

基于最小二乘估计和小波去噪的 ATI-SAR 自适应相位校正方法

张焕胜^{①②} 祁海明^{①②} 杨汝良^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: ATI-SAR 系统要求两个通道的相位特性准确匹配。该文分析了 ATI-SAR 系统相位误差的来源,建立了 ATI-SAR 系统相位误差的数学模型。提出了一种基于最小二乘估计和小波去噪的 ATI-SAR 自适应相位校正方法,给出了该相位校正方法的处理流程。计算机仿真证明在没有平台速度、偏航角等先验知识的情况下该方法仍可有效补偿 ATI-SAR 系统的相位误差,而且相位缠绕时,不需进行相位解缠。

关键词: 合成孔径雷达; 动目标指示; 沿迹干涉; 最小二乘估计; 小波去噪

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)05-1073-04

Phase Calibration Method for ATI-SAR System Based on Least Square Estimation and Wavelet-Denoising

Zhang Huan-sheng^{①②} Qi Hai-ming^{①②} Yang Ru-liang^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: ATI-SAR system requires that the phase characteristic of the two channels is precisely matched. This paper analyzes the phase error of ATI-SAR system, gives the mathematic model, proposes a simple phase calibration method for ATI-SAR system based on Least Square Estimation (LSE) and wavelet-denoising and gives the calibration flow. The simulation results demonstrated that the phase error of ATI-SAR system is removed by this method. This method does not require any knowledge of the platform velocity and actual crab angle. The problem of wrapped interferometric phases can be resolved by iterative use of this method.

Key words: Synthetic Aperture Radar(SAR); Moving Target Indication(MTI); Along Track Interferometry(ATI); Least Square Estimation(LSE); Wavelet-denoising

1 引言

运动目标检测和成像具有重要的军事价值,是合成孔径雷达的基本功能之一,是 SAR 信号处理领域的一个重要发展方向^[1,2]。ATI-SAR 是一种有效的动目标检测和成像方法,美国已装备的 JSTARS 雷达、研制中的 RADARSAT2 和 TerraSAR-X 星载合成孔径雷达均采用 ATI 技术对运动目标检测和成像^[3-5]。

ATI-SAR 利用沿迹放置的两副天线,在不同时间对同一场景进行观测,静止目标的回波相同而运动目标的回波不同,通过比较干涉相位即可抑制杂波检测动目标,因此两个通道的相位特性必须准确匹配。但是实际系统中平台不稳定、偏航、基线变化、通道不平衡、天线方向图不一致、热噪声等都会引入相位误差^[6,7],使 ATI-SAR 系统性能下降。因此要获得满意的 MTI 结果,必须补偿 ATI-SAR 系统的相位误差。文献[6]采用在 R-D 域乘一个复系数的方法补偿 ATI-SAR 系统的相位误差,但该方法只能补偿误差的线性部

分,且需要平台速度、基线长度等先验知识。文献[7]提出的去相位斜坡技术(De-trend)可以补偿 ATI-SAR 系统的线性相位误差和组相位误差,不需要平台速度、基线长度、偏航角等先验知识,但干涉相位缠绕时,需要先进行相位解缠,且补偿精度不高。文献[8]仅简单介绍了一种相位校正方法,没有给出详细描述。

本文通过分析 ATI-SAR 系统的相位误差建立了 ATI-SAR 系统相位误差的数学模型;根据这个数学模型,本文提出了一种基于最小二乘估计和小波去噪的自适应相位校正方法,并给出了该相位校正方法的处理流程。该方法不需要平台速度、基线长度、偏航角等先验知识,相位缠绕时不需进行相位解缠,由于在最小二乘估计前进行了小波去噪,该方法可以更精确地补偿 ATI-SAR 系统的相位误差。

2 ATI-SAR 系统相位误差

2.1 天线相位中心偏置引入的线性相位误差

由于目标到两相位中心的波程差,如图 1 所示,两个通道的回波具有不同的相位,其相位差为^[6]

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda)d\sin\theta \quad (1)$$

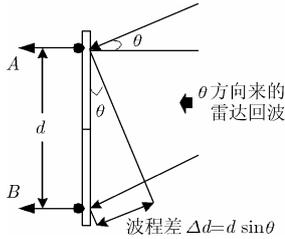


图 1 相位中心偏置引入的波程差

该相位变换到多普勒频域为

$$\Delta\phi(\omega) = \omega T = d\omega / (2V_a) \quad (2)$$

其中 d 为两天线间的距离, θ 为方位视角, T 为脉冲重复频率, V_a 为平台速度。所以该相位项是与多普勒频率呈线性关系的线性相位, ATI 技术视该相位为误差相位, 必须进行补偿, 可以在时域通过插值进行补偿, 也可以在多普勒频域按公式(2)进行补偿^[6,7]。

2.2 组相位偏移

理想情况下, 两副天线沿航迹放置。但是由于偏航(俯仰、翻滚), 两副天线与航迹成一定的角度, 如图 2 所示。偏航角引入新的波程差, 从而在两个通道间引入相位偏移, 称为组相位偏移^[8]。

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda)d \sin\theta_c \quad (3)$$

其中 θ_c 为偏航角。尽管采用平台控制技术可以校正偏航角, 但是校正精度有限, 所以有必要对 ATI-SAR 系统的组相位偏移进行补偿^[8]。

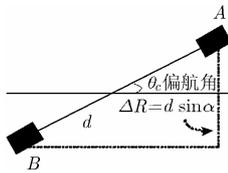


图 2 偏航引入的组相位偏移

2.3 随机相位误差

实际系统中, 还有很多因素会引入相位误差, 例如平台不稳定、通道不平衡、接收机热噪声等。这些误差沿方位向和距离向变化, 可视为均值为零的高斯随机相位误差。

2.4 ATI-SAR 系统相位误差模型

由上面的分析可以看出, ATI-SAR 系统相位误差模型可近似为线性模型:

$$\phi(\omega) = \beta\omega + \alpha + \nu(\omega) \quad (4)$$

其中 ω 为多普勒频率, $\beta = d/(2V_a)$ 为斜率, $\alpha = (2\pi/\lambda)d \sin\theta_c$ 为相位偏移, $\nu(\omega)$ 均值为 0 的白噪声。

3 基于最小二乘估计(LSE)和小波去噪(Wavelet-denoising)的自适应相位校正

根据前面的分析, 如果能够求得 ATI-SAR 系统的相位误差, 就可以补偿这些误差。由式(4)可知, 计算 ATI-SAR 系统的相位误差需要精确的惯导数据(平台速度 V_a 、偏航角 θ_c 等)和精确的相位中心间距 d , 实际中是比较困难的。采

用最小二乘估计的方法估计 ATI-SAR 系统的相位误差不需要这些参数, 但是噪声 $\nu(\omega)$ 的存在使得估计精度下降, 难以获得好的效果。如果在最小二乘估计前, 采用小波去噪技术滤除这些噪声, 将会提高 ATI-SAR 系统相位误差的估计精度。所以, 最小二乘估计与小波去噪技术相结合的方法在不需要平台速度、偏航角等先验知识的情况下可以精确地补偿 ATI-SAR 系统的相位误差。但是, 由式(2), 基线较长时, 干涉相位出现缠绕, 该相位校正方法引入新的相位误差, 通过该方法的迭代可进一步校正这些新的相位误差, 直至误差满足精度要求。所以, 迭代可以解决相位缠绕问题, 它不需要相位解缠。

3.1 ATI-SAR 系统相位误差的最小二乘估计

2.4 节已经给出了 ATI-SAR 系统的相位误差模型, 有很多方法可以估计 ATI-SAR 系统的相位误差, 例如 Bayes 估计、最大似然估计、线性均方估计、最小二乘估计等。最小二乘估计简单、易于实现, 本文选用最小二乘估计去估计相位误差的斜率 β 和相位偏移 α , 从而估计 ATI-SAR 系统相位误差^[7]。

通道接收数据经过距离压缩、距离徙动校正、方位向傅里叶变换后得到 R-D 域数据, 用 $\mathbf{Z}(\omega, k) = [\mathbf{Z}_1(\omega, k), \mathbf{Z}_2(\omega, k)]^T$ 表示, k 是距离线。在 R-D 域进行干涉:

$$\varphi(\omega, k) = \arg(\mathbf{Z}_1(\omega, k)\mathbf{Z}_2(\omega, k)^*) \quad (5)$$

设 $\varphi = [1, 2, \dots, N_a]^T$, 相位斜率和偏移为 $\theta = [\beta, \alpha]^T$, 根据式(4), 实际干涉相位为^[7]

$$\varphi = [\phi, \mathbf{1}]^T \theta + \varepsilon = \Phi \theta + \varepsilon \quad (6)$$

其中 N_a 为 $\phi(\omega, k)$ 的方位向长度, $\Phi = [\phi, \mathbf{1}]$, $\mathbf{1} = [1, \dots, 1]^T$, ε 是误差, φ 是干涉相位。利用最小二乘法, 则有^[7]

$$\hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \varphi \quad (7)$$

把估计出的 β 和 α 带入式(4)可求出 ATI-SAR 系统的相位误差 $\varphi_e(\omega, k)$ 。

由于平台运动不稳定、偏航角变化、接收机热噪声等因素的影响, ATI-SAR 系统相位误差的斜率和偏移在方位向是变化的, 如果在整个方位向进行最小二乘估计, 那么 ATI-SAR 系统相位误差的估计精度不高。为获得更高的估计精度, 本文把干涉相位 φ 等分成几小段, 每段长度为 L , 分别用最小二乘估计去估计每段的相位斜率和偏移。适当选择每段的长度 L , 就可以自适应地估计 ATI-SAR 系统的相位误差^[7]。

3.2 ATI-SAR 系统相位误差的小波去噪

由于随机相位误差的存在, 直接对 ATI-SAR 干涉相位进行最小二乘估计难以获得高精度的估计结果。所以, 在最小二乘估计前对干涉相位 $\phi(\omega, k)$ 进行滤波, 滤除高频随机噪声。ATI-SAR 系统相位误差在距离向是相同的, 首先对 ATI-SAR 系统的干涉相位 $\varphi(\omega, k)$ 在距离向做均值平滑:

$$\varphi_e(\omega) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \varphi(\omega, k) \tag{8}$$

$\varphi_e(\omega)$ 的数学模型服从公式(4)的模型, 均值平滑后 $\varphi_e(\omega)$ 仍然存在一些误差, 由于小波分析的优越性^[9,10], 本文采用小波分析的方法对 $\varphi_e(\omega)$ 进行去噪处理。由于有用信号表现为低频信号, 而噪声则表现为高频信号。对序列 $\varphi_e(\omega)$ 进行小波分解, 以门限阈值等形式对序列 $\varphi_e(\omega)$ 的小波系数进行处理, 然后用处理后的小波系数重构 $\varphi_e(\omega)$ 即可达到去噪的目的^[9,10]。小波去噪的原理和步骤参见文献^[9, 10]。

4 ATI-SAR 相位校正处理流程

ATI-SAR 相位校正处理流程如图 3 所示:

- (1) 杂波锁定: 由于系统误差的存在, 多普勒质心偏移 0 点, 所以校正前要进行杂波锁定, 估计杂波带宽和多普勒质心, 把多普勒质心校正至 0 频。
- (2) 方位向预滤波: 为消除高频误差, 校正前要进行方位向预滤波。方位向预滤波减少了后续处理的数据量和计算量。但是, 方位向预滤波必须保证频谱分辨率满足要求。
- (3) 距离向脉压。
- (4) 方位向 FFT、把信号变换到 R-D 域。
- (5) 相位校正: 包括 ATI-SAR 系统相位误差的小波去噪、最小二乘估计、相位补偿。
- (6) 方位压缩、ATI 处理、CFAR 处理。

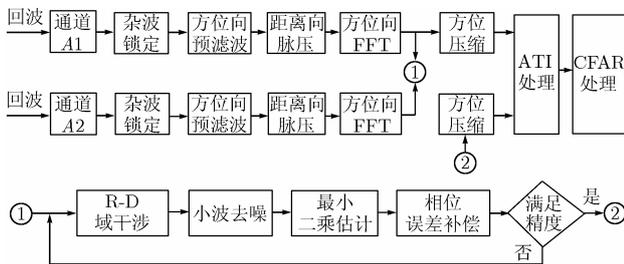


图 3 相位校正处理流程

5 计算机仿真

计算机仿真参数如下: X 波段机载正侧视雷达; 阵列天线沿航迹放置, 全孔径长 2m, 子孔径长度分别为 1m; 相位中心间距 2m; PRF: 455Hz; 载机速度 200m/s; 作用距离 15000m; 偏航角: 0.1°; 杂波背景为 15×15 点目标阵, 其中含有一个 $v_y = 3\text{m/s}$ 的运动目标, 如图 4 所示, 运动目标模糊并偏离原来的位置。

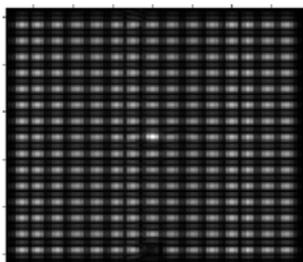


图 4 15×15 点目标 SAR 图像

小波去噪: 选用 db3 小波对 $\varphi_e(\omega)$ 进行三层小波分解, 采用软阈值方法处理小波系数。

图 5、图 6 为校正前后 ATI-SAR R-D 域干涉相位分布图。图 7 是 ATI-SAR 系统相位误差的估计值, 图 8 是校正后 ATI-SAR 系统干涉相位。由图可以看出, 校正前干涉相位与多普勒频率呈线性关系, 相对 0 相位有一相位偏移, 出现了相位缠绕现象; 校正后大多数像素的干涉相位趋 0。说明该校正方法补偿了线性相位、组相位偏移和其他一些相位误差。从图中可以看出, 校正后仍存在一些相位误差, 但是这些相位误差集中在杂波带外, 能量小, 成像后影响很小。

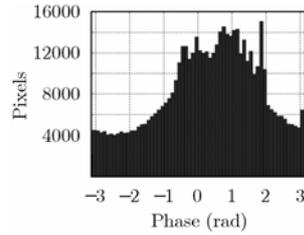


图 5 校正前 R-D 域干涉相位分布图

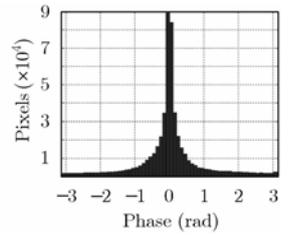


图 6 校正后 R-D 域干涉相位分布图

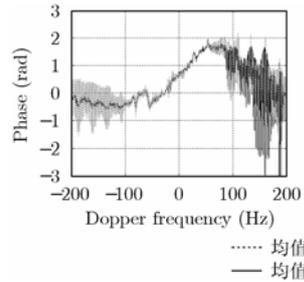


图 7 ATI-SAR 系统相位误差估计值

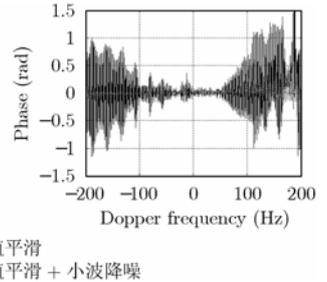


图 8 校正后 ATI-SAR 系统干涉相位

图 9, 图 10 是校正前后 ATI-SAR 图像域干涉相位图。比较两图可以看出, 校正前动目标和杂波混叠在一起, 校正后动目标与杂波区分明显, ATI-SAR 系统的 GMTI 性能得到明显改善。

1024×512 的数据块, 在 P42.8GHZ, 256M DDR 内存的 PC 机上, 该相位校正过程需时 6.5s, 运算量较小, 同时小波分解和重构采用快速算法可实时处理, 易于工程实现。

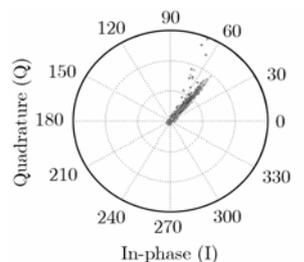


图 9 校正前 ATI-SAR 图像域干涉相位图

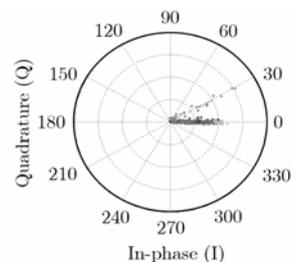


图 10 校正后 ATI-SAR 图像域干涉相位图

6 结束语

仿真结果表明本文提出的相位校正方法可以自适应地补偿 ATI-SAR 系统的相位误差, 提高了系统的性能。本方

法不需要平台速度、基线长度、偏航角等先验知识；通过迭代可以解决相位缠绕的问题；本方法简单，运算量小，易于工程实现。本文的结果都是通过计算机仿真得到的，下一步将用实际数据进一步验证在各种实际情况下本方法的有效性、鲁棒性和可靠性。

参 考 文 献

- [1] Raney R K. Synthetic aperture imaging radar and moving targets, *IEEE Trans. on AES*, 1971, AES-7(3): 499-505.
 - [2] Entzinger J N Jr, Fowler C A, and Kenneally W J. JointSTARS and GMTI: past, present and future. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35 (2): 748-761.
 - [3] Stockburger E F and Held D N. Interferometric moving-ground target imaging, *IEEE International Radar Conference*, Alexandria, VA, USA, 1995: 438-443.
 - [4] Beaulne P D and Gierull H G. Preliminary design of a SAR-GMTI processing system for RADARSAT-2 MODEX data. *IEEE IGARSS 2003*, Toulouse, France, July 21-25, 2003, Vol. 2: 1019-1021.
 - [5] Mittermayer J and Hartmut R. Conceptual studies for exploiting the TerraSAR-X dual receive antenna. *IEEE IGARSS 2003*, Toulouse, France, July 21-25, 2003, Vol. 2: 2140-2142.
 - [6] Stimson G W. *Airborne Radar*, New Jersey: Scitech, 1998: 317-322.
 - [7] Gierull H G. Digital channel balancing of along-track interferometric SAR data. *Technical Memorandum DRDC Ottawa, Canada*, 2003.
 - [8] Zhang Yu-hong and Consultants S. A dual-threshold ATI-SAR approach for detecting slow moving targets. *IEEE 2005 International Radar Conference*, Arlington, Virginia, USA, May 9-12, 2005: 295-299.
 - [9] 彭玉华著. 小波变换与工程应用. 北京: 科学出版社, 1999: 131-132.
 - [10] 杨建国著. 小波分析及其工程应用. 北京: 机械出版社, 2005: 50-150.
- 张焕胜: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达运动目标检测与成像.
- 祁海明: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达信号处理.
- 杨汝良: 男, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事微波遥感、机载、星载合成孔径雷达系统和合成孔径雷达信号处理等方面的研究工作.