

高速铁路高架桥场景中的复合无线信道特性

Composite Wireless Channel Characteristics for Communication Systems on Viaducts of High-Speed Railway

张逸康/ZHANG Yikang¹, 王公仆/WANG Gongpu¹, 叶如意/YE Ruyi²

(1. 北京交通大学, 中国 北京 100044;
2. 中国标准化研究院, 中国 北京 100191)
(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. China National Institute of Standardization, Beijing 100191, China)



摘要: 高架桥场景是高铁无线通信中的重要场景之一。针对该场景下的复合信道, 基于瑞利信道模型和莱斯信道模型, 对概率密度函数进行分析, 推导出了两种新的概率密度函数。这不仅丰富了高铁高架桥场景下的无线信道理论, 而且对未来高铁无线通信系统设计和优化有参考价值。

关键词: 无线信道; 概率密度函数; 高架桥场景; 高铁无线通信; 复合信道

Abstract: The viaduct scenario is one of the most important scenarios in the high-speed railway (HSR) wireless communications. For the composite channel in this scenario, the probability density function is analyzed based on the Rayleigh and Rician channel models, and two new probability density functions are derived. This can enrich the wireless channel modeling theories, and contribute to the design and optimization of wireless communication networks on HSR.

Keywords: wireless channel; probability density function; viaduct scenario; HSR wireless communications; composite channel

DOI: 10.12142/ZTETJ.202104007
网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210726.1648.004.html>

网络出版日期: 2021-07-27
收稿日期: 2021-02-20

随着中国高铁的飞速发展, 截至2019年底, 高铁营业总里程已经达到 3.5×10^4 km^[1]。2019年底投运于京张高铁的智能复兴号动车组, 标志着中国率先开启了世界智能高铁的新时代和中国高铁发展的新局面^[2]。

随着人们对高铁中无线通信质量需求的提高, 越来越多的专家、学者开始深入研究高铁无线通信系统。高铁列车快速行驶, 中国高铁沿线地

形复杂多变。这种高时速、多地形的无线信道具有高多普勒频移、快速时变和快速切换的特点。高铁时速的增加给高铁无线通信带来了巨大的挑战^[3], 这些挑战具体包括如何评估由于快时变引起的多普勒效应对系统性能的影响, 如何进行快速无线时变信道参数估计, 以及缺乏高铁场景无线信道的实际测量和数据分析等方面。

高架桥是一种常见的高铁场景。例如在京沪高铁线路中, 有超过70%的场景是高架桥^[4]。与其他场景相比, 高架桥场景下的无线信道相对容

易分析处理。

人们对高铁的无线信道模型做了一系列研究: 文献[5]提出了无线信道中新的注水算法; 基于深度学习的方法, 文献[6]对信道进行了预测; 文献[7]总结并概述了高铁无线信道测量与建模; 基于5G技术, 文献[8]提出了一种新的网络切片架构; 文献[9]引入了雾计算, 构建了多样的通信和雾计算网络架构; 对于智能和开放的6G网络, 文献[10]指出了关键技术, 为6G网络的实现提出了发展方向; 文献[11]指出高铁信道模型的重要性, 为信道模型的构建提供新的方向; 文献

基金项目: 国家自然科学基金(U1834210、61871026、61725101)

[12]基于高铁无线信道的快时变特性和高多普勒频移,提出了最大后验估计量;基于高架桥场景综合路径损耗、小尺度衰落等一系列因素,文献[13]提出一种能评估网络性能的新信道模型。

但以上文献并没有给出小尺度衰落上复合信道的概率密度函数。本文中,我们在已有的高铁无线信道概率密度函数的基础上,围绕高架桥场景进行高铁的无线信道特征分析。当无线通信系统采用数字车顶中继时,该中继转发的信号不能等效为反射信号,并且该场景的无线信道是瑞利信道和莱斯信道的非线性组合。据此,我们提出了两种新的概率密度函数,并比较了无线通信系统在这些不同信道模型的性能。

考虑到信道特性的研究还需要与实测的信道特性相比较,并且目前铁路上能做到实测的信道很少,所以本文重点聚焦于无线信道特性,暂不考虑系统仿真情况。

图1为高铁高架桥场景下的信号收发模型。基站发出信号后,有两条路径到达用户手机:一条是从基站直接到用户手机的路径,另一条是从基站经高铁天线转发到用户手机的路径。其中,为了简化计算,信道 h_1 和 h_2 假定服从瑞利分布。因为如果用含有直射路径的信道,也就是如果用莱斯信道进行建模,那么计算会非常复杂。如表1所示,瑞利信道是莱斯信道的特例,而信道 f_0 假定服从莱斯分布。

根据修正的贝塞尔方程可知,表2中第1类、第2类修正的0阶贝塞尔函数分别为^[14]:

$$I_0(z) = \left(\frac{z}{2}\right)^v \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z^2}{4}\right)^k}{k! \Gamma(v+k+1)}, \quad (1)$$

$$K_0(z) = \frac{\pi}{2} \frac{I_{-\nu}(z) - I_{\nu}(z)}{\sin(\nu\pi)} \quad (2)$$

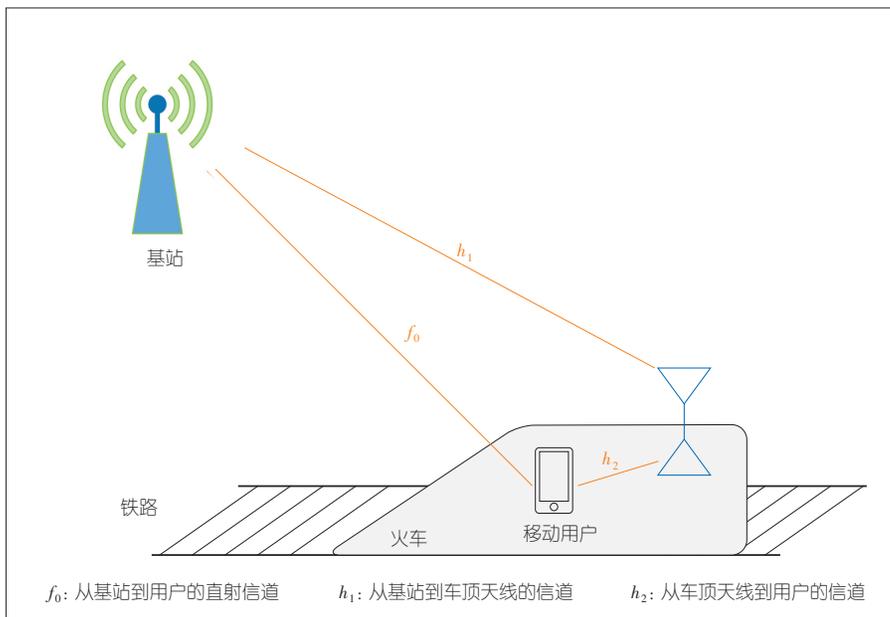
1 无线信道概率密度函数分析

1.1 高铁无线信道常用概率密度函数

当前,在高铁无线信道特性研究

中,信道模型常用的概率密度函数^[15]列举如下,高斯信道的概率密度函数为:

$$p(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(f-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (3)$$



▲图1 高铁高架桥场景中的信号收发模型

▼表1 高铁无线信道模型

莱斯K因子	信道模型
$K=0$	瑞利信道
$0 < K < \infty$	莱斯信道
$K=\infty$	高斯信道

▼表2 符号说明

字母	定义
$p(f)$	f 的概率密度函数
$p(f_0)$	f_0 的概率密度函数
$p(h_1)$	h_1 的概率密度函数
$p(h_2)$	h_2 的概率密度函数
$p(h)$	h 的概率密度函数
$p(g)$	g 的概率密度函数
$I_0(z)$	第1类修正的0阶贝塞尔函数
$K_0(z)$	第2类修正的0阶贝塞尔函数
A	直射分量幅度
μ	均值
$\sigma_0^2, \sigma_1^2, \sigma_2^2$	f_0, h_1, h_2 随机变量的方差
c	衰减因子
∞	表示无穷大

f :任意的随机变量
 f_0 :从基站到用户端的直射信道的随机变量
 g : f_0 和 h 的复合信道的随机变量

h : h_1 和 h_2 的复合信道的随机变量
 h_1 :从基站到车顶天线信道的随机变量
 h_2 :从车顶天线到用户信道的随机变量

瑞利信道的概率密度函数为:

$$p(f) = \frac{f}{\sigma_0^2} \exp\left\{-\frac{f^2}{2\sigma_0^2}\right\}, \quad (4)$$

莱斯信道的PDF为:

$$p(f) = \frac{f}{\sigma_0^2} \exp\left\{-\frac{(f^2 + A^2)}{2\sigma_0^2}\right\} I_0\left[\frac{fA}{\sigma_0^2}\right]. \quad (5)$$

其中, 高斯信道模型可以看成信号与高斯白噪声的叠加; 瑞利信道表示不含直射分量的小尺度衰落; 莱斯信道表示含直射分量的小尺度衰落。小尺度衰落指的是信号在短时间或短距离传播后幅度、相位或多径时延快速变化, 波动发生在大约一个波长范围内。

1.2 复合无线信道概率密度函数

如图1所示, 高架桥无线复合信道为: $g = f_0 + c \times h_1 \times h_2$ 。随机变量 f_0 、 h_1 和 h_2 的概率密度函数 $p(f_0)$ 、 $p(h_1)$ 和 $p(h_2)$ 如公式(6)~(8)所示。 $h = c \times h_1 \times h_2$, 则 $g = f_0 + h$ 。为了计算 g 的概率密度函数 $p(g)$, 需要首先计算 h 的概率密度函数 $p(h)$ 。以下为推导过程:

$$p(f_0) = \frac{f_0}{\sigma_0^2} \exp\left\{-\frac{(f_0^2 + A^2)}{2\sigma_0^2}\right\} I_0\left[\frac{f_0 A}{\sigma_0^2}\right], \quad (6)$$

$$p(h_1) = \frac{h_1}{\sigma_1^2} \exp\left\{-\frac{h_1^2}{2\sigma_1^2}\right\}, \quad (7)$$

$$p(h_2) = \frac{h_2}{\sigma_2^2} \exp\left\{-\frac{h_2^2}{2\sigma_2^2}\right\}. \quad (8)$$

首先, 当衰减因子 $c = 1$ 时, 我们计算 h 的概率密度函数。因为随机变量 h_1 和 h_2 为两个服从瑞利分布的相互独立的随机变量, 所以随机变量 h_1

和 h_2 的乘积 h 的概率密度为:

$$\begin{aligned} p(h) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|h_1|} p\left(h_1, \frac{h}{h_1}\right) dh_1 = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|h_1|} p(h_1) p\left(\frac{h}{h_1}\right) dh_1 = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|h_1|} \frac{h_1}{\sigma_1^2} \exp\left\{-\frac{h_1^2}{2\sigma_1^2}\right\} \frac{h}{\sigma_2^2} \exp\left\{-\frac{h^2}{2\sigma_2^2 h_1^2}\right\} dh_1 = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|h_1|} \frac{h}{\sigma_1^2 \sigma_2^2} \exp\left\{-\frac{h_1^2}{2\sigma_1^2}\right\} \exp\left\{-\frac{h^2}{2\sigma_2^2 h_1^2}\right\} dh_1 = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|h_1|} \frac{h}{\sigma_1^2 \sigma_2^2} \exp\left\{-\frac{h_1^2}{2\sigma_1^2} - \frac{h^2}{2\sigma_2^2 h_1^2}\right\} dh_1. \end{aligned} \quad (9)$$

由于被积函数是 h_1 的偶函数, 我们将式(9)简化为:

$$\begin{aligned} p(h) &= 2 \int_0^{+\infty} \frac{1}{h_1} \frac{h}{\sigma_1^2 \sigma_2^2} \exp\left\{-\frac{h_1^2}{2\sigma_1^2} - \frac{h^2}{2\sigma_2^2 h_1^2}\right\} dh_1 = \\ &= \frac{2h}{\sigma_1^2 \sigma_2^2} \int_0^{+\infty} \frac{1}{h_1} \exp\left\{-\frac{h_1^2}{2\sigma_1^2} - \frac{h^2}{2\sigma_2^2 h_1^2}\right\} dh_1. \end{aligned} \quad (10)$$

再令 $\frac{h_1^2}{2\sigma_1^2} = v$, 式(9)又可以进

一步化简为:

$$\begin{aligned} p(h) &= \frac{h}{\sigma_1^2 \sigma_2^2} \int_0^{+\infty} \frac{1}{v} \exp\left\{-v - \frac{h^2}{4\sigma_1^2 \sigma_2^2 v}\right\} dv = \\ &= \frac{2h}{\sigma_1^2 \sigma_2^2} K_0\left(\frac{|h|}{\sigma_1 \sigma_2}\right). \end{aligned} \quad (11)$$

对于不为1的衰减因子, 可以得到:

$$p(h) = \frac{2h}{c^2 \sigma_1^2 \sigma_2^2} K_0\left(\frac{|h|}{c \sigma_1 \sigma_2}\right) \quad 0 < c < \infty. \quad (12)$$

因为随机变量 f_0 、 h_1 、 h_2 相互独立, 所以 f_0 与 h 也相互独立。那么, 随机变量 f_0 与 h 之和 g 的概率密度函数为:

$$\begin{aligned} p(g) &= \int_{-\infty}^{+\infty} p(g-h) p(h) dh = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{g-h}{\sigma_0^2} \exp\left\{-\frac{(g-h)^2 + \beta^2}{2\sigma_0^2}\right\} I_0\left[\frac{(g-h)\beta}{\sigma_0^2}\right] p(h) dh. \end{aligned} \quad (13)$$

2 MATLAB仿真及参数分析

2.1 概率密度函数比较

概率密度函数的仿真参数具体如表3所示。

通过 MATLAB 仿真, 可以得到 f_0 、 h_1 、 h_2 、 h 和 g 的概率密度曲线, 如图2所示。

表3 仿真参数

参数	取值或函数
方差 σ_0^2 、 σ_1^2 、 σ_2^2 直射分量幅度 A	均为2 1
第1类修正的0阶贝塞尔函数	besseli()函数
第2类修正的0阶贝塞尔函数	besselk()函数

仿真结果表明, f_0 、 h_1 、 h_2 、 h 和 g 的概率密度均先增大后减小最后趋于0。

瑞利分布的概率密度曲线在MATLAB中有专门的函数,但是莱斯分布、信道 h 和信道 g 服从的分布没有专门的函数。其中,随机变量 g 的概率密度函数仍是一个积分函数,由于推导闭合解比较复杂,所以本文通过利用MATLAB中 f_0 与 h 的卷积运算,并利用其中的conv()函数得到 g 概率密度函数的数值解。

2.2 参数分析

2.2.1 方差分析

信号强度的总平均损耗是与距离相关的,可用 $P(d)$ 这一函数来表示。一般地, $P(d) \propto \frac{1}{d^n}$,对于高架桥场景, n 的典型值为4,也就是说接收信号的功率与收发天线距离的四次方成反比^[15]。

$$P(d) \propto \frac{1}{d^4} \quad (14)$$

可以看出,随着距离的增加,衰减功率越大,方差也就越大,所以:

$$\sigma_0^2 \propto \frac{1}{d^4}, \sigma_1^2 \propto \frac{1}{d^4}, \sigma_2^2 \propto \frac{1}{d^4} \quad (15)$$

其中, σ_0^2 、 σ_1^2 、 σ_2^2 分别对应 f_0 、 h_1 、 h_2 随机变量的方差。设 $\sigma_0^2 = \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 2$,则满足 $\sigma_0^2 < \sigma_1^2 + \sigma_2^2$ (考虑车体损耗)。

总体信道为 $g = f_0 + h$, f_0 与 h 相互独立,则有:

$$Var(g) = Var(f_0) + Var(h) \quad (16)$$

其中, $Var(g)$ 表示变量 g 的方差, $Var(f_0)$ 与 $Var(h)$ 同理。

2.2.2 c 对复合信道的影响

由于不同路径下的衰减程度不同,下面我们将讨论 c 对复合信道特性的影响。

对于总信道 $g = f_0 + c \times h_1 \times h_2$ 来说,不同的 c 会有不同的信道曲线。我们分别取 c 为1、0.7、0.3来计算总信道,具体如图3所示。

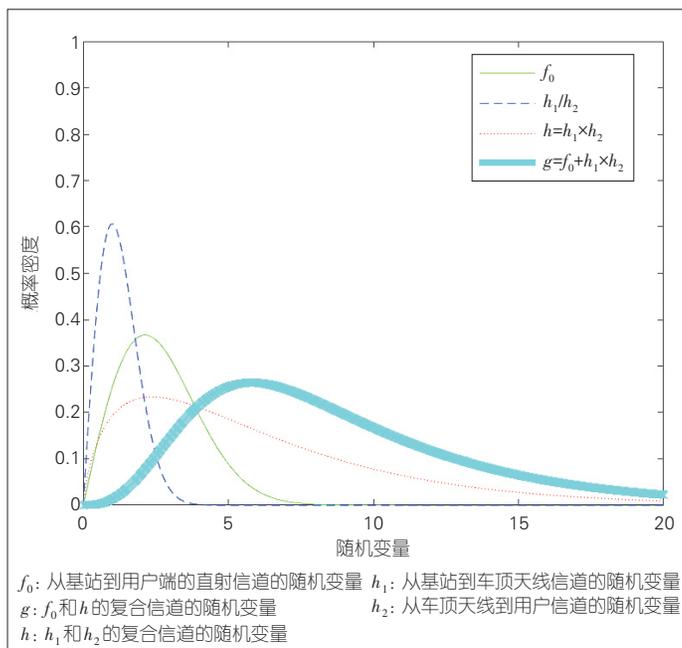
信道特性会受到衰减因子的影响,因此需要人们针对不同 c 来分析复合概率密度函数 $p(g)$ 。

由图3可以得出:随着 c 的减小,在随机变量值越小的地方概率密度越大;在随机变量值越大的地方概率密度越小。

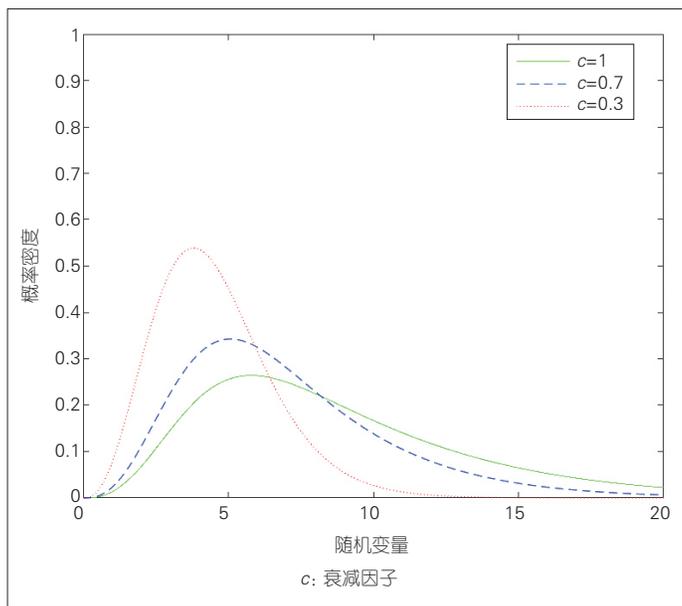
2.2.3 BER分析

将一个随机比特序列作为发送信号并记为 $x(n)$,通过 f_0 和 g 的两个信道后的信号与噪声信号 $w(n)$ 线性叠加,得到接收信号 $y_1(n) = f_0x(n) + w(n)$ 与 $y_2(n) = gx(n) + w(n)$ 。在理想情况下,假设接收方已知信道 f_0 和 g ,根据接收信号 $y_1(n)$ 和 $y_2(n)$,利用最大似然

准则就可以检测出 $x(n)$ 。检测方案如下:根据最大似然准则实现最佳接收,在发送信号0、1先验概率相等的情况下,使得似然函数 $P(y(t)|s_i(t))$, $i = 1, 2$ 最大。其中, $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 分别表示发送1和发送0, $y(t)$ 为接收信号。记 $s_1(n)$ 对应星座图中的发送信号点为 (a_1, b_1) , $s_2(t)$ 对应星



▲图2 MATLAB仿真参数的概率密度曲线



▲图3 不同衰减因子下 g 的概率密度函数

座图中的发送信号点为 (a_2, b_2) 。

在噪声服从高斯分布的前提下,似然函数最大化与星座点距离最小化是等价的,所以最大似然准则就可以转化为最小距离准则。这样利用相关接收机就可以根据信号点之间的距离进行抽样判决,实现最佳接收。

假设信号采用的调制方式是二进制相移键控(2PSK),发送1码和0码的信号能量均为 E_b ,于是信号可以表示为 $s_1 = (\sqrt{E_b}), s_2 = (-\sqrt{E_b})$ 。

根据相关接收抽样判决的规则^[16],可以得到:

$$\text{当 } \int_{-\infty}^{+\infty} y(t)s_1(t)dt - E_b > \int_{-\infty}^{+\infty} y(t)s_2(t)dt - E_b, \text{ 判为 } s_1(t);$$

$$\text{当 } \int_{-\infty}^{+\infty} y(t)s_1(t)dt - E_b < \int_{-\infty}^{+\infty} y(t)s_2(t)dt - E_b, \text{ 判为 } s_2(t)。$$

$$\text{也就是说 } \int_{-\infty}^{+\infty} y(t)(s_1(t) - s_2(t))dt > 0, \text{ 则判为 } s_1(t); \int_{-\infty}^{+\infty} y(t)(s_1(t) - s_2(t))dt < 0, \text{ 则判为 } s_2(t)。$$

0,则判为 $s_2(t)$ 。

考虑到高铁车体的损耗经验值为20 dB^[17],则可以根据接收信号 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 的错误比特数量与发送信号 $x(t)$ 比特总数的占比来计算错误比特率。对于 $c=1, c=0.1$,则可利用MATLAB仿真,具体如图4(a)。

为了清晰地说明车体损耗会对直射信道 h 和复合信道 g 产生很大影响,当车体损耗为10 dB时,不同车体损耗下误比特率(BER)特性曲线具体如图4(b)所示。如图可知,当车体损耗衰减越小时,直射信道 f_0 和复合信道 g 的BER特性越接近。

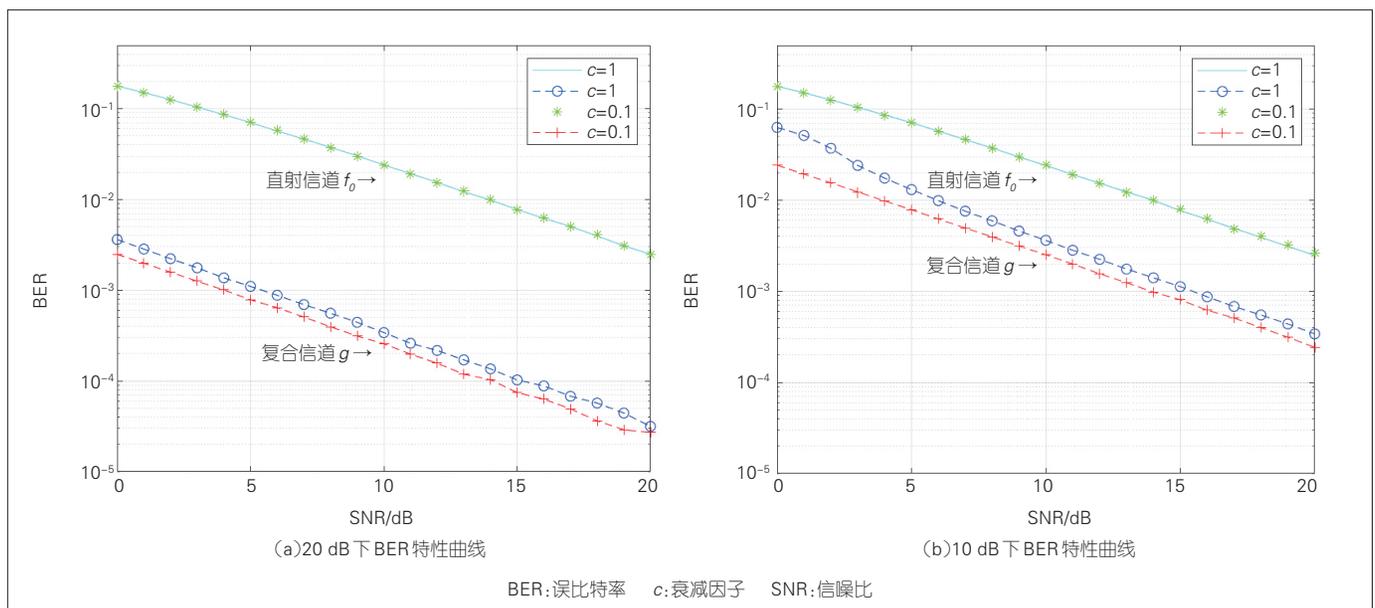
从图4(a)和图4(b)可以看出,由于直射信道 f_0 的概率密度函数与 c 无关,所以 $c=1, c=0.1$ 时的曲线重合。信道的BER曲线近似为直线,且随着信噪比(SNR)的增加,BER逐渐减小。信道的斜率近似相等,也就是说它们的变化速率近似相等。根据推导的结果可知,误比特率的理论值约为 $1/4SNR$ ^[18],所以BER与SNR成反比衰减。

当SNR在0~20 dB范围内时,由

于信道 g 的概率密度函数与 c 有关,那么对于 $c=1, c=0.1$,在相同的SNR条件下, c 越小,BER就越小。然而由于考虑了直射信道的车体损耗,即便 $c=0.1$,也不能看作是直射信道。在相同的SNR条件下,直射信道 f_0 的BER要大于复合信道 g 的BER。这可以说明,直射信道 f_0 比复合信道 g 出错的概率会更大。也就是说,在考虑高铁的车体损耗的条件下,复合信道 g 要优于直射信道 f_0 。

3 结束语

本文中,我们不仅总结了高铁中高架桥无线信道的基本概率密度函数,也得到了两种新的概率密度函数的闭合解。通过MATLAB仿真,比较了直射路径与非直射路径下信道的概率密度函数曲线,并验证了理论推导的正确性。另外,在相同SNR条件下,当直射信道考虑车体损耗,复合信道 g 的可靠性要优于直射信道 f_0 。综上所述,本文丰富了高铁高架桥场景下的无线信道理论,对未来高铁无线通信系统设计和优化有参考价值。



▲图4 不同车体损耗下BER特性曲线对比

参考文献

- [1] 瞿谦. 3.5万 km: 中国高铁的新跨度 [J]. 城市轨道交通研究, 2019, (12): 6
- [2] 刘志如. 京张高速铁路门式墩方案设计优化及施工技术研究 [J]. 科技与创新, 2020(4): 105-107
- [3] AI B, CHENG X, KURNER T. Challenges toward wireless communications for high-speed railway [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2014, 15(5): 2143-2158. DOI: 10.1109/TITS.2014.2310771
- [4] 王熙宇. 高铁无线通信系统的快时变信道估计 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018
- [5] XING C, JING Y, WANG S, et al. New viewpoint and algorithms for water-filling solutions in wireless communications [J]. IEEE transactions on signal processing, 2020, 68: 1618-1634. DOI: 10.1109/TSP.2020.2973488
- [6] YANG Y, GAO F, LI G Y, et al. Deep learning-based downlink channel prediction for FDD massive MIMO system [J]. IEEE communications letters, 2019, 23(11): 1994-1998. DOI: 10.1109/LCOMM.2019.2934851
- [7] 刘留, 陶成, 陈后金, 等. 高速铁路无线传播信道测量与建模综述 [J]. 通信学报, 2014, (1): 115-127
- [8] AI B, MOLISCH A F, RUPP M, et al. 5G key technologies for smart railways [J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(6): 856-893. DOI: 10.1109/JPROC.2020.2988595
- [9] ZHOU Y, TIAN L, LIU L, et al. Fog computing enabled future mobile communication networks: a convergence of communication and computing [J]. IEEE communications magazine, 2019, 57(5): 20-27. DOI: 10.1109/

MCOM.2019.1800235

- [10] ZHOU Y, LIU L, WANG L, et al. Service-aware 6G: an intelligent and open network based on the convergence of communication, computing and caching [J]. Digital communications and networks, 2020, 6(3): 253-260. DOI: 10.1016/j.dcan.2020.05.003
- [11] ZHOU T, LI H, WANG Y, et al. Channel modeling for future high-speed railway communication systems: a survey [J]. IEEE access, 2019, 7: 52818-52826. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2912408
- [12] HOU Z, ZHOU Y, TIAN L, et al. Radio environment map-aided doppler shift estimation in LTE railway [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2017, 66(5): 4462-4467. DOI: 10.1109/TVT.2016.2599558
- [13] HE R, ZHONG Z, AI B, et al. Measurements and analysis of propagation channels in high-speed railway viaducts [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2013, 12(2): 794-805. DOI: 10.1109/TWC.2012.120412.120268
- [14] AMOS D E. A portable package for Bessel functions of a complex argument and non-negative order [J]. Transactions on mathematical software, 1986, 12(3):265-273
- [15] MOLISH A F. 无线通信(第二版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2018
- [16] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理(第7版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2020
- [17] 尤嘉. 高速铁路场景下无线中继通信系统信息传输可靠性与安全性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018
- [18] VISWANATH D T P. 无线通信基础 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007

作者简介



张逸康, 北京交通大学在读本科生; 主要研究方向为无线通信、物联网、人工智能等。



王公仆, 北京交通大学教授、博士生导师, 信息通信网络研究所副所长; 主要研究方向为移动互联网、无线信号处理以及人工智能应用; 发表论文 120 篇, 获授权专利 3 项。



叶如意, 中国标准化研究院副研究员; 主要研究方向为电子商务信用体系、平台经济发展与管理标准化等; 发表论文 10 余篇, 参与编著著作(含译著)3 部, 获发明专利 2 项。

←上接第 17 页

信号与发射信号相干叠加。仿真结果表明, 采用 IRS 辅助后, 等效信道的信道增益随时间波动幅度小且更加平缓, 误比特率性能得到较大提升, 能够较好地提高了高铁通信系统性能, 减少信道快衰落影响。

参考文献

- [1] 刘留, 陶成, 余立, 等. 高速铁路无线信道测量与信道模型探讨 [J]. 电信科学, 2011, 27(5): 54-60. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0801.2011.05.014
- [2] WU Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network [J]. IEEE communications magazine, 2020, 58(1): 106-112. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900107
- [3] CUI T J, MEI Q Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programming metamaterials [J]. Light: science & applications, 2014, 3(10): e218. DOI: 10.1038/lsa.2014.99
- [4] BASAR E, AKYILDIZ I F. Reconfigurable intel-

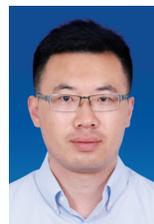
ligent surfaces for Doppler effect and multipath fading mitigation [EB/OL]. (2019-12-09) [2021-06-03]. <https://arxiv.org/abs/1912.04080>

- [5] HUANG Z, ZHENG B, ZHANG R. Transforming fading channel from fast to slow: IRS-assisted high-mobility communication [EB/OL]. (2020-11-06) [2021-06-02]. <https://arxiv.org/abs/2011.03147>
- [6] 刘留, 陶成, 陈后金, 等. 高速铁路无线传播信道测量与建模综述 [J]. 通信学报, 2014, 35(1): 115-127. DOI: 10.3969/j.issn.1000-436x.2014.01.014
- [7] YING D, WOOK F W, THOMAS T A, et al. Kronecker product correlation model and limited feedback codebook design in a 3D channel model [C]//2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). Sydney, NSW, Australia: IEEE, 2014:5865-5870. DOI: 10.1109/ICC.2014.6884258
- [8] QIN Q, GUI L, PENG C, et al. Time-varying channel estimation for millimeter wave multi-user MIMO systems [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2018, 67(10): 9435-9448. DOI: 10.1109/TVT.2018.2854735
- [9] TANG W, CHEN M Z, CHEN X, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: path loss modeling and experimental measurement [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2020, 20(1): 421-439. DOI: 10.1109/TWC.2020.3024887
- [10] WU Q, ZHANG S, ZHENG B, et al. Intelligent reflecting surface aided wireless communications: a tutorial [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(5): 3313-3351. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3051897

作者简介



王靖瑜, 西南交通大学在读硕士研究生; 主要研究方向为智能反射表面辅助的移动通信系统设计。



鞠宏浩, 西南交通大学助理研究员; 主要研究方向为高速移动通信系统设计。



方旭明, 西南交通大学教授、博导; 主要研究领域为下一代移动通信系统和轨道交通移动通信关键技术; 主持或参与“973”计划、“863”计划、重大科技专项、自然科学基金重点和面上项目, 以及中国铁路总公司重大、重点科技研发项目等 60 余项; 发表论文 300 余篇, 获得发明专利 40 余项。