

一种用于条带式 RD 算法的组合实时 PGA 方法

张 新^{①②} 丁赤飏^① 吴一戎^① 梁兴东^①

^①(微波成像技术国家重点实验室 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要: 随着合成孔径雷达(SAR)分辨率的提高,方位向相位误差的影响逐渐增大,传统的相位梯度自聚焦(PGA)方法虽然可以估计出高次误差,但是通常都需要迭代,给实时成像造成了很大困难。该文结合条带式 RD 算法和 PGA 自聚焦算法的特点,提出了一种组合的实时 PGA 方法。这种方法将频移相关距离门算法(SACGS)算法与 PGA 算法结合,不仅大大降低了计算量,可以不用迭代而达到良好的效果,而且降低了对运动初始参数的精度要求。仿真和实际数据均验证了这种方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 实时成像; 相位梯度自聚焦(PGA)算法; 自聚焦

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)05-1065-04

A Combined Real Time PGA Method for Strip Map Airborne SAR with RD Algorithm

Zhang Xin^{①②} Ding Chi-biao^① Wu Yi-rong^① Liang Xing-dong^①

^①(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100080, China)

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

Abstract: In the high resolution SAR, the effect of motion error at the azimuth direction is more severe. Though the traditional Phase Gradient Autofocus(PGA) algorithm can be used to estimate the motion error, the iterative phase correction has to be done. The huge computation makes it difficult to be used in real time image processing. In order to meet the request of real time imaging of high resolution SAR, the Shift And Correlate (SAC) algorithm, Shift And Correlate of Gate Strategy (SACGS) algorithm, PGA algorithm and Range Doppler (RD) algorithm are combined in this paper. With the new combined algorithm, the iterative operation can be reduced or even omitted. At the same time, the computation and the precision request for the initial motion parameter is decreased. The simulation and the result of imaging for real SAR data can validate the new algorithm.

Key words: Synthetic Aperture Radar(SAR); Real time imaging; Phase gradient autofocus algorithm; Autofocus

1 引言

高分辨率机载合成孔径雷达(SAR)实时成像需要雷达平台的精确运动信息。由于机载雷达平台的运动、系统的误差等因素的影响,雷达回波数据在方位向会存在一个相位误差。如果这个相位误差大到能引起方位向散焦,则必须进行补偿。通过精确的运动传感器可以补偿雷达在方位向的运动误差,但会增加 SAR 系统的实现难度。如果能够通过 SAR 回波数据进行自聚焦,估计出这部分相位误差而进行补偿,则可改善方位向分辨率并降低系统的实现难度。

机载雷达平台运动引起的误差通常包含高次项,而且这些高次项已经影响到高分辨率机载SAR的成像质量,不能忽略,必须进行补偿。传统的图像偏移法^[1](Map-Drift, MD)和频移相关法^[2](Shift-And-Correlate, SAC)是基于二阶相位误差多项式的,无法估计出高次的相位误差。相位梯度自聚焦算法^[3](Phase Gradient Autofocus, PGA)是非基于模型的

相位误差估计方法,对于低阶和高阶误差都有较好的补偿能力,但通常需要至少 3—5 次的迭代,计算量很大,在目前硬件发展水平下难以实现实时处理。

PGA算法是在距离徙动校正后进行的,因此距离徙动校正的好坏将直接影响PGA算法的效果。在本系统中,成像算法采用的是RD(Range Doppler)算法,距离徙动校正是在距离多普勒域进行。为了实现精确的距离徙动校正,将在校正之前,采用频移相关距离门(SACGS)算法估计多普勒调频率。SACGS算法不需迭代,不用做距离徙动校正,即可估计出较精确的调频率,满足距离徙动校正的要求^[4]。做完距离徙动校正后,再利用SAC算法在多普勒全带宽估计调频率,去除二次误差的影响,利用PGA算法估计高次误差,避免迭代,实现实时处理。

2 PGA 算法简介

PGA 算法首先估计出相位误差的梯度,然后对梯度和估计出相位误差,在文献[3, 5]中有详细的介绍。从理论上

讲, 该算法可以估计二次以上任意阶的误差。PGA 算法在时域和频域都可以应用, 区别只是如何在不同的信号域找出对应的点目标, 以及具体的实现方法。

传统 PGA 算法的主要步骤为点目标的选择、圆移、加窗、相位估计、迭代和相位校正。

算法流程如图 1 所示, 在相位误差较大的情况下, 一般要经过 3 到 5 次的迭代才能较准确地估计出相位误差。

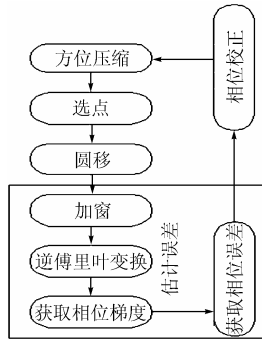


图 1 PGA 步骤

3 组合的实时 PGA 方法

3.1 组合实时 PGA 方法

通过对大量的实际回波信号数据进行分析, 发现二次相位误差是运动误差的主要部分。将二次误差去除后, 在大部分情况下, 一次 PGA 运算就可将高次误差准确地估计出来。因此, 只要能够较精确地获得二次调频率, 就有可能在不迭代的情况下将 PGA 用于实时成像, 并且达到满意的效果。

为此, 可以在PGA算法之前, 加入一次调频率的估计, 去除二次相位误差。SAC算法的精度较高, 又有不用迭代的优点, 因此从实时的角度出发, 可以采用SAC算法估计调频率。在二次相位误差较大以至于影响到距离徙动校正的精度时, 还可以首先采用SACGS^[4]进行一次调频率粗估计, 实现精确的距离徙动校正。将SACGS, SAC和PGA算法组合, 可以得到如图 2 所示流程的组合算法。组合方法在保证误差估计精度的情况下, 大大降低了计算量, 非常适于实时成像。

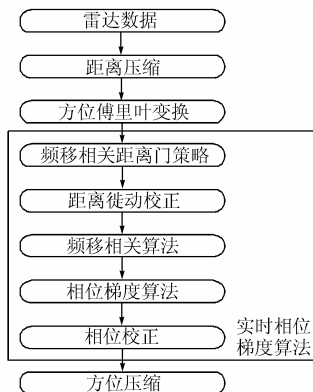


图 2 组合算法流程

3.2 实时 PGA 中点目标的选取

选择合适的目标是 PGA 算法中一个非常重要的问题。

在条带式 SAR 实时成像中, 点目标的选取应该遵循以下 3 个原则。(1)覆盖整个成像区域, (2)尽可能少, (3)点目标特性要好。

点目标选择的一般方法是在每一个距离单元内的找到最大峰值点作为点目标。为避免最大峰值点非点目标特性的情况, 本文利用对比度准则来选择经过变换后的最佳的线性调频信号, 该规则的原理为一个理想的点目标所产生的线性调频信号在合成孔径内的幅度是均匀一致的^[6], 如公式(1)所示:

$$Q_k = 1 - \left[\frac{1}{T_s} \int_{-T_s/2}^{T_s/2} |F_k(t)| dt \right]^2 \bigg/ \left[\frac{1}{T_s} \int_{-T_s/2}^{T_s/2} |F_k(t)|^2 dt \right] \quad (1)$$

这里 $F_k(t)$ 是所得到的方位线性调频信号, T_s 是合成孔径时间, 当所选点目标的多普勒历程不满一个合成孔径时, T_s 就是线性调频信号的持续时间, k 表示点目标所在的距离门。 Q_k 越小, 则表明点目标的选择越理想。

3.3 条带 SAR 相位误差的拼接问题

在条带 SAR 中, 需要将每个点目标估计出的运动误差拼接起来, 得到整个成像区域的运动误差, 必须解决相位拼接中线性项的问题。为了便于分析, 只考虑一个距离门内的方位向数据, 设整个图像的方位时间为 $t \in (-T, T)$, 合成孔径时间为 T_s , 方位调频率为 k_a , 第 m 个点目标的位置在 t_m 。易知, 只分析两个点目标的情况即可。如图 3 所示, 设运动误差的表达式为 $\xi(t)$, t_1, t_2 处的点目标为 P_1, P_2 , AB 为两点目标孔径重合部分, 则两个点目标可以表示为式(2), 式(3):

$$P_1(t) = \exp(-j(\pi k_a(t - t_1)^2 + \xi(t))), \quad t \in (-T_s/2 + t_1, T_s/2 + t_1) \quad (2)$$

$$P_2(t) = \exp(-j(\pi k_a(t - t_2)^2 + \xi(t))), \quad t \in (-T_s/2 + t_2, T_s/2 + t_2) \quad (3)$$

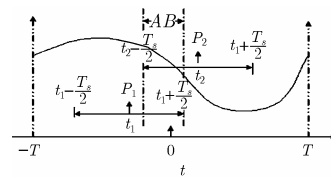


图 3 相位误差分析图

将 $\xi(t)$ 分别在 t_1, t_2 处做勒让德多项式展开, 只单独列出一项。则可得到式(4), 式(5)。

$$P_1(t) = \exp(-j(\pi k_a(t - t_1)^2 + a(t - t_1) + \xi_1(t - t_1))), \quad t \in (-T_s/2 + t_1, T_s/2 + t_1) \quad (4)$$

$$P_2(t) = \exp(-j(\pi k_a(t - t_2)^2 + b(t - t_2) + \xi_2(t - t_2))), \quad t \in (-T_s/2 + t_2, T_s/2 + t_2) \quad (5)$$

已知点目标 P_1, P_2 将分别被压缩在 $t_1 - \frac{a}{2\pi k_a}$,

$t_2 - \frac{b}{2\pi k_a}$ 位置处。因此选点后得到的点目标即为式(4), 式

(5), 将其写为式(6), 式(7)形式:

$$P_1(t) = \exp\left[-j\left(\pi k_a \left(t - t_1 + \frac{a}{2\pi k_a}\right)^2 + \frac{a^2}{4\pi k_a} + \xi_1(t - t_1)\right)\right],$$

$$t \in (-T_s/2 + t_1, T_s/2 + t_1) \quad (6)$$

$$P_2(t) = \exp\left[-j\left(\pi k_a \left(t - t_2 + \frac{b}{2\pi k_a}\right)^2 + \frac{b^2}{4\pi k_a} + \xi_2(t - t_2)\right)\right],$$

$$t \in (-T_s/2 + t_2, T_s/2 + t_2) \quad (7)$$

由第 3.2 节可知, 此时用于 PGA 估计相位误差的信号如下:

$$P_1^*(t) = \exp\left[j\left(\pi k_a \left(t - t_1 + \frac{a}{2\pi k_a}\right)^2\right)\right],$$

$$t \in \left(-\frac{T_s}{2} + t_1 - \frac{a}{2\pi k_a}, \frac{T_s}{2} + t_1 - \frac{a}{2\pi k_a}\right) \quad (8)$$

$$P_2^*(t) = \exp\left[j\left(\pi k_a \left(t - t_2 + \frac{b}{2\pi k_a}\right)^2\right)\right],$$

$$t \in \left(-\frac{T_s}{2} + t_2 - \frac{b}{2\pi k_a}, \frac{T_s}{2} + t_2 - \frac{b}{2\pi k_a}\right) \quad (9)$$

按照第 2 节的方法处理后, 去除常数项后得到需要估计的相位误差:

$$P_{11}(t) = \exp\left[-j\left(\frac{a^2}{4\pi k_a} + \xi_1(t - t_1)\right)\right], \quad t \in (\text{重合部分}) \quad (10)$$

$$P_{22}(t) = \exp\left[-j\left(\frac{b^2}{4\pi k_a} + \xi_2(t - t_2)\right)\right], \quad t \in (\text{重合部分}) \quad (11)$$

将式(10)和式(11)的相位求导, 得到 $\xi_1'(t - t_1)$, $\xi_2'(t - t_2)$, 直接积分后就得到 $\xi_1(t - t_1)$ 和 $\xi_2(t - t_2)$ 。 $\xi_1(t - t_1)$, $\xi_2(t - t_2)$ 与 $\xi(t)$ 有如下关系:

$$\xi(t) = a(t - t_1) + \xi_1(t - t_1), \quad t \in (-T_s/2 + t_1, T_s/2 + t_1) \quad (12)$$

$$\xi(t) = b(t - t_2) + \xi_2(t - t_2), \quad t \in (-T_s/2 + t_2, T_s/2 + t_2) \quad (13)$$

可见, 不加处理直接积分所估计的相位误差与实际的运动误差相比, 将存在着线性误差, 其严重程度将依赖于 a, b 。而且这个线性误差将随着方位向的位置发生变化, 每个点目标所估计的运动误差与实际误差间的线性误差都不相同, 这样, 在相位梯度拼接的时候, 将存在相位梯度跳变, 引起散焦和几何畸变, 必须想办法去除或尽量减小线性误差的影响。将式(12)求导后可得

$$\xi'(t) = a + \xi_1'(t - t_1) \quad (14)$$

将式(14)左右两边在 $t \in (-T_s/2 + t_1, T_s/2 + t_1)$ 积分可得

$$\frac{\xi(t_1 + T_s/2) - \xi(t_1 - T_s/2)}{T_s} = a + \frac{\int \xi_1'(t - t_1) dt}{T_s} \quad (15)$$

一般情况下, T_s 相对于 $\xi(t_1 + T_s/2) - \xi(t_1 - T_s/2)$ 都足够大, 因此式(15)左边趋近于 0, 可求得线性项系数 a , 利用式(14)即可求得 $\xi'(t)$ 。同理, 通过式(13)亦可求得 $\xi'(t)$ 。此时

两个点目标的孔径在 AB 段的重合部分所求得的 $\xi'(t)$ 相同, 可以完成相位误差的拼接, 得到正确的运动误差。

4 实际数据的处理和分析

图 4—图 10 是某高分辨率机载 SAR 数据处理的例子, 方位数据长度为 8192 点, 合成孔径时间为 6s, 作用距离为 13km。图 4 是未去除线性误差而拼接所得的结果, 可以看出在拼接处有明显的相位梯度不连续情况。图 5 为采用本文方法去除线性相位误差后, 拼接得到的实时 PGA 所估计的误差结果。与高精度惯性导航系统测量得到的运动误差比较, 两者的结果吻合得非常好。由此可见, 未去除线性相位误差而进行拼接的结果与实际的运动误差相比相差很远, 无法反映实际的运动误差, 不能用来做运动补偿, 只有将线性误差去除后得到的结果才是实际中运动误差的正确估计。

图 6 是未用 PGA, 未用高精度惯导, 直接成像的结果。图 7 是普通 PGA 未迭代结果。图 8 是利用超高精度平台测位仪器得到运动误差并进行补偿所得到的结果。图 9 是用组合 PGA 方法的成像结果, 没有利用平台测位仪器。图 10 是普通 PGA 迭代 6 次结果。

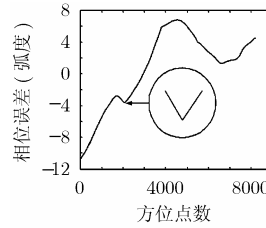


图 4 未去线性误差拼接结果

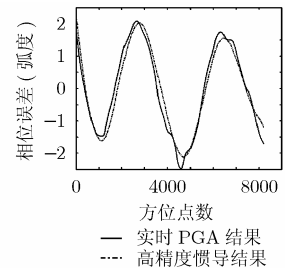


图 5 实时 PGA 和惯导结果

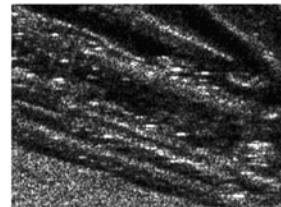


图 6 直接成像结果



图 7 普通PGA未迭代结果

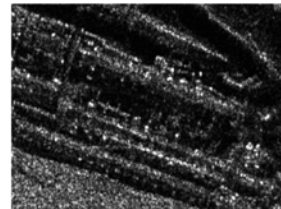


图 8 高精度惯导结果

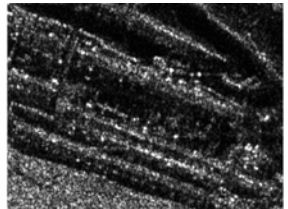


图 9 实时 PGA 结果

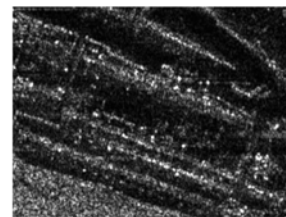


图 10 普通 PGA 迭代 6 次结果

可以看出, 实时 PGA 的效果远远好于普通 PGA 未迭

代的效果, 普通 PGA 迭代 6 次才和实时 PGA 的效果相当。实时 PGA 与高精度惯导成像的结果相当, 因此将大大降低实时 SAR 成像的设计难度, 在没有高精度测速仪器的情况下, 也可取得较好的成像效果。在加入组合方法的成像系统中, 成像时间约为 50s, SAC 自聚焦耗时占成像总时间的 5%, PGA 耗时占总时间的 25%, 组合方法的计算量远小于 PGA 迭代两次的计算量, 计算量和成像效果均显示, 该组合方法适用于实时成像。

5 结束语

本文通过对大量高分辨率机载 SAR 雷达回波数据的处理, 找出了影响 PGA 精度和迭代次数的主要因素, 将 PGA 算法, SACGS 算法结合到 RD 算法中, 采用特殊的线性调频信号判别准则, 能够在不用迭代的情况下采用 PGA 算法估计出由于雷达平台运动所产生的相位误差, 分析并解决了条带 SAR 中运动相位误差拼接的问题, 成功地将 PGA 这一稳健的相位误差估计算法应用到实时系统当中。经过对实际数据的处理, 验证了该方法的有效性, 使高分辨率的实时成像更加易于实现, 成像效果更好, 有着一定的意义。

参 考 文 献

- [1] Carrara Walter G and Goodman Ron S. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms, London: Artech House, 1995: 246–252.
 - [2] Dall Jorgen. A new frequency domain autofocus algorithm for SAR. Proceeding of IGARSS' 91, Helsinki, June 1991:
 - [3] Wahl D E and Eichel P H. Phase gradient autofocus—A robust tool for high resolution SAR phase correction. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(3): 827–835.
 - [4] 张新, 吴一戎, 丁赤飏. 一种易行的高分辨率机载 SAR 实时自聚焦算法. 电子与信息学报, 2006, 28(5): 923–926.
Zhang Xin, Wu Yi-rong, and Ding Chi-biao. A easy implementation real time autofocus algorithm for high resoluteion airborne SAR. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(5): 923–926.
 - [5] 孟大地, 丁赤飏. 一种用于条带式 SAR 的自聚焦算法. 电子与信息学报, 2005, 27(9): 1349–1352.
Meng Da-di and Ding Chi-biao. A new approach to Autofocus considering strip map SAR. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(9): 1349–1352.
 - [6] Yadin E. SAR autofocusing viewed as adaptive beamforming on prominent scatters. IEE Radar 94 Conf., Brighton UK, 2004: 138–143.
- 张 新: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为高分辨率 SAR 实时成像处理.
- 丁赤飏: 男, 1969 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为合成孔径雷达系统和成像技术、信号与信息处理技术.
- 吴一戎: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为 SAR 信号处理.
- 梁兴东: 男, 1972 年生, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为合成孔径雷达系统和信号处理.