

文章编号: 1000-6893(2005)01-0008-06

一种全自动的检测方法用于 SAR2ATI 的 GMTI

高 飞¹, 毛士艺¹, 玉振明², 袁运能¹

(1. 北京航空航天大学 203 教研室, 北京 100083)

(2. 广西大学梧州分校, 广西 梧州 543002)

Fully Automatic Detector in SAR2ATI of GMTI

GAO Fei¹, MAO Shi2yi¹, YU Zhen2ming², YUAN Yun2neng¹

(1. Faculty 203, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. Wuzhou Branch of Guangxi University, Wuzhou 543002, China)

摘 要: 针对星载 SAR2ATI 处理的中间结果, 提出了一种称为 / 两步- 类高斯拟合 0 完全自适应的检测方法。该方法可以全自动地实现杂波和噪声中的运动目标检测, 避免了传统方法作联合高斯数据的假定, 无须推导 SAR2ATI 干涉图的理论概率密度函数。此外, 该方法还可以大大降低系统的虚警概率并用仿真研究了最小可检测速度。

关键词: 合成孔径雷达; 沿航迹向干涉; 地面运动目标指示; 最小可检测速度; 虚警概率

中图分类号: V243 **文献标识码:** A

Abstract: A fully automatic detector named / Two Step Fitting Gaussian Function 0 aims at processing the output signals from spaceborne synthetic aperture radar (SAR)2along track interferometry (ATI) is proposed. Without the need to assume jointly Gaussian distributed data and derive a theoretical PDF for the interferogram, the new adaptive detection scheme automatically extracts moving targets from stationary clutter and noises. By this method the probability of false alarm P_{fa} is greatly reduced and the minimum detectable velocity (MDV) is investigated.

Key words: synthetic aperture radar; along track interferometry; ground moving target indication; minimum detectable velocity; probability of false alarm

国际上机载 SAR2GMTI 已经付诸实现, 但是星载 GMTI 至今仍处于研制阶段, 尚无实用系统, 这主要因为星载条件下杂波谱更宽、杂波强度更强、地面目标与卫星的速度相差更大, 因此检测难度也更大。星载 GMTI 成为了近年来的研究热点, 如美国和加拿大都在研究包含 SAR2GMTI 模式的星载雷达, 分别称为 Discover II^[1] 和 Radarsat II^[2]。目前, 星载 SAR2GMTI 的主要研究技术包括双通道 DPCA 和 ATI^[2, 3]。

对星载 SAR2ATI 技术的研究发现: 由于杂波和噪声的存在, 直接从 SAR2ATI 处理的中间结果中无法检测出运动目标。这个问题已有学者做了不少的研究。文献[3]利用统计分布的百分位数设置 P_{fa} , 以解析的形式推导检测门限, 文献[4]将多通道 SAR 图像的幅度和相位统计特性的研究成果直接用于 ATI 的运动目标检测; 文献[5]提出极大似然法估计相关性; 文献[6]分析了干涉 SAR 相位统计的参数估计。这些方法的主要缺

陷是: 需要假设两通道的幅度服从联合高斯分布, 这个假定要求成像区域是统计特性相似的粗糙地面, 适合于大面积农用耕地和厚植被区域, 而不适用于统计特性差异较大的区域如城区等。

/ 两步- 类高斯拟合 0 与上述方法的主要区别在于: 不对两通道的图像幅度分布作任何统计假设, 而是直接分析 SAR2ATI 干涉输出信号的幅度相位二维分布规律。研究发现高斯拟合曲线可较好地描述干涉输出信号幅度随相位的变化, 基于这个特性设置适当的高斯拟合幅相门限可以将绝大多数非目标点滤除; 此外, 在高斯拟合幅相门限以外还有一些由于强杂波信号和噪声产生的非目标点, 则分别通过设置相位门限和幅度门限滤除; 作为一个特例, 如果只有杂波没有噪声则采用幅度门限和相位门限两步即可实现运动目标检测。该方法无需推导理论概率密度函数, 是一种简单、实用、自动的适用于任何场景的检测方法, 可以大大降低系统的虚警概率。通过仿真研究了最小可检测速度 (MDV), 证明了这种方法的正确性和有效性。

收稿日期: 2004-02-14; 修订日期: 2004-09-22

1 SAR2ATI 原理

沿航迹向干涉 ATI 最早应用于海洋方面的研究,在机载 SAR 中也获得成功应用,如 JointSTARS 系统、AN/APG276 雷达系统,在星载的项目如 SRTM^[7]、TerraSAR^[8] 以及 RadarSat2II 中也都沿用此技术。类似 DPCA,ATI 至少需要两个天线(也可以是一个公共天线的子孔径),每个天线有专用的接收通道。如果按照基本双通道配置的话,补偿限于 2 个连续的脉冲周期内,有源天线的开关在脉冲之间切换,2 个脉冲由不同的天线发射,而接收是空间同一点,使得脉冲 1 时前向天线的位置和脉冲 2 时拖尾天线的位置相同,接收到固定目标的回波也相同。如果存在运动目标,其径向速度不为零,就会在 2 个脉冲间产生相移,ATI 计算干涉相位,固定目标的相位为零,运动目标的相位不为零,因此利用相位信息差可以检测运动目标,如图 1 中模块 $I_1 I_2^*$ 所示。 I_1 、 I_2 分别表示前向天线和拖尾天线产生的 SAR 图像,* 表示复共轭。

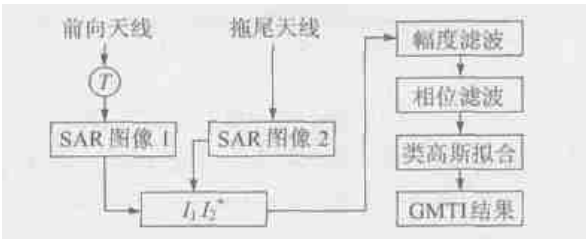


图 1 SAR2ATI 原理以及两步类高斯拟合法流程

Fig1 Principle of SAR2ATI and two step fitting Gaussian function process

双通道的配置可以是理想情况下,2 个天线交替分别发射、接收,也可以构造某一(前向或者拖尾)天线发射,前向天线和拖尾天线同时接收的几何模型。选择交替发射模式时,双程相位中心的距离较双接收模式要大,而且收发开关交替转换给系统设计带来了一定的难度。因此,模型是以整个天线用于发射,即发射天线在前向天线和拖尾天线的中间位置,前向天线和拖尾天线分别用于接收,二者相距 $2vT$ (其中 v 是雷达平台速度, T 是脉冲重复周期),等效相位中心距离为 vT ,这样保证了前向天线接收当前脉冲回波的相位中心位置与拖尾天线接收下一个脉冲回波时相位中心的位置相同。在拖尾天线和延时 T 后的前向天线两个通道上分别完成 SAR 成像处理,ATI 利用两个通道产生的 SAR 图像,计算其干涉相位,用公式表示为^[9]

$$S = I_1 I_2^* = |I_1| |I_2| e^{j(U_1 - U_2)} \quad (1)$$

其中:干涉相位

$$\$U = U_1 - U_2 = 4P \frac{-R_1 + R_2}{K} = 4P \frac{V_r T}{K} \quad (2)$$

S 表示两幅图像的干涉结果; U_1 、 U_2 分别表示前向天线和拖尾天线图像对应像素点的相位; R_1 、 R_2 分别表示前向天线和拖尾天线与目标点的距离; V_r 表示目标斜距方向的径向速度; K 表示波长。

在复平面内作出 I 的每个像素点对应的同相分量和正交分量,两幅图像的相位差显示为偏离正实轴的一个角度,如图 2 所示。固定目标相位为零,显示在实轴上,而运动目标显示在沿着某一径向相位的方向上,干涉相位在上半平面,表示 $\$U > 0$,目标远离雷达平台方向运动。利用式(2)可以求目标的径向速度,考虑到观测的几何关系并代入式(2),目标在地面的速度 V_{tg} 表示为

$$V_{tg} = \frac{V_r}{\sin(H_{nc})} = \frac{K\$U}{4PT \sin(H_{nc})} \quad (3)$$

式中: H_{nc} 表示波束入射角。令 $\$U \in (-P, P]$, 取典型参数 $K=0.103m$ 、 $H_{nc}=0.1387484rad$ 、脉冲重复频率 $f=2000Hz$ 时可求得不模糊的地面速度范围是 $V_{tg} \in (-143km/h, 143km/h)$ 。

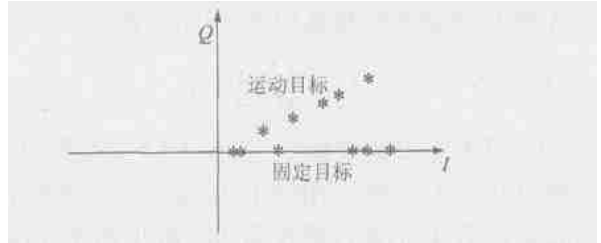


图 2 SAR2ATI 复平面图

Fig2 SAR2ATI result in complex plane

SAR2ATI 涉及的其他问题包括:运动目标检测、速度值估计、相位卷绕、方位位置确定、MDV 等。本文着重讨论在含噪声的非高斯背景杂波中用非解析的方法检测运动目标以及 MDV 的研究。

2 两步滤波法实现杂波中运动目标检测

图 2 显示的 SAR2ATI 复平面图是一种理想情况,实际情况中用匹配固定场景的滤波器进行成像时运动目标会有方位上的位置偏移,偏移位置处固定杂波的存在会使运动目标在 SAR2ATI 输出的复平面上表现为一些弥散的点,而非分布在沿着理想径向直线上,如图 3 所示。此外,杂波也并非都在正实轴上,而是在正实轴附近的一些点,具体表现为幅度较小的点相位起伏大,幅度较

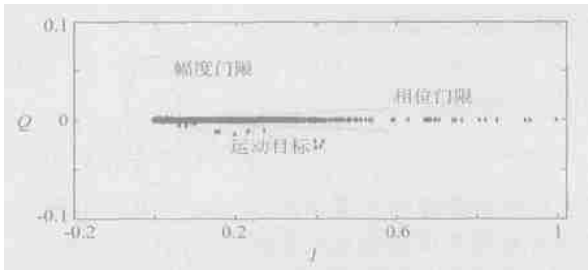


图3 目标点在 SAR2ATI 复平面上弥散开, 幅度门限和相位门限之外的点表示运动目标

Fig3 Target points is dispersive in SAR2ATI complex plane, points outside magnitude and phase threshold are moving targets

大的点相位起伏小, 可分别设置幅度门限和相位门限来滤去这些点, 幅度门限 M_{th} 和相位门限 A_{th} 由下式决定

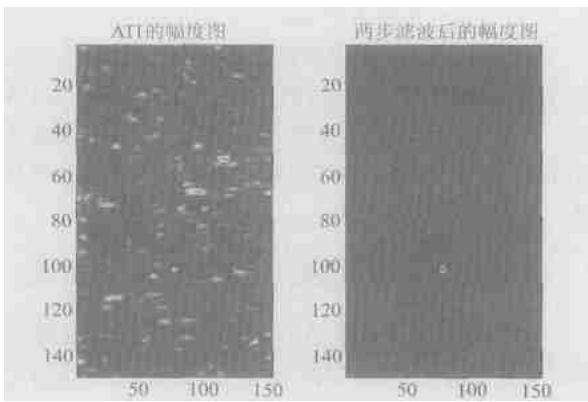
$$M_{th} = k_1 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M(i) \quad (4)$$

$$A_{th} = k_2 R \quad (5)$$

其中: $M(i)$ 表示每个信号点的幅度; N 表示信号点的总个数; R 表示所有信号点相位的统计标准差; k_1 、 k_2 是 2 个可调常数, 经验取值和调整办法见第 3 部分讨论。经幅度门限和相位门限的两步滤波, 运动目标在 SAR2ATI 复平面上显示为门限外的点, 图 3 是单个运动目标情况, 它的相位 A 即 M 个点的相角的均值, 由下式确定

$$A = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M A(i) \quad (6)$$

图 4 给出滤波前后 SAR2ATI 幅度图, 可以看出在图 4(a) 的 SAR2ATI 幅度图上杂波完全淹没了运动目标, 经过幅度和相位两步滤波后, 图 4(b) 上可以很容易地检测到运动目标。



(a) 目标被杂波淹没 (b) 两步滤波后检测出运动目标

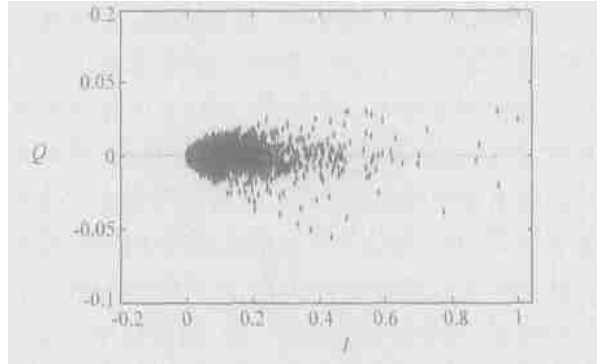
图 4 滤波前后 SAR2ATI 幅度图

Fig4 SAR2ATI magnitude images before and after filtering

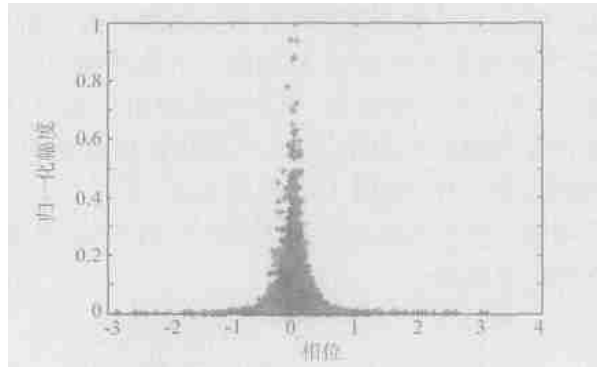
3 两步- 类高斯法实现杂波噪声中目标检测

当 SAR 雷达成像系统中同时存在着加性噪声和相位噪声时, 系统检测运动目标的性能也受

到较大的影响。经过 SAR2ATI 处理后的输出信号在复平面上如图 5(a) 所示, 观察可见, 这种情况下无法像图 3 那样通过设置一定的幅度门限和相位门限的两步滤波法来检测目标, 必须用统计的方法重新设置门限。



(a) 复平面图



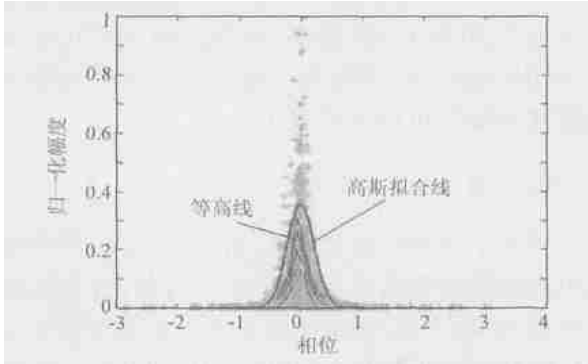
(b) 幅度2相位图

图 5 同时含杂波噪声和目标的 SAR2ATI 信号分布图

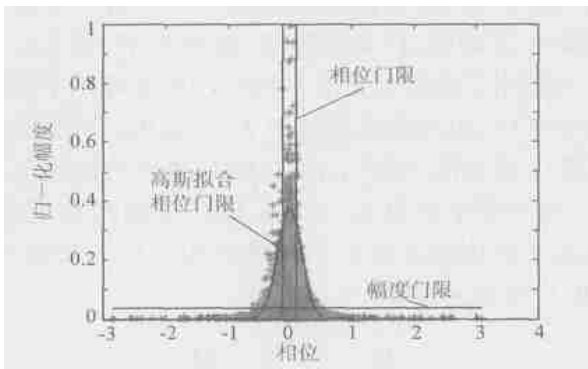
Fig5 SAR2ATI distributions of clutter noises and target constituent signal

前人也有直接将多通道 SAR 图像的强度和相位的统计特性的研究结果用于 ATI 运动目标检测的例子^[3~5], 都是基于在两幅图像幅度数据服从二维联合高斯分布这一假设条件下获得, 可作为理论分析方法, 但不适合于任意场合。对于非高斯图像分布的干涉图的幅相分布特性无法解析建模, 因此不作理论假设, 直接分析 SAR2ATI 干涉输出信号的幅相二维统计分布规律。首先作出图 5(b) 所示的 SAR2ATI 信号幅度相对于相位的关系图, 噪声的引入使图上信号点的幅度减小时, 相位的标准差增大, 这个变化的关系导致简单的幅度门限和相位门限不能用来检测目标, 需要精确分析幅度随相位变化的统计规律。类似文献 [10] 的分析方法, 在图 5(b) 的基础上进一步作出图 6(a) 所示的 SAR2ATI 信号幅相分布的二维直方图等高线, 这一簇等高线描述了幅相分布的密度。图 6(b) 显示的 4 条等高线中最里面的等高

线值最大,表示落在这个范围内的信号点数目最多。期望找到一条曲线能将绝大部分等高线都包含在里面,也即将绝大多数的杂波和噪声包含在里面,这条曲线正是我们需要的门限,它应由图中信号点的幅度和相位共同决定。



(a) 直方图等高线叠加在幅相图上



(b) 3个门限

图 6 两步-类高斯拟合原理及门限

Fig 6 Principle of two step fitting Gaussian function and corresponding threshold

图 6(a) 上的等高线不能用某个公式来表示,但是可以用高斯函数来拟合门限曲线,这就是名称“类高斯拟合”的由来。高斯拟合线由下式决定

$$G_{th} = k_3 e^{-G_p^2/k_4} \quad (7)$$

其中: G_{th} 表示高斯拟合决定的门限值; G_p 表示信号点的相位值; k_3 、 k_4 分别表示与信号点的幅度均值和相位标准差有关的两个常数,通过以值最小的等高线为基准按照最小均方误差准则估计出来。此公式的意义在于由信号点相位值决定了幅度门限。

在图 6(a) 的拟合曲线决定的门限外仍然有许多信号点,把它们都当作目标显然是不合理的,比如在相位为 0 附近有许多幅度很大的稀疏点存在,这主要是由强杂波信号而非运动目标信号产生的,在幅度很小的区域有许多相位较大的点,这主要是噪声点也不是运动目标点。结合第 2 部分

的两步滤波法即可滤去这些点。

综上所述,两步-类高斯拟合法就是幅度门限和相位门限两步处理结合由二维幅相拟合决定的高斯门限来从 SAR2ATI 的结果中检测运动目标的方法,整个流程如图 1 所示,最终决定的 3 个门限显示在图 6(b)。与第 2 部分比较可以看出,两步滤波法实现杂波中运动目标检测可以看作是两步2类高斯拟合法在噪声很小或者无噪声条件下的一种特殊情况,令 $k_3=0$ 时二者等效,此时检测运动目标只需幅度和相位 2 个门限,如图 7 所示。因此两步2类高斯拟合法是一般意义上的通用方法。参数 k_1 、 k_2 的选取在经验取值范围内 0.15~ 215, 0~ 1 可调,增大 k_1 即增大幅度门限会降低虚警概率,但也会丢失速度值大的目标,降低 k_1 则会大大增加虚警概率。增大 k_2 即增大相位门限,会降低很低速目标的检测概率,减小 k_2 大大增加虚警率,但可检测出的目标点数不会明显增加。下面将给出这种检测方法的仿真结果及分析。

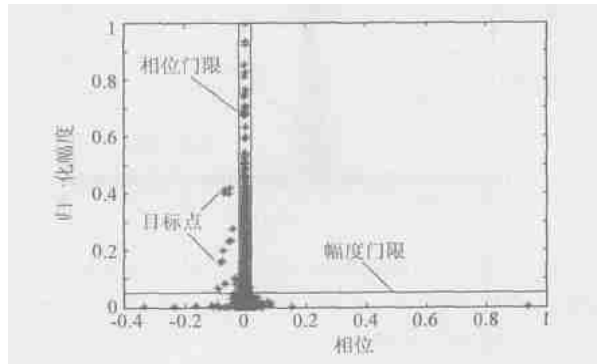


图 7 2个门限检测杂波中目标

Fig 7 Target detection in clutter using two thresholds

4 仿真结果及分析

表 1 列出了仿真的系统参数和地面场景参数。图 8 显示出 SAR2ATI 信号点的幅相图上两步2类高斯拟合法给出的门限以及门限外的目标点和虚警点。图 9 给出各个滤波步骤的 ATI 复值幅度图的结果,原始 ATI 数据经幅度滤波后虚警概率为 $P_{fa} = 516 @ 10^{-1}$, 经相位滤波后 $P_{fa} = 210 @ 10^{-1}$, 最终高斯拟合二维幅相滤波后 $P_{fa} = 514 @ 10^{-3}$, 可见大大降低了虚警率。从最后的结果来看, 4m/s、5m/s、6m/s 的 3 个目标可以检测出来, 而 1m/s、2m/s、3m/s 的目标则被淹没在杂波和噪声中无法检测, 在检测出的目标之外还有虚警点。由于无法显式推导出概率密度函数, 通过下式估计虚警概率

$$P_{fa} U \frac{\sum_{i=1}^F c(i)}{\sum_{i=1}^A c(i)} \quad (8)$$

表1 系统参数和地面仿真参数

Table 1 Simulation parameters

系统参数	
卫星轨道高度/km	750
纬度幅角/(b)	85
天线视角/(b)	20
轨道倾角/(b)	40
天线尺寸(方位@距离)/m ²	15@3
发射信号中心频率/G	10
带宽/M	20
脉冲宽度/Ls	66.67
脉冲重复频率 f/Hz	2000
地面场景参数	
场景大小(方位@距离)/m ²	600@200
杂波	K 分布杂波
	1 2 3
6个运动目标的速度值/(m#s ⁻¹)	4 5 6

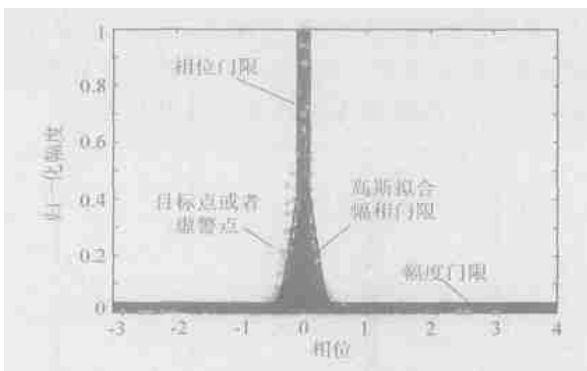


图8 两步-类高斯拟合法的门限及目标点和虚警点

Fig8 Threshold of two step-fitting Gaussian process and detection result

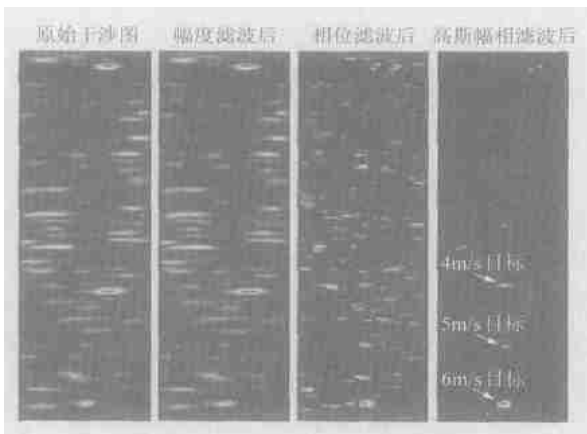


图9 滤波各个步骤的结果

Fig9 Filtering results of ordinal steps

其中: F 是选定门限外的区域; A 表示整个区域; c(i)表示所在区域的点数,这个公式是在假设门

限外没有目标的条件下的一个近似公式。采用本文的方法处理图9的最终结果是:在信杂比为-161.073dB,杂噪比为-151.07dB, k₁=0.15, k₂=0.158的条件下 P_{fa}=5.14@10⁻³, MDV 为4m/s。

表2 CNR 对 MDV 的影响

Table 2 MDV values for different CNRs

CNR /dB	- 18	- 15	- 9	- 3	无噪声
MDV / (m#s ⁻¹)	6	4	3	2	可以到很小

在不同 CNR 条件下关于 MDV 作仿真,结果列于表2,可见 CNR 越高,检测门限自适应地变小,MDV 也变小,特别是在噪声很小或者无噪声的时候,MDV 可以达到很小。

5 结论

描述了 SAR2ATI 原理,分析了其在干涉结果中检测地面慢动目标中存在的问题,仿真实现了星载 SAR2ATI,两步滤波法可以实现杂波中运动目标检测,在此基础上提出了称之为/两步2类高斯拟合法的动目标检测新方法。这种方法不需要作理论假设,无需推导,简单实用、完全自适应地利用二维统计分布从固定杂波和噪声中提取运动目标,大大降低系统的 P_{fa}。通过这种方法还研究了系统的 MDV, MDV 随杂噪比的增大而减小,噪声很小的时候,MDV 可以达到很小,仿真证实了在星载条件下当杂噪比为-151.07DB 时,MDV 可达4m/s。

参 考 文 献

- [1] Whelan D A. Discoverer II program summary[A]. In: Radar Conference 2000[C]. The Record of the IEEE, 2000. 7- 8.
- [2] Nohara T J, Weber P, Premji A, et al. SAR2GMT1 processing with Canada's Radarsat2 satellite[A]. In: Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium 2000[C]. AS2SPCC. IEEE, 2000. 379- 384.
- [3] Thompson A A, Livingstone C E. Moving target performance for Radarst2[A]. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium 2000[C]. Proceedings IGARSS IEEE 2000 International, 2000. 2599- 2601.
- [4] Gierull C. Statistics of SAR interferograms with application to moving target detection[R]. Ottawa: Defence Research Establishment Ottawa(DREO). 2001.
- [5] Gierull C H. Unbiased coherence estimator for SAR interferometry with application to moving target detection[J]. Electronics Letters, 2001, 14(7): 913- 915.
- [6] Sikaneta I, Gierull C. Parameter estimation for the phase statistics in interferometric SAR[A]. In: Geoscience and

- Remote Sensing Symposium 2002[C]. IGARSS 2002 IEEE International, 2002. 1735- 1737.
- [7] Breit H, Eineder M, Holzet J, et al. Traffic monitoring using SRTM along-track interferometry[A]. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. IGARSS, 2003. 1187- 1189.
- [8] Roth A, Eineder E, Schattler B. TerraSAR-X: a new perspective for scientific use of high resolution spaceborne SAR data[A]. In: 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas [C]. IEEE, 2003. 4- 7.
- [9] Livingstone C E, Sikaneta I, Gierull C H, et al. An airborne synthetic aperture radar experiment to support RADARSAT22 ground moving target indication[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2002, 28(6): 794- 813.
- [10] Chiu S. SAR along-track interferometry with application to RADARSAT22 ground moving target indication[A]. In: Image and Signal Processing for Remote Sensing VIII[C]. Proceeding of SPIE, 2003. 246- 255.

作者简介:



高 飞(1975-) 男,陕西省绥德县人,北京航空航天大学博士生,主要从事信号处理、雷达成像、图像处理、运动目标指示等方面的研究工作。E-mail: feigao2000@163.com

(责任编辑: 李泓洁)