

文章编号:1004-9037(2014)04-0590-07

基于回波信号的环视 SAR 成像运动参数估计

赵 亮 毛新华 吴 迪

(南京航空航天大学电子信息工程学院,南京,210016)

摘要:环视合成孔径雷达(Circular-scanning SAR)主要用于在导弹精确末制导中进行景象匹配,而雷达的运动参数是实现精确制导的关键因素之一。运动参数可以由 GPS 和 IMU 直接测得,也可以通过从实测数据中估计得出。由于环扫 SAR 雷达平台具有运动速度快、非匀速运动和大斜视等特点,因此对多普勒参数估计精度要求比较高。而由现有 GPS 和 IMU 测得的雷达运动参数由于具有较大误差一般很难满足成像精度要求,因此本文将两者结合针对实际雷达和运动情况,对运动参数作了精确估计和运动补偿,以适应环扫 SAR 高分辨率成像和精确制导的要求。仿真数据处理的结果表明,该方法能准确地实现上述参数估计,从而显著提高了环视 SAR 系统输出图像的质量。实测数据则证明了该方法具有很强的实用性。

关键词:环扫 SAR 成像;多普勒中心;参数估计

中图分类号:TN959.2⁺¹

文献标志码:A

Motion Parameter Estimate of Circular-Scanning SAR Imaging Based on Echo Signal

Zhao Liang, Mao Xinhua, Wu Di

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Circular-scanning SAR is mainly used for scene matching in the precision-guided missiles, where the motion parameters of radar are one of the key factors to achieve precision-guided. Motion parameters can be directly measured by the GPS and IMU, and also can be estimated from the measured data. The characteristics of fast velocity, non-uniform motion and big strabismus of the circular-scanning SAR platform require high quality of the SAR image. But the motion parameters measured by the GPS and radar IMU are difficult to meet the accuracy requirements since the large errors of motion parameters. By combining the two parameter estimations, accurate estimation and motion compensation are performed for the motion parameters in order to meet the requirements of high-resolution images and precision-guided. The simulation results verify the validity of the proposed scheme by improving the quality of circular-scanning SAR image. The results of measured data prove that the scheme is very practical.

Key words: circular-scanning SAR imaging; Doppler center; parameter estimation

引 言

合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)是一种高分辨成像雷达,与传统光学传感器相比,SAR具有全天时、全天候、远距离工作的优

点,是现代遥感领域的一项重要技术,具有重要的民用和军用价值。通过发射具有大时宽带宽积的线性调频信号并对接收信号进行脉冲压缩从而获得高的距离向分辨率,而方位向分辨率的提高则借助于目标和雷达的相对运动所形成的合成阵列天线和波束锐化技术。常用的机载 SAR 成像模式包

基金项目:国家自然科学基金(61301210,61301212,61201459)资助项目;中国博士后科学基金(2012M511750)资助项目;教育部博士点基金(20123218120021)资助项目;江苏省自然科学基金(BK20130815)资助项目。

收稿日期:2014-06-01;修订日期:2014-07-10

括聚束式、条带式 and 扫描式,如图 1(a~c)。这 3 种模式的成像区域均位于雷达平台航迹的一侧,但在某些特殊场合,如为导弹等精确制导武器提供景象匹配所需的图像信息时,需要即时获取飞行路线下方左右两侧环形区域的雷达图像,这时传统的雷达成像模式已无法满足要求,因此人们提出了环视 SAR 工作模式,如图 1(d)所示。环扫 SAR 系统通常采用景象匹配的方法来实现定位和制导,系统以区域地貌为目标特征,利用弹上雷达得到的目标或目标周围景物的实时高分辨率图像,与预存在弹上的基准图进行配准比较,得到导弹相对于目标或预定弹道的位置偏差,从而形成导引指令,控制导弹命中目标。导弹航迹具有时变性,尤其是在进入末制导阶段具有很大的瞬时下降速度。这种近似于抛物线的高速俯冲航迹使得环扫 SAR 系统总是工作在大机动、大斜视的状态下。为了实现精确匹配,环视 SAR 图像必需具备一定的几何准确度,进而对成像参数精度也提出了更高的要求。国内的一些高校和研究所主要研究方向和成果为:环视 SAR 成像算法优化,环视 SAR 雷达图像分辨率的提高,图像几何失真校正,图像拼接技术,环视 SAR 参数估计。文献[1,2]研究了几何失真校正处理中高度误差的估计和补偿方法^[1-2],而忽略了速度误差的影响。实际上,由于长时间的误差积累,现有惯导系统提供的速度值误差明显,严重影响了几何失真校正的精度和雷达位置的精确定位,从而严重降低了环视 SAR 系统输出图像的质量和导弹制导的性能。文献[3,4]详细介绍了传统的几种多普勒中心参数估计方法:能量均衡法、相关函数法、符号相关法、最大似然法^[4]等,由于环视 SAR 对多普勒中心的估计精度要求非常高,所以这几种传统的多普勒参数估计方法就不适合用于环视 SAR 成像参数估计了,文献[5]借助于多普勒导航的原理利用多个波束的多普勒中心频率反推雷达的三维速度,却没有充分利用每个波束不同距离门处点目标的多普勒中心频率不同这一信息,此外,雷达天线扫描角度的不准确性也不利于图像的无缝拼接^[6-8]。针对这些问题,本文研究了基于雷达回波数据的载机运动三维速度估计方法,根据环视 SAR 系统的特点并结合了多普勒导航技术的原理,在无任何辅助手段的条件下,通过对同一波束不同距离门处的点目标的多普勒参数估计和不同波束回波信号进行杂波中心频率测量,实现了对雷

达平台三维运动速度的估计。

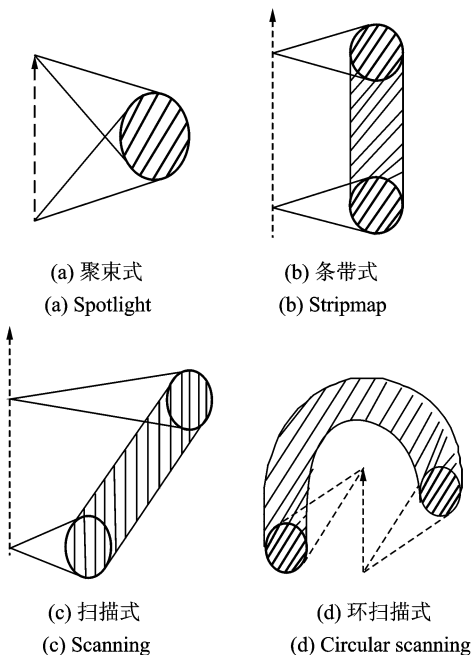


图 1 不同 SAR 成像模式

Fig. 1 Different imaging modes of SAR

1 传统的环视 SAR 参数估计方法

为了满足实时性的要求,采用基于子孔径的线性距离多普勒成像算法,子孔径成像几何关系如图 2 所示。 V_a 是雷达载体的飞行速度, φ 是波束俯仰角, θ_m 是天线波束下视角,两者是互余的关系。 φ_a 是扇环所对圆心角, θ_r 是雷达的方位角即雷达波束中心线地面投影与 x 轴正半轴的夹角。由图 2 可知,雷达波束在地面的投影为一扇形区域,而 r_0 , r_{\min} 和 r_{\max} 分别为地面波束投影区域的中心半径、内径和外径; R_{\min} , R_{mid} 和 R_{\max} 分别为天线相位中心与成像场景中心的中心斜距、最近斜距和最远斜距。已知雷达俯仰波束宽度和方位波束宽度分别为 β_r 和 β_a 。

根据文献[4]可得成像场景中心的点目标 B 的多普勒中心频率为

$$f_{\text{dcB}} = \frac{2}{\lambda} V_a \cos\theta_{\text{Att}} \quad (1)$$

式中 θ_{Att} 为 B 点所对应的多普勒锥角,根据各角度间的相互关系,有

$$\cos\theta_{\text{Att}} = \cos\theta \cos\varphi \quad (2)$$

式中 V_a 为雷达载体速度,它可以表示成向量 $\mathbf{V}_a = [V_x, V_y, V_z]$ 。所以式(1)可以写成

$$f_{\text{dcB}} = \frac{2}{\lambda} (\mathbf{V}_x \cos\theta \cos\varphi + \mathbf{V}_y \sin\theta \cos\varphi + \mathbf{V}_z \sin\varphi) \quad (3)$$

其中

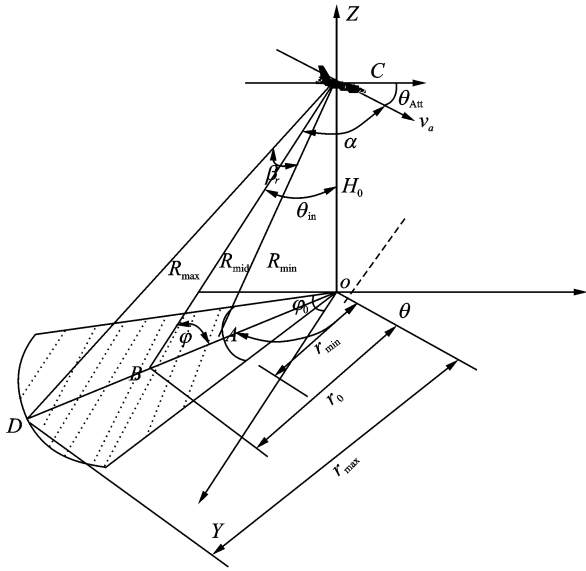


图 2 子孔径成像几何关系

Fig. 2 Geometry of sub-aperture imaging

$$\varphi = \frac{H + V_z}{R} \quad (4)$$

通过式(3)可以看出多普勒中心频率与速度 V_x, V_y 和 V_z 以及天线扫描角 θ 有关。文献[5]中假设 V_y 为 0, 对 V_x, V_z 和 θ 的误差 $\Delta\theta$ 进行估计, 这样式(3)就变为

$$f_{dcB} = \frac{2}{\lambda} (V_x \cos(\theta + \Delta\theta) \cos\varphi + V_z \sin\varphi) \quad (5)$$

然后选择不同时刻的波束(图 3), 认为 3 个不同时刻处的速度值是近似相等的。设待估计的二维速度值为 V_x 和 V_z , 待估计的天线扫描角误差值为 $\Delta\theta$ 。根据回波信号估计得到 3 个波束多普勒中心频率值, 然后利用最小二乘法估计速度值和天线扫描角的误差值, 如式(6)所示。对于式(6), 以速度值和天线扫描角的误差值为参数进行 3 维搜索使得 K 值最小, K 最小值时所对应的速度值和角度误差值即为所要估计的值。

$$K = \left(f_{dc_1} - \frac{2}{\lambda} (V_x \cos(\theta_1 + \Delta\theta) \sin\varphi_1 - V_z \cos\varphi_1) \right)^2 + \left(f_{dc_2} - \frac{2}{\lambda} (V_x \cos(\theta_2 + \Delta\theta) \sin\varphi_2 - V_z \cos\varphi_2) \right)^2 + \left(f_{dc_3} - \frac{2}{\lambda} (V_x \cos(\theta_3 + \Delta\theta) \sin\varphi_3 - V_z \cos\varphi_3) \right)^2 \quad (6)$$

这种方法存在三点不足:(1)此方法选用不同时刻的波束得到多个频率方程, 每个波束内利用了场景中心点的多普勒频率方程, 但其实每个波束照射场景内不同距离门处的点目标的多普勒中心是不一样的, 该方法没有充分利用这一信息。(2)此方法只能对速度的二维分量进行估计, 而有些情

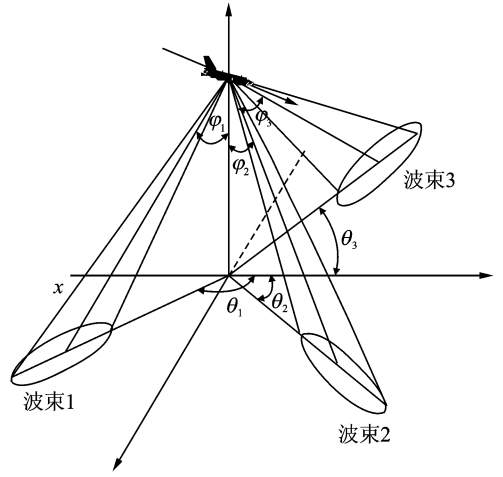


图 3 波束选择示例

Fig. 3 Sample of beam selection

况下 V_y 误差太大会造成运动补偿时雷达图像出现严重的距离徙动和模糊。所以对 V_y 的估计也不能够忽视。(3)此方法采用的是对速度值和天线扫描角度误差进行三维搜索, 运算量大, 算法没有优化。在环扫 SAR 成像中很难满足实时成像要求。

2 改进的环视 SAR 参数估计方法

结合环视 SAR 成像特点、多普勒导航原理以及传统环视 SAR 参数估计, 针对传统环视 SAR 参数估计方法的不足, 本文提出了新的环视 SAR 参数估计方法。考虑如图 4 所示成像几何, 在雷达波束地面场景照射区域内, 沿径向 AD 分布不同的点目标 A, F, E, \dots, B, M, D , 它们处在不同的距离门上, 其多普勒中心频率也随着斜距的变化而变化。为了能够精确地估计出雷达的三维速度, 这里不讨论雷达波束扫描角误差即认为 θ 是准确的。如图 4 所示在扇环足印的 A 点和 D 点分别对应着有用信号的采样起始点和结束点。不妨假设在雷达波束中心线上分布有 n 个点目标, 设定雷达扫描时方位角为 θ 。由上面的理论可知, 可以得到一个多普勒频率方程组如下

$$\begin{cases} f_{dc_1} = \frac{2}{\lambda} (V_x \cos\theta \cos\varphi_1 + V_y \sin\theta \cos\varphi_1 + V_z \sin\varphi_1) \\ f_{dc_2} = \frac{2}{\lambda} (V_x \cos\theta \cos\varphi_2 + V_y \sin\theta \cos\varphi_2 + V_z \sin\varphi_2) \\ \vdots \\ f_{dc_n} = \frac{2}{\lambda} (V_x \cos\theta \cos\varphi_n + V_y \sin\theta \cos\varphi_n + V_z \sin\varphi_n) \end{cases} \quad (7)$$

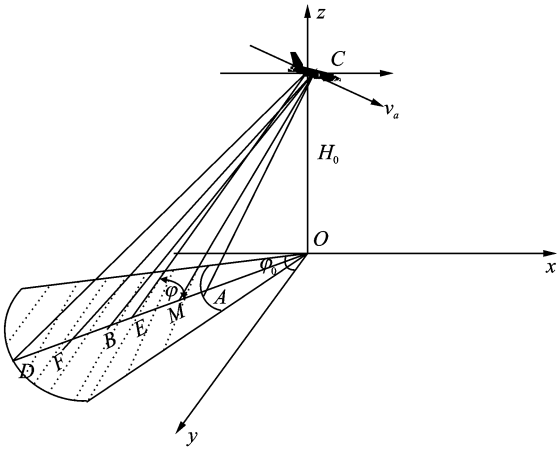


图4 子孔径成像几何关系

Fig. 4 Geometry relations of sub-aperture imaging

可以将式(7)整理写成矩阵形式

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{b} \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 & \sin\varphi_1 \\ \cos\varphi_2 & \sin\varphi_2 \\ \vdots & \vdots \\ \cos\varphi_n & \sin\varphi_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} V_x \cos\theta + V_y \sin\theta \\ V_z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \frac{\lambda}{2} \begin{bmatrix} f_{dc_1} \\ f_{dc_2} \\ \vdots \\ f_{dc_n} \end{bmatrix}$$

由 $\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$ 可以准确地解出 V_z 和 $V_x \cos\theta + V_y \sin\theta$ 的组合值,再从图3中选择多个波束(即得到多个不同的 θ 值: $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$ 等),这样可以用同样的方法得到很多类似 $V_x \cos\theta + V_y \sin\theta$ 组合的方程(这里假设每一个 θ 解出来的 $V_x \cos\theta + V_y \sin\theta$ 的组合值记为 $\epsilon_i, i=1, 2, 3, \dots, n$),将这些方程组写成矩阵形式,再次利用超定方程求最小二乘解方法计算出速度 V_x 和 V_y 。

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ \cos\theta_2 & \sin\theta_2 \\ \vdots & \vdots \\ \cos\theta_n & \sin\theta_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

再来具体分析下雷达速度误差 $\Delta V_x, \Delta V_y, \Delta V_z$ 和 Δf_{dc} 的关系。多普勒中心频率与速度的关系为

$$f_{dc} = \frac{2}{\lambda} (V_x \cos\theta \cos\varphi + V_y \sin\theta \cos\varphi + V_z \sin\varphi) \quad (10)$$

从式(10)可以看出, f_{dc} 是 V_x, V_y 和 V_z 的函数,于是可以将 f_{dc} 写为 $f_{dc}(v_x, v_y, v_z)$,式(10)中求 f_{dc} 对 V_x 的偏导数得到

$$\frac{\partial f_{dc}}{\partial V_x} = \frac{2}{\lambda} \cos\varphi \cos\theta \quad (11)$$

式(11)经过适当变形处理可以得到

$$\Delta V_x = \frac{\lambda}{2} \frac{\Delta f_{dc}}{\cos\varphi \cos\theta} \quad (12)$$

同理可以得到

$$\Delta V_y = \frac{\lambda}{2} \frac{\Delta f_{dc}}{\cos\varphi \sin\theta} \text{ 和 } \Delta V_z = \frac{\lambda}{2} \frac{\Delta f_{dc}}{\sin\varphi} \quad (13)$$

从式(12)和式(13)可以看出:(1) V_x, V_y, V_z 的估计误差 $\Delta V_x, \Delta V_y, \Delta V_z$ 与多普勒中心频率 f_{dc} 的估计误差 Δf_{dc} 有关,因此多普勒中心频率的估计精度直接决定了速度值的估计精度。(2)当 $\theta=90^\circ$ 或 270° 时,雷达波束方向与 V_x 垂直,与 V_y 平行,此时 ΔV_y 达到最优值,而 ΔV_x 却最差,同理当 $\theta=0^\circ$ 或 180° 时,雷达波束方向与 V_x 平行,与 V_y 垂直,此时 ΔV_x 达到最优值,而 ΔV_y 却最差。为了兼顾 ΔV_x 和 ΔV_y ,选取波束时尽量选取波束为 $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ 或者靠近它们的一些波束。(3)尽量选取多个不同波束进行参数估计,这样更具鲁棒性,从而可以减少误差。

3 实验验证

3.1 点目标仿真与分析

在仿真验证中,设雷达载机沿斜直线向下匀速直线飞行(参照图2坐标系),成像区外径 $r_{\max} = 3\,124.35\text{ m}$,内径 $r_{\min} = 1\,062.78\text{ m}$,中心半径 $r_0 = 2\,020.13\text{ m}$,扇形区域圆心角 $\varphi_a = 10.144^\circ$,由此可估算出成像区方位向宽度 $W_a \approx r_0 \times \varphi_a = 357.6\text{ m}$,距离向大小为 $W_r = r_{\max} - r_{\min} = 2\,061.57\text{ m}$ 。仿真系统基本参数如表1所示。设计距离向和方位向分辨率均为 1.25 m 。运动参数的测量值和真实值如表2所示。

表1 环扫SAR系统参数

| Table 1 Parameters for circular-Scanning SAR system | |
|---|-------|
| 系统参数 | 取值 |
| 雷达波长 λ/m | 0.02 |
| 工作高度 H/m | 5 000 |
| 发射信号脉宽 $T_p/\mu\text{s}$ | 5 |
| 线性调频信号带宽 B/MHz | 120 |
| 接收信号采样率 f_s/MHz | 150 |
| 波束下视角 $\theta_m/^\circ$ | 22 |
| 方位波束宽度 $\beta_a/^\circ$ | 3.8 |
| 俯仰波束宽度 $\beta_r/^\circ$ | 20 |

表 2 运动参数的误差值和真实值

Table 2 Motions parameters with and without errors

| 运动参数 | 误差值 | 实际值 |
|------------|-----|-----|
| 水平速度 V_x | 105 | 100 |
| 垂直速度 V_z | 8 | 10 |
| 径向速度 V_y | 51 | 50 |

如果直接用带有误差的参数(含有误差的参数由惯导提供,具体数值参照表 2)进行成像时,中间三个点目标的输出成像结果如图 5 所示。图 6 是理想的雷达图像,比较图 5 和图 6 可以看出,直接用带有误差的运动参数进行成像时点目标成像效果并不理想, V_z 的误差导致图像在方位向出现散焦, V_x 的误差导致图像在 x 轴方向出现移位, V_y 的误差导致图像在 y 轴方向存在严重的距离徙动,这些都会严重削弱环视 SAR 成像的质量,也不利于对雷达载体的精确定位。

因为子孔径采用的是线性距离多普勒成像算法,所以点目标信号经过处理之后已经变换到了距离多普勒域,也就是说图 5 和图 6 的横坐标为多普勒频率。而且每一个点目标响应理论上应该是一个严格的二维 sinc 函数,可以通过观察每个点目

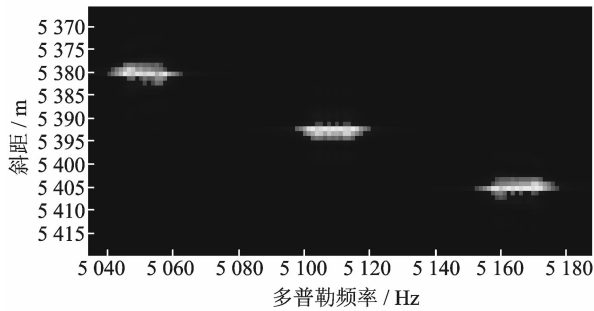


图 5 带有误差的运动参数进行点目标成像的结果
Fig. 5 Results of points target imaging with wrong parameters

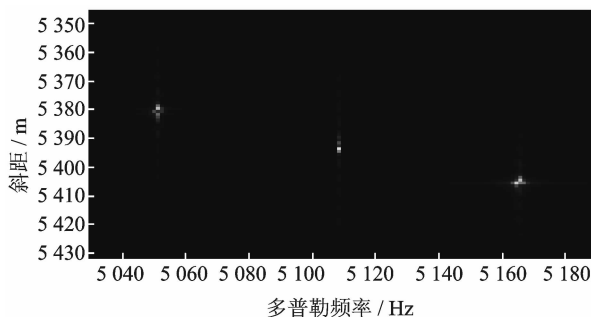


图 6 实际的运动参数进行点目标成像的结果
Fig. 6 Results of points target imaging with original parameters

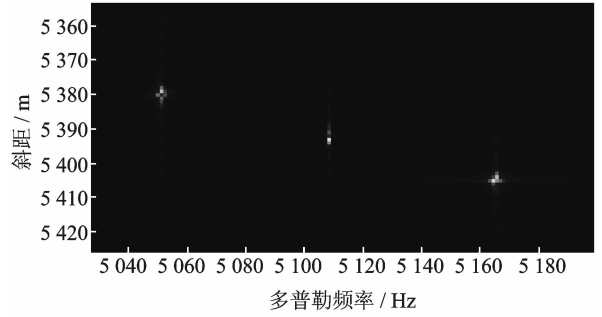


图 7 估计出的运动参数进行点目标成像的结果
Fig. 7 Results of points target imaging with estimated parameters

标的方位向剖面图的 3 dB 带宽中心点来确定与它们所对应的多普勒中心频率,但是一般情况下由于采样率不高,信号的方位向剖面图将不再是严格的 sinc 函数,并且由于运动补偿时采用的是带有误差的运动参数,所以点目标响应方位向剖面图的幅度谱会展宽即散焦,但是仍然关于多普勒中心对称。如图 8 和图 9 所示,从这两幅图里可以看出无论运动参数是否有误差,从图像域估计出的多普勒中心频率却是一样的,比如从下面两幅图里可以大概估计出此时点目标的 f_{dc} 为 5 107.9 Hz,这样就可以先用惯导提供的有误差的运动参数进行成像,然后从图像域准确的估计出每个点对应的 f_{dc} ,将这些 f_{dc} 代入式(7,8)的多普勒频率方程组中,这样就可以利用解超定方程反推出雷达载体相对精确的三维速度。

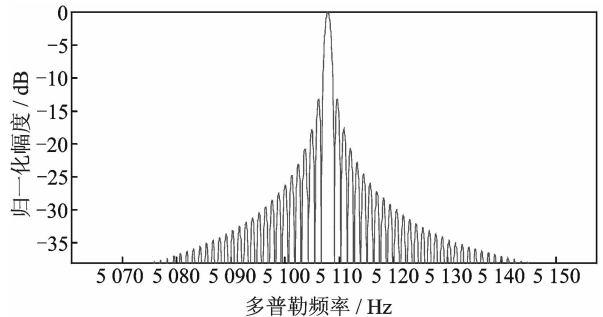


图 8 真实运动参数成像点目标方位向剖面图
Fig. 8 Azimuth sectional view of point target with original parameters

针对点目标方位向剖面图不是严格的 sinc 或者矩形门函数问题,本文提出了一个可行的方案:先取出每一点目标响应的方位剖面图,然后对其进行升采样,最后根据经验设置一个门限制(一般高于噪声平均功率 5 dB),规定凡是低于门限值的置 0,高于门限值的置 1,这样就得到一个标准的矩形窗函数,而矩形窗中心对应的频率即是点目标的多

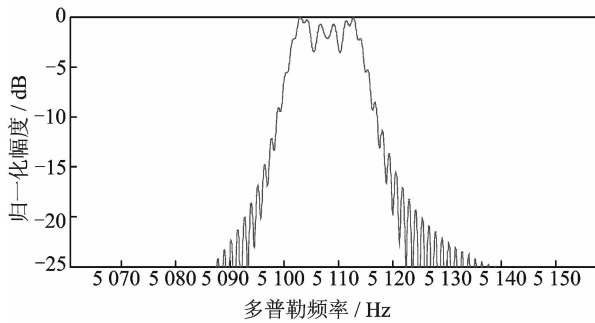


图 9 带有误差运动参数成像点目标方位向剖面图
Fig. 9 Azimuth sectional view of point target with wrong parameters

普勒中心频率。根据这种方法对 31 个点目标进行多普勒中心估计,将估计得到的多普勒中心频率值和真实值画在同一幅图里,如图 10 所示。可以看到星型线和虚线几乎重合而实线与它们相差甚大,由此说明惯导给出的速度和雷达载体的实际速度有较大误差,同时也从另一个方面说明了上面提出的多普勒中心估计方法切实可行。

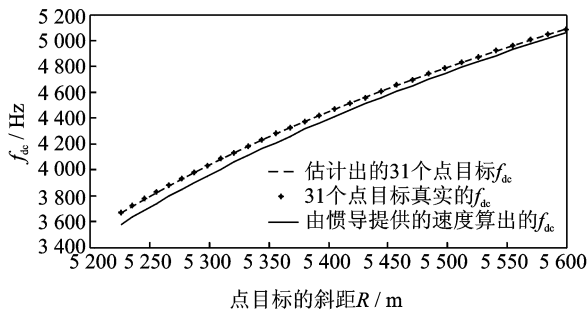


图 10 31 个点目标真实的 f_{dc} 、估计出来的 f_{dc} 与斜距 R 的关系
Fig. 10 Relations between actual (or estimated) f_{dc} and slant range

图 8~10 表明本文提出的多普勒中心估计方法原理正确,切实可行,这为后面解多普勒频率方程组奠定了基础。利用上面的方法,选取了方位角为 $30^\circ, 45^\circ$ 和 60° 的 3 个波束进行组合,估算出 $V_x = 99.9616 \text{ m/s}$, $V_y = 49.8721 \text{ m/s}$, $V_z = 10.0398 \text{ m/s}$ 。可以明显看出估算出来的三维速度值与真实值的误差不到 0.2 m/s 。利用估计出的三维雷达速度值进行重新成像如图 7 所示,发现点目标成像质量明显提高。

3.2 实测数据处理

某 K 波段机载环视 SAR 的主要参数:雷达以 $\Omega = 60^\circ/\text{s}$ 的速度逆时针旋转,脉冲重复频率为 9000 Hz ,惯导所提供的雷达的三维速度值分别为 $V_x = -51.4 \text{ m/s}$, $V_y = -121.7 \text{ m/s}$, $V_z = -215.9 \text{ m/s}$ 。

距离向采样点数为 512,方位向采样点数为 4096。利用本文的方法选取了环视 SAR 的多个波束,采用线性 R-D 算法进行子图成像和多普勒参数估计,图 11, 12 是其中的两个波束成像示意图。

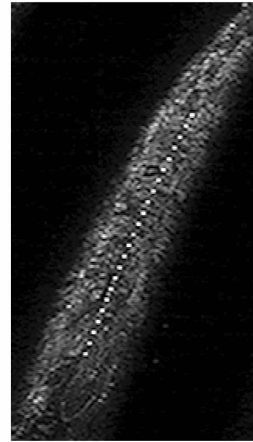


图 11 第 11 个波束成像图
Fig. 11 The eleventh beam imaging

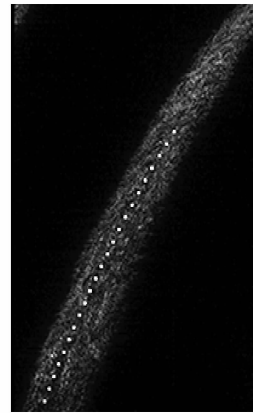


图 12 第 16 个波束成像图
Fig. 12 The sixteenth beam imaging

由线性 RD 算法成像处理完后,信号就变换到了距离多普勒域,选取不同的距离门利用本文的方法估计出每个距离门的多普勒中心频率,然后将其叠加到波束成像图中(即图中的亮点),可以看出不同距离门的点目标,其 f_{dc} 也是不一样的,而这些亮点基本处于波束成像的中心处,这一定程度上说明了本文估计出的 f_{dc} 是准确的。利用这些 f_{dc} 估计出雷达的三维速度分别为 $-52.5, -123.7$ 和 -217.8 m/s 。为了进一步验证估计出的雷达三维速度的精确性,分别用惯导提供的速度值和估计出的速度值进行环视 SAR 成像如图 13,14 所示。

从图 13 和图 14 可以看出,用惯导提供的速度值进行运动补偿和环视 SAR 成像时,其图像质量明显不如用估计出的速度值进行环视 SAR 成像时

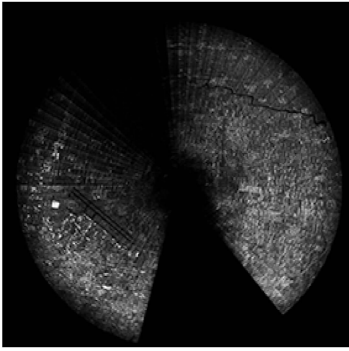


图 13 用惯导提供的速度进行环视 SAR 成像

Fig. 13 Circular-scanning SAR imaging with speed provided by inertial navigation

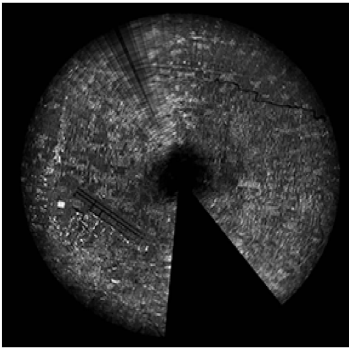


图 14 用估计出的速度进行环视 SAR 成像

Fig. 14 Circular-scanning SAR imaging with speed provided by estimated parameters

的情况。这就有力地证明了本文估计方法的准确性和实用性。

4 结束语

由于环视 SAR 图像主要设计用于实现雷达图像与光学、红外等图像的景象匹配及目标搜索定位,要求其成像结果几何精度很高。影响成像结果几何精度的最大因素是雷达平台运动的三维速度和天线扫描方位角误差。在无其他辅助测量手段的前提下,本文研究了一种基于回波数据的机载环视 SAR 成像参数估计方法,与传统的环视 SAR 参数估计方法相比有两个优点:(1)传统的环视 SAR 参数估计起码要 3 个不同的波束才能确定雷达的三维速度,而本文原则上只要任意两个波束就行。(2)本文由于充分利用了同一波束不同距离门的信息,所以会得到更多的多普勒频率方程,这样更具有鲁棒性。仿真数据的处理结果表明,该参数估计方法具有较高的估计精度,实测数据的处理和成像应用则证明了本方法的实用性。

参考文献:

- [1] 毛新华,朱岱寅,李勇,等.环视 SAR 几何失真校正误差分析及补偿技术研究[J].电子与信息学报,2008,30(11):2706-2709.
Mao Xinhua, Zhu Daiyin, Li Yong, et al. Error analysis of geometric distortion correction and compensation techniques for circular-scanning SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008,30(11):2706-2709.
- [2] 李勇,朱岱寅,朱兆达.环视 SAR 成像处理中的几何失真校正算法[J].南京航空航天大学学报,2009,41(2):232-237.
Li Yong, Zhu Daiyin, Zhu Zhaoda. Geometric distortion correction algorithm SAR imaging for circular-scanning[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009,41(2):232-237.
- [3] 李绍滨,刘银中.机载 SAR 原始回波数据多普勒参数估计的比较[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(11):1910-1914.
Li Shaobin, Liu Yinzong. Comparison of different kinds of Doppler parameter estimation from raw data of air borne SAR[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006,38(11):1910-1914.
- [4] Yu M, Xu J, Peng Y N, et al. Joint estimation of Doppler centroid and rate for SAR with large range migration [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2007,1(3):207-212.
- [5] 陈功伯,李勇,陶满意.基于信号的环视 SAR 成像参数估计方法[J].雷达学报,2013,2(2):204-209.
Chen Gongbo, Li Yong, Tao Manyi. Data-based parameter estimation method for circular-scanning SAR imaging[J]. Journal of Radars, 2013,2(2):204-209.
- [6] 孙兵,周荫清,陈杰,等.基于俯冲模型的 SAR 成像处理和几何校正[J].电子与信息学报,2004,32(9):173-180.
Sun Bing, Zhou Yinqing, Chen Jie, et al. Diving model-based SAR imaging and geometric correction [J]. Electronics and Information Technology, 2004,32(9):173-180.
- [7] Blacknell D, Ward I A. Motion compensation and geometric distortion in airborne SAR imagery[J]. ESA Proceedings of the International Symposium on Progress in Imaging Sensors, 1986,25(5):539-548.
- [8] Wang X, Zhu D Y. Wavefront curvature correction in one stationary bistatic SAR image focused via PFA [J]. IET Electronics Letters, 2010,46(18):1291-1293.

作者简介:赵亮(1988-),男,硕士研究生,研究方向:合成孔径雷达成像,E-mail:964560204@qq.com;毛新华(1979-),男,副教授,研究方向:合成孔径雷达(SAR)、空时自适应处理(STAP)、压缩感知成像(CS Imaging);吴迪(1982-),男,讲师,研究方向:SAR/GMTI。