

# 位置功率联合判决的高铁通信越区切换算法

张佳健,李翠然,谢健骊

(兰州交通大学 电子与信息工程学院,兰州 730070)

**摘要:**随着我国铁路运输现代化进程的加快,高铁列车对通信信息技术的需求日益提升。越区切换是高铁无线通信移动性管理的重要部分,对提高通信质量和运营效率、确保运营安全具有重要意义。针对高铁列车切换性能差、乒乓切换率高的问题,提出一种位置功率联合判决的越区切换算法。以切换阈值作为约束条件并借助信道模型和测量信息计算得到最佳切换带,利用高铁列车的单向移动特点简化位置信息并优化切换流程,以有效避免乒乓切换现象。考虑到车载多中继节点对切换触发位置的判决误差之间存在相关性,构建代价函数筛选最优的预测参数,采用加权统计线性回归方法预测判决误差并加以纠正,使得切换位置收敛于最佳切换点。仿真结果表明,相对A3算法、距离触发算法,该越区切换优化算法能有效降低乒乓切换率,在列车速度为350 km/h时越区切换成功率达到99.5%以上,其能够提高通信系统的可靠性,推动列车提速并保障行驶安全。

**关键词:**高速铁路;切换触发标准;中继节点;越区切换算法;切换成功率

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式:张佳健,李翠然,谢健骊.位置功率联合判决的高铁通信越区切换算法[J].计算机工程,2022,48(10):212-217.

英文引用格式:ZHANG J J, LI C R, XIE J L. Handover algorithm with position-power joint decision for high-speed railway communication[J]. Computer Engineering, 2022, 48(10): 212-217.

## Handover Algorithm with Position-Power Joint Decision for High-Speed Railway Communication

ZHANG Jiajian, LI Cuiran, XIE Jianli

(School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**[Abstract]** With the acceleration of China's railway transportation modernization, the demand for communication and information technology in high-speed trains is increasing. Handover is an important part of mobility management for high-speed railway wireless communications. It is of great importance to improve communication quality and operation efficiency and ensure operation safety. To solve the problems of poor handover performance and high ping-pong handover rate of high-speed trains, a handover algorithm based on joint decision of position and power is proposed. Considering the handover threshold as a constraint condition, the optimal handover band is calculated based on channel models and measurement data. Using the unidirectional motion characteristics of high-speed trains, the position information is simplified and the handover process is optimized to effectively avoid ping-pong handover. Considering the correlation between the decision errors of the on-board multi-relay nodes and the position of the handover trigger, the cost function is constructed to determine the optimal prediction parameters, and the weighted statistical linear regression method is used to predict and correct the decision error so that the handover position approaches the optimal handover point. The simulation results show that the handover optimization algorithm can effectively reduce the ping-pong handover rate compared with the A3 algorithm and the distance trigger algorithm. When the train speed is 350 km/h, the handover success rate is more than 99.5%. The handover optimization algorithm can improve the reliability of the communication system, increase the speed of the train and ensure the driving safety.

**[Key words]** high-speed railway; handover trigger standard; relay node; handover algorithm; handover success rate

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0062701

### 0 概述

高铁列车的通信需求有2个方面,一为高铁列车控制、列车调度业务,二为旅客的移动通信业务<sup>[1]</sup>。越区切换作为高速铁路无线通信移动性管理

的重要部分,在提高列车无线通信质量、为列车提供移动状态下的无缝通信等方面具有重要意义<sup>[2]</sup>。

文献[3]提出以贝叶斯回归模型预测列车位置的切换方法,该方法借助基站数据用于机器学习判决切换条件。文献[4]提出一种功率-距离切换优化算法,

基金项目:国家自然科学基金(62161016,61661025);甘肃省科技计划(20JR10RA273)。

作者简介:张佳健(1998—),男,硕士研究生,主研方向为高铁无线通信;李翠然(通信作者),谢健骊,教授、博士。

收稿日期:2021-09-15 修回日期:2021-10-25 E-mail: 1290231547@qq.com

其在一个测量周期内即可完成切换,但高移动速度下无法满足切换成功率的要求。文献[5]提出一种固定切换触发位置的算法,该算法忽略列车速度对切换判决的影响,简化切换流程从而实现快速切换。文献[6]提出一种H2切换方案,其借鉴LTE-R切换触发标准中的A4事件参数,提出OC约束条件以防止过早切换,但RSRP-GAP(GAP of Reference Signal Receiving Power)非最小值,使得该方案存在一定的改进空间。文献[7]提出动态函数为切换算法参数和列车速度建立对应关系,但其算法结构不适用于高铁环境,优化迟滞参数不能降低多变信道环境下的乒乓切换率。文献[8]提出一种基于速度的提前切换算法,其计算预承载点并提前执行信令交互。列车越区切换的研究重点在于快速、精准地触发切换,本文提出一种综合考虑位置信息与信号功率的切换算法,利用已切换节点的状态对后续节点的切换位置进行纠正,使切换位置收敛于最佳切换点,从而在简化切换流程的同时实现可靠、准确的越区切换。

## 1 高铁无线通信特点

### 1.1 无线通信覆盖方式

高铁无线通信的覆盖方式与公网移动通信系统

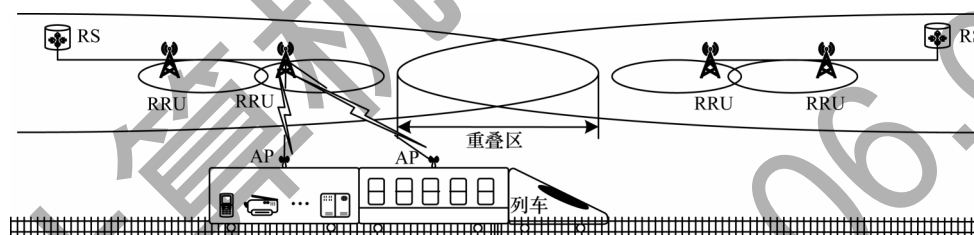


图1 高铁无线通信覆盖方式

Fig.1 Coverage mode of high-speed railway wireless communication

### 1.2 位置信息获取

基于位置信息的越区切换能够在不提高计算复杂度的前提下提升切换成功率。目前较新的定位研究成果为GNSS(Global Navigation Satellite System)与INS(Inertial Positioning System)互补定位的组合导航系统,其一维定位误差在5 m以内,惯性制导下误差保持在10 m以内,定位精度、可靠性和实时性均有较大改善<sup>[11]</sup>。

假设列车沿铁路轨道直线行驶,如图2所示,则高铁列车运行场景可简化为一维坐标模型。假设相邻小区eNB的位置坐标分别为 $M_s$ 、 $M_t$ ,基于GNSS-INS组合导航定位方法获得的列车位置坐标为 $M_0$ ,当列车位置靠近切换点附近时(切换点定义为距重叠覆盖区中心点500 m以内),则进入切换准备阶段并测量相应数据。

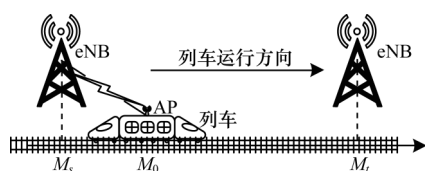


图2 基站与列车位置示例

Fig.2 Example of base station and train location

有很大不同,其无线覆盖具有以下特点<sup>[9]</sup>:

- 1)高速铁路小区部署呈线状覆盖或带状覆盖。
- 2)列车高速移动导致多普勒频移。
- 3)用户数量多,存在群切换现象。

高铁沿线采用射频拉远方式部署基站,如图1所示,逻辑小区内UE(User Equipment)不进行切换仍可流畅地完成数据业务和通话业务。在高铁无线通信中,为了降低列车车厢穿透损耗的影响,研究人员提出车顶外置通信中继天线AP(Access Point)的方法<sup>[10]</sup>,车厢所有UE通过AP汇集组网后与演进型基站eNB(evolved NodeB)进行通信。中继通信相比直连通信方式避免了列车车厢的穿透损耗,分布式无线覆盖方式降低了列车在小区间的切换频率,这两点均在一定程度上提高了列车的切换成功率。此外,覆盖重叠区的大小也会影响列车的切换性能:重叠区域过大会造成不必要的能量损耗;重叠区域过小可能会因信号太弱而掉话,从而影响切换性能。

### 1.3 切换性能影响因素

文献[6]对高铁信道模型和列车切换性能进行研究,发现RSRP-GAP和切换性能有直接联系,减小RSRP-GAP可以降低切换中断率,RSRP-GAP的定义如式(1)所示:

$$R_{\text{RSRP-GAP}} = |R_{\text{RS}_s} - R_{\text{RS}_t}| \quad (1)$$

其中: $R_{\text{RS}_s}$ 和 $R_{\text{RS}_t}$ 分别表示UE接收到来自服务eNB、目的eNB的参考信号接收功率。

切换中断率是越区切换的一项重要指标,发生中断的主要原因包括切换过早、切换过晚和乒乓切换<sup>[12]</sup>。图3所示为切换过早和过晚2种情况下的RSRP变化,其中,横坐标表示列车到源基站的距离,纵坐标为参考信号接收功率,HO表示切换。切换过早表现为UE执行越区切换时距离目的eNB过远,信噪比小于最低通信阈值;切换过晚表现为UE穿过最佳切换区域时未触发切换条件,此时正与UE保持通信的服务eNB的信号功率衰落至最低通信阈值以下,导致通信中断。切换过早和切换过晚均为切换位置选择不当所致,为了保证较好的切换结果,应使切换前后的信号功率尽可能相等,即通过RSRP-GAP最小化来优化切换性能。

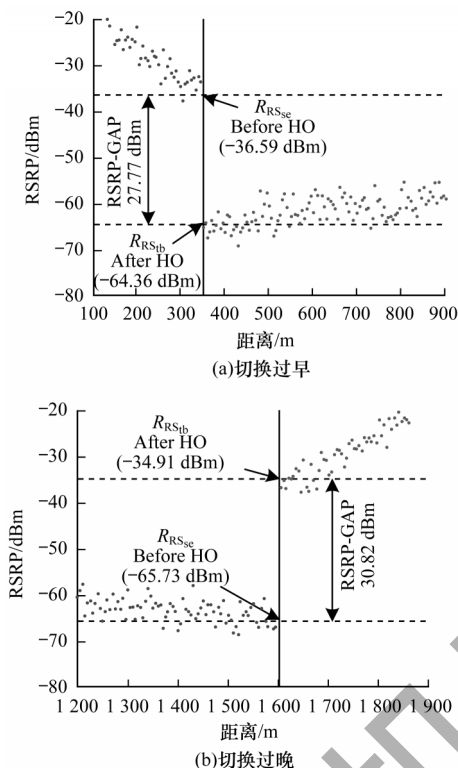


图3 切换过早和切换过晚的RSRP变化  
Fig.3 RSRP changes of handover too early and handover too late

## 2 位置功率联合判决的越区切换算法

本文以RSRP-GAP最小化为目标,提出切换阈值函数作为限制条件确定切换带,然后联合多节点切换状态,利用加权统计线性回归(Weighted Statistics Linear Regression, WSLR)算法收敛切换误差。WSLR算法的性能通过由收敛速度和波动水平组成的价格函数综合评定,以最小价格筛选出对应的最佳参数,使切换触发位置快速收敛于最佳切换点附近。

### 2.1 单节点判决

切换执行操作具有固定时延,可以由切换执行点结合列车速度信息得到切换完成点的位置信息,如式(2)所示:

$$H_e = H_b + v \cdot T_0 \quad (2)$$

其中: $H_e$ 和 $H_b$ 分别为切换完成点和执行点的坐标; $v$ 是列车当前时刻瞬时速度; $T_0$ 是固定切换时延,其取决于切换准备阶段的操作内容以及程序执行速度和延迟。路径传播与阴影衰落下的信道模型<sup>[13]</sup>如式(3)所示:

$$L_{dB} = L(d_0) + 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + \zeta_0 \quad (3)$$

其中: $L_{dB}$ 代表信道衰落; $L(d_0)$ 代表位于 $d_0$ 点的参考损耗;路径损耗指数 $n$ 依据不同地形在2~6范围内取值; $\zeta_0$ 表示阴影衰落的对数损耗<sup>[14]</sup>,因为信道中障碍物的形状、大小、位置对信号的遮挡程度是随机的,

所以通常采用统计随机特征表征,其服从均值为0、标准差为 $\sigma$  dB的正态分布。由式(3)结合式(1)可得到RSRP-GAP关于切换执行点的函数式如下:

$$R_{RSRP-GAP} = \left| 60 \log_a \left( \frac{L_{BS} - H_b - v \cdot T_0}{H_b} \right) + \zeta_1 \right| \quad (4)$$

其中: $L_{BS}$ 为基站间距,取值范围为1.5~2.0 km; $\zeta_1$ 服从均值为0、标准差为 $\sqrt{2}\sigma$  dB的正态分布<sup>[15]</sup>。高铁环境下信道状态快速变化,因此,本文设置切换阈值以限制RSRP-GAP的取值范围,得到最佳切换点可能取值的切换带。切换阈值如式(5)所示:

$$\text{GapH}(v, \sigma_0) = 6.4e^{-4} \frac{v}{120} + \sigma_0 \quad (5)$$

其中: $\text{GapH}(v, \sigma_0)$ 是限定RSRP-GAP的切换阈值(单位为mW),其与当前时刻列车速度 $v$ 和信道噪声标准差 $\sigma_0$ 有关。结合式(4)与式(5)可得切换带表达式如下:

$$\frac{L_{BS} - v \cdot T_0}{1 + 10^Q} \leq H_b \leq \frac{L_{BS} - v \cdot T_0}{1 + 10^{-Q}} \quad (6)$$

其中: $Q$ 是边界因子。当列车速度已知时 $Q$ 是影响切换带边界的唯一因素,其计算如式(7)所示:

$$Q = \frac{1}{10n} \left( 6.4e^{-4} \frac{v}{120} + \sigma_0 + \sqrt{D(\zeta_1)} \right) \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知,当环境噪声的功率和信道衰落的标准差不变时,列车速度越快,切换带越靠近服务eNB,反之则向目的eNB一侧偏移;当列车速度已知时,环境噪声和衰落标准差越大,切换带的范围越大,左右边界分别向两侧扩展。为防止切换位置选择不当,本文以切换带中点 $X_m$ 作为切换触发位置,由式(6)可知切换带中点坐标如下:

$$X_m = \frac{L_{BS} - v \cdot T_0}{2} \quad (8)$$

若第一次切换失败,需要执行第二次切换,第二次切换执行点应小于切换带右边界,即满足式(9):

$$X_m + v \cdot T_z \leq \frac{L_{BS} - v \cdot T_0}{1 + 10^{-Q}} \quad (9)$$

其中: $v$ 代表列车当前速度; $T_z$ 表示列车执行2次切换操作之间的准备时间间隔,通常取50 ms<sup>[16]</sup>。

本节基于RSRP-GAP与阈值 $\text{GapH}(v, \sigma_0)$ 确定切换带范围,提出切换带内的单节点切换判决条件,该算法执行时间包括定位时间(获取列车位置、速度信息的时间)和计算时间(计算切换阈值、切换带和切换触发位置的时间),由不同的无线定位环境和程序执行速度决定。因为该算法无法求最佳切换点的精确解,所以本文提出多节点联合的切换自优化算法以改善切换性能。

### 2.2 多节点联合判决

因为车载AP切换点的判决误差之间存在相关性,所以在车载AP间建立线联量并基于WSLR方法<sup>[17]</sup>即可根据前置节点的切换结果预测当前节点的功率补偿,通过节点信息分享为一致性预测算法提



供输入量,从而提高收敛速度<sup>[18]</sup>。利用功率补偿值对应的位置补偿纠正后续切换位置,使之逐步收敛于最佳切换点附近。

假设第*i*个节点已经完成切换并成功与目的eNB建立链接,则节点*i*的功率偏差如式(10)所示:

$$R_{RD_i} = R_{RS'_{ie}} - R_{RS'_{ib}} \quad (10)$$

其中: $R_{RS'_{ie}}$ 和 $R_{RS'_{ib}}$ 分别表示第*i*个节点在切换执行点和完成点与服务eNB、目的eNB通信的信号功率。由前置节点的功率偏差结合对应的权重系数,可得到当前节点的功率补偿如式(11)所示:

$$R_{RDC_i} = -\alpha_k R_{RD_{(i-k)}} \quad (11)$$

其中:*i*代表当前待切换的节点编号,并假设前*i*-1个节点已完成切换;*m*代表相关联的节点数量,在1~9之间取值; $\alpha_k$ 表示与当前节点相邻的第*k*个节点的功率偏差权重系数。在计算出当前节点的功率补偿后,利用切换阈值与切换带边界坐标构建分段函数,建立功率补偿与位置补偿 $\Delta x_i$ 之间的联系,如式(12)所示:

$$\Delta x_i = \frac{(L_{BS} - v \cdot T_0) \cdot R_{RDC_i}}{2 \cdot \text{GapH}(v, \sigma_0)} \quad (12)$$

合理地配置关联数量*m*和权重系数 $A=[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m]^T$ 是影响系统性能的关键。本文给出功率偏差收敛的定义,并利用基于平均收敛价格和波动水平的标准来选定参数<sup>[19]</sup>。所谓功率偏差收敛(下文简称为收敛),是指功率偏差 $R_{RD_i}$ 的绝对值小于收敛阈值(3 dB)。收敛价格是评价收敛速度的标准,原则上应使收敛价格尽可能小,即收敛速度尽可能快。收敛价格计算如式(13)所示:

$$\text{Cnt}(A) = \max_{\forall X} (\varphi(A; X)) \quad (13)$$

其中:*X*是第一个节点的切换位置; $\varphi(A; X)$ 表示第一个收敛节点的编号。考虑到第一次收敛后功率误差可能在收敛阈值内震荡,不能仅以收敛价格作为性能评价标准,因此,本文加入波动水平标准,如式(14)所示:

$$F(A) = \frac{1}{P_R - P_L} \int_{P_L}^{P_R} \left[ \frac{1}{N - \varphi(A; X)} \sum_{\varphi(A; X) \leq j \leq N} |R_{RD_j}| \right] dX \quad (14)$$

其中: $F(A)$ 是波动水平; $P_L$ 和 $P_R$ 是式(6)中的切换带左右边界;*N*为列车搭载的AP节点总数。

收敛价格表示系统的收敛效率,波动水平反映系统收敛后的稳定性,本文联合式(13)、式(14)提出代价函数,使波动水平归一化后与收敛价格相加,通过代价函数最小化来筛选出满足系统性能要求的权重系数向量,如式(15)所示:

$$L(A) = \max_{\forall X} (\varphi(A; X)) + \frac{1}{2} F(A) \quad (15)$$

相比单节点判决,多节点判决算法增加了功率测量和切换位置补偿预测过程,以牺牲一定复杂度的方式换取切换性能的大幅提升。

## 2.3 算法步骤

本文所提高铁通信越区切换算法步骤如下:

**步骤1** 车载AP控制台根据列车运行方向对AP节点进行编号,并实时从列控系统中读取位置信息、从服务eNB中获取后续小区列表,为越区切换做准备。

**步骤2** 根据读取的位置信息判断是否进入切换准备阶段,当列车距离重叠覆盖区中心点小于500 m时开始进入切换准备阶段,否则继续等待位置信息更新。

**步骤3** 在进入切换准备阶段后,针对某特定节点(编号为*i*),利用简化后的坐标模型,以切换阈值结合位置信息和基站RSRP测量报告确定切换带范围。

**步骤4** 在计算出节点*i*的切换带后,通过前置节点切换后的状态预测功率补偿 $R_{RDC_i}$ ,并利用补偿公式得到位置补偿 $\Delta x_i$ ,对切换触发位置进行纠正。

**步骤5** 判断触发条件是否满足,当节点到达触发点时启动越区切换流程,与源、目的eNB进行信令交互并激活目的eNB的无线接口,实现越区切换。

## 3 建模参数设置与仿真分析

高铁沿线环境复杂,有高架桥、平原、山地等场景,本文仿真主要针对高铁的山地场景,系统仿真参数如表1所示,其中,路径损耗指数*n*的数值依据文献[20]中的山地场景损耗参数选取。在仿真中,设置服务eNB和目的eNB各项参数,列车初始位置位于服务eNB处,分别以不同速度移动到目的eNB。以乒乓切换率和切换成功率作为评价指标,将本文位置功率联合判决算法(以下简称为联合判决算法)与基于A3事件判决算法(以下简称为A3算法)、基于距离触发的切换算法(以下简称为距离触发算法)进行性能比较。

表1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameters setting

参数	设置
带宽/MHz	20
载频/GHz	2.6
基站发射功率/dBm	43
阴影衰落模型标准差/dB	4
小区半径/m	1 000
基站距铁轨距离/m	100
列车移动速度/(km·h <sup>-1</sup> )	[120, 380]
路径损耗指数 <i>n</i>	6
功率偏差权重系数	$[\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3] = (0.619, 0.240, 0.141)$

利用Matlab软件通过区间遍历的方式进行仿真分析,关关节点数量*m*的遍历区间取[1, 6]且步进为1(*m*等于1时即对应单节点切换,考虑到算法执行效率,限制*m*不超过6),对应数量下权重矩阵*A*中元素的遍历区间为[0.01, 0.99]并以0.01为步进进行仿

真。不同  $m$  值下的最小代价变化如图4所示,由图4可知, $m=3$ 是最小代价的极值点,此时在收敛速度与波动水平之间取得权衡。

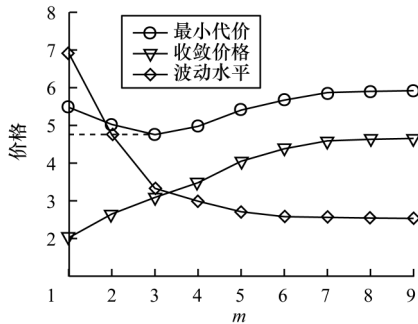


图4 不同  $m$  值对应的最低代价

Fig.4 The lowest cost corresponding to different  $m$  values

不同切换算法的乒乓切换率对比如图5所示。由图5可知,本文位置功率联合判决算法具有较低的乒乓切换率,该算法结合列车运行单向性对切换流程进行优化并适配高铁场景,依靠对目的小区RSRP进行监测从而避免重复切换,因此减少了不必要的乒乓切换。

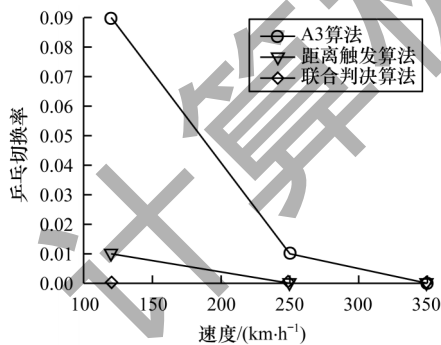


图5 不同算法的乒乓切换率对比

Fig.5 Comparison of ping-pong handover rates of different algorithms

图6比较3种算法在不同高铁移动速度下的信号功率差值RSRP-GAP。由图6可知,随着列车速度的增加,3种算法切换前后的RSRP-GAP都在增大。联合判决算法的功率差值得益于位置误差矫正,使得其低于A3算法和距离触发算法。

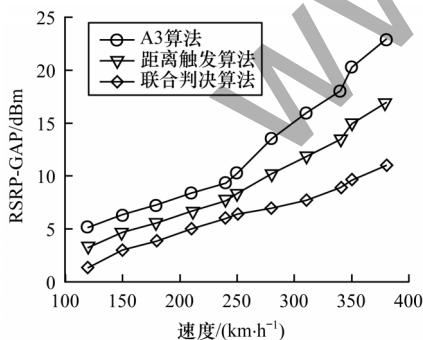


图6 不同算法的RSRP-GAP对比

Fig.6 RSRP-GAP comparison of different algorithms

不同切换算法的切换时延和通信中断率分别如图7、图8所示。我国铁路无线技术标准要求切换时延应不超过45 ms,且切换成功率应大于99.5%,从而提供较好的无线通信体验<sup>[21]</sup>。由图7可知,A3算法的切换时延随列车速度的提高而增大,在速度高于250 km/h时切换时延大于45 ms,在速度为350 km/h时通信中断率过高,对应的切换成功率小于99.5%,无法符合铁路无线技术标准<sup>[22]</sup>。而联合判决算法和距离触发算法均改善了切换性能,联合判决算法相比距离触发算法,在列车速度低于180 km/h时其性能优势并不显著,随着列车速度的不断提高,联合判决算法的切换时延和通信中断率性能提升显著。由此得出,在列车高速运行时,应采用切换性能更优的联合判决算法。

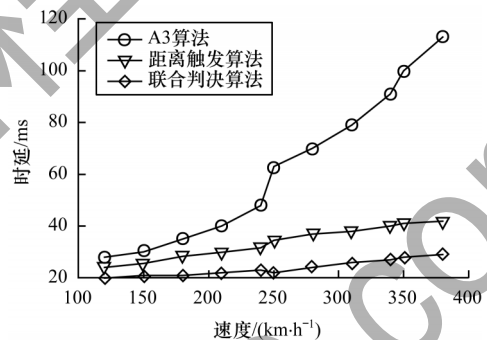


图7 不同算法的切换时延对比

Fig.7 Comparison of handover delay of different algorithms

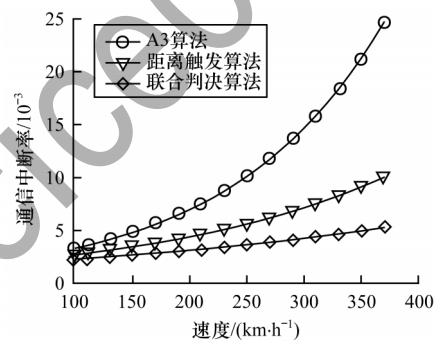


图8 不同算法的通信中断率对比

Fig.8 Comparison of communication interruption rates of different algorithms

## 4 结束语

本文以提高切换成功率、提升无线通信服务质量、保证通信链路可靠性为目的,提出一种位置功率联合判决的高铁通信越区切换算法,旨在为旅客业务、列车安全控制和运营调度提供通信保障。根据高铁列车移动方向固定的特点优化切换流程,避免乒乓切换。通过位置功率联合判决确定切换带,利用多节点联合纠正切换位置,从而提高切换成功率。仿真结果表明,在高速条件(300~380 km/h)下该算法的越区切换成功率达到99.75%以上,满足我国铁路无线通信系统标准要求。下一步将基于人工智能

技术,建立以回报函数最大化为目的的强化学习工具,并研究下一代铁路无线通信系统5G-R业务下的移动性管理算法。

### 参考文献

- [1] 方旭明,崔亚平,闫莉,等. 高速铁路移动通信系统关键技术的演进与发展[J]. 电子与信息学报,2015,37(1): 226-235.  
FANG X M, CUI Y P, YAN L, et al. The evolution and development of key technologies of mobile communication systems for high-speed railway[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(1): 226-235. (in Chinese)
- [2] 陶成,张春圆,周涛,等. 隧道场景列车车体对无线电波传播的影响[J]. 中国铁道科学,2019,40(4): 86-94.  
TAO C, ZHANG C Y, ZHOU T, et al. Influence of train body on radio wave propagation in tunnel scene[J]. China Railway Science, 2019, 40(4): 86-94. (in Chinese)
- [3] BANG J H, OH S, KANG K, et al. A Bayesian regression based LTE-R handover decision algorithm for high-speed railway systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(10): 10160-10173.
- [4] 陈永刚,杜涛,王攀琦,等. 基于功率-距离的LTE-R切换算法优化研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2019, 31(1): 57-64.  
CHEN Y G, DU T, WANG P Q, et al. Research on optimization of LTE-R handover algorithm based on power distance[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2019, 31(1): 57-64. (in Chinese)
- [5] IBRAHIM E A, BADRAN E F, RIZK M R M. A power-distance based handover triggering algorithm for LTE-R using WINNERII-D2a channel model[C]//Proceedings of the 22nd Asia-Pacific Conference on Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016: 167-173.
- [6] CHO H, SHIN S, LIM G, et al. LTE-R handover point control scheme for high-speed railways[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(6): 112-119.
- [7] TAYYAB M, GELABERT X, JÄNTTI R. A survey on handover management; from LTE to NR[J]. IEEE Access, 2019, 7: 118907-118930.
- [8] 米根锁,马硕梅. 基于速度触发的提前切换算法在LTE-R中的应用研究[J]. 电子与信息学报,2015,37(12): 2852-2857.  
MI G S, MA S M. Advance trigger handover algorithm based on the speed in LTE-R[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(12): 2852-2857. (in Chinese)
- [9] 张帅. LTE-R系统中的信道建模和切换算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学,2019.  
ZHANG S. Research on channel modeling and handover algorithm in LTE-R system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese)
- [10] WANG J Z, ZHU H L, GOMES N J. Distributed antenna systems for mobile communications in high speed trains[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(4): 675-683.
- [11] 上官伟,谢朝曦,姜维. 基于IMU标定补偿的列车组合定位优化方法[J]. 铁道学报,2020,42(2): 57-64.  
SHANGGUAN W, XIE C X, JIANG W. Optimization method for integrated train positioning accuracy based on IMU calibration compensation[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(2): 57-64. (in Chinese)
- [12] YANG J Y, AI B, SALOUS S, et al. An efficient MIMO channel model for LTE-R network in high-speed train environment[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4): 3189-3200.
- [13] XIE J L, LI C R, ZHANG W B, et al. Modeling and optimization of wireless channel in high-speed railway terrain[J]. IEEE Access, 2020, 8: 84961-84970.
- [14] 刘毅,梅玉鹏,李国燕,等. 网络环境下切换模糊时滞系统的非脆弱控制[J]. 计算机工程,2020,46(3): 299-308.  
LIU Y, MEI Y P, LI G Y, et al. Non-fragile control of switched fuzzy time-delay systems in network environment[J]. Computer Engineering, 2020, 46(3): 299-308. (in Chinese)
- [15] ZHANG J Y, DU H Y, ZHANG P, et al. Performance analysis of 5G mobile relay systems for high-speed trains[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(12): 2760-2772.
- [16] ZHOU T, YANG Y, LIU L, et al. A dynamic 3-D wideband GBSM for cooperative massive MIMO channels in intelligent high-speed railway communication systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(4): 2237-2250.
- [17] 汤文俊,张国良,曾静,等. 一种考虑先验估计误差相关性的快速DUIF算法[J]. 控制与决策,2016,31(9): 1663-1670.  
TANG W J, ZHANG G L, ZENG J, et al. A fast distributed unscented information filter algorithm taking into account the correlation among prior estimate errors[J]. Control and Decision, 2016, 31(9): 1663-1670. (in Chinese)
- [18] 王颖颖,常俊,武浩. 室内WiFi定位技术的多参数优化研究[J]. 计算机工程,2021,47(9): 128-135.  
WANG Y Y, CHANG J, WU H. Research on multi-parameter optimization of indoor WiFi positioning technology [J]. Computer Engineering, 2021, 47(9): 128-135. (in Chinese)
- [19] ALI W, WANG J Y, ZHU H L, et al. Seamless mobility under a dedicated distributed antenna system for high-speed rail networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 15427-15441.
- [20] MA Y Y, MA G Y, AI B. Multicarrier Tandem Spreading Multiple Access (MC-TSMA) for High-Speed Railway (HSR) scenario[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(5): 3490-3499.
- [21] 陈鹏,米根锁,罗森. 高速铁路LTE-R改进切换算法的研究[J]. 铁道标准设计,2018,62(5): 150-154.  
CHEN P, MI G S, LUO M. Research on LTE-R improved switching algorithm in high-speed railway [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(5): 150-154. (in Chinese)
- [22] WANG K, LI S P, LIN Y, et al. Performance analysis of high-speed railway handover scheme with different network architecture [C]//Proceedings of IEEE Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2019: 1894-1898.

编辑 吴云芳