0254-6124/2010/30(3)-270–05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Peng Tao, Zhang Hongqun, Wu Yewei, Han Jiawei. Fast approach of Doppler rate estimation based on geometry and SAR echo data. *Chin. J. Space Sci.*, 2010, **30**(3): 270-274

基于轨道参数和 SAR 回波数据的多普勒调频率快速估计

彭 涛[1,2] 张洪群[1] 吴业炜[1,2] 韩家玮[1]

[1](中国科学院对地观测与数字地球科学中心 北京 100086)

[2](中国科学院研究生院)

摘 要 多普勒调频率是 SAR 方位向压缩的关键参数之一. 调频率的失配会带来严重的方位向散焦, 从而影响成像质量. 基于减灾、防灾目的, 需要对 SAR 数据快速成像, 从而相应要求对多普勒调频率进行快速估计处理. 根据多普勒调频率快速估计需求, 提出了一种基于轨道参数法和 Map Drift 算法估计多普勒调频率的综合反演算法, 利用多普勒调频率与距离的关系, 简化整个估计流程, 从而提高估计速度. 同时给出了一种块数据筛选的方法, 用于选择综合反演法中所采用的块数据. 实验结果表明, 综合反演法能够在满足成像质量要求的基础上, 快速估计出多普勒调频率.

关键词 合成孔径雷达; 多普勒调频率; 分块处理; 聚焦深度

中图法分类号 V 524, TN 95

Fast Approach of Doppler Rate Estimation Based on Geometry and SAR Echo Data

PENG Tao[1,2] ZHANG Hongqun[1] WU Yewei[1,2] HAN Jiawei[1]

[1](*Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100086)

[2](*Graduate University of Chinese Academy of Sciences*)

Abstract Doppler frequency rate is one of the key parameters in the azimuth processing of SAR data. Once mismatched, it will cause serious defocusing in azimuth dimension and then result in the degradations of image quality. On the other hand, fast estimation for Doppler frequency rate is necessary for the sake of disaster mitigation. To meet the need of fast estimation of Doppler frequency rate, an approach based on geometry and SAR echo data is put forward in this article, which can simplify the estimation processing according to the relationship between the Doppler frequency rate and range. Besides, the selection strategy for block data used to estimate the Doppler frequency rate is discussed. In the end, corresponding results have been given.

Key words Synthetic Aperture Radar (SAR), Doppler frequency rate, Block processing, Depth of focus

2009-03-17 收到原稿, 2010-03-22 收到修定稿

E-mail: lapattoayala@yahoo.com.cn

1 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种主动式、全天时、全天候的对地观测系统, 穿透能力强 [1], 且具备其他遥感手段所不具备的优势, 在灾害监测及测绘等方面有着独特应用.

SAR 图像由 SAR 回波数据处理生成, 距离向压缩和方位向压缩是 SAR 处理流程中两个重要的步骤. 由于雷达信号的形式已知, 距离向的匹配滤波就显得相对简单, 而方位向匹配滤波对 SAR 的成像效果起着至关重要的作用. 通常, 减灾和防灾要求对 SAR 进行快速成像, 这就对多普勒调频率估计提出了速度要求.

若忽略相位高次项的影响, 则方位向匹配滤波器就可以由多普勒中心频率 $f_{\rm dc}$ 和多普勒调频率 $f_{\rm dr}$ 两个参数决定 [1]. 参数的精度决定了 SAR 图像的质量, 其中, 多普勒调频率 $f_{\rm dr}$ 的失配将导致严重的方位向散焦.

多普勒调频率 $f_{\rm dr}$ 可以通过两种方法得到. 一种方法是利用卫星轨道和姿态参数求取, 另一种方法是从回波数据估计得到 [2]. 利用轨道和姿态数据估计多普勒参数较为简单, 且计算量小, 但卫星的位置和姿态变化对多普勒参数影响很大 [2], 这就要求卫星的位置信息和姿态信息足够精确. 利用回波数据估计多普勒参数不需要知道卫星的精确信息, 而是直接对接收到的回波数据进行分析, 其是多普勒参数估计的重要研究方向. 已发展有多种算法或改进算法用来估计多普勒参数, 例如 $f_{\rm dr}$ 的估计方法有最大对比度法、Map Drift (视错位法)、相位梯度法 (PGA) 等 [2]. 但是, 当前利用回波数据估计多普勒参数的方法都面临着计算量庞大的问题. 如 Map Drift 算法需要多次迭代求取两视图的视差才能获得满意的多普勒调频率. 除此之外, 多普勒参数还被表述为距离的函数 [2], 理论上, 对于不同的距离, 应采用不同的多普勒参数, 这又将大大增加计算量. 实际上, 只要方位向的散焦在可接受范围, 就可以在一定距离范围内采用相同的多普勒调频率, 如何确定距离范围则是一个聚焦深度的问题.

在本文中, 利用 Envisat ASAR 数据作为实验数据, 结合轨道参数法和 Map Drift 算法, 提出了一种综合反演算法, 从而快速得到每一个聚焦深度内的多普勒调频率.

2 多普勒调频率估计

多普勒调频率是影响 SAR 成像处理的重要参数, 相对于多普勒中心频率, 多普勒调频率对 SAR 成像效果影响更大. 因此, 对多普勒调频率的精度要求就更高. 多普勒调频率是距离的函数, 为了满足一定的精度要求, 需要每隔一段距离单元更新一次调频率参数.

(1) 轨道参数法

SAR 的多普勒效应是由于天线与目标照射区域的相对运动造成的, 因此可以利用轨道和卫星姿态数据估计多普勒调频率, 具体的推导过程可参考文献 [1–2]. 这里给出一个简化的计算模型 [2],

$$f_{\rm dr} = -\frac{2v_{\rm st}^2 \cos^2\theta_{\rm s}}{\lambda R_{\rm c}}. \tag{1}$$

其中, $v_{\rm st}$ 为天线与目标的相对速度, λ 为信号波长, $\theta_{\rm s}$ 为天线的斜视角, $R_{\rm c}$ 为图像中心点与天线的距离. 当 $\theta_{\rm s}$ 足够小时, 式 (1) 可简化为

$$f_{\rm dr} = -\frac{2v_{\rm st}^2}{\lambda R_{\rm c}}. \tag{2}$$

由于 ASAR 数据的天线斜视角通常为 0, 因此可以通过式 (2) 求得多普勒调频率.

(2) Map Drift 算法

通过轨道参数计算获得的多普勒调频率并不能满足 SAR 高精度成像的要求, 为了得到最佳的图像聚焦, 需要从接收数据中对多普勒调频率进行更精确的估计 [2,5]. Map Drift 算法是一种对多普勒调频率进行更精确估计的有效方法, 其利用多普勒调频率误差会导致方位向两视出现视差, 因而需要通过分析调频率误差与视差之间的关系得到最终的多普勒调频率.

方位调频率误差 $\Delta f_{\rm dr}$ 会造成两个方位视之间的方位向错位 $\Delta\eta$[2], 二者之间的关系为

$$\Delta f_{\rm dr} \approx -\frac{f_{\rm dr}^2}{\Delta f_{\rm a}}\Delta\eta. \tag{3}$$

其中, $\Delta f_{\rm a}$ 为方位向两视中心处的频率间隔. 由式 (3) 可以看出, $\Delta f_{\rm dr}$ 与 $\Delta\eta$ 呈线性关系, 因此可以通过线性拟合或迭代法求出多普勒调频率, 也可以利用式 (3) 计算出调频率误差来校正初始的调频率. 为了提高估计精度, 这里采用迭代法, 一般经过 3~5 次迭代便可获得满意的结果. 视错位 $\Delta\eta$ 可以通过检测

两视之间的互相关功率峰值得到 [2].

综合以上两种算法可以看出, 轨道参数法的计算速度快, 但需要获得精确的轨道和姿态信息, 最终的计算精度低; Map Drift 算法计算精度高, 但需要进行多次的 FFT 以及迭代计算, 计算效率低. 为了满足成像精度的要求, 还需每隔一定的距离单元更新一次 $f_{\rm dr}$. 而每更新一次 $f_{\rm dr}$, 都要采用一次 Map Drift 算法, 这样计算量又将成倍增长, 是无法满足快速成像要求的.

鉴于此, 这里提出一种综合反演法来估计多普勒调频率, 结合 Map Drift 算法精度高和轨道参数法计算速度快的优点, 在最优的情况下, 只需要对一个块数据采用 Map Drift 算法, 就可以计算出整个距离向上的多普勒调频率, 从而快速进行 SAR 成像处理.

3 综合反演法

图 1 所示为提出的综合反演法估计多普勒调频率的流程, n 表示距离向的块数据标号, N 表示总数据块, MDA 为利用 Map Drift 算法估计多普勒调频率.

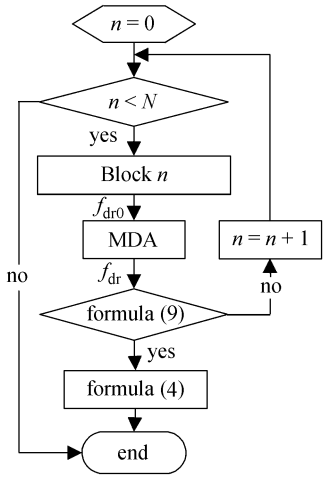


图 1 综合反演法估计流程

Fig. 1 Steps of Doppler rate estimation

3.1 估计步骤

图 1 所示的估计流程可以分为以下 4 个步骤.

①把已压缩数据按照聚焦深度的要求在距离向将回波数据分成 N 块, 取第 $n=0$ 块作为参数估计的数据域. 利用式 (2) 得出该数据域中心的多普勒调频率 $f_{{\rm dr}n0}$.

②把 $f_{{\rm dr}n0}$ 作为 B_n 数据域的初始方位压缩参数, 利用 Map Drift 算法估计出该数据域中心的多普勒调频率 $f_{{\rm dr}n}$.

③如果估计的结果 $f_{{\rm dr}n}$ 满足误差限的要求, 则转到步骤④, 否则令 $n=n+1$, 转到步骤②.

④当天线的斜视角 $\theta_{\rm s}$ 很小时, 速度 $v_{\rm st}$ 与距离 R 近似无关 [1], 在整个数据区内可以看成常数, 利用式 (2) 反演出每一个距离单元下的多普勒调频率, 即每一个数据块中心的多普勒调频率

$$f_{{\rm dr}k}=\frac{f_{{\rm dr}n}R_{cn}}{R_{ck}}. \tag{4}$$

该估计流程与直接使用 Map Drift 算法对每个分块进行多普勒调频率估计的区别有两点: 一是新方法引入了误差限标准, 用以检验估计的精度; 二是新方法在满足误差限标准的条件下结束估计进程, 并利用轨道参数估计出整条距离线上的多普勒调频率. 因此, 新方法一般不需要对所有分块利用 Map Drift 算法估计调频率参数, 其速度也就远高于原始的算法, 从而能达到对减灾防灾的快速响应要求. 整个估计过程在最优的情况下 (这取决于块数据的质量), 只需要对某一块数据采用一次 Map Drift 算法, 即可得到每条距离线上的多普勒调频率.

3.2 分块处理

由于多普勒调频率 $f_{\rm dr}$ 是距离 $R_{\rm c}$ 的函数, 如果在整个距离向上都采用相同的聚焦参数, 则在与距离中心相隔较远的大部分距离单元上都会存在参数的失配, 这必然会降低这些区域的成像效果, 因而需要根据距离的不同采用不同的调频率参数.

当天线的斜视角 $\theta_{\rm s}$ 很小时, 天线相对于目标区域的速度 $v_{\rm st}$ 几乎不随距离 $R_{\rm c}$ 变化 [1]. 于是, 可以得到一个简易而有效的模型用于表示多普勒调频率与距离的关系, 即

$$f_{\rm dr}=-\frac{2\ddot{R}(s_{\rm c})}{\lambda}=-\frac{2v_{\rm st}^2}{\lambda R_{\rm c}}. \tag{5}$$

式 (5) 表明, 如果方位匹配滤波器所使用的距离 $R_{\rm c}$ 与目标点的距离不一致, 就会引起多普勒调频率 $f_{\rm dr}$ 的失配, 有

$$\delta f_{\rm dr}=\frac{2v_{\rm st}^2}{\lambda R_{\rm c}R_{\rm c}}\delta R_{\rm c}=-\frac{f_{\rm dr}}{R_{\rm c}}\delta R_{\rm c}. \tag{6}$$

假设估计精确, 为了消除多普勒调频率 $f_{\rm dr}$ 的失配, 需对每一个距离单元更新一次 $f_{\rm dr}$. 实际上, 在允许

一定的相位误差条件下, $\delta R_{\rm c}$ 的范围可以由下式确定 [1]:

$$|\delta R_{\rm c}| < \frac{R_{\rm c}}{B_{\rm D}S} = \frac{R_{\rm c}}{|f_{\rm dr}|S^2} = \frac{2(\delta x)^2}{\lambda}. \tag{7}$$

其中, $B_{\rm D}$ 为方位向带宽, S 为合成孔径时间, δx 为方位分辨率. 这样, 只要在距离向每隔 $\delta R_{\rm c}$ 更新一次 $f_{\rm dr}$ 就可以满足 SAR 成像要求. 对于 Envisat ASAR, 若方位分辨率 $\delta x = L_{\rm a}/2 = 5\,{\rm m}$, 距离分辨率 $\delta R = 7.803\,9737\,{\rm m}$, 波长 $\lambda = 0.056\,235\,6424\,{\rm m}$, 则有

$$\left|\frac{\delta R_{\rm c}}{\delta R}\right| < \frac{2(\delta x)^2}{\lambda \delta R} \approx 114. \tag{8}$$

因此, 对于 ASAR 来说, 每隔 114 个距离单元采样点就需要更新一次 $f_{\rm dr}$, 对每一个聚焦深度内的数据采用不同的方位向滤波参数进行成像处理, 以保证方位向分辨率.

3.3　块数据选择

在估计多普勒调频率的过程中, 块数据的质量是一个需要考虑的问题, 其直接影响到整个估计的精度. 一个好的块数据会使整个估计结果更加准确, 而一个坏的块数据则会导致整个调频率参数失配. Map Drift 算法适用于具有多个目标点或强边界情况的地形, 针对这种情况, 提出一种简单的自动选取块数据的方法. 参考式 (3), 对于一个好的块数据, 调频率误差与视差应该满足良好的线性关系, 误差较小时, 对应的视差也较小. 因此可以定义一个视差比 (视差与视图像方位长度的比值), 把其作为验证参数估计好坏的标准, 即

$$\left|\frac{\Delta\eta}{L_{\rm s}}\right| \approx \left|\frac{\Delta f_{\rm a}}{f_{\rm dr}^2 L_{\rm s}}\Delta f_{\rm dr}\right| < \alpha. \tag{9}$$

其中, $\Delta\eta$ 为视错位, $L_{\rm s}$ 为视图像的方位长度, α 为误差限. 把式 (9) 作为块数据选择的判据, 选择满足该式的数据作为用于反演的数据块. 误差限不能太大, 太大会造成设定的判断标准不能达到设限的效果, 太小则可能造成多次选取数据块, 增加运算量, 甚至可能会得不到满足要求的结果. 根据实验结果, 误差限可以选择为 3%~5%. 如果视差比大于误差限, 则应该重新选取数据块; 如果小于误差限, 则可以接受估计的多普勒调频率, 并利用该块的多普勒调频率反演出整个距离线的多普勒调频率; 如果所有块都不满足, 则需要利用原始轨道参数估计的结果.

4　实验结果

本文采用 Envisat ASAR 在 2008 年 7 月 11 日位于唐山曹妃甸地区的数据, 距离向和方位向单元的采样点数分别为 6715 和 8192. 根据 3.2 节中的分析, 聚焦深度采样点选为 114, 因此, 把数据按照距离向分为 6715/114≈58 块.

图 2(a) 为利用 ACCC 分块估计方法估计的多普勒中心频率 $f_{\rm dc}$, 可以看出, 多普勒中心频率并不是一个常数, 其随着距离的变化而变化, 由于多普勒中心频率受相对运动的影响较大, 多普勒中心频率显得没有规律性, 但有一个总的趋势.

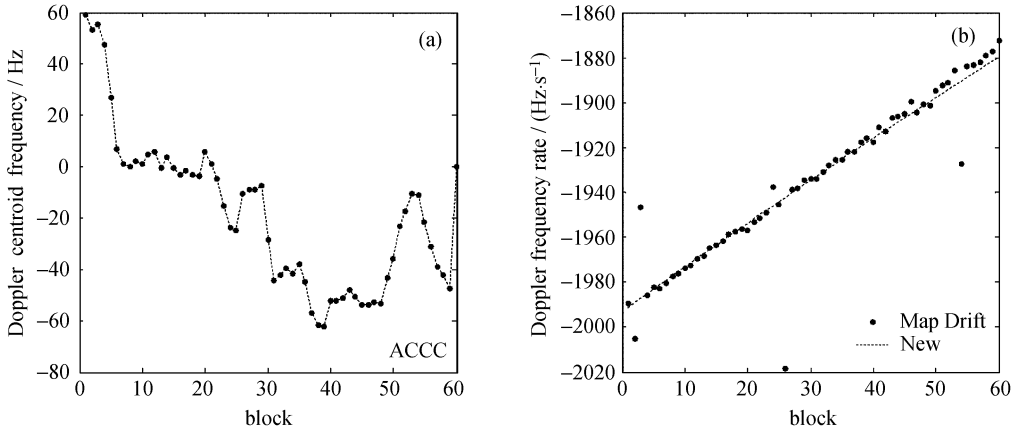


图 2　多普勒参数估计

Fig. 2　Doppler parameters estimation

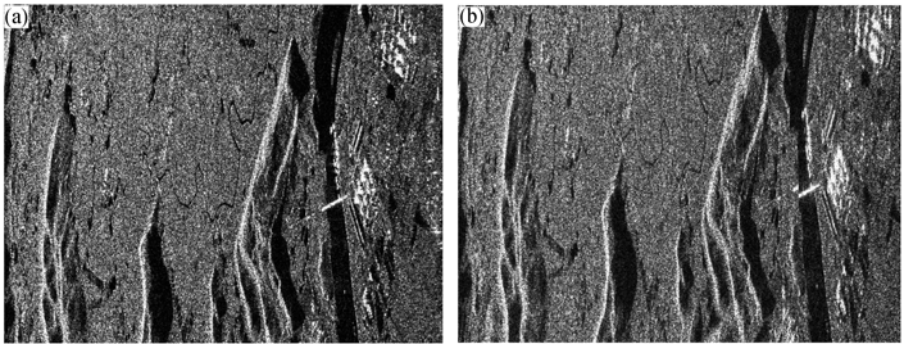


图 3 处理结果对比

Fig. 3 Comparison of results by the two methods

图 2(b) 给出了利用综合反演法和 Map Drift 算法分块估计多普勒调频率 f_{dr} 的结果对比. 两种方法得到的结果基本一致, 但是两者的处理时间是不同的. 在 16 核处理机试验平台上, 利用综合反演法的处理时间最快只需要 2 s, 而利用 Map Drift 算法分块估计, 根据分块的次数 $N = 58$, 却需要 116 s. 可见加速比是非常可观的.

由于 Map Drift 算法适用于具有多目标点或具有强边界类型的 SAR 数据 [5], 而不适用于低对比度的观测区域. 从图 2 可以看出, 利用 Map Drift 算法估计多普勒调频率对于有些块数据来说得到的结果误差比较大, 而利用综合反演法正好可以校正这些偏离点.

图 3 给出了 SAR 处理结果的对比, 向右为距离向, 向上为方位向. 图 3(a) 是 Envisat 处理系统生成的结果, 图 3(b) 是根据聚焦深度对距离向利用综合反演法分块估计多普勒参数并成像的结果. 可以看出, 两者的成像质量较为接近.

5 结论

提出的基于轨道参数和 SAR 回波数据的多普勒调频率快速估计方法应用于基于减灾防灾的快速响应系统, 在保证成像质量的基础上, 体现出了很好的处理速度优势, 并且能够有效地校正 Map Drift 算法得到的结果. 该算法在实时 SAR 图像成像处理中会有很好的实用价值.

参考文献

[1] John C C, Robert N M. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1991

[2] Cumming I G, Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation [M]. Norwood M A: Artech House, 2005

[3] European Space Agency. Envisat ASAR Product Handbook [M/OL]. ESA, 2006. 217-226

[4] Madsen S N. Estimating the Doppler centroid of SAR Data [J]. *IEEE Trans. Aeros. Ele. Sys.*, 1989, **25**(2):134-140

[5] Li F K, Held D N, Curlander J, Wu C. Doppler parameter estimation for spaceborne synthetic-aperture radars [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1985, **23**(1):47-56

[6] Wong F H, Cumming I G. A Combined SAR Doppler centroid estimation scheme based upon signal phase [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1996, **34**(3):696-707