

## 高铁场景中基于位置公平保证的毫米波波束成形方法

蒋锐<sup>1,2</sup> 尹惠<sup>1,2</sup> 徐友云<sup>2</sup>

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工程研究中心 南京 210003

**摘要** 为了提升高铁无线通信系统信息传输的稳定性和可靠性,提出了一种基于位置公平保证的毫米波波束成形方法。该方法采用交错冗余覆盖网络结构来提高信息传输的可靠性。在该结构中,基站根据其车顶移动中继之间的距离,发射不同宽度的服务波束进行信号传输,近距离时采用宽波束为列车提供服务,远距离时采用窄波束以补偿较高的路径损耗,从而保持列车在运行过程中数据传输速率的稳定性。此外,为了计算最优的发射波束宽度和波束边界点位置,提出了一种自适应搜索算法来优化服务波束。理论分析和仿真结果表明,所提方法不仅可以有效提升高铁无线通信系统数据传输的稳定性,还可以使系统获得较低的通信中断概率。

**关键词:** 高铁通信;交错冗余覆盖网络;毫米波;波束成形;位置公平

**中图分类号** U285

## Millimeter-wave Beamforming Scheme Based on Location Fairness Guarantee for HSR Communications

JIANG Rui<sup>1,2</sup>, YIN Hui<sup>1,2</sup> and XU You-yun<sup>2</sup>

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

2 National Engineering Research Center of Communications and Networking, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

**Abstract** In this paper, a millimeter-wave beamforming scheme based on location fairness guarantee is proposed to improve the stability and reliability of high-speed railway (HSR) communications. In the proposed scheme, the interleaved redundant coverage architecture is adopted to enhance the reliability of information transmission. Furthermore, the serving beams with different beam-width are formed by base station to transmit signals. The beam-width is determined by the distance from base station to mobile relay mounted on the top of train, which could keep the stability of data transmission rate during the running time of the train. Additionally, an adaptive searching algorithm is developed to calculate the optimal transmitting beam-width and beam boundary points. Theoretical analysis and simulation results suggest that the proposed scheme could not only improve the stability performance of HSR networks, but also obtain a lower communication outage probability.

**Keywords** High-speed railway (HSR) communications, Interleaved redundant coverage architecture, Millimeter-wave, Beamforming, Location fairness

## 1 引言

随着信息技术的蓬勃发展,具有超大传输容量、超高可靠性和超低时延通信等特点的第五代移动通信技术(5G)成为了热门的研究领域,而作为5G应用场景之一的高铁移动通信也成为了学术研究的焦点问题<sup>[1-2]</sup>。在我国,铁路制造和新一代无线移动通信系统制造是两大优势行业<sup>[3]</sup>。目前,中国铁路总公司正在研发新一代的智能高铁,智能高铁将大数据、

物联网、人工智能和新一代移动通信等先进的信息技术集成融合到高速铁路技术中,让高铁在装备建造、运营技术等方面实现信息化、智能化<sup>[4]</sup>。智能高铁对高速率、大带宽和稳定可靠的无线移动通信提出了极高的要求<sup>[5]</sup>。此外,与普通的移动通信场景不同,高铁场景具有运动轨迹稳定、移动速度快、信道变化快、越区切换频繁、多普勒频偏大以及穿透损耗高等特点<sup>[6]</sup>。因此,如何提升高速铁路场景中信息传输的速率、稳定性和可靠性成为高铁移动通信的重要任务<sup>[7]</sup>。提供超宽的

到稿日期:2019-08-07 返修日期:2019-12-06 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(61601243,61801240,61701253)

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFE0200200) and National Natural Science Foundation of China (61601243,61801240,61701253).

通信作者:蒋锐(j\_ray@njupt.edu.cn)

带宽资源,是提高信息传输速率和传输可靠性最直接、有效的方法。然而,低频段(如微波频段)的频谱资源已经非常稀缺,几乎找不到连续的空白频谱,所以开发新的频谱资源(如毫米波频段)是一种行之有效的方法<sup>[8-10]</sup>。毫米波频段中有非常丰富的频谱资源,可以提供超宽的带宽。第三代合作伙伴计划(3GPP)也已经提出在高铁移动通信中使用毫米波进行信号传输。但是,处于高频段的毫米波也存在不足之处,即毫米波在大气中的衰减十分严重,这一特性在很大程度上限制了其自身的应用<sup>[11]</sup>。而定向波束成形技术可以将信号能量集中在主瓣方向,从而减少了能量的损耗和浪费,这可以用来解决毫米波在大气中的衰减问题<sup>[12-13]</sup>。作为5G的关键技术之一,毫米波定向波束成形技术可以获得低时延、数十吉比特的速率<sup>[14]</sup>,而且在未来的智能铁路无线移动通信服务中,毫米波将会成为一种关键的推动因素<sup>[15]</sup>。因此,将毫米波和定向波束成形技术结合并应用到新一代智能铁路无线移动通信系统中,可以很好地满足高速铁路场景下高质量数据业务的需求。

## 2 研究现状

近年来,国内外的专家、学者对毫米波以及波束成形技术在高铁场景中的应用产生了浓厚的兴趣,并围绕该问题开展了一系列研究。在设计铁路无线通信系统和铁路基础设施时,准确理解并掌握信号的传播环境有助于获得更好的通信服务。文献[16-17]分析了高铁场景中典型的物体和材料对毫米波传播信道的影响,还介绍了“T2I”(城市、农村、高架桥和隧道等场景)和“车内”场景及其相应部署的特点。该文献在毫米波频段对12种最常见的铁路材料进行传播测量,获得相应的电磁参数,并校准3-D射线追踪模拟器。其研究表明,校准后的射线追踪可用于生成铁路场景中近乎真实的毫米波信道。为了减小毫米波的高传输损耗,文献[18]研究了由多个远程无线电单元连接的基站组成的分布式天线系统,以提高能量效率。该文献还提出了一种协作多用户波束成形方法,用于毫米波分布式天线系统的节能传输,该系统的方案可以实现更高的能量效率,还可以满足不同用户的服务需求。文献[19]提出一种控制/用户平面分离的架构,控制平面采用可靠性较高的低频波段来传输控制信息,而用户平面采用毫米波传输用户数据以提升容量;在发射波束覆盖范围内,接收端采用波束成形技术微调接收信号。该系统架构不仅可以减少反馈开销,还能够将信噪比维持在一个较高且较稳定的水平。但是,高铁通信对信令传输可靠性的要求极高,单个蜂窝网络不足以保证信令的安全传输。目前,为了提高信息传输的可靠性,交错冗余覆盖网络结构被广泛应用于高铁移动通信系统中<sup>[20]</sup>。文献[21]也提出在高铁移动通信中采用交错冗余覆盖网络结构,该结构使用两个独立的蜂窝网络交错地覆盖列车轨道区域,可以保证高铁无线通信系统信息传输的可靠性。此外,为了减少列车在行驶过程中数据传输速率的波动性,该文献采用一种非均匀稳定波束成形方法(Bisection based Beam Boundary Determination, BBBD)。该方法可以提高列车通信系统信息传输的稳定性,但是在某些位置,数据传

输速率仍然有较大波动,而且在该方法中,服务波束的个数局限于 $2^n$ 个,其中 $n$ 为正整数。为了解决上述问题,从而进一步提升高铁无线通信系统数据传输速率的稳定性,本文提出了一种基于位置公平保证的毫米波波束成形方法。该方法提出一个目标数据速率作为参考速率,使每个发射波束覆盖范围内的平均数据速率和给定的目标数据速率之间的差值最小,从而使得数据传输速率稳定在目标速率附近。该方法不仅可以进一步提升高铁无线通信系统数据传输的稳定性,而且能够保证整个通信系统具有较低的通信中断概率。

## 3 系统模型

### 3.1 交错冗余覆盖网络模型

高铁无线移动通信系统中采用的交错冗余覆盖网络结构通过两个独立的蜂窝网络交错地覆盖列车轨道区域,这两个网络相互作为备份,共同构成交错冗余覆盖网络模型,如图1所示。每个网络中的信号独立传输,不需要相互协同配合。接收端在列车顶部安装两个移动中继,它们可以分别接收来自两个网络的信号。这两个移动中继都被连接到列车上的信息处理中心,信息处理中心会选择最优的接收信号作为最终的输出信号。

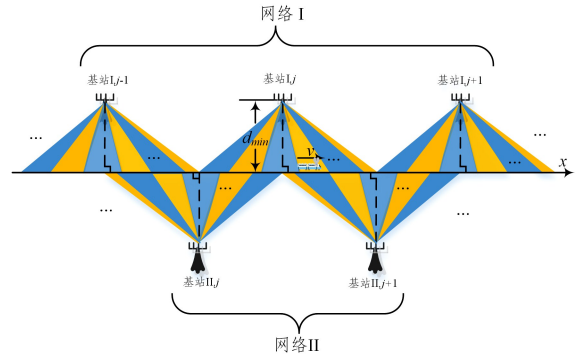


图1 交错冗余覆盖网络模型

Fig. 1 Interleaved redundant coverage architecture

### 3.2 基于位置公平的波束成形方法

考虑到位置公平性问题(位置公平指列车通信系统的数据传输速率不因位置的变化而产生较大差异),当列车穿过小区时,应该降低列车通信系统数据传输速率的波动性,从而提高整个系统在列车行驶过程中信息传输的稳定性。如图2所示,对于单个蜂窝小区来说,在列车穿过小区的过程中,列车处于不同位置时,发射信号所经历的路径损耗是不同的,列车靠近小区中心时路径损耗较小,列车远离小区中心时路径损耗较大<sup>[19]</sup>。因此,在小区覆盖范围内,不同位置的基站应该采用不同宽度的发射波束给列车提供服务,当基站与列车之间的距离较近时,应该采用波束成形增益较小的宽波束;当基站与列车之间的距离较远时,应该采用具有较高波束成形增益的窄波束,以弥补远距离带来的路径损耗。

图2中,小区覆盖半径为 $R$ , $O$ 位置表示列车行驶的起始点, $d_{min}$ 表示最短的信号传输距离。 $\theta_{i,m}$ 代表第 $m$ 个蜂窝网络中第 $i$ 个发射波束, $p_{i,m}$ 和 $p_{i+1,m}$ 分别表示发射波束 $\theta_{i,m}$ 的两个边界点位置坐标。发射波束宽度 $\theta_{i,m}$ 和边界点位置 $p_{i,m}$ 可以通过本文提出的自适应搜索算法计算得出。

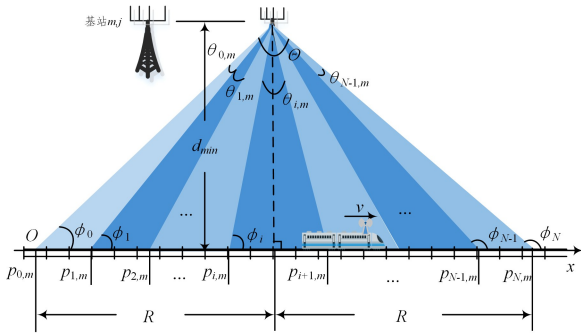


图2 服务波束切换示意图

Fig.2 Beam switching scheme

假设通过列车定位系统可以获得列车在当前时刻的准确位置,当列车的位置确定时,可以判断移动中继节点是否到达波束边界点  $p_{i,m}$ 。若到达,则将发射波束宽度为  $\theta_{i,m}$  的发射波束切换为当前服务波束进行信号传输,并且该移动中继节点在到达下一个波束边界点之前,基站不会改变发射波束的宽度和方向;若未到达,则基站继续使用前一个发射波束  $\theta_{i-1,m}$  为列车提供服务。

### 3.3 信号传输模型

第  $m$  个网络中第  $i$  个发射波束对应的接收信号功率可以表示为<sup>[22]</sup>:

$$P_R^{i,m} = P_T |\mathbf{H}_{i,m}|^2 G_R^{i,m} G_T^{i,m} d_m^{-\beta} \quad (1)$$

其中,  $P_T$  为基站的总发射功率;  $\mathbf{H}_{i,m}$  是第  $m$  个网络中第  $i$  个发射波束和移动中继之间的多径信道时变响应矩阵;  $G_R^{i,m}$  和  $G_T^{i,m}$  分别表示第  $m$  个网络中第  $i$  个接收波束和发射波束的天线方向性增益,简单起见,设  $G_R^{i,m}$  为 1;  $d$  是基站和移动中继之间的距离,  $\beta$  表示大尺度衰落因子。

式(1)中多径信道时变响应矩阵的表达式如下<sup>[23]</sup>:

$$\mathbf{H}_{i,m}(f_{d,p}, t) = \frac{1}{\sqrt{P}} \sum_{p=1}^P g_p(t) e^{2\pi j f_{d,p} t} \mathbf{u}_p^{rx} \mathbf{u}_p^{txH} \quad (2)$$

其中,  $P$  是多径数目;  $g_p(t)$  表示小尺度衰落因子;  $\mathbf{u}_p^{rx}$  和  $\mathbf{u}_p^{tx}$  分别表示第  $p$  条路径的发射空间特征和接收空间特征;  $f_{d,p}$  是第  $p$  条路径的多普勒频移,其表达式如下<sup>[24]</sup>:

$$f_{d,p} = f_{d,\max} \cos \varphi_p = v f_c \cos \varphi_p / c \quad (3)$$

其中,  $v$  是列车行驶速度,  $f_c$  是载波频率,  $\varphi_p$  代表第  $p$  条路径的到达角,  $c$  为光速。

本文假设每个波束主瓣内的天线增益是相同的,旁瓣内的天线增益是一个微小的常数,则每个波束的天线增益可以表示为<sup>[25]</sup>:

$$G_{i,m}(\theta_{i,m}) = \begin{cases} \frac{2\pi - (2\pi - \theta_{i,m})\alpha}{\theta_{i,m}} \\ \alpha \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\theta_{i,m}$  是第  $m$  个网络中第  $i$  个发射波束的波束宽度,  $0 \leq \alpha < 1$  代表旁瓣内的天线增益。

## 4 优化问题制定

为了降低高铁移动通信系统数据传输速率的波动性,从而提高整个系统信息传输的稳定性,本文提出一个目标速率,并根据该目标速率建立发射波束宽度和方向的优化问题,使每个波束覆盖范围内的平均数据传输速率和给定的目标速率

之间的差值最小。针对该优化问题,本文还提出了一种自适应搜索算法来求解最佳的服务波束宽度和波束边界点位置。

### 4.1 BBBD 算法

在 BBBD 算法中,波束的总个数局限于  $2^n$  个,其中  $n$  为正整数。另外,根据 BBBD 算法来计算服务波束的宽度和波束边界点位置时,若要求波束个数为  $M=2^n$ ,则首先将小区的整个覆盖范围划分成 2 个子波束进行覆盖,划分标准是使这 2 个波束内平均数据传输速率的差值最小;接着,将每个波束继续划分成 2 个子波束,一共进行  $n$  次划分,得到  $M$  个波束。然而,该方法无法保证所有波束内平均数据传输速率保持稳定。如图 3 所示,假设波束总个数  $M=4$ ,利用 BBBD 算法需要进行两次波束划分。在进行第二次波束划分时,可以保证波束 1 和波束 2 内的平均数据传输速率差值最小,同时波束 3 和波束 4 内的平均数据传输速率差值达到最小。然而,由于没有比较波束 2 和波束 3 之间的数据传输速率,因此数据传输速率在波束 2 和波束 3 之间可能出现较大的波动。

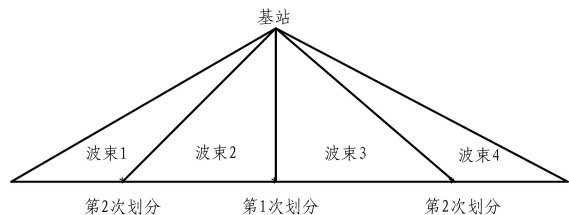


图3 BBBD方法波束划分示意图

Fig.3 BBBD method beam division diagram

### 4.2 建立发射波束宽度优化问题

本文采用交错冗余覆盖网络结构,在该结构中,列车顶部的两个移动中继能分别接收来自两个网络的信号,而且最优的接收信号将会作为最终的输出信号。因此,整个列车通信系统在每个时刻的最佳接收信号功率可以表示为:

$$P_R^i(t, \theta_i) = \max\{P_R^{i,m}(t, \theta_{i,m})\} \quad (5)$$

其中,  $m \in \mathbf{M} = \{\text{I}, \text{II}\}$ 。

根据最佳接收信号功率可以计算出列车通信系统的瞬时数据传输速率:

$$R_i(t, \theta_i) = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_R^i(t, \theta_i)}{N_0 B} \right) \quad (6)$$

其中,  $N_0$  是噪声功率谱密度,  $B$  为信道带宽。

那么,第  $i$  个发射波束覆盖范围内的平均数据传输速率可以定义为<sup>[21]</sup>:

$$R_{\text{ave}}^i(\theta_i) = \frac{\int_{\frac{p_i}{v}}^{\frac{p_{i+1}}{v}} R_i(t, \theta_i) dt}{\frac{p_{i+1}}{v} - \frac{p_i}{v}} \quad (7)$$

其中,  $p_i$  是第  $i$  个发射波束的边界点,  $v$  是列车行驶速度。

为了提升高铁无线通信系统信息传输的稳定性和可靠性,需要降低列车在行驶过程中数据传输速率的波动性。因此,本文提出一个目标数据传输速率作为参考速率,在一定条件下,使每个发射波束覆盖范围内的平均数据传输速率和给定的目标数据传输速率之间的差值最小。具体的优化问题如下:

$$\min_{\theta_i} \left| \frac{R_{ave}^i(\theta_i) - R_{tar}}{R_{tar}} \right|$$

$$\text{s. t. } \theta_i \in (\theta_{min}, \theta_{max})$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} \theta_i \geq \Theta$$

$$R_{ave}^i(\theta_{max}) \leq R_{tar} \leq R_{ave}^i(\theta_{min})$$

其中,  $\theta_{min}$  和  $\theta_{max}$  分别表示最小发射波束宽度和最大发射波束宽度,  $\Theta$  是蜂窝小区的覆盖角,  $N$  是发射波束的个数。

### 4.3 自适应搜索算法

为了解决式(8)中发射波束宽度优化的问题, 本文提出了一种自适应搜索算法来求解最佳服务波束宽度和波束边界点位置。自适应搜索算法的流程如图4所示。

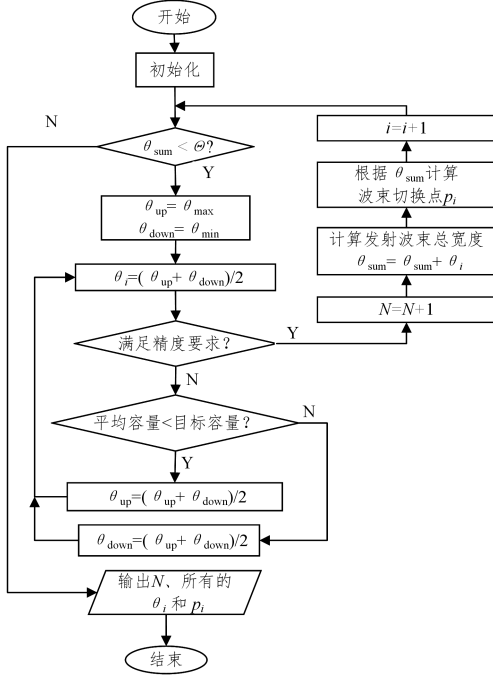


图4 自适应搜索算法的流程

Fig. 4 Flow of adaptive searching algorithm

该算法的具体步骤如算法1所示。

#### 算法1 自适应搜索算法

输入:  $\theta_{max}, \theta_{min}, \Theta, R_{tar}, \epsilon, R, d_{min}$

输出:  $N, \theta_i, p_i$

1. 初始化:  $N=0, i=0, \theta_{sum}=0$ ;
2. While  $\theta_{sum} < \Theta$  do
3. 发射波束宽度  $\theta_i = (\theta_{max} + \theta_{min})/2$ ;
4. 判断平均数据速率是否满足要求  $|(R_{ave}^i(\theta_i) - R_{tar})/R_{tar}| \leq \epsilon$ , 满足则进入步骤8, 否则进入步骤5;
5. 判断  $R_{ave}^i(\theta_i)$  是否小于  $R_{tar}$ , 若小于则进入步骤6, 否则进入步骤7;
6. 减小发射波束宽度  $\theta_i$ , 进入步骤4;
7. 增大发射波束宽度  $\theta_i$ , 进入步骤4;
8. 计算发射波束总宽度  $\theta_{sum}$  和波束边界点  $p_{i+1} = R - d_{min}/(\tan(\arctan(d_{min}/R) + \theta_{sum}))$ , 并令  $N=N+1, i=i+1$ , 进入步骤2。

## 5 仿真分析

本节将讨论分析等宽波束方法、BBBD方法以及本文所提方法的仿真结果及性能, 以证实本文方法可以有效提升高铁无线通信系统信息传输的稳定性和可靠性。为了分析这3

种方法的性能, 本文定义了一个波动因子:

$$\sigma = \frac{|R_i(t, \theta_i) - R_{ave}|}{R_{ave}} \quad (9)$$

其中,  $R_{ave}$  是列车在小区覆盖范围内整个行驶过程中的平均数据传输速率。波动因子的值越小, 表明系统的稳定性越高。

此外, 系统的通信中断概率可以表示为:

$$P_{out} = P[SNR_i(t, \theta_i) < \Gamma_{th}] \quad (10)$$

其中,  $\Gamma_{th}$  是信噪比门限值<sup>[21]</sup>。

### 5.1 仿真参数

本文的主要仿真参数如表1所列<sup>[19, 21, 26]</sup>。

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameters	values
总发射功率/dBm	30
载波频率/GHz	28
带宽/MHz	500
基站到轨道距离/m	30
列车速度/(m/s)	100
小区覆盖半径/m	500
目标速率/bps	$2 \times 10^{10}$
误差精度	0.005
噪声功率谱密度/(dBm/Hz)	-174
信噪比门限值/dB	5

### 5.2 仿真结果及性能

图5是不同方法中发射波束宽度和波束边界点位置的对比图, 在等宽波束方法中, 发射波束宽度保持不变, 为一常数。本文所提方法与BBBD方法相比, 两者发射波束宽度变化趋势一致, 当列车靠近基站时, 移动中继和基站之间的距离较短, 路径损耗较小, 所以基站可以采用较宽的发射波束来传输信号; 而当列车逐渐远离基站时, 移动中继和基站之间的路径损耗随着距离的增加而变大, 此时需要具有较高波束成形增益的窄波束来补偿逐渐增加的路径损耗。

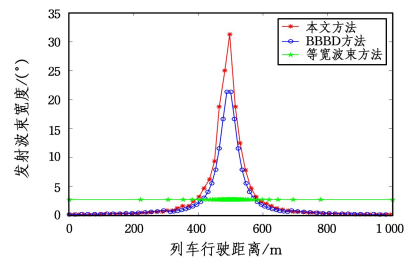


图5 发射波束宽度

Fig. 5 Beamwidth of transmitting beams

图6和图7表明本文所提方法的数据传输速率在这3种方法中是最稳定的。由图6的瞬时数据速率可以看出, 列车在整个运行过程中, 等宽波束方法的瞬时速率波动范围为 $[1.87, 2.175]$ ; BBBD方法的瞬时速率波动范围为 $[1.975, 2.03]$ ; 本文方法的瞬时速率波动范围为 $[1.99, 2.02]$ (上述数据速率分别乘 $10^{10}$ , 单位为bps)。由此可见, 等宽波束方法的瞬时速率波动较大; BBBD方法中数据传输速率的波动性相比前者大幅减小, 但其稳定性还有待提高; 本文方法的数据传输速率波动很小, 几乎稳定在目标速率附近。由图7可以看出, 在等宽波束方法中, 除了少数位置外, 波动因子的值均较大, 最高达到0.95; 在BBBD方法中, 波动因子的值比前者减

小了很多,但在[200 m,310 m]和[690 m,800 m]区域内波动因子的值仍然较大;而在本文方法中,列车在整个运行过程中,其波动因子的值都很小。因此,本文所提方法有效提高了列车通信系统数据传输速率的稳定性。

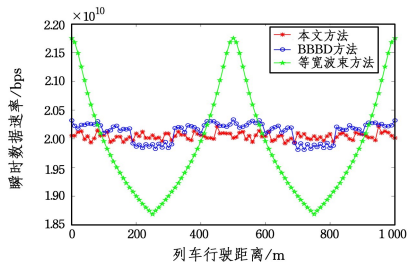


图6 瞬时数据速率

Fig. 6 Instantaneous data rates

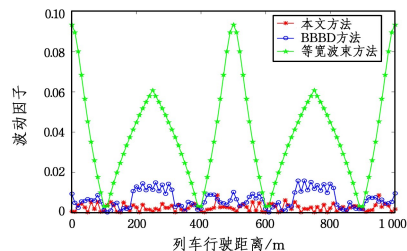


图7 波动因子

Fig. 7 Fluctuation factors

图8为3种方法的通信中断概率对比图。可以看出,在[100 m,400 m]和[600 m,900 m]区域内,等宽波束方法的通信中断概率较大;而在整个区域内,本文方法和BBBD方法的通信中断概率都接近零,这表明本文方法的通信中断概率可以保持在较低的水平,从而可以保证高铁无线通信网络信息传输的可靠性。

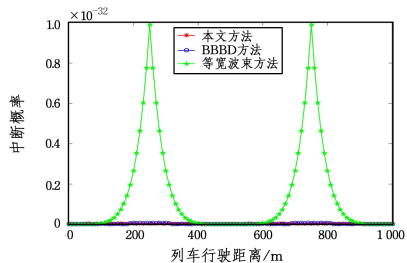


图8 通信中断概率

Fig. 8 Outage probabilities

为了比较等宽波束方法、BBBD方法以及本文算法的复杂度,表2列出了在同一计算机上分别运行3种算法的执行时间。

表2 算法复杂度

Table 2 Algorithm complexity

算法	执行时间/s
等宽波束算法	0.042
BBBD算法	0.183
本文算法	0.553

从表2中可以看出,等宽波束算法直接用相等宽度的波束进行覆盖,不需要计算最优的服务波束宽度,因此算法复杂度最低;BBBD算法利用二分原则对比相邻波束间的数据传

输速率,从而确定波束宽度,需要消耗额外的算法执行时间;本文算法需要将设定的目标数据速率作为参考速率,计算在不同位置处以该目标数据速率为参考的波束宽度,需要较长的执行时间。本文算法的运行时间虽然略长于另外两种算法,但仍然满足算法实时性要求,可以在实际中应用。

**结束语** 为了提升高铁无线通信系统信息传输的稳定性和可靠性,本文提出了一种基于位置公平保证的毫米波波束成形方法。该方法采用交错冗余覆盖网络结构来提高信息传输的可靠性。在该结构中,基站采用不同宽度的发射波束为列车提供服务,以降低列车在运行过程中数据传输速率的波动性。此外,本文还提出了一种自适应搜索算法来求解最佳发射波束宽度和波束边界点位置。仿真结果表明,本文所提方法不仅可以有效提升高铁无线通信系统数据传输的稳定性,还能保证系统获得较低的通信中断概率。然而,本文也存在一些不足之处,如交错冗余覆盖网络结构可以保证系统的可靠性,但是该结构需要耗费更多的资源。在未来的研究工作中,我们将致力于寻找更优的方法来保证系统数据传输的可靠性。

## 参考文献

- [1] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, et al. 5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6): 1201-1221.
- [2] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What Will 5G Be? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [3] HE R, AI B, WANG G, et al. High-Speed Railway Communications: From GSM-R to LTE-R [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(3): 49-58.
- [4] WANG T J. The Overall Structure and Development Prospect of Intelligent Railway [J]. Railway Computer Application, 2018, 27(7): 1-8.
- [5] ZHOU L. Leading the New Era of Intelligent High-Speed Rail with Technological Innovation [J]. Railway Computer Application, 2018, 27(7): 3.
- [6] FAN P, ZHAO J, CHIH-LIN I. 5G High Mobility Wireless Communications: Challenges and Solutions [J]. China Communications, 2016, 13(2): 1-13.
- [7] ZHOU X Z, XU W, ZHANG Q, et al. Application Research for High-Speed Railway Traffic Intelligent Rescheduling Based on Chaotic Firefly Algorithm [C]// 2018 33rd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation, 2018: 258-263.
- [8] AGRAWAL S K, SHARMA K. 5G Millimeter Wave (mm-Wave) Communications [C]// 2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development, 2016: 3630-3634.
- [9] KIM J, CHUNG H, KIM I G, et al. A Study on Millimeter-Wave Beamforming for High-Speed Train Communication [C]// 2015 International Conference on Information and Communication Technology Convergence, 2015: 1190-1193.

- [10] ROH W, SEOL J Y, PARK J, et al. Millimeter-Wave Beamforming as An Enabling Technology for 5G Cellular Communications; Theoretical Feasibility and Prototype Results [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2):106-113.
- [11] ZHOU P, CHENG K, HAN X, et al. IEEE 802.11ay-Based mm-Wave WLANs; Design Challenges and Solutions [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(3):1654-1681.
- [12] GUAN K, LI G, KURNER T, et al. On Millimeter Wave and THz Mobile Radio Channel for Smart Rail Mobility [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(7):5658-5674.
- [13] KUTTY S, SEN D. Beamforming for Millimeter Wave Communications: An Inclusive Survey [J]. *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, 2016, 18(2):949-973.
- [14] KIM T, PARK J, SEOL J, et al. Tens of Gbps Support with mmWave Beamforming Systems for Next Generation Communications [C]//2013 IEEE Global Communications Conference. 2013:3685-3690.
- [15] WEI L, HU R Q, WU G. Key Elements to Enable Millimeter Wave Communications for 5G Wireless Systems [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(6):136-143.
- [16] HE D P, AI B, GUAN K, et al. Influence of Typical Railway Objects in a mmWave Propagation Channel [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(4):2880-2892.
- [17] WANG C X, GHAZAL A, AI B, et al. Channel Measurements and Models for High-Speed Train Communication Systems; A Survey [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(2):974-987.
- [18] BAI L, LI T, YU Q, et al. Cooperative Multiuser Beamforming in mmWave Distributed Antenna Systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(12):12394-12397.
- [19] 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.
- [20] DING X, CHEN X, JIANG W Y. The Analysis of GSM-R Redundant Network and Reliability Models on High-Speed Railway [C]//2010 International Conference on Electronics and Information Engineering. 2010:154-158.
- [21] CUI Y, FANG X M, FANG Y G, et al. Optimal Nonuniform Steady mmWave Beamforming for High-Speed Railway [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(5):4350-4358.
- [22] WILDMAN J, NARDELLI P, LATVA-AHO M, et al. On the Joint Impact of Beamwidth and Orientation Error on Throughput in Directional Wireless Poisson Networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(12):7072-7085.
- [23] AKDENIZ M, LIU Y, SAMIMI M K, et al. Millimeter Wave Channel Modeling and Cellular Capacity Evaluation [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6):1164-1179.
- [24] LIU X M, QIAO D L. Location-Fair Beamforming for High Speed Railway Communication Systems [J]. *IEEE Access*, 2018, 6:28632-28642.
- [25] SHOKRI-CHADIKOLAEI H, GKATZIKIS L, FISCHIONE C. Beam-Searching and Transmission Scheduling in Millimeter Wave Communications [C]//2015 IEEE International Conference on Communications. 2015:1292-1297.
- [26] YIN H, JIAN R, XU Y Y. An mmWave-Based Adaptive Multi-Beamforming Scheme for High Speed Railway Communications [C]//2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. 2018:1-6.



**JIANG Rui**, born in 1985, Ph.D, associate professor. His main research interests include wireless communications and so on.