

基于改进 RDM 的 SAR 自聚焦算法

李刚^① 彭应宁^① 夏香根^②

^①(清华大学电子工程系 北京 100084)

^②(Department of Electrical and Computer Engineering, University of Delaware, Newark, DE 19716, USA)

摘要: 反射率偏移法(RDM)是合成孔径雷达(SAR)自聚焦的经典算法,当场景对比度较低时,RDM 自聚焦效果变差。该文提出了一种 RDM 的改进方法,该方法利用多普勒调频率与距离的函数关系,自适应地修正低对比度区域对多普勒调频率估计的影响,保证良好的自聚焦效果。实际 SAR 数据实验证明了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达;自聚焦;反射率偏移法

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)02-0349-04

Improved RDM for SAR Autofocusing

Li Gang^① Peng Ying-ning^① Xia Xiang-gen^②

^①(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

^②(Department of Electrical and Computer Engineering, University of Delaware, Newark, DE 19716, USA)

Abstract: Reflectivity Displacement Method (RDM) is a classical algorithm of Synthetic Aperture Radar (SAR) autofocus processing, whose performance degenerates with low contrast of the scene. This paper proposes an improved RDM for SAR autofocus. Based on the relationship between the Doppler rate and the range, the proposed method can adaptively overcome the effect of the low contrast on the Doppler rate estimation and obtain fine autofocus results. The experiments with real SAR data show the effectivity of the proposed method.

Key words: SAR; Autofocus; Reflectivity Displacement Method (RDM)

1 引言

合成孔径雷达(SAR)作为一种高分辨、全天时、全天候的遥感工具,已经被广泛应用到军事侦察、地形测绘、水文研究、环境监测等各个领域。为了得到高质量的 SAR 图像,需要从 SAR 回波中估计多普勒调频率,这一技术被称为自聚焦。经典的自聚焦方法有图像域方法和数据域方法两类,前者利用对场景成像后图像强度的变化信息,后者利用对场景成像前信号相位的变化信息。常用的图像域自聚焦方法有子孔径相关法(Map Drift, MD)^[1]、对比度最优法(Contrast Optimization, CO)^[2]和相位梯度法(Phase Gradient Autofocus, PGA)^[3,4]; MD 在方位上做两视处理,通过两视 SAR 图像相对位置的偏移来估计多普勒调频率,需要迭代运算;CO 的基本思想是搜索多普勒调频率,使得图像强度的对比度最大,搜索范围和步长需要适当选择;PGA 通过对图像中某些特亮点进行自聚焦处理,能够补偿高次相位误差,需要迭代运算。常用的数据域自聚焦方法有移频相关法(Shift and Correlation, SAC)^[5]、相位差法(Phase Difference, PD)^[2]和反射率偏移法(Reflectivity Displacement

Method, RDM)^[1,6]; SAC 把方位向功率谱高低两段所对应的信号移频后做相关运算,通过相关峰的位置估计多普勒调频率;PD 把方位时域信号分成两个子孔径,将一个子孔径的信号与另一个子孔径信号的复共轭相乘,再通过傅里叶变换估计多普勒调频率;RDM 对时间上有偏移的两段方位时域信号的功率谱做相关运算,根据相关峰的位置和方位时间的偏移量来估计多普勒调频率,它适用于小天线、宽波束的情况。总体上比较图像域和数据域自聚焦方法,前者的聚焦效果较好,而后的复杂度较小,这两类方法都适用于高对比度场景。除了上述两类经典方法之外,还有学者提出了其它的自聚焦方法,如参数化自聚焦^[7],最小熵自聚焦^[8]等,但这些方法复杂度很高,不适合实时处理。

上述的数据域自聚焦方法通常在多个距离单元分别估计多普勒调频率,然后取其平均值用于自聚焦处理。当场景中有部分区域对比度较低时,用这部分区域的数据估计多普勒调频率的误差较大,并导致最终的成像结果聚焦效果变差。本文以数据域自聚焦方法中的 RDM 为例,提出了一种改进的自聚焦方法,该方法利用多普勒调频率与距离的函数关系,能够自适应地修正低对比度区域对多普勒调频率估计的影响,保证良好的自聚焦效果。实际 SAR 数据实验证明了该方法的有效性。

2 RDM 简述

下面简要回顾 RDM 自聚焦处理^[1,6]。如图 1 所示, 当 SAR 天线较小、波束较宽时, 在相隔较近的两个时刻, 天线照射区域存在大面积重叠。因此, 观察在方位向时间上有少许偏移 Δt 的两个孔径, 天线照射重叠区域在两个孔径的回波信号表现出频谱偏移 Δf , 这种效果如图 1 中时频平面图所示, 其中信号在时频平面图中呈直线分布是由于方位信号可近似视为线性调频形式, 直线斜率即为多普勒调频率 f_r 。对两个孔径信号频谱做相关运算, 根据相关峰值的位置就能够估计出 Δf , 则多普勒调频率可估计为 $f_r = \Delta f / \Delta t$ 。对场景中多个距离单元做上述操作, 把多个距离单元上多普勒调频率的估计值取平均作为 f_r 的最终估计结果, 即

$$\hat{f}_r = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{f}_r(n) \quad (1)$$

其中 n 为距离单元序号, N 为参与估计的距离单元总数, $\hat{f}_r(n)$ 表示第 n 个距离单元上多普勒调频率的估计值。以上就是 RDM 的基本原理。

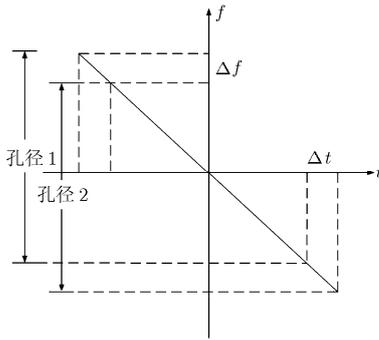


图 1 两孔径方位向信号时频关系图

在两个孔径信号频谱的相关运算结果中, 为了保证明显的相关峰值能够在正确位置出现, RDM 需要两个条件: (1) 时间偏移量 Δt 较小; (2) 场景对比度较高。前者只需合理设置 Δt 即可实现; 后者是决定 RDM 性能优劣的关键。当场景中部分区域对比度较低时, 在该区域两个孔径信号频谱的相关峰值不明显, 估计 Δf 的误差较大, 这将导致式(1)中 \hat{f}_r 误差变大, 自聚焦效果变差。因此, 自适应地修正低对比度区域对多普勒调频率估计的影响, 是改进 RDM 自聚焦效果的一个有效手段。

3 改进的 RDM

本节提出一种 RDM 的改进方法。多普勒调频率可表示为^[1-8]

$$f_r = -\frac{2(v \cos \theta)^2}{\lambda R} \quad (2)$$

其中 λ 为雷达波长, R 为距离, v 为雷达平台前向速度, θ 为天线斜视角。设参与估计 f_r 的距离单元数为 N , 定义序列

$$x(n) = \frac{1}{f_r(n)} = -\frac{\lambda(R_0 + n \cdot R_{\text{step}})}{2(v \cos \theta)^2} \quad (3)$$

其中 R_0 为观测场景的最近距离, R_{step} 为距离向脉冲压缩后距离单元的大小, n 为距离单元号, $n=1,2,\dots,N$ 。由式(3)可见, 在理想情况下, 序列 $x(n)$ 呈现为 n 的线性函数, 此时自聚焦处理可如下实现: 首先对逐个距离单元的方位向信号应用 RDM 估计 $f_r(n)$ 并得到 $x(n)$, 然后计算 x 随 n 变化的斜率, 再根据式(3)计算出每个距离单元的多普勒调频率并据此设计方位向匹配滤波器, 最终得到自聚焦图像。因此, 自聚焦处理的关键是估计 x 随 n 变化的斜率。然而在实际中, 由于场景对比度的不均匀性, 在各距离单元上应用 RDM 估计 $f_r(n)$ 必然存在误差, 这将影响 x 与 n 的线性关系。在观测场景中的高对比度区域, RDM 估计 $f_r(n)$ 的结果较为精确, x 与 n 的局部线性关系将较为明显; 而在低对比度区域, RDM 估计 $f_r(n)$ 的结果误差较大, x 与 n 的局部线性关系将变得不明显。

下面基于 x 与 n 的线性关系对 RDM 做改进。定义 N 个 $N-1$ 元序列 y_n 如下:

当 $n=1$ 时

$$y_1(i) = \left[\frac{x(i+1) - x(1)}{i} \right]^2, \quad 1 \leq i \leq N-1 \quad (4)$$

当 $n=2,3,\dots,N-1$ 时

$$y_n(i) = \begin{cases} \left[\frac{x(i) - x(n)}{i-n} \right]^2, & 1 \leq i < n \\ \left[\frac{x(i+1) - x(n)}{i+1-n} \right]^2, & n \leq i \leq N-1 \end{cases} \quad (5)$$

当 $n=N$ 时

$$y_N(i) = \left[\frac{x(i) - x(N)}{i-N} \right]^2, \quad 1 \leq i \leq N-1 \quad (6)$$

$i=1,2,\dots,N-1$ 。对指定的 n 而言, y_n 是一个 $N-1$ 元序列。在理想情况下, x 为 n 的线性函数, 则 y_n 中所有元素均相同, 即 $\text{var}(y_n) = 0$, $n=1,2,\dots,N$, 其中 $\text{var}(\cdot)$ 表示求方差运算, 可表示为

$$\text{var}(y_n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \left(y_n(i) - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N-1} y_n(j) \right)^2 \quad (7)$$

当距离单元号 n 对应高对比度区域时, $\text{var}(y_n)$ 较小; 当距离单元号 n 对应低对比度区域时, $\text{var}(y_n)$ 较大。因此可以通过观测 $\text{var}(y_n)$ 来判断第 n 个距离单元的对比度, 如果 $\text{var}(y_n)$ 较大, 即第 n 个距离单元位于低对比度区域, 则应对 $x(n)$ 做修正, 以使得 x 与 n 呈现线性关系。修正可以通过直线拟合实现, 具体过程见下面的例子。

下面结合一个例子解释上述内容。取参考距离单元数 $N=64$, 考虑一个极端的情况, 假设只有第 40 个距离单元对比度较低, 其它距离单元对比度很高, 则 RDM 在第 40 个距离单元上估计 $f_r(40)$ 误差较大, 在其它距离单元上估计 $f_r(n)$ 误差较小, $n=1,\dots,39,41,\dots,64$ 。因此 x 随 n 的函数关

系如图 2(a)所示, 可见除 $x(40)$ 之外, x 与 n 呈线性函数关系。根据式(4)~(7)计算得到 $\text{var}(y_n)$ 如图 2(b)所示, 可见 $\text{var}(y_{40})$ 最大, 这说明第 40 个距离单元对比度较低(与假设条件相吻合), 需要对 $x(40)$ 做修正。按照 $x(1), \dots, x(39), x(41), \dots, x(64)$ 做直线拟合得到序列 $z(n)$, 更新 $x(40)=z(40)$, 得到新的序列 x 如图 2(c)所示, 可见更新后的 x 与 n 呈线性函数关系。然后估计该直线斜率, 计算出每个距离单元的多普勒调频率并设计方位向匹配滤波器, 即可实现自聚焦。

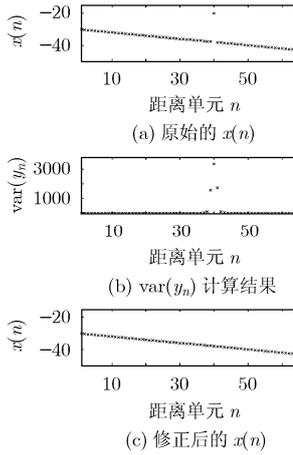


图 2 改进 RDM 示例图

综上所述, 改进 RDM 自聚焦方法可描述如下:

步骤 1 在第 n 个距离单元运用 RDM 得到 $f_r(n)$, 并按照式(3)得到序列 $x(n)$, $n=1, 2, \dots, N$;

步骤 2 根据 $x(n)$, 按照式(4)~(6)得到序列 y_n , $n=1, 2, \dots, N$;

步骤 3 按照式(7)计算 y_n 的方差, $n=1, 2, \dots, N$, 若 $\text{var}(y_k) = \max_{n=1, 2, \dots, N} [\text{var}(y_n)]$, 则按照 $x(1), \dots, x(k-1), x(k+1), \dots, x(N)$ 做直线拟合得到序列 $z(n)$, 更新 $x(k)=z(k)$, 然后再转回步骤 2, 直到 $\max_{n=1, 2, \dots, N} [\text{var}(y_n)]$ 和 $\min_{n=1, 2, \dots, N} [\text{var}(y_n)]$ 的差值

小于预定收敛门限 ϵ 。迭代收敛后, x 近似为 n 的线性函数;

步骤 4 估计 $x(n)$ 的斜率, 计算出每个距离单元的多普勒调频率并设计方位向匹配滤波器, 实现自聚焦。

改进 RDM 基于多普勒调频率的空变特性(即多普勒调频率随距离而变化), 对星载 SAR 和机载 SAR 都适用。由于 RDM 自聚焦处理多用于机载 SAR^[6], 如果距离向分辨率较高, 同时参与估计的距离单元数 N 不是很大, 则多普勒调频率的空变特性可以忽略, 即

$$f_r(n) \approx -\frac{2(v \cos \theta)^2}{\lambda(R_0 + N \cdot R_{\text{step}}/2)} \quad (8)$$

$n=1, 2, \dots, N$, 可见 f_r 与 n 呈线性函数关系, 其斜率为 0。此时无需如式(3)所示构造 $x(n)$, 可以直接基于 f_r 与 n 的线性关系对 RDM 做改进, 只需把式(4)~(6)中的 x 替换为 f_r 即可, 这里不再赘述。

4 实验结果

下面用实际 SAR 数据实验来证明本文所提出方法的有效性。实际数据来源于某单位的机载 X 波段 SAR, 系统参数如下: 波长 $\lambda=0.03108\text{m}$, 最近观测距离 $R_0=31.3\text{km}$, 雷达带宽 $B=200\text{MHz}$, 脉冲重复频率 $\text{PRF}=1\text{kHz}$, 参与估计的距离单元数 $N=64$, 脉冲压缩后距离向单元约为 1m 。由于该机载 SAR 距离向分辨率较高, 参考距离单元数又较少, 因此在理想情况下, 参与估计的各距离单元上多普勒调频率应该是近似相同的。图 3 给出了实际数据的估计结果: 图 3(a)中是原始 RDM 在各距离单元上估计多普勒调频率的结果, 可见多数估计结果集中在 -40Hz/s 左右, 少数估计结果偏差较大, 这是场景对比度的不均匀性造成的; 图 3(b)中是用本文提出的改进 RDM 修正后多普勒调频率的估计结果, 其中设迭代收敛门限 $\epsilon=0.1$, 可见修正后各距离单元的多普勒调频率估计结果基本相同。根据原始的 RDM, 对图 3(a)中各多普勒调频率估计结果求平均得到 $f_{r1}=-35.56\text{Hz/s}$, 代入式(8)得到 $v \cos \theta=131.59\text{m/s}$; 根据改进 RDM, 从图 3(b)中估计多普勒调频率为 $f_{r2}=-40.72\text{Hz/s}$, 代入式(8)得到 $v \cos \theta=140.79\text{m/s}$ 。根据两组不同参数分别做自聚焦处理, 得到成像结果如图 4 所示, 其中横轴为距离向, 纵轴为方位向, 可见改进 RDM 能够获得比原始 RDM 更清晰的自聚焦成像结果。

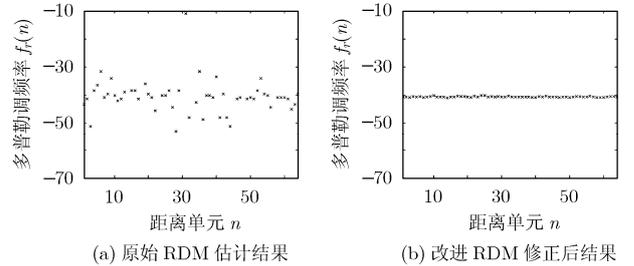


图 3 不同距离单元的多普勒调频率

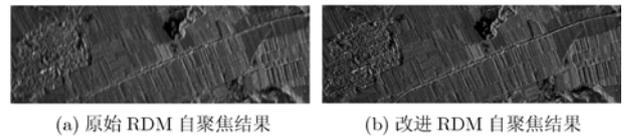


图 4 自聚焦成像结果

5 结束语

作为一种经典的 SAR 自聚焦方法, RDM 适用于高对比度场景, 对低对比度场景则自聚焦效果变差。本文提出了一种 RDM 的改进方法, 利用多普勒调频率与距离的函数关系, 能够自适应地修正低对比度区域对多普勒调频率估计的影响, 保证了良好的自聚焦效果。实际 SAR 数据实验证明了该方法的有效性。除了用于改进 RDM 以外, 本文的思想也可用于对 PD 和 SAC 等数据域自聚焦方法做改进。

参 考 文 献

- [1] 禹卫东. 合成孔径雷达信号处理研究. [博士论文], 南京: 南京航空航天大学, 1997.
- [2] Oliver C and Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images. Norwood, MA: Artech House, 1998, Chap. 2.
- [3] Wahl D E, Eichel P H, and Ghiglia D C, *et al.* 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] Van Rossum W L, Otten M P G, and Van Bree R J P. Extended PGA for range migration algorithms. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(2): 478–488.
- [5] Dall J. A new frequency domain autofocus algorithm for SAR. In Proceedings of IGARSS'91, Helsinki, Finland, 1991: 1069–1072.
- [6] Moreira J R. A new method of aircraft motion error extraction from radar raw data for real time motion compensation. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(4): 620–626.
- [7] Xu J, Peng Y N, and Xia X G. Parametric SAR autofocus: inherent accuracy limitations and realization. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(11): 2397–2411.
- [8] Wang J and Liu X. SAR minimum-entropy autofocus using an adaptive-order polynomial model. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(4): 512–516.
- 李 刚: 男, 1979 年生, 助理研究员, 研究领域包括 SAR 成像、运动目标检测与成像、阵列信号处理等.
- 彭应宁: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 长期从事雷达信号处理领域的研究.
- 夏香根: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为通信与信号处理.