一种基于双通道 DPCA 的 SAR-GMTI 杂波抑制方法

王肖洋* 高 贵 周石琳 邹焕新
(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要：偏置相位中心天线技术(DPCA)作为空时自适应信号处理(STAP)技术的特殊形式，在合成孔径雷达地面动目标指示(SAR-GMTI)领域得到了广泛的应用。杂波抑制的能力直接决定了 GMTI 的性能，传统的复图像域 DPCA 技术对于地杂波抑制能力有限，特别是广泛分布着强散射静止地物的城市区域。该文利用干涉相位对 DPCA 幅度进行非线性加权，提出了一种加权 DPCA 杂波抑制方法，该方法降低了通道间残差相位对 DPCA 杂波抑制的影响。实验结果表明：该文方法在杂波抑制能力上优于传统 DPCA 方法。

关键词：空时自适应信号处理(STAP)；偏置相位中心天线(DPCA)；合成孔径雷达(SAR)；地面动目标检测(GMTI)；杂波抑制

中图分类号：TN958 **文献标识码**：A **文章编号**：2095-283X(2014)02-0241-08

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.13121

A Clutter Suppression Approach for SAR-GMTI Based on Dual-channel DPCA

Wang Xiao-yang Gao Gui Zhou Shi-lin Zou Huan-xin
(*College of Electronic Science and Engineering*, *National University of Defense Technology*, *Changsha* 410073, *China*)

Abstract: The Displaced Phase Center Antenna (DPCA) technology, a particular form of Space Time Adaptive Processing (STAP), has been widely used in Synthetic Aperture Radar Ground Moving Target Indication (SAR-GMTI). The GMTI performance depends on the capability of clutter rejection but the traditional DPCA technology operated in the complex image domain does not have the appropriate clutter rejection capability for urban areas with strong scattering stationary objects. Hence, interferometry phase is used to weight the DPCA magnitude nonlinearly, and a weighted DPCA clutter rejection approach is proposed, which reduces the interference from residual phase difference. The experimental results suggest that the new approach can improve the clutter rejection compared with the conventional DPCA.

Key words: Space Time Adaptive Processing (STAP); Displaced Phase Center Antenna (DPCA); Synthetic Aperture Radar (SAR); Ground Moving Target Indication (GMTI); Clutter rejection

1 引言

空时自适应信号处理(Space Time Adaptive Processing, STAP)早期主要用于机载预警雷达中抑制强度大且分布广的地杂波和海杂波。近年来随着技术不断进步，该方法的使用范围进一步拓展，已被引入到合成孔径雷达地面动目标检测(SAR-GMTI)领域中[1−3]。STAP 已经与偏置相位中心天线(Displaced Phase Center Antenna, DPCA)技术、沿迹干涉(Along Track Interfermetric, ATI)技术一起成为多通道 SAR 地面动目标指示的三大主流技术。然而，由于其设备复杂、计算量大、工程实现困难[4,5]等缺点，目前在 SAR-GMTI 领域仅取得了有限的应用。取而代之的是，复图像域 DPCA 技术作为空时自适应信号处理的特殊形式，以其简单易于实现的优点已成为多通道 SAR 动目标指示领域的一种流行方法，并在实际 SAR 地面监视系统中得到验证，如加拿大防务中心在 RADARSAT-2 地面动目标指示试验中验证了双通道DPCA技术的有效性[6,7]。

值得注意的是，DPCA 技术在实际SAR-GMTI系统中的表现并不理想。传统复图像域 DPCA 方法是对双通道复数据进行了作差取模处理(通常称之为 DPCA 幅度)，在理想假设条件下，运动目标的差值模(即 DPCA 幅度)不为零，而静止地物的差值模为零，故而地杂波能被对消。事实上，DPCA 幅度与两通道数据的相位差密切相关，而相位差恰好反映了地物的动静信息，但平台抖动、通道失配、

2013-12-09 收到，2014-02-24 改回；2014-03-07 网络优先出版
国家自然科学基金(41171316)资助课题
*通信作者： 王肖洋 henanwangxiaoyang@163.com

随机噪声等引起的通道去相关使得两幅复图像中对应杂波像素之间存在残差相位，当杂波回波强度很强时，杂波的DPCA幅度可能达到一个显著的水平，对于地面强散射静止物体的抑制能力极为有限[8,9]。因此，如果能降低残差相位对杂波 DPCA 幅度的影响，则可能提高 DPCA 方法对杂波的抑制能力。

为此，本文尝试对两通道干涉相位进行非线性变换，然后利用变换后的干涉相位对 DPCA 幅度进行加权，来降低残差相位对 DPCA 幅度的影响。理论分析和实际数据实验都验证了该方法的有效性。

2 DPCA 基本原理

2.1 DPCA 杂波抑制原理

在机载(星载)雷达中，DPCA 方法通过在运动平台上沿航迹搭载两幅天线，天线的相位中心之间偏置一定距离，两幅天线的相位中心联合使用，使天线相位中心在相继的发射脉冲时间里相对于地面静止不动，这样采用两脉冲相消就可以抑制地面杂波[10,11]。其基本原理示意图如图 1 所示。

天线中心间距为 d，雷达脉冲重复频率为 PRF，平台速度为 V_{a}，箭头所指为平台飞行方向，通道 1 发射信号，通道 1 和通道 2 同时接收信号，接收第 1 个回波信号时，通道 1 的接收相位中心在 O_1 点，通道 2 的接收相位中心在 O 点，如果满足条件：

$$d = 2NV_{\mathrm{a}}/\mathrm{PRF} \tag{1}$$

则当发射 N 个脉冲后，通道 1 的接收相位中心移到 $O_1^{'}$，通道 2 的接收相位中心移到 O' 处，O' 和 O_1 位于相同的方位位置，因此通道 2 接收的第 N 个脉冲回波与通道 1 接收的第 1 个脉冲回波都包含相同地杂波信息，将两路回波信号相减，就能够消除静止杂波信息，保留动目标信息[11]。

2.2 复图像域 DPCA 杂波抑制原理

采用距离多普勒域 DPCA 方法进行动目标检测，必须满足式(1)，但在实际飞行过程中，平台会出现上下颠簸偏航现象，天线间距、平台速度和脉冲重复频率之间不再满足式(1)的关系，这就使得 DPCA 的杂波抑制效果很差。由于成像过程会对回波信号做平台运动补偿，并且信号经过聚焦处理后，运动目标信噪比较信号域有所提高，因此在复图像域进行DPCA检测将有可能使杂波抑制效果得到改善，复图像域 DPCA 杂波抑制原理图如图 2 所示。理想情况下，对于同一距离向分辨单元不同方位位置的地物，两通道接收的回波数据经过距离方位 2 维压缩成像后得到两幅 1 维复图像 $\boldsymbol{I}_1(t)$ 和 $\boldsymbol{I}_2(t)$，杂波对消特性如式(2)所示[11]：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{I}(t) &= \left|\boldsymbol{I}_1(t) - \boldsymbol{I}_2(t)\right| \\ &= 2kT_{\mathrm{s}} \cdot \left|\mathrm{sinc}\left(\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{V_{\mathrm{a}}^2\left(t - T_{02}\right)}{R}v_{\mathrm{r}}\right) + T_{\mathrm{s}}\right)\right| \\ &\quad \cdot \left|\sin\left(\frac{2p}{\lambda}v_{\mathrm{r}}t_{\mathrm{a}}\right)\right|\end{aligned} \tag{2}$$

其中 λ 是波长，k 是和目标后向散射系数有关的常数，v_{r} 为目标相对于平台的径向速度，T_{02} 与目标方位向坐标和平台飞行速度有关，T_{s} 是合成孔径时间。当目标静止即 $v_{\mathrm{r}} = 0$ 时，$\boldsymbol{I}(t) = 0$，即静止杂波被消除。

2.3 复图像域 DPCA 杂波分布特性

由于通道失配、平台偏航、配准校准误差等多种因素的存在，将两通道复数据经过 DPCA 方法处理后，地杂波 DPCA 幅度并没有被绝对抑制为 0，对于复杂的非均匀地物场景，假设目标缺失的前提下，地杂波分布近似服从自由度为 $(2n,2v)$ 的尺度 F 分布，多视 DPCA 概率密度函数呈现为以下特性[7]：

$$f_T(t;n) = \frac{2\Gamma(n+v)}{\Gamma(n)\Gamma(v)}\left(\frac{n}{n-1}\right)^n\left(1+\frac{n}{n-1}t^2\right)^{-(n+v)}t^{2n-1} \tag{3}$$

其中 $\Gamma(\cdot)$ 是伽马函数，n 为视数，v 为纹理参数，T 为多视 DPCA 检测量，从图 2 可以看出杂波分布并没有集中在 0 附近，存在展宽拖尾现象，因此在保证较高检测概率的情况下，基于 DPCA 幅度的恒虚警检测常常有显著的虚警率。尤其是对于弱散射慢速运动目标，传统的 DPCA 检测方法很难将其与杂波分离开。

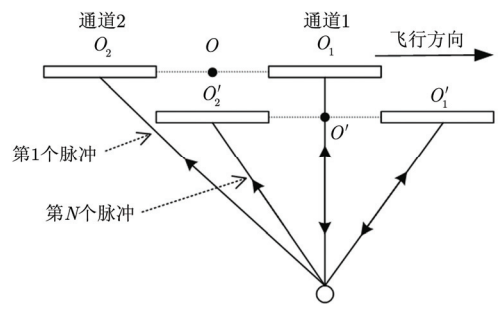


图 1 DPCA 原理示意图

Fig. 1 DPCA schematic diagram

3 加权 DPCA 杂波抑制方法

传统DPCA方法受系统噪声和通道间增益误差等多重因素的影响严重，导致静止地物在不同通道之间的幅度和相位产生偏差，其中增益误差主要引起幅度偏差，系统噪声引起的通道去相关主要引起了残差相位，使得残差相位(在干涉 SAR 中也称为干涉相位)并不是全部为 0，而是呈现如图 3 的锥形

分布，且分布中心偏离 Y 轴(图 3 中 X 轴上实心红点所示)，事实上系统噪声引起的残差相位对 DPCA 杂波抑制影响较大，文献[9]认为 DPCA 是噪声受限的。设两个通道获得的复图像为 $\boldsymbol{I}_1$ 和 $\boldsymbol{I}_2$，x_1 和 x_2 分别是 $\boldsymbol{I}_1$ 和 $\boldsymbol{I}_2$ 中静止地物的对应像素，φ_1 和 φ_2 是它们的相位，残差相位 $\Delta\varphi=\varphi_1-\varphi_2=\arg\left(x_1x_2^*\right)$，通道不平衡和系统噪声对 DPCA 杂波抑制的影响在极坐标系下表示如图 4 所示。

图中黑色实线表示像素 x_1 的矢量图，蓝色实线表示像素 x_2 的矢量图，绿色弧线代表两像素间的残差相位，红线代表 DPCA 幅度。图 4(a)表示无系统噪声干扰，只存在通道不平衡；图 4(b)和图 4(c)表示通道增益相等，只存在系统噪声引起的去相关，图 4(b)和图 4(c)的区别在于像素(信号)幅度不同；图 4(d)表示系统噪声和通道不平衡同时存在。

由图 4(a)和图 4(d)可以看出，通道不平衡时，即使是微小的残差相位也使杂波残留十分显著；由图 4(b)和图 4(c)可以看出当通道平衡时，残差相位的存在引起了杂波残留，且随着信号幅度的增强，残留杂波也近似同比例增强，换句话说幅度越强对残差相位越敏感，因此类似城市的具有强散射静止地物的区域杂波残留将很严重。显然如果能降低残差相位的影响，将会有助于抑制强杂波。

杂波残差相位(在 ATI-SAR 中称为杂波干涉相位)分布的中心偏离 Y 轴一个角度 θ，且大部分残差相位集中于 θ 附近，角度 θ 的存在很显然会使 DPCA 处理后的杂波残留更加严重，角度 θ 可近似由通道复相关系数的相位角给出，如式(4)所示[12]。

$$\rho_{\mathrm{c}}=\rho e^{j\theta}=\frac{\mathrm{E}\left[x_1x_2^*\right]}{\sqrt{\mathrm{E}\left[\left|x_1\right|^2\right]}\sqrt{\mathrm{E}\left[\left|x_2\right|^2\right]}},\quad \theta\in[-\pi,\pi] \tag{4}$$

很容易想到将干涉相位 $\Delta\varphi$ 减去偏角 θ，即对干涉相位进行校正，将干涉相位分布的中心搬移到 Y 轴，然后用校正后的干涉相位对 DPCA 幅度进行非线性加权，将有可能使杂波抑制效果得到改善，并尽可能保留动目标信息。

文献[13]提出了一种加权 ATI 思想，将 DPCA 结果与 ATI 结果相乘，$\left|x_1-x_2\right|^2\left(x_1x_2^*\right)$，即用 DPCA 幅度对 ATI 干涉结果加权。文献[14,15]提出了一种基于 ATI 的幅度相位联合动目标检测方法，利用运

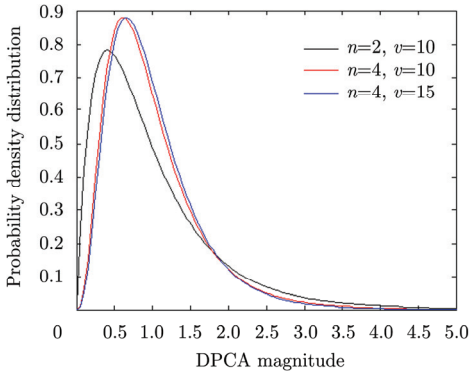


图 2 DPCA 处理后杂波概率密度分布

Fig. 2　DPCA clutter probability density distribution

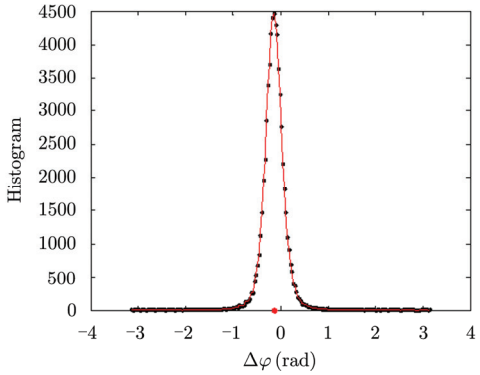
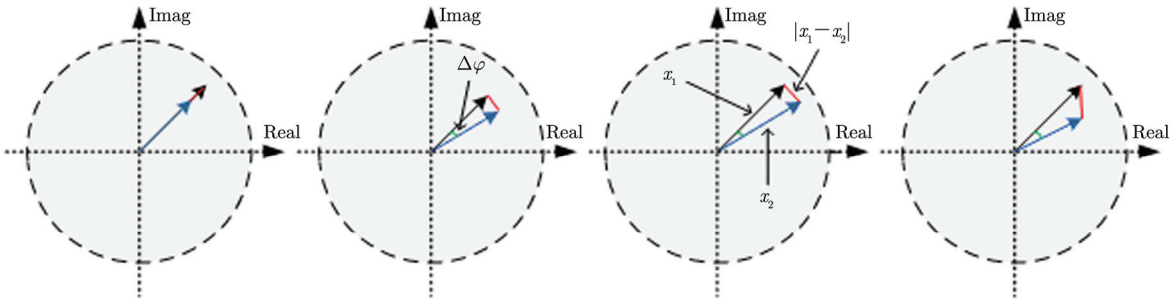


图 3 杂波残差相位分布图

Fig. 3　Residual phase difference histogram



(a) 通道不平衡
(a) Channel unbalance

(b) 弱信号加噪声干扰
(b) Weak signal with noise

(c) 强信号加噪声干扰
(c) Strong signal with noise

(d) 通道不平衡加噪声干扰
(d) Channel unbalance and noise interference

图 4 干扰因素对 DPCA 的影响

Fig. 4　Interference for DPCA

动目标具有较强的干涉幅度和较显著的干涉相位的特点，构造了检测量 $\xi=\left|x_1x_2^*\right|\left(1-\cos(\Delta\varphi)\right),\Delta\varphi=\arg\left(x_1x_2^*\right)$ 为干涉相位，并给出了新的检测量的概率密度函数。不难发现，以上方法构造的检测量对幅度较强的像素比较敏感，运动目标由于金属属性常常具有较强的幅度，因此能够保证较高的动目标检测率。但在类似城区的极不均匀区域中，杂波幅度往往波动很大，人造建筑经常和运动车辆一样也具有十分强的后向散射特性，因此以上方法对这类强杂波的抑制能力仍然有限(由图 4(b)和图 4(c)可知)。

在借鉴以上方法优点的基础上本文提出改进的 DPCA 方法(称之为加权 DPCA)，用校正后的干涉相位对 DPCA 幅度进行正弦调制，

$$W_{\mathrm{DPCA}}=\left|x_1-x_2\right|\left(1-\cos(\Delta\varphi-\theta)\right),\quad \Delta\varphi,\theta\in[-\pi,\pi] \tag{5}$$

进一步化简并去除常数因子，令

$$W_{\mathrm{DPCA}}=\left|x_1-x_2\right|\sin^2\left(\frac{\Delta\varphi-\theta}{2}\right) \tag{6}$$

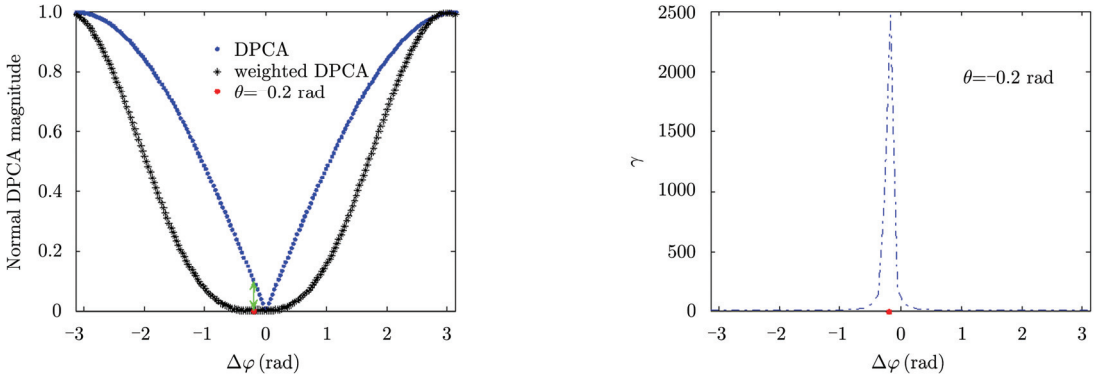
DPCA 幅度经过非线性变换后，目标和杂波的 DPCA 幅度都得到衰减，衰减系数为：

$$\gamma=\left|x_1-x_2\right|/W_{\mathrm{DPCA}}=1/\sin^2\left(\frac{\Delta\varphi-\theta}{2}\right) \tag{7}$$

为了从理论上分析干涉相位校正后加权 DPCA 对比 DPCA 的优势，我们假设两通道已平衡，即 $|x_1|\cong|x_2|$，则式(6)可写成以下形式[16]：

$$\begin{aligned}W_{\mathrm{DPCA}}&=\left|x_1-x_2\right|\sin^2\left(\frac{\Delta\varphi-\theta}{2}\right)\\&=\left|\left|x_1\right|e^{j\varphi_1}-\left|x_2\right|e^{j\varphi_2}\right|\sin^2\left(\frac{\Delta\varphi-\theta}{2}\right)\\&=\left|x_1\right|\left|e^{j\varphi_1}-e^{j\varphi_2}\right|\sin^2\left(\frac{\Delta\varphi-\theta}{2}\right)\\&=2\left|x_1\right|\left|\sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)\right|\sin^2\left(\frac{\Delta\varphi-\theta}{2}\right)\end{aligned} \tag{8}$$

如图 5(a)和图 5(b)所示，假设取 $\theta=-0.2$，即杂波干涉相位大部分分布于 -0.2 附近，随着干涉相位绝对值的不断增大，衰减系数逐渐变小，对比图 3 和图 5(b)可知，加权 DPCA 对杂波集中区域的衰减程度明显高于杂波非集中区域，换句话说，目标的衰减程度要远小于杂波的衰减程度，图 5(a)中绿色双箭头所指长度即为传统 DPCA 的残留杂波，经过加权 DPCA 方法处理后可明显看出残留杂波主分布区域被很好地抑制。当然对残留杂波抑制的同时，干涉相位很小的可能的运动目标也会被作为杂波抑制掉，不过，这些运动速度极慢的微动目标往往并不是军事监视关心的重点且数量有限，虽然牺牲了微动目标的检测能力却可以使虚警率显著降低。图 6 给出了加权 DPCA 的流程图。



(a) DPCA幅度和加权DPCA幅度
(a) DPCA magnitude & Weighted DPCA magnitude

(b) 衰减系数
(b) Attenuation coefficient

图 5 DPCA 与加权 DPCA 理论对比

Fig. 5 Theoretical comparison of DPCA and weighted DPCA

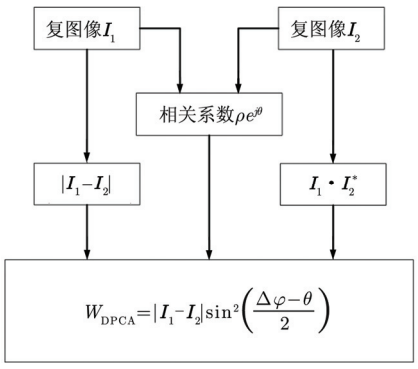


图 6 加权 DPCA 杂波抑制流程图

Fig. 6 Framework of clutter rejection with weighted DPCA

4　实验验证

4.1 实验数据

实验采用美国航空太空总署(NASA)的 AirSAR C 波段复图像数据(已完成通道均衡校正以及配准)，平台及雷达相关参数如表 1 所示。图 7(a)和图 7(b)是从同一幅单通道数据中提取的两幅子图像，图 7(a)指示城市区域(非均匀地物区域)，图 7(b)指示包含公路的郊区(均匀地物区域)，为了方便展示，两幅示意图均对原始幅度数据进行了 20 倍的对数拉伸，图 7(c)和图 7(d)分别是城市区域和郊区的干涉相位统计分布。由于缺乏地面运动目标真实集，尤其无法完全确认城市区域中哪些像素是运动目标，通过幅度、干涉相位，以及 SAR 图像判读等知识，我们认为图 7 中所有的绿色框所示区域为运动目标。

4.2 杂波抑制效果对比

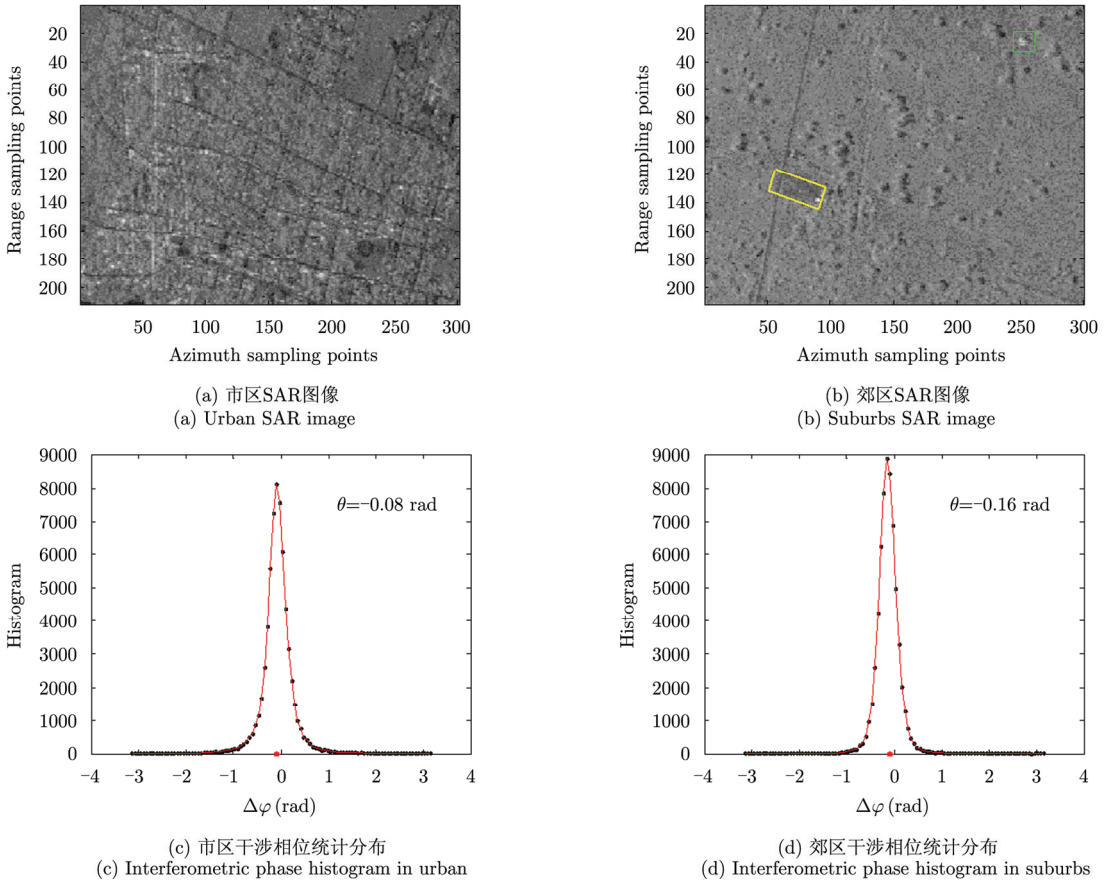
图 8(a)～图 8(d)为对应图 7(a)的传统 DPCA 法与加权 DPCA 法的杂波抑制效果对比，图 9(a)～图 9(d)为对应图 7(b)的传统 DPCA 法与加权 DPCA 法的杂波抑制效果结果对比。

表 1 平台及雷达主要参数

Tab. 1　Parameters of platform and radar

平 台	DC-8	飞行速度	200 m/s
平台飞行高度	8000 m	天线相位中心间隔	2 m
雷达中心频率	5.24 GHz	雷达波长	0.057 m
发射带宽	40 MHz	采样率	90 MHz
斜距分辨率	3.8 m	方位向分辨率	3.3 m

从图 8(a)和图 8(b)的对比可以看出，经过加权 DPCA 处理后，背景更加纯净，残留杂波被明显抑制。图 8(c)和图 8(d)分别为对应图 8(a)和图 8(b)的杂波抑制结果量化值，从中也可看出两个运动目标幅度只被轻微抑制，而大部分杂波都得到了较大程度的抑制。需要说明的是由于城市中的运动目标真实情况无法实地调查，我们并不能十分确切地判断那些疑似运动目标的真实属性，但这并不妨碍实验对该方法杂波抑制能力的证明，为了便于观察，本文只展示了 3 维视图的方位向视图。



(a) 市区SAR图像
(a) Urban SAR image

(b) 郊区SAR图像
(b) Suburbs SAR image

(c) 市区干涉相位统计分布
(c) Interferometric phase histogram in urban

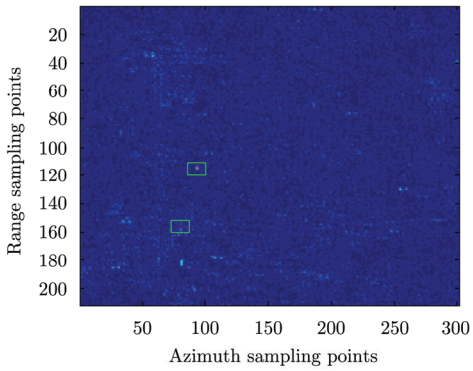
(d) 郊区干涉相位统计分布
(d) Interferometric phase histogram in suburbs

图 7 SAR 示意图及干涉相位统计分布

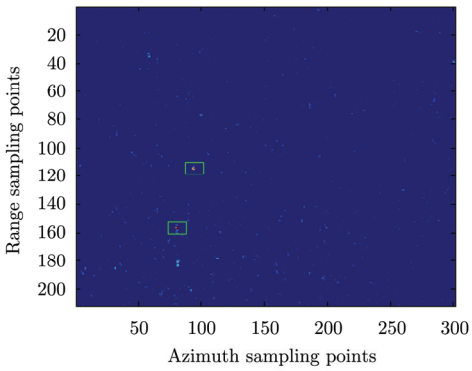
Fig. 7　SAR schematic image and Interferometric phase histogram

图 9(a)～图 9(d)中展示了非均匀区域的杂波抑制效果对比，为了充分证明该方法对非均匀地物场景和均匀地物场景均有效，我们选取了城市附近的郊区场景进行杂波抑制对比试验。图 7(b)和图 9(a)，图 9(c)中黄色框标定的区域为路边临时停车场，亮点为静止车辆或油罐(强杂波)，从图 9(a)和图 9(c)中看出经过传统 DPCA 方法处理后，该静止目标没有被抑制。从图 9(c)和图 9(d)的对比中可以看出，经过加权 DPCA 处理后静止强杂波被成功抑制(图 9(c)中黄色框标定区域被成功抑制)，而且大部分平坦区域的杂波幅度被抑制到更低水平。

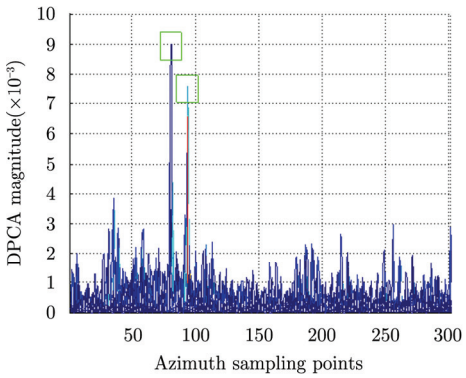
进一步对比图 9(a)和图 9(b)发现，有部分树丛区域的像素点经过加权DPCA处理后相比周围环境比较凸现，被抑制程度较轻(图 9(d)中红色圈所标)，这是因为郊区的树丛由于受风的影响而摆动，相比周围草地必然会产生更加显著的相位差，根据前文理论分析可知这些像素点的衰减程度不如草地等静止地物。



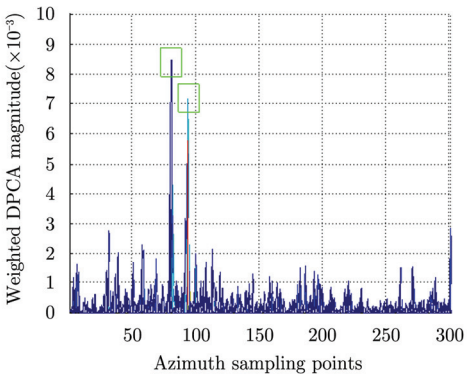
(a) DPCA杂波抑制效果图
(a) Clutter rejection effect with DPCA



(b) 加权DPCA杂波抑制效果图
(b) Clutter rejection effect with weighted DPCA



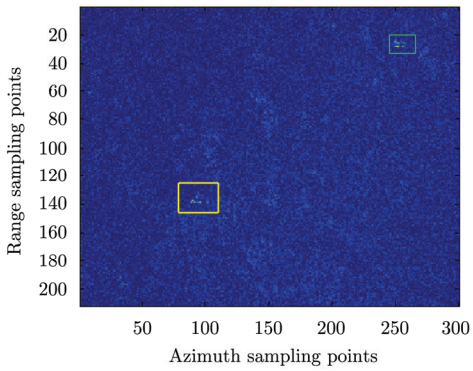
(c) DPCA幅度值
(c) DPCA magnitude value



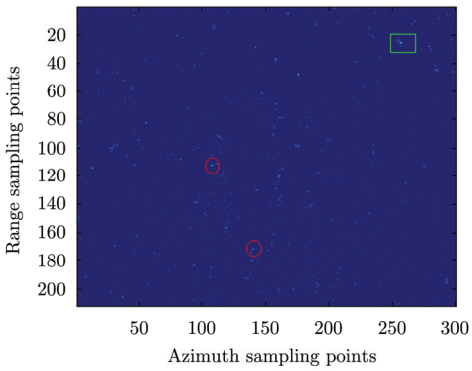
(d) 加权DPCA幅度值
(d) Weighted DPCA magnitude value

图 8 非均匀区域杂波抑制效果对比

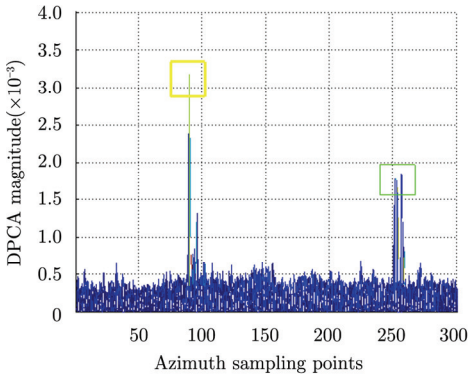
Fig. 8 Comparison of clutter rejection results in heterogenous terrain



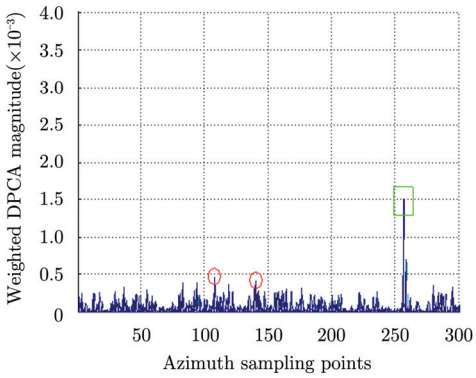
(a) DPCA杂波抑制效果图
(a) Clutter rejection effect with DPCA



(b) 加权DPCA杂波抑制效果图
(b) Clutter rejection effect with weighted DPCA



(c) DPCA幅度值
(c) DPCA magnitude value



(d) 加权DPCA幅度值
(d) Weighted DPCA magnitude value

图 9 均匀区域杂波抑制效果对比

Fig. 9　Comparison of clutter rejection results in homogenous terrain

5　结束语

本文结合双通道DPCA复图像数据的干涉相位提出了一种 SAR-GMTI 杂波抑制新方法，该方法不改变双通道 DPCA 的物理结构，利用校正后的双通道干涉相位对 DPCA 幅度进行非线性加权，降低了残差相位对 DPCA 杂波抑制的影响，均匀区域和非均匀区域的实测数据均证明了本文方法比传统 DPCA 方法具有更优的杂波抑制能力，有望被用来解决 SAR-GMTI 的杂波抑制问题。

参 考 文 献

[1] 王永良. 空时自适应信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 1–20.
Wang Yong-liang. Space-Time Adaptive Signal Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 1–20.

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

[3] Klemm R. Applications of Space-Time Adaptive Processing[M]. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004: 177–206.

[4] 王永良, 陈建文, 吴志文. 现代 DPCA 技术研究[J]. 电子学报, 2000, 28(6): 118–122.
Wang Yong-liang, Chen Jian-wen, and Wu Zhi-wen. Research on modern DPCA techniques[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(6): 118–122.

[5] 孟祥东. 空时二维自适应信号处理与动目标检测[D]. [博士论文], 西安电子科技大学, 2009.
Meng Xiang-dong. Space-time adaptive processing and moving target indication[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2009.

[6] Morena L C, James K V, and Beck J. An introduction to the RADARSAT-2 mission[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2004, 30(3): 221–234.

[7] Gierull C H and Sikaneta I. Two-step detector for RADARSAT-2's experimental GMTI mode[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(1): 436–454.

[8] Coe D J and White R G. Moving target detection in SAR imagery: experimental results[C]. IEEE International Radar Conference, British, 1995: 644–649.

[9] Shen Chiu and Livingstone C. A comparison of displaced phase centre antenna and along-track interferometry techniques for RADARSAT-2 ground moving target indication[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2005, 31(1): 37–51.

[10] 保铮. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 318–319.
Bao Zheng. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005: 318–319.

[11] 郑明洁. 合成孔径雷达动目标检测和成像研究[D]. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2003: 79–89.
Zheng Ming-jie. Study on detection and imaging of moving target with synthetic aperture radar[D]. [Ph.D. dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2003: 79–89.

[12] Lee J S, *et al*.. Intensity and phase statistics of multi-look polarimetric and interferometric SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(5): 1017–1028.

[13] 赵宁, 李景文. 机载 SAR 加权 ATI 地面慢速运动目标检测方法[J]. 雷达科学与技术, 2007, 5(3): 189–193.
Zhao Ning and Li Jing-wen. A weighting ATI ground slow velocity moving target detection method for airborne SAR[J]. *Radar Science and Technology*, 2007, 5(3): 189–193.

[14] 时公涛. 基于干涉图的多通道 SAR 地面慢动目标自动检测技术研究[D]. [博士论文], 国防科学技术大学, 2009: 30–51.
Shi Gong-tao. Study on automatic detection of moving slowly target based on multi-channel SAR interferogram[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2009: 30–51.

[15] Gao Gui and Shi Gong-tao. The CFAR detection of ground moving target based on a joint metric of SAR interferogram's magnitude and phase[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(9): 3618–3624.

[16] Livingstone C E, Sikaneta I, and Gierull C H. An airborne synthetic aperture radar (SAR) experiment to support RADARSAT-2 ground moving target indication (GMTI)[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2002, 28(6): 794–813.

作 者 简 介



王肖洋(1989–)，男，籍贯：河南，国防科技大学硕士研究生，研究方向为智能信息处理、合成孔径雷达动目标检测。
E-mail: henanwangxiaoyang@163.com

高 贵(1981–)，男，籍贯：内蒙古，国防科技大学电子科学与工程学院副教授，研究领域包括合成孔径雷达自动目标识别、SAR 图像建模、SAR-GMTI。

周石琳(1965–)，男，籍贯：湖南，国防科技大学电子科学与工程学院教授，博士生导师，研究领域包括计算机视觉及智能信息处理、图像图形处理以及数字摄影测量与遥感等。

邹焕新(1973–)，男，籍贯：广东，国防科技大学电子科学与工程学院副教授，研究方向为图形图像处理及数字摄影测量与遥感。