

一种在双通道 SAR 图像域实现地面运动目标检测的方法

高 飞¹, 毛士艺¹, 袁运能¹, 玉振明²

(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)

摘 要: 提出了一种在双通道 SAR (Synthetic Aperture Radar) 图像域基于采样协方差矩阵分析的运动目标检测方法. 此方法利用了双通道协方差矩阵非对角元素的性质, 即当运动目标的存在使得通道之间不完全匹配时, 使得此元素的幅度或者相位信息发生变化, 通过检测此变化就可以检测到两个通道之间的起伏, 即完成运动目标的检测. 相比通常的 DPCA (Displaced Phase Center Antenna), 该方法的杂波抑制能力更强, 消除了目标旁瓣的影响, 使得检测目标的门限更好选择, 降低了 Pfa (Probability of false alarm), 仿真结果证明了其在杂波抑制和目标检测方面的优越性能.

关键词: 合成孔径雷达; 地面运动目标检测; 天线相位中心偏置法; 协方差矩阵

中图分类号: TN 957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 04-0755-06

A New Ground Moving Targets Detector in Dual-Channel SAR Images

GAO Fei¹, MAO Shi-yi¹, YUAN Yun-neng¹, YU Zhen-ming²

(1. Group 203, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083 China;

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

Abstract Concerning ground moving targets detection in dual-channel SAR images, a novel detector based on dual-channel sample covariance matrix is proposed. The method succeeds by checking magnitude and phase variation of off-diagonal elements in sample covariance matrix. Compared with traditional DPCA, it achieves better clutter rejection, eliminates influences from target sidelobes, sets threshold more easily and gets lower Pfa. Simulation results show the effectiveness of the method.

Key words synthetic aperture radar; ground moving target indication; displaced phase center antenna; covariance matrix

1 引言

机载 SAR-GMTI (Ground Moving Target Indication) 相对比较成熟, 在国外已装备部队和有实际应用, 而星载 SAR-GMTI 至今还没有一个国家进入应用, 是各先进国家都在探讨的问题. 星载雷达的优势在于其可达数千公里的大视场、不受国别、地理位置、政治等因素的限制. 国外目前正在研制的星载 SAR 系统如 RadarSat II 和 Terre-SAR^[1] 都包含了 SAR-GMTI 模式, 均采用两个平行的天线孔径, 即双通道技术. 实现 SAR-GMTI 分为两步, 首先要在背景杂波中检测运动目标, 然后对发现的运动目标进行参数估计, 本文的研究重点在于运动目标的检测, 参数估计的问题可参见文献 [2]. 国内外关于星载 SAR-GMTI 检测目标的主要技术包括双通道的 DPCA 和 ATI (Along Track In-

terferometry)^[3~5].

本文从新的思路出发, 将协方差矩阵非对角元素的性质应用于 SAR-GMTI 的运动目标检测. 经过星载 SAR 的双通道成像处理得到两幅图像, 以某一像素为中心分别截取前向通道图像和拖尾通道图像的一小块数据构造采样协方差矩阵, 若当前数据仅有杂波, 则截取的两个通道图像块完全相同, 其协方差矩阵非对角元素为一实数初始值, 若当前数据中存在运动目标则截取的两个通道图像块有差异, 采样协方差矩阵非对角元素就会偏离这个初始值, 估算此偏离幅度的大小, 仅有杂波时此偏离幅度值为 0, 存在运动目标时此偏离幅度值不为 0. 重复所有像素, 就可以标记每个像素为幅度为 0 的“杂波”或者幅度不为 0 的“运动目标”, 从而实现整个图像域的运动目标检测. 文

中主要与 DPCA 方法进行实验比较, 结果表明该算法解决了 DPCA 方法中门限选取困难的问题, 可以得到更好的杂波抑制和更好的目标检测性能, 最后还对实验结果进行了分析, 从物理概念上解释了该方法的优越性.

2 星载双通道 SAR-DPCA 检测原理

按照图 1 所示的模型构造基本双通道配置方案, 图 1 的插图给出了本次脉冲以及下一个脉冲发射及接收的位置关系, 拖尾天线在接收第二个脉冲时的等效相位中心是 A_2 , 与前向天线在接收第一个脉冲时的等效相位中心 B_1 重合, 结果使得卫星的观测过程等效于每个相位中心 (前向天线和拖尾天线) 在不同时间 (前后脉冲) 在空间同一位置观测地面目标, 若地面目标是静止的, 两次观测结果完全相同; 若地面目标是运动的, 两次观测结果不尽相同.

SAR 体制下利用 DPCA 来实现 GMTI 可用公式统一表示为^[6]

$$I = I_1 - I_2 = 2 |I_1| \left| \sin \frac{2\pi v_r T}{\lambda} e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)/2 - j(\pi/2)} \right| \quad (1)$$

式中 I_1 、 I_2 分别表示延时 T 后的前向天线数据和对应拖尾天线数据, φ_1 、 φ_2 分别表示这些数据的相位, $|I_1|$ 或 $|I_2|$ 表示目标的强度, I 表示二者对消的结果, v_r 为运动目标的径向速度, λ 表示波长. 对于静止目标 $\varphi_1 = \varphi_2$ 使得 $I = 0$, 对于运动目标 $\varphi_1 \neq \varphi_2$ 使得 $I \neq 0$.

我们可以从图 2 很好地解释对目标向量的处理过程. 假设目标朝着远离卫星平台的方向运动, 目标在前向天线表现为矢量 I_1 , 对应的相位为 φ_1 , 经过延时 T 目标在拖尾天线表现为矢量 I_2 , 对应的相位为 φ_2 , 在复平面上 I_2 相当于 I_1 顺时针旋转 $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$. I_2 与 I_1 的差向量 I 描述了对消特性, 其相位垂直于 $\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$ 为 $\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} - \frac{\pi}{2}$, 其幅度就是两个矢量对应弧的直线距离. 检测目标的对消幅度 $|I|$ 正是 DPCA 方法检测目标的关键所在. 设目标的后向散射系数为 1, 可以推导出目标信号在图像域的对消特性为

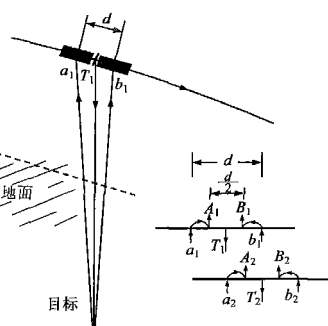


图 1 星载 SAR 双通道配置方案

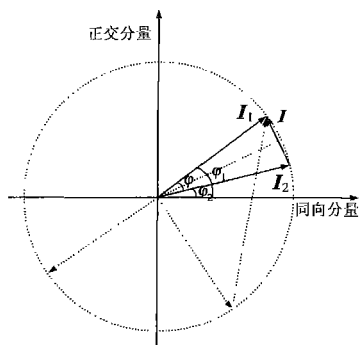


图 2 DPCA 技术在复平面的解释

$$I(t, \tau) = -2 \left| \text{sinc} \left[\pi B_a \left(t - \frac{x_0}{v} + \frac{R_0}{v^2} v_r \right) \right] \right| \cdot \text{sinc} \left[\pi B_r \left(\tau - \frac{2R_0}{c} \right) \right] \left| \sin \frac{2\pi v_r T}{\lambda} e^{j(\pi/2 + (\varphi_1 + \varphi_2)/2)} \right| \quad (2)$$

式中 t 表示方位时间, τ 表示距离时间, B_a 表示 Doppler 带宽, x_0 表示目标的初始方位位置, B_r 表示发射信号带宽, R_0 表示目标的初始位置与雷达的距离. 从式 (2) 的对消公式看到, 对消结果的幅度是受 $\left| \sin \frac{2\pi v_r T}{\lambda} \right|$ 调制的二维 sinc 函数, 必然存在着旁瓣, 因此单通道图像上强度相同但 v_r 不同的目标, 对消以后幅度有强弱之分, 从对消结果上检测目标时, 强目标的第一旁瓣峰值如果超过弱目标的主瓣峰值, 则会给检测目标的门限选取带来困难. 为了去除强目标的旁瓣干扰, 门限取值应大于强目标第一旁瓣峰值, 但这样会检测不出弱目标, 反过来为了检测出弱目标, 必须降低门限取值, 这样会将强目标的旁瓣误认为是单独的目标, 给检测带来虚警.

3 双通道协方差矩阵第二特征值用于 SAR-GMTI

多通道 SAR 系统利用各个通道获得数据的相关特性实现杂波抑制, 而多通道 SAR 的协方差矩阵携带了包括相关性在内的杂波和运动目标的所有信息, 因此, 通过多通道 SAR 协方差矩阵也可以实现运动目标检测. 若雷达通道建模为零均值的高斯过程, 则双通道 SAR 系统输出的杂波协方差矩阵^[7]可写作

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1 \sigma_2 \rho e^{j\varphi} \\ \sigma_1 \sigma_2 \rho e^{-j\varphi} & \sigma_2^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 σ_1^2 、 σ_2^2 表示两通道的方差, $\rho e^{j\varphi}$ 表示通道之间的复相关系数, 复相关系数的幅度 ρ 称为相关度 (Cohérence).

采样协方差矩阵的对角化变换或特征分解表示为

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} U^H \quad (4)$$

其中 $\lambda_1 > \lambda_2 > 0$ 是随机变量表示的特征值, U 是随机矩阵表示的特征向量, 文 [7] 给出一种 U 的表达式为

$$U = \begin{bmatrix} \cos \theta & e^{j\delta} \sin \theta \\ e^{-j\delta} \sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中

$$\delta = \arg(R_{12}) \quad (6)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2|R_{12}|}{R_{11} - R_{22}} \right) \quad (7)$$

展开式 (4) 化简得到

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} (R_{11} + R_{22} + \sqrt{4|R_{12}|^2 + (R_{11} - R_{22})^2}) \quad (8)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} (R_{11} + R_{22} - \sqrt{4|R_{12}|^2 + (R_{11} - R_{22})^2}) \quad (9)$$

文献 [7] 将第二特征值 λ_2 的分布作为检测运动目标的判据, 这里给出仿真结果, 说明其特点以及存在的问题.

表 1 仿真参数

系统参数			
卫星轨道高度	750km	两孔径的距离	7.5m
纬度幅角	85°	发射信号中心频率	10GHz
天线视角	20°	带宽	20MHz
轨道倾角	40°	脉冲宽度	66.67μs
天线尺寸(方位×距离)	15m×3m	PRF	2000Hz
地面场景参数			
场景大小(方位×距离)	400m×400m	场景大小(像素)	119×61
地面分辨率(距离×方位)	19.62m×6.72m	杂波	K 分布杂波

系统仿真参数和地面场景参数如表 1 所示, 其中转动地球采用文 [8] 的模型. 假设场景中含反射系数为 0.035, 速度值分别为 1m/s、2m/s、3m/s 的三个运动目标, 图 3(a) 是杂波平均反射系数为 0.008, 强度相比目标弱很多情况的单通道成像结果; 图 3(b) 是杂波平均反射系数为 0.08, 强度比目标大很多情况的单通道成像结果; 图 3(c) 是这两种情况下采用双通道 DPCA 的检测结果, 图中杂波抑制后只剩下三个目标, 检测结果与信杂比无关.

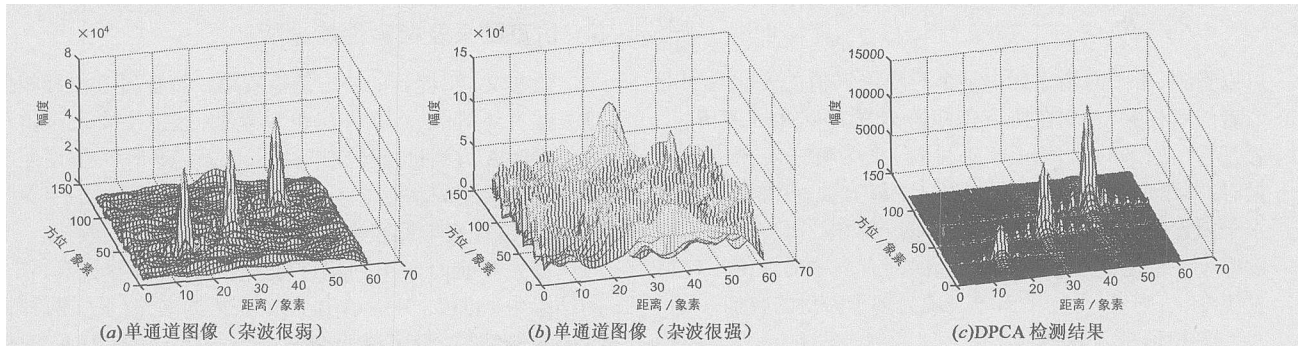


图 3 两种情况下的单通道图像及 DPCA 检测结果

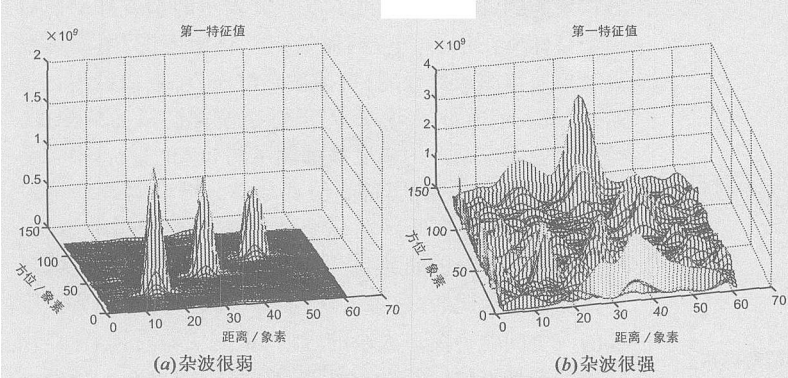


图 4 采样协方差矩阵第一特征值恢复单通道图像

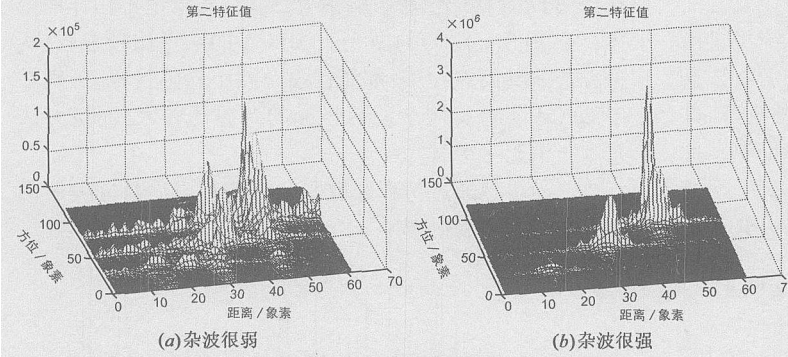


图 5 采样协方差矩阵第二特征值检测目标

图 4 和图 5 分别示出了不同信杂比条件下采用文 [7] 方法的检测结果, 图 4 是两种情况下第一特征值的幅度图, 图 5 是第二特征值的幅度图, 对比图 3 的结果, 并将

DPCA 的检测结果作为参考, 可以看到: (1) 第一特征值幅度可以大致恢复单通道图像的特征; (2) 第二特征值幅度可以检测目标, 但检测结果上虚警点太多; (3) 第二特征值的检测结果受信杂比影响较大, 且呈不规则、不规则的变化, 因此, 通过第二特征值检测目标的效果并不理想, 比 DPCA 的结果还要差.

此外, 文献 [7] 还提到了相似度和 ATI 的方法, 相似度也是运动目标的响应, 但对运动目标的存在并不敏感, 而 ATI 方法的主要缺点在于干涉相位受 SCR (Signal to Clutter Ratio) 影响较大, 有相位缠绕问题且选择幅度门限和相位门限需要作专门处理, 处理过程较复杂.

4 采样协方差矩阵非对角元素的幅度差检测运动目标

协方差矩阵的非对角元素 $\sigma_1 \sigma_2 \rho e^{j\varphi}$ 或者 $\sigma_1 \sigma_2 \rho e^{-j\varphi}$ 包含了两个通道变化的信息, 例如两通道完全相同则二者相关度 ρ 为 1, 相位 φ 为 0, 两个通道有差异则相关度 ρ 下降, 相位 φ 也不为 0. 研究协方差矩阵中这个元素的变化, 为检测运动目标提供新的思路, 这正是本文的立

足点. 假设对两个复数型随机变量 x_1 和 x_2 分别进行 N 次采样, 采样结果分别为复数序列 c_1, c_2, \dots, c_N 和 b_1, b_2, \dots, b_N , 二者采样协方差矩阵的估计值可以写作

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i c_i^* & \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i^* \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i c_i^* & \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i^* \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 $\hat{\cdot}$ 表示对数据的估计, * 表示复共轭, 如果两个采样序列完全相同, 即 $c_1 = b_1, c_2 = b_2, \dots, c_n = b_n$ 展开 R_{12} 易知其为实数, 表示为

$$R_{12} = R_{12_0} \quad (11)$$

其中, 下标 0 表示初始值. 如果第二个序列中第 k 个采样由 $b_k = c_k$ 变为 $b_k = c_k + a + jd$, 其中 a, d 为实数, j 为虚数单位, 重新展开 R_{12} 并化简得到

$$R_{12} = R_{12_0} + \frac{NC_k - \sum_{i=1}^N c_i}{N^2} a - j \frac{NC_k - \sum_{i=1}^N c_i}{N^2} d \quad (12)$$

可以看到, 由于两个序列中某个对应采样值的变化会引起二者的解相关, 表现在协方差矩阵 R 的非对角元素 R_{12} 上就是它由原来的 R_{12_0} (正实轴位置) 变为有一定角度的矢量, 偏移角度与两个采样的差值 $a + jd$ 有关, 变化的幅度与多个因素如 a, d, N, c_k 等有关, 总的效果相当于 $a - jd$ 的幅度缩小一个比例因子. 如果两个序列有多个对应的采样值发生变化, 则 R_{12} 在复平面上表现为多个矢量的叠加.

图 6 示出了这种变化关系, 假设上面描述的两个序列中某点采样的变化正是由于图 2 中运动目标引起的, 它使图 6 中 R_{12} 偏离正实轴, 通过检测 R_{12} 的幅度变化就可以检测此运动目标. 根据上述分析, 给出一种基于采样协方差矩阵的地面慢速运动目标检测方法.

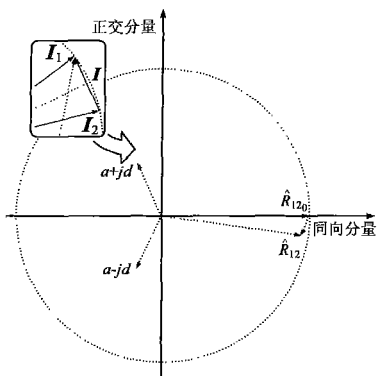


图 6 \hat{R}_{12} 随序列间某点采样值变化在复平面的表现形式

图 7 是这种方法的实现框图, 星载 SAR 系统经过沿航迹向放置的双通道成像, 在得到的两幅图像中分别以某一像素为中心, 取出两个图像块数据构造协方差矩阵, 并计算其非对角元素 R_{12} 的幅度变化, 此值的大小反映了此像素周围的变化情况. 重复所有的像素, 可以得到一个与原图像同维数的矩阵, 此矩阵各个元素的幅度起伏携带了

运动目标在原图像的信息, 因此, 最终可实现运动目标检测.

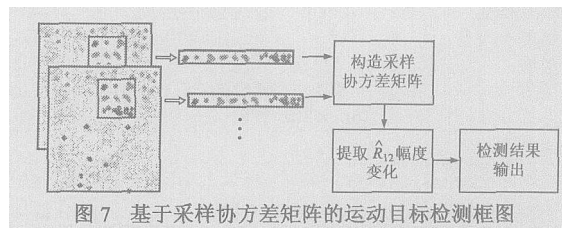


图 7 基于采样协方差矩阵的运动目标检测框图

5 仿真结果及检测性能分析

由于文 [7] 提到的协方差矩阵第二特征值方法和相似度方法并不理想, ATI 方法也较复杂, 这里主要通过仿真并与 DPCA 方法进行比较来说明通过计算 R_{12} 的幅度差实现运动目标检测的性能.

5.1 杂波抑制与目标检测

首先对前面表 1 列出的第一组数据进行仿真, 图 8 的结果中 (a) (b) 分别示出了杂波很弱、杂波很强两种情况的检测结果. 为了说明杂波抑制程度, 以图 8(b) 的检测结果为例, 图 8(c) 给出了以分贝表示的杂波抑制前后三个目标所在位置方位剖面的归一化幅度图, 图上虚线表示单通道图像域幅度, 目标被杂波淹没, 直接检测行不通, 实线表示通过 R_{12} 幅度差进行杂波抑制以后的幅度, 经对消后固定杂波的幅度被抑制了约 35dB 左右, 很容易检测到“突显”出来的目标. 仿真结果分析表明: (1) 通过计算 R_{12} 的幅度差可以在强杂波背景中检测运动目标; (2) 图 8 (a) (b) 的直观结果上看, 不同强度的杂波背景下检测结果都比较好, 该方法与 SCR 无关; (3) 该方法隐含的一个问题是窗口大小的选取, 重复实验易知, 窗口尺寸分别选择方位 (像素) \times 距离 (像素) 为 $3 \times 3, 5 \times 5, 5 \times 3, 7 \times 3$ 时对目标检测影响不大, 因此, 在这里不作详细论述; (4) 图 8(a) (b) 与图 3(c) DPCA 的结果比较来看, 两种方法的共同点在于, 都能在强杂波中检测目标, 区别在于 DPCA 方法抑制杂波后目标的旁瓣比较大, 而该方法基本上消除了旁瓣.

下面仍然通过仿真来说明杂波抑制以后目标旁瓣的存在对目标检测的影响.

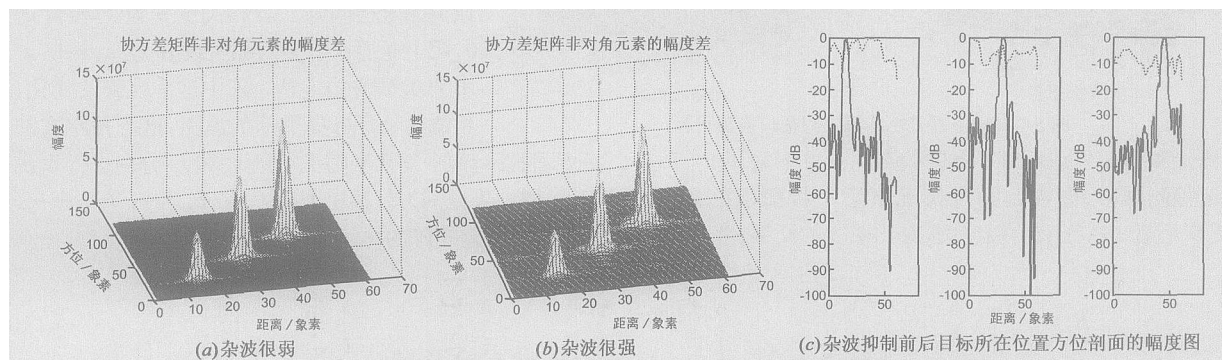


图 8 基于采样协方差矩阵非对角元素幅度差的运动目标检测结果

表 2 第二组仿真数据参数

地面场景参数						
场景大小 (方位 × 距离)	1900m × 540m		场景大小 (象素)	567 × 82		
地面分辨率 (距离 × 方位)	19.62m × 6.72m		杂波	K 分布杂波		
运动目标参数						
速度 (m / s)	-0.5	-1	-4	-10	-16	-19
距离位置 (象素)	72	12	60	24	48	36
方位位置 (象素)	19	30	103	250	396	460

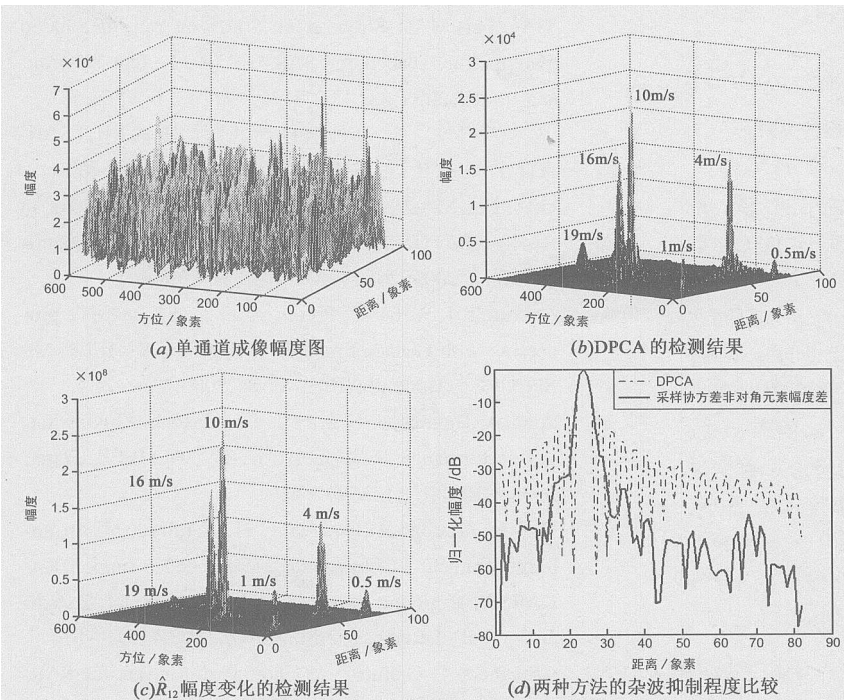


图 9 两种方法的检测结果比较

系统仿真参数与表 1 相同, 地面场景参数和运动目标参数见表 2 所示. 图 9 给出仿真结果, 由于杂波幅度比较大, 从图 9(a) 单通道的成像结果上杂波完全淹没运动目标, 检测目标几乎是不可能的; 从图 9(b) 的双通道 DPCA 对消的幅度结果上看 6 个运动目标都能检测出来, 但运动目标的旁瓣也很强; 采用协方差矩阵非对角元素 R_{12} 幅度差检测的方法得到图 9(c) 的结果, 可以看到同样能够检测出运动目标, 但目标的旁瓣电平很低. 两种方法的分析比较如下:

(1) 从检测门限设定和影响虚警率的角度来看, 图 9(b) 的对消结果上目标旁瓣的存在会影响目标的检测, 幅度较大的 -10 m/s 目标的最大旁瓣峰值为 5395 而 -0.5 m/s 和 -19 m/s 目标的主瓣峰值分别为 2506 和 4164 如果为了去除 -10 m/s 目标旁瓣的影响, 幅度门限应大于 5395 这样会漏掉 -0.5 m/s 和 -19 m/s 目标, 只能检测出其它 4 个目标; 如果为了检测出 -0.5 m/s 和 -19 m/s 的弱目标, 必须降低门限取值, 门限取值最大不应超过 2506 这样会将 -10 m/s 目标的旁瓣误认为是单独的目标, 给检测带来虚警. 而图 9(c) R_{12} 幅度差方法的检测结果上基本消除了旁瓣, 可以清楚地检测出 6 个运动目标.

(2) 从杂波抑制程度来看, 以抽取距离方位位置在 (24 250) 的 -10 m/s 目标为例, 图 9(d) 是以分贝表示的沿方位截取的距离向幅度数据, 图中点划线是 DPCA 杂波抑制以后的结果, 实线是采样协方差矩阵非对角元素幅度差杂波抑制以后的结果. R_{12} 幅度差的方法能够得到比 DPCA 更好的杂波抑制效果, 仿真结果上其性能比 DPCA 要好 20dB 左右.

(3) 从分辨率的角度来看, 仍然从图 9(d) 上观察, 相比 DPCA, R_{12} 幅度差的方法使目标的主瓣有一定的展宽, 如果考虑 -3 dB 的主瓣宽度, 则这个展宽几乎可以忽略. 上面的仿真中数据窗的尺寸选 5 (方位) \times 3 (距离), 如果数据窗尺寸选的太大, 则目标的主瓣展宽程度将进一步加大. 选取图像块数据, 一方面要依靠一定的数据量来计算协方差矩阵, 另一方面, 窗口太大检测出目标的分辨率降低. 因此, 窗口尺寸的选择需要折衷考虑, 通常取 5×3 或者 7×3 即可.

总的来讲, R_{12} 幅度差的方法以一定允许范围内的分辨率损失为代价, 提供了比 DPCA 方法更好的杂波抑制效果, 更好的目标检测概率 (或者说更低的虚警率).

5.2 统计特性与目标检测性能

考虑到实际系统的非理想性, 接收机噪声、通道失配等因素都会干扰目标的检测, 这里通过研究通道相关性、幅度统计直方图、 P_{fa} 和门限值之间的关系来定性说明.

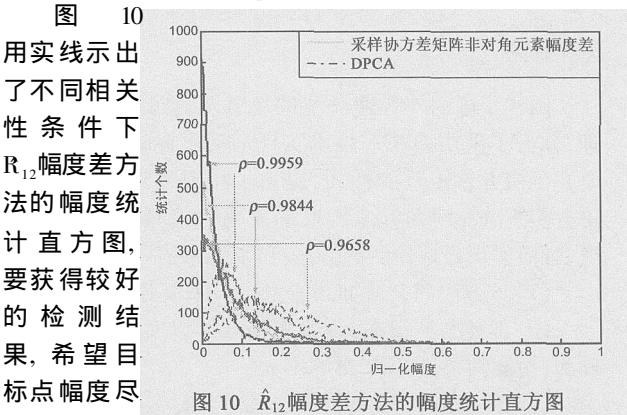


图 10 \hat{R}_{12} 幅度差方法的幅度统计直方图

用实线示出了不同相关性条件下 R_{12} 幅度差方法的幅度统计直方图, 要获得较好的检测结果, 希望目标点幅度尽可能大, 其余信号点幅度尽可能小, 图上相关性增强时, 信号点向幅度较小的区域集中, 幅度较大的目标信号就越容易检测出来, 对比点划线所示的 DPCA 幅度统计直方图, 可以看到在相关性相同的条件下, DPCA 的信号点更多地向幅度较大的区域偏离, 不利于检测, 从这个角度看 R_{12} 幅度差的方法优于 DPCA 的方法.

图 11 用实线示出了不同相关性条件下 R_{12} 幅度差方法

的 P_{fa} 随幅度门限的变化关系, 固定相关系数, 增大门限则会降低 P_{fa} ; 固

定门限, 相关系数数值越大则杂波对消程度增加得出较低的 P_{fa} ; 要达到同样的 P_{fa} , 相关性较大时门限参数取值较小. 与双折线所示的 DPCA

曲线相比, 如要达到相同的 P_{fa} , R_{12} 幅度差方法需要较小的门限; 取相同幅度门限时, R_{12} 幅度差方法的虚警率要比 DPCA 的低很多.

R_{12} 幅度差方法能够获得上述优越性能的主要原因在于, (1) 为了判断图像中某点像素是否携带运动目标信息, 必须以此像素为中心截取一定大小的两个图像数据块来构造协方差矩阵并计算 R_{12} , 参见式 (10) 中 R_{12} 的表达式, 计算过程需要在多个分辨单元求平均, 这相当于对数据进行了一定的平滑处理, 从而使目标的旁瓣幅度大大减小, 即消除了目标旁瓣对检测的干扰; (2) 同样由于上述的平滑作用, 目标的主瓣有展宽, 分辨率有一定程度的下降; (3) 换个角度来看, 如果令式 (10) 中两个序列的均值为 0 则 R_{12} 的表达式变为 $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i b_i^*$, 它相当于在一小块区域内求复干涉的平均, 也就是说可以将 ATI 的动目标检测方法认为是本文方法在零均值且 $N \rightarrow 1$ 时的特殊情况.

6 结论

阐述了国内外普遍关注的星载双通道 SAR-GMTI 原理, 分析了采用 DPCA 技术实现运动目标时存在的问题, 研究了协方差矩阵的性质, 提出了用双通道 SAR 的采样协方差矩阵非对角元素幅度的变化来检测通道之间的差异, 进而实现目标检测的方法. 仿真结果表明

- (1) 该方法的杂波抑制能力比 DPCA 好 20dB 左右;
- (2) 即使杂波很强, 该方法仍然可以实现很好的目标检测, 检测结果受 SCR 影响不大;
- (3) 该方法降低了 DPCA 方法中目标旁瓣的影响, 使得检测目标的幅度门限更好选择, 可以增加 P_d 或者降低 P_{fa} ;
- (4) 该方法检测出的目标有一定的主瓣展宽, 使得目标分辨率下降, 但分辨率的损失并不严重;
- (5) 该方法对不同径向速度目标的对消特性与 DPCA 的几乎相当;
- (6) 增强通道之间的相关性使得该方法的幅度统计向幅度较小区域集中, 更利于目标的检测.

总的来讲, 该方法实现简单、思路新颖、效果显著.

参考文献:

- [1] C H Gierul A azimuth positioning of moving targets in two-channel SAR by direction-of-arrival estimation [J]. Electronics Letters, 2004, 40(21): 1380-1381.
- [2] 高飞, 毛士艺, 等. 基于原始数据域的星载双通道 SAR-GMTI 研究 [J]. 电子学报, 2005, 33(12): 2105-2110.
GAO Fei MAO Shi-yi et al Study on raw data-based two aperture spaceborne SAR-GMTI [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(12): 2105-2110 (in Chinese).
- [3] 高飞, 毛士艺, 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): 84-89.
GAO Fei MAO Shi-yi et al Fully automatic detector in SAR-ATI of GMTI [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(1): 84-89 (in Chinese).
- [4] Nohara T J Weber P, Premji A, et al SAR-GMTI processing with Canada's radarsat-2 satellite [A]. IEEE AS-SPCC [C]. Honolulu: IEEE Press, 2000, 379-384.
- [5] Alan A Thompson, Charles E Livingstone Moving target performance for RADARSAT-2 [J]. IEEE Trans, 2000, GRS-38(6): 2599-2601.
- [6] C E Livingstone, I Skaneta, C H Gierul et al An airborne synthetic aperture radar experiment to support RADARSAT-2 ground moving target indication [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2002, 28(6): 794-813.
- [7] I Skaneta, C Gierul, J Y Chouinard Metrics for SAR-GMTI based on eigen-decomposition of the sample covariance matrix [A]. Radar Conference 2003 [C]. America: IEEE Press, 2003, 442-447.
- [8] John C C, Robert N M. Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing [M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 1991, 565-591.

作者简介:



高飞 男, 1975 年生于陕西省绥德县, 北京航空航天大学博士后, 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



毛士艺 男, 1935 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 主要研究领域: 高分辨率雷达成像、信号建模与谱分析、信号检测与分类、多目标跟踪与数据融合等.