

一种改进的斜视 SAR 运动补偿波数域算法

谭鸽伟 邓云凯

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘 要: 准确的运动补偿是高分辨率机载 SAR 成像的关键。为了获得高质量的斜视 SAR 图像, 该文详细研究了用改进的波数域算法处理带有运动误差的斜视 SAR 数据, 提出了一种改进的斜视 SAR 运动补偿波数域算法, 并用该算法进行了点目标仿真和对原始数据成像, 结果表明, 该算法对处理带有运动误差的斜视 SAR 数据有很好的效果。

关键词: 合成孔径雷达; 波数域算法; 改进的波数域算法(EWD); 运动补偿(MOCO); 斜视 EWD

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0156-04

A Kind of Method of Extended Wavenumber Domain Algorithm for Squint SAR Motion Compensation

Tan Ge-wei Deng Yun-kai

(The Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Accurate motion compensation is a key issue for high-resolution airborne SAR imaging. In order to attain high-quality squint SAR images, it is detailedly discussed that Extended Wavenumber Domain (EWD) algorithm combines two-step motion compensation technique processing squint SAR data affected by motion error in the paper, a kind of method of squint EWD algorithm is put forward, simulation and real SAR data processing results with this method are given to prove the feasibility of such algorithm.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Wavenumber domain algorithm; Extended Wavenumber Domain (EWD) algorithm; MOTion COmpensation (MOCO); Squint EWD

1 引言

为了获得高质量的 SAR 图像, 对由天线相位中心运动造成的相位误差所做的运动补偿是必须的^[1]。由于现代 SAR 一直向着二维高分辨率方向发展, 因此 SAR 成像算法要求能处理具有大带宽和长合成孔径时间的信号^[2,3], 即使这些信号带有运动误差。

传统的波数域算法(CWD)的结构决定了精确的运动补偿技术不能应用到它的算法流程中。在两步运动补偿技术中, 运动补偿分为一次运动补偿(不依赖距离)和二次运动补偿(依赖距离), 前者可以在距离压缩前也可以在距离压缩后进行, 而后者必须在距离压缩和距离徙动校正完成, 且方位向还未聚焦时进行。传统的波数域算法在二维波数域通过 Stolt 变换完成距离徙动校正的同时也完成了方位聚焦, 因此它不能和距离依赖的运动补偿结合^[4]。

Chirp-Scaling(CS)算法避免了插值, 是一种高效的成像算法, 它能和两步运动补偿技术结合^[5], 广泛应用于机载 SAR 数据的处理中, 由于 CS 算法的二次距离压缩没有考虑空变性, 所以在处理高斜视角和大孔径的 SAR 数据中有很大的局限性。

文献[4]提出的改进的 Stolt 变换, 打开了波数域算法不能和两步运动补偿结合的桎梏, 本文在此基础上提出了一种改进的斜视 SAR 运动补偿波数域算法(斜视 EWD 算法), 通过两次改进的 Stolt 变换把距离弯曲校正和距离走动校正分开, 并结合两步运动补偿完成对斜视 SAR 数据的运动误差的校正, 为带有运动误差的斜视 SAR 数据处理提供了一种很有前景的方法, 文中给出了算法步骤, 仿真结果和真实 SAR 数据处理结果。

2 雷达回波模型和相位特性

测绘带中点目标的回波可简化表示为

$$rd(s - s_0, t, r_0) = \sigma(s_0, r_0) \text{rect} \left(\frac{t - 2r/c}{\tau} \right) \cdot \exp \{ -j\pi K_r (t - 2r/c)^2 \} \exp \left\{ -j \frac{4\pi r}{\lambda} \right\}$$
$$r = \sqrt{r_0^2 + v^2 (s - s_0)^2}$$

其中 $\sigma(s_0, r_0)$ 是目标地面反射系数, s 是载机的飞行时间, s_0 是地面目标对应的方位时间, $\text{rect}()$ 是雷达发射的线性调频信号的包络, τ 是时宽, K_r 是调频率, v 是载机的前向速度, r 是 APC 到目标的斜距, r_0 是目标到载机航迹的最近距离。

利用驻留相位原理, 将信号变换到二维频域, 得到信号的二维频谱为

$$RD(f_a, f_r, r_0) = C\sigma(s_0, r_0)\text{rect}\left\{\frac{f_r}{B_r}\right\}\exp\{-j\psi(f_a, f_r, r_0)\} \quad (1)$$

$$\psi(f_a, f_r, r_0) = -\pi\frac{f_r^2}{K_r} - \frac{4\pi r_0}{\lambda}\sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_0}\right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} \quad (2)$$

其中 f_a 是方位向频率, f_r 是距离向频率, $\psi(f_a, f_r, r_0)$ 是相位函数, C 是复常数。

为了与两步运动补偿技术结合, 相位函数还可分为不依赖距离和依赖距离两部分, 即

$$\psi(f_a, f_r, r_0) = \psi_0(f_a, f_r, r_m) + \psi_1(f_a, f_r, r_x) \quad (3)$$

$$\psi_1(f_a, f_r, r_x) = -\frac{4\pi r_x}{\lambda}\sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_0}\right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} \quad (4)$$

$$r_0 = r_m + r_x$$

r_m 是测绘带中心斜距, $r_x \in [-\Delta r/2, \Delta r/2]$, Δr 是测绘带的斜距宽度。

3 斜视模式下的运动误差模型

图 1 是存在航迹偏离的斜视 SAR 系统的几何关系, 图 2 是斜距所在的斜平面上的几何关系。

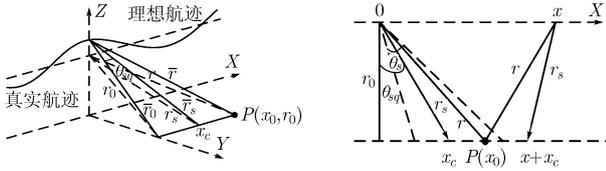


图 1 斜视模式下的 SAR 系统几何关系 图 2 斜平面上的几何关系

图 1 和图 2 中, θ_{sq} 是天线波束的斜视角, r_s 是理想航迹时 APC 的斜距, \bar{r}_s 是实际航迹下 APC 的斜距, x_c 是 APC 方位向坐标, x_0 是目标方位向坐标, θ_s 是天线波束角。

由余弦定律可得: 在理想航迹下, APC 与目标的斜距为

$$r(x, x_0, r_0) = \sqrt{r_s^2 + (x + x_c - x_0)^2 + 2r_s(x + x_c - x_0)\sin\theta_{sq}}$$

实际航迹时, APC 与目标的斜距为

$$\bar{r}(x, x_0, r_0) = \sqrt{\bar{r}_s^2 + (x + x_c - x_0)^2 + 2\bar{r}_s(x + x_c - x_0)\sin\theta_{sq}}$$

其中 $r_s = \frac{r_0}{\cos\theta_{sq}}$, $\bar{r}_s = \frac{\bar{r}_0}{\cos\theta_{sq}}$, $\bar{r}_0 = r_0 + \delta r_0$, $\bar{r}_s = r_s + \delta r_s$ 。

\bar{r}_0 随航迹变化, 但它只与平台位置有关, 与斜视角与目标位置无关, \bar{r}_s 由平台位置和斜视角决定。那么, 运动误差为 $\delta R(x, x_0, r_0) = \bar{r}(x, x_0, r_0) - r(x, x_0, r_0)$ 。

投影在波束中心 r_s 方向, 有 $\bar{r} \approx r + \frac{\partial(\bar{r})}{\partial(\delta r_s)}\bigg|_{\delta r_s=0} \delta r_s \approx$

$$r + \left[1 - \frac{(x + x_c - x_0)^2}{2r_s^2}\right]\delta r_s。$$

最后, 运动误差为 $\delta R \approx \delta r_s - \frac{(x + x_c - x_0)^2}{2r_s^2}\delta r_s$, 当

$(x + x_c - x_0) \ll r_s$ 时:

$$\delta R \approx \delta r_s = \frac{\delta r_0(x, r_0)}{\cos(\theta_{sq})} \quad (5)$$

由式(5)可知: 在一定条件下, 运动误差只与平台的位置、目标的最近斜距及斜视角有关, 而与目标方位向位置无关, 因此可以对同一距离上的所有目标进行统一的运动补偿。

运动误差可以分为依赖斜距和不依赖斜距两部分, $\delta R(x, r_0) = \delta R_I(x, r_m) + \delta R_{II}(x, r_x)$ 。

4 成像算法的相位处理

在二维频域, 信号相位分为式(3)和式(4), 相应的相位补偿函数由此构成

$$H_1(f_a, f_r, r_m) = \exp\{j\psi_0(f_a, f_r, r_m)\},$$

$$H_2(f_a, f_r, r_x) = \exp\{j\psi_1(f_a, f_r, r_x)\}$$

作下列变换:

$$\sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_0}\right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} \rightarrow 1 + \frac{f_1}{f_0}, \text{ 该变换称为 Stolt 变换。}$$

信号式(1)和 $H_1(f_a, f_r, r_m)$ 相乘, 实现了距离聚集, 固定斜距 r_m 的方位聚焦、RCM 校正和 SRC, 固定斜距的距离-方位向的高次耦合项也被补偿, 经过 Stolt 变换, 实现剩余的距离徙动校正的同时, 完成剩余的方位聚焦, 再经二维傅里叶反变换(IFT)后, 得到聚焦图像。这是传统的波数域算法。

为了和两步运动补偿技术结合, Stolt 变换作如下改变:

$$\sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_0}\right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} \rightarrow 1 + \frac{f_1}{f_0} \quad (6)$$

式(3)和式(4)也相应变化为

$$\psi_0(f_a, f_r, r_m) = -\pi\frac{f_r^2}{K_r} - \frac{4\pi r_m}{\lambda}$$

$$\cdot \left[\sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_0}\right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} \right]$$

$$\psi_1(f_a, f_r, r_x) = -\frac{4\pi r_x}{\lambda}\sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_0}\right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} - \frac{4\pi r_m}{\lambda}\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2}$$

这样改进后, 信号式(1)和 $H_1(f_a, f_r, r_m)$ 相乘, 只实现了距离聚集, 固定斜距 r_m 的 RCM 校正和 SRC, 固定斜距的距离-方位向的高次耦合项也被补偿, 但方位向未聚焦, 再经过式(6)改进的 Stolt 变换, 完成剩余的距离徙动校正, 这样距离依赖的运动补偿就可以在方位聚焦之前进行。这就是改进的波数域算法^[4]。

在斜视模式下, 运动误差投影在天线波束中心方向上, 式(5)的最小近似误差方向是距离走动方向, 因此, 二次运动补偿应该在距离弯曲校正后, 距离走动校正前进行。相应的相位式(3)和式(4)进一步变化为

$$\psi_0(f_a, f_r, r_m) = -\pi\frac{f_r^2}{K_r} - \frac{4\pi r_m}{\lambda}$$

$$\cdot \left[\sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_0}\right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} - D(f_a - f_{DC})f_r \right]$$

$$\psi_1(f_a, f_r, r_x) = -\frac{4\pi r_x}{\lambda} \sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_0}\right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} - \frac{4\pi r_m}{\lambda} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} + D(f_a - f_{DC})f_r \right]$$

其中 $D = \frac{(\lambda/(2v)) \sin \theta_{sq}}{f_0 \cos^3 \theta_{sq}}$, f_{DC} 是多普勒中心, $D(f_a - f_{DC})f_r$ 是距离走动, 由距离徙动在频域的表达式推导出。

5 斜视 EWD 算法的处理流程和仿真结果

经过对相位变化的详细分析, 斜视 EWD 算法和两步运动补偿技术结合处理斜视 SAR 数据的流程如图 3 所示。

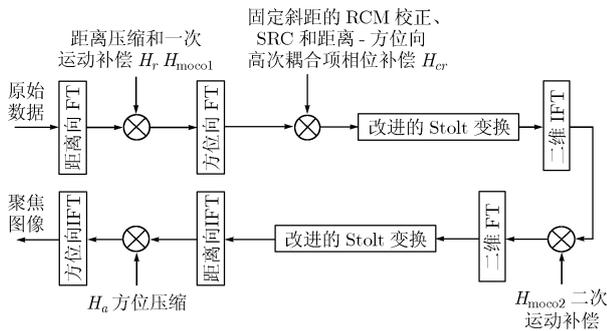


图 3 斜视 EWD 算法流程图

原始数据首先进行距离向傅里叶变换(FT), 在距离频域, 乘上 $H_r H_{moco1}$ 完成距离聚焦和一次运动补偿, 然后进行方位向 FT, 在二维频域乘上 H_{cr} 完成固定斜距的 RCM 校正、SRC 和距离-方位向高次耦合项的补偿, 并经过改进的 Stolt 变换校正剩余的距离弯曲, 再经二维傅里叶反变换把信号变换回到二维时域, 乘上 H_{moco2} 进行二次运动补偿, 运动补偿完成的数据又变换到二维频域经改进的 Stolt 变换校正剩余的距离走动, 之后乘上 H_a 完成方位聚焦, 变换到时域, 最终得到精确聚焦的 SAR 图像。上述流程图中的各个相位补偿函数如下:

$$H_r H_{moco1} = \exp \left\{ j\pi \frac{f_r^2}{K_r} \right\} \exp \left\{ j \left(\frac{4\pi}{\lambda} + \frac{4\pi}{c} f_r \right) \delta R_I \right\}$$

$$H_{cr} = \exp \left\{ j \frac{4\pi r_m}{\lambda} \left[\sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_0}\right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} - D(f_a - f_{DC})f_r \right] \right\}$$

$$H_{moco2} = \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} \delta R_{II} \right\}, H_a = \exp \left\{ j \frac{4\pi r_0}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} \right\}$$

6 仿真结果和真实 SAR 数据处理结果

仿真参数如表 1 所示。

当斜视角为 0° 时, 用 RD 算法处理后, 点目标方位向的冲激响应如图 4(a), 当斜视角为 2° 时, RD 算法处理结果如图 4(b)表示, 在斜视下, 方位向冲激响应的主瓣展宽且略有

表 1 仿真参数

发射信号带宽 $B_r = 60\text{MHz}$	合成孔径长度 $L_s = 250\text{m}$
发射信号时宽 $\tau = 1.667\mu\text{s}$	天线下视角 $\theta = 6^\circ$
发射信号波长 $\lambda = 0.03\text{m}$	脉冲重复频率 PRF = 250Hz
采样率 $F_s = 150\text{MHz}$	测绘带中心斜距 $r_0 = 41667\text{m}$
载机飞行速度 $v = 250\text{m/s}$	

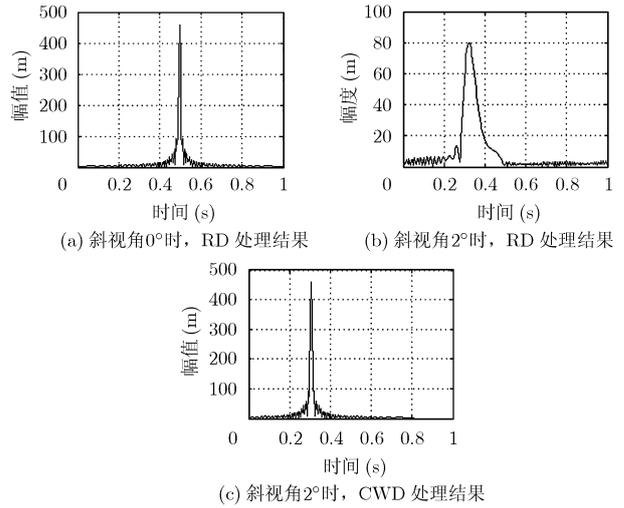


图 4

畸变, 分辨率下降, 用 CWD 算法处理的结果如图 4(c), 此时脉冲宽度与斜视角 0° 时一样, 分辨率几乎不受影响。由此可见波数域算法在处理斜视数据时有很大的优势, 随着斜视角的增加, 波数域算法处理斜视数据的优势会比 RD 算法、CS 算法越来越明显。

当运动误差 $\Delta r = 0.3t + 0.1\cos(0.5\pi t)$ 且斜视角为 2° 时, 图 5 是 CWD 处理和本文算法处理的结果比较, 运动误差使方位向冲激响应主瓣展宽, 分辨率下降, 由于 CWD 不能和运动补偿结合, 因此成像质量较差, 本文提出的斜视 EWD 算法能结合两步运动补偿, 消除了运动误差的影响, 主瓣聚焦质量明显提高。

当运动误差 $\Delta r = 0.1t^2$ 且斜视角为 2° 时, 图 6 给出了未加运动补偿的 RD 算法处理和本文算法处理的结果比较。RD 算法未加运动补偿, 所以也无法消除运动误差的影响, 另一方面斜视也使方位冲激响应主瓣展宽和畸变, 本文算法结合两步运动补偿不仅消除了运动误差的影响, 还消除了斜

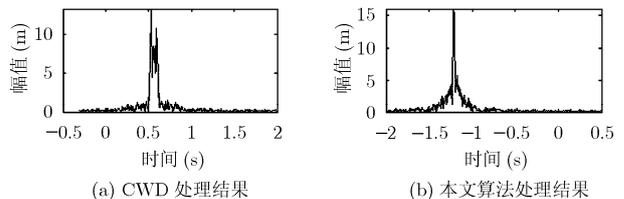


图 5 CWD 处理和本文算法处理结果的比较

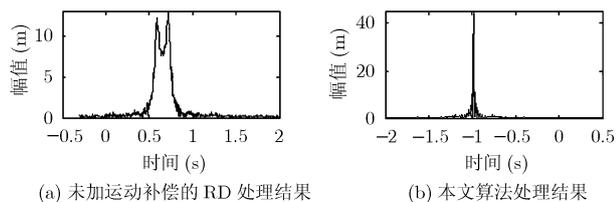


图 6 RD 处理和本文算法处理结果的比较

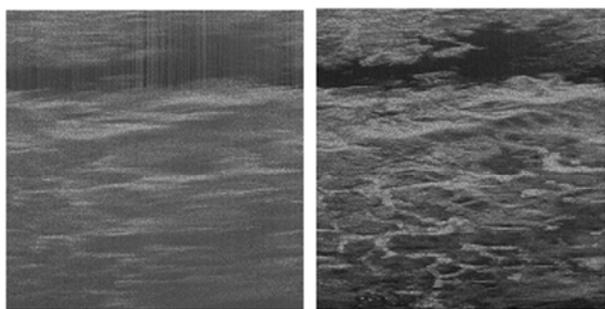
视引起的脉冲畸变,其处理后的聚焦效果明显改善。

用本文提出的斜视 EWD 算法对真实的 SAR 数据成像结果如下:

图 7(a)是用 CWD 算法处理带有运动误差的斜视 SAR 数据的成像结果,图像模糊,聚焦不好,存在明显的二次相位误差,传统的波数域算法不能和运动补偿技术结合,其处理带有运动误差的机载 SAR 数据受限,图 7(b)是用本文提出的斜视 EWD 算法的处理结果,由于加了运动补偿,图像聚焦明显改善,成像质量显著提高了。

7 结束语

波数域算法是一种优秀的成像算法,尤其在处理高斜视



(a)带有运动误差的SAR数据成像结果 (b)斜视EWD算法处理结果

图 7 斜视 EWD 算法处理带有运动误差的 SAR 数据结果

角和大孔径的 SAR 数据时,但它不能和运动补偿相结合,因此在处理带有运动误差的机载 SAR 数据时存在很大的局限性,通过改变 Stolt 变换,从而得到的改进的波数域算法能和两步运动补偿技术结合,为处理带有运动误差的斜视 SAR 数据提供了一种很有前景的方法,本文提出的斜视 EWD 算法可供借鉴。

参考文献

- [1] Fornaro G, Franceschetti G, and Perna S. Motion compensation errors: Effects on the accuracy of airborne SAR images. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(4): 1338-1352.
- [2] Macedo K A C and Scheiber R. Precise topography- and aperture-dependent motion compensation for airborne SAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 172-176.
- [3] Fornaro G, Franceschetti G, and Perna S. On center-beam approximation in SAR motion compensation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(2): 276-280.
- [4] Reigber A, Potsis A, Alivizatos E, Uzunoglu N, and Moreira A. Wavenumber domain SAR focusing with integrated motion compensation. *IGARSS '03. Proceedings*, 2003, 3: 1465-1467.
- [5] Moreira A and Huang Y. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32: 1029-1040.

谭鸽伟: 女, 1970 年生, 博士生, 研究方向为高分辨率机载 SAR 的运动补偿研究.

邓云凯: 男, 1962 年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事星载、机载 SAR 系统研究.