

星载合成孔径雷达多普勒调频率估计精度分析¹

张永军

(北京市遥感信息研究所 北京 100011)

摘要: 该文分析了星载合成孔径雷达成像处理中多普勒调频率估计与系统参数及图像特性的关系,给出了利用轨道数据或回波信号数据估计多普勒调频率的精度与图像分辨率、雷达系统参数、轨道数据精度和地物散射特性之间的关系。这些结论对系统的设计,以及数据处理方法的选择具有重要的参考价值。

关键词: 合成孔径雷达, 多普勒调频率, 系统参数, 图像质量

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)02-0200-06

Accuracy of Estimation of Doppler Frequency Rate for Spaceborne SAR

Zhang Yong-jun

(Beijing Remote Sensing Information Institute, Beijing 100011, China)

Abstract This paper analyzes Doppler frequency rate, parameters of system and images quality, and provides the relationship among accuracy of Doppler frequency rate, resolution of images, parameters of radar system, accuracy of orbit data and electromagnetic parameters of imaging area. These results are useful for system design and data processing.

Key words Synthetic Aperture Radar(SAR), Doppler frequency rate, System parameters, Image quality

1 引言

星载 SAR 成像必须对其回波信号进行精确的运动补偿才能实现不同时刻回波信号的同相干叠加,星载 SAR 的运动补偿主要是精确补偿星体与目标之间的距离历程。而每次观测的相位差依赖于星体与地面的斜距变化,瞬时斜距可以表示成相对于波束中心的二阶 Taylor 级数展开,那么只要求得展开式中的一次项和二次项系数就可以得到星体与地面的瞬时斜距方程^[1-4],从而可以构造出方位向滤波器的参考函数得到最终的方位处理结果。获得回波信号相位一次项和二次项系数的问题在星载 SAR 中称为多普勒参数估计,即多普勒中心频率和多普勒调频率的估计。

多普勒参数估计的精度直接影响图像质量的好坏。多普勒调频率的估计误差将造成图像散焦,图像变得模糊不清。

多普勒中心频率主要由卫星与目标之间的径向速度引起。在星载 SAR 中,径向速度主要由地球自转产生。多普勒调频率是由波束中心的切向速度和径向加速度产生,它与卫星的运动、目标的运动、地球的曲率有关。

为了获取高质量的星载 SAR 图像和高精度的定位,需要对星载 SAR 的多普勒参数进行估计,文献 [1] 给出了一种星载 SAR 多普勒参数估计方法。文献 [4] 研究了多普勒中心频率估计的下限,本文重点研究多普勒调频率估计与卫星轨道数据、雷达系统参数和目标区域散射特性的关系,得到了一些重要结论。

¹ 2002-09-20 收到, 2003-02-25 改回

2 星载 SAR 多普勒频率历程

回波信号的多普勒历程是回波信号相位随时间变化关系的有效表示。回波信号的相位变化由传感器与目标之间的相对运动产生, 这种相对运动可以用距离历程来表示。

星载 SAR 中, 地球的转动不可忽略, 传感器与目标的距离历程可近似表示为^[5]

$$R(t) = |R(t) \bullet R(t)|_{t=0}^{1/2} \approx |R| + \frac{V \bullet R}{|R|}t + \frac{|R|^2 + A \bullet R}{2|R|}t^2 \quad (1)$$

其中 ‘ \bullet ’ 表示两矢量点积; R , V 和 A 分别表示卫星与波束中心点目标 A 的相对位置矢量、速度矢量和加速度矢量, t 表示时间变量。

式 (1) 表明: 一般情况下, 目标与雷达之间的瞬时斜率可以近似为时间的二次函数, 在不同的雷达发射信号与接收信号时间采样点上 $R(t)$ 不相同。瞬时相位为

$$\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \left(|R| + \frac{V \bullet R}{|R|}t + \frac{|V|^2 + A \bullet R}{2|R|}t^2 \right) \quad (2)$$

瞬时频率表示为

$$f(t) = [1/(2\pi)](d\varphi(t)/dt) = f_{DC} + f_{DR}t \quad (3)$$

其中 f_{DC} 为多普勒中心频率, f_{DR} 为多普勒调频率。

$$f_{DC} = 2V \bullet R / (\lambda|R|) \quad (4)$$

$$f_{DR} = 2(|V|^2 + A \bullet R) / (\lambda|R|) \quad (5)$$

回波信号的频率可近似为线性调频信号。通过脉冲压缩可将信号压缩得很窄, 从而改善了方位分辨力。方位分辨力的大小与形成调频信号的带宽有关, 带宽越宽, 方位分辨力越高。带宽的大小与积累时间的长短有关, 积累时间越长, 带宽越大。对于条带工作模式的星载 SAR, 积累时间的极限是由天线真实孔径的大小决定的, 最大积累时间为目标受天线波束照射的最大时间。

如果用多普勒参数 f_{DC} 和 f_{DR} 表示式 (1), 则有

$$R(t) = R - (\lambda/2)(f_{DC} \bullet t + f_{DR} \bullet t^2/2) \quad (6)$$

其中 $R(t)$, R 为 $R(t)$, R 的模。

3 多普勒调频率估计精度分析

从式 (5) 可知, 当由卫星轨道数据估计多普勒调频率时, 其估计精度主要取决于轨道数据的精度。另外, 在相同轨道数据精度的条件下, 其多普勒调频率估计精度与雷达频率波长有关。下面重点分析采用自聚焦方法^[5]估计多普勒调频率时的估计精度。

如果多普勒中心频率误差为 Δf_{DC} , 距离迁移变成

$$\begin{aligned} R_A(t) &= R_A - (\lambda/2)[(f_{DC} + \Delta f_{DC})t + (f_{DR} \bullet t^2)/2] \\ &= R_A - (\lambda/2)[f_{DC} \bullet t + (f_{DR}/2)(t + \Delta f_{DC}/f_{DR})^2 - (\Delta f_{DC})^2/(2f_{DR})] \end{aligned} \quad (7)$$

由此可得多普勒中心频率误差引起的方位向图像位置畸变具有如下关系:

$$\Delta x = v\Delta f_{DC}/f_{DR} \quad (8)$$

其中 Δx 为多普勒中心频率误差 Δf_{DC} 引起的距离迁移, v 为卫星移动对应的地面速度。

若合成孔径长度为 T ，做多视处理 (N 视) 时，第 1 与 N 视之间的距离 τ 为 $(N-1)T/N$ 。不同子孔径的多普勒中心频率变化是由多普勒频率随时间的变化引起的。在成像处理时，多普勒频率近似为线性调频信号，其频率变化量由多普勒调频率，多普勒调频率误差 Δf_{DR} 引起的各第 i 个子孔径和第 j 个子孔径之间的多普勒中心频率相对误差为 $\Delta f_{\text{DC}}^{ij} = \tau \Delta f_{\text{DR}}$ ，式 (8) 变为

$$\Delta x = v\tau \Delta f_{\text{DR}} / f_{\text{DR}} \quad (9)$$

将式 (9) 改写一下，可变为

$$\Delta f_{\text{DR}} = f_{\text{DR}} \Delta x / (v\tau) \quad (10)$$

式 (10) 表示了多普勒调频率的估计误差 Δf_{DR} 与两幅子孔径图像间的配准误差 Δx 之间的关系。又因为

$$\sin \theta \approx \theta \approx \text{tg} \theta = \frac{x}{|\mathbf{R}|} = \frac{v\tau}{|\mathbf{R}|} \quad (11)$$

$$f_{\text{DR}} = \frac{2(|\mathbf{V}|^2 + \mathbf{A} \cdot \mathbf{R})}{\lambda |\mathbf{R}|} \quad (12)$$

其中 θ 为 $v\tau$ 对应的天线方位角。则

$$\Delta f_{\text{DR}} = \frac{2(|\mathbf{V}|^2 + \mathbf{A} \cdot \mathbf{R})}{\lambda \theta |\mathbf{R}|^2} \Delta x = \frac{2(|\mathbf{V}|^2 + \mathbf{A} \cdot \mathbf{R})}{|\mathbf{R}|^2} \frac{1}{\lambda \theta} \Delta x \quad (13)$$

式 (13) 中第 1 部分为轨道与地球自转有关的参数；第 3 部分为子孔径图像之间的位置误差，取决于子孔径图像间配准误差；第 2 部分为雷达系统的参数，与雷达发射频率波长和天线方位角方向图有关。若天线方向图主瓣宽度为

$$\theta_T \approx \lambda / L \quad (14)$$

下面以式 (14) 确定的天线方向图主瓣宽度为例分析，其结论不失一般性。则

$$\theta \approx (N-1)\lambda / (NL) \quad (15)$$

将式 (15) 代入式 (13) 可得

$$\Delta f_{\text{DR}} = \frac{2N(|\mathbf{V}|^2 + \mathbf{A} \cdot \mathbf{R})L}{(N-1)\lambda^2 |\mathbf{R}|^2} \Delta x = \frac{2N(|\mathbf{V}|^2 + \mathbf{A} \cdot \mathbf{R})}{(N-1)|\mathbf{R}|^2} \cdot \frac{1}{\lambda^2} \cdot L \cdot \Delta x \quad (16)$$

式 (16) 中第 1 部分为轨道与地球自转有关的参数，对于大多数合成孔径雷达卫星来讲，卫星轨道高度在 500~800km 的范围内，这一项变化不大；第 2 部分为雷达系统的参数，与雷达发射频率波长的平方成反比，对于不同频段的雷达，如 L 频段和 X 频段，这一项变化相差达到几十倍；第 3 部分为雷达天线方位角长度，一般主要取决于系统方位角分辨率；第 4 部分为子孔径图像之间的位置误差，取决于子孔径图像间配准精度，而配准精度又主要依赖于成像区域的地形及地物的散射特性。

假设雷达成像区域的地物目标对不同频段的电磁波具有相同的散射特性，在图像质量指标 (分辨率、积分旁瓣比、峰值旁瓣比和信号噪声比等)、轨道数据参数及轨道数据精度基本相同的条件下，两幅图像的配准精度基本相同，即 Δx 的值基本一样，此时，多普勒调频率的估计精度与雷达发射频率波长的平方近似成反比。

一般情况下, 同一区域的地物目标对不同频段的电磁波的散射特性会有一些差别, 如频率较高 (如: X 频段) 的雷达图像较频率较低 (如: L 频段) 的雷达图像的目标的轮廓特征更为明显, 更有利于图像的配准。

4 多普勒调频率估计精度与图像分辨率

成像处理就是完成回波信号的相干叠加, 即对某一点目标在合成孔径内不同地点的回波进行同相相加, 针对不同系统的情况, 可采用不同成像算法进行成像处理。成像处理的实质是实现不同时刻回波数据精确的相干叠加。因此, 在成像处理过程中必须精确控制多普勒中心频率和调频率引起的相位误差。

为了获取高质量的星载 SAR 图像, 需要对星载 SAR 的多普勒参数进行估计, 可以利用回波数据本身估计多普勒参数, 也可以利用卫星的轨道数据和其它辅助数据估计多普勒参数。利用回波数据本身估计多普勒参数, 其多普勒参数的估计精度往往与成像的地形及其散射特性有关, 导致成像处理的稳定性差, 对于星载 SAR, 卫星飞行相对稳定, 利用卫星的轨道数据及姿态数据估计多普勒参数的估计精度较高, 且多普勒参数的估计精度不受地形及其散射特性的影响, 估计方法可靠, 在工程实现中往往采用这种方法。对于非协作卫星接收的数据, 难以得到精确的轨道数据, 往往用卫星轨道及姿态数据估计初始的多普勒参数, 再利用回波数据估计多普勒参数, 如: 采用杂波锁定法估计多普勒中心频率, 采用自聚焦方法估计多普勒调频率。由式 (2) 可知, 与多普勒调频率有关的相位项可表示为

$$\varphi(t) = \pi f_{DR} t^2 \quad (17)$$

在成像处理时, 将一个合成孔径时间 T 内的数据做 M 视的多视 ($M=1$ 为单视) 处理, 每个子孔径的时间长度为 T/M , 以子孔径中心为基准, 由多普勒调频率误差 Δf_{DR} 引起的二次相位误差的最大值在 $t = T/(2M)$ 处, 其二次相位误差为

$$\varphi[T/(2M)] = \pi \Delta f_{DR} T^2 / (4M^2) \quad (18)$$

将式 (16) 代入式 (18), 且注意到

$$T = |R|\lambda / (|V|L) \quad (19)$$

则式 (18) 可写为

$$\varphi\left(\frac{T}{2M}\right) = -\frac{N\pi(|V|^2 + \mathbf{A} \cdot \mathbf{R})}{2M^2(N-1)|V|^2} \cdot \frac{\Delta x}{L} \quad (20)$$

一般情况下, 在式 (20) 分子中括号里的两项第 1 项远大于第 2 项, 卫星到目标距离的远近对二次相位误差影响不大, 此时, 式 (20) 可近似为

$$\varphi[T/(2M)] \approx N\pi/[2M^2(N-1)](\Delta x/L) \quad (21)$$

在做 N 视处理时, 子孔径图像的方位向分辨率约为 $NL/2$, 若限制 $|\varphi(T/2M)| \leq \pi/4$, 则

$$|2\Delta x/(NL)| \leq M^2(N-1)/N^2 \quad (22)$$

式 (21) 和式 (22) 是一个非常重要的结论, 二次相位误差与卫星轨道参数无关, 与雷达发射频率的波长也没有直接的关系 (波长的影响只通过地物的散射特性影响 Δx), 只与图像分辨率及地物的散射特性 (Δx 的精度) 有关, 其精度取决于两个子孔径图像的配准精度。表 1 给出了在多普勒调频率估计时采用 N 视处理子孔径相关自聚焦方法, 成像处理时做 M 视的多视处理, 其需要的子孔径图像配准精度与 N 和 M 的关系。

需要指出的是 N 不一定取整数, 当 N 不为整数的多普勒调频率估计时, 子孔径数取大于 N 的整数, 子孔径长度仍然为 T/N , 各子孔径的数据有一些重叠。

表 1 配准精度 $|2\Delta x/(NL)|$ 与 N 和 M 的关系

		调频率估计视数 N			
		2	3	4	5
成像 处理 视数 M	1	1/4	1/4.5	1/5.25	1/6.25
	2	1	1/1.125	1/1.25	1/1.5
	3	2.25	2	1.69	1.44
	4	4	3.56	3	2.56

把式 (22) 右边写成 N 的函数:

$$f_M(N) = M^2(N - 1)/N^2 \quad (23)$$

对 $f_M(N)$ 求导, 求 $f_M(N)$ 最大值为

$$f_M(2) = M^2/4 \quad (24)$$

从表 1 和式 (24) 可以看出, 通过自聚焦 (子孔径相关) 方法估计多普勒调频率获得高分辨率的单视图像, 并且要把二次相位误差控制在 $\pi/4$ 范围内是比较困难的, 它要求两个子孔径图像的配准精度最少要在 $1/4$ 子孔径图像分辨单元之内, 对后向散射特性变化不明显的地面成像区域很难达到这一要求。

如果放宽对二次相位误差的限制, 就会使系统方位向冲击响应展宽, 主瓣峰值电平下降。从减少二次相位误差的角度讲, 自聚焦子孔径数的最佳值为 2。

采用卫星的轨道数据和其它辅助数据估计多普勒参数。由式 (13) 可知, 多普勒调频率的估计误差可表示为

$$\Delta f_{DR} = \Delta \left\{ \frac{2(|V|^2 + A \cdot R)}{|R|} \right\} \frac{1}{\lambda} \quad (25)$$

将式 (25) 代入式 (18) 得到

$$\varphi\left(\frac{T}{2M}\right) = \pi \Delta \left\{ \frac{2(|V|^2 + A \cdot R)}{|R|} \right\} \cdot \frac{|R|^2}{|V|^2} \cdot \frac{\lambda}{4M^2L^2} \quad (26)$$

式 (26) 表明: 利用卫星的轨道数据和其它辅助数据估计多普勒参数时, 二次相位误差与卫星的轨道数据精度及轨道参数有关, 与雷达发射频率的波长有关, 而与地物的散射特性无关。在相同条件下, 雷达波长越长, 为了获得相同的图像质量指标, 对轨道数据的精度要求越高; 在卫星轨道数据精度不变的情况下, 分辨率的平方与二次相位误差成反比, 一般情况下, 为了实现成像中各回波信号的相关叠加, 要将二次相位误差控制在一定的范围内 (如: $\pi/4$), 所以, 要获得的图像分辨率越高, 对轨道数据的精度要求越高。

下面再进一步分析卫星的位置误差、速度误差和加速度误差对多普勒调频率误差及其二次相位误差的影响。一般来讲, 在式 (26) 中大括号里的两项第 1 项远大于第 2 项, 在分析位置误差和速度误差的影响时, 忽略第 2 项。在此条件下分别对式 (26) 求偏微分, 可得到如下误差表示式:

$$\varphi_V [T/(2M)] = \pi(R/V)[\lambda/(M^2L^2)]\Delta V \quad (27)$$

$$\varphi_R [T/(2M)] = \pi[\lambda/(2M^2L^2)]\Delta R \quad (28)$$

$$\varphi_A [T/(2M)] = \pi(R^2/V^2)[\lambda/(4M^2L^2)]\Delta A \quad (29)$$

其中 R , V 和 A 分别为径向距离、前向速度和径向加速度。一般情况下, ΔA 主要由地球的自转及卫星轨道的摄动引起, 通常影响比较小, R 是卫星到目标的相对距离, 可以由回波信号波

门精确给出, 也就是说 ΔR 通常非常小。所以, 其多普勒调频率估计误差主要是由轨道的速度测量误差引起, 一般需要将其引起的二次相位误差控制在 $\pi/4$ 的范围内。否则, 会使系统方位向冲击响应展宽, 主瓣峰值电平下降, 影响图像质量指标。

5 结论

本文分析了星载合成孔径雷达成像处理中多普勒调频率估计的相关因素, 给出了利用轨道数据或回波信号数据估计多普勒调频率的精度与图像分辨率、雷达系统参数、轨道数据精度和地物散射特性之间的关系, 得到了如下重要结论:

(1) 采用自聚焦方法从回波信号中估计多普勒调频率, 在成像处理时, 其多普勒调频率估计误差引起的二次相位误差与卫星轨道参数无关, 与雷达发射频率的波长也没有直接的关系, 只与图像分辨率及地物的散射特性有关, 其精度取决于两个子孔径图像的配准精度。

(2) 通过自聚焦(子孔径相关)方法估计多普勒调频率获得高分辨率的单视图像, 并且要把二次相位误差控制在 $\pi/4$ 范围内是比较困难的, 它要求两个子孔径图像的配准精度最少要在 $1/4$ 子孔径图像分辨单元之内。

(3) 在进行高精度的成像处理时, 从减少二次相位误差的角度讲, 自聚焦子孔径数的最佳值为 2; 在精度要求不太高时, $N > 2$, 会降低自聚焦(子孔径相关)处理的计算量。

(4) 利用卫星的轨道数据和和其它辅助数据估计多普勒参数时, 二次相位误差与卫星的轨道数据精度及轨道参数有关, 与雷达发射频率的波长有关, 而与成像区域的地形及地物的散射特性无关。在相同条件下, 雷达波长越长, 为了获得相同的图像质量指标, 对轨道数据的精度要求越高; 另外, 要获得的图像分辨率越高, 对轨道数据的精度要求越高。

这些结论在星载合成孔径雷达系统的设计时以及在成像处理算法中多普勒调频率的估计方法选择时, 具有重要的参考价值; 这些结论对机载合成孔径雷达系统设计和成像处理算法研究同样具有参考价值。

参 考 文 献

- [1] Prati C, Rocca F, Kost Y, Damonti E. Blind deconvolution for Doppler centroid estimation in high frequency SAR. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 1991, 29(6): 934-941.
- [2] Li F K, Held D N, Curlander J C, Wu C. Doppler parameter estimation for spaceborne synthetic aperture radar. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 1985, 23(1): 47-55.
- [3] Wong F, Cumming I G. A combined SAR Doppler centroid estimation scheme based upon signal phase. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 1996, 34(3): 696-707.
- [4] Bamler R. Doppler frequency estimation and the Cramer-Rao bound. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 1991, 29(3): 385-390.
- [5] Curlander J C, McDonough R H. Synthetic Aperture Radar: System and Signal Processing. Inc. New York, John Wiley&Sons, 1991: 182-248.

张永军: 男, 1960 年生, 研究员, 主要研究方向: 星载合成孔径雷达系统及其信息处理。