

# 一种无人机机载 SAR 运动补偿的方法

周 峰, 邢孟道, 保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 为了能够得到较理想的无人机 SAR 图像, 本文通过对无人机 SAR 系统的运动误差分析, 提出了一种有效的运动补偿方法, 该方法是通过天线伺服系统来补偿载机的转动误差, 而平动误差是根据对所建立的误差模型的分析, 从 SAR 数据的瞬时多普勒调频率中估计得到, 并且平动误差补偿是对数据在包络和相位上进行分别校正. 结合实测数据处理的结果表明该方法可得到质量较高的无人机载 SAR 图像.

**关键词:** 合成孔径雷达 (SAR); 无人机 (UAV); 运动补偿; 瞬时多普勒调频率

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 06-1002-06

## A Method of Motion Compensation for Unmanned Aerial Vehicles Borne SAR

ZHOU Feng, XING Meng-dao, BAO Zheng

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

**Abstract:** In order to obtain a UAV SAR image of high quality, a method is proposed to compensate the motion errors of UAV by virtue of the analysis of its motion errors. In our method the attitude errors are compensated through an antenna servo system. Based on the established error model the position errors are estimated by the instantaneous Doppler chirp rate from the SAR raw data and compensated through the envelope correction and the phase correction of the raw data, respectively. The experiment results show that the proposed approach can get the high quality SAR image from the UAV SAR raw data.

**Key words:** synthetic aperture radar (SAR); unmanned aerial vehicle (UAV); motion compensation; instantaneous Doppler chirp rate

### 1 引言

合成孔径雷达成像具有全天时、全天候、远距离、宽绘制带的特性, 它可以大大地提高雷达的信息获取能力, 特别是战场感知能力. 目前, SAR 在许多载体上得到了广泛的应用, 但是, SAR 在中、低空的小型运动平台工作时又会面临到载机运动误差的挑战. 特别是中、低空的无人机, 由于载机的机体较小, 飞行高度较低, 这样载机受到空气气流的影响较大, 其运动平稳性很难控制到 SAR 成像所要求的运动状态<sup>[1]</sup>. 如何对无人机 SAR 系统进行运动补偿是无人机 SAR 成像的一个关键技术. 国外的无人机 SAR 成像主要利用高精度的惯导系统和 GPS 定位系统输出的运动参数来控制载机和天线波束的平稳性, 并对 SAR 数据进行自聚焦处理<sup>[2]</sup>即可得到较理想的 SAR 图像<sup>[3]</sup>. 本文针对国内无人机 SAR 现状, 特别是在使用控制精度不太高

的惯导情况下, 论述了一种有效的 UAV-SAR 运动补偿的方法. 根据 UAV 的不同运动误差形式对 SAR 成像的影响程度不同, 该方法利用惯导的运动参数来控制天线波束指向, 从而补偿 UAV 的转动误差影响. 对于平动误差的补偿则是先建立运动误差模型, 并从 SAR 数据的多普勒调频率值中分离并估计出不同空间方向的平动分量, 然后对数据分别进行误差相位和包络的补偿<sup>[4-7]</sup>.

### 2 UAV-SAR 运动误差的形式及其转动误差补偿

无人机在空中的运动误差可以分为三个平动自由度和三个转动自由度向的运动误差, 为了叙述方便, 在此引用常见的地理坐标系北(X)、东(Y)、天(Z), UAV 的平动运动误差最终可以分解到 X、Y、Z 三个坐标方向的运动误差, 并且 UAV 平动误差的影响表现为天线相位中心在空间中的位置变化, 因而它将影响雷达到目标的瞬时距离,

而瞬时距离的变化将会引起雷达回波在包络和相位上的变化,造成方位向处理困难,故平动误差补偿是 UAV-SAR 处理中的重要部分.但若通过惯导测量或者从数据中获得每个脉冲采样时刻天线相位中心沿 X、Y、Z 方向的误差分量,我们就可以在 SAR 数据域进行平动误差补偿,本文是通过从数据中的 Doppler 调频率值来估计和补偿平动误差分量,具体分析将在下一节中详细的介绍.

若 UAV 沿北向飞行,则 UAV 的三个转动自由度可以分为绕 Z 轴转动的偏流、绕 X 轴转动的横滚,绕 Y 转动的俯仰,UAV 的转动分量主要对 SAR 雷达的波束指向和包络进行调制.若雷达波束为笔状波束,它也有绕航向、绕波束视线向和垂直斜距平面方向为轴转动的俯仰、旋转、方位三个姿态自由度. UAV 的偏流运动使得雷达波束指向与 UAV 航迹不能保持固定的夹角,但可以利用天线平台的伺服系统调节天线的波束方位指向,即改变天线波束的方位角  $\gamma_{azimuth}$ ,使得雷达波束指向与航迹方向保持在固定的夹角,这样成像过程中可以补偿 UAV 偏流的影响,使得 SAR 始终工作在正视式或者一定角度的斜视.若 UAV 的偏流角为  $\phi_{yaw}$ ,可以通过式(1)完成对天线方位波束的稳定.

$$|\gamma_{azimuth}| + |\phi_{yaw}| = A \quad (1)$$

上式中 A 为常数,当 SAR 工作在正视式时,  $A = 90^\circ$ . 假设 UAV 的机头指向北向(航向角为  $0^\circ$ ),风速为  $v_w$ ,则在正视时 UAV-SAR 系统补偿偏流转动的示意图如图 1(a)所示. UAV 的横滚运动会使得天线波束俯仰指向的变化,造成波束照射在场景距离向上的摆动,将影响距离维的采样数据,俯仰转动严重时在数据采样中将得不到目标回波.但它通过伺服系统控制天线的俯仰角  $\gamma_{depression}$  来克服 UAV 横滚运动的影响.若 UAV 的横滚角为  $\phi_{roll}$ ,可以通过式(2)完成对天线俯仰波束的稳定.

$$\gamma_{depression} - \phi_{roll} = B \quad (2)$$

上式中 B 为常数,即为了观测一定的场景初始所设定的理想天线俯仰角.若 SAR 雷达天线的理想俯仰角为  $\gamma_0$ ,则 UAV-SAR 系统补偿横滚转动的示意图如图 1(b)所示.而对于 UAV 的俯仰运动,会引起天线波束绕视线方向转动,若波束在地面投影为椭圆波束,这样会引起椭圆波束的旋转,它只会影响雷达照射的场景边沿的幅度调制,只是稍

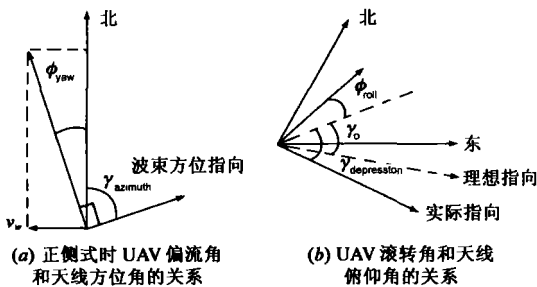


图 1 UAV-SAR 转动补偿示意图

微降低一下图像两边的信噪比,在俯仰角不是很大的情况下,这种转动的影响是可以忽略的.

### 3 基于回波数据的 UAV-SAR 平动误差补偿

前一节中已经提到 UAV 的平动误差反映在天线相位中心空间位置的变化,而天线相位中心的变化最终能反映在回波数据的包络和相位中,但是回波的包络一般受到分辨率的限制,其运动误差分析的精度比较低.相比之下,由于雷达的波长较短,故回波的相位对于雷达位置误差非常敏感,所以运动误差一般是从回波相位信息(即 Doppler 信息)来分析.故本节从 UAV-SAR 相位中心位置误差模型出发,提出了基于瞬时多普勒调频率估计的运动补偿方法.该方法从实测数据中估计出 Doppler 瞬时调频率,然后从调频率中分离运动误差分量,最后根据估算出来的运动误差量对 UAV-SAR 数据进行包络和相位的补偿.

#### 3.1 UAV-SAR 相位中心位置误差模型

如图 2 是无人机 SAR 平动误差示意图.假设 SAR 工作在正视式,场景为一个平面, T 是场景中任意的一点,其坐标为  $(X_n, Y_n, 0)$ . 天线相位中心的理想航线在 XOZ 平

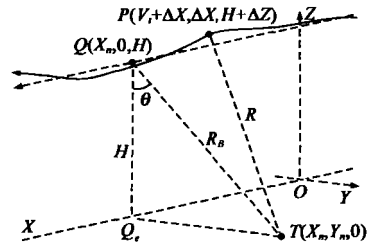


图 2 UAV-SAR 平动误差示意图

面内且与 X 轴平行,高度为 H. 天线相位中心沿理想航线以恒速 V 运动.实际中有速度波动  $\Delta v(t)$ ,且实际速度为  $v = V + \Delta v(t)$ . P 为实际航线上的任意一点,  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$  和  $\Delta Z$  为实际飞行情况相对理想飞行情况的偏离,它们都是时间 t 的函数. R 为 P 和 T 之间的距离. Q 点是理想航线上到 T 点的最近点,  $R_B$  为 T 点距理想航线的最近距离,  $Q_0$  为 Q 点在地面上的垂直投影,  $\theta$  是两直线 QQ<sub>0</sub> 和 QT 间的夹角.由图 2 可得到瞬时斜距的表达式为

$$R(t) = \sqrt{(Vt + \Delta X - X_n)^2 + (\Delta Y - Y_n)^2 + (\Delta Z + H)^2} \quad (3)$$

从上式可以看出,如果没有运动误差,则  $R = \sqrt{(Vt - X_n)^2 + R_B^2}$ ,即最短斜距相同而方位向位置不同的点目标具有相同的信号形式,也就是说具有方位向的平移不变性.方位向的平移不变性是非常重要的性质,它使得校正距离弯曲成为可能,也使得方位向压缩可采用快速卷积在频域完成.但是从式(3)也可以看出位置误差  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$  和  $\Delta Z$  使得斜距模型成为空变的,斜距误差对不同的目标点具有不同的影响,需要分别分析和补偿.由于合成孔径雷达的方位向波束宽度较窄,因而一般可以对斜距模型作以下化简:

$$R(t) \approx \sqrt{(Vt + \Delta X - X_n)^2 + R_B^2 - 2\Delta Y R_B \sin\theta + 2\Delta Z R_B \cos\theta}$$

$$\approx \sqrt{(Vt + \Delta X - X_n)^2 + R_B^2} - \Delta Y \sin\theta + \Delta Z \cos\theta \quad (4)$$

式中  $\sin\theta = \frac{\sqrt{R_B^2 - \left(\frac{H}{R_B}\right)^2}}{R_B}$ 、 $\cos\theta = \frac{H}{R_B}$ .

知道  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$  和  $\Delta Z$  的值后就可根据式(4)进行运动补偿。 $\Delta Y$  和  $\Delta Z$  造成的斜距误差可以在读取数据后或距离压缩后对每次回波直接按距离单元对包络和相位进行补偿。而不同俯仰角  $\theta$  处的补偿值是不一样的,但可以在距离上分段来提高补偿精度。

### 3.2 基于瞬时多普勒调频率的运动误差估计

由于 SAR 是依靠雷达与场景的相对运动而得到多普勒维高分辨的,所以 Doppler 参数和雷达平台运动参数之间有密切的对应关系。常用的多普勒质心估计方法多是基于方位频谱对称,所以多普勒质心的估计受到场景的起伏影响较大,估计精度不够高。而 Doppler 调频率的估计方法<sup>[8]</sup>(图像漂移法(MD法)、最小熵法等)较为稳健,精确。在此利用 Doppler 的调频率来估计出雷达平台的运动误差信息。

对式(4)求二阶导数得到回波信号的瞬时多普勒调频率如下,

$$K(t) = -\frac{2}{1} \frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{2v^2}{R_B} - \frac{2}{R_B} a_x (Vt + \Delta X - X_n) + \frac{2}{1} a_R \quad (5)$$

上式中沿径向加速度  $a_R = a_y \sin\theta - a_z \cos\theta$ , 这样调频率可以分为三项,并且与  $X_n$  有关的项只有  $-\frac{2}{R_B} a_x (Vt + \Delta X - X_n)$ , 其中沿航向加速度  $a_x$  数值较小并且整个项在多点平均时还可以抵消,当合成孔径长度满足下式的条件  $a_x$  可忽略<sup>[5]</sup>。

$$L \ll \left[ \frac{3IR_B v^2}{a_{max}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

上式中的  $a_{max}$  为加速度在合成孔径长度内的最大值,忽略这一项后得

$$K(t) \approx -\frac{2v^2}{R_B} + \frac{2}{1} a_y \sin\theta - \frac{2}{1} a_z \cos\theta$$

$$= -\frac{2v^2}{R_B} - \frac{2}{1} \left[ a_y \left( 1 - \frac{H^2}{2R_B^2} \right) + a_z \frac{H}{R_B} \right]$$

上式中利用了  $R_B \gg H$  的近似,若令  $R_B = R_s + \Delta R$ , 其中  $R_s$  表示天线相位中心到场景中心的距离,再利用  $\Delta R \ll R_s$  的近似,可得  $\frac{1}{R_B} = \frac{2}{R_s} - \frac{R_B}{R_s^2}$ , 并对式(7)整理得:

$$K(t)R_B = \left[ -\frac{2}{1} v^2 - \frac{2H}{1} a_z - \frac{2H^2}{R_s a_y} \right] + \frac{2a_y}{1} \left[ 1 + \frac{H^2}{2R_s^2} \right] R_B$$

$$= A(t) + B(t)R_B \quad (8)$$

在上式中建立了可分离的运动参数和多普勒调频率之间的关系,可以根据式(8)从多普勒调频率的估计值中提取运动误差参数。于是,可利用上式的关系对  $R_B$  作一次线性拟合,并取一次项系数  $B(t)$ , 即可得到  $a_y$ ,

$$a_y = \frac{2IR_s^2}{2R_s^2 + H^2} B(t) \quad (9)$$

根据式(9),我们对式(8)中的  $A(t)$  减去  $a_y$ , 即可得到只有  $v$  和  $a_z$  有关的常数项  $C(t)$ ,

$$C(t) = -\frac{2v^2}{1} - \frac{2}{1} a_z H \quad (10)$$

而经验规律认为速度引起的调频率是慢变的,而加速度引起的是快变的,所以实际中我们可以通过低通滤波和高通滤波分离  $v$  和  $a_z$ <sup>[7,9]</sup>。

### 3.5 沿 Y、Z 方向的运动补偿

已知  $a_y$ 、 $a_z$  数值,则通过二重定积分可计算出瞬时径向斜距误差

$$R_c(t) = \int_0^s \int_0^s (a_y \sin\theta - a_z \cos\theta) dudv \quad (11)$$

$$\Phi_{comp} = \exp \left[ j \frac{4\pi}{1} R_c(t) \right] \quad (12)$$

由式(11)可知,由于瞬时径向斜距误差  $R_c(t)$  在距离向是慢变的,所以在很多情况下可以按照场景中心的斜距误差用平移来补偿整个距离向的包络误差。至于相位误差可以简单地对每个距离单元乘上式(12)的相位补偿因子来补偿,并且该相位因子应该是随着距离而变化的。

### 3.4 沿航向(X方向)运动补偿

上面我们补偿了径向(Y和Z)的运动误差,回波的多普勒调频率写为

$$K(t) = -\frac{2v^2}{R_B} \quad (13)$$

则回波信号的时域相位历程可以写为

$$\Phi(t) = 2p \int_{t_n}^t \int_{t_n}^t K(u) dudv \quad (14)$$

式中  $t_n$  为天线相位中心到达  $X_n$  点的时刻,即有  $X_n = X(t_n)$ 。另外  $K$  可以写为

$$K = -\frac{2V^2}{R_B} - \frac{2}{R_B} (v^2 - V^2) \quad (15)$$

式中  $V$  为天线相位中心沿理想航迹的理想速度,若令  $K_c = -\frac{2V^2}{R_B}$ ,  $\Delta K = -\frac{2}{R_B} (v^2 - V^2)$ 。这样,式(14)可以进一步写为

$$\Phi(t) = pK_c(t - t_n)^2 + 2p \int_{t_n}^t \int_{t_n}^t \Delta K(u) dudv \quad (16)$$

上式中第一项是想保留的相位历程,后一项是需要补偿掉的。于是构造补偿函数

$$\Phi_{comp}(t) = 2p \int_0^t \int_0^t \Delta K(u) dudv \quad (17)$$

用式(17)补偿式(16),可得

$$\Phi(t) - \Phi_{comp}(t) = pK_c(t - t_n)^2 - 2p \int_0^t \int_0^t \Delta K(u) dudv$$

$$\cdot \int_{t_n}^t \int_{t_n}^t \Delta K(u) dudv$$

$$= pK_c(t - t_n - t_n)^2 + \Phi \quad (18)$$

式中  $t_n = \frac{1}{K_c} \int_0^t \Delta K(u) du$ 、 $\Phi_n$

$$= -2pK_{ct}t_n t_n - pK_{ct}t_n^2 - 2p \int_0^{t_n} \int_{t_n}^{\infty} \Delta K(u) du ds.$$

从式(18)可以看到, 信号相位的扰动项已被补偿掉, 多普勒调频率变为常数. 补偿过程带来的常数相位  $\phi_0$  不影响压缩, 时移  $t_n$  仅对目标的方位向位置有影响, 可以通过几何形变校正来补偿<sup>[8]</sup>.

### 3.5 基于回波数据的 UAV-SAR 平动误差补偿操作流程

基于回波数据的 UAV-SAR 平动补偿的处理步骤如图 3 的流程图所示. 我们首先对原始数据进行距离和方位分块估计 Doppler 参数, 进而得到沿径向的运动误差信息; 再对距离维数据进行如式(11)的包络平移和式(12)随距离变化的相位校正; 然后再次方位分块进行距离压缩、二次距离压缩、距离徙动校正; 并在方位各子块内估计 Doppler 参数, 在短时间内, 假定飞机速度, 雷达的视角不变情况下, 根据距离走动率、多普勒中心和多普勒调频率, 与斜视角、速度、场景中心距离的关系, 可从每个短时间段估计的多普勒参数中获得每子段时间内载机前向速度, 然后通过曲线拟合, 得到各个时刻的瞬时速度的估计; 接着对方位子块合并, 利用瞬时调频率误差如式(17)构造相位补偿函数, 补偿沿航向运动误差所引起的相位误差; 最后是方位压缩、多视处理、几何形变校正和自聚焦处理.

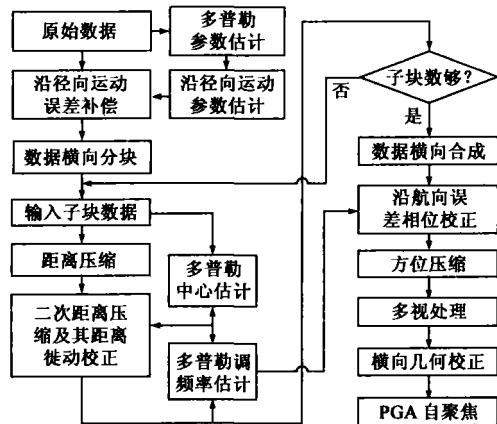


图 3 基于数据的 UAV-SAR 平动误差补偿流程图

## 4 UAV-SAR 实测数据运动补偿处理结果

本次录取数据的载机是低空无人机, UAV 飞行高度为 1900m, 场景中心距离为 13km, SAR 雷达工作在正侧视. 此时可见雷达波束的擦地角很小, 回波较弱, 并且载机飞得很低, 受到气流的扰动较大, SAR 成像运动补偿处理起来较为困难. 图 4(a) 是惯导输出的航向角, UAV 的机头指向在  $3.3^\circ \sim 8.7^\circ$  之间做类正弦的摆动, 图 4(b) 是惯导输出的 UAV 速度经过积分得到位置误差, 它在 100s 的观测时间内做类正弦变化, 最大误差为 4.5m, 而对于 X 波段只有几厘米的波长来说, 这样的变化可以使得方位相位模糊好多次, 由此可见 UAV 在数据录取时有较大运动误差.

故要想得到较好的成像效果就必须对 SAR 系统进行运动补偿. 在本次飞行试验过程中, 通过调整天线的方位角来补偿 UAV 的偏流误差, 使得天线的方位角和 UAV 的偏流角保持垂直关系, UAV-SAR 保持正侧式工作. 图 4(c) 是从惯导输出的 UAV 偏流角随飞行时间的变化, 图中载机做类正弦偏流变化(幅度为  $-4^\circ \sim 0^\circ$ ), 若不补偿, SAR 雷达将在正侧和小斜视下交替工作, 这样会给 Doppler 滤波和实时处理造成困难. 图 4(d) 是惯导输出的天线方位角的变化. 比较图 4(c) 和图 4(d) 可知天线的方位角和 UAV 的偏流角满足第二节中式(1), 两者之差基本上等于  $90^\circ$ . UAV 的滚转如图 4(e), 它是幅度为  $2^\circ$  的低频正弦摆, 这会使得天线波束在场景中进行  $2^\circ$  左右的正弦摆动, 但有图 4(f) 可见, 通过控制天线的俯仰指向可以补偿 UAV 横滚的影响, 并且两者的角度关系基本满足式(2), 使得雷达波束指向基本稳定在初始设定的  $8.6^\circ$  的位置, 这样在飞行过程中雷达天线波束始终指向固定的场景.

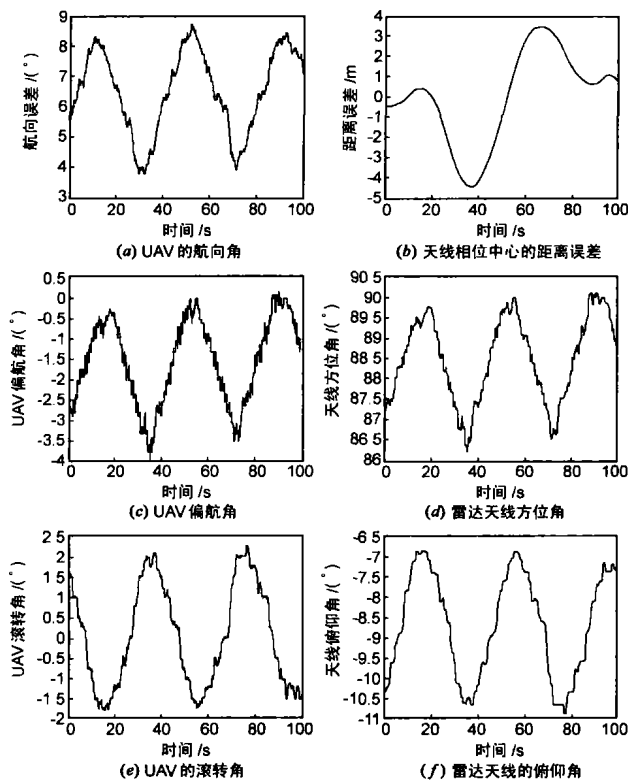
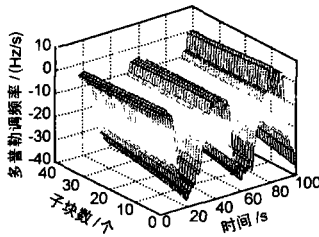


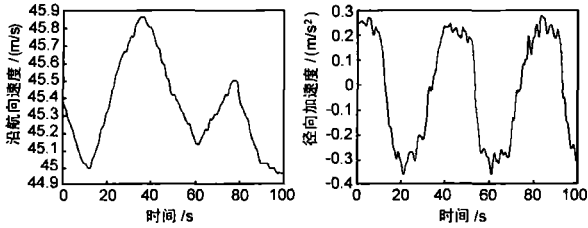
图 4 惯导中得到的 UAV-SAR 运动参数

经过上述的天线伺服系统补偿 UAV 的转动运动后, SAR 雷达的波束基本上稳定在所要观测的场景上, 但是天线相位中心的平动误差还是比较大, 这可以由图 5(a) 中的瞬时多普勒调频率值来反映, 其中图 5(a) 中的场景中心距离所对应的瞬时 Doppler 调频率在  $(-28.583 \sim 5.482)$  之间振荡, 图 5(b) 和图 5(c) 是利用 3.2 节的方法从 Doppler 调频率中估计出来的天线相位中心沿航向速度和径向加速度, 图 5(b) 中 UAV 速度基本在  $(45m/s \sim 45.9m/s)$  之间

变化,对应的 Doppler 调频率为  $-11.5\text{Hz/s}^2$  左右,但是由于图 5(c) 中的径向加速度比较大,使得图 5(a) 中的回波 Doppler 调频率值时正时负,并且振荡振幅较大.图 6(a)



(a) UAV-SAR 实测数据的瞬时多普勒调频率值



(b) 天线相位中心的沿航向瞬时速度 (c) 天线相位中心的沿径向瞬时加速度

图 5 UAV-SAR 实测数据参数分析

是利用惯导中的运动参数直接成像的结果,由于天线相位中心的平动误差较大,多普勒调频率变化较大,所以图中的成像结果很模糊,场景中的目标无法分辨,另外,由于较大的运动误差造成回波数据的包络不对齐,进而使得估计出来的多普勒参数也存在误差,这样图 6(a) 中的景物有明显的几何形变和错位.为了得到较为理想的图像,我们应用本文在第三节中所论述的基于瞬时调频估计运动补偿方法来对付 UAV 平动误差,操作步骤如图 3 的流程图所示.在此为了考虑运动参数估计的精度和效率,我们以  $20\text{m} \times 96\text{m}$  (方位  $\times$  距离) 对数据进行分段,并用 MD 方法估计调频率,分离出沿径向的运动误差信息,并进行沿径向运动误差所引起的回波包络误差和相位误差校正,接着利用 CS 算法进行距离压缩、二次距离压缩、距离徙动校正;然后再次估计 Doppler 参数,用瞬时调频率误差构造相位补偿函数对数据进行沿航向运动误差补偿,最后进行方位压缩、几何形变校正和多视抑制相干斑处理,这里的几何形变校正主要校正沿航向运动误差相位补偿时所引

入的图像形变,而多视处理不但抑制了相干斑,而且使得图像的距离和方位采样间隔一致.图 6(b) 是经过上述基于数据运动补偿后的 SAR 成像结果,图中的城镇、村庄、道路、田野、山脉等目标清晰可见,图像对比度也较好.可见 UAV-SAR 系统应用本文所论述的补偿方法后,能够得到质量较高的 SAR 图像.

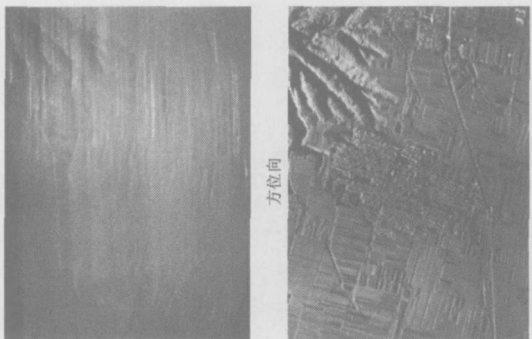
### 5 结束语

本文根据 UAV-SAR 的运动误差形式,论述了一种有效的运动误差补偿方法,该方法利用雷达天线伺服系统调整雷达的波束指向来补偿 UAV 的转动误差,平动误差通过从多普勒调频率中估计出的平动误差分量对数据分别进行包络和相位补偿来完成.并且实测数据处理的结果验证了该方法的有效性.

致谢 感谢中国电子科技集团 14 所提供 SAR 实测数据.

### 参考文献:

- [1] 曹福祥. 机载合成孔径雷达运动补偿研究[D]. 西安: 西北工业大学, 1997.
- [2] D E Wahl, P H Eichel, D C Ghiglia, C V Jr Jakowatz. Phase gradient autofocus —A robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. IEEE Trans on AES, 1994, 30(3): 827– 834.
- [3] S I Tsunoda, F Pace, J Stence, W H Hensley, A W Doerry, B C Walker. Lynx: A high-resolution synthetic aperture radar[A]. Aerospace Conference Proceeding[C]. USA: IEEE, 2000. 3(5): 51– 58.
- [4] 邢孟道, 保铮. 基于运动参数估计的 SAR 成像[J]. 电子学报, 2001, 29(12A): 1824– 1828.  
XING Meng-dao, BAO Zheng. Motion parameter estimation based SAR imaging[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12A): 1824– 1828. (in Chinese)
- [5] 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 Chinese)
- [6] 黄源宝, 等. 载机速度不稳对 SAR 的影响及补偿方法[A]. CSAR 2003[C]. 合肥: 中国电子学会无线电定位技术分会, 2003. 323– 326.
- [7] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 185– 216.
- [8] W G Carrara, R S Goodman, R M Majewski. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms[M]. Boston: Artech House, 1995. 245– 254.



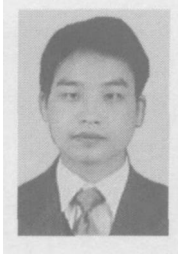
(a) 未运动补偿的 UAV-SAR 图像 (b) 运动补偿后的 UAV-SAR 图像

图 6 UAV-SAR 实测数据成像结果

[9] J R Moreira. A new method of aircraft motion error extraction from radar raw data for real time motion com-

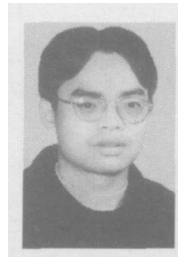
pensation[J]. IEEE Trans on GRS, 1990, 28(4): 620-626.

#### 作者简介:



周 峰 男, 1980 年 1 月出生於河南省通許縣, 2005 年 6 月在西安電子科技大學獲工學碩士學位, 現為雷達信號處理國家重點實驗室博士生, 主要研究方向為雷達成像、動目標檢測和 SAR 干擾研究.

E-mail: fzhou@mail.xidian.edu.cn



邢孟道 男, 1975 年 11 月出生於浙江, 1997 年 7 月在西安電子科技大學電子工程學院獲工學學士學位, 同年免試推薦為本校雷達信號處理國家重點實驗室碩博連讀生, 2002 年 5 月獲西安電子科技大學信號與信息處理專業工學博士學位, 現為西安電子科技大學教授. 發表論文 40 余篇, 承擔課題十餘項. 主要研究方向為雷達成像、目標識別和天波超視距雷達信號處理.

E-mail: xmd@mail.xidian.edu.cn