

基于距离走动校正的星载 SAR 成像算法

刘继帮^{①②} 韩松^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中科院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文提出一种适合大距离徙动星载 SAR 的成像算法, 该算法首先要对回波信号的距离走动进行校正, 因而距离向和方位向的耦合度大大减小, 成像质量得到提高。文中详细地推导出了该算法。然后对距离多普勒域的调频斜率的近似误差进行了分析, 并与普通的斜视算法进行了比较。最后通过点目标成像仿真和实际数据成像仿真, 验证了该算法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 距离走动校正; Chirp Scaling 算法

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)02-0322-04

An Imaging Algorithm for Space-borne SAR Based on Range Walk Correction

Liu Ji-bang^{①②} Han Song^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In this paper, an algorithm is proposed to resolve the precise imaging problem of space-borne SAR with large cell migration. This algorithm is derived in detail based on the squinted equivalent range model. A distinct difference from other algorithms is that this algorithm begins with range walk correction in the time domain, which obviously reduces the coupling between range and azimuth signal. This algorithm is compared with a common squint mode chirp scaling algorithm through the computer simulation, and the result shows that the imaging method presented in this paper is effective.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Range walk correction; Chirp Scaling (CS) algorithm

1 引言

星载 SAR 是一种空间对地观测的成像雷达, 具有全天候、全天时、可以穿透一定植被的优点, 并且可以进行全球观测, 在军事、农业、海洋等领域有广阔的应用。目前国际上主要利用 Chirp Scaling (CS)^[1] 算法进行星载 SAR 成像处理, 与 RD^[2] 算法相比, CS 算法不需进行插值处理, 能较好地完成任务。星载 SAR 的空间关系决定了其距离模型近似为斜视模型, 而且, 星载 SAR 中由于地球自转造成的距离走动和大孔径引起的距离弯曲现象十分明显, 导致一些算法的成像精度下降。为解决斜视和大距离徙动带来的问题, 国际上已经提出了许多改进的算法^[3-6]。文献[3]采用斜视距离等效模型推导出一种斜视 Chirp Scaling 算法, 能较好地解决斜视下的距离徙动进行校正。

本文提出了一种基于距离走动校正的改进 Chirp Scaling 算法来实现大距离徙动的星载 SAR 成像。该算法通过在时域中对距离走动进行校正, 减小距离向和方位向信号

的耦合。文中详细推导出该算法的实现方法, 最后分别对该算法与文献[3]中算法的仿真结果进行了比较。

2 斜视距离方程

图 1 是 SAR 斜视时的几何模型, 图中 φ 为斜视角, r 为 $t = 0$ 时雷达与目标的斜距, v 为雷达平台等效速度, 则斜视的等效距离方程^[3]为

$$R(t; r) = \sqrt{r^2 + v^2 t^2 - 2rvt \sin \varphi} \quad (1)$$

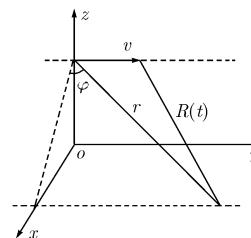


图 1 SAR 斜视时的几何模型

3 距离走动校正^[7]

距离徙动是指合成孔径过程中, 雷达和目标之间的斜距变化超过了一个距离分辨单元, 使得来自同一目标的回波信

号在距离向分布于不同的距离单元内,造成了信号在方位向与距离向的耦合。在星载 SAR 中,回波信号通常伴有大的距离徙动,因而距离徙动校正成为星载 SAR 成像处理中的重要环节,直接影响成像算法的成像质量。距离徙动包括距离弯曲(非线性部分)和距离走动(线性部分)。

对斜距 $R(t;r)$ 进行泰勒展开并取前 3 项,得到

$$R(t;r) = r - v \sin \varphi t + \frac{v^2 \cos^2 \varphi}{2r} t^2 \quad (2)$$

则距离徙动表达式为

$$\Delta R = R(t;r) - r = -vt \sin \varphi + \frac{v^2 \cos^2 \varphi}{2r} t^2 \quad (3)$$

式中二次项为距离弯曲,线性项为距离走动。距离走动具有严格的时域线性特征,因此可在时域对它进行校正。在时域中进行距离走动校正后斜距为

$$R_p(t;r) = R(t;r) + R_w(t;r) \quad (4)$$

其中

$$R_w(t;r) = vt \sin \varphi = \frac{\lambda f_{Dc}}{2} t \quad (5)$$

由于走动补偿量可能不是距离门的整数倍,因此要通过插值运算获得所需距离门处的信号值来实现走动校正。在实际数据成像处理时,通常是采用处理场景中心的多普勒中心频率进行校正。显然,对于与场景中心有不同的 f_{Dc} 目标而言,这种做法将引入一定的误差。因此可反复估计多普勒中心频率 f_{Dc} ,当使用最近两次所估计的 f_{Dc} 进行距离走动校正最大量小于一个门限值(四分之一距离分辨单元)时,可以认为此时的 f_{Dc} 接近了真实值,距离走动校正充分。

4 算法介绍

SAR 的点目标回波信号可表示为

$$ss_0(\tau, t; r) = \exp \left\{ -j\pi k \left[\tau - \frac{2R(t;r)}{c} \right]^2 - j \frac{4\pi R(t;r)}{\lambda} \right\} \quad (6)$$

其中 τ 和 t 分别是距离时间和方位时间, c 为光速, k 为发射线性调频信号的调频率, $R(t;r)$ 为点目标到雷达的斜距变化。推导中忽略幅度项,不影响整个算法。该算法的流程图如图 2 所示。

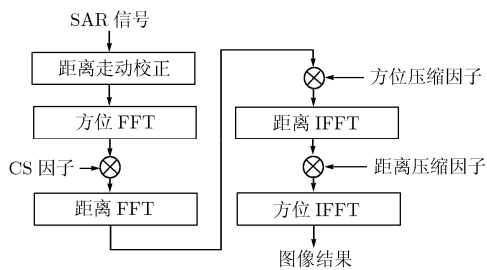


图 2 距离走动校正改进 CSA 的流程图

先对回波信号进行距离走动校正,此时距离走动的校正量如式(4)所示,回波信号可重新表达为

$$ss_1(\tau, t; r) = \exp \left\{ -j\pi k \left[\tau - \frac{2R_p(t;r)}{c} \right]^2 - j \frac{4\pi R(t;r)}{\lambda} \right\} \quad (7)$$

其中

$$R_p(t;r) = \sqrt{r^2 + v^2 t^2 - 2rvt \sin \varphi} + vt \sin \varphi \quad (8)$$

利用驻定相位原理^[8]对方位向作傅里叶变换,将信号转换到距离-多普勒域,得到

$$ss_2(\tau, f_a; r) = \exp \left\{ -j\pi K_m(f_a; r) \left[\tau - \frac{2R_p(f_a; r)}{c} \right]^2 - j \frac{4\pi r \cos \varphi}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v} \right)^2} - j \frac{2\pi r f_a}{v} \sin \varphi \right\} \quad (9)$$

其中

$$R_p(f_a; r) = \frac{r \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v} \right)^2}} \left(1 - \frac{\lambda f_a \sin \varphi}{2v} \right) + r \sin^2 \varphi \quad (10)$$

$$K_m(f_a; r) = 1 / \left\{ \frac{1}{k} + r \cos \varphi \frac{2\lambda}{c^2} \cdot \left[\frac{1 - \frac{\lambda f_a \sin \varphi}{v} + \left(\frac{\lambda f_a}{2v} \right)^2 \sin^2 \varphi}{\left[1 - (\lambda f_a / 2v)^2 \right]^{3/2}} - \frac{\cos^2 \varphi}{\left[1 - (\lambda f_a / 2v)^2 \right]^{1/2}} \right] \right\} \quad (11)$$

式中 f_a 为方位向频率。

在距离多普勒域,信号乘以 Chirp Scaling 因子 $H_1(\tau, f_a)$,

$$H_1(\tau, f_a) = \exp \left\{ -j\pi K_m(f_a; r_{ref}) C_s(f_a) [\tau - \tau_{ref}(f_a)]^2 \right\} \quad (12)$$

其中

$$C_s(f_a) = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v} \right)^2}} \left(1 - \frac{\lambda f_a \sin \varphi}{2v} \right) + \sin^2 \varphi - 1 \quad (13)$$

$$\tau_{ref}(f_a) = \frac{2}{c} r_{ref} [1 + C_s(f_a)] \quad (14)$$

通过与 Chirp Scaling 因子相乘,使不同距离上的距离徙动曲线与参考距离上的距离徙动曲线有相同的形式。

经过距离向傅里叶变换后,信号的二维频域表达式为

$$SS_3(f_r, f_a; r) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_r}{c} [r + r_{ref} C_s(f_a)] \right\} \cdot \exp \left\{ j \frac{\pi f_r^2}{K_m(f_a; r_{ref}) (1 + C_s)} \right\} \exp \{-j\theta\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi r \cos \varphi}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v} \right)^2} - j \frac{2\pi r f_a}{v} \sin \varphi \right\} \quad (15)$$

这里

$$\theta = \frac{4\pi}{c^2} K_m(f_a; r_{ref}) [1 + C_s(f_a)] C_s(f_a) (r - r_{ref})^2 \quad (16)$$

式中 f_r 为距离向频率,第 1 项为 f_r 的线性项,对应目标的正

确位置 r 和徙动 $r_{\text{ref}}C_s(f_a)$, 第 2 项为 f_r 的二次项, 是距离调频信号经过傅里叶变换的结果, 对应距离压缩和 SRC, 后面的项与距离频率 f_r 无关, 对应方位向聚焦和相位补偿。

在二维频域, $SS_3(f_r, f_a; r)$ 乘以距离补偿因子 $H_2(f_r, f_a)$, 就完成了距离压缩处理和距离徙动校正。

$$H_2(f_r, f_a) = \exp \left\{ -j \frac{\pi f_r^2}{K_m(f_a; r_{\text{ref}})(1 + C_s)} \right\} \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi f_r}{c} r_{\text{ref}} C_s(f_a) \right\} \quad (17)$$

式中第 1 项完成距离项压缩, 第 2 项完成距离徙动校正。

再经过距离向傅里叶逆变换回到距离-多普勒域, 然后沿方位向乘以方位补偿因子 $H_3(\tau, f_a)$, 最后作方位向傅里叶逆变换, 完成方位向处理。

$$H_3(\tau, f_a) = \exp \left\{ -j \frac{2\pi c \tau}{\lambda} \left[1 - \cos \varphi \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v} \right)^2} \right] \right\} \cdot \exp \{ j \Theta \} \exp \left\{ j \frac{2\pi r f_a}{v} \sin \varphi \right\} \quad (18)$$

式中第 1 项完成方位向压缩, 第 2, 3 项完成残留相位补偿。

5 仿真结果

根据前面所述, 使用本文提出的基于距离走动校正的改进 Chirp Scaling 算法, 对星载 SAR 系统进行点目标仿真实验。仿真所需参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

轨道高度	波长	脉冲重复频率	发射脉宽	采样频率	带宽
800.0km	0.056m	1257.0Hz	42.0 μ s	32.0MHz	30.0MHz

5.1 误差仿真和分析

事实上, 不同距离上的距离-多普勒域的调频斜率 $K_m(f_a; r)$ 值是不同的, 但通常取为参考距离处的值, 即采用 $K_m(f_a; r) = K_m(f_a; r_{\text{ref}})$ 的近似处理, 因而引入了误差。记各点距离处的误差为

$$\sigma_{K_m}(r) = \frac{1}{B_{az}} \sum_{f_a} [K_m(f_a; r) - K_m(f_a; r_{\text{ref}})]^2 \quad (19)$$

其中 B_{az} 表示方位向带宽。这里取场景中心位置时的斜距为参考距离, 则在距离向的边缘处误差最大。分别对文献[3]算法中和本文算法中的最大的近似误差进行了仿真和比较。

结果如图 3 所示, 选取斜视角从 1° 增加到 10° 。由图可知, 在相同的倾斜角下, 普通斜视 Chirp Scaling 算法中由 km 近似引起的最大误差比本文算法中的最大误差大几个数量级。随着斜视角的增大, 普通斜视 Chirp Scaling 算法的误差逐渐增加, 而本文中算法的误差却相对稳定。因此, 普通 Chirp Scaling 算法的成像效果会随着斜视程度的增加变得越来越差, 而本文算法能较好地适应各种倾斜度。

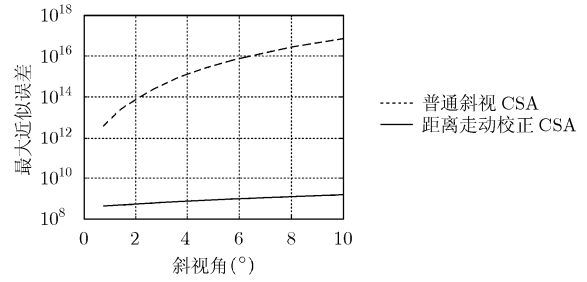


图 3 两种算法在不同斜视角下的最大近似误差

5.2 点目标成像仿真实验

根据本文所提算法, 对宽度为 6.3km 的测绘带中近距离位置、中心位置和远距位置进行单点目标成像仿真实验。分别采用文献[3]的普通斜视 Chirp Scaling 算法和本文提出的基于距离走动校正的改进 Chirp Scaling 算法进行成像处理, 成像处理中距离向和方位向都未进行窗函数加权。成像结果的性能指标见表 2, 点目标成像的三维图形分别见图 4, 图 5。其中 ρ_r 和 ρ_a 分别表示距离向和方位向地面分辨率; $ISLR_r$ 和 $ISLR_a$ 分别表示距离向和方位向积分旁瓣比; $PSLR_r$ 和 $PSLR_a$ 分别表示距离向和方位向峰值旁瓣比。用 P_n , P_c 和 P_f 分别表示测绘带的近距点、中心点和远距点。斜距分辨率为 5m, 方位分辨率为 5m。

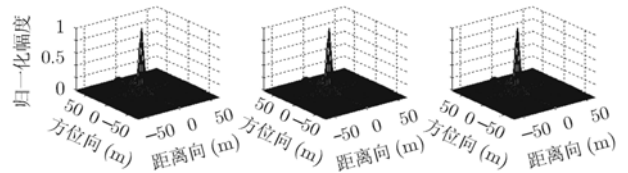


图 4 普通斜视 CSA 点目标成像三维图

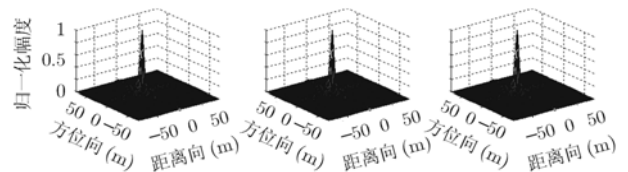


图 5 距离走动校正 CSA 点目标成像三维图

由表 2 中数据以及图 4, 图 5 可得, 两种算法对星载 SAR 的斜距向成像性能相差无几, 而在方位向有所不同。本文提出的距离走动校正 CSA 改善了方位向成像质量。从表 2 中可以进一步看出, 测绘带的 3 个位置的成像结果稍有不同, 中心点的成像性能指标略优于边缘处。这是因为多普勒参数在距离向随着距离门的不同而发生变化, 而在成像时使用的仅是中心位置参数的缘故。3 个位置的点目标成像指标均达到了设计要求, 说明距离走动校正 Chirp Scaling 算法可以实现星载 SAR 的精确成像。

表 2 点目标成像结果比较

算法	点目标 位置	斜距向			方位向		
		ρ_r (m)	ISLR _r (dB)	PSLR _r (dB)	ρ_a (m)	ISLR _a (dB)	PSLR _a (dB)
普通斜视 CSA	P_n	4.4312	-19.3706	-5.4508	5.0873	-12.4903	-10.1029
	P_c	4.4400	-19.3959	-15.4790	4.8850	-12.6863	-10.1545
	P_f	4.4310	-19.3756	-15.4606	5.0710	-12.5264	-10.1282
距离走动 校正 CSA	P_n	4.4211	-19.4389	-15.5052	4.3586	-14.5249	-12.2469
	P_c	4.4146	-19.4890	-15.5100	4.1281	-14.6212	-12.2609
	P_f	4.4222	-19.3823	-15.5048	4.6547	-14.5082	-12.2203

5.3 实测数据成像实验

根据本文提出的距离走动校正 Chirp Scaling 算法, 利用 RADARSAT-1 实测数据, 对北纬 49.2° 东经 122.9° 的加拿大某地区进行成像, 地面测绘带宽度为 29.5km。结果如图 6 所示。



图 6 实测数据成像结果

6 结束语

本文提出了一种基于距离走动校正的改进 Chirp Scaling 算法来实现星载 SAR 成像, 文中给出了该算法的详细推导, 然后对该算法进行了点目标成像仿真, 并与普通斜视算法的仿真结果进行了比较。最后利用实测数据进行了成像。结果表明, 基于距离走动校正的改进 Chirp Scaling 算法可以对大距离徙动的星载 SAR 实现精确成像。

参考文献

[1] Raney R K. Precision SAR processing using chirp scaling.

IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(4): 786-799.

[2] Bamler R. A comparison of range-doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(4): 706-713.

[3] 黄岩等. 高分辨星载 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法. 电子学报, 2000, 28(3): 35-38.

Huang Yan, *et al.*. Refined chirp scaling algorithm for high resolution spaceborne SAR imaging. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(3): 35-38.

[4] Davidson G W. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data. *IEEE Trans. on AES*, 1996, 32(1): 121-133.

[5] Horrell J M. An extension to range doppler SAR processing to accommodate severe range curvature. IGRASS'99, Hamburg, Germany, 1999, 1: 535-537.

[6] Yeo T S. A new subaperture approach to high squint SAR processing. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(5): 954-968.

[7] Curlander J C. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing. New York, Wiley, 1991: 116-120.

[8] 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: 113-114.

Zhang Cheng-bo. Synthetic aperture radar: principles, system analyses, applications. Beijing: Science Press, 1989: 113-114.

刘继帮: 男, 1981 年生, 硕士, 研究信号处理和 SAR 成像算法。

韩松: 男, 1971 年生, 研究员, 主要研究方向包括 SAR 实时成像处理、SAR 原始数据压缩等。