

基于样本加权的三通道 SAR-GMTI 机载 数据处理及性能分析

曾 操, 廖桂生, 杨志伟, 刘聪锋

(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: 针对机载三通道雷达系统的杂波抑制问题, 提出基于样本加权估计杂波相关矩阵的三通道联合动目标检测方法. 基于广义内积值对像素矢量样本加权, 三通道联合杂波抑制后检测出动目标位置, 局部两两干涉实现动目标重定位和测速, 最后进行了性能分析. 所提方法无需设置样本选取门限, 对图像配准精度仅要求在 1 个像素以内, 样本加权后改善因子提高明显; 3 幅图像联合处理的性能优于 2 幅图像处理. 机载实测数据处理结果验证了方法的有效性和稳健性.

关键词: 地面动目标检测; 杂波抑制; 样本选取; 三通道合成孔径雷达

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 03-0506-07

Airborne Data Processing and Performance Analysis Based on Three-Aperture SAR GMTI System Using Weighted Sample

ZENG Cao, LIAO Gui sheng, YANG Zhi wei, LIU Cong feng

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

Abstract: A robust method for estimating the covariance matrix using the weighted pixels vector for the joint clutter rejection is proposed. Firstly, the pixels vector is weighted based on the value of the generalized inner product. Secondly, the locations of the ground moving targets are detected using the map of joint clutter rejection with three SAR images. Thirdly, the true locations and velocities of the targets can be obtained by the local interferometric method. Finally, the performance analysis is given. Without the threshold of the sample select and only one pixel image registration being required, the improved factor with the weighted processing is much higher than that with the unweighted processing and the improved factor of the jointed processing is better than that of the paired processing. The effectiveness and robustness of the proposed method are verified with the results of the measured airborne data.

Key words: GMTI; clutter rejection; sample select; three aperture SAR

1 引言

为了获取地面运动目标信息, 将雷达安置于高空运动平台, 如飞机和卫星上已成为趋势. 由于平台运动, 静止的地物场景相对于平台而言也是运动的, 这将导致地物杂波的多普勒谱严重展宽, 从而慢速运动目标常淹没于雷达主杂波区, 传统地基雷达中利用时域一维多普勒滤波处理检测运动目标不再有效.

如何有效抑制展宽的地物杂波多普勒谱, 成为提高动目标检测性能的关键. 为此, 人们相继提出四种主要关键技术: 相位中心偏置天线 (Displaced Phase Center Antenna, DPCA) 技术; 沿航迹干涉 (Along-track Interferomet-

ric, ATI) 技术; 空时自适应处理 (Space Time Adaptive Processing, STAP) 技术; 结合成像的 SAR-GMTI (Synthetic Aperture Radar-Ground Moving Target Indicator) 技术. DPCA 原理是利用不同时的相位中心重合实现地杂波相消, 传统 DPCA 要求雷达重频、天线间隔和平台速度保持固定关系, 这在应用中不易满足. 目前已发展出多相位中心、多相位-多延迟处理 DPCA、频域 DPCA 等现代 DPCA 方法^[1], 现代 DPCA 已不要求满足上述固定关系. ATI 技术利用沿航迹通道间的回波相位差异达到运动目标检测目的, 早期主要用沿航迹的双通道干涉取相位来测定洋流速度^[2], 目前也被应用于地面慢速运动目标检测. 美国在 E-8C 飞机上搭载 JSTARS (Joint Surveillance Target

Attack Radar System)^[3], 采用 3 个子孔径干涉结构实现近实时的广域监视和远程目标攻击指示能力, 并经历海湾战争考验, 但由于通道数少算法过于简单, 检测性能并非十分理想. STAP 技术^[4]利用杂波空时耦合特性设计的自适应二维滤波器以滤除地杂波, 并保证对运动目标有足够的增益, 是一种有效抑制场景杂波和提高最小可检测速度的关键技术. 美国在 90 年代录取了大量机载多通道实测数据(例如 MCARM^[5]数据, Multi Channel Airborne Radar Measurement), 有力推动了 STAP 技术的发展.

结合 SAR 成像的 GMTI 技术逐渐成为研究热点, 多通道 SAR-GMTI 系统由于具有良好的主瓣杂波抑制能力和较小的最小可检测速度逐渐成为主流, 并且成像与 DPCA、ATI 以及 STAP 技术融合日益明显. 典型方法主要包括: ①图像域 DPCA^[6], 对多幅 SAR 图像进行插值、配准, 采用直接或自适应相减方式抑制杂波, 但该方法所需的图像插值运算量大, 配准精度要求较高. ②图像域 ATI^[7], 对多幅配准后的图像干涉处理得到干涉图, 采用仅相位、仅幅度或幅相联合检测的方式检测出动目标, 由于不抑制杂波, 难以检测微弱、稀疏的动目标. 德国 1996 年试飞的 AER(Airborne Experimental Radar)^[8]雷达系统, 对海港的 SAR 图像 ATI 处理后检测出方位偏移的船只. ③图像域 STAP^[9], 将传统 STAP 方法直接应用于 SAR 图像域. 加拿大 2003 年进行了两通道多模喇叭天线 X 波段雷达二期试飞^[10], 基于多普勒锐化(Doppler Beam Sharp, DBS)图采用后多普勒(Post-doppler)空时自适应处理实现广域区域监视. ④图像域像素矢量的杂波抑制方法^[11, 12], 利用参考像素附近的像素帮忙来实现自适应抑制杂波, 能够降低对图像配准精度的要求. 国内多家高校和研究单位长期对多通道 SAR-GMTI 系统进行理论和应用研究^[13, 14], 特别是近年来多次的挂飞试验, 国内 SAR-GMTI 技术取得长足进步.

由于环境和系统的不确定性, 实际中杂波抑制通常采用自适应方式, 由于涉及杂波相关矩阵, 其估计要求有足够的独立同分布(Independent and Identically Distributed, I. I. D)样本, 这就需要有效的样本选取方法. 从已有文献来看, 主要分为四类: ①固定的样本选取策略, 例如功率选择训练法(Power Select Training, PST)^[15]、相位和功率选择法^[16]等, 通过样本功率排序, 只挑选功率强的样本估计杂波相关矩阵, 如果样本中存在强目标, 则存在强目标“污染”问题; ②奇异样本检测和剔除方法, 强目标信号和孤立干扰, 虽然通常只出现在个别距离单元, 但对权矢量计算的扰动却是很明显的. 通过非均匀检测器(Non homogeneity Detector, NHD)^[17](如利用广义内积(Generalized Inner Product, GIP)^[18])挑选样本

可提高协方差矩阵估计的稳健性, 但样本挑选的门限选取问题仍值得研究. ③直接数据域(Direct Data Domain, DDD)算法^[19], 为了抑制检测距离单元以外的距离门没有包含的干扰(如分立干扰), 必须而且只能从待检测样本中获取这些干扰的信息. 利用降维子空间在时域和空域滑动从一个距离门的数据中得到多个子“孔径”样本, 适用于极端恶劣的杂波环境, 但势必增加较多的运算量. ④基于先验知识的自适应训练方法^[20], 利用各种先验信息指导均匀样本集的挑选, 这些知识包括数字高程地图(Digital Elevation Map, DEM)、土地使用和植被覆盖图、卫星光学图像等, 然而实际中往往难以得到这些先验知识.

针对机载三通道雷达系统的杂波抑制问题, 提出基于样本加权估计杂波相关矩阵的三通道联合动目标检测方法. 基于广义内积值对多消一矢量样本加权, 三通道联合杂波抑制后检测出各类动目标中心坐标, 以中心坐标为依据局部两两干涉实现动目标重定位和测速, 最后分析了虚警率、检测概率和定位精度. 所提方法无需设置样本选取门限, 对图像配准精度仅要求在 1 个像素以内, 样本加权后改善因子(Improved Factor, IF)提高明显; 3 通道联合处理的性能要优于两两处理的性能.

2 系统模型

三通道系统沿航迹方向等间隔排布 3 个接收孔径, 从机头至机尾依次记为通道 1、2、3. 通道 2 发射, 3 个通道同时收, 可获取相同场景 3 幅 $N_r \times N_a$ 大小的 SAR 图像, 其中 N_r 为距离向像素点数, N_a 为方位向像素点数.

记 $f_i(m, n)$ 为第 $i(i=1, 2, 3)$ 幅图像的第 m 行, 第 n 列的像素, 可被归纳为如下的模型:

$$H_0: f_i(m, n) = c_i(m, n) + n_i(m, n) \quad (1)$$

$$H_1: f_i(m, n) = c_i(m, n) + s_i(m, n) + n_i(m, n)$$

其中, H_0 表示无运动目标的假设, H_1 表示有目标的假设, $c_i(m, n)$ 是零均值宽平稳的杂波分量, $n_i(m, n)$ 是加性噪声分量, $s_i(m, n)$ 是目标信号.

实际中 3 幅图像存在配准误差和不一致, 利用多幅图像中参考点附近的像素来帮忙实现自适应杂波抑制, 能够降低对图像配准精度的要求并具有一定的抗误差能力. 下面介绍两种构造数据矢量的方法, 即多点消一点矢量^[11](后简称多消一矢量)和联合像素矢量^[12].

图 1 以 3×3 为例给出多消一和联合像素矢量的构造示意图.

第 i 幅图像中选取样本窗大小 $(2n_m + 1) \times (2n_n + 1)$ 共计 N_{mn} 个像素排成列矢量, 有:

参考图像

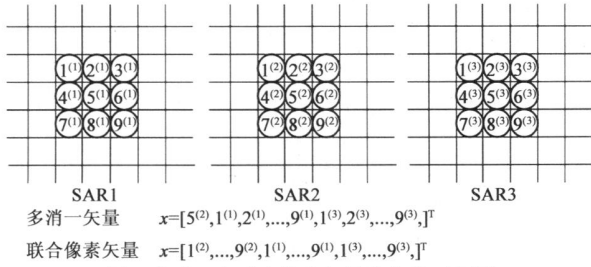


图1 多消一和联合像素矢量的构造示意图

$$\mathbf{x}_{f_i}(m, n) = [f_i(m - n_m, n - n_n), \dots, f_i(m, n), \dots, f_i(m + n_m, n + n_n)]^T, i = 1, 2, \dots, 3 \quad (2)$$

其中T表示转置.以图像2为参考,分别构造多消一矢量 $\mathbf{x}(m, n)$ 和联合像素矢量 $\mathbf{x}_j(m, n)$ 如下:

$$\mathbf{x}(m, n) = [f_2(m, n) \mathbf{x}_{f_1}^T(m, n), \mathbf{x}_{f_3}^T(m, n)]^T \quad (3a)$$

$$\mathbf{x}_j(m, n) = [\mathbf{x}_{f_2}^T(m, n) \mathbf{x}_{f_1}^T(m, n), \mathbf{x}_{f_3}^T(m, n)]^T \quad (3b)$$

其中 $\mathbf{x}(m, n)$ 为 $(2N_{mn} + 1) \times 1$ 的列矢量, $\mathbf{x}_j(m, n)$ 为 $3N_{mn} \times 1$ 的列矢量.

通过约束运动目标导向矢量响应为1并最小化输出功率可估计出自适应杂波抑制最优权矢量,但在实际中一般不能先验确定动目标的导向矢量,通过如下的约束得到次优权:

$$\min \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \quad \text{st. } \mathbf{w}^H \mathbf{e}_1 = 1 \quad (4a)$$

$$\min \mathbf{w}_j^H \mathbf{R}_j \mathbf{w}_j \quad \text{st. } \mathbf{w}_j^H \mathbf{e}_j = 1 \quad (4b)$$

其中, $\mathbf{R} = E[\mathbf{x}(m, n) \mathbf{x}^H(m, n)]$ 和 $\mathbf{R}_j = E[\mathbf{x}_j(m, n) \mathbf{x}_j^H(m, n)]$ 分别为多消一和联合像素矢量的杂波相关矩阵, $E[\cdot]$ 表示数学期望, H 表示共轭转置; \mathbf{w} 和 \mathbf{w}_j 为相应的自适应杂波抑制次优权; \mathbf{e}_1 为第1个元素为1其余元素为0的列矢量, \mathbf{e}_j 为第 $(N_{mn} + 1)/2$ 个元素为1其余元素为0的列矢量.通过拉格朗日乘子(Lagrange)算法,该约束优化问题的解为:

$$\mathbf{w} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{e}_1 / (\mathbf{e}_1^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{e}_1) \quad (5a)$$

$$\mathbf{w}_j = \mathbf{R}_j^{-1} \mathbf{e}_j / (\mathbf{e}_j^T \mathbf{R}_j^{-1} \mathbf{e}_j) \quad (5b)$$

杂波相关矩阵从样本估计中得到:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{(2K_m + 1)(2K_n + 1)} \sum_{k_m = -K_m}^{K_m} \sum_{k_n = -K_n}^{K_n} \mathbf{x}(m + k_m, n + k_n) \mathbf{x}^H(m + k_m, n + k_n) \quad (6a)$$

$$\hat{\mathbf{R}}_j = \frac{1}{(2K_m + 1)(2K_n + 1)} \sum_{k_m = -K_m}^{K_m} \sum_{k_n = -K_n}^{K_n} \mathbf{x}_j(m + k_m, n + k_n) \mathbf{x}_j^H(m + k_m, n + k_n) \quad (6b)$$

其中, $K = (2K_m + 1)(2K_n + 1)$ 为统计所用的样本数.

获得自适应杂波抑制次优权后,可得杂波相消差图为:

$$y(m, n) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(m, n) \quad (7a)$$

$$y_j(m, n) = \mathbf{w}_j^H \mathbf{x}_j(m, n) \quad (7b)$$

表1 两种方法的复乘运算量比较

运算步骤	杂波相关矩阵估计 ^a	杂波相关矩阵求逆	杂波相消
方法类型			
联合像素矢量	$3N_{mn} \times (3N_{mn} + 1) \times K/2$	$O(9N_{mn}^3)$	$3N_{mn}N_rN_a$
多消一矢量	$2N_{mn} \times (2N_{mn} + 1) \times K/2$	$O((2N_{mn} + 1)^3)$	$(2N_{mn} + 1)N_rN_a$

a. 考虑到共轭对称性,只计算对角线以上的元素

从表1可见,多消一矢量在每个运算步骤的复乘运算量均小于联合像素矢量的,样本窗和图像尺寸越大,多消一矢量与联合像素矢量的运算量相差越多.

3 样本加权杂波相关矩阵稳健估计

在实际中,当存在强运动目标和孤立干扰时,式(6a)和(6b)中对所有样本用等加权方式估计杂波相关矩阵并不是一种好方法,利用不等加权方式可提高杂波相关矩阵估计的稳健性.为简单起见,仅以多消一杂波相关矩阵估计为例,联合像素矢量的与之类似:

$$\tilde{\mathbf{R}} = \sum_{k_m = -K_m}^{K_m} \sum_{k_n = -K_n}^{K_n} \beta(m + k_m, n + k_n) \mathbf{x}(m + k_m, n + k_n) \cdot \mathbf{x}^H(m + k_m, n + k_n) = \sum_{k=1}^K \beta_k \mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^H \quad (8)$$

式(8)中将二维下标简记为一维下标, β_k 是第 k 个样本的加权系数.

在均匀环境下,样本数据服从零均值的复高斯分布,在非均匀环境下,可以将样本数据近似认为服从复高斯分布.所以,对于 N 维(多消一矢量, $N = 2N_{mn} + 1$) 复随机矢量 \mathbf{x}_k 的概率密度函数为:

$$p(\mathbf{x}_k) = \frac{1}{\pi^N |\hat{\mathbf{R}}|^{-1}} \exp(-\mathbf{x}_k^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{x}_k) = \frac{1}{C} \exp(-\mathbf{x}_k^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{x}_k) \quad (9)$$

其中 $|\hat{\mathbf{R}}|$ 为等加权杂波相关矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$ 的行列式, C 为常数. $g_k = \mathbf{x}_k^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{x}_k$ 为第 k 个样本的 GIP 值,其偏离均值(约为 N) 越远,加权应越小,反之则加权越大.据此提出如下样本加权步骤:

- (1) 根据成像结果选取相对均匀的一块场景,按等加权计算参考杂波相关矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{\text{ref}}$;
- (2) 计算样本相对 $\hat{\mathbf{R}}_{\text{ref}}$ 的 GIP 值 $\hat{g}_k = \mathbf{x}_k^H \hat{\mathbf{R}}_{\text{ref}}^{-1} \mathbf{x}_k$;
- (3) 估计加权值 $\beta_k = \exp(-|\hat{g}_k - N|/N)$;
- (4) 估计样本加权的杂波相关矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$.

在样本加权估计出杂波相关矩阵的基础上,由式(5a)得到自适应杂波相消权,接着由式(7a)完成3幅图像联合处理的杂波抑制,再通过单元平均恒虚警(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测出动目标,经动目标分类后,获得各类动目标中心的距离和方位向坐标,以中心坐标为依据,由通道2,1和通道3,2进行局部杂波抑制,然后干涉、定位和测速^[21],最终完成动目标的

重定位.

4 性能分析

4.1 虚警率 P_f 分析

不失一般性,仅考虑两幅 SAR 图像经杂波抑制,在 H_0 假设下,相消差图像中的像素可表示为:

$$\begin{aligned} H_0: f_e(m, n) &= f_2(m, n) - \mathbf{w}_1^H \mathbf{x}_{\beta 1}(m, n) \\ &= (I_{N2} - \mathbf{w}_1^H \mathbf{I}_{N1} + I_{C2} - \mathbf{w}_1^H \mathbf{I}_{C1}) \\ &\quad + j(Q_{N2} - \mathbf{w}_1^H \mathbf{Q}_{N1} + Q_{C2} - \mathbf{w}_1^H \mathbf{Q}_{C1}) \\ &= I_e + jQ_e \end{aligned} \quad (10)$$

\mathbf{I}_{N1} 、 \mathbf{Q}_{N1} 和 \mathbf{I}_{C1} 、 \mathbf{Q}_{C1} 分别是第 1 幅 SAR 图像中复噪声和复杂波的同相、正交矢量, I_{N2} 、 Q_{N2} 和 I_{C2} 、 Q_{C2} 分别是第 2 幅 SAR 图像中复噪声和复杂波的同相、正交分量. SAR 图像中的复噪声同相、正交分量服从 $N(0, \sigma_n^2/2)$ (σ_n^2 为复噪声的功率)且相互独立. 杂波分辨单元内包含大量独立同分布散射点,由中心极限定理,一般可认为复杂波的同相、正交分量服从 $N(0, \sigma_c^2/2)$ (σ_c^2 为复杂波的功率)且相互独立. 由以上分析可知,相消后的 I_e 和 Q_e 服从高斯分布,联合概率密度函数为:

$$\begin{aligned} pdf(I_e, Q_e | H_0) &= pdf(I_e | H_0) pdf(Q_e | H_0) \\ &= \frac{1}{\pi \hat{\sigma}_n^2} \exp\left(-\frac{I_e^2 + Q_e^2}{\hat{\sigma}_n^2}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\hat{\sigma}_n^2 = \sigma_n^2(1 + A \cdot CNR)$ 表示杂波相消后的等效复噪声功率, $CNR = \sigma_c^2/\sigma_n^2$ 表示输入杂噪比, $A = (1 - |\rho_{clu}|)$ 表示相消比, ρ_{clu} 为两幅图像的杂波相关系数,可见杂波相关系数降低将导致等效复噪声功率的升高.

$$\begin{aligned} \text{令} \begin{cases} I_e = r \cos \phi \\ Q_e = r \sin \phi \end{cases}, \text{由二维雅可比变换, } pdf(r, \phi | H_0) \\ = \frac{r}{\pi \hat{\sigma}_n^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\hat{\sigma}_n^2}\right) \end{aligned}$$

用求边缘概率密度函数的方法并考虑到 $0 \leq \phi \leq 2\pi$, 得 r 在 H_0 条件下的概率密度:

$$pdf(r | H_0) = \frac{2r}{\hat{\sigma}_n^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\hat{\sigma}_n^2}\right) \quad (12)$$

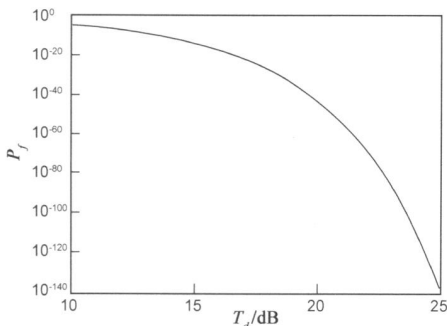


图2 虚警率随 T_d 的变化

即幅度 r 服从瑞利分布,虚警率 P_f 则可表示为:

$$P_f = \int_{r_t}^{\infty} pdf(r | H_0) dr = \exp(-r_t^2/\hat{\sigma}_n^2) = \exp(-10^{T_d/10}) \quad (13)$$

其中, r_t 为检测门限, $T_d = 10 \log_{10}(r_t^2/\hat{\sigma}_n^2)$. 图 2 给出虚警率随检测门限变化的曲线,可以看出,检测门限越高,虚警率越低,当 $T_d > 15\text{dB}$ 时, $P_f < 10^{-13}$.

4.2 检测概率 P_d 分析

在 H_1 假设下,设相消后目标信号为 $a_s e^{j\theta_s}$,相消差图像中的像素可以表示为:

$$H_1: f_e = (I_e + a_s \cos \theta_s) + j(Q_e + a_s \sin \theta_s) \quad (14)$$

$$\text{令} \begin{cases} I_e + a_s \cos \theta_s = r \cos \phi \\ Q_e + a_s \sin \theta_s = r \sin \phi \end{cases} \Rightarrow pdf(r, \phi | H_1) = \frac{r}{\pi \hat{\sigma}_n^2} \exp\left(-\frac{r^2 + a_s^2 - 2ra_s \cos(\phi - \theta_s)}{\hat{\sigma}_n^2}\right)$$

则 r 在 H_1 条件下的概率密度为:

$$\begin{aligned} pdf(r | H_1) &= \frac{r}{\pi \hat{\sigma}_n^2} \exp\left[-\frac{r^2 + a_s^2}{\hat{\sigma}_n^2}\right] \int_0^{2\pi} \exp\left(\frac{2ra_s \cos(\phi - \theta_s)}{\hat{\sigma}_n^2}\right) d\phi \\ &= \frac{2r}{\hat{\sigma}_n^2} \exp\left[-\frac{r^2 + a_s^2}{\hat{\sigma}_n^2}\right] I_0\left[\frac{2ra_s}{\hat{\sigma}_n^2}\right] \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $I_0(K) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(K \cos \phi) d\phi = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(K \sin \phi) d\phi$ 为零阶修正 Bessel 函数.

由变量替换和近似条件(当 $x \gg 1$ 时, $I_0(x) \approx e^x/\sqrt{2\pi x}$),检测概率 P_d 为:

$$P_d = \int_{r_t}^{\infty} pdf(r | H_1) dr \approx Q[\sqrt{2}(10^{T_d/20} - 10^{SNR/20})] \quad (16)$$

其中,杂波抑制后的输出信噪比 $SNR = 10 \log_{10}(a_s^2/\hat{\sigma}_n^2)$.

$Q(K) = \int_K^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$ 为标准高斯分布的右尾积分. 当 $K=0$ 时,即 $T_d = SNR$, $P_d = 0.5$.

图 3 给出不同检测门限下检测概率随信噪比的变化曲线. 观察其中的一条曲线(对应某一检测门限),可以发现检测概率随信噪比增加而增大;不同曲线间,检测门限越高检测概率的过渡带越窄. 观察 $T_d = 15\text{dB}$ 的曲线,当 $SNR > 18\text{dB}$ 时, P_d 接近 1.

4.3 定位方差分析

$$\begin{aligned} pdf(\phi | \theta_s) &= \int_0^{\infty} pdf(r, \phi | \theta_s) dr \\ &= \exp\left[-\frac{a_s^2 \sin^2(\phi - \theta_s)}{\hat{\sigma}_n^2}\right] \int_0^{\infty} \frac{r}{\pi \hat{\sigma}_n^2} \exp\left(-\frac{[r - a_s \cos(\phi - \theta_s)]^2}{\hat{\sigma}_n^2}\right) dr \end{aligned} \quad (17)$$

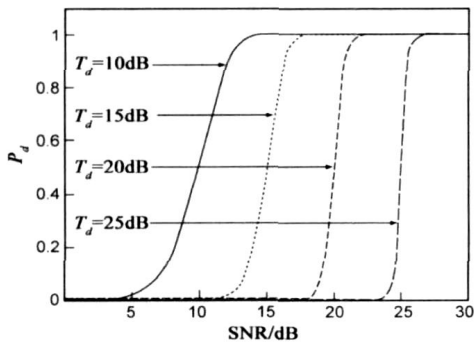


图3 检测概率随信噪比的变化

令 $a = a_s / \hat{\sigma}_n = 10^{\text{SNR}/20}$, $\varphi = \phi - \theta_s$ 可得

$$pdf(\varphi | \theta_s) = \frac{1}{2\pi} \exp(-a^2) + \frac{a \cos \varphi}{\sqrt{\pi}} \exp(-a^2 \sin^2 \varphi) Q(-\sqrt{2}a \cos \varphi) \quad (18)$$

则干涉相位的方差 $\sigma_\varphi^2 = \int_{-\pi}^{\pi} \varphi^2 pdf(\varphi | \theta_s) d\varphi$, 再由干涉相位和真实方位位置的关系^[21], 可得定位均方根误差 σ_χ 为:

$$\sigma_\chi = \left[\frac{R_0}{2\pi D} \right] \sigma_\varphi \quad (19)$$

其中, λ 表示雷达工作波长, R_0 为通道 2 到场景中心的斜距, D 为通道中心间距. 图 4 给出机载试验条件下的定位均方根误差随信噪比变化的曲线

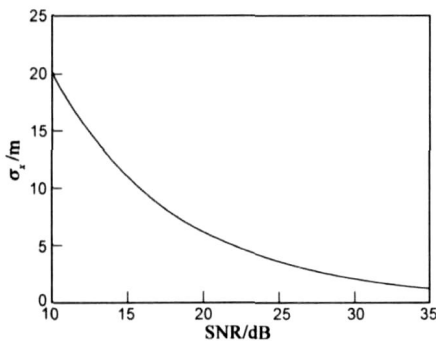


图4 定位均方根误差随信噪比的变化

可见信噪比越大, 定位均方根误差越小, 在信噪比为 15dB 时, 定位均方根误差约为 11m.

5 机载实测数据处理和性能仿真

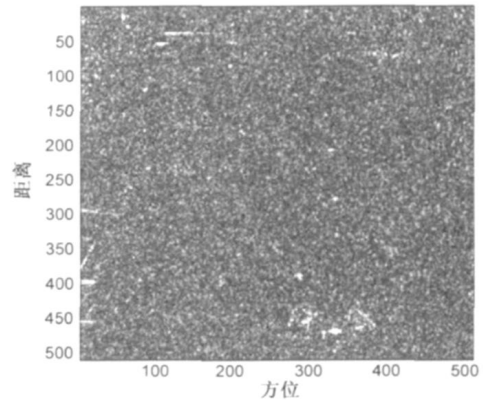
5.1 实测数据处理

试验的 3 通道雷达系统工作于 X 频段, 获取雷达回波数据后, 利用 1024 个方位脉冲成像再截取 512×512 含有合作目标的试验场景, 试验中目标速度不超过 10km/h. 选取样本窗长 5×5 , 对多消一矢量以样本不加权和加权两种方式估计杂波相关矩阵, 分别得到自适应相消权, 对 3 幅图像联合处理后所得杂波相消结果在相同对比度下分别如图 5(a) 和 (b) 所示.

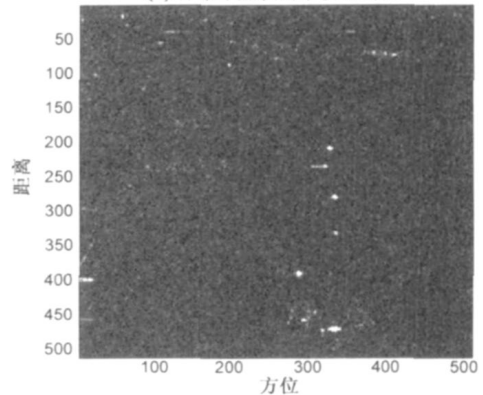
可见, 样本加权的杂波相消效果要明显优于样本

不加权的.

设置 $T_d = 15\text{dB}$, 保护窗长 11, 统计窗长 17. 图 6 中 CFAR 检测结果如 Δ 所示, 共有 8 个目标, 定位结果如 $+$ 所示, 基本定位回路上.



(a) 样本不加权的杂波相消图



(b) 样本加权的杂波相消图

图5

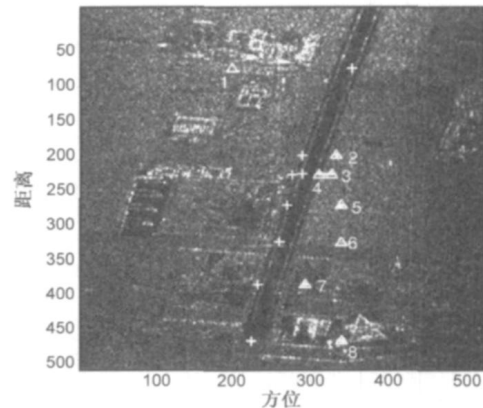


图6 检测和定位结果

动目标 1~ 8 的距离向速度 (m/s) 估计分别为 -2.94, 0.82, 0.67, 0.61, 1.24, 1.46, 1.08, 2.12, 可见距离向速度估计符合设定的速度, 速度为负表示目标远离航迹.

5.2 性能仿真

我们把不同径向速度的动目标加入场景的不同位置 (距离和方位都均匀间隔 50 个像素), 对每个径向速

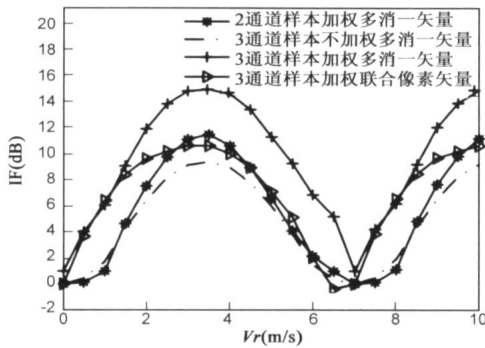


图7 改善因子随径向速度的变化

度, 均做 81 次 MonteCarlo 实验, 统计各种方法的改善因子 IF, 统计窗长 31, 保护窗长 11. 定义 IF 如下:

$$IF(\text{dB}) = SCNR_o - SCNR_i \quad (20)$$

其中, $SCNR_i$ 、 $SCNR_o$ 分别为输入和输出信杂噪比.

图 8 给出各种方法对应的改善因子随径向速度变化的曲线. 可以看出, 对于同样的径向速度, 3 通道多消一矢量样本加权相比不加权的, IF 最大改善约 7dB; 相比 2 通道样本加权处理, IF 改善约 4dB, 证明了联合处理相比两两处理可获得更好的杂波抑制性能; 相比 3 通道联合像素矢量样本加权, 除径向速度 0~2m/s 和 7~9m/s 附近 IF 接近外, 其余速度区域均优于联合像素矢量的, 这是由于联合像素矢量的维数(75)大于多消一矢量的维数(51), 所需独立同分布样本数更多的缘故.

6 结论

针对机载三通道雷达系统的杂波抑制问题, 提出基于样本加权估计杂波相关矩阵的三通道联合动目标检测方法. 样本加权能有效剔除强目标和孤立干扰的影响, 联合处理相比两两处理能获得更好的杂波抑制性能, 多消一矢量相比联合像素矢量具有更低的运算复杂度. 机载实测数据处理结果验证了方法的有效性和稳健性.

参考文献:

- [1] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 19- 23.
Wang Yong-liang, Peng Ying-ning. Space Time Adaptive Processing[M]. Beijing: Tsinghua Press, 2000. 19- 23. (in Chinese)
- [2] Stephen J, Frasier, Dual beam interferometry for ocean surface current vector mapping[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(2): 401- 414.
- [3] Entzminger J N, Fowler C A, Kenneally W J, Joint STARS and GMTI: past, present and future[J]. IEEE Trans. on Aerospace Electronic System, 1999, 35(2): 748- 761.
- [4] Liao Gu-sheng, Bao, Zheng, Xu, Zhi-yong. A framework of

rank reduced space time adaptive processing for airborne radar and its applications[J]. Science in China, Series E, 1997, 40(50): 507- 512.

- [5] William L. Melvin, et al, Assessment of multichannel airborne radar measurements for analysis and design of space time processing architectures and algorithms[C]. IEEE National Radar Conference, Ann Arbor, Michigan, USA, May 1996. 130- 135.
- [6] 郑明洁, 杨汝良. 一种改进的 DPCA 运动目标检测方法[J]. 电子学报, 2004, 32(9): 1429- 1432.
Zheng Ming-jie, Yang Ru-liang. An improved DPCA moving targets detecting algorithm[J]. ACTA Electronica Sinica, 2004, 32(9): 1429- 1432. (in Chinese)
- [7] C H Gierull. Statistical analysis of multilook SAR interferograms for CFAR detection of ground moving targets[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(4): 691- 701.
- [8] J H G Ender, P Berens, A R Briener, et al. Multi channel SAR/MTI systems development at FGAN: from AER to PAMIR [C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, Australia, 2002. 1617- 1701.
- [9] J H G Ender. Space time processing for multichannel synthetic aperture radar[J]. Electronics & Communication Engineering Journal, February 1999. 29- 38.
- [10] A Damini, B Balaji, G Haslam, M Goulding. X-band experimental airborne radar phase II: synthetic aperture radar and ground moving target indication[J]. IEE Proc Radar, Sonar, Navigation, 2006, 153(2): 144- 150.
- [11] M Soumekh. Signal subspace fusion of uncalibrated sensors with application in SAR and diagnostic medicine[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1999, 8(1): 127- 137.
- [12] Zhenfang Li, Zheng Bao, et al. Image autocoregistration and InSAR interferogram estimation using joint subspace projection [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(2): 288- 297.
- [13] 张绪锦, 朱兆达, 邓海涛等. 一种适用于双通道星载 SAR 的动目标检测技术[J]. 电子学报, 2007, 35(9): 1794- 1798.
Zhang Xu-jin, Zhu Zhao-da, Deng Hai-tao, et al. A moving target detection method for dual aperture spaceborne SAR[J]. ACTA Electronica Sinica, 2007, 35(19): 1794- 1798. (in Chinese)
- [14] 张直中. 用合成孔径雷达(SAR)对地面动目标(GMTI)成像[J]. 电子工程师, 2006, 32(2): 1- 4.
Zhang Zhi-zhong, Using synthetic aperture radar to imaging ground moving target, Electronic Engineer, 2006, 32(2): 1- 4. (in Chinese)
- [15] Rabideau D J, Steinhardt A O. Improved adaptive clutter cancellation through data adaptive training [J]. IEEE Trans on Aerospace Electronic System, 1999, 35(3): 879- 891.

- [16] Borsari G K, Steinhardt A O, Cost-efficient training strategies for space-time adaptive processing algorithm[C]. Proceedings of the 29th Asilomar conference on Signals, Systems and Computing, Pacific Grove, CA, 1995: 650– 654.
- [17] Y L Wang, J W Chen, Z Bao, et al. Robust Space-time adaptive processing for airborne radar in nonhomogeneous clutter environments[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(1): 70– 81.
- [18] 王彤, 保铮. 空时二维自适应处理的目标污染样本挑选方法[J]. 电子学报, 2001, 29(12A): 1840– 1844.
Wang Ton, Bao Zheng. The contaminated sample selecting method for STAP[J]. ACTA Electronica Sinica, 2001, 29(12A): 1840– 1844. (in Chinese)
- [19] Saikar T K, Koh J, Adve R S, et al, A pragmatic approach to adaptive antennas[J], IEEE Antennas Propagation Magazine, 2000, 42(2): 39– 55.
- [20] Weiner D D, Caprio G T, Wicks M C, An approach for utilizing known terrain and land feature data in estimation of the clutter covariance matrix[C]. IEEE International Radar Conference, Dallas, USA, May 1998. 381– 386.
- [21] 李景文. 合成孔径雷达动目标检测与成像[D]. 北京航空航天大学博士学位论文, 1999. 68– 73.

Li Jing wen, Detection and Imaging of moving targets with synthetic aperture radar[D]. A PHD dissertation of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999. 68– 73. (in Chinese)

作者简介:

曾 操 男, 1979 年出生于湖北省襄樊市, 西安电子科技大学讲师. 主要研究方向为: 阵列误差校正、地面动目标检测.

Email: czeng@mail.xidian. edu. cn

廖桂生 男, 1963 年出生于广西壮族自治区桂林市, 现为西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室副主任, 博士生导师. 国家杰出青年基金获得者, 入选“新世纪百千万人才工程”国家级人选. 获省部级科技进步奖一等奖一项(排名第二), 二等奖三项(排名第一, 第二, 第二). 在国内外核心期刊发表论文约 140 篇. 主要从事雷达信号处理、通信信号处理、阵列信号处理和动目标检测等方面的研究.

Email: gsliao@xidian. edu. cn

杨志伟 男, 1980 年出生于四川省南充市, 西安电子科技大学讲师. 主要从事阵列信号处理、动目标检测研究.

Email: yankyeesa@163. com

刘聪峰 男, 1973 年出生于陕西蓝田县, 西安电子科技大学副教授. 主要从事阵列信号处理、空时自适应处理研究.