

## 一种实用的合成孔径雷达自聚焦算法

韦立登 吴一戎 向茂生

(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)

**摘要:** 该文提出了一种实用的改进型自聚焦算法——迭代平移相关法。与原来的平移相关法相比,该改进型算法通过适当的迭代运算,并结合新的估计加权因子和窗宽自动选择功能,可在初始速度误差较大的情况下获得更为准确的估计值。理论分析及试验结果表明,迭代平移相关法可以在运算量增加不大的情况下获得更可靠的速度误差估计结果。

**关键词:** 合成孔径雷达, 成像处理, 自聚焦, 迭代平移相关法

**中图分类号:** TN958, TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)09-1370-05

## A Practical Autofocus Algorithm for SAR

Wei Li-deng Wu Yi-rong Xiang Mao-sheng

(National Key Lab. of Microwave Imaging Technology, The Institute of Electronics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** A practical modified autofocus algorithm for synthetic aperture radar, the iterative shift-and-correlation algorithm, is presented. Comparing with the original shift-and-correlation algorithm, the modified one can obtain more accurate estimations in worse case by incorporating the appropriate iterations, the new weightings and the auto-selecting width of the detecting window. Both the theoretical analyses and the test results indicate that the iterative shift-and-correlation algorithm can obtain more reliable results with a cost of slight increment of the computational complexity.

**Key words** SAR, Imaging process, Autofocus, Iterative shift-and-correlation algorithm

### 1 引言

在合成孔径雷达(SAR)成像处理过程中,要求天线相位中心的运动轨迹的运动状态为匀速直线运动。但是,对于机载 SAR 而言,由于受到大气湍流的干扰,载机的实际运动轨迹通常会偏离理想的运动状态,从而产生速度运动误差,其中恒定的速度误差会在雷达回波数据中带来二次相位误差。如果对此相位误差不加校正直接成像,将会造成图像的方位向散焦,严重时甚至无法成像<sup>[1]</sup>。利用自聚焦算法直接从回波数据中估计出载机的速度误差,并在回波数据中对二次相位误差加以校正后再成像,便能极大提高图像的方位向分辨率。

传统的自聚焦算法,如 Map Drift(MD)法<sup>[2]</sup>、最优对比度法(CO)<sup>[3]</sup>和相位梯度法(PGA)<sup>[4]</sup>等,由于需要对图像进行重复的成像处理,因此需要消耗大量的运算量。Dall 提出的“平

移相关(SAC)”法<sup>[5,6]</sup>是一种计算复杂度非常低的自聚焦算法,其精度与传统的 MD 算法的精度相当;但是,与需要重复成像的传统自聚焦算法不一样, SAC 算法是一种单次算法,而且无需进行成像处理,因此其算术运算次数远比传统自聚焦算法少许多。然而,在载机惯性导航系统(INS)精度不足,或者未对雷达进行地速跟踪补偿的情况下,给定的载机初始速度可能会与雷达的实际速度偏差较大,此时原来的 SAC 算法的估计精度将很难达到预期要求。此外,原来的 SAC 算法还具有易受估计窗宽大小影响等缺点。针对这些不足,本文提出了一种改进型自聚焦算法——迭代平移相关法(ISAC)。该改进型算法以平移相关法为基础,通过适当的迭代运算,并结合新的估计加权因子和窗宽自动选择功能,可在初始速度误差较大的情况下获得更为准确的估计值。理论分析及试验结果表明,该改进型自聚焦算法可以在运算量增加不大的情况下获得更可靠的速度误差估计结果。

2 ISAC 算法

2.1 SAC 算法简介<sup>[5,6]</sup>

SAC 算法的基本原理如图 1 所示。假设 SAR 雷达系统为严格正侧视(即多普勒中心频率为零), 来自方位  $x_a=vt_a$  处的点目标距离压缩后的方位多普勒回波信号可以表示为

$$s(t) = \exp(j\phi_a)\exp(j\pi f_r(t-t_a)^2), \quad t_a - T_s/2 < t < t_a + T_s/2 \quad (1)$$

其中  $\phi_a$  为点目标的固有相位,  $f_r$  为多普勒调频率,  $T_s=B_d/|f_c|$  为合成孔径时间, 这里的  $B_d$  为多普勒带宽。

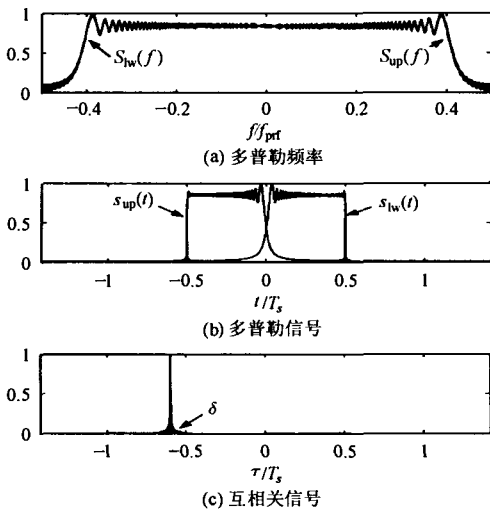


图 1 SAC 算法基本原理

在多普勒频域中, 原多普勒频谱以多普勒中心频率为界分为上频带  $S_{up}(f)$  和下频带  $S_{lw}(f)$  两部分(见图 1(a)). 将这两个频带分别平移  $\pm f_{pr}/4$ , 使其中心移到零频, 则两个频带的时域信号  $s_{lw}(t)$  和  $s_{up}(t)$ (见图 1(b))的表达式分别为

$$s_{lw}(t) = \exp(j\phi_a - j\pi f_{dr}\delta t_a - j\pi f_{dr}(\delta/2)^2) \cdot \exp(j\pi f_{dr}(t-t_a - (\delta/2))^2) \quad (2)$$

$$s_{up}(t) = \exp(j\phi_a + j\pi f_{dr}\delta t_a - j\pi f_{dr}(\delta/2)^2) \cdot \exp(j\pi f_{dr}(t-t_a + (\delta/2))^2) \quad (3)$$

式中

$$\delta = f_{pr}/(2f_r) = -[\lambda R/(2v^2)] \cdot (f_{pr}/2) \quad (4)$$

其中  $\lambda$  为波长,  $R$  为距离,  $v$  为速度。对上述两个频带的信号求互相关, 可以得到具有脉冲压缩效果的互相关信号(见图 1(c))

$$s_c(\tau) = \exp(j2\pi f_r\delta t_a)s_p(\tau - \delta) \quad (5)$$

式中  $s_p()$  为线性调频信号的压缩脉冲, 其最大值出现在  $\tau = \delta$  处, 并且与目标位置  $t_a$  无关。通过检测相关函数峰值偏离零点的时间  $\delta$ , 可以根据式(4)估计出多普勒调频率  $f_r$  或速度  $v$ 。

2.2 ISAC 算法

在机上惯性导航系统(INS)精度不足, 或者未对雷达进行地速跟踪补偿的情况下, 给定的初始速度可能会与雷达的实际速度偏差较大, 此时 SAC 算法估计所得结果的精度将很难达到预期要求。针对这一不足, 本文给出的 ISAC 算法通过引入适当的迭代运算, 并采用新的加权因子和窗宽选择策略, 可以在运算量增加不大的情况下获得更为理想的估计结果。

ISAC 算法以 SAC 算法为核心, 是一种快速有效的自聚焦算法, 其实现过程如图 2 所示。与原来的 SAC 算法实现<sup>[5,6]</sup>相比, ISAC 算法增加了迭代运算和相关函数峰值能量比加权两个主要部分(图中的虚框部分), 并在窗口检测阶段加入了检测窗宽的自动选择功能。

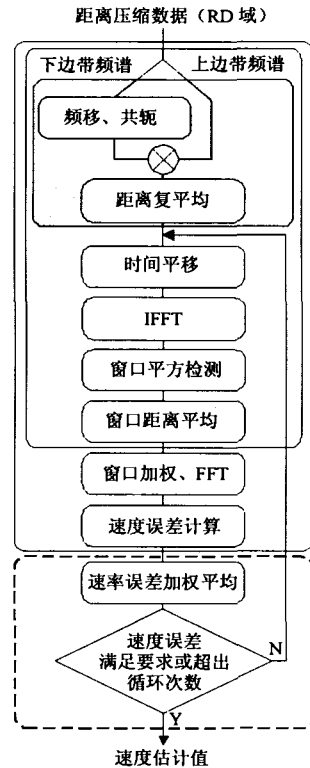


图 2 ISAC 算法实现框图

对于由雷达截面积为复数、相位在 0 到  $2\pi$  上平均分布的一组点散射目标组成的场景, 点目标背散射系数是随机的, 为了找出互相关函数的峰值点, 需要先对其进行检测, 然后再在距离向上求平均。由于多普勒调频率是随距离变化的, 如果求平均的距离跨度太大, 将会出现拖尾现象, 因此需要根据给定的初始速度估计值, 将互相关函数的峰值在时间上平移到零时刻附近。然后再在时间域内, 对平移后的互相关函数求距离平均。因此, ISAC 算法的基本步骤主要包括:

(1) 频移和互相关 为了实现频移和互相关,只需简单地将多普勒信号下边带频谱相对于上边带频谱平移  $f_{\text{prf}}/2$ , 然后将其共轭与上边带频谱相乘。

(2) 求距离向平均 对由步骤(1)求得的互相关函数分两个阶段求解距离向平均。第一阶段是在聚焦深度范围内对互相关函数的复频谱进行求和平均,第二阶段则将这些部分求和得到的互相关函数平移到时间零点附近,并在检测窗内检测后,再在更大的距离范围内求平均。利用这种方法,既能大大减少运算量,又能充分考虑到整个距离向的集平均,并且计算足够的复相关函数,获得良好的互相关函数估计。

(3) 求峰值点位置 对由步骤(2)求得的互相关函数进行加权,并变换到频率域。时间平移后的互相关函数的峰值位置可以通过相位谱的斜率求得。

(4) 峰值能量比加权 在同一方位上,由于场景的随机特性,不同距离处检测到的速度误差可能会存在一定的差异。因此,可以用该距离处相关函数峰值点的能量与窗口内的信号能量的比值作为加权因子对速度估计值进行加权。因为相关函数峰值点的能量比越大,意味着上下边带信号的相关性越强,即估计值与真实值越接近。

(5) 迭代运算 判断估计结果是否满足要求,或者超出预定的循环次数。如果条件为真,则输出最终的估计结果;否则,重复步骤(2)的第二阶段至步骤(5)的全部过程。

由于无需预先成像而直接在多普勒域中求信号互相关函数,而且检测及部分求和的距离平均只需要在检测窗口中进行,因此可以大大减少运算量。另外,迭代过程开始于步骤(2)的第二阶段,跳过了运算量较大的步骤(1)和步骤(2)的第一阶段,以及采用了新的加权因子,算法本身的收敛性较好,因此由迭代产生的额外运算量并不多。

### 3 性能分析

针对上述原有 SAC 算法的不足,ISAC 算法通过引入迭代运算、峰值能量比加权以及窗宽自动选择等进行了改进。本节主要从这些方面出发,分析 ISAC 的算法性能和执行效率。

#### 3.1 窗宽选择策略

在求相关函数峰值点位置时,只需在检测窗口内进行检测和求距离平均。检测窗口的大小必须选择合适,否则有可能使峰值点落到窗口之外,或过于靠近边缘,从而影响估计结果。因此,首先要根据初始速度的误差估计范围,确定出经过时间平移后相关函数峰值点的大致范围,从而确定可将峰值点包括在内的检测窗口大小。

假设雷达沿航线方向的初始速度估计值为  $v_0$ , 最大速度误差为  $\Delta v_{\text{max}}$ , 根据(4)式,可求得经过时间平移后相关函数峰值点的最大时间偏移为

$$\Delta \delta_{\text{max}} = \delta_0 \left( \frac{1}{(1 \pm \Delta v_{\text{max}}/v_0)^2} - 1 \right) \quad (6)$$

其中  $\delta_0$  为时间平移量,即式(4)中  $v=v_0$  时的值。因此,峰值点最大偏移位置  $\Delta N_{p\text{max}}$  为

$$\Delta N_{p\text{max}} = \frac{\Delta \delta_{\text{max}}}{T_a} = f_{\text{prf}} \delta_0 \left( \frac{1}{(1 \pm \Delta v_{\text{max}}/v_0)^2} - 1 \right) \quad (7)$$

其中  $T_a=1/f_{\text{prf}}$  为方位向采样时间间隔。

为了确保相关函数峰值点落在检测窗口内,检测窗宽  $N_w$  必须满足条件

$$N_w > 2 \left| \Delta N_{p\text{max}} \right| \quad (8)$$

考虑到相关函数脉冲有一定的脉宽,为了将整个脉冲包含在内,需要适当加大检测窗宽。此外,考虑到在进行 FFT 前为了抑制杂波要引入窗口加权,如果相关函数峰值点过于靠近窗口边缘,势必受到窗口加权严重影响,从而降低估计精度,因此,检测窗宽一般应大于  $4 \left| \Delta N_{p\text{max}} \right|$ 。在实际操作中,可采用首先选择较大的初始窗宽,然后随着迭代的进行逐渐缩小的方法,这样既可以保证估计精度所需的检测窗宽,又可以避免因窗宽选择过大而增加的运算量。

#### 3.2 加权因子

在同一方位上,由于场景的随机特性,不同距离处估计得到的速度误差可能会存在一定的差异。如果速度误差估计直接取自这些速度误差的平均值,将很难得到理想的结果。算法中采用该距离处相关函数的峰值能量比,即峰值点附近的能量与检测窗宽内的总能量之比作为加权系数对速度估计值进行加权。因为相关函数峰值能量的比值越大,意味着上下边带的信号相关性越好,估计值越接近于真实值。试验结果表明,通过引入相关函数峰值能量比加权因子,可以极大提高算法的算法精度和收敛性。

#### 3.3 运算量

在初始速度估计值误差较大 ( $\Delta v/v_0 > 5\%$ ) 时, SAC 算法的单次运算很难获得理想的结果。ISAC 算法在输出估计结果前通过判断估计结果与给定初始值之差是否满足给定的条件以决定是否继续迭代运算。与传统自聚焦算法需要重复成像处理的迭代运算不同, ISAC 算法的迭代运算直接开始于步骤(2)的第二阶段,跳过了运算量较大的步骤(1)和步骤(2)的第一阶段。由于无需进行成像处理,而且采用了新的加权因子和窗宽自动选择功能,算法本身的收敛性较好,因此由迭代产生的额外运算量并不多。

假设给定数据块大小为  $N_a \times N_r$  (方位点数  $\times$  距离点数), 距离复平均跨度为  $N_c$  点, 检测距离平均跨度为  $N_d$  点, 检测窗宽为  $N_w$  点. 根据算法实现流程求得的非迭代部分和迭代部分的实加和实乘次数(除以  $N_r$ )如表 1 所示.

表 1 ISAC 算法计算量(除以  $N_r$ )

	实加次数	实乘次数
非迭代部分	$2N_c$	$2N_c$
迭代部分	$\frac{N_a}{N_c} \left[ 1 + 3 \left( 1 + \frac{1}{N_d} \right) \log_2 N_w \right] + \frac{2N_w}{N_c}$	$\frac{N_a}{N_c} \left[ 2 + 2 \left( 1 + \frac{1}{N_d} \right) \log_2 N_w \right] + \frac{2N_w}{N_c}$

### 4 试验结果

为了验证算法的正确性和有效性, 本文利用 ISAC 算法对机载 SAR 实际数据进行了处理. 数据大小为  $4096 \times 2048$  (方位  $\times$  距离) 点, 距离复平均跨度为 8 点, 窗口距离平均跨度为 8 点, 检测窗宽为 300 点. 各次迭代所得到的速度误差和多普勒调频率估计结果如图 3 所示. 图 3(a) 表明, 在各次迭代过程中, 同一方位点不同距离处估计得到的速度误差是不同的. 对于第 1 次迭代结果  $\Delta v_1$ , 由于初始速度偏离真实速度较大, 相关函数峰值点位置偏离中心点较远, 所以各距离处的估计结果相差较大. 随着迭代次数的增加, 速度估计值越来越接近于真实值, 相关函数峰值点也越来越接近于中心点, 所以各距离处的估计结果相差越小. 图 3(b) 表明, 随着迭代次数  $i$  的增加, 多普勒调频率估计值  $f_{ri}(i=0, 1, 2, 3)$  迅速收敛于真实的多普勒调频率.

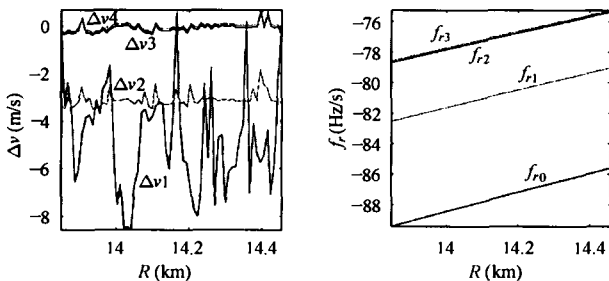


图 3 ISAC 算法估计结果

表 2 给出了试验得到的速度均值和方差, 以及程序所需的运行时间. 表中 0 次迭代表示不进行估计, 直接利用初始速度值; 1 次迭代表示只进行单次运算, 等同于原来的 SAC 算法. 速度均值和方差两项表明, 在前 1~3 次迭代中, 速度估计值迅速收敛于真实值, 之后再增大迭代次数已不再有明显改变. 运行时间项表明, 与原来的 SAC 算法相比, 每增加一次迭代, 运行时间增加约 20% 左右.

利用上述估计结果, 对实际数据进行成像所得的雷达图像如图 4 所示. 图中水平方向为距离向, 垂直方向为方位向. 其中图 4(a) 为整块试验数据的全局图像, 图 4(b)~图 4(e) 为图 4(a) 中白色方框部分的 0~3 次迭代结果. 从图中可以看到, 对于初始速度估计值偏离真实值较大的情况, 仅靠 SAC 算法的单次运算很难获得理想成像质量. 通过引入峰值能量比加权因子和窗宽自动选择策略, 增加少量的迭代运算, 则能大大提高成像的质量.

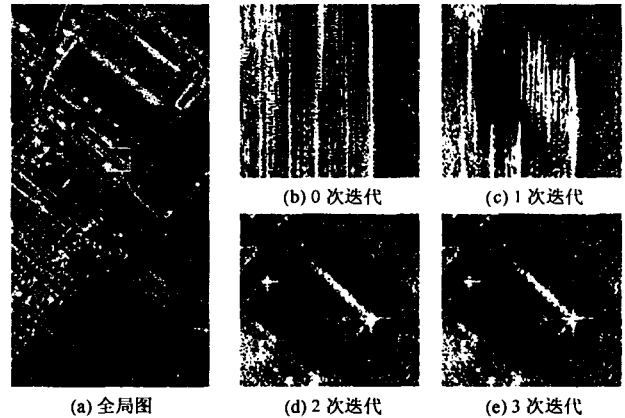


图 4 ISAC 算法成像结果

### 5 结束语

本文提出了一种基于平移相关法的改进型合成孔径雷达自聚焦算法——迭代平移相关法. 该改进型算法通过适当的迭代运算, 并结合新的估计加权因子和窗宽自动选择功能, 可在初始速度误差较大的情况下获得更为准确的估计结果. 理论分析及试验结果表明, 在初始速度误差较大的情况下, 迭代平移相关法能以较小的运算量增量获得更可靠的速度误差估计结果, 是一种实用的自聚焦算法.

表 2 ISAC 算法性能参数

迭代次数	0	1	2	3	4	8	16
速度均值 (m/s)	138.000	132.605	129.477	129.383	129.382	129.382	129.382
速度方差 (m/s)	—	2.185	0.307	0.185	0.180	0.179	0.179
运行时间 (s)	—	16.063	19.250	22.234	24.609	33.016	50.406

## 参考文献

- [1] Franceschetti G, Lannari R. Synthetic Aperture Radar Processing. Boca Raton, London, New York, Washington DC, CRC Press, 1999, Chapter 3.
- [2] Curlander J C, Wu C, Pang A. Automated processing of spaceborne SAR data. Proceedings of IGARSS'82, Munich, Jun. 1982: FA-1/3.11 - 6.
- [3] Berizzi F, Corsini G, Diani M, *et al.*. Autofocus of wide azimuth angle SAR images by contrast optimisation. Proceedings of IGARSS'96, Nebraska, Jun 1996: 1230 - 1232.
- [4] WAHL D E, *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.
- [5] Dall J. A new frequency domain autofocus algorithm for SAR. Proceedings of IGARSS'91, Helsinki, Jun. 1991, Vol.2: 1069 - 1072
- [6] Dall J. A fast autofocus algorithm for synthetic aperture radar processing. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP-92), San Francisco, Mar. 1992, part III: 5 - 8.
- 韦立登: 男, 1973年生, 博士生, 从事信号与信息处理方面的研究.
- 吴一戎: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事现代信息技术与应用方面的研究.
- 向茂生: 男, 1964年生, 研究员, 长期从事干涉合成孔径雷达技术及方法方面的研究.