doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2023.07.005

基于改进灰色-马尔可夫模型的LTE-R越区切换算法

王瑞峰，范文静
（兰州交通大学 自动化与电气工程学院，兰州 730070）

摘要：高速列车在越区切换过程中，由于路径损耗和地形等因素的影响，参考信号接收功率(reference signal receiving power, RSRP)会发生上下波动，采用基于A3事件的传统越区切换判决方法，会导致发生乒乓切换和切换成功率下降。文中提出基于改进灰色-马尔可夫模型的切换算法，改进灰色-马尔可夫模型对参考信号接收功率进行处理和预测，结合预承载方法，利用处理结果作为切换判决依据执行切换过程。仿真结果表明，采用改进切换算法，使列车接收到的源小区和目标小区RSRP值的波动情况得到明显改善，乒乓切换概率更低，切换成功率得以有效提高。

关键词：高速铁路；LTE-R；列车通信系统；越区切换；灰色-马尔可夫模型；乒乓切换

中图分类号：U285.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-582X(2023)07-044-09

Research on LTE-R handover algorithm based on improved grey-Markov model

WANG Ruifeng, *FAN Wenjing*
(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China)

Abstract: During the handover process of high-speed trains, the reference signal receiving power (RSRP) experiences fluctuations caused by path loss and terrain, leading to issues with the traditional A3 event-based handover decision method, such as ping-pong occurrences and a decrease in handover success rate. To address this problem, a handover algorithm based on an improved gray-Markov model is proposed. This algorithm processes and predicts the received power of the reference signal using an enhanced grey-Markov model. The handover process then utilizes the prediction results as the basis for the handover decision based on the preloading method. Simulation results demonstrate that the improved handover algorithm significantly reduces the fluctuation of RSRP values received by the train, lowers the probability of ping-pong handovers, and effectively improves the handover success rate.

Keywords: high speed railway; LTE-R; train communication system; handover; Grey-Markov; ping-pong handovers

收稿日期：2022-04-12
基金项目：国家自然科学基金资助项目（61661027）。
Supported by National Natural Science Foundation of China（61661027）.
作者简介：范文静(1996—)，女，硕士，主要从事铁路移动通信方向研究，(E-mail)527583518@qq.com。
通信作者：王瑞峰，女，教授，(E-mail) 3259203516@qq.com。

LTE-R是下一代铁路移动通信系统。随着高速铁路的发展，在列车运行速度大幅度提升的同时，也会造成通信质量下降，频繁切换等现象。其中，切换技术是高速铁路宽带移动通信系统研究的关键技术，列车跨越小区时的及时切换能保证会话的持续连接，提升整个通信系统的有效性和可靠性[1]。

文献[2-3]采用神经网络对数据进行预测，得出合适的切换决策参数，提高切换性能。但神经网络的预测需要大量数据，实时性较低。文献[4-5]利用机器学习算法对切换参数进行估计，对切换进行判断，但运算较为复杂。文献[6]针对长期演进(long term evolution，LTE)通信系统应用于铁路，提出一种软切换理念，采用先接入后断开的方式，有效提高切换成功率，但软切换技术占用了更多资源。文献[7-8]提出在切换重叠区采用波束赋形方式，根据列车运行速度对源基站和目标基站的赋形增益进行调整，改变信号强度，提高切换成功率。但波束赋形技术的基带处理能力要求强、系统复杂、成本较高。文献[9]通过灰色模型对参考信号接收功率进行处理，提高了切换成功率，但波动序列的适应性较差，会导致结果发生偏差。

在LTE通信系统中，由于频率相同的无用信号产生的同频干扰以及多径衰落和阴影衰落等因素，接收端的RSRP值会发生较大波动。采用A3算法可能会造成多余错误，影响列车的通信质量，导致切换失败，增加列车运行风险。文中提出一种基于改进灰色-马尔可夫模型算法，对参考信号接收功率进行处理和预测，使接收信号波动更小，利用预测值进行切换预承载判断，缩短切换时延。该算法能够很好地减少乒乓切换概率，提高切换成功率。

1　LTE-R的切换原理和工作流程

越区切换是连接状态下移动性管理的重要组成部分，其过程主要分为3个部分：切换准备过程、切换执行过程、切换完成过程[10]。越区切换是由源基站发起的，源基站对用户设备(user equipment，UE)接收到的参考信号接收功率进行测量和评估，通过UE所在区域的情况判断是否发起切换，若满足切换条件，则UE先断开与源基站的连接，再接入目标基站。

1.1　重叠区域规划

在LTE系统中，主要通过$eNodeB_A$、$eNodeB_B$和UE以及移动性管理实体(mobility management entity，MME)/服务网关(serving gateway，S-GW)之间的信令交互完成越区切换过程。演进型Node B(evolved node B，eNodeB)之间通过X2口进行连接，eNodeB通过S1口与MME/S-GW相连接。在越区切换过程中，基站间的重叠区规划十分重要，若重叠区域设置过大，会引起切换频繁，重叠区域设置过小，则会降低切换成功率。其设置如图1所示，其中，A为重叠区，B为两基站之间距离。

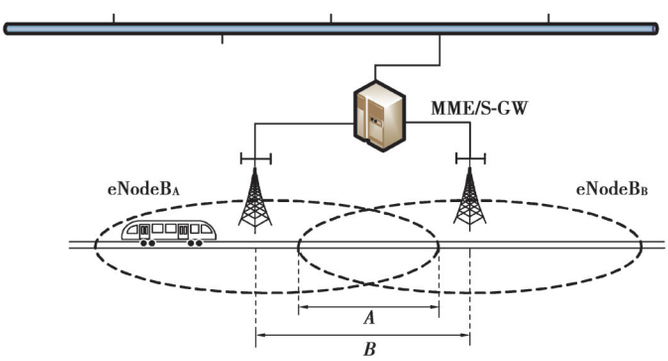

图1　两基站重叠区示意图

Fig. 1　Diagram of two base station overlap area

1.2　LTE-R的切换原理

在LTE系统中，以A3事件作为传统的切换判决条件。A3事件是指目标基站的信号强度在一段时间内持续高于源基站信号强度一个门限，即可触发切换。终端利用偏置值和迟滞值对测量的相对值进行调整，若满足触发条件，终端下发A3事件的测量报告。基站依据测量报告，进行决策，启动切换过程[11]。

参照3GPP协议36.331，简化的A3事件切换公式为

$$Mn > Ms + off + Hys, \tag{1}$$

其中：Mn为目标小区的RSRP值；Ms为服务小区的RSRP值；Off为偏置值；Hys为迟滞值。

A3事件的示意如图2所示。

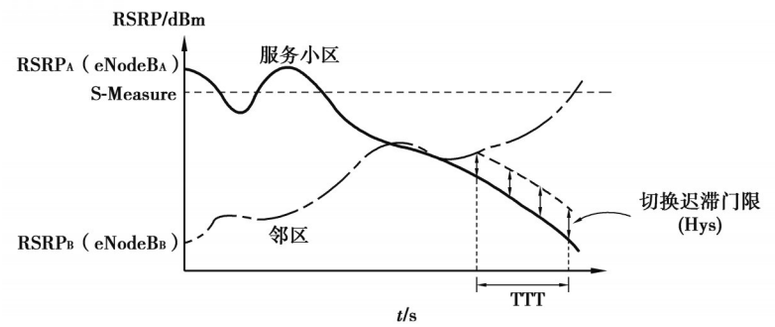

图2 A3事件示意图

Fig. 2 A3 event schematic

2 基于改进灰色-马尔可夫模型的切换算法

2.1 改进切换算法步骤

基于理论分析可知，RSRP值波动的幅度范围越小，乒乓切换发生的次数越少，系统性能越好[10]。笔者利用灰色模型对RSRP值进行预测处理并以预测值与实际值之间的差值作为预测误差，再利用马尔可夫过程对预测误差进行修正。可在减少RSRP波动同时，缩减其与实际值的误差。利用改进灰色-马尔可夫模型对$RSRP_A$和$RSRP_B$的预测，使其在满足预承载条件时，提前进行一部分信令交互，起到降低切换时延的作用。改进切换算法的步骤为：

Step1:列车驶入切换重叠区，UE接收源基站和目标基站的参考信号接收功率。

Step2:利用灰色模型对源基站和目标基站的参考信号接收功率进行预测。

Step3:通过马尔可夫过程对预测误差进行矫正，得到误差更小、更精确的预测值。

Step4:对预测结果进行加权平均处理，得到最终预测结果。

Step5:判断预测结果是否满足预承载条件。若满足，则进行预承载，提前进行信令交互，若不满足，则返回Step2。

Step6:判断是否满足切换条件，若满足，则进行切换，如果不满足，则返回Step2。

2.2 预承载算法

越区切换过程是通过UE、源eNodeB、目标eNodeB、MME和S-GW之间的信令交互完成的。预承载是一种通过提前判断切换条件，进行信令交互从而减少切换时延的切换方式。灰色-马尔可夫模型能够对RSRP进行预测，在其预测值满足条件后，源基站提前向目标基站发送含有目标小区标识、UE安全能力以及需要重建的演进的无线接入承载(evolved radio access bearer，E-RAB)信息的预承载指令，目标基站收到预承载请求后根据服务质量（quality of service，QoS）的需求，结合基站现有资源，准备接纳终端切入，并向源基站发送预承载请求反馈。该算法最高可节省约整个切换过程中44.17%、58.94%的切换时延[12]。

2.3 GM(1,1)灰色模型

灰色模型是一种对少量、不完全原始数据进行整理，得到事物蕴含内在规律，对发展趋势进行预估的预测模型[9]。灰色模型通过对系统内变量之间的关联性进行分析，减少数据随机性，显现规律性，生成具有较强规律的预测数据序列，通过建立微分模型，得到预测序列。

GM(1,1)灰色模型建立步骤为：

1）给定观测数据列，记录该时刻之前的N个$PSPR_A$值和$RSRP_B$值作为原始数列$x^{(0)}$

$$x^{(0)}=\left\{x^{(0)}(1),x^{(0)}(2),\cdots,x^{(0)}(N)\right\}。\tag{2}$$

2）通过累加生成的方式对原始数据进行预处理，得到$x^{(0)}$的一次累加数列$x^{(1)}$

$$x^{(1)}(k)=\sum_{i=1}^{k}x^{(0)}(i)\quad,k=1,\ 2,\ \cdots,\ N\ ,\tag{3}$$

$$x^{(1)}=(x^{(1)}(1),x^{(1)}(2),\cdots,x^{(1)}(N))\ 。\tag{4}$$

根据$x^{(1)}$建立GM(1,1)模型，设$x^{(1)}$满足一阶常微分方程

$$\frac{\mathrm{d}x^{(1)}}{\mathrm{d}t}+ax^{(1)}=u\ 。\tag{5}$$

通过等间隔取样，得到连续微分方程的解为

$$x^{(1)}(k+1)=\left[x^{(1)}(1)-\frac{u}{a}\right]\mathrm{e}^{-ak}+\frac{u}{a}\ 。\tag{6}$$

3）通过最小二乘法估计常数a与u。

一阶常微分方程可以变换为

$$x^{(0)}(k)=-ax^{(1)}(k)+u\quad,k=2,3,\cdots,N\ 。\tag{7}$$

为了对结果进行修正，将$x^{(1)}(k)$替换为$\frac{1}{2}\left[x^{(1)}(k)+x^{(1)}(k-1)\right]$，

故

$$\begin{bmatrix}x^{(0)}(2)\\x^{(0)}(3)\\\vdots\\x^{(0)}(N)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{1}{2}\left[x^{(1)}(2)+x^{(1)}(1)\right] & 1\\-\frac{1}{2}\left[x^{(1)}(3)+x^{(1)}(2)\right] & 1\\\vdots & 1\\-\frac{1}{2}\left[x^{(1)}(N)+x^{(1)}(N-1)\right] & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a\\u\end{bmatrix},\tag{8}$$

其矩阵形式为

$$y=\boldsymbol{BU}\ 。\tag{9}$$

4）通过最小二乘法对a与u进行估计

$$\hat{\boldsymbol{U}}=\begin{bmatrix}\hat{a}\\\hat{u}\end{bmatrix}=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}y\ ,\tag{10}$$

式中，$\hat{a}$，$\hat{u}$为a，u的估计值。

代入微分方程得到灰色模型预测的一次累加数列$\hat{x}^{(1)}(k)$为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1)=\left[x^{(1)}(1)-\frac{\hat{u}}{\hat{a}}\right]\mathrm{e}^{-\hat{a}k}+\frac{\hat{u}}{\hat{a}}\quad,k=1,2,\cdots,n-1\ ,\tag{11}$$

从而得到$\mathrm{PSPR_A}$值和$\mathrm{RSRP_B}$值的预测值$\hat{x}^{(0)}(k)$

$$\hat{x}^{(0)}(k+1)=\hat{x}^{(1)}(k+1)-\hat{x}^{(1)}(k)\quad,k=1,2,\cdots,n-1\ ,\tag{12}$$

在$k<N$时，求解结果为$\mathrm{PSPR_A}$和$\mathrm{RSRP_B}$的拟合值；在$k\geqslant N$时，求解结果为预测值。

2.4　马尔可夫过程误差修正

GM(1,1)灰色模型只是针对单调且呈指数变化的数据序列，对于摆动序列的预测效果较差。RSRP为摆动序列，若仅仅利用灰色模型进行预测，会导致预测结果与实际结果偏差较大。与灰色预测模型相比，马尔可夫理论更侧重于针对随机波动的动态过程研究，通过各个状态的转移概率对系统未来发展情况进行预测。

灰色-马尔可夫模型预测的基本思想：通过灰色模型体现原始数列内在规律并对其发展趋势进行预测，利用马尔可夫理论，根据预测值和实际值的残差划分状态区间，计算状态转移矩阵，对灰色预测值进行微观修正，使预测的精准度得到较大的提高。

其修正过程为：

1）计算预测值与实际值的残差

$$q(k)=x^{(0)}(k)-\hat{x}^{(0)}(k)\quad,k=1,2,\cdots,n\ ,\tag{13}$$

式中，$q(k)$为残差。

2)对状态进行划分

将原序列划分为 Y 个区域,每个区域表示一个状态区间。每个状态空间可以停留在本状态或向其它状态进行转移[13]。

将残差划分为 Y 个状态,每个状态区间可表示为

$$E_i=\left[e_{1i},e_{2i}\right],i=1,2,\cdots,Y\ ,\tag{14}$$

式中:状态区间的集合为 $E=(E_1,E_2,\cdots,E_Y)$,其中,e_{1i} 为状态区域 E_i 的上限,e_{2i} 为 E_i 的下限。

3)状态转移概率的计算

从一个状态转移到另一个状态的概率被称为状态转移概率。通过对原始数据进行统计分析,可得状态转移概率 $p_{ij}(m)$ 为

$$p_{ij}(m)=\frac{M_{ij}(m)}{M_i}\ ,\tag{15}$$

式中:$M_{ij}(m)$ 为状态 i 经 m 步转移到状态 j 的原始数据样本数;M_i 为系统处于状态 i 的原始数据样本数。

4)状态转移概率矩阵的计算

m 步转移概率矩阵通常由 Y 阶方阵 $P(m)$ 来表示,Y 为划分的状态数[14],即

$$\boldsymbol{P}(m)=\begin{bmatrix} p_{11}(m) & p_{12}(m) & \cdots & p_{1Y}(m) \\ p_{12}(m) & p_{22}(m) & \cdots & p_{2Y}(m) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{Y1}(m) & p_{Y2}(m) & \cdots & p_{YY}(m) \end{bmatrix},\tag{16}$$

利用状态转移概率矩阵,能够对下一步状态转移情况进行预测。

5)确定预测值

在预测对象处于 $Ey(y=1,2,\cdots,Y)$ 状态时,判断状态转移概率矩阵第 y 行中的概率最大值,若最大值为第 z 列的 P_{yz},则预测对象向 E_z 状态转移,在对下一步的状态转移进行预测时,同样利用第 z 行的概率最大值即可[15]。m 步状态转移概率为

$$P(m)=\left[\boldsymbol{P}(1)\right]^m\ 。\tag{17}$$

通过计算可以对下个状态及其区间进行预测,预测值可表示为该状态区间的中点值 $\hat{q}(k+1)$,

$$\hat{q}(k+1)=(e_{1i}+e_{2i})/2\ 。\tag{18}$$

根据状态转移概率对预测值进行计算,结果 $\hat{q}_0(k+1)$ 为

$$\hat{q}_0(k+1)=\hat{q}(k+1)\cdot p_{yz}\ 。\tag{19}$$

利用马尔可夫链对灰色模型产生的误差进行修正,预测结果 $\hat{x}_r^{(0)}(k+1)$ 为

$$\hat{x}_r^{(0)}(k+1)=\hat{x}^{(0)}(k+1)+\hat{q}_0(k+1)\ 。\tag{20}$$

取加权平均值作为预测结果

$$\begin{aligned}&\hat{x}_0^{(0)}(k+1)=a_1\cdot x^{(0)}(k-2)+a_2\cdot x^{(0)}(k-1)+a_3\cdot x^{(0)}(k)+a_4\cdot \hat{x}_r^{(0)}(k+1)+a_5\cdot \hat{x}_r^{(0)}(k+2),\\&k=1,\ 2,\ \cdots,\ n-1,\end{aligned}\tag{21}$$

式中,$a_1+a_2+a_3+a_4+a_5=1$。

对基于灰色-马尔可夫模型的预测值进行修正改进的最终结果 $\hat{x}_0^{(0)}(k+1)$ 为

$$\hat{x}_0^{(0)}(k+1)=b_1\cdot \hat{x}_0^{(0)}(k-1)+b_2\cdot \hat{x}_0^{(0)}(k)+b_3\cdot \hat{x}_0^{(0)}(k+1),k=1,2,\cdots,n-1\ ,\tag{22}$$

式中,$b_1+b_2+b_3=1$。

3 仿真与结果分析

3.1 仿真参数配置

列车在运行时接收到的源基站的信号强度 $R(A,x)$ 为

$$R(A,x)=Pt-PL(x)-\varepsilon(0,\sigma_m)\ ,\tag{23}$$

式中:ε 为大尺度衰落,它是由移动体运动过程中电波传播路径的随机变化引起的,主要包括建筑物和起伏地

形的阴影效应和大气折射状况的平缓变化，服从均值为0，方差为σ_m^2的高斯分布函数[16]；Pt为基站发射功率；$PL(x)$为采用Okumura-Hata模型下的传播损耗；x为基站到移动台的距离。

传播损耗$PL(x)$为

$$PL(x)=69.55+26.16\lg f-13.82\lg h_b+(44.9-6.55\lg h_b)(\lg x)-a(h_m), \tag{24}$$

式中：h_m为移动台高度；h_b为基站的高度；f为工作频率；$a(h_m)$为移动台高度修正因子。

仿真参数如表1所示

表1　仿真参数配置

Table 1　Simulation parameter configuration

参 数	参数配置
基站覆盖半径/m	1 300
基站间距离/m	2 000
基站发射功率/dBm	40
移动台高度/m	3
基站高度/m	35
基站发射频率/MHz	2 000
基站内额外干扰噪声/dBm	-102
信道模型	Okumura-Hata模型
t/ms	360

3.2　仿真结果及分析

图3为截取传统算法下的部分$RSRP_A$序列，通过灰色模型、灰色-马尔可夫模型进行处理后的序列，由图3可知，对于参考信号接收功率这种上下波动的序列，灰色-马尔可夫模型相比灰色模型的处理结果更平稳，接近真实值，起到更好的优化效果。

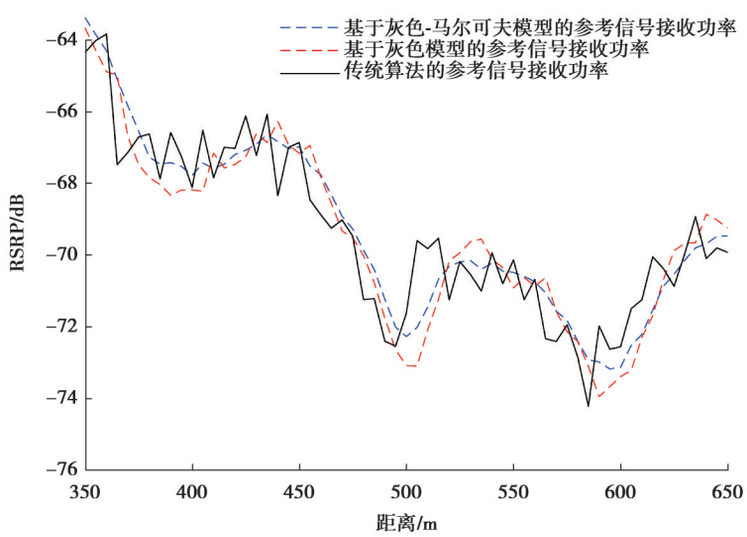

图3　处理结果对比分析

Fig. 3　Comparative analysis of treatment results

图4为采用改进灰色-马尔可夫模型和传统算法下的参考信号接收功率图。通过数学方法对基于灰色-马尔可夫模型的参考信号功率进行优化处理后，使信号接收功率更平滑。基于改进灰色-马尔可夫模型的$RSRP_A$和$RSRP_B$的相交次数和范围都明显小于传统切换算法，由此可知，改进灰色-马尔可夫模型能够减少波动和乒乓切换概率，提高切换成功率。

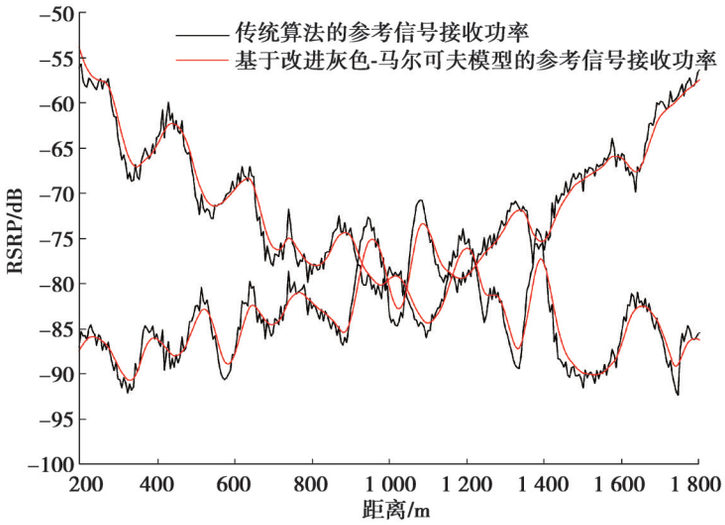

图 4 参考信号接收功率

Fig. 4 Reference signal receiving power

通过 Matlab 建立信道模型，分别对传统切换算法下的乒乓切换概率和基于改进灰色-马尔可夫模型下的乒乓切换概率进行仿真分析，如图 5 所示。结果表明，基于改进灰色-马尔可夫模型的乒乓切换概率远小于采用传统切换算法下的乒乓切换概率。在仿真过程中，分别对 2 种算法进行切换迟滞门限为 1、1.5、2、2.5、3 dB 的仿真统计，乒乓切换概率与切换迟滞门限呈正相关关系，改进切换算法乒乓切换概率相比于传统算法随切换迟滞门限增加的更为缓慢。

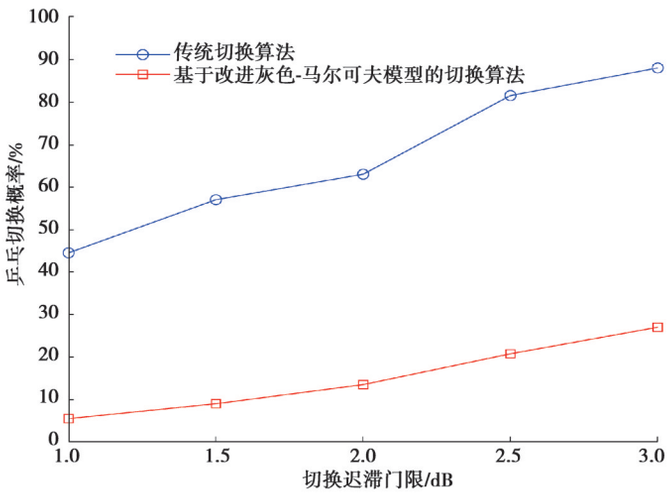

图 5 乒乓切换概率

Fig. 5 Ping-pong handover probability

中国铁路现行无线通信系统 QoS 技术要求越区切换率不小于 99.5%[17]，传统算法下越区切换成功率难以满足该需求，相比于传统和基于灰色模型的切换算法而言，基于改进灰色-马尔可夫模型切换算法的切换成功率得到了大幅度提高，满足该要求。

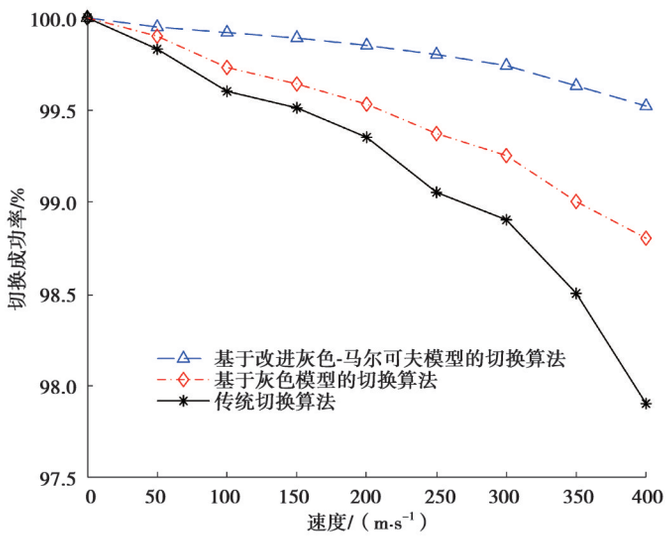

图 6　切换成功率

Fig. 6　Handover success rate

4　结　论

针对基于LTE-R的高速列车通信系统的越区切换问题进行优化，利用改进灰色–马尔可夫模型对RSRP进行处理，减少RSRP的波动，在进行切换判断时，减少受波动影响而发生乒乓切换的概率，能更好保证高速列车的无线通信质量，结合预承载方法对切换过程进一步优化，有效降低切换时延。对比现行方法，基于改进灰色–马尔可夫模型的切换算法能明显减少乒乓切换概率，提高切换成功率，使列车运行时的无线通信更加稳定。

参考文献

[1] 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.
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.(in Chinese)

[2] Li D H, Li D P, Xu Y Y. Machine learning based handover performance improvement for LTE-R[C]//2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics. IEEE, 2020: 1-2.

[3] 苏佳丽，伍忠东，丁龙斌，等．基于RBF神经网络的LTE-R切换算法优化[J]. 计算机工程，2019, 45(10): 110-115, 121.
Su J L, Wu Z D, Ding L B, et al. Optimization of LTE-R handover algorithm based on RBF neural network[J]. Computer Engineering, 2019, 45(10): 110-115, 121.(in Chinese)

[4] 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.

[5] Cai X Q, Wu C, Sheng J, et al. A parameter optimization method for LTE-R handover based on reinforcement learning[C]// 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). June 15-19, 2020, Limassol, Cyprus. IEEE, 2020: 1216-1221.

[6] Wang Q W, Ren G L, Tu J. A soft handover algorithm for TD-LTE system in high-speed railway scenario[C]//2011 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). September 14-16, 2011, Xi'an, China. IEEE, 2011: 1-4.

[7] 席皓哲，王瑞峰．基于天线分组的高铁大规模多输入多输出自适应波束赋形方案[J]. 计算机应用，2019, 39(3): 839-844.
Xi H Z, Wang R F. Adaptive beamforming scheme of massive MIMO based on antenna grouping in high-speed railway environment[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(3): 839-844.(in Chinese)

[8] Zhao J H, Liu Y Y, Wang C Y, et al. High-speed based adaptive beamforming handover scheme in LTE-R[J]. IET Communications, 2018, 12(10): 1215-1222.

[9] 温强, 李积英, 杨永红, 等 . 基于灰色预测的LTE-R越区切换算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(19): 63-71.
Wen Q, Li J Y, Yang Y H, et al. LTE-R handover algorithm based on grey prediction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(19): 63-71.(in Chinese)

[10] Hsieh P J, Lin W S, Lin K H, et al. Dual-connectivity prevenient handover scheme in control/user-plane split networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(4): 3545-3560.

[11] 孙宇彤 . LTE教程: 原理与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
Sun Y T. LTE Course: Principle and Implementation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.(in Chinese)

[12] 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)

[13] 滕云龙, 师奕兵, 郑植 . 接收机钟差灰色马尔可夫预测模型研究[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(2): 242-245.
Teng Y L, Shi Y B, Zheng Z. Research on grey Markov model for predicting receiver clock bias[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(2): 242-245.(in Chinese)

[14] 俞树荣, 韩竣羽, 李淑欣 . 利用灰色马尔可夫模型预测腐蚀管道寿命[J]. 机械强度, 2016, 38(4): 850-856.
Yu S R, Han J Y, Li S X. Predictive grey Markov chain model for pitting corrosion in piplines[J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 38(4): 850-856.(in Chinese)

[15] 马创, 袁野, 尤海生 . 基于灰色: 马尔可夫模型的农产品产量预测方法[J]. 计算机科学, 2020, 47(S1): 535-539.
Ma C, Yuan Y, You H S. Agricultural product output forecasting method based on grey-markov model[J]. Computer Science, 2020, 47(S1): 535-539.(in Chinese)

[16] 闻映红 . 电波传播理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
Wen Y H. Radio wave propagation theory[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.(in Chinese)

[17] 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.
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.(in Chinese)

（编辑　陈移峰）