

基于灰色预测的 LTE-R 越区切换算法

温强^{1,2}, 李积英^{1,2*}, 杨永红^{1,2}, 王磊³

¹兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070;

²甘肃省工业交通自动化工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730070;

³兰州交通大学交通运输学院, 甘肃 兰州 730070

摘要 针对高速铁路 LTE-R(long term evolution for mobile communications-railway)越区切换过程中,基于 A3 事件判决的越区切换算法容易出现乒乓切换频繁和切换成功率较低的问题,提出了基于改进的模糊预测优化切换算法。该算法对切换过程中的参考信号接收功率(RSRP)进行采集,并通过改进的 GM(1,1)灰色预测算法对采集的 RSRP 值进行优化处理,处理之后的测量参数值经 3 次循环预测和加权平均后,被送入判决公式进行判决。在 MATLAB 上的仿真结果表明所提算法降低了切换过程中的参数波动值,从而减少了乒乓切换的次数,提高了越区切换的成功率。

关键词 光通信; LTE-R; 测量参数; 灰色预测; 乒乓切换; 切换成功率

中图分类号 U284.76; TP39

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.190601

LTE-R Handover Algorithm Based on Grey Prediction

Wen Qiang^{1,2}, Li Jiying^{1,2*}, Yang Yonghong^{1,2}, Wang Lei³

¹School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

²Gansu Research Center of Automation Engineering Technology for Industry & Transportation, Lanzhou, Gansu 730070, China;

³School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract For the high-speed railway LTE-R (long term evolution for mobile communications-railway) handover process, the handover algorithm based on the A3 event decision is prone to frequent ping-pong handovers and has low handover success rate. An optimized handover algorithm based on improved fuzzy prediction is proposed in this work. In this algorithm, the reference signal received power (RSRP) in the handover process is collected, and the collected RSRP value is optimized by the improved GM (1, 1) grey prediction algorithm. After the three cycle prediction and weighted average, the measured parameter values are sent to the decision formula for judgment. Simulation results of the algorithm in MATLAB show that the proposed algorithm reduces the parameter fluctuation in the process of handover, thus reducing the number of ping-pang handovers and improving the success rate.

Key words optical communications; LTE-R; measured parameter; grey prediction; ping-pong handover; success rate of handover

OCIS codes 060.5565; 060.4510; 270.5565

1 引言

目前,高速铁路通信系统普遍使用 GSM-R (global system for mobile communications-railway)实现车地双向通信。由于列车速度不断提

升,小区之间的切换更加频繁,切换成功率低会对行车安全造成很大的影响;为保证行车安全,要求通信系统在切换过程中发生较少的乒乓切换,具有更小的切换时延,同时保证切换成功率。

普遍应用的窄带 GSM-R 无法完成高并发的通

收稿日期: 2019-11-20; 修回日期: 2020-01-04; 录用日期: 2020-01-15

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划(2016X003-H)

* E-mail: ljy7609@126.com

信任务,无法满足通信需求,LTE-R(long term evolution for mobile communications-railway)作为下一代移动通信系统,不仅能够继承 GSM-R 的全部业务,而且还可为用户提供多媒体集群调度、可视电话、视频监控、客运综合信息发布等功能,完成高并发通信,为铁路提供更加安全、高速的通信网络,因此 LTE-R 技术是未来实现高速铁路移动通信的首要选择^[1]。

在高速铁路 LTE-R 系统中,随着铁路的运行,移动终端(UE)从一个小区切换到另一个小区,切换成功的基础是选择合适的切换算法,若切换算法选择不恰当,轻则产生乒乓切换,重则造成通信中断,甚至会导致列车紧急制动,影响行车安全。因此对 LTE-R 切换算法的研究成为当前的一个热点,针对列车在高速运行环境下越区切换过程中出现切换成功率较低的情况,国内外学者针对不同的问题提出了不同的优化方法。文献[2-3]提出通过对速度相关的特性参数进行分级优化,虽然相对提高了越区切换的成功率,但是对参数进行优化时需要进行动态计算,而在轨道通信切换时间极短的情况,它并不能保证稳定的切换成功率。文献[4]提出在切换过程中,提前进行信令交换与切换预承载,虽然在一定程度上减小了切换时延,但是预承载点确定相对比较复杂。文献[5]提出了一种基于位置的切换算法,但是由于在实际列车运行中定位受外界干扰影响较大,工程性、实践性较差。文献[6]通过对判决参数进行优化,运用列车定位提前完成资源的分配,有效减小了切换时延,但是没有考虑到乒乓切换对切换成功率的影响。

本文从降低乒乓切换次数和提高切换成功率两个方面对 LTE-R 越区切换算法进行研究,提出一种基于模糊预测的越区切换算法。该算法通过优化测量参数减小了切换过程中信号波动对切换的影响,从而降低了乒乓切换次数、提高了切换成功率。将本文算法与传统 A3 切换算法和平滑滤波算法进行比较,验证了本文算法在高速切换过程中的优越性。

2 LTE-R 越区切换模型

高速铁路的 LTE-R 越区切换系统模型如图 1 所示,在列车高速运行过程中,列车从当前小区工作范围进入目标小区工作范围,为了保证车地通信连续,UE 必须断开与源 eNodeB 的链接,并与目标 eNodeB 建立通信链接,以保证通信的连续性和可靠性。同时切换带的设计应该保证 UE 能进行 2 次

切换,即 UE 第 1 次切换失败之后能够进行第 2 次切换。在切换过程中^[7],A3 事件是决定是否切换的主要事件,当邻小区的测量参数值高于当前服务小区的测量值时,触发判决。

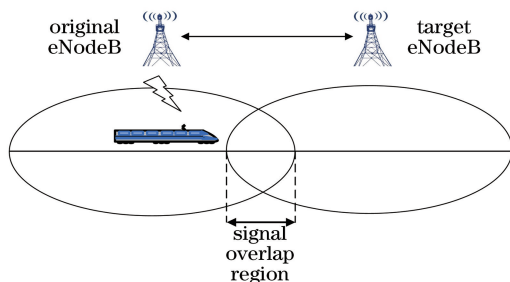


图 1 越区切换模型示意图

Fig. 1 Diagram of handover model

在无线通信系统中,切换的方式可以分为软切换、硬切换、接力切换等几种形式。因为在 LTE 网络中取消了无线网络控制器(RNC)等中间网元模块,所以只支持硬切换。硬切换的定义是:在切换过程中,UE 断开与源基站的通信,然后建立与目标基站的通信。硬切换一般分为三个过程,分别是切换测量、切换判决、切换执行^[8-9]。切换流程如图 2 所示。

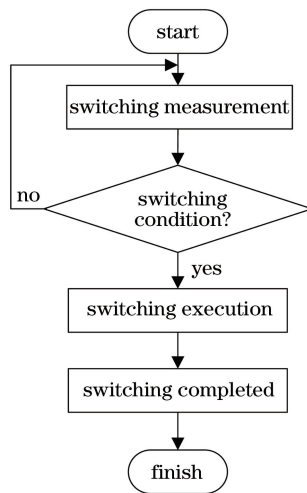


图 2 越区切换流程图

Fig. 2 Chart of handover

2.1 切换测量

列车在高速运行过程中,UE 周期性地对源 eNodeB 和目标 eNodeB 的参考信号接收功率(RSRP,其值用 R_{RSRP} 表示)进行测量,以保证在执行切换过程中,通信链路的改变不会影响通信。同时列车将测量到的瞬时值进行滤波。当滤波之后的结果满足上报准则后,UE 向源 eNodeB 发送测量报告,然后进行判决。测量滤波过程如图 3 所示,图中

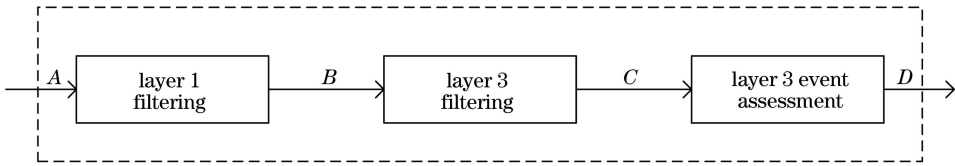


图3 测量滤波过程示意图

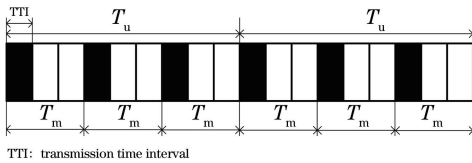
Fig. 3 Diagram of measurement filtering process

A 为测量的瞬时值。

滤波过程分为三个过程：层 1 滤波、层 3 滤波和层 3 事件评估。

1) 层 1 滤波

测量的瞬时值 A 经层 1 滤波，层 1 滤波包括 2 个周期，测量周期 T_m 和上报周期 T_u ，如图 4 所示。

图 4 测量周期 T_m 和上报周期 T_u 的示意图Fig. 4 Diagram of measurement period T_m and reporting period T_u

在上报周期 T_u 内把时间按照 T_m 划分为若干段，在每个 T_m 时间段内，对获得的 m 个 R_{RSRP} 值进行加权平均，然后加入测量随机误差 N_{T_m} 。

$$M_{T_m} = \frac{\sum_{j=1}^m R_{\text{RSRP},j}}{m} + N_{T_m}, N_{T_m} \in (0, \delta), (1)$$

式中： j 为测量的次数； $R_{\text{RSRP},j}$ 为 T_m 时间段内第 j 次测量的瞬时值； N_{T_m} 服从正态分布； δ 为正态分布的标准差。

2) 层 3 滤波

经层 1 滤波之后，进行层 3 滤波，得到测量值 C。具体过程是建立当前测量值与上一时刻的测量值的相关性，通过此处理减小了信道随机变化对上报值的影响^[10]，同时能使上报的值既与当前的测量值相关，还与上一时刻的测量值相关。层 3 滤波的公式为

$$R_{\text{RSRP}, nT_u} = (1 - \alpha)R_{\text{RSRP}, (n-1)T_u} + \alpha M_{nT_m}, (2)$$

式中： n 为当前的次数； R_{RSRP, nT_u} 为经过层 3 滤波之后的结果； $R_{\text{RSRP}, (n-1)T_u}$ 为上一时刻层 3 滤波的测量值； α 为滤波因子，为 T_m 和 T_u 的比值； M_{nT_m} 为当前层 1 滤波上报到层 3 滤波的测量值。

3) 层 3 事件评估

经过层 3 事件评估后得到处理值 D，对 D 进行

条件判决，若满足条件，将测量报告信息通过空中接口发送给高层。

2.2 切换判决

对经过测量滤波处理之后的信息通过服务 eNodeB 进行 A3 事件判决，若满足触发条件，则执行切换；否则，继续进行判决。A3 事件的判决公式为

$$M_n + O_{fn} + O_{cn} - H_{ys} > M_s + O_{fs} + O_{cs} + O_{ff}, (3)$$

式中： O_{cn} 为相邻小区的特定偏置值； O_{cs} 为服务小区的特定偏置值； M_n 为目标小区的测量值； M_s 为服务小区的测量值； O_{fn} 、 O_{fs} 分别为源小区与目的小区的特定偏置； H_{ys} 为迟滞参数； O_{ff} 为偏移参数^[11]。

基于 LTE-R 的车地通信系统采用同频越区切换，因此 O_{fn} 、 O_{fs} 的值为 0，而相邻每个小区的优先级是相同的，没有偏置，则 O_{cn} 、 O_{cs} 也均为 0。故 (3) 式可简化为

$$M_n - H_{ys} > M_s + O_{ff}. (4)$$

2.3 切换执行

如果测量信息满足判决切换要求，UE 则开始进行切换，断开与源 eNodeB 基站的链接，并与目标 eNodeB 基站建立链接，完成切换。

3 基于灰色预测模型的越区切换算法

在基于 LTE-R 的高速铁路移动通信系统中，频段内产生的同频干扰以及列车高速运行过程中产生的阴影衰落和路径损耗都会影响 M_n 和 M_s 的值^[12-13]，所以 UE 得到的信号测量值波动较大，造成乒乓切换的概率增加。因此，采用单一的 A3 切换判决[(4)式]并不能进行准确的判断。针对以上问题，本文提出一种改进的 GM(1,1)灰色预测模型算法，以对接收到的信号进行数据处理，从而去除同频干扰、多径效应、阴影衰落对 M_n 和 M_s 的影响，得到当前准确的 M_n 和 M_s ，减少乒乓切换次数。

3.1 GM(1,1)灰色预测模型

灰色预测是由我国邓聚龙教授提出的，它是通过

少量的、不完全的信息去建立灰色预测模型,然后对事物的发展进行预测,即通过分析系统内各变量之间的关联性,得到变量的发展趋势,并生成具有一定规律性的预测数据序列,然后通过建立微分模型,对之后的数据进行模糊预测,得到数据预测序列^[14]。在灰色系统理论中,GM(1,1)灰色预测模型是一种动态的预测模型,具有建模样本量小、计算效率高等特点。在进行灰色预测时,为了使杂乱的数据序列表现出一定的规律性,需要进行灰色量白化处理,经过灰色量白化处理之后,利用建立的灰色预测模型预测结果。GM(1,1)灰色预测模型建模过程为:

1) 设一组原始时间序列 $X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$, 其中, n 为序列的个数;

2) 由原始序列产生的一阶累加生成序列为 $X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$, $X^{(1)} = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(n)\}$, $x^{(0)}(i) = \sum_{t=1}^i x^{(0)}(t)$, $i=1, 2, \dots, n$, 其中, t 为迭代数, $x^{(0)}(i)$ 为累加生成值;

3) 同时一阶累加生成序列的紧邻均值生成序列为 $Z^{(1)} = \{z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n)\}$, $z^{(1)}(i) = \frac{x^{(1)}(i) + x^{(1)}(i-1)}{2}$, $i=2, 3, \dots, n$, 则 GM(1,1) 模型为

$$x^{(0)}(i) + az^{(1)}(i) = b, \quad (5)$$

式中: a 为发展系数; b 为灰作用量。

其影子方程(白化方程)为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b, \quad (6)$$

则 GM(1,1) 模型的解为

$$\hat{x}^{(1)}(i) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] \exp[-a(i-1)] + \frac{b}{a}, \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

(7)式可以记作:

$$\hat{x}^{(1)}(i) = C_1 \exp[v(i-1)] + C_2, \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

式中: C_1 为(7)式中的 $x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}$; v 为(7)式中的 $-a$; C_2 为(7)式中的 $\frac{b}{a}$ 。

3.2 GM(1,1)灰色预测模型的改进

由于高速铁路的特殊环境,信号受外界的影响后波动较大,如果采用 GM(1,1)模型直接进行预测则可能导致拟合效果不理想。对传统的 GM(1,1)

预测模型进行改进,以求达到较好的拟合效果,降低信号波动对切换的影响。改进的 GM(1,1)灰色预测模型^[15]是将传统 GM(1,1)模型与二次多项式进行融合重构,进而构造出具有更高精确度的新模型。

改进的 GM(1,1)灰色预测模型是通过指数方程 $Y = a \exp(bX)$ 和二次多项式方程 $Y = aX^2 + bX + c$ 来拟合 $\hat{x}^{(1)}(i)$, 记为

$$\hat{x}^{(1)}(i) = C_1 \exp[v \times (i-1)] + C_2(i-1)^2 + C_3(i-1) + C_4, \quad (9)$$

式中: C_1, C_2, C_3, C_4 是回归系数; v 为发展系数; i 为时间变量; $\hat{x}^{(1)}(i)$ 为一阶累加预测值。由 GM(1,1)模型计算得出 a 后,令 $v = -a$, C_1, C_2, C_3, C_4 由最小二乘法^[16]得出,求解方法为

$$A = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y, \quad (10)$$

$$B = \begin{bmatrix} \exp[v \times (1-1)] & (1-1)^2 & 1-1 & 1 \\ \exp[v \times (2-1)] & (2-1)^2 & 2-1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \exp[v \times (i-1)] & (i-1)^2 & i-1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(1)}(1) \\ x^{(1)}(2) \\ \vdots \\ x^{(1)}(n) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

通过以上过程,可得到改进的预测模型。因为轨道交通对于列车数据的实时性要求较高,所以对列车接收到的 RSRP 值进行预测时,应该采用短序列;若采用长序列进行预测时,有可能用到上一个小区无效的 RSRP,而该数据对当前时刻的预测没有很大的意义。因此,根据越区切换的特点,以当前时刻为参考点,选取当前时刻之前 4 个时刻的 M_n 值组成一个预测序列,建立改进的 GM(1,1)预测模型,预测当前时刻的值^[17]。

为了验证改进 GM(1,1)预测算法的有效性,本文对典型的曲线变化特征进行仿真和对比分析。

1) 凹凸性变化特性

检验凹凸性拟合效果时,如果数据较少则得到的实验效果不佳,故使用 10 个数据进行检验,去验证改进算法的拟合性。线段都是由点组成的,因此使用 10 个数据不会影响实验结果。使用改进 GM(1,1)模型与 GM(1,1)模型分别对

$X^{(0)} = \{45, 36, 29, 25, 23, 24, 26, 30, 37, 46\}$ 和 $X^{(0)} = \{25, 34, 41, 46, 48, 47, 44, 40, 33, 24\}$ 的凹凸性变化曲线进行拟合。拟合结果如图 5 和图 6 所示,从图中可以看出,改进的 GM(1,1)算法比原 GM(1,1)算法的拟合效果更佳。

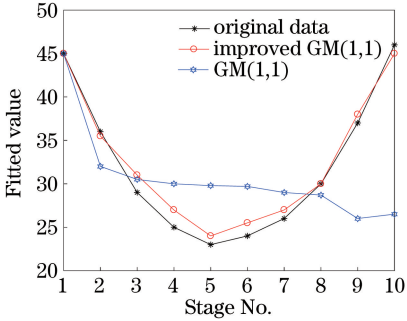


图 5 凹形变化序列拟合效果

Fig. 5 Fitting effect of concave variation sequence

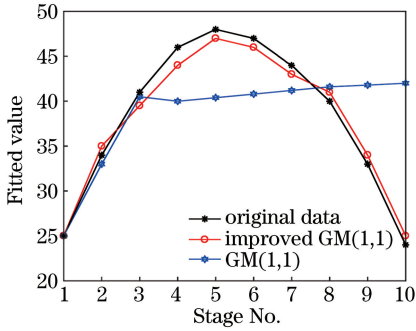


图 6 凸形变化序列拟合效果

Fig. 6 Fitting effect of convex variation sequence

2) 单调性变化特性

使用改进的 GM(1,1)模型与原始 GM(1,1)模型分别对 $X^{(0)} = \{41, 42, 43, 44, 45, 46\}$ 和 $X^{(0)} = \{46, 45, 44, 43, 42, 41\}$ 的单调性进行拟合比较,结果如图 7 和图 8 所示。通过图 7 和图 8 可以看出,相比原始 GM(1,1)模型,改进的 GM(1,1)模型可以更好地模拟和预测单调性变化序列。

3.3 算法流程

使用改进的 GM(1,1)灰色预测模型对接收到的 M_n 和 M_s 的值进行预处理,能够提高预测值的精确度,相应地减小了信号波动对切换的影响,从而得到更为精准的 M_n 和 M_s 。具体算法步骤如下:

1) 因为 M_n 和 M_s 的值 ($-80 \sim -20$ dBm) 为负值,取绝对值以方便判决。

2) 取当前时刻 M_n 和 M_s 的前 4 个值组成绝对值序列,分别为 $X_n = \{x_n(1), x_n(2), x_n(3), x_n(4)\}$, $X_s = \{x_s(1), x_s(2), x_s(3), x_s(4)\}$ 。

3) 利用绝对值序列 X_n 建立改进的灰色

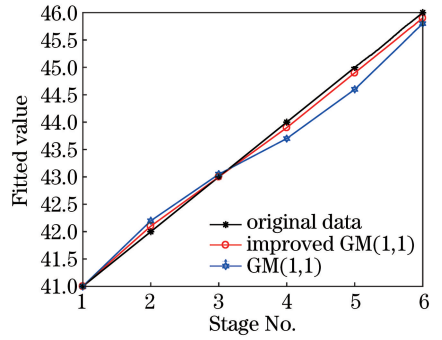


图 7 单调增形序列拟合效果

Fig. 7 Fitting effect of monotonic augmentation sequence

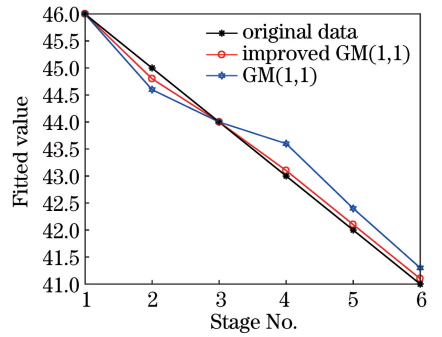


图 8 单调减形序列拟合效果

Fig. 8 Fitting effect of monotonic subtraction sequence

GM(1,1)预测模型,通过 3 次循环预测得到新序列 $X_{n,pre} = \{X_{n,pre1}, X_{n,pre2}, X_{n,pre3}\}$;同理,利用序列 X_p 建立灰色预测模型,经过 3 次循环,可得到 $X_{s,pre} = \{X_{s,pre1}, X_{s,pre2}, X_{s,pre3}\}$ 。

4) 为了进一步提高预测的精确度,对预测结果进行 2 次处理,即将上述 M_n 和 M_s 的 3 个预测值进行加权平均,得到 $\bar{X}_{n,pre}, \bar{X}_{s,pre}$ 。

5) 利用 $\bar{X}_{n,pre}, \bar{X}_{s,pre}$ 分别置换判决公式[(4)式]中的 M_n 和 M_s ,则判决公式可变为

$$\bar{X}_{n,pre} - H_{ys} > \bar{X}_{s,pre} + O_{ff} \quad (13)$$

6) 若 $\bar{X}_{n,pre}, \bar{X}_{s,pre}$ 满足判决公式, eNodeB 向 UE 发送切换命令,若 eNodeB 收到切换确认消息,释放源小区占有资源,与目标 eNodeB 建立链接。改进的流程图如图 9 所示。

4 仿真与结果分析

仿真配置如表 1 所示,在相同的仿真条件下,分别对改进的 GM(1,1)灰色预测算法、A3 事件切换算法和平滑滤波切换算法进行了仿真。以乒乓切换

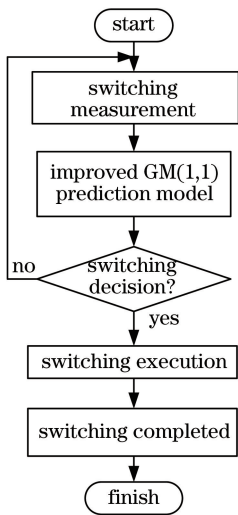


图9 改进算法的流程图

Fig. 9 Flowchart of improved algorithm

发生的次数和切换成功率作为评价标准,验证LTE-R越区切换算法的性能。本文仿真中主要针对山地场景,信号严重受到大尺度阴影衰落和路径损耗的影响,通过对信号进行模糊处理,减小了信号大幅度的波动对切换性能的影响,同时可以有效地降低乒乓切换的次数。

表1 仿真配置表

Table 1 Simulation configuration table

Parameter	Value
Bandwidth /MHz	20
Carrier frequency /GHz	2.6
Launching power of base station /dBm	43
Path loss model /dB	$140.729 + 34.768 \times \lg R - 10.03$
Standard deviation of Gaussian shadow model /dB	8
Vertical distance from base station to rail /m	100
Cell radius R /km	1.6
Cell overlap area / m^2	500
Switching trigger threshold /dB	3
Trigger delay time /ms	480
UE speed / $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	120,250,350

为了验证改进算法的合理性,对接收信号进行以上6个步骤的灰色模拟预测,并将模拟的波形图与基于传统A3事件算法的波形图进行比较。在理论上,RSRP值波动的幅度范围越小,乒乓切换发生的次数也就越少,系统性能越好。在仿真的过程中,仅考虑无线信道模型中的阴影衰落和路径损耗。

传统A3事件切换算法与改进的GM(1,1)切

换算法的RSRP值与高铁位置的变化仿真图如图10和图11所示。理论上,在信号重叠区(切换带),信号波动的幅度越小,乒乓切换发生的次数就越少,系统的切换性能就越好。通过仿真图波动幅度对比可以看出,在信号重叠区0.8~1.2 km附近,基于传统的A3事件切换算法得到的源eNodeB与目标eNodeB信号值RSRP波动幅度很大;而在基于改进的GM(1,1)灰色预测模型的算法下,重叠区0.8~1.2 km附近信号值RSRP波动较小,相比传统A3事件切换算法下的RSRP值改善了很多。

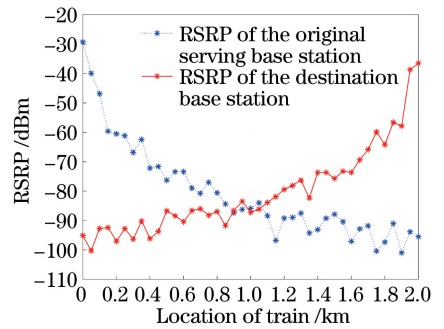


图10 传统A3算法的RSRP

Fig. 10 RSRP of traditional A3 algorithm

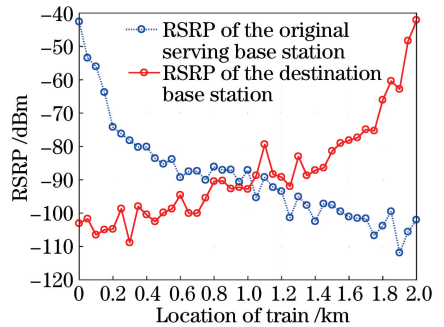


图11 改进算法的RSRP

Fig. 11 RSRP of improved algorithm

为了进一步验证改进切换算法的优越性,采用2种较为优越的越区切换算法与改进算法进行对比仿真;在整个切换过程中,为了降低实验误差,分别对3种算法进行切换总过程数为5,10,15,...,50次的仿真统计,比较发生乒乓切换的次数,验证改进算法的优越性,仿真结果如图12所示。

由于列车运行速度越大,发生乒乓切换的概率也就越大,故设置列车为高速运行的状态以证明改进算法的优越性,因此设置 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的运行速度进行仿真。仿真中,将切换的整个过程模拟了30次,在传统A3切换算法下,乒乓切换发生的次数达到了27次,而在基于模糊预测的切换算法下,乒乓切换发生的次数仅有2次。与平滑滤波切换算法相

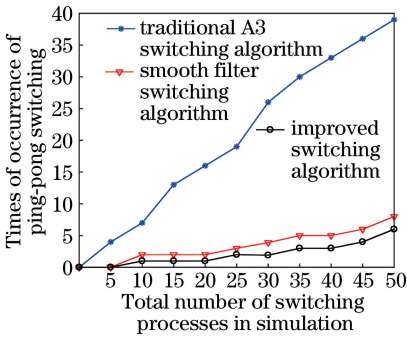


图 12 不同切换算法发生乒乓切换的次数对比图
Fig. 12 Comparison of occurrence times of ping-pong switching of three algorithms

比较,乒乓切换发生的次数也要少一些;在对切换过程进行 50 次模拟时,传统 A3 切换算法的效果更差一些,乒乓切换发生的次数达到了 39 次,而采用基于模拟预测的切换算法时,乒乓切换发生的次数仅为 6 次。从图 12 中还可以看出,改进的切换算法更加稳定一些;采用传统的 A3 切换算法时,乒乓切换发生的概率约为 80%;采用基于预测的切换算法时,乒乓切换发生的概率为 10% 左右。总体而言,基于模糊预测的越区切换算法能够有效地降低乒乓切换发生的概率,提高切换的效率。

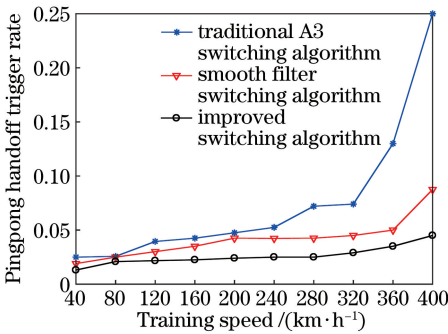


图 13 不同算法的乒乓切换触发率比较
Fig. 13 Comparison of ping-pong switching trigger rates of various algorithms

针对不同速度下乒乓切换发生的概率进行仿真,结果如图 13 所示。分别对本文算法、传统 A3 算法、平滑滤波算法进行了仿真比较,从图 13 中可以明显看出,改进的 GM(1,1) 切换算法要比传统 A3 算法和平滑滤波算法发生乒乓切换的概率小一些,切换成功率相应地提高。因此改进的 GM(1,1) 切换算法要优于其他滤波算法和传统 A3 算法。

当列车运行在 0~400 km · h⁻¹ 的速度范围内,分别对 3 种切换算法进行切换成功率仿真比较,仿真结果如图 14 所示。

由图 14 可知,当列车以 200~400 km/h 的速

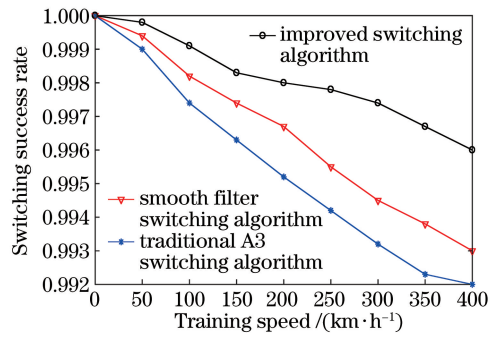


图 14 不同切换算法的切换成功率比较
Fig. 14 Comparison of switching success rates of three algorithms

度运行时,基于 A3 切换算法的越区切换成功率要比 99.5% 低,而在我国现行的标准中,它并不能够满足越区切换率大于 99.5% 的要求,而且当列车在高速运行时,传统 A3 切换算法和平滑滤波切换算法的切换成功率有较快的下降趋势,而基于灰色预测模型的切换算法的切换成功率下降趋势较小,并且能够在高速状态下满足我国铁路无线网络切换成功率的要求。

5 结 论

在越区切换过程中,受大尺度衰落和多径效应的影响,UE 接收的 RSRP 波动范围较大会造成乒乓切换发生次数较多的问题。通过对测量参数进行预处理,降低了信号的波动幅度较大对切换判决的影响。在进行测量参数预处理的过程中,直接使用传统的 GM(1,1) 灰色预测模型时存在拟合效果不佳的问题,通过将传统的 GM(1,1) 灰色预测模型与二次多项式进行拟合重构,提高了预测值的精确度。将改进的 GM(1,1) 模型应用到 RSRP 值的预测中。在进行预测之后,对估计参数进行优化,以降低系统误差,通过仿真验证可得,改进的模糊预测切换算法能够有效地减小信号的波动范围,降低乒乓切换发生的次数,提高越区切换的切换成功率。

参 考 文 献

[1] Cao Y, Ma L C, Zhang Y Z, et al. Comparison of handover success rates between LTE-R and GSM-R [J]. China Railway Science, 2013, 34(6): 117-123. 曹源, 马连川, 张玉琢, 等. 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): 117-123.

[2] Li D. Comparative research on train-ground wide band wireless communication for high-speed railway

- [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(3): 85-90.
- 李栋. 高速铁路车地宽带无线通信方案比较研究[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(3): 85-90.
- [3] Chen Y G, Li D W, Zhang C Z. A speed-based cross-zone handoff optimization algorithm of LTE-R[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(7): 67-72.
- 陈永刚, 李德威, 张彩珍. 一种基于速度的 LTE-R 越区切换优化算法[J]. 铁道学报, 2017, 39(7): 67-72.
- [4] 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.
- 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.
- [5] Fei M, Fan P Z. Position-assisted fast handover schemes for LTE-advanced network under high mobility scenarios [J]. Journal of Modern Transportation, 2012, 20(4): 268-273.
- [6] Ling Q D, Zhang L, Wang H L, et al. Fast handover algorithm of LTE-R in high-speed railway environment[J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(11): 3333-3339.
- 凌启东, 张雷, 王鸿磊, 等. 高铁环境下 LTE-R 快速切换算法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(11): 3333-3339.
- [7] Nie M, Kou W X, Wei R Y, et al. Cellular handover strategy for 6G network of quantum mobile communication based on the optimal entanglement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 152701.
- 聂敏, 寇文翔, 卫容宇, 等. 基于最优纠缠度的量子移动通信 6G 网络小区软切换策略[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 152701.
- [8] Luo W T, Fang X M, Cheng M, et al. An optimized handover trigger scheme in LTE systems for high-speed railway [C] // Proceedings of the Fifth International Workshop on Signal Design and Its Applications in Communications, October 10-14, 2011, Guilin, China. New York: IEEE Press, 2011: 193-196.
- [9] Vasudeva K, Simsek M, Guvenc I. Analysis of handover failures in HetNets with layer-3 filtering[C]//2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), April 6-9, 2014, Istanbul, Turkey. New York: IEEE Press, 2014: 2647-2652.
- [10] Xu Y, Zhan Q. Research on handover algorithm of TD-LTE mobile communication for high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(5): 47-51.
- 徐岩, 詹强. 高速铁路移动通信 TD-LTE 切换算法研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(5): 47-51.
- [11] 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.
- 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.
- [12] Zhu X M, Li D D, Xing T, et al. Strategy of locomotive handoff based on prediction and advanced authentication [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(10): 67-72.
- 朱晓敏, 李丹丹, 邢婷, 等. 一种基于预测和提前认证的机车越区切换方案[J]. 铁道学报, 2011, 33(10): 67-72.
- [13] Du T, Chen Y G, Li D W. Research on optimization of LTE-R handover algorithm based on real-time dynamic hysteresis [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(4): 176-180.
- 杜涛, 陈永刚, 李德威. 基于实时动态迟滞的 LTE-R 切换算法优化研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(4): 176-180.
- [14] Gui W Y. Study on passenger traffic prediction at Harbin railway hub using grey linear-regression model[J]. China Railway, 2018(6): 22-27.
- 桂文毅. 基于灰色线性回归模型的哈尔滨铁路枢纽客运量预测研究[J]. 中国铁路, 2018(6): 22-27.
- [15] Chen X Y, Huang W D, Zhang W J, et al. Multiple targets technology optimization based grey relative analysis of 18Ni300 Die steel formed by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0502003.
- 陈侠宇, 黄卫东, 张伟杰, 等. 基于灰色关联分析的选区激光熔化成形 18Ni300 模具钢多目标工艺优化[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0502003.
- [16] Yang Q L, Wan X X, Xiao G S. Multispectral dimension reduction algorithm based on partial least squares [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 013003.
- 杨秋兰, 万晓霞, 肖根生. 基于偏最小二乘法的多光谱降维算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57

(1): 013003.

- [17] Wang X X, Tang T, Jiang H L, et al. Handover algorithm for train-ground communication system of urban rail transit based on TD-LTE [J]. China

Railway Science, 2016, 37(3): 109-115.

王晓轩, 唐涛, 蒋海林, 等. 基于 TD-LTE 的城市轨道交通车地通信系统越区切换算法[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(3): 109-115.