

一种适用于 FLGPSAR 的自适应干扰抑制与背景均衡新方法

杨延光 宋千 金添 王建 周智敏

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 针对车载前视地表穿透合成孔径雷达(Forward-Looking Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar, FLGPSAR)探测系统存在自信号干扰和图像背景增益不一致问题, 该文提出了一种基于图像域距离带分割和迭代操作的自适应干扰抑制和背景均衡新方法。通过距离带分割实现并行处理并提高参数估计的准确性, 采用迭代操作在线估计和更新参数, 自适应实现干扰去除和图像背景增益均衡。实测数据处理结果表明: 所提方法具有更好的环境适应性, 且结构上适于实时处理, 可满足车载 FLGPSAR 探测系统对图像预处理的需求。

关键词: 探地雷达(GPR); 合成孔径雷达(SAR); 图像预处理; 自适应干扰抑制; 距离带分割; 迭代操作

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)07-1684-06

A Novel Adaptive Interferences Suppression and Background Uniformization Method Applicable to FLGPSAR System

Yang Yan-guang Song Qian Jin Tian Wang Jian Zhou Zhi-min

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To solve the problems of the self-signature interference and the nonuniformity of image background existing in the vehicle-mounted Forward-Looking Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar (FLGPSAR) detection system, an adaptive method is proposed to realize interferences suppression and background uniformization based on distance-band partition and iterative operation techniques in the image domain. Parallel processing can be realized via distance-band partition, which can also improve the accuracy of parameters estimation. Parameters can be estimated and updated on line by using the iterative operation technique, and then the interference suppression and background gain uniformization can be adaptively achieved. Experimental results of the real data show that proposed method has a better adaptability to environment and is prone to real-time processing in structure. It can effectively meet the needs of the vehicle-mounted FLGPSAR system for image preprocessing.

Key words: Ground Penetrating Radar (GPR); Synthetic Aperture Radar (SAR); Image preprocessing; Adaptive interference suppression; Distance-band partition; Iterative operation

1 引言

地表穿透合成孔径雷达(Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar, GPSAR)具有良好的土壤穿透性, 全天候工作和高分辨成像能力, 在埋地小目标, 如地雷, 探测方面具有极大的应用价值^[1]。文献[2]对地表穿透雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)系统进行了详细的综述, 指出工作于前视模式下的车载GPR探测系统可在短时间内完成大面积区域的探测, 具有安全、高效的优点。车载前视GPSAR(Forward-Looking GPSAR, FLGPSAR)探测系统既可实现对单颗地雷的探测, 又可对雷场边界进行定位, 体现了浅埋目标探测技术的发展趋势。目前, 典型的车载前视GPR系统有: 美国陆军实验室(ARL)的车载BoomSAR^[3], 美国斯坦福研究所(SRI)的车载

FLGPR^[4,5], 美国系统规划公司(PSI)的车载FLGPSAR^[6], 法国电子装备技术中心(CELAR)和微波光纤通讯研究所(IRCOM)联合研制的车载PULSAR^[7]以及中国国防科技大学研制的车载FLGPSAR等系统。车载FLGPSAR探测系统采用分裂孔径发射阵列接收的天线配置方式^[6,8], 可在车辆行进中对前方若干米外的一定区域进行连续探测, 因此, 具有对空间同一区域进行多次观测的特点, 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了新的挑战。

由于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(以下简称自干扰), ARL采用滑窗技术自适应估计自干扰, 并通过正交变换和投影从雷达数据中去除这些自干扰分量^[3]。文献[6]指出, 当地面不平坦时, 空-地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它恒定噪声源。以上方法采取在回波域去除干扰或噪声,计算量较大,且无法克服图像背景增益不一致问题。文献[1]指出某些处理在回波域和图像域是等效的,因此,可以考虑在图像域进行自干扰抑制和背景增益均衡。文献[9]通过对图像进行重聚焦来抑制杂波,这种方法计算量大,且亦不能保证图像背景增益的一致性。文献[10]利用获取的图像数据进行批处理实现图像的预处理,首先由某批次图像数据估计自干扰及背景增益,然后利用其去除每帧图像中的自干扰,同时实现图像背景增益的均衡。由于各个距离带对应于图像的均值变化较大,批处理方法在利用整幅图像估计的均值和标准差估计自干扰和背景增益时将存在较大误差,且算法在结构上也不利于实时处理。

车载前视探测系统要求干扰去除方法简单有效,且又具有良好的实时性和环境适应性,以满足工程实用中的需求。针对实时处理结构和时变环境适用性的应用需求,本文提出了一种图像域自适应干扰抑制与背景均衡新方法。该方法仅利用与探测区域有关的当前若干帧连续图像估计自干扰和背景增益,避免其它图像中不相关杂波的影响,并采用迭代操作在线估计和更新参数。实测数据处理结果表明:该方法具有良好的环境适应性,能够很好地去除图像中的自干扰,实现图像背景增益的均衡,且适用于在线实时处理。

2 车载 FLGPSAR 探测系统的干扰类型分析

文献[8]论证了分裂孔径发射配置(Split Aperture Transmit Configuration, SATC)天线体制可确保高分辨率的同时尽可能地降低系统成本和实现复杂度,该天线体制的工作方式可表述为:两个发射天线分别放置在接收天线阵的两端,对任一接收单元,左端和右端发射天线分别发射信号,利用该单元分别接收,得到两组回波数据;然后切换到下一个接收单元,采用同样的方式录取回波数据。成像区域内与天线阵列平行的方向为方位向,与车辆行进方向平行的为距离向。

因发射和接收天线单元的距离较近,且各接收天线单元间的距离亦很近,系统存在严重的耦合。这些耦合信号可分为3类:(1)发射天线与接收天线间的直接耦合;(2)发射天线旁瓣泄漏导致与其临近通道接收到的串扰信号;(3)收发天线与地面间的耦合。对于(1)和(2),耦合信号不随时间变化,天线阵列一旦确定,发射天线与各接收天线之间的耦合信号的相对延时将基本固定在某一范围;车载

FLGPSAR 探测系统的探测区域相对天线来说处于远区,所以收发天线与地面的耦合非常小。因串扰信号与天线间的互耦信号在时间上将混叠在一起,且主要能量集中在接收通道回波中较早的部分,根据天线配置的几何模型计算出互耦信号的最大延时,并结合最近成像距离对应的最小延时来选择距离波门,可将天线间的互耦信号和串扰信号在回波域去除。

尽管通过选取合适的距离波门可很好地去除耦合信号,使得图像中的残余耦合干扰可忽略不计,但系统中某些器件的振荡将激励出固有的自干扰^[3,10]。文献[3]指出,雷达发射机发射的脉冲将激发天线支架和电缆组件产生振铃信号并叠加到数据中,且认为一些因素使得该干扰信号是变化的;文献[10]指出自干扰源于雷达系统自身的特性,与车辆位置无关,可在图像域利用多次观测得到的连续帧图像对其进行估计。而对于车载 FLGPSAR 探测系统,天线高度和雷达都是固定的,在固定孔径后向投影(Constant Aperture Back-Projection, CABP)成像模型下^[8,11],自干扰在图像中表现为在某处始终存在一些固定的干扰,且幅度呈现局部的慢变化。此外,接收阵通道不一致性,谱均衡方法进行射频干扰抑制后的残余干扰,地表起伏以及土壤环境的变化等都将导致图像背景增益不一致,这将影响目标能量特征的一致性,且减小探测距离。

3 基于距离带分割和迭代操作的自适应干扰抑制和背景均衡方法

针对车载 FLGPSAR 探测系统行进间探测的工作特点以及批处理方法用于实时处理的局限性,在设计算法时采用距离带分割+迭代操作的并行流水结构,可对一些参数进行快速计算,实现参数的在线更新;且通过自适应更新随环境变化的参数实现图像的快速预处理。所提方法将具有以下两个特点:(1)良好的实时性。该方法具有适用于实时处理的结构,可满足前视探测系统对大面积区域进行快速探测的需求;(2)自适应能力。自适应算法可使系统在复杂多变的环境中保持良好的探测性能,具有更强的战场生存能力。

3.1 利用训练图像数据获取初始参数矩阵

为便于阐述本文提出的自适应方法(以下简称本文方法)的工作原理,图1给出了车载 FLGPSAR 探测系统的工作示意图。车辆每前进 Δr 米进行一次扫描,得到相应探测区域的一幅图像,由成像区域距离向长度 $R = R_{\max} - R_{\min}$,可将成像区域按距离向划分为 S 个距离带, $s = 1, 2, \dots, S$ 表示距离带的索引号,其编号由大到小分别对应于成像区域近端到

远端。距离带划分数目由 R 、图像分辨率、目标尺寸以及 DSP 结构决定。当扫描间距 Δr 较大时(例如大于 0.5m), 可按照 Δr 来划分距离带, 此时距离带数目为 $S = R / \Delta r$; 而地面上的同一区域, 从进入探测区域到出探测区域, 可被雷达连续观测 L 次, 利用 l 表示连续 L 帧图像的索引号。

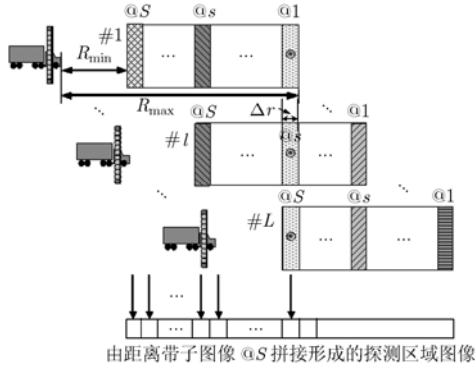


图1 车载 FLGPSAR 探测系统的工作示意图

在利用训练图像获取算法所需的初始参数矩阵时, 可选择连续 L 帧图像构成一个大图像矩阵, 将每帧图像划分为 S 个子图像, 从而形成 $L \times S$ 个子图像矩阵。为便于问题的表述, 令 v_i^s 表示复子图像, 并定义以下几个矩阵: 幅度矩阵 $\mathbf{M}[m_i^s]$, 相位矩阵 $\Theta[\theta_i^s]$, 背景能量参数矩阵 $\mathbf{R}[r_i^s]$, 均值矩阵 $\mathbf{E}[\mu_i^s]$ 和标准差矩阵 $\Sigma[\sigma_i^s]$, 去除自干扰并经滤波平滑后的图像矩阵 $\mathbf{Q}[q_i^s]$ 。以上定义的矩阵中, m_i^s , θ_i^s , r_i^s , μ_i^s 和 σ_i^s 分别为第 l 帧中第 s 个子图像的幅度、相位、背景能量系数、像素的均值和标准差, 其中下标表示第 l 帧图像, $l = 1, \dots, L$, 上标表示该帧中第 s 个子图像, $s = 1, 2, \dots, S$ 。此外, 定义两个中间变量矩阵 $\mathbf{S}_{B_1} = [s_{B_1}^1, s_{B_1}^2, \dots, s_{B_1}^S]^T$ 和 $\mathbf{S}_{B_2} = [s_{B_2}^1, s_{B_2}^2, \dots, s_{B_2}^S]^T$, 上标 T 表示转置运算, 其中 $s_{B_1}^s$ 为当前 L 帧连续图像中第 s 个子图像经过限幅后的和, 其计算公式为

$$s_{B_1}^s = \sum_{l=1}^L \frac{1}{r_l^s} \min[m_l^s, \mu_l^s + k_{P_f} \sigma_l^s] \exp[j\theta_l^s] \quad (1)$$

其中 k_{P_f} 是与虚警概率 P_f 有关的修正因子, 用于修正当前帧中第 s 个子图像的背景变化情况, 若图像的 SCR(Signal-to-Clutter Ratio)较低时, 应采用较高的 P_f 。假设背景杂波服从标准正态分布, 则 $k_{P_f} = 5$ 时对应的虚警概率在 10^{-7} 量级。 μ_l^s 和 σ_l^s 分别是由子图像所有像素估计的均值与标准差, 利用其估计的阈值可对相应的子图像进行分割来获得背景图像。为便于同批处理方法进行比较, 仍取 m_l^s 的像素值中最低 75% 对应的均方根来计算背景能量系数 r_l^s 。每帧扫描图像中的各个子图像在平均之前幅度除以 r_l^s

用来去除各帧间增益的变化, 然后由 $s_{B_1}^s$ 计算当前帧包含自干扰的各个子图像 $\mathbf{B}_1^s = s_{B_1}^s / L$ 。

为得到各个子图像背景能量的和 $s_{B_2}^s$, 以便利用其估计背景增益, 需对每帧背景图像进行平滑滤波, 消除目标残余能量对背景的影响, 可由式(2)计算背景平滑后的各个子图像

$$q_i^s = f_{\text{Mean}}\{f_{\text{Median}}\langle v_i^s / r_l^s - \mathbf{B}_1^s \rangle\}, \quad s = 1, 2, \dots, S, l = 1, 2, \dots, L \quad (2)$$

这里 $f_{\text{Median}}(\cdot)$ 表示中值滤波运算, 所用滑窗的尺寸为 21×21 , $f_{\text{Mean}}(\cdot)$ 为均值滤波运算, 所用滑窗尺寸为 51×51 , 滑窗尺寸的选择通常依据目标尺寸和图像分辨率。为避免滤波导致的子图像边缘模糊, 造成最后合成图像在分割处出现不平滑情况, 可在滤波前对子图像进行边缘扩充。则 q_i^s 可用于计算背景增益 $s_{B_2}^s$

$$s_{B_2}^s = \sum_{l=1}^L q_l^s, \quad s = 1, 2, \dots, S \quad (3)$$

对每个子图像, 分别计算参数 m_i^s , θ_i^s , r_i^s , μ_i^s , σ_i^s , q_i^s , $s_{B_1}^s$ 和 $s_{B_2}^s$, 形成初始参数对应的矩阵 \mathbf{M} , Θ , \mathbf{R} , \mathbf{E} , Σ , \mathbf{Q} , \mathbf{S}_{B_1} 和 \mathbf{S}_{B_2} 。

3.2 参数在线更新及自适应干扰抑制和背景均衡

利用训练图像数据得到初始参数矩阵后, 将其作为初始变量导入到实时处理程序中, 通过迭代实现参数在线自适应更新。下面给出具体实现步骤。

(1) 对于第 $k(k > L)$ 次扫描得到的图像 v_k , 首先由式(4)得到待更新参数对应的索引号 l

$$l = \begin{cases} \text{mod}(k, L), & \text{mod}(k, L) > 0 \\ L, & \text{mod}(k, L) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\text{mod}(k, L)$ 表示 k 除以 L 所得的余数。

(2) 由初始参数矩阵计算索引号为 l 的各个子图像限幅后的图像

$$I_l^s = \frac{1}{r_l^s} \min[m_l^s, \mu_l^s + k_{P_f} \sigma_l^s] \exp[j\theta_l^s], \quad s = 1, \dots, S \quad (5)$$

结合初始参数矩阵中索引号为 l 的平滑子图像 q_l^s , 从 \mathbf{S}_{B_1} 和 \mathbf{S}_{B_2} 中去除该索引号对应的各个子图像对自干扰及背景增益估计的贡献量

$$s_{B_1}^s = s_{B_1}^s - I_l^s, \quad s_{B_2}^s = s_{B_2}^s - q_l^s, \quad s = 1, \dots, S \quad (6)$$

(3) 计算当前帧复图像中各个子图像 v_k^s 对应的参数 m_k^s , θ_k^s , r_k^s , μ_k^s 和 σ_k^s , 并利用它们替换参数矩阵 \mathbf{M} , Θ , \mathbf{R} , \mathbf{E} 和 Σ 中第 l 帧图像中各个子图像对应的参数, 从而实现参数的在线估计和更新。由于在估计自干扰和背景增益时均需利用参数 r_l^s , 而采取排序方法估计 r_l^s 的计算量较大, 本文采用直方图分割方法得到用于计算 r_l^s 的那部分像素, 以便提高参数的计算效率。

(4)利用 $m_k^s, \theta_k^s, r_k^s, \mu_k^s$ 和 σ_k^s 及式(5)来估计当前帧图像中各个限幅子图像 I_k^s , 结合式(6), 并考虑当前图像中各个子图像对自干扰估计的影响

$$s_{B_1}^s = s_{B_1}^s + I_k^s \quad (7)$$

估计出各个子图像对应的 $B_1^s = s_{B_1}^s / L$, 存储 $s_{B_1}^s$ 并对 S_{B_1} 进行更新。

(5)将 r_k^s, v_k^s 和 B_1^s 代入式(2), 得到当前帧去除自干扰并经过中值滤波和均值滤波平滑后的子图像 q_k^s , 考虑其对背景增益估计的贡献量

$$s_{B_2}^s = s_{B_2}^s + q_k^s \quad (8)$$

由 $s_{B_2}^s$ 计算背景增益 $B_2^s = s_{B_2}^s / L$, 存储 $s_{B_2}^s$ 并利用 q_k^s 替换初始参数矩阵中的 q_l^s , 实现 Q 和 S_{B_2} 的在线更新。

(6)由以上估计的 r_k^s, B_1^s 和 B_2^s 可实现对当前帧中各个子图像进行预处理, 具体实现由式(9)给出

$$I_{Pre}^s = |v_k^s / r_k^s - B_1^s| / B_2^s, s = 1, \dots, S \quad (9)$$

由上述分析可以看出, 本文方法采用迭代操作实现初始参数矩阵的在线更新, 采用距离带分割将每帧图像划分为 L 个子图像, 实现并行处理, 可满足车载 FLGPSAR 探测系统对环境适应性和实时性的应用需求。此外, 利用连续多帧观测下的同一距离带对应的一组子图像进行参数估计和更新, 在降低数据量和计算量的同时, 可实现各个距离子图像参数的快速准确估计。图 2 给出了本文方法的具体实现流程图。通过以上步骤可实现对当前帧图像的实时自适应预处理。

4 实测数据试验结果与分析

批处理方法利用某批次试验数据中的所有帧扫描图像来估计自干扰和背景增益, 然后对所用到的每帧图像进行事后预处理, 结构上不适合实时处理; 本文方法利用训练数据获得初始参数矩阵, 通过迭代操作在线估计和更新参数, 结构上适于实时处理,

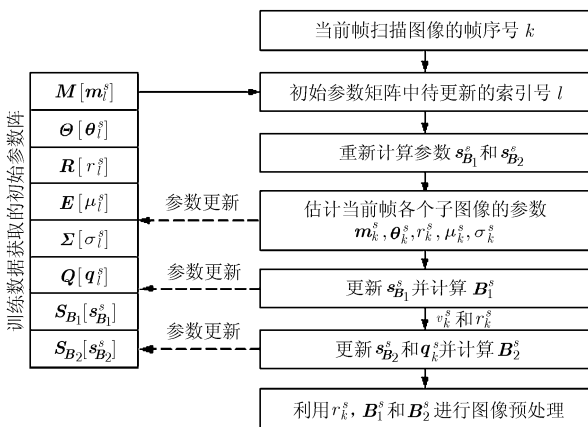


图 2 自适应干扰抑制和背景均衡的流程图

可实现对当前帧图像的实时预处理。因此, 下面主要对两种预处理方法的有效性进行详细分析和比较。

文献[10]中假定图像服从高斯分布且是均匀的, 并利用整幅图像的像素来估计均值和标准差, 但在实际中利用整幅图像估计的参数并不能准确表征图像中背景的局部变化。图 3 给出了原始图像中不同距离带子图像的均值和标准差的变化情况, 并给出了利用整幅图像估计的均值和标准差。图中曲线对应的第 13、14 和 15 个距离子带内的均值和标准差具有明显的跳变, 这是由于原始图像中该区域存在的自干扰造成的。

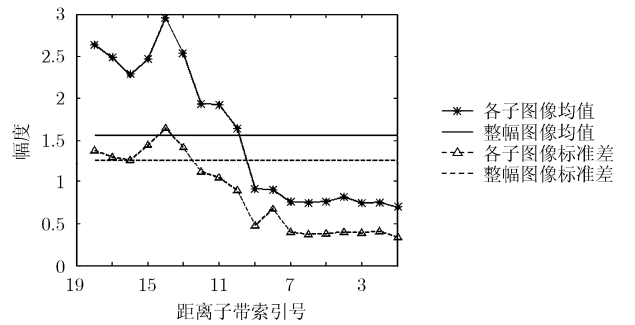


图 3 距离子图像与整幅图像的均值和标准差比较

由图 3 可以看出, 各个距离带子图像的参数变化较大, 利用整幅图像估计的参数进行自干扰估计时将存在较大的误差, 而基于距离带分割得到的子图像在进行参数估计时, 更能反映图像中背景的局部变化。此外, 本文方法可以循环更新参数, 且仅利用与当前环境有关的数据进行参数估计, 使得算法具有更好的环境适应性。为便于对环境适应性进行比较, 将某批次数据作为训练数据, 分别利用批处理方法和本文方法对另一批次数据进行处理。图 4 给出了某帧原始幅度图像以及两种预处理方法的处理结果, 其中圆圈内为 4 颗浅埋 5 cm 的某型号金属反坦克地雷。图 4 表明, 两种预处理方法均可很好地抑制图像中的自干扰, 均衡图像的背景增益, 但本文方法对自干扰的抑制更为彻底, 因此具有更好的环境适应性。

为定量分析预处理对图像质量的改善程度, 下面利用目标信干比 (Signal-to-Interference Ratio, SIR) 和 SCR 来定量评估自干扰去除和背景增益均衡的效果。SIR 的定义式如下^[1]

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

式中 A_T 为包络图像中目标的最大灰度值, σ_I^2 为 SAR 图像中自干扰的方差。SCR 通常定义为 SAR

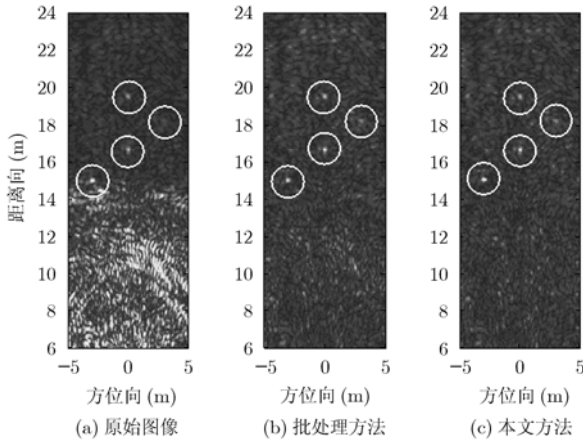


图4 图像预处理结果比较

图像中目标区域平均功率与杂波区域平均功率之比^[12]

$$\begin{aligned}
 \text{SCR} &= 10\lg \frac{P_{\text{ave}}^t}{P_{\text{ave}}^c} = 10\lg \frac{\frac{1}{N_t} \sum_{(i,j) \in \chi_t} P(i,j)}{\frac{1}{N_c} \sum_{(i,j) \in \chi_c} P(i,j)} \\
 &= 10\lg \frac{\frac{1}{N_t} \sum_{(i,j) \in \chi_t} X^2(i,j)}{\frac{1}{N_c} \sum_{(i,j) \in \chi_c} X^2(i,j)} \quad (11)
 \end{aligned}$$

其中 P_{ave}^t 为目标区域平均功率, P_{ave}^c 为杂波区域平均功率, $P(i,j)$ 为图像中点 (i,j) 的功率, $X(i,j)$ 为图像中点 (i,j) 的灰度值, χ_t 表示目标区域, χ_c 表示杂波区域, N_t 为目标区域像素点总数, N_c 为杂波区域像素点总数。GPSAR 图像中杂波区域和目标区域像素值都具有多变性, 这里取图像中所有目标区域 SIR 和 SCR 改善的平均值进行比较, 其中所利用的背景杂波为图像中 6-14 m 区域对应的像素。对于图 4 中所示的图像, 本文方法得到的 SIR 和 SCR 相对原始图像的平均改善分别为 19.47 dB 和 8.91 dB, 高于批处理方法的 14.04 dB 和 6.39 dB。

为比较预处理对图像背景增益均衡的改善程度, 对各个距离子图像的能量取对数, 并减去均值, 图 5 给出了某帧图像预处理前后图像中背景能量的

变化曲线。为进一步验证算法的稳健性, 利用各距离子图像的能量求对数后的标准差来衡量多帧图像中背景能量的变化情况。表 1 给出了连续 10 帧图像预处理前后背景能量变化的标准差。

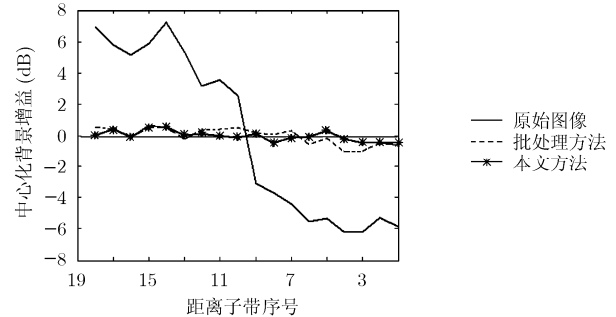


图5 图像预处理前后背景均衡效果比较

图 5 表明本文方法得到的背景均衡效果优于批处理方法, 且相对原始图像有明显的均衡效果; 表 1 进一步证明了本文方法在背景均衡方面的稳健性, 与批处理方法相比, 它可使得背景的标准差减少约 37%, 因此, 具有更好的背景均衡效果。

由上述分析可知, 本文方法不仅适用于实时处理, 且具有更好的环境适应性, 在自干扰抑制和图像背景增益均衡方面具有更好的效果, 实测数据的处理结果验证了该方法的正确性和有效性。

5 结束语

本文分析了车载 FLGPSAR 探测系统中存在的干扰类型及其特点, 针对实时性和环境适应性的应用需求, 提出了一种图像域自适应干扰抑制和背景均衡新方法。该方法通过距离带分割实现了各个子图像的并行处理, 可在降低运算量的同时提高参数估计的精度; 基于训练数据获得的初始参数, 通过迭代操作实现参数的在线更新, 使其能够反映环境的变化。实测数据试验结果表明: 所提方法在自干扰抑制和图像背景增益均衡方面具有良好的效果, 且结构上易于实时处理。因此在工程实用中有望产生良好的实用价值。

表 1 图像预处理前后背景能量变化的标准差

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	平均
原始图像	4.85	5.38	5.05	5.13	5.05	4.92	5.32	5.33	5.53	5.76	5.23
批处理方法	0.71	0.54	0.52	0.49	0.74	0.67	0.60	0.69	0.82	0.95	0.67
本文方法	0.47	0.32	0.22	0.35	0.54	0.46	0.37	0.50	0.52	0.45	0.42

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]. [博士学位论文], 国防科技大学, 2007.
Jin Tian. Research on theory and technique of ultra-wideband SAR shallow buried targets imaging and detection[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2007.
- [2] Sun Y J and Li J. Adaptive learning approach to landmine detection. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(3): 973-985.
- [3] Nguyen L, Ton T, and Wong D, *et al.* Signal processing techniques for forward imaging using ultra-wideband synthetic aperture radar. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5083: 505-518.
- [4] Kositsky J, Cosgrove R, and Amazeen C, *et al.* Results from a forward-looking GPR mine detection system. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4742: 206-217.
- [5] Cosgrove R B, Milanfar P, and Kositsky J. Trained detection of buried mines in SAR images via the deflection-optimal criterion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(11): 2569-2575.
- [6] Bradley M, Witten T, and Duncan M, *et al.* Mine detection with a forward-looking ground-penetrating synthetic apertureradar. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5089: 334-347.
- [7] Delmote P, Dubois C, and Andrieu J, *et al.* The UWB SAR system Pulsar: New generator and antenna developments. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5077: 223-234.
- [8] 杨延光, 周智敏, 宋千. 分裂孔径发射阵列接收 BP 算法方位分辨率分析. *信号处理*, 2008, 24(5): 752-756.
Yang Yan-guang, Zhou Zhi-min, and Song Qian. Azimuth resolution analysis of back-projection algorithm with the split aperture transmit configuration antenna system. *Signal Processing*, 2008, 24(5): 752-756.
- [9] Gu K L, Wang G, and Li J. Migration based SAR imaging for ground-penetrating radar systems. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5095: 33-44.
- [10] Wang T, Sjahputera O, and Keller J M, *et al.* Feature analysis for forward-looking landmine detection using GPR. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5794: 1233-1244.
- [11] Ulander L M H, Hellsten H, and Stenstrom G. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(3): 760-776.
- [12] 杨志国. 基于 ROI 的 UWB SAR 叶簇覆盖目标鉴别方法研究[D]. [博士学位论文], 国防科技大学, 2007.
Yang Zhi-guo. Foliage-concealed target discrimination of UWB SAR based on ROI[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2007.
- 杨延光: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理、超宽带 SAR 成像与目标检测。
宋千: 男, 1973 年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为实时信号处理、超宽带 SAR 信息处理技术以及超宽带探地雷达技术。
周智敏: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事 SAR 系统技术及实时信号处理的研究工作。