

基于子孔径分解的 SAR 动目标检测方法

张 露¹, 郭华东¹, 韩春明¹, 周 平²

(1. 中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室, 北京 100101;

2. 北京环境特性研究所 目标与环境电磁散射辐射国家科技重点实验室, 北京 100854)

摘 要: 运动目标在合成孔径雷达 SAR(Synthetic Aperture Radar) 图像中的成像会出现模糊, 散焦等现象, 并且会在方位向出现明显的偏移, 这些会导致运动目标的目标杂波比 TCR(Target to clutter Ratio) 降低. 本文在子孔径分解技术的基础上提出一种从单通道 SAR 单视复图像 SLC(Single Look Complex) 中检测动目标的方法, 该方法通过子孔径图像之间的相减操作来抑制杂波, 从而提高 TCR. 通过对机载 CV-580 数据和星载 Envisat ASAR 数据进行测试, 证明了该方法的有效性.

关键词: 动目标检测; 子孔径分解; SAR

中图分类号: TN957. 52 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2008)06-1210-04

Moving Targets Detection in SAR Images Based on Sub-Aperture Decomposition

ZHANG Lu¹, GUO Huadong¹, HAN Chunming¹, ZHOU Ping²

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. National Key Laboratory of Target and Environment Electromagnetic Scattering and Radiation, Beijing Institute of Environmental Characteristics, Beijing 100854, China)

Abstract: Moving targets appear seriously degraded with smearing, defocusing and apparent shifts in the azimuth direction in Synthetic aperture radar (SAR) images and give rise to a considerable loss of the target to clutter ratio (TCR). This paper proposes a method to detect moving targets in single channel SAR single look complex (SLC) image based on sub-aperture decomposition technique. The method can suppress the clutter by image subtraction between two sub-aperture images, therefore enhance the TCR. The effectiveness of the method is demonstrated on airborne Convair-580 data and Envisat ASAR data.

Key words: Moving targets detection; sub-aperture decomposition; SAR

1 引言

由于 SAR 图像在合成过程中仅仅考虑静止目标, 运动目标在 SAR 图像中的成像会出现严重的模糊现象, 同时在方位向的成像位置会发生偏移, 从而降低运动目标 TCR^[1,2]. 具体来讲, 若目标具有恒定的垂直轨道的速度, 成像位置在方位向会发生明显的偏移^[3], 若目标具有恒定的沿轨道方向的速度, 将会导致目标的模糊^[3,4]. 提高 TCR 有利于运动目标的检测, 而 TCR 的提高通过抑制杂波来实现^[5].

在动目标检测领域, 许多方法已经被提出. 其中, 基于多通道 SAR 图像的动目标检测方法主要有相位中心偏置天线 DPCA(Displaced Phase Centre Antenna) 技术, 空时自适应处理 STAP 技术(Space-Time Adaptive Processing), 沿航迹干涉 ATI(Along Track Interferometry) 技术^[4,6], 以及应用于已合成全极化数据的 |HV-VH| 技术^[2]等等. 基于单通道 SAR 图像的动目标检测方法主

要有应用于未合成原始数据的目标轨迹法^[5], 和单天线相干 SAI(Single Antenna Interferometer) 方法^[7].

然而, 单通道 SAR 图像的动目标检测方法所采用的未合成原始数据不容易获取, 且 SAR 图像合成过程复杂. 目前, 在通常的各类应用中主要使用已合成的图像数据. 本文利用子孔径分解技术^[8,9]将单通道 SAR SLC 图像数据分解, 生成多个子孔径图像, 分析动目标在不同子孔径图像中的成像特点. 利用这些特点, 采用子孔径图像相减方法来抑制噪声, 从而提高运动目标 TCR, 有利于运动目标的检测. 实验数据分别采用 CV-580 SLC 机载数据和 Envisat ASAR SLC 星载数据.

2 理论分析

2.1 子孔径分解理论

在 SAR 图像合成的过程中, 该图像的每一个像素的获取都是经历了相当长的一段时间(合成孔径时间), 在这个过程中, 同一目标的许多低分辨率的回波响应被

合成, 从而形成全分辨率的图像, 这些低分辨率的回波分别对应着不同的多普勒频率段。那么相反, 通过多普勒频率的分解可以将合成后的全分辨率的图像分解为一系列低分辨率的图像, 采用的方法是在方位向进行傅立叶变换, 这就是子孔径分解技术^[8,9], 该技术在许多应用领域已经被认为是一个非常有用的工具。

子孔径分解方法分为以下几步:

1. 将图像在方位向通过傅立叶变换转换到距离-多普勒域, 在该域中进行权重函数的估计, 权重函数的幅度值可以由距离向幅度值的平均得到。

2. 计算权重函数的逆函数, 并归一化, 这就是所求的纠正函数。

3. 将纠正函数作用于图像的距离-多普勒域, 就消除了天线权重影响, 然后按照子图像个数需求分割频率, 得到子孔径图像。

4. 得到的子孔径图像在距离-多普勒域中同样要消除点目标脉冲响应旁瓣的影响, 因此还需要乘以权重函数后再进行逆傅立叶变换。经过逆傅立叶变换后, 子孔径图像转换到空间域, 完成子孔径分解。

当 SAR 传感器照射方向正好与其飞行方向垂直时, 目标响应的多普勒频率可以用式(1)来表示, 该式可以解释子孔径图像间多普勒频率的关系。

$$f_d(t) = \frac{2v^2}{\lambda_0 r_0} t \text{ with } -\frac{v \Delta Y}{\lambda_0 r_0} \leq \frac{v \Delta Y}{\lambda_0 r_0} \quad (1)$$

式中, $f_d(t)$ 是多普勒频率, ΔY 是方位向的刈幅宽度, v 是 SAR 传感器的速度, λ_0 是 SAR 传感器所发射电磁波的波长, r_0 是传感器与目标的距离, t 是合成孔径时间, 当传感器与目标的连线方向与飞行方向垂直时, t 等于零。如果子孔径的频率范围为 $f_{t1} \sim f_{t2}$, 那么这部分数据包含了目标从 t_1 到 t_2 的响应。

2.2 运动目标检测

Ouchi 在早期对 SAR 图像进行多视处理的工作中, 描述了动目标在子孔径图像中的特点^[10], Ouchi 所说的子孔径图像是从 SAR 原始未合成数据产生的, 但是我们从 SLC 数据通过子孔径分解方法生成的子孔径图像

与未合成原始数据生成的子孔径图像是相同的。

如图 1 所示, 一个点目标以恒定速度 v 运动, 它的运动方向与方位向的夹角为 φ 。假设当 SAR 传感器正好垂直照射到此目标的时候, 该目标正通过地面坐标的原点 $(0, 0)$, 第 n 个子孔径中动目标的成像位置为:

$$\begin{aligned} X_n &= -v_r R / V + 2v_x T_n \\ Y_n &= v_y T_n \end{aligned} \quad (2)$$

其中 X 和 Y 分别表示图像坐标中的方位向变量和地距方向变量, R 表示 SAR 传感器与图 1 所提到的地面坐标系的原点的距离, T_n 表示第 n 个子孔径的中心时间, $-v_r R / V$ 表示运动目标在方位向的偏移, 不过此偏移在各个子孔径图像中是相同的。根据该式, 运动目标在第 j 个子孔径图像和第 i 个子孔径图像所在位置的差为:

$$\begin{aligned} X_{i-j} &= 2v_x (T_i - T_j) \\ Y_{i-j} &= v_y (T_i - T_j) \end{aligned} \quad (3)$$

对于静止目标或者杂波, $v = 0$, 也就是 $v_r = v_x = v_y = 0$ 。根据式(3), $X_{i-j} = 0$, $Y_{i-j} = 0$ 。该结果说明静止目标或者杂波在不同的子孔径图像中所成像的位置是固定的。而对于运动目标, v 不再等于零, 其所成像的位置将不再相同。

对于静止目标或者杂波而言, 不同的子孔径图像中的成像位置是相同的, 所以有:

$$I_C^i(X, Y) \approx I_C^j(X, Y) \quad (4)$$

其中, $I_C^i(X, Y)$, $I_C^j(X, Y)$ 分别为静止目标在第 i 个子孔径图像和第 j 个子孔径图像的强度。将二者相减, 得到式(5), 表明相减可以有效的抑制杂波。

$$I_C^{i-j}(X, Y) = I_C^i(X, Y) - I_C^j(X, Y) \approx 0 \quad (5)$$

而对于运动目标, 其不同子孔径图像中的成像位置是不同的, 这就导致若动目标第 i 个子孔径图像中的成像位置是 (X, Y) , 其强度用 $I_M^i(X, Y)$ 表示, 第 j 个子孔径图像中 (X, Y) 位置有可能是杂波, 强度用 $I_C^j(X, Y)$ 表示, 则二者相减得到:

$$I_M^{i-j}(X, Y) = I_M^i(X, Y) - I_C^j(X, Y) \approx 0 \quad (6)$$

那么, 相减后, 运动目标的 TCR 为:

$$TCR_{\text{sub}} = \frac{I_M^{i-j}(X, Y)}{I_C^{i-j}(X, Y)} \quad (7)$$

由于, $I_C^{i-j}(X, Y) \approx 0$, TCR_{sub} 和原来图像的 TCR 相比, 将会是一个很大的值。

总之, 子孔径图像之间相减能够抑制静态杂波, 从而提高运动目标的 TCR。那么, 运动目标就可以通过恒虚警率 CFAR (Constant False Alarm Rate) 方法或者更简单的阈值方法检测出来。

3 实验描述与结果

实验数据分别选择机载 CV-580 SLC 数据, 图像采

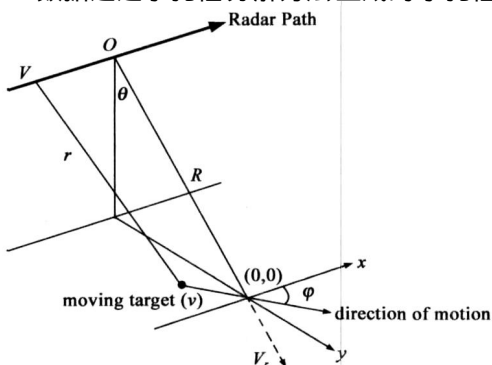


图 1 SAR 几何关系

样率为 $(4.0\text{m} \times 0.43\text{m})$, VV 波段, 获取于中国广东省的肇庆地区和星载 Envisat ASAR SLC 数据, 采样率为 $(7.80\text{m} \times 4.06\text{m})$, VV 波段, 获取于中国南海.

首先对原图像进行子孔径分解, 生成两个子孔径图像, 分别用 $S1$ 和 $S2$ 表示. 在进行图像相减之前, 需要对子孔径图像进行多视处理和几何校正. 多视处理一方面可以减小相干斑噪声的影响, 一方面可以使图像满足图像所要求的分辨率. 几何校正是为了更有效的抑制杂波. 本文中, 对于 CV-580 数据, 在方位向将 9 个像素平均得到多视图像; 对于 ASAR 数据, 采用 (7×4) 窗口进行多视处理. 图 2 为本次实验中的一个运动目标(表 1 中的 No. 3)分别在子孔径图像 $S1$ 和 $S2$ 中方位向的强度剖面图, 从图中可以清楚的看出, 该目标的峰值在不同的子孔径图像中成像位置不同.

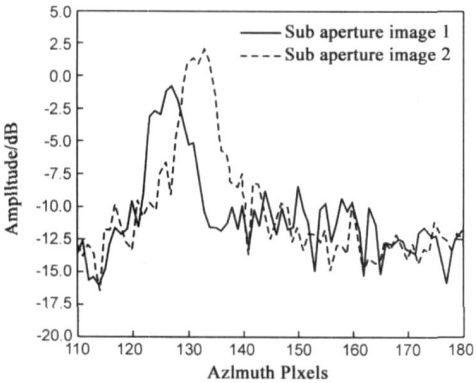


图 2 运动目标在不同子孔径图像中的成像位置对比

为了正确的对比相减后图像与原图像之间的 TCR, 原图像也需要进行多视处理和几何校正. 本文中, 相减后的图像表示为 $||S1| - |S2||$. TCR 为目标峰值与杂波的平均值之间的比值^[2]. 表 1 是实验的结果, 对于 CV-580 数据, TCR 平均增加了 5.11dB; 对于 ASAR 数据, TCR 平均增加了 3.10dB, 所以, 该方法既适应于机载数据, 同样也适应于和星载数据. 图 3(a) 和图 3(b) 分别代表 CV-580 数据的强度图和 $||S1| - |S2||$ 图, 在该图中, 选择阈值为 -5dB , 并将大于 -5dB 的像素标志为红色, 从图中可以看出, 一些目标被检测出来.

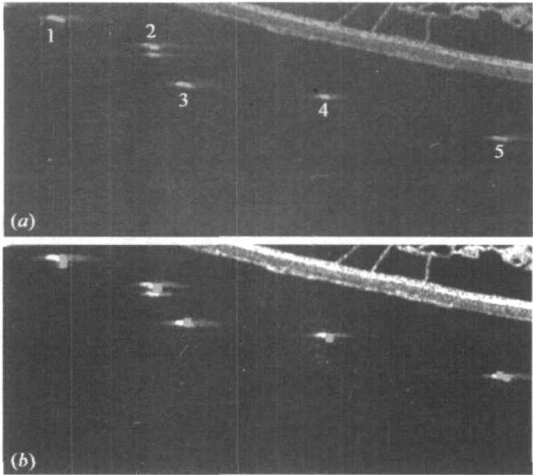


图 3 CV-580 SAR 数据动目标检测结果.(a)强度图;(b) $||S1|-|S2||$ 图, 红色代表检测结果

表 1 实验结果

No.	Data (VV)	Amplitude image (dB) ^a			S1 - S2 image(dB) ^b			TCR Enhancement (dB)
		Target	Clutter	TCR	Target	Clutter	TCR	
1	CV	1.04	- 11.80	12.84	0.86	- 17.45	18.31	5.47
2	CV	- 0.36	- 11.55	11.91	- 1.02	- 17.70	16.68	4.77
3	CV	2.36	- 12.37	14.73	1.46	- 18.24	19.70	4.97
4	CV	- 0.66	- 11.87	11.21	- 2.29	- 17.45	15.16	4.95
5	CV	- 1.49	- 11.87	10.38	- 1.94	- 17.70	15.76	5.38
6	ASAR	29.13	22.00	7.13	24.90	14.00	10.90	3.77
7	ASAR	33.53	23.05	10.48	27.22	15.39	11.83	1.35
8	ASAR	32.26	23.51	8.75	28.36	15.62	12.74	3.99
9	ASAR	26.98	19.46	7.52	23.44	11.61	11.83	4.31
10	ASAR	26.59	19.60	6.99	20.78	11.70	9.08	2.09

^a 原始图像的测试值, ^b $S1$ 和 $S2$ 分别表示不同的子孔径图像

ASAR 数据中目标分布不集中, 分散在很大的范围内, 无法整体显示, 以两个目标(No. 6, 7) 为例, 图 4(a) 和图 4(b) 即为这两个目标 ASAR 数据的强度图和 $||S1| - |S2||$ 图, 选择阈值为 20dB, 这两个目标同样可以被

检测出来. 这些被检测出的目标具有运动目标在 SAR 图像中方位向拉伸的特点, 此外海上的运动船只具有尾迹, 这些都证明所检测出的目标为运动目标, 也说明了该方法的有效性.

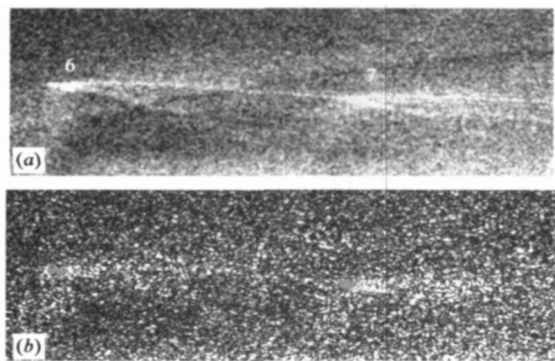


图 4 ASAR 数据动目标检测结果
(a)强度图; (b) $||S1|-|S2||$ 图

4 结论

本文在子孔径分解技术的基础上提出一种从单通道 SAR SLC 数据中检测动目标的方法. 由于静止目标在不同子孔径图像中的成像位置相同, 而运动目标在不同子孔径图像中的成像位置不同, 那么子孔径图像相减可以有效的抑制杂波, 从而提高 TCR. 该方法直接从 SLC 数据而不是原始数据中检测动目标, 避免了数据合成的复杂过程. 通过对机载 CV580 数据和星载 Errisat ASAR 数据进行测试, 证明了该方法既适应于机载雷达, 也适应于星载雷达.

感谢北京环境特性研究所 目标与环境电磁散射辐射国家科技重点实验室基金项目支持

参考文献:

- [1] Jao J K. Theory of synthetic aperture radar imaging of a moving target [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001, 39(9): 1984–1992.
- [2] Liu C. Effects of target motion on polarimetric SAR images [J]. Canadian Journal of Remote Sensing. 2006, 32(3): 51–64.
- [3] Raney R K. Synthetic aperture imaging radar and moving targets [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems. 1971, AES 7: 499–505.

- [4] Livingstone C E, Sikaneta I, Gierull C H, et al. An airborne synthetic aperture radar (SAR) experiment to support RADARSAT-2 ground moving target indication (GMTI) [J]. Canadian Journal of Remote Sensing. 2002, 28(6): 794–813.
- [5] Sikaneta I C. Detection of ground moving objects with synthetic aperture radar [D]. Ottawa, Ont.: University of Ottawa, 2004.
- [6] Chiu S. A constant false alarm rate (CFAR) detector for RADARSAT-2 along track interferometry [J]. Canadian Journal of Remote Sensing. 2005, 31(1): 73–84.
- [7] Fitch J P. The single antenna interferometer in IEEE Conference on Acoustics, Speed, and Signals [C]. Toronto, CA: IEEE, 1991.
- [8] Ferrer famil L, Reigber A, Pottier E, et al. Scene characterization using subaperture polarimetric SAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003, 41(10 PART I): 2264–2276.
- [9] Ferrer famil L, Reigber A, Pottier E. Nonstationary natural media analysis from polarimetric SAR data using a two dimensional time-frequency decomposition approach [J]. Canadian Journal of Remote Sensing. 2005, 31(1): 21–29.
- [10] Ouchi K. On the multilook images of moving targets by synthetic aperture radars [J]. IEEE Transactions on antennas and propagation. 1985, AP 33(8): 823–827.

作者简介:

张 露 男, 1976 年生于河南省郑州市, 博士研究生, 主要研究方向为雷达遥感.

E-mail: zhanglu@insa.ac.cn; zhanglu0008@163.com

郭华东 男, 1950 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为雷达遥感以及数字地球

韩春明 男, 1971 年生, 副研究员, 研究方向为雷达遥感

周 平 男, 工作于北京环境特性研究所, 目标与环境电磁散射国家科技重点实验室