

一种易行的高分辨率机载 SAR 实时自聚焦算法

张新^{①②} 吴一戎^① 丁赤飏^①

^①(中国科学院电子学研究所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 该文详细分析了距离徙动对频移相关自聚焦算法的影响, 得出了高分辨率时距离徙动将严重影响频移相关法估计精度的结论。并结合距离多普勒算法提出了一种基于距离门限制的频移相关自聚焦算法, 该算法减小了距离徙动对自聚焦的影响, 提高了估计精度, 仿真和实际数据均验证了该算法的有效性, 可以达到高分辨率的要求, 并且具有计算简单的优点, 适合实时成像。

关键词 合成孔径雷达, 频移相关算法, 实时成像, 自聚焦处理

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)05-0923-04

A Easy Implementation Real Time Autofocus Algorithm for High Resolution Airborne SAR

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

^①(The National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology of the Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

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

Abstract The effect of the range migration to the Shift-And-Correlate Monopulse Secondary Surbeillause Redar (SAC) algorithm is analyzed in this paper. The conclusion is that the precision of SAC would be severely affected by the range migration in the high resolution SAR. Integrated with the range Doppler algorithm, a new SAC autofocus algorithm based on the limits of range bin is presented, which called Shift-And-Correlate within Gate Strategy (SACGS). The effect of the range migration is minished by SACGS. And the precision is increased. The efficiency of SACGS is proved by the simulation and actual SAR data. It can satisfy the request of the high resolution. And the computation is very simple, which make it very suitable for real-time image processing.

Key words Synthetic aperture radar, Shift-and-correlate algorithm, Real time imaging, Autofocus processing

1 引言

高分辨率的机载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)实时成像需要雷达平台的精确运动信息。当运动传感器的精度有限时, 要想获得高品质的图像, 需利用 SAR 回波数据进行运动补偿, 即进行自聚焦处理。

相位梯度法(PGA)、图像偏移法(Map-Drift, MD)、频移相关法(Shift-And-Correlate, SAC)^[1-3]的原理都是在一维方位向情况下对回波数据进行处理, 但是实际上回波数据是二维的, 随着分辨率的提高, 距离徙动的影响加大, 因此在这些算法之前, 都要进行距离徙动校正, 有的还需要进行反复的迭代, 大大增加了计算量。通常, 校正的参数可以由惯导给出, 也可以用系统初始的设定值。如果惯导精度有限, 距

离徙动校正精度低, 就要经过多次迭代才能满足高分辨率的精度要求, 很难满足实时的要求。如果不进行多次迭代, 就难以获得好的聚焦图像。

本文正是针对上述矛盾, 提出了一种易行的实时自聚焦处理算法, 基于 RD 算法直接从雷达回波数据中估计其多普勒参数用于距离徙动校正, 不显著增加计算量, 并且在惯导精度有限的情形下也可完成高分辨率的实时成像。

2 频移相关法基本原理

频移相关法(SAC)最早由Jorgen Dall提出^[3], 用于对SAR回波信号多普勒调频率的估计。与MD算法相比, SAC算法有着相当高的精度, 但是对初始速度不敏感, 并且计算量少于MD算法的百分之五十。

本文给出频移相关法的另一种推导方式, 以便引出新的应用方法。在以下推导中, 暂不考虑距离徙动的影响, 以便

得到频移相关法的一般表达式。

当 SAR 工作于正侧视时, 在方位多普勒域上取回波信号以多普勒零频对称的高低两段频谱, 共轭相乘, 则相位只余一次项。由傅里叶变换的性质可知, 具有线性相频特性的带限信号, 其时域为 sinc 函数形式。因此, 我们可根据 sinc 函数最大值的位置来估计多普勒调频率。具体推导如下。

利用驻定相位原理可得信号在方位多普勒频域的表达方式为

$$G(f) = \exp(j\pi f^2/f_r), \quad -B_d/2 < f < B_d/2 \quad (1)$$

式中 f 为方位频率, B_d 为多普勒带宽, f_r 为多普勒调频率。

在方位多普勒频域将 $G(f)$ 分成对称的高低两段频谱 $G_h(f)$ 和 $G_l(f)$, 每段的带宽为 $B_m \leq B_d/2$, 即有

$$G_l(f) = G\left(f - \frac{B_m}{2}\right) = \exp\left(j\pi \frac{(f - B_m/2)^2}{f_r}\right), \quad -\frac{B_m}{2} < f < \frac{B_m}{2} \quad (2)$$

$$G_h(f) = G\left(f + \frac{B_m}{2}\right) = \exp\left(j\pi \frac{(f + B_m/2)^2}{f_r}\right), \quad -\frac{B_m}{2} < f < \frac{B_m}{2} \quad (3)$$

将 $G_h(f)$ 和 $G_l(f)$ 共轭相乘, 有

$$\begin{aligned} G_m(f) &= G_l(f) \times \text{conj}(G_h(f)) \\ &= \exp\left(-j2\pi \frac{B_m}{f_r} f\right), \quad -\frac{B_m}{2} < f < \frac{B_m}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

对式(4)做逆傅里叶变换, 有

$$S_m(t) = \text{IFFT}(G_m(f)) = \text{sinc}\left(t - \frac{B_m}{f_r}\right) \quad (5)$$

sinc 函数的最大值在 $t_m = B_m/f_r$ 处, 从而可得调频率的估计为

$$f_r = B_m/t_m \quad (6)$$

SAC 算法估计的调频率均方差可由下式得到^[4,5]:

$$\langle \delta f_r^2 \rangle \approx \frac{80T_0}{\text{SCR} \times T^5} \quad (7)$$

上式中 SCR 为信杂比(信号功率和背景噪声功率之比), T_0 为合成孔径时间, T 为估计调频率所用的孔径时间。

3 距离徙动对频移相关法的影响

随着分辨率的增加, 目标的距离徙动对信号多普勒调频率估计的影响越来越显著。主要表现在以下两点: 一是单距离门内信号的多普勒历程变短, 二是不同距离门信号间的相互影响变大, 即其他距离门的信号由于距离徙动进入当前的距离门, 它们相对当前距离门内的信号是噪声, 将引起 SCR 的下降, 所以导致测量精度下降, 因而对自聚焦产生不良影响。

距离压缩后, 回波信号在距离-方位时域的距离徙动情况如图 1 所示, 其中, 虚线为其它距离门的目标信号, 实线为本距离门的目标信号。

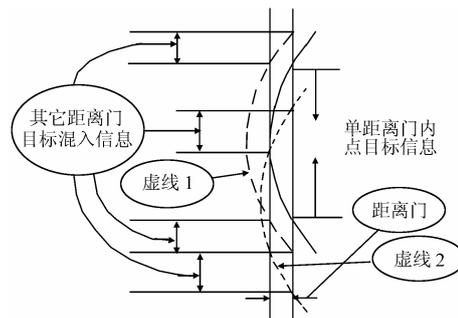


图 1 距离压缩后在距离-方位时域目标距离徙动情况

由图可见, 由于距离徙动的影响, 其它距离门的目标信号会对待估距离门的信号参数的估计产生影响, 所带来的误差也随实际情况的不同而不同。下面根据几种特殊情况做简要的说明。

(1) 其它距离门混入的目标信号强度和待估距离门的相当。此时所造成的影响为时域出现多个峰值点, 无法确定哪个是待估距离门所产生的, 对正确估计调频率造成困难。

为方便描述混入信号的影响, 不失一般性, 采用频域描述, 如图 1 所示, 虚线 1 混入的部分由时域可以看出为高频部分。可设虚线 1 混入信号的频谱范围是 $B_{m1} < f < B_{m2}$, $-B_{m2} < f < -B_{m1}$, 且 $B_{m2} - B_{m1} = B_m/2$, 而待估距离门信号的频谱范围是 $-B_m/2 < f < B_m/2$ 。如果仍按式(2)和式(3)分频段, 并设 f_{r1} 为虚线 1 所示信号的调频率, 有

$$G_l(f) = \begin{cases} \exp\left(j\pi \frac{(f - B_m/2)^2}{f_{r1}}\right), & -\frac{B_m}{2} < f < 0 \\ \exp\left(j\pi \frac{(f - B_m/2)^2}{f_r}\right), & 0 < f < \frac{B_m}{2} \end{cases} \quad (8)$$

$$G_h(f) = \begin{cases} \exp\left(j\pi \frac{(f + B_m/2)^2}{f_r}\right), & -\frac{B_m}{2} < f < 0 \\ \exp\left(j\pi \frac{(f + B_m/2)^2}{f_{r1}}\right), & 0 < f < \frac{B_m}{2} \end{cases} \quad (9)$$

此时若将式(8)和式(9)式共轭相乘, 在方位多普勒频域并不会得到所希望的一次项, 因此得不到正确的估计。

(2) 其它距离门混入的目标信号强度远大于待估距离门的信号强度。远大于即指其它距离门混入信号的带宽、反射系数等远大于待估距离门信号的相应参数。此时的情形类似于式(8), 式(9)所示, 只是频率取值范围有所不同, 故仍然得不到待估距离门调频率的准确估值。

(3) 其它距离门混入的目标信号强度远小于待估距离门的信号强度。此时影响较小, 可以找到 sinc 函数峰值的正确位置, 估计出待估距离门的调频率。

综上所述, 在高分辨率下, 由于距离徙动的影响, 式(7)分母中的 T 小于合成孔径时间, SAC 算法精度变低。因此应用 SAC 算法前需先进行距离徙动校正。

4 应用 SAC 算法的新策略

本文考虑对 SAC 算法实行新的应用策略,用于高分辨率实时成像系统。

由图 1 可知,其它距离门混入待估距离门的信号均为高频部分,也可以说待估距离门内信号的低频部分在本距离门内,高频部分混入其它距离门。因此,如果仅取待估距离门内信号的低频部分则可以降低其他距离门混入信号的影响。

实际数据经距离压缩后的信号在方位多普勒域的分布如图 2 所示,虚线为混入信号,实线为待估距离门内信号。

下述推导中认为多普勒中心频率为零。

可只截取信号在待估距离门内的低频部分进行频移相关估计,具体方法如下,首先计算出一个距离门内的方位多普勒域带宽。

合成孔径长度为

$$L_s = R_0 \theta \tag{10}$$

式中 L_s 为合成孔径长度, R_0 为斜距, θ 为天线方位 3dB 波束角。

不失一般性,如图 3 所示,相对于多普勒中心,方位向上某位置的距离徙动为

$$\Delta R = \sqrt{R_0^2 + x^2} - R_0 \approx \frac{x^2}{2R_0} \tag{11}$$

x 为相对多普勒中心的方位距离, r_g 为距离分辨单元, T_s 为合成孔径时间。因此单距离门内信号的多普勒历程可由如下方法得到。

令 $\Delta R = r_g$, 就可得到单距离门内信号在方位向上的距离为

$$x \approx \sqrt{2r_g \times R_0} \tag{12}$$

单距离门多普勒历程为

$$G_{Bd} \approx \frac{2x}{L_s} \times B_d = \frac{2 \times \sqrt{2r_g \times R_0}}{R_0 \theta} \times B_d = \frac{2B_d}{\theta} \sqrt{\frac{2r_g}{R_0}} \tag{13}$$

式中 G_{Bd} 为单距离门多普勒历程。

在方位多普勒域截取单距离门多普勒历程进行 SAC 算法就可以得到良好的估计。计算为叙述方便,将此策略称为频移相关距离门策略(Shift-And-Correlate within Gate Strategy, SACGS)。

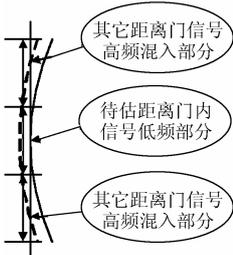


图 2 信号在方位多普勒域的分布

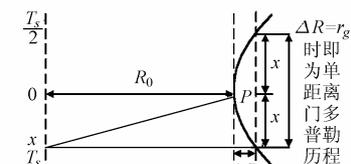


图 3 距离徙动校正

5 基于 SACGS 的实时成像处理算法

考虑将 SACGS 用于基于 RD 算法的实时成像处理算法,其成像处理的流程如图 4 所示。在此流程中, SACGS 被用来估计多普勒调频率,供距离徙动校正使用,完成距离徙动校正后再用 SAC 算法在全多普勒带宽进行调频率估计。

将 SACGS 用于实时成像的流程如图 4。

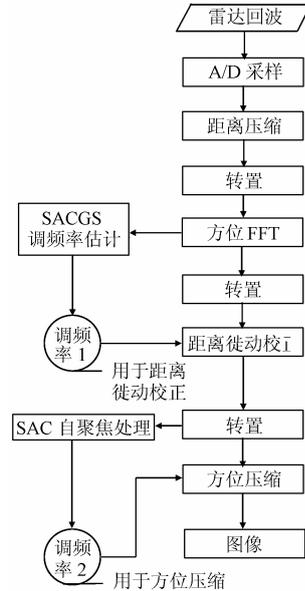


图 4 基于 SACGS 的实时成像处理算法

通常认为,如果最大距离徙动不大于四分之一一个距离分辨单元,则距离徙动不需补偿^[3]。在另一方面,也可以认为如果经距离徙动校正后,残余最大距离徙动不大于四分之一一个距离分辨单元,可以说距离徙动校正是满足成像要求的。

令 m_v 为距离徙动量,在距离多普勒域的距离徙动表达式为

$$m_v \approx \frac{\lambda f^2}{4f_r} \tag{14}$$

对上式两边求导,在 $f = \frac{B_d}{2}$ 处,距离徙动 δm_v 最大,

$$\delta m_v \approx \frac{\lambda B_d^2}{4f_r^2} \delta f_r \approx \frac{\lambda T_s^2}{16} \delta f_r \tag{15}$$

若距离分辨单元为 0.5m,波长 0.03m,合成孔径时间 5s,则可令 $\delta m_v = 0.1m$,由式(15)可得应满足 $\delta f_r \leq 2H_z/s$ 。由式(7)和式(13)可算出 $\delta f_r = 0.0011H_z/s^2$,因此 SACGS 可以满足高分辨率的要求。

6 实际数据的处理结果

由上面分析可知,采用 SACGS 方法可以直接对距离压缩后的数据进行多普勒调频率估计,并利用所得调频率进行距离徙动校正。通常,我们对聚焦深度内的数据进行平均处

理, 获得多普勒调频率。为减小估计偏差, 得到所有距离向的调频率后, 可采用直线或多项式拟合的方法。

我们采用米级高分辨率机载 SAR 实际数据进行试验处理。对其中一块数据进行处理, 在距离向 64 个聚焦深度内做出的多普勒调频率和对其直线拟合后的结果, 以及距离徙动校正后用 SAC 估计的多普勒调频率和直线拟合结果如图 5 所示。

做距离徙动校正前采用 SACGS 估计出的多普勒调频率方差 $\langle \delta f_r^2 \rangle = 0.9244(\text{Hz/s})^2$, 做距离徙动校正后 $\langle \delta f_r^2 \rangle = 0.0004(\text{Hz/s})^2$ 。距离校正前所用带宽约为校正后的四分之一, 与式(7)基本符合, 因为校正后所用带宽更大因此更精确。根据式(15), $\langle \delta f_r^2 \rangle < 1.4884(\text{Hz/s})^2$ 即可满足要求, 说明采用 SACGS 后可以实现精确距离徙动校正。

图 6 为基于 SACGS 距离徙动校正的实时成像处理算法结果,

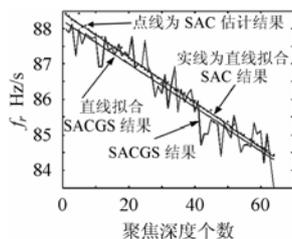


图 5 估计和直线拟合后的调频率



图 6 基于 SACGS 距离徙动校正的实时成像处理结果

7 结束语

本文简要分析了距离徙动对高分辨率机载 SAR 自聚焦处理的影响, 在此基础上提出了一种新的基于 SACGS 的实

时成像处理算法。通过 SACGS 完成高分辨率的距离徙动校正, 大大简化了高分辨率实时成像算法。该算法大大降低了平台测速精度的要求。通过对实际数据的处理, 验证了 SACGS 的正确和可行性, 对设计高分辨率的机载 SAR 实时成像系统有着一定的参考价值。

参考文献

- [1] Wahl D E, 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.
- [2] Carrara Walter G, Goodman Ron S. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms, London: Artech House, 1995: 246 – 252
- [3] Jorgen Dall. A new frequency domain autofocus algorithm for SAR, Proceeding of IGARSS' 91, Helsinki, June, 1991: 1069 – 1072.
- [4] Green J E, Oliver C J. The limits on autofocus in SAR. *Int. J. Remote Sensing*, 1992, 13: 2623 – 2641.
- [5] Oliver Chris, Quegan Shaun, Understanding Synthetic Aperture Radar Images, London: Artech House, 1998: 52 – 53.

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。

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。

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。