

机载雷达空时自适应处理技术研究综述

谢文冲* 段克清 王永良

(空军预警学院雷达兵器运用工程军队重点实验室 武汉 430019)

摘 要: 空时自适应处理(Space Time Adaptive Processing, STAP)技术通过空域和时域2维联合自适应滤波的方式, 实现了机载雷达对强杂波与干扰的有效抑制。作为提升机载雷达性能的一项关键技术, 近年来备受雷达领域的关注与世界军事强国的重视。该文从方法、实验系统和应用3个方面回顾了空时自适应处理技术的发展过程和研究现状, 着重阐述了其发展过程中遇到的关键技术问题, 介绍了STAP技术在装备上的应用情况, 并讨论了下一步的发展趋势, 提出了需要或值得进一步研究的方向。

关键词: 空时自适应处理; 机载雷达; 杂波抑制; 抗干扰; 目标检测

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2017)06-0575-12

DOI: 10.12000/JR17073

引用格式: 谢文冲, 段克清, 王永良. 机载雷达空时自适应处理技术研究综述[J]. 雷达学报, 2017, 6(6): 575-586. DOI: 10.12000/JR17073.

Reference format: Xie Wenchong, Duan Keqing, and Wang Yongliang. Space time adaptive processing technique for airborne radar: An overview of its development and prospects[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(6): 575-586. DOI: 10.12000/JR17073.

Space Time Adaptive Processing Technique for Airborne Radar: An Overview of Its Development and Prospects

Xie Wenchong Duan Keqing Wang Yongliang

(Key Research Laboratory, Wuhan Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: Used to suppress strong clutter and jamming in airborne radar data, Space Time Adaptive Processing (STAP) is a multidimensional adaptive filtering technique that simultaneously combines signals from elements of an antenna array and multiple pulses of coherent radar waveforms. As a key technology for improving the performance of airborne radar, it has attracted much attention in the field of radar research and from powerful military nations in recent years. In this paper, the research and development status of STAP technology is reviewed including methodologies, experimental systems, and applications and we focus on the key technical problems encountered during its development. Then, the application of STAP technology in equipment is introduced. Finally, the next development trends, future directions, and areas worthy of further research are presented.

Key words: Space Time Adaptive Processing (STAP); Airborne radar; Clutter suppression; Anti-jamming; Target detection

1 引言

机载雷达由于机动性强, 且可克服地面雷达存在的盲区问题, 因而受到世界各国的高度重视。但

是, 机载雷达通常采用下视工作方式, 面临的杂波强度大, 分布范围广, 杂波频谱展宽严重。因此, 杂波抑制是机载雷达研制过程中遇到的关键技术难题。传统的机载雷达杂波抑制方法仅在时频域一维处理, 难以有效抑制杂波, 导致远距离目标或弱小目标仍淹没在剩余杂波中无法被检测到。因此, 亟需发展新理论、新技术来解决机载雷达的杂波抑制难题。

空时自适应处理(Space Time Adaptive

收稿日期: 2017-08-04; 改回日期: 2017-12-12; 网络出版: 2017-12-19

*通信作者: 谢文冲 xwch1978@aliyun.com

基金项目: 国家自然科学基金(61501506)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61501506)

Processing, STAP)技术正是在这种背景下发展起来的。STAP技术充分利用多通道雷达提供的多个空域通道信息和相干脉冲串提供的时域信息,通过空域和时域2维自适应滤波的方式,实现杂波的有效抑制。空时自适应处理的概念最初是由Brennan等人于1973年针对相控阵体制机载预警雷达的杂波抑制问题而提出的^[1]。经过40多年的探索和研究,STAP技术如今已形成一项具有较为坚实理论基础的实用新技术。到目前为止,已经出现了多部学术专著^[2-7]、报告^[8]、专刊^[9,10]、综述性文献^[11-15]和大量论文,成为了国际雷达领域的研究热点。随着数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)、现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)等高性能数字处理器的迅猛发展,STAP技术逐步从理论走向了实用,目前已被成功应用于新一代机载雷达中,如新一代“先进鹰眼”E-2D预警机雷达。此外,STAP技术也从最初的机载预警雷达领域拓展应用到了星载运动目标显示(Moving Target Indicator, MTI)雷达^[16]、舰载MTI雷达^[17]、合成孔径雷达^[18]、通信^[19]、声呐^[6]、导航^[20]和地震^[6]等军用/民用领域。

2 研究现状

1973年美国科学家Brennan和Reed等人首次提出了最优STAP理论^[1],随后在1976年又进一步阐述了最优STAP处理器在机载MTI雷达中的应用情况^[21]。但是由于计算复杂度高,所需训练样本数大,且要求训练样本数满足独立同分布(Independent and Identically Distributed, I.I.D)条件,最优STAP技术无法直接应用于实际工程。上世纪90年代美国实行的Mountain Top计划^[22]和多通道机载雷达测量(Multichannel Airborne Radar Measurements, MCARM)计划^[23]录取了大量机载雷达实测数据,掀起了空时自适应非均匀/非平稳杂波抑制方法的研究高潮;本世纪初美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)启动了基于知识的传感器信号处理与专家论证(Knowledge Aided Sensor and Signal Processing and Expert Reasoning, KASSPER)工程^[24],再次掀起了STAP技术的研究高潮。从提出STAP概念起至目前,国内外已从理论、技术、试验及应用等方面开展了大量的工作,下面本文仅从方法、实验系统和应用3个方面阐述STAP技术的研究现状。

2.1 STAP方法

根据现有公开文献和作者长期以来的研究,STAP方法的发展进程主要围绕以下4个关键技术

问题进行,包括:运算量和误差、非均匀杂波、非平稳杂波和空时自适应检测,如表1所示。

表 1 典型STAP方法
Tab. 1 Typical STAP methods

序号	关键技术问题	典型STAP方法
1	运算量和误差问题	降维STAP方法
		降秩STAP方法
		功率非均匀抑制法
		非均匀检测器
2	非均匀杂波问题	直接数据域法
		模型参数化STAP方法
		知识辅助STAP方法
		稀疏恢复STAP方法
		混合STAP方法
		1维补偿类方法
3	非平稳杂波问题	2维补偿类方法
		空时内插类方法
		权值调整类方法
		逆协方差矩阵预测类方法
		3D-STAP方法
4	空时自适应检测问题	基于GLRT准则的STAD
		基于Rao准则的STAD
		基于Wald准则的STAD

2.1.1 运算量和误差问题 从20世纪70年代提出一直到20世纪90年代,对STAP技术的研究始终围绕着如何在保持STAP方法的杂波抑制性能的同时尽可能地降低运算量和增强对误差的稳健性展开,即研究低运算量和高误差稳健性的STAP方法。研究工作主要从两个角度出发:降维STAP方法和降秩STAP方法。

降维STAP方法通过与雷达回波数据无关的线性变换来降低系统维数,从而在实现良好杂波抑制性能和高误差稳健性的同时尽可能地降低计算量。降维STAP方法研究的核心在于降维矩阵的设计。典型的降维STAP方法包括:辅助通道法(Auxiliary Channel Receiver, ACR)^[25]、时空2维Capon法^[26]、多通道联合自适应处理方法(Multiple Doppler Channels Joint Adaptive Processing, M-CAP)^[27,28]、先空时自适应处理后时域滤波处理(Adapt then Filter, A\$F)方法^[8]、先滑窗滤波再空时自适应处理(Filter then Adapt, F\$A)方法^[8]、局域联合处理方法(Joint Domain Localised, JDL)^[29]、 $\Sigma\Delta$ -STAP方法^[30]、空时多波束法(Space-Time Multiple-Beam, STMB)^[31]等。降维STAP方法的优点是易于工程实

现; 缺点是结构固定, 对不同非均匀杂波环境的适应性较差。

降秩STAP方法利用回波数据自适应构造空时滤波器。1983年Klemm对机载雷达杂波回波数据的空时协方差矩阵进行了特征分析, 首次发现其杂波秩个数近似等于 $N+K$ ^[32], 其中 N 和 K 分别表示空域通道数和时域相干积累脉冲数。1992年Brennan和Staudaher等人首次给出了正侧视均匀线性阵列条件下的杂波自由度估计准则(简称Brennan准则)^[33]: $\gamma \approx \lfloor N + (K - 1)\beta \rfloor$, 其中 β 表示一个脉冲重复间隔内载机平台运动的半个阵元间距的次数。由此可见, 实际处理时只需要利用稍高于杂波秩个数的系统自由度就可以实现对杂波的有效抑制。据此特性, 提出了一系列典型的降秩STAP方法, 主要包括: 主分量法(Principal Component, PC)^[34]、互谱尺度(Cross-Spectral Metric, CSM)法^[35]、多级维纳滤波器(Multistage Wiener Filter, MWF)方法^[36]等。降秩STAP方法可以实时根据杂波环境变化自适应设计滤波器, 因此可获得比降维STAP方法更优越的杂波抑制性能。降秩STAP方法的性能通常依赖于杂波自由度的大小, 局域子空间杂波自由度理论^[3]为在较低维度内进行再降秩处理提供了可能, 但是在实际工程中受各种误差的影响杂波自由度通常难以精确估计得到。

2.1.2 非均匀杂波问题 非均匀STAP方法可以分为功率非均匀抑制法、非均匀检测器、直接数据域法、模型参数化STAP方法、知识辅助STAP方法和稀疏恢复STAP方法等6大类。

功率非均匀抑制法假定杂波非均匀性主要表现为功率非均匀, 其目的是尽量选择与待检测样本功率接近的样本作为训练样本。典型的功率非均匀抑制方法是功率选择训练法(Power Selected Training, PST)^[37], 根据测量得到的实际杂波强度自适应选择杂波功率足够强的样本作为训练样本, 该方法较好地解决了空时2维滤波器凹陷不足的问题, 但是同时存在杂噪比估计过高的缺点。文献[38]提出的相位和功率选择训练法(Phase and Power Selected Training, P²ST), 通过挑选功率足够强、相位分布接近杂波相位分布的回波数据作为训练样本, 能够剔除包含强干扰目标信号的训练样本, 但是杂噪比估计过高的问题仍然存在。

非均匀检测器(Non-Homogeneity Detection, NHD)主要用来解决由于在训练样本中存在干扰目标而导致的非均匀问题。1996年Melvin等人首次提出用广义内积(Generalised Inner Product, GIP) NHD^[39]来检测和剔除包含干扰目标的训练样本,

以改善对杂波协方差矩阵的估计性能。Melvin与Adve^[40]等利用GIP对MCARM数据进行处理后的结果表明, 在非均匀样本剔除后输出信杂噪比增加了7 dB以上。同时, 本课题组提出了关联维数NHD^[31], 较好地解决了干扰目标导致的杂波非均匀问题。其他典型的NHD还包括: 采样协方差矩阵求逆(Sample Matrix Inverse, SMI)^[41]和频心法^[42]等。

直接数据域(Direct Data Domain, DDD)方法^[43]仅利用待检测样本来消除非均匀杂波的影响。由于仅利用了待检测距离单元数据, 因此DDD方法在处理极端非均匀杂波问题上具有巨大的优势, 但是也存在一些问题, 包括: 孔径损失、对系统误差敏感和仅适用于均匀等间隔阵列等。

模型参数化STAP方法将雷达的空时回波数据描述成一个多通道矢量自回归(Auto-Regressive, AR)模型, 首先利用训练样本对AR模型的参数进行估计, 然后通过估计得到的AR模型参数构造空时滤波器权矢量, 最终实现杂波抑制。典型的模型参数化STAP方法包括参数自适应匹配滤波法(Parametric Adaptive Matched Filter, PAMF)^[44], 空时自回归法(Space-Time Auto-Regressive Filter, STAR)^[45]以及基于知识的参数自适应匹配滤波法(Knowledge-Aided PAMF, KA-PAMF)^[46]。上述方法实现简单, 收敛速度快, 但其性能严重依赖于AR模型阶数的估计精度。若阶数估计不准, 则模型参数化STAP方法的杂波抑制性能下降明显^[47]。

知识辅助STAP(Knowledge-Aided STAP, KA-STAP)方法^[13,48-51]是利用先验知识提高非均匀杂波抑制性能的一类方法。知识辅助STAP方法分为两类: 一类是间接应用KA-STAP方法, 即利用先验知识为自适应处理中的训练策略和训练样本选取提供依据和指导; 另一类是直接应用KA-STAP方法, 即利用先验知识构造杂波协方差矩阵, 并与估计得到的杂波协方差矩阵融合形成最终的协方差矩阵, 最后产生自适应权值完成杂波抑制。

稀疏恢复STAP方法是近几年国内外雷达领域的一个热点研究方向, 该方法在样本严重不足条件下对提升机载雷达的杂波抑制性能具有巨大潜力, 但存在先验知识不够精细导致性能下降的问题。法国雷恩第一大学的Maria于2006年借鉴全局匹配滤波器技术成功应用于信号源定位方面的经验, 将该技术用于STAP中来实现对杂波谱和目标的高分辨估计^[52]; 清华大学的孙珂于2011年将表面欠定方程组求解(Focal Undetermined System Solver, FOCUSS)算法应用于杂波和目标的稀疏谱估计^[53], 获得了优于传统直接数据域方法的目标检测性能; 国防科技

大学的阳召成于2012年提出基于 L_1 范数加权空时功率谱稀疏恢复的 D^3 -STAP(Direct Data Domain STAP)方法^[54], 获得了单样本条件下杂波和目标的高分辨空时功率谱。上述研究主要是基于单样本恢复进行杂波抑制和目标检测, 但是单样本恢复所估计的杂波谱往往不够准确且易受到杂波起伏和噪声的影响。阳召成、马泽强和本课题组对多样本联合稀疏恢复STAP方法进行了初步探索, 并分别提出了基于同伦、 L_1/L_2 混合范数和SA-MUSIC(Subspace-Augmented Multiple Signal Classification)理论的联合稀疏恢复STAP方法^[54-56], 揭示了多样本联合稀疏恢复STAP的可行性和优越性。

除了上述非均匀STAP方法外, 混合STAP方法^[57-61]通过多种STAP方法的结合实现非均匀杂波的有效抑制, 由于篇幅限制, 此处不再赘述。

2.1.3 非平稳杂波问题 与外部环境变化引起杂波非均匀分布不同, 杂波的非平稳分布是由雷达天线的配置方式导致的, 例如: 非正侧面阵、圆柱形阵、共形阵、双多基地配置以及分布式雷达等都会引起杂波的距离相关性, 导致非平稳杂波的产生。与非均匀杂波不同, 非平稳杂波的空时分布特性可以通过系统参数预先计算得到, 因此如何有效补偿杂波的非平稳分布成为设计非平稳STAP方法的关键。

现有的机载雷达STAP非平稳杂波补偿方法可以分为5类: (1)1维补偿类, 包括: 多普勒补偿法(Doppler Warping, DW)^[62,63]、高阶多普勒补偿法(High Order Doppler Warping, HODW)^[64]等, 该类方法的特点是仅通过多普勒频率域进行杂波非平稳性补偿; (2)2维补偿类, 包括: 角度-多普勒补偿法(Angle-Doppler Compensation, ADC)^[65]、自适应角度-多普勒补偿法(Adaptive ADC, A²DC)^[66]、尺度变换法^[67]、谱配准法(Registration-Based Compensation, RBC)^[68]、基于非均匀采样的谱配准法(Registration-Based Compensation Based on Non-Uniform Sampling, RBCNS)^[69]等, 该类方法的特点是通过角度-多普勒2维域实现对杂波非平稳性的补偿; (3)空时内插类, 包括: 最小方差内插法(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)^[70]、联合空时内插法(Space-Time Interpolation Technique, STINT)^[71]和改进的联合空时内插法(Improved STINT, ImSTINT)^[72]等, 该类方法的特点是以低自由度的杂波子空间为参考子空间, 通过变换矩阵将所有距离单元的样本数据映射到参考杂波子空间中, 以消除杂波非平稳性; (4)权值调整类, 包括: 导数更新法(Derivative Based Updating, DBU)^[73]和基于俯仰余弦的导数更新法

(Elevation-cosine DBU, EDBU)^[74], 该类方法的特点是假设权矢量是距离的函数, 通过估计权矢量函数的系数, 进而实现对杂波谱的补偿; (5)逆协方差矩阵预测类方法, 包括: 逆协方差矩阵线性预测法(Prediction of Inverse Covariance Matrix, PICM)^[75]和逆协方差矩阵非线性预测法(Non-Linear PICM, NL-PICM)^[76]等, 该类方法的特点是假设不同距离单元杂波协方差矩阵的逆矩阵满足线性或非线性预测模型, 利用该假设来直接预测待检测距离单元对应的协方差矩阵的逆。非平稳杂波补偿类方法的缺点是当存在距离模糊时性能下降明显。

3D-STAP(Three-Dimensional STAP)是抑制非平稳杂波的另一类重要方法, 3D指的是方位维-俯仰维-多普勒维。该类方法在克服非平稳杂波和距离模糊影响方面具有独特的优势。文献[77]分析了上述两个优势存在的内在原因; 文献[78]提出了“十”字型波束3D-STAP方法; 文献[79]提出了基于4维频域补偿的3D-STAP方法。除了上述两类非平稳杂波抑制方法外, 文献[80]提出了基于协方差矩阵锥销(Covariance Matrix Taper, CMT)的STAP非平稳杂波抑制方法。

2.1.4 空时自适应检测问题 现有的雷达目标检测方案通常是先利用STAP技术进行杂波抑制, 然后再利用恒虚警率检测(Constant False Alarm Rate, CFAR)技术进行目标检测。上述处理将杂波抑制和目标检测单独考虑, 在一定程度上损失了目标检测性能。针对该问题, 1986年美国麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)林肯实验室的Kelly基于广义似然比(Generalised Likelihood Ratio Test, GLRT)准则, 提出了多通道数据GLRT检测器^[81], 从而开创了多通道信号自适应检测理论。目前常用的自适应检测器设计准则包括: GLRT准则、Rao准则和Wald准则。1991年, Robey^[82]与Chen^[83]等利用两步GLRT准则在均匀环境中分别独立地提出了自适应匹配滤波器(Adaptive Matched Filter, AMF)。De Maio分别在文献[84]和文献[85]中提出了均匀环境中的Rao检测器和Wald检测器, 并且证明了Wald检测器与AMF等价。此外, 当子空间维数等于整个观测空间且目标导向矢量完全未知时的GLRT由Raghavan提出, 即自适应能量检测器(Adaptive Energy Detector, AED)^[86]。1999年在目标导向矢量已知的前提下, Kraut和Scharf根据GLRT准则提出了著名的自适应相干估计器(Adaptive Coherence Estimator, ACE)^[87]。随后在2001年, Kraut和Scharf进一步提出了当信号位于维数大于

1的子空间时的GLRT, 即自适应子空间检测器(Adaptive Subspace Detector, ASD)^[88]。

本课题组在机载雷达空时自适应检测领域进行了广泛深入的研究, 2014年提出了空时自适应检测(Space Time Adaptive Detection, STAD)的概念^[89]。当存在导向矢量失配时, 针对点目标检测和扩展目标检测问题, 刘维建等人通过增加虚拟干扰的方式, 提出了有效的失配敏感自适应检测器和可调检测器^[90]; 针对存在干扰时的点目标检测问题, 提出了假设干扰已知和干扰近似满足广义特征关系(Generalized Eigen-Relation, GER)约束条件下的GLRT检测器、Rao检测器和Wald检测器^[89,91,92]; 针对分布式目标的检测难题, 提出了基于双子空间信号模型的多种有效检测器^[93,94], 改善了检测性能; 针对目标方向信息不确定时的检测问题, 根据GLRT准则、Rao准则和Wald准则分别提出了对应的空时自适应检测器^[95,96], 提高了对失配信号检测的稳健性; 利用杂波加噪声协方差矩阵的大特征值通常小于系统自由度的特点, 提出了多种有效的检测器^[97,98], 改善了小训练样本数时的检测性能。

传统STAP方法处理的前提是假设在处理期间运动目标均位于同一个距离单元内, 但是对于高分辨率SAR/GMTI(Synthetic Aperture Radar/Ground Moving Target Indicator)雷达, 该条件难以满足。针对该问题, 1998年德国Ender等人提出了长相干积累STAP方法^[18], 随后J.K.Jao等人在2004年提出了统一的SAR-STAP思想^[99]。国内国防科技大学开展了长相干积累STAP技术的相关研究^[100]。

2.2 STAP实验系统

STAP技术自1973年提出以后, 长期处于理论研究阶段。直到上世纪90年代初, STAP理论的逐渐成熟和数字信号处理器性能的大幅度提升才使得空时自适应处理的实际应用成为可能, 各国相继开展了多项实验研究。

2.2.1 Mountain Top计划^[22] Mountain Top计划于1994年前后进行, 由DARPA策划实施, 获取了多批实测数据。该实验并非基于真实的机载平台环境, 而是在地面模拟了机载运动平台的场景。发射天线和接收天线分开放置, 利用逆偏置相位中心天线(Inverse Displaced Phase Centre Antenna, IDPCA)技术模拟从运动平台上发射波束。IDPCA是由16个子阵构成的等效线阵, 发射频率为UHF频段。工作时每个子阵沿阵面方向交替发射, 得到的回波就近似等价于从运动平台上接收到的回波, 相干处理脉冲数为16。Mountain Top计划中的接收天线为由14个等效阵元组成的线阵。利用Mountain

Top数据, 均匀环境下传统降维/降秩STAP方法的有效性得到了验证。

2.2.2 MCARM计划^[23] MCARM计划是在Mountain Top计划之后进行的(1995~1996年), 虽然二者相差的时间并不长, 但MCARM计划的规模远远超过了Mountain Top计划。该计划由美国空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)主导实施, 机载实验平台为BAC-111客机, 采用L波段有源相控阵天线阵列, 天线阵面分为8行16列共128个单元, 每一行中相邻4个阵元合成一个子阵, 因此共包含32个子阵(8×4)。天线安装在位于飞机前部左侧的雷达罩内, 为正侧面阵。MCARM平台包括两种信号处理方式: 第1种是对于模拟波束形成器接收到的和(Σ)、差(Δ)和保护(G)通道数据, 利用传统信号处理方法在Mercury计算机中完成; 第2种是将32个子阵进一步合成为24个接收通道, 信号处理由28节点的Paragon计算机群完成。与Mountain Top实验相比, MCARM计划不仅对实测杂波分布、干扰抵消性能、实时STAP算法等进行了细致分析, 而且进行了双基地机载雷达实验, 获取了一大批重要的实验数据。通过对MCARM数据的分析, 非均匀STAP杂波抑制问题引起了国内外专家的高度重视。

2.2.3 KASSPER计划^[24,101] 上世纪90年代以来, 随着对STAP技术的深入研究, 理论、仿真与实验的验证分析表明, STAP技术面临以下四大挑战: (1)实时STAP处理架构的设计; (2)STAP快速算法; (3)非平稳杂波抑制; (4)非均匀杂波抑制。为了解决上述挑战性问题的, 在DARPA资助下, 2001年MIT林肯实验室实施了KASSPER计划。KASSPER是一个闭环反馈的处理平台, 只有保证正确的知识积累和正确的信息处理方法, 才能够获得期望的性能提升。KASSPER实验针对了两种雷达工作模式, 一种是地面运动目标指示(GMTI); 另一种是合成孔径雷达。在GMTI模式下, 雷达工作频率为10 GHz, 脉冲重复频率为2.2 kHz, 相干脉冲数为33。继KASSPER实验不久, 美军逐渐将该实验成果应用于实际作战系统, 并提出了自组织的智能雷达系统(Autonomy Intelligent Radar System, AIRS)架构。目前, AIRS架构已经成功应用于美军的无人机联合作战计划中。

2.2.4 STAP实时处理系统 在空时自适应处理领域, 美国、中国和英国先后研制了多型实验系统。除了由美国主导的上述三大计划外, 国内西安电子科技大学、空军预警学院、中电集团14所和38所等单位在STAP方面做了大量的工作, 有效推动了STAP

技术的发展。西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室在“九五”期间开发研制了STAP实验系统。空军预警学院2006年开发成功STAP原型机,研制了通用可编程空时自适应信号处理系统,并实现了三/四通道机载预警雷达实测数据的实时处理。中国电科集团公司14所和38所在“十二五”期间开发成功多通道机载预警雷达STAP系统,并通过机载试验验证了复杂环境下STAP技术的有效性和工程可实现性。表2列举了国内外研制的典型STAP实时处理系统。

2.3 应用情况

目前,已有多型现役或在研装备应用了STAP技术,最具代表性的是美国海军的新一代舰载预警机“先进鹰眼”E-2D,已在2015年具备初始作战能力。该预警机配置的雷达为诺斯罗普·格鲁曼公司研制的AN/APY-9,空域通道数为18。既使仍然采用UHF频段,但应用STAP技术以后,E-2D预警机不仅可以检测海面上空的运动目标,同时也可实现对陆地强杂波背景下运动目标的有效检测。除了常规飞机目标外,还可实现对陆基弹道导弹和巡航导弹等特殊目标的探测。美国官方公布的数据表明:相对于E-2C,改进后的E-2D预警机雷达的作用距离提高50%以上。AN/APY-9雷达对空中目标探测距离大于402 km,对海面目标探测距离大于555 km,最小可检测速度小于50 km/h。

美国Sandia国家实验室研制的Lynx多功能雷达采用了双波束两相位中心STAP技术,具有运动目标指示功能,装备于“捕食者”B型(MQ-9)无人机、“空中勇士”型无人机和“灰鹰”无人机^[101]。STAP技术除了在雷达探测中的应用外,还被用于GPS(Global Positioning System)接收机的抗干扰

系统。洛克希德·马丁公司研制的G-STAR全球定位产品,采用了基于STAP的数字波束形成技术,实现了同时多波束接收和干扰零陷抑制。法国Thales公司也研发了与G-STAR类似的GPS抗干扰系统——TopShield,该系统能够提供大于90 dB的干扰抑制能力,可有效对抗连续波、脉冲窄带和宽带噪声干扰。

3 下一步发展趋势

STAP技术经过40多年的研究,在基础理论方面已经取得了很大进展,应用对象由最初的机载预警雷达扩展到机载火控雷达、机载远程战场侦察雷达和天基雷达等诸多领域。但是,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许多问题需要进一步研究。下面,结合多年来的研究会给出一些需要或值得进一步研究的方向。

3.1 STAP基础理论问题

STAP的相关理论研究已经很多,但是作者认为仍存在以下科学问题值得关注:(1)复杂地貌环境下的杂波逼真建模;(2)复杂电磁环境的科学表征;(3)杂波非均匀性和非平稳性的科学度量;(4)雷达杂波数据的距离模糊解耦;(5)干扰环境下低旁瓣和主瓣内零深的兼容性问题。基于上述科学问题,下一步值得研究的技术问题包括:(1)机载雷达杂波特性和干扰特性的进一步认知和度量,包括:新体制机载雷达多通道杂波数据产生技术、复杂地貌环境的杂波特性实时认知与度量方法、复杂电磁环境的干扰特性实时认知与度量方法等;(2)复杂环境下机载雷达认知STAP杂波抑制和抗干扰技术,包括:复杂地貌环境下认知杂波抑制技术、复杂电磁环境下认知抗干扰技术、空时频极化多维联合STAP方法、复杂环境下的强杂波与新样式干扰

表 2 国内外典型STAP实时处理系统

Tab. 2 Typical STAP real-time processing systems at home and abroad

时间(年)	国家	机构	STAP系统
1994	中国	西安电子科技大学	机载预警雷达实验系统,由大约100片DSP21060/ADSP21062构成
1996	美国	MHPCC(Maui High Performance Computer Center) MIT	采用IBM超级计算机SP2,主要用于处理Mountain Top实测数据
1996	美国	AFRL	MCARM实验系统:L波段,28个Paragon处理节点
2000	美国	Raytheon	UESA(UHF Electronically Scanned Array)计划,UHF频段电扫阵列,主要用于预警机雷达升级改造试验
2002	美国	MIT	KASSPER项目,基于知识辅助的机载雷达实验验证
2004	美国	AFRL	自组织智能雷达系统AIRS,将人工智能与知识辅助相结合的新一代雷达
2005	美国	AFRL	无人机联合侦察与作战计划,充分运用了KASSPER和AIRS实验的成果
2006	中国	空军预警学院	机载雷达通用可编程STAP系统,实现了三/四通道机载预警雷达实测数据的实时处理
2008	英国	QinetiQ Malvern	PACER(Phased Array Concepts Evaluation RIG)雷达原理样机,32个自适应接收通道
2012	中国	中国电科集团公司14所/38所	多通道机载预警雷达STAP系统

同时抑制技术等；(3)特殊目标的特性分析与认知空时自适应检测技术，包括：各类导弹、武装直升机与临近空间武器等特殊目标的特性分析、基于目标特性的认知空时自适应检测技术、海上多目标环境的重点目标分离与分类技术等。

3.2 新体制雷达STAP技术

传统相控阵体制机载雷达杂波抑制和抗干扰技术目前已取得很大进展，但对于现代战争中经常面临的包含隐身武器、反辐射导弹、弹道导弹和临近空间武器等运动目标的复杂目标环境，传统体制机载雷达受天线孔径、频段、接收通道数和信号波形等因素的限制，难以有效解决上述复杂目标的探测问题。因此，必须发展新体制雷达及其相应的新理论和新技术。近年来，国内外重点发展的新体制雷达主要包括：共形阵、端射阵、双/多基地、MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)、天基、分布式、认知等。上述新体制雷达的主要特点是：

(1) 杂波空时2维分布高度离散化

由于共形阵天线结构非线性和非等间隔性，天线方向图性能严重恶化，主瓣杂波多普勒展宽严重；同时副瓣引入高强度杂波和干扰，导致杂波自由度大幅增加，进而影响空时自适应处理的杂波和干扰抑制能力。

(2) 杂波空时2维分布轨迹复杂多变

双/多基地配置中的收发分置，使得杂波的空时2维耦合关系发生变化，其具体表现为空时2维谱分布曲线形状更为复杂和多样化，且随收/发平台相对位置关系变化而变化，在实际应用中必须设计对各种分布杂波均具备良好抑制性能的稳健STAP方法。

(3) 杂波非平稳特性更为严重

双/多基地配置中收/发分置以及天基雷达受地球自转的影响，均导致杂波多普勒依距离变化较常规雷达更为剧烈，即杂波的非平稳特性更为严重。特别在中/高重频(存在距离模糊)情况下，中远程回波和近程非平稳杂波混叠在一起，均匀样本的严重不足导致杂波抑制性能急剧恶化，表现为多普勒(速度)盲区和距离盲区显著增大。

(4) 天线误差增大

平面相控阵雷达阵列天线误差通常控制在5%以内，传统的STAP处理可通过相关算法进行有效自适应补偿，而采用共形天线结构后，天线结构与安置的复杂性必然导致更为严重的阵元误差、子阵误差和通道误差，这需要设计对误差更为稳健的STAP方法。

(5) 均匀样本需求成倍增长

MIMO体制机载雷达可形成数倍于接收阵列的天线孔径，也就是系统自由度较传统相控阵天线增大了数倍，这会导致运算量和对独立同分布训练样本需求的数倍增长，不利于STAP的实时处理以及不适用于实际严重的非均匀杂波环境。

(6) 外部信息的精确度量与配准难度大

认知机载雷达的重要内容是关于知识辅助STAP技术的研究，该技术当前存在的主要问题包括异类传感器间的数据配准、先验知识的可信度评估和实测数据与先验数据的误差补偿等。

上述特点导致传统STAP方法的杂波抑制性能严重下降。因此，研究有效的新体制机载/天基雷达STAP杂波抑制方法是未来STAP领域的研究重点之一。例如：共形阵机载/天基雷达发射方向图综合与接收通道误差自适应补偿技术；分布式机载/天基雷达系统的空时自适应杂波抑制与联合相参处理技术；MIMO机载/天基雷达的系统自由度控制与有效样本提取技术；低频机载雷达天线低副瓣控制与误差稳健的STAP方法等。

4 结束语

经过近半个世纪的发展，空时自适应处理技术在杂波抑制和抗干扰领域的优势已逐渐在实际雷达装备中得到显现。但是随着战场环境的日趋复杂，STAP技术在发展过程中仍将不可避免遇到很多问题，尤其是面临复杂目标环境。基于STAP的复杂目标探测和跟踪技术以及新体制机载/天基雷达STAP新理论和新技术将是需要进一步努力或值得研究的重要方向。毋庸置疑，随着信号处理技术的发展和硬件水平的不断提高，STAP技术将拥有更加广阔的应用前景。

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, AES-9(2): 237-252. DOI: 10.1109/TAES.1973.309792.
- [2] Klemm R. Space-Time Adaptive Processing: Principles and Applications[M]. Stevenage, UK: IEE Publishers, 1998.
- [3] 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.
Wang Y L and Peng Y N. Space-Time Adaptive Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [4] Klemm R. Principles of Space-Time Adaptive Processing[M]. Second Edition, Stevenage, Herts., UK: IEE Publishers, 2002.
- [5] Guerci J R. Space-Time Adaptive Processing for Radar[M]. Boston: Artech House, 2003.
- [6] Klemm R. Applications of Space-Time Adaptive

- Processing[M]. London: IEE Publishers, 2004.
- [7] Klemm R. Principles of Space-Time Adaptive Processing[M]. Third edition, London, UK: IEE Publishers, 2006.
- [8] Ward J. Space-time adaptive processing for airborne radar[R]. No. 1015. London: MIT Lincoln Laboratory, 1994.
- [9] Melvin W L. Space-time adaptive processing and adaptive arrays: Special collection of papers[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2): 508–509. DOI: 10.1109/7.845233.
- [10] Klemm R. Special issue on space-time adaptive processing (STAP)[J]. *Electronics & Communications Engineering Journal*, 1999, 11(1): 2.
- [11] Rangaswamy M. An overview of space-time adaptive processing for radar[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Radar, Adelaide, Australia, 2003: 45–50.
- [12] Melvin W L. A STAP overview[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2004, 19(1/2): 19–35.
- [13] Wicks M C, Rangaswamy M, Adve R, *et al.* Space-time adaptive processing: A knowledge-based perspective for airborne radar[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2006, 23(1): 51–65. DOI: 10.1109/MSP.2006.1593337.
- [14] Greve S, Ries P, Lapierre F, *et al.* Framework and taxonomy for radar space-time adaptive processing (STAP) methods[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(3): 1084–1099. DOI: 10.1109/TAES.2007.4383596.
- [15] 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, 296. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5692.2008.03.010.
- Wang Y L and Li T Q. Overview and outlook of space time adaptive signal processing for airborne radar[J]. *Journal of CAEIT*, 2008, 3(3): 271–275, 296. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5692.2008.03.010.
- [16] Maher J, Callahan M, and Lynch D. Effects of clutter modeling in evaluating STAP processing for space-based radars[C]. Proceedings of the Record of the IEEE 2000 International Radar Conference, Alexandria, VA, 2000: 565–570.
- [17] Lesturgie M. Use of STAP techniques to enhance the detection of slow targets in shipborne HFSWR[C]. Proceedings of International Radar Conference, Adelaide, Australia, 2003: 504–509.
- [18] Ender J H G. Space-time processing for multichannel synthetic aperture radar[J]. *Electronics & Communications Engineering Journal*, 1999, 11(1): 29–38.
- [19] Paulraj A J and Lindskog E. Taxonomy of space-time processing for wireless networks[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 1998, 145(1): 25–31. DOI: 10.1049/ip-rsn:19981807.
- [20] Fante R L and Vaccaro J J. Wideband cancellation of interference in a GPS receive array[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2): 549–564. DOI: 10.1109/7.845241.
- [21] Brennan L E, Mallett J D, and Reed I S. Adaptive arrays in airborne MTI radar[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1976, 24(5): 607–615. DOI: 10.1109/TAP.1976.1141412.
- [22] Titi W G. An overview of the ARPA/NAVY mountaintop program[C]. Proceedings of IEEE Adaptive Antenna Systems Symposium, Melville, NY, 1994.
- [23] Suresh Babu, Torres J A, and Melvin W L. Processing and evaluation of multichannel airborne radar measurements (MCARM) measured data[C]. Proceedings of IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Boston, MA, 1996: 395–399.
- [24] Schrader G E. The knowledge aided sensor signal processing and expert reasoning (KASSPER) real-time signal processing architecture[C]. Proceedings of IEEE Radar Conference, Philadelphia, PA, USA, 2004: 394–397.
- [25] Klemm R. Adaptive airborne MTI: An auxiliary channel approach[J]. *IEE Proceedings F Communications, Radar and Signal Processing*, 1987, 134(3): 269–276. DOI: 10.1049/ip-f-1.1987.0054.
- [26] 保铮, 廖桂生, 吴仁彪, 等. 相控阵机载雷达杂波抑制的时-空二维自适应滤波[J]. *电子学报*, 1993, 21(9): 1–7.
- Bao Z, Liao G S, Wu R B, *et al.* 2-D temporal-spatial adaptive clutter suppression for phased array airborne radars[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1993, 21(9): 1–7.
- [27] Wang Y L, Peng Y N, and Bao Z. Space-time adaptive processing for airborne radar with various array orientation[J]. *IEE Proceedings Radar, Sonar Navigation*, 1997, 144(6): 330–340.
- [28] Dipietro R C. Extended factored space-time processing for airborne radar systems[C]. Proceedings of the 26th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, 1992, 1: 425–430.
- [29] Wang H and Cai L J. On adaptive spatial-temporal processing for airborne surveillance radar systems[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(3): 660–670. DOI: 10.1109/7.303737.
- [30] Brown R D, Wicks M C, Zhang Y, *et al.* A space-time adaptive processing approach for improved performance and affordability[C]. Proceedings of IEEE National Radar Conference, Ann Arbor, MI, 1996: 321–326.
- [31] Wang Y L, Chen J W, Bao Z, *et al.* Robust space-time adaptive processing for airborne radar in nonhomogeneous clutter environments[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(1): 71–81.

- [32] Klemm R. Adaptive clutter suppression for airborne phased array radar[J]. *IEEE Proceedings H-Microwaves, Optics and Antennas*, 1983, 130(1): 125–132. DOI: 10.1049/ip-h-1.1983.0021.
- [33] Brennan L E and Staudaher F M. Subclutter visibility demonstration[R]. RL-TR-92-21, Adaptive Sensors Incorporated, 1992.
- [34] Haimovich A M and Berin M. Eigenanalysis-based space-time adaptive radar: Performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, 33(4): 1170–1179. DOI: 10.1109/7.625104.
- [35] Goldstein J S and Reed I S. Reduced-rank adaptive filtering[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, 45(2): 492–496.
- [36] 张良. 机载相控阵雷达降维STAP研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 1999.
Zhang L. Study of reduced-rank STAP for airborne phased array radar[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 1999.
- [37] Rabideau D J and Steinhardt A O. Improved adaptive clutter cancellation through data-adaptive training[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 879–891. DOI: 10.1109/7.784058.
- [38] Kogon S M and Zatman M A. STAP adaptive weight training using phase and power selection criteria[C]. Proceedings of the 35th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, 2001, 1: 98–102.
- [39] Melvin W L, Wicks M C, and Brown R D. Assessment of multichannel airborne radar measurements for analysis and design of space-time processing architectures and algorithms[C]. Proceedings of IEEE National Radar Conference, Ann Arbor, Michigan, 1996: 130–135.
- [40] Adve R S, Hale T B, and Wicks M C. Transform domain localized processing using measured steering vectors and non-homogeneity detection[C]. Proceedings of the Record of the 1999 IEEE Radar Conference, Boston, MA, 1999: 285–290.
- [41] Wicks M C, Melvin W L, and Chen P. An efficient architecture for nonhomogeneity detection in space-time adaptive processing airborne early warning radar[C]. Proceedings of (Conf. Publ. No. 449) Radar 97, Edinburgh, UK, 1997: 295–299.
- [42] 吴洪, 王永良, 陈建文. 基于频心法的STAP非均匀检测器[J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(4): 606–608. DOI: 10.3321/j.issn:1001-506X.2008.04.005.
Wu H, Wang Y L, and Chen J W. Nonhomogeneous detector for STAP based on spectral center frequency method[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(4): 606–608. DOI: 10.3321/j.issn:1001-506X.2008.04.005.
- [43] Sarkar T K, Wang H, Park S, *et al.* A deterministic least-squares approach to space-time adaptive processing (STAP)[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2001, 49(1): 91–103. DOI: 10.1109/8.910535.
- [44] Roman J R, Rangaswamy M, Davis D W, *et al.* Parametric adaptive matched filter for airborne radar applications[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2): 677–692.
- [45] Parker P and Swindlehurst A. Space-time autoregressive filtering for matched subspace STAP[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(2): 510–520.
- [46] Wang P, Li H B, and Himed B. Knowledge-aided parametric tests for multichannel adaptive signal detection[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(12): 5970–5982.
- [47] 段克清, 谢文冲, 高飞, 等. 基于杂波自由度的STAR模型参数估计方法[J]. *信号处理*, 2009, 25(11): 1715–1718. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0530.2009.11.010.
Duan K Q, Xie W C, Gao F, *et al.* Parameters estimation method for STAR model based on clutter degree of freedom[J]. *Signal Processing*, 2009, 25(11): 1715–1718. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0530.2009.11.010.
- [48] Guerci J R and Baranoski E J. Knowledge-aided adaptive radar at DARPA: An overview[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2006, 23(1): 41–50.
- [49] Melvin W L and Guerci J R. Knowledge-aided signal processing: A new paradigm for radar and other advanced sensors[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(3): 983–996.
- [50] Melvin W L and Showman G A. An approach to knowledge-aided covariance estimation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(3): 1021–1042.
- [51] Xie W C, Duan K Q, Gao F, *et al.* Clutter suppression for airborne phased radar with conformal arrays by least squares estimation[J]. *Signal Processing*, 2011, 91(7): 1665–1669.
- [52] Maria S and Fuchs J J. Application of the global matched filter to STAP data an efficient algorithmic approach[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Toulouse, 2006: 14–19.
- [53] 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.
- [54] Yang Z C, Rodrigo C. de Lamare, and 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.

- [55] Ma Z Q, Liu Y M, Meng H D, *et al.* Jointly Sparse recovery of multiple snapshots in STAP[C]. Proceedings of IEEE Radar Conference, Ottawa, ON, 2013: 1–4.
- [56] 王泽涛, 段克清, 谢文冲, 等. 基于SA-MUSIC理论的联合稀疏恢复STAP算法[J]. 电子学报, 2015, 43(5): 846–853. DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.05.003.
- Wang Z T, Duan K Q, Xie W C, *et al.* A joint sparse recovery STAP method based on SA-MUSIC[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(5): 846–853. DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.05.003.
- [57] Adve R S, Hale T B, and Wicks M C. Practical joint domain localised adaptive processing in homogeneous and nonhomogeneous environments. Part 2: Nonhomogeneous environments[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2000, 147(2): 66–74.
- [58] Aboutanios E and Mulgrew B. Hybrid detection approach for STAP in heterogeneous clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(3): 1021–1033.
- [59] Gerlach K and Picciolo M L. Robust STAP using reiterative censoring[C]. Proceedings of IEEE Radar Conference, Huntsville, AL, 2003: 244–251.
- [60] Shackelford A K, Gerlach K, and Blunt S D. Partially adaptive STAP using the FRACTA algorithm[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(1): 58–69.
- [61] Blunt S D, Gerlach K, and Rangaswamy M. STAP using knowledge-aided covariance estimation and the FRACTA algorithm[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(3): 1043–1057. DOI: 10.1109/TAES.2006.248197.
- [62] Borsari G K. Mitigating effects on STAP processing caused by an inclined array[C]. Proceedings of IEEE Radar Conference, Dallas, TX, 1998: 135–140.
- [63] 魏进武, 王永良, 陈建文. 双基地机载预警雷达空时自适应处理方法[J]. 电子学报, 2001, 29(S1): 1936–1939. DOI: 10.3321/j.issn:0372-2112.2001.z1.051.
- Wei J W, Wang Y L, and Chen J W. Space-time adaptive processing approaches to bistatic airborne early warning radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(S1): 1936–1939. DOI: 10.3321/j.issn:0372-2112.2001.z1.051.
- [64] Pearson F and Borsari G K. Simulation and analysis of adaptive interference suppression for bistatic surveillance radars[C]. Proceedings of the Adaptive Sensor Array Processing Workshop, Lexington, MA, 2001.
- [65] Himed B, Zhang Y H, and Hajjari A. STAP with angle-Doppler compensation for bistatic airborne radar[C]. Proceedings of IEEE Radar Conference, Long Beach, CA, 2002: 311–317.
- [66] Jaffer A and Ho P T. Adaptive angle-Doppler compensation techniques for bistatic STAP radars[R]. AFRL-SN-RS-TR-2005-398, AFRL, 2005.
- [67] Lapierre F D, Verly J G, and Van Droogenbroeck M V. New solutions to the problem of range dependence in bistatic STAP radars[C]. Proceedings of IEEE Radar Conference, Huntsville, AL, USA, 2003: 452–459.
- [68] Lapierre F D and Verly J G. Registration-based solutions to the range-dependence problem in radar STAP[C]. Proceedings of the 11th Adaptive Sensor Array Processing Workshop, Lexington, MA, 2003: 1–6.
- [69] Xie W C, Zhang B H, Wang Y L, *et al.* Range ambiguity clutter suppression for bistatic STAP radar[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2013, 2013(75): 1–13. DOI: 10.1186/1687-6180-2013-13.
- [70] Friedlander B. The MVDR beamformer for circular arrays[C]. Proceedings of the 34th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 2000: 25–29.
- [71] Varadarajan V and Krolik J L. Joint space-time interpolation for distorted linear and bistatic array geometries[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 56(3): 848–860.
- [72] 彭晓瑞, 谢文冲, 王永良. 一种基于空时内插的双基地机载雷达杂波抑制方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(7): 1697–1702. DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00975.
- Peng X R, Xie W C, and Wang Y L. Improved joint space-time interpolation technique for bistatic airborne radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(7): 1697–1702. DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00975.
- [73] Zatman M. Circular array STAP[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2): 510–517. DOI: 10.1109/7.845235.
- [74] 王万林. 非均匀环境下的相控阵机载雷达STAP研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2004.
- Wang W L. Study on STAP for phased array airborne radar in nonhomogeneous environment[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2004.
- [75] Lim C H and Mulgrew B. Prediction of inverse covariance matrix (PICM) sequences for STAP[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2006, 13(4): 236–239. DOI: 10.1109/LSP.2005.863654.
- [76] Lim C H, See C M S, and Mulgrew B. Non-linear prediction of inverse covariance matrix for STAP[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Honolulu, HI, 2007: II-921–II-924.
- [77] 高飞, 谢文冲, 王永良. 非均匀杂波环境3D-STAP方法研究[J]. 电子学报, 2009, 37(4): 868–872. DOI: 10.3321/j.issn:0372-2112.2009.04.036.

- Gao F, Xie W C, and Wang Y L. Research on 3D-STAP methods in non-stationary clutter[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(4): 868–872. DOI: 10.3321/j.issn:0372-2112.2009.04.036.
- [78] Wang Y L, Duan K Q, and Xie W C. Cross beam STAP for nonstationary clutter suppression in airborne radar[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2013, 2013: 276310. DOI: 10.1155/2013/276310.
- [79] 段克清, 谢文冲, 王永良. 共形阵机载雷达杂波非平稳特性及抑制方法研究[J]. *中国科学: 信息科学*, 2011, 54(10): 2170–2177.
Duan K Q, Xie W C, and Wang Y L. Nonstationary clutter suppression for airborne conformal array radar[J]. *Science China Information Sciences*, 2011, 54(10): 2170–2177.
- [80] 谢文冲, 王永良. 基于CMT技术的非正侧面阵机载雷达杂波抑制方法研究[J]. *电子学报*, 2007, 35(3): 441–444. DOI: 10.3321/j.issn:0372-2112.2007.03.011.
Xie W C and Wang Y L. Study on clutter suppression approach to airborne phased radar with non-sidelooking arrays based on CMT[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(3): 441–444. DOI: 10.3321/j.issn:0372-2112.2007.03.011.
- [81] Kelly E J. An adaptive detection algorithm[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1986, AES-22(2): 115–127. DOI: 10.1109/TAES.1986.310745.
- [82] Robey F C, Fuhrmann D R, Kelly E J, et al. A CFAR adaptive matched filter detector[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1992, 28(1): 208–216. DOI: 10.1109/7.135446.
- [83] Chen W S and Reed I S. A new CFAR detection test for radar[J]. *Digital Signal Processing*, 1991, 1(4): 198–214. DOI: 10.1016/1051-2004(91)90113-Y.
- [84] Maio A D. Rao test for adaptive detection in Gaussian interference with unknown covariance matrix[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(7): 3577–3584. DOI: 10.1109/TSP.2007.894238.
- [85] Maio A D. A new derivation of the adaptive matched filter[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2004, 11(10): 792–793. DOI: 10.1109/LSP.2004.835464.
- [86] Raghavan R S, Qiu H F, and McLaughlin D J. CFAR detection in clutter with unknown correlation properties[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1995, 31(2): 647–657. DOI: 10.1109/7.381913.
- [87] Kraut S and Scharf L L. The CFAR adaptive subspace detector is a scale-invariant GLRT[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1999, 47(9): 2538–2541. DOI: 10.1109/78.782198.
- [88] Kraut S, Scharf L L, and McWhorter L T. Adaptive subspace detectors[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, 49(1): 1–16. DOI: 10.1109/78.890324.
- [89] 王永良, 刘维建, 谢文冲, 等. 机载雷达空时自适应检测方法研究进展[J]. *雷达学报*, 2014, 3(2): 201–207. DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.13081.
Wang Y L, Liu W J, Xie W C, et al. Research progress of space-time adaptive detection for airborne radar[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(2): 201–207. DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.13081.
- [90] Liu W J, Xie W C, and Wang Y L. Parametric detector in the situation of mismatched signals[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2014, 8(1): 48–53.
- [91] 刘维建, 常晋聃, 李鸿, 等. 干扰背景下机载雷达广义似然比检测方法[J]. *雷达科学与技术*, 2014, 12(3): 267–272. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2337.2014.03.008.
Liu W J, Chang J D, Li H, et al. Generalized likelihood ratio test for airborne radar in the presence of jamming[J]. *Radar Science and Technology*, 2014, 12(3): 267–272. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2337.2014.03.008.
- [92] 刘维建, 谢文冲, 王永良. 部分均匀环境中存在干扰时机载雷达广义似然比检测[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(8): 1820–1826. DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01492.
Liu W J, Xie W C, and Wang Y L. Generalized likelihood ratio test for airborne radar with jamming in partially homogeneous environment[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(8): 1820–1826. DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01492.
- [93] Liu W J, Xie W C, Liu J, et al. Adaptive double subspace signal detection in Gaussian background-part I: Homogeneous environments[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(9): 2345–2357. DOI: 10.1109/TSP.2014.2309556.
- [94] Liu W J, Xie W C, Liu J, et al. Adaptive double subspace signal detection in Gaussian background-part II: Partially homogeneous environments[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(9): 2358–2369. DOI: 10.1109/TSP.2014.2309553.
- [95] Liu W J, Xie W C, Liu J, et al. Detection of a distributed target with direction uncertainty[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2014, 8(9): 1177–1183.
- [96] Liu W J, Xie W C, and Wang Y L. Rao and Wald tests for distributed targets detection with unknown signal steering[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2013, 20(11): 1086–1089. DOI: 10.1109/LSP.2013.2277371.
- [97] Liu W J, Xie W C, Li R F, et al. Adaptive detectors in the Krylov subspace[J]. *Science China Information Sciences*, 2014, 57(10): 102310–102311.
- [98] Wang Y L, Liu W J, Xie W C, et al. Reduced-rank space-time adaptive detection for airborne radar[J]. *Science China Information Sciences*, 2014, 57(8): 82310–82311.
- [99] Jao J K, Yegulalp A F, and Ayasli S. Unified synthetic aperture space time adaptive radar (USASTAR)

concept[R]. No. NTI-4, Lexington, MA: MIT Lincoln Laboratory, 2004.

- [100] 常玉林. 多通道低频超宽带SAR/GMTI系统长相干积累STAP技术研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2009.

Chang Y L. Coherent-processing-interval STAP techniques for low frequency multi-channel ultra-wide band

SAR/GMTI system[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2009.

- [101] 刘春静. 空时自适应处理进展概述[J]. 雷达与探测技术动态, 2012, (129): 1-6.

Liu C J. Progress in space time adaptive processing[J]. *Journal of Radar & Detection Technology*, 2012, (129): 1-6.

作者简介



谢文冲(1978-), 男, 山西万荣人, 2006年获国防科技大学信号与信息处理专业博士学位, 现为空军预警学院雷达兵器运用工程军队重点实验室副教授。获国家技术发明二等奖和军队科技进步一等奖各1项(排名2、4), 授权国防发明专利

25项, 获软件著作权1项, 在IEEE Trans. SP、IET RSN、SP和中国科学等期刊与会议上发表论文100余篇(SCI收录29篇)。IEEE会员, 中国电子学会青年科学家俱乐部会员, 空军高层次科技人才, 武汉市优秀科技工作者。研究方向包括空时自适应处理、机载雷达信号处理和雷达目标检测等。



段克清(1981-), 男, 河北石家庄人, 2010年获国防科技大学信号与信息处理专业博士学位, 现为空军预警学院雷达兵器运用工程军队重点实验室讲师。在Signal Processing、中国科学和电子学报等期刊与会议上发表论文40余篇。研

究方向包括空时自适应处理、机载雷达信号处理等。



王永良(1965-), 男, 浙江嘉兴人, 中国科学院院士, 空军预警学院教授、博士生导师。主要研究方向包括空时自适应处理、雷达信号处理和阵列信号处理等。