

车体垂向振动对高铁 FSO 通信性能影响的研究

缪慧敏^a, 郭记涛^a, 孟婷^a, 吴茗蔚^b, 刘喜昂^b

(浙江科技学院 a. 机械与能源工程学院; b. 信息与电子工程学院, 杭州 310023)

摘要: 为了将自由空间光(free space optical, FSO)通信技术应用于高速铁路通信,研究车体垂向振动对 FSO 通信性能的影响。首先,根据轨道不平顺功率谱密度函数推导其在频域的关系表达式,并利用逆傅里叶变换法对轨道不平顺进行仿真;然后,根据 1/4 车体 4 自由度模型的微分方程,利用拉普拉斯变换推导传递函数搭建基于传递函数的 Simulink 仿真模型;最后,通过对车体垂向位移的仿真,推导其概率密度函数表达式,并在高速铁路 FSO 通信链路中应用动态束腰控制方案,即在发射端实时调整束腰。仿真结果验证了车体垂向位移的概率密度函数表达式,证明动态束腰控制方案在高速铁路 FSO 通信链路中性能优于传统的固定束腰控制方案。因此,车体垂向位移的概率密度函数和动态束腰控制方案可为高铁 FSO 通信研究提供理论基础。

关键词: 轨道不平顺;车体垂向振动;指向性误差;自由空间光通信

中图分类号: U285.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8798(2021)06-0441-07

Study on impact of carriage vertical vibration on high-speed train FSO communication performance

MIAO Huimin^a, GUO Jitao^a, MENG Ting^a, WU Mingwei^b, LIU Xi'ang^b

(a. School of Mechanical and Energy Engineering; b. School of Information and Electronic Engineering,
Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: To apply FSO (free space optical) communication technology to HST (high-speed train) communication, the impact of carriage vertical vibration on FSO communication performance has been explored. Firstly, the expression of track irregularity in frequency domain was derived in accordance by virtue of the spectral density function of track irregularity, and the inverse Fourier transform method was used to simulate the track irregularity.

收稿日期: 2020-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(61571316);浙江省教育厅一般科研项目(研究生专项)(F703106J11);浙江科技学院课堂教学改革项目(2018-ky3)

通信作者: 吴茗蔚(1977—),女,浙江省杭州人,教授,博士,主要从事无线通信和光通信传输技术研究。E-mail: wu_mingwei2004@aliyun.com。

Secondly, based on the differential equation of the 1/4 carriage model with 4 degrees of freedom, the transfer function was derived using Laplace transform, thereupon establishing the Simulink simulation model. Finally, the PDF (probability density function) was derived by simulating the vertical displacement of carriage. And the dynamic beam waist adjustment was applied to the transmitter of HST FSO communication link, where the beam waist was adjusted in real-time at the transmitter. Simulation results verify the PDF expression of the carriage vertical displacement and prove the performance advantage of the dynamic beam waist adjustment scheme over the conventional fixed beam waist adjustment scheme in HST FSO communication link. The PDF of carriage vertical displacement and the dynamic beam waist adjustment scheme can provide a theoretical basis for the study of high-speed train FSO communication.

Keywords: track irregularity; carriage vertical vibration; pointing error; FSO communication

面对日益增长的交通需求,高速铁路(以下简称高铁)可作为缓解需求的一种重要解决方案,它具有绿色、环保、节能的优点^[1]。截至 2020 年 7 月底,中国高铁运营里程达到 14.14 万 km^[2],根据 2016 年修订的《中长期铁路网规划》,预计 2025 年铁路网规模达到 17.5 万 km 左右^[3]。随着高铁的快速发展,传统的无线射频(radio frequency, RF)技术因存在多普勒频移、带宽低、干扰强等缺点,已经不能满足人们高质量通信的需求。而自由空间光(free space optical, FSO)通信技术可对现有 RF 技术进行补充,它具有保密性好、抗电磁波干扰^[4-5]、部署快捷^[6]、不需要频谱许可证^[7-8]等优点,不受多普勒频移的影响,并且有足够的带宽来满足数据传输需求。2007 年, Kotake 等^[9]提出了一种在列车和地面之间使用 FSO 的地对车通信系统,并证明该系统是一种很有发展前景的列车通信系统。Fan 等^[10]和 Mabrouk 等^[11]分别提出了旋转收发机和多发发射机方案,可减少沿轨道部署的基站总数,从而降低了建设成本。Fathi-Kazerooni 等^[12]和 Mohan 等^[13]分别提出了双波长和分段多波束 2 种覆盖模型,为列车与基站之间提供无缝连接和切换,因而提高了地对车通信系统性能。高铁地对车 FSO 通信链路与传统 FSO 通信链路最大的区别在于列车一直处在前进的运动状态中,并伴随着不可忽略且难以准确估计的机械振动。由于列车的运动方向和速度都是可控且已知的,所以可利用捕获、瞄准和跟踪(acquisition, tracking and pointing, ATP)系统^[14-15]修正由于列车的前进运动导致的发射机与探测器在水平方向上的偏移,因此可假设长时间内水平方向上探测器处在发射机发出光束的中心。然而高铁车体垂向振动对通信链路所带来的影响鲜有研究提及,故本研究探索高铁车体移动过程中垂向位移的统计特性,并利用动态束腰控制方案来降低车体垂向振动对通信链路性能的影响。

1 地对车 FSO 通信链路

一个典型的高铁地对车 FSO 通信链路如图 1 所示,在铁轨的一侧建立基站安装发射机,在列车顶部放置接收机,发射机发出高斯光束被接收机接收。图 1 中: z 为发射机与接收机之间的传输距离; ω_0 为 $z=0$ 时高斯光束的光斑半径,即束腰; ω_z 为高斯光束的光斑半径。

根据高斯光束传输的特性,随着传输距离 z 的变化,高斯光束的光斑半径 ω_z 表达式^{[16]11952}为

$$\omega_z = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2} \quad (1)$$

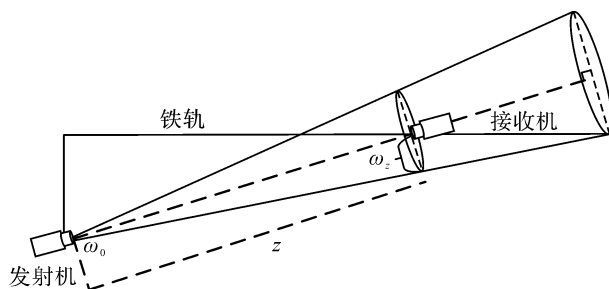


图 1 高铁地对车 FSO 通信链路

Fig. 1 HST ground-to-train FSO communication link

式(1)中: λ 为发射激光波长。图2为高斯光束截面, a 为光学探测器C的半径; d 为光学探测器C中心与高斯光束中心的偏移距离。在车体静止的情况下, $d=0$;在车体运动的情况下,列车前进会导致水平方向上的偏移,该偏移仅与前进时间 t 和车速 v 有关,为非随机变量,可利用ATP系统进行校准;相比车体垂向振动所导致的偏差,车体横向振动所导致的偏差较小^[17],可忽略不计,因此 d 等价于高速列车车体垂向位移。将接收端光学探测器C接收功率和光斑总功率的比例定义为指向性误差 h_p ,可用Marcum Q函数表示^[18]为

$$h_p = 1 - Q_{\text{Mar}}\left(\frac{2|d|}{\omega_z}, \frac{2a}{\omega_z}\right). \quad (2)$$

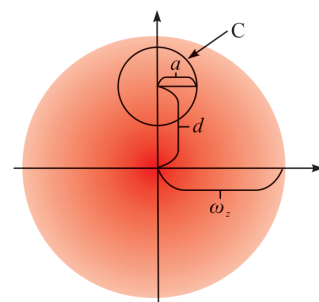


图2 高斯光束截面

Fig. 2 Gaussian beam cross section

2 车体垂向振动模型

2.1 轨道高低不平顺仿真

高铁轨道的轨面并非处于理想的平顺状态,列车行驶过程中带来的轨面的损耗、铁轨的焊接、路基的弹性不均匀等问题都会造成轨道不平顺^[19]。通过大量实际数据的测量,已有针对不同轨道拟合出的功率谱密度(power spectral density, PSD)函数来描述轨道不平顺状态。以高速无砟轨道为例,其轨道高低不平顺表达式为 $S_1(F)=A/F^m$ ^{[20]1}, F 为空间频率, A 、 m 为拟合系数,参数值及PSD函数曲线参见TB/T 3352—2014《中华人民共和国铁道行业标准》^{[20]2,4}。为了进一步研究PSD函数,我们需要得到以频率 f 为变量的轨道高低不平顺表达式 $S_2(f)$ 。利用PSD函数在相应单位带宽中均方值相等($S_1(F)dF=S_2(f)df$)的原理^[21],再根据空间频率 F 、频率 f 及车速 v 之间的关系 $f=Fv$,可得高速无砟轨道PSD函数的频域表达式为

$$S_2(f) = Af^{-m}v^{m-1}. \quad (3)$$

通过估计功率谱的Blackman-Turkey法,有频谱模值与PSD函数之间的关系^{[22]140}如下:

$$|Z_v(k)| = |\text{DFT}[z_v(n)]| = \sqrt{N^2 \times S_2(k)} = N \sqrt{\Delta f S_2(f = k\Delta f)} \left(k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2}\right). \quad (4)$$

式(4)中: $z_v(n)$ 为轨道高低不平顺时间序列; $Z_v(k)$ 为 $z_v(n)$ 的频谱;DFT为离散傅里叶变换; Δf 为频率采样间隔; N 为时域与频域的采样点数。由于 $z_v(n)$ 为随机过程,其振幅相位皆具有随机性。设 $n(k)$ 为复高斯白噪声,在式(4)频谱模值基础上乘以 $n(k)$,可得轨道高低不平顺频谱

$$Z_v(k) = n(k) |Z_v(k)| = Nn(k) \sqrt{\Delta f S_2(f = k\Delta f)} \left(k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2}\right). \quad (5)$$

利用离散傅里叶变换的对称性 $Z_v(k)=Z_v^*(N-K)$,对 $Z_v(k)$ 进行共轭对称变换,可得 $Z_v(k)(k=0, 1, \dots, N-1)$ 。对 $Z_v(k)$ 进行逆傅里叶变换可得 $z_v(n)$ 。

取车速 $v=100$ m/s,波长范围为 $2\sim 200$ m(即频率范围 $0.5\sim 50$ Hz),时间采样间隔 $\Delta t=0.001$ s,采样点数 $N=2^{14}$ 进行仿真。图3为高速无砟轨道的高低不平顺时域样本。

2.2 车体模型

图4为1/4车体4自由度模型。 m_1 为单个转向架质量的1/2; m_2 为每节满载车体质量的1/4; K_1 、 K_2 为一系及二系悬架弹簧对应的刚度,用来缓和轨道不平顺所带来的冲击; C_1 、 C_2 为一系及二系垂向减振器对应的阻尼系数,用来减弱弹簧震荡; K_{d1} 、 K_{d2} 为垂向减振器端部连接对应的刚度; z_v 为轨道高低不平顺输入; z_{d1} 、 z_{d2} 为一系及二系垂向减振器中的活塞在缸筒内的垂向位移; z_1 为转向架的垂向位移; z_2 为车体垂向位移。评价人体

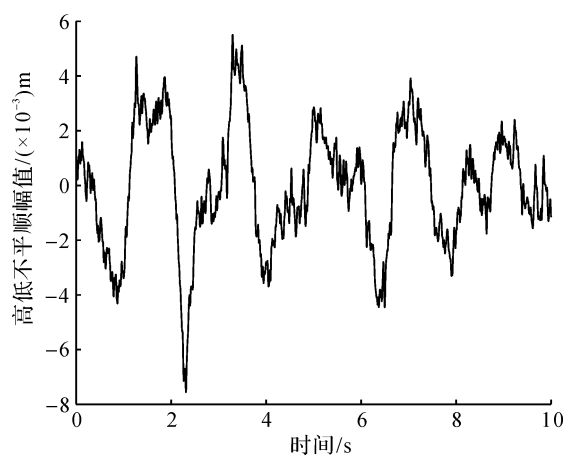


图3 高速无砟轨道高低不平顺时域样本

Fig. 3 Time domain samples of high-speed ballastless track vertical profile irregularity

舒适性的标准为加权加速度均方根值,通过最小化车体垂向振动加权加速度均方根值得最优阻尼比: $\xi_1=0.33, \xi_2=0.22$ ^{[23]58}。最优阻尼比与各悬架系数之间的关系为: $C_1=2\xi_1\sqrt{K_1m_1}, C_2=2\xi_2\sqrt{K_2m_2}$ 。

根据 D'Alembert's 原理,对车体所受动力进行分析,得到垂向振动微分方程组^{[23]56}:

$$\begin{cases} m_2\ddot{z}_2 + K_2(z_2 - z_1) + K_{d2}(z_2 - z_{d2}) = 0; \\ C_2(\dot{z}_{d2} - \dot{z}_1) - K_{d2}(z_2 - z_{d2}) = 0; \\ m_1\ddot{z}_1 + C_2(\dot{z}_1 - \dot{z}_{d2}) + K_1(z_1 - z_v) + \\ K_{d1}(z_1 - z_{d1}) + K_2(z_1 - z_2) = 0; \\ C_1(\dot{z}_{d1} - \dot{z}_v) - K_{d1}(z_1 - z_{d1}) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

各悬架的详细参数见文献[23]⁵⁸。

2.3 Simulink 仿真模型

利用 MATLAB 软件中的 Simulink 工具搭建车体仿真模型(图 5),其中图 5(a)为根据式(6)所搭建的微分方程 Simulink 仿真模型。由于搭建模型的过程比较繁琐,当车体模型较复杂时,搭建模型的难度将会大大增加,因此我们利用车体垂向位移与轨道不平顺之间的传递函数来搭建车体的 Simulink 仿真模型,可降低搭建模型的难度。

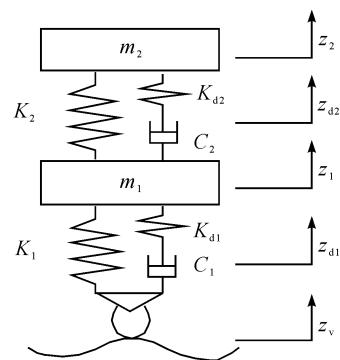
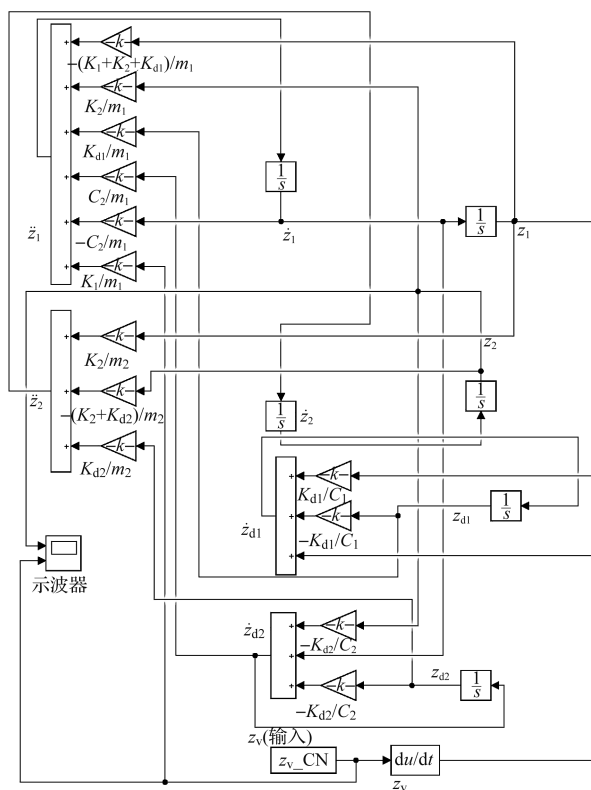
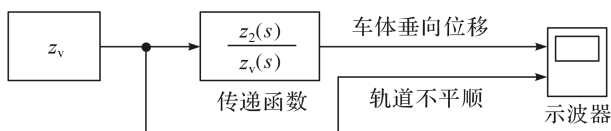


图 4 1/4 车体 4 自由度模型

Fig. 4 1/4 carriage model with 4 degrees of freedom



(a) 微分方程Simulink仿真模型



(b) 传递函数Simulink仿真模型

图 5 Simulink 仿真模型

Fig. 5 Simulink simulation model

利用拉普拉斯变换,将式(6)从实数域转换到复数域:

$$\begin{cases} -K_2 Z_1(s) + (K_2 + K_{d2} + m_2 s^2) Z_2(s) - K_{d2} Z_{d2} = 0; \\ -C_2 s Z_1(s) - K_{d2} Z_2(s) + (K_{d2} + C_2 s) Z_{d2}(s) = 0; \\ (K_{d1} + K_2 + K_1 + C_2 s + m_1 s^2) Z_1(s) - K_2 Z_2(s) - K_{d1} Z_{d1}(s) - C_2 s Z_{d2}(s) - K_1 Z_v(s) = 0; \\ -K_{d1} Z_1(s) + (K_{d1} + C_1 s) Z_{d1}(s) - C_1 s Z_v(s) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, s 为复变量。求解式(7)中 $Z_2(s)$ 与 $Z_v(s)$ 之比,即为车体垂向位移与轨道不平顺之间的传递函数

$$H(s) = \frac{Z_2(s)}{Z_v(s)} = \frac{M_0 s^2 + M_1 s + M_2}{D_0 s^6 + D_1 s^5 + D_2 s^4 + D_3 s^3 + D_4 s^2 + D_5 s + D_6} \quad (8)$$

式(8)中:

$$\begin{cases} M_0 = C_1 C_2 (K_1 + K_{d1}) (K_2 + K_{d2}); \\ M_1 = C_1 K_2 K_{d2} (K_1 + K_{d1}) + C_2 K_1 K_{d1} (K_2 + K_{d2}); \\ M_2 = K_1 K_{d1} K_2 K_{d2}; \\ D_0 = C_1 C_2 m_1 m_2; \\ D_1 = m_1 m_2 (C_1 K_{d2} + C_2 K_{d1}); \\ D_2 = C_1 C_2 K_{d2} (m_1 + m_2) + K_{d1} K_{d2} m_1 m_2 + C_1 C_2 [K_1 m_2 + K_{d1} m_2 + K_2 (m_1 + m_2)]; \\ D_3 = C_1 K_1 K_{d2} m_2 + C_1 K_{d1} K_{d2} m_2 + C_1 K_2 K_{d2} (m_1 + m_2) + C_2 K_{d1} K_{d2} (m_1 + m_2) + \\ C_2 K_{d1} K_2 (m_1 + m_2) + C_2 K_1 K_{d1} m_2; \\ D_4 = K_1 K_{d1} K_{d2} m_2 + K_{d1} K_2 K_{d2} m_1 + K_{d1} K_2 K_{d2} m_2 + C_1 C_2 (K_1 K_2 + K_1 K_{d2} + K_{d1} K_2 + K_{d1} K_{d2}); \\ D_5 = C_1 K_1 K_2 K_{d2} + C_1 K_{d1} K_2 K_{d2} + C_2 K_1 K_{d1} K_2 + C_2 K_1 K_{d1} K_{d2}; \\ D_6 = K_1 K_2 K_{d1} K_{d2}. \end{cases}$$

图5(b)为根据式(8)建立的车体传递函数 Simulink 仿真模型。将2.1节所得的轨道高低不平顺仿真数值 z_v 作为输入,经过车体传递函数 Simulink 仿真模型,可得输出车体垂向位移 z_2 ,轨道不平顺和车体垂向位移对比如图6所示。由图6可知,微分方程 Simulink 仿真模型与传递函数 Simulink 仿真模型输出的 z_2 吻合,所以传递函数法也可得到 z_2 ,同时大大降低仿真复杂度。另外, z_2 比 z_v 曲线变得光滑,这是为了乘客的舒适性,以最小化加速度为目的进行的模型参数优化。 z_2 曲线变得光滑表明加速度减少,乘客舒适性提升。但在最小化加速度的情况下, z_2 幅值变化范围大于 z_v ,因此需要分析 z_2 对通信链路的影响。

2.4 垂向位移仿真数据的统计特性

对于2.3节的车体垂向位移离散序列 $z_2(n)$,估计其均值^{[24]90}为

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N z_2(n). \quad (9)$$

估计其方差^{[24]159}为

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N |z_2(n) - \hat{\mu}|^2. \quad (10)$$

通过统计大量仿真数据, $\hat{\mu}$ 估计值为0, $\hat{\sigma}^2$ 估计值为 1.05×10^{-5} 。

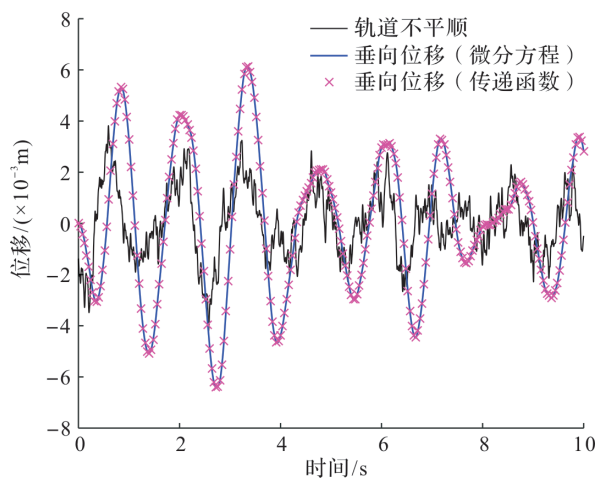


图6 轨道不平顺和车体垂向位移对比

Fig. 6 Comparison between track irregularity and carriage vertical displacement

对车体垂向位移 z_2 进行概率密度函数(probability density function, PDF)统计特性分析,车体垂向位移概率密度函数如图 7 所示。由图 7 可知,车体垂向位移 PDF 与高斯分布曲线重叠,由此可发现 z_2 服从高斯分布。因此可定义 z_2 的 PDF:

$$f(z_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\hat{\sigma}} \exp\left(-\frac{(z_2 - \hat{\mu})^2}{2\hat{\sigma}^2}\right). \quad (11)$$

在 2.1~2.3 节的研究中,为了求得 z_2 需要经过轨道不平顺仿真和车体模型仿真过程,中间的细节繁琐不便。但由 z_2 的 PDF 可以通过仿真快速得到 z_2 ,中间过程大大缩短,减少了仿真时间。以 $N=2^{25}$ 数量级为例,按照传统方法经轨道不平顺仿真、车体模型仿真过程得 z_2 需约 95 s,直接由 z_2 的 PDF 仿真得 z_2 需约 0.5 s,仅为前者的 0.53%,由此可见 z_2 的 PDF 仿真法的优越性。另外,在高铁激光通信领域,通过 z_2 的 PDF 可以推导指向性误差的 PDF,这是信道建模的关键步骤,故有重要的研究意义。

3 动态束腰控制方案性能仿真

采用开关键控(on-off keying, OOK)调制方式,系统瞬时误码率^[25]为

$$P_e(z_2) = Q\left(\sqrt{\frac{2(h_p P_t R)^2}{N_0 R_{\text{data}}}}\right). \quad (12)$$

式(12)中: $Q(\cdot)$ 为高斯 Q 函数; R 为光学接收器响应度,取 0.5; P_t 为发射功率,取 39.810 7 mW(16 分贝毫瓦); N_0 为接收端噪声单边功率谱密度,取 2×10^{-14} A/Hz; R_{data} 为数据传输速率,取 1 Gb/s^[26]。

在考虑车体垂向位移 z_2 的所有可能值情况下,利用式(11)~(12)可得系统平均误码率^{[16]11954}

$$P_e = \int_0^\infty P_e(z_2) f(z_2) dz_2. \quad (13)$$

在传统的固定束腰控制方案中, ω_0 为固定值,在确定的传输距离下, ω_z 不变。根据式(13),取仿真参数 $z=1$ km, $a=10$ cm, $\lambda=1\ 550$ nm^[26],固定束腰控制方案下的系统平均误码率如图 8 所示。

在动态束腰控制方案中, ω_0 为动态数值, ω_z 随 ω_0 而变化,文献[16]¹¹⁹⁵⁶推导其 ω_z 的最优值:

$$\omega_z^{\text{opt}} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\lambda z}{\pi}}, & z_2 < a; \\ \max\left\{\sqrt{\frac{2\lambda z}{\pi}}, \sqrt{\frac{4z_2 a}{\ln\left(\frac{z_2 + a}{z_2 - a}\right)}}\right\}, & z_2 \geq a. \end{cases} \quad (14)$$

将 ω_z^{opt} 代入式(13),可使得 P_e 最小化。根据式(13)~(14),取与固定束腰控制方案仿真相同的参数,动态束腰控制方案下的系统平均误码率如图 8 所示。由图 8 可知,动态束腰控制方案的系统性能明显优于传统的固定束腰控制方案,并且动态束腰控制方案的性能较稳定。因此动态束腰控制方案可以应用于高铁地对车通信系统来提高系统性能。

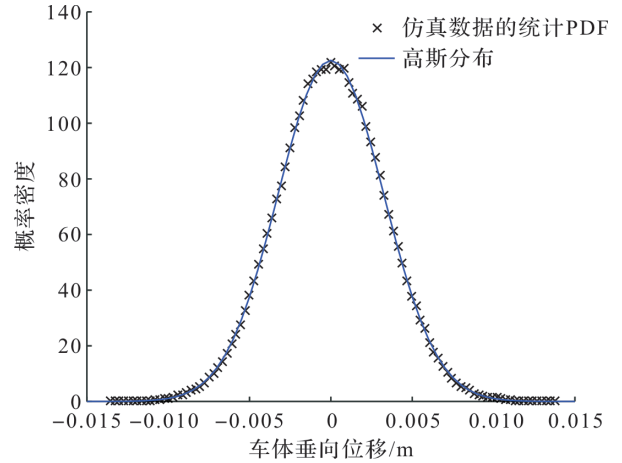


图 7 车体垂向位移概率密度函数

Fig. 7 PDF of carriage vertical displacement

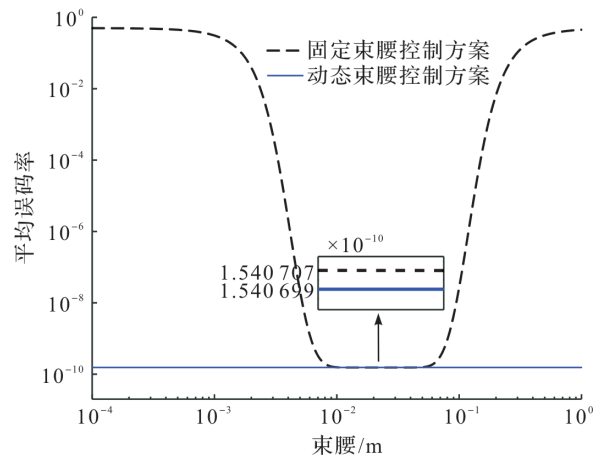


图 8 固定及动态束腰控制方案下的系统平均误码率

Fig. 8 Average bit error rates under schemes of fixed and dynamic beam waist adjustment systems

4 结 语

本文研究了高铁地对车通信系统,通过对车体进行垂向受力分析,利用拉普拉斯变换推导出车体垂向位移与轨道不平顺之间的传递函数,可以方便快捷地搭建车体传递函数 Simulink 模型,生成车体垂向位移数据。通过统计,进一步得出了车体垂向位移的概率密度函数表达式,简化了车体垂向振动位移的仿真。采用动态束腰控制方案,将其应用于高铁地对车通信系统,并通过仿真验证了本方案性能的优越性。

参考文献:

- [1] SUN S, DENG H, LI W, et al. Improving the critical speeds of high-speed trains using magnetorheological technology[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(11):1.
- [2] 曹昆,邓志慧. 中国铁路营业里程超 14 万公里[N]. 人民网, 2020-08-10(1).
- [3] 王同军. 中国智能高速铁路体系架构研究及应用[J]. 铁道学报, 2019, 41(11):1.
- [4] 胡渝,刘华. 空间激光通信技术及其发展[J]. 电子科技大学学报, 1998, 27(5):453.
- [5] 郭洁. 自由空间光通信调制方法性能分析[J]. 信息记录材料, 2018, 19(6):43.
- [6] 韩睿. 浅谈自由空间光通信技术及其应用[J]. 中国新通信, 2018, 20(17):120.
- [7] KAUSHAL H, KADDOUM G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1):57.
- [8] 任登娟,陈名松,黄雪明. 自由空间光通信的现状及其发展趋势[J]. 大众科技, 2006, 88(2):56.
- [9] KOTAKE H, HARUYAMA S, NAKAGAWA M, et al. BER characteristic of ground-to-train communication system using free-space optics technology[C]//International Conference on Transparent Optical Networks. Rome: IEEE, 2007:165.
- [10] FAN Q, TAHERI M, ANSARI N, et al. Reducing the impact of handovers in ground-to-train free space optical communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(2):1292.
- [11] MABROUK W A, ABDULLAH M F L, GISMALLA M S M. Enhancement of link range for FSO ground to train communications using multiple transmitters concept[C]//International Conference on Information Science and Communication Technology. Karachi: IEEE, 2019:1.
- [12] FATHI-KAZEROONI S, KAYMAK Y, ROJAS-CESSA R, et al. Optimal positioning of ground base stations in free-space optical communications for high-speed trains[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(6):1940.
- [13] MOHAN N, ABADI M M, GHASSEMLOOY Z, et al. Sectorised base stations for FSO ground-to-train communications[J]. IET Optoelectronics, 2020, 14(5):312.
- [14] 张敏,佟首峰,滕云杰. 空间激光通信单探测器复合跟踪控制技术研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(8):983.
- [15] 王伟,刘云清,董岩,等. 空间激光通信中复合跟踪技术研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(4):403.
- [16] SONG T, WANG Q, WU M, et al. Performance of laser inter-satellite links with dynamic beam waist adjustment[J]. Optics Express, 2016, 24(11):11952, 11954, 11956.
- [17] 郑玉强. 高速列车横向半主动控制策略研究与分析[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2019.
- [18] WANG Q, SONG T, WU M, et al. Influence of pointing errors on error probability of inter-satellite laser communications[C]//21st OptoElectronics and Communications Conference held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching. Niigata: IEEE, 2018:2.
- [19] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 4 版. 北京:科学出版社, 2015:95.
- [20] 国家铁路局. 中华人民共和国铁道行业标准:TB/T 3352—2014[S]. 北京:中国铁道出版社, 2014:1-2, 4.
- [21] GARG V K, DUKKIPATI R V. Dynamics of railway vehicle systems[M]. New York: Academic Press, 1984:25.
- [22] 陈果,翟婉明. 铁路轨道不平顺随机过程的数值模拟[J]. 西南交通大学学报, 1999, 34(2):140.
- [23] 周长城,于曰伟,赵雷雷. 高铁转向架垂向悬挂系统阻尼比的协同优化[J]. 大连交通大学学报, 2016, 37(4):56, 58.
- [24] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社, 2008:90, 159.
- [25] SONG T, KAM P Y. Efficient symbol detection for the FSO IM/DD system with automatic and adaptive threshold adjustment: the multi-level PAM case[C]//International Conference on Communications in China. Shenzhen: IEEE, 2019:53.
- [26] FARID A A, HRANILOVIC S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(7):1707.