文章编号:1673-0291(2026)04-0157-08 DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.20250048

基于非平稳几何随机模型的真空管高速列车信道特性分析

梁允馨,刘 留,王 凯,高一博,周圣钊
(北京交通大学 电子信息工程学院,北京 100044)

摘 要:真空管高速列车能以超过1 000 km/h的超高速度在受限的狭长管道中行驶.针对狭长真空管环境的密闭性和列车高速运行的非平稳性,提出一种基于几何随机建模方法(Geometry-Based Stochastic Model,GBSM),并引入一种菲涅尔区的聚类判断机制,用于分析真空管列车到地面的无线通信信道特性.首先,针对受限狭长管道特殊形状,设定几何框架,建立三维直角坐标系;其次,利用GBSM方法将该信道进行几何表征;再次,基于菲涅尔区约束判定有效散射簇,获得到达方位角与到达仰角的统计分布规律;最后,推导信道冲激响应(Channel Impulse Response,CIR)、多普勒频移以及信道时空相关函数,包括空间互相关函数(Cross-Correlation Function,CCF)和时间自相关函数(Auto-Correlation Function, ACF),并分析其时频空域相干特性.仿真结果表明:真空管密闭狭长结构带来强烈波导反射效应,致使管道内不同收发链路信道时空相关性极强,ACF稳定维持在0.967 1以上,CCF存在多处高相关峰值,多链路间信道耦合程度显著偏高,为真空管高速列车车地通信的天线布局与时频同步算法设计提供工程应用价值.

关键词:无线通信;真空管高速列车;非平稳信道特性;GBSM;散射簇
中图分类号:U285 **文献标志码**:A

Analysis of channel characteristics for high-speed vacuum-tube trains based on nonstationary geometric stochastic models

Liang Yunxin, *Liu Liu*, *Wang Kai*, *Gao Yibo*, *Zhou Shengzhao*
(School of Electronic Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: High-speed vacuum-tube trains can travel at speeds exceeding 1 000 km/h through confined, elongated tubes. To capture the enclosed nature of the long, narrow vacuum-tube environment and the nonstationarity caused by high-speed train operation, a Geometry-Based Stochastic Model (GBSM) incorporating a Fresnel-zone-based cluster identification mechanism is proposed to analyze the train-to-ground wireless channel. First, a geometric framework and a three-dimensional Cartesian coordinate system are established for the confined, elongated tube. Second, the channel is geometrically characterized using the GBSM. Third, valid scattering clusters are identified under Fresnel-zone

收稿日期:2025-04-03;**修回日期**:2025-09-12
基金项目:北京市自然科学基金(4242009);国家自然科学基金(62221001)
Foundation items: Beijing Municipal Natural Science Foundation (4242009); National Natural Science Foundation of China (62221001)
第一作者:梁允馨(2001—),女,山东日照人,硕士生.研究方向为高铁无线通信.**email**:25115030@bjtu.edu.cn.
通信作者:刘留(1981—),男,云南昆明人,教授,博士,博士生导师.**email**:liuliu@bjtu.edu.cn.

引用格式:梁允馨,刘留,王凯,等.基于非平稳几何随机模型的真空管高速列车信道特性分析[J].北京交通大学学报,2026,50(4):157-164.
Liang Yunxin, Liu Liu, Wang Kai, et al. Analysis of channel characteristics for high-speed vacuum-tube trains based on nonstationary geometric stochastic models[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(4): 157-164. (in Chinese)

constraints, and the statistical distributions of the azimuth and elevation angles of arrival are obtained. Finally, the Channel Impulse Response (CIR), Doppler shift, and spatiotemporal correlation functions, including the spatial Cross-Correlation Function (CCF) and temporal Auto-Correlation Function (ACF), are derived, and the coherence characteristics in the time, frequency, and spatial domains are analyzed. Simulation results show that the confined, elongated vacuum-tube structure produces a strong waveguide reflection effect, resulting in extremely high spatiotemporal correlations among different transmitter-receiver links within the tube. The ACF remains above 0.967 1, the CCF exhibits multiple high-correlation peaks, and channel coupling among multiple links is pronounced. These findings provide practical guidance for antenna layout and time-frequency synchronization algorithm design in train-to-ground communication systems for high-speed vacuum-tube trains.

Keywords: Wireless communication; High-speed vacuum-tube train; Nonstationary channel characteristics; GBSM; Scattering cluster

近十年来,我国高速铁路建设不断加速推进,高速铁路系统已成为连接各大城市、促进区域经济一体化的重要基础设施.随着运行速度的不断提升,目前机械摩擦、气动阻力和噪声是制约陆上轮轨技术快速发展的主要因素[1].真空管高速列车作为一种前沿的交通创新概念,可以突破目前轮轨运输环境对列车速度的限制,在长而窄的管道内实现列车以1 000 km/h超高速运行[2],可推动构建大中城市间的1~4 h交通圈,是未来交通创新变革的关键力量.

目前,国际上已开展多项商业化与试验性研发项目[3].在国内方面,中国航天科工集团于2017年宣布启动4 000 km/h“高速飞行列车”研究论证[4],于2024年在大同完成全尺寸试验线的低真空集成演示;中国航天三院于2021年联合筹建了高速飞行列车项目实验室以开展关键技术研究[5].

真空管高速列车中封闭金属管空间和超高终端速度的独特场景给车地无线通信系统的建模、设计、分析和评估带来许多挑战[6].这不仅要求通信系统具备极高的数据传输速率和可靠性,还必须适应受限的狭长真空管道环境条件.由于列车的高速运行,任何微秒级的通信中断都可能引发严重后果,这使传统无线通信方案在这一特殊场景下面临巨大挑战.

目前,国内外针对受限空间与高速移动场景的无线信道建模方法可分为传统统计建模、确定性建模与半确定性建模3类.传统统计建模方法依托实测数据拟合信道统计参数,模型结构简单、仿真效率高,但高度依赖实测数据且物理机理缺失,难以适配真空管道强波导效应和强受限多径的特殊传播环境,无法精准表征超高速运动下信道的瞬时非平稳变化特性.确定性建模方法基于电波传播物理机理并结合场景几何参数精准表征信道特性,代表性方法为射线追踪(Ray Tracing, RT)、传播图理论等.文献[7-8]针对真空管环境下的衰落特性展开了深入探究,基于RT研究大尺度和小尺度衰落特性,通过对4种不同毫米波频段下这两种衰落特性进行对比分析,得到衰落规律.半确定性建模方法兼顾物理机理的可解释性与仿真高效性,该方法通过抽象散射体几何分布、结合电磁波传播规律模拟信道动态演化,有效弥补了纯统计模型物理性不足、纯确定性模型复杂度高的缺陷.文献[9]提出一种基于三维几何的随机模型,用于在矩形隧道中捕获1.8 GHz无线电信道的非平稳性.文献[10]提出一种新的基于非平稳几何的随机模型,用于开发和测试车对车的通信系统,该模型考虑了三维散射环境并适配三维速度.文献[11]在真空管道内应用几何随机建模方法(Geometry-Based Stochastic Model,GBSM)提出了一种新的非平稳信道模型.文献[12]融合传播图理论、朗伯散射模型与几何绕射理论,修正管道内信号传播路径与车体遮挡损耗.

宽带随机性信道模型已将簇的概念纳入其中[13].簇在信道模型里的重要性日益凸显,它与物理传播环境紧密相关,为深入探究二者关系,文献[14]借助环境图信息,巧妙融合了随机模型和确定性模型,创新性地提出一种基于“簇核”的信道模型.在簇的构建和分类方面.文献[15]针对车对车(Vehicle to Vehicle,V2V)通信场景,提出一种双簇散射体架构的三维几何随机信道模型,该模型包含直射路径、单跳路径和多跳路径.文献[16]依据障碍物构建散射簇,并从移动性的角度出发,将其划分为静态簇和动态簇,这种分类方式为分析不同性质的簇对信道的影响提供了新视角.针对毫米波大规模多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output,MIMO)信道,文献[17]提出一种新的基于三维簇的第六代模型,

成功捕捉到在时域和空间域中平滑一致的出生和死亡的集群.文献[18]提出一种创新的簇生成技术,该技术基于菲涅尔区域原理.通过这一概念能够更好地理解波在传播过程中的复杂变化,尤其是在不同环境下的传播特性,为研究波的传播规律提供了有力的理论支撑.

目前,现有各类信道建模方法难以完整刻画真空管道独有的波导传播效应,缺乏适配狭长密闭管道几何特征的散射点判定建模规则,并且菲涅尔区聚类方法虽在其他场景成熟,但尚未广泛落地于真空管道场景.本文旨在针对狭长真空管道环境构建一套适用于真空管列车到地面无线通信的信道模型.该方法不仅能够集成GBSM的优势,还针对真空管道的特殊环境条件进行优化,利用GBSM并引入基于菲涅尔区的散射簇生成与判断机制,对信道特性进行深入分析.相较于文献[19]中对所有信号传播路径能量统计的烦琐计算与高复杂度而言,本文利用菲涅尔区对散射簇进行生成与判断,可有效简化计算流程,并采用非平稳信道模型捕捉列车高速移动过程中信道特性的快速变化,得到信道冲激响应(Channel Impulse Response, CIR)、空间互相关函数(Cross-Correlation Function, CCF)和时间自相关函数(Auto-Correlation Function, ACF)等关键参数,为进一步探索真空管道内的无线通信机制提供理论依据.

1　系统模型

本文设计了一种基于GBSM的真空管列车到地面无线通信的信道模型.GBSM能够参数化描述传播环境的空间特征和散射体分布,从而有效表征信号在复杂环境中的多径传播特性.这种建模方法因其兼具几何精确性与随机统计性,适用于真空管高速列车的信道分析.

在真空管密闭环境中,虽然金属管壁会引发强烈的镜面反射,但与传统开放空间无线信道相比,其传播特性具有3个显著的差异:受限狭长的轨道空间结构使得多径分量主要来源于固定位置的管壁反射,显著降低了随机散射体的影响;近似真空状态消除了大气吸收和降雨衰减等效应;规则几何形状允许通过GBSM建立起较为确定的反射路径模型.通过构建管道的三维直角坐标系,GBSM可以精确地表示出各个反射路径的相位情况,包括到达角和接收角,这对多输入多输出阵列的波束成形设计具有指导意义.

针对1 000 km/h超高速运动带来的多普勒效应,GBSM通过引入列车运动矢量与信号传播方向的几何关系,能够建立时变信道冲激响应的数学模型.GBSM的动态几何建模能力可以量化分析这种非对称频移特性,为接收机算法设计提供一定的参数依据.GBSM的灵活性使其能够适应真空管环境的复杂性和高速运动场景.通过调整几何参数和随机分布,GBSM可以模拟不同管道材料、几何形状和列车速度下的信道特性,为系统设计和性能优化提供高精度的理论支持.

在通信技术领域,MIMO系统凭借其卓越的性能优势,在提升通信容量与可靠性方面发挥着关键作用.在信道建模中,CIR的获取是一个复杂且关键的过程.本节考虑在2×2 MIMO系统中对下行链路单跳情况进行分析得到CIR.在GBSM中,CIR可以通过波传播的组合来获得直射和散射[20].在实际的无线传播环境里,信号传播路径主要包含视距(Line of Sight,LoS)径和非视距(Non-Line of Sight,NLoS)径,CIR由LoS径和NLoS径共同构成,其表达式$h(t)$为

$$h(t)=h^{\mathrm{LoS}}(t)+h^{\mathrm{NLoS}}(t) \tag{1}$$

式中:$h^{\mathrm{LoS}}(t)$为CIR在t时刻的LoS分量;$h^{\mathrm{NLoS}}(t)$为对应的NLoS分量.本文其他变量定义如表1所示.

表1　变量及其含义

Tab.1　Variables and definitions

参数	含义	参数	含义
$\boldsymbol{A}_1^{\mathrm{T}}(t)$	t时刻发端天线TX 1的位置	$\boldsymbol{A}_2^{\mathrm{T}}(t)$	t时刻发端天线TX 2的位置
$\boldsymbol{A}_1^{\mathrm{R}}(t)$	t时刻收端天线RX 1的位置	$\boldsymbol{A}_2^{\mathrm{R}}(t)$	t时刻收端天线RX 2的位置
$\boldsymbol{S}_{n_i}(t)$	t时刻散射点n_i的位置	$D_{11}^{\mathrm{LoS}}(t)$	t时刻链路TX 1—RX1的路径距离
$D_{1,n_i}^{\mathrm{T}}(t)$	t时刻链路TX 1—$\boldsymbol{S}_{n_i}(t)$的路径距离	$D_{1,n_i}^{\mathrm{R}}(t)$	t时刻链路RX 1—$\boldsymbol{S}_{n_i}(t)$的路径距离
$D_{1,r_n}^{\mathrm{T}}(t)$	t时刻链路TX 1—$\boldsymbol{r}_{n_i}(t)$的路径距离	$D_{1,r_n}^{\mathrm{R}}(t)$	t时刻链路RX 1—$\boldsymbol{r}_{n_i}(t)$的路径距离
θ_{T}	发端天线阵列的倾斜角度	θ_{R}	收端天线阵列的倾斜角度
H_{T}	发端天线所处高度	H_{R}	收端天线所处高度
$\alpha_{n_i}^{\mathrm{T}}(t)$	t时刻链路TX 1—$\boldsymbol{S}_{n_i}(t)$俯仰角	$\alpha_{n_i}^{\mathrm{R}}(t)$	t时刻链路RX 1—$\boldsymbol{S}_{n_i}(t)$俯仰角
$\beta_{n_i}^{\mathrm{T}}(t)$	t时刻链路TX 1—$\boldsymbol{S}_{n_i}(t)$水平角	$\beta_{n_i}^{\mathrm{R}}(t)$	t时刻链路RX 1—$\boldsymbol{S}_{n_i}(t)$水平角
δ_{T}	发端天线阵元间隔	δ_{R}	收端天线阵元间隔
n_i	第n个散射簇内的第i个散射点	r	管道半径
$\boldsymbol{r}_{n_i}(t)$	t时刻第n个散射簇内的第i个散射点位置	v	列车运行速度

以发送天线TX1到接收天线RX1的链路TX1—RX1为例,依据式(1)将CIR拆分为LoS与NLoS的组合,该链路CIR在t时刻的表达式$h_{11}(t)$为

$$h_{11}(t)=h_{11}^{\mathrm{LoS}}(t)+h_{11}^{\mathrm{NLoS}}(t) \tag{2}$$

LoS分量为

$$h_{11}^{\mathrm{LoS}}(t)=\sqrt{\frac{\boldsymbol{\Omega}_{11}K_{11}}{K_{11}+1}}\,\mathrm{e}^{-\frac{\mathrm{j}2\pi}{\lambda}D_{11}^{\mathrm{LoS}}(t)+\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{d},11}^{\mathrm{LoS}}(t)\cdot t} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{\Omega}_{11}$为总能量；发送天线TX1到接收天线RX1链路的K因子为K_{11}；λ为工作波长；j为虚数；$D_{11}^{\mathrm{LoS}}(t)$为该t时刻链路LoS径的距离；$f_{\mathrm{d},11}^{\mathrm{LoS}}(t)$为该链路直射分量的多普勒频移，其表达式为

$$f_{\mathrm{d},11}^{\mathrm{LoS}}(t)=\frac{1}{\lambda}\frac{\left\langle \boldsymbol{D}_{11}^{\mathrm{LoS}}(t),\boldsymbol{v}\right\rangle}{\left\| \boldsymbol{D}_{11}^{\mathrm{LoS}}(t)\right\|} \tag{4}$$

式中：〈，〉表示点积.

NLoS分量主要考虑单次的反射与散射情况，将所有可能的情况进行叠加，其表达式为

$$h_{11}^{\mathrm{NLoS}}(t)=\sqrt{\frac{\boldsymbol{\Omega}_{11}}{K_{11}+1}}\lim_{N_{\mathrm{NLoS}}\to\infty}\frac{1}{\sqrt{N_{\mathrm{NLoS}}}}\sum_{n_i=1}^{N_i}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_{n_i}-\frac{\mathrm{j}2\pi(D_{1,n_i}^{\mathrm{T}}(t)+D_{1,n_i}^{\mathrm{R}}(t))}{\lambda}+\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{d},11,n_i}^{\mathrm{NLoS}}(t)\cdot t} \tag{5}$$

式中：N_{NLoS}为NLoS径个数；φ_{n_i}为相位偏移，其在[$-\pi,\pi$]服从均匀分布；$f_{\mathrm{d},11}^{\mathrm{NLoS}}(t)$为该链路非直射分量的多普勒频移，其表达式为

$$f_{\mathrm{d},11}^{\mathrm{NLoS}}(t)=\frac{1}{\lambda}\frac{\left\langle \boldsymbol{D}_{1,n_i}^{\mathrm{R}}(t),\boldsymbol{v}\right\rangle}{\left\| \boldsymbol{D}_{1,n_i}^{\mathrm{R}}(t)\right\|} \tag{6}$$

建立直角坐标系如图1所示.图1中，Y轴正方向为列车运行方向.

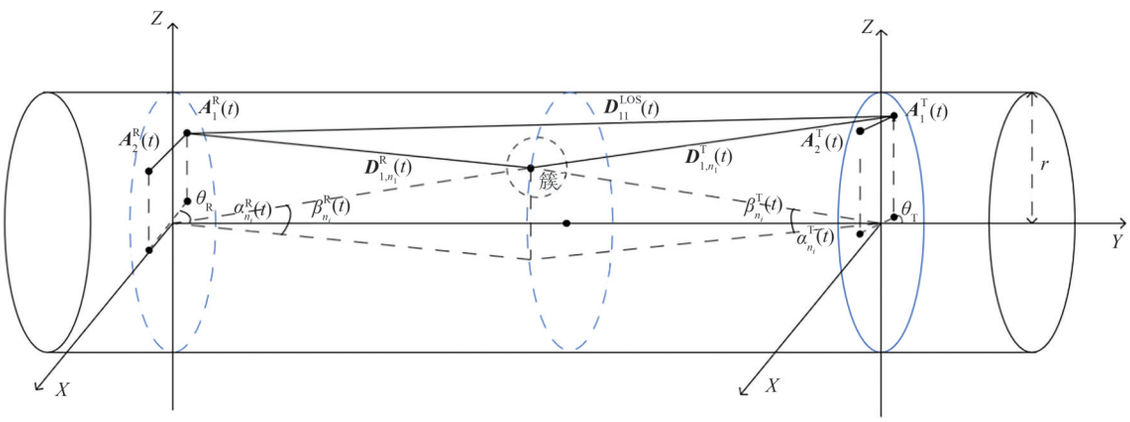


图1 直角坐标系下的真空管道

Fig.1 Vacuum tube in a Cartesian coordinate system

通过建立的坐标系并结合几何关系、正弦定理以及余弦定理，以下参数可由俯仰角和水平角表示，其对应表达式为

$$\boldsymbol{S}_{n_i}(t)=\frac{r}{\sqrt{1-\cos^2\alpha_{n_i}^{\mathrm{R}}(t)\cos^2\beta_{n_i}^{\mathrm{R}}(t)}}\begin{bmatrix}\cos\alpha_{n_i}^{\mathrm{R}}(t)\cos\beta_{n_i}^{\mathrm{R}}(t)\\ \sin\alpha_{n_i}^{\mathrm{R}}(t)\cos\beta_{n_i}^{\mathrm{R}}(t)\\ \sin\beta_{n_i}^{\mathrm{R}}(t)\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{D}_{1,n_i}^{\mathrm{R}}(t)=\boldsymbol{A}_1^{\mathrm{R}}(t)-\frac{r}{\sqrt{1-\cos^2\alpha_{n_i}^{\mathrm{R}}(t)\cos^2\beta_{n_i}^{\mathrm{R}}(t)}}\begin{bmatrix}\cos\alpha_{n_i}^{\mathrm{R}}(t)\cos\beta_{n_i}^{\mathrm{R}}(t)\\ \sin\alpha_{n_i}^{\mathrm{R}}(t)\cos\beta_{n_i}^{\mathrm{R}}(t)\\ \sin\beta_{n_i}^{\mathrm{R}}(t)\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{D}_{1,n_i}^{\mathrm{T}}(t)=\frac{r}{\sqrt{1-\cos^2\alpha_{n_i}^{\mathrm{T}}(t)\cos^2\beta_{n_i}^{\mathrm{T}}(t)}}\begin{bmatrix}\cos\alpha_{n_i}^{\mathrm{T}}(t)\cos\beta_{n_i}^{\mathrm{T}}(t)\\ \sin\alpha_{n_i}^{\mathrm{T}}(t)\cos\beta_{n_i}^{\mathrm{T}}(t)\\ \sin\beta_{n_i}^{\mathrm{T}}(t)\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{A}_1^{\mathrm{T}}(t) \tag{9}$$

$$\boldsymbol{D}_{11}^{\mathrm{LoS}}(t)=\boldsymbol{A}_1^{\mathrm{R}}(t)-\boldsymbol{A}_1^{\mathrm{T}}(t) \tag{10}$$

2 散射簇生成

2.1 散射簇生成判断机制

在GBSM完成真空管建模框架的基础上，为了更精准地剖析信道的特性，需着重讨论散射簇的分布情况，散射簇的位置和大小是保证建模精度的关键参数.在此过程中，引入菲涅尔散射簇生成判断机制.该机制旨在通过对信号传播环境中诸多因素的综合考量，确定散射簇在真空管内的具体分布.菲涅尔区域的划分在此机制中发挥着核心作用，信号的波长和传播距离直接影响菲涅尔区域的范围界定，而管壁的几何形状也会改变信号的反射与散射模式，三者共同决定了散射簇的分布格局.菲涅尔区域的划分能够帮助确定哪些区域对信号传播贡献最大.这种方法在真空管环境中的优势在于其高精度和灵活性.通过结合菲涅尔区域原理，能够有效减少传统随机建模方法中的不确定性，提供更可靠的信道预测结果.这对于真空管高速飞行列车的通信系统设计具有重要意义.

基于现有的真空管道假设，通过菲涅尔区域中

簇的生成方法,以此来准确确定发射角和到达角的分布情况,进而实现对信号传播特性的精确描述.在实际研究与应用中,鉴于所参照的5G-R通信标准[21]选取的频率相对较高,根据波长与频率的反比例关系可知,其对应的波长较短.当信号的发射端与接收端之间距离较远时,在其第三菲涅尔椭球所划定的范围内,散射点的数目相对较少.而散射点数量的不足,会极大地影响对信号传播路径的全面且深入的分析,进而降低信道建模的准确性.为有效弥补这一缺陷,将第三菲涅尔椭球进一步拓展为第 N_{fresnel} 菲涅尔椭球.以发射端和接收端镜像点为椭球的两个焦点,菲涅尔散射簇如图2所示.具体散射簇生成可分为2个步骤.

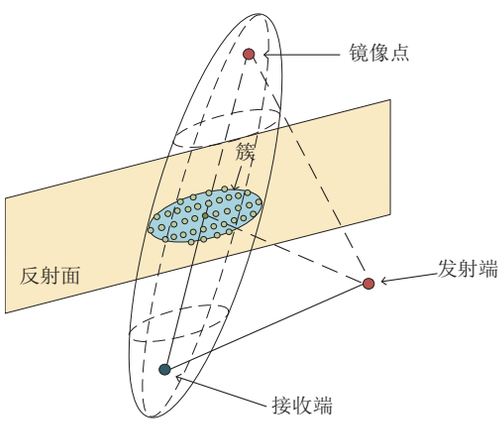


图2　菲涅尔散射簇示意图

Fig.2　Schematic of a Fresnel scattering cluster

步骤1:生成反射点.重点考虑一次反射点的生成情况.首先,找到发送端在竖直方向上关于管道壁的镜像点,基于管道壁的几何结构以及信号反射的物理特性,构建镜像点能够有效模拟信号在管道壁的反射路径;然后,分别将这两个镜像点与接收端相连;最后,将这两条连线形成的两个线段与管道壁相交的两点分别标记为 r_{n1} 和 r_{n2},其详细的位置关系和生成过程如图3所示.由图3可知,这一过程的关键在于利用几何光学原理,通过镜像点的构建准确捕捉信号在管道壁一次反射的关键位置,为后续分析提供基础数据.

步骤2:筛选有效散射点.在生成反射点之后,需要对散射点进行筛选,以获取有效散射点.具体的筛选方式是通过判断与散射点相关的距离与交点相关的距离之间的大小关系,以此来确定该散射点是否满足预先设定的散射点条件约束,约束条件为

$$\left|\boldsymbol{D}^{\text{T}}_{1,n_i}(t)+\boldsymbol{D}^{\text{R}}_{1,n_i}(t)\right|-\left|\boldsymbol{D}^{\text{T}}_{1,n_i}(t)-\boldsymbol{D}^{\text{R}}_{1,n_i}(t)\right|\leqslant N_{\text{fresnel}}\cdot\lambda/2 \tag{11}$$

只有满足这些条件约束的散射点,才能够被认定为有效散射点,并纳入后续对发射角和到达角分布的分析过程中,以此提升基于菲涅尔区域的簇生成方法在真空管环境下对发射角和到达角分布确定的准确性,为构建更为完善的真空管高速飞行列车通信系统信道模型奠定坚实基础.

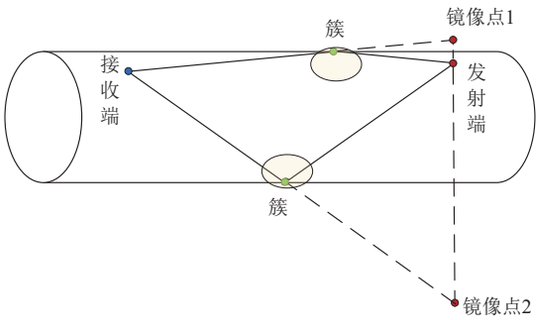


图3　管内菲涅尔散射簇示意图

Fig.3　Schematic of a Fresnel scattering cluster in tube

2.2　散射点分布仿真

针对预设的信道几何假设,对到达方位角(Azimuth Angle of Arrival,AAoA)和到达仰角(Elevation Angle of Arrival,EAoA)的分布进行仿真分析.管道半径 r=1.65 m,当前收发端水平距离 L=50 m,频率 $f_{\text{c}}=2.1\times10^{9}$ Hz参考5G-R频段[21],具体模型参数设置见表2.散射点分布情况如图4所示,散射点集中分布在上下侧两个区域,即上下侧镜像点附近.

表2　模型参数设置

Tab.2　Model parameter settings

参数	取值	参数	取值
频率/GHz	2.1	H_{R}/m	2.7
r/m	1.65	θ_{T}	$\frac{\pi}{4}$
列车速度/(km/h)	1 000	θ_{R}	$\frac{\pi}{4}$
H_{T}/m	3.2	N_{fresnel}	2

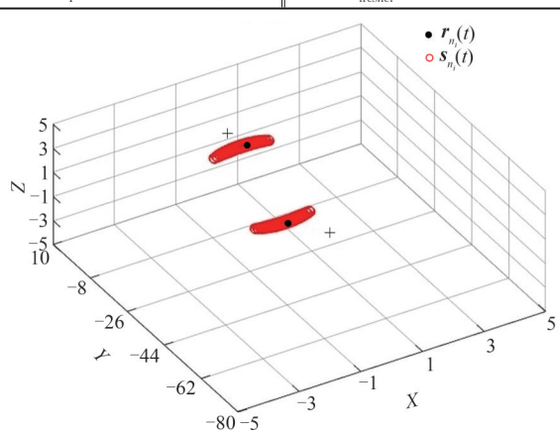


图4　散射簇分布图

Fig.4　Distribution map of scattering clusters

对到达方位角和到达仰角进行统计分析,可以发现EAoA主要集中在真空管道上下两个区域,即

两个镜像相交点附近形成了簇.根据角度将其分为前后两部分,分别对其概率分布进行拟合,得到的概率分布图和AAoA的分布拟合图如图5所示.由图5可知,AAoA与EAoA前后两部分角度分布均可用正态分布.其概率密度函数为

$$p\left(\alpha_{n_i}^{\mathrm{R}}\right)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\ \sigma_1}\mathrm{e}^{-\frac{(\alpha_{n_i}^{\mathrm{R}}-\mu_1)^2}{\sigma_1^2}} \tag{12}$$

$$p\left(\beta_{n_i,\mathrm{front}}^{\mathrm{R}}\right)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\ \sigma_2}\mathrm{e}^{-\frac{(\beta_{n_i,\mathrm{front}}^{\mathrm{R}}-\mu_2)^2}{\sigma_2^2}} \tag{13}$$

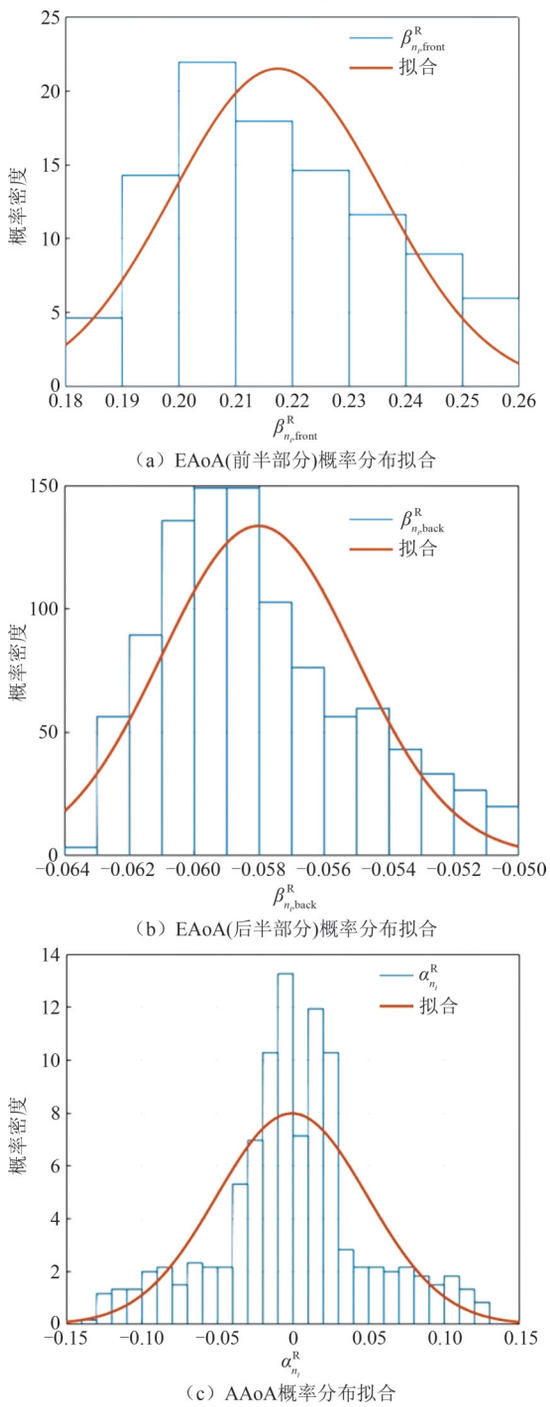


图 5　角度概率拟合

Fig.5　Probability distribution fits for angles of arrival

$$p\left(\beta_{n_i,\mathrm{back}}^{\mathrm{R}}\right)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\ \sigma_3}\mathrm{e}^{-\frac{(\beta_{n_i,\mathrm{back}}^{\mathrm{R}}-\mu_3)^2}{\sigma_3^2}} \tag{14}$$

式中:$\beta_{n_i,\mathrm{front}}^{\mathrm{R}}$为EAoA的前半部分,$\beta_{n_i,\mathrm{back}}^{\mathrm{R}}$为EAoA的后半部分;$p\left(\alpha_{n_i}^{\mathrm{R}}\right)$、$p\left(\beta_{n_i,\mathrm{front}}^{\mathrm{R}}\right)$和$p\left(\beta_{n_i,\mathrm{back}}^{\mathrm{R}}\right)$分别为$\alpha_{n_i}^{\mathrm{R}}$、$\beta_{n_i,\mathrm{front}}^{\mathrm{R}}$和$\beta_{n_i,\mathrm{back}}^{\mathrm{R}}$的概率分布函数;$\mu_1$、$\mu_2$和$\mu_3$分别为$p\left(\alpha_{n_i}^{\mathrm{R}}\right)$、$p\left(\beta_{n_i,\mathrm{front}}^{\mathrm{R}}\right)$和$p\left(\beta_{n_i,\mathrm{back}}^{\mathrm{R}}\right)$的均值;$\sigma_1$、$\sigma_2$和$\sigma_3$分别为$p\left(\alpha_{n_i}^{\mathrm{R}}\right)$、$p\left(\beta_{n_i,\mathrm{front}}^{\mathrm{R}}\right)$和$p\left(\beta_{n_i,\mathrm{back}}^{\mathrm{R}}\right)$的标准差.各参数取值分别为

$$\mu_1=-0.007\,49,\mu_2=-0.058,\mu_3=0.217\,4;$$
$$\sigma_1{}^2=0.002\,49,\sigma_2{}^2=8.612\times10^{-9},\sigma_3{}^2=0.003.$$

3　信道统计特性分析

为进一步研究真空管道内无线信道的传播特性,对信道统计特性进行分析.与CIR分析相对应,链路TX1－RX1和TX2－RX2的时空相关函数$\rho_{11,22}(\delta_{\mathrm{T}},\delta_{\mathrm{R}},\tau)$也可以分解成LOS径部分$\rho_{11,22}^{\mathrm{LoS}}(\delta_{\mathrm{T}},\delta_{\mathrm{R}},\tau)$与NLOS径部分$\rho_{11,22}^{\mathrm{NLoS}}(\delta_{\mathrm{T}},\delta_{\mathrm{R}},\tau)$,其表达式为

$$\rho_{11,22}(\delta_{\mathrm{T}},\delta_{\mathrm{R}},\tau)=\rho_{11,22}^{\mathrm{LoS}}(\delta_{\mathrm{T}},\delta_{\mathrm{R}},\tau)+\rho_{11,22}^{\mathrm{NLoS}}(\delta_{\mathrm{T}},\delta_{\mathrm{R}},\tau) \tag{15}$$

LOS径为

$$\rho_{11,22}^{\mathrm{LoS}}(\delta_{\mathrm{T}},\delta_{\mathrm{R}},\tau)=\frac{E\left[h_{11}^{\mathrm{LoS}}(t)h_{22}^{\mathrm{LoS}\,*}(t+\tau)\right]}{\sqrt{\boldsymbol{\Omega}_{11}\boldsymbol{\Omega}_{22}}}=\frac{K_{11}K_{22}}{(K_{11}+1)(K_{22}+1)}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda}\left|D_{11}^{\mathrm{LoS}}(t)-D_{22}^{\mathrm{LoS}}(t)\right|-\mathrm{j}2\pi\left(\frac{1}{\lambda}\frac{\left\langle D_{22}^{\mathrm{LoS}}(t),\boldsymbol{v}\right\rangle}{\left\|D_{22}^{\mathrm{LoS}}(t)\right\|}\right)\cdot\tau} \tag{16}$$

NLOS径为

$$\rho_{11,22}^{\mathrm{NLoS}}(\delta_{\mathrm{T}},\delta_{\mathrm{R}},\tau)=\sqrt{\frac{1}{(K_{11}+1)(K_{22}+1)}}\cdot\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\int_{\pi}^{\pi}\mathrm{e}^{-\frac{\mathrm{j}2\pi}{\lambda}\left(D_{1,n_i}^{\mathrm{T}}(t)+D_{1,n_i}^{\mathrm{R}}(t)-D_{2,n_i}^{\mathrm{T}}(t)-D_{2,n_i}^{\mathrm{R}}(t)\right)-\frac{\mathrm{j}2\pi}{\lambda}\frac{\left\langle D_{2,n_i}^{\mathrm{R}}(t),\boldsymbol{v}\right\rangle}{\left\|D_{2,n_i}^{\mathrm{R}}(t)\right\|}\cdot\tau}\cdot p\left(\alpha_{n_i}^{\mathrm{R}}\right)p\left(\beta_{n_i}^{\mathrm{R}}\right)\mathrm{d}\alpha_{n_i}^{\mathrm{R}}\mathrm{d}\beta_{n_i}^{\mathrm{R}} \tag{17}$$

式中:E为数学期望;K_{22}为发送天线TX2-接收天线RX2链路的K因子.其中,AAoA与EAoA的概率分布密度函数参数值如表1所示.

4　仿真与分析

针对相关函数推导结果对相关函数进行仿真分析.参考文献[22]的参数设置,可得$K_{11}=K_{22}=6.6$ dB.

本文时间自相关函数仿真中,收发天线阵列间距选取两组,分别为$\delta_{\mathrm{T}}=\delta_{\mathrm{R}}=0$和$\delta_{\mathrm{T}}=\delta_{\mathrm{R}}=3\lambda$,仿

真结果如图 6 所示 . 由图 6 可知:① 在极短时间延迟内,信道的输出与输入有较强的相关性;在一定的时间延迟下,随着列车的高速移动,信道的输出与输入的相关性减弱,受管道结构的约束,相关系数最终趋于稳定,且仍保持较高水平 .② 当 $\delta_T=\delta_R=0$,即单输入单输出(Single-Input Single-Output, SISO)场景下, ACF 的时间相关函数在 0.967 1～1 之间;当 $\delta_T=\delta_R=3\lambda$,即 MIMO 场景下,ACF 的时间相关函数在 0.967 2～1 之间 . 不同时间下不同接收天线间隔下的多普勒频移如图 7 所示 . 由图 7 可知:随着列车位置动态变化,不同的天线间隔也会影响多普勒频移;在列车高速移动时,频移会显著增加,将对通信系统设计产生影响 .

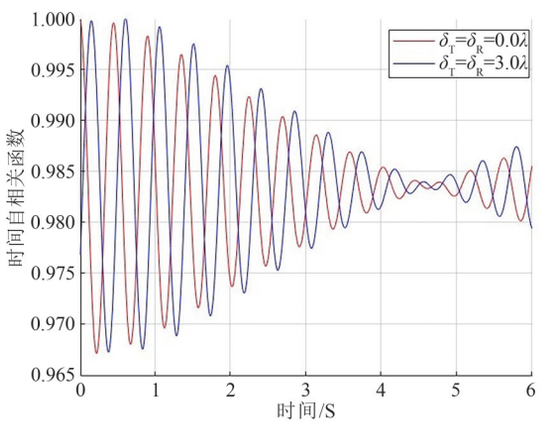


图 6　时间自相关函数

Fig.6　Time ACF

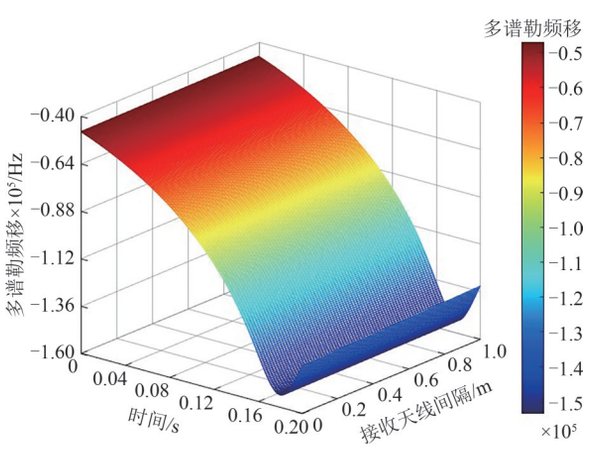


图 7　不同时间与天线间隔下的多普勒频移

Fig.7　Doppler shifts at different time instants and antenna spacings

本文空间互相关函数仿真结果如图 8 所示 . 由图 8 可知:相关性随收发天线间隔的变化而变化;空间的相关性依赖于收发天线间隔,存在多个高相关峰值区域以及低相关低谷值区域,可以通过优化天线阵列设计来获取更高的空间自由度 .

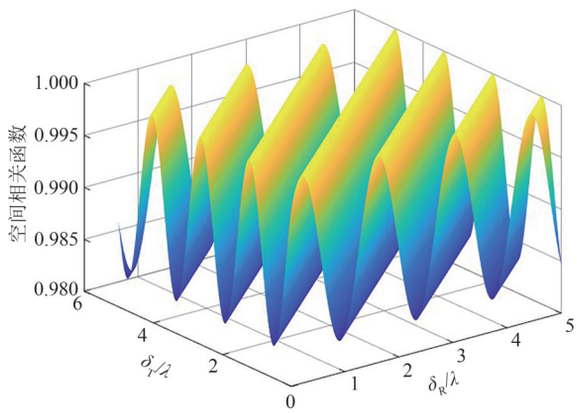


图 8　空间互相关函数

Fig.8　Spatial CCF

5　结论

本文提出了一种基于 GBSM 和菲涅尔区域判断散射簇分布的信道建模方法 . 根据所提模型,对空间 CCF 和时间 ACF 等性能进行研究和分析,研究结论如下 .

1) 在时域,SISO 与 2×2 MIMO 系统信道时间自相关系数均稳定在 0.967 1～1 区间,仅随时延小幅衰减后持续保持高相关水平;在空域,信道空间互相关系数随收发天线阵元间距动态起伏,呈现多处高相关峰值与低相关谷值;

2) 在频域,列车超高速运动引发明显多普勒频移,频移大小直接受接收天线阵列间隔影响 . 密闭金属管道形成的强波导效应使视距与管壁反射非视距多径分量高度耦合,导致管道内各车的通信链路信道耦合度较高 .

本文的工作为真空管高速列车的无线通信系统设计提供了一定的参考和依据 . 后续研究可考虑拓展毫米波、太赫兹高频段场景,考虑簇的生灭情况,分析不同频段下菲涅尔散射簇分布、信道相关特性与多普勒特性的变化规律,为真空管高速列车无线通信工程实现与标准制定提供完整理论依据 .

参考文献(References):

[1] 刘留, 裘陈成, 刘叶, 等 . 真空管道高速飞行列车车地无线通信技术[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(1): 146－156.
Liu Liu, Qiu Chencheng, LIU Ye, et al. Wireless communication technology for vacuum tube high-speed flight train[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(1): 146－156. (in Chinese)

[2] 金茂菁 , 黄玲 . 超高速真空管道交通技术发展现状与趋势 [J]. 科技中国, 2018 (3): 13－15.
Jin Maoqing, Huang Ling, Development status and trend of ultra high-speed vacuum pipeline transpor-tation technology[J].

Science and Technology China, 2018(3): 13—15. (in Chinese)

[3] Mitropoulos L, Kortsari A, Koliatos A, et al. The hyperloop system and stakeholders: a review and future directions[J]. Sustainability, 2021, 13(15): 8430.

[4] 韩柏涛, 刘留, 裘陈成, 等. 真空管道高速飞行列车综合承载业务需求分析[J]. 铁道学报, 2019, 41(7): 66—76.
Han Botao, Liu Liu, Qiu Chencheng, et al. Demand analysis of integrated service of vacuum tube high-speed flight train [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(7): 66—76. (in Chinese)

[5] 中国航天科工. 中国航天科工与山西省签署战略合作协议 [EB/OL]. (2020-11-14) [2022-09-12]. https://www.sohu.com/a/431856763_324450.
China Aerospace Science and Industry Corporation. CASIC signed strategic cooperation agreement with Shanxi Province [EB/OL]. (2020-11-14)[2022-09-12]. https://www.sohu.com/a/431856763_324450. (in Chinese)

[6] 刘留, 艾渤. 真空管磁浮高速飞行列车车地无线通信技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2025.
Liu Liu, Ai Bo. Train-ground wireless communication technology of vacuum tube maglev high-speed flight train [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2025. (in Chinese)

[7] Wang K, Liu L, Zhang J C, et al. Channel fading characteristics of hyperloop scenarios based on ray-tracing model[J]. Symmetry, 2023, 15(3): 567.

[8] Wang K, Liu L, Zhang J C, et al. Channel characteristics analysis of millimetre-wave bands in Hyperloop scenarios based on ray-tracing[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2023, 17(8): 624—633.

[9] Wu S B, Wang C X, Aggoune E M, et al. A general 3-D non-stationary 5G wireless channel model[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(7): 3065—3078.

[10] Ahmed N, Hua B Y, Zhu Q M, et al. A novel GBSM for non-stationary V2V channels allowing 3D velocity variations[J]. Sensors, 2021, 21(9): 3271.

[11] Wang K, Liu L, Zhang J C, et al. Channel characterization for hyperloops using the nonstationary geometry-based model[J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2023, 32: 2350012.

[12] 段相龙, 刘留, 周涛, 等. 基于传播图理论的真空管飞行列车的无线信道建模与容量分析[J]. 电波科学学报, 2024, 39(4): 748—759.
Duan Xianglong, Liu Liu, Zhou Tao, et al. Wireless channel modeling and capacity analysis of vacuum tube flying train based on propagation graph theory[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2024, 39(4): 748—759. (in Chinese)

[13] Li Y, He R S, Lin S Y, et al. Cluster-based nonstationary channel modeling for vehicle-to-vehicle communications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1419—1422.

[14] Zhang J C, Liu L, Tan Z H, et al. A semi-deterministic MIMO-based beam channel model of ray-tracing and propagation-graph for mmWave communications [C]// 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Seoul, 2022: 1135—1140.

[15] 李伟东, 陈小敏, 王梅, 等. 三维非平稳 V2V 信道建模及统计特性研究[J]. 微波学报, 2019, 35(6): 77—83.
Li Weidong, Chen Xiaomin, Wang Mei, et al. Three-dimensional non-stationary V2V channel modeling and its statistical properties [J]. Journal of Microwaves, 2019, 35(6): 77—83. (in Chinese)

[16] Gan M M, Steinböck G, Xu Z N, et al. A hybrid ray and graph model for simulating vehicle-to-vehicle channels in tunnels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(9): 7955—7968.

[17] Huang Z W, Cheng X. A 3D cluster-based channel model with time-space consistency (invited paper)[C]// 2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Xiamen, 2021: 1—6.

[18] He D P, Guan K, García-loygorri J M, et al. Channel characterization and hybrid modeling for millimeter-wave communications in metro train[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 12408—12417.

[19] Zhang J C, Liu L, Tan Z H, et al. A 3-D semi-deterministic MIMO beam channel model for cellular-assisted millimeter-wave vehicular communications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(4): 3546—3560.

[20] Liu Y, Wang C X, Lopez C F, et al. 3D non-stationary wideband tunnel channel models for 5G high-speed train wireless communications [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(1): 259—272.

[21] 工业和信息化部. 工信部批复铁路新一代移动通信系统试验频率持续推动铁路通信事业高质量发展 [EB/OL]. (2023-10-09) [2025-07-06]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/wgi/gzdt/art/2023/art_fd43651387a64f4cb486ee29929b05f1.html.
Ministry of Industry and Information Technology of China. MIIT approved test frequency of new generation railway-mobile communication system and Continue to promote the high-quality development of the railway communication sector[EB/OL]. (2023-10-09)[2025-07-06]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/wgi/gzdt/art/2023/art_fd43651387a64f4cb486ee29929b05f1.html. (in Chinese)

[22] Han B T, Zhang J C, Liu L, et al. Position-based wireless channel characterization for the high-speed vactrains in vacuum tube scenarios using propagation graph modeling theory[J]. Radio Science, 2020, 55(4): e2020RS007067.