

## 图像幅度和值最小化自聚焦算法

刘碧丹<sup>①②</sup> 韩松<sup>①</sup> 王岩飞<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 为了获得高分辨率合成孔径雷达(SAR)图像,需要精确的方位向调频斜率参数,该文提出了图像幅度和值最小化的自聚焦算法。论文分析了方位向信号频域的压缩处理,当频域复乘函数的幅值为常数时,图像对比度与图像幅度和值之间存在一定的关系,又根据图像聚焦程度和图像对比度之间的关系,推导出图像聚焦程度和图像幅度和值之间的联系,根据此联系可以快速准确地确定方位向真实调频斜率,论文给出了该算法的实现流程。与传统的子孔径相关算法相比,该算法由于不存在部分孔径效应,所以具有计算量小、收敛好、估计精度高的特点;与图像对比度最优估计法相比,该文算法收敛速度快,运算量少,易于硬件实现,有助于提高实时成像处理器的性能。对 RADARSAT-1 数据自聚焦,实验结果验证了该算法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达;多普勒调频斜率;自聚焦;幅度和值最小

**中图分类号:** TN957.52

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2009)04-0768-04

## Minimizing Sum of Image Amplitudes Autofocus Algorithm

Liu Bi-dan<sup>①②</sup> Han Song<sup>①</sup> Wang Yan-fei<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** High resolution Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging requires that the azimuth frequency modulation rate is accurately estimated. A new autofocus algorithm is presented which minimizing sum of amplitudes in this paper. This paper analyses the relationship between the image contrast function and the sum of amplitudes, when the matched function's amplitude in azimuth direction is invariable. Based on the relationship between the image contrast function and the focus degree of the image, the minimizing sum of amplitudes autofocus algorithm is presented. The performance of this algorithm is verified by the computer simulation and RADARSAT-1 raw data imaging. Experimental results show that the algorithm has better convergence speed and estimation accuracy than traditional Map Drift (MD) auto focus algorithm. It has better convergence speed and less computation cost than the Contrast Optimization Autofocus Algorithm (COAA). It can be implemented by hardware easily and help to improve the performance of real time imaging processor.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Doppler frequency rate; Autofocus; Minimizing sum of image amplitudes

### 1 引言

在合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像中,多普勒调频斜率由下面的参数决定:平台与目标的速度、位置和载波波长<sup>[1,2]</sup>。多普勒调频斜率的准确度影响图像的4个参数:图像分辨率、峰值旁瓣比、目标的位置和相位<sup>[3]</sup>,其误差将造成图像的散焦、模糊以及错位<sup>[4,5]</sup>。平台的扰动和惯导系统的测量误差在一定程度上阻碍了高分辨率雷达成像的实现,对于高分辨率雷达图像,需要利用回波数据进行精确的多普勒调频斜率估计。

多普勒调频斜率的估计,主要有子孔径相关法<sup>[6]</sup>,反射

率频移法、频移相关法、相位梯度法<sup>[7]</sup>和图像对比度最优法<sup>[8]</sup>等。其中,子孔径相关法应用较广,该方法要求子孔径之间具有强相关性,当SAR发射窄波束时,则会导致两个子孔径之间的相关性比较弱,从而使调频率估计误差变大;此外子孔径相关法为确定相关峰值位置,一般需要拟合处理,加大了运算量,不利于实时处理。

本文分析了SAR回波信号中的多普勒调频斜率参数。在对方位向进行频域压缩处理时,保持频域复乘函数的幅值不变,论文推导出图像对比度和图像幅度和值之间的转换关系。根据已知的图像聚焦程度和图像对比度的关系,可以推导出图像聚焦程度和图像幅度和值之间的关系。基于这种分析,提出了图像幅度和值最小化自聚焦算法。理论仿真表明,

与传统的子孔径相关法相比, 该算法由于是基于图像域的, 不存在部分孔径效应, 提高了估计精度, 收敛速度快, 运算量降低; 与图像对比度最优法相比, 本文方法收敛速度快, 运算量减少。最后, 采用 RADARSAT-1 数据实验验证了本文算法对实际数据的有效性。

## 2 算法分析

SAR 发射线性调频信号, 经过单位反射系数距离为  $R_0$  的点目标反射, 雷达接收到回波信号, 对回波信号进行正交解调后, 忽略距离包络和方位向包络等幅值的影响, 这时的复基带信号表示为<sup>[4]</sup>

$$s_0(\tau, \eta; R_0) = \exp\left\{-j\pi K_r \left(\tau - 2R(\eta; R_0)/c\right)^2\right\} \cdot \exp\left\{-j4\pi f_0 R(\eta; R_0)/c\right\} \quad (1)$$

其中  $\tau$  为距离向时间, 参考点取脉冲中心处时刻;  $\eta$  为方位向时间, 参考点取雷达距点目标最近距离处的时刻;  $c$  为光速;  $K_r$  为发射的线性调频信号的调频斜率;  $R(\eta; R_0)$  为雷达载体与点目标间的瞬时距离

$$R(\eta; R_0) = \sqrt{R_0^2 + (V_r \eta)^2} \quad (2)$$

其中  $V_r$  是雷达载体与目标间的等效速度。

回波信号的多普勒调频斜率  $K_a$  为

$$K_a = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR^2(\eta; R_0)}{d\eta^2} = -\frac{2V_r^2}{\lambda R_0} \quad (3)$$

SAR 回波在方位向上是具有大时间带宽积的近似线性调频信号, 自聚焦的任务是估计调频斜率  $K_a$  的大小<sup>[4]</sup>。

回波信号的方位向压缩通常采用频域匹配滤波方法<sup>[6]</sup>: 先对方位向信号进行傅里叶变换, 然后在频域进行相位函数复乘, 最后通过傅里叶逆变换得到 SAR 图像。

图像对比度表示图像亮度的波动程度, 也可把它理解为图像中各像素亮度值与图像亮度均值的偏离程度, 借助随机过程中方差的概念, 给出如下图像对比度的精确定义<sup>[8]</sup>: 图像对比度函数是方位向图像亮度(intensity)的标准偏差(standard deviation)和平均值(mean)的比值, 把它称为亮度对比度函数  $C$ , 记作

$$C = \frac{\sqrt{A\{I^2 - [A(I)]^2\}}}{A(I^2)} \quad (4)$$

其中用  $I$  表示方位向一维图像的幅度(amplitude);  $A$  表示空间求平均值运算。对于一个实时序列  $x(n)$ ,  $1 \leq n \leq N$ 。

$A[x(n)]$  就表示该序列的平均值, 即

$$A[x(n)] = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \quad (5)$$

图像对比度最优自聚焦算法<sup>[8]</sup>是基于图像聚焦程度和图像对比度直接存在以下关系: 一是图像对比度可以反映图像聚焦深度。图像聚焦深度越高, 图像对比度越高。二是当把图像中的相位误差全部去掉、图像完全聚焦时, 图像对比度达到最大值。

自聚焦处理时, 对方位向采用频域压缩。首先进行傅里叶变换, 设方位向复信号为  $a_1(n)e^{j\varphi_1(n)}$ ,  $1 \leq n \leq N$ , 经过傅里叶变换后信号为  $a_f(n)e^{j\varphi_2(n)}$ ,  $a_1(n)$  和  $a_f(n)$  分别表示时域和频域幅值。根据帕塞瓦尔定理(Parseval's theorem)可知, 傅里叶变换前后的能量不变<sup>[9]</sup>, 有

$$\sum_{n=1}^N a_1^2(n) = \sum_{n=1}^N a_f^2(n) \quad (6)$$

在自聚焦处理时, 对方位向频域信号进行复乘, 只进行相位补偿, 幅度为常数  $k$ , 通常取  $k=1$ , 则有复乘函数  $ke^{-j\varphi_3(n)}$ , 则频域复乘后的能量  $E$  为

$$E = k^2 \sum_{n=1}^N a_f^2(n) \quad (7)$$

频域复乘后, 对信号傅里叶逆变换处理, 根据帕塞瓦尔定理可知, 傅里叶逆变换前后的能量不变。所以这种方位频域压缩, 如果每次压缩时匹配函数只进行相位补偿, 幅度常数  $k$  保持不变, 则每次压缩后得到图像的能量是不变的。

用  $I$  表示方位向压缩处理后一维图像的幅度, 方位向处理后的长度是  $N$ , 则图像能量  $E$  可表示为

$$E = NA(I^2) \quad (8)$$

为了把图像对比度和信号能量联系起来, 把式(8)代入式(4), 根据随机过程的标准偏差的求解<sup>[10]</sup>, 可以得到下面的关系式

$$\left(\frac{CE}{N}\right)^2 = E - [A(I)]^2 \quad (9)$$

根据式(9)的关系, 可以作如下的分析: 对于处理长度  $N$ , 图像能量  $E$  保持不变, 当图像对比度  $C$  达到最大值时,  $A(I)$  达到最小值, 所以有  $NA(I)$  达到最小值, 亦即是图像的图像幅度和值达到最小值。

根据上述图像对比度和图像幅度和值的关系, 联系图像对比度最优自聚焦算法原理, 可以提出一种新的自聚焦方法, 当图像幅度和值达到最小值时, 图像的聚焦效果最好。

对于长度为  $N$  的一维方位图像, 在知道图像幅值后, 计算图像幅度和值只需要  $N-1$  次实数加法; 计算图像对比度则需要  $3N-2$  次实数加法、 $2N+3$  次实数乘法和一次开方处理。在雷达海量数据的二维信号处理中, 距离向和方位向的抽样点一般很大, 选择一定的数据块自聚焦处理时, 运算量的减少非常重要。

由于图像幅度和值的计算比图像对比度的计算量少, 所以图像幅度和值最小化自聚焦算法的运算量比图像对比度最优算法运算量减少。

图像幅度和值作为一个判变量, 在自聚焦算法中起的作用, 相当于图像对比度最优算法中的图像对比度。图像幅度和值最小化自聚焦算法就是找到图像幅度和值最小时的对应的方位向滤波器的调频斜率。文献[8]介绍的自动搜索方法同样使用于本文的自聚焦方法。

根据上述分析, 可以得到如图 1 所示的图像幅度和值最

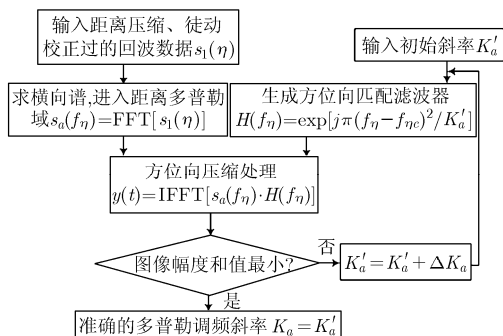


图1 图像幅度和值最小化自聚焦算法流程图

小化自聚焦算法流程图。

### 3 仿真与比较

对 SAR 回波信号进行仿真，仿真参数如表 1 所示。点目标所在位置调频斜率的值是 $-1780\text{ Hz/s}$ ，且存在边缘点的部分孔径干扰。下面分别采用 3 种方法进行方位向调频斜率估计：传统的子孔径相关算法、本文的图像幅度和值最小化估计算法和对比度最优估计算法。

表 1 仿真参数

|          |           |         |           |
|----------|-----------|---------|-----------|
| 成像区域近距   | 989340m   | 发射信号波长  | 0.05656m  |
| 回波采样频率   | 32.317MHz | 脉冲重复频率  | 1256.98Hz |
| 信号持续时宽   | 41.74μs   | 发射信号带宽  | 30MHz     |
| 相对地面飞行速度 | 7062 m/s  | 天线方位向长度 | 15m       |

子孔径相关算法把回波信号从方位向频域中分成两个子孔径，分别生成两幅图像。两图像相关后峰值位置偏移量与方位向滤波器采用的多普勒调频斜率的变化曲线如图 2 所示：由于部分孔径效应，子孔径相关峰值的收敛性在准确值 $-1780\text{ Hz/s}$ 附近并不是单调的，所以收敛性不好；当方位向滤波器中的调频斜率在 $(-1787, -1773)\text{ Hz/s}$ 范围内取值时，子孔径相关峰值的偏移量是相同的，影响到估计精度。在计算机作自动估计处理时，若初始调频斜率在 $(-1770, -1765)\text{ Hz/s}$ 范围内，此时收敛方向很难确定，则不易聚焦到准确值 $-1780\text{ Hz/s}$ ，估计误差会比较大。

采用本文提出的图像幅度和值最小化自聚焦算法，图像幅度和值变化规律曲线如图 3 所示：输入参数计算的调频斜率初始估计值，根据图像幅度和值的变化特性，改变估计值的步长大小和方向，可以很快又准确地得到准确值。图像幅度和值最小时对应的方位向频域滤波器的调频斜率为 $-1780\text{ Hz/s}$ ，即为精确的估计值；在准确估计值的两边，图像幅度和值大小呈现单调性变化，收敛性较好，便于提高收敛速度，节约了计算量，方便实时处理。

采用图像对比度最优估计方法时，图像对比度和方位向

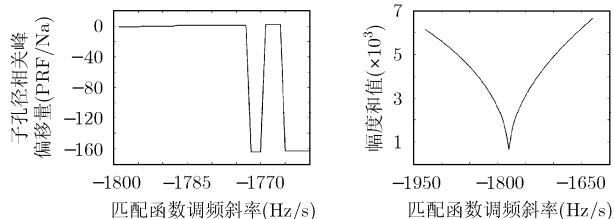


图2 子孔径相关峰值的变化曲线 图3 图像幅度和值的变化曲线

频域滤波器的调频斜率变化关系如图 4 所示。

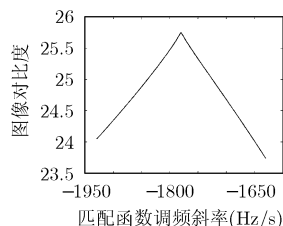


图4 图像对比度的变化曲线

对比图 3 和图 4，在同样的参数变化范围下，图像幅度和值的变化曲线比图像对比度的变化曲线陡峭，这意味着图像幅度和值的收敛速度更快，能较快地收敛到极小值点。

### 4 雷达数据

下面对 RADARSAT-1 图像数据自聚焦，选取一段海岸线图像数据进行处理。根据本文提出的自聚焦算法进行多普勒调频斜率估计。聚焦前的图像如图 5 所示，聚焦后的图像如图 6 所示，水平向是方位向，垂直方向是距离向。

对比图 5 和图 6，可见观察到，聚焦前的方位向有散焦现象，根据本文算法聚焦后的图像分辨率得到提高，灰度图效果更好，亮点的能量更为集中，边缘较为清晰。由此可见本文的算法对实际雷达数据进行多普勒调频斜率估计是有效的。

### 5 结束语

自聚焦处理是高分辨率 SAR 成像不可缺少的一个步骤。该文提出了一种比图像对比度最优自聚焦算法运算量小的



图5 图像聚焦前



图6 采用本文算法聚焦图像

算法。分析了 SAR 信号的多普勒调频斜率特点。在方位向频域压缩处理时, 如果频域匹配函数幅值为常数, 则可以推导出图像对比度和图像幅度和值之间的转换关系, 在图像对比度最优自聚焦算法中, 已知图像聚焦程度和图像对比度的关系, 进而推导出图像聚焦程度和图像幅度和值之间的联系。基于这种关系, 提出了图像幅度和值最小化自聚焦算法; 仿真实验表明, 与传统的子孔径相关法相比, 该算法由于是基于图像域的, 不存在部分孔径效应, 提高了估计精度, 收敛速度快, 运算量降低; 与图像对比度最优法相比, 本文方法收敛速度快, 运算量减少。最后, 采用 RADARSAT-1 数据验证了本文算法的有效性。由于本文估计算法精度高、运算量少, 所以便于在实时成像处理器中实现。

### 参 考 文 献

- [1] Morrison R L, Do M N, Do, and Munson D C. SAR image autofocus by sharpness optimization: A theoretical study [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2007, 16(9): 2309-2321.
- [2] Nies H, Loffeld O, and Natroshvili K. Analysis and focusing of bistatic airborne SAR data [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3342-3349.
- [3] Samczynski Piotr and Kulpa Krzysztof. Concept of the coherent autofocus map-drift technique [C]. International Radar Symposium 2006, IRS2006, Krakow, Poland, 24-26 May 2006: 1-4.
- [4] Cumming I G and Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data Algorithms and Implementation [M]. First edition, Norwood, Artech House, Inc, 2005, Ch3.
- [5] Li F K, Held D N, and Curlander J C, *et al.* Doppler parameter estimation for spaceborne synthetic-aperture radars [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, GE23(1): 47-56.
- [6] Curlander J C and McDonough R N. Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing [M]. First edition, New York, John Wiley & Sons INC, 1991, Ch 5.
- [7] Wahl D E, Eichel P H, and Ghiglia D C, *et al.* Phase gradient autofocus—a robust tool for high resolution SAR phase correction [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(3): 827-834.
- [8] 刘月花, 荆麟角. 对比度最优自聚焦算法[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(1): 24-30.
- [9] Oppenheim A V, Schafer R W, and Buck J R. Discrete-Time Signal Processing [M]. Second edition, Norwood, Person Education, Inc, 1999, Ch2.
- [10] 数学手册编写组. 数学手册. 北京: 高等教育出版社, 2006, Ch16.

刘碧丹: 女, 1980 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 信号处理与实时成像.

韩 松: 男, 1971 年生, 研究员, 研究方向为 SAR 实时成像、图像处理、数据压缩等.

王岩飞: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像雷达系统及其理论、数字信号处理等.