

# 基于毫米波通信信号的高速磁浮轨道 沉降实时监测方法

薛敏燕<sup>1</sup>, 李廷军<sup>1\*</sup>, 杨海宁<sup>1</sup>, 田毅<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学电子科学与工程学院, 四川成都 611731;

2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司高速磁浮运载技术全国重点实验室, 山东青岛 266100)

**摘要:** 针对传统轨道沉降监测方法存在实时性差、成本高等问题, 本文提出一种基于毫米波通信信号互相关分析的轨道沉降监测方法。该方法利用毫米波车地通信系统在完成高速数据传输的同时实现轨道状态感知, 扩展了通信信号辅助环境感知的能力。相比依赖人工巡检或专用测量设备的传统方案, 该方法具有部署灵活、成本低和实时性强等优势。高速磁浮列车在运行过程中接收的通信信号由直达波与反射波干涉形成, 其电平对轨道沉降变化极其敏感。当轨道发生沉降时, 反射路径长度及其相位关系随之变化, 导致接收功率干涉特征发生偏移, 为沉降量反演提供了物理基础。通过路径损耗补偿还原真实接收功率, 有效消除列车运行距离变化带来的功率衰减影响, 引入零相位滤波去噪以避免信号畸变, 提高信号处理过程中相位信息的可靠性, 并采用自适应窗函数提取主频信号以提升干涉偏移估计的稳定性。利用互相关函数精确提取干涉信号的相对偏移量, 建立干涉偏移与沉降量之间的线性映射关系, 实现沉降量的高精度估计。实验结果表明, 该方法在1~10 cm沉降范围内监测误差不超过±0.5 cm, 线性拟合决定系数( $R^2$ )均高于0.94, 表现出良好的线性一致性与重复性, 为高速磁悬浮系统提供了一种低成本、高分辨的轨道动态沉降监测方案。

**关键词:** 轨道沉降监测; 毫米波通信; 互相关分析; 通信感知融合

**基金项目:** 国家重点研发计划(No.2023YFB4302501); 泰山产业领军人才工程资助(No.tscx202408140)

**中图分类号:** TN911.7; U216.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2026)03-1310-09

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20250857

## Real-Time Track Settlement Monitoring Method for High-Speed Maglev Based on Millimeter-Wave Communication Signals

XUE Minyan<sup>1</sup>, LI Tingjun<sup>1\*</sup>, YANG Haining<sup>1</sup>, TIAN Yi<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China;

2. State Key Laboratory of High-Speed Maglev Transportation Technology, CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266100, China)

**Abstract:** To address the limitations of conventional track settlement monitoring methods, such as poor real-time performance and high cost, a track settlement monitoring method based on cross-correlation analysis of millimeter-wave communication signals is proposed. The method exploits a millimeter-wave train-to-ground communication system to achieve track condition sensing while supporting high-data-rate transmission, extending the capability of communication signals for environment-assisted sensing. Compared with traditional approaches relying on manual inspection or dedicated equipment, the proposed method offers flexible deployment, low cost, and strong real-time performance. During high-speed maglev train operation, the received communication signal is formed by the interference between the line-of-sight and reflected paths, and its power level is highly sensitive to track settlement variations. Settlement-induced changes in the reflected path length and phase relationship lead to a shift in the interference pattern, providing a physical basis for settlement inversion. Path loss compensation and zero-phase filtering are applied to recover the true received power and suppress noise without signal distortion, while an adaptive windowing strategy is employed to enhance the stability of interference shift estimation. Cross-correlation analysis is then used to extract the relative interference shift, and a linear mapping between the interference shift and the track settlement is established for high-precision estimation. Experimental results show that, within a settlement range of 1~10 cm, the monitoring error is within ±0.5 cm, with coefficients of determination ( $R^2$ ) exceeding 0.94. The proposed method provides a low-cost and high-resolution solution for dynamic track settlement monitoring in high-speed maglev systems.

**Keywords:** track settlement monitoring; millimeter-wave communication; cross-correlation analysis; communication-sensing fusion

**Foundation Item(s):** National Key Research and Development Program of China (No.2023YFB4302501); Taishan Industrial Experts Program (No.tscx202408140)

## 0 引言

随着轨道交通网络的快速发展,轨道结构的运行安全问题日益受到重视<sup>[1]</sup>。轨道沉降是轨道结构中最常见且最不易被及时发现问题之一<sup>[2]</sup>,它会导致轨道面产生微小但持续的垂直变形,进而影响列车运行的平稳性和安全性<sup>[3-4]</sup>。高速运行工况下,即使是微小的沉降也可能引起车辆姿态的变化和冲击力的增加,严重时甚至可能导致脱轨事故,带来极大的安全隐患<sup>[5]</sup>。

对于高速磁浮交通系统,轨道沉降对列车运行的平稳性和安全性影响更显著。高速磁浮列车在固定轨道上运行,悬浮高度恒定,因此微小沉降即可影响运行平稳性。比如上海示范线,由于地质结构较松软,从开始运行,每天晚上直至次日凌晨时段内,就有线路维护的工班沿线按规定的编排顺序,依次对线路钢筋混凝土预制梁进行高程和水平测试调整。根据整条线路的长度,线路维护部门会事先编配好若干个工班,配备监理及甲方代表一起参加检测。一般 30 km 长的线路,每两个月全线调整一遍<sup>[6]</sup>。对沿磁浮线的市政施工也有严格的控制和监测<sup>[7]</sup>。

目前,轨道沉降的常用监测手段包括水准测量、全站仪测量<sup>[8]</sup>及合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)技术<sup>[9-11]</sup>等。水准测量操作繁琐且周期较长,难以实现大范围线路的连续覆盖;全站仪虽然具备较高的测量精度,但布设复杂且依赖人工,监测效率较低;SAR 技术具有较强的区域覆盖与形变识别能力,但受限于成像周期、空间分辨率以及气象条件,难以实现对特定轨道段的高频次、厘米级沉降检测。因此,传统方法普遍存在实时性不足、成本高昂、运维复杂等缺陷,难以满足现代高速轨道系统对沉降监测的高频率、高分辨率及强适应性的需求。

相对于轮轨式高速列车,高速磁浮对车地通信系统的可靠性和实时性要求更高,因此采用毫米波车地通信系统<sup>[12]</sup>。毫米波的波束窄,主要覆盖轨道区域。列车运行时,毫米波通信接收信号中包含直达波和轨道区域的反射波,该信号在传输数据的同时也反映了轨道环境的变化。通过长期监测和分析接收信号的变化,就能提取轨道沉降信息。

在上述通信场景与信号特性基础上,现有相关研究主要通过复用通信信号实现环境或状态感知,根据所利用通信信号类型的不同,可分为基于导频信号进行感

知的方法和基于通信数据信号进行感知的方法<sup>[13]</sup>。

针对高速磁浮毫米波车地通信场景,本文采用基于通信数据信号的感知思路,通过分析通信接收信号中直达波与反射波叠加形成的干涉特性,在不改变原有通信系统体制的前提下,提出一种基于毫米波通信信号干涉偏移分析的轨道沉降监测方法。该方法通过提取干涉引起的接收功率变化,并结合互相关分析,实现轨道环境沉降的高精度估计。同时,引入零相位滤波与自适应窗函数设计,有效增强了对信号主频特征提取的稳定性,并建立了沉降量与干涉偏移之间的线性映射关系。该方案不仅具备良好的鲁棒性和高分辨率,还具有较强的工程适应性,适用于多类型轨道交通系统的在线沉降状态评估,为轨道结构安全保障提供了有力技术支撑。

本文的主要研究工作包括:一是构建基于通信信号的沉降监测模型,分析干涉偏移与轨道沉降的关系;二是设计零相位滤波与自适应窗函数算法等,提升信号特征提取的准确性;三是通过实验与仿真验证方法的有效性 with 精度,展示其在实际轨道监测中的应用潜力。

## 1 系统建模

### 1.1 轨道沉降的干涉响应分析

在毫米波通信系统中,接收功率信号由直达波与地面反射波叠加形成,并在空间中产生干涉效应,使信号沿水平距离呈现周期性的波峰与波谷。轨道沉降引起反射路径长度变化,从而导致干涉相位整体漂移,使电平信号的波峰与波谷位置发生明显偏移。由此,电平信号不仅体现空间干涉特性,同时对沉降引起的路径差变化高度敏感,可作为轨道沉降的感知信号,为量化评估提供可靠依据。

系统采用时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)方式实现多车、多分区通信。在每个周期的有效工作时隙内发射一帧通信数据,其余时间保持静默。接收功率模型反映的正是该工作时隙内发射信号的直达波与反射波叠加特性。

基于 Friis 传输公式,并考虑天线方向性增益,直达波接收功率为

$$P_{rd} = P_t + G_t + G_r + 20 \log_{10} \left( \frac{\lambda}{4\pi L_d} \right) \quad (1)$$

其中,  $P_t$  为发射功率;  $G_t$  和  $G_r$  分别为直达波方向对应

的发射端与接收端的增益;  $\lambda$  为波长;  $L_d$  直达波路径长度。

对于一次反射波, 其传播路径更长, 且能量衰减更明显。考虑反射损耗后, 接收功率为

$$P_{rr} = P_t + G'_t + G'_r + 20 \log_{10} \left( \frac{\lambda}{4\pi L_r} \right) + 20 \log_{10}(\Gamma) \quad (2)$$

其中,  $G'_t$  和  $G'_r$  分别为反射波方向对应的发射端与接收端的增益;  $L_r$  反射波路径长度;  $\Gamma$  为地面反射系数。地面反射系数可表示为

$$\Gamma = |\Gamma| e^{i\phi_r} \quad (3)$$

其中,  $|\Gamma|$  和  $\phi_r$  分别代表反射的幅度与相位。在实际环境中, 轨道面、轨道曲线以及邻近金属结构等因素具有不同的散射特性, 会使接收功率信号的幅度和相位产生相应变化。然而在反射环境确定后, 这些散射特性可视为不变分量, 因此通过长期监测与分析, 能够从中提取与环境沉降相关的信息。

由于高速磁浮毫米波通信具有窄波束定向特性, 常见车地通信场景以二径传播模型为主, 如图 1。基于二径传播模型, 瞬时接收功率信号表达式近似为<sup>[14]</sup>

$$P_r(t) = P_{rd} + P_{rr} + 2\sqrt{P_{rr}P_{rd}} \cos(2\pi f_0 t + \phi_0) \quad (4)$$

其中,  $\phi_0$  为初始相位偏移;  $f_0$  为接收功率信号波峰(波谷)出现的频率;  $t = x/c$  为基站天线到车载天线对应距离的信号传播时间。

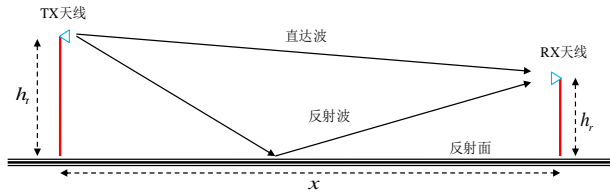


图 1 二径传播模型

Figure 1 Two-ray propagation model

轨道沉降引起车载天线高度变化, 进而影响其与地面基站之间的无线传播路径。假设地面基站高度为  $h_t$ , 车载天线高度为  $h_r$ , 两者水平距离为  $x$ , 地面基站与轨道中心距离为  $z$ 。当轨道沉降量为  $\Delta h$  时, 车载天线实际高度变为  $h_r - \Delta h$ 。此时, 两径传播路径差  $\Delta L(x)$  表达为

$$\Delta L(x) = \sqrt{x^2 + (h_t + h_r - \Delta h)^2 + z^2} - \sqrt{x^2 + (h_t - h_r + \Delta h)^2 + z^2} \quad (5)$$

在远距离条件下 ( $x \gg h_t, h_r, z$ ), 两径路径差  $\Delta L$  可近似为泰勒展开形式:

$$\Delta L(x) \approx \frac{2h_t(h_r - \Delta h)}{x} \quad (6)$$

在毫米波通信系统中, 由于直射路径与反射路径

的传播距离存在差异, 且毫米波信号波长较短, 接收端所检测到的直射波与反射波会产生显著的相位差。该相位差公式表示为

$$\phi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L(x) \quad (7)$$

接收功率信号中相邻波峰(波谷)之间的水平距离间隔为  $\Delta x$ 。该间隔对应于路径差引起的相位差增加  $2\pi$ , 完整一次相位循环, 因此,  $\Delta x$  满足

$$\phi(x + \Delta x) - \phi(x) = 2\pi \quad (8)$$

结合式(6), 在远距离条件下 ( $x \gg \Delta x$ ), 由于  $h \ll h_t, h_r$ , 可推导出  $\Delta x$ :

$$\Delta x = c\Delta T \approx \frac{\lambda x^2}{2h_t h_r} \quad (9)$$

其中,  $\Delta T$  为波峰(波谷)出现的周期。因此, 接收功率信号波峰(波谷)出现的频率  $f_0$  为

$$f_0 = \frac{1}{\Delta T} \approx \frac{2ch_t h_r}{\lambda x^2} \quad (10)$$

考虑轨道沉降对车载天线高度的影响, 未沉降 ( $\Delta h = 0$ ) 与沉降状态下的接收功率信号分别表示为

$$P_r(x) = P_{rd} + P_{rr} + 2\sqrt{P_{rr}P_{rd}} \cos\left(\frac{4\pi h_t h_r}{\lambda x} + \phi_0\right) \quad (11)$$

$$P'_r(x) = P_{rd} + P_{rr} + 2\sqrt{P_{rr}P_{rd}} \cos\left(\frac{4\pi h_t h_r}{\lambda x} \left(1 - \frac{\Delta h}{h_r}\right) + \phi_0\right) \quad (12)$$

其中,  $x$  为沿轨道方向的空间位置, 用于表示接收信号随列车运动的空间变化。

沉降状态下的接收功率信号相对于未沉降状态下的接收功率信号, 其整体沿距离轴方向偏移, 偏移量  $\tau$  可表达为

$$\tau \approx \frac{\Delta h}{h_r} x \quad (13)$$

轨道沉降会导致地面反射路径发生变化, 进而影响路径差变化, 使得沉降后的功率信号相对于未沉降功率信号整体发生偏移。由式(13)可知, 该偏移量与沉降高度和水平距离呈线性关系, 于是可以利用偏移量准确估计轨道沉降量。

## 1.2 互相关函数原理

互相关函数是一种用于衡量两个信号相似程度及其相对空间位移的重要工具, 广泛应用于信号对齐、延迟估计和特征匹配等场景中<sup>[15-17]</sup>。

对于两个沿轨道方向的连续空间信号  $P_r(x)$ ,  $P'_r(x)$ , 其互相关函数定义为

$$R(\tau) = \int_0^T P_r(x) \cdot P'_r(x + \tau) dx \quad (14)$$

其中,  $\tau$  为空间距离延迟;  $T$  为信号的空间采样长度;  $R(\tau)$  表示  $P'_r(x)$  向左或者向右平移  $\tau$  时与  $P_r(x)$  的重

合程度。

该方法适用于轨道环境毫米波接收信号的干涉偏移分析,实现轨道沉降的估计。

## 2 方法设计与实现

在毫米波通信系统中,接收功率随距离显著衰减,同时受到环境扰动的影响,轨道沉降所引起的局部变化往往难以直接观测。为有效提取沉降相关特征,本文围绕数据预处理、主频特征提取及互相关干涉偏移三个环节展开设计,提升轨道沉降检测的准确性与稳定性,进一步建立干涉偏移与沉降量之间的映射模型,为沉降量的定量反演提供理论支撑与实现路径。

### 2.1 数据预处理

在毫米波通信系统中,信号在传播过程中受到自由空间路径损耗的影响,其强度随传播距离呈指数衰减。为了排除路径损耗对接收功率的主导影响,本文通过归一化处理将测得的接收功率映射至统一距离条件,从而削弱路径衰减影响,突出轨道沉降所引起的局部扰动。

由于毫米波通信系统采用 TDMA 协议运行,系统在每个周期内的指定时隙工作,其余时间保持静默,采集的通信场强信号在时间域上呈现离散特性。尽管信号并非连续采样,但有效场强采集率足够场强空间分布信息的分析。通过连续采集多个通信周期的接收功率样本,可在距离轴上重建完整的干涉波形<sup>[18]</sup>。针对该离散采样形式,本文通过低通滤波器提取干涉包络,以保留主要调制分量并抑制高频噪声,从而获得平滑连续的接收功率信号。

本文采用四阶巴特沃斯低通滤波器<sup>[19]</sup>,并通过双向滤波实现零相位响应,以最大程度提取并保留信号的幅度与相位特征。其幅频特性表示为

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}} \quad (15)$$

其中, $\omega_c$ 为截止角频率; $n$ 为滤波器阶数。本文将低通滤波器的截止频率设置为干涉主频最大值的 1.2 倍,并采用六阶结构。该配置能够有效抑制带外噪声与脉冲离散分量,同时保持干涉包络的主要幅度变化与相位调制特征,从而为后续特征提取和干涉偏移分析提供稳定可靠的输入信号。

毫米波接收功率信号由直达波与地面反射波干涉形成,表现为典型的非平稳特性,且干涉条纹的频率随距离逐步降低。对滤波后的接收功率信号  $k(x)$  进行平滑拟合,仅保留局部干涉波动结构,得到处理后的信号定义为

$$\tilde{k}(x) = k(x) - \sum_{k=0}^n c_k x^k \quad (16)$$

其中,系数  $c_k$  通过最小二乘法确定。

随后,对信号进行希尔伯特变换提取包络,增强对频率调制特征的响应,得到包络信号。

$$e(n) = \left| \tilde{k}(x) + j\mathcal{H}[\tilde{k}(x)] \right| \quad (17)$$

其中, $\mathcal{H}[\cdot]$ 表示希尔伯特变换。

为抑制异常幅度突变对频率谱的干扰,包络信号经过对数压缩和均方根归一化处理,获得了稳定且幅度统一的频率特征表达。

$$x_{\text{norm}}(n) = \frac{\text{sign}(e(n)) \cdot \log(1 + |e(n)|)}{\text{rms}(e(n))} \quad (18)$$

其中, $\log$ 实现对幅度的压缩; $\text{rms}$ 表示均方根,用于归一化整体能量; $\text{sign}$ 保留符号信息以维持相位特性。

### 2.2 主频提取及干涉偏移分析

在完成数据预处理后,直接进行全局频率分析难以准确捕捉由轨道沉降引起的局部干涉变化。为提取高分辨率的局部频率特征,本文将接收功率信号划分为多个长度固定、步长重叠的滑动窗口。各主频提取窗口均采用汉宁窗加权,窗口重叠率设为 50%,以抑制频谱泄漏并提升频率提取的稳定性。

对每个主频提取窗进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)提取信号的主频分量<sup>[20-21]</sup>,即最大幅值对应频率表达为

$$f_{\text{main}} = \arg \max_f |F\{x_{\text{norm}}(n)\}| \quad (19)$$

在接收功率信号中,由于干涉条纹的频率随传播距离逐渐降低,为确保每个干涉偏移估计窗内包含固定数量的信号周期,本文根据局部主频自适应调整干涉偏移估计窗长度。所有干涉偏移估计窗的中心位置与主频提取窗中心保持对齐,以兼顾频率提取的稳定性与干涉偏移估计的准确性。每个干涉偏移估计窗的长度  $c$  表达为

$$c = N_{\text{cycle}} \times \frac{f_s}{f_{\text{main}}} \quad (20)$$

其中, $N_{\text{cycle}}$ 为设定的周期数; $f_s$ 为采样频率; $f_{\text{main}}$ 为当前窗内主频。通过动态调整窗长以匹配频率变化,有效增强了相位稳定性与匹配精度。

随后,本文利用互相关函数对未沉降信号与沉降信号进行局部匹配,其最大相关系数对应的偏移量被视为沉降引起的干涉偏移。

$$\tau = \arg \max_{\tau} R(\tau) \quad (21)$$

该延迟量准确反映了不同沉降状态下信号的干涉偏移,为实现轨道沉降的精确识别与反演奠定了基础。

### 3 仿真与实验验证

#### 3.1 仿真数据设计

基于毫米波传播理论,本文构建统一的仿真环境,并设置发射功率、载波频率及其他关键参数,如表1所示,为后续不同沉降条件下的传播特性分析提供一致的基准。

表1 仿真主要参数设定

Table 1 Simulation parameter settings

参数	符号	数值
发射功率	$P_t$	20 dBm
工作频率	$f$	38 GHz
波长	$\lambda$	7.89 mm
地面基站高度	$h_t$	3.4 m
车载基站高度	$h_r$	3.2 m
地面基站与轨道中心距离	$z$	2.5 m
天线增益	$G_t, G_r$	15 dBi

#### 3.2 仿真实验验证

为进一步验证所提出方法在不同沉降情形下的响应性能,本文基于前述仿真参数开展系统性模拟实验,模拟沉降量范围为1~15 cm。接收信号由直达波与一次地面反射波叠加形成,并加入噪底为-90 dBm的高斯白噪声,通过复数叠加获得完整的接收功率序列。获得沉降前后的接收功率后,依次进行路径损耗归一化、零相位滤波、主频提取以及自适应窗划分等预处理。随后,采用互相关函数将无沉降信号作为参考,与各沉降状态信号逐窗比对,提取最大互相关峰值,作为归一化干涉偏移特征。图2展示了不同沉降量下接收功率信号的三维曲线,可以直观观察沉降对信号的影响。

图3展示了不同沉降量条件下提取的归一化干涉偏移曲线。结果表明,随着沉降量的增加,互相关干涉偏移曲线的斜率显著增大,说明单位距离所引起的干涉偏移增长更加明显。同时,干涉偏移曲线随传播距离增加而不断上升,体现出信号干涉偏移的累积性增长特征。

为进一步验证归一化干涉偏移曲线的稳定性与一致性,本文对每条干涉偏移曲线随距离的变化趋势进行线性拟合,并计算对应的决定系数( $R^2$ )以评价拟合效果。决定系数 $R^2$ 是评价回归模型拟合优度的重要指标,反映了模型对观测数据变异的解释比例,其定义为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (22)$$

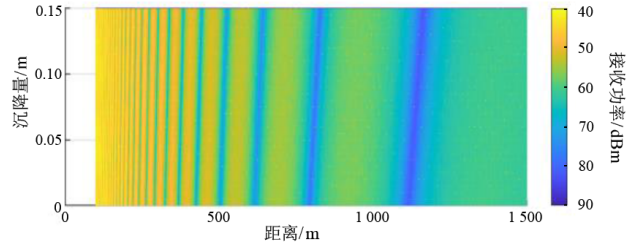
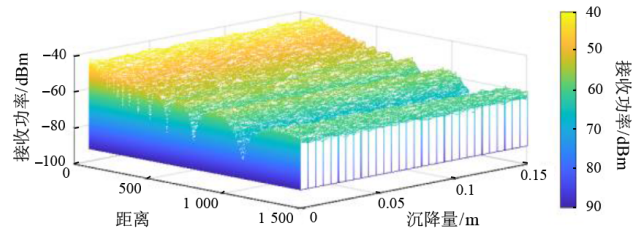


图2 不同沉降量下接收功率信号三维曲线

Figure 2 3D curves of received power signals under different settlement values

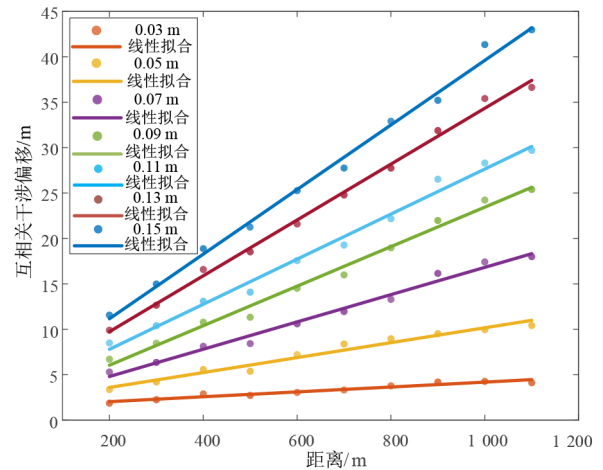


图3 不同沉降量下互相关干涉偏移曲线

Figure 3 Cross-correlation interference offset curves under different settlement magnitudes

其中, $y_i$ 为实际观测值; $\hat{y}_i$ 为拟合预测值; $\bar{y}$ 为观测值的均值; $N$ 为样本数量。 $R^2$ 越接近1表示拟合效果越好,模型能较好地解释数据变化。

表2列出了不同沉降量条件下归一化干涉偏移曲线的线性拟合结果。所有曲线的决定系数 $R^2$ 大于0.94,验证了归一化干涉偏移随传播距离呈良好线性关系。

图4展示了归一化干涉偏移曲线斜率与沉降量的拟合关系。拟合结果的决定系数达到0.97,表明斜率与沉降量之间存在高度线性关联,进一步验证了该方法在沉降变化识别上的高灵敏性和鲁棒性。

表 2 不同沉降量下归一化干涉偏移曲线的拟合结果

Table 2 Fitting results of normalized interference offset curves under different settlement magnitudes

沉降量/cm	1	3	5	7
决定系数( $R^2$ )	0.942	0.958	0.968	0.985
沉降量/cm	9	11	13	15
决定系数( $R^2$ )	0.989	0.989	0.995	0.993

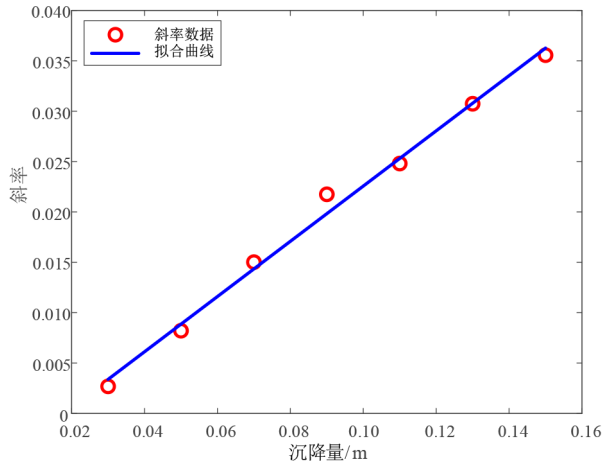


图 4 沉降量与互相关干涉偏移曲线斜率的拟合曲线

Figure 4 Fitting curve of interference offset slope versus settlement magnitude

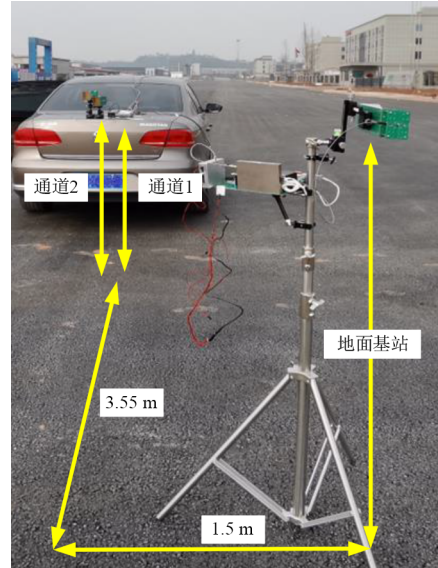


图 5 实验测试场景

Figure 5 Experimental setup

### 3.3 实验系统搭建

鉴于实际高速磁悬浮轨道沉降具有较长的演化周期,难以在真实列车运行环境下实现高效验证,本文在可控实验条件下构建了模拟平台。在典型地面场景中复现轨道沉降引起的传播路径变化,通过仿真与实验分析发现,列车运行速度对接收信号功率几乎没有影响。因此,该平台能够有效评估所提方法在不同沉降条件下的性能表现。

该测试平台如图 5,由固定发射端与移动接收端组成。发射端采用工作频率为 38 GHz 的水平极化毫米波天线,安装于具备精密高度调节能力的可升降支架上,以高度变化模拟轨道下沉情况。在测试过程中,车尽量保持固定轨迹,以保证模拟的轨道环境稳定且可重复。本实验共设置 11 个高度档位,天线初始高度为 119 cm,每次上调 1 cm,对应最大模拟沉降量为 11 cm。接收端设置于小车平台上,沿直线路径移动,并由安装于车轮上的旋转编码器间隔触发采集接收功率信号。接收系统配备双通道水平极化天线阵列,以增强对高度变化的灵敏感知能力。其中,CH1 天线下沿高度为 116.5 cm,CH2 为 121.5 cm,水平距离约为 150 cm,形成稳定的非接触测量基线。

实验场地选择在开阔、无遮挡的新建路段,具备理想的毫米波自由空间传播条件,有效降低了其他多径干扰与环境噪声的影响,从而突出沉降对信号传播

路径的直接作用。

系统硬件方面,测试平台基于团队已有的 38 GHz 毫米波通信系统进行搭建,具备高度集成化与可重构性。硬件模块包含低噪声放大器、上下变频混频器、滤波器及功率检波器等关键模块,接收端信号经高速模数转换后由主控板进行实时数字处理,并通过以太网接口传输至上位机,实现功率数据的高时空精度同步采集与处理。

### 3.4 实验结果分析

本节基于实验采集的毫米波通信接收功率数据,对接收功率信号进行了平滑和噪声抑制处理,以削弱随机干扰并突出干涉特征。实验结果表明,在实际环境中虽然存在背景噪声和非理想因素,但是处理后的信号仍然能够清晰反映出沉降引起的功率干涉变化。与仿真结果相比,实验曲线在波谷深度和局部波动上略有差异,这主要源于现场环境中的微弱多径效应、设备非线性以及采集过程中的机械偏差,但整体变化趋势与仿真保持高度一致。

进一步分析表明,不同沉降量下接收功率曲线的波谷位置呈现出规律性的线性变化,如图 6 所示。随着沉降量的增加,波谷位置整体向更远的传播距离方向移动,且其位移幅度与沉降量之间保持较好的线性

对应关系。这种线性规律为沉降量的判定提供了直接的观测依据。

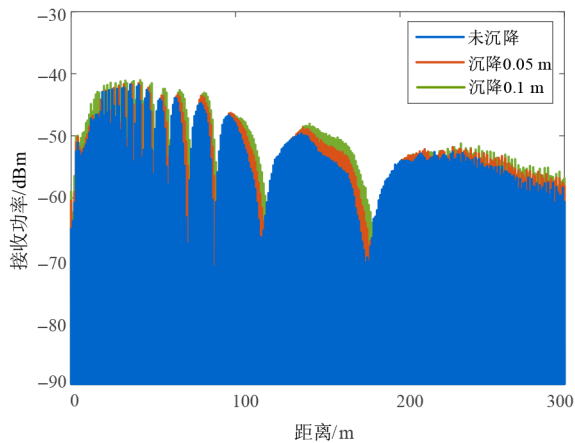


图6 不同沉降量下接收功率信号曲线

Figure 6 Received power versus distance under different settlement magnitudes

在“距离-干涉偏移”变化图中,这一波谷位置的线性漂移表现为干涉偏移曲线的持续累积增长,如图7所示。结果表明,互相关函数提取的干涉偏移结果与实验中观测到的波谷位置变化在趋势上保持一致,进一步说明其在实际环境下的可行性和鲁棒性。

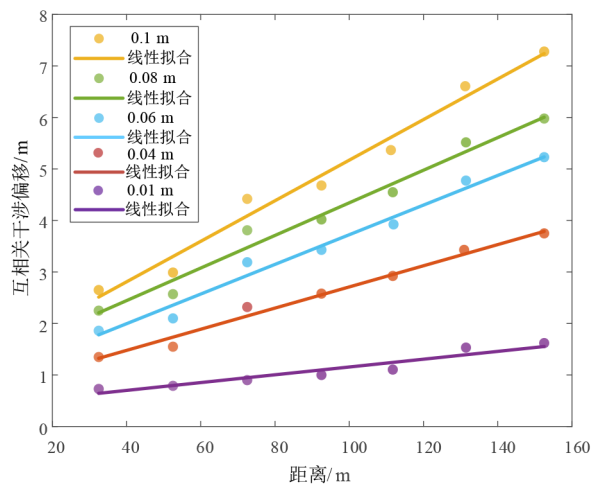


图7 不同沉降量下互相关干涉偏移曲线

Figure 7 Cross-correlation interference offset curves under different settlement magnitudes

进一步分析实验数据,通过线性拟合提取了不同沉降量下的干涉偏移斜率,并将其与对应的沉降量建立了映射关系,构建了“斜率-沉降量”的反演模型。拟合结果显示,沉降量与干涉偏移斜率之间呈显著单调关系,拟合优度较高,决定系数 $R^2$ 达到0.94,结果表明该模型在沉降量预测和反演方面具有较高精度,并表现出良好的稳定性和鲁棒性。

在实际应用中,可通过采集当前轨道段的接收功率曲线,并与未沉降时的基准信号进行互相关干涉偏移分析,得到该段轨道的“距离-互相关干涉偏移”分布情况。再提取干涉偏移斜率代入预先建立的反演模型,即可无接触、实时地估算轨道沉降量。

实验结果表明,该方法在1~10 cm的沉降范围内反演误差不超过 $\pm 0.5$  cm,实现了毫米级精度。同时,系统对不同通道和环境条件具有良好的鲁棒性,能够根据实时监测结果自动识别异常状态并触发报警,为轨道运维管理和安全保障提供可靠的技术支持。

## 4 结论

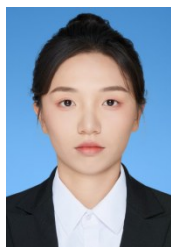
本文提出了一种基于毫米波通信信号干涉信息分析的轨道沉降监测方法。该方法通过对毫米波通信系统接收功率信号进行路径损耗补偿和零相位滤波,实现有效的信号预处理;随后采用自适应主频提取与互相关分析技术,准确估计因轨道沉降引起的通信信号干涉偏移变化,并建立了干涉偏移与沉降量之间的线性映射模型。仿真及实际结果表明,该方法具有良好的线性单调性和稳定性,使得沉降量与互相关干涉偏移拟合斜率之间的关系可作为可靠的沉降反演指标。实验表明1~10 cm的沉降范围内,反演误差小于 $\pm 0.5$  cm,达到了毫米级监测精度,满足了高速磁浮轨道高精度状态感知的需求。此外,该方法无需依赖导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)图像测量等辅助设备,能够直接集成于现有毫米波通信系统,实现非接触式、实时性强的轨道沉降监测,具有较高的应用价值和推广潜力。

## 参考文献

- [1] 温浩, 胡在凰, 胡玉坤. 基于SBAS技术的宁波市轨道交通沿线地面沉降监测[J]. 城市勘测, 2022(4): 162-165.  
Wen Hao, Hu Zaihuang, Hu Yukun. Land subsidence monitoring along rail transit in Ningbo based on SBAS technology[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2022(4): 162-165. (in Chinese)
- [2] Ye S J, Xue Y Q, Wu J C, et al. Progression and mitigation of land subsidence in China[J]. Hydrogeology Journal, 2016, 24(3): 685-693.
- [3] Zhang X D, Ge D Q, Ma W Y, et al. Study the land subsidence along JingHu highway (Beijing-Hebei) using PS-InSAR technique[C]//2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway: IEEE, 2011: 1608-1611.
- [4] Liu H H, Zhang Y Q, Wang R. The reason of land subsidence and prevention measures of Beijing segment of Bei-

- jing-Tianjin high-speed rail[C]//2014 Third International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications. Piscataway: IEEE, 2014: 323-325.
- [5] 杨成永,程霖,余乐,等.隧道沉降引起的轨道结构变形与脱空[J].中国铁道科学,2018,39(6):37-43.  
Yang Chengyong, Cheng Lin, Yu Le, et al. Deformation and cavity of track structure due to tunnel settlement[J]. China Railway Science, 2018, 39(6): 37-43. (in Chinese)
- [6] 丁信华.对磁浮工程技术的一些思考[J].城市轨道交通研究,2015,18(5):10-13.  
Ding Xinhua. New Ideas about the engineering technology of maglev transportation[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(5): 10-13. (in Chinese)
- [7] 杨光,王义盛,徐文礼.盾构穿越运营磁悬浮桩基施工监测技术[J].冶金管理,2021(9):111-112.  
Yang Guang, Wang Yisheng, Xu Wenli. Construction monitoring technology of magnetic suspension pile foundation for shield crossing operation[J]. China Steel Focus, 2021(9): 111-112. (in Chinese)
- [8] Vaidis M, Giguère P, Pomerleau F, et al. Accurate outdoor ground truth based on total stations[C]//2021 18th Conference on Robots and Vision. Piscataway: IEEE, 2021: 1-8.
- [9] Li G R, Zhao C Y, Yan M, et al. Estimation of surface height changes and deformation time series with improved SBAS-InSAR technique[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2025, 63: 5221613.
- [10] Shi H K, Wu Y H, Shi Y H, et al. Enhanced sea surface height estimation with interference rejection using high-frequency fully focused SAR altimetry data over island areas[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2025, 63: 4206216.
- [11] Jiang M J, Xu G, Zhou Y M, et al. Ground-based SAR imaging and interferometry using chip-cascaded millimeter-wave radar with phased-transmitting-digital-receiving array[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2025, 73(11): 9459-9471.
- [12] 丁叁叁.时速600公里高速磁浮交通系统[M].上海:上海科学技术出版社,2022.  
Ding Sansan. 600 km/h high-speed maglev transportation system[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2022. (in Chinese)
- [13] 唐爱民,刘凡,袁伟杰,等.以通信为中心的通感一体化信号设计:研究现状与展望[J].雷达学报(中英文),2025,14(4):1019-1045.  
Tang Aimin, Liu Fan, Yuan Weijie, et al. Signal design for communication centric ISAC: State of art and future aspects[J]. Journal of Radars, 2025, 14(4): 1019-1045. (in Chinese)
- [14] Li T J, Wang Y K, Yang X, et al. Reflectance measurement method with a large incident angle based on two-ray model[C]//2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC - URSI Radio Science Meeting. Piscataway: IEEE, 2024: 1853-1854.
- [15] Zhang H W. Research on time difference measurement technology based on cross correlation[C]//2023 8th International Conference on Image, Vision and Computing. Piscataway: IEEE, 2023: 859-863.
- [16] 王党卫,粟毅,马兴义.一种基于互相关处理的极点提取新算法[J].电子学报,2005,33(6):1015-1018.  
Wang Dangwei, Su Yi, Ma Xingyi. A new method of pole extraction using the cross-correlation-based processing[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6): 1015-1018. (in Chinese)
- [17] Kohler M, Saam A, Worms J, et al. Delay estimation for time synchronization of a bistatic transfer function measurement setup to single received pulses[C]//2019 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications. Piscataway: IEEE, 2019: 62-66.
- [18] Su B W, Cong L, Qin H L. Adaptive selection method for time of arrival in TDMA cluster collaborative relative positioning based on JTIDS[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 5502214.
- [19] 侯正信,王兆华,杨喜.全相位DFT数字滤波器的设计与实现[J].电子学报,2003,31(4):539-542.  
Hou Zhengxin, Wang Zhaohua, Yang Xi. Design and implementation of all phase DFT digital filter[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(4): 539-542. (in Chinese)
- [20] Donnelly D. The fast Fourier and Hilbert-Huang transforms: A comparison[C]//The Proceedings of the Multi-conference on "Computational Engineering in Systems Applications". Piscataway: IEEE, 2006: 84-88.
- [21] Alexey P, Olga P. Real time method and algorithms for fast discrete Fourier transform of discrete finite signals[C]//2024 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications. Piscataway: IEEE, 2024: 10510069.

## 作者简介



**薛敏燕** 女,2001年11月出生于新疆伊宁市。现为电子科技大学博士研究生。主要研究方向为电路与系统及信号处理。

E-mail: 202422021020@std.uestc.edu.cn



**李廷军** 男,1975年12月出生于重庆市。现为电子科技大学电子科学与工程学院副教授。主持科技部国家重点研发计划项目。主要研究方向为高速磁浮毫米波车地通信技术。中国电子学会会员编号:E190198949M。

Email: tjli@uestc.edu.cn



**杨海宁** 男,1987年12月出生于山东省潍坊市。现为电子科技大学电子科学与工程学院研究员、博士生导师。获四川省电子学会电子科学技术奖特等奖,主持科技部国家重点研发计划、国家自然科学基金面上等项目。主要研究方向为相控阵与信号处理。中国电子学会会员编号:E190183183M。

Email: hnyang@uestc.edu.cn



**田毅** 男,1983年5月出生于山西省晋中市。博士,现为中车青岛四方机车车辆股份有限公司、高速磁浮运载技术全国重点实验室正高级工程师。主要研究方向为高速磁浮运控通信集成技术。

Email: tianyi@cqsf.com