

文章编号:1005-0523(2012)04-0073-08

基于随机Petri网的GSM-R越区切换成功率的形式化分析

张友兵,刘 岭,何祖涛

(北京全路通信号研究设计院有限公司运行控制研究设计院,北京 100073)

摘要:首先建立了基于随机Petri网的GSM-R越区切换模型,在模型中综合考虑了信道故障、信道占用和越区切换参数配置不合理等影响越区切换成功率的因素。其次,说明了随机Petri网与马尔可夫链的关系,以及使用马尔可夫链分析“GSM-R越区切换的随机Petri网模型”的方法。最后,利用SPNP工具分析了影响GSM-R越区切换成功率的因素,发现GSM-R小区预留信道越多,越区切换成功率越高;列车运行速度越高,越区切换成功率越低;在一定范围内,列车追踪间隔越大,越区切换成功率就越高。

关键词:随机Petri网;CTCS;GSM-R;越区切换;马尔可夫链

中图分类号:TP393;U283

文献标志码:A

当前,中国列车控制系统(Chinese train control system-3 level,CTCS-3级)在我国高速铁路中得到广泛使用。在CTCS-3级列控系统中,无线闭塞中心(RBC)和列控车载设备通过GSM-R网络实时传递控制信息,确保列车安全、高效地运行^[1]。在铁路全球移动通信系统(GSM for railways,GSM-R)中,小区呈线状覆盖,且半径比较小,列车在线路上高速运行,就会频繁发生越区切换。在列车执行GSM-R越区切换过程中,如果发生信道故障、信道占用、越区切换参数配置不合理等事件时,将造成越区切换失败,影响列车行车效率,甚至影响列车的行车安全。

利用随机Petri建立GSM-R越区切换模型,介绍了马尔可夫链(Markov chain,MC)与随机Petri模型的关系,给出了使用马尔可夫链分析只有一个信道情况下的GSM-R越区切换模型的方法和步骤,并使用随机Petri网工具包(the stochastic petri net package,SPNP)研究了多个信道情况下GSM-R小区预留信道个数、列车运行速度、列车追踪间隔对列车执行GSM-R越区切换成功率的影响。也研究了列车运行速度对越区切换成功率的影响,证实了文献[2]中相关研究内容的正确性。

1 GSM-R越区切换过程

在GSM-R系统中,小区半径相对较小,列车在铁路线路上高速运行,一次呼叫会经历多次切换。GSM-R的整个切换过程由移动台(MS)、基站(BTS)、基站控制器(BSC)和移动业务交换中心(MSC)共同协调完成。MS负责测量无线子系统下行链路性能和周围小区的信号强度;BTS负责监视每个被服务MS的上下行接收电平,并监测空闲话务信道的干扰电平;BSC负责对上报的测试报告进行处理,做出切换判决;MSC负责参与BSC间切换的目标小区的确定。在呼叫期间,BTS定时对MS的信号进行测量和评估,当检测到异常情况时,BTS立即向MSC或BSC发出告警信号,MSC或BSC会寻找一个新小区或新信道,并在找到后发出一个切换,否则通信会在原来的信道上继续进行。同时,尝试切换的过程周期性地重复进行。如果完成切换,原来的信道就被释放^[3]。

越区切换的过程可分为测量、触发、选择和执行4个阶段。测量是指BTS和MS测量上下行信号质量;

收稿日期:2012-06-10

基金项目:科学技术部国家科技支撑计划项目(2009BAG12A08)

作者简介:张友兵(1982—),男,助理工程师,硕士,研究方向为车载ATP模拟仿真及自动测试。

触发是指 BSC 或者 MSC 将测量结果与门限值比较,判断 MS 是否需要切换;选择是网络侧从切换相邻小区列表中选择一个最佳小区作为切换目标小区或者选择指定的小区作为目标小区;执行是指在目标小区上分配、激活一个新信道,并且命令 MS 切换到新信道上进行服务^[4]。

GSM-R 越区切换的 3 种类型如图 1 所示,包括① BSC 内部切换:越区切换由一个 BTS 切换到另外一个 BTS,但是在切换时受同一个 BSC 控制,例如,列车 1 从小区 1 切换到小区 2。② BSC 之间切换:越区切换由一个 BTS 切换到另一个 BTS,但是在切换时不受同一个 BSC 控制,受同一个 MSC 控制,例如,列车 2 从小区 2 切换到小区 3。③ MSC 之间切换:切换前和切换后小区在不同的 MSC 控制范围内,列车切换前后受不同 MSC 控制,例如,列车 3 从小区 4 切换到小区 5。

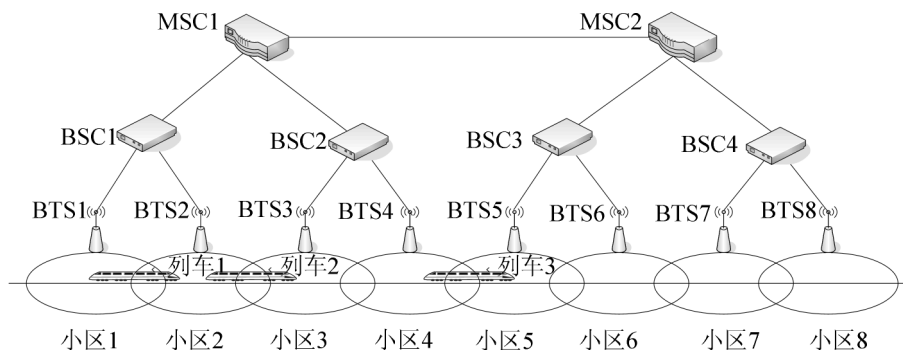


图 1 GSM-R 越区切换类型
Fig.1 GSM-R handover types

2 随机 Petri 网与马尔可夫过程

在连续时间随机 Petri 网中,变迁从可实施到实施需要延时,一般认为变迁实施延时服从某一种类型的分布函数。连续时间随机 Petri 网中,变迁实施延时服从指数分布函数

$$\forall t \in T: F_t = 1 - e^{-\lambda_t x} \quad (1)$$

式中:参数 $\lambda_t > 0$ 是变迁 t 的平均实施速率,变量 $x > 0$ 。

连续时间随机 Petri 网定义为 $N_{\text{SPN}} = (S, T; F, W, M_0, \lambda)$, 其中 $(S, T; F, W, M_0)$ 是一个基本 Petri 网系统, S 为网的库所集; T 为网的变迁集; F 为网的流关系; W 为网的权函数; M_0 为初始标识; $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ 是变迁平均实施速率集合^[5-6]。已经证明,一个随机 Petri 网系统同构于一个连续时间马尔可夫链,将 N_{SPN} 的每个标识映射成连续时间马尔可夫链的一个状态,即可获得与 N_{SPN} 可达图同构的连续时间马尔可夫链^[7-8]。

利用随机 Petri 网对系统模型进行性能分析分为 3 步^[9-11]:① 建立系统的随机 Petri 网模型;② 构造与系统随机 Petri 网模型同构的马尔可夫链;③ 基于马尔可夫链的稳定状态概率对系统进行性能分析。

3 基于随机 Petri 网的 GSM-R 越区切换模型

3.1 影响 GSM-R 越区切换的因素

在高速铁路环境下,列车频繁发生越区切换。列车以 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度高速运行,基站间距取平均值 7 km,则平均每小时列车执行 50 次 GSM-R 越区切换。越区切换发生如此频繁,增大了由于网络覆盖、越区切换参数设置、同频干扰以及系统传输等原因引起越区切换失效的风险。在网络设备和移动终端设备均无故障的前提下,影响越区切换的因素有 3 个,分别是:目标基站无切换信道,信道质量下降,越区切换参数设置不合理。在越区切换过程中,如果发生前所述 3 种情况,有可能导致 GSM-R 越区切换过程失败。

3.2 使用随机 Petri 网建立 GSM-R 越区切换模型

综合考虑信道故障,信道占用,及越区切换参数配置不合理 3 个因素,基于随机 Petri 网理论建立

GSM-R越区切换模型,如图2所示。在GSM-R越区切换模型中,各位置的含义如表1所示,各变迁的含义、激发速率和哨函数如表2所示。

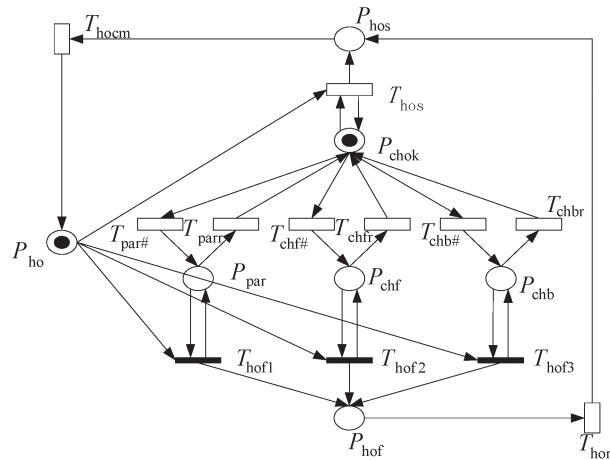


图2 基于随机Petri网的GSM-R越区切换模型
Fig.2 GSM-R handover model based on the stochastic Petri net

表1 图2所示模型中各位置说明

Tab.1 Position indication of the model in Fig. 2

位置	含义
P_{ho}	GSM-R越区切换就绪状态
P_{chok}	信道状态良好状态
P_{par}	越区切换参数配置不合理状态
P_{chf}	信道故障状态
P_{chb}	信道占用状态
P_{hos}	GSM-R越区切换成功状态
P_{hof}	GSM-R越区切换失败状态

表2 图2所示模型中各变迁说明

Tab.2 Transition indication of the model in Fig. 2

变迁	含义	激发速率	哨函数
T_{par}	越区切换参数配置不合理	λ_{par}	
T_{parr}	越区切换参数配置合理	μ_{parr}	
T_{chf}	信道故障	λ_{chf}	
T_{chfr}	信道恢复	μ_{chfr}	
T_{chb}	信道占用	λ_{chb}	
T_{chbr}	信道释放	μ_{chbr}	
T_{hos}	越区切换成功	λ_{hos}	
T_{hof1}	由于参数配置不合理造成的越区切换失败		$mark("P_{chok}")=0$
T_{hof2}	由于信道故障造成的越区切换失败		$mark("P_{chok}")=0$
T_{hof3}	由于信道占用造成的越区切换失败		$mark("P_{chok}")=0$
T_{hocm}	越区切换发生	λ_{hocm}	
T_{hor}	越区切换失败后恢复成功	λ_{hor}	

由位置 P_{chok} 、 P_{par} 、 P_{chf} 、 P_{chb} 和变迁 T_{par} 、 T_{parr} 、 T_{chf} 、 T_{chfr} 、 T_{chb} 、 T_{chbr} 组成 GSM-R 通信信道状态子网。其中,位置 P_{chok} 表示信道状态良好状态,位置 P_{par} 表示越区切换参数配置不合理状态,位置 P_{chf} 表示信道故障状态,位置 P_{chb} 表示信道占用状态,变迁 T_{par} 表示越区切换参数配置不合理,变迁 T_{parr} 表示越区切换参数配置合理,变迁 T_{chf} 表示信道故障,变迁 T_{chfr} 表示信道恢复,变迁 T_{chb} 表示信道占用,变迁 T_{chbr} 表示信道释放。 T_{par} 、 T_{chf} 、 T_{chb} 是标识相关的变迁,其发生速率正比于位置 P_{chok} 中的标记数量,图中用#表示。当 GSM-R 通信信道良好时,标记位于位置 P_{chok} 中。在列车执行 GSM-R 越区切换过程中,如果信道故障,则变迁 T_{chf} 被激活,位置 P_{chok} 中的标记将转移到位置 P_{chf} 中,即 GSM-R 信道处于信道故障状态。如果信道故障恢复,则变迁 T_{chfr} 被激活,位置 P_{chf} 中的标记将重新回到位置 P_{chok} 中,表示 GSM-R 通信信道良好。同理,在列车执行 GSM-R 越区切换过程中,如果参数配置不合理,则变迁 T_{par} 被激活,位置 P_{chok} 中的标记将转移到位置 P_{par} 中,即由于参数配置不合理 GSM-R 信道处于不可用状态;如果参数配置合理,则变

迁 T_{parr} 被激活,位置 P_{par} 中的标记将重新回到位置 P_{chok} 中。在列车执行 GSM-R 越区切换过程中,如果信道被其它服务占用,则变迁 T_{chb} 被激活,位置 P_{chok} 中的标记将转移到位置 P_{chb} 中,即 GSM-R 信道处于被占用状态;如果信道被释放,则变迁 T_{chbr} 被激活,位置 P_{chb} 中的标记将重新回到位置 P_{chok} 中。

在列车运行过程中,列车进入相邻 GSM-R 小区重叠区时,开始执行 GSM-R 越区切换,即位置 P_{ho} (GSM-R 越区切换就绪状态)存在标记。此时,如果信道状态良好,即位置 P_{chok} 存在标记,则位置 P_{ho} 和 P_{chok} 将共同激活变迁 T_{hos} (越区切换成功),向位置 P_{hos} (GSM-R 越区切换成功状态)添加一个标记,表示列车执行 GSM-R 越区切换成功,同时向位置 P_{chok} 添加一个标记,表示列车释放已离去的 GSM-R 小区的被占用信道。列车在新的 GSM-R 小区中运行一段时间,将执行新的越区切换,即变迁 T_{hoem} (越区切换发生)被激活,向位置 P_{ho} 中添加一个标记,表示新的越区切换过程准备就绪。

如果在列车执行 GSM-R 越区切换过程中,发生信道故障事件,则位置 P_{chf} 存在标记,那么位置 P_{ho} 和位置 P_{chf} 一起激活变迁 T_{chf} ,向位置 P_{hof} (GSM-R 越区切换失败状态)添加一个标记,表示列车执行 GSM-R 越区切换失败,同时向位置 P_{chf} 添加一个标记,表示列车释放已离去的 GSM-R 小区的被占用信道。此后,列车重选小区,建立呼叫,执行越区切换,即变迁 T_{hor} (越区切换失败后恢复成功)被激活,向位置 P_{hos} 中添加一个标记。由于信道占用、越区切换参数配置不合理造成越区切换失败原理同上。

在模型中,存在 T_{hof1} 、 T_{hof2} 、 T_{hof3} 三个立即变迁。其中,变迁 T_{hof1} 表示由于参数配置不合理造成的越区切换失败,变迁 T_{hof2} 表示由于信道故障造成的越区切换失败,变迁 T_{hof3} 表示由于信道占用造成的越区切换失败。当位置 P_{ho} 和 P_{chf} 都存在标记,则立即变迁 T_{hof2} 被激活,向位置 P_{hof} 添加一个标记,其含义是在列车执行 GSM-R 越区切换的时候,信道故障,则越区切换失败。立即变迁 T_{hof2} 存在稍函数 $\text{mark}("P_{\text{chok}}")=0$, mark 为 SPNP 工具所提供的函数,用于计算一个位置包含标记的概率。即只有当位置 P_{chok} 中没有标记时,立即变迁 T_{hof2} 才能被激活,其作用是当 GSM-R 小区预留多个信道时,在列车执行 GSM-R 越区切换时,如果存在信道故障情况,且没有好的信道可用,则越区切换失败。

3.3 利用马尔可夫过程分析 GSM-R 越区切换模型

由 GSM-R 越区切换模型可得与其同构的马尔可夫链,如图3所示。同构马尔可夫链中包含9个状态,分别是 $M_0, M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7$ 和 M_8 。图3中各标识的含义如表3所示。

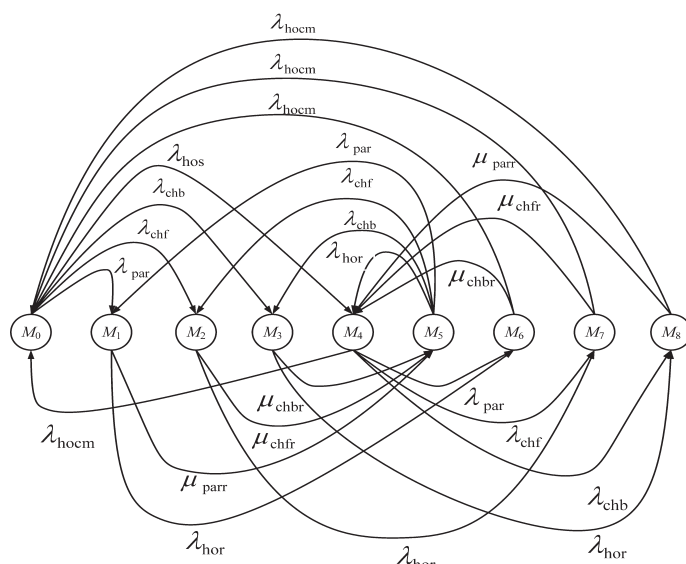


图3 GSM-R 越区切换模型的马尔可夫链
Fig.3 Markov chain of GSM-R handover model

表3 图3中各标识的含义

Tab.3 Meanings of the marks in Fig.3

状态	P_{ho}	P_{chok}	P_{par}	P_{chf}	P_{chb}	P_{hos}	P_{hof}
M_0	1	1	0	0	0	0	0
M_1	0	0	1	0	0	0	1
M_2	0	0	0	1	0	0	1
M_3	0	0	0	0	1	0	1
M_4	0	1	0	0	0	1	0
M_5	0	1	0	0	0	0	1
M_6	0	0	1	0	0	1	0
M_7	0	0	0	1	0	1	0
M_8	0	0	0	0	1	1	0

GSM-R越区切换SPN模型同构马尔可夫链的 Q 矩阵如式(2)所示。 Q 为转移矩阵, q_{ij} 为 Q 矩阵非对角线上的元素, q_{ii} 为 Q 矩阵对角线上的元素。当从状态 M_i 到状态 M_j 有弧相连时,则 q_{ij} 等于弧上所标注速率。当从状态 M_i 到状态 M_j 没有弧相连时,则 q_{ij} 等于0。 q_{ii} 等于从状态 M_i 输出的各条弧上标注速率之和的负值。

$$Q = \begin{bmatrix} a_0 & \lambda_{par} & \lambda_{chf} & \lambda_{chb} & \lambda_{hos} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 & \mu_{parr} & \lambda_{hor} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_2 & 0 & 0 & \mu_{chfr} & 0 & \lambda_{hor} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & \mu_{chbr} & 0 & 0 & \lambda_{hor} \\ \lambda_{hocm} & 0 & 0 & 0 & a_4 & 0 & \lambda_{par} & \lambda_{chf} & \lambda_{chb} \\ 0 & \lambda_{par} & \lambda_{chf} & \lambda_{chb} & \lambda_{hor} & a_5 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{hocm} & 0 & 0 & 0 & \mu_{parr} & 0 & a_6 & 0 & 0 \\ \lambda_{hocm} & 0 & 0 & 0 & \mu_{chfr} & 0 & 0 & a_7 & 0 \\ \lambda_{hocm} & 0 & 0 & 0 & \mu_{chbr} & 0 & 0 & 0 & a_8 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $a_0 = -(\lambda_{par} + \lambda_{chf} + \lambda_{chb} + \lambda_{hos})$,同理可以得出 a_1 到 a_8 的计算公式。

令马尔可夫链的稳态概率为向量 $X = (x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8)$,根据马尔可夫过程可以得到线性方程

$$\begin{cases} XQ = 0 \\ \sum x_i = 1 \end{cases}, 0 \leq i \leq 8 \quad (3)$$

根据式(3)可得式(4):

$$\begin{cases} a_0 x_0 + \lambda_{par} x_1 + \lambda_{chf} x_2 + \lambda_{chb} x_3 + \lambda_{hos} x_4 = 0 \\ a_1 x_1 + \mu_{parr} x_5 + \lambda_{hos} x_6 = 0 \\ a_2 x_2 + \mu_{chfr} x_5 + \lambda_{hos} x_7 = 0 \\ a_3 x_3 + \mu_{chbr} x_5 + \lambda_{hos} x_8 = 0 \\ \lambda_{hocm} x_0 + a_4 x_4 + \lambda_{par} x_6 + \lambda_{chf} x_7 + \lambda_{chb} x_8 = 0 \\ \lambda_{par} x_1 + \lambda_{chf} x_2 + \lambda_{chb} x_3 + \lambda_{hos} x_4 + a_5 x_5 = 0 \\ \lambda_{hocm} x_0 + \mu_{parr} x_4 + a_6 x_6 = 0 \\ \lambda_{hocm} x_0 + \mu_{chfr} x_4 + a_7 x_7 = 0 \\ \lambda_{hocm} x_0 + \mu_{chbr} x_4 + a_8 x_8 = 0 \\ x_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

解线性方程组(4),即可得到每个可达标识的稳定概率 $p[M_i] = x_i (0 \leq i \leq 8)$ 。

在得到GSM-R越区切换模型各个可达标识的稳定概率之后,利用稳态概率可进一步计算出以下性能指标:在每个状态中的驻留时间、在每个状态的等待时间、标记概率密度函数、在位置中的平均标记数、变迁利用率和变迁标记流速。

在随机Petri模型状态空间比较小的时候,使用上述方法可以人工计算出每个可达标识的稳定概率。但是当状态空间逐渐增大的时候,使用上述方法去人工计算每个可达标识的稳定概率就越来越困难。例如,在“基于随机Petri网的GSM-R越区切换模型”中,当位置 P_{chok} 含有1个标记时,可达标识为9个,连接可达标识之间的变迁为24个,其马尔可夫链如图3所示。当位置 P_{chok} 含有2个标记时,可达标识为24个,连接可达标识之间的变迁为87个。当位置 P_{chok} 含有3个标记时,可达标识为50个,连接可达标识之间的变迁为212个。可以看出,只改变位置 P_{chok} 中的标记数,状态空间规模将非线性增长,导致计算量剧增。因此,需要寻找新的方法去分析随机Petri网模型。

3.4 利用SPNP工具分析GSM-R越区切换模型

通过SPNP工具可以计算出模型中每个位置包含标记的概率,假设位置 P_{hos} 包含标记的概率为 $\text{mark}("P_{\text{hos}}")$,位置 P_{hof} 包含标记的概率为 $\text{mark}("P_{\text{hof}}")$,则可以计算出列车执行越区切换的成功率 p_{hosucc} 为

$$p_{\text{hosucc}} = \frac{\text{mark}("P_{\text{hos}}")}{\text{mark}("P_{\text{hos}}") + \text{mark}("P_{\text{hof}}")} \quad (6)$$

4 模型分析

4.1 GSM-R小区预留信道数量

在《CTCS-3级列控系统GSM-R网络需求规范》中规定连接丢失概率 $\leq 10^{-2} \text{ h}^{-1}$,可得信道故障速率为 $0.000\ 002\ 78 \text{ s}^{-1}$ 。GSM-R网络覆盖为线状覆盖方式,则越区切换发生速率为 $v \cdot d^{-1}$,其中, v 为列车运行速度, d 为基站间隔距离。如果列车以 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度高速运行,基站间距为7 km,则越区切换发生速率为 $0.011\ 905 \text{ s}^{-1}$ 。UIC-SUBSET-052中规定越区切换的中断时间不超过300 ms,得到越区切换成功速率 3.3 s^{-1} 。在GSM-R越区切换过程中,如果发生异常情况,移动台没有成功接入目标小区,并且未能及时返回原小区,T3103定时器超时,信道被释放,发生掉话,造成GSM-R越区切换失败。车地通信中断时间为:T3103定时器设置值+小区重选时间+呼叫建立时间。其中,T3103定时器一般设置为5 s,小区重选的最大时间为5 s,呼叫建立的最大时间为10 s,所以车地通信中断最大时间为 $20 \text{ s}^{[12]}$ 。因此,认为越区切换失败恢复成功速率为 0.05 s^{-1} 。

列车以 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度高速运行,如果基站间距为7 km,则列车在一个GSM-R小区中运行84 s,即信道释放速率为 $0.011\ 905 \text{ s}^{-1}$ 。如果列车追踪运行间隔为15 km,则信道占用速率为 $0.005\ 556 \text{ s}^{-1}$ 。表4列出了列车以 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度运行时,GSM-R越区切换模型中各个参数的取值。GSM-R小区设计时预留传输安全数据的信道数量不同,越区切换成功率也就有所不同。在GSM-R越区切换模型中,改变位置 P_{chok} 中的标记个数,可以模拟GSM-R小区预留不同个数的信道。通过SPNP软件运行“基于随机Petri网的GSM-R越区切换模型”,得出GSM-R小区信道个数不同时,越区切换的成功概率,如表5所示。从表5可以看出,GSM-R小区预留的信道个数

表4 GSM-R越区切换模型各参数取值

Tab.4 The parameters of the GSM-R handover model

参数	激发速率/ s^{-1}
λ_{par}	0.000 278
μ_{parr}	0.2
λ_{chf}	0.000 002 78
μ_{chfr}	0.001 667
λ_{chb}	0.005 556
μ_{chbr}	0.011 905
λ_{hos}	3.3
λ_{hor}	0.05
λ_{hocm}	0.011 905

表5 GSM-R小区预留信道个数对越区切换成功率的影响

Tab.5 Effects of GSM-R cell channel number on handover

success rate	
GSM-R小区 预留信道个数	越区切换成功率/%
1	93.59
2	97.38
3	98.84
4	99.48
5	99.76
6	99.89
7	99.95
8	99.97
9	99.98
10	99.99

越多,列车执行GSM-R越区切换的成功率就越高,并且成功率随着信道个数的增加而非线性增加。从表5还可以看出,如果基站间距为7 km,列车追踪运行间隔为15 km,列车以300 km·h⁻¹的速度高速运行,要求列车执行GSM-R越区切换成功率达到99.5%,则每个GSM-R小区至少应该预留4个传输安全数据的信道。

4.2 列车运行速度

假设基站间距为7 km,列车追踪运行间隔为15 km。由于越区切换发生速率和信道释放速率是列车运行速度与基站间距的比值,信道占用速率是列车运行速度与列车追踪运行间隔的比值,所以在利用“基于随机Petri网的GSM-R越区切换模型”分析列车运行速度对越区切换成功率的影响时,在不同的列车运行速度情况下,需要修改模型中越区切换发生速率 λ_{hoem} 、信道占用速率 λ_{chb} 、信道释放速率 μ_{chbr} 3个参数值。

在“GSM-R越区切换的随机Petri网模型”中,假设GSM-R小区设计时预留4个传输安全数据的信道,即位置 P_{chok} 中含有4个标记。利用SPNP软件分析“GSM-R越区切换的随机Petri网模型”,得到不同列车运行速度情况下越区切换的成功率,如表6所示。由表可见,列车运行速度越高,列车执行GSM-R越区切换的成功率就越低,并且越区切换成功率随着列车运行速度的增高而线性降低。

表6 列车运行速度对越区切换成功率的影响
Tab.6 Effects of train running speed on handover success rate

列车运行速度/km·h ⁻¹	越区切换 发生速率/次·s ⁻¹	信道占用 速率/次·s ⁻¹	信道释放速 率/次·s ⁻¹	越区切换 成功率/%
50	0.001 984	0.000 926	0.001 984	99.90
100	0.003 968	0.001 852	0.003 968	99.81
150	0.005 952	0.002 778	0.005 952	99.72
200	0.007 937	0.003 704	0.007 937	99.63
250	0.009 921	0.004 630	0.009 921	99.55
300	0.011 905	0.005 556	0.011 905	99.48
350	0.013 889	0.006 481	0.013 889	99.40

4.3 列车追踪间隔

假设基站间距为7 km,改变列车追踪间隔,研究在不同列车追踪间隔情况下,列车执行GSM-R越区切换成功率。信道占用速率是列车运行速度与列车追踪运行间隔的比值,所以在利用“基于随机Petri网的GSM-R越区切换模型”分析列车追踪间隔对越区切换成功率的影响时,需要修改模型中信道占用速率 λ_{chb} 。

在“基于随机Petri网的GSM-R越区切换模型”中,假设GSM-R小区设计时预留4个传输安全数据的信道,即位置 P_{chok} 中含有4个标记。利用SPNP软件分析“基于随机Petri网的GSM-R越区切换模型”,得到不同追踪间隔情况下越区切换的成功率,如表7所示。

表7 列车追踪间隔对越区切换成功率的影响
Tab.7 Effects of train track interval on handover success rate

列车追踪间隔/km	信道占用速率/次·s ⁻¹	越区切换成功率/%
10	0.008 333	98.26
11	0.007 576	98.66
12	0.006 944	98.96
13	0.006 410	99.18
14	0.005 952	99.35
15	0.005 556	99.48
16	0.005 208	99.58

从表7可以看出,列车追踪间隔越大,列车执行GSM-R越区切换的成功率就越高。需要说明的是,当列车追踪间隔大到一定程度,使得前后列车不存在同时使用相同GSM-R小区信道的情况时,也就不再用

考虑信道占用速率和信道释放速率对越区切换成功率的影响,所在再继续提高列车追踪间隔,对提高越区切换成功率将不再有帮助。

5 结束语

使用SPNP工具对模型进行分析,得出以下结论:

1) GSM-R小区预留的信道个数越多,列车执行GSM-R越区切换的成功率就越高,并且成功率随着信道个数的增加而非线性增加。如果基站间距为7 km,列车追踪运行间隔为15 km,列车以 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度高速运行,要求列车执行GSM-R越区切换成功率达到99.5%,每个GSM-R小区至少应该预留4个传输安全数据的信道。

2) 列车运行速度越高,列车执行GSM-R越区切换的成功率就越低,并且越区切换成功率随着列车运行速度的增高而线性减低。

3) 在一定范围内,列车追踪间隔越大,越区切换成功率就越高。超过范围之后,扩大列车追踪间隔,对提高越区切换成功率将没有帮助。

参考文献:

- [1] 张曙光. CTCS-3级列控系统技术创新总体方案[M]. 北京:中国铁道出版社,2009:7-8.
- [2] 曹源,牛儒,唐涛,等. 基于SPN的越区切换模型分析[J]. 铁道学报,2009,31(4):104-107.
- [3] 任静. GSM-R网络中越区切换失效和优化的研究[D]. 北京:北京交通大学,2007:6-15.
- [4] 张文. GSM-R网络越区切换算法的分析与优化[D]. 杭州:浙江大学,2011:14-20.
- [5] 何鹏,李文锋. 基于随机Petri网的物流配送流程建模与分析[J]. 武汉理工大学学报,2010,32(3):434-452.
- [6] 李培松,刘觉夫,周娟. 基于随机高级Petri网改进型网格资源调度算法[J]. 华东交通大学学报,2008,25(1):85-88.
- [7] 石乐义,贾春福,吕述望. 服务跳变系统性能的随机Petri网评价[J]. 南开大学学报,2009,42(1):72-75.
- [8] 梁楠,王海峰. 基于SPN的CTCS-3级列控系统RBC实时性能分析[J]. 铁道学报,2011,33(2):67-71.
- [9] 林闯. 随机Petri网和系统性能评价[M]. 北京:清华大学出版社,1999:23-28.
- [10] 傅小华,郭宋平. 基于随机Petri网的FMS建模及其性能分析[J]. 武汉理工大学学报,2007,29(4):81-83.
- [11] 胡松筠,陈燕,李晔,等. 基于随机时间Petri网的第三方物流业务流程建模与分析[J]. 大连海事大学学报,2005,31(4):53-59.
- [12] 庞萌萌. 高速铁路GSM-R网络越区切换对CTCS-3系统的影响及模型研究[D]. 北京:北京交通大学,2010:36-40.

Formal Analysis of GSM-R Handover Success Rate Based on the Stochastic Petri Net

Zhang Youbing, Liu Ling, He Zutao

(Beijing National Railway Research & Design Institute of Signal & Communication Co., Ltd. Research and Design Institute of Operation Control, Beijing 100073, China)

Abstract: Firstly, GSM-R handover model is established based on the Stochastic Petri Net (SPN). The factors which affect the handover success rate are considered in the model, such as channel fault, channel occupancy and unreasonable handover parameters. Secondly, this paper illustrates the relationship between the Stochastic Petri Net and Markov Chain (MC), discussing the method of Markov Chain in analyzing the GSM-R handover model. Finally, the factors which affect the GSM-R handover success rate are analyzed with the SPNP tool. The result shows that the more GSM-R cell reserved channels are, the higher the handover success rate is. The result also shows that the higher the train speed is, the lower the handover success rate is. Within a certain range, the greater the train track interval is, the higher the handover success rate is.

Key words: Stochastic Petri Net; Chinese Train Control System; GSM-R; handover; Markov Chain