

基于协方差矩阵特征分解的多通道 SAR-GMTI 方法及性能分析

蔚 婧 廖桂生 曾 操

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘 要: 该文提出了一种基于协方差矩阵特征分解的多通道运动目标检测和测速定位方法, 该方法依据多通道 SAR 数据协方差矩阵特征分解后小特征值之和的幅度变化来检测运动目标。在检测出运动目标后, 先利用两幅复图像的干涉相位对目标径向速度进行粗略估计, 再通过搜索动目标空域导向矢量的方法对径向速度进行精确估计, 克服了干涉相位对杂波和噪声的敏感性。仿真数据和实测数据验证了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 协方差矩阵; 地面运动目标检测; 空域导向矢量

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)02-0374-04

Multi-Channel SAR-GMTI Technique and Performance Analysis Using Eigen-Decomposition

Yu Jing Liao Gui-sheng Zeng Cao

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A multi-channel SAR-GMTI technique based on eigen-decomposition of the covariance matrix is proposed. The variation of the sum of small eigenvalues of the covariance matrix is used to detect moving targets. The radial velocity of the moving target is estimated by two steps. Firstly, using the interferometric phase of two SAR images to get the coarse radial velocity estimation, then the more precise radial velocity is obtained by searching the space-domain steering vector of the moving target. It overcomes the sensitivity of the interferometric phase to clutter and noise. The effectiveness of the presented technique is demonstrated by both simulated and measured SAR data.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Covariance matrix; Ground moving target detection; Space-domain steering vector

1 引言

合成孔径雷达运动目标显示(SAR-GMTI)对于战场目标的侦察、监视、攻击有着重要的军事意义, 因此 SAR-GMTI 也是 SAR 领域近年研究的热点问题。GMTI 技术的核心问题是从强的杂波背景中提取运动目标信号, 进而对运动目标进行测速、定位。

运动目标检测技术可分为两类, 一类是单通道技术, 如反射特性位移法(RDM)、WVD 法、截断平均法等。另一类是多通道技术, 主要有相位中心偏置天线技术(DPCA)^[1]、沿航迹干涉技术(ATI)^[2]、空时自适应处理技术(STAP)^[3]。单通道运动目标检测方法一般不能检测频谱落入主杂波带内的慢速运动目标。多通道系统由于增加了雷达系统空间维的信息, 同时利用空间和时间两维信息能够更好地抑制杂波。

本文提出一种多通道运动目标检测、测速定位方法, 该方法首先通过构造 3 通道 SAR 数据协方差矩阵, 经过特征

分解, 依据两个小特征值之和的幅度变化情况来检测运动目标; 然后对检测出来的动目标点取干涉相位, 进行径向速度的粗略估计; 再通过搜索动目标空域导向矢量的方法对径向速度进行精确估计。仿真数据和实测数据都验证了该方法的优越性。

2 基于协方差矩阵特征分解的多通道运动目标检测方法

首先分析多通道 SAR 系统的信号模型, 为不失一般性, 我们以三通道系统为例。假设 3 个通道接收的数据分别经过了 SAR 成像, 并进行了精确配准, 第 i 个通道所成 SAR 图像中 (p, q) 像素的数据 $x_i(p, q)$ 可以写为 (p, q) 分别为 SAR 图像中方位和距离的位置

$$\left. \begin{aligned} H_0 : x_i(p, q) &= c_i(p, q) + n_i(p, q) \\ H_1 : x_i(p, q) &= c_i(p, q) + s_i(p, q) + n_i(p, q), \quad i = 1, 2, 3 \end{aligned} \right\} (1)$$

其中 $c_i(p, q)$ 为杂波分量, $n_i(p, q)$ 为噪声分量, $s_i(p, q)$ 为运动目标信号分量。 H_0 和 H_1 分别表示该像素中不存在和存在运动目标的情况。

文献[4]介绍了一种双通道运动目标检测方法, 本文将该

方法推广到多通道 SAR 系统中。

3 通道 SAR 数据的协方差矩阵可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(p, q) &= E\{\mathbf{X}(p, q) * \mathbf{X}^H(p, q)\} \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1\sigma_2\rho_{12}e^{j\phi_{12}} & \sigma_1\sigma_3\rho_{13}e^{j\phi_{13}} \\ \sigma_1\sigma_2\rho_{12}e^{-j\phi_{12}} & \sigma_2^2 & \sigma_2\sigma_3\rho_{23}e^{j\phi_{23}} \\ \sigma_1\sigma_3\rho_{13}e^{-j\phi_{13}} & \sigma_2\sigma_3\rho_{23}e^{-j\phi_{23}} & \sigma_3^2 \end{bmatrix} \\ &= \lambda_1\mathbf{v}_1\mathbf{v}_1^H + \lambda_2\mathbf{v}_2\mathbf{v}_2^H + \lambda_3\mathbf{v}_3\mathbf{v}_3^H \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{X}(p, q) = [x_1(p, q), x_2(p, q), x_3(p, q)]^T$, 是 3 个通道同一像素所对应数据排成的矢量; $E\{\cdot\}$ 表示统计平均; $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ 为协方差矩阵的 3 个特征值, $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3$ 为所对应的特征矢量; $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2$ 分别为 3 个通道的功率; $\rho_{12}e^{j\phi_{12}}, \rho_{13}e^{j\phi_{13}}, \rho_{23}e^{j\phi_{23}}$ 分别为 1、2 通道, 1、3 通道和 2、3 通道的复相关系数; $\{\cdot\}^T$ 表示转置, $\{\cdot\}^H$ 表示共轭转置。

在 3 幅 SAR 图像经过精确配准后, 杂波的自由度为 1, 系统的可控自由度为 3, 故在 3 通道 SAR 数据的协方差矩阵特征分解后, 存在 1 个大特征值 λ_1 和 2 个小特征值 λ_2 和 λ_3 。在 SAR 图像中, 杂波的能量占绝大部分, 协方差矩阵经过特征分解后, 大特征值所对应的特征矢量 \mathbf{v}_1 构成杂波子空间, 小特征值对应的特征矢量 $\mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3$ 构成噪声子空间, 杂波子空间与噪声子空间正交。运动目标在杂波子空间与噪声子空间中均有分量。将数据矢量 $\mathbf{X}(p, q)$ 以空间基矢量 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3$ 的形式表示如下, 为表达简便省去了坐标 (p, q) :

$$\left. \begin{aligned} H_0: \mathbf{X} &= c_1\mathbf{v}_1 + n_1\mathbf{v}_2 + n_2\mathbf{v}_3 \\ H_1: \mathbf{X} &= c_1\mathbf{v}_1 + s_1\mathbf{v}_1 + s_2\mathbf{v}_2 + s_3\mathbf{v}_3 + n_1\mathbf{v}_2 + n_2\mathbf{v}_3 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中 $c_1, n_1, n_2, s_1, s_2, s_3$ 分别为数据矢量在相应基矢量上的系数。

将数据矢量向噪声子空间投影, 就能够把属于杂波子空间的成分抑制掉, 仅留下噪声分量和包含在噪声子空间中的运动目标分量。如式(4)所示:

$$\left. \begin{aligned} H_0: \mathbf{X}_{\text{proj}} &= n_1\mathbf{v}_2 + n_2\mathbf{v}_3 \\ H_1: \mathbf{X}_{\text{proj}} &= s_2\mathbf{v}_2 + s_3\mathbf{v}_3 + n_1\mathbf{v}_2 + n_2\mathbf{v}_3 \\ &= (s_2 + n_1)\mathbf{v}_2 + (s_3 + n_2)\mathbf{v}_3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 \mathbf{X}_{proj} 表示向噪声子空间投影后的数据矢量。由上式可以看出目标的存在会使噪声子空间中的成分增加, 从而也提高了协方差矩阵特征分解后的小特征值的幅度。因此可以利用小特征值的幅度变化情况对运动目标进行检测。

3 通道 SAR 数据协方差矩阵通常采用独立同分布的样本进行估计, 设选取 $M \times N$ 个像素样本进行估计 (M, N 分别代表方位和距离的像素点数, 设 M, N 为奇数), 协方差矩阵的估计值可表示为

$$\hat{\mathbf{R}}_{p, q} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=p-\frac{M-1}{2}}^{p+\frac{M-1}{2}} \sum_{j=q-\frac{N-1}{2}}^{q+\frac{N-1}{2}} \mathbf{X}(i, j)\mathbf{X}^H(i, j) \quad (5)$$

对 SAR 图像中每一像素均构造协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{p, q}$, 并进行特征分解, 比较两个小特征值的幅度和来进行运动目标检

测。由后面的仿真实验也可以看出, 存在运动目标的像素处小特征值的幅度和明显高于其它像素点。

3 运动目标测速定位方法

检测出运动目标后, 我们还需要对运动目标的参数如速度、初始方位位置进行估计。运动目标的切向速度在估计出运动目标的多普勒调频率后即可确定, 具体方法可参见文献[5]。本文讨论的重点是目标径向速度的估计, 故在分析中不考虑切向速度的影响。

首先来分析一下沿航迹排列的多通道 SAR 系统的运动目标信号模型。假设检测到运动目标在 SAR 图像上的位置为 (p, q) , 则第 i 个通道中的运动目标成像后的信号可以写为

$$s_i(p, q) = \sigma(p, q) \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda}r(p, q)\right] \exp\left[-j\frac{2\pi v_r(p, q)d_i}{\lambda v_a}\right], \quad i = 2, \dots, N \quad (6)$$

其中 $\sigma(p, q)$ 为该运动目标的复反射系数, v_a 为平台速度, λ 为波长, $r(p, q)$ 为各通道在成像中心时刻到该目标的斜距, 因为 3 个通道为沿航迹排列, 所以对每个通道而言, $r(p, q)$ 都相等, d_i 为第 i 个通道的相位中心到参考相位中心的距离, 以第 1 个通道的相位中心作为参考, 则 $d_1 = 0$, $v_r(p, q)$ 为运动目标的径向速度, N 是通道数目。

由式(6)可以看出, 不同的通道接收到的目标信号相差一个由目标的径向速度引起的相位, 将该相位项联立就可以得到运动目标的空域导向矢量:

$$\boldsymbol{\gamma} = \left[1, \exp\left[-j\frac{2\pi v_r d_2}{\lambda v_a}\right], \dots, \exp\left[-j\frac{2\pi v_r d_N}{\lambda v_a}\right]\right]^T \quad (7)$$

根据波束形成的思想, 当用该导向矢量构成的权矢量对信号进行波束形成时, 运动目标的信号被相干积累其输出最大, 而由于杂波信号的导向矢量与运动目标的不同故其输出较小从而被抑制。

基于上述分析, 本文提出一种新的运动目标测速方法。首先, 在已经检测到运动目标的基础上, 取两幅 SAR 图像中运动目标点处的干涉相位, 对运动目标的径向速度进行粗略估计。干涉相位和径向速度有如下关系^[6]:

$$v_{\text{coarse}} = \frac{\Delta\phi\lambda v_a}{2\pi d} \quad (8)$$

其中 $\Delta\phi$ 为干涉相位, d 为两通道的间距, λ 为波长, v_{coarse} 是对径向速度的粗略估计值。由于干涉相位受杂波和噪声的影响较大, 所以单纯从干涉相位估计出的径向速度存在一定的误差, 为了提高测速精度, 还要进一步对径向速度进行精确估计。

利用线性约束最小方差准则^[7]构造如下的自适应权矢量:

$$\mathbf{w} = \mu \hat{\mathbf{R}}^{-1} \boldsymbol{\gamma} \quad (9)$$

其中 μ 为复常数, $\hat{\mathbf{R}}$ 为 3 通道 SAR 数据采样协方差矩阵。用权矢量 \mathbf{w} 对数据矢量 $\mathbf{X}(i, j) = [x_1(i, j), x_2(i, j), x_3(i, j)]^T$ 进行自适应波束形成, 当构造的空域导向矢量 $\boldsymbol{\gamma}$ 中的 v_r 等于运

动目标的径向速度时其输出功率最大。如果取 $\mu = 1/(\gamma^H \hat{R}^{-1} \gamma)$ ，输出即为 Capon 功率谱：

$$P_{\text{capon}} = w^H \hat{R} w = \frac{1}{\gamma^H \hat{R}^{-1} \gamma} = \mu \quad (10)$$

在对目标的径向速度已经有了粗略估计的基础上，在 v_{coarse} 左右的范围内以一定步长搜索式(7)中的 v_r 使式(10)输出功率最大，即可得到对运动目标径向速度的精确估计 \bar{v}_r 。

有了目标径向速度的精确估计值，就可以计算出动目标方位向的偏离值^[8]，进而求得其方位的真实位置 \bar{x}_0 ：

$$\bar{x}_0 = x + \frac{\bar{v}_r \cdot r(p, q)}{v_a} \quad (11)$$

x 为运动目标出现在 SAR 图像中的方位位置。

由于在速度搜索前，对径向速度已经有了粗略的估计，所以测速和定位的运算量相当小，在后面的性能分析中也可以看出用本方法对径向速度进行估计能够达到很高的精度。

4 实验结果

4.1 计算机仿真

为验证本文方法的有效性，本节进行了计算机仿真，仿真参数选取如下：载机高度 $H = 4.5\text{km}$ ，载机速度 $v_a = 150\text{m/s}$ ，相邻孔径间距 $d = 0.96\text{m}$ ，中心斜距 $R = 11.5\text{km}$ ，波长 $\lambda = 0.03\text{m}$ ，发射脉冲重复频率 $\text{prf} = 500\text{Hz}$ 。

在仿真的杂波中分别放置 3 个运动点目标，杂波噪声功率比为 30dB，信号杂波功率比为 0dB，运动目标参数如表 1 所示。

表 1 运动目标参数

目标序号	径向速度(m/s)	方位位置(m)	目标斜距(m)
1	1.5	130	11000
2	2.1	145	10800
3	-1.2	-130	11200

对 3 个通道录取的数据用常规 SAR 成像方法所得三维图像如图 1 所示，动目标被完全淹没在杂波中，无法进行分辨。用本文方法进行动目标检测的结果如图 2，3 个运动目标清晰可见。为了定量分析检测效果，如图 3 所示，画出某一距离单元的 DPCA 检测效果与用本文方法检测效果相比较，可见本文方法检测效果要好于 DPCA 方法。

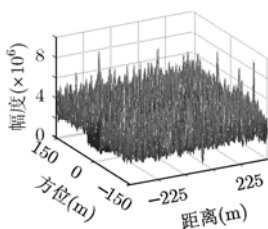


图 1 原始三维 SAR 图像

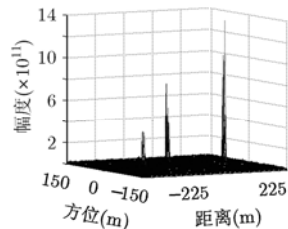


图 2 本文方法动目标检测结果

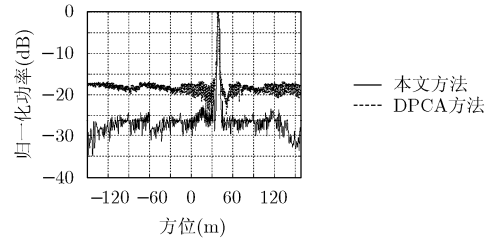


图 3 检测效果对比图

对检测到的运动目标进行径向速度粗略估计得到的估计值依次为： $v_{\text{coarse1}} = 1.32\text{m/s}$ ， $v_{\text{coarse2}} = 1.93\text{m/s}$ ， $v_{\text{coarse3}} = -1.08\text{m/s}$ 。再用构造的空域导向矢量对速度进行精确估计，例如对目标 2，搜索输出功率，其最大值对应的速度值为 2.1170m/s ，即为目标 2 径向速度的精确估计值。

用本文方法对 3 个运动目标参数估计的结果如表 2 所示。

表 2 运动目标参数估计值

目标序号	径向速度估计值(m/s)	方位位置估计值(m)
1	1.5110	137.4864
2	2.1170	146.8175
3	-1.1890	-132.3511

下面对该方法进行性能分析，不存在噪声时，径向速度测量误差随信杂比变化曲线如图 4 所示；信杂比为 0dB 时，径向速度测量误差随信噪比变化曲线如图 5 所示。可以看出，该方法在信杂比、信噪比较低的情况下依然可以获得较好的测速精度。

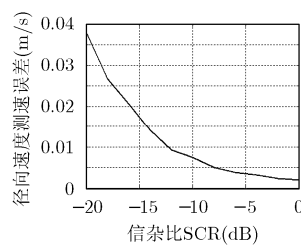


图 4 径向速度测量误差随信杂比变化曲线

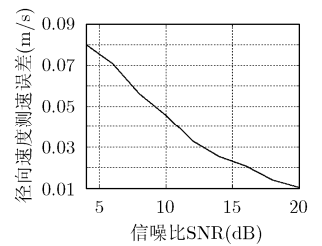


图 5 径向速度测量误差随信噪比变化曲线

4.2 实测数据结果

本节将该算法应用于某机载 3 通道实测数据。在某实测数据块中截取包含运动目标的一部分数据进行分析。图 6 为根据径向速度的估计值，对动目标在 SAR 图像上重新标注的结果。SAR 图像中颜色较黑的部分为一段公路，目标就在这条公路上运动，可以看出图像中有几个较亮的点，这是由于动目标运动而在 SAR 图像上发生了方位偏移。图中白色的圈表示标注到原始方位位置的动目标，可见动目标初始位

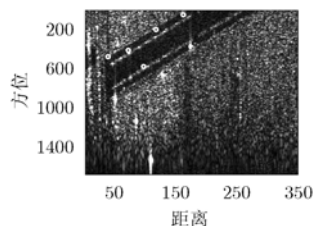


图6 动目标标注在 SAR 图像上

置都在公路上,这也验证了该算法的有效性。对运动目标径向速度的估计值从左到右依次为: -3.69m/s , -6.12m/s , -8.03m/s , -3.81m/s , -2.62m/s , 负号表示目标运动方向为远离载机飞行方向,而且可以看出动目标的径向速度越大方位向偏离越大。

5 结束语

本文提出一种基于协方差矩阵特征分解的多通道运动目标检测和测速定位方法。该方法依据小特征值幅度和的变化检测运动目标,根据两幅 SAR 图像的干涉相位先对目标径向速度进行粗略估计,再用搜索动目标空域导向矢量的方法对径向速度进行精确估计,可达较高测速精度。克服了由于杂波、噪声等因素影响使两幅 SAR 图像的干涉相位存在偏差,造成动目标径向速度估计不准的问题。仿真数据和实测数据都验证了该方法的实用性和优越性。

参考文献

- [1] 王永良, 陈建文, 吴志文. 现代DPCA技术研究[J]. 电子学报, 2000, 28(6): 118-121.
Wang Yong-liang, Chen Jian-wen, and Wu Zhi-wen. Research on modern DPCA techniques[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(6): 118-121.
- [2] Goldstein R M and Zebker H A. Interferometric radar measurement of ocean surface currents[J]. *Nature*, 1987, 328(20): 707-709.
- [3] Gerlach K and Picciolo M L. Airborne/spacebased radar STAP using a structured covariance matrix[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems*, 2003, 39(1): 269-281.
- [4] Sikaneta I, Gierull C, and Chouinard J Y. Metrics for SAR-GMTI based on eigen-decomposition of the sample covariance matrix[C]. Radar Conference 2003: 442-447.
- [5] 王琦, 王岩飞. 利用短时FFT的距离-多普勒域SAR运动目标检测[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(4): 628-631.
Wang Qi and Wang Yan-fei. Moving target detection with short time FFT for SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(4): 628-631.
- [6] Kim D J, Moon W M, Moller D, and Imel D A. Measurements of ocean surface waves and currents using L-and C-band along-track interferometric SAR[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(12): 2821-2832.
- [7] Frost O L. An algorithm for linearly constrained adaptive array processing[J]. *Proc. IEEE*, 1972, 60(8): 926-935.
- [8] Raney R K. Synthetic aperture imaging radar and moving targets[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1971, 7(3): 499-505.

蔚 婧: 女, 1982年生, 博士生, 研究方向为地面运动目标检测、阵列信号处理在雷达信号处理中的应用。

廖桂生: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为阵列信号处理及其在雷达信号处理中的应用、雷达成像及动目标检测、分布式小卫星雷达系统、智能天线等。

曾 操: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理及其在雷达信号处理中的应用。