

维纳滤波最优权修正导向矢量的 SAR-GMTI 动目标径向速度估计方法

束宇翔, 廖桂生, 杨志伟

(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: 针对通道幅相误差和图像配准误差等非理想因素导致动目标径向速度估计性能下降问题, 本文提出利用维纳滤波最优权修正导向矢量的动目标径向速度估计方法. 该方法利用抑制杂波的维纳滤波最优权矢量对动目标理想导向矢量加权处理获得修正导向矢量, 并采用匹配滤波算法估计动目标径向速度. 仿真数据和某机载多通道 SAR-GMTI 实测数据处理表明, 所提方法对通道幅相误差和图像配准误差稳健, 在图像相邻像素存在较大相关性时仍可获得较高的动目标径向速度估计精度.

关键词: 地面运动目标检测; 杂波抑制; 参数估计

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 09-1986-06

Radial Velocity Estimation of Moving Targets Based on Modifying the Steering Vector with Wiener Optimal Weights in SAR-GMTI Radar System

SHU Yu-xiang, LIAO Gui-sheng, YANG Zhi-wei

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

Abstract: For the purpose of overcoming the influence of non-ideal factors on the performance of the radial velocity estimation, such as the channel gain and phase response error and image registration error, a new match filtering algorithm based on modifying the steering vector with the optimal weights for Wiener filtering is proposed. The validity and superiority of this method are experimentally verified by the simulated and real synthetic aperture radar (SAR) data. The results illustrate this method has a good robustness to image registration error, channel response error and the pixel correlation of the SAR image.

Key words: ground moving target detection; clutter rejection; target parameter estimation

1 引言

合成孔径雷达(SAR)技术与地面运动目标检测(GMTI)技术相结合,可提供运动平台雷达(机载雷达或星载雷达)监视区域的静态和动态两种信息.虽然单通道 SAR/GMTI 系统通过采用频域滤波、反射特性位移、时频分析^[1,2]等技术可以实现 GMTI 的功能,但是难以有效检测淹没在主瓣杂波区的慢速微弱运动目标信号.在多通道 SAR-GMTI 系统中,根据场景杂波的多谱勒频率与空间锥角的对应关系,采用空时自适应处理方法^[3,4]可有效抑制杂波,获得更好的最小可检测速度(MDV).但是通道幅相误差和 SAR 图像精配准困难等非理想因素导致运动目标实际导向矢量与理想导向矢量存在误差,进而使得传统自适应匹配滤波算法的动目标检测和参数估计性能下降.文献[5]提出了利用子空间投影的径向速度估计方法,在正确估计信号子空间的

基础上可获得较好的估计性能.但在实际环境中,一方面准确判断信号子空间维数通常比较困难,另一方面该方法需要对杂波自相关矩阵进行特征分解,运算量较大.此外,考虑在实际成像过程中采样率通常大于信号带宽,并且为了降低积分旁瓣比需要进行二维加窗处理,导致距离方位压缩后的 SAR 图像相邻像素具有相关性,使得正确估计杂波的信号子空间更为困难.

针对上述问题,本文提出利用维纳滤波最优权修正导向矢量的动目标径向速度估计方法.该方法在利用抑制杂波的维纳权矢量对动目标理想导向矢量加权处理获得修正导向矢量基础上,采用匹配滤波算法估计动目标径向速度.对仿真数据和某机载多通道 SAR-GMTI 实测数据的处理结果表明本文所提方法对通道幅相误差和图像配准误差稳健,在图像相邻像素存在较大相关性时仍可获得较高的动目标径向速度估计精度.

2 信号模型

不失一般性,假设 SAR-GMTI 系统有 M 个通道沿航向排列,第一个通道为发射/接收通道,其余通道只接收雷达回波,与第一个通道的间距依次为 d_2, d_3, \dots, d_M . 如图 1 所示.

各通道回波数据分别经过 SAR 成像处理并精确配准得到 M 幅复图像,理想情况下 SAR 图像各像素间满足独立同分布的条件,地面慢速运动目标仅在一个像素单元内存在且不扩散到相邻像素单元,则 M 个通道的 SAR 图像所对应的同一像素(对应同一地面散射单元)的复数据可写成如下矢量形式:

$$H_0: X_0(m, n) = C(m, n) + N(m, n) \quad (1)$$

$$H_1: X_1(m, n) = C(m, n) + N(m, n) + S(m, n)$$

其中: m, n 分别为 SAR 图像中距离向和方位向的坐标; H_0 表示检测单元不含运动目标; H_1 表示检测单元包含运动目标; $C(m, n) = [c_1(m, n), \dots, c_M(m, n)]^T$ 表示杂波信号; $N(m, n) = [n_1(m, n), \dots, n_M(m, n)]^T$ 表示加性高斯白噪声; $S(m, n) = [s_1(m, n), \dots, s_M(m, n)]^T$ 表示目标信号; $[\cdot]^T$ 表示转置.

假设动目标的径向速度 v_r , 雷达工作波长 λ , 平台速度 v_a . 利用杂波空域导向矢量与空间锥角的对应关系,经补偿后杂波的空域导向矢量可表示为 $\mathbf{a}_c = [1, 1, \dots, 1]_M^T$. 与静止场景相比,目标由于相对雷达观察视线的径向运动导致在不同通道间产生一个相位差,动目标的空域导向矢量可表示为

$$\mathbf{a}_s(v_r) = \left[1, \exp\left(-j \frac{2\pi d_2 v_r}{\lambda v_a}\right), \dots, \exp\left(-j \frac{2\pi d_M v_r}{\lambda v_a}\right) \right]_M^T$$

$$= \left[1, \exp(j\phi_v^2), \dots, \exp(j\phi_v^M) \right]_M^T \quad (2)$$

其中 $\phi_v^i = -\frac{2\pi d_i v_r}{\lambda v_a}$, $i = 2, 3, \dots, M$

对场景杂波有效抑制是检测主瓣区运动目标的前提^[6-8], 本文借鉴文献^[6]中提出的多点相消算法抑制场景杂波,按照图 2 所示方式构造联合数据矢量.

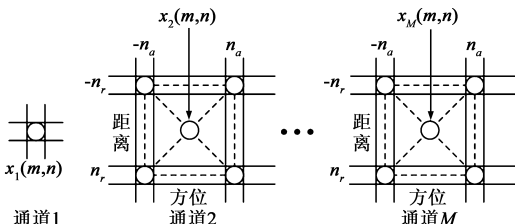


图2 联合数据构造示意图

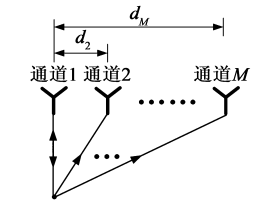


图1 SAR-GMTI系统示意图

其中 n_r 为距离半径, n_a 为方位半径. 令 $N_r = 2n_r + 1, N_a = 2n_a + 1, N_r, N_a$ 分别表示构造联合数据的距离采样点数和方位采样点数. 则数据矢量如式(3)所示.

$$\mathbf{X}(m, n) = \begin{bmatrix} x_1(m, n), x_2(m - n_r, n - n_a), \dots, x_2(m + n_r, n + n_a), \\ \dots, x_M(m - n_r, n - n_a), \dots, x_M(m + n_r, n + n_a) \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$$\text{令 } \mathbf{X}_i(m, n) = \begin{bmatrix} x_i(m - n_r, n - n_a), \\ \vdots \\ x_i(m + n_r, n + n_a) \end{bmatrix}_{(N_r N_a) \times 1}$$

$i = 2, \dots, M$, 则

$$\mathbf{X}(m, n) = [x_1(m, n), \mathbf{X}_2^T(m, n), \dots, \mathbf{X}_M^T(m, n)]^T \quad (4)$$

相应的,动目标理想导向矢量可表示为:

$$\mathbf{a}_{si}(v_r) = \begin{bmatrix} 1, 0, \dots, 0, \exp(j\phi_v^2), 0, \dots, 0, \\ \dots, 0, \dots, 0, \exp(j\phi_v^M), 0, \dots, 0 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

实际工作环境中,通道幅相误差和图像配准误差使得动目标的实际导向矢量难以精确获知,采用 $\hat{\mathbf{a}} = [1, 0, \dots, 0]^T$ 代替目标的导向矢量^[6], 根据线性约束最小方差准则,构造如下杂波抑制自适应权矢量

$$\mathbf{w} = \mathbf{R}^{-1} \hat{\mathbf{a}} \quad (6)$$

其中 \mathbf{R} 表示场景的协方差矩阵,在场景杂波满足独立同分布前提下,根据下式估计:

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{X}(m, n) \mathbf{X}^H(m, n)] \quad (7)$$

其中 $E[\cdot]$ 表示取期望, $[\cdot]^H$ 表示共轭转置. 通过 CFAR 处理获得动目标位置之后就可以对每个目标进行速度匹配搜索.

3 动目标径向速度估计方法

众所周知,采用自适应匹配滤波方法(AMF)估计动目标径向速度的代价函数如下:

$$\hat{v}_r = \arg \max_{v_r} \frac{|\mathbf{w}^H(v_r) \mathbf{X}(m, n)|^2}{\mathbf{w}^H(v_r) \mathbf{R} \mathbf{w}(v_r)}$$

$$= \arg \max_{v_r} \frac{|\mathbf{w}^H(v_r) \mathbf{X}(m, n)|^2}{\mathbf{a}_{si}^H(v_r) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_{si}(v_r)} \quad (8)$$

其中 $\mathbf{w}(v_r) = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_{si}(v_r)$.

实际处理中,一方面存在系统误差、图像配准误差等非理想因素,另一方面距离方位压缩过程导致图像的像素间具有相关性,从而使得目标实际导向矢量难以精确获知,无法正确约束目标信号,利用 AMF 方法测速的性能下降. 针对这一问题,本文提出利用维纳滤波最优权修正导向矢量的匹配滤波方法(简称为 OWMF 方法),具体处理步骤描述如下:

步骤 1 计算抑制杂波的维纳权

令 $\mathbf{X}_r = [\mathbf{X}_2^T(m, n), \dots, \mathbf{X}_M^T(m, n)]^T$, 则式(4)可改写为

$$\mathbf{X}(m, n) = [x_1(m, n), \mathbf{X}_r^T]^T \quad (9)$$

将场景的协方差矩阵写成分块矩阵形式

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & \mathbf{r}_{12}^H \\ r_{12} & \mathbf{R}_{22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中 $r_{11} = E[x_1(m, n)x_1^*(m, n)]$, $[\cdot]^*$ 表示共轭, $\mathbf{r}_{12} = E[\mathbf{X}_r(m, n)x_1^*(m, n)]$, $\mathbf{R}_{22} = E[\mathbf{X}_r(m, n)\mathbf{X}_r^H(m, n)]$.

根据线性约束最小方差准则 $\begin{cases} \min \|\bar{\mathbf{w}}^H \mathbf{X}\| \\ \text{s.t. } \bar{\mathbf{w}}(1) = 1 \end{cases}$, 得到维纳滤波意义上的杂波抑制最优权矢量

$$\bar{\mathbf{w}} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\mathbf{R}_{22}^{-1} \mathbf{r}_{12} \end{bmatrix} \quad (11)$$

可以发现: $\bar{\mathbf{w}}$ 中的 $-\mathbf{R}_{22}^{-1} \mathbf{r}_{12}$ 项同时包含了通道数据互相关和各个通道数据的自相关, 因此在估计目标径向速度时, 利用 $\bar{\mathbf{w}}$ 对目标导向矢量进行修正, 有望实现对通道幅相误差、图像配准误差的稳健处理, 以及在图像内像素间具有相关性时获得更好处理结果.

步骤 2 标记动目标实际导向矢量中有效元素位置

配准误差和相邻像素的相关性将导致动目标的实际导向矢量与式(5)不再相等. 我们定义与 $-\mathbf{R}_{22}^{-1} \mathbf{r}_{12}$ 同样维数的全零列矢量 \mathbf{a}_p , 鉴于 $-\mathbf{R}_{22}^{-1} \mathbf{r}_{12}$ 中模值高于一定门限 T_{th} 的元素在杂波抑制过程中起主要作用(称为有效元素), 在 \mathbf{a}_p 中将有效元素的对应位置修正为 1. 在此基础上, 定义动目标未加权的有效导向矢量如下:

$$\mathbf{a}_{sp}(v_r) = \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a}_\phi(v_r) \odot \mathbf{a}_p \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中 $\mathbf{a}_\phi(v_r) = \begin{bmatrix} \underbrace{\exp(j\phi_v^2), \dots, \exp(j\phi_v^2)}_{N_v} \\ \underbrace{\exp(j\phi_v^M), \dots, \exp(j\phi_v^M)}_{N_v} \end{bmatrix}^T$, \odot 表示

Hadamard 积.

步骤 3 构造加权导向矢量, 估计动目标径向速度 $\bar{\mathbf{w}}$ 是维纳滤波意义上对消杂波的最优权, 则对杂波信号的最佳累积权值 $\boldsymbol{\eta}$ 可表示为:

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{R}_{22}^{-1} \mathbf{r}_{12} \end{bmatrix} \quad (13)$$

进而可获得修正后的动目标导向矢量为:

$$\mathbf{a}_{ow}(v_r) = \boldsymbol{\eta} \odot \mathbf{a}_{sp}(v_r) \quad (14)$$

根据下述代价函数进行速度搜索:

$$\hat{v}_r = \arg \max_{v_r} |\mathbf{a}_{ow}^H(v_r) \mathbf{X}(m_t, n_t)|^2 \quad (15)$$

其中 m_t, n_t 分别表示目标在 SAR 图像所处单元的距离

向和方位向坐标; $\mathbf{X}(m_t, n_t)$ 是以 (m_t, n_t) 为坐标中心, 按照式(9)描述的方式构造的联合数据矢量.

为了与 OWMF 对比, 我们提出利用相关矢量修正导向矢量的径向速度估计方法, 称之为相关加权方法(简称为 CWMF 方法), 该方法的具体描述如下:

步骤 1 计算抑制杂波的维纳权

步骤 2 标记动目标实际导向矢量中有效元素位置

根据相关矩阵 \mathbf{R} 的第一列 $\boldsymbol{\rho}_1 = [r_{11}, \mathbf{r}_{12}^T]^T$, 采用与 OWMF 中类似的方法, 获得未加权的有效导向矢量 $\mathbf{a}_{spr}(v_r)$.

步骤 3 构造相关加权导向矢量, 估计动目标径向速度

相关加权导向矢量按下式计算:

$$\mathbf{a}_{cw}(v_r) = \boldsymbol{\rho}_1 \odot \mathbf{a}_{spr}(v_r) \quad (16)$$

构造如下代价函数, 进行速度搜索

$$\hat{v}_r = \arg \max_{v_r} |\mathbf{a}_{cw}^H(v_r) \mathbf{X}(m_t, n_t)|^2 \quad (17)$$

下面对 OWMF 算法与 CWMF 算法的异同进行说明. 就双通道系统而言, 在相邻像素数据满足独立同分布前提下, 即像素间不具有相关性(相关系数近似为 0)时, \mathbf{R}_{22} 是一个对角阵. 进一步假设各个接收通道的杂波能量相等, 即可以写成 $\mathbf{R}_{22} = \sigma_c^2 \mathbf{I}$, 其中 σ_c 为杂波的复反射系数, \mathbf{I} 为 $N_r N_a \times N_r N_a$ 的单位阵, 可得

$$\mathbf{R}_{22}^{-1} = (\sigma_c^2)^{-1} \mathbf{I}, \boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{R}_{22}^{-1} \mathbf{r}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ (\sigma_c^2)^{-1} \mathbf{r}_{12} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\rho}_1 = \begin{bmatrix} r_{11} \\ \mathbf{r}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_c^2 \\ \mathbf{r}_{12} \end{bmatrix}$$

对比 $\boldsymbol{\eta}$ 与 $\boldsymbol{\rho}_1$ 可以看出他们是一致的, 所以此时 OWMF 方法与 CWMF 方法等效. 但在场景杂波不再满足相互独立的理想情况时, 两种方法不再等价. 注意到 OWMF 方法的加权矢量为抑制杂波的维纳解, 有望比 CWMF 方法获得更好的动目标速度估计性能.

4 实验结果及分析

4.1 仿真分析

下面以星载双通道 SAR-GMTI 系统为例, 通过计算机仿真验证本文方法的有效性. 仿真参数配置为: 轨道高度 675km, 卫星飞行速度 7500m/s, 工作波长 0.03m, 脉冲重频 3500Hz, 发射带宽 80MHz, 双天线接收孔径间隔 5m, 杂噪比 CNR = 10dB.

首先给出邻近分辨单元杂波数据满足独立同分布条件下 OWMF 方法与 AMF 方法在不同配准误差、通道相位误差、信杂比下的性能对比.

图 3 给出了信杂比 SCR = 8dB, 目标干涉相位 $\pi/2$, 不同配准误差下 AMF 方法与 OWMF 方法的测速性能比

较.这里配准误差值 d 指配准误差半径,即 $d = \sqrt{dx^2 + dy^2}$, dx 、 dy 分别为距离、方位配准误差像素值.对不同的配准误差 d 分别进行 1000 次蒙特卡罗实验,可以看出:当配准误差在 1/10 个像素以内时,AMF 方法与 OWMF 方法的动目标干涉相位估计均方根误差均较小,但随着配准误差的继续增大,不满足精配准的要求时,AMF 方法性能急剧下降,而本文提出的 OWMF 方法对配准误差稳健.

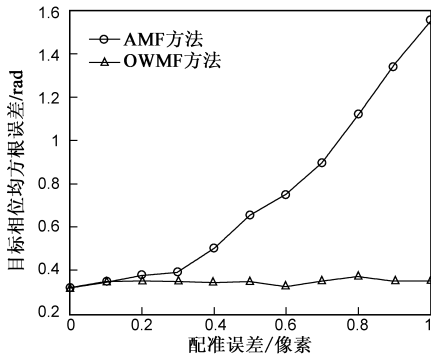


图3 测速性能随配准误差变化曲线

通道幅相误差会影响 AMF 方法的测速性能,其中相位误差使测速性能的恶化更为明显.图 4 给出了 SCR = 10dB,目标干涉相位 $\pi/2$,AMF 方法与 OWMF 方法在不同通道相位误差下测速性能的比较.对不同的通道相位误差分别进行 1000 次蒙特卡罗实验,可以看出随着通道相位误差的增大,AMF 方法性能逐渐下降,而本文提出的 OWMF 方法对通道相位误差稳健.

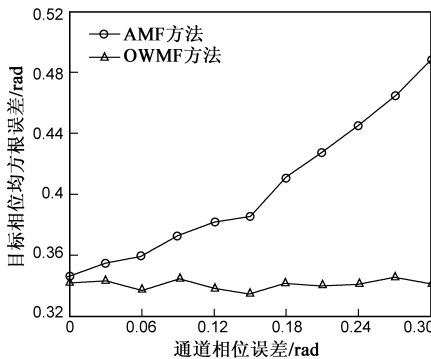


图4 测速性能随通道相位误差变化曲线

图 5 给出了在配准误差 0.5 个像素,目标干涉相位 $\pi/2$,不同 SCR 情况下,AMF 方法与 OWMF 方法测速性能的比较.对不同的 SCR 条件,分别进行 1000 次蒙特卡罗实验,可以发现存在配准误差时,随着 SCR 的提高,两种方法的性能都有改善,但本文提出的 OWMF 方法要优于 AMF 方法.

当图像内像素间存在相关性的时候,本文第 3 节提出的 OWMF 方法和 CWMF 方法不再相同.进一步的,我们在图 6 中给出 SCR = 8dB,目标干涉相位 $\pi/2$,两通道的图像具有 0.5 个像素的配准误差情况下,OWMF 方法

与 CWMF 方法的测速性能随邻近像素相关性的变化关系.这里像素间相关性是通过以最大值归一化后的杂波协方差矩阵中一个像素点与邻近像素最大的相关系数来衡量.对像素间相关性不同的场景图像,分别进行 1000 次蒙特卡罗实验.从图 6 中可以看出在 SAR 图像中像素间相关性较大的情况下,OWMF 方法比 CWMF 方法具有更稳定的测速性能,这也印证了我们在第 3 节中得到的结论.

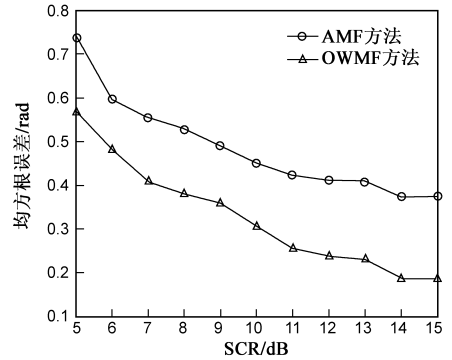


图5 测速性能随SCR变化曲线

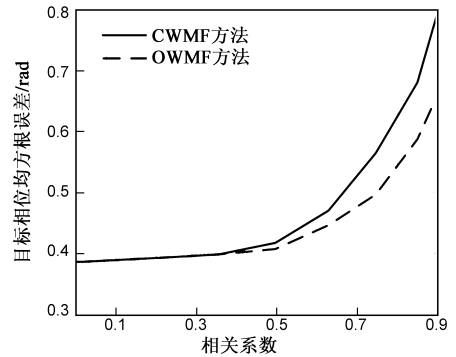


图6 测速性能随像素间相关系数变化曲线

4.2 实测数据处理

本节利用某机载多通道 SAR-GMTI 雷达实测数据验证本文提出的方法.主要系统参数如下:载机速度 v 约为 115m/s,脉冲重复频率 1000Hz,发射带宽 40MHz,通道间距 0.6m.成像后选择运动目标所在的图像区域如图 7 所示.

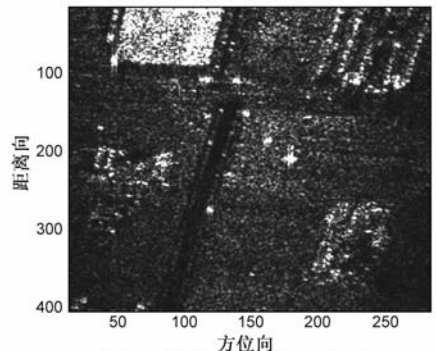


图7 实测数据场景SAR图像

用本文提出的 OWMF 方法对动目标所在位置进行速度搜索.令检测的目标方位向位置为 x_d ,目标所在距离门对应的斜距为 R_c ,估计的目标径向速度为 \hat{v}_r ,根据 $x_o = x_d + \frac{\hat{v}_r \cdot R_c}{v}$ 实现对目标的重新定位.图 8 是对运动目标进行测速并重新定位的结果,图中标出了由于径向速度导致方位向位置偏移的动目标,公路中的白色菱形标志表示对与其在同一距离门上的目标重新定位的真实方位位置.

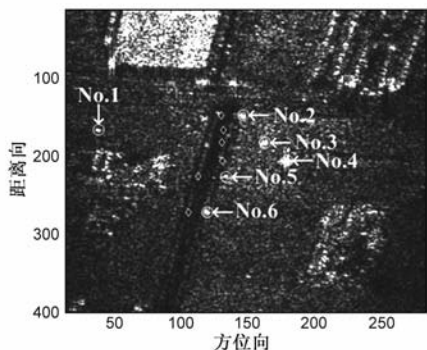


图8 对实测数据目标重新定位结果

图 9 给出了对目标 1 和目标 5 分别用 OWMF 方法和 CWMF 方法进行速度搜索得到的代价函数曲线的比较.可以看出:OWMF 方法的速度搜索曲线最大值与最小值的差异更为明显,谱峰更为尖锐、宽度更窄,利于获得更好的动目标径向速度估计精度.

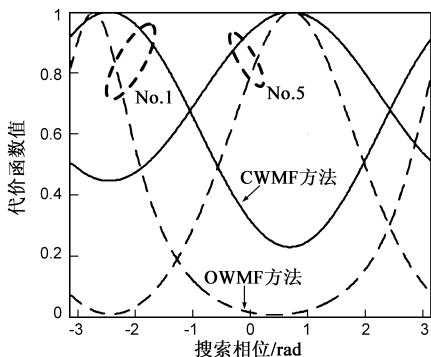


图9 代价函数搜索曲线

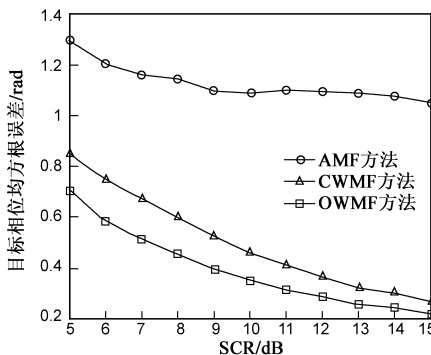


图10 以实测场景为背景的测速性能随SCR变化曲线

图 10 以该实测场景为杂波背景(统计的像素间最大相关系数为 0.8052),给出了存在 0.5 个像素配准误差,动目标干涉相位 $\pi/2$ 的测速性能随 SCR 变化关系.可以发现:OWMF 方法相比 AMF 方法和 CWMF 方法而言,在不同 SCR 下均具有更好的测速性能.验证了本文方法不仅对配准误差稳健,而且在 SAR 图像背景杂波像素间存在相关性时仍可获得较好的动目标测速性能.

5 结论

SAR 图像的配准误差、通道幅相误差以及像素间的相关性给动目标的测速定位性能带来严重影响.针对上述问题本文提出了利用维纳滤波最优权修正导向矢量的动目标径向速度估计方法.实测数据和仿真数据的处理结果表明本文所提方法对通道幅相误差和图像配准误差稳健,在图像相邻像素存在较大相关性时仍可获得较高的动目标径向速度估计精度.在实际处理中,对于高速运动的目标信号在成像期间不能有效积累会导致目标散焦,如何对此类目标实现稳健的测速定位有待进一步研究.

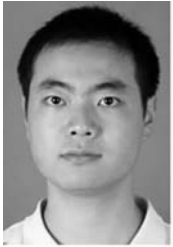
参考文献

- [1] Raney R K. Synthetic aperture imaging radar and moving targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1971, 7(3): 499 – 505.
- [2] Moreira J R, Keydel W. A new MTI-SAR approach using the reflectivity displacement method [J]. IEEE Trans on GRS, 1995, 33(5): 1238 – 1244.
- [3] J H G Ender. Space-time processing for multichannel synthetic aperture radar [J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1999, 11(1): 29 – 38.
- [4] Klemm R. Space-Time Adaptive Processing: Principles and Applications[M]. London: IEE Press, 1998.
- [5] 刘颖, 廖桂生, 周争光. 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[J]. 电子学报, 2007, 35(6): 1009 – 1014.
- LIU Ying, LIAO Gui-sheng, ZHOU Zheng-guang. A robust method to images registration of ground moving target detection and relocation for distributed small satellites synthetic aperture radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(6): 1009 – 1014. (in Chinese)
- [6] M Soumekh. Signal subspace fusing of uncalibrated sensors with application in SAR and diagnostic medicine [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1999, 8(1): 127 – 137.
- [7] 李真芳, 保铮, 杨凤凤. 基于成像的分布式卫星 SAR 系统地面运动目标检测 (GMTI) 及定位技术 [J]. 中国科学 (E 辑), 2005, 35(6): 597 – 609.

LI Zhenfang, BAO Zheng, YANG Fengfeng. Ground moving target detection and location based on SAR images for distributed spaceborne SAR[J]. Science in China (Series F), 2005, 48(5): 632 - 646.

- [8] 杨志伟, 廖桂生, 曾操. 基于联合特征空间投影的 SAR 图像域杂波抑制[J]. 电子学报, 2007, 35(12): 2298 - 2031.
 YANG Zhi-wei, LIAO Gui-sheng, ZENG Cao. Clutter suppression based on joint eigenspace projection in synthetic aperture radar image domain[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(12): 2298 - 2031. (in Chinese)

作者简介

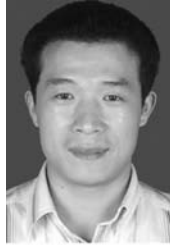


束宇翔 男, 1987 年 7 月生于安徽巢湖, 现为西安电子科技大学信号与信息处理专业博士生, 主要研究方向为运动平台雷达动目标检测, 阵列信号处理等.

E-mail: shuyuxiang723@163.com



廖桂生 男, 1963 年 6 月生于广西桂林. 现为西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, IEEE 会员. 主持和承担了国防 973 课题、国家“863”高技术项目、国防科技预研、国家自然科学基金等科研任务, 其中获省部级科技进步奖一等奖 1 项、二等奖 2 项、三等奖 1 项. 1999 年获教育部颁发的首批“新世纪百千万人才工程国家级人选”, 2008 年获国家杰出青年科学基金. 在国内外发表学术论文 140 余篇. 现主要从事雷达探测系统信号处理、包括空时自适应处理, 天基预警和阵列信号处理等研究领域. E-mail: gsliao@xidian.edu.cn



杨志伟 男, 1980 年出生于四川省南充市, 博士, 现为西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室副教授. 主持国防科技预研和国家自然科学基金各一项. 研究领域为: 天基预警、阵列信号处理、多维域动目标检测和运动平台雷达动目标检测.

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