

一种改进的 SAR 自动聚焦算法¹

刘 昕 朱锡兴 朱敏慧

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 自动聚焦是高分辨率合成孔径雷达 (SAR) 中的一项重要技术。如果进行实时成像, 就要求自动聚焦算法有很高的计算效率。移位相关法 (Shift-and-Correlate SAC) 就是这样一种算法。它最先是由 Jorgen 在 1991 年提出的, 本文深入分析了这种算法, 并对它进行了改进。

关键词 SAR, 自动聚焦, 高分辨率成像, 实时成像

中图分类号 TN958, TN957.7

1 引 言

在进行高分辨率成像时, 需要有一个匹配的方位向滤波器, 尽管滤波器的参数, 如多普勒中心和多普勒调频率 f_{dr} , 在理论上可以用星历数据进行计算, 但由于有空气扰动和传播误差的存在和惯性测量单元的局限性等因素, 必须使用依靠回波数据来消除相位误差的自动聚焦技术。常见的自动聚焦技术有: 地图移位法 (map-drift method), 三次样条法 (cubic-spline approximation), 二次编码法 (binary multiplexing), 相位梯度法 (phase gradient autofocus), Wilgner-Ville 分布法 (Wilgner-Ville Distribution) 等。有些算法, 如 PGA, 可以达到很高的精确度, 但代价是复杂的运算。在实时成像中我们需要一种即能满足一定的精度要求, 计算量又较小的算法。本文中描述了一种新的称之为移位相关法的算法, 它在某种程度上类似于传统的地图移位法, 但是计算效率更高。移位相关法是根据回波信号的特点, 对回波信号分段频移, 通过相关寻找最佳匹配滤波器参数 f_{dr} 。由于它无需成像, 并且可以对距离向压缩后的数据直接在频域进行处理, 所以计算效率很高。

2 移位相关法及其改进

移位相关法最早由 Jorgen 于 1991 年提出^[1]。它利用多普勒信号自身的相关特性, 以很高的效率估算多普勒调频率 f_{dr} 。下面是一个多普勒信号:

$$S = \exp(\pi f_{dr}(t - t_a)^2), \quad -T/2 + t_a \leq t \leq T/2 + t_a. \quad (1)$$

S_l 和 S_u 是这样的信号, 它们的谱分别是信号谱的右半部分和左半部分。在时域, S_l 和 S_u 近似等于信号的前半部分和后半部分。它们的相关为

$$C_0 = S_l \circ S_u = \begin{cases} [\sin \pi f_{dr}(t - t_a)^2] / [\pi f_{dr}(t - t_a)], & 0 \leq t - t_a \leq T/2; \\ [\sin \pi f_{dr}(t - t_a)(T - (t - t_a))] / [\pi f_{dr}(t - t_a)], & T/2 \leq t - t_a \leq T. \end{cases} \quad (2)$$

¹ 1996-11-21 收到, 1997-03-05 定稿

注意在 $\text{sinc}(\pi f_{dr}(t-t_a))$ 函数的峰值处有 $C_0 = t - t_a$. 在这里因为峰值位置在 $t - t_a = 0$, 所以才有 $C_0 = 0$. 我们通过在频域移动 S_l 和 S_u 的谱将峰值位置从 $t - t_a = 0$ 移开, 如 (3) 式所示. 文献 [1] 中使用 PRF (脉冲重复频率) 做为 f_{sh} , 其实这并非必须, f_{sh} 的范围以满足 $(T/2)f_{dr} \leq f_{sh} \leq Tf_{dr}$ 为佳.

$$\left. \begin{aligned} S_{l+} &= S_l \exp[j(\pi/2)f_{sh}t] \approx \exp[j(\pi f_{dr}(t-t_a)^2 + (\pi/2)f_{sh}t)], & -T/2 \leq t - t_a \leq 0 \\ S_{u-} &= S_u \exp[-j(\pi/2)f_{sh}t] \approx \exp[j(\pi f_{dr}(t-t_a)^2 - (\pi/2)f_{sh}t)], & 0 \leq t - t_a \leq T/2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

S_{l+} 和 S_{u-} 的相关是:

$$C_s = S_{l+} \circ S_{u-} = \begin{cases} \exp(j2\pi f_{dr}\delta t_a) [\sin \pi f_{dr}(\delta - t)] / [\pi f_{dr}(\delta - t)], & 0 \leq t - t_a \leq T/2, \\ \exp(j2\pi f_{dr}\delta t_a) [\sin \pi f_{dr}(\delta - t)(T - t)] / [\pi f_{dr}(\delta - t)], & T/2 \leq t - t_a \leq T, \end{cases} \quad (4)$$

$$\delta = f_{sh} / (2f_{dr}). \quad (5)$$

这样峰值平移到 $t = \delta$ 处, δ 与点目标的位置 t_a 无关. 我们可以方便地通过 (5) 式计算多普勒调频率 f_{dr} . 不过, 相位项 $\exp(j2\pi f_{dr}\delta t_a)$ 仍然存在, 它随目标位置变化, 导致峰值在 $t = \delta$ 处不相干叠加. 另外, 时间间隔是 $|t_a - t_b|$ 的目标对将在 $t = \delta \pm |t_a - t_b|$ 出现非相干的峰值叠加. 令 S_1 和 S_2 分别代表位置在 t_a 和 t_b 的两个点目标, 频移后:

$$\left. \begin{aligned} S_{lm} &= \exp(j(\pi/2)f_{sh}t)(S_{1l} + S_{2l}) = S_{1lm} + S_{2lm} \\ S_{um} &= \exp(-j(\pi/2)f_{sh}t)(S_{1u} + S_{2u}) = S_{1um} + S_{2um} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$S_{1lm} \circ S_{1um}$ 和 $S_{2lm} \circ S_{2um}$ 的峰值出现在 $t = \delta$ 但是相位不同. 同时 $S_{1lm} \circ S_{2um}$ 和 $S_{2lm} \circ S_{1um}$ 在 $\delta \pm |t_b - t_a|$ 处出现峰值. 实际上, 所有时间间隔是 $|t_a - t_b|$ 的目标对将在这一点出现峰值. 另外, $S_{1lm} \circ S_{2um}$ 和 $S_{2lm} \circ S_{1um}$ 也影响 $t = \delta$ 处的值. 因此 $t = \delta$ 处的峰值有可能出现衰落. 一种解决办法是对临近距离门的数据进行集合平均, 这将增加运算量并且只有在相位不相干的条件下才可能有效.

本文提出另外一种解决办法. 它基于 $S_{1lm} \circ S_{2um}$ 和 $S_{2lm} \circ S_{1um}$ 的相关特性:

$$\left. \begin{aligned} S_{1lm} \circ S_{2um} &= \begin{cases} \exp[\pi f_{dr}(\delta(t_a + t_b) + \varphi_a - \varphi_b)] \frac{\sin \pi f_{dr}(t_b - t_a + \delta - t)(t_a - t_b + t)}{\pi f_{dr}(t_b - t_a + \delta - t)}, & t_b - t_a \leq t \leq T/2 + t_b - t_a; \\ \exp[\pi f_{dr}(\delta(t_a + t_b) + \varphi_a - \varphi_b)] \frac{\sin \pi f_{dr}(t_b - t_a + \delta - t)(T - t_a + t_b - t)}{\pi f_{dr}(t_b - t_a + \delta - t)}, & T/2 + t_b - t_a \leq t \leq T + t_b - t_a; \end{cases} \\ S_{2lm} \circ S_{1um} &= \begin{cases} \exp[\pi f_{dr}(\delta(t_b + t_a) + \varphi_b - \varphi_a)] \frac{\sin \pi f_{dr}(t_b - t_a + \delta - t)(t_b - t_a + t)}{\pi f_{dr}(t_a - t_b + \delta - t)}, & t_a - t_b \leq t \leq T/2 + t_a - t_b; \\ \exp[\pi f_{dr}(\delta(t_b + t_a) + \varphi_b - \varphi_a)] \frac{\sin \pi f_{dr}(t_b - t_a + \delta - t)(T - t_b + t_a - t)}{\pi f_{dr}(t_a - t_b + \delta - t)}, & T/2 + t_a - t_b \leq t \leq T + t_a - t_b. \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

可以看到相关的结果是共轭对称的。如果在 $\delta - |t_b - t_a|$ 有一个峰值, 则在 $\delta + |t_b - t_a|$ 有相同的峰值, 即相关运算的质心恰好在 $t = \delta$ 。这样我们找到了一种简单可靠的方法计算相关峰值。

更进一步, 我们可以考虑在移位相关法中将信号划分成更小的区间以获得更精确的相位补偿。

考虑信号 S 在时间段 $[t_1 + t_a, t_2 + t_a]$ 和 $[t_3 + t_a, t_4 + t_a]$ 上的信号 S_1 和 S_2 , 它们的相关 C_0 为

$$C_0 = \begin{cases} \exp[-j\pi f_{dr}(t_2 + t_3)t] \frac{\sin \pi f_{dr}(t_2 - t_3 + t - t_a)(t - t_a)}{\pi f_{dr}(t - t_a)}, & t_1 \leq t_3 - t \cap t_2 \leq t_4 - t; \\ \vdots & \end{cases} \quad (9)$$

信号 S_1 和 S_2 进行频移后仍满足

$$C_S = \exp(j2\pi f_{dr}\delta t_a)C_0(t - \delta). \quad (10)$$

由于在频谱上进行信号划分不易确定 t_2 和 t_3 的值, 因此我们采用几个 f_{sh} , 做出 f_{sh}/δ 直线, 通过斜率来确定 f_{dr} , 即

$$|f_{dr}| = \left| \frac{\Delta f_{sh}}{2\Delta\delta} \right| \quad (11)$$

这样, 我们可以将全孔径划分成若干子孔径, 相邻子孔径两两移位相关, 获得 $n - 1$ 个局部的 f_{dr} , 这 $n - 1$ 个 f_{dr} 可以用来拟合一个最佳的匹配滤波器, 从而能够获得更为精确的相位补偿。这种算法也有一定的局限性: 由于它需要在频谱上对信号进行划分, 而多普勒调频率 f_{dr} 是未知并且存在误差相位, 不易精确分割信号, 如果将信号区间划分得过小, 会产生较大的误差。

3 模拟结果

图 1 是一个有六个点目标的模拟信号, 图 2 是加入的误差相位, 它由三次和四次相位误差构成。这样选择相位误差是因为三次和四次相位误差将分别导致非对称性和对称性的畸变, 具有一定代表性。图 3 是用地图移位法进行聚焦后的信号。图 4 是采用原有的移位相关法聚焦的图象。图 5 采用改进后的移位相关法, 它分别计算了全孔径的调频率 $\hat{f}_{fdr}$ 和左右两个子孔径的调频率 $\hat{f}_{ldr}$ 和 $\hat{f}_{rdr}$, 先用 $\hat{f}_{fdr} - \hat{f}_{ldr}$ 和 $\hat{f}_{fdr} - \hat{f}_{rdr}$ 对左右两个子孔径进行补偿, 然后根据 $\hat{f}_{fdr}$ 产生匹配滤波器进行成像。移位相关法由于不需要先成像, 所以与地图移位法相比, 提高了计算效率。图 5 采用的改进移位相关法, 其运算量只有图 3 采用的地图移位法的 60%。

4 结 论

本文分析了移位相关法的实质; 确定了一些参数要求; 对峰值位置 δ 的确定提出了改进方法; 将移位相关法进一步深化, 获得了更好的聚焦效果。

移位相关法的实质是通过分析回波数据, 获得它的多普勒调频率 f_{dr} , 产生最佳匹配滤波器, 对回波信号进行压缩。移位相关法虽然无法达到如 PGA 那样的算法的精度, 但它不需要

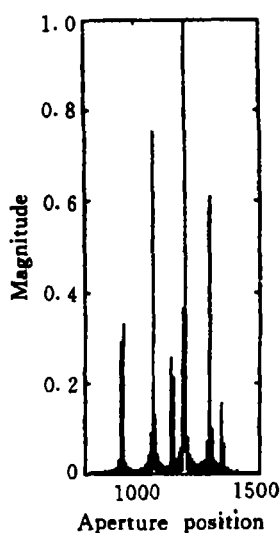


图 1 模拟信号

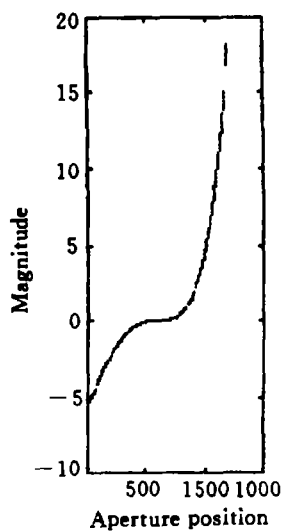


图 2 误差相位

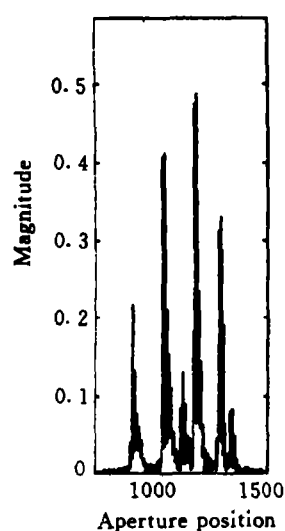


图 3 地图移位法聚焦

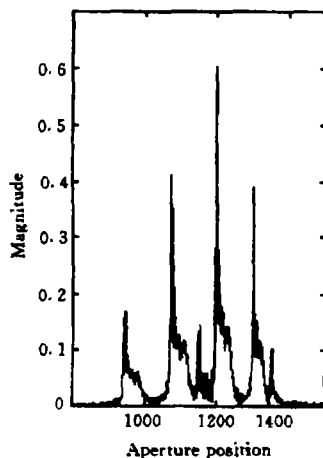


图 4 原 SAC 算法聚焦图象

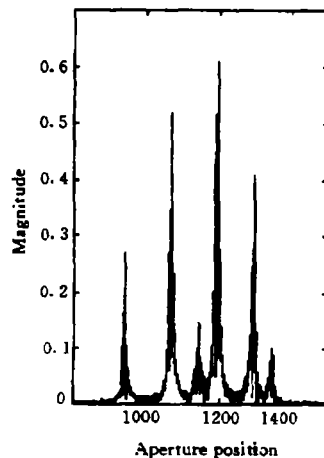


图 5 改进的 SAC 算法聚焦图象

对距离向压缩的信号进行成像来估计 f_{dr} 。这个特点使移位相关法有很高的计算效率, 并且更少地依赖星历数据。尤其在实时成像中, 移位相关法不失为一种很好的算法。

参 考 文 献

- [1] Jorgen D. A new frequency domain autofocus algorithm for SAR. Proceeding of IGARSS'91, Helsinki: June, 1991, 1069-1072.
- [2] Terry M C, Charles V J, Paul A T, *et al.* Comparison of synthetic aperture radar autofocus techniques-phase gradient vs subaperture, SPIE vol.1566 Advanced Signal Processing Algorithm, Architectures, and Implementations II, 1991, 353-364.
- [3] Warren D B, Dennis C G. Some methods for reducing propagation-induced phase errors in coherent imaging systems. I. Formalism, Journal of Optical Society of America, 1988, 5(6): 924-941.

- [4] Terry M C, Gregory W D. Subaperture autofocus for synthetic aperture radar. *IEEE Trans. on AES*, 1994, AES-30(2): 617-621.

AN ADVANCED AUTOFOCUS ALGORITHM FOR SAR

Liu Xin Zhu Xixing Zhu Minhui

(*Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080*)

Abstract Autofocus is an important technique in high resolution Synthetic Aperture Radar(SAR). When autofocus is needed by real-time SAR imaging processing, it must be very computationally effective. Shift and correlate algorithm is such an algorithm. It was first presented by Jorgen, (1991). In this paper, we analyze its essence and make some advance on it.

Key words SAR, Autofocus, High resolution imaging, Real time imaging

刘 昕: 女, 1973 年生, 硕士研究生, 从事合成孔径雷达自动聚焦算法的研究.

朱锡兴: 男, 1938 年生, 研究员, 从事合成孔径雷达系统和实时数字成象处理器的研究.

朱敏慧: 女, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 从事微波遥感和数字图象处理方面的研究.