

地基分布式相参雷达技术研究综述

刘泉华^{1,3} 张凯翔^{1,2} 梁振楠^{1,2} 曾 涛^{1,2} 龙 腾¹

(1. 北京理工大学信息与电子学院雷达技术研究所, 北京 100081; 2. 卫星导航电子信息教育部重点实验室 (北京理工大学), 北京 100081; 3. 北京理工大学重庆创新中心, 重庆 401135)

摘 要: 地基分布式雷达是由多部单元雷达分置部署、协同工作实现目标探测的雷达系统, 部署在地基平台, 照射源除自身还可用合作、非合作跨平台照射源, 各单元雷达间可信号级相参融合。传统集中式雷达在复杂场景中难以探测识别低可观测目标, 分布式雷达有望解决上述瓶颈问题, 并实现侦干探通一体化, 因此分布式相参雷达体制是未来雷达形态发展的重要方向之一。分布式雷达体系复杂, 涉及维度、要素多, 须研究探索合理有效的工作范式。本文系统介绍了地基分布式相参雷达发展的新趋势和新技术, 通过信号级融合处理, 可形成大口径稀疏阵列, 获得极窄的高增益波束, 可采用更多更先进的信号处理算法探测和精确定位目标。本文介绍该领域最新的研究进展和代表性成果, 围绕分布式相参增程探测、分布式相参成像、分布式相参抗干扰、分布式系统同步校准等四个方面的关键问题和技术难点展开论述, 并对分布式雷达体制的前景进行了展望。

关键词: 分布式相参雷达; 相参增程探测; 相参成像; 相参抗干扰; 系统同步

中图分类号: TN958. 92 **文献标识码:** A **DOI:** 10. 16798/j. issn. 1003-0530. 2022. 12. 001

引用格式: 刘泉华, 张凯翔, 梁振楠, 等. 地基分布式相参雷达技术研究综述[J]. 信号处理, 2022, 38(12): 2443-2459. DOI: 10. 16798/j. issn. 1003-0530. 2022. 12. 001.

Reference format: LIU Quanhua, ZHANG Kaixiang, LIANG Zhennan, et al. Research overview of ground-based distributed coherent aperture radar[J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(12): 2443-2459. DOI: 10. 16798/j. issn. 1003-0530. 2022. 12. 001.

Research Overview of Ground-Based Distributed Coherent Aperture Radar

LIU Quanhua^{1,3} ZHANG Kaixiang^{1,2} LIANG Zhennan^{1,2} ZENG Tao^{1,2} LONG Teng¹

(1. Radar Research Lab, School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Electronic and Information Technology in Satellite Navigation (Beijing Institute of Technology), Ministry of Education, Beijing 100081, China; 3. Beijing Institute of Technology Chongqing Innovation Center, Chongqing 401135, China)

Abstract: Ground-based distributed coherent aperture radar (GB-DCAR) is deployed by decentralized multiple ground-based radars, working together to achieve target detection. Both cooperative and non-cooperative cross-platform illumination sources besides radar's own transmitter can be used, and signal-level fusion processing can be realized. In complex scenarios, traditional monostatic radar is difficult to detect and identify low observable targets, while GB-DCAR aims to solve the above bottleneck problem and realizes the integrated technology of reconnaissance, interference, detection and communication. Therefore, GB-DCAR has been considered as a promising direction of next generation radar. GB-DCAR

is a highly complex system involving many factors, so it is necessary to study and explore a reasonable and effective working paradigm. This paper systematically introduces the new trends and technologies of the development of GB-DCAR. An equivalent large-aperture sparse array with high-gain and extremely narrow beams is formed by signal-level fusion processing, enabling more advanced signal processing algorithms to detect and accurately locate various targets. This paper then presents the latest progress and representative achievements of GB-DCAR and discusses the issues and solutions relevant to coherent processing, imaging, anti-jamming, system synchronization and calibration. Finally, future prospects for GB-DCAR are discussed.

Key words: distributed coherent aperture radar; coherent detection; coherent imaging; coherent anti-jamming; system synchronization

1 引言

现代先进雷达系统须满足抗毁顽存、广域覆盖、精确识别等需求,分布式相参雷达作为以跨平台信号级协同为基本特征的新体制雷达为满足上述需求提供了技术途径。分布式雷达由多部单元雷达分置部署、协同工作实现目标探测识别。与分布式雷达相关的常见概念包括:双多基地雷达^[1-2]、外辐射源雷达^[3-4]、多输入多输出(Multi-Input Multi-Output, MIMO)雷达^[5-6]、网络化雷达^[7-8]等。这些雷达广义上均可认为是分布式雷达或MIMO雷达,但狭义上的细微差别体现在两个方面:1)在部署方式上,双多基地雷达采用收发分置、异址部署的方式,外辐射源雷达和网络化雷达采用异址部署方式,MIMO雷达和分布式雷达两种部署方式均可采用;2)在协同方式上,双多基地雷达、外辐射源雷达和MIMO雷达采用信号级协同方式,网络化雷达采用数据级协同方式,而分布式雷达两种协同方式均可采用。

传统雷达只有空、时、频、极化、能量域等资源,而分布式雷达拥有节点域资源,其节点规模、拓扑结构灵活,且不局限于自身发射和接收,亦可使用非合作发射源,这些资源为获得探测信息增量提供了物理基础。分布式相参雷达各节点间可实现信号级信息相参融合,具有聚能量、增信息、广覆盖、抗毁伤等四大优势。

(1)聚能量,合成大发射功率、大天线口径,探测威力强:可突破单基地雷达功率、尺寸、重量,可扩展;可形成超大孔径、超大功率的巨型雷达,汇聚能量探测极远目标。

(2)增信息,观测维度多,目标辨识准、定位精度高:可多视角观测,可获得空域分集增益,提升隐

蔽目标观测可能性,目标识别能力强;阵列基线长,可提高目标角度分辨力与测量精度。

(3)广覆盖,时空连续覆盖,观测效率高:空间分散,节点可升空及前置部署,突破视距限制。

(4)抗毁伤,协同方式灵活,对抗软硬杀伤:机动部署,接收节点电磁静默,生存能力强;多节点去中心化,可靠性强、抗毁能力强;可对抗主瓣干扰,对抗能力强。

因此,分布式相参雷达体制是未来雷达形态的重要发展方向之一。分布式雷达根据雷达所处平台可分为天基、临近空间平台、空基、地基、海基等,受篇幅所限,本文聚焦于地基分布式雷达系统。本文重点介绍地基分布式相参雷达发展的新趋势和新技术,以及相应的关键问题和解决方案,并对分布式雷达体制的前景进行展望。

2 分布式相参增程探测技术

雷达探测威力主要取决于功率孔径积,距离测量精度主要取决于回波信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)与信号带宽,角度测量精度主要取决于回波SNR与天线口径^[9-10]。因此,面对远程微弱目标探测识别需求,大口径宽带雷达应运而生。例如,美国在1998年研制了X波段地基雷达XBR的原型雷达GBR-P,天线直径12.5 m,探测威力超过2000 km^[11-12];在2005年开发了X波段海基雷达SBX,天线直径22.1 m,探测威力超过3000 km^[13]。然而,大口径雷达存在机动部署难、生存能力差、造价成本高等缺点。当目标距离较远时,单部雷达无法探测到目标,分布式相参雷达可在空间上实现功率合成,有效地提升SNR,提高探测威力^[14-15]。在发射与接收全相参条件下,具有 N 个单元雷达的分布式全相参雷达可实现 N^3 倍的SNR增益^[14]。

美国麻省理工学院在 1963 年开展了四部工作频率为 2270 MHz 的抛物面天线雷达相参试验, 部署在边长为 60 ft 的正方形四个顶点, 共用同一本振源作为相位基准, 通过相位校准同时跟踪飞机目标, 验证了该系统可提高 SNR^[16-17]。1964 年 3 月, 文献[18]利用多个相参接收单元实现智能自适应天线, 提出自相位(Self-Phasing)天线概念。2000 年美国林肯实验室提出分布式孔径全相参雷达是下一代雷达(Next Generation Radar, NGR)的发展方向^[19-20]。该雷达体制工作过程如下: 各雷达发射正交波形、工作在 MIMO 接收相参模式, 估计各节点间时延、相位差等相参参数后, 发射相同波形、工作在全相参模式。2004 年至 2005 年间, 美国林肯实验室先后用 2 部 X 波段实验系统开展分布式全相参雷达外场实验, 探测水塔、飞机与火箭等目标, 声称接收相参合成 SNR 增益达到 6 dB、全相参合成 SNR 增益达到 9 dB^[16]。美国军方与林肯实验室签署合同, 对现有两部 AN/MPS-36 雷达(工作频率为 5400~5900 MHz)开展 NGR 升级改造并开展全相参实验^[21]。2007 年, 美国国防部资助美国应用雷达公司开展 X 波段分布式相参合成孔径(Coherent Distributed Aperture, CDA-AESA)技术研究^[22]。日本部署了 FPS-7 新型陆基反导预警雷达, 该雷达采用分布式天线技术, 提高了灵敏度与探测范围^[23]。2017 年, 美国约翰霍普金斯大学应用物理实验室研制了两台 1 GHz 工作频率的相干分布式发射机, 相距 85 m, 实现了接近理想值 6 dB 的增益^[24]。2014 年, 美国海军研究办公室授予雷声公司一份价值 850 万美元的合同, 设计“灵活分布式阵列雷达(Flexible Distributed Array Radar, FlexDAR)”。2021 年, 雷声公司 FlexDAR 试验样机交付美国海军^[25-26]。FlexDAR 由两部 S 波段阵元级数字阵列组成, 可实现分布式雷达跟踪, 且各阵列具备同时进行雷达监视、通信与电子战的能力。上述两部阵列分别部署于马里兰州切萨皮克湾和弗吉尼亚州美国宇航局沃洛普斯飞行基地, 相距约 120.7 km, 通过多路高速光纤以太网互联以及一路模拟信号提供公共时钟用于数据传输和同步¹。

国内方面, 2013 年, 北京无线电测量研究所开

展了窄带分布式阵列相参合成雷达技术研究^[14], 采用 P 波段雷达系统开展试验, MIMO 模式下 SNR 增益约 6 dB, 发射接收全相参模式下 SNR 增益约 9 dB。2017 年, 北京无线电测量研究所用 C 波段两单元雷达系统开展线馈接收相参试验^[15], 实现 SNR 增益的 6 dB 提升, 开展空馈试验, 接收相参实测 SNR 增益约为 5.76 dB, 收发相参实测 SNR 增益优于 8.44 dB; 该单位后续开展了 C 波段单脉冲、相控阵体制与 X 波段相控阵体制雷达分布式相参试验, 实现了对飞机、卫星等运动目标的跟踪^[27]。2016 年, 笔者所在的北京理工大学雷达技术研究所(下文简称北理工雷达所)提出了一种基于频率步进信号的宽带分布式全相参技术^[16], 利用频率步进信号瞬时窄带合成宽带的特性, 获得宽带雷达的高距离分辨性能, 同时放宽了对时间同步的要求; 研制了 Ka 波段分布式全相参雷达实验系统, 实现了两单元雷达 512 MHz 带宽、7.4 dB 的全相参增益。2019 年, 清华大学开展了基于微波光子学的分布式相参孔径雷达(Distributed Coherent Aperture Radar, DCAR)的研究^[28], 提出了一种基于光子学的宽带 DCAR 系统, 进行了两单元 X 波段 DCAR 系统原理验证实验, 实现了全相参模式下 8.3 dB 的 SNR 增益。西安电子科技大学开展了对动平台下分布式相参合成技术的研究^[29], 仿真得到多输入单输出(Multiple-Input Single-Output, MISO)、MIMO 和全相参模式的 SNR 增益分别为 2.92 dB、5.91 dB 和 8.95 dB, 均与理论值基本相符。2020 年, 电子科技大学研究了分布式雷达的相参性能, 对窄带和宽带分布式雷达的接收相参增益进行理论和仿真分析, 并对相参合成空域范围进行研究^[30-31]。分布式相参雷达具有可达千米数量级的基线, 探测目标时的工作场景常属于近场, 目标相对于不同雷达的角度存在较大差异, 反射到各雷达处的回波相参特性受到破坏^[32]。对于该问题, 2020 年, 中国电子科技集团公司第三十八研究所提出了一种改善近场全相参探测性能的方法, 对分辨单元进行精细刻画, 将大散射点目标分为多个强散射点目标, 对多个强散射点目标反射的回波进行相参积累, 并通过仿真验证了该方法提高近场全相参探测增益的可行性^[32]。

¹ NRL demonstrating advanced distributed radar concepts with FlexDAR, <https://www.nrl.navy.mil/Media/News/Article/2712331/nrl-demonstrating-advanced-distributed-radar-concepts-with-flexdar/> 2021,7,29.

分布式相参雷达能够实现增程探测,可构建巨型阵列进行深空探测,突破现有雷达探测极限。2017年,美国提出了深空先进雷达概念(Deep Space Advanced Radar Capability, DARC)项目^[33],2017至2021年开展技术方案分析与验证,研发原理样机;2025年完成深空探测雷达建设^[33]。2021年,DARC项目开启建设进程,在英国建设深空先进雷达站,分别用6部和10部抛物面天线进行发射和接收,声称可探测地球同步轨道上足球大小尺寸的目标^[33]。2022年,北理工雷达所发表了分布式相参雷达深空探测技术初步成果^[34],并联合相关单位建设“超大分布式孔径雷达高分辨率深空域主动观测设施”。该设施由多部25 m~30 m孔径的分布式雷达组成,就像昆虫的复眼,故命名为“中国复眼”雷达;建成后可观测0.15 Tm范围内的小行星,将是世界探测距离最远的雷达,可满足近地小行星防御、行星形成机理探索等研究需求。该设施第一期系统由4部16 m分布式孔径雷达组成,已成功获得了对月球观测的雷达图像。

分布式相参雷达在空间、时间方面存在约束条件。根据文献^[35]在空间方面,天线尺寸 L_a 需满足如下约束

$$L_a < R_r \cdot \min\left(\frac{\rho_r}{x}, \sqrt{\frac{\lambda}{y}}\right) \quad (1)$$

其中 R_r 为发射机到目标的距离, ρ_r 为距离分辨率, λ 为波长, x 和 y 分别表示目标尺寸的横纵坐标的大小, $\min(\cdot)$ 表示最小值。在时间方面,相干积累时间 t 需满足如下约束

$$t = \frac{\lambda T_m}{2\pi L_a} > T_{re} \quad (2)$$

其中 T_m 为数据率, T_{re} 为波束的驻留时间。对于分布式相参雷达的工作场景,考虑到目标角度范围很小,目标起伏对相参的影响很小。对于分布式相参增程探测技术,有观点认为单部雷达节点需要满足目标探测的信噪比,否则单部雷达探测不到目标、无法估计相参参数,从而无法实现收发全相参;因此这项技术是“锦上添花”而不是“雪中送炭”。笔者认为,该技术的确更适用于有先验信息引导下的跟踪探测模式;在搜索截获模式下,单部雷达信噪比低,可以通过长时间积累方式提升信噪比,逐步转入全相参模式;对于单部雷达已能够探测目标的

情形,通过分布式相参合成提升信噪比,“锦上添花”进一步提升目标识别性能也是很有意义的。未来随着技术不断进步和发展,有望实现真正发射相参,即无需发射正交波形、随时随地实现分布式收发全相参,让分布式空间相参成为雷达的固有属性,即可破解上述矛盾。

3 分布式相参成像技术

本文所述分布式相参成像指分布式逆合成孔径(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)成像。分布式ISAR通过结合实孔径阵列与综合孔径,实现对运动目标的高分辨成像。

传统的ISAR成像模型需要长时间的孔径积累,并且要求目标在积累期间近似做平稳运动^[36],通常需要在ISAR成像时间内目标转角较小,并且没有速度变化和姿态变化,否则会导致成像发生模糊,不能聚焦。由于目标的运动轨迹和运动参数通常是未知的,难以精确获知目标的运动信息来修正。

分布式ISAR成像技术同时利用多个雷达通道对目标进行观测,缩短了成像积累时间,可认为目标在积累期间始终是平稳运动的,在较短时间内实现了目标的大转角成像,从而克服了单基地ISAR孔径积累时间长的瓶颈。分布式ISAR成像技术可以通过多天线配置获取更充分的目标信息,即利用各通道的位置关系将回波进行相参处理,从而得到目标的运动速度、姿态和轨迹等信息,提高了成像质量。分辨率提升需满足一定条件,如在文献^[37]指出,若分布式ISAR对目标的观测共面(指目标的旋转矢量垂直于分布式雷达构成的平面),则可以通过估计目标的等效转速与分布式雷达对目标观测的视角差对不同支撑区域的目标数据进行融合成像,提高所获目标图像的分辨率。此外,对于长基线部署的分布式雷达,可以对目标进行多视角观测,可较好避免遮挡问题。在相同的分辨率指标下,雷达在空间上采用稀疏布阵可以降低成本,但是稀疏布阵下会出现栅瓣或混叠等问题。根据相对运动原理,目标的运动可以等效雷达沿运动反方向运动对其进行观测,等效的空间采样间隔由目标运动速度与雷达脉冲重复频率PRF共同决定的。由于雷达PRF通常较高,ISAR在空间的采样一般都能满足混叠要求。因此,在分布式ISAR成像中,利

用 ISAR 的等效空间采样来填充分布式雷达的稀疏采样间隔,从而避免产生栅瓣实现高分辨^[38]。

分布式 ISAR 成像分为相参和非相参融合方法。相参融合可分为回波域融合和图像域融合,由于相参成像过程纯线性运算,回波域融合和图像域融合本质上没有不同。非相参融合方法采用的是多视角图像的散射点配准融合方式。

国外,针对单基地雷达 ISAR 成像能力受限的问题,澳大利亚昆士兰大学于 2005 年发表了多基地 ISAR 成像相关论文,证明了多基地 ISAR 成像的可行性^[39]。2012 年,针对单部雷达系统分辨率有限的问题,意大利罗马大学提出了一种利用多个空中雷达同时获取数据来提高运动目标成像分辨率的新技术^[40]。2020 年,美国得克萨斯大学达拉斯分校讨论和开发了近场 MIMO-ISAR 毫米波成像系统,将 MIMO 雷达与单像素图像重建算法相结合^[41]。2021 年,针对移动的刚性目标 MIMO-ISAR 成像问题,东芝欧洲研究中心详细研究了近距离非合作刚性目标高分辨率成像方法以及运动补偿算法^[42]。

国内,2006 年,针对单站 ISAR 雷达不能对沿雷达视线方向飞行的目标成像的问题,空军预警学院研究了双基地 ISAR 成像原理及成像分辨率等相关特性^[43]。2009 年左右,针对传统 ISAR 成像要求目标平稳运动的问题,国防科技大学提出 MIMO-ISAR,结合分布式实孔径与 ISAR 等效时间采样,采用多个天线通道或多个雷达同时对目标进行观测,将所有获取的回波进行联合处理,最终实现成像^[44]。2010 年,针对双基地 ISAR 成像平面变化大、精确测距测速困难的问题,陆军工程大学对双基地 ISAR 的成像平面模型、回波模型及速度补偿等问题做了分析^[45-46]。同年,针对传统成像方法对非合作运动目标成像困难的问题,国防科技大学提出了基于 MIMO 雷达的高分辨成像方法,并对相关成像特性进行了分析^[47-48]。2018 年,为了增加信息量,提高雷达成像性能,中国科学技术大学对分布式雷达空间谱成像理论进行了研究,将 ISAR 成像与谱估计方法结合起来^[49]。2020 年,哈尔滨工业大学提出一种分布式 ISAR 成像方法,对多站回波先补偿不同雷达间相位,然后将不同雷达观测的中心多普勒频率与载频对齐,分别进行方位向傅里叶变换,在频域进行图像融合得到合成 ISAR 图像^[50]。

北理工雷达所对分布式相参成像做了系统的研究。2015 年,研究了基于图像熵的分布式相参 ISAR 高分辨成像方法^[38],配置多部接收天线,各自使用最小化图像熵法估计转动中心与转动角速度,并基于后向投影法进行成像,然后对各接收站的图像进行融合重建。2021 年,针对单视角下目标角闪烁及自我遮挡现象导致的干涉式逆合成孔径雷达 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InISAR) 三维图像信息缺失问题,提出了一种基于三维点云配准的多视角 InISAR 三维图像融合算法^[51];配置多部 InISAR 系统,获得不同观测视角下的目标 InISAR 三维点云,然后将多个视角下获得的目标 InISAR 三维点云进行配准,实现非相参融合,得到包含更完整信息的目标三维点云。2022 年,提出了基于参数化运动补偿的分布式地基雷达成像技术^[34]。

分布式相参成像在战场态势感知和民航管制等军事及民用领域中具有重要的研究价值,在雷达目标识别中有着巨大潜力。目前的研究成果具有一定的理论意义和应用价值,但仍然存在着诸多未解决的问题,需继续研究和不断完善。低信噪比下,常规的 ISAR 成像算法结果信噪比不高,散射点提取性能不佳,成像点数少,需要研究如何提升信噪比以及如何更有效地提取散射点;针对非合作复杂运动目标,其非平稳变化导致成像分辨率有限,需要研究更有效的非合作复杂运动目标成像算法。

4 分布式相参抗干扰技术

电磁干扰已经成为制约单基地雷达工作效能的瓶颈问题^[52-55]。当干扰信号从天线旁瓣进入雷达时,雷达可采用空域自适应滤波在干扰方向形成零陷,有效抑制旁瓣干扰^[56];干扰信号从雷达天线主瓣进入则形成主瓣干扰,干扰效率极高,常规空域形成零陷方法失效^[57]。近年来抗干扰技术也不断发展^[58-61],单基地雷达各种抗干扰手段对主瓣边沿噪声干扰、占空比较小的欺骗式干扰有一定效果,但难以解决密集假目标、压制噪声等多干扰并存、协同的主瓣干扰问题。因此,如何有效地抑制主瓣干扰,同时保持目标能量不受损,实现对目标有效探测与高精度测量,是现代雷达在复杂电磁环境中面临的核心难题之一。

分布式雷达具有较高的角度分辨力与角度测

量精度,因此在主瓣干扰抑制方面有巨大潜力^[62-63]。2008年和2012年,美国导弹防御局授予了美国应用雷达公司(Applied Radar Inc)两期合同,价值150万美元,开展“分布式孔径雷达自适应主瓣干扰抑制”项目研究,旨在解决单基地雷达主瓣干扰问题,采用多部X波段地基雷达开展试验,具体途径和结果未披露^{2,3}。2015年美国北部科技公司(Upstate Scientific Inc)和戴顿大学提出分布式雷达体制可提升抗电磁干扰能力,并在纽约格里菲斯商业科技园(Griffiss Business and Technology Park)开展了分布式雷达抗主瓣干扰试验^[64]。五部雷达稀疏部署在76 m长的基线上,分别发射正交信号,经空时频联合处理后可抑制主瓣干扰。“十二五”初期,北理工雷达所提出了分布式雷达广义自适应主瓣干扰抑制方法,其核心思想是在主雷达周边稀疏部署少量只接收不发射的辅助接收阵列,将主雷达面临的主瓣干扰变为分布式雷达的旁瓣干扰,在空时频多域实现联合对消。2016年,采用S波段分布式雷达试验系统进行了分布式雷达抗主瓣干扰试验^[65],试验使用了四个节点雷达采用一发多收、一主多辅的体制,通过空域预白化处理算法成功对主瓣噪声压制式干扰进行了抑制,信干噪比改善达到了30 dB以上。近年来,北理工雷达所持续开展针对分布式雷达抗主瓣干扰的外场试验,验证了分布式雷达抗主瓣干扰的可行性^[66]。

分布式雷达抗主瓣干扰在实际的应用中同样也存在一些问题和瓶颈:当辅助接收阵列的天线增益小于主阵,在相参处理后是否会引入大量辅助阵列噪声造成信噪比损失;超稀疏布阵的栅瓣是否会导致干扰抑制性能的恶化等。本文对这些问题展开简要分析与阐述。

4.1 辅助阵列噪声问题

为分析辅助阵列的增益对信噪比的影响,本文考虑一个一主多辅、一发多收的分布式雷达系统。针对单个主瓣干扰场景,分析信噪比损失的理论值。假设主阵通道数为 M ,辅助阵列通道数为 M' ,定义辅助阵列通道幅度增益为主阵通道的 α 倍,经推导,理想情况下对消一个主瓣干扰带来的SNR损失至少为

$$\text{SNR}_{\text{loss}} = \frac{M + \alpha^2 M'}{4\alpha^2 M'} \quad (3)$$

若考虑主阵列通道增益为单位增益,则 M 等价为主雷达增益, $\alpha^2 M'$ 等价为辅阵列总增益,则上式可进一步简写为

$$\text{SNR}_{\text{loss}} = \frac{G_M + G_A}{4G_A} \quad (4)$$

式中 G_M 为主阵列增益, G_A 为辅阵列总增益。

根据上式结论,当辅助阵列总面积达到主阵列面积的三分之一时,可在某种阵列构型下对抗一个主瓣干扰而不损失信噪比。辅助阵列增益较小时,的确会因为引入辅助阵列噪声造成输出信噪比下降,但引入辅助阵列带来了极大的信干噪比提升。下面给出典型场景下分布式雷达主瓣干扰抑制结果,主阵列与辅助阵列的面积比为16:5。

如图1所示,干扰抑制前干噪比约为48.1 dB,信噪比约为28.9 dB,干扰抑制后信干噪比约为24.6 dB,信噪比损失约为4.3 dB,虽然造成了一定的信噪比损失,但是信干噪比改善达到了43.8 dB,信干噪比改善效果显著。综合上述推导及仿真可以发现,当辅助阵列的总面积较小时,分布式雷达系统的确会在抗主瓣干扰的过程中损失一定的信噪比。但即便如此,分布式雷达抗主瓣干扰会带来十分明显的信干噪比改善。

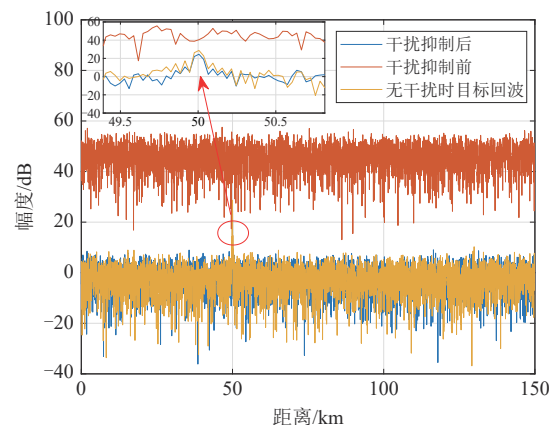


图1 分布式雷达系统主瓣干扰抑制结果
Fig. 1 Main lobe jamming suppression result

4.2 分布式雷达栅瓣问题

由于分布式雷达稀疏部署的特点,当雷达节点均匀布置时,将会产生大量栅瓣。针对分布式雷达

² Adaptive distributed aperture radar mainlobe jammer suppression (phase 1), <https://www.sbir.gov>, 2008.

³ Adaptive distributed aperture radar mainlobe jammer suppression (phase 2), <https://www.sbir.gov>, 2012.

的栅瓣问题,通常会采用非均匀布阵优化设计以抑制栅瓣^[67-68],如图 2 所示。

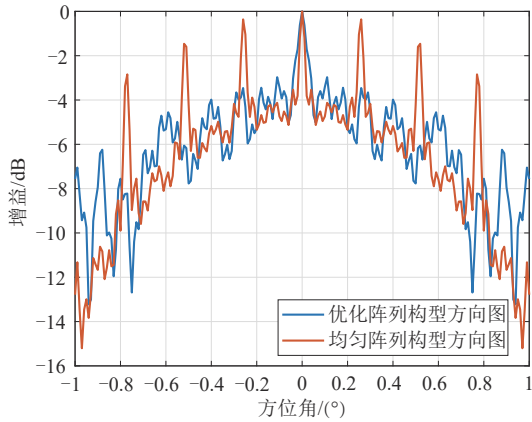


图 2 优化稀疏布阵方向图

Fig. 2 The pattern of sparse array

为分析栅瓣对于干扰抑制带来的具体影响,经推导分布式阵列输出信干噪比满足该公式:

$$\text{SINR}_{\text{out}} \propto \left(M + \alpha^2 M' - \frac{|\mathbf{a}_0^H \mathbf{a}_j|^2}{M + \alpha^2 M'} \right) \quad (5)$$

上式中, $|\mathbf{a}_0^H \mathbf{a}_j|^2$ 为波束指向目标时的静态方向图在干扰角度处的功率响应,除此项之外其余项均为常量。当干扰落在分布式阵列的栅瓣位置时,会造成更大的输出信干噪比损失,但根据图 2 也同样可以发现,在部分非栅瓣角度,优化阵列的静态响应也会高于均匀阵列。而在实际场景中干扰与目标的角度偏差未知,需进一步分析当干扰落在主瓣内任意角度时,不同阵列构型抗干扰总体性能。

考虑目标角度位于法线处不变,干扰在主瓣内任意角度随机出现,进行 500 次蒙特卡罗仿真,优化阵列构型与均匀阵列构型的输出信干噪比如图 3 所示。

从图 3 可以看出,由于分布式雷达系统本身角度分辨力极高,所以栅瓣也同样较窄,所影响的角度范围较小,500 次蒙特卡罗仿真中仅有不到 30 次落入均匀阵列的栅瓣。而优化阵列虽然抑制了栅瓣,但却导致了全阵列合成主瓣的展宽,干扰落入全阵列主瓣的概率变高,同样会造成信噪比损失。综合仿真结果,优化阵列构型的平均输出信干噪比为 29.4 dB,而均匀阵列构型的平均输出信干噪比为 29.3 dB,在干扰出现的角度完全未知且随机的

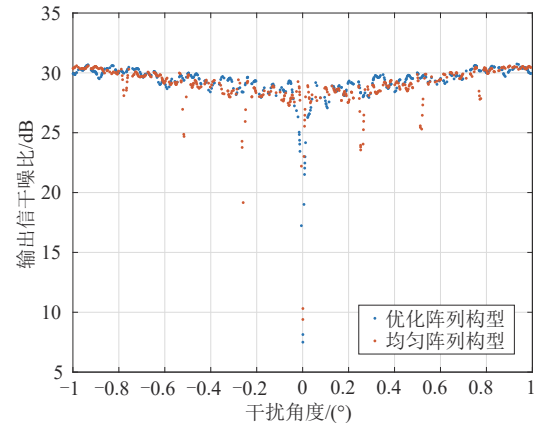


图 3 干扰出现在任意角度时不同阵列构型输出信干噪比
Fig. 3 Output SINR of different arrays when jamming appears at different angles

情况下,两种阵列构型的总体性能没有明显区别。此外,根据图 2 和图 3 的结果可以发现,由于分布式雷达系统的栅瓣幅度沿主阵列的主瓣向外逐渐衰减,即便干扰落在栅瓣中也不会造成信噪比完全损失的情况,仍然会保持一个较高的信干噪比改善值。

此外,在实际的分布式雷达系统部署中,由于地形等因素的影响,无法保证各节点雷达准确部署在设计位置,本文进一步分析了辅助阵列在保证基线长度不变的情况下,随机部署在基线中的任意位置时的性能,同样使干扰在主瓣内随机出现,进行 500 次蒙特卡罗仿真,结果如图 4 所示。

综合上述仿真可以发现,无论是优化阵列、均匀阵列还是随机阵列,当干扰在主瓣内的角度是随机出现时,各阵列构型的平均输出信干噪比差别不大,不同的阵列构型仅会在具体的角度上产生差别。在实际的干扰对抗场景中,无法预知干扰出现在主瓣内的具体角度,在这种情况下,分布式雷达系统阵列构型便不再重要。因此无论是栅瓣还是节点雷达无法布置在预设位置,都不会对分布式雷达抗主瓣干扰的总体性能造成影响。

4.3 分布式体制在干扰对抗中的优势

电子对抗本质上是攻防双方资源投入以及资源利用实力的比拼。当前的抗干扰方式更多采用频率、波形、极化、信号处理等维度的资源。但随着干扰技术的不断进步,干扰机全双工、大功率等技术的日渐成熟^[69-70],干扰方不断地在硬件资源上加

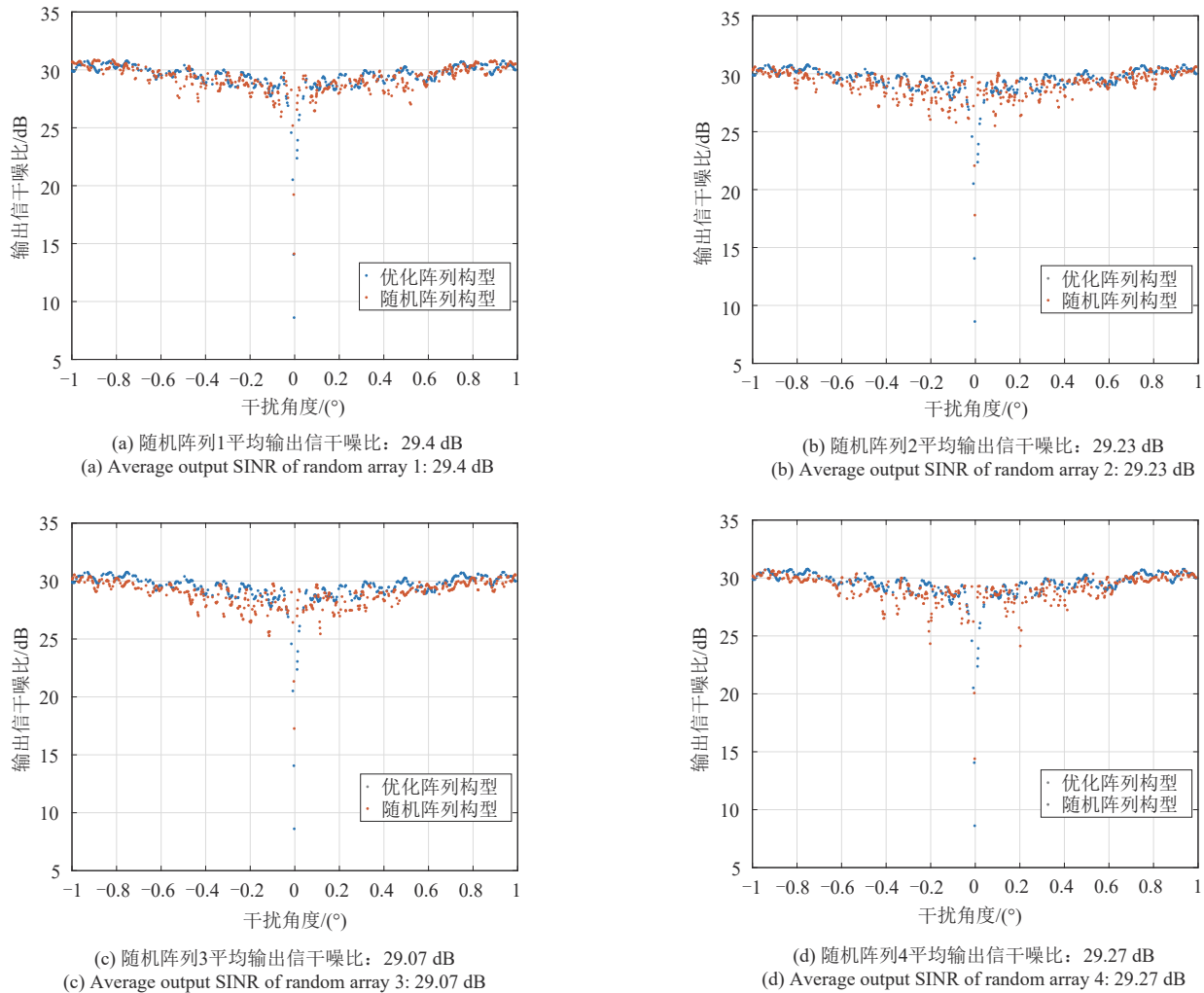


图4 干扰出现在任意角度时四组随机阵列输出信干噪比

Fig. 4 Output SINR of random arrays when jamming appears at different angles

大投入,例如通过氮化镓发射组件提升干扰功率、增加吊舱数量以覆盖多个波段、通过有源电子扫描阵列覆盖更广的空域,因此雷达作为抗干扰方,应该也必须在硬件资源方面加大投入。地基雷达存在一个天然的优势,即受体积、重量、功耗等物理因素制约较小,有极大的空间和潜力去投入硬件资源,而干扰方多是机载或弹载平台,难以无限地扩张硬件投入与地基平台对抗。

考虑成本和机动性,通常辅助阵列的尺寸比主阵列小,导致对消干扰时会引入辅助阵列噪声使得信噪比下降。上文理论分析了信噪比与辅助阵列面积的关系,结果表明,即使在辅助阵列比较小的情况(例如主辅阵面积之比16:5),能获得极大的信干噪比改善(典型场景,单干扰条件下40 dB以上)。此外,分

布式体制中的辅助雷达可以设计成低成本的纯接收阵列,优化噪声系数,使其拥有比主雷达更高的探测灵敏度;同时辅助雷达可以同雷达诱饵系统等结合起来,从多个维度提升雷达系统的对抗能力,实现侦察、干扰、探测等多功能一体化,提升效费比。

5 分布式相参雷达同步与校准

在地基分布式雷达系统中,各单元雷达间的时间和频率高精度同步以及空间同步是保证雷达高效相参积累的前提。时间同步的目的是使得接收信号在时间上对齐,保证采集数据具有相参性^[71-72]。时间同步误差的直接影响是引入“距离徙动”^[73-74]。而在分布式雷达系统中,距离和相位是耦合的,所以同步误差又会对相位产生影响^[75]。分布式雷达

间频率源的微小频率偏差及抖动,都会造成回波信号存在不同形式的相位误差,即频率同步问题。空间同步通过使系统中各单元雷达的波束同时照射目标来实现,利用数字波束形成技术和脉冲追赶式扫描方法能有效解决空间同步问题^[76],故本文对此不做过多介绍。

5.1 分布式相参雷达同步精度需求

本文从相参积累和干扰对消两个方面对同步精度要求进行分析评估。相参积累包括发射相参和接收相参两部分,对于发射相参而言,分布式雷达间时频同步误差将直接造成发射信号在目标处叠加损失;对于接收相参而言,时频同步误差可以通过信号处理方式进行精细补偿。干扰对消是对接收干扰信号的相消,分布式雷达间同步误差同样可以通过信号处理方式进行补偿,且对消权值由数据协方差获得,有一定自适应能力。

以某一雷达(主阵列)时间为基准,分布式其余各单元雷达(辅助阵列)相对于该雷达存在时间同步误差 Δt 。以 Chirp 信号为例,构建分布式相参雷达接收到的目标回波模型如下:

$$\begin{aligned} \text{主阵列: } s_M(t) &= \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{T_p}\right) \exp(j\pi k(t - \tau)^2) \\ \text{辅助阵列: } s_A(t) &= \text{rect}\left(\frac{t - \tau - \Delta t}{T_p}\right) \exp(j\pi k(t - \tau - \Delta t)^2) \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\text{rect}(\cdot)$ 表示矩形窗, k 为 Chirp 信号的调频率, T_p

为信号时宽, τ 为目标时延。由式(6)可知,第一项 $\text{rect}(\cdot)$ 呈现了时间同步误差对距离对齐的影响,第二项 $\exp(\cdot)$ 呈现了时间同步误差对相位的影响。在此信号模型下,相参合成 SNR 随时间同步误差变化如图 5(a) 所示,当相参合成 SNR 下降约 1 dB 时,信号带宽 5 MHz 所需时间同步精度为 40 ns,而信号带宽 500 MHz 所需时间同步精度为 0.4 ns。干扰对消后 SINR 随时间同步误差变化如图 5(b) 所示,当 SINR 下降约 3 dB 时,信号带宽 5 MHz 所需时间同步精度为 30 ns,而信号带宽 500 MHz 所需时间同步精度为 0.3 ns。

综上所述,在分布式相参雷达中,时间同步精度要求与信号带宽或信号脉压后的时宽有关,通常要求满足脉压后时宽的 1/5。

5.2 分布式相参雷达同步技术

根据传输媒介不同,可以将时频同步分为无线同步技术和有线同步技术。

(1) 无线同步技术

无线同步技术主要包括 2 大类:独立式直达波同步法和卫星授时同步法。独立式直达波同步法利用辅助通道接收发射阵列的直达波,采用非相干积累、滑窗滤波等信号处理方法提取同步参数,用于分布式相参雷达同步^[77-78]。卫星授时同步技术利用卫星发射携带了精确标准时间信息的电磁波信号,地面接收机接收信号并锁定卫星后,通过解算本地时钟和卫星的钟差并加以驯服,使得本地时钟源与卫星钟时间同步。此类方法包括卫星共视、双

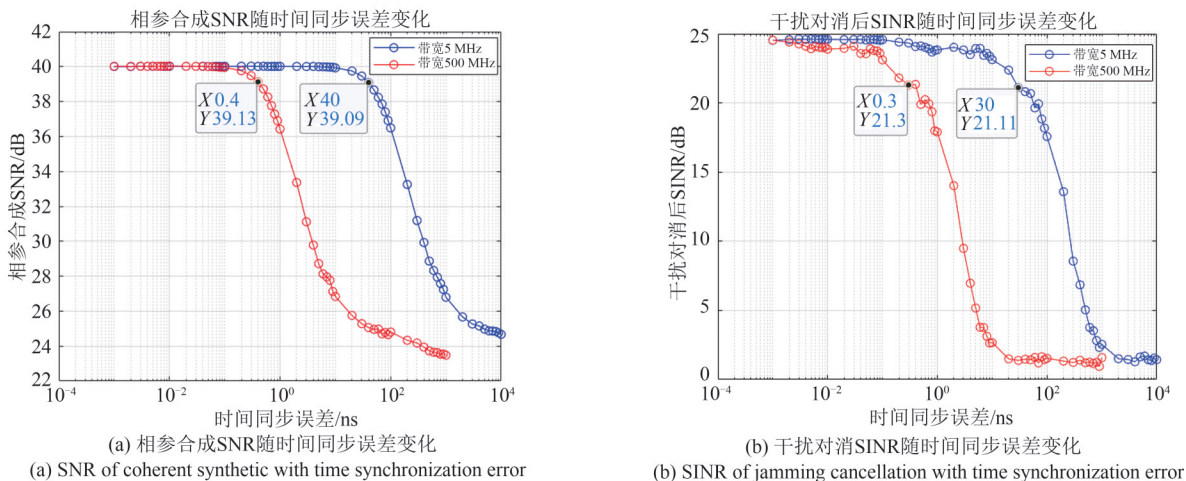


图5 分布式雷达时间同步精度分析

Fig. 5 Time synchronization accuracy analysis of distributed radar

向时间频率传输、基于精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)的时间同步等^[79-81]。北京航空航天大学在PPP时间传递技术的基础上,结合时间基准溯源、实时卫星钟差估计、精准时钟调控及硬件延迟标校等技术,建立了基于北斗卫星导航系统的广域高精度时间服务(Wide-area Precise timing, WPT)系统,可实现所有用户时钟与WPT基准时间优于0.5 ns的时间同步精度^[82]。

(2) 有线同步技术

有线同步方法主要包括2大类:基于射频的同步技术和基于光纤的同步技术。

射频时频同步是基于射频线链路实现频率信号从控制中心到分布式雷达的传输技术,在控制中心和分布式雷达之间架设等长的同种规格射频线缆,在小范围区域内可实现高精度稳定传输、同步。

光纤时频同步传输技术是基于光纤链路实现微波信号从控制中心到分布式雷达的光学稳定传输技术,具有同步精度高、工作带宽大、传输损耗低、覆盖区域广、抗电磁干扰强等优势。它采用低损耗光纤作为传输介质,结合高线性度电光调制和光电探测技术实现电信号和光信号之间转换,并采用主动补偿单元实时校准光纤链路长度,可突破传统射频传输链路的长度和重量限制,实现百公里级的超远、高频、宽带微波信号稳相传输。

2007年,美国喷气动力实验室提出基于往返相位校正原理和光纤延时调控的光纤同步传输技术,实现了氢原子钟产生的100 MHz频率参考信号的同步传输,频率传输稳定度为 $5 \times 10^{-16}/10^3 \text{ s}^{[71]}$ 。随后,日本信息与通信研究所提出基于压控晶体振荡器的高精度、大范围微波相位补偿方法,并将其应用于微波信号同步传输系统中,在25 km城域光纤链路中实现了1 GHz微波信号的同步传输,频率传输稳定度为 $1 \times 10^{-17}/\text{天}^{[83]}$ 。2013年,澳大利亚麦考瑞大学通过研究光载微波信号传输和混频过程中微波信号相位的演变关系,提出基于相位共轭混频技术和偏振扰偏技术的微波信号时频同步传输系统,并将其成功地应用于甚长基线干涉(VLBI)测量系统中^[84-85]。2014年,韩国科学技术院提出基于光纤环路的超高精度光波-微波混合鉴相技术,结合光电锁相环技术,进一步提高了光纤时频同步传输系统的同步精度^[86]。2017年,澳大利亚西澳大学提出

了基于光相位测量和闭环主动补偿的微波信号时频同步传输技术,通过采用光学迈克尔逊干涉仪实现光相位高精度解调,结合声光调制器实现光相位抖动的主动补偿,实现了166 km光纤链路上微波信号的时频同步传输^[87]。2020年,意大利国家计量基于光频同步传递技术,结合超稳定光频梳和高精度光锁相环结构,实现了长达1739 km光纤链路上微波信号的时频同步传输,并探索了其在VLBI测量系统中的应用^[88]。

国内在光纤时频同步传输技术研究进展方面,中科院国家授时中心提出了基于微波相位补偿的高精度微波信号光纤时频同步技术,在56 km传输距离上实现了 $1.8 \times 10^{-15}/\text{s}$ 的频率传输稳定度^[89]。中科院上海光机所聚焦于国土范围内远距离光纤时频同步传输技术研究^[90-91],实现的光纤同步传输链路距离可达数百公里级。中科院半导体所在基于被动微波相位自校正的同步传输技术方面进行了研究^[92]。清华大学提出了基于压控晶体振荡器和高精度锁相环的微波信号时频同步传输系统^[93],并探索了时频同步传输链路在分布式雷达系统中的应用^[28]。北京大学提出了基于模拟移相补偿的长距离光纤时频同步传输,100 MHz频率参考信号在100 km远光纤上的频率传输稳定度为 $1.1 \times 10^{-16}/4 \times 10^3 \text{ s}^{[94]}$ 。上海交通大学提出了光电延迟锁相环、相干瑞利噪声抑制、主动微波光子移相等研究方案,研发的光纤同步传输系统在频率传输稳定度、传输距离等方面实现了较高的技术指标^[95-97]。北京邮电大学提出了色散延时调控、高精度光电锁相环、快速大范围微波相位抖动抑制等创新性的研究方案,微波信号光纤时频同步传输链路距离可达1007 km,频率传输稳定度为 $5.1 \times 10^{-16}/2 \times 10^4 \text{ s}^{[98-101]}$ 。南京航空航天大学提出了基于混频器的后补偿式光纤时频同步传输技术,实现了皮秒量级的传输延时稳定度,并将其应用于分布式微波光子雷达系统,取得了较好的雷达成像结果^[102]。

目前,国内外针对基于离散器件的微波信号光纤时频同步技术已经开展了较深入的研究,在传输稳定度、传输距离等方面实现了较高的技术指标,已经逐渐应用于分布式雷达、深空探测网络、VLBI测量等系统中。然而,现有的技术方案大都聚焦于单条同步链路的研究,针对大规模高精度的高频微

波信号光纤时频同步传输网络的研究鲜有报道。随着分布式相参雷达系统探测距离的增加和探测精度的提高,雷达天线单元数目急剧增加,光纤稳相链路规模显著扩大,链路组网特性显著增强,而传统的离散解决方案存在结构复杂、尺寸大、功耗高、成本高等不足,而且在大规模组网条件下容易积累器件差异,引起链路一致性恶化的倾向,难以满足大规模网络要求。随着集成光子技术的快速发展,利用大规模、超精细的硅基光子集成工艺制备标准化微波信号光学处理和传输芯片成为国际前沿研究方向。通过充分发挥光电子芯片的高密度集成和大规模制造优势,实现高效能、高可靠性、低成本、可模块化标准化的芯片解决方案是适应低成本大规模网络布阵的必然要求,也是时频同步传输技术发展的重要趋势。

6 分布式相参雷达技术发展趋势和展望

分布式相参雷达具有很大的潜力,当前仍存在许多亟待突破的关键技术。

(1) 发射相参

针对相参增程而言,希望能做到真正的发射相参,即无需发射正交波形,可直接估计相参参数,随时随地实现自由相参,让分布式空间相参成为雷达的固有属性,使得多部雷达工作起来就跟一部相控阵雷达一样。

(2) 时频同步

采用无线传输、主动补偿的工作方式,同步模块满足动态接入、即插即用的使用要求,可随时随地实现高精度同步。

(3) 低成本、轻量化、高灵敏度

分布式雷达需要一定的规模作为基础,因此低成本、轻量化、高灵敏度是实际工程应用中的重要需求。结合超导接收机、增益介质与光子耦合的微波激射放大器等技术,以期突破传统半导体噪声温度极限,极大提升分布式雷达的等效增益。结合天线平台一体化、天线新质材料与结构、综合射频数字异质集成等创新技术,研制出超轻量化、超低成本分布式雷达,以满足工程应用。

(4) 前沿技术

与更多先进的技术进行交叉融合,分布式相参雷达能够发挥更强大的工作效能,例如,微波光子技

术可提供超宽带信号产生和光学实时处理能力,与分布式相参雷达相结合,有望提升信号工作带宽,提供更高的距离分辨率,并满足海量数据实时处理的要求。2013年,意大利光子网络国家实验室等研制了基于全光子学的相干雷达系统,并于2018年研发2×2全光MIMO雷达,为基于微波光子技术的分布式雷达提供了技术支撑^[103]。人工智能可提供大数据量下的最优决策能力,分布式节点域资源,为智能提供了自由度和发挥的空间;也正是分布式节点多、资源调度复杂,必须引入智能。

未来,仅靠单一平台的协同探测难以满足远程、连续、准确和高可信的要求,亟需向跨平台分布式协同方向发展。综合运用陆、海、空、天多域平台上的分布式雷达,利用一切泛在电磁频谱信号作为发射源,比如遥感、通信卫星,5G、6G,广播信号等,构建跨域引导、相互印证、接力跟踪、多方位立体化连续观测、等效扩展观测孔径、多源信息融合等跨平台协同工作模式,改善侦察监视能力,并可根据任务需求快速实现重构,满足多尺度快速广域覆盖需求,显著提升分布式相参雷达的作用距离、作用范围、定位精度、跟踪数据率和目标识别准确性。

参考文献

- [1] WILLI N J. Bistatic Radar [M]. Norwood MA: Artech House, 1991.
- [2] 张光斌. 双/多基地雷达参数估计算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
ZHANG Guangbin. Study on parameter estimation algorithms for Bi/multi-static radar [D]. Xi'an: Xidian University, 2006. (in Chinese)
- [3] 杨广平. 外辐射源雷达关键技术研究[J]. 现代雷达, 2008, 30(8): 5-9.
YANG Guangping. A study on key technology of passive radar[J]. Modern Radar, 2008, 30(8): 5-9. (in Chinese)
- [4] 宋杰, 何友, 蔡复青, 等. 基于非合作雷达辐射源的无源雷达技术综述[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2151-2156, 2180.
SONG Jie, HE You, CAI Fuqing, et al. Overview of passive radar technology based on non-cooperative radar illuminator[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(9): 2151-2156, 2180. (in Chinese)
- [5] LI J, STOICA P. MIMO Radar Signal Processing [M]. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2008.

- [6] HAIMOVICH A M, BLUM R S, CIMINI L J. MIMO radar with widely separated antennas[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(1): 116-129.
- [7] 徐洋, 袁振涛, 朱景雷, 等. 网络化雷达现状及技术发展趋势[J]. *现代雷达*, 2019, 41(10): 14-18, 23.
XU Yang, YUAN Zhentao, ZHU Jinglei, et al. A study on developing status and trend of networked radar [J]. *Modern Radar*, 2019, 41(10): 14-18, 23. (in Chinese)
- [8] 刘宏伟, 严峻坤, 周生华. 网络化雷达协同探测技术[J]. *现代雷达*, 2020, 42(12): 7-12.
LIU Hongwei, YAN Junkun, ZHOU Shenghua. Collaborative detection technology of netted radar [J]. *Modern Radar*, 2020, 42(12): 7-12. (in Chinese)
- [9] SKOLNIK M I. *Introduction to Radar Systems (3rd)*[M]. New York: McGraw-Hill, 2008.
- [10] SKOLNIK M I. *Radar Handbook*[M]. New York: McGraw-Hill, 2008.
- [11] 马骏声. NMD-GBR 地基雷达初样型的技术功能[J]. *航天电子对抗*, 2002, 18(3): 1-6.
MA Junsheng. Technical functions of NMD-GBR ground based radar prototype[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2002, 18(3): 1-6. (in Chinese)
- [12] 史仁杰. 雷达反导与林肯实验室[J]. *系统工程与电子技术*, 2007, 29(11): 1781-1799.
SHI Renjie. Radar anti-ballistic missile systems and Lincoln laboratory [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(11): 1781-1799. (in Chinese)
- [13] 陈晓栋. 美国海基 X 波段雷达发展现状[J]. *现代雷达*, 2011, 33(6): 29-31.
CHEN Xiaodong. Development status of US sea-based X-band radar system[J]. *Modern Radar*, 2011, 33(6): 29-31. (in Chinese)
- [14] 鲁耀兵, 张履谦, 周荫清, 等. 分布式阵列相参合成雷达技术研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(8): 1657-1662.
LU Yaobing, ZHANG Lüqian, ZHOU Yinqing, et al. Study on distributed aperture coherence-synthetic radar technology [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(8): 1657-1662. (in Chinese)
- [15] 鲁耀兵, 高红卫, 周宝亮. 分布式孔径相参合成雷达技术[J]. *雷达学报*, 2017, 6(1): 55-64.
LU Yaobing, GAO Hongwei, ZHOU Baoliang. Distributed aperture coherence-synthetic radar technology [J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 55-64. (in Chinese)
- [16] 殷丕磊. 地基宽带分布式全相参雷达技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
YIN Pilei. Research on ground-based wideband distributed coherent aperture radar[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [17] EBERLE J. An adaptively phased, four-element array of thirty-foot parabolic reflectors for passive (Echo) communication systems[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1964, 12(2): 169-176.
- [18] SKOLNIK M, KING D. Self-phasing array antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1964, 12(2): 142-149.
- [19] AHLGREN G W. Next generation radar concept definition team final report[R]. Massachusetts: MIT Lincoln Laboratory, 2003.
- [20] CUOMO K, COUTTS S, MCHARG J, et al. Wideband aperture coherence processing for next generation radar (Nex-Gen)[R]. Massachusetts: MIT Lincoln Laboratory, 2004.
- [21] 周伯行. AN/MPS-36 机动式靶场测量雷达[J]. *现代雷达*, 1985, 7(4): 132-136.
ZHOU Boxing. AN/MPS-36 mobile range measurement radar[J]. *Modern Radar*, 1985, 7(4): 132-136. (in Chinese)
- [22] 张威. 分布式米波雷达相位误差校正与相位编码信号设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
ZHANG Wei. Phase error calibration and phase code signal design for distributed VHF radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)
- [23] 方芳, 陈志宏. 国外新型预警机发展[J]. *国防科技*, 2017, 38(4): 47-52.
FANG Fang, CHEN Zhihong. Recent developments of foreign new AWACS [J]. *National Defense Science & Technology*, 2017, 38(4): 47-52. (in Chinese)
- [24] SCHMID R L, COMBERIATE T M, HODKIN J E, et al. A distributed RF transmitter using one-way wireless clock transfer[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(2): 195-197.
- [25] 美海军接收“柔性分布式阵列雷达”(FlexDAR)[J]. *航天电子对抗*, 2021, 37(1): 32.
US navy receives “flexible distributed array radar” (FlexDAR)[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2021, 37(1): 32. (in Chinese)
- [26] 姜攀. 分布式雷达研究与应用[J]. *现代雷达*, 2022, 44(3): 103-104.
JIANG Pan. Research and application of distributed radar [J]. *Modern Radar*, 2022, 44(3): 103-104. (in Chinese)
- [27] 周宝亮, 雷子健, 周东明, 等. 分布式孔径相参雷达预警探测技术[J]. *信号处理*, 2018, 34(11): 1330-1338.
ZHOU Baoliang, LEI Zijian, ZHOU Dongming, et al.

- Early-warning detection technology of distributed aperture coherent radar[J]. *Journal of Signal Processing*, 2018, 34(11): 1330-1338. (in Chinese)
- [28] 李尚远, 肖雪迪, 郑小平. 基于微波光子学的分布式相参孔径雷达[J]. *雷达学报*, 2019, 8(2): 178-188.
LI Shangyuan, XIAO Xuedi, ZHENG Xiaoping. Distributed coherent aperture radar enabled by microwave photonics[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(2): 178-188. (in Chinese)
- [29] 张聪. 动平台下分布式相参合成技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
ZHANG Cong. Research on distributed coherent synthesis technology on motion platform[D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)
- [30] 孙炜荣. 分布式雷达相参性能分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
SUN Weirong. Coherence performance analysis on distributed radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [31] 望明星, 李小龙, 王辰宇, 等. 基于信息熵的分布式 MIMO 雷达回波相位补偿与相参积累方法[J]. *信号处理*, 2021, 37(6): 966-974.
WANG Mingxing, LI Xiaolong, WANG Chenyu, et al. Entropy-based phase compensation and coherent integration method for distributed MIMO radar[J]. *Journal of Signal Processing*, 2021, 37(6): 966-974. (in Chinese)
- [32] 吴剑旗, 戴晓霖, 杨利民, 等. 一种大基线分布雷达近场相参探测技术[J]. *雷达科学与技术*, 2020, 18(6): 579-583.
WU Jianqi, DAI Xiaolin, YANG Limin, et al. Study on a near-field coherent detection technology for long-baseline distributed radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2020, 18(6): 579-583. (in Chinese)
- [33] 王虎, 韩长喜, 薛慧. 美国深空先进雷达发展研究[J]. *飞航导弹*, 2021(12): 122-126, 145.
WANG Hu, HAN Changxi, XUE Hui. Research on the development of American deep space advanced radar[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2021(12): 122-126, 145. (in Chinese)
- [34] 丁泽刚, 曾涛, 张光伟, 等. 分布式地基雷达深空探测技术[J]. *雷达科学与技术*, 2022, 20(1): 28-33, 40.
DING Zegang, ZENG Tao, ZHANG Guangwei, et al. Deep space detection using distributed earth-based radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2022, 20(1): 28-33, 40. (in Chinese)
- [35] 曹晓敏. 分布式无人机电载雷达相参/非相参信号处理方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
CAO Xiaomin. Research on the method of coherent and non-coherent signal processing of distributed radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)
- [36] 朱宇涛, 郁文贤, 粟毅. 一种基于 MIMO 技术的 ISAR 成像方法[J]. *电子学报*, 2009, 37(9): 1885-1894.
ZHU Yutao, YU Wenxian, SU Yi. An ISAR imaging method based on MIMO technique[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(9): 1885-1894. (in Chinese)
- [37] 叶春茂. 逆合成孔径雷达目标参数估计与图像重建的研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
YE Chunmao. Research on the parameter estimation and image reconstruction for inverse synthetic aperture radar[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)
- [38] 王锐. 分布式全相参雷达参数估计及 ISAR 成像方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
WANG Rui. Research on parameter estimation and ISAR imaging for distributed coherent radar[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [39] PALMER J, H OMER J, LONGSTAFF I D, et al. ISAR imaging using an emulated multistatic radar system[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(4): 1464-1472.
- [40] PASTINA D, SANTI F, BUCCIARELLI M, et al. 2D-MIMO SAR/ISAR imaging of moving targets with reconfigurable formation of platforms[C]//EUSAR 2012; 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Nuremberg, Germany. VDE, 2012: 223-226.
- [41] SMITH J W, YANIK M E, TORLAK M. Near-field MIMO-ISAR millimeter-wave imaging[C]//2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20). Florence, Italy. IEEE, 2020: 1-6.
- [42] JARDAK S, YODA D, MORI H. Combined ISAR and MIMO processing for near-field 3D radar imaging[C]//2021 18th European Radar Conference (EuRAD). London, United Kingdom. IEEE, 2022: 409-412.
- [43] 张亚标, 朱振波, 汤子跃, 等. 双站逆合成孔径雷达成像理论研究[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(6): 969-972.
ZHANG Yabiao, ZHU Zhenbo, TANG Ziyue, et al. Bi-static inverse synthetic aperture radar image formation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(6): 969-972. (in Chinese)
- [44] 朱宇涛. 多通道 ISAR 成像技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
ZHU Yutao. Multiple-channel ISAR imaging[D]. Chang-

- sha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [45] 董健, 尚朝轩, 高梅国, 等. 双基地 ISAR 成像平面研究及目标回波模型修正[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(8): 1855-1862.
DONG Jian, SHANG Chaoxuan, GAO Meiguo, et al. The image plane analysis and echo model amendment of bistatic ISAR [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(8): 1855-1862. (in Chinese)
- [46] 董健, 尚朝轩, 高梅国, 等. 空间目标双基地 ISAR 成像的速度补偿研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(1): 78-85.
DONG Jian, SHANG Chaoxuan, GAO Meiguo, et al. Research on bistatic ISAR speed compensation of space target[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2010, 5(1): 78-85. (in Chinese)
- [47] 谷文堃, 陈阿磊, 王党卫, 等. 一种机载 MIMO 雷达地面运动目标成像方法[J]. 空军雷达学院学报, 2010, 24(4): 235-238, 243.
GU Wenkun, CHEN Alei, WANG Dangwei, et al. Method for ground moving target imaging of airborne MIMO radar [J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2010, 24(4): 235-238, 243. (in Chinese)
- [48] 王党卫, 林震, 袁俊泉, 等. 窄带高分辨 MIMO 雷达图像特性分析[J]. 空军雷达学院学报, 2010, 24(6): 391-395.
WANG Dangwei, LIN Zhen, YUAN Junquan, et al. Analysis of image characteristics of narrow-band high-resolution MIMO radar [J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2010, 24(6): 391-395. (in Chinese)
- [49] 唐远航. 分布式雷达高分辨成像方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
TANG Yuanhang. Research on high resolution imaging method of distributed radar system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [50] 王勇, 杨佳兴, 李亚军, 等. 舰载 ISAR 成像平台运动补偿新方法研究[J]. 制导与引信, 2020, 41(2): 26-32, 42.
WANG Yong, YANG Jiaying, LI Yajun, et al. Research on a new method of platform motion compensation for shipborne ISAR imaging[J]. Guidance & Fuze, 2020, 41(2): 26-32, 42. (in Chinese)
- [51] CAI Jinjian, MARTORELLA M, LIU Quanhua, et al. 3D ISAR imaging: the alignment problem[C]//2019 International Radar Conference (RADAR). Toulon, France. IEEE, 2019: 1-5.
- [52] LI Nengjing, ZHANG Yiting. A survey of radar ECM and ECCM [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1995, 31(3): 1110-1120.
- [53] SCHROER R. Electronic warfare [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2003, 18(7): 49-54.
- [54] 王玉军. 线性调频雷达干扰新技术及数字干扰合成研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
WANG Yujun. Study on jamming to chirp radar and digital jamming synthesis [D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [55] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.
ZHAO Guoqing. Principle of Radar Countermeasure [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012. (in Chinese)
- [56] 王永良, 丁前军, 李荣锋. 自适应阵列处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
WANG Yongliang, DING Qianjun, LI Rongfeng. Adaptive Array Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
- [57] BALLANCE W P, MILLER T W. Impact of mainlobe interference angular extent on adaptive beamforming [C]// Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, USA. IEEE, 1991: 989-993.
- [58] ZHOU Feng, TAO Mingliang. Research on methods for narrow-band interference suppression in synthetic aperture radar data [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(7): 3476-3485.
- [59] LI Hui, ZHAO Yongbo, CHENG Zengfei, et al. OFDM chirp waveform diversity design with correlation interference suppression for MIMO radar [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(7): 1032-1036.
- [60] LIU Hongqing, LI Dong, ZHOU Yi, et al. Joint wide-band interference suppression and SAR signal recovery based on sparse representations [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(9): 1542-1546.
- [61] SU Jia, TAO Haihong, TAO Mingliang, et al. Narrow-band interference suppression via RPCA-based signal separation in time-frequency domain [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(11): 5016-5025.
- [62] 蒲伟铭, 梁振楠, 陈新亮, 等. 一种鲁棒的分布式雷达主瓣干扰抑制方法[J]. 信号处理, 2022, 38(2): 250-257.
PU Weiming, LIANG Zhennan, CHEN Xinliang, et al. A robust method for mainlobe interference suppression based on distributed array radar [J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(2): 250-257. (in Chinese)

- [63] 陈静, 李晗, 张洪纲, 等. 分布式雷达主瓣间歇采样转发干扰抑制方法[J]. 信号处理, 2018, 34(11): 1368-1376. CHEN Jing, LI Han, ZHANG Honggang, et al. Main-lobe interrupted sampling repeater jamming suppression method in distributed radar[J]. Journal of Signal Processing, 2018, 34(11): 1368-1376. (in Chinese)
- [64] AMUSO V, SCHNEIBLER R A, ZHANG Y, et al. Distributed apertures for robustness in radar and communications (DARRC)[C]// 2015 IEEE Radar Conference (RadarCon). Arlington, VA, USA. IEEE, 2015: 111-116.
- [65] ZHANG Honggang, LUO Jian, CHEN Xinliang, et al. Whitening filter for mainlobe interference suppression in distributed array radar[C]//2016 CIE International Conference on Radar (RADAR). Guangzhou, China. IEEE, 2016: 1-5.
- [66] 刘泉华. 分布式雷达抗主瓣干扰技术[R]. 合肥: 第五届全国电子战大会专题论坛, 2022.9.17. LIU Quanhua. Main Lobe Jamming Suppression Technique in Distributed Array Radar[R]. Hefei: 2022 Conference of China Electronic Warfare (CEW), 2022.9.17. (in Chinese)
- [67] CEN Ling, YU Zhuliang, WEE S, et al. Linear aperiodic array synthesis using an improved genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(2): 895-902.
- [68] 王铮. 相控阵雷达稀布阵列优化设计方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2019. WANG Zheng. Study on Sparse Arrays Synthesis and Optimization Technique for Phased Array Radar [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [69] 夏辉, 史海庆, 黎之乐. 下一代支援干扰吊舱发展综述[J]. 电子信息对抗技术, 2019, 34(6): 52-55. XIA Hui, SHI Haiqing, LI Zhile. Summary of the development of the next-generation electronic attack jamming pod[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2019, 34(6): 52-55. (in Chinese)
- [70] 之兼. 美军“下一代干扰机”(NGJ)项目近况跟踪[N]. 中国航空报, 2020-12-1(9). ZHI Jian. Status tracking of the Next Generation Jammer (NGJ) project of U.S. army [N]. China Aviation News, 2020-12-1(9). (in Chinese)
- [71] 杨振起. 双(多)基地雷达系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. YANG Zhenqi. Bistatic (Multistatic) Radar Systems [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [72] 汤子跃, 张守融. 双站合成孔径雷达系统同步问题研究[J]. 现代雷达, 2004, 26(1): 5-9. TANG Ziyue, ZHANG Shourong. A study on the system synchronization of a bistatic synthetic aperture radar [J]. Modern Radar, 2004, 26(1): 5-9. (in Chinese)
- [73] WANG Wenqin, DING Chibiao, LIANG Xingdong. Time and phase synchronization via direct-path signal for bistatic synthetic radar systems[J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2010, 2(1): 1-11.
- [74] WANG Wenqin. Clock timing jitter analysis and compensation for bistatic synthetic aperture radar systems [J]. Fluctuation and Noise Letters, 2007, 7(3): 341-350.
- [75] 黄鹏, 杨明磊, 陈伯孝, 等. 双基地多载频 MIMO 雷达的同步误差提取方法研究[J]. 现代雷达, 2012, 34(7): 33-37, 40. HUANG Peng, YANG Minglei, CHEN Baixiao, et al. A study on estimation methods of time synchronization error in bistatic multi-carrier-frequency MIMO radar [J]. Modern Radar, 2012, 34(7): 33-37, 40. (in Chinese)
- [76] 杜子亮. 双(多)基地雷达系统应用分析[J]. 雷达与对抗, 2016, 36(4): 5-7, 40. DU Ziliang. Application analysis of bistatic /multi-static radar systems [J]. Radar & ECM, 2016, 36(4): 5-7, 40. (in Chinese)
- [77] 李昱龙, 熊英. 对分布式 MIMO 雷达的时间同步干扰方法[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(1): 51-54, 59. LI Yulong, XIONG Ying. A time synchronization jamming method to MIMO radar with widely separated antennas [J]. Radar Science and Technology, 2015, 13(1): 51-54, 59. (in Chinese)
- [78] 陈伯孝, 孟佳美, 张守宏. 岸-舰多基地地波超视距雷达的发射波形及其解调[J]. 西安电子科技大学学报, 2005, 32(1): 7-11. CHEN Boxiao, MENG Jiamei, ZHANG Shouhong. Design of transmitting waveforms and its demodulation in the coast-ship multi-static ground wave over-the-horizon radar [J]. Journal of Xidian University, 2005, 32(1): 7-11. (in Chinese)
- [79] 肖云, 焦文海, 梁海鸥, 等. 基于 GPS 卫星共视法站间时间同步[J]. 测绘科学与工程, 2010(1): 9-11, 45. XIAO Yun, JIAO Wenhai, LIANG Haiou, et al. The time synchronization of stations based on GPS common view method [J]. Geomatic Science and Engineering, 2010(1): 9-11, 45. (in Chinese)
- [80] 朱江淼, 韩东, 高源, 等. 卫星双向法时间频率比对系统的研究与构建[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(3): 509-516.

- ZHU Jiangmiao, HAN Dong, GAO Yuan, et al. Research and establishment of two way satellite time and frequency transfer system[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2011, 19(3): 509-516. (in Chinese)
- [81] 吕大千. 基于精密单点定位的GNSS时间同步方法研究[J]. *测绘学报*, 2022, 51(2): 315.
LÜ Daqian. Research on GNSS time synchronization method based on precise point positioning [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(2): 315. (in Chinese)
- [82] 施闯, 张东, 宋伟, 等. 北斗广域高精度时间服务原型系统[J]. *测绘学报*, 2020, 49(3): 269-277.
SHI Chuang, ZHANG Dong, SONG Wei, et al. BeiDou wide-area precise timing prototype system[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(3): 269-277. (in Chinese)
- [83] KUMAGAI M, FUJIEDA M, NAGANO S, et al. Stable radio frequency transfer in 114 km urban optical fiber link [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2949-2951.
- [84] HE Yabai, ORR B J, BALDWIN K G H, et al. Stable radio-frequency transfer over optical fiber by phase-conjugate frequency mixing [J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 18754-18764.
- [85] HE Yabai, BALDWIN K G H, ORR B J, et al. Long-distance telecom-fiber transfer of a radio-frequency reference for radio astronomy[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 138-146.
- [86] JUNG K, SHIN J, KANG J, et al. Frequency comb-based microwave transfer over fiber with 7×10^{-19} instability using fiber-loop optical-microwave phase detectors [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(6): 1577-1580.
- [87] SCHEDIWIY S W, GOZZARD D R, STOBIE S, et al. Stabilized microwave-frequency transfer using optical phase sensing and actuation[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(9): 1648-1651.
- [88] CLIVATI C, AIELLO R, BIANCO G, et al. A coherent optical fiber link for very long baseline interferometry [C]//2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). San Jose, California, USA.IEEE, 2020: 1-2.
- [89] 全洪雷, 赵文宇, 薛文祥, 等. 基于微波相位补偿的56 km高精度光纤微波频率传递[J]. *光子学报*, 2021, 50(4): 40-46.
QUAN Honglei, ZHAO Wenyu, XUE Wenxiang, et al. High-resolution microwave frequency dissemination via 56 km optical fiber based on microwave phase compensation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4): 40-46. (in Chinese)
- [90] 陈炜, 程楠, 刘琴, 等. 275 km京沪光纤干线高精度时频传递研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 205-212.
CHEN Wei, CHENG Nan, LIU Qin, et al. High precision time and frequency transfer on 275 km Beijing-Shanghai fiber backbone [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 205-212. (in Chinese)
- [91] FENG Zitong, ZHANG Xi, WU Rui, et al. High-stability and multithreading phase-coherent receiver for simultaneous transfer of stabilized optical and radio frequencies[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(10): 2418-2421.
- [92] LI Wei, WANG Wenting, SUN Wenhui, et al. Stable radio-frequency phase distribution over optical fiber by phase-drift auto-cancellation [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4294-4296.
- [93] 王力军. 超高精度时间频率同步及其应用[J]. *物理*, 2014, 43(6): 360-363.
WANG Lijun. High precision synchronization of time and frequency and its applications [J]. *Physics*, 2014, 43(6): 360-363. (in Chinese)
- [94] 任丽霞, 章双佑, 钱程, 等. 基于模拟移相补偿的长距离光纤频率传输[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 132-136.
REN Lixia, ZHANG Shuangyou, QIAN Cheng, et al. Radio-frequency transfer over a long-distance fiber link based on analog phase shift compensation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 132-136. (in Chinese)
- [95] ZHANG Lumin, CHANG Le, DONG Yi, et al. Phase drift cancellation of remote radio frequency transfer using an optoelectronic delay-locked loop [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 873-875.
- [96] 常乐, 董毅, 孙东宁, 等. 光纤稳相微波频率传输中相干瑞利噪声的影响与抑制[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 59-64.
CHANG Le, DONG Yi, SUN Dongning, et al. Influence and suppression of coherent Rayleigh noise in fiber-optic-based phase-stabilized microwave-frequency transmission system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 59-64. (in Chinese)
- [97] SHEN Jianguo, WU Guiling, HU Liang, et al. Active phase drift cancellation for optic-fiber frequency transfer using a photonic radio-frequency phase shifter[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2346-2349.
- [98] ZHANG Anxu, DAI Yitang, YIN Feifei, et al. Stable radio-frequency delivery by λ dispersion-induced optical tunable delay[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2419-2421.
- [99] WANG Dongxing, JIANG Tianwei, LIU Chenxia, et al. Stable radio frequency dissemination via a 1007 km fiber link based on a high-performance phase lock loop[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 24479-24486.

- [100] WU Zhongle, DAI Yitang, YIN Feifei, et al. Stable radio frequency phase delivery by rapid and endless post error cancellation[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(7): 1098-1100.
- [101] YIN Feifei, ZHANG Anxu, DAI Yitang, et al. Phase-conjugation-based fast RF phase stabilization for fiber delivery[J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 878-884.
- [102] WEI Juan, ZHANG Fangzheng, ZHOU Yonggang, et al. Stable fiber delivery of radio-frequency signal based on passive phase correction [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3360-3362.
- [103] 李圆圆. 微波光子雷达信号生成及处理关键技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- LI Yuanyuan. Research on key technologies of microwave photonic radar signal generation and processing [D]. Xi'an: Xidian University, 2021. (in Chinese)

作者简介



刘泉华 男,1982年生,福建龙岩人。北京理工大学信息与电子学院教授、博士生导师。研究方向为高分辨雷达、分布式雷达系统及信号处理。
E-mail: liuqianhua@bit.edu.cn



张凯翔 男,1991年生,山西大同人。北京理工大学信息与电子学院博士研究生。研究方向为分布式阵列雷达抗干扰。
E-mail: 841355867@qq.com



梁振楠(通讯作者) 男,1992年生,山西平遥人。北京理工大学信息与电子学院博士后。研究方向为数字阵列雷达系统和分布式雷达信号处理。
E-mail: liangzhennan@bit.edu.cn



曾涛 男,1971年生,天津人。北京理工大学信息与电子学院教授、博士生导师。研究方向为SAR成像技术、实时雷达信号处理技术。
E-mail: zengtao@bit.edu.cn



龙腾 男,1968年生,湖北黄冈人。北京理工大学信息与电子学院教授、博士生导师。研究方向为雷达系统、阵列信号处理、合成孔径雷达。
E-mail: longteng@bit.edu.cn