

## 一种改进的斜视 SAR 运动补偿波数域算法

谭 鹤 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<sup>[1]</sup>。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<sup>[2,3]</sup>, 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<sup>[4]</sup>。

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<sup>[5]</sup>, 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,  $\tau$  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,  $r_x \in [-\Delta r/2, \Delta r/2]$ ,  $\Delta r$  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。

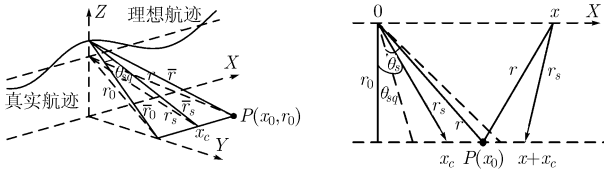


图 1 斜视模式下的 SAR 系统几何关系 图 2 斜平面上的几何关系

图 1 和图 2 中,  $\theta_{sq}$  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,  $\theta_s$  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<sup>[4]</sup>。

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。

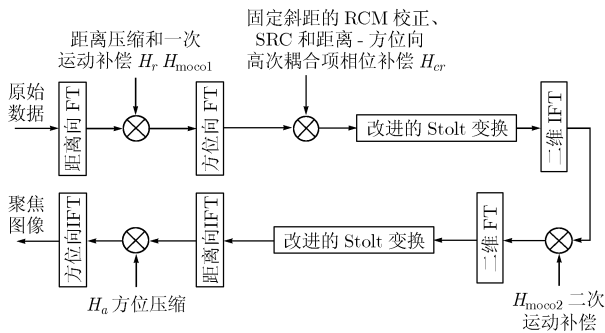


图 3 斜视 EWD 算法流程图

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  $0^\circ$  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  $2^\circ$  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 $v = 250\text{m/s}$	

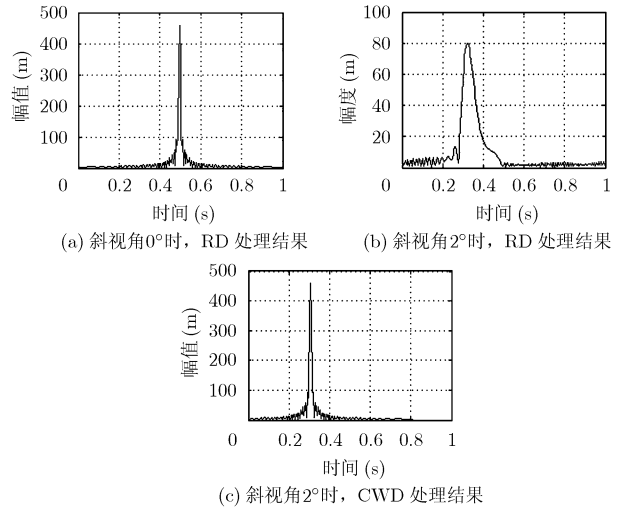


图 4

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  $0^\circ$  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  $2^\circ$  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  $2^\circ$  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

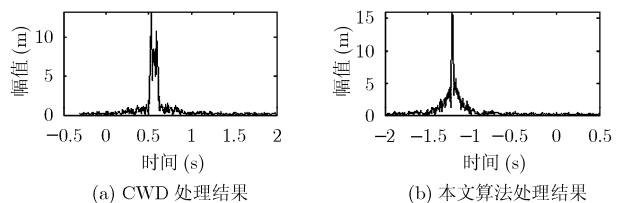


图 5 CWD 处理和本文算法处理结果的比较

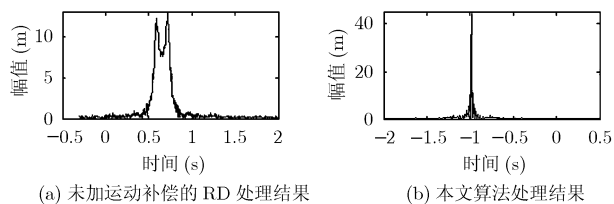


图 6 RD 处理和本文算法处理结果的比较

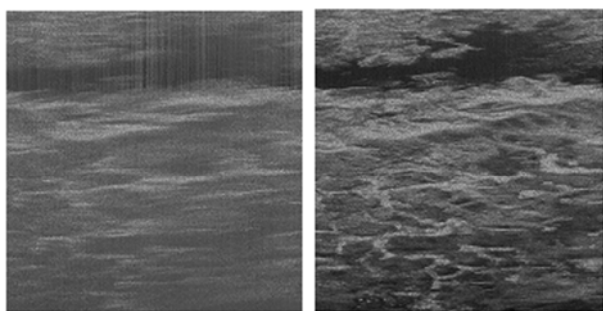
视引起的脉冲畸变,其处理后的聚焦效果明显改善。

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.