

# 一种基于图像增强的地下管线 GPR B-scan 预 处理方法

姓名：史政一

导师：黄弘 教授

院系：院系

2025 年 5 月 8 日

1 研究背景与意义

2 技术路线

3 研究方法

4 研究结果

5 结论

# 1 研究背景与意义

- 我国既有建筑总面积超过 730 亿  $m^2$ ，改造需求高达 500 多亿  $m^2$  (68%)；其中，建成年代早于 2000 年的建筑总面积达 350 亿平方米，老旧住区数量约 22 万个。**城市更新、老旧住区改造需求巨大。**
- 城市更新是国家战略。2024 年《政府工作报告》中部署：**稳步实施城市更新行动……加快完善地下管网。**
- 我国既有建筑和住区建造年代跨度大，建造体系变化多，导致：**管线种类多；管线埋设杂乱；埋设介质复杂。**

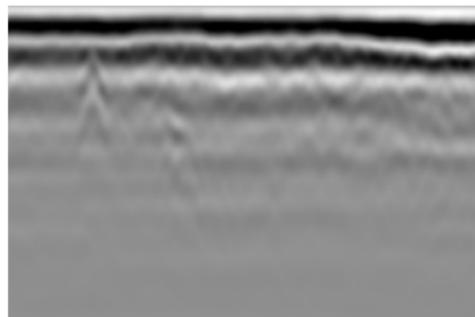


# 1 研究背景与意义

- 目前，为了探明管线位置需要破坏性施工，亟需**无损、快速、智能化定位技术**的引入。
- **探地雷达**（ground penetrating radar, GPR）是一种用来无损探查地下管线的仪器，在有人介入的情况下，在浅埋管线的探查作业中有较好的性能，在实际工程作业中应用较广。
- 然而，GPR 的高效率依赖于有经验的操作者的决策，现有的 B-scan 自动化信号处理方法在**管线尺寸小、埋设介质差**的作业条件下的性能有待提升。



典型的 GPR 仪器



一张由 GPR 信号形成的 B-scan

# 1 研究背景与意义

- 在操作时，GPR 设备在地面上沿直线（称为测线）移动，每隔一段距离或一段时间采样一次，每个采样是一个雷达波的时间响应信号，沿位移轴排列的这些信号就形成了 B-scan。(Peters, 1994)
- 当测线与地下管线的轴正交或接近正交时，地下管线在 B-scan 中呈现出明显的双曲线特征，这条双曲线  $H$  反映了管线的位置  $x_0$ 、埋深  $h$ 、外半径  $R$ ，以及介质的相对介电常数  $\epsilon_r$  (Shehab, 2005)

$$H(t, x) : \frac{(t + R/v)^2}{(t_0 + R/v)^2} - \frac{(x - x_0)^2}{v_0^2(t_0 + R/v)^2} = 1 \quad \begin{array}{ll} t_0 = h/v & \text{单程用时} \\ v = c/\sqrt{\epsilon_r} & \text{介质波速} \end{array}$$

- 然而，B-scan 总会有横向、黑白相间的地面反射条带，以及地面不平整、地下小物体、电磁干扰等形成的噪声。GPR B-scan 图像处理的目的是克服 B-scan 固有属性和种种噪声的干扰，把能反映地下管线特征的双曲线提取出来。
- 本研究的目的是设计一个算法流程，以提取出在小管径、差介质条件下所测得 B-scan 中的双曲线，帮助决策者在短时间内分析目标地域的浅层地下管线埋设情况。

# 1 研究背景与意义

---

- 本研究提出了一个**无监督、快速**的 GPR B-scan 预处理算法流程，可以将原始 B-scan 中的双曲线提取出来。
- 可以较好应对管线外径较小（外直径小于 20 cm）、介质条件较差（在新疆盐碱土中测得）的情形，即双曲线横向宽度窄、信号随深度衰减快、双曲线延伸距离短。
- 包括**地面反射条带消除算法**（ground reflectio removal algorithm, GRRR）、**基于数据作用力的增强算法**（data gravitational force enhancement, DGFE）和**以基于扩张的局部定阈和分割算法**（dilation-based local thresholding and segmentation, DLTS）为主要特点的全局-局部定阈方法。
- 对一张 GPR B-scan 的典型处理时间为 0.36 s，可以实现快速、准实时的处理，为决策者实地、快速做出决策奠定了基础。

1 研究背景与意义

2 技术路线

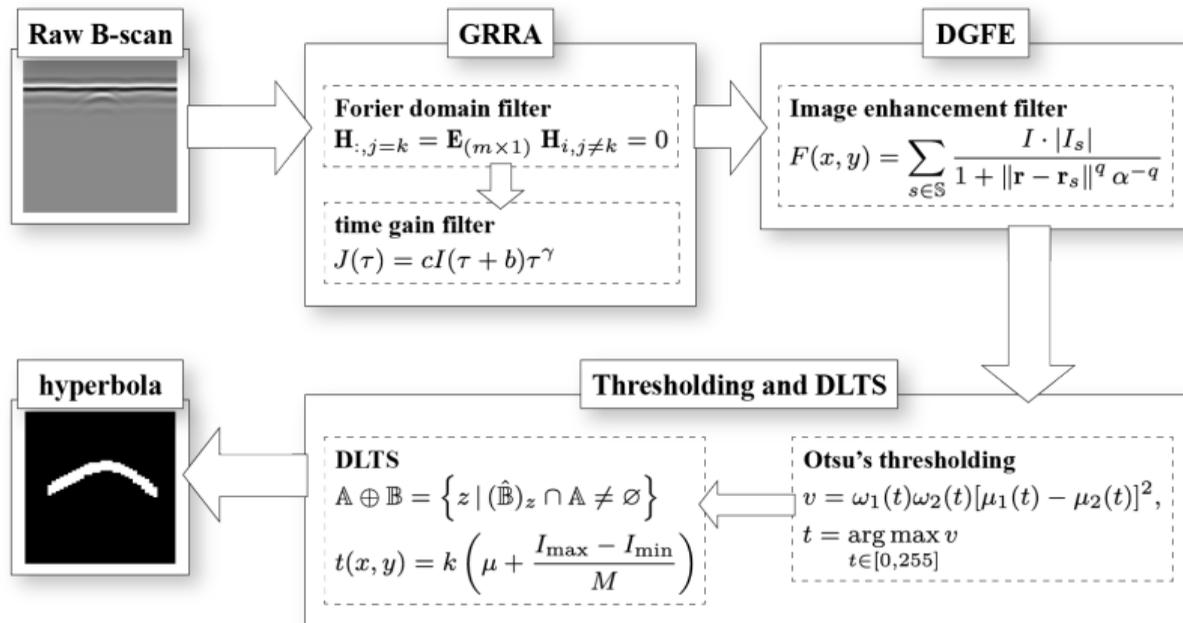
3 研究方法

4 研究结果

5 结论

## 2 技术路线

□ 本研究的技术路线如下。



# 1 研究背景与意义

## 2 技术路线

## 3 研究方法

3.1 地面反射条带消除算法 GRRR

3.2 基于数据作用力的增强算法 DGFE

3.3 基于 DLTS 的全局-局部定阈和分割

## 4 研究结果

## 5 结论

## 3.1 地面反射条带消除算法 GRRR

- 横向的地面反射条带在时间轴方向有很强的**周期特征**，所以考虑在 Fourier 频域中处理问题。
- 理想的横向条带的 2D-DFT (2D 离散 Fourier 变换) 为纵向、宽度为 1 的变幅值条带，而理想双曲线的 2D-CFT 为 (其中  $K_0$  为修正的第二类 Bessel 函数)

$$\hat{\mathcal{H}}(u, v) = 2K_0 \left[ 2\pi \sqrt{(bu)^2 + (av)^2} \right]$$

- 这个函数在 0 的邻域内大于 0，并迅速衰减到 0，故用一个中间列为 0，其余为 1 的频域滤波器  $\mathbf{H}$

$$\mathbf{H}_{:,j=k} = \mathbf{E}_{(m \times 1)} \quad \mathbf{H}_{i,j \neq k} = 0$$

$k$   $u = 0$  的列索引  
 $\mathbf{E}$  全 1 矩阵

- 再用一个幂增强空间滤波器，凸显深处信号 ( $I$ 、 $J$  分别为输入、输出图像)

$$J(\tau) = cI(\tau + b)\tau^\gamma \quad c = 1, \tau = 1.3$$

## 3.1 地面反射条带消除算法 GRRR

□ GRRR 的效果。可见大部分地面反射条带被消除，且深处信号增强，尤其是双曲线的信号。



原始 B-scan



应用 Fourier 频域滤波器后，大部分横向条带被消除



应用幂增强空间滤波器后，双曲线的信号相对于较浅的地面反射条带和背景都有增强

## 3.2 基于数据作用力的增强算法 DGFE

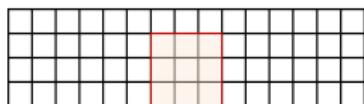
- 一般来说，应该对 GRRR 输出的图像进行定阈，但是，如果直接进行全局定阈，不能克服以下问题：（1）尚残存一些地面反射条带，它们的强度大于双曲线上较弱部分（如尾部）的强度；（2）双曲线一级多次波的头部强度大于双曲线尾部的强度。
- 这些问题会影响无监督算法中阈值的确定过程，也会使得在阈值确定后一些干扰信息被保留。
- 提出了一个基于数据场的图像增强算法 DGFE（data-gravitational field enhancement），以大大增强双曲线的相对强度，削弱残留的地面反射条纹和双曲线多次波的相对强度。定义数据场

$$F(x, y) = \sum_{s \in S} \frac{l \cdot |l_s|}{1 + \|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s\|^q \alpha_{-q}}$$

$S$  窗内像素的集合

$l$  灰度

$\mathbf{r}$  位矢



一个  $3 \times 3$  的窗



DGFE 处理后的 B-scan，可见双曲线部分与背景的区别度更明显了

### 3.3 基于 DLTS 的全局-局部定阈和分割

- 全局定阈的计算量小，但很难抓取双曲线的尾部；局部定阈可以区分双曲线的尾部和背景，但计算量大。所以，提出一个局部-全局定阈相结合定阈和分割方法，DLTS 是其核心。
- 全局定阈使用 Otsu 方法，它可以很好地去掉双曲线外的干扰，但几乎总是舍弃一些包含有用信息的部分，如双曲线的尾部。

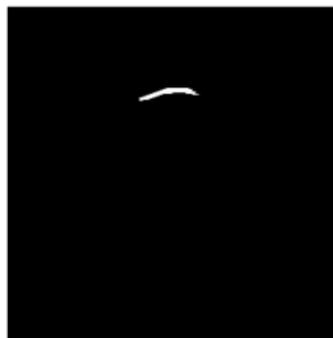
$$v = \omega_1(T)\omega_2(T) [\mu_1(T) - \mu_2(T)]^2$$

$$T = \operatorname{argmax}_{T \in [0, 255]} v$$

$$\omega_1(T) = \sum_{i=0}^{T-1} p(i) \quad \omega_2(T) = \sum_{i=T}^{255} p(i)$$

$$\mu_1(T) = \frac{\sum_{i=0}^{T-1} ip(i)}{\omega_1(T)} \quad \mu_2(T) = \frac{\sum_{i=T}^{255} ip(i)}{\omega_2(T)}$$

$\mu$  每类的均值  
 $\omega$  每类的概率和  
 $T$  全局阈值



全局定阈的结果，可见虽然干扰均被舍弃，但双曲线有一部分缺失了

### 3.3 基于 DLTS 的全局-局部定阈和分割

- 全局定阈后的双曲线不完整，为了补全它，并在消耗的计算资源上做妥协（不致过多），提出了基于形态学中膨胀运算的局部定阈和分割算法 DLTS。
- 用形状  $\mathbb{B}$  去膨胀形状  $\mathbb{A}$  就是在前者的基础上，把后者的边缘“生长”出一部分

$$\mathbb{A} \oplus \mathbb{B} = \{z \mid (\hat{\mathbb{B}})_z \cap \mathbb{A} \neq \emptyset\}$$

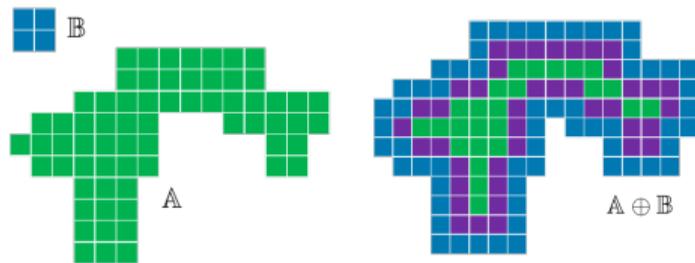
$z$      $\mathbb{B}$  的位置  
 $\hat{\phantom{x}}$     反转运算

- 局部定阈的阈值包含窗内灰度的均值和最大值

$$t(x, y) = k \left( \mu + \frac{I_{\max} - I_{\min}}{M} \right)$$

$\mu$     窗内像素的均值  
 $M$     窗内像素的最大值

- 通过调整窗的大小和控制常数  $k$  的值，可以根据输出图像的效果进行参数敏感性分析。



想象将蓝色沿着绿色的边缘移动，每个位置不重合的部分（蓝色）就是膨胀运算“生长”出来的部分。

### 3.3 基于 DLTS 的全局-局部定阈和分割

1. 令  $\mathbb{H}$  为定阈后双曲线中所有像素的集合,  $\mathbb{E}$  为一个  $3 \times 3$  的形状。  $\mathbb{N}$  表示所有应忽略的像素集合, 它标记了应被跳过的图形边缘。
2. 令  $\mathbb{H}$  的边缘为  $\mathbb{L}$ , 并更新  $\mathbb{L} = \mathbb{L} - \mathbb{N}$ . 令  $\alpha = 0$  为标记变量。 设  $\mathbb{H}$  内最右、最下的像素为  $h_0$ ,  $\mathbb{E}$  中央的像素为  $e_0$ , 之后将  $h_0$  与  $e_0$  重合。 定义一个动态更新的变量  $z$  为  $\mathbb{E}$  的中央像素在当前所处的位置。 令  $z_0 = z$ , 并初始化  $z' = (-1, -1)$ 。
3. 若  $z_0 \in \mathbb{N}$ , 跳到步骤 6。
4. **扩张:** 令  $\mathbb{D} = (\mathbb{E})_z - (\mathbb{E})_{z'} - \mathbb{H}$ 。
5. **局部定阈:** 对每个  $\mathbb{D}$  中的像素应用局部定阈。 每当像素  $p \in \mathbb{D}$  被定阈法保留, 更新  $\mathbb{H} = \mathbb{H} \cup \{p\}$  并置  $\alpha = 1$ ; 否则, 更新  $\mathbb{N} = \mathbb{N} \cup \{z\}$ 。
6. 设置  $z' = z$ , 然后将  $\mathbb{E}$  的中央像素沿  $\mathbb{L}$  按逆时针方向移动至下一个最近的相邻的未访问过的像素。 回到步骤 3, 直到  $z = z_0$ 。
7. 若  $\alpha = 1$  回到步骤 2, 否则, DLTS 结束,  $\mathbb{H}$  为最终分割得到的双曲线。

## 1 研究背景与意义

## 2 技术路线

## 3 研究方法

## 4 研究结果

4.1 应用在不同 B-scan 的结果

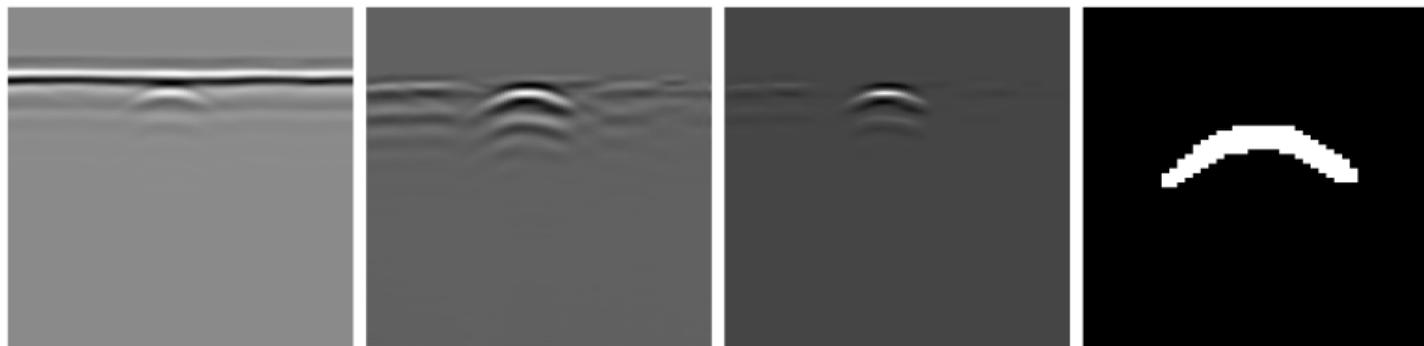
4.2 与其他算法的比较

4.3 DLTS 的参数分析

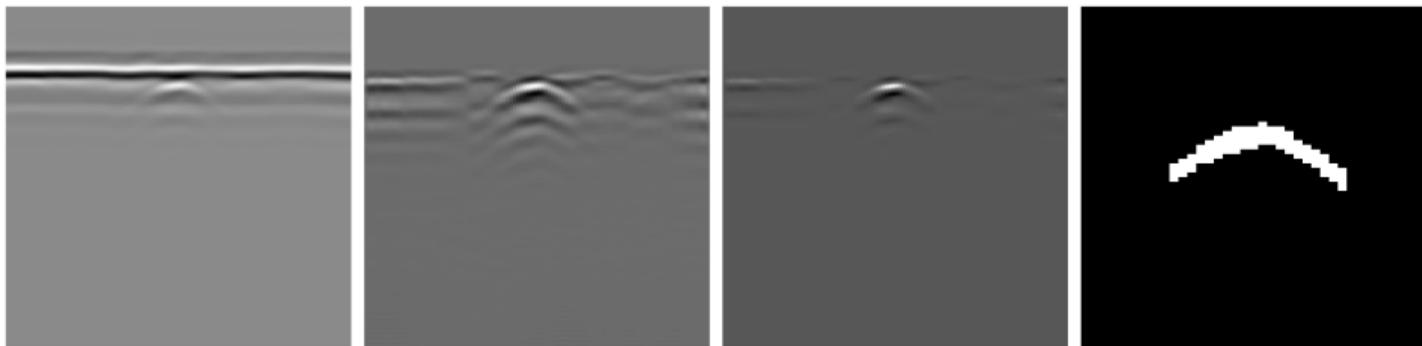
## 5 结论

## 4.1 应用在不同 B-scan 的结果

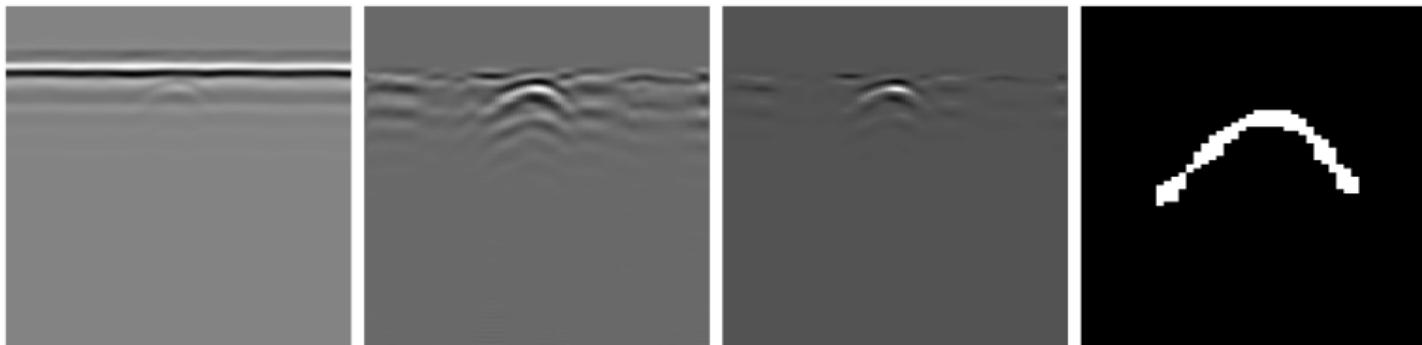
- 所用数据集为使用 GPR 设备在实地测量的 B-scan。实验用管线的外直径分别为 10 cm、15 cm 和 20 cm，埋深为 10 cm。
- 处理后的图像表明，该算法可以较好地目标双曲线从原始 B-scan 中分割出来。



DLTS 的窗大小为 5、 $k = 0.5$  时，算法应用在埋设于 10 cm 深处的外直径为 15 cm 的铸铁管线的 B-scan 的结果



DLTS 的窗大小为 5、 $k = 0.5$  时，算法应用在埋设于 10 cm 深处的外直径为 20 cm 的铸铁管线的 B-scan 的结果



DLTS 的窗大小为 5、 $k = 0.5$  时，算法应用在埋设于 10 cm 深处的外直径为 10 cm 的铸铁管线的 B-scan 的结果

## 4.1 应用在不同 B-scan 的结果

- 对 80 张不同的 B-scan 应用提出的算法，算法执行时长典型值为 **0.36 s**，可以实现接近实时的快速处理。所使用的 CPU 为 Intel® Core™ i7-10700。

---

均值 (s)	最大值 (s)	最小值 (s)	中位 (s)	标准偏差 (ms)
0.362	0.388	0.354	0.360	64.1

---

- 对提取出的双曲线应用最小二乘拟合，以**验证形状的准确性**，按下式

$$\tau = -\frac{2R}{v} + a\sqrt{1 + \frac{(x - x_0)^2}{b^2}}$$

其中， $a = \tau_0 + 2R/v$ ， $b = v\tau_0/2 + R$ ， $v = 2b/a$ 。

## 4.1 应用在不同 B-scan 的结果

- 拟合表明，分割出的双曲线所反演出的管线属性与真实值相比有 5.9% ~ 14.8% 不等的均值误差，验证了算法的有效性。

该算法在实验获取的 B-scan 上以  $k = 0.7$ 、窗大小 5 的验证结果；表中， $R$  为半径， $h$  为埋深， $\bar{\cdot}$  代表均值，est 代表估计值，error 代表误差

$R$	$\bar{R}_{\text{est}}$	$\overline{\text{error}}_R$	$h$	$\bar{h}_{\text{est}}$	$\overline{\text{error}}_h$
10	9.20	8.0%	10	10.62	6.2%
7.5	6.94	7.5%	10	10.59	5.9%
5	4.26	14.8%	10	10.98	9.8%

## 4.2 与其他算法的比较

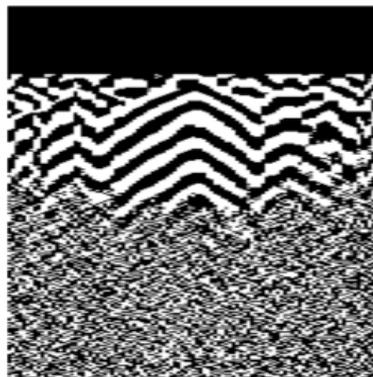
- 在具有双曲线横向宽度窄、信号随深度衰减快、双曲线延伸距离短特点的实验获得的 B-scan 上应用若干其他研究提出的自适应定阈法，适用性不足，体现了本研究提出的方法的适应性。



最小熵交叉法 (Li et al., 1997)



三角法 (Zack et al., 1977)



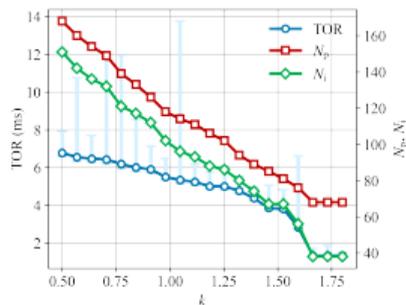
垂直梯度法 (Zhou et al., 2018)



多阈值 Otsu 法 (Kapur et al., 1985)

## 4.3 DLTS 的参数分析

- DLTS 的控制参数  $k$  对算法性能略有影响。 $k$  越大，双曲线的像素数越少，DLTS 的迭代次数越少，算法执行时间越短；即  $k$  越大，计算量越小，但面临双曲线“缩小”的风险。



算法的性能随  $k$  的变化；TOR、 $N_p$  和  $N_i$  分别指运行时间、双曲线像素数和迭代次数



窗大小为 5,  $k = 0.5$



窗大小为 5,  $k = 0.6$



窗大小为 5,  $k = 0.7$

## 4.3 DLTS 的参数分析

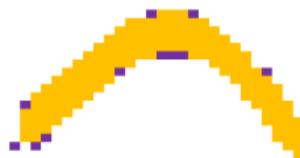
- 窗大小对算法的性能几乎没有影响，只要它限制在一定的范围内。
- 下图为双曲线的形状与窗大小之间的关系，可见双曲线之间仅有数个像素点的差异（紫色为相差的像素点），故认为窗大小在 3 ~ 9 的范围内都是比较合适的。



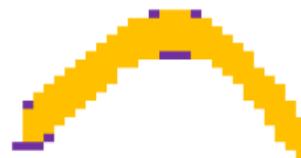
窗大小为 3,  $k = 0.5$



窗大小为 5,  $k = 0.5$



窗大小为 7,  $k = 0.5$



窗大小为 9,  $k = 0.5$

1 研究背景与意义

2 技术路线

3 研究方法

4 研究结果

5 结论

## 5 结论

---

- 本研究提出了一个**无监督、实时**的 GPR B-scan 预处理算法流程，可以将原始的 B-scan 信号中的双曲线提取出来。该流程主要包括用于地面反射条带消除的 GRRR、用于图像增强的 DGFE 和用于局部定阈的 DLTS 3 种核心算法。
- 在通过**实地实验**获取的 GPR B-scan 数据集中进行了验证，该算法提取出的双曲线在拟合后与实验设计值间的误差均值不超过 15%，在大部分情况下不超过 8%，证明了该算法的有效性。
- 在相同的数据集中，将该算法与其他若干常用或前沿算法进行比较，发现在数据集中双曲线具有**双曲线横向宽度窄、信号随深度衰减快、双曲线延伸距离短**等可能对自动化算法造成负面影响特征的情况下，该算法表现出了较好的适应性。

## 6 参考文献

---

- Abramowitz, M., & Stegun, I. A. (1964). *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables*. U.S. Government Printing Office.
- Bao, Q., Li, Q., & Chen, W. (2014). GPR data noise attenuation on the curvelet transform. *Applied Geophysics*, 11(3), 301–310.
- Besaw, L. E., & Stimac, P. J. (2015). Deep convolutional neural networks for classifying GPR B-Scans [Baltimore, MD, USA, 2015, 945413]. In S. Bishop & J. Isaacs (Eds.), *Detection and sensing of mines, explosive objects, and obscured targets xx* (Vol. 9454).
- Cai, Z. (2004). Ringing artefact reduction using adaptive averaging filtering [Reading, UK]. *IEEE International Symposium on Consumer Electronics, 2004*, 156–159.
- Cheng, W., Chen, Y., & Xu, G. (2020). Optimizing sensor placement and quantity for pipe burst detection in a water distribution network [04020088]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(11).
- Dai, Q., Li, Y., Jiang, T., & Sun, Q. (2022). A new B-Scan interpretation model in complex environments. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71.
- Daniels, D. J. (2004). *Ground penetrating radar* (2nd). Institution of Engineering; Technology (IET).
- Dikmen, M. (2022). Investigating transfer learning performances of deep learning models for classification of GPR B-Scan images. *Traitement du Signal*, 39(5), 1761–1766.
- Dou, Q., Wei, L., Magee, D. R., & Cohn, A. G. (2017). Real-time hyperbola recognition and fitting in GPR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(1), 51–62.
- Frigui, H., Fadeev, A., Karem, A., & Gader, P. (2009). Adaptive edge histogram descriptor for landmine detection using GPR [Orlando, FL, USA, 730321]. *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 7303.
- Gan, L., Zhou, L., & Liu, S. (2014). A de-noising method for GPR signal based on EEMD. *Applied Mechanics and Materials*, 687-691, 3909–3913.

## 6 参考文献

---

- Ge, L., Zhang, C., Tian, G., Xiao, X., Ahmed, J., Wei, G., Hu, Z., Xiang, J., & Robinson, M. (2021). Current trends and perspectives of detection and location for buried non-metallic pipelines [97]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 34(1).
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing* (4th). Pearson.
- Hasan, M. K., Majumder, M. M. R., Sarker, O., & Matin, A. (2018). Local contrast based thresholding for document binarization [Dhaka, Bangladesh]. *2018 4TH International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT)*, 204–209.
- He, Y., Yang, W., Luo, J., Li, X., Wang, H., & Li, J. (2023). Ground penetrating radar underground target detection based on GPR-YOLOv5. *2023 International Conference on Image Processing, Computer Vision and Machine Learning (ICICML)*, 621–624.
- Kapur, J. N., Sahoo, P. K., & Wong, A. K. C. (1985). A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 29(3), 273–285.
- Karle, N., Boldt, M., Thiele, A., & Thoennessen, U. (2022). 3D mapping of buried pipes in multi-channel GPR data [Nice, France, 2022]. *XXIV ISPRS Congress Congress “Imaging Today, Foreseeing Tomorrow” , Commission I*, 43-B1, 85–91.
- Kilic, G. (2017). Applications of ground-penetrating radar (gpr) to detect hidden beam positions. *JOURNAL OF TESTING AND EVALUATION*, 45(3), 911–921.
- Lei, W., Hou, F., Xi, J., Tan, Q., Xu, M., Jiang, X., Liu, G., & Gu, Q. (2019). Automatic hyperbola detection and fitting in GPR B-scan image [102839]. *Automation in Construction*, 106.
- Li, D. (2004). Artificial intelligence with uncertainty [Wuhan, China]. *The 4th International Conference on Computer and Information Technology*.
- Li, X., & Liu, Z. (1997). Entropy-based image thresholding and weighting gray-level uncertainty. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 5(1), 83–93.
- Ma, J., Tang, Z., Lv, F., Yang, C., Liu, W., Zheng, Y., & Zheng, Y. (2021). High-sensitivity ultrasonic guided wave monitoring of pipe defects using adaptive principal component analysis [6640]. *Sensors*, 21(19).

## 6 参考文献

---

- Miao, S., Liu, X., Li, H., & Wang, X. (2019). Data interpretation method of coal-rock interface detection based on ground penetrating radar. *Industry and Mine Automation*, 45, 35–39.
- Oskooi, B., Julayusefi, M., & Goudarzi, A. (2015). GPR noise reduction based on wavelet thresholdings. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(5), 2937–2951.
- Ostoori, R., Goudarzi, A., & Oskooi, B. (2018). GPR random noise reduction using BPD and EMD. *Journal of Geophysics and Engineering*, 15(2), 347–353.
- Otsu, N. (1979). Threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 9(1), 62–66.
- Ozkaya, U., Ozturk, S., Melgani, F., & Seyfi, L. (2021). Residual CNN plus Bi-LSTM model to analyze GPR B scan images [103525]. *Automation in Construction*, 123.
- Pande-Chhetri, R., & Abd-Elrahman, A. (2011). De-stripping hyperspectral imagery using wavelet transform and adaptive frequency domain filtering. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(5), 620–636.
- Peters, L., Daniels, J., & Young, J. (1994). Ground-penetrating radar as a subsurface environmental sensing tool. *Proceedings of the IEEE*, 82(12), 1802–1822.
- Sharma, P., Kumar, B., & Singh, D. (2018). Development of adaptive threshold and data smoothening algorithm for GPR imaging. *Defence Science Journal*, 68(3), 316–325.
- Shihab, S., & Al-Nuaimy, W. (2005). Radius estimation for cylindrical objects detected by ground penetrating radar. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 6(1), 151–166.
- Suzuki, S., & Abe, K. (1985). Topological structural-analysis of digitized binary images by border following. *Computer Vision Graphics and Image Processing*, 30(1), 32–46.
- Tassiopoulou, S., & Koukiou, G. (2024). Fusing ground-penetrating radar images for improving image characteristics fidelity. *Applied Sciences*, 14(15).

## 6 参考文献

---

- Wang, B., Sun, B., Wang, J., Greenbaum, J., Guo, J., Lindzey, L., Cui, X., Young, D. A., Blankenship, D. D., & Siegert, M. J. (2020). Removal of 'strip noise' in radio-echo sounding data using combined wavelet and 2-D DFT filtering. *Annals of Glaciology*, 61(81), 124–134.
- Wang, B., Li, K., Wu, S., & Chen, P. (2024). GPR B-Scan image augmentation via GAN with multiscale discrimination strategy [5101510]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62.
- Wu, T., & Qin, K. (2012). Data field-based transition region extraction and thresholding. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(2), 131–139.
- Yu, Y., Guan, Y., Xong, H., & Yan, J. (2009). A fast abnormal target detection method for shallow ground penetrating radar. *Chinese Journal of Electron Devices*, 32, 677–681.
- Zack, G. W., Rogers, W. E., & Latt, S. A. (1977). Automatic measurement of sister chromatid exchange frequency. *Journal of Histochemistry & Cytochemistry*, 25(7), 741–753.
- Zhang, L., Tang, J., Li, Y., Liu, Z., Chen, W., & Li, G. (2022). GPR denoising via shearlet transformation and a data-driven tight frame. *Near Surface Geophysics*, 20(4), 398–418.
- Zhou, X., Chen, H., & Li, J. (2018). An automatic GPR B-Scan image interpreting model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(6), 3398–3412.

谢谢

期待您的提问和指点