

多业务异构网络的呼叫接纳控制

徐可, 黄海, 董广忠, 王传启

(中国科学技术大学信息科学技术学院, 安徽 合肥 230026)

摘要: 呼叫接纳控制作为异构网络系统资源管理的重要部分, 直接影响整个网络资源使用的有效性, 因此在异构网络环境下设计一个合理有效的接纳控制策略至关重要. 考虑了异构网络中的呼叫接入问题, 根据各类服务的带宽需求以及提供的利润差异, 针对其随机分布的特性, 建立连续时间 Markov 分析模型, 提出一种基于缓存的呼叫接入控制算法, 并采取迭代策略对算法进行优化. 仿真实验验证了算法的有效性, 最终的控制策略是系统长期平均利润最大化的最优策略.

关键词: 异构网络; 呼叫接纳控制; 连续时间 Markov; 策略优化

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.01.006

引用格式: 徐可, 黄海, 董广忠, 等. 多业务异构网络的呼叫接纳控制[J]. 中国科学技术大学学报, 2018, 48(1): 42-46.

XU Ke, HUANG Hai, DONG Guangzhong, et al. Call admission control for multi-service heterogeneous networks[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018, 48(1): 42-46.

Call admission control for multi-service heterogeneous networks

XU Ke, HUANG Hai, DONG Guangzhong, WANG Chuanqi

(School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Call admission control, as an important part of resource management of heterogeneous network system, directly affects the effectiveness of the whole network resource usage. Therefore, it is very important to design a reasonable and effective admission control strategy in heterogeneous network environment. The call access problem in heterogeneous networks is considered. According to the bandwidth requirement of various services and the different profits they provide, a continuous time Markov analysis model for the random distribution of the call is constructed. A cache-based call access control algorithm is proposed and the iterative strategy is used to optimize the algorithm. The simulation results verify the effectiveness of the algorithm. The final control strategy is the optimal strategy for making the largest long-term system average profit.

Key words: heterogeneous network; call admission control; continuous time Markov; strategy optimization

收稿日期: 2017-03-17; 修回日期: 2017-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61473001, 71071045, 71131002)资助.

作者简介: 徐可, 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向: 大数据, 复杂系统的建模仿真与控制. E-mail: xuke16@mial.ustc.edu.cn

通讯作者: 黄海, 博士/副研究员. E-mail: hhuang03@ustc.edu.cn

0 引言

随着网络技术的迅速发展,用户数量和网络使用量的不断增长,异构网络的优化和网络资源分配面临了新的挑战.一个有效的无线资源管理机制能够充分利用有限的资源给用户提供高质量的通信服务,而呼叫接纳控制的意义是在保证用户服务质量的同时提高网络的资源利用率;当出现新的通话呼叫时,新呼叫能被接纳的前提是不影响已存在呼叫用户的服务质量,且新呼叫的服务质量也能得到满足^[1].总之,呼叫接纳控制作为异构网络系统资源管理的重要部分,直接影响整个网络资源使用的有效性和用户的 QoS 要求,因此在异构网络环境下设计一个合理有效的接纳控制策略至关重要.

当前一些主要的呼叫接纳控制算法如下:

文献[2]按照异构网络业务具有自相似的特性,提出了一种可以适应自相似业务的异构网络接纳控制算法.作者首先通过对比不同业务之间的业务流量特性,根据网络演算方法,定量求解网络性能的边界,从而能够进行准确的带宽估计;其次,通过考虑业务优先级、业务占用的带宽以及系统的剩余带宽进行接纳控制,该控制策略将概率机制引入保证终端接入的公平性.

文献[3]从非合作博弈理论的观点出发,对异构无线网络中无线资源分配和呼叫接入控制进行研究,提出不同服务区域的带宽、连接数量分配机制及接入控制算法.该机制通过均衡各种无线资源的博弈竞争,使得带宽的分配更具公平性.此外,作者提出的算法还能通过对相应区域分配的连接数进行调整,从而缓解服务需求增大时对通信可靠性降低的影响.

文献[4]提出了一种基于业务类别的联合呼叫控制算法,有效地利用了系统中的资源,新业务阻塞率明显降低.该算法认为,实时业务相对于非实时业务来说,应该尽可能地减少切换次数、降低切换时延.非实时业务要求较高的数据传输速率,对时延不敏感.基于此,该算法在接入控制时,只要系统资源允许,实时业务首选接入蜂窝网络,非实时业务首选接入 WLAN.

文献[5]提出一种基于模糊逻辑的呼叫接纳控制算法,能够较好地考虑负载均衡、用户满意度以及网络的动态变化等因素,但是该算法复杂度较高,并且模糊推理规则以及参数的权重是人为决定的,受

个人主观因素影响较大.

本文考虑多种类型用户的呼叫接纳控制问题,从运营商的角度,优化呼叫接入,在保证现有服务质量的前提下,提高系统收益.首先,针对用户不同类型业务的请求到达、服务持续时间和容许响应延迟时间的随机分布特性,采用连续时间 Markov 控制过程来描述呼叫接纳的动态特性,建立系统性能分析与策略优化框架;其次,本文提出一种基于缓存的呼叫接入控制算法;然后,以系统的长期平均报酬最大为优化函数,采用一种策略迭代优化算法对优化函数进行优化;最后仿真实验验证了算法的有效性.

1 系统分析模型

假设通信业务类别有 K 类,用集合 $I = \{1, 2, 3, \dots, K\}$ 表示,第 i 类业务的信道数需求为 b_i ,不同业务类别的呼叫请求达到服从独立的泊松分布,且第 i 类呼叫的达到率为 λ_i ,呼叫持续时间服从独立指数分布,且第 i 类呼叫的持续时间参数为 u_i ,呼叫等待时间服从独立指数分布,第 i 类呼叫的等待时间参数为 v_i .

以系统中接收的各类服务个数以及缓冲容量中的各类服务请求个数描述该系统状态,即 $s = (n_i, m_i, i \in I)$,其中的 n_i, m_i 分别表示系统中正在接受服务的各类业务个数和缓冲容量中的各类服务请求个数.则系统的状态空间可以描述为

$$S = \{(n_i, m_i, i \in I) \mid \sum_{i \in I} n_i b_i \leq B_{\max}, \sum_{i \in I} m_i b_i \leq M_{\max}\}.$$

式中, B_{\max} 表示系统容量, M_{\max} 表示系统缓冲容量.

控制行动 $d = \{d_i, i \in I\}$,其中 d_i 取 0 或 1: d_i 取 1 表示接纳新到达或缓存的第 i 类业务请求; d_i 取 0 表示将新到达的第 i 类业务请求放入缓存中或对缓存中的第 i 类业务请求不予接纳.所有可行的行动构成行动集 D .将一个 i 类业务新请求到达定义为事件 e_i ,而将网络中一个 i 类业务完成服务离开定义为事件 e'_i ,则所有事件集合可表示为 $E = \{e_i, e'_i, i \in I\}$.

发生的事件决定控制行动.状态空间 S 与事件集合 E 到行动集合 D 的映射可以构成确定型策略 Γ ,即

$$\Gamma: S \times E \rightarrow D, \Gamma = \{\Gamma_i(s, e), i \in I, s \in S, e \in E\}.$$

式中, $\Gamma_i(s, e)$ 表示处于状态 s 发生事件 e 时所采取

的控制行动 d_i , 确定型策略空间记为 Π .

系统状态在策略 $\Gamma \in \Pi$ 的控制下可以演化成
一个连续时间 Markov 控制过程 $\{X_t, t \geq 0; S, A^\Gamma\}$, 其中 A^Γ 为系统的状态转移速率矩阵, 其矩阵
各元素为

$$a_{ss'}^\Gamma = \begin{cases} \lambda_i \Gamma_i(s_i, e_i), s' = s^{(n_i+1)}; \\ \lambda_i I(\Gamma_i(s_i, e_i) = 0), s' = s^{(m_i+1)}; \\ n_i u_i \Gamma_j(s, e'_i), s' = s^{(n_i-1, n_i+1, m_i-1)}; \\ n_i u_i I(\Gamma_j(s, e'_i) = 0), s' = s^{(n_i-1)}; \\ m_i v_i I(b_i + B(s) \leq B_{\max}), s' = s^{(n_i+1, m_i-1)}; \\ m_i v_i I(b_i + B(s) > B_{\max}), s' = s^{(m_i-1)}; \\ - \sum_{s' \neq s} a_{ss'}^\Gamma, s' = s; \\ 0, \text{others.} \end{cases}$$

这里, $s, s' \in S, s^{(\cdot)}$ 表示其状态分量相对于 $s = \{n_1, n_2, \dots, n_K, m_1, m_2, \dots, m_K\}$ 发生括号标注的
变化, $B(s) = \sum_{j=1}^K n_j p_j, I(\cdot)$ 为示性函数.

在策略 $\forall \Gamma \in \Pi$ 下, 该 Markov 过程不可约, 并且存在唯一的稳态概率 $q^\Gamma = (q_s^\Gamma, s \in S)$, 且满足平衡方程

$$q^\Gamma A^\Gamma = 0, q^\Gamma e = 1, A^\Gamma e = 0.$$

式中, $e = (1, 1, \dots, 1)^\top$.

设报酬函数 $f: S \rightarrow R, f(s) = C[B(s)]$, 写成
向量形式 $f = (f(s), s \in S)^\top$. 系统的长期平均报酬为

$$\eta^\Gamma = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(X_t) dt = q^\Gamma f.$$

优化目标为寻求最优的控制策略 $\Gamma^* \in \Pi$, 使得系统运行的长期平均报酬最大, 即

$$\Gamma^* \in \arg \max_{\Gamma \in \Pi} \eta^\Gamma.$$

2 基于缓存的呼叫接纳控制算法

本文针对为多类不同用户提供服务的异构网络的呼叫接纳控制问题, 提出了一种基于缓存容量的呼叫接纳控制(cache-based call access control, CB-CAC)算法, 其流程图如图 1 所示, 具体描述如下:

(I) 当一个新业务请求到达时, 如果当前的容量允许接入该业务, 则接入该业务请求, 否则转到下一步;

(II) 判断系统缓存容量是否足够将该业务纳入缓存, 若缓存容量不够, 则拒绝该业务, 否则将其纳

入缓存, 并进行下一步;

(III) 在该业务缓存时间到达之前, 如果有业务完成使得系统容量足够接入该业务, 则接入该业务; 否则继续等待, 直到缓存时间到达最大, 缓存时间达到最大时进行下一步;

(IV) 该业务的缓存时间到达最大, 再次尝试系统能否接入该业务; 若能则接入, 不能则拒绝该业务请求.

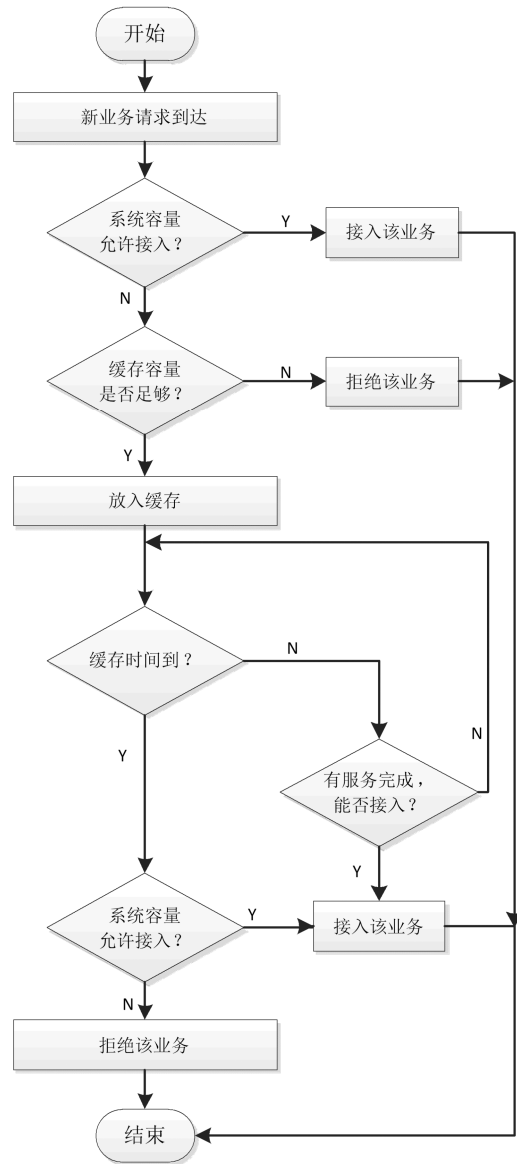


图 1 CB-CAC 算法流程图

Fig.1 CB-CAC algorithm flowchart

3 策略优化策略

上文描述的算法的优化问题是一个无约束优化问题, 可在确定型策略空间取得最优, 适合用策略

迭代的方法进行策略寻优^[6].

设 $\{X_t, D_t, t \geq 0\}$ 是在策略 Γ 的驱动下, 上述连续时间 Markov 控制过程的一条样本轨道, 对应报酬函数 f , 可定义状态 $s \in S$ 的性能势^[7]为

$$g_s^\Gamma = E\left[\int_0^\infty (f(X_t) - \eta^\Gamma) dt \mid X_0 = s\right] \quad (1)$$

性能势向量 $g^\Gamma = (g_s^\Gamma, s \in S)^\top$ 满足 Poisson 方程

$$-f + \eta^\Gamma e = A^\Gamma g^\Gamma \quad (2)$$

由式(2) 可得性能势的理论计算公式为

$$g^\Gamma = -((A^\Gamma - eq)^{-1} - eq)f \quad (3)$$

设 $A^{\Gamma'}$ 为策略 $\Gamma' \in \Pi$ 诱导的另一个转移速率矩阵; $q^{\Gamma'}$, $\eta^{\Gamma'}$ 为对应的稳态概率和平均报酬测度. 将式(2) 两边同时乘以 $q^{\Gamma'}$, 并用 $q^{\Gamma'} A^{\Gamma'} = 0$ 得到性能差公式为

$$\eta^{\Gamma'} - \eta^\Gamma = q^{\Gamma'}((A^{\Gamma'} - A^\Gamma)g^\Gamma + (f^{\Gamma'} - f^\Gamma)) \quad (4)$$

由公式(4)可知, 基于一个策略下的性能势对两个策略的优劣进行比较, 有如下引理.

引理 3.1

(I) 如果 $A^{\Gamma'}g^{\Gamma'} + f^{\Gamma'} \triangleleft A^\Gamma g^\Gamma + f^\Gamma$ (符号 \triangleleft 表示各分量不小于且至少有一个分量大于), 则有 $\eta^{\Gamma'} > \eta^\Gamma$;

(II) 当且仅当 $\forall \Gamma' \in \Pi$ 时, 策略 Γ 是最优的策略, 则

$$A^\Gamma g^\Gamma + f^\Gamma \geq A^{\Gamma'} g^{\Gamma'} + f^{\Gamma'} \quad (5)$$

基于引理 3.1, 有如下策略迭代算法:

Step1 给定初始策略 Γ^0 , 置 $k = 0$;

Step2 (策略评估) 根据式(3) 计算 g^{Γ^k} ;

Step3 (策略改进) 逐个分量选择

$$\Gamma^{k+1} = \arg \max_{\Gamma \in \Pi} (A^\Gamma g^{\Gamma^k} + f^\Gamma) \quad (6)$$

若在状态 $s \in S$ 采用 $\Gamma^k(s, e)$ 取到式(6) 最小, 则置 $\Gamma^{k+1}(s, e) = \Gamma^k(s, e)$.

Step4 若 $\Gamma^{k+1} = \Gamma^k$, 算法停止; 否则置 $k = k + 1$, 转入 Step2.

由 Step3, 如果 $\Gamma^{k+1} \neq \Gamma^k$, 则

$$f^{\Gamma^{k+1}} + A^{\Gamma^{k+1}} g^{\Gamma^k} \triangleleft f^{\Gamma^k} + A^{\Gamma^k} g^{\Gamma^k}$$

根据引理 3.1, 有 $\eta^{\Gamma^{k+1}} \geq \eta^{\Gamma^k}$, 即每一次策略的迭代, 报酬都有增加. 由于策略空间是有限的, 将在有限步内结束迭代过程. 当迭代在第 k 步停止时, 设 $\Gamma^* = \Gamma^k$, 则由式(6) 得

$$\Gamma^* = \arg \max_{\Gamma \in \Pi} (f^\Gamma + A^\Gamma g^{\Gamma^*}).$$

或者

$$f^{\Gamma^*} + A^{\Gamma^*} g^{\Gamma^*} \geq f^\Gamma + A^\Gamma g^{\Gamma^*}$$

由引理 3.1 可知, 策略 Γ^* 是最优策略.

4 仿真实验

通过仿真实验评估算法的收敛性和有效性, 仿真参数选取如下: 系统的最大容量 $B_{\max} = 4$, 最大缓冲容量为 $M_{\max} = 4$, 为两类用户的业务 ($K = 2$) 提供接入服务, 各类业务的具体参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

业务类型 i	b_i	λ_i	u_i	v_i	c_i
1	1	3	1	2	4
2	2	2	0.8	1.5	10

系统仿真结果如图 2 所示. 对于其中的曲线, 迭代次数为 0, 即系统处于未优化状态, 只要系统的带宽允许, 就对新到达的呼叫允许接入, 此时系统的总利润较低. 随着迭代的进行, 系统的报酬得以优化, 从第二次迭代开始, 系统的利润得到优化. 随后系统达到最优的接入控制策略, 系统总报酬保持最高不变.

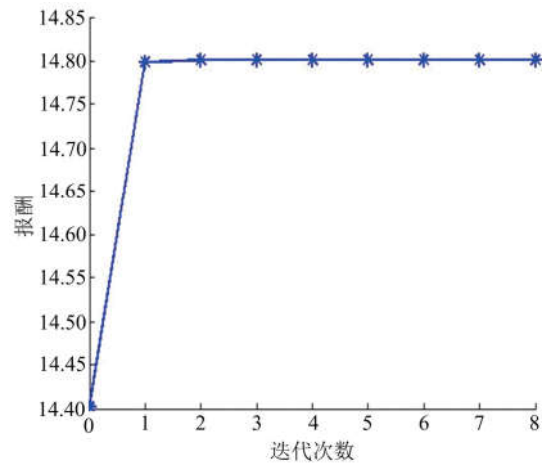


图 2 算法执行情况

Fig.2 Algorithm execution process

此外, 将本文的 BC-CAC 算法与文献[4]中的 BTS-JCAC 算法进行对比. 系统的最大容量 $B_{\max} = 5$, 为两类用户的业务 ($K = 2$) 提供接入服务, 各业务参数如表 2 所示. 不断改变系统缓存容量 M , 将 BC-CAC 算法和 BTS-JCAC 算法所取得的长期平均报酬进行对比.

表 2 对比实验参数

Tab.2 Comparison experiment parameters

业务类型 i	b_i	λ_i	u_i	v_i	c_i
1	1	0.8	0.6	0.4	40
2	2	0.6	0.4	0.6	100

对比结果如表 3 所示,其中 C_{CB-CAC} 表示 CB-CAC 算法的长期平均报酬, $C_{BTS-JCAC}$ 表示 BTS-JCAC 算法的长期平均报酬.当 $M = 0$ 时,即系统没有缓存,CB-CAC 和 BTS-JCAC 算法的长期报酬相同.当 M 不为零时,相比于 BTS-JCAC,CB-CAC 总是取得更大的长期平均报酬,并且随着 M 的不断增大,系统获得的报酬不断增大,从而验证了算法的有效性.

表 3 CB-CAC 算法与 BTS-JCAC 算法对比结果

Tab.3 CB-CAC algorithm and BTS-JCAC algorithm comparison results

M	0	1	2	3	4
C_{CB-CAC}	133.95	137.97	144.64	148.36	150.96
$C_{BTS-JCAC}$	133.95	133.95	133.95	133.95	133.95

5 结论

本文考虑多业务异构网络的呼叫接纳控制问题,针对各类业务请求随机分布的特性,基于连续时间 Markov 控制过程,建立了系统性能分析模型,进而提出一种基于缓存的呼叫接入控制算法,并采用策略迭代对算法进行优化.该算法有效地解决了异构网络呼叫接纳控制问题,后续工作将进一步考虑算法运行速度的优化问题.

参考文献(References)

[1] 胡永东, 吴国新, 钱宁, 等. WiMAX 网络中自相似呼

叫接纳控制算法研究[J]. 通信学报, 2012, 33(9): 8-14.

HU Yongdong, WU Guoxin, QIAN Ning, et al. Study on self-similar call admission control algorithm in WiMAX[J]. Journal of Communications, 2012, 33(9): 8-14.

[2] 郭强, 车玉洁, 张晓萌, 等. 一种适应自相似业务的异构网络接纳控制算法[J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(3): 97-100.

GUO Qiang, CHE Yujie, ZHANG Xiaomeng, et al. A CAC algorithm adopting for self-similar service in wireless network[J]. Computer Technology and Development, 2016, 26(3): 97-100.

[3] 李明欣, 陈山枝, 谢东亮, 等. 异构无线网络中基于非合作博弈论的资源分配和接入控制[J]. 软件学报, 2010, 8(21): 2037-2049.

LI Mingxin, CHEN Shanzhi, XIE Dongliang, et al. Resource allocation and admission control based on non-cooperation game in heterogeneous wireless networks[J]. JOURNAL OF SOFTWARE, 2010, 8(21): 2037-2049.

[4] 王艳敏. 基于业务类别的联合呼叫接纳控制算法[J]. 微型机与应用, 2016, 35(24): 66-69.

WANG Yanmin. A joint call admission control algorithm based on business categories[J]. 2016, 35(24): 66-69.

[5] TOSTES A I J, DE L P D F, ZARATE L E et al. Dynamic fuzzy cellular admission control[J]. Latin America Transactions on Communications, 2015, 13(2): 510-515.

[6] PUTERMAN M L. Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming[M]. New York: John Wiley & Sons, 1994.

[7] CAO X R. The potential structure of sample paths and performance sensitivities of Markov systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(12): 2129-2142.