

高距离分辨率雷达目标检测研究现状与进展

简 涛, 何 友, 苏 峰, 曲长文, 顾新锋

(海军航空工程学院信息融合技术研究所, 烟台 264001)

摘 要: 高距离分辨率雷达目标回波表现为距离扩展目标的形式, 距离扩展目标检测技术是目前雷达信号处理领域的一个热门和难点问题。本文对这一技术的发展过程、研究现状及最新研究进展进行了较为全面的综述, 主要从高斯背景、部分均匀环境及非高斯背景出发, 对这一技术进行了介绍。最后对距离扩展目标检测方法做了总结, 并对有待进一步研究和完善的问题进行了展望。

关键词: 高距离分辨率雷达; 目标检测; 高斯背景; 部分均匀环境; 非高斯背景

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2010)12-2623-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.12.001

Overview of High Range Resolution Radar Target Detection

JIAN Tao, HE You, SU Feng, QU Chang-wen, GU Xin-feng

(Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The high range resolution radar echo is modeled as a range-spread target. Moreover, the range-spread target detection is a difficult and crucial problem in the radar signal processing community. The status and development of this problem are reviewed and summarized in terms of Gaussian background, partially homogeneous environment and non-Gaussian background. Finally, the future direction of research and development is viewed.

Key words: High range resolution radar; Target detection; Gaussian background; Partially homogeneous environment; Non-Gaussian background

0 引 言

常规窄带雷达一般采用宽脉冲, 距离分辨率很低, 一般目标的散射回波信号只占据一个距离分辨单元, 呈现为“点”目标^[1], 且目标各散射中心回波在时域上的重叠造成目标的角闪烁和雷达散射截面起伏, 使检测性能下降。随着科技的不断进步, 人们对雷达探测目标提出了更高的要求, 不仅希望可以探测到感兴趣目标的有无, 而且还希望能够对目标进行成像并且判别目标的类别属性^[2]。高距离分辨率(High Range Resolution, HRR)雷达由于采用了脉冲压缩或者频率捷变技术, 使得雷达发射信号具有很大的时宽带宽积, 从而获得了距离高分辨的能力。HRR雷达距离分辨率可达亚米级, 一般目

标的回波分布在不同的径向距离单元中, 呈现为“一维距离像”, 形成了“距离扩展目标”^[3]。

HRR雷达目标回波分布在多个径向距离单元上, 若仍采用常规低分辨率雷达点目标的检测方法进行目标检测, 一方面, 距离扩展目标强散射中心的能量会泄漏到邻近距离单元中形成“信号污染”现象, 导致检测性能大大下降; 另一方面, 由于点目标检测方法不能充分利用分布在多个距离单元中目标回波的全部能量, 这不但不能体现高分辨率雷达的优势, 反而会降低对距离扩展目标的检测性能。可见, 传统低分辨率雷达点目标检测方法对HRR雷达距离扩展目标不再适用。解决复杂背景下距离扩展目标的检测问题将使HRR雷达获得高于常规低分辨率雷达的检测性能, 充分发挥HRR雷达大带宽和

收稿日期: 2009-09-20; 修回日期: 2010-10-05

基金项目: 国家自然科学基金(60672140); 教育部新世纪优秀人才支持计划(05-0912); 海军航空工程学院青年科研基金(HYQN201013)

高距离分辨率的优势,对探测隐身和低空目标具有重要的实用价值。国内外学者针对不同的杂波背景,在已有的点目标检测技术基础上,对距离扩展目标检测进行了深入广泛的研究。

1 HRR 雷达目标检测研究进展

对距离扩展目标检测问题的理论阐述最早可以追溯到 1971 年, Van Trees 教授在其专著中首先提出了这一问题,并初步论述了 HRR 雷达距离扩展目标的回波统计特性^[4]。几乎同时,荷兰学者 Gerard 在高斯白噪声背景下研究了利用单脉冲检测 Swerling II 型距离扩展目标的问题^[5]。随后美国海军研究实验室的 Hughes 提出沿目标所占据的距离分辨单元进行非相干积累的检测方法^[6]。而 Farina 等人通过对雷达目标模型和环境模型的分析^[7],从匹配发射和匹配接收的角度,提出了高分辨率雷达的一般设计准则和最优接收机的结构^[8]。自二十世纪九十年代中期以来,对距离扩展目标的检测引起雷达界越来越多的关注,出现了大量的研究文献。以意大利著名雷达专家 Farina、Conte、De Maio 和美国海军研究实验室的 Gerlach 等为代表,学者们对距离扩展目标检测问题进行了深入的研究,早期从高斯背景入手,随着对高分辨率雷达杂波的深入认识^[9],逐渐扩展到非高斯背景^[10]。

1.1 高斯背景下 HRR 雷达目标检测方法

高斯背景下 HRR 雷达目标的检测研究开展较早。1997 年,美国的 Gerlach 等学者在高斯白噪声环境下,基于广义似然比检验 (Generalized Likelihood Ratio Test, GLRT) 理论,推导了一种依赖于散射点空域分布密度的距离扩展目标检测器^[11],而在高斯背景的采样协方差矩阵可能奇异时, Gerlach 又给出了一种修正的 GLRT (MGLRT, modified GLRT) 检测方案^[12]。紧接着,在同时考虑接收机白噪声和高斯杂波的情况下, Gerlach 给出了具有有界恒虚警率 (Constant False Alarm Rate, CFAR) 特性的自适应快速收敛检测方案^[13]。在协方差矩阵未知的高斯噪声中,意大利学者 De Maio 设计了极化域自适应 MGLRT 检测器^[14]。而考虑到高斯干扰背景下目标信号失配的情况, De Maio 等人又提出了一种正交抑制 (Orthogonal Rejection, OR) - MGLRT 检测器,并利用 MGLRT 和 OR - MGLRT 的双门限检测结构,

在检测性能和抑制性能之间获得了很好的折中范围^[15]。

国内学者从 1994 年开始探讨高斯背景下的 HRR 雷达距离扩展目标检测问题^[16],并指出距离扩展目标检测可以比拟为低分辨率雷达的多脉冲检测。文献[17]采用相关滤波方法,获得了比普通低分辨率雷达约 10dB 的信噪比改善。进一步,文献[18]介绍了 HRR 雷达接收机的实现技术途径,给出了五种距离扩展目标检测器的可能实现思路,并没有对各种检测器进行较为详细的性能分析。文献[19]研究了 HRR 雷达单脉冲回波的信号检测问题,多脉冲的情况有待进一步研究。利用目标一维距离像,文献[20]提出了一种自适应距离单元积累检测方法,利用不同径向单元内的强散射中心能量进行横向积累。而文献[21]则先从目标距离像中提取散射中心,获得其空域分布密度,再进行 GLRT 检测。在文献[16]的基础上,文献[22]将距离扩展目标回波看成时域可分的具有随机参量的脉冲串信号,提出了单次回波的随机参量脉冲串检测方法。结合经典的极大、最小等 CFAR 处理技术^[1],文献[23]研究了高斯背景下距离扩展目标的非参量双门限检测方法。

另外,以一维距离像为基础,国内学者对高斯背景下极化域距离扩展目标的检测问题进行了积极的探索^[24-29]。文献[24-25]针对毫米波高分辨率雷达体制,通过寻求最佳极化配置,充分利用目标和杂波极化散射特性之间的差异,提出了基于极化域非线性加权积累的距离扩展目标检测方法。串联检测器将极化白化滤波器输出的一组不相关的一维距离像非相参的相加,得到了一幅质量改善的距离像,进一步检测目标的散射中心,检测性能有明显的提高^[26]。而文献[28]基于 Stokes 矢量 Frobenius 范数,提出了一种非参数的距离扩展目标检测方法,有效地改善了检测性能。

1.2 部分均匀环境下 HRR 雷达目标检测方法

除了经典的均匀高斯背景,学者们还考虑了主数据和辅助数据具有相同协方差矩阵结构和不同功率水平的部分均匀环境。Conte 等学者用辅助数据来估计未知的高斯杂波协方差矩阵,分别在均匀背景和部分均匀背景下,给出了具有 CFAR 能力的检测方案^[30],首先假设检测单元的主通道数据的协方

差矩阵已知,对未知的信号幅度和噪声功率水平用最大似然估计代替,推导出 GLRT 检验统计量,然后用参考单元的辅助数据获得采样协方差矩阵,并代替主数据中的未知协方差矩阵,最终获得了广义自适应匹配滤波检测器。文献[31]将结构化的干扰用自回归高斯过程建模,采用基于模型的检测方法,在均匀背景和非均匀背景下分别设计了四种距离扩展目标检测器。另外,文献[32]研究了部分均匀背景下距离扩展目标的自适应检测问题,但计算复杂度高,难以实时实现。在均匀和部分均匀高斯背景下,文献[33]研究了多秩距离扩展目标的自适应检测问题,采用 GLRT 检验理论,分别推导了“一步法”检测器和“两步法”检测器。

1.3 非高斯背景下 HRR 雷达目标检测方法

在 HRR 雷达体制下,由于距离分辨率的提高,出现在距离分辨单元中的杂波散射点数目急剧减少,中心极限定理所需的条件不再满足,HRR 雷达杂波分布的概率密度函数呈现出非对称、“尖峰”、“长拖尾”等一系列非高斯的特征^[34]。研究非高斯杂波背景下距离扩展目标的检测问题,对于 HRR 雷达性能分析和新体制雷达的设计等方面均具有较强的现实意义。

1997 年,Conte 等学者利用杂波图 CFAR 处理技术,初步探讨了两类典型的非高斯杂波背景下距离扩展目标的检测问题,但文中依然遵循点目标的检测思路,未能充分利用目标所有的散射点能量^[35-36]。Gerlach 采用球不变随机过程对非高斯杂波建模,推导了不依赖于散射点密度的广义似然比检测器(Non-Scatterer Density Dependent GLRT, NS-DD-GLRT)和基于散射点密度的广义似然比检测器(Scatterer Density Dependent GLRT, SDD-GLRT),但二者均不是自适应的^[37]。由于 SDD-GLRT 是统计平均意义下的最优检测器,为了提高检测性能,文献[38]对 SDD-GLRT 进行修正,充分利用可能含有目标散射点的距离单元形成检测统计量,有效提高了检测性能。在相邻距离单元间复合高斯杂波的纹理分量可能相关的假设下,Conte 等学者利用杂波分组的思想,基于 GLRT 理论设计出具有 CFAR 能力的检测器^[39],但考虑的杂波背景过于特殊。进一步地,Conte 将 Rao 检验和 Wald 检验应用到复合高斯杂波背景下的距离扩展目标检测中,利用杂波分组

的思想,得到了自适应 Rao 检测器和自适应 Wald 检测器^[40],对 χ^2 起伏目标的仿真结果表明,自适应 Wald 检测器的性能要明显优于自适应 Rao 检测器。在复合高斯杂波背景下,文献[41]利用多极化通道数据自适应检测距离扩展目标,分别设计了自适应极化 GLRT 检测器和自适应极化 Wald 检测器;当背景环境高度非均匀时,对自适应极化检测器进行了修正。由于存在目标散射点的距离单元幅值明显高于纯杂波单元的幅值,文献[42]利用有序统计检测理论探讨了距离扩展目标检测问题,有效提高了检测性能。国内学者对非高斯背景下距离扩展目标检测的研究较少,其中文献[43]在相关非高斯杂波背景下,评估了利用单元平均和有序统计两种 CFAR 方案检测距离扩展目标的可能性。

1.4 其它 HRR 雷达目标检测方法

另外,学者们还利用现代信号处理和智能信号处理方法对距离扩展目标检测进行了有益的探索。其中,文献[44]借鉴人脑视觉信息处理的冗余性原理,提出了基于强散射点位置相关的非参数双门限检测方案。基于目标一维距离像特征,文献[45]初步探讨了利用分形理论检测距离扩展目标的可能性。另外,文献[46]应用模糊集合理论,研究了电子干扰环境下检测海面舰船距离扩展目标的问题,提出了四类基于模糊集合相似性测度的模糊匹配滤波方法。而利用目标一维距离像和纯杂波在变换域中的不同特性,文献[3]研究了基于目标距离像波形的距离扩展目标检测方法,获得了较好的效果。

2 结论与展望

总的来看,对于 HRR 雷达距离扩展目标检测研究,国外学者主要针对雷达回波复信号进行检测器设计;而国内学者主要从目标一维距离像出发,进行相应的目标检测研究。另外,随着研究的深入,背景分布从高斯到非均匀环境,最后到非高斯分布,但研究的目标形式较单一,考虑目标状态还不够充分,该领域仍存在以下需要解决的问题:

(1) HRR 雷达多秩目标检测方法

在距离扩展目标回波模型方面,针对秩 1 信号的距离扩展目标检测研究较多,对更为一般的多秩距离扩展目标检测研究较少^[33],尤其是非高斯杂波背景下多秩距离扩展目标的检测研究还有待开展。

(2) HRR 雷达运动目标检测方法

当目标高速运动时,经脉压处理后的回波包络会在不同的脉冲重复周期之间发生走动,由于 HRR 雷达的距离分辨单元很小,这种“包络走动”现象会比普通的低分辨率雷达更加严重,进一步增加了运动距离扩展目标检测的难度。部分学者针对一维距离像信号模型进行了一定的研究^[47],但是在利用原始复信号的运动距离扩展目标相参积累检测方面^[48]有待进一步研究。

(3) HRR 雷达弱目标检测方法

与普通低分辨率雷达相比,HRR 雷达在检测弱目标方面具有先天的优势,因此需要深入分析弱目标的 HRR 雷达回波信号在时域、频域、时频域^[49]、空域、极化域和其它变换域^[50]中的特点,研究有效的 HRR 雷达弱目标检测手段。

(4) HRR 雷达自适应目标检测方法

前期多数的研究工作是基于已知背景功率水平或协方差矩阵的假设下进行的,目前关于距离扩展目标的自适应检测问题已逐步展开^[15,33]。一方面可以利用不含目标信号的辅助数据进行背景估计^[51];另外,可以考虑无需辅助数据的距离扩展目标自适应检测方法^[12]。

(5) 适用于实际应用的 HRR 雷达目标检测方法

当实际中目标或杂波模型与理想条件的模型不一致时,就会出现模型“失配”的问题^[52]。点目标的“失配”检测问题得到了较好的解决,但是距离扩展目标的失配检测问题由于其难度较大,至今研究进展不大^[53]。另外,目前大多数距离扩展目标检测方法比较复杂,计算量较大,无法满足工程中的实时性要求,因此,研究简化算法或计算复杂度较低的高效算法也有着重要的现实意义。

需要说明的是,上述问题在本质上是相互关联和相互交叉的,一个方面的研究进展必将影响和推动其它方面的研究。随着雷达技术的发展,HRR 雷达目标检测技术将得到更广泛的应用。

参 考 文 献

[1] 何友,关键,彭应宁,等. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京:清华大学出版社,1999.
 [2] 保铮,刑孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
 [3] 顾新锋,简涛,何友,等. 一种基于波形的距离扩展目标检

测方法[J]. 海军航空工程学院学报,2008,23(6):659-661,668. [Gu Xin-feng, Jian Tao, He You, et al. A detector based on waveform for range-spread targets[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2008, 23(6): 659-661, 668.]

- [4] Van Trees H L. Detection, estimation and modulation theory. vol. III: Radar/sonar signal processing and gaussian signals in noise[M]. New York: John Wiley, 1971.
 [5] Gerard A V D S. Detection of a distributed target[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1971, 7(5): 922-931.
 [6] Hughes II P K. A high resolution radar detection strategy[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1983, 19(5): 663-667.
 [7] Farina A, Studer F A. Detection with high resolution radar: great promise, big challenge[J]. Microwave Journal, 1991, 5: 263-273.
 [8] Farina A, Studer F A. Detection with high resolution radar: Advanced topics and potential applications[J]. Chinese Journal of Systems Engineering and Electronics, 1992, 14(1): 32-34.
 [9] Conte E, De Maio A, Galdi C. Statistical analysis of real clutter at different range resolutions[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(3): 903-918.
 [10] 简涛,何友,苏峰,等. 一种新的非高斯杂波下自适应雷达目标检测方法[J]. 航空学报,2010,31(3):579-586. [Jian Tao, He You, Su Feng, et al. A novel adaptive radar target detector for non-Gaussian clutter[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(3): 579-586.]
 [11] Gerlach K, Steiner M J, Lin F C. Detection of a spatially distributed target in white noise[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1997, 4(7): 198-200.
 [12] Gerlach K, Steiner M J. Adaptive detection of range distributed Targets[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(7): 1844-1851.
 [13] Gerlach K, Steiner M J. Fast converging adaptive detection of Doppler-shifted range-distributed targets[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000; 48(9): 2686-2690.
 [14] De Maio A. Polarimetric adaptive detection of range-distributed targets[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(9):2152-2159.
 [15] Maio A D, Farina A, Gerlach K. Adaptive detection of range spread targets with orthogonal rejection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(2): 738-752.
 [16] 孙以平,陆林根. 距离扩展目标检测的研究[J]. 系统工程与电子技术, 1994, 8: 36-45. [Sun Yi-ping, Lu Lin-gen. Detection of range spread target[J]. Systems Engineering and Electronics, 1994, 8: 36-45.]
 [17] 陆林根. 高距离分辨雷达用相关滤波提高目标检测性能[J]. 系统工程与电子技术, 1995, 9: 57-61. [Lu Lin-gen.

- The method of improvement detection performance with high-range-resolution radar-correlation filter[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1995, 9: 57-61.]
- [18] 陆林根. 高分辨雷达的目标自动检测器[J]. *电子科学学刊*, 1997, 19(2): 195-201. [Lu Lin-gen. Automatic target detector for high resolution radar[J]. *Journal of Electronics*, 1997, 19(2): 195-201.]
- [19] 陆林根. 高距离分辨(HRR)雷达单个目标回波信号检测[J]. *系统工程与电子技术*, 1999, 21(9): 22-25. [Lu Lin-gen. Signal detection of mono-pulse backscatter of HRR radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1999, 21(9): 22-25.]
- [20] 孙文峰, 何松华, 郭桂蓉, 等. 自适应距离单元积累检测法及其应用[J]. *电子学报*, 1999, 27(2): 111-112, 123. [Sun Wen-feng, He Song-hua, Guo Gui-rong, et al. Adaptive range-cell integrated detection method with application[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(2): 111-112, 123.]
- [21] 黎海涛, 徐继麟. 基于广义似然比的高分辨率雷达目标检测[J]. *系统工程与电子技术*, 2000, 22(11): 5-7. [Li Hai-tao, Xu Ji-lin. Detection of high range resolution radar target based on generalized likelihood ratio[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2000, 22(11): 5-7.]
- [22] 杨建宇, 李俊生. 高分辨率雷达目标的随机参量脉冲串检测方法[J]. *电子学报*, 2004, 32(6): 1044-1046. [Yang Jian-yu, Li Jun-sheng. Random parameters pulse train detector for high range resolution radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(6): 1044-1046.]
- [23] 孟祥伟, 曲东才, 何友. 高斯背景下距离扩展目标的恒虚警检测[J]. *系统工程与电子技术*, 2005, 27(6): 1012-1015. [Meng Xiang-wei, Qu Dong-cai, He You. CFAR detection for range-extended target in Gaussian background[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(6): 1012-1015.]
- [24] 李永祯, 王雪松, 肖顺平, 等. 基于非线性积累的高分辨率极化目标检测[J]. *红外与毫米波学报*, 2000, 19(4): 307-312. [Li Yong-zhen, Wang Xue-song, Xiao Shun-ping, et al. High-resolution of polarization target detection based on nonlinear integration[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2000, 19(4): 307-312.]
- [25] 王雪松, 李永祯, 徐振海, 等. 高分辨雷达信号极化检测研究[J]. *电子学报*, 2000, 28(12): 16-18. [Wang Xue-song, Li Yong-zhen, Xu Zhen-hai, et al. Study on high resolution radar signal polarization detection[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(12): 16-18.]
- [26] 徐振海, 王雪松, 汪连栋, 等. 基于 PWF 融合的高分辨率极化雷达目标检测算法[J]. *电子学报*, 2001, 29(12): 1620-1622. [Xu Zhen-hai, Wang Xue-song, Zhou Ying, et al. Study on high resolution polarization radar target detection algorithm based on PWF[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(12): 1620-1622.]
- [27] 李永祯, 王雪松, 徐振海, 等. 基于强散射点径向积累的高分辨率极化目标检测研究[J]. *电子学报*, 2001, 29(3): 307-310. [Li Yong-zhen, Wang Xue-song, Xu Zhen-hai, et al. Study on high-resolution polarization target detection based on intense scatterer range integration[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(3): 307-310.]
- [28] 曹学军, 李永祯, 姜文利, 等. 一种改进的高分辨率极化目标检测算法[J]. *电子与信息学报*, 2002, 24(7): 930-934. [Cao Xue-jun, Li Yong-zhen, Jiang Wen-li, et al. An improved method for high-resolution polarization target detection[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2002, 24(7): 930-934.]
- [29] 曾勇虎, 王雪松, 肖顺平, 等. 基于时频联合域极化滤波的高分辨率极化雷达信号检测[J]. *电子学报*, 2005, 33(3): 524-526. [Zeng Yong-hu, Wang Xue-song, Xiao Shun-ping, et al. High-resolution polarimetric radar signal detection based on polarization filtering in time-frequency domain[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(3): 524-526.]
- [30] Conte E, De Maio A, Ricci. GLRT-based adaptive detection algorithms for range-spread targets[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, 49(7): 1336-1348.
- [31] Alfano G, De Maio A, Farina A. Model-based adaptive detection of range-spread targets[J]. *IEE Proceedings, Radar, Sonar, Navigation*, 2004, 151(1): 2-10.
- [32] Ricci G, Scarf L L. Adaptive radar detection of extended Gaussian targets[R]. OMB Technical Report, 2004: 0704-0188.
- [33] Bandiera F, De Maio A, Greco A S, et al. Adaptive radar detection of distributed targets in homogeneous and partially homogeneous noise plus subspace interference[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(4): 1223-1237.
- [34] 简涛, 何友, 苏峰, 等. 非高斯杂波协方差矩阵估计新方法[J]. *宇航学报*, 2010, 31(2): 495-501. [Jian Tao, He You, Su Feng, et al. A novel covariance matrix estimator for non-Gaussian clutter[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(2): 495-501.]
- [35] Conte E, Lops M. Clutter-map CFAR detection for range-spread targets in non-Gaussian clutter. Part I: System design[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, 33(2): 432-443.
- [36] Conte E, Lops M. Clutter-map CFAR detection for range-spread targets in non-Gaussian clutter. Part II: Performance assessment[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, 33(2): 444-455.
- [37] Gerlach K. Spatially distributed targets detection in non-Gaussian Clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 926-934.
- [38] 简涛, 何友, 苏峰, 等. 非高斯杂波下修正的 SDD-GLRT 距离扩展目标检测器[J]. *电子学报*, 2009, 37(12): 2662-2667. [Jian Tao, He You, Su Feng, et al. Modified SDD-GLRT

- detector for range-spread targets in non-Gaussian clutter[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(12): 2662 - 2667.]
- [39] Conte E, De Maio A, Ricci G. CFAR detection of distributed targets in non-Gaussian disturbance[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 612 - 621.
- [40] Conte E, De Maio A. Distributed target detection in compound-Gaussian noise with Rao and Wald tests[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(2): 568 - 582.
- [41] Alfano G, De Maio A, Conte E. Polarization diversity detection of distributed targets in compound-Gaussian clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40(2): 755 - 765.
- [42] He Y, Jian T, Su F, et al. Novel range-spread target detectors in non-Gaussian clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(3): 1312 - 1328.
- [43] 唐劲松. 高分辨雷达目标检测与识别[D]. 南京理工大学博士论文, 1996. [Tang Jin-song. Detection and recognition of high resolution radar targets[D]. Nanjing: Doctoral Dissertation of Nanjing University of Science & Technology, 1996.]
- [44] 黄德双, 韩月秋. 基于位置相关的高分辨雷达目标检测方法[J]. *电子科学学刊*, 1997, 19(5): 585 - 590. [Huang De-shuang, Han Yue-qiu. A detection method of high resolution radar targets based on position correlation[J]. *Journal of Electronics*, 1997, 19(5): 585 - 590.]
- [45] He Y, Gu X F, Jian T, et al. A detector based on fractal for range extended targets[C]. *ICSP 2008 Proceedings*, Beijing, China, October 26 - 29, 2008.
- [46] 赵群, 保铮, 张守宏. 强杂波干扰背景下高分辨雷达信号的模糊检测[J]. *系统工程与电子技术*, 1995: 15 - 24. [Zhao Qun, Bao Zheng, Zhang Shou-hong. Fuzzy detection of signals of high-resolution radar in high clutter environments[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1995: 15 - 24.]
- [47] 孙文峰, 何松华, 郭桂蓉, 等. 强杂波背景中高距离分辨率雷达运动目标的积累检测[J]. *电子学报*, 1998, 26(12): 12 - 15. [Sun Wen-feng, He Song-hua, Guo Gui-rong, et al. Integration detection of maneuvering target in strong clutter background with high range resolution radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1998, 26(12): 12 - 15.]
- [48] Liu G Q, LI J. Moving target detection via airborne HRR phased array radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(3): 914 - 924.
- [49] 简涛, 何友, 苏峰, 等. 小波变换在雷达信号检测中的应用[J]. *海军航空工程学院学报*, 2006, 21(1): 121 - 126. [Jian Tao, He You, Su Feng, et al. Overview on radar signal detection with wavelet transform[J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2006, 21(1): 121 - 126.]
- [50] 简涛, 何友, 苏峰, 等. 一种基于小波变换的信号恒虚警率检测方法[J]. *信号处理*, 2006, 22(3): 430 - 433. [Jian Tao, He You, Su Feng, et al. A signal CFAR detection method with wavelet transform[J]. *Signal Processing*, 2006, 22(3): 430 - 433.]
- [51] Jian T, He Y, Su F, et al. Fast converging estimator for covariance matrix structure of compound-Gaussian clutter[J]. *The Chinese Journal of Electronics*, 2010, 19(3): 579 - 582.
- [52] Jian T, He Y, Su F, et al. Covariance matrix estimator in non-Gaussian clutter and the mismatch performance analysis[C]. *IET International Radar Conference 2009*, Guilin, China, April 20 - 22, 2009.
- [53] Jian T, He Y, Su F, et al. Performance characterization of two adaptive range-spread target detectors for unwanted signal[C]. *ICSP 2008 Proceedings*, Beijing, China, October 26 - 29, 2008.

作者简介:简涛(1980 -),男,讲师,研究方向为雷达信号检测与信号处理。

通信地址:山东烟台海军航空工程学院信息融合技术研究所(264001)

电话:(0535)6635695

E-mail:iamjiantao@yahoo.com.cn

(编辑:张宇平)