基于通道误差校准的空域导向矢量多通道 SAR-GMTI 杂波抑制方法

秦记东*　赖　涛　赵拥军　黄　洁　白　冰
(信息工程大学导航与空天目标工程学院　郑州　450002)

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地面动目标检测性能下降的问题，该文结合最小方差和空域导向矢量两种杂波抑制算法，提出一种基于通道误差校准的空域导向矢量杂波抑制方法。该方法首先计算最小方差杂波抑制的权向量，通过该权向量构造配准图像，然后利用配准图像计算杂波正交补空间，最后通过正交子空间的方法实现杂波抑制。理论分析及实验结果表明，所提方法在图像配准误差和通道幅相误差较大的情况下仍具有很好的检测性能，能获得较最小方差杂波抑制方法和基于空域导向矢量的杂波抑制方法更高的信杂噪比。

关键词：合成孔径雷达(SAR)；地面动目标显示(GMTI)；通道误差校准；空域导向矢量
中图分类号：TN957.52　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2095-283X(2014)01-0070-08
DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.13118

Multichannel SAR-GMTI Clutter Rejection Based on Channel Error Correction and Airspace Steering Vector

Qin Ji-dong　Lai Tao　Zhao Yong-jun　Huang Jie　Bai Bing
(*College of Navigation & Aerospace Engineering*, *Information Engineering University*, *Zhengzhou* 450002, *China*)

Abstract: To overcome the influence of non-ideal factor on the performance of moving target indication, such as the channel gain and phase response error and image registration error, an improving clutter rejection method is proposed. The algorithm combines the minimum variance clutter rejection method and the steering vector clutter rejection method. Firstly, the weight vector of minimum variance clutter rejection is calculated to construct registration image. Then clutter orthogonal subspace is calculated with registration image. Finally, clutter rejection is implemented with orthogonal subspace method. Theoretical analysis and experimental results show that the proposed method performs well and it can obtain higher SCNR than the minimum variance clutter rejection method and steering vector clutter rejection method when both image registration and channel amplitude and phase errors are big.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Ground Moving Target Indication (GMTI); Channel error correction; Airspace steering vector

1　引言

合成孔径雷达(SAR)[1]以其全天时全天候高分辨率等优势已广泛应用于军事侦察、地形绘制等方面，而地面运动目标显示(GMTI)是 SAR 在侦察中的重要应用。多通道 SAR-GMTI 系统能够在获得高分辨率图像的同时完成地面动目标检测、测速及定位，具有巨大的应用价值。常见的多通道 SAR-GMTI 方法有相位中心偏置天线(Displaced Phase Center Antenna, DPCA)[2,3]、空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)[4]和顺轨干涉(Along-Track Interferometry, ATI)[5]，在理想情况下这 3 种方法都具有较好的地面动目标检测性能。

但在实际环境中，由于系统误差[6](包括通道相位中心误差、通道幅相误差、各通道方向图响应不一致等)和非均匀杂波环境[7−10](包括杂波样本不满足独立同分布条件、样本不够强、强信号或孤立干扰带来的样本污染等)的影响，无法获得准确的多通道系统导向矢量和杂波协方差矩阵，导致上述方法不同程度地受到制约，故研究稳健的杂波抑制方法十分必要。

文献[11,12]采用总体最小方差的杂波抑制方法来抑制杂波，该方法能够很好地解决图像配准误差带来的性能下降，但没有充分利用动目标导向矢量的信息。基于空域导向矢量的杂波抑制方法[13]借鉴

2013-12-03 收到，2014-01-26 改回；2014-02-11 网络优先出版
国家自然科学基金(41301481)资助课题
*通信作者：　秦记东　qinjd_edu@163.com

阵列信号处理的方法，针对动目标信号在不同通道之间呈现空域导向的特点，利用杂波子空间与杂波正交补空间的正交原理来实现杂波抑制[14]，该类算法具有较高的分辨率和较高的精度，其缺点是对图像配准误差较为敏感。

针对上述问题，本文提出一种基于通道误差校准的空域导向矢量杂波抑制方法。该方法首先计算最小方差杂波抑制的权向量，通过该权向量构造配准图像，然后利用配准图像来获得杂波正交补空间，最后通过正交子空间方法实现杂波抑制。理论分析及实验结果表明，该方法能够取得比上述两种方法更好的杂波抑制性能。

2　基于空域导向矢量的杂波抑制

多通道 SAR-GMTI 雷达工作立体示意图见图 1。多通道 SAR 系统沿航迹方向等间隔排布 L 个接收通道，假定通道 1 为发射通道(参考通道)，所有通道均接收回波数据。x 轴表示沿航迹方向(方位向)，y 轴表示垂直航迹方向，雷达载体平台速度为 $v_{\rm a}$。d_l 表示接收通道 l 与发射通道的沿航迹间隔，且 $d_l=(l-1)d$, d 为两个通道间距离(假设通道为等间距排列)，H 代表平台高度。设在方位慢时间 $t_m=0$ 时，点目标 P 在斜距平面与雷达阵列的垂直距离为 R_0，方位向坐标为 x_0。在方位积累时间 T_m 内，认为目标以恒定的径向速度 $v_{\rm r}$ (定义远离运动平台方向为正)和切向速度 v_x (定义运动平台运动方向为正)运动。

各通道回波数据分别经过成像处理得到 L 幅复图像，理想情况下 SAR 图像各像素之间满足独立同分布的条件，地面动目标仅在其对应的像素点上存在，不会扩散到相邻的像素单元，则第 l 通道的 SAR 图像的复数据可表示为：

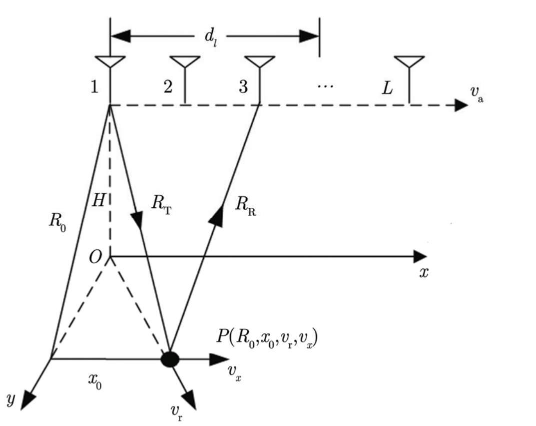


图 1 多通道 SAR-GMTI 雷达工作立体示意图

Fig. 1　Multi-channel SAR-GMTI radar perspective view

$$\left.\begin{aligned} H_0: z_l(m,n) &= c_l(m,n)+n_l(m,n) \\ H_1: z_l(m,n) &= c_l(m,n)+n_l(m,n)+s_l(m,n)\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

其中 m 和 n 分别为 SAR 图像中的距离向和方位向坐标，H_0 表示该检测单元不含动目标，H_1 表示包含动目标，$c_l(m,n)$ 和 $n_l(m,n)$ 分别为第 l 通道 (m,n) 处的杂波与加性高斯白噪声信号，$s_l(m,n)$ 表示动目标信号。

设雷达工作波长为 λ，当多通道 SAR 系统满足 DPCA 条件时，不同通道不同时刻在空间重叠位置可形成等相位中心，将这些等相位中心的图像组成一组数据。静止目标的相位在这些图像中不会发生改变，动目标的相位将会随时间变化而产生变化。运动目标的空域导向矢量可表示为[15]：

$$\boldsymbol{a}_{\rm s}(v_{\rm r})=\left[1\ e^{-j\frac{2\pi d v_{\rm r}}{\lambda v_{\rm a}}}\ \cdots\ e^{-j\frac{2\pi (L-1) d v_{\rm r}}{\lambda v_{\rm a}}}\right]^{\rm T} \quad (2)$$

其中，$[\bullet]^{\rm T}$ 表示转置。静止目标的径向速度 $v_{\rm r}=0$，故其所在的检测单元的导向矢量应为：

$$\boldsymbol{a}_{\rm s}(v_{\rm r})\big|_{v_{\rm r}=0}=\left[1\ 1\ \cdots\ 1\right]^{\rm T} \quad (3)$$

但实际中，通道间存在幅相误差，上述杂波与动目标的导向矢量会受到幅相误差的影响，运动目标和静止目标的导向矢量分别变为：

$$\hat{\boldsymbol{a}}_{\rm s}(v_{\rm r})=\left[1\ a_2 e^{j\left(-\frac{2\pi d_2 v_{\rm r}}{\lambda v_{\rm a}}+\varphi_2\right)}\ \cdots\ a_L e^{j\left(-\frac{2\pi d_L v_{\rm r}}{\lambda v_{\rm a}}+\varphi_L\right)}\right]^{\rm T} \quad (4)$$

$$\hat{\boldsymbol{a}}_{\rm s}(v_{\rm r})\big|_{v_{\rm r}=0}=\left[1\ a_2 e^{j\varphi_2}\ \cdots\ a_L e^{j\varphi_L}\right]^{\rm T} \quad (5)$$

其中 $a_l,\varphi_l(l=2,3,\cdots,a_L)$ 分别为通道 l 的幅度和相位误差。取不同通道对应像素点的数据组成向量 $\boldsymbol{Z}(i,j)=\left[z_1(i,j)\ z_2(i,j)\cdots z_L(i,j)\right]^{\rm T}$，设场景的协方差矩阵为 $\boldsymbol{R_Z}$，并对其进行特征分解：

$$\boldsymbol{R_Z}={\rm E}\left[\boldsymbol{Z}(i,j)\cdot\boldsymbol{Z}(i,j)^{\rm H}\right]=\sum_{i=1}^{L}\beta_i\boldsymbol{u}_i\boldsymbol{u}_i^{\rm H},\quad \beta_1\ge\beta_2\ge\cdots\ge\beta_L \quad (6)$$

其中 $[\bullet]^{\rm H}$ 表示共轭转置，β_i 为特征值，$\boldsymbol{u}_i$ 为对应的特征向量。由于场景中绝大部分目标为静止目标，故大特征值对应的特征向量为杂波的导向矢量，小特征对应的特征向量为动目标及噪声的导向矢量。若通道幅相误差是非空变的，则杂波的能量集中在 $\boldsymbol{u}_1$ 方向上，此时选取 $\boldsymbol{u}_1$ 的正交补空间对杂波进行抑制就会得到很好的效果；若通道幅相误差是空变的，则杂波的能量会集中在 $\boldsymbol{u}_1,\boldsymbol{u}_2,\cdots,\boldsymbol{u}_D$ 上，D 根据通道幅相误差的均匀性而适当调整，可通过前 k 个导向上的部分能量和 Q_k 来确定，Q_k 定义为：

$$Q_k = \sum_{l=1}^{k}\beta_l \Bigg/ \sum_{l=1}^{L}\beta_l \tag{7}$$

其物理意义是前k个导向能量占总能量的百分比，根据所取场景杂波特性来设置合适的门限(一般取0.9)，取k初值为1，增加k，当满足式(8)的条件时停止，

$$Q_k > Q' \tag{8}$$

此时的k值即为D。

构造杂波正交补空间$\boldsymbol{U}_{\rm s}$：

$$\boldsymbol{U}_{\rm s}=\left[\boldsymbol{u}_{D+1}\ \boldsymbol{u}_{D+2}\ \cdots\ \boldsymbol{u}_L\right] \tag{9}$$

杂波导向矢量与杂波正交补空间是正交的，而非盲速动目标向量与杂波正交补空间非正交，如图2所示(以$L=2$为例)，其中$\boldsymbol{U}_{\rm c}$为杂波空间，$\boldsymbol{U}_{\rm s}$为杂波正交补矢量，$\hat{\boldsymbol{a}}_{\rm s}$为运动目标的导向矢量，$\alpha$为$\boldsymbol{U}_{\rm c}$与$\hat{\boldsymbol{a}}_{\rm s}$的夹角，可以证明，$\alpha=-(2\pi d v_{\rm r})/(\lambda v_{\rm a})$。杂波的$\boldsymbol{Z}_{\rm c}(i,j)$的导向矢量在$\boldsymbol{U}_{\rm c}$附近，含动目标信号的$\boldsymbol{Z}_{\rm s}(i,j)$的导向矢量在$\hat{\boldsymbol{a}}_{\rm s}$附近。

通过上述分析，发现可将多通道数据与正交补空间通过子空间类的算法来提高信杂噪比。令：

$$I_1(i,j)=\boldsymbol{Z}^{\rm H}(i,j)\cdot\boldsymbol{U}_{\rm s}\cdot\boldsymbol{U}_{\rm s}^{\rm H}\cdot\boldsymbol{Z}(i,j) \tag{10}$$

杂波信号$\boldsymbol{Z}_{\rm c}(i,j)$得到的抑制程度会大于动目标信号$\boldsymbol{Z}_{\rm s}(i,j)$, I_1即为采用正交子空间的方法进行杂波抑制后的结果，其抑制效果受图像匹配误差影响较大。

3 基于总体最小方差的杂波抑制

由于图像配准误差的存在，会导致杂波分量在周围像素间扩散。数据模型如图3所示，无配准误差时，通道1中的像素点1对应通道2中的像素点5，当存在亚像素级的配准误差时(现在的配准误差一般能够达到亚像素级水平)，通道1中的像素点1可能对应到通道2中的像素点5与其周围的像素点之间，从而使杂波自由度增加，这时再利用传统的DPCA或ATI等方法将很难取得满意的检测结果。在这种情况下，可以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。

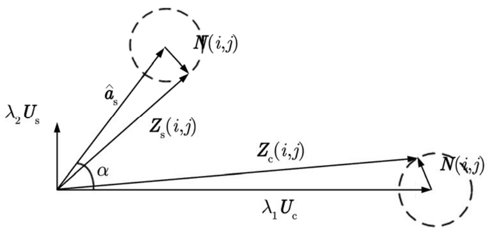


图2 导向矢量示意图

Fig. 2 Oriented vector diagram

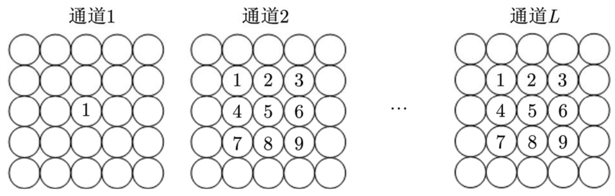


图3 数据模型

Fig. 3 Data model

通常采用自适应的方法进行配准，自适应匹配窗口的大小根据通道间的匹配误差进行调整，本文以3×3的窗口为例进行说明。如图3，通道1取出像素1以及通道2～L分别取出像素1～9，构成数据矢量：

$$\boldsymbol{X}(i,j)=\big[z_1(i,j)\ z_2(i-1,j-1)\cdots z_2(i+1,j+1)\ \ldots$$
$$z_L(i-1,j-1)\cdots z_L(i+1,j+1)\big]^{\rm T} \tag{11}$$

定义$\boldsymbol{R}_{\boldsymbol{X}}$为场景的权向量协方差矩阵，由式(12)进行估计：

$$\boldsymbol{R}_{\boldsymbol{X}}={\rm E}\left[\boldsymbol{X}(i,j)\cdot\boldsymbol{X}(i,j)^{\rm H}\right] \tag{12}$$

根据线性最小方差准则[16]：

$$\left.\begin{aligned}&\min \boldsymbol{w}^{\rm H}\boldsymbol{R}_{\boldsymbol{X}}\boldsymbol{w}\\&{\rm s.t.}\ \boldsymbol{w}^{\rm H}\hat{\boldsymbol{a}}=1\end{aligned}\right\} \tag{13}$$

即可获得最小方差下的权向量$\boldsymbol{w}$。其中$\hat{\boldsymbol{a}}=[1,0,0,\cdots,0]^{\rm T}$，目的是确保$\boldsymbol{w}(1)=1$，即通道1中的像素点幅度保持不变，且可保证$\boldsymbol{w}\neq 0$。

利用拉格朗日法求解式(13)，得到杂波抑制的自适应权矢量为：

$$\boldsymbol{w}=\boldsymbol{R}_{\boldsymbol{X}}^{-1}\cdot\hat{\boldsymbol{a}} \tag{14}$$

则杂波抑制通过式(15)实现：

$$I_2(i,j)=\boldsymbol{X}^{\rm H}(i,j)\cdot\boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{w}^{\rm H}\cdot\boldsymbol{X}(i,j) \tag{15}$$

I_2即为通过总体最小二乘准则进行杂波抑制后的结果。该方法能够较好地抑制通道间配准误差和幅相误差，但其没有利用动目标导向矢量与杂波导向的信息，虽能达到一定的抑制效果，但在信杂噪比较低时性能不佳。

4 改进的杂波抑制方法

空域导向矢量方法可以获得较高的信杂噪比，但对配准误差敏感，总体最小方差的杂波抑制可以很好地抑制图像配准误差和通道幅相误差。本文结合两种方法，提出一种新的算法，该算法利用最小方差权向量，通过该权向量构造配准图像，然后利用配准图像进行杂波抑制，消除图像配准误差及通道幅相误差。下面从两个方面论证该方法的可行性及必要性。

从杂波的导向矢量估计方面来看，当存在配准误差时，每个像素的导向矢量将会严重偏离真实导向矢量$[1\,1\,\cdots\,1]^{\mathrm{T}}$，且偏离方向各不一样。此时，如果采用第 2 节的方法估计杂波的导向矢量，则该矢量的方向将会是所有样本导向矢量的平均。利用该估计矢量进行杂波抑制时，那些实际导向矢量与估计矢量夹角较大的像素将不能得到有效抑制，从而导致动目标可能会被淹没。所以，图像配准误差和幅相误差的校准是非常必要的。

从动目标的导向矢量方面来看，由于杂波抑制后要通过动目标的导向矢量来估计径向速度，故精确地估计目标的导向矢量是必要的，而精确估计的前提是能够获得准确的目标导向矢量。图像失配会导致目标的导向矢量发生变化，故需要对图像进行配准处理。

对图像加权配准同样会改变动目标的幅度和相位，但这个改变是有益于后期处理的，图像加权配准将会使杂波与目标的导向矢量估计更加接近真实的导向矢量，从而得到更高的改善因子和运动参数估计准确度。

完成配准后，通过导向矢量的方法进行杂波抑制，从而提高信杂噪比。算法步骤描述如下：

步骤 1　通过总体最小方差算法估计杂波抑制的自适应权矢量$\boldsymbol{w}$

为了方便理解和描述，对$\boldsymbol{X}(i,j)$进行如下处理。令：

$$\boldsymbol{X}_l(i,j)=\left[z_l(i-1,j-1)\ z_l(i,j-1)\ \cdots\ z_l(i+1,j+1)\right]^{\mathrm{T}} \tag{16}$$

则有：

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}(i,j)=\left[\boldsymbol{X}_2^{\mathrm{T}}(i,j)\ \boldsymbol{X}_3^{\mathrm{T}}(i,j)\ \cdots\ \boldsymbol{X}_L^{\mathrm{T}}(i,j)\right]^{\mathrm{T}} \tag{17}$$

$$\boldsymbol{X}(i,j)=\left[x_1(i,j)\ \boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{T}}(i,j)\right]^{\mathrm{T}} \tag{18}$$

代入式(12)，则场景的权向量协方差矩阵可以改写成：

$$\boldsymbol{R}_{\boldsymbol{X}}=\begin{bmatrix} r_{11} & \boldsymbol{r}_{12}^{\mathrm{H}} \\ \boldsymbol{r}_{12} & \boldsymbol{R}_{22}\end{bmatrix} \tag{19}$$

其中 $r_{11}=\mathrm{E}\left[x_1(m,n)\cdot x_1^*(m,n)\right]$，$[\bullet]^*$ 表示取共轭，$\boldsymbol{r}_{12}=\mathrm{E}\left[\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}(i,j)\cdot x_1^*(m,n)\right]$，$\boldsymbol{R}_{22}=\mathrm{E}\left[\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}(i,j)\cdot \boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{H}}(i,j)\right]$。从而得到杂波抑制的自适应权矢量新的表达形式：

$$\boldsymbol{w}=\left[1\ \ -\boldsymbol{R}_{22}^{-1}\boldsymbol{r}_{12}\right]^{\mathrm{T}} \tag{20}$$

其中$-\boldsymbol{R}_{22}^{-1}\boldsymbol{r}_{12}$项为除第 1 通道外其它通道的数据对通道 1 对应像素数据的估计的负值。也就是说，$\boldsymbol{R}_{22}^{-1}\boldsymbol{r}_{12}$为对第 1 通道对应像素点的估计值。构造$\boldsymbol{w}'$：

$$\boldsymbol{w}'=\left[1\ \ \boldsymbol{R}_{22}^{-1}\boldsymbol{r}_{12}\right]^{\mathrm{T}}=\left[1\ \boldsymbol{w}_2'^{\mathrm{T}}\ \cdots\ \boldsymbol{w}_L'^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}} \tag{21}$$

其中$\boldsymbol{w}_l'=\left[w_{l1}\ w_{l2}\ \cdots\ w_{l9}\right]^{\mathrm{T}}$。

步骤 2　构造新的配准图像

对图像进行配准处理，构造新的配准图像。第$l\,(l=2,\cdots,L)$通道图像配准后为：

$$z'(i,j)=\boldsymbol{w}_l'^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{X}_l(i,j) \tag{22}$$

步骤 3　计算杂波正交补空间$\tilde{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{s}}$

构造新的数据向量$\boldsymbol{Z}'(i,j)=\left[z_1'(i,j)\ z_2'(i,j)\cdots z_L'(i,j)\right]^{\mathrm{T}}$，仍然采用正交子空间的方法，得到修正的杂波正交补空间：

$$\tilde{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{s}}=\left[\tilde{\boldsymbol{u}}_{D+1}\ \tilde{\boldsymbol{u}}_{D+2}\ \cdots\ \tilde{\boldsymbol{u}}_L\right] \tag{23}$$

步骤 4　杂波抑制

采用正交子空间算法，进行杂波抑制：

$$I_3(i,j)=\boldsymbol{Z}'^{\mathrm{H}}(i,j)\cdot\tilde{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{s}}\cdot\tilde{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{H}}\cdot\boldsymbol{Z}'(i,j) \tag{24}$$

I_3为改进算法进行杂波抑制后的图像。

设场景大小为(M,N)，以3×3的窗口为例对 3 种方法的计算量进行分析，本文方法运算量为两种算法之和，结果见表 1。

表 1 运算量表

Tab. 1　Calculation table

算法	复数加法	复数乘法	其它
空域导向矢量方法	$2MNL^2$	$2MNL^2$	矩阵特征分解 $O(L^3)$
最小方差方法	$9MNL^2$	$9MNL^2$	矩阵求逆 $O\left((9L-8)^3\right)$
本文方法	$11MNL^2$	$11MNL^2$	$O\left((9L-8)^3\right)+O\left(L^3\right)$

从表 1 可以看出，本文算法在运算量提高不大的情况下可以获得更好的性能。

5　实验分析

5.1 仿真分析

采用一组常见的机载 SAR 系统数据，通道数$L=2$，雷达工作频率$f_0=10$ GHz，雷达等效速度$v_{\mathrm{a}}=115\ \mathrm{m/s}$，最近斜距$R_0=10\ \mathrm{km}$，天线长度$L_{\mathrm{a}}=2\ \mathrm{m}$，脉冲重复频率 PRF=1000 Hz，杂噪比$\mathrm{CNR}=10$。

图 4 是在目标干涉相位为$\pi/2$, $\mathrm{SNR}=6\ \mathrm{dB}$的情况下，杂波抑制性能随配准误差的变化曲线(在不同配准误差下各做 600 次蒙特卡洛实验)。从图 4 中可以看出，最小方差自适应杂波抑制方法可以很好地抑制图像配准误差，导向矢量的算法在配准误差较小时能够得到较好的改善因子，但其随配准误差变大而性能大大降低。本文方法在图像配准误差较大时仍具有较好的性能。

通道的幅相误差会影响杂波抑制的效果。图 5 是在目标干涉相位为 $\pi/2$, SNR = 6 dB， 图像配准误差为 0.4 个像素点的情况下，杂波抑制性能随通道相位误差的变化曲线(在不同相位误差下各做 600 次蒙特卡洛实验)。可以看出，3 种方法的性能都随相位误差变大而变差，但总体上本文方法可得到比上述两种方法更好的性能。

图 6 给出了在配准误差为 0.5 个像素，目标干涉相位为 $\pi/2$, SNR = 6 dB 的情况下，改善因子随杂噪比的变化曲线(在不同杂噪比情况下各做 600 次蒙特卡洛实验)。可以发现，随着杂噪比的增加，杂波抑制性能均有所提升，但本文方法要优于最小方差及导向矢量方法。

5.2 场景仿真分析

采用真实的 SAR 场景数据，成像之后得到复图像数据，基于得到的复图像数据使用频域快速算法[17]仿真所需要的通道 1 和通道 2 的回波数据，设置 4 个运动目标，位于图像中的道路上，见图 7(a)中的暗色线。使用机载多通道 SAR-GMTI 雷达的常用系统参数，参数设置见表 2。

图 7(a)为某通道的成像结果。图 7(b)、图 7(c)、图 7(d)是在图像匹配误差为 0.4 个像素点时不同杂波抑制方法处理后的效果图，图中直线为后期标注

表 2 参数表

Tab. 2 Parameter table

参数	参数值
雷达工作频率	10 GHz
载机速度	115 m/s
景最近斜距	10 km
距离向带宽	40 MHz
脉冲重复频率	1000 Hz
天线长度	2 m
通道间距	0.6 m
信杂比 SCR	10 dB
杂噪比 CNR	10 dB

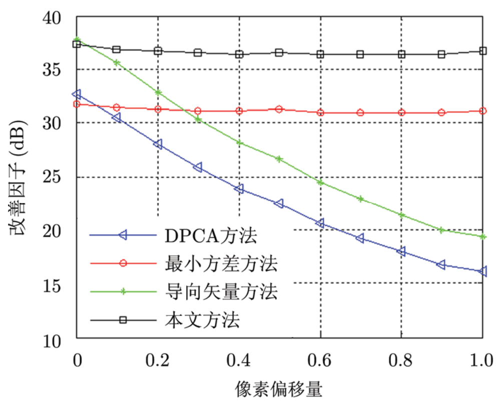


图 4 杂波抑制性能随配准误差的变化曲线

Fig. 4 Clutter rejection performance curve with the registration error

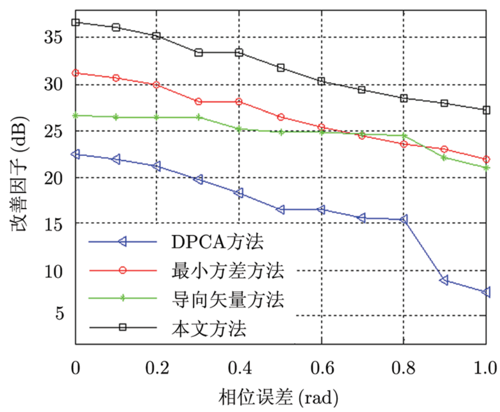


图 5 杂波抑制性能随通道相位误差变化曲线

Fig. 5 Clutter rejection performance curve with the channel phase error

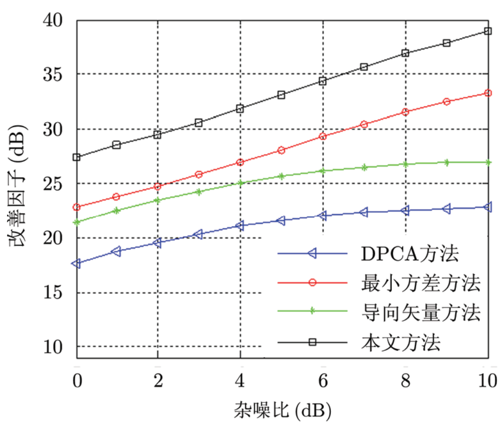
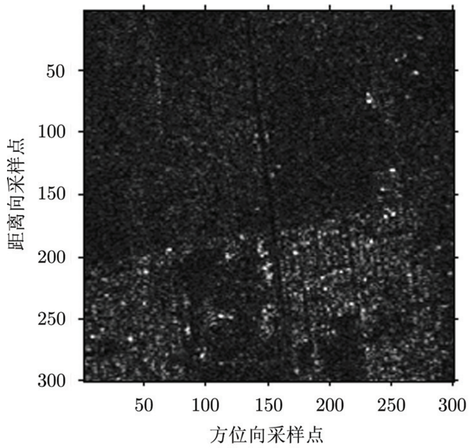


图 6 杂波抑制性能随杂噪比变化曲线

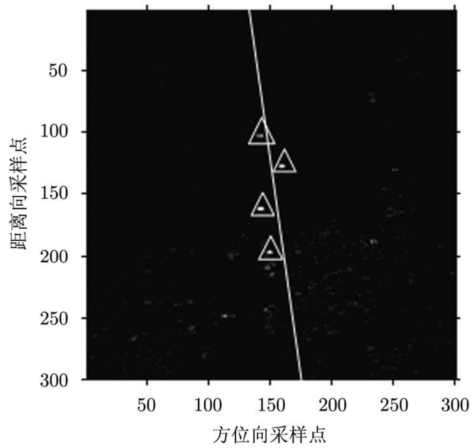
Fig. 6 Clutter rejection performance curve with the CNR

的道路，三角形内为动目标。可以发现，由于目标运动产生了方位向上的位置偏移。为了方便观察，对每幅图像相对于能量最大的动目标做幅度归一化处理。从图 7(b)、图 7(c)可以看出，当存在图像匹配误差时，最小方差自适应杂波抑制算法要优于基于空域正交子空间的方法。从图 7(b)、图 7(c)、图 7(d)中的可以看出，本文方法优于上述两种方法。

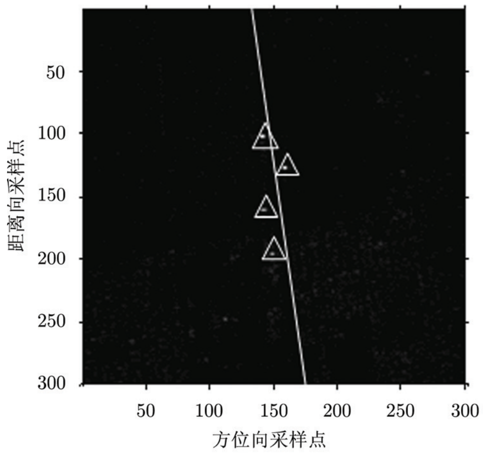
为了便于观察比较，选取第 161 个距离门的数据，结果如图 8 所示，可以看出，本文方法杂波抑制效果最佳。



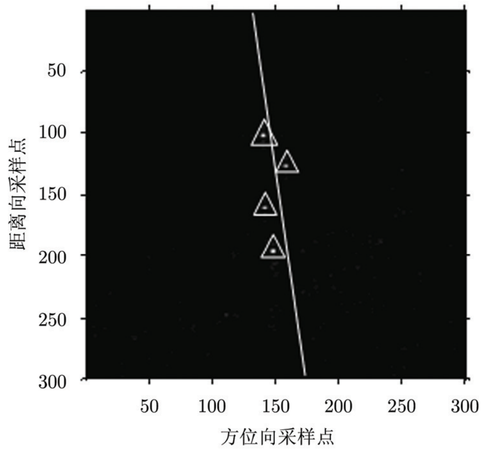
(a) 单通道SAR成像
(a) Single-channel SAR imaging



(b) 导向矢量方法
(b) Steering vector method



(c) 最小方差方法
(c) Minimum variance method



(d) 本文算法
(d) The proposed algorithm

图 7 杂波抑制效果

Fig. 7　Clutter rejection performance

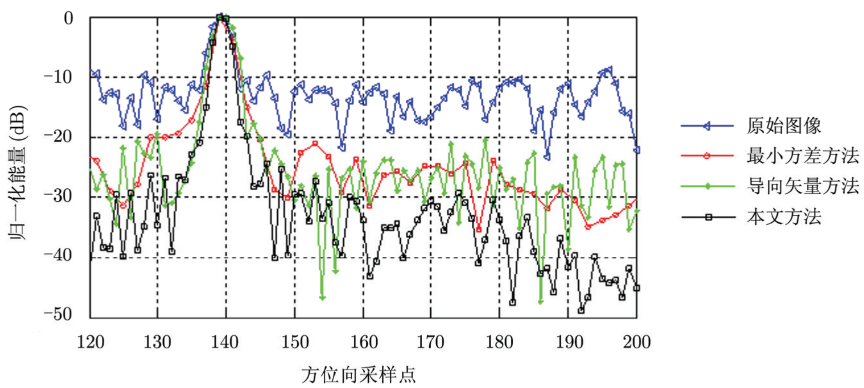


图 8 第 161 距离门处杂波抑制效果

Fig. 8　Clutter rejection of the 161st range bin

计算 3 种方法的改善因子，信号为 4 个运动目标，杂波和噪声为除去运动目标后的杂波及噪声，结果见表 3。可以看出，本文方法较上述两种方法能够获得更高的改善因子。

表 3 不同方法下改善因子

Tab. 3 Improvement factor of different methods

算法	信杂噪比(dB)
最小方差方法	22.13
导向矢量方法	25.42
本文方法	30.11

6 结论

针对 SAR-GMTI 中图像配准误差及通道幅相误差影响杂波抑制效果的问题，本文结合总体最小方差和空域导向矢量杂波抑制方法的优点，提出了一种新算法。理论分析及实验结果表明，所提方法在通道配准误差和通道幅相误差较大的情况下仍具有很好的杂波抑制性能，可获得比最小方差杂波抑制方法和空域导向矢量杂波抑制方法更高的信杂噪比。

本文从子空间分解的角度对通道幅相误差及配准误差问题进行了较深入的分析，为动目标检测提供一个新的思路。同样也可以将该思想应用于盲速、最小可检测速度及速度分辨率等方面。

参 考 文 献

[1] 邓云凯, 赵凤军, 王宇. 星载 SAR 技术的发展趋势及应用浅析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 1–10.
Deng Yun-kai, Zhao Feng-jun, and Wang Yu. Brief analysis on the development and application of spaceborne SAR[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 1–10.

[2] Richardson P G. Analysis of the adaptive space time processing technique for airborne radar[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation,* 1994, 141(4): 187–195.

[3] 张佳佳, 周芳, 孙光才. 基于机载前向阵雷达的三通道斜视 SAR-GMTI 技术研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 344–350.
Zhang Jia-jia, Zhou Fang, and Sun Guang-cai. Study on three channels squint SAR-GMTI system based on the forward-looking airborne radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 344–350.

[4] Ender J H G. Space-time processing for multichannel synthetic aperture radar[J]. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1999, 11(1): 29–38.

[5] Budillon A, Evangelista A, and Schirinzi G. GLRT detection of moving targets via multibaseline along-track interferometric SAR systems[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(3): 348–352.

[6] Aghaabdellahian N and Modarres-Hashemi M. Improving performance of adaptive radar detectors in nonhomogeneous environment[C]. 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Mashhad, Iranian, 2013: 1–4.

[7] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Unambiguous SAR signal reconstruction from nonuniform displaced phase center sampling[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(4): 260–264.

[8] 吴迪, 朱岱寅, 朱兆达. 一种非均匀环境中双端口干涉 SAR/GMTI 杂波抑制算法[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2179–2183.
Wu Di, Zhu Dai-yin, and Zhu Zhao-da. A clutter suppression algorithm for two-port interferometric SAR/GMTI in heterogeneous environment[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(9): 2179–2183.

[9] Liu Xiang-yang, Wang Jing, Zhao Wei-wei, *et al.*. A channel equalization approach using the spatial correlation property of clutters[C]. IET International Radar Conference 2013, Xi'an, 2013: 1–4.

[10] 张丹丹, 仇晓兰, 胡东辉, 等. 基于运动目标检测的同步轨道星-空双站 SAR 杂波特性分析[J]. 雷达学报, 2013, 2(3): 348–356.
Zhang Dan-dan, Qiu Xiao-lan, Hu Dong-hui, *et al.*. Analysis of geosynchronous satellite-air bistatic SAR clutter characteristics from the viewpoint of ground moving target indication[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(3): 348–356.

[11] 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, and 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.

[12] 束宇翔, 廖桂生, 杨志伟. 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[J]. 电子学报, 2011, 39(9): 1986–1991.
Shu Yu-xiang, Liao Gui-sheng, and Yang Zhi-wei. radial velocity estimation of moving targets based on modifying the steering vector with wiener optimal weights in SAR-GMTI radar system[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(9): 1986–1991.

[13] 时公涛, 贺志国, 高贵. 基于协方差矩阵的双通道 SAR 图像域地面慢动目标检测算法的性能对比研究[J]. 信号处理, 2009, 25(8): 1169–1181.

Shi Gong-tao, He Zhi-guo, and Gao Gui. Performance analysis of the slow ground moving target detecting algorithms based on covariance matrix in dual-SAR images[J]. *Signal Processing*, 2009, 25(8): 1169–1181.

[14] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 126–135.

Zhang Xian-da. Modern Signal Processing[M]. Beijing: Tshinghua University Press, 2002: 126–135.

[15] 曾操. 多通道地面动目标检测雷达稳健阵列处理方法研究[D]. [博士论文], 西安电子科技大学, 2008: 48–52.

Zeng Cao. Research on multichannel ground moving target indicator radar with robust array processing[D]. [Ph. D. dissertation], Xidian University, 2008: 48–52.

[16] Shu Yu-xiang, Liao Gui-sheng, and Yang Zhi-wei. Robust radial velocity estimation of moving targets based on adaptive data reconstruction and subspace projection algorithm[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(6): 1101–1105.

[17] He Zhi-hua, He Feng, Dong Zhen, *et al.*. Real-time raw-signal simulation algorithm for InSAR hardware-in-the-loop simulation applications[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(1): 134–138.

作 者 简 介

秦记东(1988–)，男，河北邯郸人，信息工程大学硕士研究生，研究方向为 SAR 成像处理及地面运动目标检测。
E-mail: qinjd_edu@163.com

赖　涛(1980–)男，江西萍乡人，信息工程大学讲师，研究方向为 SAR 成像处理及 MIMO-SAR 波形设计。
E-mail: ltnudt@163.com

赵拥军(1964–)男，河南新乡人，信息工程大学博士生导师，教授，研究方向为阵列信号处理及雷达信号处理。
E-mail: zhaoyjzz@163.com