

机载 SAR 的运动误差的二维空变性及其补偿

谭鸽伟 邓云凯

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: 精确的运动补偿是高分辨率机载 SAR 成像的关键, 尤其对于机载小平台和大扰动情况下的成像具有重要意义。为了获得高质量的 SAR 图像, 该文结合波数域算法, 考虑运动误差的二维空变性, 提出了具体的运动补偿算法, 并基于实测数据得到了成像结果。结果显示, 该文提出的算法对运动误差有较好的补偿效果。

关键词: 机载 SAR; 运动误差; 运动误差的二维空变性; 运动补偿

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)02-0366-04

The Two-Dimensional Spatial-Variant Properties of Airborne SAR Motion Error and Its Compensation

Tan Ge-wei Deng Yun-kai

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

Abstract: The precise motion compensation is a crucial issue for high-resolution airborne SAR imaging, which is especially important for SAR imaging under airborne small platform or severe disturbance. In order to obtain high-quality SAR images, combining wavenumber domain algorithm and considering the two-dimensional spatial-variant properties of motion error, practical motion compensation algorithms are put forward in this paper. Simulation and SAR imaging results based on practical measuring data with these algorithms are given to prove the feasibility of this method.

Key words: Airborne SAR; Motion error; Two-dimensional spatial-variant properties of motion error; Motion compensation

1 引言

合成孔径雷达是能全天时、全天候工作的二维高分辨率微波成像系统, 它以脉冲压缩技术获得距离向的高分辨率, 以合成孔径原理实现方位向的高分辨。SAR 信号处理是回波信号与二维空变参考函数的相关过程, 各种成像算法都是以雷达载体的理想运动为前提。

机载 SAR 受大气湍流的影响偏离理想的航迹引起天线相位中心(APC)的运动误差, 该运动误差将导致雷达回波信号的幅度调制和相位调制, 降低了 SAR 图像质量, 可通过装载在雷达载机上的惯性导航系统(INS)、惯性测量单元(IMU)和 GPS 精确测量 APC 的运动参数或者直接从雷达回波数据中提取运动参数实现运动误差补偿^[1,2]。最早的运动补偿方案只考虑了空不变的运动误差, 但随着机载 SAR 分辨率的提高, 运动误差在距离向的空变性对 SAR 成像影响显著增加, 两步运动补偿技术和各种成像算法结合起来有效地补偿了距离向的运动误差, 实现了机载 SAR 的高分辨率^[3,4]。但随着方位向宽波束应用的发展, 运动误差方位向的空变性对 SAR 成像的影响已不能忽略^[5], 这给运动补偿技术提出了新的难题。

本文详细讨论了运动误差的二维空变性及其相应的补偿算法, 并用仿真和真实 SAR 数据处理结果证实了所提方案的可行性。

2 运动误差模型及其二维空变性

图 1 是正侧视模式下存在航迹偏离的 SAR 系统的几何模型, 从图中可得到如下的表达式:

$$\left. \begin{aligned} R_0(x' - x, r) &= \sqrt{r^2 + (x' - x)^2} \\ R(x' - x, x', r) &= \sqrt{(r + \Delta r)^2 + (x' - x)^2} \\ R(x' - x, x', r) &= R_0(x' - x, r) + \Delta R(x' - x, x', r) \\ \Delta R(x' - x, x', r) &= \frac{\partial R}{\partial(\Delta r)} \Big|_{\Delta r=0} \Delta r = \frac{r}{R_0} \Delta r(x', r) \\ &\approx \Delta r - \frac{(x' - x)^2}{2r^2} \Delta r \end{aligned} \right\} (1)$$

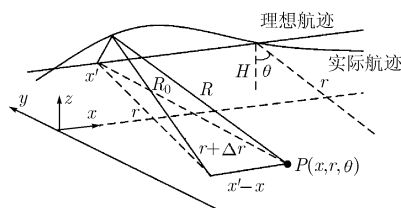


图 1 存在航迹偏离的 SAR 系统的几何关系

若式(1)第 2 项产生的最大相位误差远小于 1 rad 时, 即

$$\frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{L_s/2}{2r^2} \right) |\Delta r| \ll 1 \Rightarrow |\Delta r| \ll \frac{2\lambda r^2}{\pi L_s^2} = \frac{8\rho_a^2}{\pi\lambda} \quad (2)$$

此项运动误差可以忽略^[1], 即

$$\Delta R(x' - x, x', r) \approx \Delta r(x', r) \quad (3)$$

此时, 运动误差与目标方位向的位置无关, 同一距离不同方位向的所有目标可以统一进行运动补偿。

当式(2)不能满足时, 运动误差与目标方位位置有关, 因此必须考虑运动误差方位向的空变性。

运动误差在距离向可分为不依赖斜距和依赖于斜距两部分, 分别称为: 距离空不变运动误差 Δr_0 和距离空变运动误差 Δr_v , 如图 2, $\Delta r(x', r) = \Delta r_0(x', r_0) + \Delta r_v(x', r)$, 其中 x' 是载机的飞行位置, r 是目标到雷达航迹的最近斜距, r_0 是测绘带中心斜距。同理, 距离空变运动误差引起的最大相位误差远远小于 1 rad 时, 运动误差距离向的空变性也可以忽略。

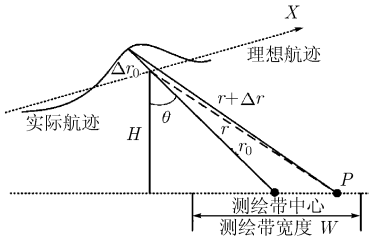


图 2 距离向空变与空不变运动误差关系

3 带有运动误差的信号模型及方位向窄波束运动误差的补偿

当方位向宽波束未广泛应用时, 距离向空变运动误差是限制机载 SAR 分辨率的一个主要因素, 为了提高分辨率, 不仅要对场景中心斜距对应的运动误差进行补偿, 还要对斜距依赖的运动误差进行补偿, 这就是两步运动补偿技术, 各种成像算法和两步运动补偿技术的结合极大地提高了机载 SAR 的分辨率。

若雷达发射线性调频信号, 带有运动误差的点目标回波模型可简化为

$$sd(x', t, r) = \sigma(x, r) \text{rect} \left[\frac{t - 2R/c}{\tau} \right] \cdot \exp \left\{ -j\pi k \left(t - \frac{2R}{c} \right)^2 \right\} \text{rect} \left(\frac{x'/v}{T_s} \right) \exp \left\{ -j \frac{4\pi R}{\lambda} \right\}$$

其中 $\sigma(x, r)$ 是目标地面反射系数, c 为光速, τ 是线性调频信号时宽, k 是调频率, x' 是载机飞行位置, v 是载机的前向速度, T_s 是合成孔径时间。当条件式(2)满足时, 运动误差方位向的空变性可忽略, 即 $R = R_0 + \Delta R \approx R_0 + \Delta r = R_0 + \Delta r_0(x', r_0) + \Delta r_v(x', r)$ 。

利用驻留相位原理, 信号沿距离向作傅里叶变换得到

$$sD(f_r, x', r) = C \text{rect} \left[\frac{f_r}{B_r} \right] \text{rect} \left[\frac{x'/v}{T_s} \right] \exp \left\{ j\pi \frac{f_r^2}{k} \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi R_0}{c} f_r \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi R_0}{\lambda} \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi [\Delta r_0(x', r_0) + \Delta r_v(x', r)]}{c} f_r \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi [\Delta r_0(x', r_0) + \Delta r_v(x', r)]}{\lambda} \right\} \quad (4)$$

距离向运动误差引起回波包络延迟误差(第四项指数项)和方位向相位误差(第五项指数项), 空不变运动误差 Δr_0 与斜距无关, 对它的补偿称为一次运动补偿, 可在距离压缩前也可在距离压缩后进行; 距离向空变运动误差 Δr_v 跟斜距有关, 所以对 Δr_v 的补偿必须在距离压缩、RCM 校正完成和方位聚焦前进行, 称为二次运动补偿。

把波数域算法中的 Stolt 变换作如下改变^[4]:

$$\sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_0} \right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v} \right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v} \right)^2} \rightarrow 1 + \frac{f_1}{f_0} \quad (5)$$

其中 f_1 是变换后距离向新的频率。

波数域算法就可以和两步运动补偿技术结合, 其处理流程如图 3。

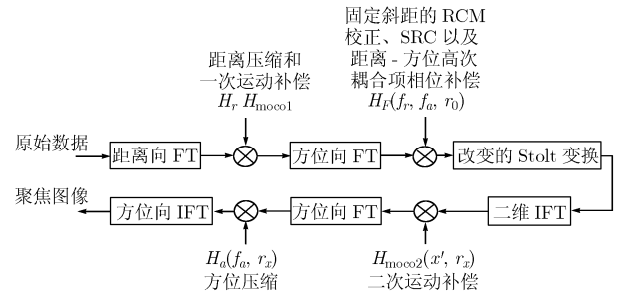


图 3 波数域算法和两步运动补偿技术结合的处理流程图

原始数据经过距离向傅里叶变换, 信号形式为式(4), 在距离频域乘上 $H_r H_{moco1} = \exp \left\{ -j\pi \frac{f_r^2}{k} \right\} \exp \left\{ j \left(\frac{4\pi \Delta r_0(x', r_0)}{c} f_r + \frac{4\pi \Delta r_0(x', r_0)}{\lambda} \right) \right\}$ 完成距离压缩和一次运动补偿, 对处理后的

数据再进行方位向 FT 后, 信号进入二维频域, 信号形式为

$$SD(f_r, f_a, r) = C \text{rect} \left(\frac{f_r}{B_r} \right) \text{rect} \left(\frac{f_a}{B_a} \right) \exp \left\{ -j \frac{4\pi r}{\lambda} \left[\left(1 + \frac{f_r}{f_0} \right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}, \text{ 在二维频域乘上 } H_F(f_r, f_a, r_0) = \exp \left\{ j \frac{4\pi r_0}{\lambda} \cdot \left[\sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_0} \right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v} \right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v} \right)^2} \right] \right\} \text{ 完成固定斜距 } r_0 \text{ 的}$$

RCM 校正, SRC 以及距离-方位高次耦合项相位补偿, 再经过改变的 Stolt 变换式(5)完成剩余的 RCM 校正, 经二维 IFT, 将信号又变回到二维时域乘上 $H_{moco2}(x', r) =$

$\exp\left\{j\frac{4\pi\Delta r_v(x',r)}{\lambda}\right\}$ 完成二次运动补偿, 最后在距离-多普勒

域进行方位压缩, $H_a = \exp\left\{j\frac{4\pi r}{\lambda}\sqrt{\left(1+\frac{f_r}{f_0}\right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2}\right\}$, 方

位向傅里叶反变换后得到聚焦的 SAR 图像。

4 方位向宽波束运动误差的补偿^[6]

距离向空不变运动误差和空变运动误差补偿完成后, 剩余运动误差为

$$\Delta R_v(x' - x, x', r) = \Delta R(x' - x, x', r) - \Delta r(x', r)$$

该运动误差与方位位置有关, 低频条件下, 方位频率和方位位置一一对应, 方位位置和斜视角一一对应, 因此可将数据在方位向分为多个等长的子孔径 ΔL_i , 在每个子孔径内, 认为运动误差近似相同, 即各个子孔径的运动误差和斜视角 θ_i 一一对应。由图 4 有^[6]

$$\begin{aligned} \Delta R_v(x' - x, x', r) &= \frac{\Delta r(x', r)}{\cos(\theta_i)} - \Delta r(x', r) \\ &= \Delta r(x', r) \left(\frac{1 - \cos \theta_i}{\cos \theta_i} \right) \end{aligned}$$

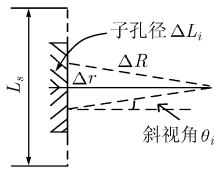


图 4 方位向空变运动误差和斜视角关系

剩余运动误差产生的相位误差的补偿函数为

$$\begin{aligned} H_{amoco} &= \exp\left\{j\frac{4\pi\Delta R_v}{\lambda}\right\} = \exp\left\{j\frac{4\pi\Delta r_0(x', r_0)}{\lambda} \left(\frac{1 - \cos \theta_i}{\cos \theta_i}\right)\right\} \\ &\cdot \exp\left\{j\frac{4\pi\Delta r_v(x', r)}{\lambda} \left(\frac{1 - \cos \theta_i}{\cos \theta_i}\right)\right\} \\ &= H_{amoco1}(i, r_0) H_{amoco2}(i, r) \end{aligned} \quad (6)$$

当斜视角不是很大且满足 $(4\pi/\lambda) |\Delta r_v(x', r)| \ll 1$ 时, 式(6)第 2 项可以忽略, 这时方位向宽波束运动补偿只需和距离空不变运动误差补偿结合, 处理流程如图 5。

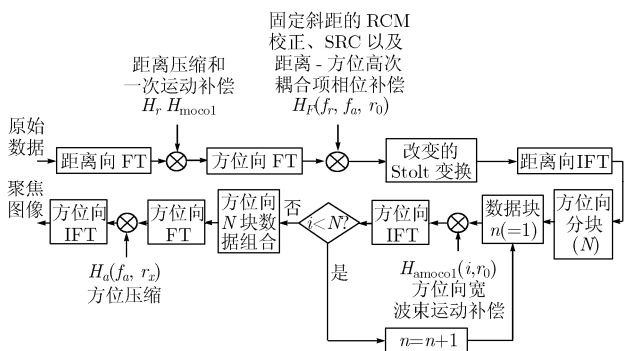


图 5 距离向空变运动误差忽略时的宽波束运动补偿算法流程图

当条件 $(4\pi/\lambda) |\Delta r_v(x', r)| \ll 1$ 不满足时, 距离向的空变运动误差不能忽略, 此时波数域算法结合运动补偿的处理流程如图 6。

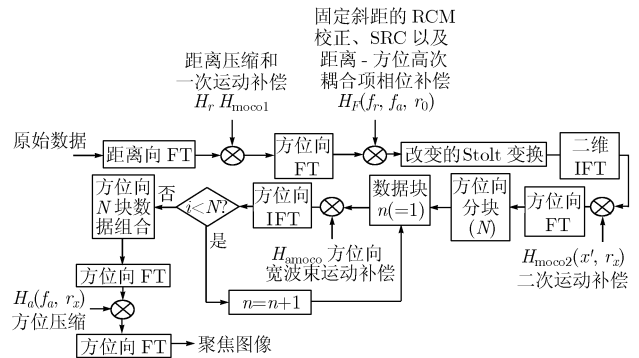


图 6 距离向空变运动误差不能忽略时的宽波束运动补偿算法流程图

5 仿真和基于实测数据的 SAR 成像结果

仿真参数如表 1。

表 1 仿真参数及 L-SAR 参数

参数名称	仿真参数	L-SAR 参数
发射信号带宽	120MHz	61.65 MHz
发射信号波长	0.03m	0.24m
采样率	300 MHz	66.67 MHz
合成孔径长度	250m	
发射信号时宽	1.667μs	33μs
载机飞行速度	120m/s	146.4m/s
脉冲重复频率	240Hz	650Hz
测绘带中心斜距	20833m	
测绘带近距		6400m

图 7 是本文算法对不同运动误差补偿后的效果, 并和无运动误差下的方位冲激响应作了比较, 它们的性能指标列在表 2 中。

下面以 5 个点目标(分别位于测绘带中心处, 方位向相距 250m 的 3 个点目标以及近距和远距相距中心也为 250m 的两个点目标)的仿真结果说明距离向空不变运动误差和空变

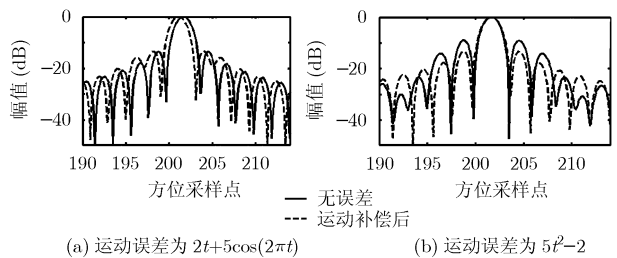


图 7 经过本文算法补偿后的方位冲激响应和无误差时方位冲激响应的比较

表 2 运动补偿后的方位冲激响应和
无误差时的方位冲激响应性能指标比较

	分辨率(m)	峰值旁瓣比 (dB)	积分旁瓣比 (dB)
无运动误差时	1.252	-13.25	-10.22
运动误差为 $2t + 5 \cos(2\pi t)$	1.255	-13.12	-10.11
运动误差为 $5t^2 - 2$	1.261	-12.76	-9.825

运动误差的影响及补偿效果。运动误差为 $\Delta r_0 = 4 \sin(0.4x')$, $\Delta r_v = 4 \sin(0.4x') \cdot (r - r_0)$ 。

图 8(a)是加了距离向空不变及空变运动误差的成像结果, 距离向和方位向都散焦, 分不清 5 个点目标, 图 8(b)只做了包络延迟校正, 距离向聚焦效果提高, 图 8(c)是只做一次运动补偿的结果, 测绘带中心 3 个目标完全聚焦, 但近距和远距目标由于受距离向空变运动误差的影响仍然散焦, 图 8(d)经过两步运动补偿, 图像完全聚焦。

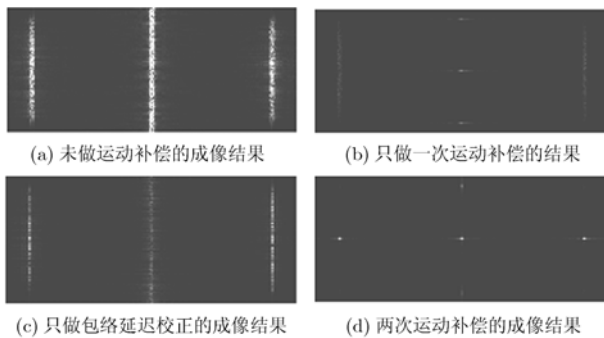


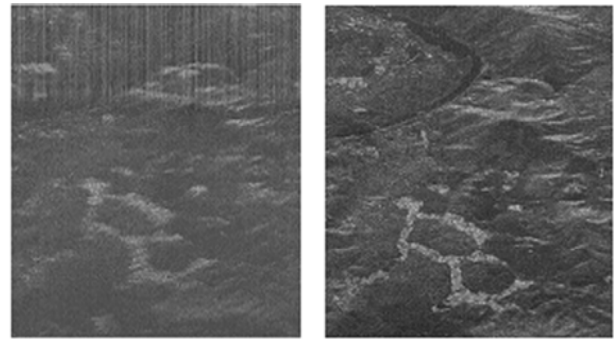
图 8 距离向空不变运动误差补偿和
空变运动误差补偿的成像结果比较

利用图 3 算法处理实测的 L-SAR 数据结果如图 9, L-SAR 参数如表 1。

图 9(a)是带有运动误差的真实 SAR 数据成像结果, 图像模糊, 存在明显的二次相位误差, 用波数域结合两步运动补偿算法处理后如图 9(b), 由于消除了运动误差, 图像聚焦性能显著提高。

6 结束语

本文研究了波数域算法和两步运动补偿技术结合对运动误差的补偿, 仿真和真实 SAR 数据处理结果证实了这种算法对距离向的运动误差有很好的补偿作用, 明显提高了机载 SAR 在方位向窄波束条件下的成像质量; 随着方位向宽波束应用的发展, 运动误差方位向的空变性对 SAR 成像的影响不可忽略, 这给运动补偿技术提出了新的难题, 本文利用斜视角和方位位置的关系提出了一种方位向宽波束运动



(a)带有运动误差的图像 (b)加两步运动补偿处理结果

图 9 未加运动补偿和加运动补偿
的成像结果比较(分辨率: $3\text{m} \times 3\text{m}$)

补偿方法, 为运动补偿技术的发展提供一定的借鉴。

参考文献

- [1] Fornaro G. Trajectory deviation in airborne SAR: Analysis and compensation. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(4): 997-1009.
- [2] 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.
- [3] 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(5): 1029-1040.
- [4] Reigber A, Potsis A, Alivizatos E, Uzunoglu N, and Moreira A. Wavenumber domain SAR focusing with integrated motion compensation. *IGARSS '03. Proceedings, Toulouse, France, 2003*, 3: 1465-1467.
- [5] 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.
- [6] Potsis A, Reigber A, and Mittermayer J. Sub-aperture algorithm for motion compensation improvement in wide-beam SAR data processing. *Electronics Letters*, 2001, 37(23): 1405-1407.

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。