

探地雷达铁路轨枕干扰特性分析

杨 林

(成都理工大学 地球物理学院, 成都 610059)

摘要: 由于铁路路基病害对铁路运输安全影响较大,探地雷达可以对路基进行高效和连续成像,因此它被广泛应用于铁路路基无损检测。在应用探地雷达对铁路路基病害进行检测时,轨枕干扰会影响路基病害的识别和定位,因此需要研究合适的处理方法对轨枕干扰进行有效地抑制。笔者分析了轨枕干扰的时域、频域、空域、时频域、空频域以及统计相关性的特性,发现了轨枕干扰在时域、频域、空域、时频域、空频域都有不同程度的重叠现象,并且从统计相关性上来看,整体较高。此外,探地雷达铁路轨枕干扰特性还为选择轨枕干扰抑制方法提供了依据。

关键词: 探地雷达;路基病害;轨枕干扰特性分析

中图分类号: U213.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.04.10

0 引言

铁路运输具有运输能力大、速度快、距离长、成本低、安全程度高等优点,是我国主要交通运输方式之一。由于我国的地质条件复杂,铁路沿线工程地质条件差别大,再加之早期修建铁路时施工工艺和路基标准较低,从而导致许多运营线路出现不同程度的路基病害。及时发现铁路路基病害并进行维护是铁路安全运营的保证。传统路基病害检测方法有挖探法、瑞利面波法、高密度电阻率法等,这些方法的共同特点是效率低、成本高,其中挖探法还会损坏线路。与常规的地下检测方法相比,探地雷达具有检测速度快、检测过程连续、分辨率高、操作灵活等优点,目前已经被广泛地应用于铁路路基病害检测中^[1]。在基于探地雷达的铁路路基病害检测中,由于铁路路基检测工作环境特殊,钢轨、钢筋混凝土轨枕等铁路设施产生的强反射湮没了路基介质的反射信号,导致无法对病害异常进行有效地识别^[2]。

目前针对轨枕干扰的处理方法包括时窗叠加压

制^[3]、多分辨率图像分析^[4]、预测反褶积滤波^[5]、Radon变换法^[6]、时频分析法^[7]、逻辑尺法^[8]、时空过滤波法^[2]、经验模态分解法^[9]等,这些方法分别从时间域、时频域和变换域等不同角度分析雷达信号,在一定程度上压制了轨枕干扰。

笔者通过对铁路雷达探测模拟信号进行深入分析,可以发现有效信号和轨枕干扰在时间域、空间域、频率域、变换域等方面都存在重叠现象,因此仅仅采用单一方法很难有效压制轨枕干扰。

1 轨枕干扰数值模拟

钢轨强干扰反射在雷达剖面上时频特征固定,采用行间去均值法、F-K滤波、小波变换等已经可以得到有效地压制,因此在设计模型时可以不考虑钢轨部件,即笔者所设计的铁路模型为无钢轨铁路路基病害仿真模型,如图1所示。

在图1中,数值模型长度为20 m,自上而下介质分布为空气层厚0.4 m,相对介电常数 $\epsilon=1$,电导率 $\sigma=0$ S/m)、道砟层(厚0.4 m,相对介电常数 $\epsilon=5$,电导率 $\sigma=0.0005$ S/m)、基床层(厚2 m,相对介电常

数 $\epsilon=11$, 电导率 $\sigma=0.005 \text{ S/m}$) 共三层介质。拟模型中共设有 22 根混凝土轨枕, 规格大小为 $0.22 \text{ m} \times 0.16 \text{ m}$, 轨枕之间的间距为 0.56 m , 并均匀分布在道床表层。模型中共设置了两个病害, 其中一个病害为不规则的翻浆冒泥, 用 A 表示, 位于横向坐标 $3 \text{ m} \sim 8 \text{ m}$ 和垂向坐标 $0.5 \text{ m} \sim 1.5 \text{ m}$; 另一个病害为矩形空洞, 用 B 表示, 位于横向坐标 17 m 和垂向坐标 0.7 m 处, 即位于基床的空洞病害。数值模拟软件采用探地雷达电磁波散射仿真软件 gprMax。该软件采用时域有限差分方法 (FDTD) 和完全匹配层边界吸收条件, 能够模拟频散介质^[10]。本次数值模拟的激励信号源为雷克子波, 雷达天线位于道床表面上方 0.4 m 处且天线中心频率为 400 MHz , 并从左至右依次完成扫描探测。所设计模型的电性参数如表 1 所示。

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameters

编号	名称	相对介电常数/ ϵ	电导率/(S/m)
1	空气	1	0
2	道床	5	0.0005
3	轨枕	6.5	0.01
4	基床	11	0.005
5	翻墙冒泥(A)	15	0.01
6	空洞(B)	2	0.00001

为了弄清轨枕干扰的影响, 分别去除图 1 中的病害和轨枕得到铁路层状结构正演模拟图 2; 去除图 1 中的轨枕得到铁路层状结构和轨枕的正演模拟图 3; 去除图 1 中的轨枕得到不包含轨枕的铁路层状结构加病害的正演模拟图 4; 图 5 为图 1 的路基病害模型的正演模拟图像。

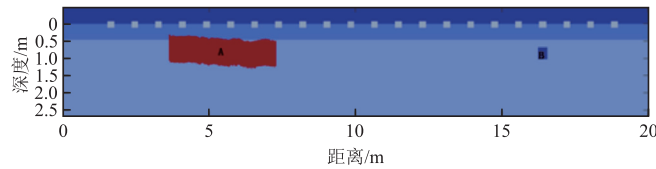


图 1 包含轨枕和路基病害的数值模型

Fig. 1 Numerical model including sleeper and embankment diseases

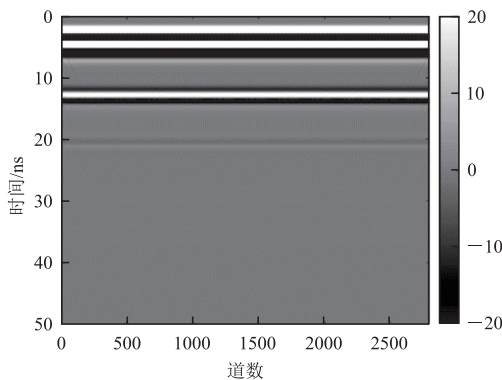


图 2 铁路层状模拟

Fig. 2 Railway layered simulation

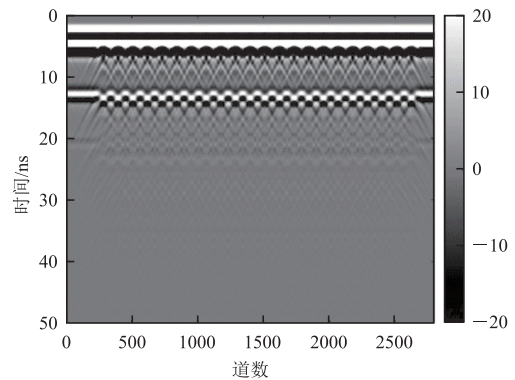


图 3 铁路轨枕模拟

Fig. 3 Railway sleeper simulation

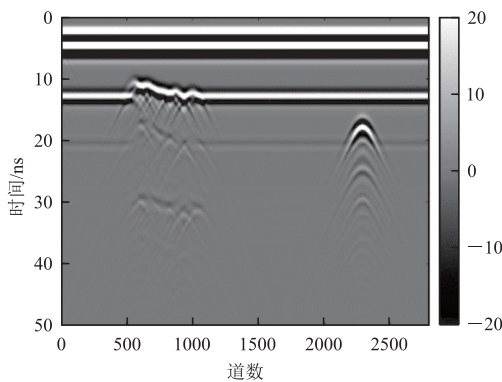


图 4 铁路无轨枕病害模拟

Fig. 4 Simulation of railway sleeperless diseases

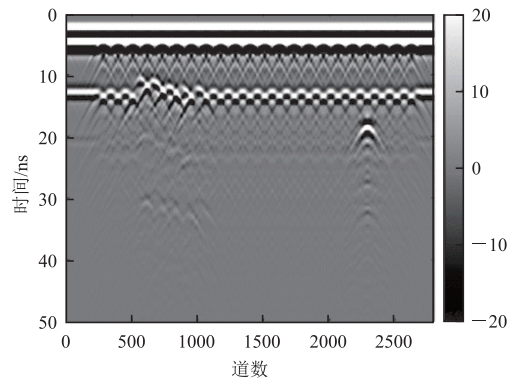


图 5 铁路轨枕和病害模拟

Fig. 5 Railway sleeper and disease simulation

由图 4、图 5 可以发现,轨枕的多次反射和绕射干扰导致病害不易识别,位置和大小也难以分辨。

只包含病害和轨枕干扰的 B-scan 图 9。图 10 和图 11 分别是图 8 和图 9 的第 750 道的时域波形图。

2 轨枕干扰特性分析

2.1 时域分析

时域信号是信号最直接的表现形式,它反映了信号的幅值随时间的变化。探地雷达发射的电磁波向下传播,当介质发生变化时会产生反射,在时域波形上会出现反射波。探地雷达回波数据是离散的时间序列,常用的时域分析方法包括波形观察和时域参数计算。为了研究轨枕干扰在时域波形上对路基病害的影响。分别取图 4 和图 5 中位于路基病害处的第 750 道 A-scan 数据进行研究。

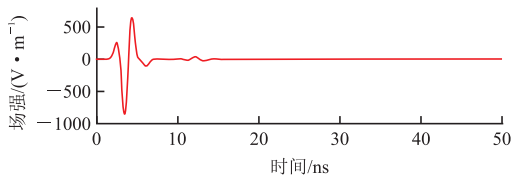


图 6 铁路无轨枕病害模拟第 750 道 A-scan
Fig. 6 The 750th A-scan of railway sleeperless disease simulation

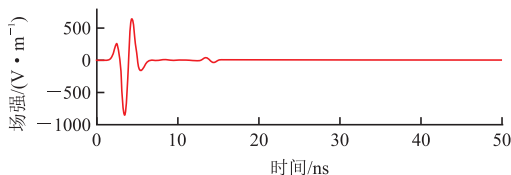


图 7 铁路轨枕和病害模拟第 750 道 A-scan
Fig. 7 The 750th A-scan of railway sleepers and disease simulation

对比图 6 和图 7 可以看出在 5 ns 左右信号的幅值最强,且包含轨枕干扰的波形幅值在 5 ns 处略大于不包含轨枕干扰的波形幅值,显示在其仿真雷达剖面图 4 和图 5 中为白色条带,这种能量很强、幅值很大的波为直达波,它会将浅层目标的反射信号覆盖掉,在处理雷达数据时,通常会首先将直达波切除。在 13 ns 左右波形出现了第二次较大的起伏,这是道床与基床分层界面的界面反射波,在无轨枕干扰时也呈现为一条白色条带。由于直达波能量太强,而由轨枕引起的干扰通常能量较低,从整体上来看,两条时域波形相差并不大。为了屏蔽掉直达波的影响,将图 4 和图 5 的 B-scan 数据减掉干净铁路的层状背景,可以得到只包含病害的 B-scan 图 8 和

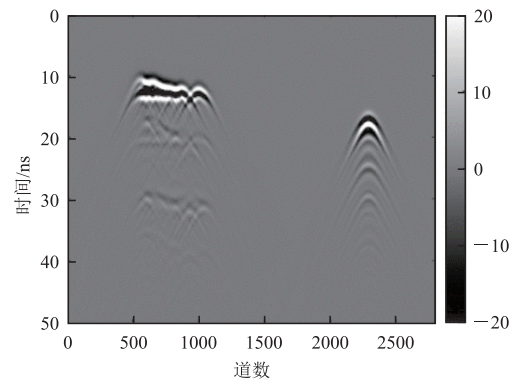


图 8 包含病害 B-scan 图像
Fig. 8 Contains disease B-scan images

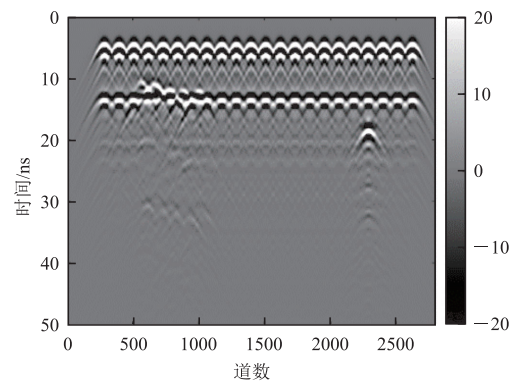


图 9 包含病害和轨枕干扰 B-scan 图像
Fig. 9 Contains B-scan images of disease and sleeper disturbances

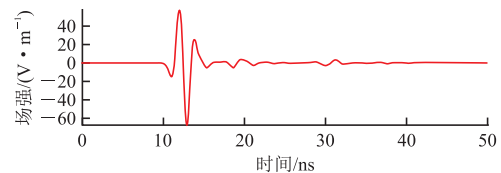


图 10 铁路无轨枕病害模拟第 1 500 道 A-scan
Fig. 10 The 1 500th A-scan of railway sleeperless disease simulation

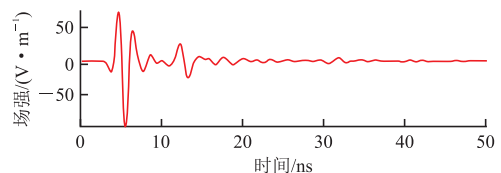


图 11 铁路轨枕和病害模拟第 1 500 道 A-scan
Fig. 11 The 1 500th A-scan of railway sleeper and disease simulation

可以看出在 21 ns 左右波形出现了一次小的起伏,这是包含路基分层界面和翻浆冒泥病害的信号

一次反射波,在轨枕干扰的影响下,本来较为平稳的波形却变得波浪起伏,已无法在雷达仿真剖面图上进行分辨。13 ns 左右出现的分层界面反射波在轨枕干扰的影响下幅值有所降低,病害的有效信号也被干扰,对比图 4 和图 5,轨枕干扰对翻浆冒泥病害的形状、位置、大小都有影响,不如无轨枕干扰剖面清晰。

对时域信号进行统计计算可以从数值上更加直观地分析轨枕干扰的影响,常用的时域指标及其计算公式如表 2 所示。

表 2 常用时域指标及其计算公式

Tab. 2 Commonly used time domain indicators and their calculation formulas

指标	计算公式
均值	$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$
均方根	$X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$
标准差	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$
最大值	$X_{\text{max}} = \max x_i$
最小值	$X_{\text{min}} = \min x_i$
方差	$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$

分别对图 8 和图 9 的第 750 道 A-scan 数据进行计算,得到表 3。

表 3 信号指标计算结果

Tab. 3 Signal indicator calculation results

指标	图 8 中第 750 道 A-scan	图 9 中第 750 道 A-scan
均值	1.4105×10^{-4}	1.4013×10^{-4}
均方根	9.362 6	13.310 4
标准差	9.364 2	13.312 6
最大值	58.000 2	73.806 2
最小值	-67.352 8	-97.194 5
方差	87.687 5	177.224 5

信号的均值代表信号在一段时间内的平均振幅,由表 3 可以看出含轨枕干扰信号和无轨枕干扰信号两者之间的均值接近;信号的均方根表示信号在一段时间内的平均能量大小,可以看出在 50 ns 范围内,含轨枕干扰信号的平均能量更大;信号的标准差是信号波动程度的另一种常用度量方式。标准差的值越大,信号数据点与信号的均值差距也越大,信号的波动性也越大。标准差的值越小,信号数据点与信号的均值差距也越小,信号的波动性也越小。标准差可以用来描述数据的分布情况和波动性。由表 3 可以看出含轨枕干扰信号的标准差明显大于不

含轨枕干扰信号的标准差,证明含轨枕干扰信号的波动性更强;信号的最大值和最小值可以用来评估信号的峰值和波动范围,含轨枕干扰信号的最大值更大,最小值更小,说明含轨枕干扰信号的峰值更高,信号波动更加剧烈;信号的方差是用来描述信号数据分布离散程度的指标,方差衡量的是信号数据点与其均值之间的差距。方差越大,表示信号数据点与均值之间的差距越大,数据分布越分散。含轨枕干扰信号的方差是不含轨枕干扰信号的两倍多,说明含轨枕干扰信号的数据更加分散。

综上所述,对探地雷达时域波形分析表明,轨枕干扰会湮没掉一部分来自路基介质和路基病害的有效信号,造成路基病害不易识别和路基分层界面不清晰。

2.2 频域分析

信号的时域分析只是从振幅随时间变化的角度来分析信号,通过傅里叶变换,可以实现信号从时间域到频率域的转换,转换后形成的频谱描述了雷达信号各个频率与幅值大小对应的关系^[11]。分别对图 4 和图 5 中位于路基病害处的第 750 道 A-scan 数据做离散傅里叶变换,得到对应的频谱图 12 和图 13。

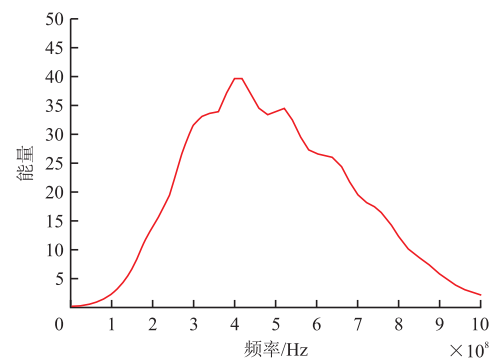


图 12 铁路无轨枕病害频谱图

Fig. 12 Spectrum diagram of railway sleeperless disease

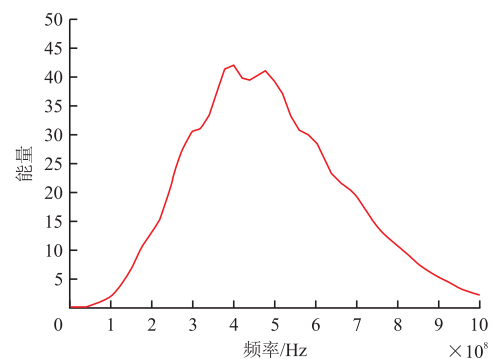


图 13 铁路轨枕和病害频谱图

Fig. 13 Spectrum diagram of railway sleepers and diseases

对比两幅频谱图,频率分布范围基本一致,能量都主要集中在 400 MHz 左右,但是相同频率下,含轨枕干扰的频率段具有更高的能量。在 300 MHz~600 MHz 的频谱曲线差异较大,说明在中心频率为 400 MHz 的天线下,轨枕干扰在这个频率段对信号的干扰严重,而在实际工程应用中,有效信号通常集中在中心频率的 0.5 倍~1.5 倍,也就是集中在 200 MHz~600 MHz,如果仅仅是通过带通滤波是无法对轨枕干扰进行有效抑制。

综上所述,在频率域轨枕干扰对有效信号的有效频段干扰严重,常常混叠在一起,严重影响了有效信号的识别。

2.3 空域分析

B-scan 是 GPR 最常用的扫描方法,它得到的是 GPR 地下二维场景的扫描切片,将信号幅值的转换为对应的图像像素大小可以将 B-scan 数据转换为 GPR 图像,转换为图像之后,便具有了空间特征。

在实测雷达剖面 and 仿真模拟雷达剖面上,轨枕干扰在时间和空间上的分布规律难以用精确的数学模型来表达,从图 3 上来看,轨枕干扰在同一时间节点的不同扫描道上面呈现有规律分布特征,分别取图 3 在 10 ns 和 20 ns 处的横向扫描道数据进行观察,如图 14 和 15 所示。

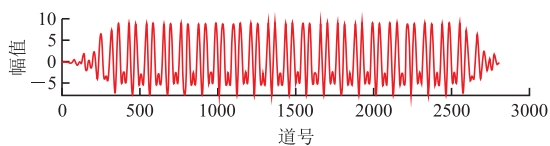


图 14 10 ns 处横向扫描道数据
Fig. 14 Transverse scan data at 10 ns

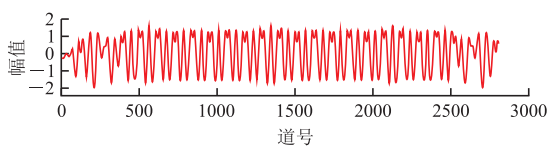


图 15 20 ns 处横向扫描道数据
Fig. 15 Transverse scan data at 20 ns

从同一时间的横向扫描道数据可以看出,轨枕干扰在空间分布上具有一定的周期性,这可能与轨枕均匀排列在道床上有关。利用轨枕干扰响应的时空周期性分布特点,朱德兵等^[2]提出了一种时空过滤筛算法用来压制轨枕干扰,即将重采样后的多道记录按一倍或多倍于枕间周期进行平移叠加再平均,形成携带轨枕干扰信号的时空过滤筛,再用原始数据减去过滤筛就可以得到抑制轨枕干扰后的雷达

剖面,但这通常也会使 GPR 图像的分辨率降低。

针对轨枕干扰响应的时空周期性分布特点,采用滤波、信号分解等信号处理技术对由每个扫描道在同一时间得到的采样点组成的一维信号进行处理,可以抑制部分轨枕干扰。

2.4 空频域分析

二维 B-scan 数据包含二维空间信息,即深度时间信息和水平距离信息。对探地雷达二维回波信号进行处理,能获得更多的信息。对探地雷达二维信号做二维傅里叶变换,可以将时间域变换到频率域,空间域变换到波数域及频率波数域。下面就从二维角度对 GPR 的二维 B-scan 数据进行分析。

假设接收到的 GPR 二维回波信号为 $s(x, t)$, 对其进行二维傅里叶变换可得^[12-13]

$$S(f, k) = \iint s(x, t) e^{-j2\pi(ft+kx)} dx dt \quad (1)$$

式中 x 为采样点在探地雷达扫描时的不同空间位置, t 为采样点对应的纵向采样时间。经过上式变换后,接收信号由时间-空间域变换到频率-波数域。在频率波数域进行各种分析和处理之后,应该用二维傅里叶反变换可以得到处理后的回波信号:

$$S(x, t) = \iint s(f, k) e^{j2\pi(ft+kx)} df dk \quad (2)$$

分别对图 2 铁路层状的 B-scan 数据、图 3 铁路和轨枕的 B-scan 数据、图 4 铁路和病害的 B-scan 数据、图 5 铁路和病害和轨枕的 B-scan 数据进行二维傅里叶变换得到图 16、图 17、图 18、图 19。

通过对比图 16、图 17、图 18 和图 19 可知,不含轨枕干扰的频率波数域主要包含一个主瓣,且能量大部分集中在 200 MHz~600 MHz。包含轨枕干扰的频率波数域图像除主瓣外出现了副瓣,且能量微弱,如果能证明主瓣里面不含轨枕干扰影响,则可以通过频率波数域滤波将轨枕干扰能量所占的波数

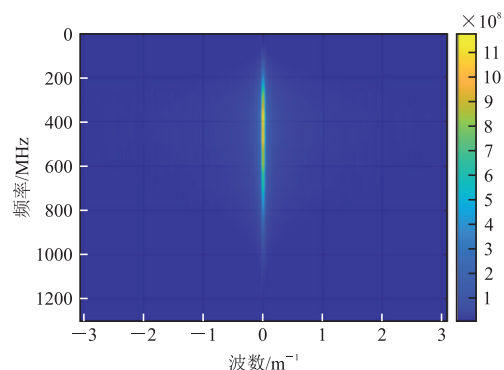


图 16 铁路层状结构的频率波数域
Fig. 16 Frequency wavenumber domain of railway layered structure

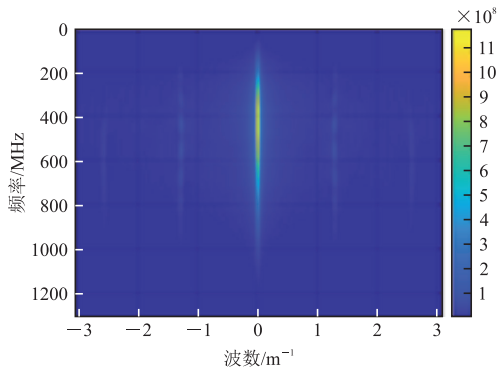


图 17 铁路轨枕的频率波数域

Fig. 17 Frequency wavenumber domain of railway sleepers

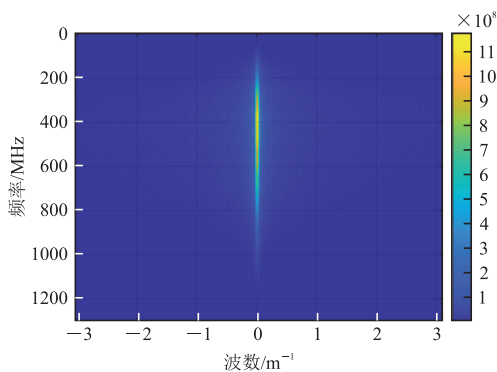


图 18 铁路病害的频率波数域

Fig. 18 Frequency wavenumber domain of railway diseases

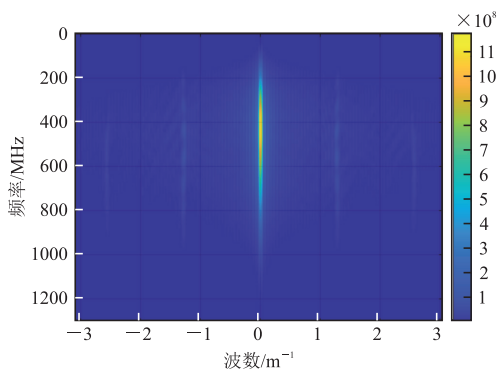


图 19 铁路轨枕和病害的频率波数域

Fig. 19 Frequency wavenumber domain of railway sleepers and diseases

范围滤除,保留目标回波的波数范围。那么,轨枕干扰能量就会被滤除,再通过二维傅里叶逆变换,就可以得到去除轨枕干扰后的 B-scan 图像。

为了证明轨枕干扰在频率波数域中的分布范围,首先要明确轨枕干扰在时间-空间域中的分布,轨枕干扰信号通常分布在直达波界面以下的地方。设直达波的时间范围为 $[t_1, t_2]$, 则轨枕干扰信号存在的时间范围为 t_2 至回波接收信号的截止时间 t_3 。

设含轨枕干扰信号的幅度大小为 A , 可以写成如下形式:

$$d(x, t) = \begin{cases} A, & t \in [t_2, t_3] \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

则频率波数域的变换可表示为:

$$d(f, k) = \int_0^{x_0} \int_{t_2}^{t_3} A e^{-j2\pi(ft+kx)} dx dt \quad (4)$$

式中 x_0 为扫描距离。得到含轨枕干扰的信号频率波数域图 20。

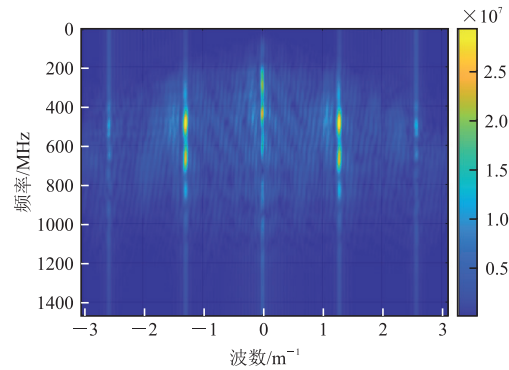


图 20 含轨枕干扰频率波数域

Fig. 20 Frequency wavenumber domain with sleeper interference

由上图可以看出,能量级别降低了一级,说明轨枕干扰信号能量较低,而且轨枕干扰波数范围在整个波数范围内都有分布,能量主要集中在主瓣及第一副瓣,说明轨枕干扰在频率波数域与有效信号重叠部分主要在主瓣附近,单从频率波数域无法将轨枕干扰与有效信号进行分离。

2.5 时频域分析

近几年时频分析的方法有很多,最早的时频分析方法是短时傅里叶变换,虽然实现较为简单,但是分辨率很单一,在实际应用中受到了很多的限制。之后 Grossman 和 Morlet 等提出和发展了小波变换,使得时间分辨率和频率分辨率都是可以变化的,但是时间域和频率域之间没有明确的联系。后来 Stockwell 等^[14]提出了 S 变换, S 变换的时频谱具有较高的分辨率,能够反映地震资料的时频特征。可是 S 变换中窗函数不能随意改变,其有定的窗函数变化趋势,后来又对 S 变换的窗函数进一步改进,增强了时频域的调节能力。

广义 S 变换是对 S 变换的改进,其高斯窗函数的选取会随频率的变化而变化, Stockwell 等^[14]提出了 S 变换,高斯窗函数的选取与频率有关, S 变换的公式为:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-f^2(\tau-t)^2}{2}\right) \exp$$

$$(-2\pi i f t) dt \tag{5}$$

在 S 变换中,窗函数满足条件 $\int_{-\infty}^{+\infty} \omega(\tau-t, f) dt = 1$,调谐高斯函数为:

$$\omega(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-f^2 t^2}{2}\right) \tag{6}$$

S 变换高斯窗函数的宽度与频率成反比,低频端的时窗较宽,频率分辨率较高;高频端时窗较窄,时间分辨率较高。由于高斯窗函数不能随着频率的变化而变化。将 S 变换的窗函数进一步优化,使得优化后的窗函数能够在频率产生变化的时候,窗口的形状和大小也能及时地变化,这样优化的 S 变换就是广义 S 变换。Mansinha^[15]用 f/r 替换 S 变换窗函数中的 f ,得到调谐函数为:

$$\omega(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-f^2 t^2}{2r^2}\right) \tag{7}$$

陈学华和贺振华^[16]引入两个参数 λ 和 p 的窗函数,对 S 变换进行了改造,公式为:

$$\omega(t, f) = \frac{\lambda |f|^p}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-f^2 t^2 f^{2p}}{2}\right) \tag{8}$$

其中 λ 和 p 是调节参数,得到广义 S 变换为:

$$GST(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{\lambda |f|^p}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-\lambda^2 (\tau-t)^2 f^{2p}}{2}\right) \exp(-2\pi i f t) dt \tag{9}$$

分别对去除直达波后的图 3、图 4 和图 5 的 B-scan 数据中的第 750 道 A-scan 数据进行广义 S 变换得到图 21、图 22 和图 23。

由图 21、图 22 和图 23 的广义 S 时频谱可以看出,能量都主要集中在 400 MHz~800 MHz,路基病害反射的有效信号和轨枕干扰信号在频率上重叠,所以单从滤波的角度无法将轨枕干扰过滤掉。由不含轨枕干扰的广义 S 变换频谱图可以看出病害的主要集中在 10 ns~15 ns,但是在图 20 中与轨枕

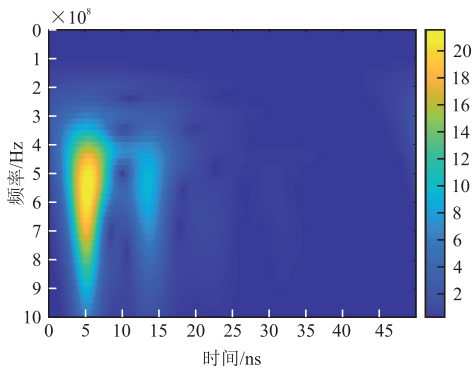


图 21 轨枕干扰的广义 S 变换

Fig. 21 Generalized S-transformation of sleeper disturbance

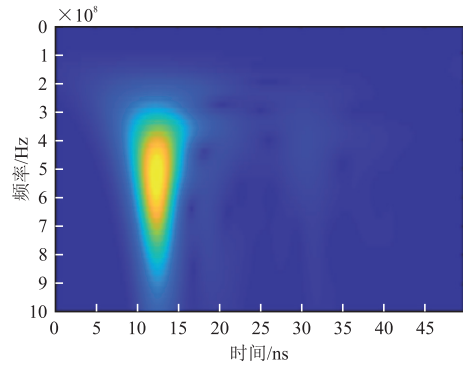


图 22 不含轨枕干扰的广义 S 变换

Fig. 22 Generalized S-transform without sleeper interference

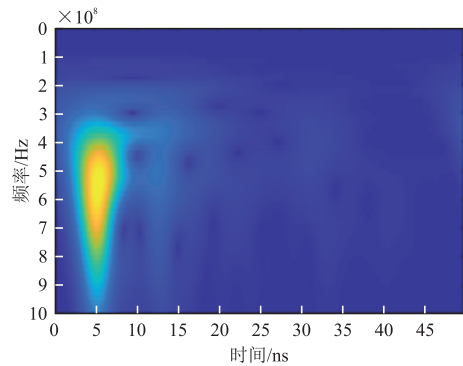


图 23 含轨枕干扰的广义 S 变换

Fig. 23 Generalized S-transform with sleeper disturbance

的能量幅值相比相差较大,导致轨枕干扰常常会淹没掉有效路基病害信号。

2.6 统计相关性分析

在统计学中,皮尔森相关系数被广泛应用于描述两个变量之间的相关性,特别是在数据挖掘、机器学习和数据分析等领域中。它可以用来评估两个变量之间的相关性,以及这种相关性的强度和方向。在众多应用场景中,当系数越接近 1 或 -1 时,表明两个变量之间线性相关性越强;当系数越接近 0 时,说明两个变量之间线性相关性越弱^[17]。假设雷达数据有 m 条记录道,每条记录道有 n 个采样点,则雷达剖面可以表示为 $A = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$,设两样本 X 和 Y 是雷达剖面中的两道不同数据,分别用 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 和 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 表示, \bar{x} 和 \bar{y} 分别是 X 和 Y 的均值,皮尔森相关系数 $r(X, Y)$ 的值域为 $[-1, 1]$, $r(X, Y) = 0$ 则表示两个样本完全无关, $r(X, Y)$ 等于 1 或 -1 时表示两个样本完全相关。皮尔森相关系数计算公式如下:

$$r(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \tag{10}$$

分别取图 8 和图 9 雷达剖面中的 500 道~1 000 道数据每两道之间计算皮尔森系数,如下图 24 和图 25 所示。

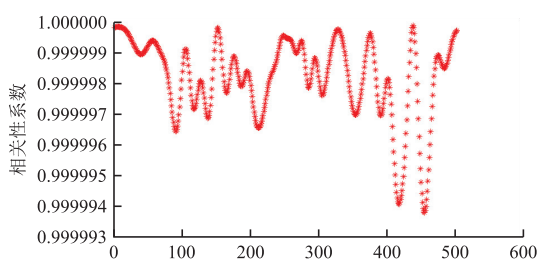


图 24 不含轨枕干扰的统计相关性分析

Fig. 24 Statistical correlation analysis without sleeper disturbance

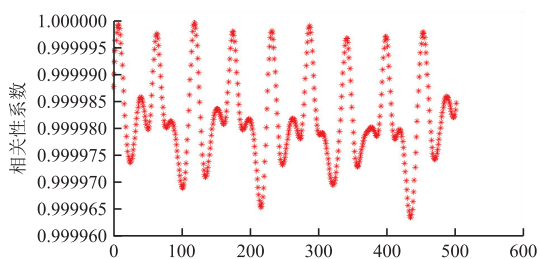


图 25 含轨枕干扰的统计相关性分析

Fig. 25 Statistical correlation analysis of interference containing sleepers

由上图可知,在没有轨枕干扰的影响下,道与道之间的相关性系数略小一点,但是也基本接近于 1,相关程度非常高,然而病害通常不规则,相关程度较低,因此去除相关性可以达到凸显病害的目的。

3 结论

通过对铁路轨枕病害进行建模,得到模拟数据,分别从不同的角度分析了轨枕干扰的特性,得出以下结论:

1) 含轨枕干扰的时域信号比不含轨枕干扰的时域信号能量更强,波形起伏明显,与病害有效信号发生重叠,导致病害形状发生改变。

2) 在频域中,轨枕干扰对有效信号的有效频段干扰严重,常常混叠在一起,严重影响了有效信号的识别。

3) 在空间域中,轨枕在道床上的均匀排列使得轨枕干扰在横向分布上呈现一定的周期性分布。

4) 在空频域中,轨枕干扰分布在整個波数范围内,有效信号和含轨枕干扰信号主要重叠在主瓣附近。

5) 在时频域中,有效信号和含轨枕干扰信号频率范围基本一致,但轨枕干扰信号在整个时间范围内都有出现。

6) 整个雷达剖面道与道之间相关性都很强,即使存在轨枕干扰的影响,相关系数也接近于 1。

综上所述,有效信号和轨枕干扰在时间域、空间域、频率域、变换域等方面都存在重叠现象。

参考文献:

- [1] 秦怀兵. 铁路车载探地雷达道床检测应用技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2020.
QIN H B. Application technology of railway vehicle-mounted ground penetrating radar track bed detection [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2020. (In Chinese)
- [2] 朱德兵, 耿嘉楠, 黄敏, 等. 一种铁路路基雷达探测信号中轨枕干扰的压制算法[J]. 铁道学报, 2013, 35(5): 75-79.
ZHU D B, GENG J N, HUANG M, et al. Algorithm for suppressing sleeper interferences in railway subgrade GPR signals[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(5): 75-79. (In Chinese)
- [3] HUGENSCHMIDT J. Railway track inspection using GPR[J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 43(2/3/4): 147-155.
- [4] AL-NUAIMY W, ERIKSEN A, GASGOYNE J. Train-mounted GPR for high-speed railtrackbed inspection[C]// Proceedings of the Tenth International Conference on Grounds Penetrating Radar, 2004. GPR. Delft, Netherlands. IEEE, 2004: 631-634.
- [5] 杨峰, 高云泽, 康文献. 地质雷达剖面高压线干扰的识别与去除[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(4): 276-281.
YANG F, GAO Y Z, KANG W X. Identification and removing of the city high-voltage line interference from geological radar profile[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2(4): 276-281. (In Chinese)
- [6] 廖立坚, 杨新安, 杜攀峰. 铁路路基雷达探测数据的处理[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(3): 18-23.
LIAO L J, YANG X A, DU P F. Processing GPR detection data of railway subgrade[J]. China Railway Science, 2008, 29(3): 18-23. (In Chinese)
- [7] AL-QADI I L, XIE W, JONES D L, et al. Development of a time - frequency approach to quantify railroad ballast fouling condition using ultra-wide band ground-penetrating radar data[J]. International Jour-

- nal of Pavement Engineering, 2010, 11(4): 269—279.
- [8] 肖建平,柳建新. 一种剔除轨枕干扰的铁路路基检测雷达数据处理方法; CN101590858B[P]. 2011—02—02.
- XIAO J P, LIU J X. Method for processing railway roadbed detected radar data with sleeper interference eliminated; CN101590858B[P]. 2011—02—02. (In Chinese).
- [9] 王韵棋,肖建平,柳建新,等. 基于经验模态分解的车载探地雷达探测信号强干扰处理[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(1): 406—410.
- WANG Y Q, XIAO J P, LIU J X, et al. Based on empirical mode decomposition the signal processing of the vehicle-mounted ground penetrating radar data for strong interferences [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(1): 406—410. (In Chinese)
- [10] GIANNOPOULOS A. Modelling ground penetrating radar by GprMax[J]. Construction and Building Materials, 2005, 19(10): 755—762.
- [11] 詹毅,梁昌洪,方广有. 探地雷达回波信号处理中小波变换域滤波方法的研究[J]. 西安电子科技大学学报, 1999, 26(3): 305—309.
- ZHAN Y, LIANG C H, FANG G Y. Study of wavelet domain filtering techniques in the processing of the received signals of a ground penetrating radar [J]. Journal of Xidian University, 1999, 26(3): 305—309. (In Chinese)
- [12] 张景东. 探地雷达 FK 滤波技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- ZHANG J D. FK filtering technique for GPR [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (In Chinese)
- [13] HAYASHI N, SATO M. F-k filter designs to suppress direct waves for bistatic ground penetrating radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(3): 1433—1444.
- [14] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: The S transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998—1001.
- [15] MANSINHA L, STOCKWELL R G, LOWE R P, et al. Local S-spectrum analysis of 1-D and 2-D data [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1997, 103(3/4): 329—336.
- [16] 陈学华,贺振华. 改进的 S 变换及在地震信号处理中的应用[J]. 数据采集与处理, 2005, 20(4): 449—453.
- CHEN X H, HE Z H. Improved S-transform and its application in seismic signal processing [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2005, 20(4): 449—453. (In Chinese)
- [17] MOHAMED SALLEH F H, ARIF S M, ZAINUDIN S, et al. Reconstructing gene regulatory networks from knock-out data using Gaussian Noise Model and Pearson Correlation Coefficient [J]. Computational Biology and Chemistry, 2015, 59 Pt B: 3—14.

Analysis of interference characteristics of ground penetrating radar railway sleepers

YANG Lin

(School of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Diseases of railway subgrade may affect the safety of railway transportation. Ground penetrating radar can perform efficient and continuous imaging of subgrades and has been widely used in non-destructive testing of railway subgrades. When ground penetrating radar is used to detect railway subgrade diseases, sleeper interference affects the identification and location of subgrade diseases. The characteristics of sleeper interference in the time domain, frequency domain, space domain, time-frequency domain, space-frequency domain, and statistical correlation are analyzed, respectively, which provides a basis for further selection of sleeper interference suppression methods.

Keywords: ground penetrating radar; roadbed disease; analysis of sleeper disturbance characteristics