

一种基于干涉仪体制的低成本小型化空管二次雷达设计

季雪荣* 郑于安

南京恩瑞特实业有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i2.18930

[摘要] 空管二次雷达通过发射询问信号,接收飞机应答机的回复来获取信息,包括飞机的识别码、高度、航向等,是现代航空领域不可或缺的重要保障技术。而在部分场景,例如空管区域边缘或是空中交通密度较低的区域,ADS-B系统也会作为空管二次雷达的补充使用,从而降低管制建设成本。但随着近些年诸如S模式等空地信息交互需求的提升,ADS-B系统的功能局限性愈发明显,因此设计一款能够实现常规空管二次雷达所有功能且低成本小型化的空管二次雷达产品就具有了充分的必要性,从而有效替代当前的ADS-B系统,进一步填充、扩展空中交通管制可靠性与有效性。本文通过对二次雷达收发系统进行重构,基于机载干涉仪天线的设计,提出了一种基于干涉仪体制的二次雷达架构,对其原理、系统组成以及系统指标进行了设计与分析,验证了基于干涉仪体制的低成本小型化空管二次雷达设计的可行性。

[关键词] 干涉仪; 低成本小型化; 空管二次雷达; 系统设计

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A

Design of a Low-Cost and Miniaturized Air Traffic Control Secondary Radar Based on the Interferometer System

Xuerong Ji* Yu'an Zheng

Nanjing NRIET Industrial Co., Ltd.

[Abstract] The air traffic control secondary radar is a key device for air traffic control. It acquires information by transmitting interrogation signals and receiving responses from aircraft transponders, including the identification code, altitude, heading, etc. of the aircraft. It is an indispensable and important safeguard technology in the modern aviation field. In some scenarios, such as at the edge of the air traffic control area or in areas with low air traffic density, the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) system will also be used as a supplement to the air traffic control secondary radar, thus reducing the construction cost of air traffic control. However, with the increase in the demand for air-ground information interaction such as the Mode S in recent years, the functional limitations of the ADS-B system have become increasingly obvious. Therefore, it is quite necessary to design an air traffic control secondary radar product that can achieve all the functions of a conventional air traffic control secondary radar and is low-cost and miniaturized, so as to effectively replace the current ADS-B system and further enhance and expand the reliability and effectiveness of air traffic control. In this paper, by reconstructing the transceiver system of the secondary radar and based on the design of the airborne interferometer antenna, a secondary radar architecture based on the interferometer system is proposed. The principle, system composition, and system indicators are designed and analyzed, verifying the feasibility of the design of the low-cost and miniaturized air traffic control secondary radar based on the interferometer system.

[Key words] Interferometer; Low-cost and miniaturized; Air traffic control secondary radar; System design

引言

在现代航空领域,空管二次雷达起着中流砥柱的作用。它凭借发射询问信号,并接收飞机应答机反馈的回复,精准撷取飞机的识别码、高度以及航向等关键信息,为航空运行筑牢安全防线,是当之无愧的重要保障技术。

在空管区域边缘或空中交通密度较低的空域等特定场景下,ADS-B系统常辅助空管二次雷达工作,助力降低管制建设成本并优化资源配置。然而,近年来,随着S模式等空地信息交互需求持续攀升,ADS-B系统的功能短板愈发显著。面对复杂多变的航空管控需求,它渐显力不从心,难以全方位满足诸如高精度定位、复杂环境下稳定通信等常规空管二次雷达应具备的全部功能,同时兼具低成本、小型化优势的空管二次雷达产品迫在眉睫。该产品一旦落地,有望替代当前的ADS-B系统,进一步强化空中交通管制的可靠性与有效性,拓展航空管控的深度与广度^[1]。

当下,现代常规二次雷达的设计架构已趋于稳定,相控阵体制成为最新的发展方向。这一变革旨在提高空域询问频率,赋予雷达一定的俯仰角测量能力,以从容应对大流量空域交通管理的挑战。但在管区边界以及小流量区域,无论是采用ADS-B系统还是常规雷达,均存在固有弊端,前者功能受限,后者成本居高不下。

有鉴于此,本文独辟蹊径,创新性地将在机载干涉仪体制融入二次雷达设计之中。通过采用干涉仪固定朝向测向的技术路线,对二次雷达系统进行化简重组。在确保不缺失常规二次雷达功能的前提下,削减系统成本,缩减设备规模,并深入剖析其功能性能边界指标。此番探索,期望能为同类型或相似产品的设计提供具有借鉴意义的参考,助力推动航空管制技术的持续进步。

本文将机载干涉仪体制引入二次雷达设计中,通过干涉仪固定朝向测向的技术路线,简化二次雷达系统组成,在确保具备常规二次雷达功能的前提下,降低系统成本,减小设备规模,进行了设计重构,并对其功能性能边界指标进行分析计算,为该类产品或相似产品的设计提供一定的参考价值。

1 空管二次雷达原理

二次雷达与一次雷达基本组成一致,包含发射、接收以及信号处理等分系统,与一次雷达的不同在于,二次雷达接收的信号为目标对象发射的信号,而非自身发射信号的回波,同时收发信号中均通过调制方式包含了数据信息,可实现上下行的数据交互,这个收发过程一般被称为上行询问以及下行应答^[2],原理示意如下图所示:

2 干涉仪测向原理

使用基线长度为 d 的两根天线,接收外界电磁辐射信号,对于同一来源的信号,通过比较在两个天线位置接收信号的

相位差值解算获取目标方位信息^[3],相位差与目标方位的关系为:

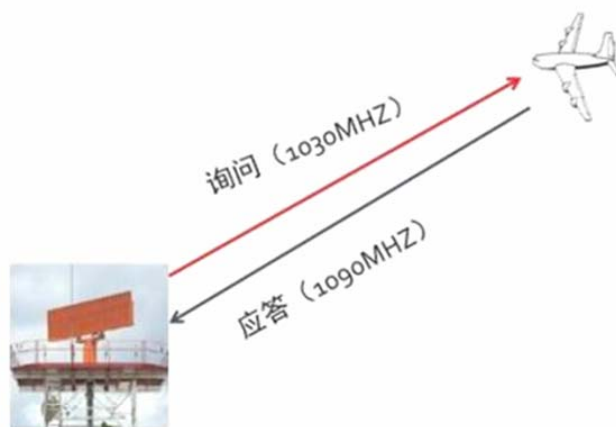


图1 空管二次雷达原理示意图

$$\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \quad \text{式1}$$

其中 φ 为相位差, d 为基线长度, λ 为信号波长, θ 为目标相对于干涉仪阵面法线的夹角,以2GHz信号为例,理想情况下的双基线相位差与目标方位的对照关系如下图所示:

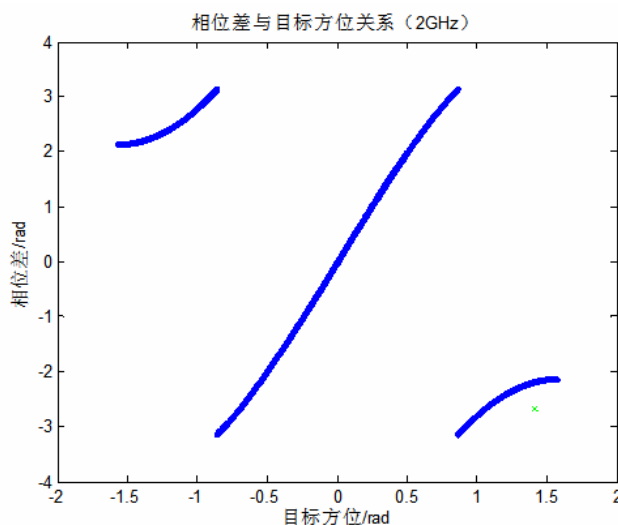


图2 相位差与目标方位关系仿真图(信号载频2GHz)

即可通过基线间测量出的信号相位差数据来计算目标方位。

3 基于干涉仪体制的空管二次雷达系统设计

3.1 系统硬件设计

常规二次雷达的组成结构具有一定的复杂性,通常涵盖天线阵面、伺服系统、馈线,以及整合了信号处理、数据处理等数字模块的综合机柜。在这些组成部分中,伺服系统因其自身特性带来了诸多困扰。作为大型机械结构,它不仅占地面积广阔,在场地利用上给雷达部署造成压力,而且运行过程中的功耗极高,

持续消耗大量能源。此外,为确保其始终处于有效工作状态,还需要周期性地开展维护工作,投入大量的人力、物力与时间成本,这也使得它在雷达总成本中占据了相当可观的比重。

然而,随着技术的发展,借助干涉仪测向体制进行设计创新为解决上述问题提供了新思路。通过采用干涉仪测向体制,能够巧妙地省去伺服系统这一复杂且昂贵的组成部分,转而利用固定阵完成测向任务。现阶段,干涉仪测向系统在固定翼、旋翼飞机平台有着广泛应用,其采用固定安装的方式,稳稳扎根于载机之上。凭借自身精密的构造与先进的技术原理,它能够对载机各个方向的辐射信号展开侦收与解析,精准获取外部辐射信号的特征,进而顺利完成信号识别工作。一旦识别到可能存在的火控、跟踪雷达信号,便能迅速给出告警,及时提醒机组人员采取应对措施,切实保障载机的飞行安全。基于该类型设计的突出优势,我们可大胆采用固定式干涉仪天线组替换现有的二次雷达旋转式天线设计,如此一来,不仅去除了伺服系统的使用,精简了系统组成架构,而且在降低成本方面成效显著,为雷达技术的进一步发展与推广开辟了新路径。一组标准的干涉仪天线组布阵俯视图示意如下:

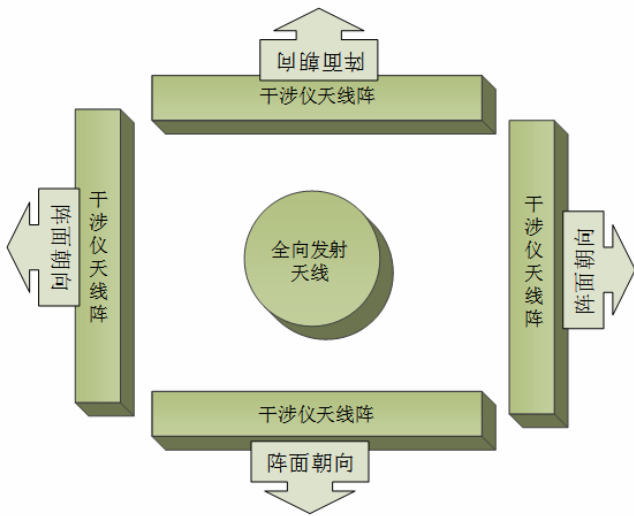


图3 标准干涉仪天线组布阵示意图

由于干涉仪天线组件通常采用平面螺旋天线来进行多基线布阵,值得注意的是,这类平面螺旋天线属于纯接收天线,其功能仅局限于对应答信号的接收,并不具备上行信号辐射能力,所以,为保障整个系统的正常运行,有必要单独配备发射天线。

鉴于此设计下的雷达产品将对标于ADS-B系统,主要聚焦于中近距离目标的管控任务,因而在性能指标上,相较于常规空管二次雷达,它能够接纳相对较低的上行辐射功率。同时,由于在前期设计过程中已然去除了伺服系统,这就意味着无法借助机械转动方式促使发射信号实现水平全方位覆盖。再者,从二次雷

达自身特性出发,其发射信号对目标对象原本就不存在严格的指向要求,综合考虑以上因素,本设计选用全向天线承担辐射任务最为适宜。

后端处理环节方面,常规空管二次雷达与常规干涉仪系统在架构上基本保持一致,这为两者的融合统筹提供了便利条件。经过整合优化后,最终系统呈现出全新的整体架构,其完全依托于干涉仪架构,巧妙运用四阵面干涉仪达成对水平方位的全面覆盖,具体示意如下:

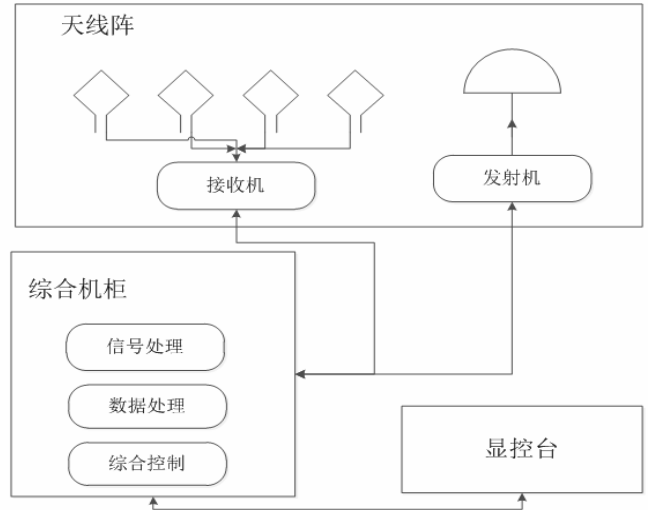


图4 干涉仪体制二次雷达系统硬件设计示意图

在接收机设计环节,此系统相较于一般干涉仪系统展现出显著的简易性。一般而言,常规干涉仪系统的应用场景主要针对外界未知雷达,这就要求它必须实现载频、脉宽以及重频等参数的大范围覆盖。仅以载频参数为例,常规机载干涉仪产品的频率覆盖范围通常为0.8-18GHz,为契合如此大跨度的频率覆盖需求,同时确保精准测频效果,接收机一般会采用全数字折叠设计,并且前级A/D采样频率不得低于2GHz,以此来满足频率解模糊的严格要求。然而,在本系统当中,接收机仅仅针对1090MHz的单频点下行信号开展工作,不存在测频需求,因而可直接借鉴常规中频方案,将接收到的信号混频至中频,随后使用频率相对较低的A/D芯片便能顺利完成采样流程。

综上所述,在此架构下,系统的组成结构得以精简,组件之间的连接线缆数量极少,相互之间的互联关系简单明了,这不仅易于梳理、维护与使用,而且能够切实有效地节约成本,为雷达系统的实际应用与推广创造了有利条件。

3.2 系统流程设计

干涉仪系统通常被应用于机载或其他移动平台之上,肩负着至关重要的测向识别任务,其典型的工作流程一般涵盖“接收-测频-分选-凝聚-识别”这几个关键环节。与之对应的是,空管二次雷达大多以地面固定站的形式安装部署,承担着对空域飞

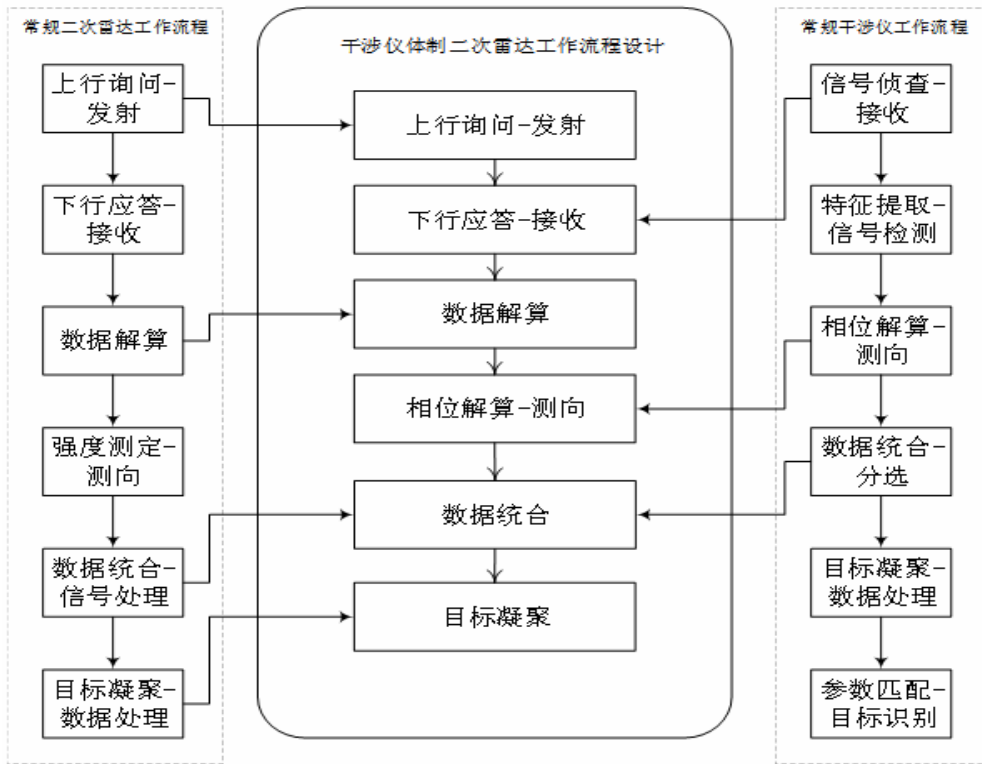


图5 干涉仪体制二次雷达系统工作流程设计示意图

行器进行全方位管控的重任,其日常工作流程主要包含“询问-接收-识别-点迹凝聚-航迹凝聚”。

显而易见,干涉仪系统的工作流程重点聚焦于接收信号之后的一系列精细处理流程,经过仔细对比分析可以清晰看出,它与空管二次雷达工作流程的核心差异集中体现在信号处理阶段。鉴于二者在功能实现上具有很强的互补特性,于是以达成空管关键功能的二次雷达传统工作流程为坚实根基,巧妙地将干涉仪系统工作流程融入其中,由此构建出一套全新且高效的流程设计,具体如下:

在这套全新流程中,除数据统计合流程外,其余的工作流程均可直接借鉴常规二次雷达以及干涉仪系统已有的成熟设计。就拿数据统计合流程来说,它创造性地结合了两种体制下的算法模式。首先,运用干涉仪分选逻辑,依据脉冲信号所携带的诸如频率、脉冲宽度、脉冲重复频率等特征,对纷繁复杂的脉冲信号进行精细分类,同时开展置信度判别以及聚类操作,以此精准识别不同类别的信号。

随后,针对聚类后的脉冲组,依照与之匹配的数据信息展开深入的信号处理工作,充分挖掘信号中的有效信息。并且,依据方位、强度等辅助判别信息,有条不紊地完成点迹凝聚步骤,使得零散的信号点逐步汇聚整合,进而顺利转入传统二次雷达的数据处理环节中的目标凝聚流程。

如此设计带来诸多显著优势。一方面,能够充分利用现有体制下积累的成熟算法以及设计经验,极大提高了系统的复用程度,有效降低了集成风险。另一方面,由于主体的数据解算、目标凝聚算法与传统二次雷达基本保持一致,这就意味着后续面对空管行业不断涌现的新需求与调整变化时,该系统能够与传统二次雷达直接对齐,无缝衔接,避免了因重复开发而造成的人力、物力以及时间等诸多资源的浪费。

4 基于干涉仪体制的系统指标预计

4.1 收发隔离度

常规二次雷达在收发过程中有其独特的实现方式,它通常使用同一组天线来完成发射与接收任务,而收发隔离则是依靠环形器、切换开关等技术手段达成。与之相较,基于干涉仪体制的二次雷达在设计上别具一格,其收发过程分别运用上行全向天线以及下行平面天线,即能够借助天线朝向实现物理隔离。

二次雷达所主要针对的目标对象为军民航飞机。鉴于雷达实际的布置位置,以及现实中的航路分布态势综合考量,飞机相对于雷达所处的仰角位置普遍较低。基于此特性,在发射天线的设计选型上,诸如共线偶极子阵列天线成为优选方案。这类天线的垂直方向增益曲线呈现出显著特点:在水平方向能够达成很高的增益,确保信号的有效传输;而在较高和较低仰

角上, 辐射的能量极少, 其垂直方向的波束宽度极为狭窄, 在水平面下5度时, 衰减即可满足不低于30dB的严苛要求。如此一来, 只需将发射天线布置得略高于接收天线, 便能轻松实现理想的隔离状态。

干涉仪阵面所面向的主要目标则是外部电磁辐射源, 为保障全方位的覆盖效果, 一般会采用螺旋平面天线, 以此来提供较大的角度覆盖范围。依据天线布阵的整体设计规划, 发射天线通常位于中间位置, 干涉仪阵面紧密围绕发射天线进行排布, 且天线口精准地面向外围, 以便高效地侦收信号, 即干涉仪阵面天线与发射天线呈现背向关系。通过对天线单元进行精心设计, 合理布置背腔以及选用适配的吸波材料, 能够成功实现背向30-40dB的衰减效果。

综合上述设计特点与参数配置, 针对现有常规二次雷达而言, 一般其发射机发射功率处于70-75dBm区间, 经过一系列的传输与衰减过程, 最终辐射至接收天线口面的信号功率不大于15dBm, 这一功率水平已然能够充分满足收发隔离的实际需求, 确保雷达系统稳定、高效地运行。

4.2 最大探测距离

在二次雷达研究中, 最大探测距离是关键性能指标, 需从上行、下行链路精细设计核算。

上行链路方面, 因平台固定安装且作用范围近, 全向天线成辐射首选, 它覆盖广、成本低, 辐射增益约0dB。以100km为例核算, 空间传输损耗公式如下:

$$L=31.4+20*\log f+20*\log(d) \quad \text{式2}$$

二次雷达所使用的上行频率为1030MHz, 则空间损耗L为31.4+60.2567+40=131.6567dB;

现有机载二次应答机接收机灵敏度一般为-69dBm, 接收天线增益为0dBm, 则需要的发射功率不低于65dBm, 现有常规站点式二次雷达发射功率一般为70~75dbm, 现有发射机产品即可满足需求; 同时由于该设计下的二次雷达可同时接收全向应答信号, 无需依靠阵面转动完成空域覆盖, 通过2~3次发射即可完成一轮探测工作, 因此在相较于传统二次雷达能够更快完成“整圈”空域探测的前提下, 降低发射机工作时间。

下行链路中, 现有机载二次应答机发射功率为51dBm, 空间损耗与上行链路基本一致, 干涉仪阵面采用窄带平面螺旋天线, 增益保证优于6dB的条件下, 要求接收机灵敏度优于-75dBm, 该指标较难达到, 一般现有接收机系统灵敏度指标在-70dBm附近, 可以考虑采用多次询问收到的应答信号进行相干积累进行处理, 获取6dbm处理增益, 即能够满足探测要求。

4.3 测向精度

接收天线考虑到平台选择固定方式, 采用四阵干涉仪排布, 呈口字型排列, 参照现有二次雷达方位测量精度要求, 优于0.2度, 依照一维多基线干涉仪测向精度公式可得当使用四基线, 基

线长度比为11/9, 编码器的角度量化位数为8时, 理论上的测向精度为:

$$\theta = \frac{\alpha}{n^{k-1} * 2^{m-1}} \quad \text{式3}$$

其中 θ 为测向精度, α 为系统固有误差, n 为天线数量, k 值由具体的天线布局和信号处理方式决定, m 为信号特性参数, 依照常规四基线布阵核算数值为0.235度, 基本满足要求。四基线可依照162mm、198mm、242mm的基线比例排布, 总基线长度602mm, 该基线长度远小于常规二次雷达产品阵面, 充分满足小型化要求。

4.4 数据密度

接收机设计相较于一般干涉仪系统, 由于接收信号频率已知且固定, 可通过滤波器滤除其他杂波信号, 因此无信号测频需求, 无需功分正交以及延迟线, 架构较为简单, 前级“限幅-滤波-放大”后直接进行AD采样获取数字IQ从而计算基线相位差值, 单个阵面包含4个基线单元, 则每个阵面对应4路AD采样输入, 所有阵面共计16路AD采样输入。

依照区域范围内100架次飞机计算信号密度, 设定上行询问频率为5次/秒, 依照A-C模式13+2的应答脉冲的组成, 则脉冲密度为7500脉冲/秒, 较常规干涉仪探测系统而言密度极低, 因此接收机主处理由1片K7或Z7即可完成。考虑到该二次雷达可接受较低的刷新频率(1s间隔刷新全方位覆盖, 相较于常规二次雷达, 刷新频率很高), 同时数据率较低, 因此使用1路光纤或网络即可完成数据下传。

5 结束语

通过对基于干涉仪体制的空管二次雷达进行系统设计剖析以及指标预计结果评估, 不难发现其诸多卓越特性。在确保能够圆满满足常规空管各项需求指标的前提下, 该型雷达凸显出低成本与小型化的显著优势。这不仅使得其在经济成本层面极具竞争力, 而且小巧轻便的身形有利于灵活部署, 能够有效填补当前ADS-B系统在空域管辖方面的不足, 作为强有力的替代或补充力量, 大幅提升空域管控效能。

值得一提的是, 依据不同的使用需求场景, 这款雷达展现出了极强的适应性。通过简便易行的改装流程, 它能够摇身一变成车载式或背负式设备, 从而灵活应对多样化的任务需求, 无论是在偏远地区的临时空管保障, 还是应急救援现场的低空监测, 都能发挥关键作用。

另一方面, 在诸如小范围无人机管理、军事训练等对空域覆盖范围要求相对较小的特定任务情境下, 干涉仪体制的二次雷达凭借其独特的收发天线物理分离设计, 展现出独特优势。通过巧妙运用适配的处理方法, 能够有效消除因收发隔离而产生的近场盲区, 极大提升对近距离顶空区域的探测精度与灵敏度, 为这些特殊场景下的空域安全保驾护航。

然而, 审视现阶段该雷达的设计现状, 不难发现目前仍处于简单的体制、系统融合阶段。为更好地契合空管雷达日益复杂多变的实际需求, 以及充分挖掘干涉仪体制蕴藏的巨大潜力, 后续仍有较大的优化提升空间。例如, 可以大胆尝试将传统的四面天线基线创新性地融合为环状连续基线组成形式, 如此一来, 不仅能够优化信号接收的均匀性与稳定性, 还能进一步拓展雷达的探测角度范围; 亦或是审慎考量添加高位天线阵元, 以此实现对俯仰角度的精准探测, 打破现有探测维度局限, 全方位拓展二次雷达的使用功能边界, 为未来更加复杂、多元的空管任务提供坚实可靠的技术支撑。

[参考文献]

- [1]刘泽杉.ADS-B和雷达系统的性能差别分析[J].中国军转民,2024,No.337(12):35-36.
- [2]付广荣.二次雷达原理分析[J].硅谷,2014,7(03):72+70.
- [3]袁孝康.相位干涉仪侧向定位研究[J].上海航天,1999(3):1-7.

作者简介:

季雪荣(1989--),男,汉族,江苏南通人,本科,南京恩瑞特实业有限公司,工程师,雷达系统、ADS-B系统。