

一种鲁棒的三通道 SAR 慢动目标 检测、定位算法研究

沈明威 朱岱寅 朱兆达

(南京航空航天大学信息科学与技术学院, 南京 210016)

摘要 该文研究三通道合成孔径雷达(SAR)在通道不平衡条件下的慢动目标检测、定位问题。实际系统中,由于雷达系统存在通道幅相不一致等误差,干涉 SAR/GMTI 技术的杂波抑制性能急剧下降,无法检测慢动目标并进行定位。本文提出了一种分块 SAR 图像通道误差校正算法,进而采用空域自适应处理对慢动目标进行检测及定位。仿真实验表明该方案对系统误差的敏感度显著下降,具有很好的鲁棒性,非常适合实际工程实施。

关键词 合成孔径雷达 地面慢动目标检测 通道误差

中图法分类号: TN959.73 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)01-0030-05

Study on A Robust Slowly Moving Target Detection and Location Algorithm Based on Three-port SAR

SHEN Ming-wei, ZHU Dai-yin, ZHU Zhao-da

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract In this paper, a robust slowly-moving target detection and location algorithm is investigated. In practice, due to channel imbalance such as gain and phase error, the clutter suppression performance of the interferometric SAR/GMTI is significantly degraded, and makes it difficult to detect and locate the moving target. A channel error calibration algorithm based on sub-patch SAR image is proposed, and the spatial adaptive processing is used for the moving target detection and location. The simulation results are presented to demonstrate that, the proposed algorithm is robust to system errors, and is suitable for engineer implementation.

Keywords synthetic aperture radar (SAR), ground slowly moving target detection, channel error

1 引言

地面慢动目标检测及定位是机载雷达迫切需要具备的一项功能,但机载雷达下视工作,地面慢动目标在时、空、频域都淹没在强大的主瓣地杂波中。因此,对慢动目标的检测通常都是通过主杂波进行抑制,提高慢动目标信杂比这一途径来实现的,如偏置相位中心天线(DPCA)^[1]、空时自适应处理

(STAP)^[2]、多通道干涉合成孔径雷达动目标检测技术(SAR/GMTI)^[3-4]。目前已达到实用的机载雷达慢动目标检测技术是多通道干涉 SAR/GMTI 技术, JSTARS 就采用三通道干涉 SAR/GMTI 技术抑制地杂波,实现慢动目标检测及定位功能^[3-5]。

三通道干涉 SAR/GMTI 在高分辨率 SAR 成像提高慢动目标的信杂比基础上,利用不同通道 SAR 图像中对应像素的相位信息通过空域对消来抑制地杂波,进而用干涉相位测向技术估计慢动目标的真

基金项目:国家自然科学基金项目(60502030);航空科学基金项目(05D52027)

收稿日期:2007-04-28;改回日期:2007-10-23

第一作者简介:沈明威(1981~),男,2008年于南京航空航天大学获通信与信息系统专业博士学位。研究方向为慢动目标检测和空时自适应处理。E-mail: smv_nuaa@hotmail.com

实方位^[4-5]。实际系统存在各种误差,如通道不平衡等,该方案的慢动目标检测及定位性能急剧下降。因此提出一种易于工程实施、鲁棒的三通道 SAR 慢动目标检测、测速及定位算法。

2 三通道 SAR 回波信号

图1是三通道 SAR 成像斜距平面几何关系, A 、 B 、 C 表示3个接收子天线的相位中心,相邻间距为 d ,发射相位中心位于 B 处。 O 为成像区参考点,位于天线波束视线方向, P 为成像区内任意一点,天线波束斜视角为 θ_s ,雷达波长为 λ ,载机速度为 V_a 。从天线 A 、 B 、 C 接收的回波分别采用线性 R-D 成像算法^[6],各通道 SAR 图像的运动补偿都是对同一成像区中心点进行的。设散射点 P 相对天线波束指向的方位角为 θ ,经 SAR 处理后,各通道接收到散射点 P 的回波信号为^[5]

$$\begin{cases} S_A = G_A e^{j\psi_A} \sigma_p \cdot \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} (R_2 + R_3 - 2R_0)\right] \\ S_B = G_B e^{j\psi_B} \sigma_p \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (R_2 - R_0)\right] \\ S_C = G_C e^{j\psi_C} \sigma_p \cdot \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} (R_2 + R_4 - 2R_0)\right] \end{cases} \quad (1)$$

式中, σ_p 为 P 点的复反射系数, G_A 、 ψ_A 、 G_B 、 ψ_B 和 G_C 、 ψ_C 分别为 A 、 B 、 C 各通道的增益系数与相位延迟。

由图1的几何关系, $R_3 - R_2 = R_2 - R_4 = d \sin\theta$ 。当理想通道幅相一致,即 $G_A = G_B = G_C$, $\psi_A = \psi_B = \psi_C$ 时, A 、 B 、 C 各通道接收到的同一散射点的回波信号具有确定的相位关系:

$$\begin{cases} S_A = S_B \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta\right) \\ S_B = S_B \\ S_C = S_B \cdot \exp\left(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta\right) \end{cases} \quad (2)$$

A 、 B 、 C 各通道接收信号经 SAR 聚焦处理,输出的 SAR 图像是复原的地面散射特性。根据上述分析,忽略通道幅相误差,各通道 SAR 图像对应像素存在确定的相位关系。不失一般性,假定 $G_B = 1$ 、 $\psi_B = 0$ 。那么各通道 SAR 图像对应像素满足如下关系:

$$\begin{cases} S_A(R, f_d) = G_A e^{j\psi_A} S_B(R, f_d) W(R, f_d) \\ S_C(R, f_d) = G_C e^{j\psi_C} S_B(R, f_d) / W(R, f_d) \end{cases} \quad (3)$$

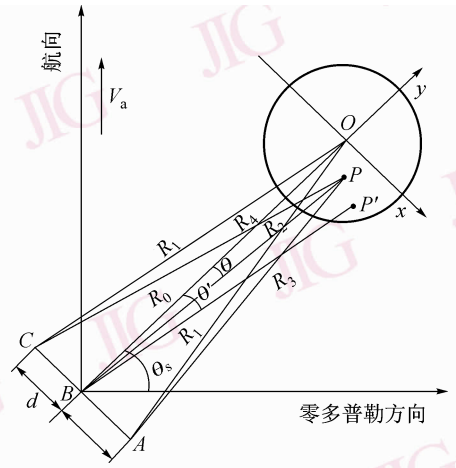


图1 成像几何关系

Fig. 1 Imaging Geometry

式中, $S_A(R, f_d)$ 、 $S_B(R, f_d)$ 和 $S_C(R, f_d)$ 分别表示 A 、 B 、 C 通道 SAR 图像,其中 R, f_d 分别为距离和方位坐标。 $W(R, f_d)$ 为逐像素相位延迟因子^[5-6],即

$$\begin{aligned} W(R, f_d) &= \exp\left(-j \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta\right) \\ &= \exp\left(-j \frac{\pi d \cdot f_d}{V_a \cos\theta_s}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

慢动目标由于径向速度引入附加的多普勒频率,在 SAR 图像中其方位位置会偏离真实位置。假定位于 θ 处的慢动目标具有径向速度 V_r ,在 SAR 图像中将位于 θ' 。即

$$\sin\theta' = \sin\theta + V_r / (V_a \cdot \cos\theta_s) \quad (5)$$

理想通道平衡下,可采用干涉 SAR/GMTI 方案逐像素空域对消来抑制地杂波检测慢动目标,但存在通道误差时,其杂波抑制性能急剧恶化。

3 鲁棒的慢动目标检测、定位算法

3.1 分块 SAR 图像通道误差校正

Soumech 指出, SAR 图像各子块通道误差可近似不变^[7-8]。因此,对于 A 、 B 、 C 3 幅 SAR 图像各子块,幅相误差可近似为常数。由式(3),为了估计 A 、 C 通道的幅度增益和相位延迟,可首先逐像素补偿固定目标在 A 、 C 两幅 SAR 图像相对 B 通道 SAR 图像的相位延迟因子。记补偿后的 A 、 C 两幅 SAR 图像分别为

$$\begin{cases} S_A^{(1)}(R, f_d) = S_A(R, f_d) / W(R, f_d) = G_A e^{j\psi_A} S_B(R, f_d) \\ S_C^{(1)}(R, f_d) = S_C(R, f_d) \cdot W(R, f_d) = G_C e^{j\psi_C} S_B(R, f_d) \end{cases} \quad (6)$$

在各子块 A 、 C 通道的增益系数 G_A 、 G_C 及相位延迟 ψ_A 、 ψ_C 近似为常数,因此根据最小功率剩余准则分别估算 A 、 C 通道的增益系数及相位延迟。各子块估计的 A 、 C 通道的相位延迟系数 ψ'_A 、 ψ'_C 分别为

$$\begin{cases} \psi'_A = \arg\left[\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_A^{(1)}(R_i, f_{d_j}) S_B^*(R_i, f_{d_j})\right] \\ \psi'_C = \arg\left[\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_C^{(1)}(R_i, f_{d_j}) S_B^*(R_i, f_{d_j})\right] \end{cases} \quad (7)$$

式中, $*$ 为共轭运算符, $\arg(\cdot)$ 为取幅角运算, M 、 N 分别为各子块距离、方位像素大小。增益系数 G'_A 、 G'_C 的计算公式分别为

$$\begin{cases} G'_A = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \operatorname{Re}[S_A^{(1)}(R_i, f_{d_j}) S_B^*(R_i, f_{d_j}) e^{-j\psi'_A}]}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |S_B(R_i, f_{d_j})|^2} \\ G'_C = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \operatorname{Re}[S_C^{(1)}(R_i, f_{d_j}) S_B^*(R_i, f_{d_j}) e^{-j\psi'_C}]}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |S_B(R_i, f_{d_j})|^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\operatorname{Re}(\cdot)$ 为复数取实部运算。由式(7)、式(8)可以进一步校正 A 、 B 、 C 3 幅 SAR 图像各子块的通道误差,即

$$\begin{cases} S_A^{(2)}(R, f_d) = S_A^{(1)}(R, f_d) / (G'_A \cdot e^{j\psi'_A}) \\ S_C^{(2)}(R, f_d) = S_C^{(1)}(R, f_d) / (G'_C \cdot e^{j\psi'_C}) \end{cases} \quad (9)$$

式中, $S_A^{(2)}(R, f_d)$ 、 $S_C^{(2)}(R, f_d)$ 分别表示逐像素补偿相位延迟因子和通道误差校正后的 A 、 C 通道 SAR 图像。

3.2 空域自适应慢动目标检测

通过补偿相位延迟因子和通道误差校正后,静止目标在 3 幅 SAR 图像上可分别表示为

$$\begin{cases} S_A^{(2)}(R_i, f_{d_j}) = \sigma_{ij} + n_{ij}^A \\ S_B(R_i, f_{d_j}) = \sigma_{ij} + n_{ij}^B \\ S_C^{(2)}(R_i, f_{d_j}) = \sigma_{ij} + n_{ij}^C \end{cases} \quad (10)$$

式中, (R_i, f_{d_j}) 表示 SAR 图像上距离为 R_i , 多普勒频率为 f_{d_j} 处的像素单元, σ_{ij} 为该像素单元的复散射系数, n_{ij}^A 、 n_{ij}^B 和 n_{ij}^C 分别为 A 、 B 和 C 通道在该像素单元叠加的噪声信号。

假定径向速度为 V_r 的慢动目标位于 SAR 图像 (R_m, f_{d_n}) 处。经相位延迟因子补偿和通道误差校正后, 3 幅 SAR 图像 (R_m, f_{d_n}) 处的信号可表示为

$$\begin{cases} S_A^{(2)}(R_m, f_{d_n}) = \sigma_{mn} + \sigma_t \exp[-j2\pi dV_r / (\lambda V_a \cos\theta_s)] + n_{mn}^A \\ S_B(R_m, f_{d_n}) = \sigma_{mn} + \sigma_t + n_{mn}^B \\ S_C^{(2)}(R_m, f_{d_n}) = \sigma_{mn} + \sigma_t \exp[j2\pi dV_r / (\lambda V_a \cos\theta_s)] + n_{mn}^C \end{cases} \quad (11)$$

式中, σ_{mn} 为 3 幅 SAR 图像上位于 (R_m, f_{d_n}) 处静止目标复反射系数, n_{mn}^A 、 n_{mn}^B 和 n_{mn}^C 分别为 A 、 B 和 C 通道在该像素单元叠加的噪声信号, σ_t 为出现在该像素单元慢动目标信号的复反射系数。

可以采用空域自适应处理来抑制杂波和噪声,检测位于 (R_m, f_{d_n}) 处的慢动目标信号,其权矢量满足下面的约束关系^[2]

$$\begin{cases} \min \mathbf{W}^H \mathbf{R}_c \mathbf{W} \\ \mathbf{W}^H \mathbf{S}_s = 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中, \mathbf{S}_s 为对应于径向速度 V_r 的空域导引矢量,即

$$\mathbf{S}_s = [\exp[-j2\pi dV_r / (\lambda V_a \cos\theta_s)], 1, \exp[-j2\pi dV_r / (\lambda V_a \cos\theta_s)]] \quad (13)$$

\mathbf{R}_c 为静止目标(杂波)和噪声的协方差矩阵。记

$$\mathbf{T}_{ij} = [S_A^2(R_i, f_{d_j}), S_B(R_i, f_{d_j}), S_C^2(R_i, f_{d_j})]^H \quad (14)$$

式中, \mathbf{T}_{ij} 不包含慢动目标信号。那么协方差矩阵 $\mathbf{R}_c = E(\mathbf{T}_{ij} \mathbf{T}_{ij}^H)$, 式中 $E(\cdot)$ 为期望函数。假定地面复反射系数 σ_{ij} 服从零均值复高斯分布, 方差为 σ_0^2 。各通道噪声信号为零均值高斯白噪声, 方差为 σ_n^2 。协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_c = \begin{bmatrix} \sigma_0^2 & \sigma_0^2 & \sigma_0^2 \\ \sigma_0^2 & \sigma_0^2 & \sigma_0^2 \\ \sigma_0^2 & \sigma_0^2 & \sigma_0^2 \end{bmatrix} + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (15)$$

因此,我们无需估计固定目标和噪声的协方差矩阵,只需确定各像素单元的平均杂噪比即可。最优自适应解为^[2]

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{S}_s \quad (16)$$

当然协方差矩阵 \mathbf{R}_c 也可通过样本来估计,但会显著增加系统运算量。不同径向速度的慢动目标对应于不同的空域导引矢量,可以通过搜索空域导引矢量来检测慢动目标。

3.3 慢动目标径向速度估计及定位

理论分析和仿真试验表明,利用最优权矢量,根据输出信杂比,能有效检测慢动目标信号。但对于检测出的慢动目标还需进一步准确估计其径向速度和真实方位,下面我们着重来研究一种新的慢动目

标径向速度估计算法。

3.2 节分析表明,能准确估计慢动目标的空域导引矢量就能确定慢动目标的径向速度。由于空间只有 3 个通道,空间分辨率较弱,存在系统误差情况下,根据最大输出信噪比并不能准确确定慢动目标导引矢量。SAR 经过两维相干积累,系统信噪比极高。因此,忽略系统噪声,由式(11)发现存在如下关系:

$$\frac{S_A^{(2)}(R_m, f_{d_n}) - S_B(R_m, f_{d_n})}{S_B(R_m, f_{d_n}) - S_C^{(2)}(R_m, f_{d_n})} = \exp[-j2\pi dV_r/(\lambda V_a \cos\theta_s)] \quad (17)$$

因此,慢动目标的径向速度 V_r 的估计值为

$$V_r' = -\arg\left(\frac{S_A^{(2)}(R_m, f_{d_n}) - S_B(R_m, f_{d_n})}{S_B(R_m, f_{d_n}) - S_C^{(2)}(R_m, f_{d_n})}\right) \times (\lambda V_a \cos\theta_s) / 2\pi d \quad (18)$$

由估计的径向速度 V_r' ,可进一步确定目标的真实方位

$$\sin\theta = \sin\theta' - V_r' / (V_a \cos\theta_s) \quad (19)$$

综上所述,本文提出的三通道 SAR 慢动目标检测及定位信号算法能有效克服通道误差,不仅能实现杂波抑制和慢动目标检测,而且能精确测定慢动目标径向速度和真实方位。其信号处理框图如图 2 所示。

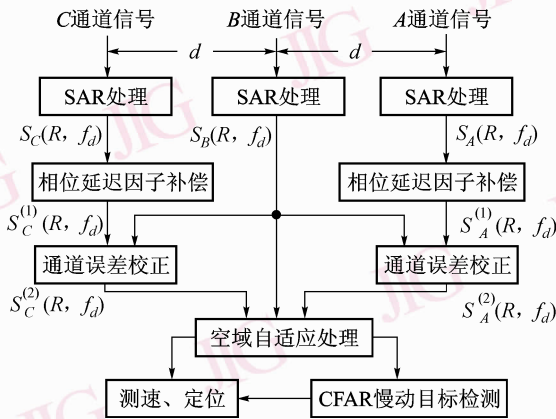


图 2 检测及定位信号处理框图

Fig. 2 Signal processing chart of detection and location

4 仿真结果

通过计算机仿真,研究本文提出的三通道 SAR 慢动目标检测与定位算法的性能。仿真采用的主要参数如表 1 所示,SAR 图像距离、方位分辨率均

为 15 m。仿真中以一幅实测 SAR 图像模拟地面杂波。通道间不完全匹配,相邻通道间幅度误差为 3 dB,相位误差为 5° 。在地面距离坐标 300 m,方位坐标 -500 m 处设置一慢动目标 D ,且径向速度为 3 m/s,对消前慢动目标 D 的输入信杂比为 0 dB。

表 1 雷达仿真参数

Tab. 1 Radar simulation parameters

参数名称	取值
雷达波长	$\lambda = 3.125 \text{ cm}$
子孔径间距	$d = 0.35 \text{ m}$
LMF 信号带宽	$B = 10 \text{ MHz}$
信号带宽	$\tau = 10 \text{ }\mu\text{s}$
载机速度	$V_a = 200 \text{ m/s}$
载机高度	$H = 6 \text{ km}$
成像距离	$R = 40 \text{ km}$
波束斜视角	$\theta_s = 45^\circ$

图 3 给出了通道 A、B、C 各自 SAR 成像结果。图 4 为通道 A、B、C 采用干涉 SAR/GMTI 方案处理结果。由于存在通道误差,干涉 SAR/GMTI 技术并不能有效抑制杂波,慢动目标淹没在杂波中无法辨识。

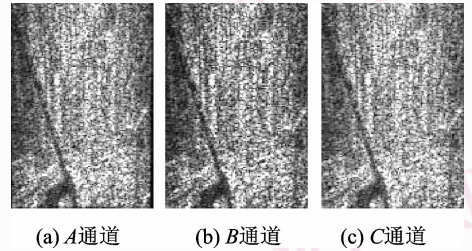


图 3 SAR 成像结果

Fig. 3 The result of SAR imaging

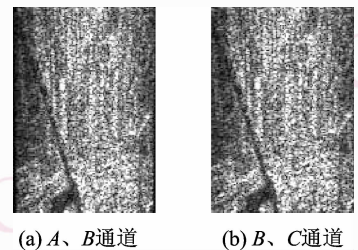


图 4 干涉 SAR/GMTI 结果

Fig. 4 The result of interferometric SAR/GMTI

图 5 (a) 为本文算法, 经通道误差校正后, 逐像素采用空域自适应处理后的输出结果; 图 5 (b) 为处理后慢动目标所在距离单元的方位剖面。可见, 本文方法能有效克服通道误差, 处理后输出信杂比提高了约 30 dB, 能有效检测慢动目标。采用本文算法估计的慢动目标径向速度为 $V_r = 3.06$ m/s, 慢动目标方位坐标估计值为 -520 m。系统误差下, 能较准确地确定慢动目标速度及方位。

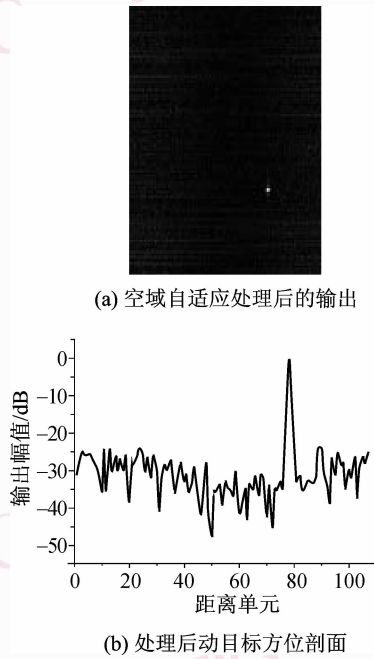


图 5 空域自适应处理输出结果

Fig. 5 The result of spatial adaptive processing

5 结 论

通过以上的分析和仿真结果表明, 本文提出的鲁棒的三通道 SAR 慢动目标检测及定位算法在系

统存在误差的情况下能可靠地抑制地杂波, 进而实现地面慢动目标检测及定位。该方案相对于干涉 SAR/GMTI 方案具有很好的鲁棒性, 对系统误差不敏感, 对通道间的一致性要求较低, 因此易于工程实施。

参考文献 (References)

- Blum R C, Melvin M L, Wicks M C. An Analysis of Adaptive DPCA [A]. In: Proceedings of the 1996 IEEE National Radar Conference [C], Ann Arbor, Michigan, USA, 1996: 303-308.
- Klemm R. Principles of Space-time Adaptive processing [M]. London: IEE Press, 2002.
- Tobin M. Real time simulations SAR/GMTI in a tactical airborne environment [A]. In: Proceedings of European Conference on Synthetic Aperture Radar [C], Koenigswinter, Berlin, Germany, 1996: 63-66.
- Zhu Dai-yin, Zhu Zhao-da. Studies of ground slow-moving target imaging by airborne interferometric SAR/ISAR [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2003, 25(5): 586-590. [朱岱寅, 朱兆达. 机载干涉 SAR/ISAR 对地慢速目标成像研究[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(5): 586-590.]
- Ye Shao-hua. Study on Airborne SAR Raw Data Imaging and Interferometric SAR/GMTI [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2002. [叶少华. 机载 SAR 原始数据成像处理和干涉 SAR/GMTI 技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.]
- Zhu Dai-yin, Zhu Zhao-da. Studies on airborne squint-looking SAR patch-mapping [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(9): 1387-1389. [朱岱寅, 朱兆达. 机载 SAR 斜视区域成像研究[J]. 电子学报, 2002, 30(9): 1387-1389.]
- Soumekh M. Moving targets detection and imaging using an X band-track monopulse SAR [J]. IEEE Transactions on AES, 2002, 38(1): 315-333.
- Soumekh M. Signal subspace fusion of uncalibrated sensors with application in SAR and diagnostic medicine [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(1): 127-137.