

文章编号: 1001-2486(2003)03-0041-04

一种基于机载 SAR 原始回波的多普勒参数估计方法*

郭微光, 梁甸农, 董臻, 刘光平

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 多普勒参数的估计精度直接影响机载合成孔径雷达系统(SAR)成像质量。根据平均后的方位谱来估计多普勒中心频率, 通过计算子图像之间的位移值来估计多普勒调频斜率。为了消除在实际应用中各种干扰的影响, 采用了对原始回波数据加窗的方法来提高对估计的准确性。该算法的估计结果可以用于补偿载机运动误差引入的相位误差, 从而实现高分辨率成像。通过使用实验数据进行分析, 验证了该方法的有效性。

关键词: 机载合成孔径雷达; 多普勒中心频率; 多普勒调频斜率

中图分类号: TN958 文献标识码: A

Doppler Parameters Estimation from Raw Data of an Airborne SAR

GUO Wei-guang, LIANG Dian-nong, DONG Zhen, LIU Guang-ping

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In the airborne synthetic aperture radar system, the estimation accuracy of Doppler parameters affects the image quality directly. This paper estimates Doppler centroid using the averaged azimuth spectrum, and it estimates the Doppler frequency rate by computing the shift between sub-images. The raw data are windowed to reduce the affection of various noises in the system, and improve the estimation accuracy. Results of the algorithm can be used to compensate the phase error caused by motion error of the airborne. The method is finally verified with a set of actual experimental data.

Key words: airborne synthetic aperture radar; Doppler centroid; Doppler frequency rate

合成孔径雷达(SAR)采用合成孔径的原理来提高雷达的方位向分辨率, 利用脉冲压缩技术来提高距离向分辨率。在方位向的压缩过程中, 为了实现匹配滤波, 目标回波的多普勒相位历史必须是准确可知的。由 SAR 载体平台的非理想运动所引入的相位误差将导致匹配滤波器的参数估计误差, 从而降低成像质量, 因此运动补偿是机载 SAR 系统中不可缺少的环节。

SAR 回波的相位历史可以由两个多普勒参数决定: 多普勒中心频率和多普勒调频斜率。它们可以通过测量目标与天线相位中心的相对位置和速度矩阵计算出来, 也可以直接从 SAR 原始数据中提取。SAR 的载机上都备有导航和测量系统, 以检测出天线相位中心的快变和慢变误差、扰动的平面内分量和非平面分量, 并作相应的补偿。在实际系统中, 由于设备的速度和检测精度往往难以满足高分辨率成像的要求(特别是相位的准确校正)。为了弥补这种不足, 从 SAR 原始回波中提取多普勒参数的方法可以作为一种选择。

对两个多普勒参数的估计方法分别称为杂波锁定和自聚焦, 通常可以对数据的方位向频谱进行分析来实现。文献[1]指出, 直接对回波进行处理难以得到精确的估计值, 而采用了对成像结果求方位谱平均, 以及对子图像进行比较的方法来估计两个参数。该方法要求成像场景为均匀噪声背景, 以及背景中存在强目标。文献[2]对目标区域的模型进行了改进, 弱化了对背景条件的依赖性。其它估计方法还有基于时频分析的方法、反射位移法等^[3,4]。在实际应用中, 由于系统的噪声影响, 以及目标和背景的复杂性, 估计效果并不明显。

* 收稿日期: 2003-01-10

基金项目: 雷达信号处理国防科技重点实验室基金项目(51431020101KG01)

作者简介: 郭微光(1975-), 男, 博士生。

1 多普勒中心频率的估计

在进行距离压缩和距离迁移校正之后,用多普勒参数形式表示点目标的响应为^[6]:

$$\hat{g}(\tau_1, \tau_c, R_c) = \text{rect}\left[\frac{\tau_1 - \tau_c}{T/2}\right] \exp(-j4\pi R_c/\lambda) \exp\{j2\pi[f_{DC}(\tau_1 - \tau_c) + f_{DR}(\tau_1 - \tau_c)^2/2]\} \quad (1)$$

其中, $\text{rect}\left[\frac{\tau_1 - \tau_c}{T/2}\right] = \begin{cases} 1, & |\tau_1 - \tau_c| < T/2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$

τ_c, R_c 为点目标的位置; τ 为载机沿轨迹的时间(慢时间); T 为积分时间,即目标处于雷达波束内的时间; f_{DC} 和 f_{DR} 为需要估计的多普勒参数:多普勒中心频率和多普勒调频斜率。式(1)中忽略了天线方向图的形状。

对于分布目标,在方位时间 τ 、距离 R_c 上的回波是位于同一距离上的所有散射点回波的线性组合:

$$g(\tau, R_c) = \int_{\tau-T/2}^{\tau+T/2} A(\tau_c, R_c) \hat{g}(\tau, \tau_c, R_c) d\tau_c \quad (2)$$

$A(\tau_c, R_c)$ 为点目标 (τ_c, R_c) 的反射系数。分布目标的回波能量分布在最大频率为 $f_{DC} + f_{DR}T/2$ 、最小频率为 $f_{DC} - f_{DR}T/2$ 的一个条形区域内。波束内每个散射点的能量集中在这个条形区域内的一条斜线段上,斜率为 f_{DR} 。图1是分布目标的能量在时频域内分布示意图。如果把时频能量谱沿时间 t 轴的方向进行积累,其结果将是各散射点回波的方位谱能量的叠加。由于是非相参叠加,其形状与单个散射点的能量谱相同,也就是天线方向图的形状。这时可以用估计谱质心的方法来估计多普勒中心频率。

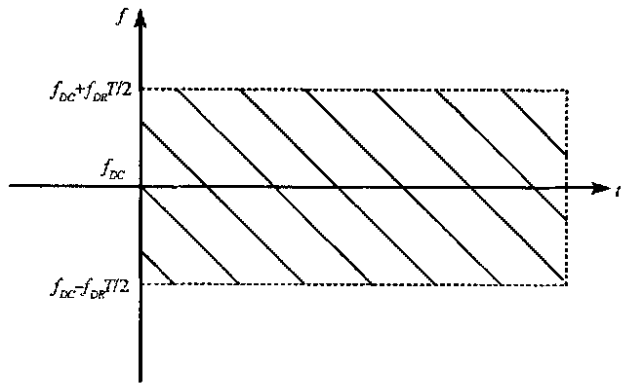


图1 分布目标的时频分布

Fig. 1 Time frequency distribution of the targets

在没有多普勒中心偏移时,原始回波在方位向上的功率谱与天线的方向图相同,以零频为对称轴。对单个点目标而言,多普勒中心频率估计可以通过搜索原始回波方位功率谱的最大值来获得。而在实际应用中的多目标情况下,由于SAR回波是多个点目标回波的重叠,要在时域找出相位变化是很难实现的。

为了解决上述问题,本文提出一种对回波在方位向加窗后分析方位谱的方法,以提高信噪比,减小场景区域目标不均匀所造成的影响,从而提高多普勒中心频率估计的准确性。常用的窗函数有契比雪夫加权函数、Kaiser窗等。对多个加窗后的方位谱求平均,然后查找能量的平衡点,即左右两侧功率谱积分相等的点即为多普勒中心频率的估计值。

2 多普勒调频斜率的估计

在方位向频谱上将一个孔径分成 N 个等大小的子孔径,由于方位压缩采用的调频率的估计误差,会造成子图像之间的相对位移,可以通过图像相关估计其位移值,从而得到更精确的调频率。

单个目标点方位向多普勒信号傅里叶变换的相位为:

$$\phi(f) = -\frac{\pi(f - f_{DC})^2}{f_{DR}} \quad (3)$$

采用冲激响应为调频斜率是 f_{DRE} 的线性调频信号进行匹配滤波,并从中心频率处分开频谱,得到两子图像频谱,其相位为:

$$\begin{cases} \phi_1(f) = \frac{f_{DR} - f_{DRE}}{f_{DR} f_{DR}} \pi (f - f_{DC})^2, & f_{DC} - PBW/2 < f < f_{DC} \\ \phi_2(f) = \frac{f_{DR} - f_{DRE}}{f_{DR} f_{DR}} \pi (f - f_{DC})^2, & f_{DC} < f < f_{DC} + PBW/2 \end{cases} \quad (4)$$

其相位差对应的时域子图像的位移为:

$$\Delta t = \frac{f_{DRE} - f_{DR}}{2f_{DR} f_{DRE}} PBW \quad (5)$$

将子图像沿方位向做相关运算, 得到峰值的位置, 从而得到子图像的位移。由于不同子图像之间的位置偏移是依据相关运算后的峰值来确定的, 所以如果成像区域中有强目标或对比明显的区域, 多普勒调频斜率的估计值将更为准确; 相反, 如果场景为均匀区域, 如沙漠, 那么子图像之间的相关运算将难以出现明显的峰值, 从而影响估计值的精度。

3 实验结果分析

实验系统为 UHF 波段的正侧视机载 SAR, 天线俯视角 30° , 载机飞行高度为 4200m, 速度约为 110m/s, 目标区域放置有若干个金属角反射器。在成像数据中对距离向和方位向均取 4096 点, 图 2 所示为 64 条连续的方位频谱求平均的结果。图 3 是对原始回波加 Kaiser 窗后求频谱, 然后进行平均的结果。对两图进行比较可以看出, 加窗可以明显有利于对多普勒参数进行估计。在图 3 中搜索左右两侧频谱能量积分相等的点可以用来估计多普勒中心频率。

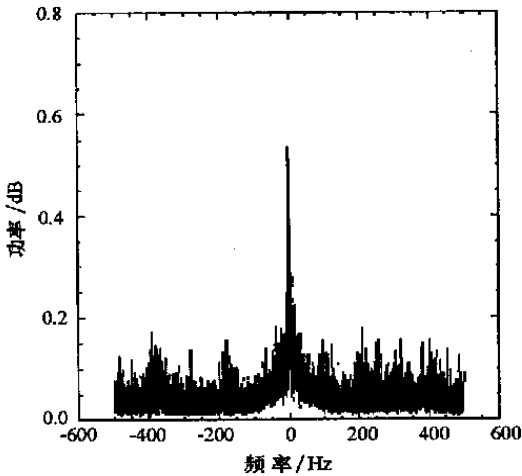


图 2 原始回波的方位功率谱

Fig. 2 The azimuth power spectra of the raw data

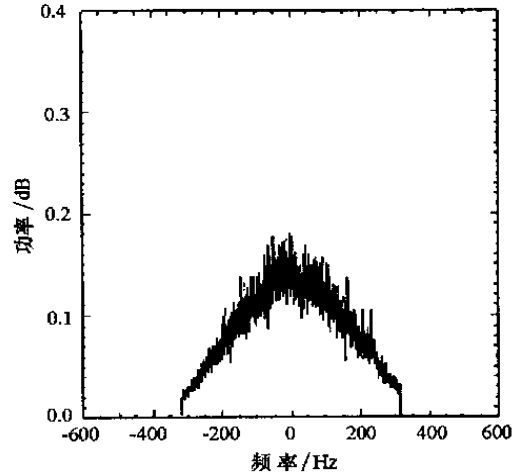


图 3 对原始回波加窗后的方位功率谱

Fig. 3 The azimuth power spectra of the windowed raw data

为了验证这种方法的准确性, 将成像区域沿距离向分为 $N = 16$ 段, 每段的大小为距离向 64 点方位向 4096 点。按上述方法, 从原始回波中可以得到一个距离区域与多普勒中心频率估计误差的对应关系曲线, 如图 4 所示。

在对多普勒调频斜率进行估计时, 将一个孔径的原始回波在频域分成 $M = 4$ 个子孔径, 然后用每一段的数据使用不同的多普勒调频斜率来成像。图 1 和图 4 的图像在方位向做相关运算后可得到如图 5 所示的曲线, 图中的峰值代表多普勒调频斜率误差所造成的图像偏移。偏移为零时所对应的多普勒调频斜率即为成像处理时所用的估计值。

对场景中点目标的成像效果比较如图 6 和图 7 所示。图 6 使用机载导航测量设备提供的载机运动参数进行成像, 由于存在一定的测量误差, 导致图像不能很好聚焦。图 7 是将原始回波估计出多普勒调频斜率后应用到方位向匹配滤波器的成像结果, 与图 6 比较可以看出有明显的改善。

4 结论

对机载高分辨率 SAR 而言, 多普勒参数估计是成像处理中的一个重要问题。本文针对实际应用中

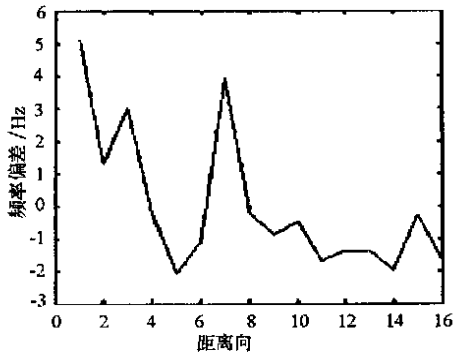


图4 距离区域与多普勒中心频率估计误差的对应关系
Fig. 4 Relationship between the estimation error of Doppler centroid and the range segments

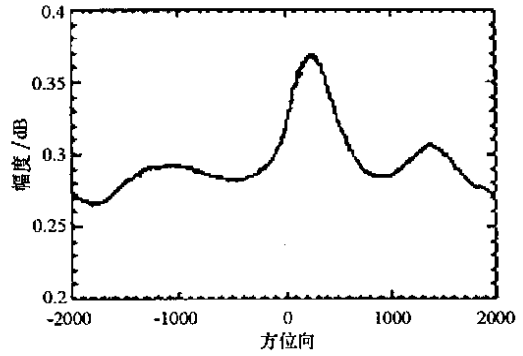


图5 子图像方位向的相关结果
Fig. 5 Cross-correlation result between subimages



图6 使用测量数据的成像结果
Fig. 6 Image without using estimated Doppler frequency rate

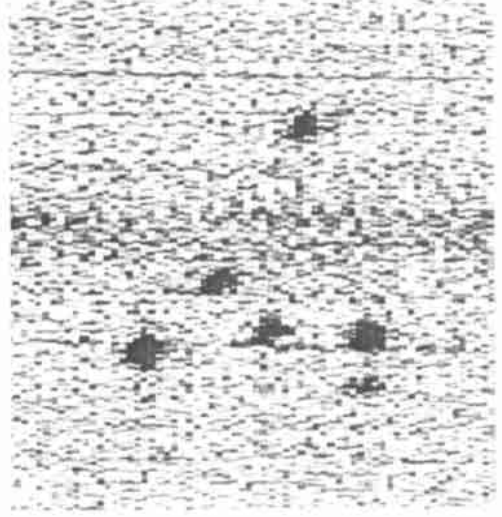


图7 采用估计调频斜率的成像结果
Fig. 7 Image using estimated Doppler frequency rate

噪声基底高、场景区域背景复杂的特点,提出了对回波数据进行加窗,以及对子图像进行相关运算的方法进行处理,以提高估计精度。通过对飞行试验数据进行分析证明了本文方法的有效性。结果表明,在机载测量设备精度无法满足要求的条件下,从回波数据中提取多普勒参数的方法可以明显改善成像质量。

参考文献:

- [1] Li F K, Held D N, Curlander J C, Wu C. Doppler Parameter Estimation for Spaceborne Synthetic-aperture Radars [J]. IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 1985, 23(1): 47-55.
- [2] Jin M Y. Optimal Doppler Centroid Estimation for SAR Data from a Quasi-homogeneous Source [J]. IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 1986, 24(6): 1022-1025.
- [3] 张劲林, 许荣庆, 刘永坦, 顾建政. 利用 Wigner-Ville 分布估计星载合成孔径雷达多普勒中心频率[J]. 系统工程与电子技术, 1998, (3): 15-18.
- [4] Moreira J R. A New Method of Aircraft Motion Error Extraction from Radar Raw Data for Real Time Motion Compensation [J]. IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 1990, 28(4): 620-626.
- [5] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [6] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1991.
- [7] 孙造宇. 机载合成孔径雷达成像算法研究[D]. 国防科技大学, 2002.