

基于运动目标聚焦像的单通道 SAR 运动目标定位方法

范崇祎, 黄晓涛, 安道祥

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 本文针对合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)“方位位置不确定”问题,提出了一种基于运动目标聚焦像的单通道 SAR 运动目标定位新方法.该方法根据运动目标与方位天线波束关系,利用运动目标多普勒频谱的相对端点估计运动参数,实现精确定位.方法简单,计算量小,信杂比要求低,适用范围广.仿真与实测数据验证了该方法的有效性.

关键词: 合成孔径雷达; 单通道; 运动目标定位; 二维速度估计; 方位位置不确定

中图分类号: TN959.73; TN959.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)03-0463-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.03.008

A Localization Method of Moving Target in Single Channel SAR Based on the Focused Imaging

FAN Chong-yi, HUANG Xiao-tao, AN Dao-xiang

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: A novel approach of moving target localization based on the focused imaging is proposed for the problem of “azimuth position uncertainty” in the single-channel SAR (Synthetic Aperture Radar). According to the deduced relationship between moving target and azimuth antenna pattern, the approach uses the relative endpoints of moving target Doppler spectrum to estimate moving target parameters, which can locate the moving target precisely. This approach with lower computation load can be used in lower signal to clutter ratio, which is easy to realize and has wide applications. Both simulation and real data experiments illustrate the effectiveness of this approach.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); moving target localization; single channel; 2-dimensional velocity estimation; azimuth position uncertainty

1 引言

单通道合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)系统相对成熟,成本相对较低,易与地面运动目标指示(Ground Moving Target Indication, GMTI)相结合,具有较大的军事和民用价值^[1,2].利用单通道单航过数据,将检测到的匀速运动目标标定到 SAR 图像上是实际 SAR/GMTI 系统应用的基本需求,也是本文主要考虑的研究对象.

基于目标回波的相位历程分析指出,单通道运动目标检测存在“方位位置不确定”问题,即运动目标多普勒频偏不仅与目标自身的径向速度有关,还与运动目标合成孔径中心时刻的方位视角有关,利用运动目标多普勒

频谱中心换算获得的方位位置偏移是不准确的,不能实现运动目标在 SAR 图像上的精确定位^[3,4].系统工作频率越低、照射距离越远,目标径向速度越大,定位精度就越低.该问题导致单通道 SAR 系统在很长一段时间内被认为“无法精确定位”,影响了其应用^[3].文献[5~7]利用双频信号、多速度平台、多航过数据较好解决了这一问题,但这些方法都改变了单通道 SAR 常用的单航过工作模式,方法实用性相对较低.实际中, SAR 系统的方位天线波束宽度是有限的.文献[8]利用该特点构造匹配滤波器,实现了运动目标的精确定位,提高了一定的实用性,但该方法计算相对复杂,目标信杂比(Signal to Clutter Ratio, SCR)、信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)要求相对较高.文献[9]进一步提出了估计多普勒

频谱能量中心的简化方法,但该方法易受静止杂波和噪声的干扰,SCR、SNR 的要求更高.此外,上述方法均未考虑运动目标频谱被静止杂波覆盖、SCR 较低的情况.

为解决上述问题,本文通过简洁的数学推导,提出了一种基于运动目标聚焦像的单通道 SAR 运动目标定位方法,适用于 SCR 较低的情况,实现了运动目标相对精确的定位,解决了“方位位置不确定”问题.本文结构如下,第二部分推导了单通道 SAR 的运动目标回波,将“方位位置不确定”问题的求解转化为相同相对速度下运动参数的估计;第三部分进一步推导了天线波束与目标二维速度、二维位置的关系,分析了定位原理;第四部分提出了该定位方法及其实现流程;第五部分基于仿真与实测数据验证了所提方法的有效性,并对定位性能进行了比较分析;第六部分为结论部分.

2 单通道 SAR 的运动目标回波

假设机载条带 SAR 场景中,雷达沿 Y 轴方向以恒速 v_a 飞行,高度为 h ,方位向天线波束宽度为 α .理想地面点运动目标 M 在合成孔径中心时刻 t_c 位于 (x_t, y_t) ,具有恒定的地面速度 (v_x, v_y) 与参考斜距 $R_t = \sqrt{x_t^2 + y_t^2 + h^2}$.以方位向天线波束的中心视角照射到 M 的时刻为 Y 轴原点,建立如图 1 所示的坐标系.

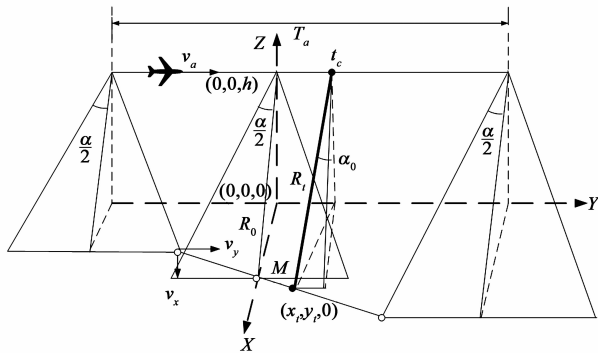


图1 单通道SAR对地观测几何

设雷达工作波长为 λ ,发射的线性调频信号为脉宽 T_p 、调频斜率为 K_r ,则慢时间 t_m 时刻,雷达到 M 的瞬时斜距 $R(t_m)$ 为:

$$R(t_m) = \sqrt{R_t^2 - 2v_r R_t t_m + V^2 t_m^2} \quad (1)$$

其中相对速度 $V = \sqrt{v_x^2 + (v_a - v_y)^2}$,径向速度 $v_r = \frac{(v_a - v_y)y_t - x_t v_x}{R_t}$.注意到, y_t 是 t_c 时刻的方位向相对位置;当目标静止时,天线波束中心时刻,即 Y 轴原点,与 t_c 重合,有 $y_t = 0$; y_t 与 t_c 时刻天线波束照射到 M 时的斜视角 α_0 有关,其关系可表示为:

$$\sin \alpha_0 = \frac{y_t}{R_t} = \frac{t_c(v_a - v_y)}{R_t} \quad (2)$$

运动目标时域回波经正交解调、二维逆傅里叶变换后,能得到精确的二维频谱.对该频谱的距离方位耦合指数项展开成关于 f_r 的泰勒级数,再对近似后的回波进行距离向逆傅里叶变换,可得距离-多普勒域的回波信号:

$$\begin{aligned} S(\vartheta) = S(\tau, f_a) = & \text{rect} \left[\frac{K'_m}{K_r T_p} \left(\tau - \frac{2R'_t}{c \cos \vartheta} \right) \right] \\ & \cdot \text{rect} \left[\frac{1}{T_a} \left(\frac{y'_t}{V} - \frac{R'_t}{V} \tan \vartheta - t_c \right) \right] \\ & \cdot \exp \left(-j\pi K'_m \left(\tau - \frac{2R'_t}{c \cos \vartheta} \right)^2 \right) \\ & \cdot \exp \left(-2\pi f_a \frac{y'_t}{V} \right) \exp \left(-\frac{4\pi f_c R'_t \cos \vartheta}{c} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 τ 为快时间, f_a 为多普勒频率, $\text{rect}[\cdot]$ 表示矩形窗函数, c 为电磁波传播速度.运动目标像的合成孔径时间为 T_a ,方位向位置 $y'_t = \frac{v_r}{V} R_t$,参考斜距 $R'_t = R_t \sqrt{1 - \left(\frac{v_r}{V}\right)^2}$,方位视角 $\vartheta = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2V} f_a\right)$,二次距离压缩调频率 K'_m 与 V 有关^[10].式(3)中第二项方位向窗函数确定了方位角,其与 f_a 的关系可以表示为 $f_a = \frac{2V}{\lambda} \sin \vartheta$.

假设天线加权是二维可分离的且不随频率变化,则式(3)中第二项方位向窗函数表示天线波束在各方位视角的加权系数为 1,是方位向天线方向图的一种特例.窗函数范围对应了视角 ϑ 的范围,窗函数中心对应了目标运动产生的多普勒频偏.由其表达式易知,目标多普勒频偏包含了与径向速度 v_r 有关的 $\frac{y'_t}{V}$ 项与斜视角 α_0 有关的 $-t_c$ 项,反映了“方位位置不确定”问题.对式(3)第三项指数项精确补偿,可获得运动目标聚焦像,进而准确估计相对速度 V ^[1,11].此时运动目标的方位位置偏移仅与式(3)中第二项指数项有关,但是 y'_t 与 (v_x, v_y) 、 (x_t, y_t) 均有关系,相同相对速度 V 的运动目标可能会有不同的方位向位置偏移.此时,“方位位置不确定”问题就转换为解决相同相对速度 V 下的运动目标定位,估计运动参数 (v_x, v_y) 、 (x_t, y_t) .

3 利用天线波束实现运动目标定位的原理

下面以矩形窗函数为例,分析运动目标定位原理.从成像的角度,式(3)体现了成像坐标系发生的旋转^[8],旋转后重构的对地观测几何如图 2 所示.图中,雷达以 M 为中心,从坐标系 (X, Y, Z) 旋转角度 β 获得旋转后的坐标系 (X', Y', Z') ,其中 $\tan \beta = -\frac{v_x}{v_a - v_y}$ 、 $\cos \beta = \frac{y_t}{V t_c}$.

$$\sqrt{\frac{(c^2(b^2+1)^2+(c^2+1)^2b^2+2cb(b^2+1)(1+c^2))a^2+(c^2b^2-1)^2}{(c^2-b^2)^2a^4+2((c^2+1)^2b^2+c^2(b^2+1)^2)a^2+(c^2b^2-1)^2}} \quad (15)$$

其中 $a = \sin\psi'$, $b = \tan\beta$, $c = \tan\beta \tan^2 \frac{\alpha}{2}$. 利用该式就可以获得 y'_i 的估计, 进而估计实际位置 (x_i, y_i) .

3.3 端点 ϑ_i 的近似估计

式(8)和式(15)的计算均需已知运动目标完整的多普勒频谱, 这在杂波较强、波长较长的条件下并不成立. 通常, 实际数据只能保证精确估计运动目标的一个多普勒频谱端点. 注意到式(6)可重写为:

$$\begin{cases} \tan\vartheta_1 = \frac{V T_a}{R'_i} - \tan\beta \sin\psi' \\ \tan\vartheta_2 = -\frac{V T_a}{R'_i} - \tan\beta \sin\psi' \end{cases} \quad (16)$$

则有:

$$\begin{aligned} \tan(\vartheta_1 - \vartheta_2) &= \frac{\tan\vartheta_1 - \tan\vartheta_2}{1 + \tan\vartheta_1 \tan\vartheta_2} \\ &= \frac{\frac{T_a V}{R'_i}}{1 - \left(\frac{V T_a}{R'_i}\right)^2 + \tan^2\beta \sin^2\psi'} \end{aligned} \quad (17)$$

若 $\sin\psi' \approx 1$, 则式(15)可进一步化简为:

$$\cos\vartheta_c = \frac{p^2 + 1}{\sqrt{(1 + \tan^2\beta)(1 + p^2 \tan^2 \frac{\alpha}{2})}} \quad (18)$$

将式(18)代入(17)化简, 有:

$$\begin{aligned} \tan(\vartheta_1 - \vartheta_2) &= \frac{\cos\beta(p^2 + 1)}{\sqrt{(1 + \tan^2\beta)(\cos^2\beta(p^2 + 1)^2 - \tan^2 \frac{\alpha}{2})}} \frac{2 \tan \frac{\alpha}{2}}{1} \\ &\approx \tan\alpha \end{aligned} \quad (19)$$

机载场景下, 运动目标距离向速度 v_x 远小于载机速度, $\cos\beta \rightarrow 1$, $p \rightarrow 0$. 因此上式中的约等号成立, 即存在近似 $\vartheta_1 - \vartheta_2 \approx \alpha$, 我们可由一个 ϑ_i 值推测另一个 ϑ_i 值, $i = 1, 2$. 尽管该方法是一个近似方法, 但后续仿真表明, 该近似引入的误差较小, 对定位精度影响较小, 适于实际应用.

4 方法步骤

根据上述分析, 提出了基于聚焦像的单通道 SAR 运动目标定位方法. 具体步骤包括:

步骤 1 利用运动目标聚焦像, 估计相对速度 V 、参考斜距 R'_i 及下视角 ψ' .

步骤 2 提取包含运动目标聚焦像的感兴趣区域, 补零后变换到方位频域, 获得运动目标的距离-多普勒频谱 $S(\vartheta)$, 并将其幅度转化到 dB 值 $S_d(\vartheta)$. 该频谱能

尽可能排除目标周围的杂波干扰, 保证视角 ϑ 的估计精度.

步骤 3 估计 $S_d(\vartheta)$ 的端点 ϑ_1 和 ϑ_2 . 估计可表示为:

$$\begin{cases} \hat{\vartheta}_1 = \min_{\vartheta} \{ (\max\{S_d(\vartheta)\} - S_d(\vartheta)) > \gamma \} \\ \hat{\vartheta}_2 = \max_{\vartheta} \{ (\max\{S_d(\vartheta)\} - S_d(\vartheta)) > \gamma \} \end{cases} \quad (20)$$

其中阈值 γ 与天线波束宽度 α 有关. 当 $S_d(\vartheta)$ 某一端点被杂波覆盖时, 可通过式(19)估计另一个端点.

步骤 4 将估计结果代入式(8), 获得 β 的估计 $\hat{\beta}$, 进而估计二维速度:

$$\hat{v}_x = V \sin\hat{\beta}, \hat{v}_y = v_a - V \cos\hat{\beta} \quad (21)$$

步骤 5 将估计结果代入式(15), 获得 ϑ_c 的估计 $\hat{\vartheta}_c$, 进而估计二维位置:

$$\begin{cases} \hat{x}'_i = \sqrt{R_i'^2 - h^2} = R'_i \sin\psi' \\ \hat{y}'_i = R'_i \tan\hat{\vartheta}_c \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \hat{x}_i = R'_i \sin\psi' \cos\hat{\beta} - R'_i \tan\hat{\vartheta}_c \sin\hat{\beta} \\ \hat{y}_i = R'_i \sin\psi' \sin\hat{\beta} + R'_i \tan\hat{\vartheta}_c \cos\hat{\beta} \end{cases} \quad (23)$$

步骤 6 在原静止场景的 SAR 图像上实现运动目标定位. 设运动目标聚焦像在图像上的位置为 (x'_i, y'_i) , 相对图像的参考方位向距离为 y_0 , 则有:

$$\begin{cases} \hat{x}'_i = \hat{x}_i \\ \hat{y}'_i = y_0 + \hat{y}_i \\ \hat{y}_0 = y'_i - \hat{y}_i = y'_i - R'_i \tan\hat{\vartheta}_c \end{cases} \quad (24)$$

因此, 运动目标在静止场景图像上的实际位置 (\hat{x}'_i, \hat{y}'_i) 为:

$$\begin{cases} \hat{x}'_i = \hat{x}_i = R'_i \sin\psi' \cos\hat{\beta} - R'_i \tan\hat{\vartheta}_c \sin\hat{\beta} \\ \hat{y}'_i = \hat{y}_0 + \hat{y}_i = y'_i - R'_i \tan\hat{\vartheta}_c + R'_i \sin\psi' \sin\hat{\beta} + R'_i \tan\hat{\vartheta}_c \cos\hat{\beta} \end{cases} \quad (25)$$

运动目标定位需要平移的位置量 $(\delta x, \delta y)$ 为:

$$\begin{cases} \delta x = \hat{x}_i - x'_i = R'_i \sin\psi' (\cos\hat{\beta} - 1) - R'_i \tan\hat{\vartheta}_c \sin\hat{\beta} \\ \delta y = \hat{y}_i - y'_i = R'_i \sin\psi' \sin\hat{\beta} + R'_i \tan\hat{\vartheta}_c (\cos\hat{\beta} - 1) \end{cases} \quad (26)$$

本方法中, 参数 α 是一个相对取值, 可根据需要设计不同的值, 进而对运动参数进行多次估计, 提高定位精度. 将步骤 2、3 换成对静止目标聚焦像的对应操作, 就可获得阈值 γ 下天线波束的宽度: $\hat{\alpha} = \hat{\vartheta}_2 - \hat{\vartheta}_1$. 仿真表明, 加权为 1 的天线波束下, $\gamma = -8$ dB 时估计得到的 $\hat{\alpha}$ 与设定的天线波束宽度 α 等价.

5 方法验证及性能分析

5.1 仿真数据分析

利用仿真的单通道 SAR 数据, 对所提方法进行验证, 系统参数如表 1 所示. 仿真中设置了多个相同相对速度 $V = 85$ m/s, 不同距离向、方位向速度的运动目标.

图 3 中的数字标号给出了其中 5 个运动目标的聚焦像,具体参数如表 2 第一列所示.图 3 中每个运动目标附近的弯曲目标像是设置的静止目标,以相对速度 V 成像后,这些静止目标是散焦的.图 3 所示图像的方位分辨率为 0.2m ,具有的 SNR 为 10dB ,SCR 为 -14dB .这里 SNR、SCR 的计算是根据静止场景图像上运动目标散焦像计算获得的.

图 4 进一步给出了 v_x 从 0 到 36m/s 变化的多个运动目标多普勒频谱的幅度等高线,其多普勒频率 f_d 已转化成对应的方位视角 ϑ .注意到,运动目标多普勒频谱靠近 0° 视角的一端易受静止杂波影响,等高线具有相对明显的起伏,如目标 v_x 为 25.8m/s 附近.此时可根据式(19)的近似关系由频谱另一端未受杂波影响的 ϑ_2 估计该 ϑ_1 值.当 v_x 大于 20m/s 时,运动目标的多普勒频谱还会受到图像积累角的截取,并不完整.此时可增加成像积累角,或利用方位子视图,甚至无杂波区的多普勒频谱,获得多普勒频谱上远离 0° 视角的端点,从而应用本方法进行定位.图 4 还表明,理想情况下,当阈值 γ 取 $-2 \sim -20\text{dB}$ 时,能较好的估计 ϑ_1 .由于天线照射时间的长短决定了运动目标回波能量,运动目标多普勒频谱在各个方位视角 ϑ 的能量并不完全相同,实际应用中 γ 的门限不宜取得过高.经过多次仿真,表 2 给出了 $\gamma = -8\text{dB}$ 下,其中 5 个运动目标处理角度、速度及位置估计误差的均值和均方根误差(标准差).此时目标多普勒频谱完整, ϑ_1 和 ϑ_2 具有相似的估计误差,表中用 ϑ_i 表示.在该门限下,通过静止目标估计得到天

线波束宽度 α 为 28.03° ,与理论设计值相符.经多次仿真可知,距离向速度的估计误差与平台速度比可控制在 2% ,在该场景下绝对位置误差可控制在 5m 以内.

表 1 低频 SAR 系统参数

参数	工作频段	高度	信号脉宽	平台速度	中心斜距	脉冲重复频率	天线波束宽度
参数值	UHF	100m	$1\mu\text{s}$	80m/s	850m	500Hz	28°

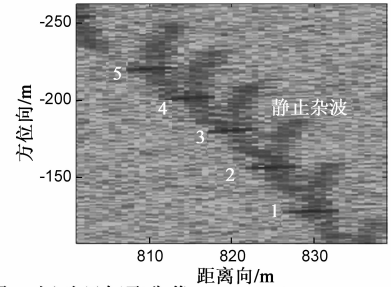


图 3 运动目标聚焦像,SNR=10dB,SCR=20dB

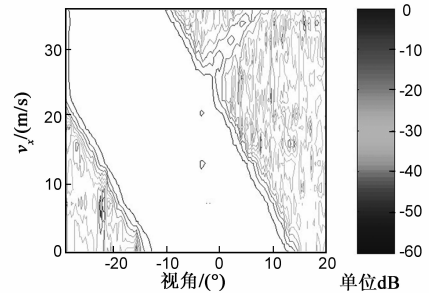


图 4 运动目标多普勒频谱

表 2 运动目标参数的估计误差

目标序号	设置的目标参数				运动目标参数的估计误差									
					角度误差($^\circ$)		速度误差(m/s)				位置误差(m)			
	速度(m/s)		位置(m)		$ \hat{\vartheta} - \vartheta $		$ \hat{v}_x - v_x $		$ \hat{v}_y - v_y $		$ \hat{x}_t - x_t $		$ \hat{y}_t - y_t $	
	v_x	v_y	x_t	y_t	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
1	13.000	-4	837.41	9.30	0.142	0.125	0.835	0.800	0.134	0.127	1.329	1.295	0.538	0.142
2	15.898	-3.5	836.32	11.43	0.102	0.000	0.626	0.145	0.117	0.027	0.758	0.053	1.765	0.102
3	18.330	-3	835.98	13.25	0.225	0.000	0.070	0.260	0.015	0.057	0.210	0.102	1.606	0.225
4	20.463	-2.5	835.63	14.88	0.140	0.500	0.391	0.857	0.096	0.207	0.409	1.320	2.029	0.140
5	22.383	-2	834.50	16.36	0.624	0.500	0.636	0.463	0.176	0.128	2.080	1.723	1.455	0.624

为了对算法性能进行充分比较,图 5(a)和(b)分别给出了匹配滤波方法^[8]、能量搜索方法^[9]与本文所提方法在不同 SCR 下对图 4 中各运动目标进行定位,获得的距离向速度估计误差比 $\frac{\Delta v_x}{v_a}$,此时 SNR 与相对速度 V 不变.图 5(a)表明,当 SCR 较高时,匹配滤波方法对 v_x 较小(绝对值小于 20m/s)的运动目标能达到相对较高的定位精度,但是由于该算法存在一定近似,随着 v_x 的增加估计精度逐渐降低.能量搜索方法本质上是匹配滤波方法的进一步近似,其定位精度易受杂波、噪声

影响,误差起伏相对较大.这一特点在低信杂比下尤其明显,如图 5(b)所示.而本文所提方法能使各种 v_x 的运动目标均达到较高的定位精度,方法性能优于前两种方法.

图 5(b)表明,当 SCR 较低时,匹配滤波算法集中了运动目标对应的相关能量,对杂波及噪声有一定的抑制能力,但是这个方法实现起来相对复杂,未考虑多普勒频谱不完整的运动目标.能量搜索方法在整个多普勒频谱区间都会受到杂波、噪声的干扰,估计误差相对较大,定位精度相应较低.而本文方法计算量小、估计

误差小,能在较低 SCR 下达到较高的定位精度,其中对 v_x 大于 25m/s 的目标采用了在无杂波区估计远离 0° 视角端点的方法。

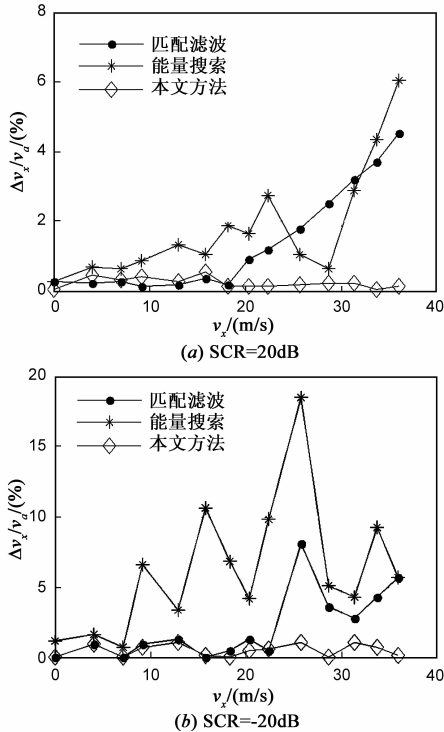


图5 不同信杂比下方法性能的比较,SNR=10dB

5.2 实测数据验证

利用单通道低频 SAR 实测数据进一步验证本文所提方法的有效性.系统中心斜距为 10km,高度 2.5km,设计的 3dB 天线波束宽度 α 为 11.4° ,雷达平台速度 v_a 为 65m/s,其余参数同表 1.场景中存在一个 SNR 为 10dB 的合作运动目标,利用常规检测方法获得的相对速度 V 为 76.1m/s,如图 6 所示,其聚焦像如图 6 中圆圈所示.目标散焦像的 ROI 区域未受强杂波影响.应用本文方法所估计的目标速度 (\hat{v}_x, \hat{v}_y) 为 $(3.1, -11.04)$ m/s,实际位置 (\hat{x}_t, \hat{y}_t) 为 $(9768.4, -3.967)$ m.根据估计的运动参数推算目标合成孔径时间内的运动轨迹,其二维位置与通过高精度 GPS 测得的实际值相符,如图 7 所示.

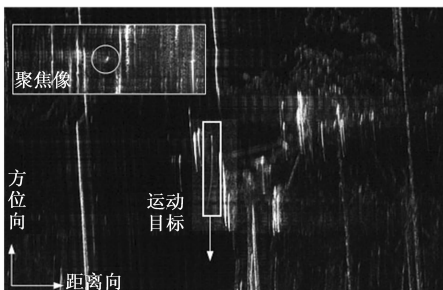


图6 SAR场景成像及运动目标聚焦像实测数据的运动目标

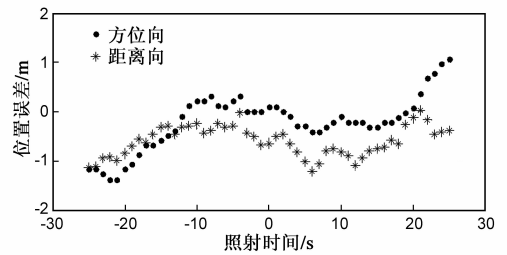


图7 与GPS实际值相比较获得的未知误差

6 总结

本文提出了一种基于聚焦像的单通道 SAR 运动目标定位方法.该方法通过直接的数学推导研究了方位向天线波束与运动目标的关系,可利用运动目标多普勒频谱的一个端点估计运动参数,解决了单通道系统中的“方位位置不确定”问题,实现了运动目标相对精确的定位.仿真与实测数据表明:在 SCR-14dB 时,距离向速度的估计误差与平台速度比可以控制在 2%,能显著改善现有方法的定位精度.方法计算量小、信杂比要求低,适用于多普勒频谱不完整的情况,具有较好的实用性.

参考文献

- [1] VU V T, SJÖGREN T K, et al. Detection of moving targets by focusing in UWB SAR-Theory and experimental results[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(10): 3799 - 3815.
- [2] 常玉林,周红,等.多通道 SAR 频率多普勒域宽带长 CPI STAP 方法[J].电子学报,2011,39(6):1245 - 1252.
CHANG Y L, ZHOU H, et al. Frequency-Doppler domain wideband long CPI STAP method for multichannel SAR system [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6): 1245 - 1252. (in Chinese)
- [3] CHAPMAN R D, HAWES C M, et al. Target motion ambiguities in single-aperture synthetic aperture radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic System, 2010, 46(1): 1142 - 1156.
- [4] RANEY R K. Synthetic aperture imaging radar and moving targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic System, 1971, 7(5): 499 - 505.
- [5] RÜEGG M, MEIER E, et al. Capabilities of dual-frequency millimeter wave SAR with monopulse processing for ground moving target indication[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2007, 45(3): 539 - 553.
- [6] WANG G, XIA X, et al. Dual-speed SAR imaging of moving targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 368 - 379.
- [7] MINARDI M J, GORHAM L A, et al. Ground moving target

detection and tracking based on generalized SAR processing and change detection[A]. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XII[C]. Dublin, Ireland: SPIE, 2005. 156 – 165.

- [8] DIAS J, MARQUES P. Multiple moving target detection and trajectory parameters estimation using a single SAR sensor[J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic System, 2003, 39(2):604 – 624.
- [9] 陈广东, 聂志彪, 等. SAR 图像中恒速动目标定位[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(4):520 – 523.
CHEN G D, NIE Z B, et al. Constant-speed moving target positioning in SAR image[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007, 39(4): 520 – 523. (in Chinese)
- [10] 范崇祎, 黄晓涛. 基于多方位分辨率图像的低频 SAR 地面运动目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(5): 1057 – 1064.
FAN C Y, HUANG X T. Moving target detection based on multiple azimuth resolution images in low frequency SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(5):1057 – 1064. (in Chinese)
- [11] 周红, 黄晓涛, 等. 基于三通道 UWB SAR 子孔径图像序列的 ATI 方法[J]. 电子学报, 2009, 37(5):930 – 936.
ZHOU H, HUANG X T, et al. Along track interferometry method based on sub-aperture image series for triple-channel UWB SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(5): 930 – 936. (in Chinese)
- [12] 周峰, 李亚超, 等. 一种单通道 SAR 地面运动目标成像和运动参数估计方法[J]. 电子学报, 2007, 35(3):543 – 548.

ZHOU F, LI Y C, et al. An effective approach to ground moving target imaging and motion parameter estimation for single channel SAR system[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3):543 – 548. (in Chinese)

作者简介



范崇祎 女, 1984 年 1 月出生于江苏省常熟市. 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院讲师. 主要研究方向为单/双通道 SAR 运动目标检测.

E-mail: fancococ@yahoo.com.cn



黄晓涛 男, 1972 年 9 月出生于湖北省武汉市. 博士. 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院教授、博士生导师. 主要从事 SAR 信号处理、阵列信号处理、目标检测等信号与信息处理领域的研究工作.

E-mail: hxtah@yahoo.com



安道祥 男, 1981 年 1 月出生于吉林省东丰县. 博士. 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院讲师. 主要从事 SAR 成像处理等领域的研究工作.

E-mail: daoxiangn@yahoo.com.cn