, LI Daojing, YIN Jianfeng, *et al*. Airship imaging radar based on aperture synthesis of thinned array[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12): 2377-2382.[侯颖妮, 李道京, 尹建凤, 等. 基于稀疏综合孔径天线的艇载成像雷达研究[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2377-2382.]

[5] TENG Xiumin, LI Daojing. Airship conformal sparse array radar imaging[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(4): 644-649.[滕秀敏, 李道京. 艇载共形稀疏阵列天线雷达成像研究[J]. 电波科学学报, 2012, 27(4): 644-649.]

[6] D'OLIVEIRA F A, DE MELO F C L, DEVEZAS T C. High-altitude platforms-present situation and technology trends[J]. Journal of Aerospace Technology and Management, 2016, 8(3): 249-262. DOI: 10.5028/jatm.v8i3.699

[7] ZHOU Jianwei, LI Daojing, TIAN He, *et al*. Performance analysis on airship-borne passive radar based on conformal sparse array[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(5): 1058-1063.[周建卫, 李道京, 田鹤, 等. 基于共形稀疏阵列的艇载外辐射源雷达性能分析[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(5): 1058-1063.]

[8] XU Bin, QU Wei, HE Yonghua, *et al*. Research on the performance of passive detection system for space targets based on navigation signals[J]. Science & Technology Information, 2014(4): 77-78.[许斌, 曲卫, 何永华, 等. 基于导航信号的空间目标无源探测系统性能研究[J]. 科技信息, 2014(4): 77-78.]

[9] KOU Leilei, WANG Xiaoqing, CHONG Jinsong, *et al*. Research of key technologies in geosynchronous parasitic SAR system[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2725-2729.[寇蕾蕾, 王小青, 种劲松, 等. 地球同步轨道寄生SAR系统的若干关键技术研究[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2725-2729.]

[10] XIAO G Y, QUAN Y H, SUN Z Z, *et al*. Design of a digital array signal processing system with full array element[J]. Remote Sensing, 2023, 15(16): 4043. DOI: 10.3390/rs15164043

[11] ZHAO Panfeng, YUAN Junhang, CHENG Qin, *et al*. Simulation and design of conformal antennas to inflatable cylinder[J]. Radar Science and Technology, 2013, 11(1): 97-100.

[赵攀峰，袁军行，成琴，等. 雷达天线与柱形气囊共形设计与仿真分析[J]. 雷达科学与技术，2013，11(1)：97-100.]

[12] ZHANG Yijiang. Inflatable back cavity thin film antenna[J]. Shandong Industrial Technology，2018(15)：144.[张轶江. 充气背腔薄膜天线[J]. 山东工业技术，2018(15)：144.]

[13] LI Daojing，TENG Xiumin，PAN Zhouhao. The concept and applications of distributed POS[J]. Journal of Radars，2013，2(4)：400-405.[李道京，滕秀敏，潘舟浩. 分布式位置和姿态测量系统的概念与应用方向[J]. 雷达学报，2013，2(4)：400-405.]

[14] WAN Xianghong，XIAO Guoyao，QUAN Yinghui. Design and implementation of a multi-channel universal signal processor[J]. Radio Engineering，2022，52(12)：2253-2262.[万相宏，肖国尧，全英汇. 一种大带宽多通道信号处理模块设计与实现[J]. 无线电工程，2022，52(12)：2253-2262.]

[15] WEN B，XIAO G Y，SUN Z Z，*et al*. A modeling and computational analysis method for multichip DDR microsystem[J]. IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems，2023，4(4)：336-344. DOI：10.1109/JMASS.2023.3293861

[16] QIN Zhaotao，WANG Jun，WEI Shaoming，*et al*. Passive localization using TDOA measurements from multiple sensors based on priori knowledge of target altitude[J]. Journal of Electronics & Information Technology，2018，40(9)：2219-2226.[秦兆涛，王俊，魏少明，等. 基于目标高度先验信息的多站时差无源定位方法[J]. 电子与信息学报，2018，40(9)：2219-2226.]

[17] LI Jianyang，CHANG Wenge. Bistatic SAR imaging for satellite/airborne configuration[J]. Signal Processing，2010，26(1)：32-37.[李建阳，常文革. 星/机双站SAR成像处理技术研究[J]. 信号处理，2010，26(1)：32-37.]

Research on Target Detection and Remote Sensing of the Novel Airshipborne Radar

LI Daojing[1]，Cui Anjing[1,2]，SUN Huifeng[1]，YANG Yanchu[3]

(1.*National Key Laboratory of Microwave Imaging*，*Aerospace Information Research Institute*，*Chinese Academy of Sciences*，*Beijing* 100190，*China*；

2.*School of Electronic*，*Electrical and Communication Engineering*，*University of Chinese Academy of Sciences*，*Beijing* 100049，*China*；

3.*Aerospace Information Research Institute*，*Chinese Academy of Sciences*，*Beijing* 100190，*China*)

Abstract：Airshipborne radars can continuously detect targets on land，sea and in the air，it can also carry out remote sensing of the earth by the synthetic aperture radar imaging mode under the moving state. Due to the limited power supply capacity of airships，large-size antennas are required to realize long-distance target detection and remote sensing，and the weight capacity limitation of the platform also puts forward high requirements for lightweight antennas. An aireshipborne active-passive combined target detection system concept based on a sparse array is proposed especially for the low and medium altitude airship platform，which detects passively with the geo-synchronous earth orbit synthetic aperture radar being the external radiation source，the system performance under different working modes is analyzed，the method of installing the subarray antennas on the hull is presented，and the prototype manufacture and integrated installation on the hull of the lightweight antenna array are introduced.

Key words：Airshipborne radar；Sparse array；Target detection；Passive radar；Active-passive composite detect；Remote sensing