

基于毫米波高铁车地通信的自适应多波束成形方法



蒋锐^{1,2} 尹惠^{1,2} 徐友云²

1 南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003

2 南京邮电大学通信与网络技术国家地方联合工程研究中心 南京 210003

摘要 文中提出了一种基于毫米波高铁车地通信的自适应多波束成形方法。在该方法中,基站利用毫米波同时发射多个具有不同宽度的波束进行信号传输,从而提升系统的吞吐量。多波束传输方法也可以降低系统的通信中断概率。但是,多个波束同时传输信号会引发波束间干扰的问题。为了减弱其影响,采用一种自适应波束激活算法来实时调整激活波束的数量,使系统在当前时刻保持最佳的吞吐量性能。理论分析和仿真结果表明,所提方法可以进一步提升高铁车地通信系统的吞吐量,同时还可以获得较低的通信中断概率。

关键词: 高铁通信;毫米波;多波束成形;波束间干扰

中图分类号 U285

Millimeter Wave Based Adaptive Multi-beamforming Scheme for High-speed Railway Vehicle-ground Communications

JIANG Rui^{1,2}, YIN Hui^{1,2} and XU You-yun²

1 College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2 National Local Joint Engineering Research Center for Communication and Network Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract A millimeter wave based adaptive multi-beamforming scheme for high-speed railway (HSR) vehicle-ground communications is proposed in this paper. In the proposed scheme, multiple beams with different beam-width are formed by base station simultaneously to improve the system throughputs. In the multi-beam transmission method, the outage probability could be decreased as well. Unfortunately, the inter beam interference (IBI) is introduced when multiple beams transmit signals simultaneously. Therefore, an adaptive algorithm adjusting the activated beams in real time is presented in this scheme to mitigate the IBI and maintain an optimal throughput at current time. Theoretical analysis and simulation results suggest that the proposed scheme can improve the system throughput with a lower outage probability in HSR vehicle-ground communications.

Keywords High-speed railway communications, Millimeter-wave, Multi-beamforming, Inter beam interference

1 引言

随着高速铁路的迅速发展,云计算、物联网、大数据、北斗定位、下一代移动通信和人工智能等先进的技术手段将被应用到高铁中。新一代信息技术与高速铁路技术的集成融合,实现了高铁智能建造、智能装备和智能营运技术水平的全面提升^[1],但这对高移动场景中数据传输速率和可靠的移动业务提出了极高的要求。同时,为了给高铁乘客带来更好的用户体验,满足高铁用户在高移动场景下对无线数据下载、OTT消息传输、高清图片上传、视频播放、视频会话、实时视频分享和移动在线游戏等业务的需求,高铁通信对高速率、大带宽且具有服务质量保证的无线移动通信的需求也与日俱增^[2]。然而,目前的 GSM-R(Global System for Mobile Com-

munications-Railway 或 GSM-Railway)系统只能提供高速铁路关于列车正常运行的相关调度应急通信方面的需求,这远远不能满足现代高铁对传输速率和传输可靠性的要求,也达不到用户在高速移动过程中“信息随心至,万物触手及”的宽带通信愿景^[3-4]。而升级版的 LTE-R(Long Term Evolution-Railway)系统还没有形成统一的标准^[5]。因此,如何大幅提升高铁车地无线通信系统的数据传输速率和信息传输的可靠性,以满足人们日益增长的无线业务需求,引起了业内的广泛关注。

拓展新的频谱资源,开发毫米波频段,能够提供极宽的带宽资源,从而解决低频段频谱资源稀缺的问题^[6]。但是,在进行信号传输时,高频波段在空气中的衰减十分严重^[7]。而波束成形技术可以通过对多天阵元上的各路信号进行加权合

到稿日期:2020-01-08 返修日期:2020-03-08 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家重点研发计划(2016YFE0200200);国家自然科学基金(61801240,61701253);南京邮电大学研究项目(NY220008)

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFE0200200), National Natural Science Foundation of China (61801240,61701253) and Research Foundation of Nanjing University of Posts and Telecommunications(NY220008).

通信作者:蒋锐(j_ray@njupt.edu.cn)

3.3 接收信号模型

在激活的服务波束集合 B_{opt} 中,第 i 个车载移动中继节点的接收信号可以表示为:

$$\mathbf{y}_i = \sqrt{\mu_i} \mathbf{h}_i \mathbf{w}_i^H \mathbf{x}_i + \sum_{j \in B_{\text{opt}}, j \neq i} \sqrt{\mu_j} \mathbf{h}_j \mathbf{w}_j^H \mathbf{x}_j + \mathbf{n}_i \quad (1)$$

等式右边的 3 项分别表示期望的接收信号、干扰信号和噪声。 μ_i 可以表示为:

$$\mu_i = p_i \beta_i G_{T_i} G_{R_i} \quad (2)$$

其中, p_i 是分配给第 i 个波束的功率, β_i 为从基站到第 i 个车载移动中继节点的大尺度衰落因子,它由路径损耗 $PL(d_i)$ 和阴影衰落指数 σ_p 共同决定^[13], d_i 是从发射基站到第 i 个移动中继节点的距离。 G_{T_i} 和 G_{R_i} 分别表示发射波束和接收波束的波束成形增益,其表达式如下^[14]:

$$\text{gain}(W_{3\text{dB}}, \Delta\theta) = \frac{2\pi}{W_{3\text{dB}}} 10^{-0.1\eta \left(\frac{\Delta\theta}{W_{3\text{dB}}}\right)^2} \quad (3)$$

其中, η 是一个常数,取值为 $4 \log 2$; $W_{3\text{dB}}$ 表示波束的 3 dB 带宽。在理想情况下, $\Delta\theta$ 是波束主瓣方向和到达角方向的角度差。

式(1)中,信道矢量 $\mathbf{h}_i \in \mathbb{C}^{1 \times N_T}$ 可以表示为^[12]:

$$\mathbf{h}_i = \alpha_i \exp\left(\frac{j2\pi d_i}{\lambda c}\right) \mathbf{r}(\phi_i) \quad (4)$$

其中, α_i 是一个随机量,服从标准正太分布 $N(0, 1)$; $\mathbf{r}(\phi_i)$ 是天线阵方向矢量:

$$\mathbf{r}(\phi_i) = [1, e^{-j2\pi\Delta\cos\phi_i}, \dots, e^{-j2\pi(N_T-1)\Delta\cos\phi_i}] \quad (5)$$

$\mathbf{w}_i \in \mathbb{C}^{1 \times N_T}$ 是均匀线性直线阵的权值矢量,可以表示为:

$$\mathbf{w}_i = \frac{1}{\sqrt{N_T}} \mathbf{r}(\phi_i) = \frac{1}{\sqrt{N_T}} [1, e^{-j2\pi\Delta\cos\phi_i}, \dots, e^{-j2\pi(N_T-1)\Delta\cos\phi_i}] \quad (6)$$

\mathbf{x}_i 表示第 i 个发射信号,满足 $E\{|\mathbf{x}_i|^2\} = 1, i \in B_{\text{opt}}; \mathbf{n}_i$ 是均值为零、方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声。

4 优化问题描述

为了进一步提升高铁车地通信系统的吞吐量性能,本节将建立系统吞吐量的优化问题,并采用自适应波束激活方法来搜索当前时刻最佳的服务波束,从而优化高铁车地通信系统的通信容量和通信质量。

4.1 系统吞吐量优化问题

根据接收信号,可以计算出第 i 个移动中继节点所对应的接收信干噪比 $SINR_i$:

$$\begin{aligned} SINR_i &= \frac{E\{|\sqrt{\mu_i} \mathbf{h}_i \mathbf{w}_i^H \mathbf{x}_i|^2\}}{E\left\{\left|\sum_{j \in B_{\text{opt}}, j \neq i} \sqrt{\mu_j} \mathbf{h}_j \mathbf{w}_j^H \mathbf{x}_j + \mathbf{n}_i\right|^2\right\}} \\ &= \frac{|\sqrt{\mu_i} \mathbf{h}_i \mathbf{w}_i^H|^2 E\{|\mathbf{x}_i|^2\}}{\sum_{j \in B_{\text{opt}}, j \neq i} |\sqrt{\mu_j} \mathbf{h}_j \mathbf{w}_j^H|^2 E\{|\mathbf{x}_j|^2\} + E\{|\mathbf{n}_i|^2\}} \\ &= \frac{\mu_i |\mathbf{h}_i \mathbf{w}_i^H|^2}{\sigma_n^2 + \sum_{j \in B_{\text{opt}}, j \neq i} \mu_j |\mathbf{h}_j \mathbf{w}_j^H|^2} \end{aligned} \quad (7)$$

则高铁车地通信系统在某个时刻的总吞吐量可以表示为:

$$C = \sum_{i \in B_{\text{opt}}} W \log_2(1 + SINR_i) \quad (8)$$

其中, W 为信道带宽。

基站同时发射多个波束进行信号传输可以提升高铁车地通信网络的吞吐量性能,但是多个波束之间会产生波束间干

扰的问题,从而降低系统的性能;而且列车与基站之间的距离越远,波束之间的分辨率越低,这种波束间的干扰就越严重。如果一直保持多个波束同时传输信号,则当列车处于小区边缘时,波束间干扰将严重影响系统的吞吐量性能。为了减弱波束间干扰的影响,使系统吞吐量保持在最佳水平,需要实时调整激活波束的数量,对系统吞吐量进行优化。本文的优化问题就是调整激活波束的数量,使系统吞吐量最大化:

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i \in B_{\text{opt}}} W \log_2(1 + SINR_i) \\ \text{s. t.} \quad & B_{\text{opt}} \subset \Omega \\ & \sum_{i \in B_{\text{opt}}} p_i \leq P \end{aligned} \quad (9)$$

其中, Ω 是所有待激活波束的集合, P 是总的发射功率。

4.2 计算发射波束宽度

在解决式(9)中的吞吐量优化问题之前,需要预先计算出每个车载移动中继节点在小区覆盖范围内所需的所有发射波束宽度以及相应的波束切换点。计算方法如算法 1 所示^[10]。

算法 1 发射波束宽度计算法

输入: $N_S, \theta_{\text{max}}, \theta_{\text{min}}, \Gamma_{\text{th}}, \delta$

输出: $\theta(i, k), \text{BSP}(i, k), N(i)$

1. 初始化: $B_{\text{sum}}(i) = 0, N(i) = 0$;
2. 发射波束宽度 $\theta(i, k) = \theta_{\text{max}}$;
3. 判断接收信噪比是否小于接收门限,若小于则进入步骤 4, 否则进入步骤 6;
4. 更新发射波束宽度 $\theta(i, k)$;
5. 判断 $\theta(i, k)$ 是否小于 θ_{min} , 若小于, 则 $\theta(i, k) = \theta_{\text{min}}$, 进入步骤 6, 否则进入步骤 3;
6. 计算发射波束总宽度 $B_{\text{sum}}(i)$ 和波束切换点 $\text{BSP}(i, k)$;
7. 判断 $\text{BSP}(i, k)$ 是否在基站的覆盖范围内, 若在, 则 $k = k + 1$, 进入步骤 2, 否则 $i = i + 1$, 进入步骤 1, $i \in (1, N_S)$ 。

若列车的位置信息已知,为其服务的波束便可以确定。因此,当列车穿过小区时,基站可以根据当前的位置为每个移动中继节点提供一个服务波束。该波束的宽度和边界点可以通过上述方法获得。当列车处于某一确定位置时,判断每个车载移动中继节点是否到达各自的波束切换点。若到达,则切换为下一个服务波束;否则,未到达切换点的车载移动中继节点继续使用上一波束进行服务。

4.3 自适应波束激活算法

基站利用多个波束同时进行信息传输时,多个波束之间会产生波束间干扰的问题,而且列车距离基站越远,这种波束间的干扰就越严重。因此,若一直保持服务波束的数量不变,则波束间的干扰会严重影响整个高铁车地通信系统的吞吐量性能。为了减小波束间干扰带来的影响,本文采用自适应波束激活算法来实时调整激活波束的个数,使每一时刻的系统吞吐量可以达到最大。该算法的具体步骤如算法 2 所示。

算法 2 波束激活算法

输入: 车载移动中继节点个数 N_S

输出: $C_{\text{max}}, B_{\text{opt}}$

1. 初始化: $C_{\text{max}} = 0, C_i = 0, C_i = 0, \Omega = \{1, 2, \dots, N_S\}, B_{\text{opt}}(0) = \Phi$;
2. 当 $k \in (1, N_S)$ 时, $B = \Phi$, 进入步骤 3, 否则进入步骤 6;
3. 对于每个 $i \in \Omega, B = B_{\text{opt}}(k-1) \cup \{i\}, C_i = \sum_{i \in B} W \log_2(1 + SINR_i)$;
4. $C(k) = \max C_i, s_i = \arg \max C_i, B_{\text{opt}}(k) = B_{\text{opt}}(k-1) \cup s_i$;
5. $\Omega = \Omega - s_i, k = k + 1$, 进入步骤 2;
6. $C_{\text{max}} = \max C(k), B_{\text{opt}} = B_{\text{opt}}(k)$ 。

波束激活算法的流程如图 3 所示。

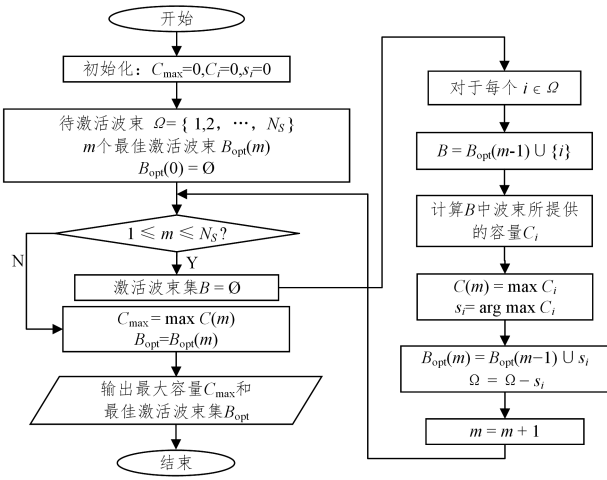


图 3 自适应波束激活算法的流程

Fig. 3 Flowchart of adaptive beam activation algorithm

5 仿真分析

本节给出了相应的仿真结果,并分析讨论了其性能,证实了本文方法不仅可以有效提升高铁车地通信系统的吞吐量性能,还可以保证其具有较低的通信中断概率。由于本文方法讨论的是多波束传输模型,只有当多个波束链路同时发生中断时,整个系统的通信才会发生中断,因此系统的通信中断概率可以表示为:

$$P_{\text{total}} = \prod_{i \in B_{\text{opt}}} P_{\text{out}}(SINR_i < \Gamma_{\text{th}}) \quad (10)$$

其中, Γ_{th} 是信噪比门限值。

5.1 仿真参数

表 1 列出了本文在仿真过程中所用到的主要参数^[15-16]。

表 1 仿真参数列表

Table 1 Simulation parameters

参数	值
发射总功率/dBm	30
载波频率/GHz	38
带宽/GHz	1
MR 的个数	8
归一化天线间隔	0.5
小区半径/m	500
基站到轨道垂直距离/m	20
列车长度/m	200
相邻 MR 间距/m	25
列车速度/(m/s)	100
基站高度/m	10
MR 高度/m	3
噪声功率/(dBm/Hz)	-174

5.2 仿真结果及性能分析

图 4 是车载移动中继节点数量为 8 时,每个移动中继节点的发射波束宽度以及波束边界点位置的仿真结果图。它表明当列车靠近基站附近时,发射波束比较宽,因为该区域内的路径损耗不是很严重,所以可以采用较宽的发射波束来传输信号。但是由于受最大波束宽度 θ_{max} 的限制,发射波束的宽度只能取 θ_{max} 。而当列车逐渐远离基站时,路径损耗随之增大,因此需要具有较高波束成形增益的窄波束来补偿毫米波逐渐增加的路径损耗。因此,随着列车与基站之间距离的增加,发射波束宽度逐渐变窄。此外,本文假设列车从小区中心

位置出发,然后穿过小区,即第 1 个移动中继节点从 0 m 运行到 500 m,又由于相邻两个移动中继节点之间间隔为 25 m,因此第 8 个移动中继节点从 -175 m 开始运行。

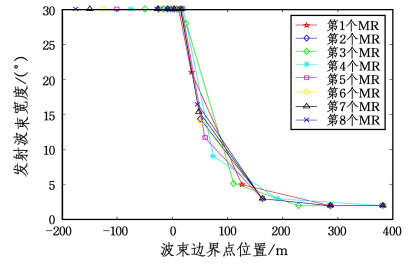


图 4 发射波束宽度

Fig. 4 Beam width of transmitting beams

作为对比,本节仿真了由长期发射波束成形和短期接收波束成形组成的单波束成形方法以及本文提出的基于毫米波高铁车地通信的自适应多波束成形方法,其吞吐量性能对比如图 5 所示。在前者中,基站和移动中继节点都采用天线阵列收发信号,可以形成波束以集中信号能量;而且在一个发射波束的覆盖范围内,移动中继节点可以调整接收波束来微调接收信噪比。因此,这种单波束成形方法可以取得较高的吞吐量性能,而且其稳定性也较好。本文方法继承了前述方法的优点,而且基站同时采用多个不同宽度的波束进行信号传输,大幅提升了系统的吞吐量。在靠近基站的区域内,波束间的干扰较小,可并存服务的波束数目较多,本文方法获得的吞吐量远远高于单波束方法。在远离基站的区域内,由于波束间的干扰增大,需要适当减少激活波束的数目来降低波束间干扰的影响,这会导致系统吞吐量下降,但其依然高于单波束成形方法的吞吐量。

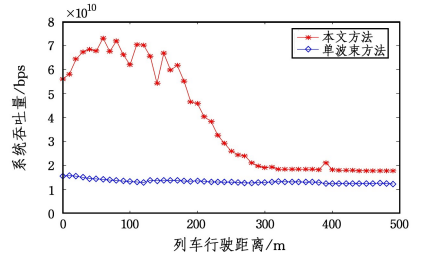


图 5 系统吞吐量

Fig. 5 System throughput

列车在行驶过程中激活的波束数目如图 6 所示。

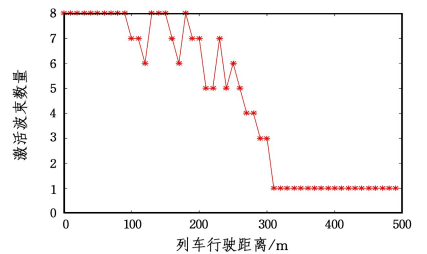


图 6 激活波束数量

Fig. 6 Number of activated beams

在基站附近的区域内,如 $d \in (0, 90 \text{ m})$,波束之间的分辨率较高,波束间的干扰不是很严重,8 个波束可以同时激活。但是,随着列车与基站之间距离的增加,波束之间的分辨率降低,波束间的干扰越来越严重,需要适当减少激活波束的数目

来减弱波束间干扰的影响,从而维持较高的吞吐量性能。当列车靠近小区边缘即 $d \in (310 \text{ m}, 500 \text{ m})$ 时,波束间的干扰很严重,只有 1 个波束被激活。此时,多波束成形方法已经退化为单波束成形方法,但是其吞吐量性能仍然高于前述的单波束成形方法,因为该激活波束是 8 个波束中最优的一个。

图 7 是两种方法的通信中断概率对比图。在单波束成形方法中,每个发射波束的两边都设置了额外的保护角,该保护角可以降低由传输时延或噪声引起的通信中断。但是,在多波束成形方法中,增加保护角会使发射波束变宽,在一定程度上增加了波束间的干扰。因此,在本文方法中,发射波束没有设置额外的保护角。但是,在多波束传输方法中,只有当多个波束链路同时发生中断时,整个系统的通信才会发生中断,因此多个波束同时进行信号传输可以降低通信中断的概率。如图 7 所示,当信噪比门限值为 10 dB 时,两种方法的通信中断概率都接近零。当信噪比门限值为 13 dB, $d \in (0, 390 \text{ m})$ 时,两者的通信中断概率都接近零;但当 $d \in (400 \text{ m}, 500 \text{ m})$ 时,本文所提的多波束成形方法的通信中断概率明显优于单波束成形方法的中断概率。

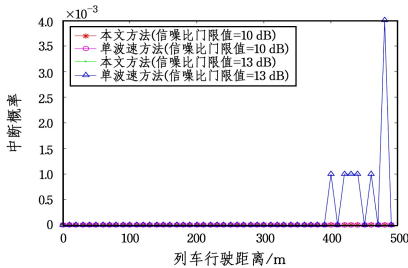


图 7 通信中断概率

Fig. 7 Communication outage probability

结束语 在毫米波高铁车地通信系统中,为了避免毫米波信号穿过密闭的高铁车厢时产生高穿透损耗,本文采用了基于移动中继的两跳通信网络结构。在该结构中,为了提升高铁通信系统的吞吐量,以满足人们在高移动场景中对数据传输速率和可靠移动业务的需求,本文提出了一种基于毫米波高铁车地通信的自适应多波束成形方法。在该方法中,基站利用毫米波同时发射多个具有不同宽度的波束来进行信号传输,而且多个波束同时传输信号可以降低系统的通信中断概率。作为接收端,车载移动中继节点采用天线阵列接收从基站传来的信号以提高接收信噪比,进而提升系统的吞吐量。由于多个波束之间会产生波束间的干扰问题,因此多波束传输并不总是可以提高系统的吞吐量。本文采用一种自适应波束激活算法来实时调整激活波束的数量,以减弱波束间干扰的影响,从而使当前位置的系统吞吐量保持在最佳水平。仿真结果表明,本文方法不仅可以大幅提升高铁车地通信系统的吞吐量,还可以使系统获得较低的通信中断概率。

参考文献

[1] CAO W X, MA J. Research and Implementation of Railway Intelligent Platform Based on Cloud Computing [J]. *Modern Industrial Economy and Informatization*, 2019, 9(10): 65-66.
 [2] WANG Y. Research on Development of Intelligent Construction of High-speed Rail under the Background of Intelligent High-

speed Rail Development [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2019, 16(17): 254, 256.

- [3] DONG C L, WANG L. 5G network vision and challenges [J]. *Wireless Internet Technology*, 2018, 15(5): 23-24.
 [4] CHAKRABORTY R, KUMARI N, MOUSAM M, et al. The Future of 5G and Millimeter Waves [C] // 2018 Second International Conference on Electronics Communication and Aerospace Technology. 2018: 1679-1683.
 [5] DONG J G. Application of LTE-R Technology in Railway Wireless Communication Engineering [J]. *Electronic Components and Information Technology*, 2019, 3(8): 66-70.
 [6] XIANG S, LIU X D. Research on 5G Millimeter Wave Based Cell Discovery Method [J]. *Application of Electronic Technology*, 2019, 45(11): 6-9.
 [7] XU J R, PENG R, ZHU C G, et al. A study of flames with millimeter-wave radiation [J]. *Defence Technology*, 2019, 11(4): 1-7.
 [8] KUTTY S, SEN D. Beamforming for Millimeter Wave Communications; An Inclusive Survey [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(2): 949-973.
 [9] NAMODARAN S P D. Optimized and Low-Complexity Power Allocation and Beamforming with Full Duplex in Massive MIMO and Small-Cell Networks [J]. *The Journal of Supercomputing*, 2019, 75(12): 7979-7993.
 [10] YAN L, FANG X M, FANG Y G. Stable Beamforming with Low Overhead for C/U-Plane Decoupled HSR Wireless Networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(7): 6075-6086.
 [11] CHENG M. Adaptive Antenna-Activation Based Beamforming for Large-Scale MIMO Communication Systems of High-Speed Railway [J]. *China Communications*, 2016, 13(9): 12-23.
 [12] WEBB W. Fundamentals of Wireless Communication [Book Review] [J]. *Communications Engineer*, 2005, 3(5): 44-44.
 [13] LIU L. Position-Based Modeling for Wireless Channel on High-Speed Railway under a Viaduct at 2.35 GHz [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(4): 834-845.
 [14] VAKILIAN V. Effects of Angle-of-Arrival Estimation Errors, Angular Spread and Antenna Beam-width on The Performance of Reconfigurable SISO Systems [C] // 2011 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing. 2011.
 [15] KIM J. A Study on Millimeter-Wave Beamforming for High-Speed Train Communication [C] // 2015 International Conference on Information and Communication Technology Convergence. 2015.
 [16] LU Y Z, QI J H, HU F Q, et al. Exploring The Application of Millimeter Wave Communication Technology in High-Speed Rail Passenger Services [J]. *Railway Communication Signals*, 2018, 54(5): 50-53.



JIANG Rui, born in 1985, Ph.D, associate professor. His main research interest is wireless communications.