

对图像配准误差稳健的分布式星载 SAR 地面运动目标检测及高精度的测速定位方法

刘 颖, 廖桂生, 周争光

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 图像配准误差、杂波相关性以及阵列误差等对分布式星载合成孔径雷达地面运动目标检测的性能有很大影响. 针对这种情况, 研究了一种基于多通道、多像素联合自适应处理的运动目标检测及测速定位联合实现方法, 首先将多通道、多像素联合数据等效为一个简单的阵列模型, 通过空间投影的方法估计出存在图像配准误差情况下的运动目标真实的导向矢量形式, 然后利用最优波束形成的方法在抑制杂波的同时, 通过搜索代价函数的峰值来估计目标的径向速度, 从而对其进行重新定位. 性能分析及仿真结果表明, 此方法大大提高了运动目标检测性能及测速定位精度, 对图像配准误差具有较强的稳健性.

关键词: 分布式卫星; 地面运动目标检测 (GMTD); 图像配准误差; 最优波束形成

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 06-1009-06

A Robust Method to Images Registration of Ground Moving Target Detection and Relocation for Distributed Small Satellites Synthetic Aperture Radar

LIU Ying, LIAO Gui-sheng, ZHOU Zheng-guang

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The image registration error, clutter decorrelation and array error have a great influence on the performance of the distributed synthetic aperture radar ground moving target detection. In this paper, an approach on moving target detection and relocation is proposed based on multi-channel and multi-pixel adaptive signal processing in image domain. Firstly, the multi-channel and multi-pixel joint data is equaled to a simple array model. The real steering vector of the moving target can be estimated through the space projection approach on the condition that there is image registration error. The optimal beam forming approach is used to cancel clutter, and at the same time the cross-track velocity of moving target can be determined by searching for the peak value of the cost function and then the moving target can be relocated on the image. The simulation results indicate this method has a good robustness to image registration error, clutter decorrelation and array error, and the detection performance and the estimation accuracy are improved greatly.

Key words: distributed small satellite; ground moving target detection; images registration; optimal beam forming

1 引言

分布式卫星^[1~3]地面运动目标检测 (GMTD) 能够从高空实现广域监视, 及时发现高价值的军事目标, 具有特别重要的军事意义. 如果仅仅实现二维 SAR 成像和 GMTD 功能, 则最佳星座构形为沿航向的直线分布, 因为沿航向直线阵列在地形高度维没有分辨能力, 从而可以获得最佳的杂波抑制性能.

在目前已有的多通道 SAR 动目标检测方法^[4~6]中, 均要求对各幅 SAR 图像进行精确的图像配准和时

间校准, 否则目标检测的性能会严重下降. 然而由于各成像雷达的偏航和相位中心位置的不同, 各通道 SAR 图像间会出现相对平移, 当复图像的图幅宽度较大且各图像之间甚至图像内部存在不同程度的几何形变和旋转时, 不能再简单的通过在距离或方位向移动一个常数来完成图像配准, 这时的配准过程将会非常复杂, 而且配准的精度也会随之下降. 为了防止碰撞, 各成像卫星之间的间距通常在几十甚至上百米, 过长的沿航向基线会使不同的卫星对同一地面的下视角不同而导致各通道接收的杂波信号是不完全相干的, 杂波之间的起伏将

直接影响图像之间的相关性. 同样, 阵列误差尤其是幅相误差和阵元位置误差的影响在很大程度上可以等效为通道间的杂波起伏, 从而引起图像间相关性的下降. 以上问题使得图像配准误差的存在是不可避免的. 图像配准误差的存在将会大大影响动目标检测的性能, 更使动目标的测速及定位变得不可能. 因此, 研究对图像配准误差具有强稳健性的动目标检测及测速定位方法, 具有非常重要的实用价值.

文献[7]中提出了利用相邻像素联合处理的思路来解决 InSAR 中的图像配准问题, 获得了较大成功. 本文利用相邻像素的联合处理, 提出了一种基于多通道、多像素自适应处理的动目标检测及测速定位的联合实现方法. 此方法将多个通道以及各个通道中的多个像素的联合数据等效为一个简单的阵列模型, 并通过空间投影的方法估计出存在图像配准误差情况下的运动目标真实的导向矢量形式, 然后利用最优波束形成的方法在抑制杂波的同时, 通过搜索代价函数的峰值来估计动目标的径向速度, 从而对其进行重新定位. 性能分析及仿真结果表明, 该方法大大提高了动目标检测性能及测速精度, 且对图像配准误差具有较强的稳健性.

2 多通道多像素联合数据信号模型

如果仅仅实现二维 SAR 成像和 GMTI 功能, 则最佳星座构形为沿航向的直线分布, 故本文重点研究卫星阵列为沿航向分布的线阵的情况, 这并不失一般性. 此外, 由于卫星速度非常快, 而运动目标通常为慢速目标, 其多普勒调频率与固定目标的调频率相差非常小, 故在本文的分析中不考虑运动目标方位向速度的影响.

首先分析一下多通道 SAR 的信号模型. 假设各通道卫星接收的回波数据已经经过了 SAR 成像和精确的图像配准及相位补偿. 以第一颗卫星为参考, 第 m 颗卫星通道像素 i 的数据 (不考虑运动目标) 可以写成:

$$x_m(i) = c_m(i) + n_m(i), \quad m = 1, \dots, N \quad (1)$$

其中 $c_m(i)$ 为该像素的杂波分量, 如果不考虑地面杂波的时间去相关且假设各卫星照射同一地面时的入射角近似相同从而杂波的复反射系数不变, 则有 $c_1(i) = c_2(i) = \dots = c_N(i) = c(i) \triangleq c_i$, 可以认为其是该像素内杂波的复反射系数, $n_m(i)$ 是第 m 个通道像素 i 处的噪声分量, N 为卫星通道数目.

将整个阵列接收的信号写成矢量的形式为:

$$X(i) = a c(i) + N(i) = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} c_i + N(i) \quad (2)$$

其中 a 为杂波的导向矢量.

然而, 当图像配准有误差时, 杂波的导向矢量已不能再简单的写成 $[1, \dots, 1]^T$ 的形式, 而且这时杂波的自由度也有所增加, 由于此时系统的可控自由度只有 N 个, 没有足够的能力抑制全部干扰, 因此杂波相消效果很差.

在这种情况下, 就要充分利用扩散到周围像素中的杂波分量信息以达到杂波相消的目的, 所以可以利用待检测像素及其周围的像素进行联合处理来对消杂波. 由于粗配准通常能达到一个像素的配准精度, 因此可以只选择待检测像素及其周围相邻像素进行联合处理.

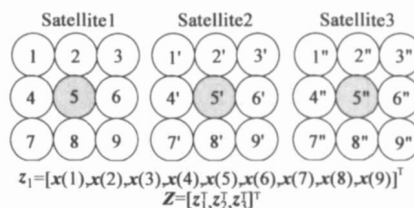


图 1 多通道多像素数据构造示意图

选待检测像素及其周围的 8 个像素, 图 1 给出了多通道多像素数据构造示意图, 图中以三通道为例, 将数据重新排列如下:

$$z_m(i) = [x_m(i-4), x_m(i-3), \dots, x_m(i), \dots, x_m(i+4)]^T, \quad m = 1, \dots, N \quad (3)$$

其中像素 i 为待检测的像素. 将多个通道的数据排成矢量的形式:

$$Z(i) = [z_1^T(i) \quad z_2^T(i) \quad \dots \quad z_N^T(i)]^T \quad (4)$$

该数据是一个维数为 $9N \times 1$ 的矢量. 则杂波加噪声的协方差矩阵可以通过周围多个满足独立同分布的像素数据平均来估计:

$$R(i) = \frac{1}{ML} \sum_{l=-L/2}^{L/2-1} \sum_{s=-M/2}^{M/2-1} Z(m+l, n+s) Z^H(m+l, n+s) \quad (5)$$

其中 L 和 M 分别为沿方位向和距离向选取的样本数. 为保证输出信杂噪比的损失不超过 3dB (相对于确知协方差矩阵下的最佳信杂噪比), 要求 $ML \geq (2 \times 9N - 1)$. 在动目标检测中, 为了避免目标信号污染样本, 可以在估计协方差矩阵时保留一些保护单元, 即在估计杂波协方差矩阵时避开待检测像素及其最相邻的像素.

3 多通道多像素联合数据等效阵列模型及运动目标检测和测速定位方法

首先将本文方法中采用的多通道多像素联合数据建模为如下的阵列模型 (仍以三通道为例): 三个通道可以认为是三个子阵, 每个子阵各由 9 个阵元组成, 对应着 9 个像素, 每个阵元接收的信号为该对应像素的回波, 如图 2 所示.

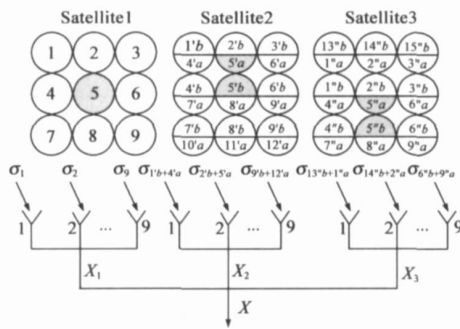


图 2 多通道多像素联合数据的等效阵列模型

不考虑运动目标,则整个大阵列接收的信号可以写成:

$$X = AC + N \quad (6)$$

其中 A 为该阵列的阵列流形, A 中的每一列为一个信号的导向矢量. 由杂波的独立性知 $C = [1, 2, \dots, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]^T$, C 中信号源的数目就是杂波的自由度. N 为阵列接收的噪声矢量.

下面具体分析一下信号的导向矢量形式. 定义在此阵列模型下第 i 个像素对应的信号的导向矢量为:

$$S^i = S_s^i S_r^i \quad (7)$$

其中“ \circ ”表示 hadamard 积, S_s^i 为信号的空间导向矢量, 对于地面固定目标即杂波来说, 其空间导向矢量为 $S_s^i = [1, 1, 1]^T$. S_r^i 为该信号的相关系数矢量, 并令 $S_r^i = [S_{r1}^i, S_{r2}^i, S_{r3}^i]^T$, $S_{r1}^i, S_{r2}^i, S_{r3}^i$ 分别为该信号在三个子阵内的相关系数矢量, 当图像精确配准时可知, $S_{r1}^i, S_{r2}^i, S_{r3}^i$ 相等且等于单位阵 $I_{9 \times 9}$ 的第 i 列, 这时每个像素对应的信号的相关系数矢量中只有三个元素的值为 1, 其它元素均为 0. 为了便于后文的分析讨论, 我们定义这种相关系数矢量和对应的导向矢量分别为理想的相关系数矢量和理想的导向矢量. 而当存在配准误差时, 第 i 个像素的一部分或全部偏出了该像素的位置, 这时由此阵列模型可知, 该像素对应信号的相关系数矢量已不再是理想的相关系数矢量的形式, 此时的相关系数矢量中仍然只有某几个元素不为零, 只是有值的元素个数不一定是 3, 而且值也不一定是 1, 其中有值的元素表示由于存在图像配准误差导致该像素内含有第 i 个像素的分量. 这种情况下, 需要根据图像配准误差的具体情况来确定真实的相关系数矢量和真实的导向矢量.

如果假设目标存在于中间的待检测像素内, 即像素 5 中, 故运动目标的相关系数矢量受图像配准误差影响发生的扰动与像素 5 中杂波分量的相关系数矢量的变化相同.

首先分别求第 n ($n = 2, \dots, N$) 幅图像中待检测像素与第一幅图像中待检测像素及其周围 8 个相邻像素的相关系数, 通过比较其模值的大小可以确定第 n ($n = 2, \dots, N$) 幅图像与第一幅图像配准偏差的方向, 从而

确定该图像对应的子阵内的相关系数矢量中不为零的元素的位置. 例如图 2 中所示的第二幅图像配准偏差方向为向上, 故像素 5 中的分量有一部分偏到像素 2 中了, 因此所求的相关系数中待检测像素与其上方的相邻像素的相关系数将明显大于其它 7 个相邻像素, 例如, 我们仿真了配准误差为向上 0.4 个像素的情况, 这时第二幅图像中待检测像素与第一幅图像中的 9 个像素的相关系数分别为 0.0451, 0.5064, 0.0455, 0.0526, 0.7585, 0.0368, 0.0128, 0.1070, 0.0483.

确定了信号的相关系数矢量中元素不为零的位置后, 就可以初设它的相关系数矢量形式如下 (以像素 5 为例):

$$\begin{aligned} \tilde{S}_r^5 &= [\tilde{S}_{r1}^5, \tilde{S}_{r2}^5, \tilde{S}_{r3}^5]^T \\ &= [0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0]^T \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)的形式是根据图 2 中所示的图像配准偏差的情况得出的. 由式(7)可得像素 5 的初始导向矢量为:

$$\begin{aligned} \tilde{S}^5 &= S_s^5 \tilde{S}_r^5 = [1, 1, 1]^T [0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0]^T \\ &= [0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0]^T \end{aligned} \quad (9)$$

此时的导向矢量与真实的导向矢量只是形式相同, 其取值是存在误差的, 文中采用将有误差的导向矢量向信号子空间投影的方法^[8]得到真实的导向矢量.

对利用式(5)估计出的杂波加噪声协方差矩阵 R 进行特征值分解得到其杂波子空间 U_c , 并可得杂波子空间上的投影矩阵为:

$$P_c \stackrel{\text{def}}{=} U_c (U_c^H U_c)^{-1} U_c^H = U_c U_c^H \quad (10)$$

由于像素 5 的真实导向矢量存在于杂波子空间内, 故将式(9)向杂波子空间投影即可得到像素 5 的真实的导向矢量 S^5 和真实的相关系数矢量 S_r^5 :

$$S^5 = S_s^5 S_r^5, S_r^5 = P_c \tilde{S}_r^5 = U_c U_c^H \tilde{S}_r^5 \quad (11)$$

对于运动目标而言, 其相关系数矢量与所在像素 (像素 5) 内杂波的相关系数矢量相同, 而其空间导向矢量为:

$$(v_r) = \left[1, \exp \left[-j \frac{4 v_r d_2}{v_a} \right], \exp \left[-j \frac{4 v_r d_3}{v_a} \right] \right]^T \quad (12)$$

其中 d_n , $n = 2, 3$ 为第 n 个通道的等效相位中心到参考卫星的沿航向距离, v_a 为卫星速度, v_r 为运动目标的径向速度, λ 为波长. 进而就可以得到运动目标的真实的导向矢量:

$$\begin{aligned} (v_r) &= (v_r) S_r^5 \\ &= \left[1, \exp \left[-j \frac{4 v_r d_2}{v_a} \right], \exp \left[-j \frac{4 v_r d_3}{v_a} \right] \right]^T \end{aligned}$$

$$[S_{r1}^5, S_{r2}^5, S_{r3}^5]^T \quad (13)$$

根据最优波束形成的思想,当用该导向矢量构成的权矢量对信号进行波束形成时,运动目标的信号被相干积累其输出最大,而由于杂波信号的导向矢量与运动目标的不同而被非相干积累故其输出较小.因此可以利用线性约束最小方差准则^[9]构造自适应权:

$$w(v_r) = \mu R^{-1} (v_r) \quad (14)$$

μ 为复常数.用式(14)的自适应权对待检测像素进行多通道、多像素联合自适应波束形成,并构造如下的搜索函数:

$$J(v_r) = \frac{E_{S_{out}}}{(E_C + E_N)_{out}} \cdot \frac{(E_C + E_N)_{in}}{E_{S_{in}}} \\ = \frac{E_{S_{out}}}{(E_C + E_N)_{out}} \cdot \frac{(CNR + 1)}{E_{S_{in}}} \quad (15)$$

其中 $E_{S_{in}}$ 和 $E_{S_{out}}$ 分别为输入和输出信号的平均功率, $(E_C + E_N)_{in}$ 和 $(E_C + E_N)_{out}$ 分别为输入和输出的杂波加噪声的平均功率, CNR 为图像域的平均杂噪比, $\frac{2}{n}$ 为输入噪声的平均功率.搜索 v_r 使式(15)的搜索函数最大就可以得到动目标的径向速度的估计 \hat{v}_r .进而可以利用下式对动目标进行重新定位,

$$\bar{x} = x_0 + \frac{r(i)}{v_a} \quad (16)$$

其中 x_0 为成像后目标在图像中的方位位置, $r(i)$ 为卫星在成像中心时刻到目标的斜距.

上述方法是检测与测速定位同时完成的,但需要对整幅图像上的每一个像素分别处理,其运算量是相当大的,为了降低运算量,我们可以利用下面的方法先粗略估计运动目标在图像上的位置,从而缩小处理范围.

由于在检测之前运动目标的空间导向矢量和相关系数矢量均是未知的,可以用 $[1, 0, \dots, 0]^T$ 来代替运动目标的导向矢量,这样使杂波的输出功率尽可能

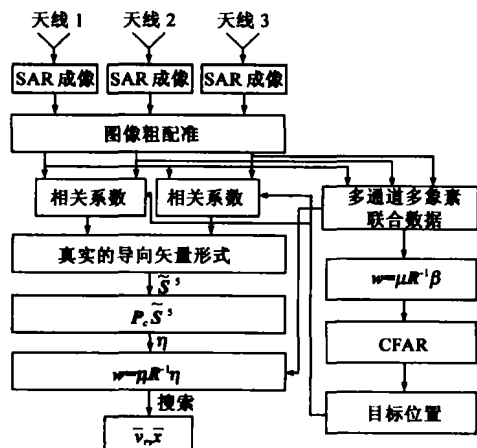


图3 本文方法处理结构框图

的小但不能保证目标信号不受损失.此时杂波抑制的阵列权矢量变为:

$$w = \mu R^{-1} \quad (17)$$

对 SAR 图像中的每一个像素分别利用上述的权矢量进行自适应波束形成,然后就可以通过恒虚警率(CFAR)技术来检测运动目标从而确定其在 SAR 图像上的位置.图3为本方法的处理结构框图.

4 仿真实验

下面通过仿真实验对本文方法的有效性进行验证.仿真中用到的参数如下:卫星阵列由3颗星组成,其沿航向坐标分别为0,133,217m,卫星速度 $v = 7000\text{m/s}$,卫星到地面的高度 $h = 800\text{km}$,观测距离 $R = 1000\text{km}$.雷达工作在 X 波段, $\lambda = 0.03\text{m}$,脉冲重复频率 $f_r = 1400\text{Hz}$.仿真的地面杂波平坦, CNR = 30dB, SCR = 0dB.在估计协方差矩阵时,沿方位向和距离向各选取8个共64个样本,即式(5)中的 $M = L = 8$.

4.1 动目标检测性能分析

图4给出了常规 DPCA 方法和本文方法在以下2种不同配准精度情况下动目标检测的性能比较(成像后目标位置在场景中心):

- (a) 三幅图像的配准误差分别为(0, 向左 0.25, 向下 0.5)象素
- (b) 三幅图像的配准误差分别为(0, 向左 0.75, 向下 1.5)象素

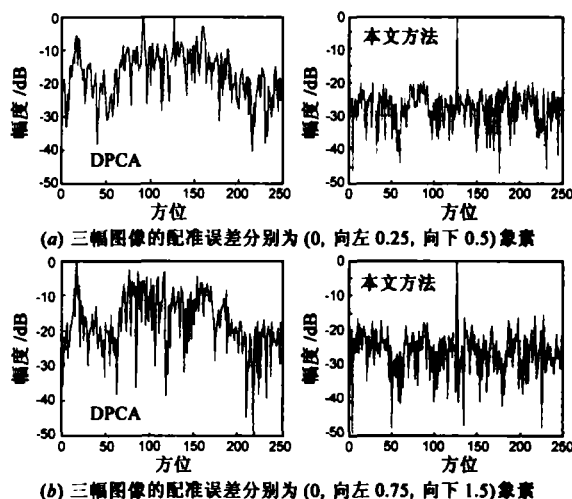


图4 不同配准误差情况下动目标检测性能

除了图像配准误差外,图像间杂波的相关性也会影响运动目标的检测性能.仿真中以第一个卫星通道为参考,其它两个通道的杂波分别附加一个幅度服从均值为0方差为0.1的高斯分布、相位服从0~0.2均匀分布的随机起伏,图5给出了分别利用本文方法和DPCA方法得到的改善因子随杂波相关系数的变化曲线.从图中可以看出,当杂波相关性下降到0.97时,本

文方法的输出信杂噪比改善仍能达到 24dB 以上,可以对动目标进行很好的检测,而 DPCA 方法的性能则差很多。

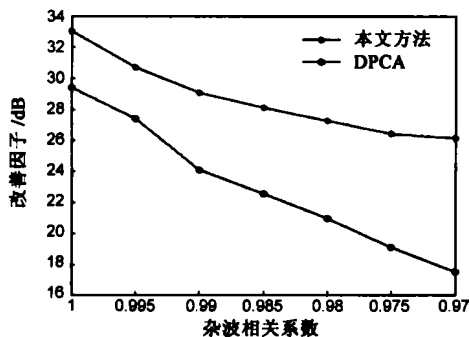


图 5 改善因子随杂波相关系数的变化曲线

图 6 给出了存在阵列误差情况下动目标检测性能的仿真结果,从图中可以看出,当存在 10% 的通道幅相误差或分米级的垂直航向位置误差时,本方法仍能获得很好的目标检测性能。

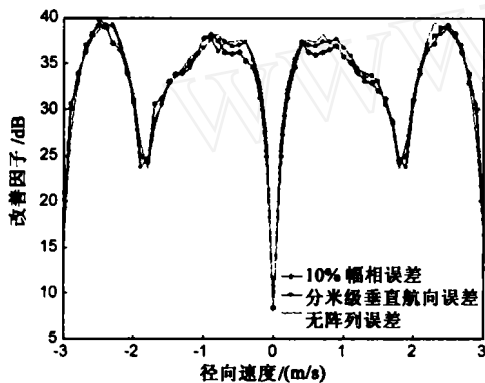


图 6 存在阵列误差情况下的目标检测性能

4.2 动目标测速定位性能分析

图 7 给出了在以下 3 种不同图像配准误差情况下进行速度估计的均方根误差统计结果。统计了 1200 次估计结果,每次估计过程中运动目标的径向速度随机分布在 $[0, 5] \text{ m/s}$ 之内。

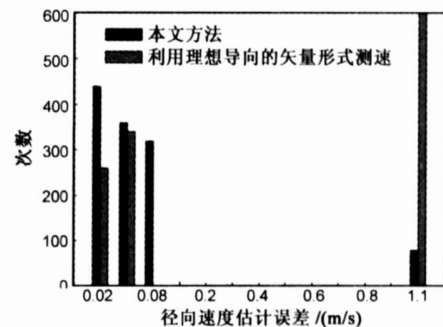
(a) 三幅图像的配准误差分别为(0, 向右 0.2, 向上 0.5)个像素。

(b) 三幅图像的配准误差分别为(0, 0, 向上 1)个像素。

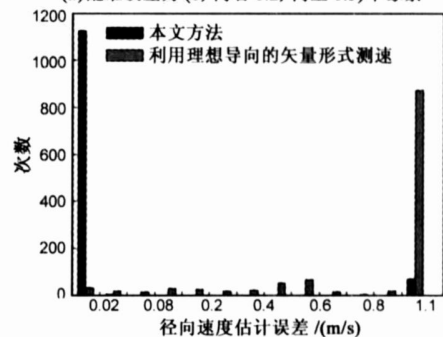
(c) 三幅图像的配准误差分别为(0, 向左 0.5 × 向下 0.5, 向上 0.5)个像素。

图中给出了两种方法的速度估计结果,一种是利用本文方法估计出的真实的导向矢量进行测速,另一种是直接利用上节中定义的理想导向矢量形式进行测速,通过比较两种方法的结果可以看出,利用本文方法测速的精度较高,大部分估计误差在 0.08 m/s 之内,图中估计误差在 1 m/s 附近的结果是由该速度接近速

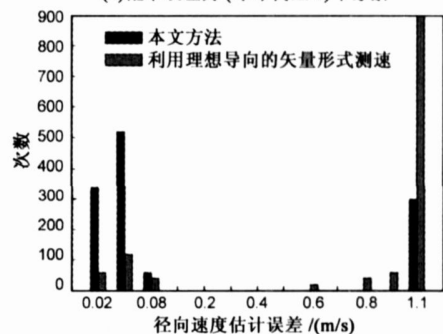
度响应曲线的高旁瓣区引起的测速模糊。而直接利用理想的导向矢量形式进行测速则速度估计误差较大,尤其是当配准误差较大时,如接近 1 个像素时,这种方法将完全失效。对于图像配准误差方向为斜向的情况,如情况 c 中第二幅图像的配准误差为(向左 0.5 × 向下 0.5)个像素,本文方法仍然能得到较好的测速结果,可见本文方法适用于任意方向的图像配准误差。



(a) 配准误差为(0, 向右 0.2, 向上 0.5)个像素



(b) 配准误差为(0, 0, 向上 1)个像素



(c) 配准误差为(0, 向左 0.5 向下 0.5, 向上 0.5)个像素

图 7 运动目标径向速度估计及定位结果

5 结论

当图像配准误差、杂波去相干以及阵列误差存在时传统的 DPCA、ATI 等动目标检测方法的性能将受到严重影响,会大大增加虚警概率甚至完全失效。而本文提出的基于图像域的多通道、多像素联合自适应处理的动目标检测及测速定位联合实现方法,大大提高了动目标检测性能及测速定位精度,对图像配准误差以及阵列误差等具有较强的稳健性。

参考文献:

- [1] Massonnet D. The interferometric cartwheel: A constellation of passive satellites to produce radar images to be coherently combined[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22 (12): 2413 - 2430.
- [2] Goodman N A, Lin S C, Rajakrishna D, et al. Processing of multiple-receiver spaceborne arrays for wide-area SAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40 (4): 841 - 847.
- [3] Krieger G, Fiedler H, Mittermayer J, et al. Analysis of multi-static configurations for spaceborne SAR interferometry[J]. IEEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150 (3): 87 - 96.
- [4] Wang H S C. Mainlobe clutter cancellation by DPCA for space-based radars [A]. IEEE Aerospace Applications Conference [C]. New York Piscataway: IEEE, 1991. 1 - 128.
- [5] Frasier S J. Dual-beam interferometry for ocean surface current vector mapping [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39 (2): 401 - 414.
- [6] Klemm R. Introduction to space-time adaptive processing[J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1999, 27 (2): 5 - 12.
- [7] Li Zhengfang, Bao Zheng, Li Hai, et al. Image autocoregistration and InSAR interferogram estimation using joint subspace projection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44 (2): 288 - 297.
- [8] Feldman D, Griffiths L J. Projection approach for robust adaptive beamforming[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42 (4): 867 - 876.
- [9] Frost O L. An algorithm for linearly constrained adaptive array processing[J]. IEEE Proceedings on Signal Processing, 1972, 60 (8): 926 - 935.

作者简介:



刘颖女, 1979年5月生于山东省潍坊市, 现为西安电子科技大学信号与信息处理专业博士生. 主要研究方向为分布式小卫星雷达动目标检测、阵列误差估计与校正以及合成孔径雷达成像等. E-mail: liuying1927@126.com

廖桂生男, 1963年生于广西, 现为西安电子科技大学信号与信息处理学科博士生导师, 雷达信号处理国家重点实验室副主任, 曾获省部级科技进步奖一等奖1项、二等奖2项、三等奖1项, 在国内外主要学术刊物上发表论文70余篇, 其中有10余篇已被SCI收录. 目前主要研究方向为分布式小卫星雷达系统、阵列信号处理、智能天线等. E-mail: gsliao@xidian.edu.cn

周争光男, 1969年生于湖北, 现为西安电子科技大学信号与信息处理专业博士生. 主要研究方向为阵列信号处理及其在雷达信号处理中的应用、分布式小卫星雷达动目标检测等.