

## 超高分辨率机载聚束 SAR 空变运动误差校正

韩冰<sup>①②</sup> 丁赤飏<sup>①</sup> 梁兴东<sup>①</sup> 李道京<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要:** 该文分析了机载聚束式合成孔径雷达(SAR)运动误差的空变性, 推导了空变的运动误差与聚束扫描角度、照射区域大小及天线下视角等参数之间的定量关系, 针对超高分辨率机载聚束 SAR 成像运动误差空变效应明显的问题, 提出一种基于 chirp 扰动的距离重采样新方法, 并结合图像方位分块处理技术构建了比较完善的运动补偿方案, 以弥补传统运动补偿方法在超高分辨率机载 SAR 成像中的不足。最后, 用仿真实验验证了方案的有效性。

**关键词:** 机载聚束 SAR; 超高分辨率; 空变运动误差; 距离重采样; 图像分块

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)05-1249-04

## Space-Variant Motion Compensation in Ultra-high Resolution Airborne Spotlight SAR

Han Bing<sup>①②</sup> Ding Chi-biao<sup>①</sup> Liang Xing-dong<sup>①</sup> Li Dao-jing<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The compensation for space-variant motion errors is one of the main issues in ultra-high resolution airborne SAR imaging. This paper first discusses the characteristics of space-variant motion errors of airborne spotlight SAR, and deduces the quantificational relationship between space-variant motion errors and SAR imaging parameters such as scan angle, size of illuminated scene and grazing angle. Then, it presents a comprehensive processing scheme for motion compensation of high resolution airborne spotlight SAR, which is based on the sub-patches processing and a new method of range resample using chirp disturbance. This scheme can make up for the deficiency of traditional process and deals well with severe space-variant motion errors in ultra-high resolution imaging. Finally, computer simulations prove the validity of the scheme.

**Key words:** Airborne spotlight SAR; Ultra-high resolution; Space-variant motion error; Range resample; Sub-patches

### 1 引言

机载合成孔径雷达(SAR)平台受大气湍流及导航误差等因素的影响, 不可避免地做偏离匀速直线的非理想运动, 这一方面造成回波信号的相位误差, 另一方面导致数据记录位置的漂移误差, 两者都随被照射目标空间位置的变化而变化, 即具有空变性。传统 SAR 成像中, 认为运动误差中空变部分的影响很小, 仅以参考位置为准, 完成空不变误差的补偿。随着分辨率的提高, 合成孔径长度增加, 距离徙动量增大, SAR 成像对运动误差也更敏感, 必须考虑运动误差空变性的影响。

相位误差的补偿方法中, 二阶运动补偿<sup>[1]</sup>仅解决沿距离向空变的问题; 沿方位向空变一般利用雷达到目标视线方向的角度与多普勒频率之间的对应关系(下面简称: 角频对应关

系), 通过划分子孔径来补偿<sup>[2-5]</sup>, 但这类方法往往受子孔径数据时带积的约束, 无法补偿高频运动误差。对数据记录位置漂移误差的校正, 理论上可以通过时域插值进行距离重采样来实现<sup>[6]</sup>, 但该方法运算量巨大, 同时会引入插值误差造成虚假目标, 实用价值不大。由于空变的位置漂移误差只有超过一个距离分辨单元时, 才会对 SAR 成像质量产生明显的影响<sup>[6]</sup>, 传统方法一般仅对信号进行整体时移来校正空不变的位置漂移误差<sup>[1, 6]</sup>。在超高分辨率(如 5cm)SAR 成像中, 运动误差的空变性显著。与低分辨率情况相比, 载机的低频运动转变为高频运动而引起高频相位误差; 同时, 空变的数据记录位置漂移误差常常超过一个距离分辨单元, 不做校正必然导致成像质量的下降。除此以外, 就空变运动误差对成像的影响仍然缺乏定量分析的理论工具。因此, 实现机载 SAR 的超高分辨率成像对运动补偿理论和方法都提出了新的挑战。

本文针对机载 SAR 工作在高分辨率聚束模式的情况, 推导了空变运动误差与载机偏离直线位置矢量及系统成像参数之间的显式关系, 实现了空变运动误差对成像影响的量化分析。另外, 提出了一种基于 chirp 扰动的距离重采样新方法, 解决了空变的数据记录位置漂移误差的校正问题, 并结合图像方位分块处理技术, 在传统方法的基础上构建出比较完善的运动补偿方案, 以满足超高分辨率机载聚束 SAR 成像对高精度运动补偿的需要。最后, 仿真验证了方案的有效性。

## 2 空变运动误差影响分析

图1给出存在运动误差情况下机载 SAR 成像几何关系。设地物所在平面为直角坐标系的  $X-Y$  平面, 载机理想航迹平行于  $x$  轴并位于  $X-Z$  平面内, 地面目标  $P$  到理想航迹的距离用  $r$  表示,  $(x, r)$  构成被照射目标的方位和斜距坐标;  $d$  为载机偏离直线(理想航迹)位置矢量的大小, 该矢量与水平面的夹角为  $\alpha$ , 这里假定沿航迹方向的非均匀采样误差已被校正;  $\delta r$  为载机在实际航迹上相对  $r$  的偏差;  $R$  和  $R_n$  分别是目标到载机的实际距离和理想距离;  $\beta$  为天线下视角; 天线相对于正侧视方向的聚束转角用  $\theta$  表示。

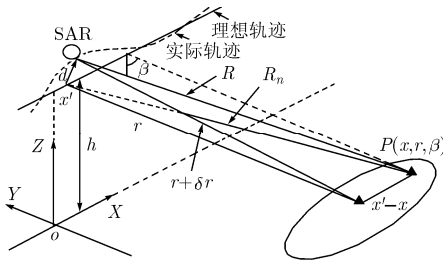


图1 机载 SAR 成像几何关系示意

$R$  和  $R_n$  之差为  $\delta R$ , 即到  $P$  点视线方向的运动误差,  $\delta R$  对目标方位位置  $x$  和距离位置  $r$  的依赖反映了运动误差的空变性, 空变性是 SAR 成像运动误差的固有性质。偏离直线位置矢量相同的情况下, 误差发生在合成孔径边缘时, 空变部分的影响最为严重, 聚束工作模式下, 相对场景中心位于测绘区域方位向边界和距离向边界的目标, 其回波中的空变运动误差分别可以近似为

$$\delta R_{az} \approx \delta r_c \cdot \left[ \frac{1}{\cos(\theta + \theta_w)} - \frac{1}{\cos(\theta)} \right] \quad (1)$$

$$\delta R_{ry} \approx \frac{-d \cdot \cos(\beta_c - \alpha)}{\cos(\theta + \theta_w)} \cdot \Delta\beta \quad (2)$$

其中下标  $c$  代表场景中心处的参数,  $\Delta\beta$  为测绘区域距离向边界相对场景中心下视角的变化,  $\delta R_{ry}$  近似为  $\Delta\beta$  的线性函数;  $\theta_w$  为测绘区域方位向边界相对于场景中心视线方向的变化。若  $\theta$  取天线最大转角, 式(1)及式(2)将分别给出可能造成的沿方位向和沿距离向最严重的空变运动误差, 由此可以对偏离直线运动引起的空变运动误差的影响做一个保守的

估计。一般情况下, 当回波数据位置漂移误差小于一个距离分辨单元, 或雷达到目标视线方向的运动误差小于  $\lambda/16$ , 即, 引入的相位误差小于  $\pi/4$  时, 可以不予补偿<sup>[6,7]</sup>。此外, 载机偏离直线运动误差的影响与误差矢量的大小  $d$  和方向  $\alpha$  均有关, 大小相同的情况下, 当矢量与正侧视天线视线方向垂直时, 所引起的沿距离向空变运动误差的影响最严重; 而当矢量与正侧视天线视线方向处在同一直线内时, 所引起的沿方位向空变运动误差的影响最严重。本文第4节仿真实验中将利用以上结论, 以 5cm 分辨率为例, 分析空变运动误差的影响, 并根据给定系统参数, 估计出可以忽略空变效应影响时的载机偏离直线运动误差幅度上限。分析结果表明, 超高分辨率 SAR 成像对偏离直线运动误差非常敏感, 空变运动误差的补偿问题几乎无法回避。

## 3 空变运动误差补偿

### 3.1 沿距离向空变运动误差的补偿

针对传统运动补偿方法存在未解决数据记录位置空变误差校正的不足, 本文提出了一种基于 chirp 扰动的距离重采样新方法, 该方法处理效率较高, 结合传统方法<sup>[1]</sup>可以校正绝大部分由 SAR 平台非理想运动造成的数据记录位置误差。

**3.1.1 数据记录位置误差的空变性** 由图1知, 与聚束场景中心处在相同方位位置上的目标, 其视线方向运动误差为

$$\delta R(r, x', x_c) = R(r, x', x_c) - R_n(r, x', x_c) = R - \sqrt{R^2 + dy^2 + dz^2 - 2dy \cdot \sqrt{R^2 - (x' - x_c)^2 - h^2} - 2dz \cdot h} \quad (3)$$

其中  $x'$  为载机方位位置,  $h$  为理想航迹高度;  $dy$  和  $dz$  是载机偏离直线位置矢量在地距和高程方向上的投影。可见, 任意方位采样点上, 方位位置相同的目标, 视线方向运动误差是沿距离向空变的, 且仅为斜距  $R$  的函数, 选定参考距离  $R_{ref}$ , 取  $R = R_{ref} + \Delta R$ , 进行泰勒展开并保留一次项有:

$$\delta R(R) = \delta R(R_{ref}) + \text{Coe}(R_{ref}, x' - x_c, h, dy, dz) \cdot \Delta R \quad (4)$$

其中

$$\text{Coe}(R_{ref}, x' - x_c, h, dy, dz) = 1 - \left[ \frac{dy}{\sqrt{R_{ref}^2 - (x' - x_c)^2 - h^2}} \right] R_{ref} \cdot \left[ \frac{dy}{\sqrt{R_{ref}^2 + dy^2 + dz^2 - 2dy \cdot \sqrt{R_{ref}^2 - (x' - x_c)^2 - h^2} - 2dz \cdot h}} \right]$$

为展开式中一次项系数。由图1几何关系, 也可将展开式  $n$

次分量的大小用  $\left| \frac{d \sin^{(n)}(\beta_c - \alpha) \Delta R^n}{n! h^n \sin^n \beta_c} \right|$  来近似,  $(\cdot)^{(n)}$  表示求  $n$

阶导数, 以  $d=1.5\text{m}$ ,  $\alpha=45^\circ$  为例, 按第4节仿真参数, 参考距离经过场景中心的情况下, 距离向边界处, 空变运动误差中的线性分量约为 0.1061m, 而二次及三次分量仅为  $9.65 \times 10^{-4}\text{m}$  和  $9.40 \times 10^{-5}\text{m}$ , 因此, 对视线方向运动误差中随  $\Delta R$  变化的量而言, 线性分量一般占绝大部分, 距离重采样中只校正线性分量就足够了。下面将对本文所提出的基于 chirp 扰动的校正方法做详细介绍。

**3.1.2 基于 chirp 扰动实现距离重采样** 对线性调频脉冲体制 SAR, 不考虑包络变化影响的情况下, 脉冲零频位于时间  $\tau_p$  的回波信号为

$$s_r(\tau) = \text{rect}\left(\frac{\tau - \tau_p}{T}\right) \exp\{-j\pi K_r(\tau - \tau_p)^2 + j\phi_p\} \quad (5)$$

其中  $T$  为脉冲宽度,  $K_r$  为发射信号调频率,  $\phi_p$  是携带目标信息的常数相位。用调频率为  $K_s$ , 零频位于  $\tau_{\text{ref}}$  的 chirp 信号对此信号进行相位扰动, 即

$$s_{rs}(\tau) = s_r(\tau) \exp\{-j\pi K_s(\tau - \tau_{\text{ref}})^2\} \\ = \text{rect}\left(\frac{\tau - \tau_p}{T}\right) \exp\{j\phi_{rs}(\tau) + j\phi_p\} \quad (6)$$

其中  $\phi_{rs}(\tau) = -\pi \left\{ (K_r + K_s) \left[ \tau - \tau_t + \frac{K_s}{K_r + K_s} (\tau_t - \tau_{\text{ref}}) \right]^2 + \frac{K_r K_s (\tau_t - \tau_{\text{ref}})^2}{K_r + K_s} \right\}$ 。若令  $\text{Coe} = \frac{K_s}{K_r + K_s}$ , 利用由此得到的  $K_s$  进行 chirp 相位扰动, 就可以实现对存在位置漂移误差数据的重采样(仅校正线性误差)。相位扰动后, 信号的调频率为  $K'_r = \frac{K_r}{1 - \text{Coe}}$ , 即扰动之后, 距离向脉冲的调频率随运动误差的变化而变化, 另外, 新零频位于  $\tau'_t = \tau_t - \text{Coe}(\tau_t - \tau_{\text{ref}})$ ; 相位  $\phi_{rs}(\tau) = -\pi \left\{ K'_r (\tau - \tau'_t)^2 + \frac{\text{Coe} K'_r}{(1 - \text{Coe})} (\tau'_t - \tau_{\text{ref}})^2 \right\}$ , 其第 2 项影响后续方位向处理, 由于与  $\tau'_t$  相关, 需要在脉冲压缩之后补偿相位  $\Delta\phi(\tau'_t) = \pi \frac{\text{Coe} K'_r}{(1 - \text{Coe})} (\tau'_t - \tau_{\text{ref}})^2$  加以消除。

**3.1.3 距离重采样新方法实现步骤及适用条件** 基于 chirp 扰动的距离重采样方法的具体实现步骤是: (1)线性调频脉冲回波信号非线性误差进行补偿, 即完成系统幅相误差校正; (2)选定场景中某一位置作为参考(一般取照射场景中心), 根据运动误差测量数据针对每一方位采样点计算 Coe 及  $K_s$ ; (3)生成扰动信号, 在回波的二维时域进行相位扰动, 使脉冲相位中心移至无运动误差的位置, 实现距离重采样; (4)完成脉冲压缩后, 对相位扰动引入的误差相位  $\Delta\phi(\tau'_t)$  进行校正, 消除扰动对方位向处理的影响。

基于 chirp 扰动的距离重采样方法, 仅适用于线性调频脉冲(chirp)体制的 SAR 系统, 且只在回波脉冲空变位置漂移误差中线性分量占主要成分的情况有效, 当运动误差非常大, 致使空变位置漂移误差展开式(4)中二次及以上项超过一个距离分辨单元时, 则该方法将不再适用。

**3.2 沿方位向空变运动误差的补偿**

SAR 通过聚束工作模式获取高的方位分辨率, 与此同时, 也要承受更长的合成孔径时间, 尤其当载体为小型无人驾驶或慢速飞行器时, 偏离匀速直线运动误差将非常严重, 运动误差中的高频分量丰富, 这会导致基于角频对应关系的传统空变相位误差补偿方法<sup>[2-5]</sup>失效。本文针对这一情况, 采用一种图像方位分块处理的空变相位误差时域补偿方法

(非去斜模式下)。该方法在不存在空不变运动误差的粗聚焦图像的方位向上划分子块, 利用方位压缩逆过程将图像恢复到信号域, 并针对每个子块在时域进行相位补偿。其中, 方位向分块的原则是, 每个子块图像内残留方位向空变运动误差应小于  $\lambda/16$ 。由此, 方位子块之间的错位可以不予考虑, 但如果对定位精度要求比较高, 可以采用在分块边缘进行插值的方式完成图像拼接。图像方位分块时域补偿方法不存在传统方法的局限性, 可以很好地适应飞行运动误差比较大, 尤其是高频运动误差比较大时的运动补偿需要, 并可根据载机飞行情况灵活确定方位分块数, 有效控制运算量。

**3.3 运动误差补偿方案流程**

将上述运动误差补偿方法嵌入 SAR 成像处理流程中, 即, 数据聚焦前, 在传统一阶运动补偿<sup>[1]</sup>处理中嵌入基于 chirp 扰动的距离重采样方法, 以聚束场景中心为参考, 完成沿距离向空变运动误差的补偿; 对数据进行二维聚焦处理后, 利用图像方位分块处理的空变相位误差时域补偿方法消除沿方位向空变的运动误差, 由此构成包括对空变的相位误差及位置漂移误差进行校正的、比较完善的运动补偿方案, 方案流程如图 2 所示。对宽带 SAR 系统而言, 还要考虑运动误差随信号频率的变化, 补偿方法参见文献[8], 本文不再赘述。下节仿真实验对本文补偿方案进行了验证。

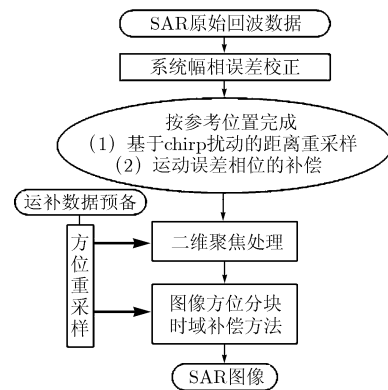


图 2 结合成像处理的运动补偿方案

**4 仿真实验**

仿真采用正侧视聚束 SAR, 工作波长  $\lambda$  为 0.0186m, 理想航迹高度  $h$  为 2km, 天线下视角  $\beta$  为  $59^\circ$ , 测绘区域 250m(方位)  $\times$  250m(地距), 天线聚束照射最大转角  $\theta_{\text{max}}$  为  $6.45^\circ$ , 方位向和距离向理论分辨率均为 0.04m,  $-30\text{dB}$  泰勒窗加权后, 分辨率扩展为 0.05m, 场景中心位于(0, 3328.6), 在测绘区域方位向边界和距离向边界布置了目标 1(125, 3328.6)和目标 2(0, 3203.6)。

由式(1)及式(2)得, 当载机偏离直线运动误差幅度  $d$  小于 1.23m, 方可以不校正数据记录位置漂移误差中空变的部分; 而当  $d$  小于 0.27m 时, 才可以不考虑运动误差沿方位向空变的问题。由此可见, 运动误差空变效应明显在超高分辨率 SAR 成像中是一个普遍问题。回波仿真中, 载机飞行存

在非理想运动, 约 1km 的合成孔径长度内, 偏离直线误差幅度  $d$  最大达到了 4.95m, 远超出了 1.23m 的范围。以场景中心为参考, 对回波数据进行空不变运动误差的补偿后, 目标 1 残留视线方向运动误差最大达到了 2.55mm, 大于  $\lambda/16$ ; 目标 2 残留视线方向运动误差最大值接近 8cm, 大于  $\rho_r/2$ 。因此, 需要同时对回波数据中空变的相位误差和位置漂移误差进行校正。合成孔径中心处,  $dy = -2.518\text{m}$ ,  $dz = 2.628\text{m}$ , 整个斜距幅宽内, 场景中心所在方位位置上的目标, 空变位置漂移误差如图 3 所示, 最大已超过一个距离分辨单元, 其中线性分量占绝大部分, 二次及以上分量则远小于一个距离分辨单元, 从而符合本文距离重采样方法的适用条件。

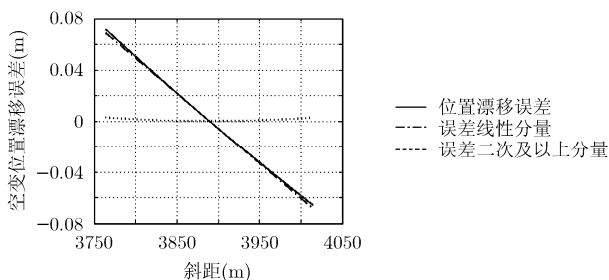


图 3 空变位置漂移误差分析

传统运动补偿方案一般仅包括对空不变运动误差及沿距离向空变相位误差的补偿<sup>[1]</sup>, 表 1 给出了传统运动补偿方案及本文方案对仿真数据的处理结果。采用本文方案进行运动补偿处理后, 成像质量得到了明显的改善, 各项指标均接近无运动误差的情况, 且不存在目标成像位置的偏差。

## 5 结束语

本文推导了机载聚束 SAR 回波数据空变运动误差与载机偏离直线位置矢量及系统成像参数之间的显式关系, 给出了对空变运动误差影响进行定量分析的方法; 研究了非理想运动导致的数据记录位置误差随目标斜距变化的规律, 得到

表 1 运动补偿处理结果比较(-30dB 泰勒窗加权)

指标名称及处理方法		目标 1	目标 2	
距离向	分辨率(m)	传统方案	0.0442	0.0508
		本文方案	0.0449	0.0442
	峰值旁瓣比(dB)	传统方案	-29.9459	-19.3887
		本文方案	-30.7205	-30.0214
	积分旁瓣比(dB)	传统方案	-22.7400	-19.3196
		本文方案	-23.6720	-22.7838
方位向	分辨率(m)	传统方案	0.0464	0.0659
		本文方案	0.0448	0.0444
	峰值旁瓣比(dB)	传统方案	-13.8716	-18.9106
		本文方案	-27.1575	-28.4452
	积分旁瓣比(dB)	传统方案	-15.2943	-18.5713
		本文方案	-25.4031	-24.2507

其中线性分量占绝大部分, 二次及以上项一般小于一个距离分辨单元的结论, 并由此提出了一种基于 chirp 扰动的距离重采样新方法, 用于校正线性调频脉冲体制 SAR 回波数据中空变的位置漂移误差; 针对超高分辨率机载聚束 SAR 成像中运动误差空变效应明显, 而传统运动补偿方案存在未考虑空变位置漂移误差校正以及对高频运动误差敏感等不足, 在传统方法的基础上, 结合基于 chirp 扰动的距离重采样方法及图像方位分块处理技术, 构建出比较完善的运动补偿方案。超高分辨率机载聚束 SAR 成像仿真结果表明, 该方案能有效地校正明显的空变相位误差及位置漂移误差, 较之传统运动补偿方案, 可大幅提高 SAR 成像质量。由于运动补偿方法的有效性是以 SAR 平台运动轨迹信息获取的准确性为基础的, 因此, 本文后续工作除了对运动补偿方案的进一步优化外, 还包括对平台运动参数高精度获取技术以及基于回波数据补偿方案的研究。

## 参考文献

- [1] Fornaro G. Trajectory deviations in airborne SAR: Analysis and compensation[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 997-1009.
- [2] Prats P, Reigber A, and Mallorqui J J. Topography-dependent motion compensation for repeat-pass interferometric SAR systems[J]. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 2005, 2(2): 206-210.
- [3] Scheiber R and Bothale V. Interferometric multi-look techniques for SAR data[C]. *IEEE IGARSS Proc*, Toronto, Canada, 2002, 1: 173-175.
- [4] Madsen S N. Motion compensation for ultra wide band SAR[C]. *IEEE IGARSS Proc.*, Sydney, Australia, 2001, 3: 1436-1438.
- [5] de Macedo, K A C, and Scheiber R. Precise topography-and aperture- dependent motion compensation for airborne SAR[J]. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 2005, 2(2): 172-176.
- [6] Gou Yong-mei, Chen Hao, and Hong Wen, *et al.* Resample in the first order motion compensation of realtime SAR processor[C]. *ICSP2000 Proc.*, Beijing, China, 2000, 3: 1830-1833.
- [7] Carrara W G, Goodman R S, and Majewski R M. *Spotlight SAR: Signal Processing Algorithms[M]*. Boston, Artech House, 1995, Chapter 5.
- [8] Reigber A, Alivizatos E, and Potsis A, *et al.* Extended wavenumber-domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation[J]. *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, 2006, 153(3): 301-310.

韩冰: 女, 1980年生, 博士生, 研究方向为超高分辨率合成孔径雷达成像、运动补偿及其相关信号处理技术。

丁赤飏: 男, 1969年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为先进合成孔径雷达系统和信号处理技术、数字信号处理、信息系统技术等。

梁兴东: 男, 1973年生, 研究员, 主要研究方向为雷达系统设计与雷达信号处理技术等。

李道京: 男, 1964年生, 研究员, 主要研究方向包括雷达系统和雷达信号处理。