

基于马尔科夫过程的异构网络性能分析与优化

施政 朱琦*

(南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 教育部宽带无线通信与传感网技术重点实验室 南京 210003)

摘要: 该文给出了一种基于马尔科夫过程的异构网络性能优化方法。该方法将用户的移动性作为影响系统性能的一个重要因素, 通过切换率来反映用户的移动性, 并采用马尔科夫过程来分析异构网络的系统性能, 得到异构网络系统的总吞吐量表达式。考虑到在两个网络的重叠区域用户需要选择接入的网络, 将在重叠区域选择其中一个网络的业务到达率占该区域总的业务到达率的比例作为一个优化因子, 通过选择合适的因子来最大化系统的吞吐量, 最后通过黄金分割法来求解该优化问题。仿真结果表明, 该算法能够有效提高异构网络系统的吞吐量, 改善异构网络中无线资源的利用率。

关键词: 异构网络; 协同无线资源管理; 切换率分析; 马尔科夫过程; 黄金分割法

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)09-2224-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00251

Performance Analysis and Optimization Based on Markov Process for Heterogeneous Wireless Networks

Shi Zheng Zhu Qi

(*Jiangsu Province Key Lab of Wireless Communications, Key Lab on Wideband Wireless Communications and Sensor Network Technology of Ministry of Education, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China*)

Abstract: A method of performance optimization is proposed based on Markov process in Heterogeneous Wireless Networks (HWNs) consisting of diverse wireless networks. The method takes users' mobility as an important factor affecting system performance, and users' mobility is embodied by handoff rate. Then the system performance of HWNs based on Markov process is analyzed, and the expression of total throughput is obtained for the performance analysis of HWNs. Considering that the users in the overlapping region of two wireless networks need to select one of them to access, the proportion of service arrival rate accessing to one of the networks to the total service arrival rate in the overlapping region is regarded as an optimized factor for performance analysis. The throughput of the HWNs' system is maximized by choosing appropriate factor. Finally, the optimization issue is worked out based on golden section method. The simulation results show that the optimization algorithm can effectively enhance the throughput of HWNs, and improve the resources' utilization of wireless networks.

Key words: Heterogeneous networks; Common Radio Resource Management (CRRM); Handoff rate analysis; Markov process; Golden section method

1 引言

异构无线网络的融合成为一个研究热点, 这些网络在覆盖范围、适应的业务类型、数据的传输速率以及对用户移动特性的支持等方面都存在很大差异。通过这些差异来为用户选择合适的网络, 即无线资源管理, 其目标是为用户提供满意的服务质量, 并提高异构网络中无线资源的利用率, 成为异构网

络融合的关键问题。

3GPP 在其规范^[1]中提出了协同无线资源管理 (CRRM) 的概念, 在文献[2]中介绍了 CRRM 的模型。文献[3]中提出了基于层次分析法和灰度分析法的切换决策机制, 文献[4]中提出了基于模糊逼近理想解排序法的网络选择算法。在文献[5]中, 提出了一种基于业务以及用户移动性的接入和切换网络选择算法。在文献[6]中, 提出了一种基于负载均衡的网络选择算法。在文献[7]中, 提出了一种考虑多媒体应用层 QoS 的最优分布式网络选择方案。在文献[8]中, 提出了一种基于博弈理论的定价策略和网络选择方法。然而上述文献中大部分只考虑了用户的

2012-03-13 收到, 2012-05-29 改回

国家 973 计划项目(2007CB310607), 国家自然科学基金(61171094), 国家科技重大专项(2011ZX03001-006-02, 2011ZX03005-004-03)和江苏省自然科学基金重点研究专项(BK2011027)资助课题

*通信作者: 朱琦 zhuqi@njupt.edu.cn

QoS, 没有考虑异构网络无线资源的利用率以及用户的移动性。

针对上述不足, 本文提出了一种基于马尔科夫过程的异构网络性能优化方法。利用马尔科夫过程来分析异构网络的性能, 得到每个网络的马尔科夫链的状态转移率以及马尔科夫链的稳态分布。由稳态分布推导获得异构网络系统中总的吞吐量, 即优化的目标函数。在吞吐量表达式中有一个优化因子, 该优化因子是 UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) 网络在重叠区域的业务到达率占该区域总的业务到达率的比例, 通过选择合适的因子来最大化系统的吞吐量。考虑到优化的目标函数是 1 维的, 因此这里采用黄金分割法来求解。最后通过仿真结果说明了该方法可以有效提高异构网络系统的吞吐量, 改善异构网络中无线资源的利用率。

本文接下来的内容安排如下: 第 2 节给出异构网络的系统模型、切换率的计算以及马尔科夫过程理论; 第 3 节结合马尔科夫过程来分析异构网络的性能, 并给出本文的优化算法; 第 4 节通过仿真说明该方法可以改善无线资源的利用率; 第 5 节总结本文。

2 系统模型及切换率

本文的异构网络模型如图 1 所示^[9], 异构网络由 UMTS 和 WiMAX(Worldwide Interoperability for Microwave Access)网络组成, 每个网络的 RRM (Radio Resource Management) 实体负责测量该网络参数, 如业务到达率、小区半径和用户移动速度等参数。并将测量结果汇报给 CRRM 服务器, 由 CRRM 服务器来处理这些数据, 然后将处理的结果反馈给每个网络的 RRM 实体, 由 RRM 实体来执行无线资源分配。异构网络的具体参数定义如下: UMTS 和 WiMAX 基站的覆盖半径分别为 d_U 和 d_W , 信道数分别为 C_U 和 C_W , 单信道的数据传输速率分别为 R_U 和 R_W , 重叠覆盖区域的业务到达率为 λ_o , 重叠区域外的两个网络业务到达率分别为 λ_U 和 λ_W , 用户的通话时间服从均值为 $1/\mu$ 的指数分布, 用户的平均移动速度为 v 。

文献[10,11]从流体模型角度给出了切换率的计算公式, 而文献[12]从角度移动模型给出了类似的切换率表达式, 切换率的计算表达式为

$$\lambda_n = 2nv / (\pi d) \tag{1}$$

其中 d 表示小区的覆盖半径, n 表示当前小区内正在通话的用户数。

本文采用时间连续、状态离散的马尔科夫过

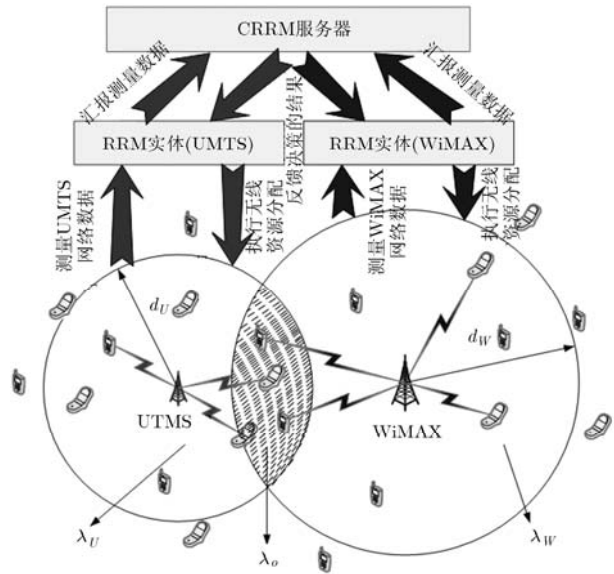


图 1 异构网络系统模型以及 CRRM 模块结构

程^[13], 也即马尔科夫链, 来分析异构网络的性能, 这里通过分析网络的信道占用状态或者正在通话的用户数状态, 来分析网络的性能。假设网络中的信道数为 C , 因此该网络最多有 C 个正在通话的用户, 如图 2 示, 该马尔科夫链有 $C + 1$ 个状态, 其中 λ^i 与 μ^i 表示状态转移概率, 该马尔科夫链的稳态分布为

$$\pi^i = \left(1 + \sum_{j=1}^C \left(\prod_{k=0}^{j-1} \lambda^k / \prod_{l=1}^j \mu^l \right) \right)^{-1} \left(\prod_{k=0}^{i-1} \lambda^k / \prod_{l=1}^i \mu^l \right), \tag{2}$$

$$0 \leq i \leq C$$

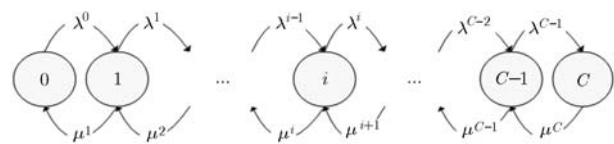


图 2 马尔科夫链

3 性能分析及吞吐量优化算法

图 1 中, 在 UMTS 和 WiMAX 重叠的区域, 该区域用户需要考虑网络选择。对于异构网络来说, 其目标是最大化系统的吞吐量, 高效利用无线网络资源。本文提出一种方法, 通过合理地分配无线网络资源给重叠区域的用户, 来最大化异构网络系统的吞吐量。这里假设 UMTS 网络在重叠区域的业务到达率占该区域的总业务到达率的比例为 p , 将 p 作为系统吞吐量的一个优化因子, 通过选择合适的 p , 来最大化系统的吞吐量。

本文通过马尔科夫链的理论来分析每个网络的性能。根据第 2 节的知识, UMTS 网络中信道的状态数有 $C_U + 1$ 。其中, 从状态 i 到状态 $i + 1$ 的状态

转移率记为 λ_U^i , λ_U^i 不但包括 UMTS 网络覆盖范围内非重叠区域的业务到达率 λ_U , 还包括重叠区域的业务到达率为 $p\lambda_o$, 另外还要考虑从 UMTS 外切换到小区内的平均切换率, 记平均切换率为 $\overline{\lambda_U^h}$, 因此可以得到 λ_U^i 为

$$\lambda_U^i = \lambda_U + p\lambda_o + \overline{\lambda_U^h}, \quad i = 0, \dots, C_U - 1 \quad (3)$$

从状态 i 到状态 $i-1$ 的状态转移率记为 μ_U^i , μ_U^i 包括通话结束率, 即单位时间内结束通话的用户数, 考虑到网络中存在 i 个用户数, 因此通话结束率为 $i\mu$, 还包括从小区内切换到小区外的切换率, 根据式(1)可以得到切换率为 $2iv/(\pi d_U)$, 因此可以得到 μ_U^i 为

$$\mu_U^i = i \left(\mu + \frac{2v}{\pi d_U} \right), \quad i = 1, \dots, C_U \quad (4)$$

根据式(2)可以得到 UMTS 网络信道状态的稳态分布为

$$\pi_U^i = \left(\sum_{j=0}^{C_U} \left(\frac{(\xi_U)^j}{j!} \right) \right)^{-1} (\xi_U)^i / i!, \quad 0 \leq i \leq C_U \quad (5)$$

其中

$$\xi_U = \frac{\lambda_U + p\lambda_o + \overline{\lambda_U^h}}{\mu + 2v/(\pi d_U)} \quad (6)$$

文献[12]提出小区内用户数动态平衡理论, 即单位时间内从小区内切换到小区外的用户数与从小区外切换到小区内的用户数是相等的, 因此这里 $\overline{\lambda_U^h}$ 可以利用这个结论计算得到。首先根据稳态分布得到 UMTS 网络中的平均用户数为

$$\begin{aligned} M_U(\xi_U) &= \sum_{i=0}^{C_U} i \pi_U^i \\ &= \xi_U \left[1 - \left(\sum_{j=0}^{C_U} \left(\frac{(\xi_U)^j}{j!} \right) \right)^{-1} (\xi_U)^{C_U} / C_U! \right] \\ &= \xi_U (1 - P_U^b) = \xi_U P_U^{nb} \end{aligned} \quad (7)$$

其中 P_U^b 为阻塞概率, P_U^{nb} 为非阻塞概率, 并且

$$\begin{aligned} P_U^b &= 1 - P_U^{nb} = \pi_U^{C_U} \\ &= \left(\sum_{j=0}^{C_U} \left(\frac{(\xi_U)^j}{j!} \right) \right)^{-1} (\xi_U)^{C_U} / C_U! \\ &= P(\xi_U) \end{aligned} \quad (8)$$

根据动态平衡理论, 当 UMTS 网络内存在 $M_U(\xi_U)$ 个用户时, 从小区内切换到小区外的平均切换率等于 $\overline{\lambda_U^h}$, 表示成数学形式如下:

$$\overline{\lambda_U^h} = \frac{2M_U(\xi_U)v}{\pi d_U} = \frac{2\xi_U v P_U^{nb}}{\pi d_U} = \frac{2v P_U^{nb}}{\pi d_U} \frac{\lambda_U + p\lambda_o + \overline{\lambda_U^h}}{\mu + 2v/(\pi d_U)} \quad (9)$$

为了计算 UMTS 网络的信道状态的稳态分布, 这里

作如下处理, 由式(9)可以得到 $\overline{\lambda_U^h}$ 关于 P_U^b 的表达式。

$$\overline{\lambda_U^h} = \frac{2v P_U^{nb} (\lambda_U + p\lambda_o)}{\pi d_U \mu + 2v P_U^b} = \phi(P_U^b) \quad (10)$$

将式(10)代入到式(8)中, 得到关于 P_U^b 的方程

$$P_U^b = P(\xi_U) \Big|_{\xi_U = \frac{\lambda_U + p\lambda_o + \phi(P_U^b)}{\mu + 2v/(\pi d_U)}} = \varphi(P_U^b) \quad (11)$$

为了计算在 p 确定时, UMTS 网络阻塞概率 P_U^b , 作下面分析, 首先记

$$\psi(x) = x - \varphi(x) = x - P(\xi_U) \Big|_{\xi_U = \frac{\lambda_U + p\lambda_o + \phi(x)}{\mu + 2v/(\pi d_U)}} \quad (12)$$

由式(11)可知, P_U^b 为方程 $\psi(x) = 0$ 的解。考虑到

$$\begin{aligned} \psi'(x) &= 1 + \frac{1}{\mu + 2v/(\pi d_U)} \frac{2v(\lambda_U + p\lambda_o)(\pi d_U \mu + 2v)}{(\pi d_U \mu + 2vx)^2} \\ &\quad \cdot \frac{P_U^b (C_U - \xi_U P_U^{nb})}{\xi_U} \Big|_{\xi_U = \frac{\lambda_U + p\lambda_o + \phi(x)}{\mu + 2v/(\pi d_U)}} \end{aligned} \quad (13)$$

考虑到有 $M_U(\xi_U) = \xi_U P_U^{nb} < C_U \sum_{i=0}^{C_U} \pi_U^i = C_U$, 因此推出 $\psi'(x) > 0$, 说明 $\psi(x)$ 是增函数。由于 $0 < \varphi(x) < 1$, 因此 $\psi(0) = -\varphi(0) < 0$, $\psi(1) = 1 - \varphi(1) > 0$, 因此 $\psi(x)$ 在 $[0, 1]$ 之间必然存在零点, 而且只存在一个零点。这里可以采用二分法来求解式(12)的零点, 即计算出 P_U^b , $\overline{\lambda_U^h}$, 即得到 UMTS 网络信道状态的马尔科夫链的稳态分布。考虑到 P_U^b 和 $\overline{\lambda_U^h}$ 都是 p 的函数, 因此记 $P_U^b = h_U(p)$, 将其代入到式(10)中, 得到 $\overline{\lambda_U^h}$ 为

$$\overline{\lambda_U^h} = \frac{2v(1 - h_U(p))(\lambda_U + p\lambda_o)}{\pi d_U \mu + 2vh_U(p)} = \lambda_U(p) \quad (14)$$

类似于式(5)可以计算 WiMAX 网络的信道状态的稳态分布为

$$\pi_W^i = \left(\sum_{j=0}^{C_W} \left(\frac{(\xi_W)^j}{j!} \right) \right)^{-1} (\xi_W)^i / i!, \quad 0 \leq i \leq C_W \quad (15)$$

其中

$$\xi_W = \frac{\lambda_W + (1-p)\lambda_o + \overline{\lambda_W^h}}{\mu + 2v/(\pi d_W)} \quad (16)$$

并得到类似式(7)得到 WiMAX 小区内的平均用户数 $M_W(\xi_W) = \xi_W P_W^{nb}$, 其中 $P_W^b = 1 - P_W^{nb} = \pi_W^{C_W}$ 。同样可以分析 P_W^b 和 $\overline{\lambda_W^h}$ 都是 p 的函数, 因此记 $P_W^b = h_W(p)$, 以及

$$\overline{\lambda_W^h} = \frac{2v(1 - h_W(p))(\lambda_W + (1-p)\lambda_o)}{\pi d_W \mu + 2vh_W(p)} = \lambda_W(p) \quad (17)$$

根据马尔科夫链分析的 UMTS 和 WiMAX 网络的稳态分布, 可以得到异构网络系统总的平均吞吐量为

$$T(p) = R_U \sum_{i=0}^{C_U} i \pi_U^i + R_W \sum_{i=0}^{C_W} i \pi_W^i = R_U \xi_U P_U^{nb} + R_W \xi_W P_W^{nb} \quad (18)$$

由于需要对异构网络重叠区域的资源进行合理的分配，才能使得整个无线网络的资源利用率提高，在本文中也就是通过选择合理的 p 来最大化系统的吞吐量，改善无线资源的利用率，因此本文的优化问题即最大化式(18)，将式(14)以及式(17)代入到式(18)中，该优化问题的数学形式可以表示成

$$\begin{aligned} \max T(p) = & R_U (1 - h_U(p)) \frac{\lambda_U + p\lambda_o + \lambda_U(p)}{\mu + 2v/(\pi d_U)} \\ & + R_W (1 - h_W(p)) \\ & \cdot \frac{\lambda_W + (1-p)\lambda_o + \lambda_W(p)}{\mu + 2v/(\pi d_W)}, \\ \text{s.t. } & 0 \leq p \leq 1 \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $h_U(p)$ 与 $\lambda_U(p)$ 分别表示在到达率比例为 p 时 UMTS 网络的阻塞概率与平均切换率，同样地， $h_W(p)$ 与 $\lambda_W(p)$ 分别表示在到达率比例为 p 时 WiMAX 网络的阻塞概率与平均切换率。考虑到式(19)中只有一个优化因子 p ，因此这里可以采用黄金分割法来求解该优化问题。

综上，可以得到针对两个无线网络组成的异构网络无线资源管理的优化算法，具体如下：

步骤1 测量网络的参数，如业务到达率、小区半径、信道数等。并将测量结果汇报给 CRRM 服务器，交由 CRRM 服务器处理。

步骤2 CRRM 服务器对测量数据进行处理。利用黄金分割法求解式(19)的优化问题，黄金分割法中需要确定特定 p 值下异构网络系统的吞吐量，因此这里需要计算 p 固定时，两个网络的马尔科夫链的稳态分布。这里采用二分法求解式(12)的零点，从而得到 UMTS 网络的稳态分布，类似方法，可以得到 WiMAX 网络的稳态分布，即得到 $h_U(p)$ ， $\lambda_U(p)$ ， $h_W(p)$ 和 $\lambda_W(p)$ ，最后通过式(19)来得到特定 p 值时的 $T(p)$ 。

步骤3 反馈结果至 RRM 实体。将 CRRM 服务器处理结果反馈给每个网络的 RRM 实体，得到的最优分配比例 p ，通过 RRM 实体来调整重叠区域的 用户选择接入到哪个网络。

步骤4 RRM 实体执行无线资源的分配。不同网络的 RRM 实体可以根据用户的偏好、业务类型以及移动性等 QoS 来选择相应的用户接入到对应的网络^[4,15]，但选择网络时要保证接入的用户比例为 p ，以保证系统的总吞吐量的最大化。

4 仿真分析

为了说明本文所提出的异构网络无线资源管理

的优化算法特点，这里通过仿真来分析该算法的性能，采用的仿真网络模型如图 1 所示，其中，UMTS 和 WiMAX 网络的详细参数见表 1，仿真结果如图 3 至图 6 所示。

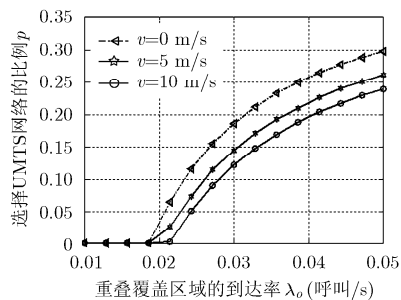
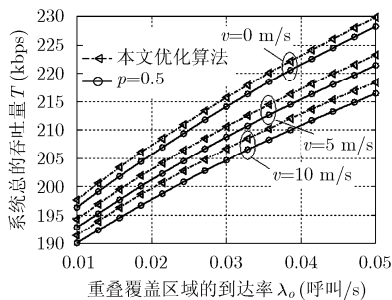
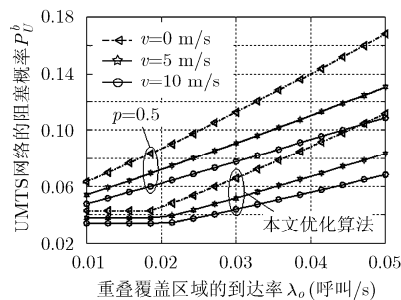
表 1 UMTS 与 WiMAX 组成的异构网络参数

d_U	500 m	d_W	1000 m
C_U	10	C_W	15
R_U	9.6 kbps	R_W	13.6 kbps
λ_U	3/60 呼叫/s	λ_W	5/60 呼叫/s
μ	1/120 呼叫/s		

如图 3 所示，给出的是随着重叠区域的业务到达率 λ_o 从 0 增加到 0.05 过程中，优化算法得到的 UMTS 网络在重叠区域的业务到达率比例 p 的变化图。从图中可以看出随着 λ_o 的增加， p 的值也增加，表明通话用户在重叠区域选择 UMTS 网络的比例增加，这是因为随着 λ_o 的增加，导致 WiMAX 负荷很大，引起 WiMAX 网络的阻塞概率增加，从而导致 WiMAX 网络吞吐量的增加相对于 UMTS 网络吞吐量的增加的速率逐渐放缓，为了保证异构网络系统的吞吐量的增加，CRRM 服务器要求重叠区域的通话用户接入到 UMTS 的比例 p 增加。还可以看出，当用户的移动速度 v 增加时，选择 UMTS 网络的比例 p 减小，这是因为移动性越大的用户更倾向于选择覆盖半径大的网络。

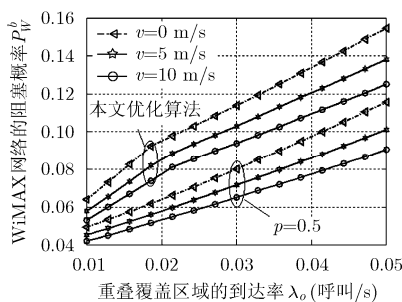
如图 4 所示，给出的是随着重叠区域的业务到达率 λ_o 从 0 增加到 0.05 过程中，优化算法和 $p = 0.5$ 这两种情况下得到的总吞吐量的比较图。从图中可以看出优化算法得到的总吞吐量要大于 $p = 0.5$ 这种资源分配情况下的吞吐量，这说明了该优化算法理论分析的正确性。从图中可以看出，随着 λ_o 的增加，系统的吞吐量增加，这是因为重叠区域通话的用户数增加，使得吞吐量增加。另外从图中还可以看出，随着用户移动速度的增加，系统的吞吐量随着降低，这是由于在图 3 中分析的结论，随着速度 v 的增加， ξ_U 相对减少了，等价于 λ_o 减少，因此系统的吞吐量降低了。

如图 5 所示，给出的是随着重叠区域的业务到达率 λ_o 从 0 增加到 0.05 过程中，优化算法和 $p = 0.5$ 这两种情况下得到的 UMTS 网络阻塞概率的比较图。从图中可以看出，随着 λ_o 的增加，对于优化算法的 UMTS 网络的阻塞概率在 λ_o 从 0.01 变化至 0.018 过程中不变，这是因为从图 3 中可以看出没有用户选择 UMTS 网络。而 λ_o 从 0.018 变化至 0.05 过程中，阻塞概率增加，这是因为 λ_o 从在 0.018 变化至 0.05 过程中，到达率比例 p 增加，说明接入到

图3 重叠区域选择 UMTS 网络的业务到达率比例 p 图4 异构网络系统总的吞吐量 T 图5 UMTS 网络的阻塞概率 P_U^b

UMTS 网络的用户数增加,导致 UMTS 网络的阻塞概率增加。还可以看出,在 $p = 0.5$ 情况下的 UMTS 网络的阻塞概率明显小于优化算法,这是因从图 3 中可以看出重叠区域通话用户选择 UMTS 网络的比例 p 小于 0.5,因此可以看出后者接入到 UMTS 网络的用户数少,因此优化算法相对于 $p = 0.5$ 的 UMTS 网络的阻塞概率要低。类似可以分析图 6 得到相同的结论。

从仿真结果可以看出,本文提出的异构网络无线资源管理的优化算法可以有效提高无线资源的利用率,但是从图 6 可以看出,该优化算法将导致 WiMAX 无线网络的阻塞概率增加,这可能会影响用户的服务质量,因此同时考虑系统的吞吐量与用户的服务质量等多目标问题是非常必要的,这将有待作进一步研究。

图6 WiMAX 网络的阻塞概率 P_W^b

5 结论

本文提出了一种异构网络无线资源的优化方法,该方法是基于马尔科夫过程和切换率计算等理论进行分析的,并且提出的一种无线资源分配算法。首先给出异构网络的系统模型和 CRRM 模块的组成,利用马尔科夫链分析每个网络的性能,通过切换率公式得到马尔科夫链的参数,进而计算出马尔科夫链的稳态分布,根据稳态分布得到异构网络的性能参数。最后通过最大化异构网络的总的吞吐量,来最优化分配无线资源,并采用黄金分割法求解该

1 维优化问题的解。最后通过仿真结果说明了本文的优化算法可以有效提高异构网络系统的吞吐量,改善异构网络中无线资源的利用率。

参考文献

- [1] 3GPP. Improvement of RRM across RNS and RNS/BSS (release 5)[S]. TR 25.881 v5.0.0, 2001.
- [2] Wu L J and Sandrasegaran K. A survey on common radio resource management, wireless broadband and ultra wideband communications[C]. The 2nd International Conference on AusWireless, Sydney, Aug. 2007: 66-71.
- [3] Ma F, Xu G X, and Yang F X. Capability adaptation algorithm based on joint network and terminal selection in heterogeneous networks[J]. *Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2011, 18(1): 76-82.
- [4] Chamodrakas I and Martakos D. A utility-based fuzzy TOPSIS method for energy efficient network selection in heterogeneous wireless networks[J]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(4): 3734-3743.
- [5] Hasib A and Fapojuwo A O. Analysis of common radio resource management scheme for end-to-end QoS support in multiservice heterogeneous wireless Networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(4): 2426-2439.
- [6] Son H, Lee S, Kim S C, et al. Soft load balancing over heterogeneous wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(4): 2632-2638.
- [7] Pengbo S, Yu F R, Hong J, et al. Optimal network selection in heterogeneous wireless multimedia networks[C]. IEEE International Conference on Communications, Dresden, June 2009: 1-5.
- [8] Chen Q B, Zhou W G, Chai R, et al. Game-theoretic approach for pricing strategy and network selection in heterogeneous wireless networks[J]. *IET Communications*, 2011, 5(5): 676-682.
- [9] Jorperez P R and Sallen O. Loose and tight interworking between vertical and horizontal handovers in multi-RAT scenarios[C]. IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Malaga, May 2006: 579-582.
- [10] Shen W and Zeng Q A. Cost-function-based network

- selection strategy in integrated wireless and mobile networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(6): 3778–3788.
- [11] Wang L H and Binet D. Mobility-based network selection scheme in heterogeneous wireless networks[C]. IEEE 69th Vehicular Technology Conference, Barcelona, Apr. 2009: 1–5.
- [12] 施政, 朱琦. 异构网络中基于角度移动模型的垂直切换率分析[J]. 信号处理, 2012, 28(7): 1029–1036.
- Shi Zheng and Zhu Qi. A vertical handoff rate analysis based on angle mobility model in heterogeneous networks[J]. *Signal Processing*, 2012, 28(7): 1029–1036.
- [13] Rappaport T. *Wireless Communications: Principles and Practice*[M]. Second Edition, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2002: 555–564.
- [14] Miguel L B and Javier G. Common radio resource management algorithms for multimedia heterogeneous wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(9): 1201–1213.
- [15] Wang H, Ding L H, Wu P, *et al.* QoS-aware load balancing in 3GPP long term evolution multi-cell networks[C]. IEEE International Conference on Communications, Kyoto, June 2011: 1–5.
- 施政: 男, 1989年生, 硕士生, 研究方向为异构网络中无线资源管理.
- 朱琦: 女, 1965年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为下一代移动通信技术、宽带无线接入技术、OFDM技术、信道和信源编码技术和无线资源动态分配技术等.