

基于非线性 FM 滤波的 SC-Chirp Scaling 算法

陈 杰, 黄 岩, 李春升, 周荫清
(北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

摘 要: 本文分析了 Chirp Scaling 算法推导过程中残留三次相位误差对成像质量的影响, 在此基础上提出了一种基于非线性 FM 滤波的高分辨率星载 SAR 成像处理 SG-Chirp Scaling 算法. 该算法采用斜视等效距离模型, 利用非线性 FM 滤波方法实现了 Chirp Scaling 算法的三次相位误差修正, 使高分辨率星载 SAR 成像质量获得明显改善. 计算机仿真结果验证了该算法的有效性.

关键词: 星载合成孔径雷达; Chirp Scaling 算法; 雷达成像; 非线性 FM 滤波

中图分类号: TN957 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2000) 12-0005-03

SC-Chirp Scaling Algorithm Based on Nonlinear FM Filter

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

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

Abstract: The effects of residual cubic phase error induced by Chirp Scaling algorithm on SAR image qualities are analyzed, and an SG Chirp Scaling imaging algorithm for high resolution spaceborne SAR based on nonlinear FM filter is proposed in this paper. Squint equivalent range model is used, and a nonlinear FM filter method is applied to achieve cubic phase error correction in the algorithm. Computer simulation results are presented, which illustrate the algorithm having the capability to acquire evident improvement of high resolution spaceborne SAR image qualities.

Key words: spaceborne synthetic aperture radar; chirp scaling algorithm; radar imaging; nonlinear FM filter

1 引言

经典 Chirp Scaling 算法^[1,2]的推导采用了机载正侧视模型, 能够较好地实现距离徙动校正和相位补偿, 并且不需要插值运算, 仅通过 FFT 和复乘即可完成成像处理^[1,3,4]. 而星载 SAR 的空间几何关系决定了其距离模型近似为斜视模型, 因此需要对经典 Chirp Scaling 算法进行修正, 才适用于星载 SAR 成像处理.

本文首先给出了星载 SAR 的距离模型和回波信号模型. 然后分析了 Chirp Scaling 算法推导过程中由近似处理而引入的残留三次相位误差及其对星载 SAR 成像质量的影响. 在文献 [7] 提出的改进 Chirp Scaling 算法基础上, 提出了一种基于斜视等效距离模型 (Squint Equivalent Range Model)、利用非线性 FM 滤波方法^[5]进行三次项误差修正 (Cubic Phase Error Correction) 的 SG Chirp Scaling 算法. 同文献 [7] 的算法相比, 该算法的运算量虽有所增加, 但它能够有效地补偿三次相位误差, 更适用于大视角、大距离徙动条件下实现高分辨率星载 SAR 整个观测带内信号的精确成像处理. 计算机仿真结果验证了算法的有效性.

2 信号模型

2.1 距离模型

经典 Chirp Scaling 算法采用正侧视距离模型, 文献 [6] 采用二次逼近距离模型, 本文提出的 SG Chirp Scaling 算法基于斜视等效距离模型. 同前两种距离模型相比, 斜视等效距离模型能够更好地拟合星载 SAR 空间几何关系, 因而更适合于大距离徙动高分辨率星载 SAR 成像处理^[7].

斜视等效距离模型的表达式为^[7]

$$R(t; r) = [r^2 + (Vt)^2 - 2rVt \cos \varphi]^{1/2} \quad (1)$$

式中, r 为波束中心照射目标时的斜距, V 为等效速度, φ 为等效斜视角 (锥角).

2.2 回波信号模型

星载 SAR 点目标的回波信号为^[2]

$$s(\tau, t; r) = \sigma \cdot W_a(t) \cdot a[\tau - (2/c)R(t; r)] \cdot \exp\left\{-j\pi b[\tau - (2/c)R(t; r)]^2\right\} \cdot \exp\left\{-j(4\pi/\lambda)R(t; r)\right\} \quad (2)$$

式中 c 为光速, b 为发射线性调频信号的调频率, σ 表示点目标后向散射特性, $W_a(t)$ 为方位天线方向性函数, $a(\tau)$ 为发射脉冲包络, $R(t; r)$ 表示点目标与雷达的斜距变化规律.

3 Chirp Scaling 算法相位误差分析

在 Chirp Scaling 算法推导过程中残留的三次相位误差包

括以下两部分:

(1) 忽略二维回波谱中 f_τ 的三次项所引入的三次相位误差, 点目标回波信号的二维频谱中忽略三次项引入的相位误差 $\Phi_{e1}(f_\tau, f, r)$ 为

$$\Phi_{e1}(f_\tau, f, r) = \exp\{j\psi_3(f; r)f_\tau^3\} \quad (3)$$

其中

$$\psi_3(f; r) = -\frac{2\pi\lambda^2 r \sin\varphi}{c^3 D^3(f)} \cdot \left(\frac{f\lambda}{2V}\right)^2, D(f) = \sqrt{1 - (\lambda f / (2V))^2} \quad (4)$$

(2) 采用 $b_r(f, r) \approx b_r(f, r_{ref})$ 的近似处理所引入的三次相位误差, Chirp Scaling 因子相乘时, 由忽略 $b_r(f; r)$ 与 $b_r(f; r_{ref})$ 的差异, 引入的相位误差 $\Phi_{e2}(\tau, f)$ 为

$$\begin{aligned} \Phi_{e2}(\tau, f) &= \exp\{j\pi [b_r(f; r_{ref}) - b_r(f; r)] \cdot [\tau - \frac{2}{c}R_f(f; r)]^2\} \\ &= \exp\{j\pi E(f) \cdot (r \cdot \frac{\sin\varphi}{\sin\varphi_{ref}} - r_{ref}) \cdot [\tau - \frac{2}{c}R_f(f; r)]^2\} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{其中} \quad E(f) &\approx b^2 k_1 \sin\varphi_{ref} / (1 + r_{ref} b k_1 \sin\varphi_{ref})^2 \quad (6) \\ k_1 &= 2\lambda (\lambda / 2V)^2 / c^2 [1 - (\lambda / 2V)^2]^{3/2} \quad (7) \end{aligned}$$

$\Phi_{e1}(f_\tau, f, r)$ 随斜距 r 和雷达视角的增加而增加, 在二维频域中直接用 $\exp\{-j\psi_3(f; r_{ref})f_\tau^3\}$ 即可进行补偿. $\Phi_{e2}(\tau, f)$ 可近似为 $[\tau - (2/c)R_f(f; r)]$ 的三次项误差, 并且随着目标斜距 r 与参考距离 r_{ref} 之间偏差以及雷达视角的增加而增大. 补偿 $\Phi_{e2}(\tau, f)$ 是进行三次项补偿的难点.

三次相位误差将引起成像处理后距离向点目标扩展函数发生非对称性畸变, 即右侧旁瓣抬高, 而主瓣向左侧展宽^[8], 导致点目标距离向峰值旁瓣比和积分旁瓣比指标变差, 在图像上强点目标附近出现重影, 影响图像的解译和判读.

4 SG Chirp Scaling 算法

在文献[7]提出的改进 Chirp Scaling 算法基础上, 本文提出了 SG Chirp Scaling 算法. 该算法采用非线性 FM 滤波, 能够较好地修正 Chirp Scaling 算法的三次相位误差, 从而有效地保证了高分辨率星载 SAR 在大视角、大距离徙动条件下整个观测带内信号的成像质量. SG Chirp Scaling 算法同文献[7]的算法相比, 在二维频域增加了一个非线性 FM 相位补偿因子, 并且对其他三个补偿因子进行相应的修正(算法流程如图 1 所示). SG Chirp Scaling 算法中各相位补偿因子如下:

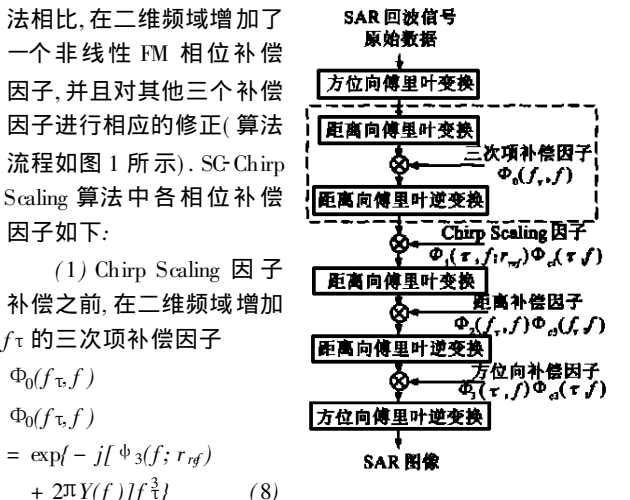


图 1 SG Chirp Scaling 算法流程图

$$Y(f) = \frac{cE(f)}{12} \cdot \frac{2C_s(f) + 1}{b_r^3(f; r_{ref}) C_s(f) [C_s(f) + 1]} \quad (9)$$

补偿因子 $\Phi_0(f_\tau, f)$ 是一个非线性 FM 相位补偿因子, 其中第一部分相位用于补偿 $\Phi_{e1}(f_\tau, f, r)$, 即忽略二维频域中 f_τ 的三次项引起的相位误差; 第二部分相位用于补偿 $\Phi_{e2}(\tau, f)$, 即采用 $b_r(f; r) \approx b_r(f; r_{ref})$ 近似处理引入的相位误差.

(2) 在距离-多普勒域进行 Chirp Scaling 因子补偿时, 对 Chirp Scaling 因子 $\Phi_1(\tau, f; r_{ref})$ 进行修正, 增加 $[\tau - (2/c)R_f(f; r_{ref})]^3$ 的三次项补偿 $\Phi_{e1}(\tau, f)$

$$\Phi_{e1}(\tau, f) = \exp\{j2\pi Q(f) [\tau - \tau_{ref}(f)]^3\} \quad (10)$$

$$\text{其中} \quad Q(f) = \frac{cE(f)}{12} \cdot \frac{C_s(f)}{C_s(f) + 1} \quad (11)$$

(3) 在二维频域进行距离补偿时, 修正距离补偿因子 $\Phi_2(f_\tau, f)$, 增加 f_τ 的三次项补偿因子 $\Phi_{e2}(f_\tau, f)$

$$\Phi_{e2}(f_\tau, f) = \exp\left\{j \frac{c\pi E(f)}{6 [b_r(f; r_{ref})]^3 \cdot C_s(f) \cdot [1 + C_s(f)]^2 f_\tau^3}\right\} \quad (12)$$

式中 $\Phi_{e2}(f_\tau, f)$ 同补偿因子 $\Phi_0(f_\tau, f)$ 一样, 也是二维频域上的非线性 FM 相位补偿因子.

(4) 在距离-多普勒域进行方位补偿时, 修正方位补偿因子 $\Phi_3(\tau, f)$, 增加相位补偿因子 $\Phi_{e3}(\tau, f)$ 项, 完成 $\left\{r(\sin\varphi/\sin\varphi_{ref}) - r_{ref}\right\}$ 的三次项补偿. 补偿因子 $\Phi_{e3}(\tau, f)$ 为

$$\begin{aligned} \Phi_{e3}(\tau, f) &= \exp\left\{-j(4\pi/3c^2) C_s(f) \cdot [C_s(f) + 1] \cdot E(f) \cdot \left\{r \cdot (\sin\varphi/\sin\varphi_{ref}) - r_{ref}\right\}^3\right\} \end{aligned} \quad (13)$$

5 计算机仿真结果

5.1 仿真参数

信号波长: 0.238m 空间分辨率: 5m × 5m(地面)
轨道高度: 600km 观测带宽度: 60km

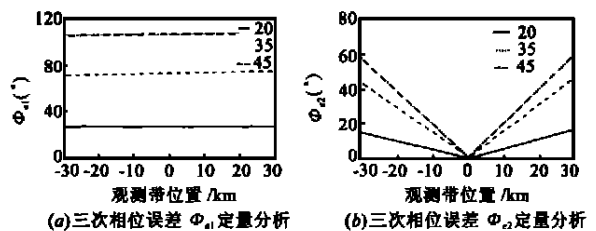
5.2 三次相位误差分析

选择地面成像区域在赤道附近(此时距离徙动数超过 560 个距离门), 雷达视角分别为 20°、35° 和 45°. 图 2 分别给出了两部分残留三次相位误差最大值 Φ_{e1} 和 Φ_{e2} 的定量分析结果. 图中将参考距离的位置选择在观测带的中心处.

分析可知, Φ_{e1} 随雷达天线视角的增加而增大, 但它在观测带内的变化不明显. Φ_{e2} 随雷达天线视角以及成像目标与参考距离之间偏离距离的增大而增大, 在测绘带边缘处 Φ_{e2} 达到最大.

5.3 SG Chirp Scaling 算法成像处理效果

图 2 显示当星载 SAR 视角为 45° 时, 观测带边缘处三次相位误差达到最大. 因此, 选择 45° 视角观测带边缘处的点目标



(a) 三次相位误差 Φ_{e1} 定量分析 (b) 三次相位误差 Φ_{e2} 定量分析

图 2 三次相位误差定量分析结果

进行回波信号仿真和成像处理, 并对比分析以下三种情况的成像结果:

- (1) 文献[7]提出的未作三次相位误差修正的 Chirp Scaling 算法;
- (2) 在文献[7]算法基础上, 仅补偿三次相位误差 Φ_{e1} 的 Chirp Scaling 算法;
- (3) 本文提出的完全补偿三次相位误差 Φ_{e1} 和 Φ_{e2} 的 SG Chirp Scaling 算法。

成像处理中, 采用 $F_1=0.23$ 的简化泰勒加权。图 3(a)~(c) 分别为这三种情况下, 成像处理后距离向点目标扩展函数, 横坐标为距离向采样点数, 单位为 bin(表示距离门)。

图 3(a) 清楚地显示三次相位误差引起距离向点目标扩展函数的非对称畸变, 即主瓣向左侧展宽, 右侧旁瓣抬高。图 (b) 表明通过补偿相位误差 Φ_{e1} , 距离向点目标扩展函数的对称性有所改善, 峰值旁瓣明显下降。图 (c) 表明采用 SG-Chirp Scaling 算法进行成像处理, 基本消除了三次相位误差所带来的影响。从而证明该算法能够在大气角、大距离徙动条件下, 有效地补偿三次相位误差, 实现高分辨率星载 SAR 整个观测带内信号的精确成像处理。

5.4 点目标性能指标测试结果

对上述三种情况下的点目标成像处理的仿真结果进行性能测试, 所测得的数据在表 1 中列出。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。

通过分析比较, 可知 SG Chirp Scaling 算法能够有效地补偿三次相位误差, 使距离向积分旁瓣比和峰值旁瓣比指标获得明显改善, 同时对方位向的成像质量也有一定的提高。

表 1 点目标成像质量评估结果

名称	斜距向			方位向			
	性能指标	ρ_r	$ISLR_r$	$PSLR_r$	ρ_a	$ISLR_a$	$PSLR_a$
组别		(m)	(dB)	(dB)	(m)	(dB)	(dB)
未进行三次修正	3.85	-15.79	-21.25	4.78	-18.57	-29.88	
仅修正相位误差 Φ_{e1}	3.85	-15.98	-27.73	4.67	-18.89	-31.02	
SG-Chirp Scaling 算法	3.85	-18.57	-28.97	4.63	-18.79	-31.26	

6 结论

在 Chirp Scaling 算法推导过程中, 为了简化推导采取了一些近似处理, 从而导致残留三次相位误差。这种三次相位误差随雷达视角的增加而增大, 随偏离参考斜距的距离增加而增大, 导致高分辨率星载 SAR 在大视角条件下的成像质量下降。仿真实验表明, 采用本文提出的 SG Chirp Scaling 算法, 能够有效地对三次相位误差进行补偿, 使距离向峰值旁瓣比和积分旁瓣比等指标得到明显的改善, 从而保证在整个观测带内获得高质量的高分辨率星载 SAR 图像。

参考文献:

- [1] R. Balzer. A comparison of range Doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms [J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, July 1992, 30(4): 706-713.
- [2] R. K. Raney. A exact wide field digital imaging algorithm [J]. Int. J. Remote Sensing, 1992, 13(5): 991-998.
- [3] R. K. Raney, H. Runge, R. Bamler, I. G. Cumming, F. H. Wong. Precision SAR processing using chirp scaling [J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, July 1994, 32(4): 786-799.
- [4] A. Moreira, Y. Huang. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation [J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, July 1994, 32(5): 1029-1040.
- [5] G. W. Davidson, I. G. Cumming. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, January 1996, 32(1): 121-133.
- [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 [J]. 电子学报, 1996, 24(6).
- [7] 黄岩, 李春升, 陈杰, 周荫清. 高分辨星载 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法 [J]. 电子学报, 2000, 28(3).
- [8] 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.

作者简介:



陈 杰 1973 年生, 1996 年获北京航空航天大学学士学位, 现为北京航空航天大学电子工程系博士研究生, 主要从事信息获取与处理、高分辨率雷达成像、星载 SAR 总体分析与系统仿真等方面的研究工作。

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 成像等方面的研究工作。