

高分辨星载 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法

黄 岩,李春升,陈 杰,周荫清

(北京航空航天大学电子工程系,北京 100083)

摘 要: 本文提出了一种用于星载合成孔径雷达(SAR)的改进 Chirp Scaling 成像处理算法.本文分析了三种星载 SAR 距离模型,根据误差最小的斜视等效距离模型,推导了改进 Chirp Scaling 算法,给出了实现步骤.该算法适用于大距离徙动高分辨率星载 SAR 精确成像.并且基于改进的 Chirp Scaling 算法,分析了多普勒参数误差对成像质量的影响.最后通过计算机仿真,验证了算法的有效性.

关键词: 合成孔径雷达; 雷达成像; Chirp Scaling 算法; 多普勒参数估计

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 03-0035-04

Refined Chirp Scaling Algorithm for High Resolution Spaceborne SAR Imaging

HUANG Yan, LI Chun-sheng, CHEN Jie, ZHOU Yin-qing

(Dept. of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper a refined chirp scaling algorithm for spaceborne synthetic aperture radar (SAR) imaging is presented. At first, three range models of spaceborne SAR are analyzed. Based on the squint range model which has the least error among the three models, a refined chirp scaling algorithm is derived. And it is suitable for precise imaging of high resolution spaceborne SAR with large range cell migration. Based on the refined chirp scaling algorithm, the effects of Doppler parameters on the quality of SAR image are analyzed as well. Finally, this algorithm is tested by computer simulation.

Key words: synthetic aperture radar; radar imaging; chirp scaling algorithm; estimation of doppler parameters

1 引言

高分辨率星载合成孔径雷达(SAR)的距离徙动现象十分严重,尤其对 L 波段更为明显,在合成孔径时间内距离徙动可能跨越上百个距离门,导致一些算法的成像精度降低. RD 算法^[1]是经典的成像处理算法,其中时域频域混合相关算法可以提供精确的脉冲响应,但是当距离徙动较大时,其运算量迅速增加,有效性下降;同时,聚焦深度相对距离徙动变小,甚至可能小于距离徙动,降低成像精度.带有二次距离压缩的改进 RD 算法和波数域算法^[1]可以完成距离徙动较大时的成像处理,但都采用了插值运算,不仅增加了计算量,而且降低了成像精度. Chirp Scaling 算法^[2~4]能完全校正距离徙动,相位补偿精确,而且无需插值运算,通过 FFT 和复乘即可完成成像处理.

经典 Chirp Scaling 算法^[2]是从机载正侧视模型推导出来的,星载 SAR 则近似为一斜视模型.一种从机载 SAR 斜视模型得到的 Chirp Scaling 算法^[4]仅在弯曲因子中进行修正,距离徙动的频域表达式不精确.本文从斜视距离模型直接推导出一种改进的 Chirp Scaling 算法,该算法适用于高分辨率星载 SAR 大距离徙动的精确成像.本文还进一步分析了多普勒参数误

差对成像质量的影响,给出了结合改进的 Chirp Scaling 算法的多普勒参数估计方法.最后对等效距离模型的误差、成像处理、多普勒参数误差的影响进行了计算机仿真,验证了算法的有效性.

2 斜视距离等效模型

SAR 常用的距离模型有三种

(1) 正侧视距离模型

$$R(t; r) = \sqrt{r^2 + V^2 t^2} \quad (1)$$

(2) 二次逼近距离模型

$$R(t; r) = r + \lambda(f_d t + 0.5 f_d^2 t^2) / 2 \quad (2)$$

(3) 斜视等效距离模型

$$R(t; r) = \sqrt{r^2 + V^2 t^2 - 2rVt\cos\varphi} \quad (3)$$

在星载 SAR 中,目标与雷达载体间的距离变化规律十分

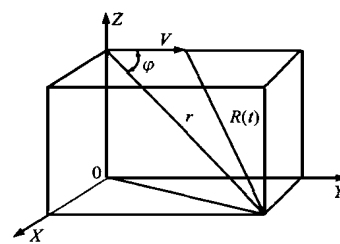


图1 斜视距离模型几何关系

复杂,没有显式解.即使星上天线安装时波束指向与平台运动方向垂直,但是由于地球自转等因素的影响,雷达平台和地面目标的相对运动方向与雷达波束指向也不垂直.第一种正侧视模型,星载 SAR 情况下误差较大,不能采用.第二种二次逼近距离模型,忽略了三次以上的高次项,误差小于第一种模型,主要由三次项决定.第三种斜视距离等效模型中含有各次成分,误差最小,是一种比较精确的星载 SAR 距离模型.

式(3)中 r 为 $t=0$ 时的斜距, V 为雷达平台运动的等效速度, φ 为等效斜视角.多普勒中心频率 f_d 和多普勒调频率 f_r 分别为

$$f_d = -(2V/\lambda) \cos\varphi \quad (4)$$

$$f_r = (2V^2/\lambda r) \sin^2\varphi \quad (5)$$

其中 λ 为波长.

3 改进的 Chirp Scaling 算法

3.1 回波模型

Chirp Scaling 算法与 RD 算法、波数域算法不同,不是首先通过脉冲压缩完成距离处理再进行方位处理,而是先将回波信号进行方位向傅里叶变换,再相继在距离-多普勒域、二维频域、距离-多普勒域进行相位补偿.成像质量直接与算法推导中相位因子的精确程度有关.

SAR 的点目标回波信号可以用式(6)表示

$$ss(\tau, t; r) = \sigma \cdot W_a(t) \cdot a[\tau - (2/C) R(t; r)] \exp\{-j\pi b[\tau - (2/C) R(t; r)]^2\} \exp\{-j\frac{4\pi}{\lambda} R(t; r)\} \quad (6)$$

式中 C 为光速, b 为发射线性调频信号的调频率, σ 为点目标后向散射特性, $W_a(t)$ 为方位向天线方向性函数, $a(\tau)$ 为发射脉冲包络, $R(t; r)$ 为点目标到雷达的斜距变化.

根据不同的距离模型可以选取不同的函数作为 $R(t; r)$, 距离模型的误差越小,推导出的补偿相位因子就越精确.经典的 Chirp Scaling 算法是根据本文第二部分介绍的第一种正侧视模型推导出来的,不适于高分辨、大距离徙动星载 SAR.本文采用与星载 SAR 斜距变化规律误差最小的式(3),推导改进的 Chirp Scaling 成像处理算法,相位补偿更精确,易于实现,适用于高分辨、大距离徙动星载 SAR 的精确成像.

在实际成像处理中,可以通过精确估计多普勒中心频率 f_d 和多普勒调频率 f_r 计算等效速度 V 和等效斜视角 φ

$$V = \sqrt{\lambda f_r / 2 + (\lambda f_d / 2)^2} \quad (7)$$

$$\varphi = \arccos(-\lambda f_d / 2V) \quad (8)$$

3.2 改进 Chirp Scaling 成像处理算法

改进 Chirp Scaling 算法的步骤与经典 Chirp Scaling 算法^[3]相同,但是所采用的补偿因子不同.推导中忽略复常数,不影响整个算法.

3.2.1 方位向傅里叶变换 通过方位向傅里叶变换,将信号转换到距离-多普勒频域,得到

$$sS_1(\tau, f; r) = \sigma \cdot W_a[-\frac{\lambda f \sin\varphi}{2V^2} \sqrt{1 - (\lambda f / 2V)^2}] \cdot a[\tau - \frac{2}{C} R_f(f; r)] \exp\{-j\pi b_r(f; r) [\tau - \frac{2}{C} R_f(f; r)]^2\}$$

$$-j\frac{4\pi r \sin\varphi}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda f / 2V)^2} + j\frac{2\pi f}{V} \cos\varphi \quad (9)$$

其中

$$R_f(f; r) = \frac{r \sin\varphi}{\sqrt{1 - (\lambda f / 2V)^2}} \quad (10)$$

$$b_r(f; r) = \frac{b}{1 + b r \sin\varphi \frac{2\lambda}{C^2} \frac{(\lambda f / 2V)^2}{[1 - (\lambda f / 2V)^2]^{3/2}}} \quad (11)$$

式(9)是整个推导的关键和核心.文献[4]直接对经典 Chirp Scaling 算法的弯曲因子 $C_s(f)$ 进行修正,距离徙动的频域表达式 $R_f(f; r)$ 不够精确.

3.2.2 在距离-多普勒域乘以 Chirp Scaling 因子 在距离-多普勒域,信号 $sS_1(\tau, f; r)$ 乘以 Chirp Scaling 因子 $\Phi_1(\tau, f; r_{ref})$.

$$\Phi_1(\tau, f; r_{ref}) = \exp\{-j\pi b_r(f; r_{ref}) C_s(f) [\tau - \tau_{ref}(f)]^2\} \quad (12)$$

其中

$$C_s(f) = \frac{\sin\varphi}{\sqrt{1 - (\lambda f / 2V)^2}} - 1 \quad (13)$$

$$\tau_{ref}(f) = (2/C) r_{ref} [1 + C_s(f)] \quad (14)$$

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

3.2.3 距离向傅里叶变换 经过 Chirp Scaling 因子相乘之后的信号进行距离向傅里叶变换,得到

$$SS(f_\tau, f) = \sigma \cdot W_a[-\frac{\lambda f \sin\varphi}{2V^2} \sqrt{1 - (\lambda f / 2V)^2}] \cdot a[\tau - \frac{f_\tau}{b_r(f; r_{ref}) (1 + C_s(f))}] \exp\{-j\frac{4\pi}{\lambda} r \sin\varphi \cdot \sqrt{1 - (\lambda f / 2V)^2} \exp\{j\frac{\pi f_\tau^2}{b_r(f; r_{ref}) [1 + C_s(f)]}\} \exp\{-j\frac{4\pi}{C} f_\tau [r + r_{ref} C_s(f)]\} \exp\{-j[\Theta_1(f) + \Theta_2(f, r)]\} \quad (15)$$

其中

$$\Theta_1(f) = \frac{4\pi}{C^2} b_r(f; r_{ref}) [1 + C_s(f)] C_s(f) (r - r_{ref})^2 \quad (16)$$

$$\Theta_2(f; r) = \frac{2\pi f}{V} \cos\varphi \quad (17)$$

式(15)中第一个相位项为方位调频函数,与距离频率 f_τ 无关.第二个相位项为 f_τ 的二次函数,是距离调频信号经过傅里叶变换的结果.第三个相位项为 f_τ 的线性函数,包含了每一个点目标的准确距离和距离徙动曲线.可以看出,经过 Chirp Scaling 因子相乘,所有距离具有近似相同的距离徙动曲线.第四个相位项为 Chirp Scaling 相位相乘中所未能补偿的残留相位,其中 Θ_2 为多普勒中心频率引起的相移.

3.2.4 在二维频域乘以距离补偿因子 $SS(f_\tau, f)$ 在二维频域通过乘以距离补偿因子完成距离徙动校正和距离聚焦处理.

$$\Phi_2(f_\tau, f; r_{ref}) = \exp\{-j\frac{\pi f_\tau^2}{b_r(f; r_{ref}) [1 + C_s(f)]}\} \exp\{j\frac{4\pi}{C} f_\tau r_{ref} C_s(f)\} \quad (18)$$

第一项完成二次距离压缩和距离向聚焦,第二项完成距离徙动校正.

3.2.5 距离向傅里叶逆变换 在距离补偿后,对信号作距离

向傅里叶逆变换,得到距离-多普勒域信号 $sS_2(\tau, f)$

$$sS_2(\tau, f) = \sigma \cdot W_a \left[-\frac{\lambda f \sin \Phi}{2V^2 \sqrt{1 - (\lambda f / 2V)^2}} \right] \cdot A(\tau - 2r/C) \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} r \sin \Phi \sqrt{1 - (\lambda f / 2V)^2} - j[\Theta_1(f) + \Theta_2(f, r)] \right\} \quad (19)$$

其中 $A(\cdot)$ 为距离压缩后的距离向包络。

3.2.6 在距离-多普勒域乘以方位补偿因子 在距离-多普勒域乘以方位补偿因子 $\Phi_3(\tau, f)$

$$\Phi_3(\tau, f) = \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} C \tau [1 - \sin \Phi \cdot \sqrt{1 - (\lambda f / 2V)^2}] + j[\Theta_1(f) + \Theta_2(f; r_{ref})] \right\} \quad (20)$$

因为距离徙动在第(4)步已完全校正,所以有

$$r = C\tau/2 \quad (21)$$

第一项完成方位处理,第二、三项完成残留相位补偿。方位补偿因子相乘后,成像处理中所有相位补偿已完成,得到了 SAR 图像的多普勒频谱。文献[4]中的相位补偿未包含 $\Theta_2(f; r_{ref})$ 会使图像位置发生偏移。

3.2.7 方位向傅里叶逆变换 方位向傅里叶逆变换后,得到 SAR 幅度图像为

$$|ss_2(\tau, t)| = |\sigma \cdot W_{ac} [t - (r - r_{ref}) \cos \Phi / V] \cdot A(\tau - 2r/C)| \quad (22)$$

$W_{ac}(\cdot)$ 为方位压缩后的方位向包络。由于 $\Theta_2(f; r_{ref})$ 的相位补偿,使整个图像的距离向与方位向垂直。

4 多普勒参数估计

改进的 Chirp Scaling 算法中, V 与 Φ 是根据 f_d 和 f_r 计算出来的。如果多普勒参数不准确,则影响相位补偿因子的精度,降低成像质量。下面首先分析多普勒参数误差对成像质量的影响,然后给出改进 Chirp Scaling 算法中多普勒参数的估计方法。

4.1 多普勒中心频率误差

多普勒中心频率的误差引起图像信噪比下降,模糊度变差,以及图像位置偏移。多普勒中心频率误差引起的图像信噪比、模糊度变差的定量分析与天线方向性图、脉冲重复频率有关。多普勒中心频率误差造成图像距离向位置偏移为

$$\Delta r = -\frac{\lambda}{2} \left(\frac{f_d}{f_r} \cdot \Delta f_d + \frac{1}{2f_r} \cdot \Delta f_r^2 \right) \quad (23)$$

方位向位置偏移为

$$\Delta x = V_g \cdot (\Delta f_d / f_r) \quad (24)$$

V_g 为波束指向在地面的移动速度。

4.2 多普勒调频率误差

多普勒调频率影响图像的聚焦。多普勒调频率的误差,在成像处理中表现为二次相位误差。多普勒调频率误差 Δf_r 在合成孔径时间引起的最大二次相位误差 Φ_{2m} 为

$$\Phi_{2m} = \pi \cdot \Delta f_r \cdot (T_s/2)^2 \quad (25)$$

T_s 为孔径时间。二次相位误差会使主瓣展宽,即分辨率降低,同时也会抬高旁瓣。用带有误差的多普勒调频率进行成像处理会使图像发生散焦。

从式(25)中可以看出如果孔径时间不同,相同的多普勒调频率误差带来的二次相位误差也不同,因此对分辨率的影响也不同。

4.3 结合改进 Chirp Scaling 算法的多普勒参数估计

从星历参数计算得到的多普勒参数不能满足精确成像的要求,可以利用回波数据本身,结合成像算法进行精确的多普勒参数估计。RD 算法中用杂波锁定估计多普勒中心频率,自聚焦估计多普勒调频率的基本思想^[5],也可以用于改进的 Chirp Scaling 算法^[6]。基本步骤如下:

(1) 利用星历数据估计多普勒中心频率和多普勒调频率的初值 f_{d0} 、 f_{r0} 。

(2) 计算 V 、 Φ ,完成改进 Chirp Scaling 算法步骤的(1)~(6),得到图像的多普勒频谱。

(3) 用多普勒频谱能量均衡的方法通过迭代估计多普勒中心频率 $f_d^{[5]}$ 。

(4) 用子孔径成像方法估计多普勒调频率 $f_r^{[5]}$ 。

(5) 将 f_d 、 f_r 用地计算 V 、 Φ ,重复步骤(2)~(5)直到精度满足要求为止。

5 计算机仿真结果

5.1 仿真参数

波长:0.25m;卫星平均高度:600km;雷达视角:20°、35°、45°;方位分辨率:5m;斜距分辨率:3m。

5.2 距离等效模型误差分析

通过计算得到一个孔径时间内卫星在理想轨道运行与地面目标间的斜距变化规律为 $R(t)$ 。分别计算公式(1)、(2)、(3)三种距离模型与 $R(t)$ 的均方根误差,计算结果见表 1。

表 1

视角	20°	35°	45°
式(1)与 $R(t)$ 均方根误差(m)	127.7832	250.2029	367.3457
式(2)与 $R(t)$ 均方根误差(m)	8.40×10^{-3}	1.65×10^{-2}	2.42×10^{-2}
式(3)与 $R(t)$ 均方根误差(m)	1.80×10^{-5}	8.19×10^{-5}	2.61×10^{-4}

5.3 成像处理结果

采用斜视距离等效模型误差小于通常采用的二次逼近距离模型,在以上三个视角情况下,均方根误差均小于 0.0003m,相位误差小于 1°,是比较精确的一种星载 SAR 距离等效模型。在此距离模型基础上推导的改进 Chirp Scaling 成像算法相位补偿更精确,适于大距离徙动高分辨星载 SAR 成像处理。

根据仿真参数,产生点目标的 SAR 回波信号,然后采用第三部分本文提出的改进 Chirp Scaling 算法进行成像处理,成像结果见图 2 至图 4,性能指标见表 2。

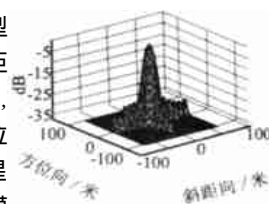


图 2 视角 20°

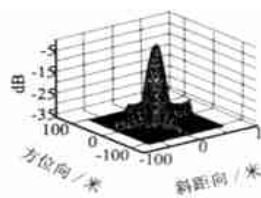


图 3 视角 35°

表 2 中 M 表示孔径时间内距离徙动跨越的距离门数, ρ 表示分辨率, ISLR 表示积分旁瓣比, PSLR 表示峰值旁瓣比, 下标 r 、 a 分别表示斜距向、方位向。考虑到天线特性类似对信号进行频域加权, 因此成像处理中方位向、距离向加权函数分别为 $F_1 = 0.10$ 、 $F_1 = 0.23$ 的简化泰勒加权。成像结果表明, 改进的 Chirp Scaling 算法的对高分辨率大距离徙动星载 SAR 可以精确成像。

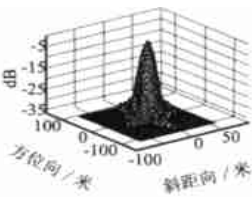


图 4 视角 45°

表 2

名称		斜距向			方位向		
视角	M	ρ_r (m)	ISLR _r (dB)	PSLR _r (dB)	ρ_a (m)	ISLR _a (dB)	PSLR _a (dB)
20°	197	2.82	-19.06	-26.96	4.17	-19.13	-27.33
35°	385	2.92	-18.87	-26.27	4.12	-19.50	-29.65
45°	566	2.92	-17.78	-23.97	4.31	-19.52	-29.38

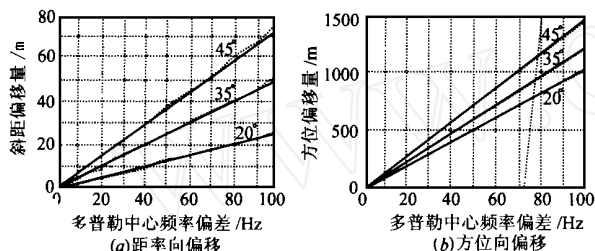


图 5 图像位置偏移与多普勒中心频率误差的关系

5.4 多普勒参数误差对成像结果的影响

5.4.1 多普勒中心频率误差 图 5 给出视角 20°、35°、45° 时, 图像偏移与多普勒中心频率误差的关系曲线。根据理论公式 (23)、(24) 计算多普勒中心频率误差引起的图像在距离向和方位向的偏移, 在图 5 中用实线表示。用带有不同误差的多普勒中心频率进行成像, 测得图像位置的偏移在图 5 中用虚线表示。

可以看出用成像得到的曲线与理论曲线相符, 这也从另一个角度验证了成像算法。如果给定图像偏移误差的允许值, 就可以从图 5 中得到对多普勒中心频率误差的要求。

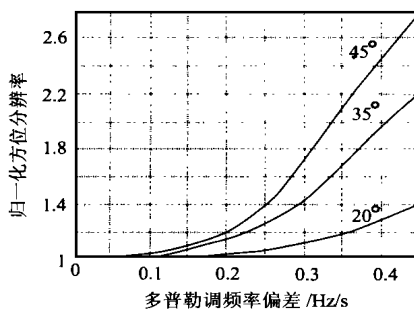


图 6 归一化分辨率与多普勒调频率误差的关系

5.4.2 多普勒调频率误差 在视角 20°、35°、45° 用带有不同误差的多普勒调频率对点目标进行成像处理, 分别测出点目标的方位分辨率, 求其与多普勒调频率无误差时的方位分辨率的比值 (即归一化分辨率)。图 6 中的曲线横坐标为多普勒调频率误差, 纵坐标为点目标归一化分辨率。

在这三个视角中, 45° 视角上孔径时间最长, 因此相同多普勒调频率误差引起的二次相位误差最大, 点目标分辨率受到的影响也最大。如果提出对分辨率损失的要求, 可以根据图 6 确定所允许的多普勒调频率误差。

6 结论

本文介绍了星载 SAR 的三种距离模型, 并通过计算机仿真, 计算了各模型的误差, 根据误差最小的斜视等效距离模型, 推导了改进的 Chirp Scaling 算法。对点目标的成像处理结果及性能指标证明该算法相位补偿精确, 对大距离徙动的高分辨率星载 SAR 能高质量成像。多普勒参数是 SAR 成像处理中的重要参数, 本文通过理论分析和计算机仿真讨论了多普勒参数误差对成像质量的影响。

参考文献

- [1] Bamler, R. . IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, July 1992, 30(4): 706 ~ 713
- [2] Raney, R. K. . Int. J. Remote Sensing, 1992, 13(5): 991 ~ 998
- [3] Raney, R. K. Runge, H. , Bamler, R. , Cumming, I. G. , Wong, F. H. . IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, July 1994, 32(4): 786 ~ 799
- [4] Moreira, A. , Huang, Y. . IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, July 1994, 32(5): 1029 ~ 1040
- [5] Li, F. K. , Curlander, J. C. , Wu, C. . IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, January 1984, GE-23(1): 47 ~ 55
- [6] 李春升, 黄岩, 王璇, 周荫清. 基于 Chirp Scaling 算法的星载 SAR 成像处理实现方法. 电子学报, 1996, 24(6)
- [7] 李春升, 李景文, 周荫清. 空载合成孔径雷达技术及其展望. 电子学报, 1995, 23(10)



黄 岩 博士. 主要从事信息获取与处理, 高分辨率雷达成像, 干涉 SAR 等方面的研究工作。