

文章编号: 1001- 2486(2008) 05- 0080- 06

# 车载 UWB SAR 干扰自适应抑制新方法\*

杨延光, 周智敏, 王建, 宋千, 金添

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 在分析车载超宽带合成孔径雷达(UWB SAR)探测系统中干扰类型及其产生机理的基础上, 针对 Tsaipei Wang 等提出的批处理方法的局限性, 提出一种基于迭代运算的图像域自适应干扰抑制方法。该方法利用基于韦布尔分布的恒虚警率(CFAR)检测器提高干扰信号估计的准确性; 采用迭代方法在线估计和更新参数, 实现干扰的自适应抑制。实测数据处理结果表明: 该方法可有效抑制自信号干扰, 且结构上适于实时处理, 可满足车载 UWB SAR 探测系统对图像预处理的要求。

**关键词:** 合成孔径雷达(SAR); 探地雷达(GPR); 图像预处理; 自适应干扰抑制; 迭代运算

**中图分类号:** TN957; TN958 **文献标识码:** A

## A Novel Adaptive Suppression Method of Interferences in the Vehicle-mounted UWB SAR System

YANG Yan-guang, ZHOU Zhi-min, WANG Jian, SONG Qian, JIN Tian

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** With an analysis of the types and formation mechanism of interferences in the vehicle-mounted ultra-wideband synthetic aperture radar (UWB SAR) detection system, a novel adaptive method is presented for the interferences suppression in the image domain based on the iterative technique. It can overcome the limitations and drawbacks of a batch processing method proposed by Tsaipei Wang. By exploiting the constant false alarm rate (CFAR) detector with weibull distribution, the new method can improve the accuracy of interference estimation. Then the parameters estimation and updating can be realized by using the iterative operation, and the adaptive interference suppression can be achieved on line. The processing results of real data show that the proposed method can effectively suppress the self-signature interference and is prone to real-time processing in structure. It can meet the needs of real-time preprocessing in the vehicle-mounted UWB SAR detection system.

**Key words:** synthetic aperture radar (SAR); ground penetrating radar (GPR); image preprocessing; adaptive interference suppression; iterative operation

超宽带合成孔径雷达(Ultra-Wideband Synthetic Aperture Radar, UWB SAR)具有良好的地表穿透性、全天候工作和高分辨成像能力, 在埋地小目标探测方面具有极大的应用价值<sup>[1]</sup>。前视车载 UWB SAR 探测系统能在短时间内完成大面积区域的探测, 具有安全、高效的特点<sup>[2-4]</sup>。此外, 它具有对空间同一区域进行连续多次观测的特点, 这为目标检测提供了更为丰富的特征, 同时也给图像预处理带来新的挑战。

雷达系统各部分的失配将引起低频振铃响应而形成自信号(Self-signature)干扰, 其特性随着时间、雷达运动和高度是慢变化的, 美国陆军实验室采用滑窗技术对其进行自适应, 并通过正交变换和投影从雷达数据中去除这些干扰分量<sup>[5]</sup>。文献[4]指出, 当地面不平坦时, 空-地界接触面的回波将产生空间非均匀杂波, 提出利用高通 FIR 空间滤波器去除慢变化背景噪声以及地面反射波和其他恒定噪声源。文献[6]提出对图像沿方位向和距离向进行重聚焦来进行杂波抑制, 但计算量较大。文献[7]采用批处理方法估计图像中的自信号干扰并将其从图像中去除, 但该方法在结构上不利于实时处理, 且利用整幅图像的均值和标准差进行限幅来估计自信号时, 杂波模型失配将导致干扰抑制效果变差。文献[8]采用自适应方法估计图像中各像素点对应的均值和标准差, 以实现图像的归一化处理, 消除幅度与距离的依

\* 收稿日期: 2008- 02- 20

作者简介: 杨延光(1980—), 男, 博士生。

赖关系。但上述两种方法的应用均假设背景杂波服从高斯分布。

## 1 干扰类型及其产生机理

为实现快速行进间探测, 车载 UWB SAR 探测系统采用分裂孔径发射阵列接收的天线配置方式, 两发射天线位于接收阵两端。由于发射和接收天线单元的距离较近, 系统存在严重耦合, 包括天线间直接耦合和天线与地面间的耦合, 前视系统中后者可忽略, 前者成为耦合的主要来源。分裂孔径发射配置下, 同一时刻只有一个天线单元发射信号, 且仅有一个接收通道开通, 因此只有发射信号在接收通道引起耦合, 而发射信号波形并不受耦合的影响。此外, 发射天线旁瓣泄漏将导致与其临近的通道接收到串扰信号, 但它与天线间的互耦信号在时间上将混叠在一起, 主要能量集中在接收通道回波中较早的部分。由于耦合信号不随时间变化, 天线阵列一旦确定, 发射天线与各个接收天线之间的耦合信号便固定了。由天线配置的几何模型, 可计算出互耦信号最大延时, 并结合最近成像距离对应斜平面的最小延时间来选择距离波门, 在回波域将收发天线单元间的互耦信号和串扰信号中的主要部分去除。

尽管通过选取合适的距离波门可对耦合信号起到良好的抑制作用, 使得耦合信号的振荡拖尾在图像中引入的干扰可忽略不计, 但系统中某些器件的振荡将激励出固有的自信号干扰, 在图像中表现为在某处始终存在一些固定的干扰。理论上可在微波暗室测量出这些固定的自信号, 直接从原始回波域将其去除, 但在实际探测过程中, 某些因素将导致自信号具有一定的变化<sup>[5]</sup>, 很难将实际回波中的自信号干扰与测量的自信号对齐相减。因此, 本文尝试在图像域去除自信号干扰。

## 2 现有图像域干扰抑制方法及其存在问题分析

文献[7]利用同一趟中所有扫描图像的相干平均来估计自信号干扰, 并通过对图像幅度利用一个上限以减少强信号(如地表地雷)对自信号干扰估计的影响。利用  $v_k(x, y)$  表示所有扫描图像中的像素值,  $m_k(x, y)$  和  $\theta_k(x, y)$  表示  $v_k(x, y)$  的幅度和相位, 自信号干扰可由下式估计

$$B_1(x, y) = \frac{1}{N_{scan}} \sum_k \frac{1}{r_k} \min[m_k(x, y), \mu_k + 5\sigma_k] \exp[i\theta_k(x, y)] \quad (1)$$

式中  $N_{scan}$  为每趟扫描的帧数,  $\mu_k$  和  $\sigma_k$  分别为  $m_k(x, y)$  的整体均值和标准差,  $r_k$  定义为  $m_k(x, y)$  的像素值中最低 75% 对应的均方根。每帧扫描图像的幅度在平均之前除以  $r_k$  以去除各帧间增益的变化。每帧扫描图像去除自信号干扰的计算式为

$$m'_k(x, y) = |v_k(x, y)/r_k - B_1(x, y)| \quad (2)$$

上述批处理方法在进行干扰抑制时存在以下四个问题:

(1) 利用一趟获取的所有图像数据进行事后处理, 算法在结构上无法实现实时处理, 不能满足车载探测系统对实时性的要求;

(2) 利用一趟图像数据的相干平均估计自信号时, 因自信号在时间上是慢变化的, 可能导致相干积累性能变差而降低自信号估计的准确性;

(3) 假设整幅图像中背景杂波服从高斯分布且是均匀的, 利用整幅图像估计的均值和标准差进行限幅时, 杂波模型的失配将导致自信号估计存在较大误差;

(4) 在计算参数  $r_k$  时, 由干扰信号比较强,  $m_k(x, y)$  的像素值中最低 75% 部分可能不包含干扰信号, 利用该部分像素估计的  $r_k$  进行图像归一化时, 将不能消除自信号干扰在不同帧间的增益变化, 使得利用式(2)去除干扰时存在较多残余。

## 3 基于迭代运算的自适应干扰抑制方法

鉴于上述批处理方法存在的问题, 首先分析图像中背景杂波的统计分布, 以便选择合适的 CFAR 检测器来估计背景图像; 然后利用训练数据获取初始参数; 最后利用迭代运算在线快速估计和更新参数, 在图像域实现自信号干扰的自适应抑制。图 1 给出了本文算法实现的流程图。

车辆每前进  $\Delta_m$  进行一次扫描, 从进入探测区域到出探测区域, 地面上同一个区域可被连续观测  $ML$  次。为使系统正常工作时取得较好的探测性能, 通常利用最初获取的  $ML$  帧图像作为训练数据来估计自适应处理所需的初始参数, 然后在后续行进探测过程中进行参数的迭代计算和更新。由于车载 UWB SAR 探测系统装备有高精度的定向仪、差分全球定位系统 (DGPS) 和车速传感器, 可确保车辆匀速直线行驶, 因此可利用短时间内获取的图像进行相干平均估计自信号干扰。

### 3.1 由训练数据获取初始参数

令  $I_k(x, y)$  和  $\phi_k(x, y)$  分别表示第  $k$  帧扫描图像中任意位置像素的幅度和相位, 对  $I_k(x, y)$  求取自然对数得到  $\hat{I}_k(x, y)$ , 其中  $x$  和  $y$  分别为图像中距离向和方位向坐标。由式 (1) 可知, 在对

图像进行限幅时, 实际上是通过检测分割出背景图像的过程。实测图像数据中背景杂波的统计分析表明: 整幅幅度图像背景杂波服从对数正态分布, 而距离带子图像中背景杂波服从韦布尔分布。因此, 利用基于韦布尔分布的 CFAR 检测器从原始图像中分割出的背景图像可更好地估计自信号干扰。对于韦布尔分布, 给定虚警概率  $P_f$ , 对  $I_k(x, y)$  中任意点  $(x, y)$  进行检测时的门限为<sup>[9]</sup>

$$K_{\text{CFAR}} = \sqrt{\frac{6}{\pi}} \left\{ \ln[-\ln(P_f)] + \gamma \right\} \quad (3)$$

其中  $\gamma = 0.5764$  为欧拉常数。则  $I_k(x, y)$  限幅后的图像为

$$\hat{I}_k(x, y) = \min[I_k(x, y), \mu_k(x, y) + K_{\text{CFAR}} \sigma_k(x, y)] \quad (4)$$

其中  $\mu_k(x, y)$  和  $\sigma_k(x, y)$  分别为  $I_k(x, y)$  中任意像素点  $(x, y)$  周围杂波的均值和标准差。则原始幅度图像  $I_k(x, y)$  对应的限幅图像为

$$I_k^{\text{lim}}(x, y) = \exp[\hat{I}_k(x, y)] \quad (5)$$

选取合适的  $P_f$ , 使得  $I_k^{\text{lim}}(x, y)$  中包含自信号干扰, 利用该图像计算背景能量系数

$$r_k = \sqrt{\frac{1}{N_r N_c} \sum_{x, y} I_k^{\text{lim}}(x, y)^2} \quad (6)$$

其中  $N_r$  和  $N_c$  分别为图像距离向和方位向像素点数。利用式 (6) 计算的  $r_k$  可对  $I_k(x, y)$  和  $I_k^{\text{lim}}(x, y)$  中的自信号干扰很好地进行归一化, 从而消除各帧间的增益不同对自信号估计的影响。则经过限幅及背景增益归一化后的背景复图像为

$$I_k^{\text{hnt}}(x, y) = I_k^{\text{lim}}(x, y) \exp[j\phi_k(x, y)] / r_k \quad (7)$$

当  $k \leq ML$  时, 将  $I_k^{\text{hnt}}(x, y)$  依次存储到初始化图像矩阵  $M [I_1^{\text{hnt}} \quad I_2^{\text{hnt}} \quad \dots \quad I_M^{\text{hnt}}]$  中, 并计算这些背景复图像的相干累加和

$$S_0(x, y) = \sum_{k=1}^{ML} I_k^{\text{hnt}}(x, y) \quad (8)$$

$S_0(x, y)$  将作为后续迭代运算的初始参数, 用于估计自信号干扰。利用  $I_k(x, y)$  中估计的各个像素点的均值  $\mu_k(x, y)$  和标准差  $\sigma_k(x, y)$  来估计迭代所需的初始参数

$$\mu_0(x, y) = \frac{1}{ML} \sum_{k=1}^M \mu_k(x, y), \quad \sigma_0(x, y) = \frac{1}{ML} \sum_{k=1}^M \sigma_k(x, y) \quad (9)$$

将初始化图像矩阵  $M$ 、 $S_0(x, y)$  和初始参数矩阵  $\mu_0(x, y)$  和  $\sigma_0(x, y)$  存储, 用于实时处理。

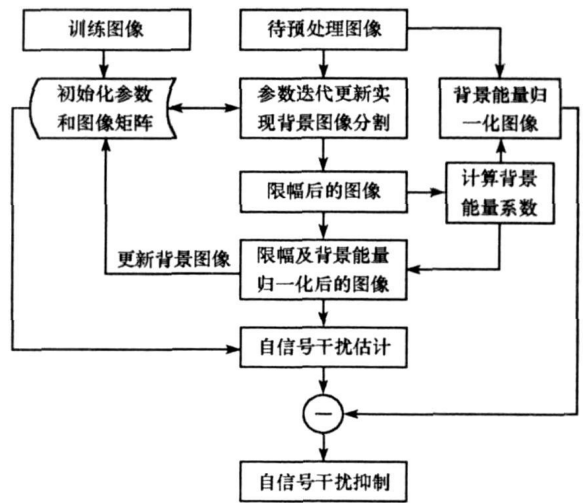


图 1 自适应干扰抑制方法的流程图

Fig. 1 Flow chart of the adaptive interference suppression method

### 3.2 参数在线估计和更新与自适应干扰抑制

从第  $k (> Ml)$  次扫描起开始进行图像预处理。为表示方便, 下面将  $S_0(x, y)$ ,  $\mu_0(x, y)$  和  $\sigma_0(x, y)$  中的下标均改为  $k-1$ 。具体实现步骤如下:

(1) 对于第  $k$  次扫描, 由式(10) 确定待更新参数对应的索引号

$$m = \begin{cases} \text{mod}(k, Ml), & \text{mod}(k, Ml) > 0 \\ Ml, & \text{mod}(k, Ml) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

(2) 从  $S_{k-1}(x, y)$  中去掉初始化图像矩阵  $M$  中的第  $m$  个背景图像对自信号估计的贡献

$$S_{k-1}(x, y) = S_{k-1}(x, y) - I_m^{\text{hnt}}(x, y) \quad (11)$$

(3) 对当前帧幅度图像  $I_k(x, y)$  求取自然对数得到  $I_k(x, y)$ , 利用初始参数和式(3) 中的  $K_{\text{CFAR}}$  对其限幅, 得到分割出的背景图像为

$$\hat{I}_k(x, y) = \min[I_k(x, y), \mu_{k-1}(x, y) + K_{\text{CFAR}} \sigma_{k-1}(x, y)] \quad (12)$$

同时, 利用式(13) 和式(14) 实现  $\mu_{k-1}(x, y)$  和  $\sigma_{k-1}(x, y)$  的在线更新

$$\mu_k = \begin{cases} \mu_{k-1} & \text{if } I_k \geq \mu_{k-1} + K_{\text{CFAR}} \sigma_{k-1} \\ (1-\alpha) \mu_{k-1} + \alpha I_k & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$\sigma_k^2 = \begin{cases} \sigma_{k-1}^2 & \text{if } I_k \geq \mu_{k-1} + K_{\text{CFAR}} \sigma_{k-1} \\ (1-\alpha) [\sigma_{k-1}^2 + (\mu_k - \mu_{k-1})^2] + \alpha (I_k - \mu_k)^2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

在式(13) 和式(14) 中省略了  $I(x, y)$ 、 $\mu(x, y)$  和  $\sigma(x, y)$  中的  $(x, y)$ 。  $\alpha$  为一常数(通常设在 0.01~0.1), 一般由实测数据确定。

(4) 由  $\hat{I}_k(x, y)$  利用式(5) 和式(6) 可得当前帧原始幅度图像对应的限幅图像  $I_k^{\text{hnt}}(x, y)$  和背景能量归一化系数  $r_k$ , 然后由式(7) 得到当前帧限幅及背景归一化后的背景复图像  $I_k^{\text{hnt}}(x, y)$ , 并利用其替换初始图像矩阵  $M$  中第  $m$  个复图像, 完成参数的在线更新。

(5) 考虑当前帧背景复图像对自信号估计的贡献

$$S_k(x, y) = S_{k-1}(x, y) + I_k^{\text{hnt}}(x, y) \quad (15)$$

并利用  $S_k(x, y)$  估计出自信号  $B(x, y) = S_k(x, y)/Ml$ 。

(6) 由  $r_k$  和  $B(x, y)$ , 可通过下式去除当前帧复图像中的自信号干扰

$$I_k^{\text{re}}(x, y) = I_k(x, y) \exp[j\phi_k(x, y)] / r_k - B(x, y) \quad (16)$$

由上述分析可以看出, 采用迭代运算实现参数的在线更新, 可满足车载 UWB SAR 系统对环境适应性和实时性的要求。

## 4 实验结果及其分析

本文利用的实测数据由国防科技大学研制的国内首个车载 UWB SAR 探测系统获取, 该系统工作频段为 P 波段, 极化方式为圆极化。与批处理方法相比, 本文提出算法在结构上适于实时处理, 因此在以下分析中, 主要从三个方面来验证其合理性和有效性。

### 4.1 获取背景图像的分割方法

首先分析实测图像中背景杂波统计分布, 检验算法的应用前提是否满足。在某趟数据中选取某帧不含目标的幅度图像, 对整幅图像的背景杂波进行统计, 然后将图像沿距离向等间隔分割成若干个子图像, 分析不同距离带对应子图像中背景杂波的统计特性。图 2 给出了利用整幅图像与各个距离带子

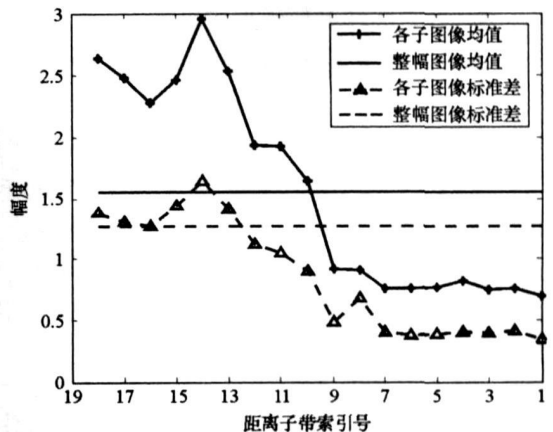


图 2 距离带子图像与整幅图像的均值和标准差比较  
Fig. 2 Comparisons of mean and standard deviation between the whole image and distance-band sub-images

图像估计的背景均值和标准差。可以看出,各个距离带子图像的参数变化较大,整幅图像中背景杂波分布是非均匀的,这表明文献[7]中估计背景的方法存在较大误差。

在利用CFAR检测器实现背景分割时,为减少杂波模型失配对检测器性能的影响<sup>[10]</sup>,需进一步分析图像中背景杂波的统计分布特性。为定量评估实际杂波分布与标准分布的近似程度,利用它们概率密度函数(PDF)的均方误差(MSE)进行分析。通过分析整幅图像与距离带子图像中实际背景杂波分布与几种标准分布PDF之间的MSEs,可得出如下结论:

整幅图像的背景杂波统计特性更接近对数正态分布,而非高斯分布;距离带子图像中的背景杂波统计特性更接近韦布尔分布。实测图像数据的背景杂波统计分布结果验证了本文选择基于韦布尔分布的CFAR检测器实现图像背景分割的合理性。

#### 4.2 能量归一化系数的计算方法

本文在第2部分指出了文献[7]中 $r_k$ 计算方法存在的问题,即当用于计算 $r_k$ 的背景图像中不包含自信号干扰时,无法利用 $r_k$ 消除自信号干扰在帧间的增益变化,致使预处理后的某些帧图像中残留的自信号较大。图3给出了某帧幅度图像及其最小75%像素对应的图像来说明这一问题。

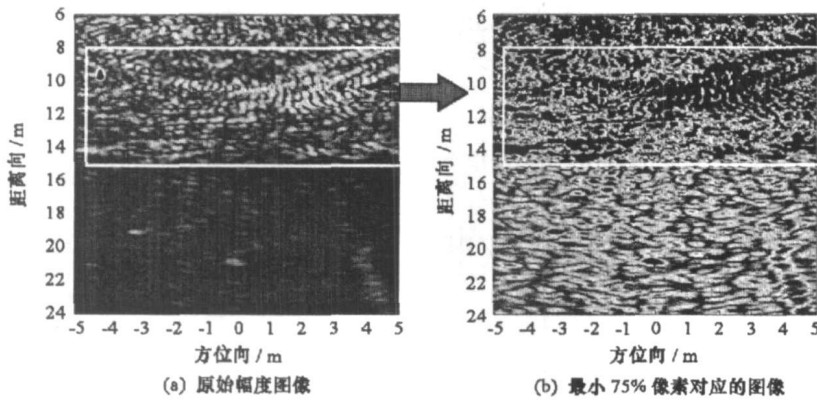


图3 原始幅度图像及其最小75%像素对应图像的比较

Fig. 3 Comparisons of the original magnitude image and its corresponding image with the lowest 75% of pixel values

图3表明:文献[7]中利用幅度图像最小75%像素的均方根来计算背景能量归一化系数 $r_k$ 是不合理的。通过选择合适的虚警概率,本文方法可确保检测出的背景图像中包含自信号干扰,同时消除目标中较强像素对背景能量估计的影响,使得计算 $r_k$ 能够很好地实现图像的归一化,减少自信号干扰在预处理后图像中的残留。下面通过预处理结果来进一步验证利用限幅后的背景图像计算 $r_k$ 的合理性以及算法的有效性。

#### 4.3 自信号干扰抑制效果评估

为便于比较批处理方法和本文方法的性能,将某趟数据中的前18帧图像(通常根据实际处理需要来确定)作为训练数据,分别利用批处理方法和本文方法估计自信号及相应的初始参数,然后利用两种方法对该趟数据中其他图像均进行干扰抑制。图4给出了某帧图像预处理前后的结果,各图像按其最大值进行归一化。圆圈内前4个目标为浅埋的金属防坦克地雷,后4个为塑料防坦克地雷。

比较图4(a)、图4(b)和4(c)可以看出,原始图像经过自信号干扰抑制后,图像质量明显改善;批处理方法由于估计的自信号干扰不准确,存在残余的干扰信号,而本文方法对自信号干扰的抑制更为彻底。

为定量分析图像质量的改善程度,下面采用目标信干比(Signal to Interference Ratio, SIR)来定量评估自信号干扰的去除效果,其定义式为<sup>[11]</sup>

$$SIR = 10 \lg(A_T^2 / \sigma_I^2) \quad (17)$$

式中 $A_T$ 为幅度图像中目标的最大灰度值, $\sigma_I^2$ 为图像中自信号干扰的方差。

对原始幅度图像、批处理方法和本文方法预处理后的图像,分别计算它们的SIR。当一帧图像中具有多个目标时,利用各个目标SIR的平均作为该帧对应的SIR。表1给出了连续10帧图像利用本文方

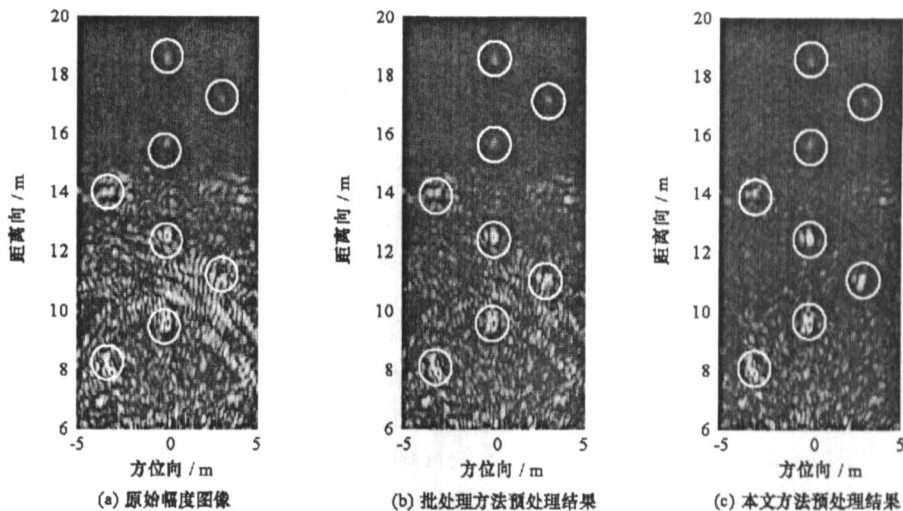


图 4 不同方法对原始图像进行预处理结果的比较

Fig. 4 Comparisons of original magnitude image and its preprocessed images with different methods

法和批处理方法所得 SIR 的平均改善程度。

表 1 两种方法的 SIR 改善程度比较

Tab. 1 Comparisons of the SIRs improvement for two methods

|       | # 19  | # 20  | # 21  | # 22  | # 23  | # 24  | # 25  | # 26  | # 27  | # 28  | 平均    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 原始图像  | 10.68 | 11.45 | 12.89 | 10.20 | 10.38 | 10.94 | 10.10 | 9.15  | 11.17 | 11.21 | 10.82 |
| 批处理方法 | 17.74 | 18.59 | 19.21 | 18.14 | 17.53 | 18.03 | 17.86 | 16.79 | 18.28 | 18.31 | 18.04 |
| 本文方法  | 21.72 | 22.53 | 24.46 | 22.16 | 21.02 | 22.12 | 21.58 | 20.75 | 23.39 | 22.73 | 22.25 |

由以上比较可以看出, 本文提出的预处理方法不仅适用于实时处理, 且可稳健、有效地去除图像中的自信号干扰。

### 5 结束语

分析了车载 UWB SAR 探测系统中存在的干扰及其特点, 针对实时性的工程应用需求, 提出了一种图像域自适应干扰抑制的新方法。首先分析了实测数据中背景杂波的统计分布, 选择相应的 CFAR 检测器实现背景图像分割; 然后利用训练数据得到初始参数; 最后通过迭代运算实现参数的在线更新和图像的自适应干扰抑制。试验结果进一步验证了该方法可稳健、有效地去除自信号干扰。该方法在工程实用中取得了良好的效果, 后续研究中可通过目标增强技术进一步提高图像信杂比, 进而提高探测性能。

### 参考文献:

[1] 金添. 超宽带 SAR 浅埋目标成像与检测的理论和技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.  
 [2] Kositsky J, Cosgrove R, Amazeen C, et al. Results from a Forward-looking GPR Mine Detection System[C]// Proceedings of SPIE, 2002, 4742: 206-217.  
 [3] Russell B, Cosgrove R, Milanfar P, et al. Trained Detection of Buried Mines in SAR Images via the Deflection Optimal Criterion[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(11): 2569-2575.  
 [4] Bradley M, Witten T, Duncan M, et al. Mine Detection with a Forward-looking Ground-penetrating Synthetic Aperture Radar[C]// Proceedings of SPIE, 2003, 5089: 334-347.  
 [5] Nguyen L, Ton T, Wong D, et al. Signal Processing Techniques for Forward Imaging Using Ultra-wideband Synthetic Aperture Radar[C]// Proceedings of SPIE, 2003, 5083: 505-518.  
 [6] Gu K, Wang G, Li J. Migration Based SAR Imaging for Ground Penetrating Radar Systems[J]. IEEE Proc. Radar Sonar Navig, 2004, 151(5): 33-44.  
 [7] Wang T P, Sjahputera O, Keller J M, et al. Feature Analysis for Forward-looking Landmine Detection Using GPR[C]// Proc. of SPIE, 2005, 5794: 1233-1244.  
 [8] Wang T P, Sjahputera O, Keller J M, et al. Landmine Detection Using Forward-looking GPR with Object-tracking[C]// Proc. of SPIE, 2005, 5794: 1080-1088.  
 [9] 方学立. UWB SAR 图像中的目标检测与鉴别[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.  
 [10] 杨志国. 基于 ROI 的 UWB SAR 叶簇覆盖目标鉴别方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.