

基于速度触发的提前切换算法在 LTE-R 中的应用研究

米根锁 马硕梅*

(兰州交通大学自动化与电气工程学院 兰州 730070)

摘要: 随着高铁的快速发展,铁路移动通信系统对切换时延、切换成功率等要求更为苛刻。该文针对铁路长期演进(LTE-R)系统提出基于速度触发的提前切换算法,通过提前进行信令交互、设置切换预承载点切换的方式抑制过早或过迟切换所带来的通信中断、掉话等问题。通过信令流程图进行理论分析,并对长期演进(LTE)各结构类型数据计算可知,该算法均可缩短切换时延,其中 TDD 帧结构类型 2 时效果最为显著。最后通过仿真对比得到提前切换算法相比传统切换算法有着更高且更稳定的切换成功率,验证算法的有效性,为 LTE-R 在未来铁路专网的应用提供技术支持。

关键词: 铁路长期演进;越区切换;切换时延;切换成功率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)12-2852-06

DOI: 10.11999/JEIT150577

Advance Trigger Handover Algorithm Based on the Speed in LTE-R

Mi Gen-suo Ma Shuo-mei

(College of Automatic & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: With the rapid development of high-speed railway, the railway mobile communication system has more demands on the handover delay and handover success rate. This paper proposes an advance trigger handover algorithm based on the speed in LTE-R. It is designed to suppress communication interruption and dropped calls caused by that the signaling interaction and setting pre-bearer switching point get rise to handover too early or too late. The theoretical analysis is established in the signaling flow chart, and it is shown that the advance handover algorithm can shorten the handoff latency, which TDD frame structure type two has the most significant time effect. Finally, the simulation shows that compared with the conventional handover algorithm, the advance handover algorithm has a higher and more stable handover success rate. It provides a technical support for the future railway private network applications to LTE-R.

Key words: Long Term Evolution-Railway (LTE-R); Handover; Handoff latency; Handover success rate

1 引言

铁路长期演进 (Long Term Evolution-Railway, LTE-R)技术作为下一代铁路移动通信系统,对其进行深入研究已成为业内共识。铁路沿线呈线状覆盖,随着列车速度的提升,小区切换更加频繁、切换时间更短,这就要求通信系统有更低的切换时延,并保证切换成功率和系统可靠性^[1]。目前对 LTE-R 的研究尚处于起步阶段,文献[2]建立了 LTE-R 与 GSM-R 的 Petri 网模型,通过数学分析对比指出,列车高速行驶时 LTE-R 系统切换成功率会降低,尤其运行速度达到 400 km/h 时,切换成功率降低至

99.47%以下^[2]。文献[3]提出基于参考信号接收质量 (Reference Signal Receiving Quality, RSRQ)/参考信号接收功率 (Reference Signal Receiving Power, RSRP)高速特性的自适应联合判决算法,通过设置满意通信概率作为切换条件,在保证通信质量的同时减少不必要的切换次数,但在通信环境不太理想情况下,过于追求通信质量可能导致系统掉话^[3]。文献[4]对高速铁路网络下的掉话率进行了理论分析,指出在高速时 LTE-R 网络掉话率将更高,但并未提出具体改进方法^[4]。文献[5-9]分别以改善 LTE 系统资源分配为目标,提出相应的改进算法,算法充分利用了系统信道资源,提升了系统容量^[5-9]。分析可知目前对 LTE-R 切换成功率与切换时延的研究尚处于起步阶段。

本文从缩短切换时延角度出发对 LTE-R 切换算法进行研究,提出一种基于速度触发的提前切换

收稿日期: 2015-05-15; 改回日期: 2015-08-28; 网络出版: 2015-11-01

*通信作者: 马硕梅 msm369@126.com

基金项目: 甘肃省自然科学基金(1310RJZA046)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Gansu Province (1310RJZA046)

算法, 以达到缩短切换时延、提高切换成功率的目的。

2 LTE-R 系统概述

LTE-R采用扁平化网络结构,是由基站eNodeB构成的单层网络。在UE移动时,LTE-R切换主要考虑同一移动管理实体(Mobility Management Entity, MME)下不同eNodeB间切换(通过X2接口)和eNodeB与MME/服务网关(Serving GateWay, S-GW)之间的切换(通过S1接口)^[10]。

LTE-R系统同频切换步骤主要分为切换测量、切换上报、切换判决和切换执行^[10]。

3 基于速度触发的提前切换算法

对于高速行驶的列车,根据列车当前信息计算出当前服务小区的预承载点,提前一定时间进行小区测量、目标小区判定和信令交互,通过节省切换时间来达到缩短时延的目的。当列车到达小区预承载点时,直接进行信道切换。算法分析时采用常用的单网覆盖方式,具体切换步骤如下:

(1)上报列车信息:UE上报测量信息,主要包括当前服务小区信息,当前列车速度信息 V_{cur} ,当前列车位置信息 P_{cur} ,当前UE的跟踪区(Tracking Area, TA)信息和下一小区性能测量报告(主要是RSRP和RSRQ值)等信息。

(2)判断列车运行方向:根据列车车次号判断列车运行方向,更新小区位置信息和TA列表。根据当前列车信息判断列车当前位置,标注小区位置坐标与小区识别号标注,如图1所示。

采用重叠TA覆盖的方法,TA之间重叠覆盖,UE处于重叠区时,在所在的TA区域分布中选择一个进行驻留。

(3)选定目标小区:在切换判决部分,采用RSRP值和RSRQ值联合判决的方式进行判定目标小区。

(4)计算列车预承载点和切换时长:根据上报列车位置信息计算列车预承载点坐标和切换时长,列车预承载点的横坐标计算公式如式(1)所示。

$$x_0 = V_{\text{cur}}(t_1 + t) \quad (1)$$

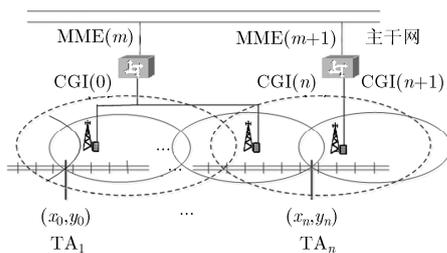


图1 小区位置信息标注示意图

其中, V_{cur} 为列车当前速度,单位为m/s, t_1 为信息重发时延,单位为ms, t 为UE上报测量报告到目标小区信道激活时所用时延。

由于在定位列车当前位置和上报列车运行位置时均会出现误差,所以又通过对列车运行时间进行计算的方法,判断列车是否到达预承载点。对列车运行至预承载点的时间进行计时,当 $t \geq t_0$ 时,说明列车到达预承载点附近,即可触发切换,切换时间如式(2)所示。

$$t_0 = \left\{ \sqrt{(x_0 - x_{\text{cur}})^2 + (y_0 - y_{\text{cur}})^2} \right\} / V_{\text{cur}} \quad (2)$$

其中, (x_0, y_0) 为预承载点位置坐标,单位为m, $(x_{\text{cur}}, y_{\text{cur}})$ 为计算完预承载点时UE当前的位置坐标,单位为m。

因为小区均沿铁轨纵向分布,所以小区预承载点的纵坐标可以不计算。

(5)判断是否到达预承载点:运行时间达到切换时间即 $t \geq t_0$ 或者UE位置到达预承载点 $x \geq x_0$ 时就判定为列车已到达预承载点附近。

在判断UE是否移动至预承载点位置的同时进行信令交互和信道建立,当到达预承载点时触发切换。

(6)切换执行:当UE到达预承载点附近时触发切换,UE切断与源小区连接信道,与目标切换小区建立信道。

4 提前切换算法有效性评估

LTE-R普遍采用信令流程图进行描述切换过程,通过信令流程图进行理论分析时延的方法是评估算法有效性的方式之一。通过对两种切换下信令流程图进行理论分析,验证提前切换算法是否可以有效缩短切换时延。

4.1 同一MME内eNodeB间切换

同一MME内的eNodeB间切换时改进算法信令流程图如图2所示。

由图2可知,整个小区切换的总时延是执行完整个流程图的总时延,设该总时延为 T_A ,如式(3)所示。

$$T_A = 2T_{\text{s1c}} + \sum_{i=1}^n t_i \quad (3)$$

其中, t_i 为各信令流程时延值, T_{s1c} 为S1-C转移时延值。

提前切换算法可以节省从“上报测量信息”之后到“预承载点触发切换”之前的信令时延,设该段时延为 T_s_A ,根据图2得到式(4)。

$$T_s_A = 2T_{\text{s1c}} + \sum_{j=1}^m t_j \quad (4)$$

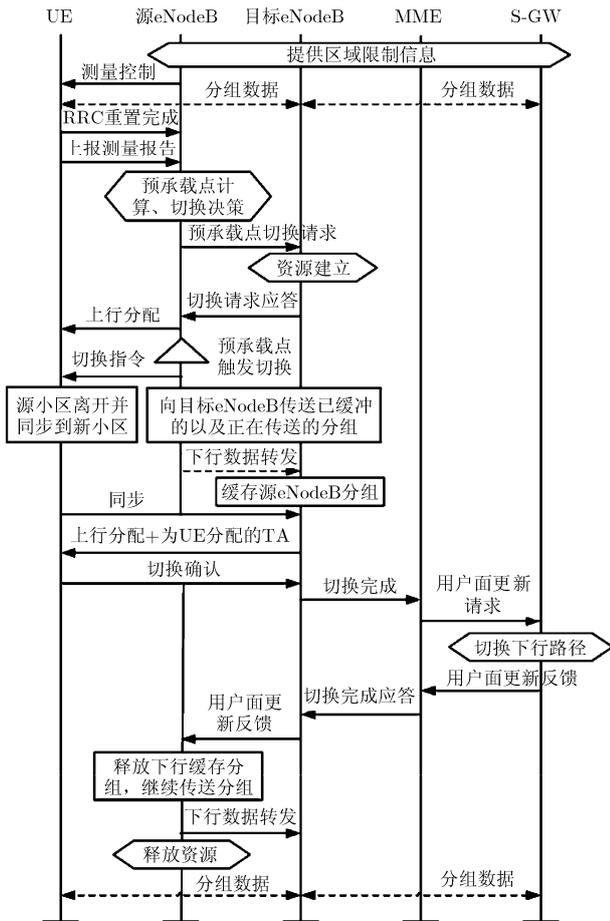


图2 基于速度触发的提前切换算法信令流程图(X2)

其中, t_j 为采用提前切换算法时在 eNodeB 间切换中所节约的各信令流程时延值, T_{s1c} 为 S1-C 转移时延值。

计算采用传统切换算法时切换时延与基于速度触发的提前切换算法时系统的切换时延, 分别设为 T_{A1} 和 T_{A2} , 定义为

$$T_{A1} = T_A \tag{5}$$

$$T_{A2} = T_A - T_{s_A} \tag{6}$$

由于 LTE-R 的实际应用只有朔黄铁路, 整个系统数据很少, 本文根据文献[10,11]中 LTE 各结构类

型的控制面和用户面时延数据将其代入式(1)~式(6)中进行理论计算, 最后得到各结构类型下的时延数据^[10-12], 如表 1 所示。

从表 1 中可以看出, 在同一 MME 下 eNodeB 间切换中, 提前切换算法在各类型帧结构的 LTE-R 中均可有效缩短切换时延, 其中效果最显著的是 TDD 帧结构类型 2, 可节约 44.71% 的切换时延。

4.2 eNodeB 与 MME 间切换

同理, 采用提前切换算法的信令流程图如图 3 所示。

将 eNodeB 与 MME 间的切换中整个小区切换的总时延设为 T_B , 节省从测量开始至“预承载点触发切换”前的时延为 T_{s_B} , 根据图 3 得到式(7), 式(8)。

$$T_B = 2T_{s1c} + T_{s1u} + \sum_{i=1}^n t_i \tag{7}$$

$$T_{s_B} = 2T_{s1c} + T_{s1u} + \sum_{j=1}^m t_j \tag{8}$$

其中, t_j 为采用提前切换算法时在 eNodeB 间切换中所节约的各信令流程时延值, T_{s1u} 为 S1-U 转移时延值。

与 eNodeB 间切换相同, 分别设采用传统切换算法中切换与采用提前切换算法时系统的切换时延值为 T_{B1} 和 T_{B2} , 定义为

$$T_{B1} = T_B \tag{9}$$

$$T_{B2} = T_B - T_{s_B} \tag{10}$$

将文献[10,11]中 LTE 各结构系统用户面与控制面数据分别按照图 3 所示流程代入式(7)~式(10)中得到各类型结构时延数据^[10-12], 如表 2 所示。

从表 2 中可以看出, 提前切换算法在 eNodeB 与 MME 间切换中效果更显著, 无论哪种结构类型, 均能缩小近一半的切换时延, 最高可以节约 58.94% 的切换时延。

分析表 1 和表 2 中各数据可知, 采用提前切换算法可以达到缩短切换时延的目的, 其中, 在 TDD 帧结构类型 2 时的效果最为显著, 两种切换下的切换时延分别是传统切换时的 55.29% 和 41.16%。

表 1 同一 MME 下 eNodeB 间切换中传统算法与提前切换算法执行时延对比表

	FDD	TDD(帧结构类型 1)				TDD(帧结构类型 2)
		4-DL/1-UL	3-DL/2-UL	2-DL/3-UL	1-DL/4-UL	
$T_{A1}(\text{ms})$	91.000	97.952	95.849	94.148	96.575	81.960
$T_{s_A}(\text{ms})$	36.000	37.000	38.050	38.399	38.425	36.647
$T_{A2}(\text{ms})$	55.000	60.952	57.799	55.749	58.150	45.313
节省时间比率(%)	39.56	37.77	39.70	40.786	39.79	44.71

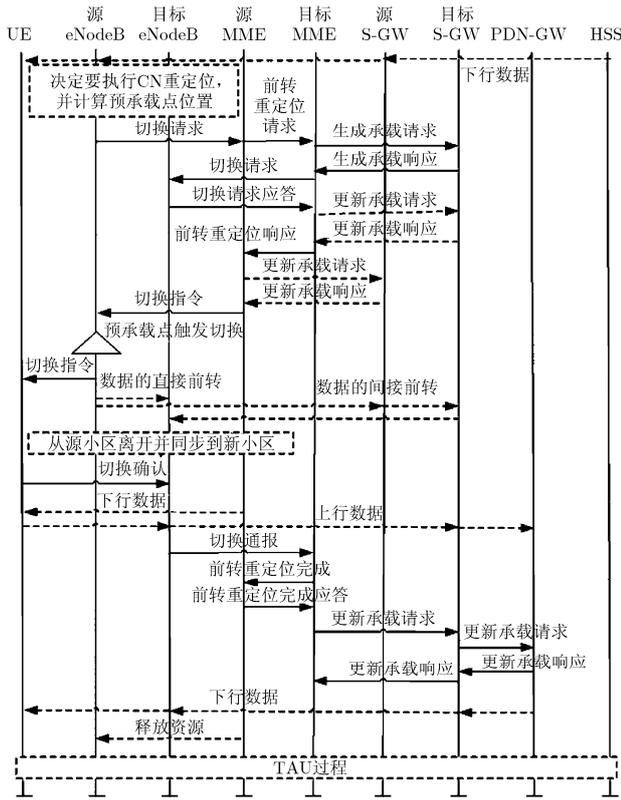


图 3 基于速度触发的提前切换算法信令流程(S1)

4.3 改进算法切换成功率分析

上述分析了算法可以有效缩短切换时延，下面分析切换时延与切换成功率的关系。假设同层相邻两基站间距离为 D ，列车在运行过程中，设 t 时刻，列车与源小区 eNodeB_{*i*} 距离为 x_t 时，接收信号强度如式(11)所示。

$$S_{rec_t}(i, x) = K_1 - K_2 \lg(x_t) - \varphi(t) - \delta(i) \quad (11)$$

其中， K_1 为 eNodeB_{*i*} 的发射功率， K_2 为 COST321-Hata 模型中路衰落因子， $\varphi(t)$ 为快衰落对接收信号造成的影响， $\delta(i)$ 为阴影衰落因子 $\delta(i) : (0, \sigma^2)$ 。

同理，列车接收到目标切换小区 eNodeB_{*j*} 的接收信号强度如式(12)所示。

$$S_{rec_t}(j, x) = K_1 - K_2 \lg(D - x_t) - \varphi(t) - \delta(i) \quad (12)$$

列车在切换判断触发之前会对接收到的信号质量进行层 3 滤波处理，用以削弱切换过程中存在的切换误判和乒乓效应，甚至可以减少切换中信号因受到快衰落影响接收信号波动较大的问题。在分析中，对接收信号强度进行层 3 滤波方式进行处理，如式(13)所示。

$$\bar{S}_{rec_t} = \alpha S_{rec_t} + (1 - \alpha) \bar{S}_{rec_{t-\Delta t}} \quad (13)$$

其中， S_{rec_t} 为 t 时刻列车接收到来自基站信号强度， $\bar{S}_{rec_{t-\Delta t}}$ 为上一测量时刻 $t - \Delta t$ 计算的接收信号平均值， α 为滤波因子 ($0 < \alpha < 1$)， Δt 为小区测量信号时间间隔。

设两次测量时间间隔内列车运行速度为 v ，则其运行距离如式(14)所示。

$$x_t - x_{t-\Delta t} = v\Delta t \quad (14)$$

当列车运行时检测到接收信号质量满足条件，触发切换。此时设为 t 时刻，则列车切换触发的概率如式(15)所示。

$$P_{HO_tr} = \Pr[S_{rec_t}(i, x) < H] + \Pr\left\{\left[\bar{S}_{rec_t}(j, x) - \bar{S}_{rec_t}(i, x) > \mu \mid S_{rec_t}(i, x) > H\right]\right\} \quad (15)$$

其中， μ 为列车接收两个相邻基站信号强度差值， H 为列车通信信号强度阈值最小值。

设列车在切换触发后，从开始执行到完成目标基站网络重进入的时间为 t_{HO1} 。

列车切换时，由于列车速度很快，穿过小区覆盖范围的时间很短，设列车一次无法切换成功则视为切换中断。则采用传统切换算法列车一次性顺利接入目标基站的概率如式(16)所示^[13]。

$$P_{HO_suc1} = P_{HO_tr} \frac{1}{vt_{HO1}} \int_{x_t}^{x_t+t_{HO1}} \Pr[\bar{S}_{rec}(j, x) > H] dx \quad (16)$$

在提前切换算法中，列车在接近预承载点时直接进行切换，此时，只需要与目标基站进行链路连接，设目标小区重进入时间为 t_{HO2} 。

由于改进算法可以根据列车运行速度判断预承载点，在高速运行时，由于省下了近一半的切换时延，所以在第 1 次切换失败的情况下可以执行第 2 次切换。所以其切换成功率如式(17)所示。

表 2 eNodeB 与 MME 间切换传统算法与提前切换算法执行时延对比表

	FDD	TDD(帧结构类型 1)				TDD(帧结构类型 2)
		4-DL/1-UL	3-DL/2-UL	2-DL/3-UL	1-DL/4-UL	
$T_{B1}(ms)$	106.000	112.952	110.849	109.148	111.575	96.960
$T_{s_B}(ms)$	53.500	54.500	55.400	55.698	56.150	57.147
$T_{B2}(ms)$	52.500	58.452	55.449	53.450	65.425	39.813
节约时间比率(%)	50.47	48.25	49.78	51.03	50.33	58.94

$$\begin{aligned}
 & P_{\text{HO_suc2}} \\
 &= \Pr \left[x_{t+t_{\text{HO2}}} < R \right] \\
 &\cdot \left\{ 1 - P_{\text{HO_tr}} \frac{1}{vt_{\text{HO2}}} \int_{x_t}^{x_t+t_{\text{HO2}}} \Pr \left[\bar{S}_{\text{rec}}(j, x) > H \right] dx \right\} \\
 &\cdot \frac{1}{vt_{\text{HO2}}} \int_{x_t+t_{\text{HO2}}}^{x_t+2t_{\text{HO2}}} \Pr \left[\bar{S}_{\text{rec}}(j, x) > H \right] dx \quad (17)
 \end{aligned}$$

从上述分析可知时延对切换成功率的影响, 并且得到速度触发提前切换算法在 LTE-R 中可以提升切换成功率, 缩短切换时延, 尤其在车速较高时, 改进算法更能凸显出优势。

5 仿真验证

前面的理论分析验证了提前切换算法的有效性, 下面进一步通过仿真进行分析验证。仿真设在两个小区间进行, 通过列车来回在两个小区间移动模拟列车通过线路中各小区, 实时记录每次仿真后得到的各数据。仿真次数设定为 25 次, 数据结构类型为 FDD 型, 对 eNodeB 与 MME 间切换进行仿真, 最后统计全部数据, 对比后得到结果。仿真平台采用 Matlab, LTE 系统级仿真, 仿真主要参数设置如下:

基站高度 35 m, 移动台高 3 m, 基站距铁路垂直距离 50 m, 载波频率 2 GHz, 基站间距 2 km, 基站天线高 30 m, 测量周期 5 ms, 基站覆盖半径 1.3 km, 基站发射功率 44 dBm, 信号强度门限值 -35 dB, 车速 360 km/h, 路径损耗模型采用 COST231-

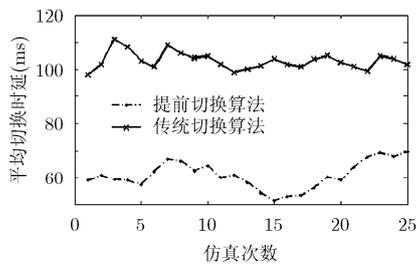


图 4 两种切换算法系统时延对比图

HATA(中等城市), $L_p = 36.8 \lg(d) + 28.1$, 背景噪声设为 -103 dBm/Hz, 滤波系数 $K=2^{[14,15]}$ 。

图 4 为采用两种切换算法时得到的系统时延对比图, 图中平均时延为累计各仿真次数的切换时延而得到的平均值。可知提前切换算法相比传统切换算法其时延更短, 尤其在累计 15 次切换时延数据时, 效果最显著, 其平均切换时延仅为传统平均切换时延的 49.8%, 与前述理论分析结果基本一致。

图 5 为两种切换算法下切换成功率对比图。可以看出在高速时, 提前切换算法下的切换成功率更为稳定, 且始终保持在 99.5% 以上。满足我国现行无线通信系统 QoS 技术对越区切换成功率大于 99.5% 以上的要求。

6 结论

本文从缩短切换时延的角度提出了一种基于速度触发的提前切换算法, 首先通过信令流程对 LTE-R 切换中采用传统切换算法和提前切换算法时的切换时延进行了理论计算, 分析理论可行性, 知理想条件下, 最高可节省约整个切换过程中 44.17%、58.94% 的切换时延; 其次通过仿真验证, 得知采用基于速度触发的提前切换算法可以有效缩短切换时延, 并在车速为 360km/h 时算法可以将系统切换成功率提升到 99.5% 以上, 为未来 LTE-R 系统在铁路的应用提供技术支持。

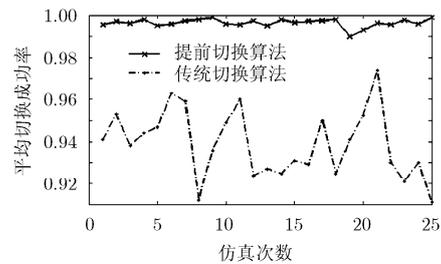


图 5 两种切换算法切换成功率对比图

参考文献

- [1] 庞萌萌. 高速铁路 GSM-R 网络越区切换对 CTCS-3 系统的影响及模型分析[D]. [硕士论文], 北京交通大学, 2010.
Pang Meng-meng. Effect of GSM-R handover on CTCS-3 and model analysis in high-speed railway environment[D]. [Master dissertation], Beijing Jiao Tong University, 2010.
- [2] 曹源, 马连川, 张玉琢. LTE-R 与 GSM-R 的越区切换成功率比较[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(6): 117-122.
Cao Yuan, Ma Lian-chuan, and Zhang Yu-zhuo. Comparison of handover success between rates between LTE-R and GSM-R[J]. *China Railway Science*, 2013, 34(6): 117-122.
- [3] 贺臻. 基于 LTE-R 的高速移动宽带通信系统切换技术研究[D]. [硕士论文], 中南大学, 2013.
He Zhen-zhen. The research on handover technology under high-speed mobile communication system based on LTE-R[D]. [Master dissertation], Central South University, 2013.
- [4] 吴端坡, 金心宇, 蒋路茸. 高速铁路网络环境下掉话率分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(4): 705-710.
Wu Duan-po, Jin Xin-yu, and Jiang Lu-rong. Dropped-call probability in high speed railway environment[J]. *Journal of*

- Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, 49(4): 705-710.
- [5] 朱晓荣, 罗小琴, 朱洪波. 正交频分多址系统中一种面向多业务应用的自适应资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(6): 1298-1303.
- Zhu Xiao-rong, Luo Xiao-qin, and Zhu Hong-bo. Adaptive resource allocation scheduling algorithm for multi-service application in OFDMA system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(6): 1298-1303.
- [6] 刘勤, 李红霞, 李钊. 基于认知的LTE系统动态频谱分配[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(1): 175-181.
- Liu Qin, Li Hong-xia, and Li Zhao. Dynamic spectrum allocation for LTE system by Exploiting cognitive capability[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(1): 175-181.
- [7] 黄妙娜, 冯穗力, 陈军. LTE网络中多目标优化的动态负载均衡算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(9): 2152-2157.
- Huang Miao-na, Feng Sui-li, and Chen Jun. Dynamic load balancing scheme for multi-objective optimization in LTE networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(9): 2152-2157.
- [8] Piro G and Boggia G. Two-level downlink scheduling for real-time multimedia services in LTE networks[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2011, 13(5): 1052-1065.
- [9] Capozzi F and Grieco L A. Downlink packet scheduling in LTE cellular networks: key design issues and a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 17(2): 678-700.
- [10] 赵治. LTE系统原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 57-194.
- Zhao Zhi. The Principle and Application of LTE System[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 57-194.
- [11] 孟繁丽, 张新程, 胡恒杰. LTE系统时延分析[J]. 邮电设计技术, 2009, 24(3): 37-41.
- Meng Fan-li, Zhang Xin-cheng, and Hu Heng-jie. LTE system time delay analysis[J]. *Design Technology of Posts and Telecommunications*, 2009, 24(3): 37-41.
- [12] 吴昊, 谷勇浩, 钟章队. 一种应用于高速铁路的快速切换算法研究[J]. 铁道工程学报, 2009, 37(1): 92-96.
- Wu Hao, Gu Yong-hao, and Zhong Zhang-dui. Research on the fast algorithm for GSM-R switching for high-speed railway[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2009, 37(1): 92-96.
- [13] 邸成, 方旭明, 杨崇哲. 一种基于车载双天线的GSM-R冗余网络无缝切换方案[J]. 铁道学报, 2012, 34(6): 51-56.
- Di Cheng, Fang Xu-ming, and Yang Chong-zhe. On-board dual-antenna seamless handover scheme in GSM-R redundant network[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2012, 34(6): 51-56.
- [14] 原燕斌. 高速铁路环境下LTE切换技术的研究[D]. [硕士学位论文], 北京邮电大学, 2012.
- Yuan Yan-bin. Research on high-speed railway environment LTE handover technology[D]. [Master dissertation], Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012.
- [15] 栾林林. 支持高速切换的TD-LTE信令的设计及其优化的研究[D]. [博士学位], 北京邮电大学, 2013.
- Luan Lin-lin. Research on designing and optimization of signaling of TD-LTE based in high-speed handover[D]. [Ph.D. dissertation], Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012.
- 米根锁: 男, 1966年生, 硕士, 教授, 主要研究方向为计算机测控技术及应用。
- 马硕梅: 女, 1990年生, 硕士生, 研究方向为下一代铁路移动通信技术。