

一种新的星载高分辨宽测绘带 SAR 运动目标检测与参数估计方法*

吴明宇, 杨桃丽, 李真芳, 吴顺君

(西安电子科技大学 雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要:针对星载多通道高分辨宽测绘带合成孔径雷达系统,提出了一种地面运动目标检测和参数估计方法,该方法利用空时自适应处理进行杂波抑制,采用传统 SAR 成像处理得到模糊的运动目标图像,接着利用恒虚警检测技术检测出所有运动目标,包括真实目标和由于多普勒模糊引起的虚假目标,再根据模糊图像的空间位置关系,从所有成像目标中检测出运动目标的真实成像位置,根据运动目标的斜距历程得到因运动目标速度引起的图像位置偏移,由此估计得到运动目标速度。该方法具有运算量小、检测精度高等优点,星载仿真数据验证了本文方法有效性。

关键词:地面运动目标检测;高分辨宽测绘带;合成孔径雷达;多普勒模糊

中图分类号:TN957 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)04-0074-05

A new method of moving target detection and parameter estimation for spaceborne HRWS SAR

WU Mingyu, YANG Taoli, LI Zhenfang, WU Shunjun,

(National Key Laboratory of Radar Signal processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A ground moving target indication (GMTI) method for spaceborne high resolution wide swath (HRWS) synthetic aperture radar (SAR) systems is presented. First, the space time adaptive processing was adopted for clutter suppression followed by the traditional SAR imaging which yields the ambiguous images. Then all the moving targets including the real one and ghost ones were detected by the CFAR technique, and the real one was distinguished from all the imaging targets based on the space relationship of the ambiguous images. Finally, the moving velocity was obtained according to the azimuth position shift, which could be deduced from the range history of the moving target. The advantages of the method are its low computational burden and high accuracy. The spaceborne simulation data confirms its validity.

Key words: ground moving target indication; high resolution and wide swath; synthetic aperture radar; doppler ambiguity

传统单通道星载 SAR (Synthetic aperture radar) 系统受最小天线面积的限制^[1]:为得到宽距离测绘带而不产生距离模糊要求脉冲重复频率不能太高,而高方位分辨率又要求系统以高脉冲重复频率工作,难以同时获取方位高分辨和距离宽测绘带。结合数字波束形成技术 DBF (Digital Beam Forming),多通道 SAR 系统可以突破这一限制^[2-4]。对于多通道 SAR/GMTI 系统来说,现有的大多数文献均在假设系统参数满足最小天线面积限制的前提下进行运动目标检测及参数估计^[5-8],未考虑回波信号的模糊。文献[9]提出了在多普勒模糊的前提下利用 STAP 进行杂波抑制的方法,但未说明如何进行运动目标检测。本文针对以上问题,在存在多普勒模糊的情况下,详细讨论了如何利用多通道 SAR 系统进行运动目标检测和参数估计,并利用星载仿真数据验证了

本文算法的有效性。

1 回波特征

对于星载地面运动目标检测来说,具有以下特点^[10]:卫星速度快,可认为在波束扫过地面期间,运动目标的速度基本没变化;运动目标沿航向的速度远远小于卫星速度,可以忽略;由于雷达波束较窄,运动目标垂直航向的速度沿视线方向的投影变化很小,可以看作为常数。因此,本文主要考虑运动目标仅存在沿视线方向的速度。地面固定杂波的多普勒频率 f_d 与波束锥角 ϕ 的正弦值存在如下线性关系:^[10]

$$f_d(\phi) = \frac{2v_s}{\lambda} \sin\phi \quad (1)$$

其中 v_s 为卫星速度, λ 为工作波长。由于运动目标存在沿视线方向的速度,其多普勒频谱相对同

* 收稿日期:2012-11-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41001282, 40871205)

作者简介:吴明宇(1976—),男,江西峡江人,博士研究生,E-mail:inhurry@163.com;

吴顺君(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:sjwu@xidian.edu.cn

一方向的固定杂波有一偏移,即

$$f_{i,d}(\phi) = \frac{2v_s}{\lambda} \sin\phi + \Delta f_{i,d}(\phi) = \frac{2v_s}{\lambda} \sin\phi + \frac{2v_{ct} \cos\phi}{\lambda} \quad (2)$$

其中

$$\Delta f_{i,d}(\phi) = \frac{2v_{ct} \cos\phi}{\lambda} \approx \frac{2v_{ct}}{\lambda} = \Delta f_d \quad (3)$$

图1(a)给出了固定杂波和运动目标的空时二维谱,其中粗实线表示固定杂波谱,细实线表示运动目标谱, f_p 表示脉冲重复频率。在星载 SAR 系统中,宽测绘带要求采用较低的脉冲重复频率,这样就会导致方位向发生多普勒模糊,如图1(b)所示,固定杂波和运动目标谱均发生了模糊折叠。

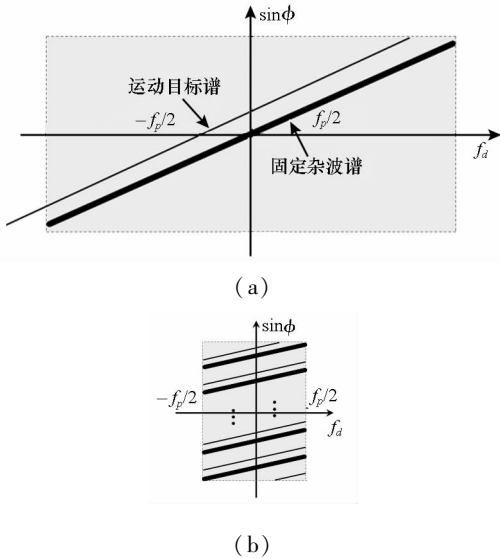


图1 固定杂波和运动目标的空时二维谱

Fig. 1 Spatial-temporal spectrum of the clutter and ground moving target

2 目标检测与速度估计

根据运动目标相对固定杂波的谱偏移,文献[9]提出了利用空时自适应处理的方法对多通道接收回波进行杂波抑制,取得了很好的效果。本文首先利用该方法对所有通道接收回波进行杂波抑制,然后再对回波数据进行聚焦处理,提高动目标的相干积累时间,从而提高输出信噪比,更有利于动目标检测。

由于方位欠采样,进行 SAR 成像处理后,运动目标图像将会出现虚假目标。假设回波信号多普勒模糊 N 次,则成像处理后将会输出 $2N - 1$ 个目标,其中 $2N - 2$ 为虚假目标,如图2所示,中间的矩形目标为真实目标,其余4个椭圆目标为虚假目标。利用传统 CFAR 技术^[11]进行目标检测

将会得到错误的 $2N - 2$ 个目标。如何判断真实目标和虚假目标是本文的关键所在。根据回波信号的模糊特性和成像匹配函数的关系可知,虚假目标与真实目标在方位向上的相对位移为^[12]

$$\Delta x_n = n f_p v_s / K_d \quad (4)$$

其中, n 表示第 n 个偏离真实目标的虚假目标, K_d 为用在处理器中真实目标处的匹配函数的方位调频率。也就是说,对于 CFAR 检测出的所有目标,若其沿方位向等间隔相距 $f_p v_s / K_d$ 的话,则可认为这些目标均属于同一运动目标,然后再利用成像几何关系,在检测出的所有属于同一运动目标的图像中判断出真实目标。

由于运动目标存在沿视线方向的速度,使得成像后目标偏离其真实坐标位置

$$\Delta x = \frac{v_{ct} \cdot R_0}{v_s^2} \cdot v_s = \frac{v_{ct} \cdot R_0}{v_s} \quad (5)$$

其中, R_0 为目标起始时刻离雷达的最近斜距。根据式(5)可知,若能获得 Δx 即可得到 v_{ct} 。本文正是基于此估计出运动目标沿视线方向的速度。利用上述的目标检测方法我们可以得到运动目标成像后的位置,若能获取运动目标的真实坐标位置即可得到 Δx 。我们知道目标沿方位向的斜距历程可反映出目标相对雷达的坐标位置。以正侧视为例,如图3所示,波束中心照射目标的时刻对应的雷达方位位置即为目标的真实方位位置。然而在实际情况下,由于运动目标可能只是部分孔径照射,我们并不能直接获得波束中心照射目标的时刻。但可通过运动目标被照射的起始或结束时刻,结合合成孔径时间估算得到目标照射的中心时刻。基于上述分析,先将杂波抑制后的回波进行距离压缩,以提高目标的相干积累时间,然后在两维时域得到目标照射的起始或结束位置,利用系统参数得到的合成孔径时间,从而得到运动目标照射的中心时刻,接着将其与目标检测后得到的目标方位时刻对比,得到运动目标由于沿视线方向速度引起的位置偏移量,再根据下式得到目标沿视线方向的速度。

$$v_{ct} = \frac{\Delta t \cdot v_s^2}{R_0} \quad (6)$$

在实际情况下,我们无法精确获得 R_0 ,但其可用目标检测后得到的目标斜距 R' 替代,实验证明该误差可忽略。

下面给出利用本文方法进行运动目标检测和参数估计的具体步骤,其流程如图4所示。

1) 利用各通道回波数据进行自适应杂波抑制。

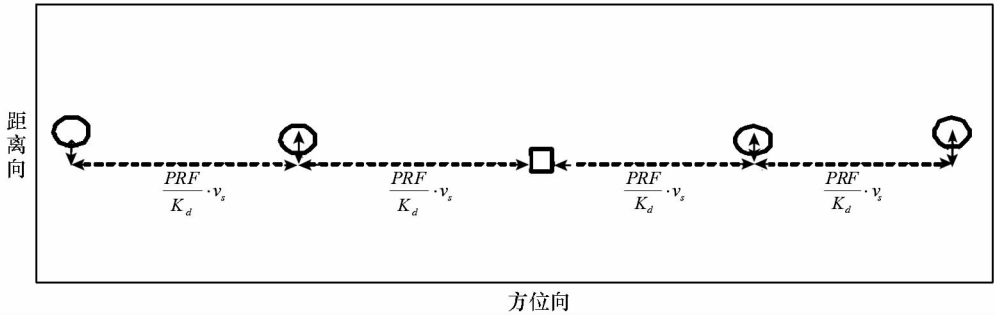


图 2 多普勒模糊动目标成像示意图

Fig. 2 Ground moving target imaging with Doppler ambiguity

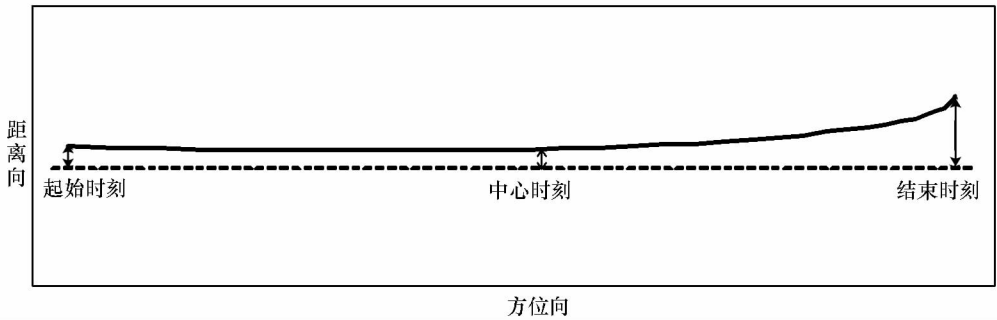


图 3 目标运动轨迹示意图

Fig. 3 Range history of a moving target

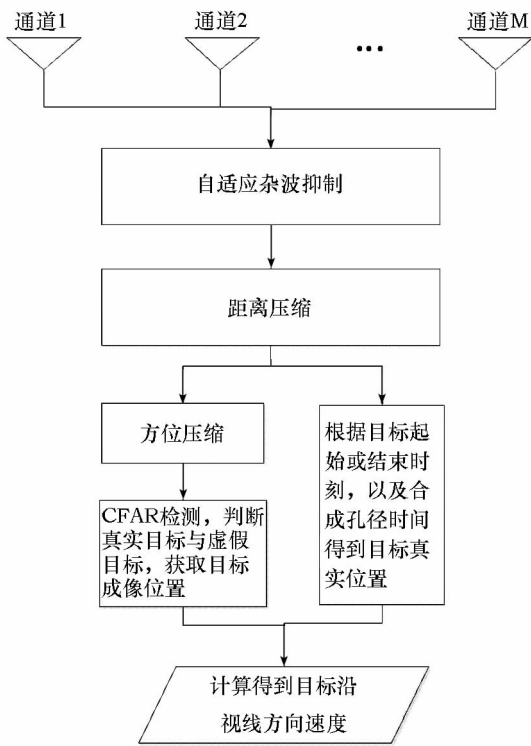


图 4 运动目标检测与速度估计流程图

Fig. 4 Flow chart of ground moving target detection and motion parameter estimation

- 2) 对杂波抑制后的数据进行距离压缩。
- 3) 利用系统参数计算得到合成孔径时间, 再根据运动目标的斜距历程得到运动目标的起始或

结束照射时刻, 结合成像几何得到目标的真实方位位置, 例如假设成像多普勒中心为零, 对于正侧视来说, 中心照射时刻对应的雷达方位位置即为目标的真实方位位置。需要说明的是, 这里的位置及时刻均指相对位置和相对时刻, 即可假设第一个采样时刻为零, 对应的方位位置也为零, 而无需绝对位置和绝对时刻。

4) 对距离压缩后的数据进行方位压缩, 得到模糊的 SAR 图像。

5) 利用恒虚警检测技术检测得到运动目标的所有成像目标, 包括真实目标和虚假目标, 然后根据式(4)判断得到属于同一运动目标的所有成像目标, 由此得到运动目标的真实成像位置。

6) 根据运动目标的成像位置和真实方位位置得到因运动目标速度引起的方位位置偏移量, 再根据式(6)得到运动目标沿视线方向速度。

3 实验验证

下面我们通过星载仿真数据来验证我们的方法。仿真参数如表 1 所示, 天线沿方位向均匀划分为 6 个独立接收通道, 即每个接收通道的方位向尺寸为 2m, 回波信号发生 3 次多普勒模糊。场景中包含两个运动目标, 垂直航向速度分别为 -12.8m/s , 9.6m/s , 信杂比为 0dB。

图 5(a) 给出利用 6 个通道的回波数据进行

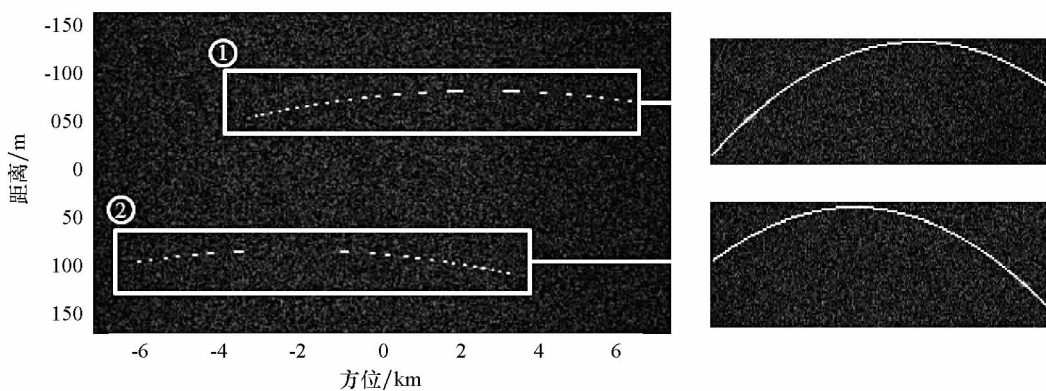
杂波多普勒解模糊后的成像结果,从图中无法判断出何为运动目标。图 5(b)给出了利用 6 个通道进行杂波抑制后距离压缩的结果,图中①②分别表示两个运动目标,图右侧为两个运动目标运动轨迹的放大图,从图中可以看出,自适应方法很好地进行了杂波抑制,运动目标的轨迹清晰可见。图 5(c)为杂波抑制后成像结果,图中实线小圆圈

标注的为检测出的真实动目标,虚线小圆圈标注的为对应的虚假动目标。根据仿真参数,可以计算出同一目标的相邻虚假目标沿方位向相距 3263.8m ,对应 SAR 图像中相距 1088 个采样单元,与动目标实际检测结果相一致。从图中可以看出,本文方法在进行较低运算量的情况下很好地实现了运动目标检测。



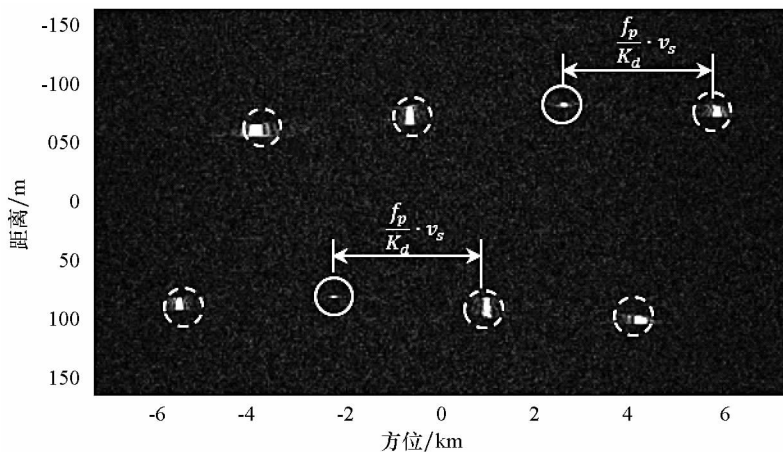
(a) 杂波多普勒模糊抑制成像

(a) Image with Doppler ambiguity suppression



(b) 杂波抑制后距离压缩结果

(b) Range compression after clutter suppression



(c) 杂波抑制后的成像结果

(c) Image after clutter suppression

图 5 杂波抑制与运动目标检测

Fig. 5 Results of clutter suppression and ground moving target detection

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameter

| 参数 | 数值 |
|------|-----------|
| 轨道高度 | 500km |
| 下视角 | 40° |
| 波长 | 0.03m |
| 天线尺寸 | 12m × 1m |
| 通道数 | 6 |
| 卫星速度 | 7616.4m/s |
| PRF | 2539Hz |
| 杂噪比 | 30dB |

由系统参数可以得到合成孔径时间约为 1.2855s。假设第一个方位采样时刻为 0s,由图 5(b)可估出目标 1 的开始照射时刻为 0.5215s,由此可得目标 1 的中心照射时刻为 1.1643s;目标 2 的开始照射时刻为 0.1335s,由此可得目标 2 的中心照射时刻为 0.7763s。根据目标检测的结果,由图 5(c)得到两个运动目标成像位置对应的方位时刻分别为 1.3084s 和 0.6676s,由此得到目标的偏移时间为 -0.1441s 和 0.1087s,再根据式(6)即可得到两个运动目标沿视线方向速度分别为 -12.8088m/s 和 9.6598m/s,与真实速度非常接近。当目标轨迹时间计算不准时,假设偏离 10 个像素,引入的误差仅为 0.3m/s。

4 结论

同时获取方位高分辨和距离宽测绘带是合成孔径雷达的发展趋势,然而结合高分辨宽测绘带 SAR 系统进行地面运动目标检测则少有研究。基于此,本文针对星载方位多通道高分辨宽测绘带 SAR 系统,提出了一种地面运动目标检测和速度估计的方法,该方法首先利用空时自适应处理方法进行杂波抑制,然后再对杂波抑制后的结果进行距离压缩得到运动目标的运动轨迹,从而得到目标的真实方位位置,接着进行聚焦处理,利用多普勒模糊关系从模糊的运动目标中判断出真实目标,获得运动目标因沿视线方向速度引起的方位位置偏移,从而得到运动目标沿视线方向的速度。该方法具有运算量小,估计精度高等优势,星载仿真实验证明该方法的有效性。

参考文献 (References)

- [1] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic aperture radar : systems and signal processing[M]. New York: Wiley, 1991.
- [2] Currie A, Brown M A. Wideswath SAR [J]. IEEE Proceedings-F, 1992, 139(2):122-135.
- [3] Li Z, Wang H, Bao Z. Generation of wide-swath and high-resolution SAR images from multichannel small spaceborne SAR system[J]. IEEE Geoscience Remote Sensing Letters, 2005, 2(1):81-86.
- [4] Gebert N, Krieger G, Moreira A. Digital beamforming on receive: techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2): 564-592.
- [5] Ender J. Detection and estimation of moving target signals by multi-channel SAR[J]. AEÜ Int. J. Electron. Commun., 1996, 50(2): 150-156.
- [6] Ender J. The airborne experimental multi-channel SAR system AER-II[A]. EUSAR 1996[C]. Germany: IEEE, 1996, 49-52.
- [7] 梁旬农,蔡斌,王敏,等. 星载 SAR-GMTI 研究进展[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(4): 87-92.
LIANG Diannong, CAI Bing, WANG min, et al. Research process of spaceborne SAR-GMTI systems [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(4): 87-92. (in Chinese)
- [8] 周智敏,周红,雷鹏正,等. 低频宽带 SAR/GMTI 试验系统[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(6): 72-77.
ZHOU Zhimin, ZHOU Hong, LEI Pengzheng, et al. Low frequency wide band SAR/GMTI experimental system [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(6): 72-77. (in Chinese)
- [9] 李真芳,保铮,王彤. 分布式小卫星 SAR 系统地面运动目标检测方法[J]. 电子学报, 2005, 33(9): 1664-1666.
LI Zhenfang, BAO Zheng, WANG Tong. Ground moving target indication for distributed small satellite SAR systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(9): 1664-1666. (in Chinese)
- [10] 李真芳. 分布式小卫星 SAR-InSAR-GMTI 的处理方法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
LI Zhenfang. Approaches to SAR-InSAR-GMTI for distributed small satellite SAR systems[D]. Xi'an: Xidian University, 2006. (in Chinese)
- [11] 何友,关键,彭应宁,等. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
HE You, GUAN Jian, PENG Yingning, et al. Radar automatic detection and constant false alarm processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. (in Chinese)
- [12] Li F K, Johnson W T K. Ambiguities in spaceborne synthetic aperture radar data[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1983, AES-19: 389-397.