

斜视模式 SAR 的子孔径算法分析及实现¹

李明峰*** 王贞松*

*(中国科学院计算技术研究所 北京 100080)

** (中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要: 该文根据传统的子孔径算法提出了适用于斜视情况的改进的子孔径算法, 该算法可以明显改善图像的质量, 并有助于自聚焦算法的收敛。同时, 该文还提出了一种适用于该算法结构的自适应调整比例因子的图像域杂波锁定方法, 可以大大加快收敛速度并提高收敛精度。该文还详细讨论了改进的子孔径算法对存储容量的要求, 提出实时处理情况下的算法流程, 分析了算法的计算量并与 R-D 算法做了相应比较。

关键词: 子孔径算法, 自适应因子调整, 存储需求

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)05-0727-06

Implementation and Analysis of Modified Subaperture Approach for Squint Mode Air-Borne SAR

Li Ming-feng** Wang Zhen-song*

*(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

** (Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract For processing the data of squint mode SAR, the modified subaperture approach based on classical real-time subaperture processing is presented in this paper. This new approach can improve the image quality obviously and make the auto-focus processing converge better. At the same time, a new clutterlock algorithm of proportion factor self-adaptive in image field is introduced, which can improve the converging speed and the precision of result. In this paper, the memory requirements in the real-time processing procedures are discussed carefully. Finally, the amount of computing is analyzed and compared with that of the R-D algorithm.

Key words Subaperture method, Auto-adjusting proportion factor, Memory requirement

1 引言

传统的时域算法通常计算量很大, 而且计算繁琐, 不利于数据的成批处理, 子孔径算法的出现改变了这一状况, 但传统的子孔径算法在处理多普勒中心不为零的斜视数据时结果不理想。在实际环境中, 斜视情况是不可避免的, 尤其是星载 SAR 数据, 通常都存在一定的等效斜视角, 因此本文在传统的子孔径算法基础上提出了改进的子孔径算法和适用的参数估计方法, 其中自适应调整比例因子的图像域杂波锁定法可以大大加快杂波锁定的收敛速度并提高其精度, 同时本文还根据该方法详细分析了成像处理过程对存储器的要求、处理流程和计算量, 在计算量与传统子孔径方法相比没有明显增加的情况下使图像质量有了很大改善。由于该算法在时域完成距离迁移校正, 避免了距离迁移对方位频谱调制的影响, 使得该算法在斜视情况下比 R-D 算法有更大的适用性。

¹ 2002-12-27 收到, 2003-06-16 改回
国家自然科学基金资助课题 (69896250-2)

2 传统子孔径方法

传统的子孔径算法是基于相位近似的时域算法。对于线性调频 (LFM) 信号, 其二次相位在一定误差范围内可以分段近似成线性相位, 按线性相位的特点对数据进行处理从而使处理过程得到简化, 传统的子孔径算法出发点就在于此。

传统子孔径方法的处理过程是: 对原始数据进行子孔径划分、对每个子孔径进行初次相位补偿、初次相关、再次相关、再次相位补偿、对补偿结果相干累加得到一个子孔径长度的最终图像数据。数学表示如下^[1]:

$$|f(t)| = \left| \sum_{n=-N_i}^{N_i} \left\{ h_n(t) \left[s(t)g_n(t) \otimes \text{rect} \left(\frac{t-n(1-\alpha)}{T_1} \right) \otimes \text{rect} \left(\frac{t}{T_1} \right) \right] \right\} \right| \quad (1a)$$

$$g_n(t) = \exp\{-j2\pi n(1-\alpha)T_1 K t\} \quad (1b)$$

$$h_n(t) = \exp\{j\pi n(1-\alpha)T_1 K(2t-n(1-\alpha)T_1)\} \quad (1c)$$

式中 \otimes 表示相关运算。子孔径的数目为 $2N_i + 1$, 子孔径之间的重叠率为 α , 子孔径的序号为 n , 子孔径对应的时宽是 T_1 , 根据上面的处理过程, 在正侧视情况下可以得到良好的 SAR 图像。

3 改进的子孔径算法与相应的参数估计方法

若方向向的速度是 V_a , 载波的波长是 λ , 波束的斜视角是 θ_s , 根据文献 [2] 可知方向向的多普勒中心 F_{dc} :

$$F_{dc} = (2V_a/\lambda) \sin(\theta_s) \quad (2)$$

随着斜视角度的增加, F_{dc} 的偏移也随之增加。

在成像处理中, 是否针对多普勒中心的变化作相应的补偿所得的结果图像是不同的。用传统子孔径的处理方法, 图 1(a) 是多普勒中心为 0 时得到的一维仿真结果, 图 1(b) 是多普勒中心为数据带宽的 30% 时得到的一维仿真结果, 通过对比可以看出没有对多普勒中心进行处理时, 一方面造成了目标实际位置的变化, 另一方面使得目标的响应函数峰值降低 (约为 30%), 对整个图像而言, 必然造成图像的信噪比下降。

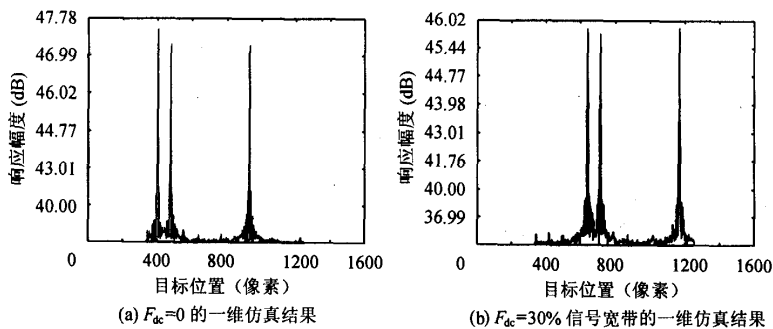


图 1

从本质上看, 使最终图像质量下降的根本原因是传统子孔径方法处理的频谱范围是以零频为中心的, 这样就与目标信号的频谱范围存在偏差。根据具有一定时带积的线性调频信号时域与频域的对应关系^[3], 针对传统子孔径处理方法的特点, 可以通过改变所处理的频谱范围来使

之适用于目标信号的多普勒中心不在零频的情况。具体方法是对于每个子孔径, 在原有的初次相位补偿过程前再增加一次相位预补偿, 其函数形式是

$$p_n(t) = \exp\{-j2\pi f_{dc}[n(1 - \alpha)T_1 + t]\} \text{rect}(t/T_1) \tag{3}$$

相对于 $p_n(t)$ 而言, $g_n(t), h_n(t)$ 是不需要变化的, 这种改进方法的好处还可以体现在硬件结构上, 即杂波锁定时, 每次迭代的估值可以被反馈单元直接传递给 $p_n(t)$ 的计算单元, 这样每次只需重新计算 $p_n(t)$ 的各系数, 而 $g_n(t), h_n(t)$ 的系数则可保持不变。

采用改进的子孔径算法的仿真结果如图 2 所示, 可以看出目标响应函数有了明显的改善, 目标位置也得以正确反映。

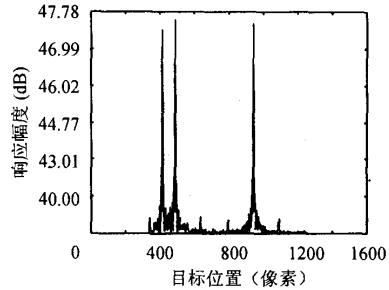


图 2 改进后的子孔径处理方法的
一维仿真结果

改进的子孔径算法继承了传统子孔径算法的结构, 同样可以方便地实现图像的多视处理和 Doppler 参数估计, 而且由于考虑到实际目标信号的频谱中心偏移, 处理的效果会更好。

3.1 多视处理^[1]

根据子孔径算法的特点和线性调频信号时域和频域的对应关系, 每个子孔径的结果都可以作为一个“视”, 当相邻的多个子孔径处理结果相干累加时就可以得到一个较高分辨率的“视”, 不同的“视”非相干累加时就可以得到一个分辨率与单视结果相同的多视图像。由于各视的频谱分配均匀, 因此图像的效果比传统子孔径方法要好得多, 图 3(a) 和 3(b) 分别是传统的子孔径方法和改进的子孔径方法多视处理的仿真结果, 可以看出二者的差别。

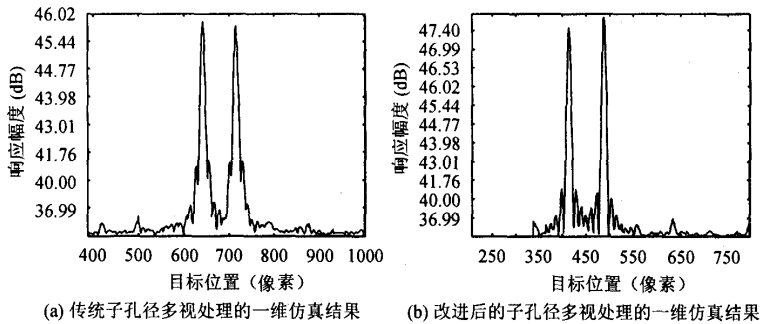


图 3

3.2 自动聚焦

由于子孔径算法可以方便地实现图像的多视处理, 因此可以用基于多视处理的自聚焦方法实现对多普勒调频率 F_{dr} 的精确估计^[1]。根据文献 [4] 的论述, 如果图像的视数为 n , 合成孔径时间为 T_s , 最低频段的视图和最高频段的视图像素之间位置偏差为 Δx , 那么 F_{dr} 的修正量 ΔF_{dr} 可以表示为

$$\Delta F_{dr} = [(\Delta x / \text{prf}) / (1 - 1/n)T_s] F_{dr} \tag{4a}$$

$$F'_{dr} = F_{dr} + \Delta F_{dr} \tag{4b}$$

其中 F'_{dr} 为修正后的 F_{dr} 。由于改进的子孔径算法各视的频谱分配均匀, 因此对同一目标的响应也相同, 从而比传统的子孔径方法更容易收敛到正确的结果。

需要指出的是 F_{dr} 的误差是由多方面的原因引起的, 如速度的变化, 斜距的变化, 斜视角度的变化等, 要选择主要的原因进行参数确定, 然后根据新参数沿距离方向更新相应的 F_{dr} , 从而节省处理时间。

3.3 杂波锁定

考虑到子孔径算法本身不包括 FFT 这一类求频谱的运算, 因此利用方位谱来估计多普勒中心的方法需要在原算法外增加额外的计算结构, 因此并不适合于本算法。根据子孔径算法的处理过程, 可以采用图像域的杂波锁定方法。该估计方法也是以图像的多视处理为基础的, 其估计原理^[5]是: 先将回波信号处理成多视图像, 对每视图像中多普勒历程完整的像素点求能量和, 然后通过计算多视图像的归一化能量差来得到多普勒中心的偏差值, 该过程可以表示为^[5]

$$\Delta F_{dc} = k \left(\sum_{i=1}^{N/2} E_i - \sum_{i=N/2+1}^N E_i \right) / \left(\sum_{i=1}^N E_i \right) \quad (5a)$$

$$F'_{dc} = F_{dc} + \Delta F_{dc} \quad (5b)$$

当 ΔF_{dc} 小于一个预先设定的值时, 结束迭代过程。在仿真过程中发现比例因子 k 的选取对估值过程影响很大, k 值太小则估值收敛速度很慢, k 值太大又会导致估值不收敛, 因此这里给出一种自适应调整比例因子的算法, 假定上一步得到的多普勒中心偏差为 ΔF_{dc} , 本次得到的偏差为 $\Delta F'_{dc}$, 调整策略是

当 $\Delta F_{dc} \cdot \Delta F'_{dc} \geq 0$ 表明当前的收敛趋势是一致的, 此时增大比例因子, 即

$$k' = k + \Delta p \quad (6a)$$

当 $\Delta F_{dc} \cdot \Delta F'_{dc} < 0$ 表明当前的收敛趋势已不一致, 此时减小比例因子, 以避免收敛过程产生大幅振荡, 即

$$k' = 0.5 \times k \quad (6b)$$

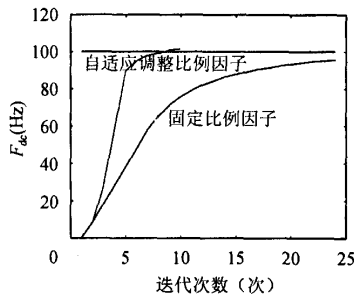


图 4 固定比例因子和自适应调整比例因子方法的一维仿真结果

其中 Δp 是与初始的比例因子 k_0 同符号的固定常数, 这样对 k 的调整可以始终保持符号不变, 即便对于 k_0 的初始值取得比较小而 F_{dc} 的偏差又比较大的情况, 收敛速度仍可以很快。图 4 是多普勒中心与信号带宽相等时固定比例因子法与自适应调整比例因子法仿真结果的比较图, 从图中可以看出自适应调整比例因子法的收敛速度比固定比例因子法大约快 3 倍, 并且最后收敛的结果误差小得多。

4 改进的子孔径算法处理过程中数据存储量分析

假定一个完整孔径的数据量为 N_{ref} , 每个子孔径的数据量为 N_{sb} , 子孔径之间的重叠系数为 β (与重叠率 α 的关系是: $\beta = 1/(1 - \alpha)$), 那么待处理的子孔径数目 M 为

$$M = \beta(N_{ref}/N_{sb}) \quad (7)$$

根据算法结构, 各主要处理过程所需存储的最小复数数据量如表 1 所示。

表 1 主要处理过程存储量需求

数据分发	数据处理		转角存储
	串行方式	并行方式	
$M \times N_{sb}$	$3\beta \times N_{ref} + 4 \times N_{sb}$	$3\beta \times N_{ref} + 4M \times N_{sb}$	$N_{aref} \times (1 + 1/M) \times N_r$

其中转角存储过程中的 N_{aref} 表示方位向一个合成孔径的数据量, N_r 为一条距离线的数据量。

5 改进的子孔径算法实时处理流程

改进的子孔径算法总体上可分为距离向处理, 数据转置, 多普勒参数估计和方位处理几个部分, 具体的处理流程如图 5 所示。

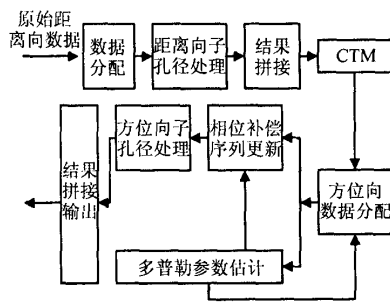


图 5 子孔径实时处理流程

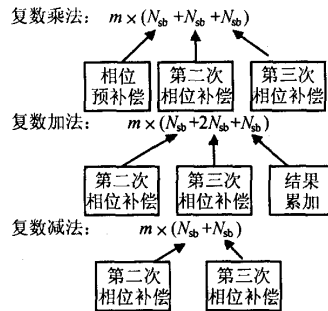


图 6 单孔径计算量解释图

6 改进的子孔径算法计算量分析和对比

根据上面的数据参数: 处理一个孔径数据的结果计算分析如图 6 所示, 利用该分析结果, 针对实际的机载 SAR 斜视数据: 方位向处理的一个孔径数据长度 N_{ref} 为 1524, 带宽约为 130Hz, 等效的合成孔径时间约为 1.7s, 在相位误差为 $\pi/6$ 的条件下, 每个子孔径数据 N_{sb} 为 80, 子孔径之间的重叠率 α 为 57%, 子孔径数目 M 为 45, 若每条方位线的长度为 N_s , 则总的处理次数 M_s 为

$$M_s = [N_s / (N_{sb}(1 - \alpha))] - M \tag{8}$$

当 N_s 为 8192 时, M_s 为 194; 每条距离线长度为 4096, 若方位向相位补偿序列和参考函数每两个距离门更新一次, 那么整个方位处理过程中, 改进的子孔径算法与 R-D 算法计算量的比较如表 2 所示。

表 2 改进的子孔径算法和 R-D 算法方位处理计算量比较

	改进的子孔径算法 (次数)	R-D 算法 (次数)	比例 (倍数)
实数加法	5.149×10^{10}	3.339×10^9	15.42
实数乘法	3.433×10^{10}	2.315×10^9	14.83

SAR 的距离向处理与方位向处理相似, 由于不涉及相位补偿序列和参考函数的更新, 因此参数固定, 相对方位向而言更容易实现。同样, 改进的子孔径算法与 R-D 算法计算量相比更显得大一些。

对于一次只处理一个子孔径长度数据的串行处理模式而言, 改进的子孔径算法计算量显然远大于 R-D 算法, 计算时间也要长得多; 但如果采用专用的处理器进行并行处理, 每次能处理一个孔径的数据 (即每次同时处理 M 个子孔径), 处理时间就会少 M 倍, 根据上面的假设, 将

比 R-D 算法快 3 倍, 这样就很利于实时处理。而且从处理器的设计角度来看, 改进的子孔径算法所用的处理器结构显然比实现 FFT 的芯片 (如 DSP 芯片) 要简单, 数据调度也容易。

7 成像试验与总结

我们对机载 Ku 波段、多普勒中心高达 420Hz 斜视数据做了成像处理。由于 SAR 在距离向对回波做了去调频处理, 因此距离向还是用 FFT 算法, 方位向用改进的子孔径算法成像, 图像放大后, 地面上相距 1m 的角反射器清晰可辨, 说明图像的方位分辨率可以达到理论^[3]值, 处理的结果如图 7 所示。



图 7 改进的子孔径算法成像结果

可见, 如果改进的子孔径算法和高性能的处理或专用处理器配合, 将是获得高质量实时图像的有效算法。

参 考 文 献

- [1] Moreira A. Real-time synthetic aperture radar processing with a new subaperture approach. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 1992, GRS-30(4): 714-722.
- [2] Curlander J C, McDonough R N. *Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing*, New York: John Wiley & Sons, INC, 1991: 159-176.
- [3] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用. 北京, 科学出版社, 1989: 24-37, 113-129.
- [4] Li F K, et al.. Doppler parameter estimation for spaceborne synthetic aperture radars. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 1985, GE-23(1): 47-55.
- [5] 黄水红. 星载合成孔径雷达成像处理与运动补偿. [博士论文], 北京: 北京航空航天大学, 1992: 50-55.

李明峰: 男, 1974 年生, 博士生, 研究方向为信号处理和 SAR 成像。

王贞松: 男, 1945 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: SAR 系统设计、实时信号处理和处理机的体系结构。