

基于多通道联合自聚焦技术的机载三维 SAR 运动补偿

杨泽民* 孙光才 邢孟道 保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 机载 3 维 SAR 通过天线阵实现 3 维的分辨,这也导致在分析 3 维 SAR 系统的运动误差时,不但要考虑载机的平动误差带来的天线阵整体平移,更要考虑载机转动误差带来的阵元间相对位置变化,因此针对 3 维 SAR 的运动误差的分析与传统单通道 SAR 相比难度更大。该文从平动误差和转动误差导致的斜距变化出发,利用天线阵的线性几何构型,提出基于多通道联合自聚焦技术的运动补偿算法。该算法可同时得到平动和转动误差,从而使载机运动误差得到精确补偿。最后通过仿真实验验证了算法的有效性。

关键词: 3 维 SAR; 运动补偿; 多通道联合自聚焦

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)07-1581-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01365

Motion Compensation for Airborne 3-D SAR Based on Joint Multi-channel Auto-focusing Technology

Yang Ze-min Sun Guang-cai Xing Meng-dao Bao Zheng

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Airborne three-dimensional SAR uses an antenna array to resolve along height. Then, both the translation and the rotation errors of the plane should be considered. The reasons are that the translation error will result in defocusing along track and the rotation error will lead to phase distortion of signals from different channels. Therefore, the analysis of the motion error of 3-D SAR is much more difficult compared to that of traditional single-channel SAR. In this paper, based on joint multi-channel auto-focusing technology, a motion compensation algorithm is proposed, which can be utilized to estimate not only the translation error but also the rotation error with high accuracy. Hence the motion error would be precisely compensated. Finally, simulation results confirm the validity of the proposed algorithm.

Key words: 3-D SAR; Motion compensation; Joint multi-channel auto-focusing technology

1 引言

合成孔径雷达(SAR)具有全天候、全天时和远距离成像的特点,可以大大提高雷达的信息获取能力,特别是战场感知能力,对军用和民用均有重要的应用价值^[1]。

传统的合成孔径雷达利用宽带信号得到距离高分辨率,方位向(沿航向)通过合成阵列得到方位高分辨率,却无法对高度维进行分辨,其根本原因在于高度维没有基线,成像结果实际是 3 维场景在距离方位平面的投影^[2]。也就是说依靠单天线系统无法获得高度维的分辨能力^[3]。干涉合成孔径雷达(InSAR)可以利用垂直航向的两根天线,通过干涉相位,得到场景的高度信息^[4]。然而仅仅利用两块数据的 InSAR 系统无法解决多个不同高度的目标投

影到同一距离单元内的模糊问题^[5],因此不能形成高度维的分辨。

为得到高度维的分辨率,需要在高度维构建等效孔径,这可以采用单通道多天线 SAR 或者多通道单天线 SAR,前者往往硬件设计复杂并且代价昂贵,而后的成像质量受限于通道数量或者说孔径的大小^[6]。对于多通道单天线 SAR 成像质量受限的问题很多学者从不同角度提出了很多方法,比如:基于多基线干涉法^[7]、基于自适应波束形成技术法^[8]、基于特征值分解的线性反演技术法^[9]等。

总的来说,当前研究机载 3 维 SAR 成像的文章主要是针对成像算法进行研究,算法中均假设雷达平台做匀速直线运动。针对运动误差的分析较少。然而,载机在飞行过程中不可避免要受到气流的扰动,使其偏离理想航迹(平动),同时伴有俯仰、偏航、横滚这些姿态变化(转动)。对单天线来说,若天线放置在载机重心处或附近,载机的俯仰和偏航均对成像没有影响或影响很小,载机横滚的影响可

2011-12-21 收到, 2012-03-26 改回

国家自然科学基金重大项目(60890072)资助课题

*通信作者: 杨泽民 yyy629@126.com

以通过时时控制雷达波束指向或后期几何校正得以解决,运动补偿只需考虑平动误差即可^[10]。但是,对于机载3维SAR来说,不仅载机平动误差会对成像造成较大影响,转动误差因破坏天线阵阵元间相对位置,也会严重影响成像结果。这些差异使得对3维成像的运动误差的分析和补偿具有特殊的难度。

本文从机载3维SAR成像几何出发,分别分析了平动误差和转动误差的几何模型,从原理上给出载机平动误差和转动误差给点目标斜距带来的变化,进而分析其对多普勒调频率的影响,总结多普勒调频率随阵元变化的规律,根据规律设计联合多通道估计多普勒调频率方法,即得到系统平动误差和转动误差带来的相位误差,用得到的误差量对系统进行运动补偿可得到聚焦良好的图像。

2 机载3维SAR理想成像几何模型

本文讨论的机载3维SAR理想成像几何如图1所示。

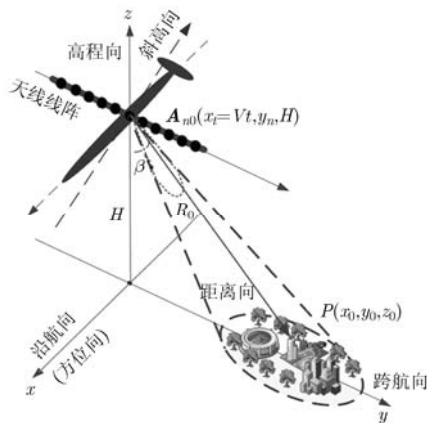


图1 机载3维SAR成像几何

当不存在运动误差时,根据等效相位中心原理,由图1可得到点目标 $P(x_0, y_0, z_0)$ 到第 n 个等效相位中心 $A_n(x_t = vt, y_n, H)$ 的斜距为

$$R(t) = \sqrt{(vt - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 + (H - z_0)^2} \quad (1)$$

其中 v 为载机飞行速度, t 为方位慢时间, y_n 为阵元位置, H 为载机飞行高度。则天线接收的基带回波信号可表示为

$$s(\hat{t}, t) = a_r \left(\hat{t} - \frac{2R(t)}{c} \right) a_a(t) a_n(y_n) \cdot \exp \left[j\pi\gamma \left(\hat{t} - \frac{2R(t)}{c} \right)^2 \right] \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t) \right) \quad (2)$$

其中 a_r 为距离窗函数, a_a 为方位窗函数, a_n 为阵元的加权函数, \hat{t} 为快时间, c 为光速, γ 为调频率。

传统的机载3维SAR成像算法根据驻相点原理

将式(2)先后变到距离向-方位向2维频域以及距离向-斜高向2维频域进行相应的徙动校正,脉冲压缩,即可实现距离向-方位向-斜高向3维分辨,再经几何形变校正即可得到沿航向-跨行向-高程向3维图像^[11]。

3 机载3维SAR运动误差几何模型

载机平台受气流扰动及自身震动不可避免带有运动误差,即使少量的运动误差也会对成像结果造成很大影响,因此要想得到聚焦良好的高分辨图像,必须进行运动补偿。传统的运动补偿算法只针对载机平动误差进行分析和补偿,忽略了载机姿态变化即转动误差对成像带来的影响,这对传统的单天线雷达系统是成立的。然而对于机载3维SAR这类天线阵系统,这种算法不再适用,需要针对转动误差讨论新的运动补偿算法。

载机运动误差对成像质量的影响,究其根本是其对斜距的影响,因此这里首先分析带运动误差的机载3维SAR成像点目标斜距表达式。图2和图3分别给出了带平动误差和转动误差的机载3维SAR成像几何模型。

如图2所示,场景中有一点目标 P , t 时刻雷达第 n 个通道的理想位置为 A_{n0} ,虚线箭头指向其真实位置 A_n ,则其平动误差为 $\Delta r = A_n - A_{n0} = [\Delta x_t, \Delta y_t, \Delta z_t]$ 。如图3所示,雷达平台发生转动,

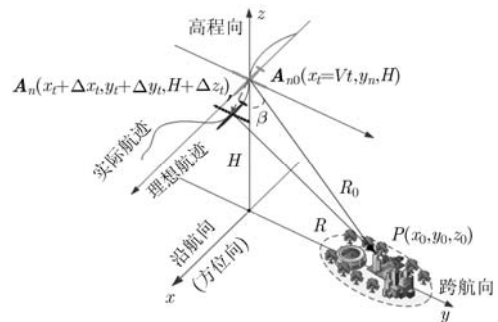


图2 带平动误差的机载3维SAR成像几何模型

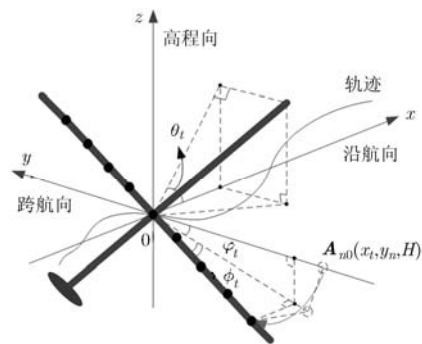


图3 机载3维SAR载机转动误差几何模型

俯仰角为 θ_t ，横滚角为 φ_t ，偏航角为 ϕ_t 。其中，俯仰角对天线相位中心的位置没有影响，由横滚角引

入的旋转矩阵为 $\mathbf{T}_\varphi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_t & -\sin \varphi_t \\ 0 & \sin \varphi_t & \cos \varphi_t \end{bmatrix}$ ，由偏航

角引入的旋转矩阵为 $\mathbf{T}_j = \begin{bmatrix} \cos \phi_t & -\sin \phi_t & 0 \\ \sin \phi_t & \cos \phi_t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ，则第

n 个天线相位中心(APC)的真实位置为

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_n &= [x_t, 0, H]^\top + \mathbf{T}_\varphi \mathbf{T}_j [0, y_n, 0]^\top + \Delta \mathbf{r}^\top \\ &= [x_t - y_n \sin \phi_t + \Delta x_t, y_n \cos \phi_t \cos \varphi_t \\ &\quad + \Delta y_t, H + y_n \cos \phi_t \sin \varphi_t + \Delta z_t]^\top \end{aligned} \quad (3)$$

这时，点目标 P 与第 n 个 APC 的真实位置 \mathbf{A}_n 之间的距离为

$$\begin{aligned} R_{\text{real}}(t) &= \left[(x_t - y_n \sin \phi_t + \Delta x_t - x_0)^2 \right. \\ &\quad + (y_n \cos \phi_t \cos \varphi_t + \Delta y_t - y_0)^2 \\ &\quad \left. + (H + y_n \cos \phi_t \sin \varphi_t + \Delta z_t - z_0)^2 \right]^{1/2} \\ &= \sqrt{R(t)^2 + R_e^2} \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} R_e &= \left[2(x_t + \Delta x_t - x_0)(-y_n \sin \phi_t) + \Delta x_t^2 \right. \\ &\quad + 2\Delta x_t(x_t - x_0) + 2(-\Delta y_t y_0 - \Delta z_t z_0) \\ &\quad + 2y_n(y_0(1 - \cos \phi_t \cos \varphi_t) - z_0 \cos \phi_t \sin \varphi_t \\ &\quad \left. + \Delta y_t \cos \phi_t \cos \varphi_t + \Delta z_t \cos \phi_t \sin \varphi_t) \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)即运动误差带来的斜距变化量，也就是需要补偿掉的运动误差量。

4 机载 3 维 SAR 基于回波数据运动补偿

运动补偿有两种途径，即基于惯导数据补偿和基于回波数据补偿。一般而言基于惯导数据的运动补偿方法对惯导系统(INS 和 GPS)的测量精度要求较高。然而由于高精度惯导系统价格昂贵，通常的惯导系统提供不了足够的测量精度和稳定性^[12]，这使得斜距补偿误差达不到 $\lambda/4$ 甚至更小级别。因此一般在运动误差较大时，我们常采用惯导数据进行粗补偿，而要想实现聚焦良好的高分辨成像，往往采用基于回波数据的运动补偿方法。下面讨论机载 3 维 SAR 基于回波数据运动补偿算法。

首先从点目标基带回波相位出发，其表达式可以表示为

$$\Phi(t) = -\frac{4\pi R_{\text{real}}(t)}{\lambda} \quad (6)$$

则对式(6)泰勒展开得

$$R_{\text{real}}(t) \approx R_B + \frac{(x_t - x_0)^2}{2R_B} + \Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 + \Delta R_4 \quad (7)$$

其中

$$\Delta R_1 = \frac{\Delta x_t(x_t - x_0) + \frac{1}{2}\Delta x_t^2 - (x_t - x_0)y_n \sin \phi_t}{R_B} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_2 &= \frac{-y_n \cos \phi_t \cos \varphi_t - \Delta y_t}{R_B} y_0 \\ &= (-y_n \cos \phi_t \cos \varphi_t - \Delta y_t) \sin \beta \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_3 &= \frac{\Delta z_t + y_n \cos \phi_t \sin \varphi_t}{R_B} (H - z_0) \\ &= (y_n \cos \phi_t \sin \varphi_t + \Delta z_t) \cos \beta \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_4 &= (-2\Delta x_t y_n \sin \phi_t + y_n^2 + \Delta y_t^2 + 2\Delta y_t y_n \\ &\quad \cdot \cos \phi_t \cos \varphi_t + \Delta z_t^2 + 2\Delta z_t y_n \cos \phi_t \\ &\quad \cdot \sin \varphi_t) / (2R_B) \end{aligned} \quad (11)$$

下面分析式(7)中各项运动误差(式(8)-式(11))的物理意义。 ΔR_1 为载机沿航向运动误差造成的距离变化。如图 4， ΔR_2 为载机高程向运动误差造成的距离变化， ΔR_3 为载机跨航向运动误差造成的距离变化， ΔR_4 为运动误差影响比较小(小于 $\lambda/4$) 的项。其中， $\sin \phi_t$ ， $\sin \varphi_t$ 是 10^{-2} 的量级， $\cos \phi_t$ ， $\cos \varphi_t$ 小于 1， y_n ， Δy_t ， Δz_t 为米级， Δx_t 虽能达到几十米，但 $\Delta x_t \sin \phi_t$ 依旧是米级， R_B 为 10^4 量级，那么， ΔR_4 为 10^{-4} 的量级，对 X 波段的雷达，其影响可忽略。式(7)的泰勒展开误差和 ΔR_4 的忽略误差将在后面进行仿真验证。

将式(7)略去 ΔR_4 项代入式(6)，并对慢时间 t 两次求得第 n 个通道的点回波瞬时多普勒调频率为

$$\gamma_n = \gamma_0 + A(t) + B(t) y_n \quad (12)$$

其中

$$\gamma_0 = -2v^2 / (\lambda R_{B0}) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} A(t) &= -2 \left[\Delta a_{xt}(x_t - x_0 + \Delta x_t) + 2\Delta v_{xt} v \right. \\ &\quad \left. + \Delta v_{xt}^2 - \Delta a_{yt} y_0 + \Delta a_{zt}(H - z_0) \right] / (\lambda R_B) \end{aligned} \quad (14)$$

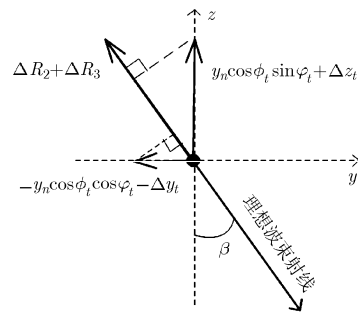


图4 运动误差投影示意图

$$\begin{aligned}
B(t) = & \frac{2}{\lambda R_{B0}} \left[2v\omega_{\phi t} \cos \phi_t + a_{\phi t} (x_t - x_0) \cos \phi_t \right. \\
& - \omega_{\phi t}^2 (x_t - x_0) \sin \phi_t \left. \right] + \frac{2y_0}{\lambda R_{B0}} \left[-a_{\phi t} \sin \phi_t \cos \varphi_t \right. \\
& - a_{\varphi t} \cos \phi_t \sin \varphi_t + 2\omega_{\varphi t} \omega_{\phi t} \sin \phi_t \sin \varphi_t \\
& \left. - (\omega_{\varphi t}^2 + \omega_{\phi t}^2) \cos \phi_t \cos \varphi_t \right] + \frac{2(H - z_0)}{\lambda R_{B0}} \\
& \cdot \left[a_{\phi t} \sin \phi_t \sin \varphi_t - a_{\varphi t} \cos \phi_t \cos \varphi_t \right. \\
& \left. + 2\omega_{\phi t} \omega_{\varphi t} \sin \phi_t \cos \varphi_t + (\omega_{\varphi t}^2 + \omega_{\phi t}^2) \cos \phi_t \sin \varphi_t \right] \quad (15)
\end{aligned}$$

式中 $R_B = \sqrt{y_0^2 + (H - z_0)^2}$ 为中心 APC 到点目标的零多普勒斜距, Δv_{xt} 为载机速度误差, Δa_{xt} , Δa_{yt} 和 Δa_{zt} 分别为沿航向、跨航向和高程向的平动误差加速度, ω_{ϕ_t} , ω_{φ_t} 分别为偏航角和横滚角的角速度, a_{ϕ} , a_{φ} 分别为其角加速度。

从式(12)可以看出, 点目标实际回波信号的多普勒调频率包括 3 部分, 其中 γ_0 为理想调频率, 后两项为误差项, 且 $A(t)$ 只与平动误差有关, $B(t)$ 只与转动误差有关。当 $y_n = 0$ 时, 相当于对单个通道而言, $\gamma = \gamma_0 + A(t)$, 即此时的多普勒调频率只受平动误差的影响, 因此针对传统单通道系统的误差分析, 只考虑平动误差对多普勒调频率的影响, 而没有考虑转动误差。它只是本文方法对天线阵所有运动误差的分析在 $y_n = 0$ 时的特例, 也就是说式(12)更具有普遍性。

从以上的分析中还可以看出, 运动误差使得多普勒调频率沿 APC 位置 y_n 呈线性变化规律, 利用该线性规律本文提出多通道联合自聚焦技术, 该技术可以联合多通道较精确地估计得到多普勒调频率, 同时补偿平动误差和转动误差。

直接或间接估计多普勒调频率的方法有很多种, 主要有基于 MD(MapDrift)^[13] 的自聚焦方法, 对比度方法(contrast optimization)^[14], 反射率偏移法(reflectivity displacement method)^[15]等。这里采用自聚焦方法, 因为 MD 算法能稳健地估计得到二次相位, 而二次相位是使图像模糊的主要相位项^[16]。

通过基于 MD 的自聚焦方法对每个通道接收的数据估计出频率偏差, 进而计算得到各通道的多普勒调频率, 设有 N 个通道, 得

$$\hat{\gamma} = [\hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2, \dots, \hat{\gamma}_N]^T \quad (16)$$

需要注意的是, 在实际处理的过程当中总是将信号进行方位子块划分, 并分别估计得到相应的调频率, 也就是说此时式(16)中的调频率都代表了一个沿方位变化的函数。为了得到式(12)中两个未知参量, 可以构造代价函数

$$J(A, B) = \sum_{n=1}^N (\hat{\gamma}_n - \gamma_0 - A - B y_n)^2 \quad (17)$$

通过使代价函数最小, 可以使得整体估计误差最小化, 此时所求 A , B 值即为需要的值。为使代价函数最小, 需要找出其驻点。将式(17)分别对 A , B 求偏导, 并令其等于零, 得

$$\frac{\partial J}{\partial A} = -2 \sum_{n=1}^N \hat{\gamma}_n + 2N\gamma_0 + 2NA + 2B \sum_{n=1}^N y_n = 0 \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial J}{\partial B} = & -2 \sum_{n=1}^N (\hat{\gamma}_n y_n) + 2\gamma_0 \sum_{n=1}^N y_n + 2A \sum_{n=1}^N y_n \\
& + 2B \sum_{n=1}^N y_n^2 = 0 \quad (19)
\end{aligned}$$

联立式(18), 式(19), 解得

$$A = \frac{\sum_{n=1}^N \hat{\gamma}_n \times \sum_{n=1}^N y_n^2 - \sum_{n=1}^N (\hat{\gamma}_n y_n) \times \sum_{n=1}^N y_n}{N \sum_{n=1}^N y_n^2 - \left(\sum_{n=1}^N y_n \right)^2} - \gamma_0 \quad (20)$$

$$B = \frac{N \sum_{n=1}^N (\hat{\gamma}_n y_n) - \sum_{n=1}^N \hat{\gamma}_n \times \sum_{n=1}^N y_n}{N \sum_{n=1}^N y_n^2 - \left(\sum_{n=1}^N y_n \right)^2} \quad (21)$$

从以上分析可知, 多通道联合运动补偿充分利用了各通道的运动信息, 并采用多值优化的方法来估计得到未知参量。下文的仿真将证明这种方法估计得到的中心 APC 的调频率 ($y_n = 0$, 与单通道 SAR 一样, 只受平动误差影响), 相对于传统单通道估计来说精度更高, 更稳健。同时这种方法还利用线性变化特性估计得到转动误差参量 B , 因此非常适用于线阵运动误差的分析和补偿。

得到各通道多普勒调频率, 再对各通道各自补偿相位, 相位补偿函数为

$$H_n = \exp(-j\Delta\Phi_n) \quad (22)$$

其中

$$\Delta\Phi_n = \int_0^m \int_0^m (A(t) + B(t)y_n) dt dt \quad (23)$$

至此, 式(5)所描述的载机运动误差量已得到较精确的补偿, 雷达可以看成沿理想航迹飞行, 而且没有姿态变化, 再按照常规机载 3 维 SAR 信号处理算法流程处理数据, 即可得到聚焦良好的 3 维图像。下面进行仿真实验验证。

5 仿真

5.1 对点目标斜距泰勒展开进行数值分析

参考“运七”平台运动误差量级在系统中加入图 5 所示运动误差。其中, 转动误差在 10° 以内, 跨航向和高程向运动误差在 4 m 以内, 而沿航向,

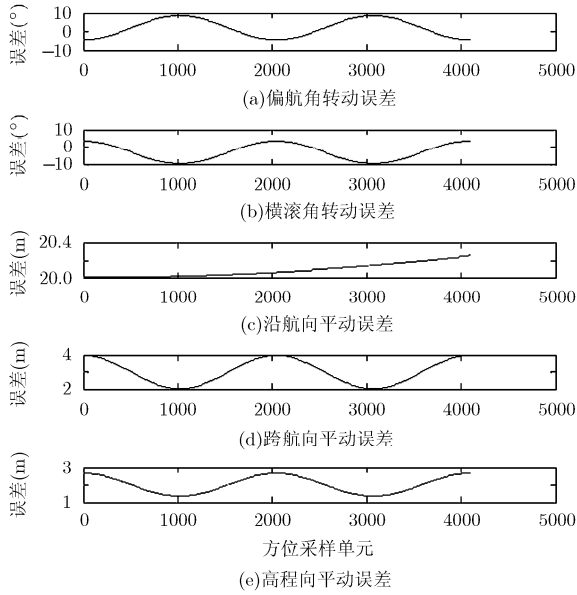


图 5 系统中加入的平动误差和转动误差

由于载机机械惯性较大，沿航向运动误差主要有两个特点：变化缓慢和积累较大^[1]，因此这里在沿航向加入 20 m 左右的缓变误差。 $R_B = 1.2 \times 10^4$ m。那么式(7)边缘通道(y_n 绝对值最大)的泰勒展开误差以及展开后各项误差如图 6 所示。

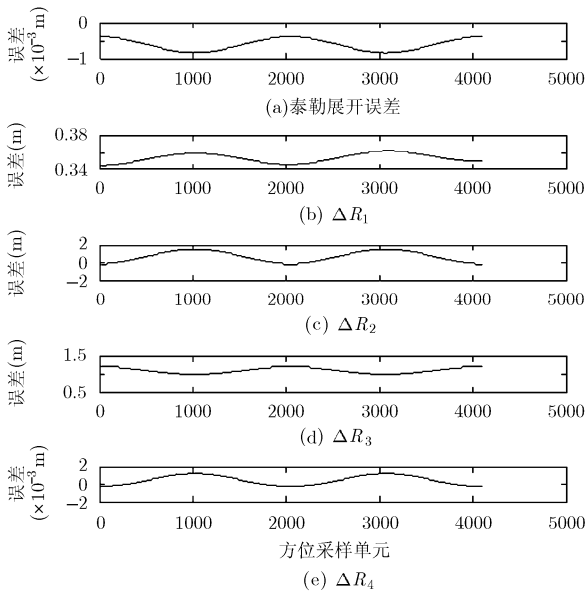


图 6 式(7)泰勒展开误差以及各项误差

由图 6 可以看出式(7)的泰勒展开误差以及 ΔR_4 项为 10^{-4} 量级，对于 X 波段的雷达而言，可以忽略不计。同时 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 较大，分别为运动误差量在 3 个方向的决定性部分，验证了文中分析的正确性。

5.2 对比多通道联合自聚焦技术和传统单通道自聚焦技术的多普勒调频率估计精度

为验证文中提出的联合多通道自聚焦算法具有比传统单通道自聚焦算法对调频率的估计有更高的精度，系统中加入图 5 所示运动误差，采用 32 个通道，方位向分为 11 个子块分别估计调频率，然后插值拟合。部分仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

载波波长	0.0313 m	载机飞行高度	6 km
发射信号带宽	150 MHz	载机飞行速度	150 m/s
脉冲持续时间	2 μ s	下视角	60°
脉冲重复频率	180 Hz	跨航向维实孔	8 m
天线尺寸	2 m	径长度	

图 7 为每个子块各通道数据多普勒调频率估计结果，从图中可以看出，各通道多普勒调频率值变化接近于线性规律。图 8 为分别用本文提出的多通道联合自聚焦技术和传统单通道自聚焦技术，对中心 APC 多普勒调频率估计与理论值作差的结果。可以看出，本文方法的估计误差在 $\pm 1\%$ 以内(插值运算是造成图中两边陡降的原因)波动，传统方法的估计误差在 $\pm 4\%$ 以内波动，因此本文方法在估计精度上相比传统方法有一定的提升。图 9 展示了用本文提出的多通道联合自聚焦技术，估计多普勒调频率未知参量 A 和 B，与理论值相比可以看出，本文提出的估计方法精度较高。

5.3 基于数据补偿

为验证本文提出的运动补偿算法的有效性，下面对不同位置不等高度的点目标进行仿真验证。为得到较理想的成像结果，系统中采用了 512 个通道。由于 3 维数据有庞大的数据量，为减少内存开支，方位向只分配了 512 个点，从图 5 所示的运动误差中截取前 512 点加入系统中。场景中在不同位置放入 6 个不等高度的点目标，其坐标及空间分布如图 10 所示。

将含有运动误差的数据按照本文的方法进行运动补偿后，成像结果如图 11~图 14 所示。图 11 为距离向-方位向 2 维平面脉冲压缩图。图 12 为将投影在距离向-斜高向 2 维平面的脉冲压缩图进行形变校正后，得到的跨航向-高程向 2 维平面脉冲压缩图。然后分别在两个 2 维平面内对场景中最高点(0,0,60)画出能量强度等高线图如图 13(a)和图 13(b)所示，其方位向、高程向、跨航向的峰值旁瓣比和积分旁瓣比分别如图 14(a)、14(b)和 14(c)所示。由图 11~

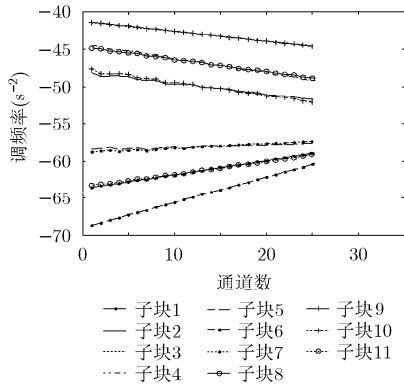


图 7 各通道多普勒调频率估计结果

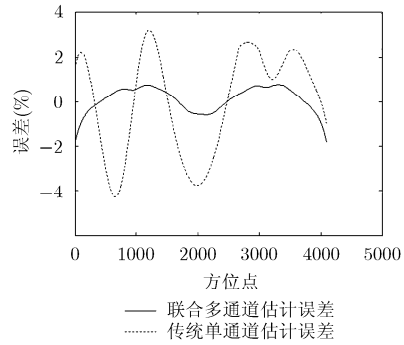
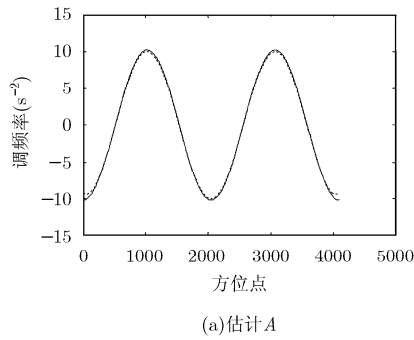
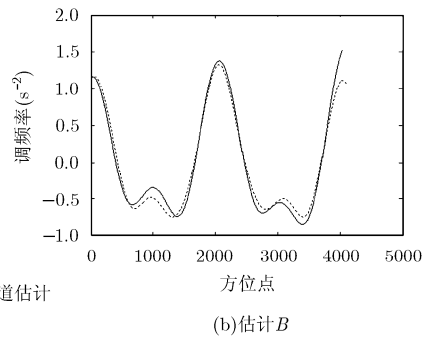


图 8 两种技术调频率估计误差比较



(a) 估计 A



(b) 估计 B

图 9 多通道联合自聚焦技术估计调频率参量

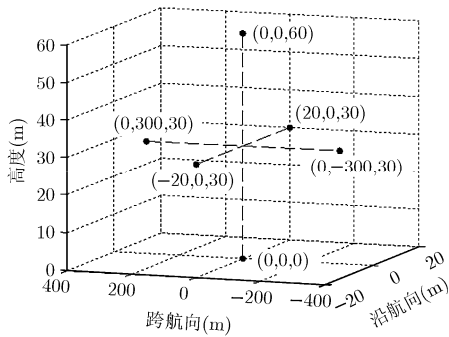


图 10 点目标空间分布

表 2 各维度理论分辨率与真实分辨率对比

维度	距离维	方位维	斜高维
理论分辨率(m)	1	1	46.875
真实分辨率(m)	1.0322	1.0027	48.1093

图 14 可以看出, 该点在各维度内均聚焦良好。表 2 给出了 3 维理论分辨率与真实分辨率的对比。

6 结论

机载 3 维 SAR 利用天线阵与距离向宽带信号和

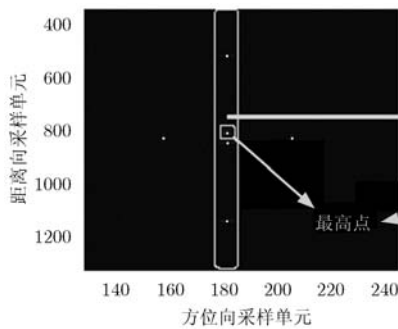


图 11 距离向-方位向 2 维平面脉冲压缩图

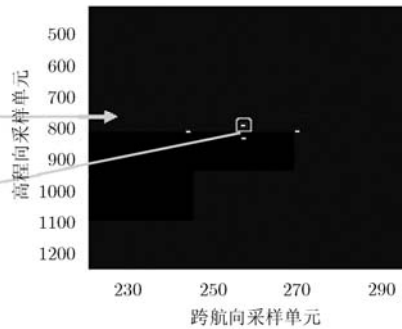


图 12 跨航向-高程向 2 维平面脉冲压缩图

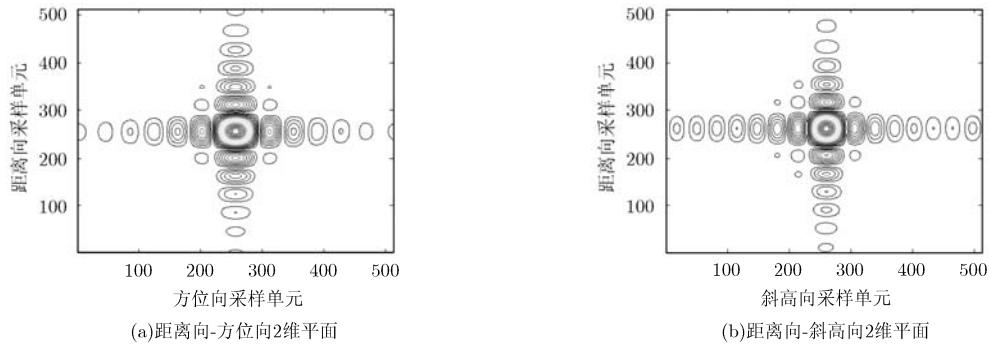


图 13 最高点-32 dB 等高线图

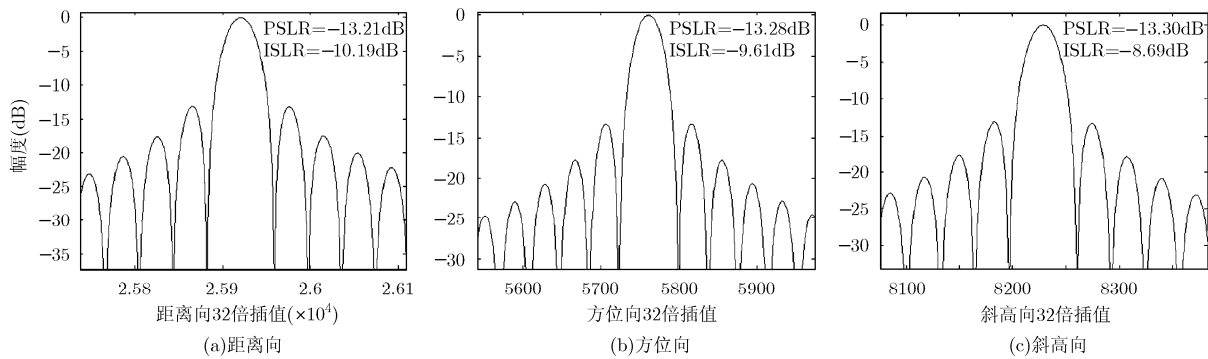


图 14 最高峰值旁瓣比和积分旁瓣比

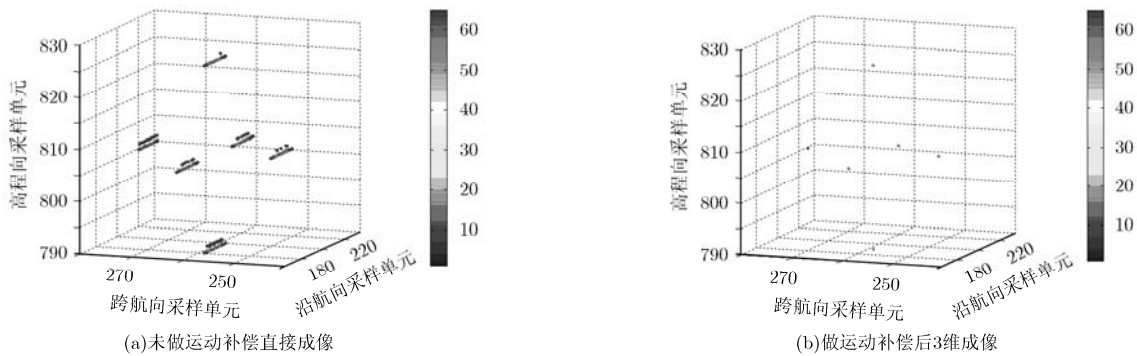


图 15 是否采用运动补偿对 3 维成像的影响

方位向合成孔径一起实现 3 维空间的分辨。然而天线阵的引入也使得运动误差分析不能局限在传统对单通道系统平动误差的分析，而要兼顾转动误差的影响。本文从分析两种运动误差对斜距造成的影响出发，依据天线阵线性几何构型，分析发现天线阵通道间多普勒调频率变化规律，并结合该规律提出联合多通道调频率估计算法，进而提出了适合于线阵 SAR 的运动补偿算法，最后通过仿真数据验证了本文算法的有效性。

参 考 文 献

[1] Liu Min, Li Chun-sheng, and Shi Xin-hua. A back-projection fast autofocus algorithm based on minimum entropy for SAR imaging[C]. 3rd International Asia-Pacific Conference on SAR, Seoul, Korea, September 2011: 1-4.

[2] Budillon A, Evangelista A, and Schirinzi G. Three-dimensional SAR focusing from multipass signals using compressive sampling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2011, 49(1): 488-499.

[3] Reigber A and Moreira A. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2142-2152.

[4] Sauer S, Ferro-Famil L, Reigber A, et al. Polarimetric dual-baseline InSAR building height estimation at L-band[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(3): 408-412.

[5] Nannini M, Scheiber R, and Moreira A. Estimation of the

- minimum number of tracks for SAR tomography[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(2): 531-543.
- [6] Zhu Xiao-xiang and Bamler R. Sparse reconstruction techniques for SAR tomography[C]. 17th International Conference on DSP, Corfu, Greece, July 6-8, 2011: 1-8.
- [7] Homer J, Longstaff I D, and Callaghan G. High resolution 3-D SAR via multi-baseline interferometry[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium'96, Lincoln USA, May 31-31, 1996, 1: 796-798.
- [8] Lombardini F and Reigber A. Adaptive spectral estimation for multibaseline SAR tomography with airborne L-band data[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium'03, Toulouse, France, July 21-25, 2003, 3: 2014-2016.
- [9] Fornaro G, Lombardini F, and Serafino F. Three-dimensional multipass SAR focusing experiments with long-term spaceborne data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(4): 702-714.
- [10] 李燕平. 单/双基 SAR 成像和运动补偿研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2008.
Li Yan-ping. Study of the image formation and motion compensation for the mono-and bistatic SAR[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2008.
- [11] Reigber A and Moreira A. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2142-2152.
- [12] 张双喜, 孙光才, 周峰, 等. 一种基于子孔径自聚焦的高频运动误差估计和补偿方法[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(12): 3013-3017.
- Zhang Shuang-xi, Sun Guang-cai, Zhou Feng, *et al.* A method of based on sub-aperture autofocus to estimate the high-frequency motion error and compensation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 3013-3017.
- [13] Sameczynski P and Kulpa K S. Coherent mapdrift technique[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1505-1517.
- [14] Cacciamano A, Giusti E, Capria A, *et al.* Contrast-optimization-based range-profile autofocus for polarimetric stepped-frequency radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2049-2056.
- [15] 李刚, 彭应宁, 夏香根. 基于改进RDM的SAR自聚焦算法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(2): 349-352.
Li Gang, Peng Ying-ning, and Xia Xiang-gen. Improved RDM for SAR autofocusing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(2): 349-352.
- [16] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 200-206.
Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Technique[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005: 200-206.
- 杨泽民: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为机载 3 维 SAR 运动补偿和星载 SAR 成像等.
- 孙光才: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为星载高分辨多模式 SAR 成像、动目标成像及干扰技术研究.
- 邢孟道: 男, 1975 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像和目标识别等.
- 保 铮: 男, 1927 年生, 教授, 中国科学院院士, 研究方向为 SAR 成像、目标识别、天波超视距、空时 2 维自适应等.