doi:10.11887/j.cn.201404013 http://journal.nudt.edu.cn

高分辨率 UAV SAR 的三维运动误差分离与补偿*

贾高伟,常文革
(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘 要:在基于SAR回波的数据处理中,多普勒调频率具有很高的估计精度且对场景的依赖性很小,可以更广泛地用于自聚焦处理。基于多普勒调频率参数估计,针对回波包络及相位分别提出了误差提取模型,并通过包络误差校正和相位误差补偿两个步骤实现了高精度的运动补偿处理。实测数据表明,本文方法可以在低精度导航信息情况下获取高分辨率雷达图像。

关键词:多普勒调频率估计;包络校正;相位补偿
中图分类号:TP957 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2014)04-0071-06

Three-dimensional motion error correction for unmanned aerial vehicle synthetic aperture radar

JIA Gaowei, *CHANG Wenge*
(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For the parameters estimation of synthetic aperture radar (SAR) raw data, the estimation of Doppler rate is robust with the advantage of high estimation precision and less dependence upon situations. Thus it is widely employed in the autofocus correction. Based on the estimation of Doppler rate, two different error extraction models for the range migration and phase are proposed, respectively. The three dimension (3-D) motion errors are removed by correcting the residual range cell migration and compensating the phase errors, respectively. Real SAR data test shows that the proposed method is feasible to generate high resolution SAR image with only low-accuracy navigation information.

Key words: Doppler rate estimation; residual range cell migration; phase error compensation

近年来,合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)同无人机(Unmanned Aero Vehicle, UAV)的结合,大大促进了SAR在国防及民事活动中的应用,同时也有力拓展了无人机的应用范围。UAV SAR已经成为世界各大国竞相发展的重要装备。但无人机体积小、重量轻,容易受到不稳定气流的影响,在SAR回波录取过程中引入严重的运动误差,不利于高分辨SAR图像的生成[1-2]。此外,受技术条件及成本限制,国内无人机载SAR系统多搭载精度较低的导航设备,因而直接利用外部导航数据完成高精度高分辨率的UAV SAR成像变得十分困难。为此,基于回波参数估计的高精度自聚焦技术将是无人机载SAR高分辨成像的关键。

运动误差对成像的影响,体现在引入额外的包络误差(也可以称之为残余距离徙动)及相位误差[3-5]。现有的基于回波的自聚焦处理算法,多是以包络误差基本消除为前提,即单个目标的回波能量能够集中在一个距离分辨单元之内,而专注于相位误差的校正。事实上,随着SAR空间分辨率的不断提高,这一假设前提已难以满足。无人机非平稳飞行引入的较大轨迹偏移将使得回波能量散布在相邻的几个距离分辨单元之内。在这一情况下,传统的自聚焦算法性能大大降低。因此对于(超)高分辨率UAV SAR系统,包络误差的校正至关重要[6-7],且应先于误差相位校正完成。具体地,在基于回波的参数估计中,多普勒调频率具有很高的估计精度,且估计精度对成像场景的依赖较小,可以利用对比度最优算法(Contrast Optimized Algorithm, COA)[8]或图像偏置法(Map Drift, MD)[9]精确获知,适合作为可靠的自聚焦处理的数据来源。本文针对某高分辨率无人机载SAR系统(空间分辨率优于20cm),提出了一种适用于条带SAR成像的新的运动误差

* **收稿日期**:2013-11-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61072116)
作者简介:贾高伟(1989—),男,河南周口人,博士研究生,E-mail:ji_as@126.com;
常文革(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:changwenge@nudt.edu.cn

校正方法。该方法基于多普勒调频率估计值实现了运动误差的分离和校正。

1 三维运动误差对多普勒调频率的影响

图 1 为存在运动误差条件下的 SAR 成像模型。图中短划线表示载机的实际航迹，沿 X 方向的实线表示理想情况下的预定航迹。P_e 为雷达相位中心(APC)的实际位置，β 表示雷达下视角，O 为坐标原点。T_n 为场景中任意散射点，R_B 为 T_n 对应的零多普勒斜距，$R(t_m,R_B)$ 为 APC 同 T_n 之间的真实瞬时斜距。设 P_e 点坐标为 $[X(t),\Delta Y(t),\Delta Z(t)]$，其中 $X(t)$ 表示载机沿航向的实际位置，$\Delta Y(t)$、$\Delta Z(t)$ 分别为 APC 沿 Y 向、Z 向的位置偏差。设 T_n 点坐标为 $[X_n,Y_n,Z_n]$，则 $R(t_m,R_B)$ 可以表示为[4]：

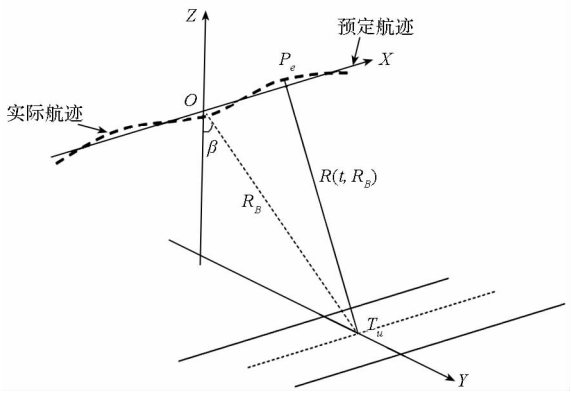


图 1 包含运动误差时的 SAR 成像几何

Fig. 1 SAR geometry in the presence of motion errors

$$\begin{aligned}&R(t_m,R_B)\\&=\sqrt{(X(t_m)-X_n)^2+(\Delta Y(t_m)-Y_n)^2+(\Delta Z(t_m)-Z_n)^2}\\&\approx\sqrt{(X(t_m)-X_n)^2+R_B^2}\\&\quad-\frac{R_B}{\sqrt{(X(t_m)-X_n)^2+R_B^2}}[\Delta Y(t_m)\sin\beta+\Delta Z(t_m)\cos\beta]\end{aligned}\tag{1}$$

式(1)中近似处理源于泰勒公式展开以及 $\Delta Y,\Delta Z\ll R_B$，对于机载高波段 SAR 系统，该近似处理可以满足。在无运动误差的理想情况下，$R(t_m,R_B)$ 可以表示为：

$$R(t_m,R_B)=\sqrt{(Vt_m-X_n)^2+R_B^2}\tag{2}$$

其中 V 为载机航向理想速度，$R_B=\sqrt{Y_n^2+Z_n^2}$。

对比式(1)及式(2)可以得到因运动误差引入的斜距误差为：

$$\begin{aligned}&\Delta r(t_m,R_B)\\&=\sqrt{(X(t_m)-X_n)^2+R_B^2}-\sqrt{(Vt_m-X_n)^2+R_B^2}\\&\quad-[\Delta Y(t_m)\sin\beta+\Delta Z(t_m)\cos\beta]\cos\theta\\&\approx\sqrt{(X(t_m)-X_n)^2+R_B^2}-\sqrt{(Vt_m-X_n)^2+R_B^2}\\&\quad-[\Delta Y(t_m)\sin\beta+\Delta Z(t_m)\cos\beta]\end{aligned}\tag{3}$$

式中，$\cos\theta=\dfrac{R_B}{\sqrt{(X(t_m)-X_n)^2+R_B^2}}$，$\theta$ 为瞬时成像角。式(3)中采用了近似处理 $\cos\theta\approx1$，在窄波束条件下该近似通常都是满足的[1,10-11]。$\Delta r(t_m,R_B)$ 对应的误差相位为 $-\dfrac{4\pi}{\lambda}\Delta r(t_m,R_B)$，由此对应的多普勒调频率误差为：

$$\begin{aligned}\Delta\gamma(t_m)&=\frac{1}{2\pi}\frac{d^2\left(-\frac{4\pi}{\lambda}\Delta r(t_m,R_B)\right)}{dt_m^2}\\&=-\frac{2V'^2(t_m)-2V^2}{\lambda R_B}-\frac{2[X(t_m)-X_0]a_x}{\lambda R_B}\\&\quad-\frac{2}{\lambda}a_y\sin\beta-\frac{2}{\lambda}a_z\cos\beta\end{aligned}\tag{4}$$

式中，V' 表示载机实际速度，a_x、a_y、a_z 分别表示载机在航向、Y 向及 Z 向的加速度。由于载机的机械惰性，航向加速度非常小，其对多普勒调频率的贡献可以忽略[4]。则式(4)可以简化为：

$$\Delta\gamma(t_m)=-\frac{2V'^2(t_m)-2V^2}{\lambda R_B}-\frac{2}{\lambda}a_y\sin\beta-\frac{2}{\lambda}a_z\cos\beta\tag{5}$$

式(5)表示了高波段 UAV SAR 多普勒调频率误差同三维运动误差之间的关系，也是本文所提算法的理论基础。由式(5)可知，在存在三维运动误差的情况下，多普勒调频率误差由目标距离位置、航向速度误差、Y 向及 Z 向的加速度等共同决定。作为一个逆问题，在得知多普勒调频率之后，也可以从中反演载机的三维运动误差。

此外，针对条带 SAR，多普勒调频率估计应与子孔径处理方法[12]相结合。子孔径长度通常远小于合成孔径长度，可以认为运动误差在单一子孔径内是近似恒定的。为了估计高阶的运动误差并提高估计精度，本文采用了重叠子孔径技术与多普勒调频率估计相结合的方法。

2 基于多普勒调频率的三维运动误差校正

式(5)所揭示的运动误差对多普勒调频率的影响规律，在文献[4]中也有介绍，但如何进行三维运动误差的分离是具有挑战性的难题。文献[4,13]中提出了通过设置不同截止频率的高、低通滤波器以实现航向误差同视线方向运动误差相分离的方法，具有一定的效果。但该方法需要对载机平台的运动误差有明确的先验知识，对载机平台的依赖性较强。

相应地，本文将三维运动误差的校正分为两个步骤完成，首先是包络误差的估计与校正，而后

是误差相位补偿的估计与校正。在具体处理过程中,二者对补偿精度的要求是不同的,相比之下,相位误差补偿具有更高的精度要求。

2.1　包络误差的校正

反观式(3),定义

$$\Delta r_x = \sqrt{(X(t_m) - X_n)^2 + R_B^2} - \sqrt{(Vt_m - X_n)^2 + R_B^2} \tag{6}$$

Δr_x 表示载机航向速度偏差引起的斜距误差。为从简分析航向速度对包络误差的影响,令 $X_n = 0$,并假定航向速度为恒定值,且 $V' > V$,则有 $X(t) = V't_m$。航向误差对包络的影响如图 2 所示。

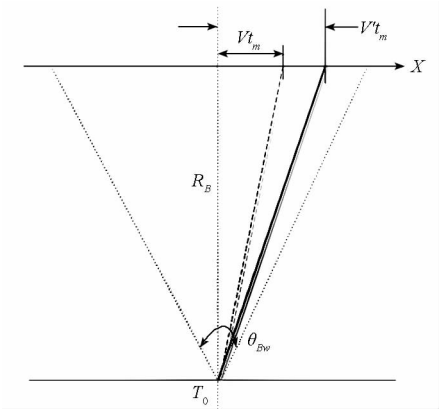


图 2　航向速度误差对包络误差的影响

Fig. 2　The geometry of along track error

图 2 中设定 SAR 的孔径积累角为 θ_{BW},T_0 为场景中任一目标,设其零多普勒斜距为 R_B,图中实线表示 APC 与目标之间的真实斜距,点划线表示理想情况下 APC 同目标之间的斜距。依据图 2 可知,目标 T_0 在一个合成孔径长度内,因航向速度误差引起的最大包络误差为:

$$\Delta r_{x\max} = 2\left(\sqrt{\left(\frac{L_{sar}}{2}\right)^2 + R_B^2} - \sqrt{\left(\frac{VL_{sar}}{V'2}\right)^2 + R_B^2}\right) \tag{7}$$

对于式(7),结合某微型 UAV SAR 的典型参数:中心斜距 2000m,成像积累角为 3°,载机速度 25m/s,得到 $\Delta r_{x\max}$ 的变化范围如图 3 所示。

图 3 中纵向坐标表示航向速度引入的包络误差,横向坐标表示航向速度的相对误差,定义为 $\frac{V' - V}{V}$。在 SAR 的实际处理过程中,航向速度误差的来源有两种:一是载机航向运动的不稳定,它是客观存在的;二是雷达成像轨迹同真实轨迹之间的偏离引入的速度偏差,这是由成像轨迹的选取引入的。前者已通过实时调整 PRF 来校正,而雷达成像处理轨迹同真实轨迹之间的夹角一般可控制在 5°以内,对应的速度相对误差在 8% 以内。

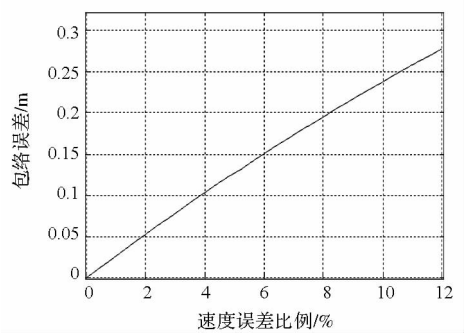


图 3　航向速度误差对包络误差的影响

Fig. 3　The effect on the envelope error derived from velocity error

结合图 3,我们可知,在整个合成孔径内,由航向速度误差引入的包络误差通常小于 SAR 距离分辨单元(针对 0.2m 的高分辨率 SAR),因此可以忽略其对包络的影响。但在相位补偿处理中,需要考虑 Δr_x 对成像的影响。

由以上分析,在某一子孔径内,式(3)可以近似为:

$$\Delta r(t_m, R_B) \approx -[\Delta Y(t_m)\sin\beta + \Delta Z(t_m)\cos\beta] \tag{8}$$

相应地,式(5)变为:

$$\Delta\gamma(t_m) \approx -\frac{2}{\lambda}a_y\sin\beta - \frac{2}{\lambda}a_z\cos\beta \tag{9}$$

式(9)对于分离运动误差具有重要意义,它表明了在处理包络误差的过程中,多普勒调频率误差是由 Y 向及 Z 向的误差加速度引入的。对该子孔径数据内 N 条距离线进行多普勒调频率估计,得到不同斜距处对应的多普勒调频率误差,可联立线性方程组为:

$$\begin{cases} \Delta\gamma_1(t_m) \approx -\dfrac{2}{\lambda}a_y\sin\beta_1 - \dfrac{2}{\lambda}a_z\cos\beta_1 \\ \quad\vdots \\ \Delta\gamma_N(t_m) \approx -\dfrac{2}{\lambda}a_y\sin\beta_N - \dfrac{2}{\lambda}a_z\cos\beta_N \end{cases} \tag{10}$$

式中 $\Delta\gamma_i$,β_i,$(i = 1,2,\cdots,N)$ 分别表示 N 个不同距离线对应的多普勒调频率误差值及不同距离线对应的雷达下视角。令 $\boldsymbol{D} = [\Delta\gamma_1(t_m), \Delta\gamma_2(t_m), \cdots, \Delta\gamma_N(t_m)]^{\mathrm{T}}$,$X = [a_y, a_z]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} -\frac{2}{\lambda}\sin\beta_1, -\frac{2}{\lambda}\cos\beta_1 \\ \vdots \quad \vdots \\ -\frac{2}{\lambda}\sin\beta_N, -\frac{2}{\lambda}\cos\beta_N \end{bmatrix}$,则式(10)可以表示为:

$$\boldsymbol{HX} = \boldsymbol{D} \tag{11}$$

求解式(11)即可得到该子孔径内载机沿 Y、Z 向的加速度 a_y,a_z。利用加权最小二乘准则[14]

可以得到 X 的最优线性估计：

$$\boldsymbol{X} = (\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\boldsymbol{H})^{-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\boldsymbol{D} \tag{12}$$

其中，$\boldsymbol{\Sigma} = \mathrm{diag}[w_1, \cdots, w_N]$ 为加权矩阵。根据加权最小二乘准则[14]，最优的加权因子为待估计参数的方差值。然而对于多普勒调频率估计，其方差难以获得，为此在实际应用中，可以采用平均能量作为加权因子。即

$$w_i = \frac{\sum |I(m,\hat{\gamma})|}{M}, i = 1,2,\cdots,N \tag{13}$$

式中，$I(m,\hat{\gamma})$ 为子孔径数据中某距离处的方位向脉压结果，m 表示方位向像素位置，M 为子孔径的方位向总的点数，$\hat{\gamma}$ 为多普勒调频率的估计值。

类似地，对各个子孔径数据完成 a_y, a_z 参数估计之后，对这些数据进行拼接，插值，得到对应于全合成孔径时间的$\{a_y, a_z\}$。通过二次积分，可得到载机沿 Y 向、Z 向的位置偏差 $\Delta\hat{Y}$和$\Delta\hat{Z}$。结合成像原理[4,11]，场景中心处对应的距离空不变包络误差为：

$$\Delta r_c = -(\Delta\hat{Y}\sin\beta_c + \Delta\hat{Z}\cos\beta_c) \tag{14}$$

β_c 表示场景中心处对应的雷达下视角。距离空变的包络误差为：

$$\Delta r_v = -(\Delta\hat{Y}\sin\beta + \Delta\hat{Z}\cos\beta - \Delta r_c) \tag{15}$$

通常地，Δr_v 在量级上要远远小于距离分辨单元[11]，为此，对整个场景仅补偿距离空不变包络误差 Δr_c 即可达到高分辨率成像的要求。

2.2 误差相位补偿

由于成像结果对相位误差十分敏感，式(9)中的近似处理在相位误差补偿过程中不再成立。利用 2.1 节中提出的包络误差矫正方法，我们可以认为包络误差已经得到充分校正，即信号能量集中于单个距离分辨单元之内。此时，再次利用 COA 算法或者 MD 算法计算 N 个不同距离线处对应的多普勒调频率误差。此时的多普勒调频率误差估计值将会有更好的精度，这是由于单个目标的回波能量集中于一个距离分辨单元之内。

在进行误差相位校正的过程中，应当考虑误差相位沿距离向的空变性。文献[4]中建立了多普勒调频率随斜距呈线性变化的一阶模型，该模型的成立前提为雷达测绘带宽远小于场景中心线到航线的垂直距离。在 UAV SAR 成像过程中，载机飞行高度较低，又需要有较大的测绘带宽，一阶线性模型将带来较大误差。为此本文提出了多普勒调频率关于斜距变化的二阶模型，具体表示为：

$$\Delta\gamma = \kappa_0 + \kappa_1 R'_B + \kappa_2 R'^2_B \tag{16}$$

R'_B 为不同斜距处对应的零多普勒斜距，κ_0 表示多普勒调频率的距离空不变部分，κ_1 为多普勒调频率误差随距离线性变化的系数，κ_2 为多普勒调频率误差随二次距离项变化的系数。对于模型阶数的定义，其本质是利用不同阶数的多项式拟合逼近真实的多普勒调频率变化规律。更高的模型阶数对应高的拟合精度，但也带来了较大的运算量。经实测数据验证，式(16)中二阶模型的处理精度已经能够满足系统要求。

为不失一般性，可以将式(16)改写为：

$$\Delta\gamma = \kappa_0 + \kappa_1\Delta d + \kappa_2\Delta d^2 \tag{17}$$

$\Delta d = R'_B - R_c$ 表示不同目标斜距同参考斜距 R_c 之间的距离差。类似于式(10)，可以基于式(17)到一个线性方程组

$$\begin{cases} \Delta\gamma_1 = \kappa_0 + \kappa_1\Delta d_1 + \kappa_2\Delta d_1^2 \\ \quad\vdots \\ \Delta\gamma_N = \kappa_0 + \kappa_1\Delta d_N + \kappa_2\Delta d_N^2 \end{cases} \tag{18}$$

式中 $\Delta d_i, i = 1,2,\cdots,N$ 表示 N 个不同距离线同参考斜距 R_c 之间的距离差。令 $\hat{\boldsymbol{D}} = [\Delta\gamma_1, \Delta\gamma_2, \cdots, \Delta\gamma_N]^{\mathrm{T}}$，$\hat{\boldsymbol{X}} = [\kappa_0, \kappa_1, \kappa_2]^{\mathrm{T}}$，$\hat{\boldsymbol{H}} = \begin{bmatrix} 1, \Delta d_1, \Delta d_1^2 \\ \vdots \\ 1, \Delta d_N, \Delta d_N^2 \end{bmatrix}$，式(18)可以表示为：

$$\hat{\boldsymbol{H}}\hat{\boldsymbol{X}} = \hat{\boldsymbol{D}} \tag{19}$$

同样利用加权最小二乘估计，得到

$$\hat{\boldsymbol{X}} = (\hat{\boldsymbol{H}}^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{\Sigma}}^{-1}\hat{\boldsymbol{H}})^{-1}\hat{\boldsymbol{H}}^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{\Sigma}}^{-1}\hat{\boldsymbol{D}} \tag{20}$$

式(20)中加权矩阵 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}$ 的选取准则同式(12)一致。在对各个子孔径数据完成参数$[\kappa_0, \kappa_1, \kappa_2]$估计之后，对这些数据进行拼接，得到对应于全孔径的二阶多项式系数，据此结合式(17)可以计算任意斜距处对应的多普勒调频率误差，对其进行二次积分，可以得到误差相位为：

$$\Delta\varphi = \iint\Delta\gamma(s)\,\mathrm{d}s\mathrm{d}u \tag{21}$$

式(21)计算得到的误差相位 $\Delta\varphi$ 包含了由航向速度误差及 Y 向、Z 向误差引起的总的相位误差，且考虑了运动误差的距离空变性。将式(21)计算得到的误差相位沿不同距离线进行补偿，即实现了对误差相位的精确补偿。经过包络误差校正及相位误差补偿，三维运动误差得以精确校正。

3 实测数据验证

针对上节提出的运动补偿方案，我们利用某 Ku 波段微型 SAR 系统，开展了一次车载 SAR 验证试验。在试验过程中，微型 SAR 系统被安装在

一辆越野车的车顶。该系统嵌入了一个绝对定位精度约为 2m 的 GPS 接收机。车载 SAR 试验在某高架公路上进行。

系统试验的具体参数如表 1 所示。

在该测试试验中,成像区域为道路两边的农田,其轮廓较为杂乱,但成像结果仍能凸显本文算法的有效性。图 4 给出了系统试验的部分成像结果,SAR 图像分辨率为 0.2m × 0.2m,场景大小为 270m × 100m(方位 × 斜距),图中横向表示斜距向。图 4(a)为仅采用 GPS 数据做运动补偿得到的成像结果,图 4(b)为采用传统的对比度最优方

表 1　试验参数表

Tab. 1　The parameters of test campaign

参　数	数　值
距离分辨率	0.2m
雷达波段	Ku
车辆平台速度	17.5m/s
场景中心斜距	900m
测绘带宽	300m
方位分辨率	0.2m

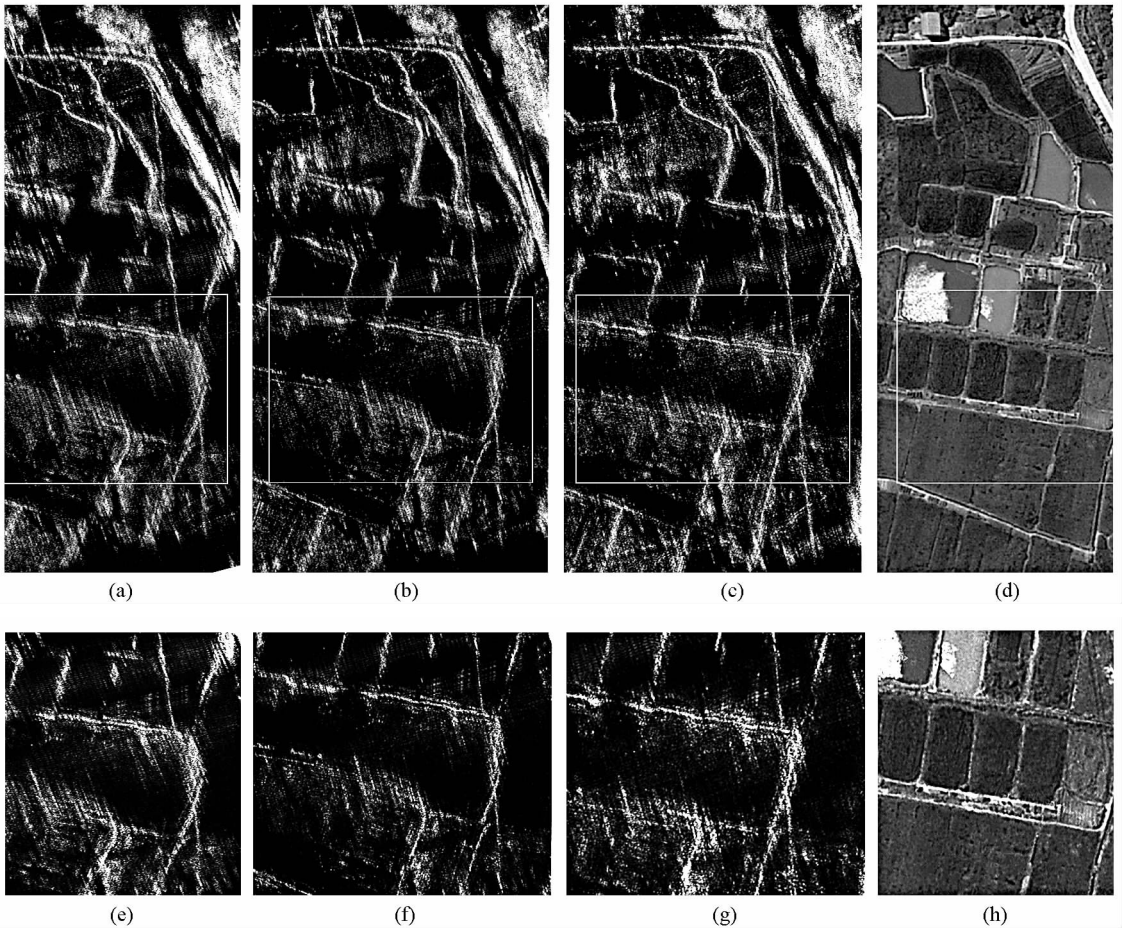


图 4　运动误差校正效果对比

Fig. 4　The comparison of motion compensation results

法处理得到的 SAR 图像,该方法没有考虑包络误差,而是对航向速度误差进行了估计并完成了相位补偿,图 4(c)为本文所提算法处理得到的结果,图 4(d)为同一成像区域对应的光学图像。具体观察图 4(a)(b)(c)(d)中白色方框区域,图 4(e)(f)(g)(h)分别是对应的放大图,该区域为一田埂的边角,具有较为规则的几何结构。图 4(e)中存在明显的散焦和几何失真,图 4(f)相比于图 4(e)微有改善,仍存在散焦及失真,图 4(g)中则目标聚焦良好,通过与图 4(h)的对比,可知几何失真被校正。

由图 4 知,只采用较低精度的 GPS 数据进行运动补偿得到的图像是散焦且存在几何形变的。利用 COA 算法得到的图像微有改善,但同样是散焦且失真的,这是由于严重的包络误差使得该算法性能大大降低。本文所提算法首先估计并校正了包络误差,随后对空变的相位误差进行补偿,因而得到的 SAR 图像聚焦良好且几何失真被校正。试验结果表明了本文算法在校正三维运动误差中的有效性。

4 结论

高分辨率 UAV SAR 成像处理对运动补偿提出了更高的要求。本文提出了一种新的基于多普勒调频率参数的自聚焦处理算法。在处理过程中,算法考虑了包络误差对成像造成的影响,建立线性模型实现了视线方向加速度的分离,精确估计并校正了包络误差;考虑了相位误差沿斜距的空变性,建立了多普勒调频率随斜距变化的二阶模型,实现了相位误差的精确估计与补偿。实测数据验证显示,本文提出的算法具有很强的鲁棒性和很好的运动误差校正能力。

参考文献(References)

[1] Xing M D, Jiang X W, Wu R B, et al. Motion compensation for UAV SAR based on raw radar data[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens, 2009,47(8):2870 – 2883.

[2] 周峰,邢孟道,保铮. 一种无人机机载 SAR 运动补偿的方法[J]. 电子学报,2006, 34(6):1002 – 1007.
ZHOU Feng, XING Mengdao, BAO Zheng. A method of motion compensation for unmanned aerial vehicles borne SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(6): 1002 – 1007. (in Chinese)

[3] 黄源宝,保铮,周峰. 一种新的机载条带式 SAR 沿航向运动补偿方法[J]. 电子学报,2005, 33(3):459 – 462.
HUANG Yuanbao, BAO Zheng, ZHOU Feng. A novel method for along-track motion compensation of the airborne strip-map SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3):459 – 462. (in Chniese)

[4] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. The technique of SAR imaging[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)

[5] 安道祥. 高分辨率 SAR 成像处理技术研究[D]. 长沙:国防科技大学博士学位论文,2011.
AN Daoxiang. Study on the imaging and motion compensation techniques for SAR systems with large integrated angle[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chniese)

[6] Hubert M J, Nahum C. Airborne SAR-efficient signal processing for very high resolution[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(3):784 – 797.

[7] Cantalloube H, Dubois-Fernandez P. Airborne X-band SAR imaging with 10cm resolution: technical challenge and preliminary results[J]. IEE Proc.-Radar Sonar Navigation, 2006,153 (2):163 – 176.

[8] Fabrizio B, Giovanni C. Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization[J]. IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems, 1996, 32(3): 1185 – 1191.

[9] Walter C G, Goodman R S, and Majewski R M. Spotlight synthetic aperture radar signal processing algorithms[M]. Artech House, Boston, London, 1995.

[10] Zhang L, Qiao Z J, Xing M D, et al. A robust motion compensation approach for UAV SAR imagery[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens, 2012, 50(8): 3202 – 3218.

[11] Fornaro G. Trajectory deviations in airborne SAR: analysis and compensation[J]. IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems, 1999, 35(3), 997 – 1009.

[12] Calloway T C, Donohoe G. Subaperture autofocus for synthetic aperture radar[J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst, 1994, 30(2): 617 – 621.

[13] Moreira J R. A new method of aircraft motion error extraction from radar raw data for real time motion compensation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(4):620 – 626.

[14] Wei Y, Yeo T S, Bao Z, Weighted least-squares estimation of phase errors for SAR/ISAR autofocus[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1999, 37(5):2487 – 2494.

(上接第 54 页)

[4] Ekestorm R T, Karow C. An all-digital image synthesizer for countering high-resolution imaging radars[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2000.

[5] LI Yuan, LV Gaohuan, CHEN Huilian. A new technology of multi-false targets deception against chirp waveform inverse synthetic aperture radar[C]//ICSP 2008 Proceedings, 2008: 2477 – 2480.

[6] LI Yuan, CHEN Huilian. Deception jamming against stepped-frequency ISAR using image synthesis technology[C]//APMC 2005 Proceedings,2005.

[7] 李源, 蔡英武. 逆合成孔径雷达成像干扰仿真研究[J]. 现代雷达, 2006, 28(3): 36 – 39.
LI Yuan, CAI Yingwu. Research on jamming simulation for countering ISAR imaging[J]. Modern Radar, 2006, 28(3): 36 – 39. (in Chinese)

[8] 张煜, 董春曦, 崔艳鹏, 等. 对解线调处理的 ISAR 的相干干扰技术[J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1590 – 1594.
ZHANG Yu, DONG Chunxi, CUI Yanpeng, et al. Coherent jamming technique countering ISAR[J]. ACTA Electronica SINICA, 2006, 34(9): 1590 – 1594. (in Chinese)

[9] 张煜, 杨绍全, 董春曦, 等. 对线性调频雷达的正弦加权调频干扰技术[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(4): 544 – 547.
ZHANG Yu, YANG Shaoquan, DONG Chunxi, et al. Sinusoidal weighted frequency modulation jamming technique countering LFM radar [J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(4): 544 – 547. (in Chinese)

[10] 张煜, 杨绍全. 对线性调频雷达的卷积干扰技术[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(6): 1408 – 1411.
ZHANG Yu, YANG Shaoquan. Convolution jamming technique countering LFM radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(6): 1408 – 1411. (in Chinese)