

基于干涉图的 D-SAR 地面慢动目标检测算法

时公涛 蒋咏梅 高贵 匡纲要

(国防科学技术大学电子科学与工程学院三系遥感信息处理实验室,长沙 410073)

摘要 由于应用于干涉图对地面慢动目标进行检测时表现出巨大的潜力,因此备受国内外 SAR-GMTI 研究者的青睐。在分析和对比了各种基于干涉图的双通道 SAR (D-SAR) 图像域地面慢动目标检测算法的基础上,首先,对现有算法进行了归纳分类;然后,分析比较了每类算法的基本原理,并阐明了他们各自的优缺点;进而结合实验验证,分别从检测率和虚警率、稳健性、可检测速度范围以及抗干扰性等方面做了进一步的对比分析,并全面总结了现有算法的检测性能;最后,结合现有算法存在的不足,指出了下一步的研究方向。

关键词 合成孔径雷达 干涉图 地面慢动目标 检测

中图法分类号: TP391.41 TP751.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-8961(2009)12-2425-13

Performance Analysis of the Slow Ground Moving Target Detecting Algorithms Based on Interferometry in Dual-SAR Images

SHI Gong-tao, JIANG Yong-mei, GAO Gui, KUANG Gang-yao

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract Dual-SAR interferometry shows great potential for detecting the slow ground moving targets. Firstly, according to a performance analysis and comparison of the slow ground moving target detecting algorithms based on interferometry, all the algorithms are divided to three categories. Then, on the basis of analyzing the basic detection theory of each interferometry algorithm, this paper illuminates their advantages and disadvantages. By combining with the simulated results, further analysis and comparison are conducted in terms of detection probability and false alarm probability, the stabilization, the range of detection velocity, anti-jamming. Finally, by summarizing the disadvantages of each interferometry algorithm, this paper indicates the practical use of interferometry for detecting slow ground moving targets.

Keywords synthetic aperture radar, interferometry, slow ground moving targets, detection

1 引言

合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 图像域地面慢动目标检测的研究是当前 SAR 应用的前沿课题,其具有广泛的应用背景和重要的学术价值。到目前为止,已经提出了很多的图像域慢动目标检测算法。其中主要包括单通道的图像分割法、子孔径划分法^[1-4]和双通道的天线相位中心偏

置 (displaced phase center antenna, DPCA) 技术、沿迹干涉 (along track interferometry, ATI) 技术以及基于协方差矩阵特征值分解和变换的一类方法^[5-6]等。相对于其他方法,ATI 技术在获得干涉图后,干涉图幅度和干涉图相位的联合使用表现出巨大的慢动目标检测潜能,被越来越多的机载和星载 SAR 系统所采用,如美国的 JSTARS^[7] 机载系统、Discoverer-2^[8] 和 TechSat21^[9] 星载系统,加拿大的 CV580 SAR^[10] 机载系统、Radarsat-2^[11] 星载系统等。

基金项目:国家自然科学基金项目(60772045)

收稿日期:2008-04-07;改回日期:2008-11-12

第一作者简介:时公涛(1980~),男。现为国防科学技术大学电子科学与工程学院博士研究生。主要从事 SAR-GMTI, SAR 成像处理以及 SAR 图像统计建模等方面的研究。E-mail: shigongtao@sina.com

传统的 ATI 技术仅仅利用干涉图的相位信息,即利用不同通道之间的相位差进行动目标检测,但由于受随机噪声、相位漂移等干扰因素的影响,致使相位检测阈值需要专门处理,而且检测性能也不理想^[12]。随着研究的不断深入,学者们发现,干涉图幅度信息是干涉图相位信息的一个有益补充,用其能够有效地提高动目标的检测性能^[13]。同时,基于 Wishart 分布模型^[14]的假设,结合 Frery 等人把目标检测面临的杂波环境分为均匀区域、不均匀区域、极度不均匀区域 3 类的思想^[15],对干涉图的统计特性也实现了较为完备的描述。从而使基于干涉图的各式各样的动目标检测算法应运而生。本文全面分析和对比了各种基于干涉图的双通道 SAR 图像域地面慢动目标检测算法。在对现有算法进行归类划分的基础上,指出了不同检测算法之间的内在联系,分析了每类算法的基本检测原理,并详细阐述了每种算法的性能优缺点。进而结合实验验证,分别从检测率和虚警率、稳健性、可检测速度范围以及抗干扰性等方面进行了进一步的对比分析,全面总结了各种算法的检测性能。本文的根本目的在于通过总结现有检测算法存在的不足,找出检测性能提高的关键,以指明下一步的研究方向。

2 基于干涉图的检测算法分类

对配准的前向、后向通道 SAR 复图像进行共轭相乘处理即可得到干涉图,其对应于采样协方差矩阵的副对角线元素。干涉图信息的利用,极大地推动了 SAR-GMTI (ground moving target indication) 研究者们对慢动目标检测的研究,现已形成了较为完善的理论体系,并在实际系统中得到了应用。今天,笔者站在历史的制高点上,通过梳理流派纷呈的基于干涉图的双通道 SAR 图像域地面慢动目标检测的文献不难发现,各种检测算法的本质是充分利用动目标和杂波干扰之间的散射特性差异,以干涉图相位信息为基准,结合干涉图幅度信息来实现图像域地面慢动目标的检测。因此,现有的检测算法可归入如下脉络分明、有章可循的几类:(1) 基于干涉图相位的动目标检测算法;(2) 基于干涉图幅度和相位统计特性的一类动目标检测算法;(3) 基于干涉图散布特性的一类动目标检测算法。现有各种检测算法的分类关系如图 1 所示。

图 1 表明,以地面慢动目标的自动、快速、准确检测为最终目的,对干涉图统计特性进行深入分析

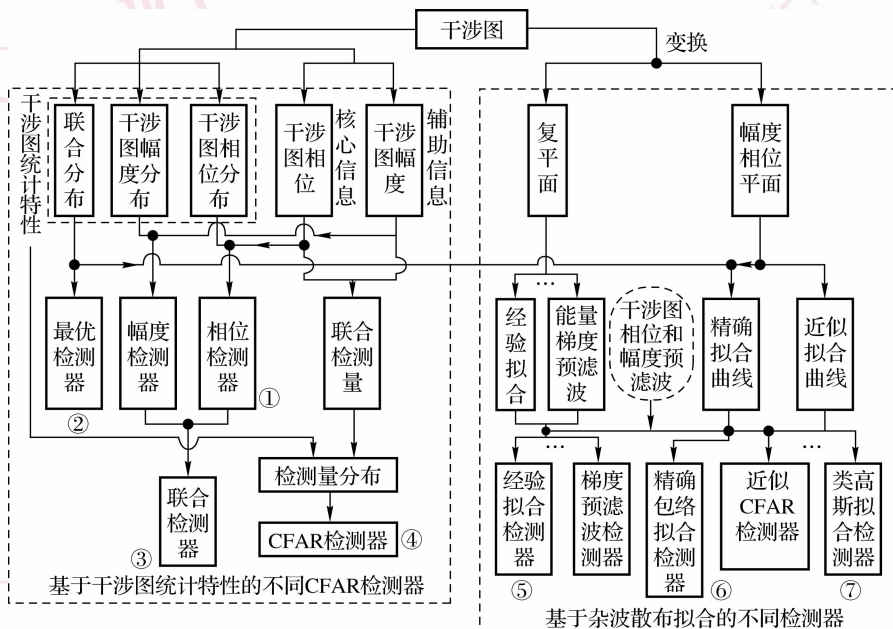


图 1 基于干涉图的检测算法分类

Fig. 1 Classification of the slow ground moving target detection algorithms based on interferometry

是各种基于干涉图信息的检测算法的基础和前提。对于干涉图的统计特性的详细描述可参阅文献 [13] ~ 文献 [21], 在此不再赘述。

3 基于干涉图的动目标检测算法的性能对比分析

在对现有的基于干涉图的双通道 SAR 图像域地面慢动目标检测算法进行分类的基础上, 本文首先通过分析比较不同算法的检测原理和通过梳理清楚不同检测算法之间的内在关系来阐明不同算法的优缺点; 然后结合实验验证, 分别从检测率和虚警率、稳健性、可检测速度范围以及抗干扰性等方面做进一步的对比分析, 全面论证了现有算法的检测性能。

3.1 检测原理对比分析

3.1.1 基于干涉图相位的动目标检测算法

该类检测算法即为传统的 ATI 检测方法。其基本原理是: 静止杂波的干涉图相位为零, 动目标由于其径向速度分量的存在, 导致干涉图相位不为零, 因此利用干涉图相位即可消除静止的地面杂波, 保留动目标。在给定虚警率条件下, 可先利用干涉图相位分布求解得到检测阈值, 进而实现动目标的恒虚警 (constant false alarm rate, CFAR) 检测。

该类检测算法的最大优点在于能够实现简单、快速且自动的目标检测。但是实际检测时, 由于干涉图相位对随机噪声、相位漂移等干扰因素比较敏感, 导致干涉图复图像中与具有较大干涉图相位的像素点对应的不一定是动目标, 换句话说, 一些静止杂波散点也可能具有较大的干涉图相位, 这将造成在保证高检测率的同时, 却会形成大量的杂波虚警, 使检测性能严重下降。

3.1.2 基于干涉图幅度和相位统计特性的一类动目标检测算法

由于仅仅利用干涉图相位进行慢动目标检测的性能不佳, 故检测性能的提高需另辟蹊径。随着研究的不断深入, 研究者们发现, 干涉图幅度是干涉图相位的一个有益补充。干涉图幅度和相位信息的联合使用, 不仅能够有效缓解干扰因素对检测性能的影响, 同时可通过扩展动目标的检测速度范围, 使检测性能得到较大幅度的提高。可以说, 干涉图相位和幅度的联合使用, 对于实现图像域地面慢动目标的检测具有举足轻重的地位。

(1) 基于干涉图幅度和相位联合分布的 CFAR 检测算法: 因该检测算法是基于干涉图的双通道 SAR 图像域慢动目标 CFAR 检测算法中最优的一种, 故在图 1 中称为“最优检测器”。其基本原理是: 给定虚警率 P_{fa} (下角标 fa 代表 false alarm), 由干涉图幅度 η 、相位 ψ 的联合分布即可确定幅度-相位曲线门限 $\chi(\psi)$ [22], 即

$$P_{fa} = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{\chi(\psi)}^{\infty} p(\eta, \psi) d\eta d\psi \quad (1)$$

利用幅度-相位曲线门限 $\chi(\psi)$ 即可精确地去除杂波, 并可以低的虚警率、高的检测率实现动目标的检测。

然而, 由于理论上的幅度-相位曲线门限 $\chi(\psi)$ 的解析表达式几乎无法求得, 这严重阻碍了该类算法的应用, 因此, 基于干涉图幅度和相位统计特性的这类检测算法中的其他方法都是避开幅度-相位曲线门限的求解, 只能实现次优的动目标检测。不同的折中处理虽可解决一方面的问题, 但同时又存在一定的缺陷。

(2) 基于干涉图幅度和相位边缘分布的联合 CFAR 检测算法: 该算法巧妙地避开了利用干涉图幅度、相位联合分布来求解幅度-相位曲线门限这个具有挑战性的难题, 而是通过获取干涉图幅度和相位各自的边缘分布来实现图像域慢动目标的 CFAR 检测 [13]。其基本思路是: 在推导得到均匀区域、不均匀区域以及极度不均匀区域等不同杂波环境下的干涉图幅度、相位的边缘分布后, 再分别设定干涉图幅度虚警率和干涉图相位虚警率, 并根据文献 [13]、文献 [17]、文献 [18]、文献 [21]、文献 [23] ~ 文献 [25] 中的方法, 在完成参数估计的同时, 由干涉图幅度和相位的各自边缘概率密度函数求解出对应的干涉图幅度门限、相位门限; 然后遍历干涉图中的每一个像素点, 并将该像素点的幅度和相位分别与幅度门限、相位门限作比较, 若两者均大于门限值, 则判定该像素点为动目标点, 其他情况均视为杂波像素点, 依此即可实现动目标的 CFAR 检测。

但是, 一是由于该算法利用的是干涉图幅度、干涉图相位两个独立的 1 维滤波处理, 不能求得最优化的检测概率 P_D ; 二是由于未考虑干涉图幅度和干涉图相位之间的依赖关系, 换句话说, 干涉图幅度的检测门限应该随着干涉图相位的变化而不同, 因此在较低的虚警率条件下, 该算法容易导致径向速度较小的动目标的漏检, 造成检测性能的下降。此外,

对于极度不均匀区域的杂波场景的干涉图幅度、相位的统计特性还有待进一步完善,以实现对于极度不均匀区域的杂波直方图进行更高精度的拟合。

(3) 基于干涉图幅度和相位联合检测量的 CFAR 检测算法:基于干涉图幅度、相位联合分布和各自边缘分布的检测算法中,检测阈值的解析获取是一个共有的复杂难题,需要借助于数值计算。围绕着目标检测算法的核心问题——“寻找并利用目标信号和杂波干扰之间的散射特性差异,以达到增强信号或抑制杂波和提高信杂比(signal to clutter ratio, SCR)”的目的。通过联合干涉图幅度和相位信息,不仅可构造出新的动目标检测量,而且由该检测量可以简单、快速地实现动目标的精确检测。例如在文献[26]中,在用邻域平均代替多视平均的基础上,提出了以下一种标准化的干涉图幅度 ξ 和相位 ψ 联合的检测量:

$$\zeta = \xi \cdot (1 - \cos\psi) = \xi \cdot \vartheta \quad (2)$$

在检测量 ζ 图像中,对于与动目标对应的像素点,其不但具有较大的 ϑ 值,同时也有较大的干涉图幅度 ξ 值,其表现在检测量 ζ 图像中为更加显著的值;与静止目标对应的像素点,虽然其干涉图幅度 ξ 值较大,但对应的 ϑ 值却相对较小,其在检测量 ζ 图像中对应较小的值;与杂波对应的像素点的幅度 ξ , ϑ 值都较小,其对应检测量 ζ 像图中的值更小。

此外,还有很多构造新检测量的方法,比如用干涉图幅度和相位直接相乘构造的检测量,也可以获得不错的杂波抑制效果。文献[27]提出的利用协方差矩阵的副对角线元素幅度差检测量进行动目标检测的方法,本质上也是一种利用干涉图幅度和相位构造动目标检测量的有效方式。不过该类算法最大的问题在于,在干涉图统计特性的基础上推导动目标检测量的概率分布具有较大的挑战性。当前,迫切需要寻求一种形式简单,且其统计描述易于获取,检测性能又高的新检测量,这不但具有理论意义,更有重要的实际需求。

3.1.3 基于干涉图散布特性的一类动目标检测算法

把复干涉图变换到复平面(横轴对应实部、纵轴对应虚部)或幅度-相位平面(横轴对应干涉图相位、纵轴对应干涉图幅度)后,再分析干涉图像素点在不同平面上的散布特点,即可通过寻找能够精确拟合杂波像素点的包络曲线,再以此曲线作为检测门限来实现图像域地面慢动目标的精确检测。

(1) 基于复平面散布特点的检测算法:在这类算法中,具有代表性的算法是文献[9]提出的经验拟合法,在把干涉图变换到复平面后,由于地面杂波的干涉图通常沿虚轴对称,因此可采用一种经验拟合的方式来求解包络检测曲线。其基本实现思路为:先将干涉图的实部数据等间隔划分为 N 个区间 $x_i (i=1, \dots, N)$, 然后画出与每一区间对应的虚部直方图。可近似认为与实部各区间对应的虚部直方图服从高斯分布,然后求出各部分分布的统计参数,并根据需要的虚警率,计算各部分相应的虚部值。其中虚警率与虚部值的关系如下:

$$P_{fa} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \int_{y_i}^{+\infty} \exp\left(-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dy \quad (3)$$

其中, y_i 为虚部值, μ 为均值, σ 为标准差。此时, P_{fa} 就是与正态分布上的 α 分位点对应的概率值。求出对应实部各区间的虚部值 $y_i (i=1, \dots, N)$ 后,即可得到一组 $\{(x_i, y_i) | i=1, \dots, N\}$ 点数据集,然后以此就可拟合出一条曲线 $x = F(y)$, 该曲线就是包络检测函数,最后即可以此曲线作为检测门限来滤除杂波来实现动目标的 CFAR 检测(图 1 中称为“经验拟合检测器”)。

由于该算法的检测性能受实部划分间隔大小的影响,间隔的过大或过小都会造成拟合精度的下降,从而给检测性能造成较大影响。此外,由于随机噪声、相位漂移等干扰因素的影响,造成复平面中的地杂波像素点与动目标像素点的区分度较差,加之包络检测函数对地杂波的拟合精度不高,因而导致该算法在高的检测率条件下会产生大量的杂波虚警。为了抑制随机噪声、相位漂移等干扰因素的影响,文献[28]通过做一次关于能量梯度的预滤波来滤除干涉图相位中相位失效的点,从而降低了动目标检测的虚警率。

(2) 基于幅度-相位平面散布特点的检测算法:相对于将干涉图变换到复平面,把干涉图变换到幅度-相位平面后,与地杂波对应的像素点和与动目标对应的像素点在该平面中的区分度明显增大,其原因在于:对于感兴趣的地面慢速运动目标,如坦克、装甲车、步兵战车、军用卡车等,由于径向速度的存在,其干涉图中的对应像素点具有较大的相位值;同时由于它们与静止目标一样,较之自然杂波背景具有更强的雷达波散射,在经过匹配滤波后,它们在图像中都表现为一些相对较少、整体相对比较亮的“异常点”,因此动目标在干涉图中对应的像素点也

具有较大的幅度值。而对于杂波散点,由于受相位漂移、噪声等因素的影响,使得他们对应的像素点具有较大的干涉图相位,但其干涉图幅度却较小;对于与静止目标对应的像素点,由于它们的干涉图幅度较大,而干涉图相位却较小,因此在幅度-相位平面中,可利用动目标像素点对应于干涉图中的像素点同时具有较大的幅度值和相位值的特点来实现高检测率、低虚警率的动目标检测。

基于上述思路,文献[22]、文献[29]提出了各自的

处理方式:在文献[22]中,用 $P_{fa} \approx \frac{\sum_{x_i \in \mathbf{R}} \text{count}(x_i)}{\sum_{x_i \in \mathbf{S}} \text{count}(x_i)}$ (其

中, $\text{count}(x_i)$ 表示门 x_i 内点的个数; \mathbf{R} 表示小于等于阈值,但不为零的门的集合; \mathbf{S} 表示所有门的集合) 来代替式(1), 实现了基于干涉图幅度-相位平面散布特点的动目标 CFAR 检测;而文献[29]则是先通过选取门中具有最大干涉图幅度的像素点,然后利用高斯函数进行近似拟合来实现动目标的 CFAR 检测。但是,上述两种方法的近似处理精度较差,从而导致检测性能不佳。为此,文献[21]提出了一种能够精确提取地杂波包络曲线的方法,并利用该曲线作为检测门限来实现高性能的动目标检测(在图 1 中称为“精确包络拟合检测器”)。该算法的思想是:以不同杂波环境下的干涉图幅度、相位的联合分布为基础,结合全局干涉图幅度的自动筛选,通过杂波干涉图在幅度-相位图中零相顶点的确定来获得包络检测曲线,该曲线能够把杂波像素点精确地包含在里面,而动目标像素点则在具有较大的干涉图相位的同时,又具有较大的干涉图幅度,其在幅度-相位图中表现为“奇异散点”,分布在包络检测曲线之外。因此,利用此条曲线作为检测门限,就能够精确地去除杂波点和保留动目标点。另外,为了去除由相位漂移、噪声等因素引起的具有较大干涉图相位的静止杂波异常点,可依托干涉图幅度预滤波来完成;而设置干涉图相位预滤波的目的则是为了滤除具有较小相位和较大幅度的静止目标像素点。

该算法由于充分考虑了干涉图幅度、相位之间的依赖关系,因此能够精确地滤除杂波和检测出动目标。与其他算法相比,该算法表现出更强的稳健性和不同杂波环境的适用性,其不仅扩展了动目标的可检测速度范围,而且对低对比度的动目标也具有较高的检测性能。然而,由于该算法中的干涉图幅度和相位的联合分布包含高斯超几何函数,从而

造成运算复杂度的增加,且有时存在数值不稳定性问题;而且由于无法求解包络检测曲线的解析表达式,因而更侧重于理论意义。为了实现基于幅度-相位图的自动检测,可利用类高斯曲线来近似拟合地杂波的幅度-相位图^[30](图 1 中称为“类高斯拟合检测器”)。但是由于类高斯曲线的拖尾衰减较快,对于强杂波环境的拟合精度较差,而且对于干涉图相位较小区域存在过拟合现象,因此造成该算法的检测性能较低。

3.2 检测性能对比分析

为了进一步对基于干涉图的不同检测算法进行深入的对比分析,本文通过仿真实验验证,分别从检测率和虚警率、稳健性、可检测速度范围、抗干扰性等方面对每类算法中具有代表性的方法的性能进行了比较、分析。系统仿真参数设置如表 1,表 2 所示。仿真了 3 个具有不同径向速度的运动目标和一个静止目标,他们在图像中的位置如表 3 所示。仿真的前向通道 SAR 图像如图 2(a)所示,其中动目标 1,2,3 的 SCR 依次为 4.05 dB,4.25 dB 和 4.32 dB,静止目标的 SCR 为 5.10dB,杂噪比 (clutter to noise ratio, CNR) 为 1.25 dB。

表 1 系统参数设置

Tab. 1 The GMTI simulation system parameters

系统参数			
雷达工作距离 (m)	4 000.0	发射脉冲宽度 (μs)	1.0
载机飞行速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	76.0	发射信号带宽 (MHz)	180.0
波长 (m)	0.03	发射信号中心频率 (GHz)	10.0
脉冲重复频率 (Hz)	182.0	A/D 采样率 (MHz)	216.0
两孔径的距离 (m)	3.34	工作模式	正侧视
合成孔径时间 (s)	3.157 9	天线尺寸 (方位 \times 距离(m))	1.5 \times 1.0

表 2 地面场景参数设置

Tab. 2 The spatial resolution and the size of terrain

地面场景参数			
场景图像大小 (pixels)	574 \times 518	距离向分辨率加权因子	1.2
方位向分辨率加权因子	1.2	距离向分辨率 (m)	1.0
方位向分辨率 (m)	1.0	杂波	Rayleigh 分布杂波

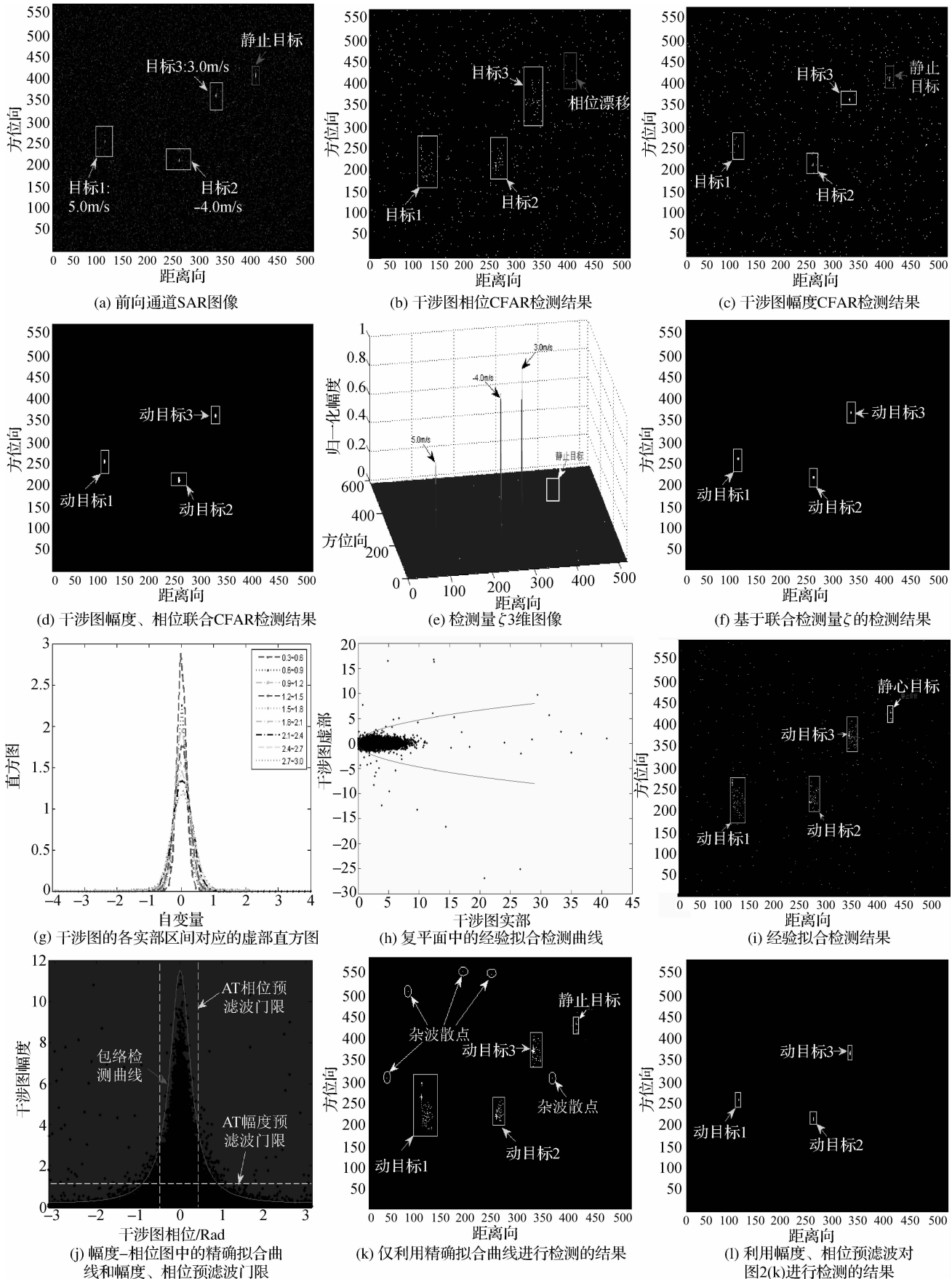


图 2 基于干涉图的不同检测算法的检测结果

Fig. 2 Detection results of the different algorithms for slow ground moving targets based on interferometry

表 3 目标参数设置

Tab. 3 The parameters of four targets

目标参数	动目标 1	动目标 2	动目标 3	静止目标
径向速度 (m · s ⁻¹)	5.0	-4.0	3.0	0
距离向位置 (pixels)	103	251	324	403
方位向位置 (pixels)	254	211	360	410

3.2.1 检测率和虚警率

给定干涉图相位的虚警率 $P_{fa}^{\psi} = 0.0066$, 即可求解得到检测门限 $T_{\psi} = 1.2$, 对干涉图相位进行检测的结果如图 2(b) 所示。给定干涉图幅度的虚警率 $P_{fa}^{\xi} = 0.0060$, 获得幅度检测门限 $T_{\xi} = 0.62$, 其检测结果如图 2(c) 所示, 进而可得到干涉图幅度、相位联合 CFAR 的检测结果(如图 2(d) 所示)。图中清楚地表明: 仅利用干涉图相位进行动目标检测时, 与动目标对应的像素点虽然被检测出来, 但由于此时大量的静止杂波散点未被滤除, 从而形成虚警。产生虚警的原因是: 一方面, 由随机噪声造成, 因为配准的前向、后向通道的 SAR 复图像是同一场景在不同时刻拍摄的两幅图像, 所以造成两通道图像之间存在相干斑起伏噪声, 同时每个通道又都存在加性接收机热噪声, 由于随机噪声的存在, 致使在产生去相关的同时, 也会使干涉图相位产生一定的随机

性, 呈现出不规律的变化, 此时某些杂波散点可能会有较大的干涉图相位; 另一方面, 由相位漂移的影响所致, 其表现为动目标像素点周围有大量的杂波虚警, 因为强散射点, 尤其是动目标作为强散射点时, 对周围静止杂波像素点的污染会非常严重, 从而造成大量杂波像素点的干涉图相位增大。当用干涉图幅度、相位联合进行检测时, 动目标像素点可全部被检测出来, 且图 2(b) 中的杂波散点被有效滤除, 使虚警率大幅下降。这表明干涉图幅度是干涉图相位的一个有益补充, 能够有效地提高检测率和降低虚警率。

利用干涉图幅度和相位联合检测量进行动目标检测的结果如图 2(e)、图 2(f) 所示。由图 2(e) 可直观地看到, 在检测量 ζ 图像中, 杂波和噪声得到显著抑制, 动目标像素点被突显出来。在此基础上, 可简单、精确地检测出动目标(如图 2(f) 所示)。这说明该类检测算法可在保证高检测率的同时, 还能够保持较低的虚警率。

干涉图变换到复平面后, 其实部区间划分、拟合各实部区间对应的虚部直方图的正态分布的参数估计值以及在虚警率 $P_{fa} = 10^{-4}$ 条件下对应的虚部值 $y_i (i = 1, \dots, 9)$ 如表 4 所示, 图 2(g) 为各区间对应的虚部直方图。根据所求的虚部值 $y_i (i = 1, \dots, 9)$ 值

表 4 标准化的干涉图的实部区间划分、参数估计值及对应的虚部值

Tab. 4 Division of the interferometry's real part, the estimation values of parameters μ and σ , and the corresponding imagery parts

实部区间	0.3 ~ 0.6	0.6 ~ 0.9	0.9 ~ 1.2	1.2 ~ 1.5	1.5 ~ 1.8	1.8 ~ 2.1	2.1 ~ 2.4	2.4 ~ 2.7	2.7 ~ 3.0
均值	0.007 7	0.011 1	0.015 8	0.022 7	0.026 4	0.029 0	0.037 7	0.037 4	0.041 6
标准差	0.143 1	0.183 5	0.210 5	0.239 4	0.263 7	0.290 0	0.304 2	0.346 6	0.365 4
虚部值	0.543 7	0.697 1	0.800 0	0.909 7	1.001 9	1.101 9	1.156 1	1.317 2	1.388 5

和它们对应的实部区间 $x_i (i = 1, \dots, 9)$, 采用最小误差准则进行曲线拟合的结果为 $x = 0.4523 |y|^2$ (如图 2(h) 所示), 图 2(i) 为利用拟合曲线进行检测的结果。检测结果表明, 由于受随机噪声和相位漂移等干扰因素的影响, 造成一些静止杂波散点的干涉图相位增幅较大, 致使它们散布在复平面的低幅值区域, 且位于拟合曲线之外, 形成杂波虚警。另外, 对于静止目标, 其对应的像素点在具有较大的干涉图幅度的同时, 噪声和相位漂移等因素也使得其干涉图相位具有相对较大的值, 也分布在拟合曲线之外。总而言之, 该类算法的检测结果的虚警率较高, 这主要是由于二次曲线对于地杂波干涉图的拟合精度较差所致。从另一个方面讲, 把干涉图变换

到复平面之后, 由于受随机噪声、相位漂移等干扰因素的影响, 与地杂波对应的像素点和动目标像素点的区分度较差, 因此在保证高的检测率的同时, 会产生大量的杂波虚警。

把干涉图变换到幅度-相位平面后, 再基于杂波统计特性获取精确拟合曲线, 其进行动目标检测的结果如图 2(j) ~ 图 2(l) 所示。这些图表明: 仅利用获得的杂波包络检测曲线来对干涉图进行滤波后, 与动目标对应的像素点可全部被检测出, 只有零星的杂波散点, 由于受随机噪声、相位漂移等因素的影响而未被滤除。若结合干涉图幅度和相位预滤波, 则 3 个动目标均可被精确地检测出, 杂波全部被滤除, 从而实现了高检测率、低虚警率的地面慢动目标检测。

3.2.2 稳健性对比

由于不同地物背景的散射特性差异较大,通常把目标检测面临的杂波环境分为均匀区域、不均匀区域、极度不均匀区域 3 大类,对于不同类型的杂波环境,不但干涉图的统计特性描述不同,而且更为重要的是,对于感兴趣的慢速运动目标在 SAR 图像中的 SCR 差别很大,这给检测算法带来较大考验,因此,一种算法能否在不同的杂波环境下都能以高检测率、低虚警率实现动目标的精确检测,并表现出较强的稳健性,是衡量该算法优劣的重要指标。为此,本文利用乘积模型仿真了幅度服从 G^0 分布^[15] 的强杂波,把 4 个目标(参数设置同表 3)植入 G^0 杂波中,如图 3(a)所示,3 个动目标的 SCR 依次为 -0.44 dB, -0.42 dB, -0.36 dB,静止目标的 SCR 为 -0.25 dB, CNR 为 2.12 dB。

对于基于干涉图相位的检测算法、复平面经验拟合算法以及幅度-相位平面类高斯拟合算法,它们即使在均匀区域的检测性能都不理想(如图 2(b)、图 2(i)所示),而且为了保证检测率,还会造成较高

的杂波虚警率;在强杂波环境下,由于拟合精度更差,从而导致检测性能更加恶化。经过反复实验验证表明,在各种杂波环境条件下,这 3 种算法的检测性能都不佳,表明他们受杂波环境类型、SCR 的影响较大,稳健性较差。

图 3 给出了极度不均匀杂波环境下,基于干涉图幅度分布、相位分布联合的 CFAR 检测算法的检测结果(如图 3(b)所示)、干涉图幅度和相位联合检测量 ζ 图像中动目标 1,2,3 所在处的方位剖面图(如图 3(c)所示)以及幅度-相位平面精确拟合检测算法的检测结果(如图 3(d)~图 3(f)所示)。由图 3 可见,3 种算法仍都能够有效精确地检测出 3 个动目标,且虚警率较低。这说明这 3 种检测算法受杂波环境类型、SCR 的影响不大,都具有较强的稳健性。详细来说,图 3(b)是在相同的幅度、相位恒虚警率下的检测结果,由于杂波强度的明显增大,基于干涉图幅度的 CFAR 算法的检测结果中虚警点显著增加,而基于干涉图相位的 CFAR 算法的检测结果变化较大之处是动目标周围的杂波散点的个数减

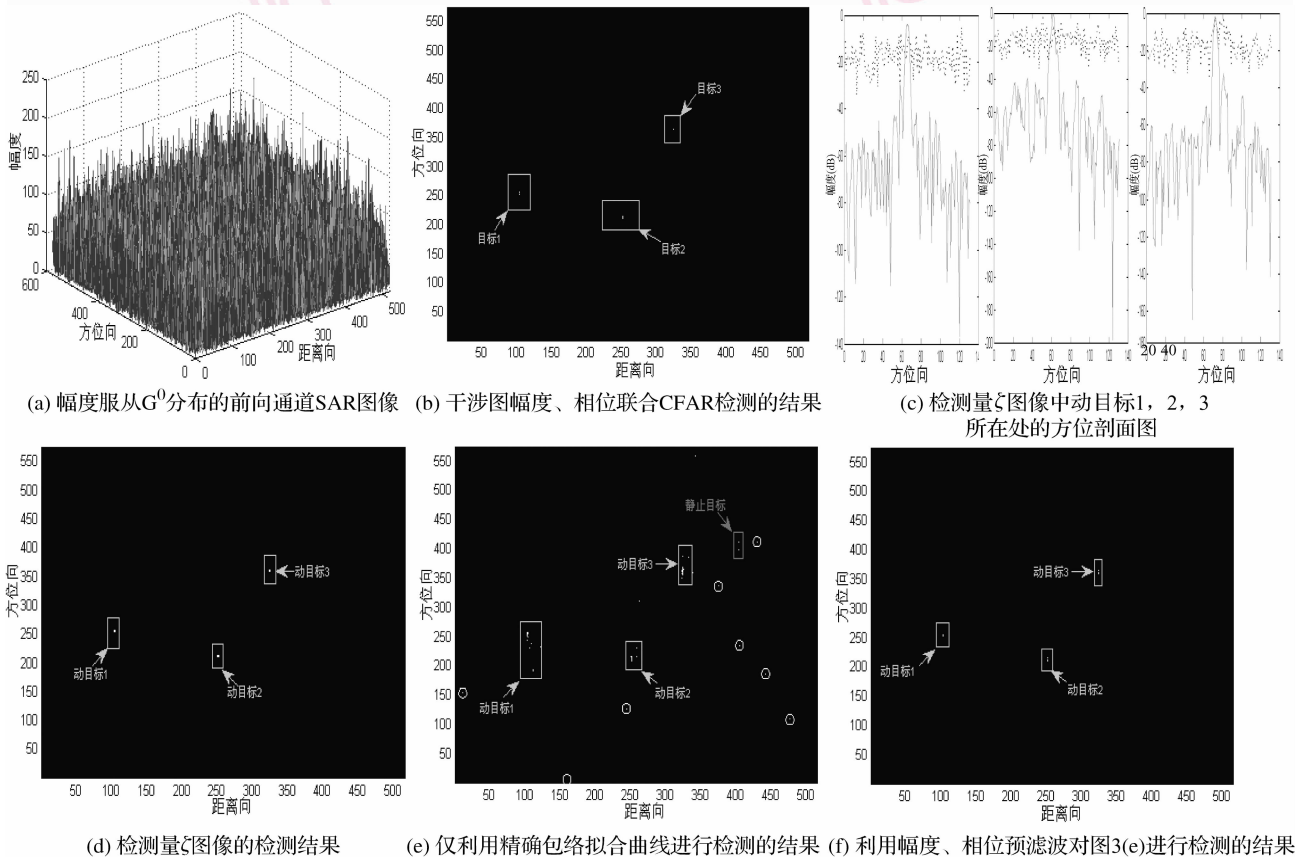


图 3 强杂波环境下不同算法的检测结果

Fig. 3 The detection results of different algorithms used in the conditions with high degrees of heterogeneity

少,其原因是由于相位漂移得到较大程度抑制,因此图 3(b)与图 2(d)相比,图 3 更有利于动目标的精确定位;从图 3(c)可直观看得到(点线表示 SAR 幅度图像,实线表示检测量 ζ 图像),杂波抑制前,动目标完全被杂波淹没,根本无法检测;而变换到检测量 ζ 图像中后,径向速度为 5.0 m/s 的动目标 1 的峰值幅度比杂波和噪声的峰值幅度高出 35 dB 左右,径向速度为 -4.0 m/s 的动目标 2 的峰值幅度比杂波和噪声的峰值幅度高出 40 dB 左右,径向速度为 3.0 m/s 的动目标 3 的峰值幅度竟比杂波和噪声的峰值幅度高出 50 dB 左右,这表明 SCR 得到大幅提高,从而能够

简单准确地检测出动目标;对比图 3(e)与图 2(k)不难发现,杂波增强以后,虚警点数反而减少,这主要是由于随机噪声、相位漂移等干扰因素的影响得到相对抑制的缘故,所以能使检测性能得以提高。

3.2.3 可检测速度范围对比

进行不同检测速度的检测结果对比时,参数设置把动目标 2 的径向速度由 -4.0 m/s 调整为 -0.3 m/s,而把动目标 3 的径向速度由 3.0 m/s 调整为 20.0 m/s,其他参数保持不变。3 种具有较高检测性能的检测算法的检测结果如图 4 所示。不难得出:

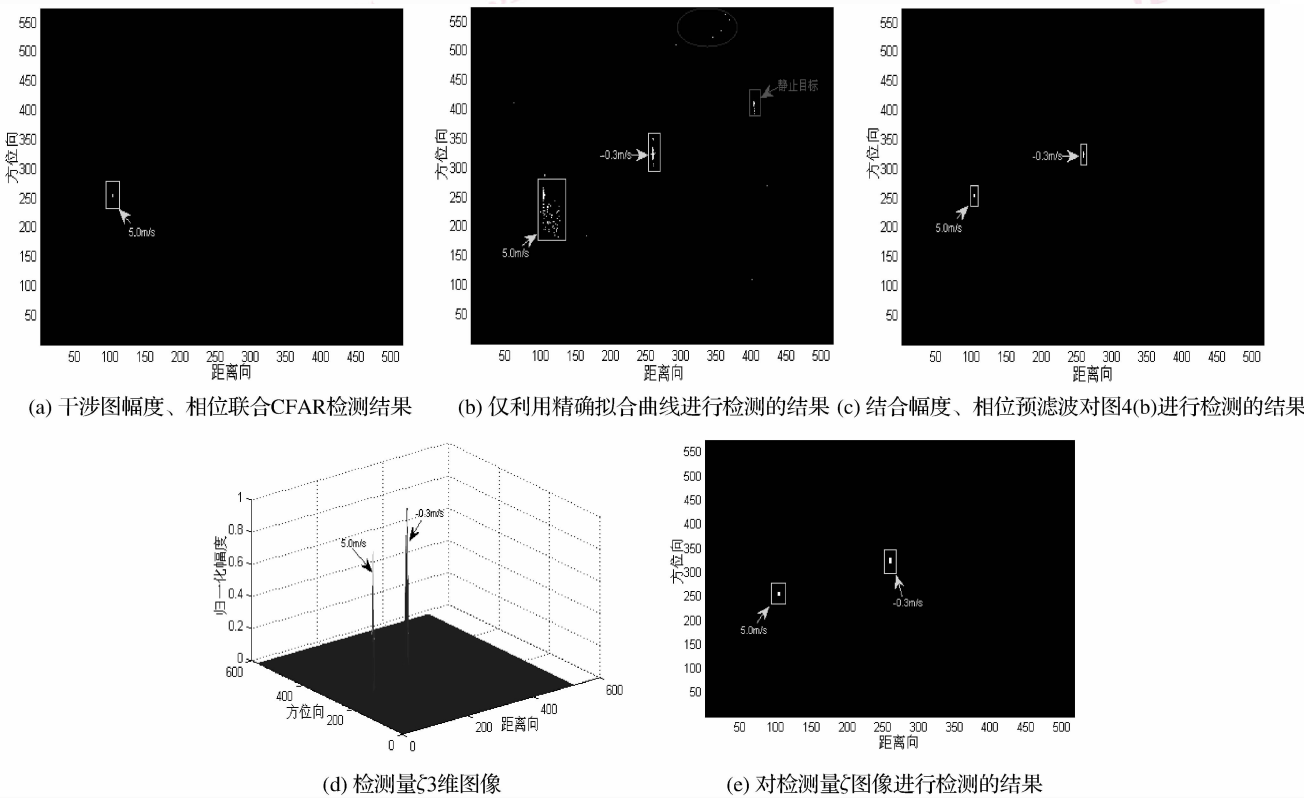


图 4 动目标的速度改变后的不同算法的检测结果

Fig. 4 The detection results of different algorithms along with the velocity of the moving target 2 varied from -4.0 m/s to -0.3 m/s and the velocity of the moving target 3 varied from 3.0 m/s to 20.0 m/s

(1) 3 种算法都没有检测出径向速度为 20.0 m/s 的动目标 3,即造成漏检。其原因在于此目标的运动速度过快,当利用静止目标的匹配滤波器对其进行压缩成像时,发生了严重的散焦,甚至消失所致。换句话说,由于动目标 3 已经不具备复图像域动目标检测的先决条件——清晰成像,因此基于图像域的多通道动目标检测算法检测该目标时都会失效。不过,

对于进行快速运动目标检测的算法已经非常成熟,如利用简单的频域滤波法^[5]即可;

(2) 基于干涉图幅度分布、相位分布联合的 CFAR 检测算法对速度为 -0.3 m/s 的动目标 2 也产生漏检,而幅度-相位平面精确拟合检测算法和基于干涉图幅度和相位联合检测量的算法却都能精确地检测出此径向速度较小的目标。基于干涉图幅度

分布、相位分布联合的 CFAR 检测算法产生漏检的原因在于,当运动目标的速度过小时,其干涉图相位相应的也会较小,如果为了去除相位发生漂移的杂波像素点,则需要取较大的检测门限,这将使动目标 2 也被滤除。如果要保证目标 2 被检出,则该算法相应的检测门限要降低,但这样又会造成虚警率的大幅提高,致使相应的检测性能下降。而精确拟合检测算法则是基于干涉图幅度和相位的联合信息进行检测,虽然动目标的径向速度过小会导致干涉图相位较小,但由于此时干涉图幅度会较大,致使干涉图中与对应该目标的像素点仍分布在包络检测曲线之外,因此动目标 2 自然会被检测出来;基于干涉图幅度和相位联合检测量的算法也是充分使用了干涉图幅度和相位的联合信息,由于动目标的径向速度过小,在导致干涉图相位较小的同时,干涉图幅度会较大,而且使对应的检测量 ζ 值要比杂波平均幅度大得多,因此动目标 2 能够很容易地被检测出。

综上所述,充分利用干涉图幅度和相位联合信息的检测算法能有效扩展动目标的最小可检测速度,这对于地面慢动目标检测而言具有重要的意义。

3.2.4 抗干扰性对比

利用干涉图来实现双通道 SAR 图像域地面慢动目标检测时,其可利用的主要信息是干涉图相位,而干涉图幅度只是干涉图相位的辅助信息。因此,当两通道之间存在绝对增益误差时,只会造成干涉图幅度具有一定的偏差,不会对动目标检测性能造成较大影响,换句话说,基于干涉图的动目标检测算法对通道 SAR 图像之间的绝对增益误差不敏感。真正对检测性能造成较大影响的是随机噪声、相位漂移等干扰因素,其影响表现如下:

(1) 相位漂移的影响^[28]: 一个点目标在干涉图对应的复平面图中扩展分布在一条直线上,对应于该点目标成像压缩后的主瓣和旁瓣。推而广之,对于干涉图复平面图中的每一个像素点,都是由一簇相位(该相位称之为像素的真实相位)相同的点组成,这一簇点分别对应于相邻像素点的同相旁瓣和该点像素的主瓣。此时,干涉图中的每一个像素点的检测相位,由于受相邻像素的旁瓣影响而偏离真实相位,从而产生相位漂移。其具体表现为:第 1 种情况是当杂波场景雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 恒定或起伏不大时,因为线性调频信

号脉冲压缩后,其峰值旁瓣比的理论值可达到 -13.26 dB,再经过加窗处理后,其值可以达到 -20 dB 以下,故此时可认为相邻像素对中心像素的相位漂移影响不大;第 2 种情况是,若杂波背景中存在强散射静止目标时,则对其周围像素相位漂移的影响就不可以忽略,因为周围杂波的相位被污染后呈现出运动目标的相位特征;第 3 种情况是,如果强散射点为动目标,则周围静止弱杂波的相位污染会更严重,即污染的像素点数更多,在利用干涉图相位进行动目标检测时,还会因造成动目标 ROI (region of interest) 的增大而不利于动目标的精确定位;

(2) 噪声的影响:配准的前向、后向通道的 SAR 复图像是同一场景在不同时刻拍摄的两幅图像,两通道图像之间不仅存在相干斑起伏噪声,同时每个通道又都存在加性接收机热噪声。随机噪声的存在会在产生去相关的同时,也会使各像素点的干涉图相位值产生一定的随机性,呈现出不规律的变化,此时某些杂波散点可能会有较大的干涉图相位值。

正是由于随机噪声、相位漂移等干扰因素会对干涉图相位产生较大影响,因此造成仅利用干涉图相位的一类算法的检测性能不佳,其在保证高检测率的同时,会产生大量的离散杂波虚警点。至于复平面经验拟合算法、幅度-相位平面类高斯拟合算法,除了拟合精度以外,相位干扰因素的影响也是导致检测性能差的重要因素。因此,可以说以上 3 种算法的抗干扰性都较差。虽然随机噪声、相位漂移等干扰因素会造成一些杂波散点具有较大的干涉图相位,但干涉图幅度却较小。由此可见,正是由于基于干涉图幅度和相位分布的联合 CFAR 检测算法,以及基于干涉图幅度和相位联合检测量的算法有效地利用了干涉图的幅度信息,使干扰因素对检测性能的影响大幅降低,因此能够实现高检测率、低虚警率的慢动目标检测。对于幅度-相位平面精确包络拟合检测算法,干扰因素的影响可通过幅度预滤波处理得到有效补偿。可见,这 3 种算法对干扰因素的敏感度较差,具有较强的抗干扰性。

如上所述,对于基于干涉图的双通道 SAR 图像域地面慢动目标检测的各种检测算法而言,由于检测原理的不同、干涉图信息的利用程度和方式的差别,从而造成不同算法的检测性能有较大差别。各类检测算法的详细性能对比如表 5 所示。

表 5 各类检测算法的性能对比汇总

Tab. 5 Performance comparison of the representative slow ground moving target detection algorithms based on interferometry

检测算法		性能				
		检测率和虚警率	稳健性	可检测速度范围	抗干扰性	其他
基于干涉图相位的算法	相位检测器	检测率高的同时,虚警率也高	受杂波环境类型、SCR 影响较大,稳健性较差	高检测率、较低虚警率条件下,可检测速度范围小	差	可实现动目标的 CFAR 检测
	最优检测器	具有最优的检测率和最低的虚警率	高	最大	最强	只停留在理论探讨层面,可作为依托干涉图检测算法的标准
基于干涉图相位和幅度联合的算法	联合检测器	具有高检测率和低虚警率	较高	在高检测率、低虚警率的条件下,可检测速度范围相对较小	较强	可实现慢动目标的 CFAR 检测
	CFAR 检测器	具有高检测率和低虚警率	受杂波环境类型、SCR 的影响不大,稳健性较高	较大	较强	该类算法的 CFAR 检测有待进一步研究
	复平面	经验拟合检测器	检测率高的同时,虚警率也高	较差	在高检测率、较低虚警率的条件下,可检测速度范围小	差
基于干涉图变换的算法	精确包络拟合检测器	具有相对最优的检测率和最低的虚警率	受杂波环境类型、SCR 的影响较小,稳健性高	较大	相对最强	对具有一定伪装的慢动目标有较强的检测能力,但无法实现 CFAR 检测
	幅度-相位平面	类高斯拟合检测器	检测率高的同时,虚警率也高	受杂波环境类型、SCR 的影响较大,稳健性较差	在高检测率、较低虚警率的条件下,可检测速度范围小	较差

4 存在的问题及进一步的研究方向

4.1 存在的问题

地面慢动目标检测是当前 SAR 应用的一个非常前沿的研究课题,受到了各国 SAR 研究者的青睐。近年来,随着研究的不断深入,发现干涉图具有更大的慢动目标检测潜能,因此应该促使该方面的研究得到较大发展,并在实际系统中成功应用。本

文对现有算法进行了 4 个方面的对比评价:(1)检测率和虚警率;(2)稳健性;(3)可检测;速度范围;(4)抗干扰性。另外,算法的自动性也是评价的重要标准之一。

事实上,不论是仅仅利用干涉图的相位信息进行慢动目标检测,还是基于干涉图相位和幅度信息的联合使用,各种检测算法还都存在这样那样的问题。为了便于比较,本节提纲挈领的给出了各类算法存在的问题(如表 6 所示)。

表 6 各类检测算法存在的问题

Tab. 6 Shortcomings of the representative slow ground moving target detection algorithms based on interferometry

检测算法		存在的问题
基于干涉图相位的算法	相位检测器	由于干涉图相位对随机噪声、相位漂移等干扰因素比较敏感,因此往往会在造成保证高检测率的同时,还会产生大量的离散杂波虚警
	最优检测器	幅度-相位曲线门限的解析表达式理论上几乎无法求得,故该算法只停留在理论探讨层面
基于干涉图相位和幅度联合的算法	联合检测器	由于利用的仅是干涉图幅度、干涉图相位两个独立的 1 维滤波处理,没有考虑干涉图幅度的检测门限应该随着干涉图相位的变化而不同,因而造成检测性能的下降
	CFAR 检测器	由于在干涉图统计特性的基础上推导它们的概率分布具有较大的挑战,从而导致到目前为止,无法实现慢动目标的 CFAR 检测
基于干涉图变换的算法	复平面	经验拟合曲线的拟合精度较差,同时由于干扰因素的影响,导致动目标对应的像素点与静止杂波对应的像素点在复平面中的区分度较差,因此造成检测性能不佳
	幅度-相位平面	精确包络拟合检测器 由于干涉图幅度、相位联合分布中包含高斯超几何函数,不仅增加了运算的复杂度,且有时存在数值不稳定性问题;也无法求解包络检测曲线的解析表达式,因而不能实现慢动目标的 CFAR 检测 类高斯拟合检测器 由于类高斯曲线的拖尾衰减较快,其不仅对于强杂波环境下的拟合精度较差,而且对于干涉图相位较小的区域存在过拟合现象,因此造成该算法的检测性能较低

4.2 进一步的研究方向

经过各国学者的共同努力,使得基于干涉图的双通道 SAR 图像域地面慢动目标检测研究已经有了较深的技术沉淀。基于前述的讨论,纵论该领域的发展趋势,就笔者所能判定的而言,如下几方面有待进一步研究:

(1) 干涉图统计特性的研究:对于不均匀区域,尤其是极度不均匀区域,干涉图幅度、相位的统计分布还有待于进一步完善,以提高对杂波数据的拟合精度。同时简化分布函数的描述难度,以避免由于包含高斯超几何函数而带来的数值不稳定性问题;

(2) 寻求更优的干涉图幅度和相位联合检测量:干涉图幅度和相位联合信息的使用是提高检测性能的根本所在,通过分析杂波干涉图幅度随相位变化的趋势,寻求一种形式简单,且其统计特性描述简洁,检测性能又高的新联合检测量来实现基于干涉图的地面慢动目标的 CFAR 检测,这不但具有重要的理论意义,更有迫切的实际需求;

(3) 实现幅度-相位曲线的较精确匹配:基于干涉图幅度和相位的联合分布来求解幅度-相位曲线门限的解析表达式是几乎不可能的,可通过对现有已知函数进行组合、匹配验证,寻找一种能够较精确拟合幅度-相位曲线的分布,以便实现幅度-相位平面拟合算法的自动检测;

(4) 进行提高抗干扰性与定位精度之间的权衡:基于干涉图的慢动目标检测算法,其利用的核心信息是干涉图相位,可是恰恰干涉图相位受随机噪声、相位漂移等干扰因素的影响较大。目前,较为有效的一种算法是邻域平均处理,虽然其操作简单,但能够利用噪声的随机性来有效提高 SNR。同时,由于邻域平均处理能使主瓣的能量扩散到相邻的分辨单元,将导致 SCR 的降低,且目标(包括静止目标和慢速运动目标)作为“强散射点”的条件得以削弱,从而也可有效地抑制相位漂移的发生。但邻域平均却会因造成动目标 ROI 的增大而不利于动目标的精确定位。因此如何在实现抑制干扰因素影响的同时,又不影响定位精度,这对于动目标检测算法性能的提高至关重要。

致 谢 本文得到国防科技大学博士创新基金资助,特此致谢。

参考文献 (References)

- 1 Fienup J R. Detecting moving targets in SAR imagery by focusing [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(3): 794-809.
- 2 Zhu D, Li Y, Zhu Z. A Keystone transform without interpolation for SAR ground moving-target imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing letters, 2007, 4(1): 18-22.
- 3 Zhou F, Wu R, Xing M, et al. Approach for single channel SAR ground moving target imaging and motion parameter estimation [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2007, 1(1): 59-66.
- 4 Li Jing-wen. Detection and Imaging of Moving Targets with Synthetic Aperture Radar (SAR) [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999. [李景文. 合成孔径雷达动目标检测与成像[D]. 北京:北京航空航天大学, 1999.]
- 5 Zheng Ming-jie. Research on Detection and Imaging of Moving Targets with Synthetic Aperture Radar [D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2003. [郑明洁. 合成孔径雷达动目标检测和成像研究[D]. 北京:中国科学院电子学研究所, 2003.]
- 6 Sikaneta I C, Gierull C H. Ground moving target detection for along-track interferometric SAR Data [A]. In: Proceedings of the IEEE Aerospace Conference [C], Big Sky, Montana, USA, 2004: 2227-2235.
- 7 Entzminger J N. JointSTARS and GMTI: Past, present and future [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(2): 748-761.
- 8 Whelan D A. Discoverer II program summary [A]. In: Proceedings of the IEEE International Radar Conference [C], Hyatt Regency, Long Beach, California, USA, 2002: 7-8.
- 9 Steyskal H, Schindler J K, Franchi P, et al. Pattern synthesis for TechSat21-a distributed space-based radar system [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2003, 45(4): 19-25.
- 10 Livingstone C, Sikaneta I, Gierull C H, et al. An airborne SAR experiment to support RADARSAT-2 GMTI [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2002, 28(6): 1-20.
- 11 Livingstone C, Thompson A. The moving object detection experiment on RADARSAT-2 [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2004, 30(3): 355-368.
- 12 Chiu S. Computer simulation of Canada's RADARSAT-2 GMTI [A]. In: Sensor Electronic Technology (SET) of Research Technology Organization (TRO) Symposium [C], Samos, Greece, 2000: 451-458.
- 13 Gierull C H. Statistics of SAR Interferograms with Application to Moving Target Detection [R]. DREO Technical Report TR 2001-045, Defense Research Establishment Ottawa, Department of National Defense, Ottawa, Canada, 2001.
- 14 Goodman N R. Statistical analysis based on a certain multivariate complex gaussian distribution (an introduction) [J]. Annals of Mathematical Statistics, 1963, 34(1): 152-177.
- 15 Frery A C, Muller H J, Yanasse C F, et al. A model for extremely

- heterogeneous clutter [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, **35**(3): 648-659.
- 16 Gierull C H. Statistical analysis of multilook SAR interferograms for CFAR detection of ground moving targets [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, **42**(4): 691-701.
- 17 Gierull C H. Ground moving target parameter estimation for two-channel SAR [J]. IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, 2006, **153**(3): 224-233.
- 18 Abdelfattah R, Nicolas J M. Interferometric SAR coherence magnitude estimation using second kind statistics [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, **44**(7): 1942-1953.
- 19 Lee J S, Hoppel K W, Mango S A, *et al.* Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, **32**(5): 1017-1028.
- 20 Joughin I R, Winebrenner D P, Percival D B. Probability density functions for multilook polarimetric signatures [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, **32**(3): 562-574.
- 21 Shi Gong-tao, Gao Gui, Jiang Yong-mei, *et al.* A novel dual-SAR detection method of the slow ground moving targets based on interferometry [J]. Progress in Natural Science, 2008, **18**(5): 559-572. [时公涛, 高贵, 蒋咏梅等. 基于干涉图的双通道合成孔径雷达地面慢动目标检测新方法[J]. 自然科学进展, 2008, **18**(5): 559-572.]
- 22 Chiu S. SAR along-track interferometry with application to RADARSAT-2 ground moving target indication [A]. In: Proceedings of SPIE Conference on Image and Signal Processing for Remote Sensing [C], Agia Pelagia, Greece, 2003, **4885**: 246-255.
- 23 Touzi R, Lopes A, Bruniquel J, *et al.* Coherence estimation for SAR imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, **37**(1): 135-149.
- 24 Shi Gong-tao, Gao Gui, Zhou Xiao-guang, *et al.* Parameter estimation of the G^0 distribution based on the Mellin transform [J]. Progress in Natural Science, 2009, **19**(6): 677-690. [时公涛, 高贵, 周晓光等. 基于 Mellin 变换的 G^0 分布参数估计方法[J]. 自然科学进展, 2009, **19**(6): 677-690.]
- 25 Gierull C H, Sikaneta I C. Estimating the effective number of looks in interferometric SAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, **40**(8): 1733-1742.
- 26 Shi Gong-tao, Gao Gui, Kuang Gang-yao, *et al.* A Novel dual-SAR detecting method based on joint-metrics of interferogram's magnitude and phase for slow ground moving targets [J]. Signal Processing, 2009, **25**(6): 888-894. [时公涛, 高贵, 匡纲要等. 一种基于多视干涉图幅度和相位联合的双通道 SAR 地面慢动目标检测方法[J]. 信号处理, 2009, **25**(6): 888-894.]
- 27 Gao Fei, Mao Shi-yi, Yuan Yun-neng, *et al.* A new ground moving targets detector in dual-channel SAR images [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, **34**(4): 755-760. [高飞, 毛士艺, 袁运能等. 一种在双通道 SAR 图像域实现地面运动目标检测的方法[J]. 电子学报, 2006, **34**(4): 755-760.]
- 28 Yuan Hao, Zhou Yin-qing, Li Jing-wen. New method of ATI moving targets indication based on amplitude and phase thresholds [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, **33**(2): 169-175. [袁昊, 周荫清, 李景文. 基于幅度和相位联合的 ATI 动目标检测新方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, **33**(2): 169-175.]
- 29 Zeng B, Zhang X, Huang S. An implementation method of adaptive threshold to detect moving targets based on ATI technology [J]. Journal of Electronics, 2007, **24**(6): 787-791.
- 30 Gao Fei, Mao Shi-yi, Yu Zhen-ming, *et al.* Fully automatic detector in SAR-ATI of GMTI [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, **26**(1): 84-88. [高飞, 毛士艺, 玉振明等. 一种全自动的检测方法用于 SAR-ATI 的 GMTI[J]. 航空学报, 2005, **26**(1): 84-88.]