

机载 MIMO 雷达空时自适应处理技术研究进展

王 珽* 赵拥军 胡 涛

(信息工程大学导航与空天目标工程学院 郑州 450001)

摘要: MIMO 雷达作为一种新体制雷达, 具有诸多优点和广泛的应用领域, 引起了国内外军事界和学术界的极大关注。空时自适应处理(STAP)主要目的为抑制地杂波, 进行地面动目标显示(GMTI)。如今, 这项技术又被进一步推广到 MIMO 雷达系统中, MIMO 雷达 STAP 迅速成为国际雷达界的一个研究热点。该文详细阐述了 MIMO-STAP 的引入及重要意义, 对杂波建模、杂波自由度(DOF)分析、降维(秩)处理、有源干扰与杂波的同时抑制、非均匀杂波环境处理等方面主要研究情况进行综述, 并对未来 MIMO-STAP 技术的发展方向进行了展望。

关键词: MIMO 雷达; 机载雷达; 空时自适应处理(STAP)

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2015)02-0136-13

DOI: 10.12000/JR14091

引用格式: 王珽, 赵拥军, 胡涛. 机载 MIMO 雷达空时自适应处理技术研究进展[J]. 雷达学报, 2015, 4(2): 136-148. <http://dx.doi.org/10.12000/JR14091>.

Reference format: Wang Ting, Zhao Yong-jun, and Hu Tao. Overview of space-time adaptive processing for airborne multiple-input multiple-output radar[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(2): 136-148. <http://dx.doi.org/10.12000/JR14091>.

Overview of Space-Time Adaptive Processing for Airborne MIMO Radar

Wang Ting Zhao Yong-jun Hu Tao

(Institute of Navigation and Aerospace Target Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) radar is an emerging radar system that is of great interest to military and academic organizations due to its advantages and extensive applications. The main purpose of Space-Time Adaptive Processing (STAP) is to suppress ground clutter and realize Ground Moving Target Indication (GMTI). Nowadays, STAP technology has been extended to MIMO radar systems, and MIMO radar STAP has quickly become a hot research topic in international radar fields. This paper provides a detailed description of the extension and significant meaning of MIMO-STAP, and gives an overview of the current research status of clutter modeling, analysis of clutter Degree Of Freedom (DOF), reduced-dimension (reduced-rank) processing, simultaneous suppression of clutter plus jamming, non-homogeneous environment processing, and so on. The future perspective for the development of MIMO-STAP technology is also discussed.

Key words: Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) radar; Airborne radar; Space-Time Adaptive Processing (STAP)

1 引言

在现代战争中, 掌握制空权是赢得战争的重要保证, 预警机在其中起着举足轻重的作用。但是机载预警(Airborne Early Warning, AEW)雷达在下

视工作时受地面杂波的影响十分严重, 地杂波不仅强度大而且不同方向的地杂波相对于载机的速度也各不相同, 从而使杂波谱大大扩展, 杂波呈现出很强的空时耦合性。STAP 技术最初是由 Brennan 等人^[1]于 1973 年针对相控阵体制机载预警雷达的杂波抑制而提出的。经过 40 余年的探索和研究, STAP 技术如今已形成一个具有较为坚实理论基础的实用新技术。Ward 的报告^[2], Guerci 和 Klemm 的专著^[3,4], Melvin 的综述性文章^[5]及国内王永良的

2014-06-10 收到, 2015-01-05 改回; 2015-01-19 网络优先出版
国家高技术研究发展计划(863 计划)(2011AA*****)和国家自然科学基金(41301481)资助课题

*通信作者: 王珽 wangtingsp@163.com

专著^[6]等对 STAP 做了比较完整的论述。同时，国内保铮、彭应宁、廖桂生等学者在 STAP 技术的研究发展进程中做出了重要的工作和贡献。

STAP 技术的研究当前依然非常活跃，特别是结合合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR)、分布式小卫星雷达及天基/空基 MIMO 雷达，又出现了一系列新的研究课题^[7]。并且针对不同的应用对象和实际环境，STAP 技术在理论和实际工程中还有很多问题需要进一步研究。如信息化条件下，现代雷达面临着电子对抗、反隐身等艰巨任务，巡航导弹、反辐射导弹 (Anti-Radiation Missile, ARM)、隐身飞机等目标特性给机载雷达的检测带来困难，雷达对这些目标的探测距离只有对通常目标探测距离的 1/5 左右。为了有效地探测这些特殊目标，必须发展新体制的机载雷达，如具有米波频段的机载雷达、双/多基地雷达、MIMO 雷达等^[8]。这些新体制雷达将使空时自适应处理面临许多新的问题。因此，针对新体制机载雷达开展 STAP 技术研究是值得进一步努力的方向。

2 MIMO-STAP 的引入及重要意义

随着 MIMO 技术在移动通信领域的不断发展，并同时受到综合脉冲孔径雷达 (Synthetic Impulse and Aperture Radar, SIAR) 的启发，MIMO 雷达的概念在近几年被提出并得到了国内外军事界与学术界的广泛关注，已成为世界各国研究的热点^[9,10]。目前，根据 MIMO 雷达收发特性，将 MIMO 雷达分为两种类型：分布式 MIMO 雷达^[11,12]和集中式 MIMO 雷达^[13]。由于利用波形分集技术，集中式 MIMO 雷达能够对收发两个孔径进行混合，从而在无需增加实际收发物理孔径的基础上，采用较小的天线规模即可形成很大的虚拟阵列孔径，这在一

定程度上克服了机载应用背景下传统雷达天线孔径和重量受载机平台严格限制的缺点，适合于机载雷达的小平台、多任务的设计需求，可以提高雷达的角度分辨率和杂波抑制能力。在 2013 年最新的美国专利中披露，Lockheed Martin 公司已对一种机载 MIMO 雷达 (aircraft MIMO radar) 进行分析设计^[14]，如图 1 所示，即对其中机翼阵列 (wing arrays) 进行 MIMO 处理，可见其重要的军事应用意义。但从图 1 中给出的信号处理流程可以看出，其采用的是先波束形成后多普勒处理的形式，尚未体现空时联合处理，即 STAP 的思想。2003 年美国麻省理工学院 (MIT) 林肯实验室的 Bliss 和 Forsythe 在第 37 届 Asilomar 信号、系统与计算机会议 (ACSSC) 上首先提出 MIMO-STAP 概念^[15]，并对不同构成形式下的 MIMO 雷达的自由度 (Degree Of Freedom, DOF)、分辨率改善和 MIMO 雷达如何利用 STAP 进行地面动目标显示 (Ground Moving Target Indication, GMTI) 进行了研究。表明与机载相控阵雷达相比，MIMO 雷达具有较大的虚拟阵列孔径和长时间的脉冲积累，提升了系统自由度，改善了机载雷达的杂波抑制性能，并且能够显著提高 MIMO 雷达的速度分辨率，更有利于在强杂波中检测低速弱目标信号，从而能够获得更好的 GMTI 性能，给空时自适应处理技术的发展带来了机遇。2009 年美国佛罗里达大学 Xue 等人提出了“影子-200” (Shadow-200) 无人机 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 上装备 MIMO 雷达的构想^[16]，如图 2 所示。2009 年 MIT 林肯实验室与美国空军合作，在双水獭 (Twin Otter) 飞机上安装 MIMO 阵列，进行了机载 MIMO 雷达的飞行试验^[17]，如图 3 所示，验证了机载 MIMO 雷达相对于传统机载相控阵雷达在 GMTI 方面的优势。

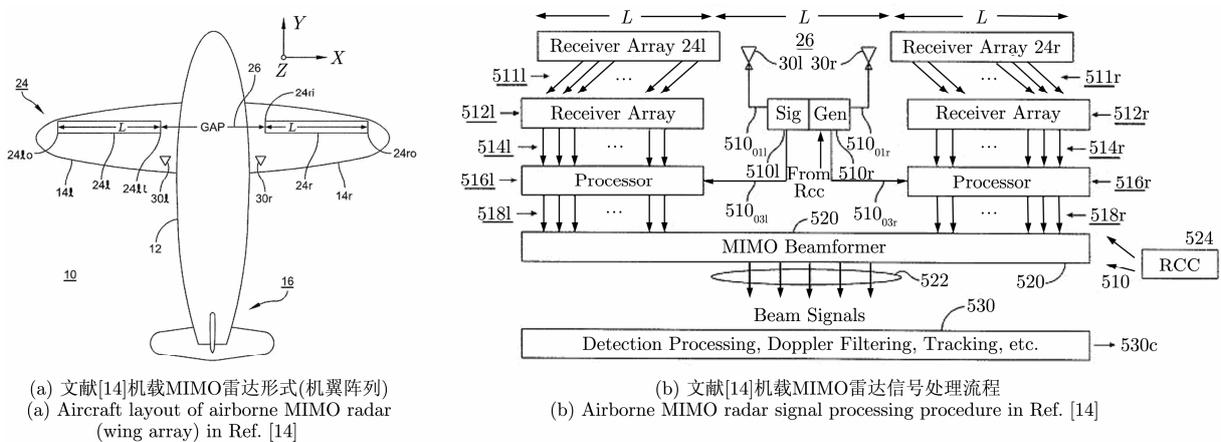


图 1 文献[14]机载 MIMO 雷达构想

Fig. 1 Conception of airborne MIMO radar in Ref. [14]

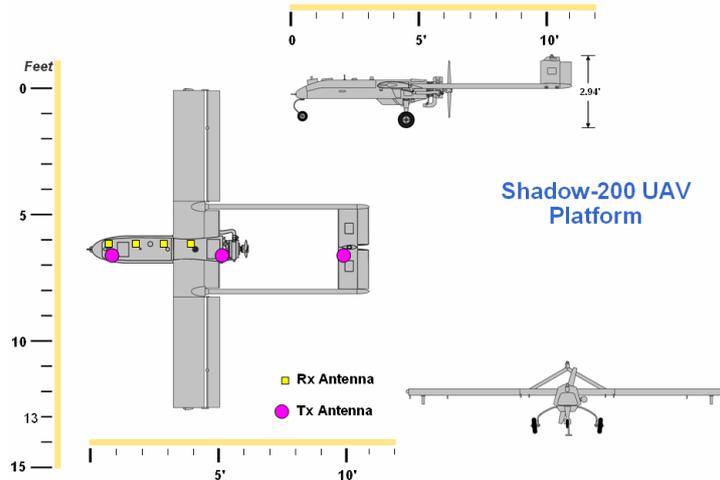


图2 “影子-200”无人机装备MIMO雷达构想

Fig. 2 Conception of Shadow-200 UAV equipped with MIMO radar



图3 机载MIMO雷达飞行试验(双水獭飞机)

Fig. 3 Flight experiment of airborne MIMO radar (Twin Otter aircraft)

经过 40 余年的发展,对于机载相控阵雷达而言,STAP 技术已趋于成熟。如今,这项技术又被进一步推广到 MIMO 雷达系统中,与传统机载相控阵雷达相比具有显著的性能优势,MIMO 雷达 STAP 迅速成为国际雷达界的一个研究热点。

本文下面首先对机载 MIMO 雷达 STAP 前期的主要研究情况进行了详细综述,包括杂波建模、杂波自由度分析、降维(秩)处理、有源干扰与杂波的同时抑制、非均匀杂波环境处理以及参数估计、波形设计和双基地 MIMO-STAP 等方面。然后根据 MIMO-STAP 方面的研究现状,结合相关领域最新研究进展,对今后 MIMO-STAP 的研究方向进行进一步的思考与展望。

3 MIMO-STAP 技术研究概述

3.1 杂波建模与杂波自由度分析

Chen 等人^[18]利用问题几何结构,使用扁长椭圆波函数(Prolate Spheroidal Wave Function, PSWF)估算理想杂波子空间,并给出了 MIMO 雷达杂波自由度估计的扩展 Brennan 准则。Wu 等

人^[19]研究了发射相位编码正交信号(c-MIMO)和多载频信号(f-MIMO)时的 MIMO 雷达 STAP 信号模型和杂波模型。严韬等人^[20]仿真分析了存在杂波起伏、通道误差、载机偏航等非理想情况下的杂波特性,误差影响的主要影响表现在使杂波自由度增加。Li 等人^[21]将这些误差因素归结为时间去相关、空间去相关效应,利用锥化矩阵窗(Covariance Matrix Taper, CMT)对杂波协方差矩阵进行修正。Mecca 等人^[22,23]研究了慢时间(slow-time) MIMO 雷达对多径杂波的抑制,并将其推广应用至超视距(Over The Horizon, OTH)雷达中。

此外,有学者对发射波形合成对于杂波自由度的影响进行了研究。Wang 等人^[24]通过研究表明机载 MIMO 雷达杂波自由度受发射信号互相关矩阵(Waveform Covariance Matrix, WCM)秩的影响,但未给出信号互相关矩阵结构变化时 MIMO 雷达杂波分布的统一关系。张西川等人^[25]从信号空间与阵元空间变换的数学角度构建了发射波形合成模型,并在此基础上,提出了任意发射波形合成影响

下的机载 MIMO 雷达杂波统一模型，揭示了统一模型下发射波形从全正交、相关到全相干的演变过程中的杂波分布特性。在文献[26]中提出并证明了一种杂波自由度快速估计准则，建立了机载相干 MIMO 雷达发射波形合成结构、阵列稀布构型与杂波自由度之间的定量关系。谢文冲等人^[27]给出了适用于 MIMO-相控阵雷达的杂波自由度估计准则。Feng 等人^[28,29]又从不同角度揭示了子阵合成 MIMO 雷达的杂波自由度。Chong 等人^[30]对慢时间 MIMO 雷达的杂波自由度进行了分析。

3.2 降维(秩)处理方面

由于发射波形分集导致机载 MIMO 雷达系统的空时维数较相控阵雷达大幅提高，MIMO-STAP 将传统的空-时 2 维处理扩展到空-时-波形 3 维空间^[31]，如图 4 所示。因此算法运算量问题尤为突出，同时在实际杂波环境中难以获取足够的独立同分布(Independent Identical Distribution, IID)样本^[32]，现有文献主要集中于降维(秩)的 MIMO-STAP 算法研究方面。

(1) 基于杂波子空间离线构造的降秩方法

Chen 等人^[18]利用扁长椭圆波函数(PSWF)估算出的理想杂波子空间，通过矩阵分解及矩阵求逆引理等数学变换推导得到一种新的降维算法(Zero-Forcing, ZF)，证明了该算法具有良好的信干噪比(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR)性能，并能够降低计算复杂度，推动了 MIMO-STAP 的发展。吕晖等人^[33]根据杂波在空时 2 维平面的先验分布离线构造杂波子空间，提出一种简化的杂波特征相消器(Eigen Canceller, EC)，此方法避免了传统 EC 方法中复杂的协方差矩阵估计和特征值分解运算，既消除了因协方差矩阵估

计不准确而导致的性能损失又减小了运算量，可获得接近最优的杂波抑制性能。翟伟伟等人^[34]结合 PSWF 正交函数基矢量，提出了一种基于杂波子空间基矢量估计的降维 STAP 算法，但其实质仍为简化的杂波特征相消器。张筱等人^[35]又进一步将离线构造的 PSWF 基矢量进一步应用于主分量法(PC)中，同样无需协方差矩阵估计以及特征值分解。以上方法均进行数据独立方式的杂波子空间构造，并结合杂波子空间进行降维，属于自适应降秩处理范畴。但以上方法均考虑理想杂波模型，当实际杂波与理想模型不一致时，如存在阵元误差、通道误差、杂波起伏、载机偏航等因素时，以上方法的性能将有所下降。

陆达等人^[36]针对上述不足，将基于扁长椭圆波函数估计的杂波子空间作为先验知识进行辅助处理，并形成约束矩阵，而后采用多级维纳滤波实现了降秩 MIMO-STAP。由于该方法同时利用了样本数据和离线估计的杂波子空间知识，可以在保证杂波抑制性能的基础上，显著降低算法运算量和提高算法的收敛性能。并且该杂波子空间知识对误差具有很好的稳健性。本方法从知识辅助的角度，为结合杂波空时分布和实际杂波数据共同进行融合处理提供了一种思路。

(2) 基于权值迭代的降维方法

Xiang 等人^[37]提出基于三迭代的机载 MIMO 雷达空时降维自适应处理方法。该方法结合机载 MIMO 雷达目标导向矢量的 Kronecker 积结构，利用 3 维权矢量空时可分离特性将最优权矢量近似表示为发射、接收和时域 3 个权矢量的 Kronecker 积形式，然后基于循环迭代的思想依次固定其中两个权矢量构造相应的降维变换矩阵，在低维空间上优

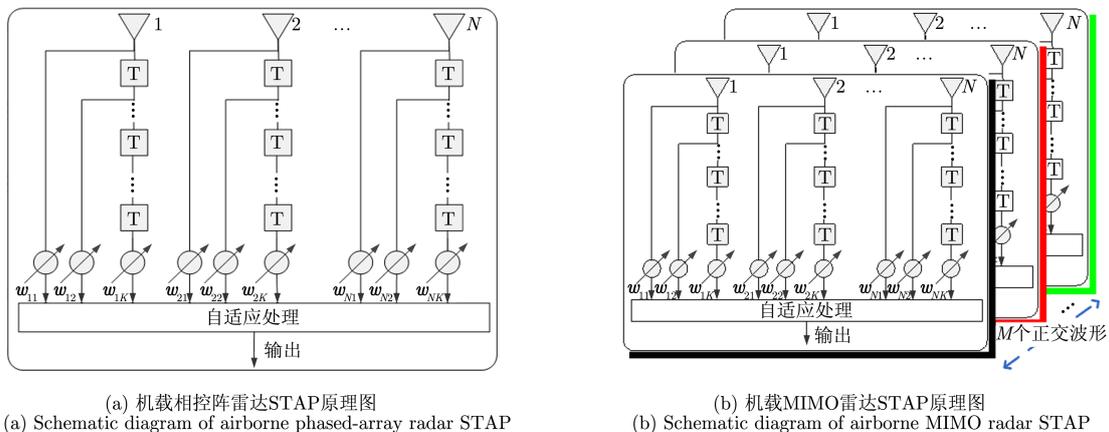


图 4 机载 MIMO 雷达空-时-波形 3 维处理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of space-time-waveform three-dimensional processing for airborne MIMO radar

化另一权矢量。此方法已申请专利^[38]。同时,何洁等人^[39]将高维空时权矢量重构为空域和时域权矢量 Kronecker 积的形式,提出最小化代价函数的双迭代算法交替优化两个低维权矢量。吕晖等人^[40]首先利用多普勒滤波对杂波信号进行时域降维处理;然后将空域发射-接收 2 维波束形成权向量表示成发射权和接收权的 Kronecker 积,进行双迭代求解。上述 3 种降维方法均较好利用了导向矢量 3 维 Kronecker 积形式,将高维权矢量的求解问题转换为低维的权矢量分别进行求解,得到了较好的降维效果,有效地降低了运算负担,减少了需要的训练样本数,但均需要若干次迭代运算才能得到最佳权矢量,且迭代次数难以确定。

文献[41]针对文献[40]双迭代算法进行改进,其利用矩阵变换的性质实现了对发射-接收 2 维权矢量的分离求解,且无需进行迭代运算,从而进一步降低了运算量。

(3) 传统降维(秩)方法的推广应用

已有降维(秩)STAP 方法经过改进可以用于 MIMO 雷达。李彩彩等人^[42]针对 MIMO 雷达虚拟阵列孔径大,典型的降维 STAP 方法 m-Capon 法无法适用的问题,对子阵级 m-Capon 法进行了研究,既有效降低了 MIMO-STAP 自由度,又能获取比相对应相控阵雷达的性能提升。郝琳等人^[43]将机载 MIMO 雷达技术与 3-CAP 空时自适应方法相结合,提出了一种 M3-CAP 空时自适应新方法。吕晖等人^[44]通过空域发射-接收两维固定波束形成和时域多普勒滤波将接收数据由阵元-脉冲域变换到波束-多普勒域,然后再选取检测单元周围若干个 3 维波束并根据线性约束最小方差准则进行部分联合自适应处理,其实际为传统局域联合处理 (Joint Domain Localized, JDL) 方法在 MIMO-STAP 中的推广。赵军^[45]将基于参数化模型的空时自回归 (Space Time Auto-Regressive, STAR) 技术引入到机载 MIMO 雷达杂波抑制问题中,提出一种 MIMO-STAR 算法,能够在极小样本条件下获得良好的杂波抑制性能,与统计型 STAP 算法相比,训练样本数明显减少,运算量有所降低。Fa 等人^[46,47]引入递归最小二乘算法 (Recursive Least Squares, RLS), 并且利用环境的先验信息增加约束,实现降维矩阵与自适应权值的联合迭代优化。Marcos^[48]提出一种基于距离递归的机载 MIMO 雷达杂波抑制方法。以上方法实质上均是传统降维(秩)算法在 MIMO-STAP 中的推广应用。

3.3 有源干扰条件下 MIMO-STAP

由于发射波形分集,机载 MIMO 雷达 STAP

系统自由度得到扩展,同时增大了训练样本数需求,运算量显著提升,这些问题已成为制约 MIMO-STAP 发展与应用的主要瓶颈。并且随着电磁环境的日益复杂,机载雷达的目标检测能力通常受到有源干扰的影响。引入有源干扰将使系统的杂波与干扰自由度大幅度增加,将使本来就很复杂的处理系统进一步复杂化^[2-5]。因此研究在有源干扰背景下机载 MIMO 雷达的杂波抑制问题,实现同时抗杂波与抗干扰的双重能力,是很有实际意义的。杨晓超等人^[49]对有源干扰条件下机载 MIMO 雷达 STAP 协方差矩阵秩进行了分析,同时提出一种两级机载 MIMO 雷达 STAP 方法抑制杂波和干扰^[50]。第 1 级处理利用部分空间接收自由度进行干扰抑制,同时实现了降维处理。第 2 级通过匹配滤波获得发射自由度,并联合剩余的接收自由度和时域自由度抑制杂波,获得了较好的效果,存在强干扰时可以逼近全维处理的最优性能。文献[18]利用 MIMO 雷达结构参数及扁长椭球波函数 (PSWF) 估计杂波子空间,而后通过分时被动接收对干扰加噪声协方差矩阵进行估计。高伟等人^[51]则根据 MIMO 雷达发射正交波形的特点,提出利用与所有发射波形正交的辅助匹配滤波通道估计干扰子空间,更为简便有效。该方法和文献[18]方法均可以有效降低运算量与样本需求,但其中对于杂波子空间分析,扁长椭球波函数 (PSWF) 的构造较为复杂。进而杨晓超等人^[52]利用文献[33]方法给出杂波子空间的简便构造形式,再结合有源干扰加噪声协方差矩阵以及目标空时导向矢量来构造降维矩阵,可将全维数据维数降为杂波的秩加 1。文献[53]实现了离线杂波子空间构造、杂波加有源干扰协方差矩阵秩估计、以及利用 ZF 方法抑制杂波和干扰的统一。

3.4 非均匀杂波环境 MIMO-STAP

随着机载 MIMO 雷达系统自由度的提升,需要的独立同分布 (IID) 样本数进一步增大,然而实际的杂波环境往往是非均匀的,使得传统的统计 STAP 算法无法获取大量 IID 的样本进行杂波协方差矩阵估计。目前研究的非均匀现象主要有:杂波功率非均匀、干扰目标和孤立干扰等。郑焱^[54]在其硕士论文中对文献[18]的 ZF 算法在非均匀环境中的性能进行了仿真分析。仿真结果表明,ZF 算法在存在功率非均匀与干扰目标的非均匀环境中依然有效,但会受到孤立干扰现象的影响。李彩彩等人^[55]对含有孤立干扰的严重功率非均匀环境下 MIMO-STAP 进行研究,提出一种基于时域平滑的两级级联非均匀降维 STAP 方法,先后对杂波和孤立干扰进行抑制,取得了较好的效果。Ahmadi 等

人^[56]建立了机载相控阵-MIMO 雷达的通用模型, 并利用经典的直接数据域(Direct Data Domain, DDD)方法实现了对非均匀杂波的有效抑制。

3.5 MIMO-STAP 目标参数估计

在 STAP 技术中, 机载 MIMO 雷达同样具有相控阵雷达多功能工作的优势, 即同时实现目标的搜索与跟踪。其中搜索功能包括抑制杂波与干扰、目标检测、目标角度和速度估计等信号处理流程。同时良好的方向和速度估计精度是实现跟踪算法的关键前提。Chong 等人^[57]给出了机载 MIMO 雷达空时估值的克拉美-罗界(Cramér-Rao Bound, CRB), 并针对不同阵元配置的影响进行研究。邹博等人^[58]研究了采用频分正交信号(f-MIMO)的机载 MIMO 雷达对地面动目标的角度和多普勒估计的 CRB。刘晓莉^[59]在其博士论文中给出了基于最大似然(Maximum Likelihood, ML)法和空时自适应单脉冲方法的目标波达方向(Direction Of Arrival, DOA)与多普勒频率联合估计方法。

3.6 MIMO-STAP 波形设计

实际中设计的 MIMO 雷达最优发射波形通常具有相关性, 以满足波束方向或参数估计等性能因素的约束, 此时发射波形并不满足全正交的理想条件。Wang 等人^[60]以最大化输出信干噪比(SINR)为目标对色高斯噪声背景下 MIMO-STAP 进行波形优化设计, 以实现最优的检测性能。同时, 研究了初始参数存在估计误差场景下提高 MIMO-STAP 最差检测性能的稳健波形优化^[61]。由于优化波形可以最大化输出 SINR, 因此与正交波形相比, 所提方法能够显著提高 MIMO-STAP 系统的目标检测性能。

3.7 双基地 MIMO-STAP

目前 MIMO-STAP 相关研究主要是针对单基地 MIMO 雷达 STAP 工作模式。由于双基地雷达具有抗隐身, 抗反辐射导弹, 抗综合电子干扰和抗超低空突防的“四抗”优势, 近几年得到了快速发展和广泛应用。机载双基地雷达由于平台运动, 雷达处于下视工作状态和收发分置的几何结构特点, 导致地杂波回波幅度明显增强, 存在杂波特性随距离变化的问题。因而, 双基地雷达杂波比传统单基地雷达杂波具有更为复杂的特性, 相应地其杂波抑制难度也明显增加。李军, 廖桂生等人^[62-67]针对双基地 MIMO 雷达的 STAP 进行了研究, 建立了双基地 MIMO 雷达的杂波模型, 表明了双基地 MIMO 杂波谱具有 3 维特征(发射角, 接收角, 多普勒频率), 并且经过 3 维杂波消除, 双基地 MIMO-STAP 在 SINR

性能及最小可检测速度(Minimum Detectable Velocity, MDV)方面要优于双基地 SIMO-STAP。

文献[62]已对双基地 MIMO-STAP 研究进展情况进行了较详尽的总结展望, 本文不再对此方面进行赘述。本文下面所给出的研究展望仍主要针对单基地 MIMO-STAP。

4 总结展望

机载 MIMO 雷达 STAP 已成为近几年雷达界研究的热点, 通过现有研究情况可以看出, 目前对于机载 MIMO 雷达空时自适应处理的研究主要集中在杂波模型的建立、降维(秩)STAP 算法等方面, 同时对有源干扰条件下 MIMO-STAP、非均匀杂波环境下 MIMO-STAP、以及 MIMO-STAP 参数估计、波形设计和双基地 MIMO-STAP 方面也都有所涉及, 而对于非理想因素影响及发射波形合成影响下 MIMO-STAP 算法的研究则研究较少。由于 MIMO 雷达作为一种新体制的雷达, 起步较晚, 所以对 MIMO 雷达 STAP 技术的研究还有很大的发展空间, 理论与实践的结合问题还有待于探讨和研究。同时随着雷达信号处理与数据处理水平的提升, 最新信号处理算法的涌现, 以及相关硬件水平的完善, MIMO-STAP 仍然具有很好的研究前景以及很高的应用价值。下面结合 MIMO-STAP 研究现状以及作者的认识和思考, 对该领域下一步研究的主要方向进行展望。

4.1 基于发射波束域处理的 MIMO-STAP

发射波形合成的影响为 MIMO 雷达中的特有问題。如 3.6 节所示, 为实现 MIMO 雷达 STAP 最优检测性能, 此时设计的 MIMO 雷达最优发射波形已不满足正交的理想条件, 通常具有相关性。现有文献已对发射波形合成对于 MIMO 雷达杂波自由度的影响进行了研究^[24-26], 但均未涉及到相关 STAP 方法。对于发射波形合成影响下的 MIMO-STAP 方法, 考虑模型的相似性, 拟结合发射波束域处理^[68-71]、相控阵-MIMO^[72]、发射子阵划分等技术进行下一步研究。

MIMO 雷达能够获取收发联合处理增益, 但由于其全向等功率发射因此将存在信噪比损失。针对传统 MIMO 雷达发射功率分散而造成的输出信噪比下降的问题, 目前基于发射波束域的处理已应用在 MIMO 雷达的参数估计、波束形成等方面, 并且体现出相对于常规 MIMO 雷达的性能优势^[68-71]。因此可以考虑将其引入到 MIMO-STAP 中, 使得发射功率集中于感兴趣的目标区域, 同时杂波在全空域均匀分布, 杂噪比近似不变, 从而使得输出信

杂噪比得以提升,并且达到降维的目的。可以进一步结合发射波束域处理情况下 MIMO 雷达杂波自由度以及时域脉冲选择进行考虑分析。

4.2 基于知识辅助的稳健 MIMO-STAP

在STAP实际工程实现中,往往存在影响系统功能的非理想因素,如阵元误差、通道误差、杂波起伏、近场散射、载机偏航等^[6]。这些误差因素将使杂波自由度进一步增加,造成常规MIMO-STAP方法性能下降,因此考察MIMO雷达STAP方法的误差鲁棒性也是非常重要的。

如利用离线构造的杂波子空间已成为MIMO-STAP中一种有效的低复杂度方法,但此类方法针对的均为理想杂波子空间,而与实时的杂波数据无关,因此在误差存在的情况下与其相关的STAP方法性能将有所下降。最近,相关研究人员提出了基于知识辅助(Knowledge-Aided, KA)的STAP技术^[36,46,47,73-75],以进一步提高STAP的性能以及在实际应用中的稳健性。KA处理的思路就是通过将先验知识与实测数据进行有效的融合,提升协方差矩阵的估计精度。受此启发,可以考虑结合杂波的空时分布和实际杂波数据共同估计杂波子空间,以实现稳健的MIMO-STAP。

4.3 基于误差约束的稳健 MIMO-STAP

考虑STAP与自适应波束形成模型的相似性。在数学描述上,自适应波束形成和STAP具有相同的最优化表达式,不同之处是所用的导向向量和协方差矩阵不同。其中波束形成主要研究最优空域滤波问题,而STAP主要研究最优空时滤波问题,即STAP可以看作波束形成的推广,而波束形成可以看作STAP的特例。现有稳健波束形成技术已相对成熟,同时已有研究人员将其推广到稳健STAP算法设计中^[76]。

考虑MIMO雷达中存在导向矢量失配和协方差矩阵失配的情况,可以对模型进行误差约束,通过问题转化进行求解。如存在收发导向矢量误差的稳健MIMO雷达波束形成已有相关研究^[77,78],而MIMO-STAP问题相比于MIMO雷达波束形成多增加了一维多普勒域,因此需要建立发射、接收、多普勒3维误差模型,并可以在此误差约束下转化为最差性能最优等问题,结合凸优化等算法实现稳健的MIMO-STAP权值求解。

4.4 基于知识辅助的非均匀杂波环境下 MIMO-STAP

随着机载 MIMO 雷达处理维数的提升,需要独立同分布(IID)的样本数是很大的,一方面增加了运算量,另一方面也限制了应用环境。实际中很

难获取足够的 IID 样本,尤其是在严重的非均匀杂波环境中。因此,非均匀环境下样本采集的困难对 MIMO-STAP 理论提出了挑战,非均匀杂波环境下的有效 MIMO-STAP 方法值得进一步深入研究。

如在训练样本非均匀检测中,基于广义内积(General Inner Product, GIP)准则的非均匀检测器是一种常用的非均匀检测方法。但其性能依赖于协方差矩阵的准确估计,因此其性能受训练样本中干扰目标的影响。但当训练样本被干扰目标污染时,利用这些训练样本估计出的协方差矩阵将会产生附加项,影响GIP统计量,使常规GIP方法难以有效分辨出非均匀训练样本,造成误检和漏检,进而降低后续STAP的目标检测性能。因此可以考虑使用知识辅助技术^[79,80],如MIMO-STAP中常用的离线杂波子空间构造技术,即仅利用MIMO-STAP系统参数构造出杂波协方差矩阵。此时离线构造的杂波协方差矩阵不受训练样本中含有干扰目标的影响,能更有效剔除含有干扰目标的训练样本,从而提高STAP的目标检测性能。

4.5 基于稀疏恢复的直接数据域 MIMO-STAP

近期,随着稀疏恢复思想在信号处理领域的广泛应用,同时根据杂波空时分布特性和稀疏表示间的内在联系,稀疏恢复在STAP中的实现应运而生^[81-86]。检测单元数据在角度-多普勒域的能量分布只集中在杂波脊线和少数离散位置,而其他位置都很小(不存在噪声时为0)。因此,检测单元数据在角度-多普勒域具有稀疏性。利用稀疏恢复算法,在只有检测单元数据的条件下实现高分辨空时谱估计,有效消除杂波及孤立干扰源对运动目标检测的影响,使直接距离向目标检测成为可能。同时由于不使用训练样本,可以很好地避免训练样本中引入的非平稳性,在实际非均匀杂波场景中具有广泛的应用前景。

随着 MIMO-STAP 维数的进一步提升,如何结合发射维信息进行 MIMO-STAP 稀疏基的有效构造,并进行低运算复杂度的快速稀疏恢复算法的实现,将是此方面下一步研究的重点。

4.6 基于收发阵元-延迟线结构优化设计的 MIMO-STAP

从MIMO-STAP的系统结构可以看出,随着匹配滤波器组的使用以及延迟线组的增加,MIMO-STAP的设备量非常大,从而急剧增加了其工程实现的复杂度。为解决这一实际问题,可以考虑使用收发阵元与延迟线同时优化设计的MIMO-STAP系统,即通过优化设计,使用较少的收发阵元数与延迟线抽头个数,达到与全阵元-全延迟线结构相

同的STAP性能。目前, MIMO雷达中阵元域结构优化设计的稀疏布阵技术已有相关研究, 如最小冗余MIMO雷达^[87-89]等, 而对收发阵元-延迟线的结构优化设计尚未见相关报道。因此可以考虑进行基于收发阵元-延迟线结构同时优化的MIMO-STAP技术研究, 以较小的设备复杂度达到较好的杂波抑制性能, 使其更接近实际应用。其中涉及收发阵元个数与位置、延迟线段数与长度以及STAP权值等多维参数的同时优化问题。

4.7 基于电磁矢量传感器阵列 MIMO 雷达的极化-空时自适应处理(Polarization-STAP)

极化-空时自适应处理(Polarization-STAP)在机载极化阵列雷达模型的基础上, 结合雷达回波的极化信息, 进行极化、空间角度、多普勒 3 维自适应处理, 可在不增加天线孔径的前提下提高系统的MDV, 相比于传统空时 2 维处理具有更好的慢速目标检测性能^[90-94]。同时近年来, 结合电磁矢量传感器阵列和 MIMO 雷达提出的矢量传感器 MIMO 雷达, 能够同时利用矢量传感器提供的极化分集和 MIMO 雷达的波形分集来提高目标的波达方向(DOA)估计精度^[95-99]。因此, 可以考虑针对基于电磁矢量传感器阵列 MIMO 雷达, 进行极化-空时自适应处理方面的研究, 以进一步提升 MIMO-STAP 的性能优势, 也是很有意义, 值得进一步深入研究的方向。

4.8 共形阵 MIMO-STAP

机载共形阵列是指雷达阵列沿机载平台表面形状布设, 如: 机头、机翼以及飞机下腹部等位置, 通常属于非线性阵列的范畴。共形阵列可充分利用机载平台的外表面, 具有更优异的气动形状兼容性和更小的有效载荷重量, 在有限空间下提供更多的天线孔径数以提供更高的空间分辨率及更宽广的空间观测范围, 有效改善MDV和GMTI性能, 因此配置有共形阵列的机载雷达系统在未来机载预警系统、尤其是小型无人机等领域具有巨大优势^[4,100]。

共形阵机载雷达STAP技术研究已成为目前机载雷达信号处理研究领域的热点和难点^[101-103]。目前, MIMO-STAP研究仍主要集中于正侧视且收发均为均匀线阵的MIMO雷达阵列形式。机载MIMO雷达由于其飞行动态探测的要求, 以及体积的限制, 采用与机体共形的阵列天线更加符合实际工程应用需要。因此可以考虑从建立机载共形阵MIMO雷达模型(如圆形阵列、圆柱阵列等)及其杂波特性分析入手, 对共形阵MIMO雷达STAP的有效方法进行研究。

4.9 认知 MIMO-STAP

从雷达技术的发展历程可以看出, 抑制杂波和对抗干扰是推动雷达技术发展的两大动力, STAP已成为反映未来雷达发展方向的关键技术。同时从现有的雷达技术发展水平来看, 未知地理和电磁环境的时变特性给雷达技术带来的巨大挑战, 并且模型单一和参数固化导致雷达技术难以适应时变环境。这些问题已成为制约常规STAP技术发展的关键因素^[104]。考虑到上述问题, 可以将STAP与认知雷达概念紧密结合, 设计出具有认知能力的机载MIMO雷达STAP系统。

认知雷达作为一种全新的智能化雷达概念, 可以有效提升雷达在复杂地理和电磁环境中的探测性能, 被认为是未来雷达发展的方向^[105,106]。Guerci在文献[105]中已对认知MIMO-STAP进行了初步探讨, 如使SCR最大化的最优脉冲赋形, 多普勒频分复用(DDMA)等方面。同时前文所提到的知识辅助、波形优化等方面实际上已体现出了认知雷达的思想, 但其环境感知、动态知识库构建、智能化处理以及相应的系统结构和处理体系支撑等方面还有待进一步在实践中进行探讨和完善。

目前对于认知雷达的研究尚处于起步阶段, 许多基本概念和关键技术尚不成熟, 因此对于认知MIMO-STAP领域需要在基本概念和基础理论方面开展研究和攻关。

参 考 文 献

- [1] Brennan L E and Reed I S. Theory of adaptive radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1973, 9(2): 237-252.
- [2] Ward J. Space-time adaptive processing for airborne radar[R]. Technical Report 1015, MIT Lincoln Laboratory, 1994.
- [3] Guerci J R. Space Time Adaptive Processing for Radar[M]. Norwood, MA: Artech House, Inc., 2003: 3-55.
- [4] Klemm R. Principles of Space-Time Adaptive Processing[M]. London: The Institution of Electrical Engineers, 2002: 5-45.
- [5] Melvin W L. A STAP overview[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 19(1): 19-35.
- [6] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 1-9.
Wang Yong-liang and Peng Ying-ning. Space-time Adaptive Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 1-9.
- [7] 吴顺君, 梅晓春. 雷达信号处理和数据处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 228-256.
Wu Shun-jun and Mei Xiao-chun. Radar Signal Processing and Data Processing Technology[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2007: 228-256.
- [8] 王永良, 李天泉. 机载雷达空时自适应信号处理技术回顾与

- 展望[J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, 3(3): 271-275.
- Wang Yong-liang and Li Tian-quan. Overview and outlook of space-time adaptive processing for airborne radar[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2008, 3(3): 271-275.
- [9] Li Jian and Stoica P. MIMO Radar Signal Processing[M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2009, Chapter 2.
- [10] 陈浩文, 黎湘, 庄钊文. 一种新兴的雷达体制—MIMO雷达[J]. 电子学报, 2012, 40(6): 1190-1198.
- Chen Hao-wen, Li Xiang, and Zhuang Zhao-wen. A rising radar system—MIMO radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(6): 1190-1198.
- [11] Fisher E, Haimovich A, and Blum R S. Spatial diversity in radar-models and detection performance[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(3): 823-838.
- [12] Haimovich A M, Blum R S, and Lenard J. MIMO radar with widely separated antennas[J]. *IEEE Signal Process Magazine*, 2008, 25(1): 116-129.
- [13] Li J and Stoica P. MIMO radar with colocated antennas[J]. *IEEE Signal Process Magazine*, 2007, 24(5): 106-114.
- [14] Fenders G P and Manickam A. Aircraft MIMO radar[P]. U.S. Patent No. US 8, 570, 210 B1, Oct. 29, 2013.
- [15] Bliss D W and Forsythe K W. Multiple-input multiple-output (MIMO) radar and imaging: degrees of freedom and resolution[C]. Conference Record of the 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, USA, 2003: 54-59.
- [16] Xue M, Vu D, Xu L, *et al.* On MIMO radar transmission schemes for ground moving target indication[C]. The 2009 IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, USA, 2009: 1171-1175.
- [17] Kantor J and Davis S. Airborne GMTI using MIMO techniques[C]. IEEE Radar Conference, Washington DC, USA, 2010: 1344-1349.
- [18] Chen C Y and Vaidyanathan P P. MIMO radar space-time adaptive processing using prolate spheroidal wave functions[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(2): 623-634.
- [19] Wu Y, Tang J, and Peng Y N. Models and performance evaluation for multiple-input multiple-output space-time adaptive processing radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2009, 3(6): 569-582.
- [20] 严韬, 谢文冲, 王永良. 机载 MIMO 雷达杂波建模及杂波特性分析[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(4): 289-295.
- Yan Tao, Xie Wen-chong, and Wang Yong-liang. Model and clutter characteristics analysis for airborne MIMO radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2010, 8(4): 289-295.
- [21] Li Y Z, He Z S, Li J, *et al.* A model of non-coherent airborne MIMO space time adaptive processing radar[C]. IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, Chengdu, 2010: 1-4.
- [22] Mecca V F, Ramakrishnan D, and Krolik J L. MIMO radar space-time adaptive processing for multipath clutter mitigation[C]. Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Signal Processing, Waltham, USA, 2006: 249-253.
- [23] Mecca V F, Krolik J L, and Robey F C. Beamspace slow-time MIMO radar for multipath clutter mitigation[C]. IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, Las Vegas, USA, 2008: 2313-2316.
- [24] Wang G H and Lu Y L. Clutter rank of STAP in MIMO radar with waveform diversity[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(2): 938-943.
- [25] 张西川, 谢文冲, 张永顺, 等. 任意波形相关性的机载 MIMO 雷达杂波建模与分析[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(3): 646-651.
- Zhang Xi-chuan, Xie Wen-chong, Zhang Yong-shun, *et al.* Modeling and analysis of the clutter on airborne MIMO radar with arbitrary waveform correlation[J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2011, 33(3): 646-651.
- [26] 张西川, 张永顺, 谢文冲, 等. 机载相干 MIMO 雷达杂波自由度估计研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2125-2131.
- Zhang Xi-chuan, Zhang Yong-shun, Xie Wen-chong, *et al.* Research on the estimation of clutter rank for coherent airborne MIMO radar[J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2011, 33(9): 2125-2131.
- [27] Xie Wen-chong, Zhang Xi-chuan, Wang Yong-liang, *et al.* Estimation of clutter degrees of freedom for airborne multiple-input multiple-output-phased array radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2013, 7(6): 652-657.
- [28] Feng Cun-qian, Zhang Lin-rang, Zhang Dong, *et al.* Clutter rank estimation rule for MIMO radar with arbitrary transmitted waveform synthetic strategies[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(18): 1180-1181.
- [29] Zhang W, Li J, Lin H, *et al.* Estimation of clutter rank of MIMO radar in case of subarraying[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(11): 671-673.
- [30] Chin Yuan-chong. Clutter rank for slow-time MIMO STAP[C]. Proceedings of the 9th European Radar Conference, Amsterdam, Netherlands, 2012: 54-56.
- [31] Zeng J K, He Z S, and Liu B. Adaptive space-time-waveform processing for MIMO radar[C]. Proceedings of the International Conference on Communications, Circuits and Systems, Kokura, Japan, 2008: 641-643.
- [32] Reed I S, Mallett J D, and Brennan L E. Rapid convergence rate in adaptive arrays[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1974, 10(6): 853-863.
- [33] 吕晖, 冯大政, 和洁, 等. 一种简化的机载 MIMO 雷达杂波特

- 征相消器[J]. 航空学报, 2011, 32(5): 866-870.
- Lv Hui, Feng Da-zheng, He Jie, *et al.* A simplified eigencanceler for airborne MIMO radar clutter suppression[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 32(5): 866-870.
- [34] 翟伟伟, 张弓, 刘文波. 基于杂波子空间估计的 MIMO 雷达降维 STAP 研究[J]. 航空学报, 2010, 31(9): 1824-1831.
- Zhai Wei-wei, Zhang Gong, and Liu Wen-bo. Study of reduced-rank STAP based on estimation of clutter subspace for MIMO radar[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(9): 1824-1831.
- [35] 张筱, 吴军, 彭芳. 基于扁长椭圆波函数的机载多输入多输出雷达降维自适应处理算法研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(3): 186-189.
- Zhang Xiao, Wu Jun, and Peng Fang. Study of reduced-dimension STAP based on PSWF for airborne MIMO radar[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(3): 186-189.
- [36] 陆达, 张弓. 知识辅助的机载 MIMO 雷达降秩 STAP 算法[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(4): 429-435.
- Lu D and Zhang G. Knowledge-aided reduced-rank STAP algorithm for airborne MIMO radar[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2012, 27(4): 429-435.
- [37] Xiang C, Feng D Z, and Lü H. Three-dimensional reduced-dimension transformation for MIMO radar space-time adaptive processing[J]. *Signal Processing*, 2011, 91(8): 2121-2126.
- [38] 冯大政, 向聪, 李倩, 等. 基于三迭代的机载 MIMO 雷达空时降维自适应处理方法[P]. 中国专利: CN 101887117 A. 2010. 11. 17.
- Feng Da-zheng, Xiang Cong, Li Qian, *et al.* Reduced-dimension STAP for airborne MIMO radar based on tri-iterative algorithm[P]. Chinese Patent, No. CN 101887117 A, 2010. 11. 17.
- [39] 和洁, 冯大政, 向聪, 等. 机载 MIMO 雷达降维空时自适应处理算法[J]. 电子科技大学学报, 2012, 41(1): 31-35.
- He Jie, Feng Da-zheng, Xiang Cong, *et al.* Reduced-dimension STAP for airborne MIMO radars[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2012, 41(1): 31-35.
- [40] 吕晖, 冯大政, 和洁, 等. 机载 MIMO 雷达两级降维杂波抑制方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(4): 805-809.
- Lv Hui, Feng Da-zheng, He Jie, *et al.* Two-stage reduced-dimension clutter suppression method for airborne MIMO radar[J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2011, 33(4): 805-809.
- [41] 王珽, 张剑云, 郑志东. 机载 MIMO 雷达两级降维空时自适应处理方法[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(4): 542-548.
- Wang Ting, Zhang Jian-yun, and Zheng Zhi-dong. Two-stage reduced-dimension STAP method for airborne MIMO radar[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2014, 29(4): 542-548.
- [42] 李彩彩, 廖桂生, 朱圣棋, 等. MIMO 雷达子阵级 m-Capon 方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 32(6): 1117-1120.
- Li Cai-cai, Liao Gui-sheng, Zhu Sheng-qi, *et al.* Study of subarray domain m-Capon method for MIMO radar[J]. *System Engineering and Electronics*, 2011, 32(6): 1117-1120.
- [43] 郝琳, 张永顺, 李哲. 机载 MIMO 雷达 3-CAP 杂波抑制方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2014, 15(4): 51-55.
- Hao Lin, Zhang Yong-shun, and Li Zhe. 3-CAP clutter suppression method research for airborne radar[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2014, 15(4): 51-55.
- [44] 吕晖, 冯大政, 和洁, 等. 机载多输入多输出雷达局域化降维杂波抑制方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38(2): 88-92.
- Lv Hui, Feng Da-zheng, He Jie, *et al.* Localized reduced-dimension clutter suppression method for airborne MIMO radar[J]. *Journal of Xidian University*, 2011, 38(2): 88-92.
- [45] 赵军. 机载 MIMO 雷达空时自回归算法[J]. 空军第一航空学院学报, 2012, 20(2): 6-10.
- Zhao Jun. A space-time autoaggressive method for airborne MIMO radar[J]. *Journal of the First Aeronautic Institute of the Air Force*, 2012, 20(2): 6-10.
- [46] Fa R and Lamare R C. Knowledge-aided reduced-rank STAP for MIMO radar based on joint iterative constrained optimization of adaptive filters with multiple constraints[C]. IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, Dallas, USA, 2010: 2762-2765.
- [47] Fa R, Lamare R C, and Clarke P. Reduced-rank STAP for MIMO radar based on joint iterative optimization of knowledge-aided adaptive filters[C]. 2009 Asilomar Conference, Pacific Grove, USA, 2009: 496-500.
- [48] Marcos S. Range recursive space time adaptive processing (STAP) for MIMO airborne radar[C]. Proceedings of the 17th European Signal Processing Conference, Glasgow, Scotland, 2009: 592-596.
- [49] 杨晓超, 刘宏伟, 王勇, 等. 有源干扰条件下机载 MIMO 雷达 STAP 协方差矩阵秩的分析[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(7): 1616-1622.
- Yang Xiao-chao, Liu Hong-wei, Wang Yong, *et al.* STAP covariance matrix rank analysis for airborne MIMO radar in the presence of jammers[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(7): 1616-1622.
- [50] 杨晓超, 刘宏伟, 王勇, 等. 一种两级机载 MIMO 雷达空时自适应处理方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(5): 1102-1108.
- Yang Xiao-chao, Liu Hong-wei, Wang Yong, *et al.* A novel two-stage space-time adaptive processing method for airborne MIMO radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(5): 1102-1108.

- [51] 高伟, 黄建国, 王海强, 等. 基于子空间估计的 MIMO 阵列降维 STAP 方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(5): 876-881. Gao Wei, Huang Jian-guo, Wang Hai-qiang, *et al.* Reduced-rank STAP method for MIMO array based on estimation of subspace[J]. *System Engineering and Electronics*, 2012, 34(5): 876-881.
- [52] 杨晓超, 刘宏伟, 王勇, 等. 利用多输入多输出雷达低秩杂波的降维空时自适应算法[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(8): 76-81. Yang Xiao-chao, Liu Hong-wei, Wang Yong, *et al.* A new reduced dimensional space-time adaptive processing algorithm exploiting low-rank clutter for multiple-input multiple-output radar[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(8): 76-81.
- [53] 王琰, 张剑云, 郑志东. 有源干扰条件下机载 MIMO 雷达降维 STAP 方法[J]. 现代雷达, 2013, 35(8): 37-42. Wang Ting, Zhang Jian-yun, and Zheng Zhi-dong. A reduced-rank STAP method for airborne MIMO radar under jamming condition[J]. *Modern Radar*, 2013, 35(8): 37-42.
- [54] 郑焱. MIMO 雷达中的空时自适应处理(STAP)技术[D]. [硕士学位论文], 南京: 南京邮电大学, 2010. Zheng Yan. Space Time Adaptive Processing (STAP) technology for MIMO radar[D]. [Master dissertation], Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2010.
- [55] 李彩彩, 廖桂生, 朱圣棋, 等. 一种抑制严重非均匀杂波的机载 MIMO-STAP 方法[J]. 电子学报, 2011, 39(3): 511-517. Li Cai-cai, Liao Gui-sheng, Zhu Sheng-qi, *et al.* An airborne MIMO-STAP method for severely non-homogeneous clutter suppression[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(3): 511-517.
- [56] Ahmadi M and Mohamed-pour K. Space-time adaptive processing for phased-multiple-input-multiple-output radar in the non-homogeneous clutter environment[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2014, 8(6): 585-596.
- [57] Chong C Y, Pascal F, and Lesturgie M. Estimation performance of coherent MIMO-STAP using Cramér-Rao bounds[C]. IEEE Radar Conference, Kansas City, USA, 2011: 533-537.
- [58] 邹博, 董臻, 梁甸农. 基于 STFAP 的 MIMO 雷达运动目标参数估计的 CRB 研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(8): 1988-1992. Zou Bo, Dong Zhen, and Liang Dian-nong. Research on CRB for moving target parameter estimation in MIMO radar based on STFAP[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(8): 1988-1992.
- [59] 刘晓莉. MIMO 雷达参数估计方法研究[D]. [博士学位论文], 西安: 西安电子科技大学, 2011. Liu Xiao-li. Study on parameters estimation of MIMO radar[D]. [Ph.D. dissertation], Xi'an: Xidian University, 2011.
- [60] Wang H Y, Liao G S, Li J, *et al.* Waveform optimization for MIMO-STAP to improve the detection performance[J]. *Signal Processing*, 2011, 91(11): 2690-2696.
- [61] Wang Hong-yan, Liao Gui-sheng, Li Jun, *et al.* Robust waveform design for MIMO-STAP to improve the worst-case detection performance[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2013, 52: 1-8.
- [62] 李军, 党博, 刘长赞, 等. 利用发射角度的双基地 MIMO 雷达杂波抑制方法[J]. 雷达学报, 2014, 3(2): 208-216. Li Jun, Dang Bo, Liu Chang-zan, *et al.* Bistatic MIMO radar clutter suppression by exploiting the transmit angle[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(2): 208-216.
- [63] Li J, Liao G S, and Griffiths H. Bistatic MIMO radar space-time adaptive processing[C]. IEEE Radar Conference, Kansas City, USA, 2011: 498-501.
- [64] Li J, Liao G S, and Griffiths H. Range-dependent clutter cancellation method in bistatic MIMO-STAP radars[C]. IEEE CIE International Conference on Radar, Chengdu, 2011: 59-62.
- [65] 李军, 柴睿, 廖桂生. 基于 MIMO 的双基地雷达地面动目标检测方法[P]. 中国专利: CN 102156279 A. 2011. 08.07. Li Jun, Chai Rui, and Liao Gui-sheng. Bistatic radar ground moving target indication method based on MIMO (Multiple Input Multiple Output)[P]. Chinese Patent, No. 102156279 A. 2011. 08.07.
- [66] 李军, 李焕, 廖桂生. 基于双基地多输入多输出雷达的杂波抑制方法[P]. 中国专利: CN 102520395 A. 2012. 06.27. Li Jun, Li Huan, and Liao Gui-sheng. Clutter suppression method based on bistatic multiple-input and multiple-output radar[P]. Chinese Patent, No. CN 102520395 A. 2012. 06.27.
- [67] 党博, 廖桂生, 李军, 等. 基于投影优化的双基地 MIMO 雷达杂波抑制方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(10): 2505-2511. Dang Bo, Liao Gui-sheng, Li Jun, *et al.* Weighted projection optimization for range-dependent clutter suppression in bistatic MIMO radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(10): 2505-2511.
- [68] Hassanien A and Vorobyov S A. Transmit energy focusing for DOA estimation in MIMO radar with colocated antennas[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(6): 2669-2682.
- [69] Khabbazibasmenj A, Hassanien A, Vorobyov S A, *et al.* Efficient transmit beamspace design for search-free based DOA estimation in MIMO radar[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(6): 1490-1500.
- [70] 郑志东, 张剑云, 杨瑛. 基于发射波束域-平行因子分析的 MIMO 雷达收发角度估计[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 2875-2880. Zheng Zhi-dong, Zhang Jian-yun, and Yang Ying. Joint

- DOD-DOA estimation of MIMO radar based on transmit beamspace-PARAFAC[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(12): 2875-2880.
- [71] 洪振清, 张剑云. 基于发射波束域预处理的 MIMO 雷达 MVDR 波束形成算法[J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(4): 722-731.
- Hong Zhen-qing and Zhang Jian-yun. MVDR beamforming algorithm based on beamspace preprocessing for MIMO radar[J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(4): 722-731.
- [72] Hassanien A and Vorobyov S A. Phased-MIMO radar: a tradeoff between phased-array and MIMO radars[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(6): 3137-3151.
- [73] Stoica P, Li J, Zhu X M, *et al.* On using a priori knowledge in space-time adaptive processing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(6): 437-444.
- [74] Zhu X M, Li J, and Stoica P. Knowledge-aided space-time adaptive processing[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(2): 1325-1336.
- [75] 范西昆, 曲毅. 知识辅助机载雷达杂波抑制方法研究进展[J]. *电子学报*, 2012, 40(6): 1199-1206.
- Fan Xi-kun and Qu Yi. An overview of knowledge-aided clutter mitigation methods for airborne radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(6): 1199-1206.
- [76] 刘聪锋. 稳健的自适应波束形成与时空自适应处理算法研究[D]. [博士论文], 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- Liu Cong-feng. Research on robust adaptive beamforming and space-time adaptive preprocessing algorithms[D]. [Ph.D. dissertation], Xi'an: Xidian University, 2008.
- [77] Xiang Cong, Feng Da-zheng, Lü Hui, *et al.* Robust adaptive beamforming for MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2010, 90(12): 3185-3196.
- [78] Zhang Wei, Wang Ju, and Wu Si-liang. Robust minimum variance multiple-input multiple-output radar beamformer[J]. *IET Signal Processing*, 2013, 7(9): 854-862.
- [79] Yang X P, Liu Y X, and Long T. Robust non-homogeneity detection algorithm based on prolate spheroidal wave functions for space-time adaptive processing[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2013, 7(1): 47-54.
- [80] 周宇, 张林让, 刘楠, 等. 空时自适应处理中基于知识的训练样本选择策略[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(2): 405-409.
- Zhou Yu, Zhang Lin-rang, Liu Nan, *et al.* Knowledge aided secondary data selection in space time adaptive processing[J]. *System Engineering and Electronics*, 2010, 32(2): 405-409.
- [81] 阳召成, 黎湘, 王宏强. 基于空时功率谱稀疏性的空时自适应处理技术研究进展[J]. *电子学报*, 2014, 42(6): 1194-1204.
- Yang Zhao-cheng, Li Xiang, and Wang Hong-qiang. An overview of space-time adaptive processing technology based on sparsity of space-time power spectrum[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(6): 1194-1204.
- [82] 马泽强, 王希勤, 刘一民, 等. 基于稀疏恢复的空时二维自适应处理技术研究现状[J]. *雷达学报*, 2014, 3(2): 217-227.
- Ma Ze-qiang, Wang Xi-qin, Liu Yi-min, *et al.* An overview on sparse recovery-based STAP[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(2): 217-227.
- [83] 孙珂, 张颖, 李刚, 等. 基于稀疏恢复的直接数据域 STAP 算法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2011, 51(7): 972-976.
- Sun Ke, Zhang Hao, Li Gang, *et al.* Direct data domain STAP algorithm using sparse recovery[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2011, 51(7): 972-976.
- [84] 孙珂, 张颖, 李刚, 等. 基于杂波谱稀疏恢复的空时自适应处理[J]. *电子学报*, 2011, 39(6): 1389-1393.
- Sun Ke, Zhang Hao, Li Gang, *et al.* STAP via sparse recovery of clutter spectrum[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(6): 1389-1393.
- [85] Sun K, Meng H D, Lapierre F D, *et al.* Registration-based compensation using sparse representation in conformal-array STAP[J]. *Signal Processing*, 2011, 91(10): 2268-2276.
- [86] Sun K, Meng H D, Wang Y L, *et al.* Direct data domain STAP using sparse representation of clutter spectrum[J]. *Signal Processing*, 2011, 91(9): 2222-2236.
- [87] Chen C Y and Vaidyanathan P P. Minimum redundancy MIMO radars[C]. *Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Seattle, USA, 2008: 45-48.
- [88] 洪振清, 张剑云, 梁浩, 等. 最小冗余 MIMO 雷达阵列设计[J]. *数据采集与处理*, 2013, 28(4): 471-477.
- Hong Zhen-qing, Zhang Jian-yun, Liang Hao, *et al.* Minimum redundancy MIMO radars array design[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2013, 28(4): 471-477.
- [89] 王伟, 马跃华, 王威鹏. 低冗余度多输入多输出雷达阵列结构设计[J]. *电波科学学报*, 2012, 27(5): 968-972.
- Wang Wei, Ma Yue-hua, and Wang Xian-peng. Low-redundancy MIMO radar array structure design[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2012, 27(5): 968-972.
- [90] Park H R, Kwak Y K, and Wang H. Efficient joint polarization space-time processor for nonhomogeneous clutter environments[J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(25): 1714-1715.
- [91] Park H R and Wang H. Adaptive polarization-space-time domain radar target detection in inhomogeneous clutter environments[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(1): 35-43.
- [92] Wu D J, Xu Z H, Zhang L, *et al.* Polarization-space-time adaptive processing for clutter suppression in airborne radar systems[C]. *IEEE Second International Conference on Digital Manufacturing and Automation*, Zhangjiajie, 2011: 855-858.

- [93] 杜文韬, 廖桂生, 杨志伟. 极化空时自适应处理性能分析[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2014, 41(1): 1-5.
Du Wen-tao, Liao Gui-sheng, and Yang Zhi-wei. Performance analysis of the polarization-space-time adaptive processing[J]. *Journal of Xidian University (Natural Science Edition)*, 2014, 41(1): 1-5.
- [94] 吴迪军, 徐振海, 熊子源, 等. 机载雷达极化空时联合域杂波抑制性能分析[J]. 电子学报, 2012, 40(7): 1429-1433.
Wu Di-jun, Xu Zhen-hai, Xiong Zi-yuan, et al. Performance analysis of polarization-space-time joint domain processing for clutter suppression in airborne radars[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(7): 1429-1433.
- [95] Gu C, He J, Li H, et al. Target localization using MIMO electromagnetic vector array systems[J]. *Signal Processing*, 2013, 93(7): 2103-2107.
- [96] 郑桂妹, 陈伯孝, 杨明磊. 基于矢量传感器 MIMO 雷达的发射极化优化 DOA 估计算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(3): 565-570.
Zheng Gui-mei, Chen Bai-xiao, and Yang Ming-lei. Transmitted polarization optimization for DOA estimation based on vector sensor MIMO radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(3): 565-570.
- [97] 郑桂妹, 杨明磊, 陈伯孝, 等. 干涉式矢量传感器 MIMO 雷达的 DOD/DOA 和极化联合估计[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(11): 2635-2641.
Zheng Gui-mei, Yang Ming-lei, Chen Bai-xiao, et al. Joint DOD/DOA and polarization estimation for interferometric MIMO radar with electromagnetic vector sensors[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(11): 2635-2641.
- [98] 王克让, 朱晓华, 何劲. 基于矢量传感器 MIMO 雷达的 DOD DOA 和极化联合估计算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(1): 160-165.
Wang Ke-rang, Zhu Xiao-hua, and He Jin. Joint DOD DOA and polarization estimation for MIMO radar with electromagnetic vector sensors[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(1): 160-165.
- [99] 王克让, 何劲, 贺亚鹏, 等. 基于矢量传感器的扩展孔径双基地 MIMO 雷达多目标定位算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4): 582-586.
Wang Ke-rang, He Jin, He Ya-peng, et al. Extended-aperture multi-target location algorithm for MIMO radars with vector sensors[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(4): 582-586.
- [100] Josefsson L and Persson P. Conformal Array Antenna Theory and Design[M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [101] Zatman M. Circular array STAP[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2): 510-517.
- [102] 高飞, 谢文冲, 王永良. 机载共形阵雷达杂波抑制方法研究[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2014-2020.
Gao Fei, Xie Wen-chong, and Wang Yong-liang. Study on clutter suppression method for airborne radar with conformal arrays[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(9): 2014-2020.
- [103] 段克清, 谢文冲, 王永良, 等. 共形阵机载火控雷达杂波建模与杂波抑制[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8): 1738-1744.
Duan Ke-qing, Xie Wen-chong, Wang Yong-liang, et al. Clutter modeling and suppression for airborne fire control radar with conformal antennas array[J]. *System Engineering and Electronics*, 2011, 33(8): 1738-1744.
- [104] 金林. 智能化认知雷达综述[J]. 现代雷达, 2013, 35(11): 6-11.
Jin Lin. Overview of cognitive radar with intelligence[J]. *Modern Radar*, 2013, 35(11): 6-11.
- [105] Guerci J R. Cognitive Radar: The Knowledge-Aided Fully Adaptive Approach[M]. Norwood, MA: Artech House, Inc., 2010.
- [106] 贲德, 王峰, 雷智勇. 基于认知原理的机载雷达抗干扰技术研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013, 8(4): 368-372.
Ben De, Wang Feng, and Lei Zhi-yong. Key anti-jamming technique of airborne radar based on cognition[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2013, 8(4): 368-372.

作者简介



王 琨(1988-), 男, 河南许昌人, 分别于 2010 年、2013 年获合肥电子工程学院学士学位、硕士学位, 现为信息工程大学导航与空天目标工程学院在读博士研究生, 主要研究方向为机载 MIMO 雷达空时自适应处理技术。

E-mail: wangtingsp@163.com



赵拥军(1964-), 男, 河南新乡人, 信息工程大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为阵列信号处理、雷达信号与信息处理。

E-mail: zhaoyjzz@163.com

胡 涛(1976-), 男, 安徽安庆人, 信息工程大学副教授, 主要研究方向为电子侦察、高功率微波技术。

E-mail: hu_tao_tao@sohu.com