

探地雷达数据处理方法综述

杨莎莎, 刘聪*, 李刚, 李瑜

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2022年12月29日; 录用日期: 2023年1月19日; 发布日期: 2023年1月31日

摘要

探地雷达探测技术(GPR)作为一类无损的检测工具, 目前已应用在建筑工程、地质、考古等领域。探地雷达的发展是一个值得高度关注的问题。本文介绍了探地雷达的基本原理, 常规数据处理技术的发展现状及其优缺点。着重分析了数据处理中的问题, 并指出GPR未来的发展方向应偏向于机器深度学习、人工智能化。

关键词

探地雷达, 降噪, 空洞探测, 人工智能

Review of Data Processing Methods for Ground Penetrating Radar

Shasha Yang, Cong Liu*, Gang Li, Yu Li

College of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Dec. 29th, 2022; accepted: Jan. 19th, 2023; published: Jan. 31st, 2023

Abstract

Ground penetrating radar (GPR), as a nondestructive detection tool, has been applied in architectural engineering, geology, archaeology and other fields. The development of ground penetrating radar (GPR) is of great concern. This paper introduces the basic principle of ground penetrating radar, the development status of conventional data processing technology and its advantages and disadvantages. This paper emphatically analyzes the problems in data processing, and points out that the future development direction of GPR should be biased towards machine deep learning and artificial intelligence.

*通讯作者。

Keywords

Ground Penetrating Radar, Noise Reduction, Cavity Detection, Artificial Intelligence

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着中国经济社会的高速发展,截至2020年五月,中国公路的总里程已达到了519.81万公里[1]。越来越多公路基础设施的建设,同时伴随着前期投入使用的基础设施的老化,需要考虑的是前期基础设施的损坏[2]。道路病害目前已成为当前道路基础设施的通病[3],中国公路建设正向着“由建转养”的模式中过渡。存在于道路基层中的地基空洞,塌陷,倾移,通常不能被人们轻易察觉,因此通常情况下不能得到及时的处理[4],直至发生安全事故,这将严重危害人们的人身安全,同时也影响着社会的安定发展。

探地雷达(Ground Penetrating Rada)探测技术,主要是根据电磁波在不同介质中的介电特性(介电常数、电导率、磁导率)的不同以及电磁波在不同介质中产生不同反射的原理[5],见图1。接收天线收集反射波的物理特征如波长,波形,振幅等,以图像的方式直观表现出地下结构特征。当地下出现空洞时介电常数会出现明显差异,所以探地雷达能够高效探测出地下病害[6]。

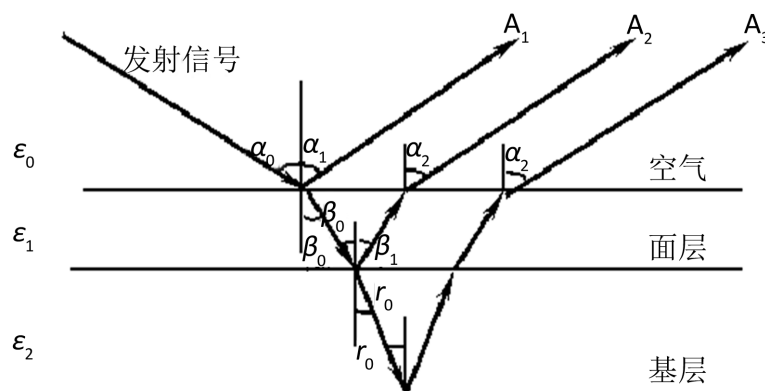


Figure 1. Schematic diagram of electromagnetic reflection

图1. 电磁波反射示意图

早在上个世纪六十年代国外对探地雷达的研究就开始了,开始探索电磁波在探测埋藏目标中的应用。1962年Moynic提出CMP叠加概念[7]。随着电磁波技术的成熟和其他雷达系统的逐步完善。1971年Claerbout提出有限差分法解波动方程[8];1978年Schneider与Kirchhoff提出积分公式,Stolt提出F-K偏移[9],Gazdag提出相移法原型;1983年Mcmechan提出的逆时偏移方法;1984年Gazdag提出相移内插法[10]等基本形成了完整的探地雷达和信号处理系统,见表1。当然,相关领域的很多算法和具体应用还不成熟,而1985年国内才引进SIR系列GPR对探地雷达的研究才刚开始[11],比国外的研究落后了七八十年。在国内开展探地雷达基础研究的同时,国外在相关的信号处理和成像算法方面也做了大量的工作。就目前而言,国内外的主要研究方向是:细化理论,解决某一领域某一算法的问题,对提出的算法

进行工程可实现性和环境适应性的优化改进，结合近年来流行的深度学习等技术，尝试用其他方法突破探地雷达数据处理的难题。

Table 1. Development status at home and abroad
表 1. 国内外发展现状

年代	进展
1904	
1910	
1926	经典偏移成像
1929	
1960	Moynic 提出了 CMP 叠加的概念
1962	Cherbout 有限差分法解波动方程
1971	Schneider 与 Kirchloff 积分公式 Stolt 提出 F-K 偏移
1978	Gazdag 提出相移法原型 Mcmechan 提出的逆时偏移方法
1983	Gazdag 提出相移内插法
1984	Tarantola 提出时域全波形反演 Dines、Lytk 层析成像 Fisher 提出逆时偏移应用到探地雷达
1992	Pratt 提出频域全波形反演 Cordua 蒙特卡洛策略反演
2012	Feng 等全极化探地雷达偏移成像
2015	雷林林等全波形反演逆时偏移成像
2017	Liu T 提出三维频域全波形反演
2018	刘钰波阻抗反演方法
2022	赵勇基于 CNN 的探地雷达自动识别

探地雷达数据的处理可谓是承前启后的一个关键步骤，电磁波在地下的传播是一个很复杂的过程，探地雷达的杂波是除开探测目标反射的回波信息以外的任何回波信息。在同一时窗里，接收天线接收既有目标的回波信号，又接收包含探地雷达的杂波信号。除此之外，电线，手机信号，电台天线等这些环境中的电磁干扰也无法避免[12]。这些干扰因素统称为噪声，最终会对雷达图像解释产生很大影响，这样的结果也是失真的。探地雷达数据处理的目的是排除有效回波信号以外的其他任何回波信号，尽量提高图像剖面上显示反射波的分辨率，进而得出反射波的各种有用的参数(电磁波速度、振幅和波形等)来帮助图像解释[13]。由于电磁波与地震波理论的相似性，以及它们采集数据的方式的类同，目前地质雷达数据处理方法主要是根据地震数据处理方法而改进。但由于雷达波和地震波存在着动力学差异如强衰减性，所以单一地移植、借鉴地震资料处理技术是不够的。McCann [14]得出高电磁波在地层中的穿透能力比地震波浅得多，同时电磁波在有含水率的地层中比干地层中衰减更快，这与地震波相反。所以不能一味地迁移地震数据处理方法到探地雷达数据处理中。

常规的数据处理包括时域和频域的高低通滤波、带通滤波、偏移归位、反褶积、图像增强等。本文主要阐述探地雷达工作原理，数据处理，根据探地雷达在工程上的研究现状简评探地雷达未来发展趋势和方向。

2. 探地雷达数据处理

2.1. 数据编辑

在数据采集完成后,原始数据中通常包含有效数据,错误数据和多余数据等情况,数据编辑就是针对这类问题,对原始信号数据进行修正,整合。在数据编辑处理后,通常需要进行零点校正,确定地面反射位置,以及对连续数据进行水平距离归一化处理等[15]。

目前三维探地雷达相对于二维探地雷达其数据量是更大的,同时探地雷达的选择不同,其数据的干扰因素,分析难度也是各有差别。但无论如何,数据编辑都是最基本的步骤,对于以后数据的常规处理,结果的显示和解释有着直接的关系。未来三维探地雷达采集数据信息量趋于更大,人工进行数据编辑以及常规的机器学习无法满足大数据处理需求,人工智能是必然的趋势。

2.2. 增益

由于电磁波能量在传播过程中逐渐衰减,在探测到达一定深度时,反射的电磁波很弱,造成接收到的深、浅部电磁波信号强度差别非常大,给显示、分析、解释带来一定困难。信号增益对电磁波在球面扩散和吸收衰减作用下造成的电磁波能量信息衰减给予一定程度的补偿。通常增益控制方法根据增益函数的不同可分为指数增益,分段线性增益,包络增益等[16]。指数增益控制是根据电磁波衰减规律设计的指数函数控制增益,但通常地下介质构造复杂,实际中难以预测电磁波衰减规律,设计出的增益函数并不具有真实性,该方法不适合实际应用。分段线性函数是根据回波能量强弱情况生成相应分段增益函数,具有一定的增益针对性。虽然其效果相对于指数增益更好,但并未达到最好的效果,其增益效果对所有波信号进行无差别放大,也就增大了分辨难度,同时分段方法不够精准或是分段数量不够细致时,其结果也是不准确的[17]。包络增益是通过对采集的每个数据进行希尔伯特变换取包络后进行包络叠加。归一化后,取倒数作为增益的增益曲线。包络增益具有针对性,对有效波和杂波区别增益,对每个数据都进行了处理,也克服了增益函数分段细致的问题[18],常规增益与包络增益对比,见图2。未来探地雷达需要处理的数据量更大,采用包络增益的方法也会趋于人工智能化。

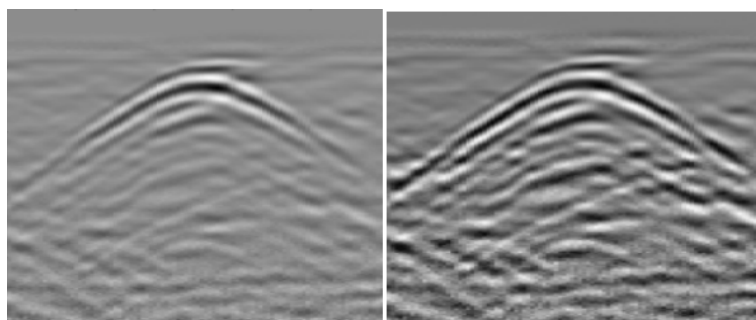


Figure 2. Comparison of conventional gain (left) versus envelope gain (right)

图2. 常规增益(左)与包络增益(右)对比图

2.3. 滤波处理

滤波处理是数据处理的关键。由于原始数据中包含大量的信息同时也夹杂着杂波信息,增益后的电磁波中,有用信息和杂波信息同时放大,所以应根据工程需要结合一种或多种合理滤波处理,突显出有效信息。滤波处理可从时域和频域两个不同角度进行[19]。通常有用信号处于低频和少量高频,无用信号通常是高频。利用这一原理传统的一维滤波比如带通、高通、低通滤波以及(F-K)滤波等,对每一道波都

取设定频率范围,直接去除其他频率波段[20]。虽然去除了大量与有效频带明显差异的杂波但少量有用信号波也全部去除,对于频带内信号混叠的杂波没有并未去处。

随着复信号处理技术的快速发展,经验模态分解(EMD)等方法也发挥着巨大作用。它是非线性、非平稳信号时频分析的一种有效方法。它具有自适应的特点,即可以根据信号的不同特性自动调整基的形状,从而避免了大多数时频分析技术基一旦选定就不能改变的缺点,在信号分析中具有很大的灵活性。虽然EMD方法不断改进,但仍然存在一些问题,如噪声干扰导致的模态混叠和对经验的依赖[21]。基于奇异谱分析(Singular Spectrum Analysis, SSA)技术已应用于信号去噪。由于它独立于信号模型,不受噪声频谱分布的影响,可以达到自适应去噪的效果[22]。但是降噪的过程涉及到一些主观因素。当原始信号中含有高斯噪声时,通过人为设置阈值,可以提取原始信号轨迹矩阵的较大奇异值集形成信号子空间,较小奇异值集形成噪声子空间,从而实现信噪分离[23]。但是,当原始信号中含有少量大噪声时,也会使这种方法的分析失效,特别是在复杂的背景噪声环境下。随后具有多种分辨率特征,阈值类信号数据的降噪方法层出不穷,如小波变换法,小波阈值变换法,曲波变换法等[24]。虽然对高频段处理表现出良好降噪效果,但其低频处效果不佳,小波基的灵活性也让降噪效果处于不确定性,阈值算法本身存在缺陷,其结果可靠性不高[25]。在复杂的噪声背景环境中,信号往往同时包含高斯噪声和脉冲噪声。小波阈值去噪只对高斯噪声有效,对脉冲干扰无能为力[26]。随着深度学习的快速发展,训练小波系数特征以及阈值函数特征对图像进行处理许是新的发展方向,并结合其他滤波处理方式共同进行,以获得更好的信号去噪效果。

2.4. 偏移归位

偏移技术通过将探地雷达记录中的每一个反射点移动到其原来的空间位置来改善雷达图像的失真,从而获得一种能够反映地下介质真实形态的成像方法[27]。目前,探地雷达偏移处理方法主要有两种。一种是基于射线理论的衍射偏移算法,这是一种将目标的反射波自动返回到其实际空间位置的近似方法,不能准确描述电磁波的反射规律,偏移结果不可靠。另一种是基于波动方程的波偏移算法,这种算法是基于波动方程的传播规律来反向扩展探地雷达电磁波场,实现偏移成像[28]。如今用于探地雷达数据偏移和归位的方法主要是根据地震勘探中的反射波处理技术和方法。常用的方法有F-K偏移、克希霍夫积分和有限差分偏移等[29],其对比见表2。

有限差分偏移,虽然实际工程中偏移噪声小,效果明显,但由于延拓步长和网格划分不精确,偏移效果并不理想。如果减少延拓步长或提高网格生成精度,可以提高偏移效果,但会增加计算量[30]。另外,由于反射界面倾角的限制,当倾角较大时,反射波容易被频散现象扭曲,因此偏移成像效果较差。

克希霍夫偏移原理上适合任意倾角的反射界面,但偏移参数无法精确,处理横向速度变化的精度不高。在偏移处理过程中,对网格划分要求不高,偏移归位效果好。但偏移结果中的偏移噪声较大,是由高频干扰引起的,会严重影响后续的偏移数据处理[31]。F-K偏移同样也是基于波动方程理论,将雷达数据用傅里叶变换到频率-波数域处理,结果精度高,噪声小且效率高被广泛应用在工程领域中。

Table 2. Comparison of the principle and performance of the offset algorithm

表 2. 偏移算法原理与性能对比

偏移算法	实现原理	性能评价
有限差分偏移	基于波动方程理论,直接离散波动方程,对色散方程作近似处理。	算法精度、计算时间与差分网格步长有关,能够处理介质横向和纵向的变化,但是受界面倾斜角的限制,最大约为 30° 。
克希霍夫积分偏移	根据波动方程理论,根据克希霍夫积分公式,取合适的闭合曲面之内作积分求和。	算法精度较高,计算时间较长,处理介质横向上的变化时有一定的误差,噪声干扰严重。
F-K 偏移	基于波动方程理论,利用傅立叶变换将雷达数据变换到频率-波数域进行处理。	算法精度高,计算速度快,效率高,噪声小,仿真及工程应用广泛。

2.5. 图像分析

近年来,机器学习算法不断涌现,在探地雷达图像的解译分析方面取得了一些研究成果。如何高效、自动地获取探地雷达 B-Scan 图像的形状特征成为首要问题[32]。许多学者提出了不同的机器学习算法,并在探地雷达图像解译方面取得了许多成果。但是机器学习算法太多了,比如分类、回归、聚类、图像识别等。很难找到最合适的算法[33]。随着机器学习特别是深度学习人工智能的不断发展,模式识别的性能得到了显著提高。而且随着数据量的不断增加,相比机器算法,优势更加明显。

3. 总结与展望

本文通过对探地雷达系统的工作原理和数据处理进行了分析。阐述了目前常用的数据处理方法,每一种数据处理的方法原理是不同的,其作用是不可替代的,要达到理想的降噪效果绝不是一种方法可以解决的,应在数据处理,以及图像分析上根据实测地况采用多种降噪方法共同调节,才能取得更佳信噪比。GPR 数据处理和图像分析未来的发展方向都应偏向于人工智能化,机器深度学习。在精度与速度上都实现了更显著地提高,并深入到了工程领域的方方面面。该领域的迅速开发可以提升中国在高技术工程领域的影响力。人们须对这一领域积极探索,在未来不久实现这一技术。

基金项目

西安市科技局高校院所科技人员服务企业项目(22GXFW0148);陕西省教育厅 2022 年度一般专项科研计划项目(22JK0597)。

参考文献

- [1] 2020 年我国交通运输行业发展统计公报发布[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(6): 963.
- [2] 张家明. 城市道路塌陷事故应急救援探讨[J]. 中国应急救援, 2020(3): 43-46.
- [3] 李强. 实施常规化地下空洞探测, 预防城市道路塌陷事故[J]. 测绘通报, 2013(s2): 97-100, 103.
- [4] 司友强, 吕润华, 李梦茹. 道路空洞无损探测技术发展研究[J]. 公路, 2020, 65(2): 29-32.
- [5] 刘澜波, 钱毅毅. 探地雷达: 浅表地球物理科学技术中的重要工具[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2606-2617.
- [6] 张杨. 探地雷达在深圳市道路坍塌防治中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021. <https://doi.org/10.27493/d.cnki.gzdzy.2021.001277>
- [7] 刘国华, 李庆春, 周学明. 增强地震数据质量的非 CMP 叠加技术[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(4): 1372-1377.
- [8] 李广场. 有限差分法探地雷达波动方程偏移[D]: [硕士学位论文]. 深圳: 河海大学, 2004.
- [9] 张东良. 均匀介质中的 F-K 反偏移: 实现算法与应用[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [10] Claudio Bagaimi, Enrico Pieroni, 牛燕. 三维相移内插偏移(PSPI)的数据平行实现[C]//南京石油物探研究所. 美国勘探地球物理学家学会第 65 届年会论文集: 1995 年卷. 北京: 石油工业出版社, 1995: 62-66.
- [11] 余松盛. 探地雷达方法对近地表 LNAPL 污染物的探测研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [12] 李曼如. 基于探地雷达和深度学习的道路地下病害智能检测研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- [13] 崔国龙, 余显祥, 魏文强, 熊奎, 孔昱凯, 孔令讲. 认知智能雷达抗干扰技术综述与展望[J]. 雷达学报, 2022, 11(6): 974-1002.
- [14] McCann, D.M., Jackson, P.D. and Fenning, P.J. (1988) Comparison of the Seismic and Ground Probing Radar Methods in Geological Surveying. *IEE Proceedings F (Communications, Radar and Signal Processing)*, **135**, 380-391. <https://doi.org/10.1049/ip-f-1.1988.0045>
- [15] 曹震峰, 杨世福, 宋世荣, 周剑. 探地雷达数据处理方法及其应用[J]. 地质与勘探, 1996(1): 34-42.
- [16] 黄肇刚. 地下管线渗漏的探地雷达信号分析和定位方法研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2022.
- [17] 索明康. 探地雷达信号处理及反演方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

- <https://doi.org/10.27061/d.cnki.ghgdu.2021.001271>
- [18] 姜建禹. 阵列式探地雷达信息采集及增益控制技术的研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019. <https://doi.org/10.27061/d.cnki.ghgdu.2019.000918>
- [19] 田元荣, 王俊迪, 吴笑天. 转发式干扰条件下 LFM 雷达的检测概率估计[J/OL]. 系统工程与电子技术: 1-11. <https://kns-cnki-net.webvpn.xnai.edu.cn/kcms/detail/11.2422.TN.20221022.1817.002.html>, 2022-12-07.
- [20] Gressman, A. and Morlet, J. (1984) Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, **15**, 723-736. <https://doi.org/10.1137/0515056>
- [21] Masarik, M.P., Burns, J., Thelen, B.T., Kelly, J. and Havens, T.C. (2015) GPR Anomaly Detection with Robust Principal Component Analysis. In: *Proceedings of SPIE 9454, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XX*, Vol. 9454, International Society for Optics and Photonics, Bellingham. <https://doi.org/10.1117/12.2176571>
- [22] 夏赛强, 张朝伟, 蔡万勇, 杨军. 一种多维多域的微动信号降噪方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(8): 802-808.
- [23] 姜化冰. 探地雷达地下空洞目标探测研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [24] 张斯薇. 基于小波变换的探地雷达数据去噪方法研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2022. <https://doi.org/10.26918/d.cnki.ghngc.2022.000290>
- [25] 杨廷怡. 探地雷达信号处理的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [26] 石志远, 徐卫明, 周波, 孟浩. 基于经验模态分解和小波阈值的自适应降噪方法[J]. 海洋测绘, 2021, 41(6): 54-57+72.
- [27] 张虎. 探地雷达数值模拟与成像方法研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2013.
- [28] 丁超, 张伟, 杨辉. 基于波动方程差分法和 Kirchhoff 积分的被动源弹性波逆时成像对比研究[J]. 物探化探计算技术, 2020, 42(4): 429-441.
- [29] 万星. 探地雷达正演和偏移算法研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- [30] 杨俊, 李静和, 孟淑君, 廖小倩, 李文杰. 小波与曲波变换探地雷达数据去噪对比分析[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(5): 2097-2105.
- [31] 杨俊. 小波与曲波组合域探地雷达数据去噪[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2020. <https://doi.org/10.27050/d.cnki.gglgc.2020.000317>
- [32] 侯斐斐, 施荣华, 雷文太, 董健, 许孟迪, 席景春. 面向探地雷达 B-scan 图像的目标检测算法综述[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(1): 191-200.
- [33] 应厚泽. 基于机器学习的 SAR 图像分类与识别研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2016.