

一种机载大斜视 SAR 运动补偿方法

周 峰,王 琦,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: 大斜视合成孔径雷达(SAR)成像要求较长的合成孔径,这样载机的不平稳性对其影响较大,如何对大斜视 SAR 进行运动补偿是实现大斜视成像的关键.本文根据大斜视 SAR 成像的几何模型,推导出大斜视 SAR 的瞬时多普勒调频率表达式,并利用从数据中估计得到的多普勒调频率和运动平台的惯导参数来分离和估计运动误差的空间分量,然后利用所得的运动误差对大斜视 SAR 数据进行包络和相位的运动误差校正.本文所提出的大斜视 SAR 运动补偿方法能和大斜视 SAR 成像算法很好地结合,并且仿真和实测数据的成像结果验证了该方法的有效性.

关键词: 机载 SAR; 大斜视; 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 (2007) 03-0463-06

A Novel Method of Motion Compensation for Airborne High Squint Synthetic Aperture Radar

ZHOU Feng, WAN Qi, XING Meng-dao, BAO Zheng

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

Abstract: Long synthetic aperture is required in high squint SAR imaging, which is severely influenced by the nonstationarity of airplanes. Therefore, motion compensation is crucial in high squint SAR data processing. A motion compensation approach integrated with the imaging algorithm is proposed. Firstly, the expression of instantaneous Doppler chirp rate is given according to the image geometry model of high squint SAR. Then, the components of motion errors are separated and estimated, using the Doppler chirp rate estimated from measured data and the parameters of inertia navigation system (INS). After that, the envelope and phase corrections are performed in high squint SAR data through the obtained motion errors. The effectiveness of the proposed approach can be verified by the imaging results of simulation data and measured data.

Key words: airborne synthetic aperture radar (SAR); high squint; motion compensation; instantaneous Doppler chirp rate

1 引言

大斜视合成孔径雷达(SAR)具有防区外探测能力,即可以不直接飞越某一地区而能对该区域的地物目标进行观测.它在资源勘探、国境侦察、战场侦察和战场精确打击等应用中发挥着重要的作用,并且随着 SAR 雷达朝着多模方向的发展,斜视 SAR 已经是 SAR 雷达的一种工作模式.但是斜视 SAR 与正侧视 SAR 相比,它具有较为复杂的成像几何模型和较长合成孔径的特点,这样使得斜视 SAR 数据在方位和距离耦合比较严重,进而使得 SAR 成像算法和运动补偿较难实现.特别是大斜视 SAR(斜视角大于 45°),严重的距离和方位向的耦合突出表现为较大的距离走动,这使得大斜视 SAR 成像算法不易实现,而较长的合成孔径使得在 SAR 成像

处理中对载机的运动误差测量和补偿都提出更高的要求,如何对大斜视 SAR 数据进行运动补偿并精确成像一直是 SAR 领域的研究难题.文献[1]利用扩展 CSA 算法并结合 RDM^[2]的运动补偿方法进行成像,但是在在大斜视的条件下,扩展 CSA 算法的应用会受到限制,而且 RDM 的运动补偿方法是根据经验值利用滤波器从多普勒调频率中分离运动误差分量,另外,该运动补偿方法是建立在二维运动误差分量分析的基础上,所以在在大斜视 SAR 成像中该方法的精确性受到了一定的限制.

文献[3,4]对基于数据的 SAR 运动补偿技术做了详细的研究,但是这些方法适用于正侧视 SAR,对大斜视 SAR 数据处理有些困难.本文利用 SAR 回波数据并结合部分惯导参数对大斜视 SAR 运动补偿进行了进一步的研究.本文所提出的斜视运动补偿方法是建立在斜

视 SAR 成像的几何模型上,根据斜视模型推导出较为精确的多普勒参数和运动分量之间的对应关系式,然后利用 SAR 数据的多普勒参数和载机的部分惯导参数求出各个运动误差分量,并对数据进行相应的运动误差补偿.成像算法使用时域距离走动校正的 R-D 算法^[5,6],该成像算法可以克服大斜视 SAR 严重的距离走动,虽然同时出现方位聚焦深度的限制,但是通过方位分段估计多普勒调频率并进行方位聚焦可以解决此问题.本文所述的斜视 SAR 运动补偿方法能够和时域距离走动校正的 R-D 算法很好地结合,文中仿真和实测数据处理的结果表明该方法对大斜视 SAR 数据处理具有较好的成像效果.

2 大斜视 SAR 运动补偿原理

斜视 SAR 的成像几何模型是斜视运动误差分析的基础.本节首先建立成像几何模型,然后从几何模型出发推导出运动误差和多普勒参数的关系,然后给出运动误差分量的求解方法,最后根据所求的运动误差对数据进行运动补偿.

2.1 大斜视 SAR 运动误差分析

如图 1 所示为存在运动误差的斜视 SAR 成像几何模型,图中载机沿 X 方向飞行,飞机高度为 H , 为斜视角(雷达波束指向和载机运动方向间夹角的余角),图中的实曲线为载机的实际航迹,相邻的虚线为理想航迹, t_m 为慢时间, $x(t_m)$, $y(t_m)$, $z(t_m)$ 分别为 X , Y , Z 方向的位置误差分量,设 P_0 为合成孔径的中心位置, P_i 为该合成孔径中的任意点载机位置,其坐标为 $(Vt_m + x(t_m), y(t_m), H + z(t_m))$, R_s 为合成孔径中心到目标点的距离, R_n 为目标点到航线的最短斜距, T 为场景中的任意目标点,其坐标为 $(R_s \sin \alpha + x_n, y_n, 0)$, 并且考虑 Y , Z 方向的距离误差相对瞬时斜距来说是很小的,所以载机到目标的瞬时斜距可以表示为:

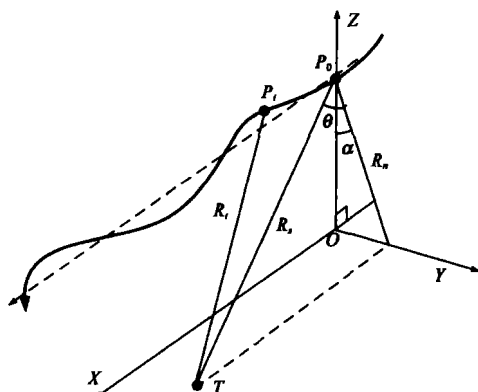


图 1 存在运动误差的斜视 SAR 成像几何模型

$R_t(t_m)$

$$= \sqrt{(Vt_m + x(t_m) - R_s \sin \alpha - x_n)^2 + (y(t_m) - y_n)^2 + (z(t_m) + H)^2}$$

$$\sqrt{(Vt_m + x(t_m) - R_s \sin \alpha - x_n)^2 + R_s^2 \cos^2 \alpha} + \frac{-y(t_m) R_n \sin \alpha + z(t_m) R_n \cos \alpha}{\sqrt{(Vt_m + x(t_m) - R_s \sin \alpha - x_n)^2 + R_s^2 \cos^2 \alpha}} \quad (1)$$

其中 $\cos \alpha = H/R_n$, $\sin \alpha = \sqrt{1 - (H/R_n)^2}$, 若在正侧视或小斜视的窄带 SAR 系统中, 可认为 $R_n/\sqrt{(Vt_m + x(t_m) - R_s \sin \alpha - x_n)^2 + R_s^2 \cos^2 \alpha} \approx \cos \alpha$, 然而在大斜视不可以这样近似. 为了进一步地分离三个空间误差分量, 再对式(1)进行关于 $(Vt_m + x(t_m) - x_n)$ 的 Taylor 级数展开如下:

$$R_t(t_m) \approx R_s \sin \alpha + (Vt_m + x(t_m) - x_n) \cos \alpha + \frac{\cos^2 \alpha}{2 R_s} (Vt_m + x(t_m) - x_n)^2 + \frac{\sin \alpha \cos^2 \alpha}{2 R_s^2} (Vt_m + x(t_m) - x_n)^3 + \left(-\frac{y(t_m) R_n \sin \alpha + z(t_m) R_n \cos \alpha}{R_s} + \left(\frac{1}{R_s} + \frac{\sin \alpha}{R_s^2} (Vt_m + x(t_m) - x_n) \right) \right) (Vt_m + x(t_m) - x_n)^2 \quad (2)$$

由于载机和目标的相对运动会产生多普勒信息, 所以由式(2)可得到目标点的瞬时多普勒频率为

$$f_d(t_m) = -\frac{2}{\lambda} \frac{d}{dt_m} (R_t(t_m)) = -\frac{2}{\lambda} \sin \alpha v_x(t_m) - \frac{2 \cos^2 \alpha}{R_s} (Vt_m + x(t_m) - x_n) v_x(t_m) - \frac{3 \sin \alpha \cos^2 \alpha}{R_s^2} (Vt_m + x(t_m) - x_n)^2 v_x(t_m) + \frac{2 R_n}{\lambda} (v_y(t_m) \sin \alpha - v_z(t_m) \cos \alpha) \left(\frac{1}{R_s} + \frac{\sin \alpha}{R_s^2} (Vt_m + x(t_m) - x_n) \right) + \frac{2 R_n \sin \alpha}{R_s^2} (y(t_m) \sin \alpha - z(t_m) \cos \alpha) v_x(t_m) \quad (3)$$

上式中 $v_x(t_m) = V + v_x(t_m)$, 并且当 $(Vt_m + x(t_m) - x_n) = 0$, 可得到多普勒中心频率为:

$$f_{dc} = \frac{2}{\lambda} \sin \alpha v_x(t_m) + \frac{2}{\lambda} \cos \alpha (v_y(t_m) \sin \alpha - v_z(t_m) \cos \alpha) + \frac{2 R_n \sin \alpha}{R_s^2} (y(t_m) \sin \alpha - z(t_m) \cos \alpha) v_x(t_m) \quad (4)$$

根据式(3)可得到瞬时多普勒的瞬时调频率如下

$$k_d(t_m) = \frac{d}{dt_m} (f_d(t_m)) = \frac{2}{\lambda} \sin \alpha a_x(t_m) - \frac{2 \cos^2 \alpha}{R_s} v_x^2(t_m) + \frac{2 \cos \alpha}{\lambda} (a_y(t_m) \sin \alpha - a_z(t_m) \cos \alpha) + \frac{4 \cos \alpha \sin \alpha}{R_s} (v_y(t_m) \sin \alpha - v_z(t_m) \cos \alpha) v_x(t_m) \quad (5)$$

式中 v_x , v_y , v_z , a_x , a_y , a_z 分别是 X , Y , Z 方向的速度误差和加速度误差, 并且上式中忽略了空变项, 至此得到了运动误差与多普勒信息的对应关系式, 这样就可以通过从 SAR 数据中估计出的多普勒信息求出运

动误差分量.但是多普勒中心估计一般是在能量均衡的基础上,它对天线方向图的对称性和成像场景的均匀性要求较高,故多普勒中心的估计一般不太可靠.相比之下多普勒调频率对相干积累的相位比较敏感,如 MD^[7],最大对比度^[8]等方法都可以相当准确地估计出多普勒调频率,而且这些方法的实现也比较成熟,在此就不过多地展开论述了.

由式(5)可以看出,斜视角的指向控制误差将影响多普勒调频率的估计精度,进而影响运动参数的估计精度,故需要分析斜视角的控制精度要求,由式(5)对求导可得,

$$k_d(t_m) = \frac{\partial k_d(t_m)}{\partial} = \frac{2}{R_s} \cos a(t_m) + \frac{2 \sin 2}{R_s} v_x^2(t_m) - \frac{2 \sin}{R_s} (a_y(t_m) \sin - a_z(t_m) \cos) + \frac{4 \cos 2}{R_s} (v_y(t_m) \sin - v_z(t_m) \cos) v_x(t_m) \quad (6)$$

当斜视角误差所引起的相位误差小于 $\pi/2$ 时,斜视角误差可忽略,由式(7)可以得到斜视角的控制精度要求.

$$\frac{1}{4 \int_0^{t_m} k_d \, duds} \quad (7)$$

另外,若把 $R_s = H/(\cos \cos)$ 带入式(5)则可以发现 v_x 与 a_z 是耦合的.但是在实测数据处理时,一般我们把惯导中载机的地速(载机相对于地球速度的水平分量,其方向为航迹方向)作为沿航向速度 v_x ,地速的导数作为 a_x ,所以我们可以根据精确的多普勒调频率值和惯导中的沿航向速度参数解算出运动误差分量.

一般条带式 SAR 的距离维场景较大,不同的距离单元对应着不同的多普勒调频率,这为解算运动误差提供了方便.当 t_m 取合成孔径时间内的某一固定时刻,若 $t_m = t_0$ 时,不同距离单元 $R_{s1}, R_{s2}, \dots, R_{sm}$ 对应的多普勒调频率为 $k_{d1}, k_{d2}, \dots, k_{dm}$,则

$$K_d = A_0 + AX \quad (8)$$

其中: $K_d = [k_{d1}, k_{d2}, \dots, k_{dm}]^T$

$$A_0 = \left[\frac{2}{R_{s1}} \sin a_x(t_0) - \frac{2 v_x(t_0) \cos^2}{R_{s1}}, \frac{2}{R_{s1}} \sin a_x(t_0) - \frac{2 v_x(t_0) \cos^2}{R_{s2}}, \dots, \frac{2}{R_{sm}} \sin a_x(t_0) - \frac{2 v_x(t_0) \cos^2}{R_{sm}} \right]^T$$

$$A = \left[\frac{2}{R_{s1}} \cos \sin i, -\frac{2}{R_{s1}} \cos \cos i, \frac{4}{R_{s1}} \sin \cos \sin i v_x(t_0), -\frac{4}{R_{s1}} \sin \cos \cos i v_x(t_0) \right]$$

$$\cos i = H/(R_{si} \cos), \sin i = \sqrt{1 - [H/(R_{si} \cos)]^2}, i = 1, 2, \dots, m$$

$$X = [a_y(t_0), a_z(t_0), v_y(t_0), v_z(t_0)]^T$$

式(8)显然为一个线性方程组,为了提高估算的精度,一般利用多个距离单元的调频率,即 A 为列满秩矩阵 ($m > 4$).通常 t_0 时刻的速度和 t_0 前时刻的加速度是相关,而与 t_0 时刻的加速度的相关性较小,特别是运动误差变化越剧烈时,当前的速度与当前加速度的相关性更小.所以求得 A 的 Mbor-Penrose 逆,带入式(8)即可得到式(9)所示的运动误差分量表达式

$$X = (A^H A)^{-1} A^H (K_d - A_0) \quad (9)$$

2.2 大斜视 SAR 运动补偿

对于大斜视 SAR 的运动补偿可以通过包络和相位的校正来完成,首先进行校正沿航向运动误差所引起的包络偏移,它是包含在时域走动校正和频域距离弯曲校正过程中,即利用存在运动误差的沿航向速度(地速 v_x)来构造走动和弯曲量

$$R_{eaw}(t_m) = \int_0^{t_m} v_x(u) \, duds - \text{mid} \left[\int_0^{t_m} v_x(u) \, duds \right] \quad (10)$$

$$R_{eac}(f_r, f_a) = \frac{R_s}{2c} \left(\frac{f_a}{2 v_x(t_m) \cos} \right)^2 f_r \quad (11)$$

式(11)中的 f_r, f_a 分别为距离频率和方位频率, c 为光速,由式(10)和式(11)的徙动量可通过平移来补偿沿航向的包络误差.接着进行沿垂直航向(Y 和 Z 方向)的包络校正.根据式(9)求得 a_y, a_z, v_y, v_z ,带入式(5)可求得垂直航向误差所引起的调频率误差 $K_{er}(R_{si}, t_m)$,

$$K_{er}(R_{si}, t_m) = \frac{2 \cos}{R_{si}} (a_y(t_m) \sin i - a_z(t_m) \cos i) + \frac{4 \sin \cos}{R_{si}} (v_y(t_m) \sin i - v_z(t_m) \cos i) \cdot v_x(t_m) \quad (12)$$

对式(12)进行二重定积分可计算出瞬时径向距离误差

$$R_{er}(R_{si}, t_m) = - \frac{1}{2} \int_0^{t_m} \int_0^s K_{er}(R_{si}, u) \, duds + V_{ri}(0) t_m + R_{ri}(0) \quad (13)$$

其中, $V_{ri}(0) = - \text{mean} \left[\frac{1}{2} \int_0^{t_m} K_{er}(R_{si}, u) \, du \right]$, $R_{ri}(0) = - \text{mid} \left[\frac{1}{2} \int_0^s \int_0^s K_{er}(R_{si}, u) \, duds + V_{ri}(0) t_m \right]$, 并且 mean, mid 分别表示取平均和取中值的操作符,这样保证了在合成孔径中心时刻斜视角是恒定的.由式(13)可通过平移来补偿垂直航向的包络误差.

在完成包络校正后可进行相位误差校正(包括垂直航向和沿航向的相位误差校正),已知运动误差参数,通过式(5)可得瞬时多普勒调频率 $K_d(R_{si}, t_m)$,若令沿航向的平均速度为 V ,这样可以得到多普勒调频率误差 K_e

$$K_e(R_{si}, t_m) = K_d(R_{si}, t_m) - K_{dc} \quad (14)$$

其中 $K_{dc} = \left[\frac{-2V^2 \cos^2}{R_{s1}}, \frac{-2V^2 \cos^2}{R_{s2}}, \dots, \frac{-2V^2 \cos^2}{R_{sm}} \right]^T$.

对式(14)做二重定积分可计算出相位误差,

$$\phi_e(R_{si}, t_m) = \int_0^{t_m} \int_0^s K_e(R_{si}, u) du ds + 2 \int_0^{t_m} f_i(0) t_m + \phi_i(0) du \quad (15)$$

其中 $f_i(0) = -\text{mean} \left[\int_0^{t_m} K_e(R_{si}, u) du \right]$, $\phi_i(0) = -\text{mid} \left[\int_0^{t_m} \int_0^s K_e(R_{si}, u) du ds + f_i(0) t_m \right]$, 由式(15)可得误差相位校正函数如下

$$\text{cmp}(R_{si}, t_m) = \exp(-j\phi_e(R_{si}, t_m)) \quad (16)$$

所以在完成距离压缩、距离徙动校正、包络误差补偿和沿垂直航向的相位补偿之后,对 SAR 数据在不同的距离单元上乘以式(16)的校正函数即可完成沿航向的相位误差校正. 结合大斜视 SAR 运动补偿的成像算法将在下一节介绍.

3 结合运动补偿的大斜视 SAR 成像算法

大斜视 SAR 在距离和方位向有严重的耦合,特别是大的距离走动使得方位向信号不再满足驻相原理,这很难直接在多普勒域进行距离徙动校正和成像处理,这使得许多适用于正侧视 SAR 成像的算法失效了.但是可使用时域校正距离走动的 R-D 算法进行成像处理,该算法是在时域通过平移消除大斜视 SAR 的距离走动,虽然会出现方位聚焦深度^[5,6]的限制,然而通过方位分段估计多普勒调频率,方位聚焦可以解决该问题,并且这一分段过程正是分段估计运动误差参数所需要的.

方位向聚焦深度 $|X_d|$ 可表示为

$$|X_d| = \frac{R_s^2}{2(L \cos \theta)^2 \sin \theta} \quad (17)$$

上式中 L 表示合成孔径的长度. 对于时域距离走动校正的 R-D 算法在相关文献^[5,6,9]已有较详细的论述,本节重点介绍该算法结合大斜视运动补偿的实现步骤.

如图2所示为结合运动补偿的大斜视 SAR 成像算法,该算法分为两部分,左边的虚线框图为运动参数估计,右边的虚线框图为结合运动补偿的时域距离走动校正的 R-D 算法. 在运动参数的估计中,先要把数据进行方位分段,分段的长度选择要考虑到方位聚焦深度和多普勒参数的估计精度. 接着距离压缩,并利用惯导提供的地速和斜视角进行走动校正(距离走动量如式(10)所示),消除快变的距离包络. 然后进行距离分段估计调频率,得到式(8)中不同距离单元所对应的调频率 K_d ,在该方位段中把地速的平均值作为 v_x ,把下一方位块的平均速度与本方位块的平均速度之差作为加速度

a_x ,并且由惯导提供的载机高度和场景距离可以得到不同距离单元所对应的俯仰角 θ ,这样根据式(9)可以算出运动误差参数 v_y, v_z, a_y, a_z . 对每个方位块都进行上述的操作可得到不同时刻的运动误差参数,然后进行三次样条插值即可得到不同慢时刻的运动误差 $v_y(t_m), v_z(t_m), a_y(t_m), a_z(t_m)$.

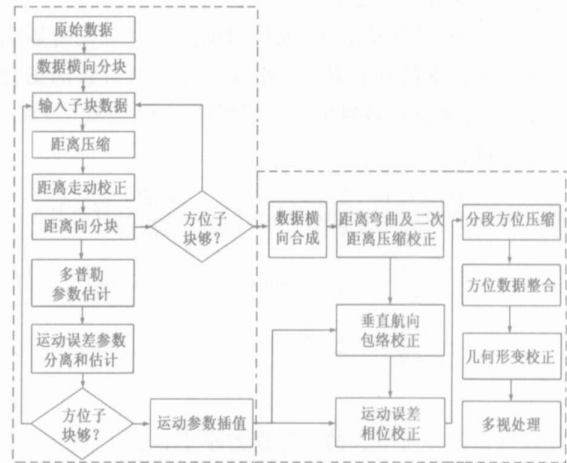


图2 结合运动补偿的大斜视 SAR 成像算法

R-D 算法是一种实时性较强的二维可分离算法,在前面的运动参数估计中已经做了距离压缩,距离走动校正. 下面把方位数据整合起来,接着对数据做二维 FFT,做距离弯曲和二次距离压缩校正,距离弯曲量可以参考式(11),二次距离压缩项为

$$\text{scr} = \exp \left[-j \frac{2 R_s (f_d / (2 v_x \cos \theta))^2}{c^2 \left(\sqrt{1 - (f_d / (2 v_x \cos \theta))^2} \right)^2} 3 f_r^2 \right] \quad (18)$$

根据式(13)的垂直航向包络偏移量对数据进行平移校正,可以补偿包络误差,接着做二维 IFFT,并在方位和距离二维时域平面内进行如式(16)的误差相位补偿. 接着进行方位分段压缩,然后是几何形变校正,斜视 SAR 的几何形变校正可以分为两步完成. 首先是对距离几何形变的校正,因为距离几何形变是在时域距离走动校正中产生的,所以可以通过距离走动校正的逆过程校正该几何形变,在距离上将图像移动如式(10)的平移量. 其次是方位几何形变校正,该过程为直角坐标系和斜视坐标系间的坐标转换,即在方位向将 SAR 图像移动 $R_s \sin \theta$ 即可. 最后做多视处理来提高图像质量.

4 仿真数据处理结果

存在运动误差的大斜视 SAR 仿真数据的雷达参数如表1所示. 场景中有正方形分布的9个点目标,点间距为50米. 沿航向(X 方向)、垂直航向(Y, Z 方向)的位置误差分别为 $10 \cos(0.1 t)$ 、 $10 \sin(0.1 t)$ 和 $10 \cos(0.1 t)$,其中运动误差的频率为0.05Hz,该频率是参考某小型机载 SAR 某次不平稳飞行的运动参数,并对其误差幅度做了5倍放大. 并且由式(7)可以知道

此时斜视角的指向控制精度要求为 0.02° , 这对常规的测量控制单元来说是比较容易实现的。

根据表 1 所示的参数可知, 方位向数据长度大于方位向聚焦深度, 故把方位数据分为两个子块处理来克服方位向聚焦深度的限制。在估计多普勒调频率时, 数据在距离上分为 8 段(每段包含 256 个距离采样单元)。图 3(a) 和 (b) 为估计的 Y 和 Z 方向的加速误差曲线, 图中实线为实际的加速度误差, 虚线为估计的加速误差, 它们的标准差分别为 0.0208 和 0.0125。图 3(c) 是在几何形变校正前, 某一点目标运动补偿前后的方位向脉冲响应(IPR) 曲线, 并且做方位匹配滤波时信号进行

了汉明加权, 图中的虚线为未补偿直接成像的结果, 由于存在着较大的运动误差, 故在方位压缩时信号存在着较严重的失配, IPR 没有积累起来。而实线为运动补偿后的方位向脉冲响应曲线, 运动补偿后 IPR 的脉冲宽度比为 2.1, 峰值旁瓣比为 -23.2dB, 积分旁瓣比为 -17.8dB, 可见应用本文所提方法的运动补偿后成像效果明显地提高了。图 3(d) 和 3(e) 分别为运动补偿前和补偿后的 SAR 图像。由于运动误差的存在, 图 3(d) 中的点目标在方位向上不能很好地聚焦, 点目标在方位向模糊一片, 并且点目标的位置也有偏移。但运动补偿后, 在图 3(e) 中可以得到清晰的点目标 SAR 图像。

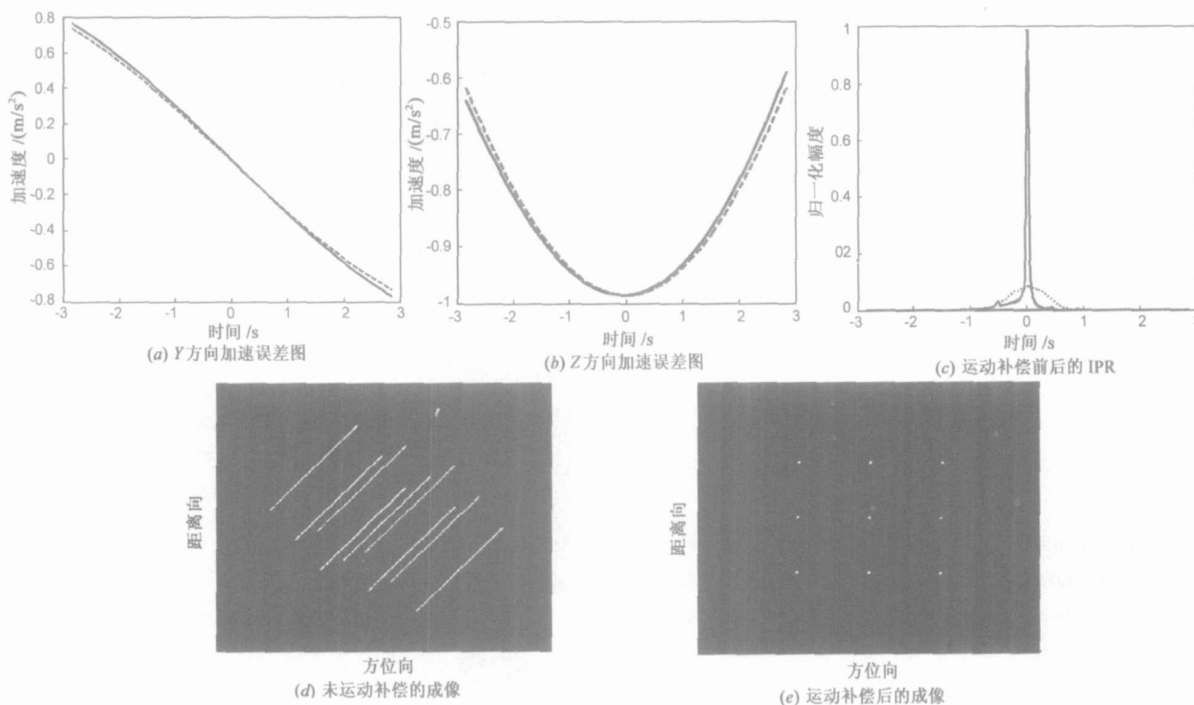


图 3 仿真数据处理的结果

表 1 仿真数据的雷达参数

波长	0.0195m	发射信号带宽	80MHz	调频率	$1.33 \times 10^{13} \text{H/s}^2$
载机理想速度	107m/s	载机高度	4000m	斜视角	50°
分辨率(加窗)	3m × 3m	场景中心距离	23km	方位聚焦深度	554m
脉冲重复频率	500Hz	方位波束宽度	1.5°	方位向采样数	4096

5 实测数据处理结果

本批数据为某次试飞所录取的分辨率为 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 的机载条带式大斜视 SAR 数据。雷达工作在 X 波段, 脉冲重复频率为 1000Hz, 飞行高度为 2800m, 场景中心斜距为 31.4km, 斜视角为 50° 。载机装有 INS(惯性导航设备)可以为载机提供较为准确的运动参数, 其中包括较

为精确的地速, 并且在 SAR 雷达上装配了 IMU(惯性测量单元)可以测量雷达的运动状态, 通过伺服系统来稳定雷达的波束指向。在数据处理中斜距向场景宽度为 6.2km, 斜距向回波共有 4096 个采样点, 以每段 256 个采样点来分段可以分为 16 段, 即每次用 16 个方程来解算该孔径位置的运动误差参数。由于方位聚焦深度为 346m, 方位向以 280m(2048 个采样点)进行方位分块。图 4(a) 是直接利用惯导参数成像的结果, 即利用惯导中的侧向速度补偿载机的径向运动误差, 利用平均地速构造的方位匹配函数进行成像的 SAR 图像(为了清楚的对比, 图 4 为截取的部分图像)。虽然载机的测量系统较为精确, 但是载机飞行较低, 在对流层中会受到气流的扰动, 故图 4(a) 虽能得到场景的图像, 但是图中的目标在方位向有明显的散焦和图像形变。图 4(b) 是使用本文方法运动补偿后的成像结果, 可以明显地看

出,利用式(9)得出的运动误差估计对数据进行运动补偿后,图4(b)中的场景目标聚焦效果较好,图中的村庄、公路和田野清晰可见,SAR成像质量得到了较大提高。

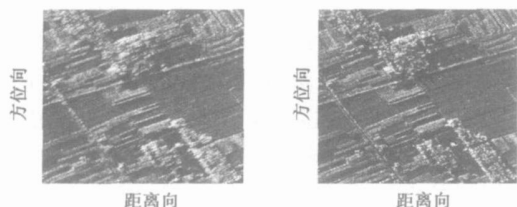


图4 大斜视SAR实测数据成像结果

6 结束语

本文针对大斜视SAR的特性进行了分析,推导出适合大斜视SAR的多普勒参数和运动误差参数的对应关系式,并结合从SAR数据中估计出来的调频率参数和惯导提供的地速进行运动参数估计,再利用时域距离走动校正的R-D成像算法对大斜视数据进行成像处理,实验结果表明该运动补偿方法可以得到质量较高的大斜视SAR图像。

致谢 感谢中国电子科技集团14所提供大斜视SAR实测数据。

参考文献:

- [1] Alberto. Morreira, Yonghong. Huang, Airborne SAR processing of highly squint data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation[J]. IEEE Trans on GRS, 1994, 32(5): 1029 - 1040.
- [2] J R Moreira. A new method of aircraft motion error extraction from radar raw data for real time motion compensation[J]. IEEE Trans on GRS, 1990, 28(4): 620 - 626.
- [3] 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, 2004, 32(12A): 1824-1828. (in Chinese)
- [4] 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, 2003, 33(3): 459 - 462.
HUANG Yuan-bao, 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)
- [5] 黄源宝, 保铮. 大斜视SAR成像的一种新的二维可分离处理方法[J]. 电子与信息学报, 2001, 27(1): 1 - 5.
- [6] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 146 - 151.
- [7] R Bamlaer. A comparison of range-doppler and Wavenumber domain SAR focusing algorithm [J]. IEEE Trans on GRS, 1992, 30(1): 706 - 713.
- [8] F Berizzi, G Corsini. Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contract optimization [J]. IEEE Trans on AES, 1996, 32(6): 1185 - 1191.
- [9] R Bamlaer. A comparison of range-doppler and Wavenumber domain SAR focusing algorithm [J]. IEEE Trans on GRS, 1992, 30(1): 706 - 713.

作者简介:



周峰男, 1980年1月生于河南省通许县, 2005年6月在西安电子科技大学获工学硕士学位, 现为雷达信号处理国家重点实验室博士生, 主要研究方向为雷达成像、运动目标检测和SAR干扰研究。
E-mail: fzhou@mail.xidian.edu.cn



王琦男, 1972年3月生于河北省武安市, 2004年6月在西安电子科技大学获工学硕士学位, 现为雷达信号处理国家重点实验室博士生, 主要研究方向为ISAR成像、运动目标检测和ISAR干扰研究。E-mail: wanqi627@hotmail.com



邢孟道男, 1975年11月出生于浙江, 1997年7月在西安电子科技大学工程学院获工学学士学位, 同年免试推荐为本校雷达信号处理国家重点实验室硕博连读生, 2002年5月获西安电子科技大学信号与信息处理专业工学博士学位, 现为西安电子科技大学教授, 发表论文40余篇, 承担课题十余项, 主要研究方向为雷达成像、目标识别和天波超视距雷达信号处理。
E-mail: xmd@mail.xidian.edu.cn



保铮男, 1927年12月出生于江苏省南通市, 现为西安电子科技大学教授、博士生导师、中国科学院院士、中国电子学会会士, 主要研究方向为雷达信号处理。