

doi: 10.11720/wtyht.2021.1223

张斯薇, 吴荣新, 韩子傲, 等. 双边滤波在探地雷达数据去噪处理中的应用[J]. 物探与化探, 2021, 45(2): 496–501. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1223>

Zhang S W, Wu R X, Han Z A, et al. The application of bilateral filtering to denoise processing of ground penetrating radar data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(2): 496–501. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1223>

双边滤波在探地雷达数据去噪处理中的应用

张斯薇, 吴荣新, 韩子傲, 吴海波

(安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 在探地雷达数据的采集过程中, 受外界因素影响会不可避免地混入噪声, 严重干扰有效回波的识别与解译。为此, 利用双边滤波算法进行探地雷达数据的去噪处理, 通过在探地雷达正演记录加入高斯白噪声来模拟实测的探地雷达记录, 利用双边滤波器对含噪声的合成记录进行滤波处理, 结果表明双边滤波算法能除去大部分高斯噪声, 突出有效回波信息, 峰值信噪比 (PSNR) 由初始的 15.845 1 增加到 22.147 7。进一步将双边滤波器用于实测记录的滤波, 从滤波结果来看, 噪声除去效果较好, 表明双边滤波器能有效应用于探地雷达数据的去噪处理。

关键词: 双边滤波; 探地雷达; 高斯白噪; 峰值信噪比

中图分类号: P631.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2021)02-0496-06

0 引言

探地雷达是以高频电磁波传播为基础, 通过高频电磁波在介质中的反射和折射等现象来实现对地下介质的探测^[1]。探地雷达可分辨地下 0.1 m 尺度的介质分布, 以其特有的高分辨率在浅层和超浅层地质调查中有及其广阔的应用前景^[2], 但探测过程存在频散、衰减、噪声、杂波以及其他各种干扰, 极大地影响了探地雷达数据质量^[3]。因此, 压制随机和规则干扰的去噪处理在处理过程中就必不可少。常见的一维高通、低通和带通滤波均是根据信号与噪声的频谱分布不同对数据进行去噪处理, 但由于其吉布斯以及伪门现象而不能很好应用。如今, 许多新方法也被应用于探地雷达的数据处理^[4-8]。

双边滤波算法是一种同时考虑空间域信息和灰度相似性的非线性滤波方法, 也是结合了图像的空间邻近度和像素相似度的一种折中处理, 借此来达到保边去噪的目的^[9]。双边滤波具有简单、非迭代、局部等特点, 可追溯到 Aurich 和 Weule 于 1995 年的非线性高斯滤波器的工作, 后来被 Smith 和

Brady 重新发现, 并且将双边滤波作为其 SUSAN 框架的一部分^[10]; Tomasi 和 Manduchi 给它命名为双边滤波^[11]。Paris 等人提供了双边滤波器及其应用的全面评价, 包括去噪、图像提取、结构和色调调节^[12]; 王玉灵将中值滤波的思想引入双边滤波, 得到伪中值的双边滤波, 并提出了一种新的检测边缘方法^[10]; 方连超提出了一种基于双边滤波的双边结构张量算法^[13]; 郑丽娟等人改进双边滤波算法, 提高执行效率, 使其能有效地去除“椒盐噪声”^[14]; 赵苓等人提出了一种基于改进的双边滤波算法, 结合红外小目标的点源扩散性来获取气体泄漏点及其位置^[15]; Weickert 等提出了一种既适用于摄影图像又适用于地震图像的各向异性扩散滤波器^[16]。

综上所述, 双边滤波算法能明显滤除数据和图像中的噪声, 提高图像的信噪比, 在保留图像细节信息的同时还能达到良好的滤波效果。为此, 本文寻求将双边滤波应用于探地雷达的去噪处理, 通过将探地雷达正演模型响应记录加入高斯白噪声来模拟实际的探地雷达数据, 对其合成记录以及现场实测记录进行双边滤波, 分析滤波效果, 探讨双边滤波算法是否适用于探地雷达数据去噪处理。

收稿日期: 2020-04-27; 修回日期: 2020-09-15

基金项目: 安徽高校自然科学研究重点项目 (KJ2018A0071); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金 (SKLCRSM19KFA16)

作者简介: 张斯薇 (1996-), 女, 四川南充人, 硕士研究生, 研究方向为工程地球物理勘查。Email: 1735252739@qq.com

1 双边滤波算法原理

双边滤波具有去除噪声,同时保持边缘的效果,是一种具有双重滤波作用的非线性滤波算法。双边滤波是一个包含有 2 个高斯基的滤波函数,因此它不仅考虑了图像中各像素值几何上的邻近关系,还考虑了各个像素值亮度上的相似性。通过对两者的非线性组合,自适应滤波得到平滑的图像^[17]。

含有高斯噪声的基础图像模型如下:

$$g(i, j) = f(i, j) + n(i, j), \quad (1)$$

式中: $f(i, j)$ 表示不含任何噪声的图像, $n(i, j)$ 表示服从零均值高斯分布的噪声, $g(i, j)$ 表示带有噪声的图像。滤波需要做的就是去除含有噪声图像 $g(i, j)$ 中的噪声 $n(i, j)$,从而恢复没有噪声的图像 $f(i, j)$ 。双边滤波器对含噪图像处理后的像素值为:

$$\hat{f}(i, j) = \frac{\sum_{(i, j) \in S_{x, y}} w(i, j) g(i, j)}{\sum_{(i, j) \in S_{x, y}} w(i, j)}, \quad (2)$$

式中: $S_{x, y}$ 是中心点 (i, j) 的 $(2N+1) \times (2N+1)$ 大小的领域, $S_{x, y}$ 领域内的各个像素点均由下面两部分因子的乘积组成:

$$w(i, j) = w_s(i, j) w_r(i, j), \quad (3)$$

其中:

$$w_s(i, j) = \exp\left(\frac{|i - x|^2 + |j - y|^2}{2\delta_s^2}\right), \quad (4)$$

$$w_r(i, j) = \exp\left(\frac{|g(i, j) - g(x, y)|^2}{2\delta_r^2}\right). \quad (5)$$

$w_s(i, j)$ 函数是根据像素距离选择权重,由式(4)可以看出距离越近权重越大,这与传统高斯滤波方式相同。而 $w_r(i, j)$ 函数则是根据像素的差异来分配权值,即当两个像素值越接近,即使距离较远,也比差异大距离近的像素点的权重大。由于 $w_r(i, j)$ 函数的作用,使得距离近但差异大的边缘像素点得以保留。

2 含噪声正演记录的双边滤波处理

2.1 含噪声正演记录

本文中探地雷达合成记录由探地雷达正演记录与不同信噪比的高斯白噪声叠加而成。其中正演模型为埋深不同的管线模型,其探地雷达正演记录如图 1 所示,能明显看出其上部的反射轴,下部为埋深较深、相隔一定距离、管径较小的管。合成记录加噪

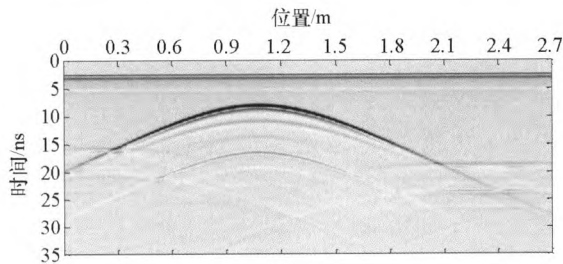
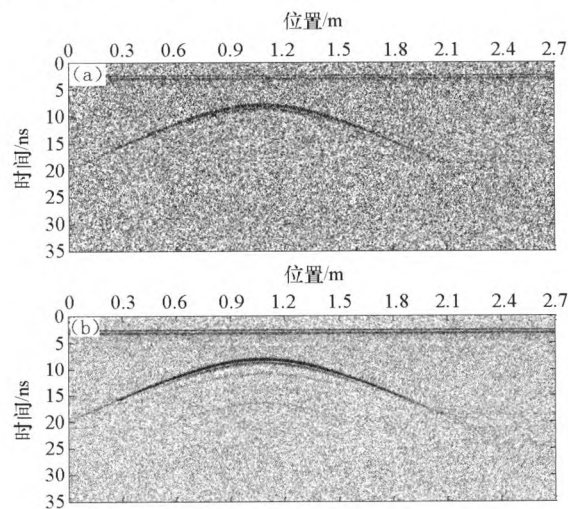


图 1 探地雷达正演记录

Fig.1 The forward record of ground penetrating radar

选择的高斯白噪声指的是其瞬时值服从高斯分布,且功率谱密度均匀分布的噪声。

对探地雷达正演响应记录加入高斯白噪声,可以看出,当加入高斯白噪声的信噪比为 2 时,只有上部较浅位置的反射轴,其弧度也变短,下部反射信息均被覆盖,对图像的损害较大(图 2a);当信噪比为 10 时,上部反射轴强度与原图一致,下部也有反射轴显示,但反射强度较弱(图 2b)。高斯白噪声对有效回波的识别有一定影响。



a—信噪比为 2 的合成记录;b—信噪比为 10 的合成记录

a—a synthetic record with a signal-to-noise ratio of 2;

b—a synthetic record with a signal-to-noise ratio of 10

图 2 不同信噪比的探地雷达合成记录

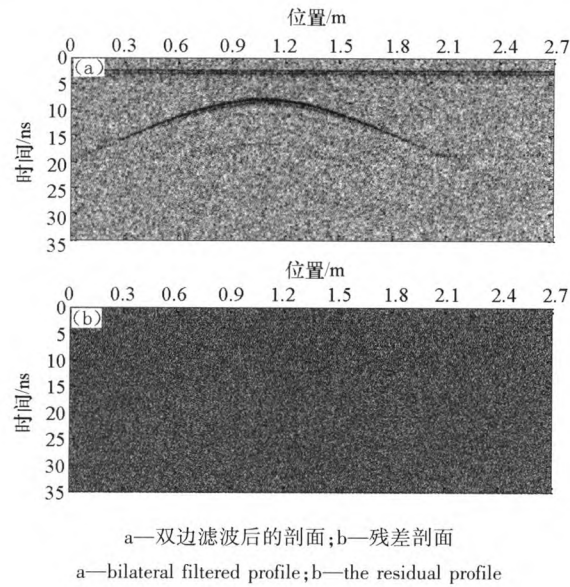
Fig.2 Synthetic records of ground penetrating radar with different signal-to-noise ratio

2.2 滤波处理效果分析

滤波是将信号中特定波段频率滤除的操作,是抑制和防止干扰的一项重要措施。滤波分为经典滤波和现代滤波。经典滤波是从噪声中提取确定的信号,研究对象是信号与噪声处于不同的频带。而现代滤波则用研究随机信号的方法来克服经典滤波器的不足之处^[18]。从图 2 可看出,信噪比为 2 时,探地雷达数据图像模糊,噪声盖过了大部分反射信息;

高斯白噪声信噪比为 10 时,对图像的损害较小。对加噪图像进行双边滤波处理,得到滤波剖面 and 残差剖面。

图 3 为图 2a 的双边滤波效果。信噪比为 2 的高斯白噪声对图像质量影响较大,经双边滤波后管道双曲线有加深、延长的趋势,图像质量有所提升。由于下方弱反射与背景值比较接近,并未直观显示,滤波后也无法轻易识别。



a—双边滤波后的剖面;b—残差剖面
a—bilateral filtered profile;b—the residual profile

图 3 图 2a 的探地雷达记录双边滤波结果

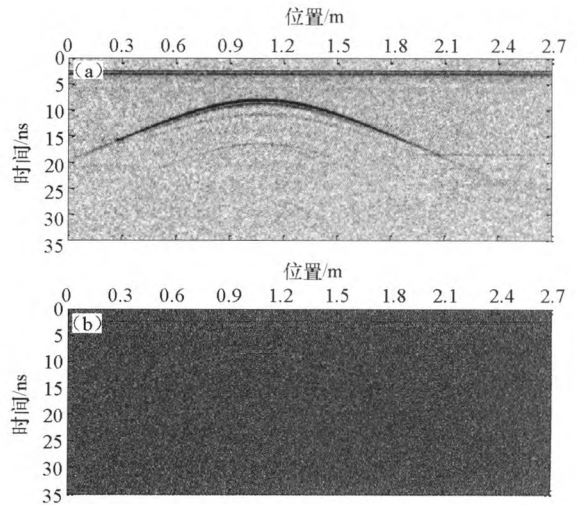
Fig.3 The result of bilateral filtering of the GPR in figure 2a

图 4 为图 2b 的双边滤波效果。管状模型与信噪比为 10 的高斯白噪声的合成记录,其管状记录正演模型上部反射较明显,经滤波后,反射轴有增强的趋势;图像下方在加噪后反射轴较弱部分完全被覆盖,经双边滤波后肉眼可见,其反射轴弧度也有所延长,弱的有效回波均有增强。

用 PSNR 函数计算加噪图像与不加噪图像以及滤波后图像与不加噪图像的信噪比(表 1),结果表明,针对不同信噪比的探地雷达正演记录,加噪图与原图的峰值信噪比接近于加入的高斯白噪声的信噪比;双边滤波后,其峰值信噪比均大幅度提高,最高可达 10 倍,但由于信噪比值太小,肉眼并不能有效

表 1 不同信噪比的高斯白噪声滤波图像 PSNR 值

Table 1 PSNR values of White Gaussian Noise images with different signal-to-noise ratio		
高斯白噪声 信噪比	含噪图像 信噪比	滤波图像 信噪比
1	1.872 9	13.391 5
2	4.875 9	15.360 2
10	11.867 8	22.147 7



a—双边滤波后的剖面;b—残差剖面

a—bilateral filtered profile;b—the residual profile

图 4 图 2b 的探地雷达记录双边滤波结果

Fig.4 The result of bilateral filtering of the GPR in figure 2b

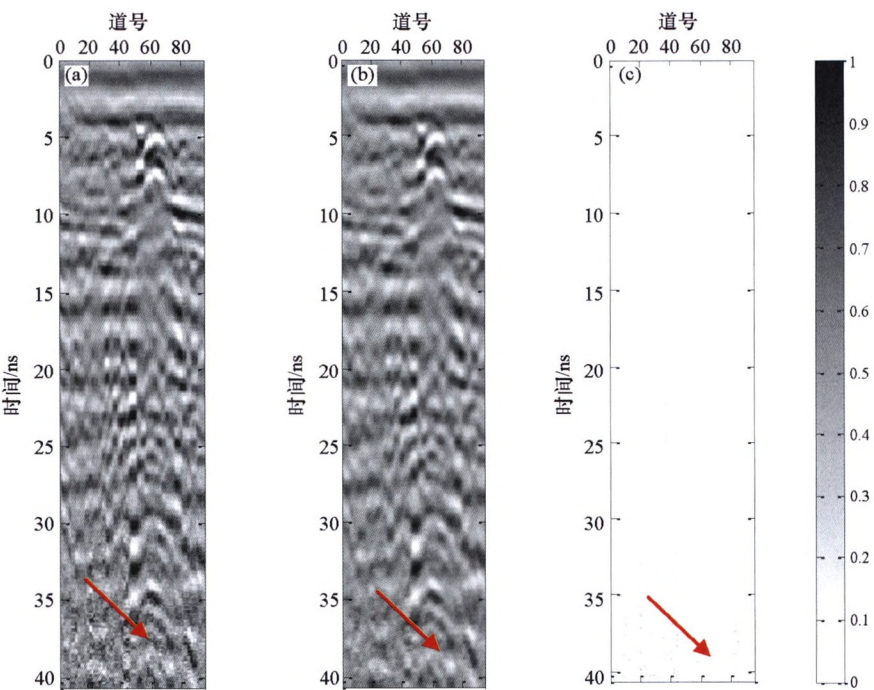
识别。双边滤波能有效改善一定信噪比的探地雷达记录图像的质量,去除噪声的效果明显。

3 实测记录滤波处理分析

为进一步研究双边滤波算法在实测探地雷达记录中的滤波效果,选取实测探地雷达记录进行双边滤波处理,结果见图 5、图 6。

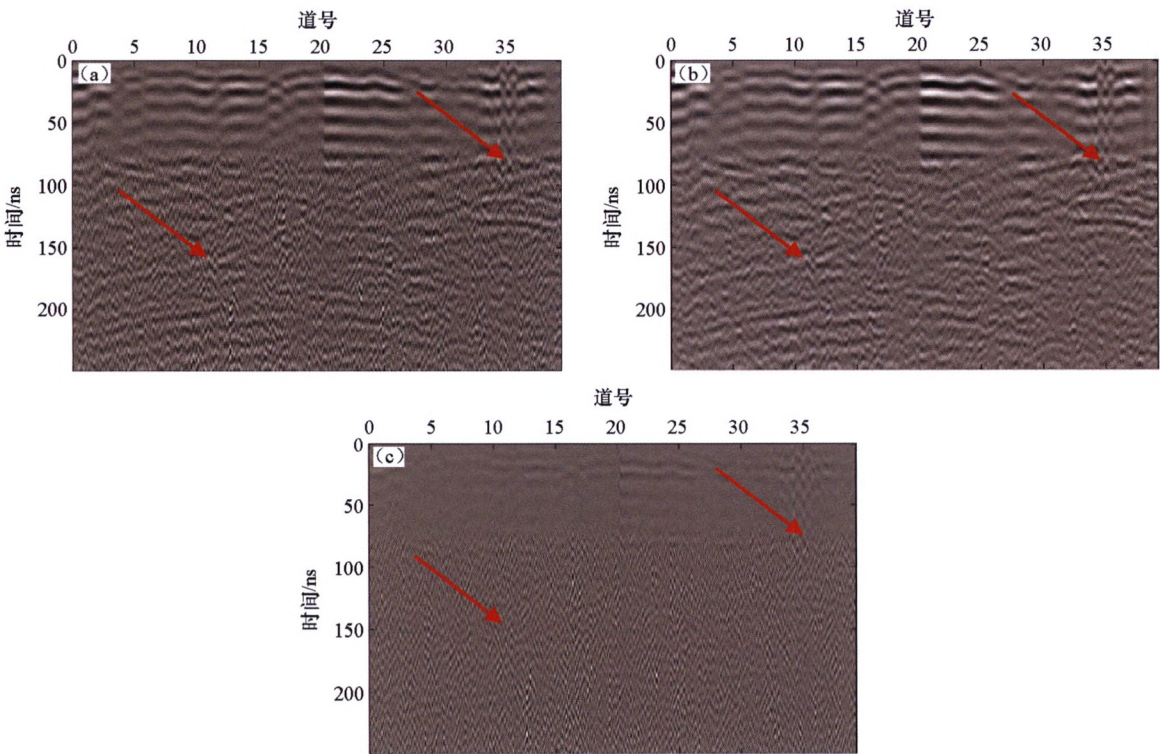
图 5a 为下部有直径 70 mmPVC 管的探地雷达实测记录,PVC 管埋深 280 mm,管中无任何填充物。可以看出:图像上部道号 60 左右,时间深度 5 ns 处有反射信息;其下部 28 ns 处有反射信息,判断应为 PVC 管,邻近 35 ns 范围处有明显的噪声,对管线反射信息识别造成了干扰。对其进行双边滤波后,从图 5b 可看到,上部反射轴变化较小,但反射轴变得平滑,较图 5a 清楚;在 30~40 ns 处的集中噪声基本去除,管道反射得以完全展示。从图 5c 的残差剖面也能明显看出图像下部去除了绝大多数噪声,滤波后图像质量提升。使用 MATLAB 程序计算其峰值,信噪比为 25.355 7,去噪效果较好。

图 6 选取的是合肥某地铁雷达实测记录,该记录显示为双层管道探地雷达实测剖面。图 6a 能看出时间 80 ns 处为其明显的界面分层处,其管道位置并不能明确分辨。经双边滤波后,图 6b 中的界面分界处显示更加明显。道号 35 处能看出有一个较大的管道反射轴。道号 10、时间 150 ns 处能明显识别出有管道反射,原始剖面由于噪声的存在,并不能看出有管道存在。图 6c 显示分界面以上小值被去除,



a—原始剖面;b—滤波后剖面;c—残差剖面
a—the original profile;b—the bilateral filtered profile;c—the residual profile

图 5 PVC 管实测探地雷达记录的双边滤波效果
Fig.5 Bilateral filtering effect of ground penetrating radar records measured by PVC tube



a—原始剖面;b—滤波后剖面;c—残差剖面
a—the original profile;b—the bilateral filtered profile;c—the residual profile

图 6 管道实测探地雷达记录的双边滤波效果
Fig.6 Bilateral filtering effect of pipeline ground penetrating radar record

分界面以下噪声基本去除。图像经双边滤波后图像分辨率提高,管道双曲线更易于识别,有益于确定地
面下方管道的位置,以及异常所在区域。经 matlab 程序计算其峰值信噪比为 26.103 4。

4 结论

对不同信噪比的探地雷达正演记录进行双边滤波处理并应用于实测探地雷达记录的去噪处理,取得如下认识:

1) 对管状模型正演记录进行双边滤波后,从滤波后剖面图可看出能去除高斯白噪声,深部较弱反射得到有效增强,雷达记录图像的峰值信噪比从 11.867 8 增大到 22.147 7。

2) 对实测记录进行双边滤波,其有效反射能较好的保持,噪声去除能力较强,其峰值信噪比最大可提升到 26.103 4。表明将双边滤波算法应用于探地雷达数据去噪处理,能改善图像的质量,提高有效回波的分辨能力。

参考文献 (References):

- [1] 曾昭发. 探地雷达方法原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
Zeng Z F. Principle and application of ground penetrating radar [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [2] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
Li D X. Method and application of ground penetrating radar [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [3] 黄真萍, 曹洁梅, 周成峰, 等. 探地雷达资料的高分辨去噪处理及应用[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2012, 40(4): 521 - 526.
Huang Z P, Cao J M, Zhou C F, et al. The high-resolution de-noise processing of processing-pretetrating radar data and its engineering application[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2012, 40(4): 521 - 526.
- [4] 张先武, 高云泽, 方广有. 带有低通滤波的广义 S 变换在探地雷达层位识别中的应用[J]. 地球物理学报, 2013, 56(1): 309 - 316.
Zhang X W, Gao Y Z, Fang G Y. Appliaction of generalized S transform with lowpass filtering to layer recognition of Ground Penetrating Radar[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(1): 309 - 316.
- [5] 杨秋芬. 基于维纳滤波的探地雷达信号提高分辨率研究[J]. 科技视界, 2013(27).
Yang Q F. Reaserch on improved resolution of ground penetratin rada signal on Wiener filter [J]. Science & Technology Vision, 2013 (27).
- [6] 黄敏, 朱德兵, 郭政学, 等. 连续小波变换在探地雷达信号分析中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2012, 34(5): 593 - 598.
Huang M, Zhu D B, Guo Z X, et, al. Application of continuous Wavelet transform in signal analysis of ground penetrating radar [J]. Computing Technologys for Geochemical Exploration, 2012, 34(5): 593 - 598.
- [7] 李春华, 胡本钧. 基于小波变换 mallat 算法的雷达回波去噪[J]. 机电一体化, 2010, 16(2): 51 - 53.
Li C H, Hu B D. Radar target signal denoising based on wavelet mallat algorithm[J]. Mechatronics, 2010, 16(2): 51 - 53.
- [8] 张梦殊, 那振宇, 梁道轩, 等. 一种联合小波阈值和维纳滤波的探地雷达信号去噪方法[J]. 移动通信, 2018, 42(7): 39 - 44.
Zhang M S, Na Z Y, Liang D X, et, al. A Joint wavelet threshold and wiener filtering de-noising method for ground penetrating radar signal [J]. Mobile Communications, 2018, 42(7): 39 - 44.
- [9] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images [C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision (ICCV98), IEEE Computer Society, 1998.
- [10] 王玉灵. 基于双边滤波的图像处理算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
Wang Y L. Study of algorithm in image processing based on the bilateral filter[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [11] 蒋辉. 双边滤波理论及其在遥感图像处理中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
Jiang H. Reaearch for bilateral filtering theory and its application in remote sensing image processing[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [12] Paris S, Kornprobst P, Tumblin J, et al. A gentle introduction to bilateral filtering and its applications [C]// ACM Siggraph 2008 Classes, ACM, 2008.
- [13] 方连超. 基于双边结构张量的三维图像纹理分析与应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
Fang L C. Analysis and application of 3D image texture based on bilateral structure tensor [D]. Changdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [14] 郑丽娟, 张杰, 郑丽萍. 基于体素的双边滤波快速实现[J]. 电视技术, 2018, 42(12): 11 - 17.
Zheng L J, Zhang J, Zheng L P. A fast implementation of bilateral filtering with voxel[J]. Television Technology, 2018, 42(12): 11 - 17.
- [15] 赵苓, 郭召阳, 任仲超. 基于改进双边滤波的气体泄漏检测[J]. 液压与气动, 2019, 43(3): 49 - 53.
Zhao L, Guo Z Y, Ren Z C. Air leak detection based on bilateral filter of infrared image[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019, 43(3): 49 - 53.
- [16] Weickert J. Coherence-enhancing diffusion filtering [J]. International Journal of Computer Vision, 1999, 31: 111 - 127.
- [17] 余胜威, 丁建明, 吴婷, 等. MATLAB 图像滤波去噪分析及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
Yu S W, Ding J M, Wu T, et al. MATLAB image filtering denoising discovery and application [M]. Beijing: Beihang University Press, 2015.
- [18] 王念旭, 杨亚东. DSP 基础与应用系统设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
Wang N X, Yang Y D. Basic and application system design of DSP [M]. Beijing: Beihang University Press, 2001.

The application of bilateral filtering to denoise processing of ground penetrating radar data

ZHANG Si-Wei, WU Rong-Xin, HAN Zi-Ao, WU Hai-Bo

(School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: During the acquisition of ground penetrating radar (GPR) data, noise would inevitably be mixed in by the influence of external factors, which seriously interferes with the identification and interpretation of effective echo. Therefore, the authors used the bilateral filtering algorithm to remove noise from ground penetrating radar data. By adding White Gaussian Noise to the forward record of ground penetrating radar to simulate the measured ground penetrating radar record, the synthetic record containing noise was filtered by bilateral filter. The results show that the bilateral filtering algorithm can remove most of the White Gaussian Noise, highlight the effective echo information and increase the peak signal-to-noise ratio (PSNR) from 15.845 1 to 22.147 7. Furthermore, the bilateral filter was used to filter the measured records. The filtered results show that the noise removal effect is better, which indicates that the bilateral filter could be effectively applied to the denoise of ground penetrating radar data.

Key words: bilateral filter; ground penetrating radar; Gaussian white noise; peak signal-to-noise ratio

(本文编辑:沈效群)