

2019年空时自适应处理技术研究热点回眸

闫晟¹, 孙梦茹^{1,2}, 施博¹, 郝程鹏^{1*}

1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 空时自适应处理可以联合空域和时域进行二维自适应滤波, 是运动平台雷达系统中进行杂波抑制和目标检测的关键技术。近年来, 空时自适应处理技术迅速发展, 其应用领域也在不断扩大。概述了2019年空时自适应处理领域所取得的重要研究进展, 展望了未来空时自适应处理技术的发展趋势。

关键词 空时自适应处理; 杂波抑制; 目标检测; 抗干扰

空时自适应处理(space-time adaptive processing, STAP)技术联合空域和时域进行二维自适应滤波, 可实现对运动平台杂波的有效抑制并凸显目标。基于STAP的目标常用检测流程如图1所示^[1], 由STAP处理和恒虚警(constant false alarm rate, CFAR)检测两部分组成, 其中STAP处理实现对接收杂波和干扰的有效抑制, 恒虚警检测器完成目标的自动检测并输出判决结果。STAP技术最早应用于机载雷达中, 目前已成为运动平台雷达系统杂波抑制和目标检测的关键技术和重要手段。随着稀疏恢复、认知雷达等技术的不断发展, 以及STAP应用场景日趋复杂, STAP技术在发展近半世纪后仍得到了国内外学者的广泛关注。本文立足于STAP领域的

研究动态, 介绍2019年STAP领域的重要进展以及推动STAP研究取得重要突破的新技术和新方法。



图1 基于STAP的目标检测流程

1 传统STAP提升

1.1 运算量和误差问题

自1973年STAP技术提出至今, 如何在保持STAP方法杂波抑制性能的基础上降低计算复杂度、提高算法稳健性, 一直是学者们所关注的重点问题。

收稿日期: 2019-12-31; 修回日期: 2020-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(61172166, 61701490, 61971412)

作者简介: 闫晟, 研究员, 研究方向为水声信号处理, 电子信箱: yansheng@mail.ioa.ac.cn; 郝程鹏(通信作者), 研究员, 研究方向为水声信号处理, 电子信箱: haochengp@mail.ioa.ac.cn

引用格式: 闫晟, 孙梦茹, 施博, 等. 2019年空时自适应处理技术研究热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(3): 192-199; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.03.017

目前,降低STAP计算复杂度的途径多是采用优化迭代方法或降维方法。考虑到共轭梯度法在矩阵求逆中的计算优势,文献[2]提出了一种结合CLEAN方法^[3]和共轭梯度法的STAP算法,可获得比迭代自适应方法(iterative adaptive approach, IAA)更低的计算成本,并且改善了IAA的失配问题,一定程度上减少传统STAP方法对辅助样本数的需求。文献[4]利用了杂波协方差矩阵的斜对称结构,与局域联合处理法(joint domain localized, JDL)这一传统降维STAP方法相结合,可在降低计算复杂度的同时充分利用辅助样本。文献[5]则将多普勒域的降维变换引入互质阵雷达STAP中,有效地降低了运算量,收敛速度也有所提升。文献[6]关注于 $\Sigma\Delta$ -3DT降维STAP方法的硬件实现,利用高速数字信号处理器(digital signal processor, DSP)的多核特性,在多核上并行处理多个子段的雷达数据;并对样本协方差矩阵的更新进行优化处理。该方法可降低计算复杂度,缩短处理时间,满足工程所需的实时性要求。

通过修正数据模型或施加额外约束,可提高STAP对误差的稳健性。针对分布式天线阵列,文献[7]证明了幂律相位噪声功率谱密度模型的适用性,同时提出一个分布式STAP系统的广义运动模型,分析了各种误差因素对分布式STAP性能的影响,这些工作有助于为提高分布式STAP的鲁棒性提供理论依据和算法改进思路。文献[8]为了提高基于参数化协方差矩阵估计(parametric covariance matrix estimation, PCE)的STAP在系统参数和杂波分布存在误差时的稳健性,首先利用稀疏恢复与Radon变换得到杂波分布,再使用归一化广义内积统计量对杂波进行修正,最后通过PCE估计出杂波协方差矩阵(clutter covariance matrix, CCM)。文献[9]将幅度约束和相位约束分别施加到空域和时域中,通过迭代优化得到相应的鲁棒权重即设计空时可分滤波器。此方法可保证STAP处理在阵列校准误差、导向矢量失配等偏差下的鲁棒性。

1.2 非均匀/非平稳杂波问题

STAP的实际应用场景多为非均匀、非平稳杂

波环境,难以获得大量独立同分布的辅助样本,以致于对杂波协方差矩阵的估计精度下降,严重影响STAP性能。近年来,稀疏恢复(sparse recovery, SR)方法在STAP中的应用受到了广泛关注,该方法可在辅助样本数严重不足时仍然保持良好的杂波抑制性能。

三维(three-dimensional, 3D)STAP是抑制非平稳杂波的重要方法,文献[10]采用基于多测量矢量的稀疏贝叶斯学习(sparse bayesian learning, SBL)算法,针对迭代过程效率低、计算量大的问题,选择了一种扩展相关向量机的快速算法来估计超参数。改进后的3D-STAP方法可在非平稳、非均匀杂波环境中较为准确地恢复出杂波三维谱,并增强了近距离杂波和俯仰角模糊杂波的可分性。大量文献已经证明,仅使用一个辅助样本时,SR-STAP算法的杂波抑制性能将会大大降低^[11-18],文献[19]-[21]致力于提高基于单样本的SR-STAP算法性能。文献[19]利用杂波回波对称性这一先验知识(图2^[9]),重构一些丢失的杂波分量,得到更为准确的CCM;文献[20]没有按照传统的SR-STAP直接计算自适应权值,而是利用SR方法估计出的CCM设计降维变换矩阵,再使用基于广义旁瓣相消器(generalized sidelobe canceller, GSC)的降维STAP方法。尽管只有一个辅助样本所获得CCM的精度不足以获得合适的自适应权值向量,但它可以为选择最合适的辅助通道提供很好的支持。文献[19]-[20]是基于杂波空时功率谱的稀疏性,而文献[21]则是基于STAP滤波器权值的稀疏性。该方法利用角度-多普勒域权值向量的稀疏性设计降维变换矩阵,仅选择权重值较大的角度多普勒通道进行杂波抑制。与利用辅助样本进行杂波抑制的上述研究不同,文献[22]利用杂波脊斜率的先验知识,预先从接收到的数据中构造斜投影来剔除潜在的目标成分,再利用CCM的结构特点重构出CCM,实现基于SR的直接数据域(direct data domain, D3)STAP算法,不存在网格失配和系统自由度损失的问题。

除上述SR-STAP算法以外,还有其他解决非均匀、非平稳杂波问题的算法研究。文献[23]提出

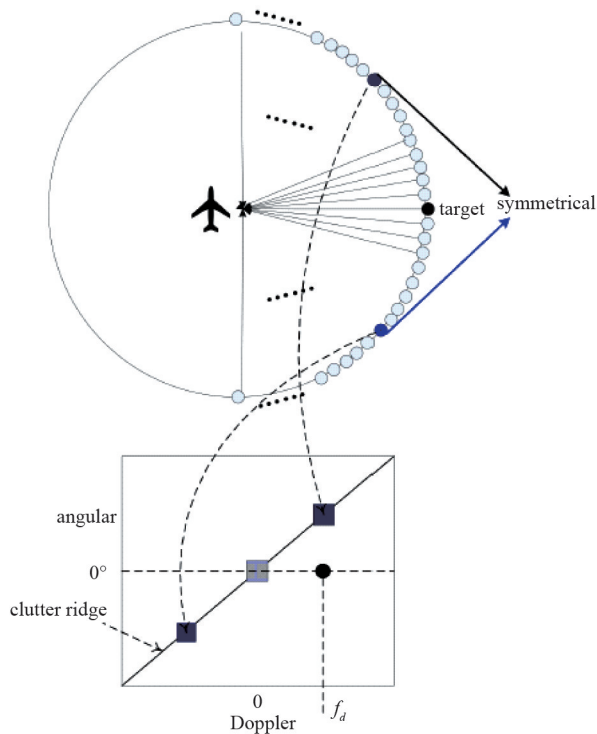


图2 杂波回波的对称性

了一种从训练数据中剔除潜在运动目标信号和强散射体的运动目标信号抑制模型,与针对多通道雷达STAP的4种训练数据选择方法相结合进行了比较评估。所提出的模型在保持较低的虚警概率情况下,可提高目标检测概率。针对于端射阵列机载雷达(end-fire array airborne radar, EAAR),文献[24]引入时间协方差矩阵黎曼平均距离的概念量化杂波的非平稳性,通过自适应分割将杂波距离多普勒谱分为纯噪声区、平稳杂波区和非平稳杂波区,分别对应使用脉冲多普勒(pulse Doppler, PD)、二维(two-dimensional, 2D)STAP、3D-STAP进行处理。与传统3D-STAP相比,该方法降低了计算复杂度和采样要求;与传统2D-STAP相比,该方法能有效地提高非平稳杂波区域的杂波抑制性能。

1.3 干扰抑制问题

STAP目前已广泛应用于军事和民用领域,其实际应用场景中常常存在各种干扰成分,导致了STAP性能严重下降,亟需展开抗干扰STAP算法的研究。

文献[25]针对于机载相控阵雷达系统,提出了一种基于最大后验概率(Maximum A Posteriori, MAP)原理的鲁棒SBL离散干扰抑制方法。该方法迭代进行空时谱的估计和空时过完备字典的校准,每次迭代中利用SBL估计出空时平面上杂波和离散干扰的显著分量,再通过计算误差矩阵校准过完备字典。在少量的空时辅助数据下,该方法可有效抑制离散干扰、提高检测性能,并且计算量较低。文献[26]对存在多个离群点时性能显著降低的广义内积(generalized inner product, GIP)方法进行了优化改进。样本协方差矩阵(sample covariance matrix, SCM)作为GIP的初始检验协方差矩阵(text covariance matrix, TCM),将目标导向矢量与SCM特征空间之间的最大互谱度量对应的SCM特征值设为噪声方差,重构出新的TCM后再与传统GIP方法结合,形成新的GIP统计量。

文献[27]分析了干扰协方差矩阵失配对自适应匹配滤波器(adaptive matched filter, AMF)性能的影响,分析结果有助于预测AMF检测器的虚警率和对各种失配条件的错配训练,在训练不匹配的情况下发展STAP的CFAR算法。由于散射波扫频干扰占据大量STAP自由度,文献[28]充分利用相位编码信号波形灵活、抗干扰的特点,提出了一种基于双相位随机编码信号的STAP抗干扰方法。该方法在利用匹配滤波进行干扰抑制后,可保证足够的系统自由度用于后续STAP处理。与基于chirp信号的STAP方法相比,该方法提高了波束形成的鲁棒性和杂波抑制能力。

2 新体制应用

随着STAP技术在传统相控阵体制运动平台上的成熟应用,尤其是对杂波的有效抑制,更多的研究人员致力于将STAP技术和基本原理应用于新的雷达体制,以期望其不仅在反制传统的具备隐身性能的战斗机、洲际导弹和临近空间武器目标时获得更好的处理效果,而且也能在民用方面做出贡献。近一年内国内外学术界在新体制雷达方面的主要

工作集中在无源双、多基地和MIMO(multiple-input multiple-output)等。

2.1 无源 STAP

借助于广泛分布于空间中的电磁信号如无线电广播、电视广播、通信基站等,无源STAP技术成为地面动目标探测(ground moving target indication, GMTI)的重要手段。无源STAP技术一般使用双基地探测模型,如图3^[29]所示,因此无源STAP技术不但要克服双基情况下的杂波抑制问题,还需要应对非合作信号的非平稳问题、多种非合作信号最优选择等问题。

在杂波抑制方面,文献[30]研究了移动无源雷达中多普勒散射杂波的滤除问题。借助于由射电

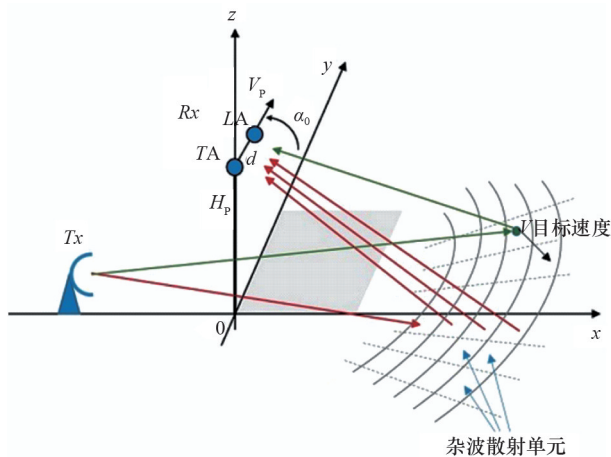


图3 双基地无源STAP

天文学发展起来的CLEAN技术,作者提出一种应用于无源运动雷达的杂波抑制技术。通过对信号的强分量进行精确建模并滤除它们,来提升隐藏的弱分量的信噪比。仿真结果表明,该算法具有良好的杂波对消能力,但本底噪声对消能力有限。

在解决非合作信号的非平稳性方面。文献[29]使用数字广播电视信号(DVB-T)作为非合作探测源,由于这种用于通信的非合作信号包含大量信息,用于探测时表现出严重的非平稳性,使得传统匹配滤波脉冲压缩方法对杂波抑制的处理能力受限。文章通过深入分析这种探测场景下匹配滤波输出,提出了使用互惠反馈滤波(reciprocal filter-

ing, RpF)级联移动相位中心阵(displaced phase center antenna, DPCA)的相干处理方法。仿真和实验验证表明,新方法能有效提高使用大带宽非合作信号的输出性能,并能成功的探测地面低速目标。

在非合作信号的最优选取方面。文献[31]从整体设计的角度上全面评估了STAP中直接影响无源双基地雷达的三维辐射源选择优化性能的关键因素。从GMTI的任务角度来看,有几个重要的因素需要考虑。通常这些被归结为发射器、目标和接收器之间的相对距离。强调了双静态角度、目标和杂波特性及发射器波形特性作为可调参数的重要性,这些参数可以改变发射器的选择过程。这种优化的结果将为任务指挥官和自动无源雷达工具提供信息,以便在规划和执行无源移动目标行动时做出最佳决策。

2.2 MIMO

MIMO体制可以通过波形分集、空间分集和二者混合的形式提升对探测空间的信息获取能力,但其阵元数量和发射波形量的增加也对系统采样和运算性能提出了更高的要求。

在MIMO新阵列结构方面,文献[32]研究了具有嵌套结构的机载MIMO雷达的空时自适应处理问题,如图4^[32]所示。根据阵列和发射脉冲间隔的特殊结构,构造了一个长度较长的虚拟时空快拍矢量。由嵌套阵列和嵌套脉冲串构成的虚拟天线阵

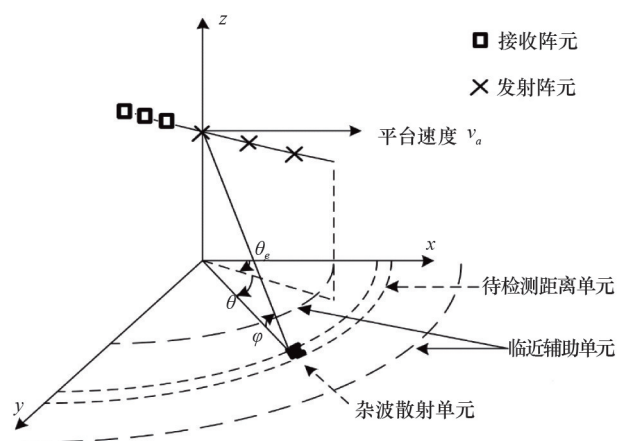


图4 机载集中式MIMO雷达

列和虚拟脉冲序列是连续的、无孔径的。在自由度不断增加的情况下,与传统的机载 MIMO 雷达相比,嵌套结构的机载 MIMO 雷达的 STAP 方法能够获得更高的上界,有利于杂波抑制和目标检测。然而在协方差矩阵的估计中,杂波块之间的交叉相关导致了样本协方差矩阵的不准确,这使得 STAP 方法需要大量的训练样本。

在解决样本量不足和运算复杂度过高方面,文献[33]将 MIMO 技术与 GMTI 相结合,提出了一种两步检测过程:第一步在较短的时间间隔内,利用前斜视波束获得粗略信息,通过 3DT 降维 STAP 方法在相对较高的虚警率下探测可能感兴趣的目标,同时解决数据样本不足的问题;第二步基于预信息,利用侧视模式下发射波形和接收滤波器的循环优化进行收发机联合设计,使输出 SINR 最大化,从而进一步检测和降低虚警率。该方法能够较好地抑制杂波,从而提高运动目标的检测性能。

在提高 MIMO 雷达失配情况下的稳健性方面,文献[34]研究了一种能提高 MIMO 探测系统参数估计稳健性的方法。通过构建空时导向矢量误差模型,系统信干噪比模型,以及波形恒模、旁瓣和杂波抑制约束等形成了一套基于最大化最差情况下输出信干噪比的优化准则。并使用迭代的方法高效求解这个复杂的非线性优化问题,理论和仿真分析都表明新提方法能有效提升 MIMO-STAP 系统的稳健性。

2.3 其他

文献[35]成功地将 STAP 方法应用于民用机场跑道障碍物检测。文章没有使用一般机载雷达假定的同心圆散射单元模型,而是使用了矩形散射单元模型,通过分析散射单元杂波特性有效抑制杂波,并得到可优于合成孔径雷达的探测性能。实验证明在 X 波段,当噪声能量为 60 dBm 时,碎片障碍物的反射能量超过 30 dBm 就能被有效检测。

文献[36]将 STAP 技术和后向投影(back projection, BP)成像算法相结合,用于解决地面低速目标探测问题。通过将多颗地球同步轨道合成孔径雷达编队,形成虚拟卫星孔径,在此基础上构建 STAP 处理模型,并最终给出了动目标检验统计

量。通过仿真分析表明,所提方法能有效抑制杂波达 45 dB,且最小探测速度为 5 m/s,优于低轨道 STAP 技术。

文献[37]考虑了弹载雷达在攻击超低空目标时,因目标与海面严重电磁耦合现象,形成镜像虚假目标干扰问题。为克服这种多径干扰,文章通过将目标及其临近空时二维域进行幅相联合多点约束的稳健空时自适应处理,实现了 STAP 二维响应的主瓣保形,克服了超低空动目标检测应用中多径效应造成的 STAP 二维响应的主瓣畸变。通过仿真分析,证明了所提方法在克服多径效应时的有效性。

3 发展趋势与展望

3.1 稀疏恢复 STAP

基于稀疏恢复的 STAP 框架建立了由离散化空时频率所对应的空时导向矢量,并相应地产生了网格失配(off-grid)问题,显著降低了 STAP 的处理性能。简单增加空时频率的离散化网格密度并不能有效解决网格失配问题,反而会影响稀疏恢复 STAP 的性能。

文献[38]提出了一种基于降维局部搜索正交匹配追踪的网格失配 STAP 算法。该算法利用训练样本估计出的杂波频谱设计了一个稀疏 STAP 字典,并从中选择与杂波信号匹配的全局原子。此外,在局部搜索步骤中设计局部 STAP 字典,并从中选择与杂波信号匹配度更高的局部原子。该算法通过选择更多的匹配原子,获得更精确的 CCM。仿真结果验证该算法可在较低的计算量下获得较好的抗网格失配性能。

文献[39]提出了一种网格失配下的角度多普勒序贯估计方法,实现 STAP 在估计精度和处理效率上的平衡。算法应用粗糙稀疏重建初始化空时相对概率图(图 5^[39]),并获取可能的回波源数目和相应的角度多普勒估计作为先验知识。通过最小化粗糙角度-多普勒估计与可能的网格失配估计参数对之间的欧氏距离,对每个回波源进行配对。仿真结果验证该算法可大大减小离散空时谱优化的计算复杂度,并避免了由网格失配引起的基失配

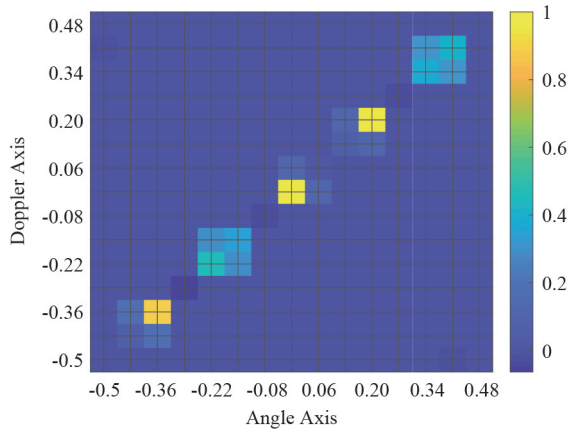


图5 初始化空时相对概率

问题,保证了方位角和多普勒估计的准确性。

3.2 知识辅助 STAP

在非均匀杂波环境中,不当的辅助样本选择会降低对杂波的自适应抑制性能。知识辅助 STAP 结合各类先验信息,是抑制非均匀杂波的重要方法。但对先验知识的获取和选择方法均有待更为广泛的研究。

文献[40]对全自适应和知识辅助处理方法在机载和陆基雷达应用中的优势进行了讨论,指出将来自数字高程模型(DEM)和开放街道地图(OSM)等不同来源(图6^[40])的信息用于知识辅助 STAP 处理的优点,并结合 Hensoldt 空地智能雷达数据研究了杂波不均匀性对实时 STAP 处理的影响以及知识辅助 STAP 下的样本选取方法。该论文指出,联合不同来源地图信息进行自适应和知识辅助处理可最大限度地提高 STAP 的处理性能,并可作为认知雷达的主要发展方向。

文献[41]提出了一种适用于非均匀背景杂波抑制的智能化样本选择方法。该方法利用样本空时特性进行典型特征提取并基于支持向量机实现智能化决策,提高了 CCM 估计的精度和处理效率。基于仿真和实测数据的实验结果验证了该方法的有效性。进一步对样本数据的其他特征空间的进行探索,有望在复杂场景中获得更好的样本分类性能。近年来,智能化技术在雷达领域得到了快速发展。在 STAP 处理中,智能化技术为解决非均匀背景下的辅助样本选择问题提供了新的思路。

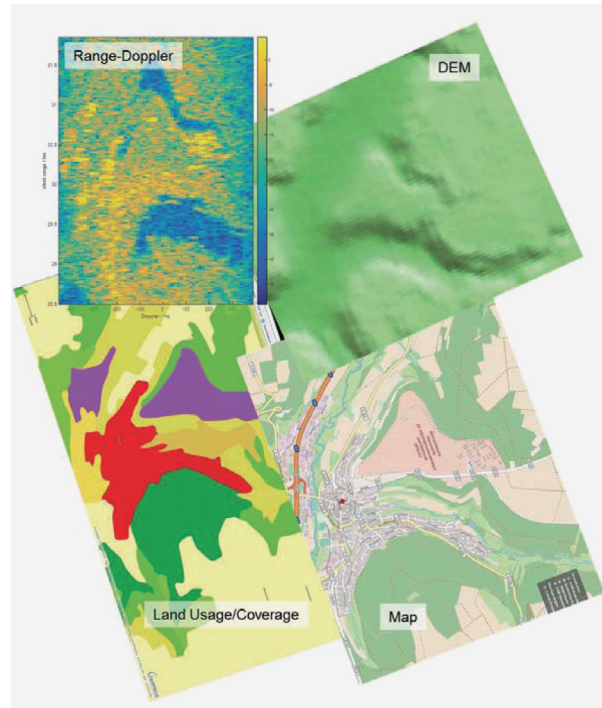


图6 用于知识辅助 STAP 的不同来源地图数据

4 结论

2019年,STAP技术在算法改进、理论分析、硬件实现、场景应用等方面均取得了阶段性的研究进展,对 STAP 技术的理论完善和工程应用具有重要的推动作用。复杂多变的实际环境和新应用领域所面临的问题既对 STAP 技术提出了新的要求,也为其进一步发展和完善指明了方向。信号处理技术的不断发展和硬件水平的不断提高,将给 STAP 带来更加广阔的应用前景和挖掘潜力的研究空间,推动 STAP 领域更多的理论和技术创新。

参考文献 (References)

- [1] 郝程鹏, 施博, 闫晟, 等. 主动声纳混响抑制与目标检测技术[J]. 科技导报, 2017(20): 104-110.
- [2] Lin J, Jiang C S, LI J X, et al. STAP based on clean technology and conjugate gradient method[C]//2019 IEEE Radar Conference. Piscataway N J: IEEE, 2019: 10.1109/RADAR.2019.8835806.
- [3] Kulpa K. The CLEAN type algorithms for radar signal processing[C]//Microwaves, Radar & Remote Sensing Sympo-

- sium. Piscataway N J: IEEE, 2008: 152–157.
- [4] Wang S, Shi B, Hao C P, et al. Exploiting persymmetry for JDL-STAP[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019 (19): 6113–6116.
- [5] Wang X Y, Yang Z C, Huang J J. Reduced-dimension space-time adaptive processing for airborne radar with co-prime array[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019 (19): 5971–5974.
- [6] Li J J, Li Y. Design and implementation of $\Sigma\Delta$ -3DT based on multi-core DSP[C]. 28th Wireless and Optical Communications Conference. Piscataway N J: IEEE, 2019.
- [7] Vu P, Haimovich A M, Himed B. Effects of system impairments on the performance of distributed STAP[C]//2019 IEEE Radar Conference. Piscataway N J: IEEE, 2019, doi: 10.1109/RADAR.2019.8835820.
- [8] 刘佳俊, 位寅生, 朱永鹏, 等. 稳健的基于参数化协方差矩阵估计的空时自适应处理方法[J]. *电子学报*, 2019, 47 (9): 1943–1950.
- [9] Zhu S Q, Liao G S, Xu J W, et al. Robust STAP based on magnitude and phase constrained iterative optimization [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(19): 8650–8656.
- [10] Duan K Q, Xu H, Yuan H D, et al. Three-dimensional sparse recovery space-time adaptive processing for airborne radar[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019 (19): 5478–5482.
- [11] Yang Z C, de Lamare R C, Li X. L1-regularized STAP algorithms with a generalized sidelobe canceler architecture for airborne radar[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(2): 674–686.
- [12] Sen S. OFDM radar space-time adaptive processing by exploiting spatiotemporal sparsity[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(1): 118–130.
- [13] Wang Z T, Wang Y L, Gao F, et al. Clutter nulling space-time adaptive processing algorithm based on sparse representation for airborne radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(1): 177–184.
- [14] Sun Y, Breloy A, Bahu P, et al. Low complexity algorithms for low rank clutter parameters estimation in radar systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(8): 1986–1998.
- [15] Yang X P, Sun Y Z, Zeng T, et al. Fast STAP method based on PAST with sparse constraint for airborne phased array radar[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(17): 4550–4561.
- [16] Guo Y D, Liao G S, Feng W K. Sparse representation based algorithm for airborne radar in beam-space post-Doppler reduced-dimension space-time adaptive processing[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 5896–5903.
- [17] Sadeghi M, Babaie-Zadeh M. Iterative sparsification-projection: Fast and robust sparse signal approximation [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64 (21): 5536–5548.
- [18] Sen S. Low-rank matrix decomposition and spatio-temporal sparse recovery for STAP radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2015, 9 (8): 1510–1523.
- [19] Zhang W, He Z S, Li H Y. Space time adaptive processing based on sparse recovery and clutter reconstructing [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2019, 13(5): 789–794.
- [20] Zhang W, An R X, He N Y, et al. Reduced dimension STAP based on sparse recovery in heterogeneous clutter environments[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, doi: 10.1109/TAES.2019.292-1141.
- [21] Zhang W, Han M H, He Z S, et al. Data-dependent reduced-dimension STAP[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2019, 13(8): 1287–1294.
- [22] Li M, Sun G H, He Z S. Direct data domain STAP based on atomic norm minimization[C]//2019 IEEE Radar Conference. Piscataway N J: IEEE, 2019, doi: 10.1109/RADAR.2019.8835701.
- [23] da Silva A B C, Baumgartner S V, Krieger G. Training data selection and update strategies for airborne post-Doppler STAP[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(8): 5626–5641.
- [24] Li Y W, Xie W C, Mao H H, et al. Clutter suppression approach for end-fire array airborne radar based on adaptive segmentation[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 147094–147105.
- [25] Yang X P, Sun Y Z, Yang J, et al. Discrete interference suppression method based on robust sparse Bayesian learning for STAP[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 26740–26751.
- [26] Yuan H D, Xu H, Duan K Q, et al. Cross-spectral metric smoothing-based GIP for space-time adaptive processing[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(9): 1388–1392.
- [27] Raghavan R S. False alarm analysis of the AMF algorithm for mismatched training[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(1): 83–96.
- [28] Ye W J, Yang X P, Sun Y Z, et al. Anti-jamming meth-

- od for STAP based on a bi-phase random-coded signal [J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(19): 6309–6312.
- [29] Wojaczek P, Colone F, Cristallini D, et al. Reciprocal-filter-based STAP for passive radar on moving platforms [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(2): 967–988.
- [30] Kulpa K, Bączyk M, Malanowski M, et al. CLEAN removal of ground clutter in mobile passive radar[C]//2019 IEEE Radar Conference. Piscataway N J: IEEE, 2019, doi: 10.1109/RADAR.2019.8835846.
- [31] Gessel B H, Lievsay J R. Three-dimensional emitter selection optimization for passive GMTI[C]//2019 IEEE Radar Conference. Piscataway N J: IEEE, 2019, doi: 10.1109/RADAR.2019.8835715.
- [32] Zhou Y, Li Y Y, Wang L. The space-time adaptive processing method in airborne MIMO radar with nested structure[C]//2019 IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing. Piscataway N J: IEEE, 2019, doi: 10.1109/SIPROCESS.2019.8868414.
- [33] Lü Z D, He F, Sun Z Y. MIMO radar transceiver joint optimization using pre-information of forward-squint-looking GMTI[C]. 2019 IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing. Piscataway N J: IEEE, 2019.
- [34] 王洪雁, 乔惠娇, 裴炳南. MIMO 雷达空时编码和接收权联合稳健设计[J]. *西安电子科技大学学报*, 2019, 46(2): 69–77.
- [35] Yang X, Huo K, Zhang X, et al. A Clutter-analysis-based STAP for moving FOD detection on runways[J]. *Sensors*, 2019, 19(3), doi: 10.3390/s19030549.
- [36] 崔畅, 胡程, 董锡超. 基于 GEO SAR 编队飞行的动目标检测[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2019, 17(4): 604–609.
- [37] 李浩冬, 廖桂生, 许京伟. 弹载雷达和差通道稳健自适应杂波抑制方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(2): 273–279.
- [38] Li Z H, Zhang Y S, Ge Q C, et al. Off-grid STAP algorithm based on reduced-dimension local search orthogonal matching pursuit[C]. *IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing*. Piscataway N J: IEEE, 2019.
- [39] Lu L, Zhou C W, Shi Z G, et al. Off-grid angle-Doppler estimation for space-time adaptive processing: A sequential approach[C]//2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway N J: IEEE, 2019, doi: 10.1109/ICCCChina.2019.8855917.
- [40] Brandfass M, Meyer-Hilberg J, Dallinger A, et al. Towards cognitive radar via knowledge aided processing for airborne and ground based radar applications[C]//2019 20th International Radar Symposium (IRS). 2019, doi: 10.23919/IRS.2019.8768133.
- [41] Duan C D, Li Y, Wang W W. An intelligent sample selection method for space-time adaptive processing in heterogeneous environment[J]. 2019, *IEEE Access*, 7: 30321–30330.

Hot topics of space-time adaptive processing in 2019: A review

YAN Sheng¹, SUN Mengru^{1,2}, SHI Bo¹, HAO Chengpeng^{1*}

1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. University of Chinese of Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Space-time adaptive processing (STAP) which performs adaptive filtering in spatial and temporal domains is a key technology for clutter suppression and target detection in moving platform radar system. In recent years, STAP technology has developed rapidly and its application field is also expanding. This article reviews the hot topics and important research progress in the field of STAP in 2019 and discusses new STAP trends.

Keywords space-time adaptive processing; clutter suppression; target detection; anti-jamming ●



(责任编辑 刘志远)