单通道 SAR 实现 ATI 动目标检测的新方法

高 飞 孙进平 袁运能 白 霞

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 研究了采用单通道合成孔径雷达(SAR,Synthetic Aperture Radar)多视沿航迹向干涉(ATI,Along Track Interferometry)实现地面慢速运动目标指示的检测方法. 分析了该方法所需的步骤,即利用重叠或不重叠的窗构造子视,对子视分别成像,相位误差校正并求干涉. 关于其中起关键作用的相位误差校正步骤,提出了利用信号子空间投影进行相位配准的补偿方法. 借助该鲁棒的自适应方法可以从某种程度上解决子图像间的去相关问题,降低相位随机性的影响,从 2 幅子视图像的干涉相位图上敏锐地检测到运动目标. 通过仿真实验,验证了该方法可以有效地从强杂波中检测动目标,为单通道 SAR 实现地面运动目标指示(GMTI,Ground Moving Target Indication)、扩展已有 SAR 系统功能提供可靠的途径.

关 键 词: 合成孔径雷达; 地面运动目标指示; 沿航迹向干涉

中图分类号: TN 957

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)08-0890-04

New method of moving target detection using single-channel SAR ATI

Gao Fei Sun Jinping Yuan Yunneng Bai Xia

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A detector for slow GMTI (ground moving target indication) with a single channel SAR (synthetic aperture radar) multi-look ATI (along track interferometry) was investigated. The steps include constructing multi-look using overlapped or unoverlapped windows, respective imaging, phase compensation and performing interferemetric processing. Concerning the crucial step of phase error rectification, a compensation method of phase calibration using SSP (signal subspace processing) was proposed. By this robust and adaptive approach, decorrelation between sub-images can be resolved and phase randomicity of multi-look ATI can be alleviated to some extent, moving targets can be isolated much easily from interferometric phase of multi-look sub-images. Simulation results show effectiveness of the method in moving targets detection in strong clutter, thus it provides reliable reference for single channel SAR GMTI and supports operational extension of existing SAR system.

Key words: synthetic aperture radar; ground moving target indication; along track interferometry

在机载和星载合成孔径雷达(SAR,Synthetic Aperture Rador)系统的许多军用和民用应用场合,人们期望在产生高质量固定场景图像的同时能够检测地面慢速运动目标如轮式装甲车辆或集结部队[1]. 一种有效的方法是利用沿载机飞行方向排列的多个通道观测同一块地面区域的沿航迹向干涉(ATI,Along Track Interferometry)技术. 通过比较通道之间的相位,固定区域可以对消掉,而运动目标信息保留下来从而实现检测. 近年的如星载系统 RADARSAT-2 和 TerraSAR-X[2] 采用 2 个平行的接收天线孔径,机载系统 JSTARS[3] 采用了 3 个通道. 然而出于附加接收通道费用、系统设计以及已存在系统的考虑,实际情况下不一定能获得多通道的配置. 此外,为了充

收稿日期: 2006-10-20

基金项目: 国家预研资助项目(513070605);中国博士后科学基金资助项目(20060400034)

作者简介: 高 飞(1975—),男,陕西绥德人,博士后,feigao2000@163.com.

分利用实际数据并且扩展已有系统的功能,希望采用单通道 SAR 系统既实现成像又能在某种程度上获得地面运动目标指示(GMTI, Ground Moving Target Indication)功能. 已有学者[4-5]尝试采用单通道和 ATI 组合的方法来解决这个问题. 但是,文献[4]仅列出结果没有给出实现细节,文献[5]中的方法将单通道 SAR 的方位数据二抽一构造 2 个孔径并分别成像、计算干涉,因而受脉冲重复频率的限制.

本文从单通道 SAR 数据形成多视图像出发,采用多视图像 ATI 技术,分析 ATI 信号的分布规律,针对子视图像干涉相位随机性的干扰,提出了信号子空间投影对子孔径图像间的相位进行盲配准的方法,经过相位补偿之后在干涉相位图上可以很容易检测出淹没在杂波中的运动目标. 本文方法无需多通道配置,实现起来简单有效,可以方便地扩展现有单通道 SAR 系统功能. 最后的仿真实验验证了其正确性和有效性.

1　单通道 SAR-ATI 方法

1.1　多视的构成

为了构造类似沿航迹向的多通道配置,单通道的多个子孔径通常在方位向提取. 由于条带 SAR 载机的前进,每个脉冲回波都包含了新区域的反射信息,此时时间域的多视划分会带来场景之间的干扰. 因此,应在频率域采用带通滤波器进行多视划分,滤波器函数包括了用来旁瓣控制的权值,视数之间通常重叠 10%～20%,如图 1 的第①步骤所示. 由于线性调频信号的频率与时间有锁定关系,这种划分等效于方位波束宽度分为不同的部分,每个部分对应不同的视线方向,因此可以得到等效的多通道数据并分别进行成像处理.

1.2　预 处 理

图 1 的第②步骤示出了 ATI 所需的预处理操作. 由于在不同视线方向观测相同区域,各视子图像必须严格配准. 本文取序贯相似检测作为配准判据:

$$E(u,v)=\sum_{x,y}\mid T(x,y)-I(x-u,y-v)\mid \tag{1}$$

其中,x,y 表示二维像素位置;T 和 I 表示 2 个子图像;u 和 v 表示二维搜索空间. 当 E 取最小值时 2 幅图像得到配准. 同样由于 2 个子孔径相对 SAR 场景有不同视角,在计算干涉相位之前必须首先补偿合成孔径之间的方位相位差,该相位补偿值正比于距离场景中心的方位距离,考虑到双程距离可表达为目标视线角 θ 的函数:

$$\Delta\phi=\frac{4\pi}{\lambda}d\sin\theta \tag{2}$$

其中,λ 是波长;d 是子视多普勒中心频率对应的子孔径间的距离. 相位 $\Delta\phi$ 可在时间域通过插值的方法来去除,但付出的代价是计算量大. 精确的相位校正方法如通道盲均衡算法可以补偿该误差,同时还可以去除其它类型的如随机性的相位误差,具体实现可以参见第 2 节的原理及第 3 节的仿真.

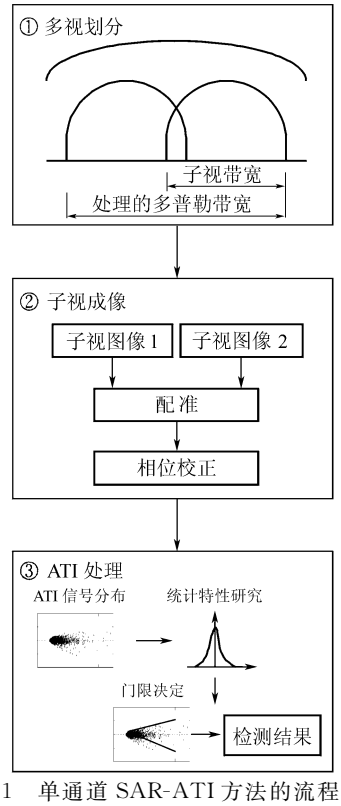


图 1　单通道 SAR-ATI 方法的流程图

1.3　ATI 的 CFAR 检测

对经过配准和误差校正的子视图像求相互之间的复干涉,即作 ATI 处理,理想情况下,在 *I-Q* 复平面上固定场景的信号点相位为 0,沿着正实轴分布,而有径向速度的运动目标信号点在沿着某一径向相位的方向上. 考虑到实际情况下存在的杂波干扰、接收机热噪声、杂波内部运动以及子视间随机相位等因素的影响,ATI 信号点在 *I-Q* 复平面上会扩散开来,如图 1 的第③步骤所示,图上也示出了检测运动目标所需的处理步骤. 分析 SAR-ATI 干涉输出信号的幅度、相位及二维幅相统计分布规律,并根据不同的场合选择不同门限,例如仅有杂波的情况只采用幅度门限和相位门限,而大噪声干扰情况下还要附加二维幅相联合

门限.由指定的虚警概率确定相应的门限值,门限外面的点就是可能的运动目标点,实现恒虚警(CFAR,Constant False Alarm Rate)检测.

2 基于SSP的相位误差校正

由于多视子图像之间的相位是随机的,直接的ATI结果中运动目标完全淹没在杂波中,检测目标很难,必须采用专门的方法对随机相位进行校正,换句话说,要对多视图像的相位进行均衡.以2个子视为例,假设通道不平衡引起的2幅图像的幅度、相位误差可表示为

$$f_1(x,y)=f_2(x,y)**h(x,y) \qquad (3)$$

其中,$**$表示二维卷积运算;f_1,f_2分别表示2个子视图像;x,y表示横坐标和纵坐标(例如距离和方位坐标);h表示通道误差引起的二维冲激函数(或二维滤波器).如果能估计出$h(x,y)$就可以从f_2得到f_1的估计值f_1',从而补偿通道误差.

求解二维冲激函数$h(x,y)$往往很繁琐,许多情况是采用其它数学方法获得类似效果,例如信号子空间处理(SSP,Signal Subspace Processing).SSP的思路是将f_1投影到f_2张成的线性空间上:首先将f_2的数据分块并构造其空间的基,其次进行Schimidt正交化处理形成标准正交基,再根据对应的f_1分块数据计算其投影到f_2标准正交基上的各个系数,最后分别叠加各个分量得到估计值f_1'.从该过程可以看到SSP方法是利用某通道数据向另一通道数据子空间(基)投影来获得二者的关系,因此该方法是基于最优解的且符合最小均方误差准则的正交性原理.

SSP避免了直接求解$h(x,y)$,运算量很小,可以校正图像间的幅度和相位误差.具体到本文研究的问题,由于ATI技术主要依赖信号的相位特性,因此借助SSP方法只需要对2个子视图像的相位进行均衡.均衡之后再求干涉,在*I-Q*复平面上可将杂波信号抑制到较小的区域,简单的门限比较即可实现杂波抑制,突显出动目标.

3 仿真验证

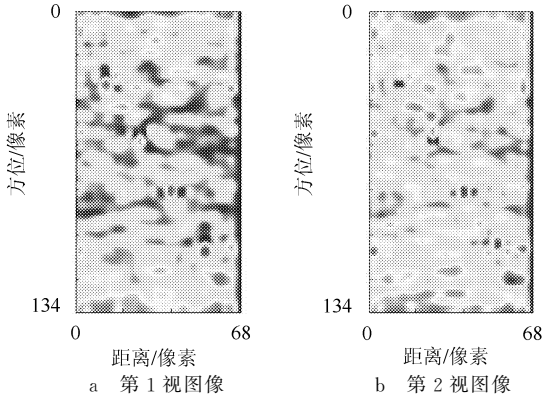
仿真参数列于表1,场景中包含径向速度分别为1,2,3,4 m/s的4个运动目标.

经多视划分后2个子图像的成像结果如图2所示,从图像本身很难直接检测到其中的运动目标.

图3对比了SSP相位误差校正前后的结果,从图3a直接ATI的干涉相位图中,像素的相位有随机性,判断运动目标几乎不可能,经SSP校正后图3b的结果中部分运动目标则可以很清楚地显示出来.从检测结果上看,目标1、目标2和目标4可以容易地检测出来,而目标3仍然很难找到,这是因为其干涉相位为π的整数倍,对应的速度为盲速,该问题是ATI方法所固有的缺陷.

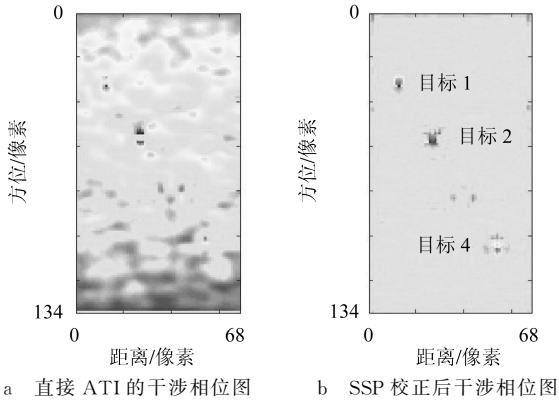
表1 雷达系统及场景仿真参数

参 数	数 值	参 数	数 值
雷达高度/ km	750	子视间隔/s	0.12
纬度幅角/(°)	85	频率/GHz	10
视角/(°)	20	带宽/MHz	20
轨道倾角/(°)	40	脉冲宽度/μs	67
天线尺寸/m²	15×3	脉冲重复频率/Hz	2000
场景大小/m²	450×450	像素个数	68×134
分辨率/m²	19×6.7	杂波分布	K分布



a 第1视图像 b 第2视图像

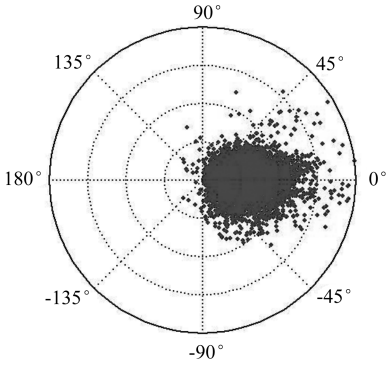
图2 多视划分后的2个子视图像



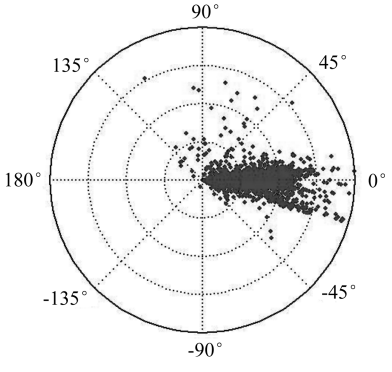
a 直接ATI的干涉相位图 b SSP校正后干涉相位图

图3 SSP相位误差校正前后结果对比

ATI技术面临的一个共同问题是检测门限的选取,图4示出了*I-Q*复平面上ATI信号点的分布情况,图4a是直接ATI的结果,信号点分布范围大,运动目标点容易淹没在杂波中,门限选取复杂[6],检测较难;图4b是经SSP处理后的结果,图上杂波信号被抑制到范围较小的区域,大大减弱了杂波的干扰,只需要设置相位门限和辅助的幅度门限就可以很好地实现目标检测.



a　直接 ATI 的信号复平面图



b　SSP 校正后信号复平面图

图 4　信号复平面图

4　结 束 语

本文给出了信号子空间投影组合单通道多视 ATI 实现运动目标检测的方法,大大降低了杂波干扰的影响,可以简便地选择检测门限,较好地实现杂波抑制,为单通道 SAR 实现 GMTI 提供可靠的途径.有待进一步开展的工作包括盲速的消除、相位解缠绕等.

参考文献(References)

[1] Sharma J J, Gierull C H, Collins M J. The influence of target acceleration on velocity estimation in dual channel SAR-GMTI[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006,44(1):134－147

[2] Gierull C H. Azimuth positioning of moving targets in two-channel SAR by direction-of-arrival estimation[J]. Electronic Letters, 2004, 40(21): 1380－1381

[3] Stockburger E F, Held D N. Interferometric moving ground target imaging[C]//IEEE Nat Radar Conf Proc. Piscataway, NJ:IEEE, 1995: 438－443

[4] Lipps R, Chen V, Bottoms M. Advanced SAR GMTI techniques[C]//IEEE Nat Radar Conf Proc. Piscataway, NJ: IEEE,2004:105－110

[5] 康雪艳,杨汝良.对机载单天线 SAR 实际数据进行 ATI 动目标检测的新方法[J]. 电子学报,2005,33(3):416－418
Kang Xueyan, Yang Ruliang. A new method of moving target detection using ATI for single-antenna airborne SAR real data[J]. Acta Electronica Sinica,2005,33(3):416－418(in Chinese)

[6] Gao Fei, Mao Shiyi, Yuan Yunneng, et al. Approaches of single channel SAR combining ATI for GMTI[C]//International Conference on Signal Processing. Piscataway, NJ: IEEE,2006: 2820－2823

(上接第 881 页)

[4] 范非达. 转角优化程序在低压比轴流压气机上的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究,1998,11(4):6－14
Fan Feida. Application of angle reset optimization program on low pressure-ratio axial-flow compressor[J]. Gas Turbine Experiment and Research,1998,11(4):6－14(in Chinese)

[5] 宋文艳,李新,范非达. 多级压气机可调静叶转角的多目标优化研究[J]. 推进技术,1997,18(4):26－30
Song Wenyan, Li Xin, Fan Feida. Investigation on multi-objective optimizing angle of variables stator of axial-flow compressor[J]. Journal of Propulsion Technology,1997,18(4): 26－30(in Chinese)

[6] 刘前智. 多级轴流压气机非设计性能的数值预估[J]. 航空动力学报,2004,19(1):108－112
Liu Qianzhi. Numerical prediction of multi-stage axial flow compressor off-design performances[J]. Journal of Aerospace Power,2004,19(1):108－112(in Chinese)

[7] Denton J D. The calculation of three-dimensional viscous flow through multistage turbomachines[J]. ASME Journal of Turbomachinery,1992,114:18－26

[8] Adamczyk J J. Aerodynamic analysis of multistage turbomachinery flows in support of aerodynamic design[R]. NASA-19990116700,1999

[9] 李晓娟,桂幸民. 风扇/增压级设计与非设计性能数值模拟[J]. 推进技术,2005,26(6):522－525
Li Xiaojuan, Gui Xingmin. Numerical simulation of fan/compressor design and off-design performance[J]. Journal of Propulsion Technology,2005,26(6):522－525(in Chinese)

[10] 姚吉先.轴流式压气机气动设计方法研究[D].西安:西北工业大学航空动力与热能工程系,1992
Yao Jixian. Research of aerodynamic design methods on axial-flow compressor[D]. Xi'an: Dept of Aeroengine and Thermal Power Engineering, Northwestern Polytechnical University, 1992(in Chinese)