智能反射面在高铁通信下的 应用研究

Applications of Intelligent Reflecting Surface in **High-Speed Railway Communications**

王靖瑜/WANG Jingyu,鞠宏浩/JU Honghao,方旭明/FANG Xuming

(两南交通大学,中国 成都 611756) (Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

摘要:提出了一种智能反射面(IRS)辅助的高铁通信方案。针对视距(LOS)主导的无线通信场 景,在车载接入点(AP)和基站(BS)已知信道状态情况下,本方案首先通过调整IRS反射信号 相位,补偿级联信道中LOS分量的多普勒频移,后通过最大化LOS径波束赋形增益,并在接收 端处将IRS反射信号与基站发射信号相干叠加,提升接收信号质量。仿真结果表明,相比于未 部署IRS场景,IRS辅助的高铁无线通信系统有效减轻了高铁高速移动对无线信道带来的快衰 落影响,并且系统误比特率性能也得到了明显改善。

关键词:高速铁路:智能反射面:快衰落:波束赋形

Abstract: An Intelligent Reflecting Surface (IRS) -assisted high-speed railway communications scheme is proposed. For the Line-Of-Sight (LOS) dominant communication scenario, assuming the channel state information is perfectly known by the access point (AP) and base station (BS), the proposed scheme can control the IRS reflecting phase to compensate for the Doppler shift of the LOS component, maximize the beamforming gain of the LOS path, and achieve the coherent combination of the IRS reflected signal and BS transmitted signal. Simulation results show that the IRS-assisted high-speed railway communications system can effectively alleviate the fast fading and improve system Bit Error Rate.

Keywords: high-speed railway; Intelligent Reflecting Surface; fast fading; beamforming

DOI: 10.12142/ZTETJ.202104004 网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/ detail/34.1228.TN.20210722.1415.004.html

网络出版日期:2021-07-23 收稿日期:2021-06-18

→ 铁作为一种方便快捷的交通运 输系统,具有运力强、效率高、 速度快等优点,目前已经成为人们主 要的出行方式之一。作为高铁乘客 的主要信息交互手段,高铁车地通信 系统的业务需求量也随着高铁乘客 量的增加而急剧增长。然而,不同于

基金项目: 国家自然科学基金(62071393、U1834210); 四川省应用基础研究重点项目(2020YJ0218);中央高 校基本科研业务费项目(2682021CF019)

传统的地面交通工具,高铁具有很高 的运行速度,这将在信号收发端产生 较大的多普勒频偏凹,严重时可能还 会导致接收端无法解调信号,这给高 铁车地通信系统的设计带来了极大 挑战。

近年兴起的智能反射面(IRS)具 备重塑信道环境的能力[2]。IRS可以 控制每个反射单元的幅度和相移,并 根据信道状态动态调整反射信号四。 利用这一特点,IRS能够实时补偿多 普勒频移的相位变化,从而减少多普 勒频移对接收端的影响[4-5]。若将其 运用到高铁车地通信系统设计中,有 望解决高铁高速移动过程中的信道 快衰落问题。

1 IRS輔助的高铁车地通信系统

在高铁通信中,为了避免电磁波 穿透高铁车厢的穿透损耗,车内用户 和地面基站一般采用基站(BS)与车 载接入点(AP)通信、车载AP与车内

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

用户通信的两跳链路。由于中国高铁线路主要以开阔环境为主,铁路周围反射和散射较少,存在较强视距(LOS)径^[6]。因此,本文中我们主要在LOS径主导的高速移动场景下,研究IRS辅助的高铁无线通信性能提升方法。

为阐述IRS消除多普勒频移的原理,我们假设在高铁视距通信场景下,LOS径受到障碍物遮挡,AP只能接收IRS反射信号。针对等效基带信号,如果不考虑噪声及信道衰落,IRS接收到的基带信号为:

$$y(t) = x(t)e^{j2\pi f_D t}, \tag{1}$$

其中, f_n 是 BS-IRS 链路的多普勒频移。通过 IRS 反射后,接收信号可表示为:

$$\gamma(t) = x(t)e^{j2\pi f_D t + j\theta(t)}, \qquad (2)$$

其中, $e^{i\theta(t)}$ 表示 IRS 随时间变化的相移函数。显然,令 $\theta(t) = -2\pi f_D t$ (即在每一时刻利用 IRS 消除多普勒频移引入的相位变化),就可以消除多普勒频移,提升高速移动场景下的接收端性能。

2系统模型建立及求解

通过以上分析,我们可以利用IRS来提升高铁快速移动时的通信接收性能。如图1所示,首先利用IRS建立级联链路,在IRS处分离出LOS分量和非视距(NLOS)分量。其中,LOS分量和NLOS分量分别受多普勒频移和多普勒扩展影响。然后利用IRS调整LOS分量反射信号相位,在消除LOS分量多普勒频移的同时,通过波束赋形提高LOS径增益。最后,在AP侧将IRS反射信号与基站发射信号相干叠加,整体上提升接收端信噪比并减少信道快衰落影响。

2.1 IRS辅助下的高铁通信模型

为了更好地评估IRS 给高铁通信带来的性能提升,我们假设所有信道状态信息(CSI)完全已知。设定列车以速度v匀速行驶,基站和车载AP均为全向单天线。IRS为布置在铁路一侧的均匀矩形阵列(URA),由 N_i = $N \times N$ 个天线阵元组成。以BS为原点建立三维笛卡尔坐标系,假设帧长为 T_a ,每一帧由M个长度为 T_c 的时隙组成,则满足 T_a = $M \times T_c$ 。

我们考虑两种链路: BS-AP链路(直接链路)和BS-IRS-AP链路(级联链路)。直接链路在第n个时隙的信道增益 h_{dn} 服从瑞利分布,其多普勒功率扩展谱为 Jakes 谱。级联链路包含 BS-IRS 链路和 IRS-AP 链路, BS-IRS 链路的信道增益为 $h_1 \in \mathbb{C}^{N_l \times 1}$, IRS-AP 链路的信道增益为 h_2 , $ext{order}$ 以对于BS-IRS 链路,由于IRS的位置已提前规划,假设该链路为LOS传输,则信道 h_1 建模为:

$$h_{1} = \alpha p_{x} (\varphi_{1}, \theta_{1}) \otimes p_{z} (\varphi_{1}, \theta_{1}) = \alpha a (\varphi_{1}, \theta_{1}),$$
(3)

其中,α表示BS-IRS链路的路径复增

益, $\varphi_1 \in [0,\pi]$ 和 $\theta_1 \in [0,\pi]$ 分别表示信号到达 IRS 的方位角以及俯仰角,
⊗ 表示克罗内克积 (Kronecker Product)
∘ $p_x(\varphi_1,\theta_1) \in \mathbb{C}^{N\times 1}$ 与 $p_z(\varphi_1,\theta_1) \in \mathbb{C}^{N\times 1}$ 分别为 IRS 沿 x 轴和 z 轴的导向矢量[7]:

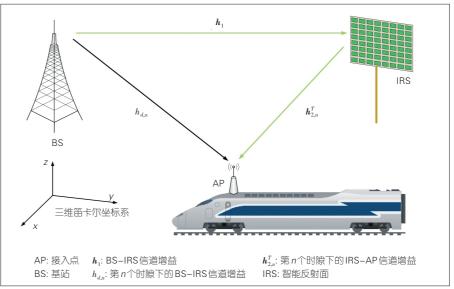
$$\begin{aligned} & \boldsymbol{p}_{\boldsymbol{x}} \left(\boldsymbol{\varphi}_{1}, \boldsymbol{\theta}_{1} \right) = \\ & \left[1, e^{j2\pi d_{\boldsymbol{x}} \sin\theta_{1} \cos\varphi_{1}/\lambda}, \cdots, e^{j(N-1)2\pi d_{\boldsymbol{x}} \sin\theta_{1} \cos\varphi_{1}/\lambda} \right]^{T}, \end{aligned} \tag{4}$$

$$p_{z}(\varphi_{1},\theta_{1}) = \begin{bmatrix} 1, e^{j2\pi d_{z}\cos\theta_{1}/\lambda}, \cdots, e^{j(N-1)2\pi d_{z}\cos\theta_{1}/\lambda} \end{bmatrix}^{T}$$
(5)

由于BS-IRS链路保持相对静止,那么在一个帧长内,可认为 α 、 θ ₁和 φ ₁保持不变。针对IRS-AP链路,第n个时隙下的信道增益 \mathbf{h}_{2n} 建模成莱斯信道:

$$h_{2,n} = \sqrt{\frac{\kappa}{1+\kappa}} h_{\text{LOS},n} + \sqrt{\frac{1}{1+\kappa}} h_{\text{NLOS},n}, n = 1, 2, \dots, M,$$
(6)

其中, κ为莱斯因子, h_{NIOS} 为第 n 个



▲图1 IRS辅助下的高铁通信

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

时隙IRS-AP链路中NLOS分量,服从 瑞利分布,其功率扩展谱为Jakes谱。 h_{LOS_a} 为LOS分量,仅受多普勒频偏影 响。 $h_{LOS,n}$ 为:

$$h_{\text{LOS},n} = \beta p_x(\varphi_2, \theta_2) \otimes p_z(\varphi_2, \theta_2) e^{j2\pi f_d n T_e} = \beta a(\varphi_2, \theta_2) e^{j2\pi f_d n T_e}, n = 1, 2, \dots, M$$
(7)

β表示 IRS-AP链路的路径复增 $\dot{\Delta}, \varphi_2 \in [0,\pi]$ 和 $\theta_2 \in [0,\pi]$ 分别表示 信号离开IRS的方位角和俯仰角。相 对于列车运行速度,由于通信帧长较 短(毫秒级),在一个帧长内可认为列 车相对于BS保持静止,信道复增益 系数变化较为缓慢^[8]。因此,假设 β 、 θ_{2} , φ_{2} 和 f_{i} 在一个帧内保持不变。

在前文所述基础上,定义对角矩 阵 $\Omega_n = \operatorname{diag}(e^{j\omega_{1,n}}, \dots, e^{j\omega_{N_I,n}}) \in \mathbb{C}^{N_I \times N_I}$ 为 第n个时隙下IRS反射系数矩阵,则 第n个时隙接收信号可以写为:

$$y = (\boldsymbol{h}_{2,n}^T \boldsymbol{\Omega}_n \boldsymbol{h}_1 + \boldsymbol{h}_{d,n}) x + \boldsymbol{\xi}_n,$$

$$n = 1, 2, \dots, M,$$
(8)

其中, ξ_n ~ $\mathcal{C}\mathcal{N}$ $(0,\sigma^2)$ 表示加性高斯白 噪声。

2.2 问题求解

针对上述问题,可以通过以下步 骤减少信道快衰落影响,并提升AP 接收信号的信噪比:

- (1)利用IRS消除LOS分量的多 普勒频移,并进行波束赋形,以提高 LOS径增益;
- (2)在(1)的基础上,利用IRS调 整反射信号相位,使AP接收到的IRS 反射信号与基站发射信号相干叠加, 最大化AP接收信号的信噪比。

首先针对公式(8)中的接收信号 γ_k ,为利用IRS对抗多普勒偏移并实 现信号波束赋形,定义 $h_{rn} = \boldsymbol{h}_{2n}^T \boldsymbol{\Omega}_n \boldsymbol{h}_1$ 为级联信道,那么 h_m 可进一步写为:

$$h_{r,n} = \sqrt{\frac{\kappa}{1+\kappa}} h_{\text{LOS},n}^T \Omega_n h_1 + \sqrt{\frac{1}{1+\kappa}} h_{\text{NLOS},n}^T \Omega_n h_1 = \sqrt{\frac{\kappa}{1+\kappa}} s_{\text{LOS},n} + \sqrt{\frac{1}{1+\kappa}} s_{\text{NLOS},n}, n = 1, 2, \dots, M_{\odot}$$
(9)

此外, 定义 $\boldsymbol{v}_n = \left[e^{j\omega_{1,n}}, \dots, e^{j\omega_{N_{I^n}}}\right]^I$, LOS 分量 s_{LOS} 经过变量代换可以得 到 $\boldsymbol{h}_{LOS,n}^T \boldsymbol{\Omega}_n \boldsymbol{h}_1 = \boldsymbol{v}_n^T \boldsymbol{g}_n \circ \boldsymbol{g}_n$ 表示为:

$$\mathbf{g}_{n} = \gamma e^{j2\pi f_{d}nT_{c}} \mathbf{a} \left(\varphi_{1}, \theta_{1}\right) \odot \mathbf{a} \left(\varphi_{2}, \theta_{2}\right),$$

$$n = 1, 2, \dots, M,$$
(10)

其中,⊙为哈达玛积(Hadamard Product)。基于此, $s_{LOS,n}$ 可进一步表示为:

$$\mathbf{s}_{\text{LOS},n} = \gamma e^{j2\pi f_d n T_c} \mathbf{v}_n^T \mathbf{a} (\varphi_1, \theta_1) \odot \mathbf{a} (\varphi_2, \theta_2),$$

$$n = 1, 2, \dots, M_{\odot}$$
(11)

根据公式(11),在第 n个时隙将 相 位 调 整 为 \boldsymbol{v}_{1n}^T = $e^{-j2\pi f_d nT_c} \left(\boldsymbol{a} \left(\boldsymbol{\varphi}_1, \boldsymbol{\theta}_1 \right) \odot \boldsymbol{a} \left(\boldsymbol{\varphi}_2, \boldsymbol{\theta}_2 \right) \right)^H$, 这样能 够消除 h_{10Sa}中引入的多普勒频移,并 实现IRS波束赋形,提高级联信道中 LOS 径增益。IRS 波東赋形后,在AP 侧,级联信道中LOS径增益较大,在 各信道中占据主导地位。这使得等 效合成信道的快衰落影响得到改善。

经过第1步求解,级联信道表示 为 h⁽¹⁾。BS 和 AP 之间的等效信道模 型可写为:

$$h_n = h_{rn}^{(1)} + h_{dn}, n = 1, 2, \dots, M_{\odot}$$
 (12)

由于向波束赋形矢量添加任意 相位旋转并不会影响波束赋形增益, 我们定义 $\mathbf{v}_{2n} = \mathbf{v}_{1n} e^{i\epsilon}$ 为第2步求解的 调整相位。将 \boldsymbol{v}_{2n} 代入公式(12)得到 公式(13):

$$\begin{split} h_n &= h_{r,n}^{(2)} + h_{d,n} = h_{r,n}^{(1)} e^{je} + h_{d,n}, \\ n &= 1, 2, \cdots, M_{\odot} \end{split} \tag{13}$$

根据公式(13)可知,在第n个时 隙下将 IRS 相位调整为 $\boldsymbol{v}_{2,n}$ = $\mathbf{v}_{1,n}e^{-j\left(\arg\left(h_{r,n}^{(1)}\right)-\arg\left(h_{d}\right)\right)}$,能够在消除多普勒 频移以及实现级联信道波束赋形的 基础上,使AP接收到的IRS反射信号 与BS发射信号相干叠加,从而整体 上提升AP接收信噪比。

在第n个时隙下,IRS调整为最 优相位 \boldsymbol{v} 。"后,可达速率为:

$$R = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^{M} \log \left(1 + \frac{\left| \widehat{h_n} \right|^2}{\Gamma \sigma^2} \right)_{\circ}$$
 (14)

其中, $\widehat{h_n} = h_{cn}^{(2)} + h_{dn}$ 为第n个时隙下 IRS调整为最优相位后的最大信道增 益, Γ≥1表示与实际情况下信道容 量差距,由所用调制和编码机制 (MCS)决定。

3 仿真结果及分析

本节中,我们通过仿真来验证所 提算法的性能。仿真参数的设置如 表1所示。经计算,最大多普勒频移 $f_m = vf_c/c \approx 1660 \text{ Hz}$,其中 c 为光速。 每个时隙长度设置为相关时间 T_{c} = $0.423/f_m \approx 0.2 \text{ ms}_{\odot}$

我们设置BS、IRS和AP的坐标分 别为(0 m, 0 m, 20 m)、(0 m, 300 m, 20 m)、(20 m, 200 m, 0 m)。为方便讨 论,假设IRS布阵间距 $d_x = d_y = 0.01 \text{ m}$ 。根据远场边界公 式[9], 可得远场距离为L=2D2/ $\lambda = 2N_I d_x d_y / \lambda \approx 5.3 \,\mathrm{m}_{\odot}$ 因此,我们可认 为收发端均位于远场,此时级联信道 满足路径乘积损耗模型[10]。

假设IRS单元数 $N_i = 40 \times 40$,图 2给出了一个传输帧内,信道增益随 时间变化的曲线。由图2可知,在没 有部署IRS时,信道增益波动幅度大 且剧烈;而经过IRS智能反射后,信道 增益波动幅度小且更加平缓,并且平

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

▼表1 仿真参数设置

仿真参数	参数值
高铁速度 v	350 km/h
载波频率 f_c	5 GHz
带宽 <i>B</i>	100 kHz
噪声功率 σ^2	-90 dBm
发射功率 P_{ι}	40 dBm
帧长 T_d	3 ms
参考距离 $(1\mathrm{m})$ 路径损耗 c_o	30 dB
莱斯因子κ	10 dB
BS-AP链路路损因子	3.5
BS-IRS信道路损因子	2
IRS-AP信道路损因子	2.8
多普勒功率谱	Jakes

AP:接入点 BS:基站 IRS:智能反射面

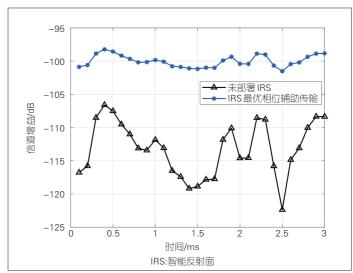
均增益相比于未部署IRS时也有了明 显提升。这表明IRS减轻了速度对无 线信道时变性的影响。

在上述基础上,我们研究可达速 率R与单元数 N_i 间关系。根据图3可 知,部署IRS后,IRS采用最优相位或 随机相位,可达速率均随N,增加而增 大。但采用最优相位后,可达速率R具有更高的增长速率。

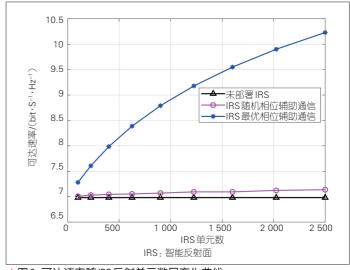
最后,固定BS坐标为(0m,0m, 20 m), IRS坐标为(0 m, 300 m, 20 m), 假设IRS单元数 $N_1 = 40 \times 40$ 、BS发射 16进制正交幅度调制(QAM)信号,并 分析车载 AP分别运行至不同位置时 误比特率情况。从图4可以看出,没 有部署IRS时,由于不存在波束赋形 增益,接收信噪比相对较低,误比特 率相对较大。当IRS调整至最优相位 时,该方案充分利用了BS-AP以及BS-IRS-AP两条链路带来的分集增益,所 以误比特率相对较低。此外,当IRS 调整至最优相位时,随着列车远离BS 并逐渐向IRS靠近,误比特率呈现出 先增后减的趋势。这是因为列车在 靠近BS时,AP到BS路径损耗较小, 接收信噪比较大,使得误比特率降 低;而列车靠近IRS时,AP接收到的 BS信号较弱,但由于AP更靠近IRS, 因此能够接收到较强的IRS反射信 号。这使得接 收信噪比仍然 保持着一个较 高值,误比特率 仍处于较低水 平。当列车处 于中间位置(同 时远离BS与 IRS)时,AP端的 接收信噪比相 对较低,误比特 率相对较大。

4 结束语

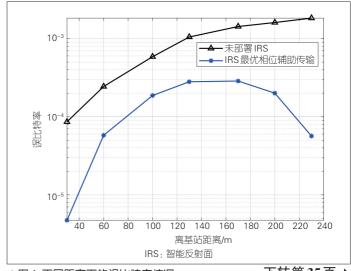
本文中,我 们研究了IRS辅 助下的高铁通 信方案。在车 载 AP 和 BS 已 知信道状态条 件下,通过IRS 对反射信号进 行相移调整,能 够补偿级联信 道 LOS 分量的 多普勒频移,优 化IRS波東赋形 增益,并在车载 AP处实现反射



▲图2 信道增益变化曲线



▲图3 可达速率随IRS反射单元数目变化曲线



▲图4 不同距离下的误比特率情况

下转第35页➡

张逸康 等

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

参考文献

- [1] 訾谦. 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 highspeed 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 view-point 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 learningbased 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 net works: a convergence of communication and computing [J]. IEEE communications maga zine, 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 nonnegative 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 证以及人工等能应用; 发表论文120篇,获授 权专利3项。

4



叶如意,中国标准化研究院副研究员;主要研究院向为电子商务层联研究系统系统系统系统系统系统系统系统系统系统系统系统系统系统。 10 余篇,参与编署的 作(含译署)3部,获发明专利2项。

←上接第17页

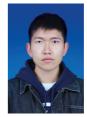
信号与发射信号相干叠加。仿真结果表明,采用IRS辅助后,等效信道的信道增益随时间波动幅度小且更加平缓,误比特率性能得到较大提升,能够较好地提高了高铁通信系统性能,减少信道快衰落影响。

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/ Isa.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.201 4.01.014
- [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 MI– MO 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

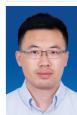
作 者 简



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。

4

1



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;主要研究通大学领域为下一代通报。第二年对通通经域为下一代通报的通报的通报的,并通报的,并通报的,并通知。第373°计划、"863°计划,在第373°计划,第573°计划,

项目等60余项;发表论文300余篇,获得发明专利40余项。