

呼叫准入约束下 Macro-Femto 小区选择 GSPN 模型研究

汪凯¹ 陈昕¹ 向旭东²

(北京信息科技大学计算机学院 北京 100101)¹ (北京科技大学计算机与通信工程学院 北京 100083)²

摘要 随着数据业务快速增长,仅靠宏蜂窝网络已无法满足流量需求;飞蜂窝网络可以有效分流宏蜂窝流量,近年来所构成的 Macro-Femto 架构得到了较广泛的部署。Macro-Femto 网络部署的关键问题之一是小区选择,由于飞蜂窝网络频谱资源有限,进行小区选择时仍需考虑呼叫准入控制(Call Admission Control, CAC)。图形化的广义随机 Petri 网(Generalized Stochastic Petri Nets, GSPN)具有并行性、不确定性和异步特性以及强大的分析复杂系统的功能。针对 Macro-Femto 网络的呼叫准入约束机制,通过分析呼叫对信道的占用情形,在改进呼叫重审机制的基础上,建立了呼叫准入控制策略 GSPN 模型。利用建立的 GSPN 模型,分析了不同呼叫准入控制策略对新呼叫和切换呼叫阻塞率的影响,给出了部分重审机制的呼叫准入控制策略。在分析飞蜂窝的高速服务特性和宏蜂窝的高负载能力的基础上,结合部分重审呼叫准入策略和 GSPN 方法,提出了基于负载的飞蜂窝优先选择方案(Load-Based Femto-Priority Selection Scheme, LFP)。仿真结果表明,较典型的飞蜂窝优先选择方案,所提出的 LFP 方案对新呼叫的阻塞率和切换呼叫的掉线率分别降低了 2.7% 和 4.6%。

关键词 Macro-Femto 网络,呼叫准入,小区选择,GSPN

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.11.016

Cell Selection GSPN Model Constrained by Call Admission in Macro-Femto Networks

WANG Kai¹ CHEN Xin¹ XIANG Xu-dong²

(School of Computer, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China)¹

(School of Computer & Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)²

Abstract Alone with the increase of data service, it can not meet the traffic demand only by using macrocell deployment. As an efficient means to offload macrocell traffic, femtocell networks are introduced and formed the Macro-Femto architecture. Cell selection will be an open challenge when Macro-Femto network is deployed. As for channel resource scarcity in femto-base station, putting call admission on femtocell network may also be of great concern. Graphical generalized stochastic Petri net(GSPN) characters parallelism, uncertainty and asynchrony, and is suitable to analyze complicated system. For call admission constrains in Macro-Femto networks, the occupancy of calls to channels was first studied and GSPN model was built on call admission by advancing call retrials. Based on GSPN approach, the modified part-retrial-based call admission control strategy was introduced after analyzing the influence of call admission control strategy on call blocking rate. Concerning high-speed service characteristic in femtocell and high capability in macrocell, load-based femto-priority(LFP) selection scheme was proposed with adoption of part-retrial call admission control strategy and GSPN. Simulation results show that, compared with femto-priority selection scheme. The proposed LFP scheme can achieve lower new and handover calls blocking probability by 2.7% and 4.6%.

Keywords Macro-femto network, Call admission, Cell selection, GSPN

1 引言

伴随 4G 业务的普及,用户对高速率数据服务的需求也在不断增长,飞蜂窝网络的出现弥补了宏蜂窝信号室内覆盖弱和强度低的问题。飞蜂窝的低功耗、支持宽带接入等特性加快了飞蜂窝基地站的普及度,截止到 2015 年年初,飞蜂窝的

使用量已经达到 1020 万,亚太地区和欧洲的使用步伐也开始加速^[1]。然而部署飞蜂窝带来信号的重叠覆盖、Macro-Femto 网络中如何选择合适小区为多种呼叫进行服务、降低呼叫阻塞率是当前飞蜂窝进一步普及所亟需解决的关键问题。

通信系统中,用户数远远多于资源数,尤其是飞蜂窝基站最多可提供 6 个用户的同时接入,增加了系统对呼叫准入的

到稿日期:2015-09-15 返修日期:2016-01-24 本文受国家自然科学基金(61370065, 61502040),国家科技支撑计划(2015BAK12B03-03)资助。

汪凯(1990—),男,硕士生,主要研究方向为无线网络与性能评价, E-mail: clomis@foxmail.com; 陈昕(1965—),男,博士,教授,主要研究方向为计算机网络及性能评价、网络安全、航电网络; 向旭东(1986—),男,博士生,主要研究方向为性能评价、最优控制。

控制难度。针对 LTE-UMTS 网络,文献[2]使用 Petri 网构建了自适应联合呼叫准入控制的随机模型,语音和数据业务根据网络负载情况选择接入不同网络,保证了服务质量(Quality of Service, QoS)需求,但使用不同无线接入技术(Radio Access Technology, RAT)的异构网络呼叫准入无法直接应用于 Macro-Femto 网络。资源预留是准入控制中的常用策略,文献[3]研究了动态频谱接入中的带宽预留方法;文献[4]采用信道预留方式对 Small Cell 网络中的准入控制问题进行了研究,所提出的呼叫准入方案降低了中低速切换呼叫掉线率,但方案中没有考虑新呼叫和切换呼叫的时延要求差异。基于文献[4]中的借用信道方案,针对不同呼叫对实时性要求不同,划定信道占用范围,给出了信道借用方案,并通过优化呼叫重审机制的应用给出了部分重审机制呼叫准入控制策略,构建了相应的 GSPN 模型,优化了网络的呼叫服务性能。

Macro-Femto 网络中,呼叫在信号重叠区域选择合适小区为其服务是呼叫服务性能的关键。多种参数可应用于小区选择问题并得到广泛研究,如信道质量、候选小区负载、接收到的信号强度(Received Signal Strength, RSS)及蜂窝间干扰^[5]等,但只考虑小区参数而忽略小区类型对小区选择的影响是不足的。强化学习^[6]、进化博弈理论^[7]以及模糊神经网络^[8]等方式也应用到不同场景下的小区选择问题,但是使用回程链路接入到核心网的飞蜂窝网络无法对大量控制信令进行及时交换从而导致接入失败,仍限制了该类方法的应用。飞蜂窝成为重要接入点的事实使其相对于传统接入点拥有更高的接入优先级^[9]。Macro-Femto 网络中易于实现的一种策略是飞蜂窝优先选择策略。文献[10]对比了飞蜂窝优先选择和宏蜂窝优先选择两种方案,前者降低了呼叫阻塞率,提高了系统吞吐量,但未考虑飞蜂窝有限的频谱资源和短距离服务的特性,使其不具备大容量、大范围服务的能力。典型的飞蜂窝优先选择策略不能承载真实系统中的大量用户接入。为了实现飞蜂窝分流宏蜂窝流量的功能,通过对宏蜂窝设置负载阈值作为由不同基站提供接入服务的指示,提出了基于负载的飞蜂窝优先选择方案。方案采用部分重审机制控制策略对选择本小区的呼叫进行准入,呼叫到达后,首先决策小区选择:若宏蜂窝负载低于阈值,则选择宏蜂窝接入,否则选择飞蜂窝提供服务,分流宏蜂窝负载;若飞蜂窝资源不足,宏蜂窝虽负载较高但仍有可用资源,则将重新请求宏蜂窝服务;若双层蜂窝网络均无法提供接入服务,表明呼叫失败。本文重点对使用随机 Petri 网对呼叫准入约束下的小区选择问题的建模方法进行研究,分析不同准入控制策略和小区选择方案的性能。相比于 Markov 链方法, GSPN 模型的可视化特性对描述这两方面的问题更为直观, TimeNet 工具也提供了强有力的仿真支持。

2 Macro-Femto 网络模型

2.1 Macro-Femto 网络飞蜂窝覆盖密度分级模型

Macro-Femto 网络有效缓解了流量的快速增长,成为广泛采纳的网络模型。单个宏蜂窝基站和多个飞蜂窝基站混合组网,宏蜂窝覆盖范围内分布着的多个飞蜂窝,在某些区域分布相对稀疏,而在其他部分区域则比较密集,如图 1 所示。

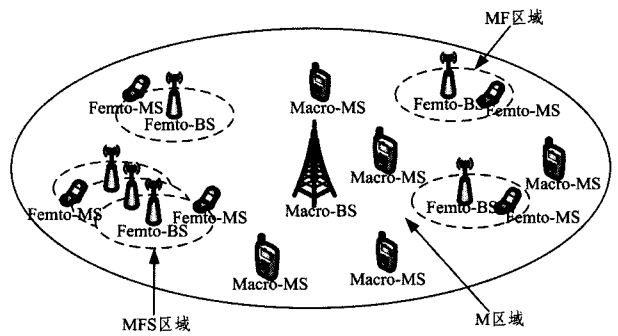


图 1 宏蜂窝/飞蜂窝双层网络模型

网络中有 3 类区域:区域 M 只覆盖宏蜂窝信号;区域 MF 内飞蜂窝稀疏部署,只覆盖宏蜂窝信号和单个飞蜂窝信号;区域 MFS 内飞蜂窝密集部署,存在宏蜂窝和多个飞蜂窝信号覆盖。整个区域 R 可表示为:

$$R = \{M, MF, MFS\} \quad (1)$$

飞蜂窝部署密度是影响通信性能的重要因素,如空间频谱效率^[11]等。在分析双层蜂窝网络空间频谱效率时,文献[12]定义了宏蜂窝覆盖下的飞蜂窝密度:

$$\rho_f = N_f / \pi R_c^2 \quad (2)$$

其中, N_f 表示宏蜂窝网络中飞蜂窝数量, R_c 表示宏蜂窝半径。

但相比于全局部署密度,一定区域内的飞蜂窝部署密度对用户有着较大影响。文献[13]将某一区域 CA 内的飞蜂窝密度定义为:

$$Density = \frac{N \cdot A_f}{CA_{Area}} \quad (3)$$

其中, N 代表区域中飞蜂窝基站数量, A_f 表示 $8.3 \times 17.5 \text{m}^2$ 大小的住宅或小型办公室的面积, CA_{Area} 表示半径为 70m 的飞蜂窝随机部署区域 CA 的面积。

该定义仍未表示出离散的可接收到的信号数量,可将飞蜂窝部署密度 ρ 重新定义为目标区域 CA 中心位置的终端用户所接收到的飞蜂窝信号数量。由此将密集部署的飞蜂窝区域划分为中心区域 MFS_c 和边缘区域 MFS_e 两部分(见图 2),整个网络的覆盖区域可表示为:

$$R = \{M, MF, MFS_c, MFS_e\} \quad (4)$$

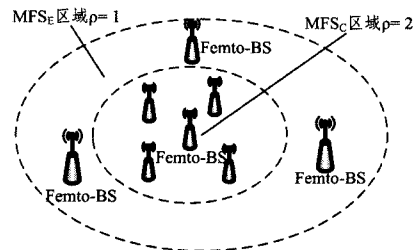


图 2 飞蜂窝密集部署的覆盖密度分级模型

2.2 用户移动模型

飞蜂窝密集部署区域内,一组地理上临近的飞蜂窝可由一定策略组成飞蜂窝组(Femtocell Group),如干扰对齐(Interference Alignment, IA)技术^[14]。飞蜂窝组中存在飞蜂窝管理设备(Femtocell Management Equipment, FME),充当控制器和蜂窝系统网关的角色^[15]。若单独考虑飞蜂窝组内的每个飞蜂窝基站下的呼叫切换,会导致状态空间爆炸,因此假设飞蜂窝组内的切换呼叫不会失败。

网络中新呼叫和切换呼叫的到达速率不尽相同。假设网络中新呼叫和切换呼叫遵循泊松到达过程,到达速率分别为 λ_{new} 和 $\lambda_{handover}$,则呼叫的平均到达速率 $\lambda = \lambda_{new} + \lambda_{handover}$,新呼叫到达比例 $\Delta = \lambda_{new} / \lambda$ 。呼叫到达后,由蜂窝基站提供服务,服务时间称为呼叫持续时间,记为 T 。其中新呼叫持续时间 T_{new} 以及切换呼叫持续时间 $T_{handover}$ 分别服从参数为 μ_{new}^{-1} 和 $\mu_{handover}^{-1}$ 的指数分布,则新呼叫和切换呼叫服务结束的平均速率分别为 μ_{new} 和 $\mu_{handover}$,并满足泊松过程。

2.3 呼叫准入模型

由于不同业务类型在建模时会有不同的准入模型,文中只考虑数据业务^[16],采用固定分配的方式为业务分配信道资源。相比于新呼叫请求被阻塞,通信过程中发生的中断更能引起用户的不满,因此为切换呼叫设置较高的优先级:1)当呼叫同时请求信道时首先为切换呼叫分配资源;2)基站为切换呼叫预留信道,降低掉线率。

预留信道机制将信道分为公共信道和预留信道,前者服务所有呼叫,而后者只响应切换呼叫请求。设置预留信道可在一定程度上降低切换掉线率,但较低的切换失败率是以增大了新呼叫阻塞率为代价的,为折衷两类呼叫的服务质量,引入了借用信道的概念。

系统对切换呼叫设置了最少专用信道数量,即预留切换信道;预留信道中剩余资源作为预留借用信道。公共信道资源不足时,若预留信道存在可用资源,新呼叫请求可被调度接入到借用信道。

图3描述了 M, MFS_C 和 MFS_E 区域中两呼叫对信道的请求权情况。 MF 区域飞蜂窝基站可用信道数较少,所有预留信道均为切换呼叫服务。为降低呼叫阻塞率,模型引入了呼叫重审机制:接入失败的呼叫被置于重审队列 $Queue_{new}$ 和 $Queue_{handover}$,队列容量为 $QLen_{new}$ 和 $QLen_{handover}$ 。队列间隔一定时间激发呼叫重审事件,提交队列中的呼叫请求。两队列激发间隔服从参数为 τ_{new}^{-1} 和 $\tau_{handover}^{-1}$ 的指数分布,激发速率分别为 τ_{new} 和 $\tau_{handover}$ 。

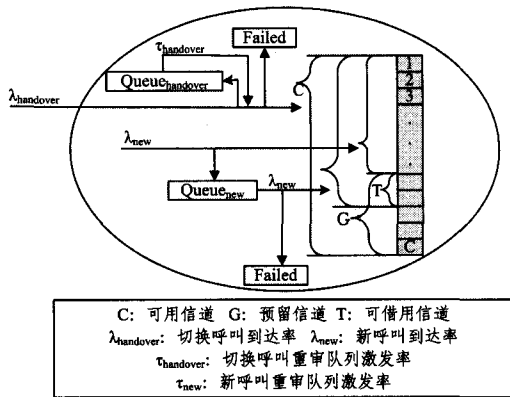


图3 蜂窝区域中的呼叫准入模型

3 呼叫准入约束的小区选择 GSPN 模型

随系统单元增多,随机 Petri 网 (Stochastic Petri Net, SPN) 的状态空间呈指数增长,因此引入了广义随机 Petri 网 GSPN。GSPN 为六元组, $GSPN = (P, T; F, W, M_0, \lambda)$, 其中 P, T, F 和 W 为库所集合、变迁集合、有向弧集以及弧权函数, M_0 为系统初始状态, λ 为各变迁的变迁速率集合。

GSPN 将变迁分为时间变迁和瞬时变迁,瞬时变迁优先级高于时间变迁,从而缓解了“状态空间爆炸”问题^[17]。时间变迁可以表示服从概率分布的事件发生,而瞬时变迁可以表征系统的判断决策行为。呼叫请求的到达与离开服从泊松到达过程,可用时间变迁来表示;网络准入和选择策略可用带有哨函数的瞬时变迁来实现。

3.1 呼叫准入控制 CAC 的 GSPN 模型

通信过程中,用户的移动和新业务的发生带来了切换呼叫和新呼叫。为保证服务质量,蜂窝网络需对不同呼叫进行准入控制,提高用户对网络的整体满意率。

3.1.1 基于重审机制的呼叫准入控制

重审机制主要应用于排队模型,通信网络也可引入重审机制处理呼叫业务,如呼叫中心^[18]等。根据是否对新呼叫和切换呼叫执行重审操作,可将重审分为无重审、全部重审以及部分重审3种类型。

蜂窝基站中总信道、预留信道及借用信道数量分别用 C, G, T 表示;令 $Serve_{handover}, Serve_{new}^G, Serve_{new}^T$ 标记切换呼叫、预留信道和借用信道请求权下的新呼叫是否被服务,1代表请求被接纳,0代表被阻塞;Cap表示网络可用资源数,则呼叫准入约束条件可表示为:

$$Serve_{handover} = \begin{cases} 1, & Cap > 0 \\ 0, & Cap = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$Serve_{new}^G = \begin{cases} 1, & Cap > G \\ 0, & Cap \leq G \end{cases} \quad (6)$$

$$Serve_{new}^T = \begin{cases} 1, & Cap \geq G - T \\ 0, & Cap < G - T \end{cases} \quad (7)$$

若基于借用信道的呼叫准入策略对两类呼叫均不执行重审操作,则称为无重审准入控制策略。将该策略记为 Plain-CAC 策略,可表示为:

$$GSPN_{PlainCAC} = (P, T; F, W, M_0, \lambda) \quad (8)$$

其中, $P = \{Wait_{new}, Wait_{handover}, Cap, Load\}$, $T_{timed} = \{New, Handover, End_{new}, End_{handover}\}$, $T_{untimed} = \{Fail_{new}, Fail_{handover}, Admission_{new}, Admission_{handover}\}$, $F = P \times T \cup T \times P$, $\forall w \in W$, $w = 1, M_0 = (0, 0, C, 0)$ 。

相应的图形化表示如图4所示。Chesoong Kim 等人^[19]通过四维马尔科夫链分析并优化了应用于两类呼叫的多重审预留信道策略,但在预留信道采用重审机制对降低新呼叫阻塞率效果并不明显。因此改进新呼叫重审策略,在首次呼叫被阻塞后进入重审队列,重审激发时增加对借用信道的重审;切换呼叫拥有所有信道的请求权,对其在全部信道上执行重审操作称为全重审准入控制策略,记为 RetrialCAC,如图5所示。

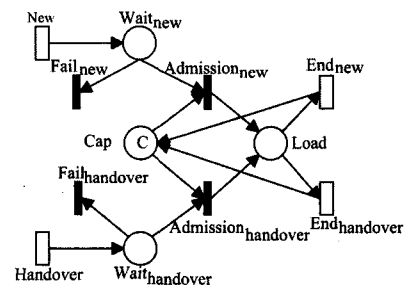


图4 无重审机制 CAC 策略的 GSPN 模型

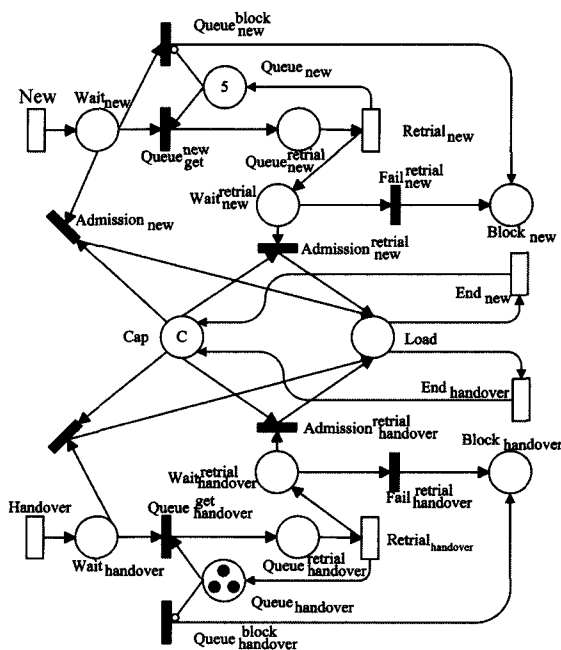


图5 全部重审机制 CAC策略的 GSPN模型

切换呼叫的短时延要求使重审机制无法发挥有效作用, 剪除 RetrialCAC 策略中切换呼叫重审操作, 设计了部分重审准入控制策略 PartRetrialCAC, 如图 6 所示。3 种策略下, 新呼叫或切换呼叫到达时, 若不符合准入约束条件(5)或(6), PlainCAC 策略下呼叫被阻塞; RetrialCAC 策略将呼叫置于相应重审队列; 而 PartRetrialCAC 只将新呼叫置于重审队列等待激发, 切换呼叫被拒绝。呼叫重审时, 新呼叫增加了对预留借用信道 T 的请求权, 若满足约束(7), 被允许接入网络, 否则呼叫阻塞。

图 6 部分重审机制 CAC 策略的 GSPN 模型

G_m 表示宏蜂窝预留信道数, G_f 为飞蜂窝预留信道数, 并满足 $G_m > G_f$; 飞蜂窝密集部署区域由于存在多个飞蜂窝信号覆盖, 预留信道数可表示为 $G_f * \rho$ 。表 1 列出了各基站的总信道、预留信道以及借用信道数量的分配情况。

基站类型	信道分配(个)		
	总信道数(C)	预留信道数(G)	借用信道数(T)
宏基站	40	5	2
稀疏飞蜂窝基站	6	1	0
密集飞蜂窝基站	$6 * \rho$	$2 * \rho$	ρ

3.1.2 呼叫准入控制 GSPN 模型

图 4—图 6 分别描绘了无重审机制、全重审机制和给出的部分重审机制呼叫准入控制过程的 GSPN 模型。该模型以单个蜂窝基站为背景, 呼叫以泊松过程到达系统, 以库所 C_{ap} 表示系统中的信道资源, $Load$ 表示系统中的资源占用。

库所/变迁	意义
Cap	蜂窝系统的空闲信道资源
Load	蜂窝系统中被占用的信道资源
Wait _{new}	新呼叫到达后的准入判断状态
Wait _{handover}	切换呼叫到达后的准入判断状态
Queue _{new}	用于新呼叫重审的队列资源
Queue _{handover}	用于切换呼叫重审的队列资源
Queue _{new} ^{retrial}	新呼叫重审排队状态
Queue _{handover} ^{retrial}	切换呼叫重审排队状态
Wait _{new} ^{retrial}	新呼叫重审后的准入判断状态
Wait _{handover} ^{retrial}	切换呼叫重审后的准入判断状态
Block _{new}	被阻塞的新呼叫请求
Block _{handover}	被阻塞的切换呼叫请求
New	时间变迁, 新呼叫请求到达
Handover	时间变迁, 切换呼叫请求到达
Retrial _{new}	时间变迁, 新呼叫重审激发
Retrial _{handover}	时间变迁, 切换呼叫重审激发
End _{new}	时间变迁, 新呼叫终止
End _{handover}	时间变迁, 切换呼叫终止
Queue _{new} ^{get}	瞬时变迁, 决策新呼叫进入重审队列
Queue _{handover} ^{get}	瞬时变迁, 决策切换呼叫进入重审队列
Queue _{new} ^{block}	瞬时变迁, 决策新呼叫被重审队列阻塞
Queue _{handover} ^{block}	瞬时变迁, 决策切换呼叫被重审队列阻塞

为了实现呼叫准入控制的决策行为,需对所建立的 CAC 策略 GSPN 模型中的部分变迁添加约束条件,即添加一定的谓词变迁。

与新呼叫相关的变迁中,无重串策略下, $Admission_{new}$ 关联的谓词变迁为 $\#Cap > G$, $Fail_{new}$ 为 $\#Cap \leq G$; 重串策略下, $Queue_{get}^{new}$ 为 $\#Cap \leq G \text{ AND } \#Queue_{new} > 0$, $Queue_{block}^{new}$ 为 $\#Cap \leq G \text{ AND } \#Queue_{new} = 0$, $Admission_{retrial}^{new}$ 和 $Fail_{retrial}^{new}$ 关联的谓词变迁分别是 $\#Cap > (G - T)$ 和 $\#Cap \leq (G - T)$ 。

与切换呼叫相关的变迁中, $Admission_{handover}$ 和 $Admission_{retrial}$ 关联的谓词变迁为 $\#Cap > 0$; 对应地, $Fail_{handover}$ 和 $Fail_{retrial}$ 是 $\#Cap = 0$; $Queue_{age}^{handover}$ 与 $Queue_{dock}^{handover}$ 分别为 $\#Cap = 0$ AND $\#Queue_{handover} > 0$ 和 $\#Cap = 0$ AND $\#Queue_{handover} = 0$ 。相关谓词均添加到瞬时变迁的哨函数中, 决策呼叫准入。

3.2 带有 CAC 策略的小区选择 GSPN 模型

Macro-Femto 网络存在多处蜂窝信号重叠覆盖区域,针对呼叫选择合适服务小区的问题,引入呼叫准入约束机制,对比分析了不同小区选择方案的服务性能。飞蜂窝优先选择方案(Femto-Priority Selection Scheme, FP)是简单且易实施的选择策略,呼叫到达时,若约束条件满足,优先选择飞蜂窝基站为其服务;当飞蜂窝资源不满足约束条件时,呼叫才选择宏蜂窝基站服务。

飞蜂窝是为了提升室内覆盖和系统容量^[20]而设计的,本身并不具备大范围覆盖以及大容量服务的能力,优先选择飞蜂窝服务无法充分利用宏蜂窝资源较充分的优势,容易导致

呼叫阻塞。因此引入了宏蜂窝负载阈值 T ，提出了基于负载的飞蜂窝优先选择方案 LFP。LFP 方案中，首先由宏蜂窝为到达的呼叫提供服务，当宏蜂窝负载达到阈值 T 时，新到达呼叫优先接入飞蜂窝基站；若此时飞蜂窝无法满足准入约束且宏蜂窝满足约束条件，则选择宏蜂窝接入；若基站均无法提供接入，则呼叫失败。 M 区域不存在重叠覆盖的蜂窝信号，不会出现不同小区信号的选择问题，故只对非单一覆盖区域构建小区选择模型，如图 7 所示。

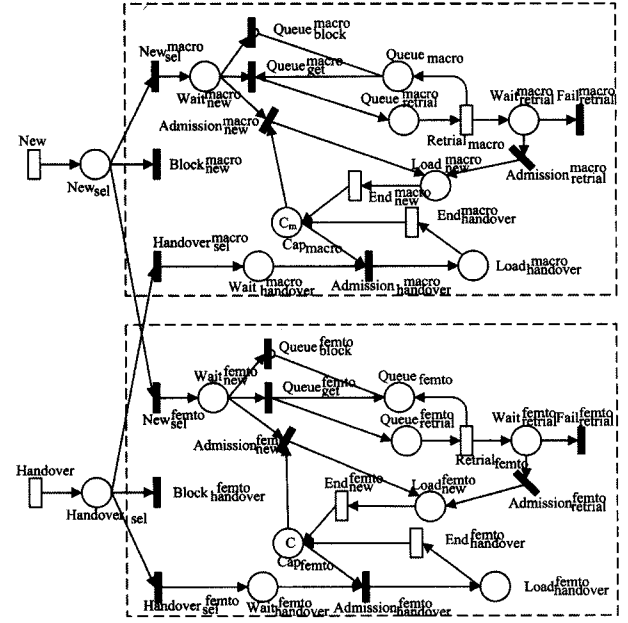


图 7 小区选择的 GSPN 模型

表 3 给出了 GSPN 模型中部分变迁的哨函数，实现不同的小区选择方案。宏蜂窝基站总信道数、预留信道数及借用信道数分别表示为 C_m, G_m 和 T_m ；飞蜂窝基站相应信道数表示为 C, G 和 T 。

表 3 小区选择 GSPN 模型部分变迁的哨函数

方案	变迁	哨函数
FP	New _{macro} sel	$\#Cap_{macro} > G_m - T_m$
	New _{femto} sel	$\#Cap_{macro} > G - T$
	Handover _{macro} sel	$\#Cap_{macro} > 0$
	Handover _{femto} sel	$\#Cap_{macro} > 0$
LFP	New _{macro} sel	$\#Cap_{macro} > G_m - T_m$
	New _{femto} sel	$\#Cap_{femto} > G - T$
	Handover _{macro} sel	And $\#Cap_{macro} < C_m - T$
	Handover _{femto} sel	And $\#Cap_{macro} < G_m - T$

呼叫选择特定的小区后，该小区基站将对呼叫执行准入控制，若系统资源不满足该小区对呼叫设定的约束条件，则该呼叫被阻塞，若满足则为该呼叫提供接入服务。

4 仿真分析

利用 TimeNet 仿真工具对呼叫准入和小区选择问题进行仿真，分析不同策略下新用户的阻塞率和切换用户的掉线率。表 4 给出了仿真时使用的相关参数。宏蜂窝和飞蜂窝提供的数据率不同，数据业务的完成速率也不同，设定新呼叫和切换呼叫在宏蜂窝和飞蜂窝下的呼叫持续时间为 80s/60s 和 60s/40s。

表 4 仿真参数设置

参数	设定值
Δ	0.2
$QLen_{new}$	5
τ_{new}^{-1}	5s
T	30
$QLen_{handover}$	3
$\tau_{handover}^{-1}$	3s

首先仿真 3 种准入控制策略，根据 GSPN 模型及约束条件，呼叫阻塞概率可按如下方式得出。切换呼叫无论是否采用重审策略，当 $\#Cap=0$ 时，切换用户的接入请求被拒绝，所以切换掉线率为 $\#Cap=0$ 的概率，即 $P\{\#Cap=0\}$ 。同样的，不采用重审策略时，新用户阻塞概率为 $P\{\#Cap \leq G\}$ ；采用重审策略时为 $P\{\#Cap < G - T\}$ 。图 8 显示了 3 种准入控制策略对新呼叫和切换呼叫的影响。

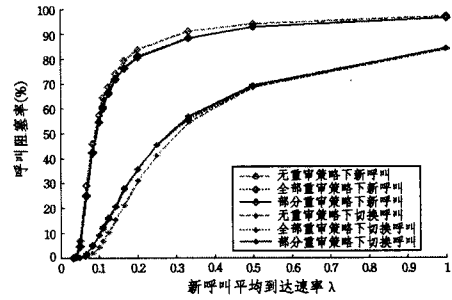


图 8 不同准入控制策略用户的呼叫阻塞率

由图 8 可得，重审机制对新呼叫和切换呼叫有着不同的影响。相比于 PlainCAC 策略，带有重审策略的准入控制机制 RetrialCAC 和 PartRetrialCAC 在不同的呼叫到达率下都能降低新呼叫的阻塞率。呼叫中低速到达时，RetrialCAC 策略和 PartRetrialCAC 策略对降低新呼叫阻塞率的效果更为明显。对切换呼叫来说，引入重审策略增加了切换掉线率，尤其在中低速呼叫到达的情况下。呼叫到达率较高时，3 种策略的阻塞率趋同，综合对比两类呼叫在不同策略下的阻塞率可以发现，低速呼叫到达时重审策略带来的新呼叫阻塞率的降低小于其所带来的切换掉线率的增加；然而在中高速情况下，重审策略对降低新呼叫阻塞率效果显著。考虑到低速呼叫到达时系统整体阻塞率相对较低，因此带有重审策略的准入控制机制更适用于 Macro-Femto 网络。同时，PartRetrialCAC 策略和 RetrialCAC 策略的曲线趋于拟合，表明是否对切换呼叫执行重审对阻塞率没有明显影响，但对呼叫均执行重审反而增加了系统资源的额外消耗，因此 PartRetrialCAC 策略整体表现要优于 RetrialCAC 策略。

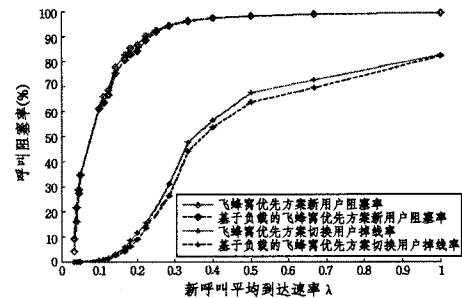


图 9 不同小区选择方案的呼叫阻塞率

针对小区选择 GSPN 模型，采用了典型的 MFS_C 区域进行仿真实验。图 9 描绘了在 FP 方案和 LFP 方案下，两类呼

叫的阻塞率随呼叫到达速率增快的变化情况。可知基于负载的飞蜂窝优先选择方案要较优于单纯的飞蜂窝优先选择方案。到达速率较低时,飞蜂窝资源相对充足,可满足新呼叫的接入请求,FP 方案和 LFP 方案都表现出较低的阻塞率;到达速率较高时,整个蜂窝系统中新呼叫可用的资源稀缺,导致两方案下均保持很高的呼叫阻塞率;而新呼叫到达速率在中低速情况下,FLP 方案中宏蜂窝提供了较多用户的接入请求,同时飞蜂窝也发挥出分流宏蜂窝流量的功能,从而带来了阻塞率的下降。经过计算得知,所提出的 LFP 方案相较 FP 方案,最大可降低 2.7% 的新呼叫阻塞率。对切换呼叫而言,LFP 方案总体优于 FP 方案,呼叫到达速率较高时,两方案均保持较高的阻塞率而 LFP 方案仍可带来一定的阻塞率下降,最大可降低 4.6% 的切换呼叫掉线率。

结束语 本文研究了 Macro-Femto 蜂窝网络中呼叫准入约束的小区选择问题。首先对所研究的蜂窝网络根据信号重叠情况划分为多个区域,提出了飞蜂窝密集部署场景的覆盖密度分级模型,用于构建可使用 GSPN 进行性能分析的蜂窝小区模型。其次,针对蜂窝小区中的准入控制问题,分析了无重审准入控制策略 PlainCAC 和全部重审准入控制策略 RetrialCAC 的不足,改进 RetrialCAC 形成部分重审准入控制策略 PartRetrialCAC,并建立了 3 种准入控制策略的 GSPN 模型,验证了 PartRetrialCAC 策略整体上优于其他两种策略。最后,将部分重审呼叫准入控制机制引入到 Macro-Femto 网络的小区选择问题上,通过分析飞蜂窝优先选择方案,提出了基于负载的飞蜂窝优先选择方案,使飞蜂窝实现分流宏蜂窝流量的功能,并构建了 GSPN 模型进行仿真分析。

参 考 文 献

- [1] Forum S C. Small cells deployment market status report [R]. 2015
- [2] Kaur S, Selvamuthu D. Adaptive joint call admission control scheme in LTE-UMTS networks[C]//2014 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite. Jakarta: IEEE, 2014: 63-70
- [3] Salameh H A B, Krunz M, Manzi D. Spectrum bonding and aggregation with guard-band awareness in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(3): 569-581
- [4] Alioua A, Gharbi N, Senouci S M. Call admission control scheme using borrowable guard channels and prioritizing fresh calls retrials in small cell networks[C]//2014 Global Information Infrastructure and Networking Symposium. Montreal, QC: IEEE, 2014: 1-6
- [5] Davaslioglu K, Ayanoglu E. Interference-based cell selection in heterogenous networks[C]//2013 Information Theory and Applications Workshop. San Diego, CA: IEEE, 2013: 1-6
- [6] Muñoz P, Barco R, de la Bandera I. Load balancing and handover joint optimization in LTE networks using Fuzzy Logic and Reinforcement Learning[J]. Computer Networks, 2015, 76: 112-125
- [7] Feng Z, Song L, Han Z, et al. Cell selection in two-tier femtocell networks with open/closed access using evolutionary game[C]//2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Shanghai: IEEE, 2013: 860-865
- [8] Jiao Y, Ma L, Xu Y. Research on vertical handover in LTE two-tier Macrocell/Femtocell Systems based on fuzzy neural network [C]//2014 International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies. Hefei: IEEE, 2014: 1-5
- [9] Gódor G, Jakó Z, Knapp Á, et al. A survey of handover management in LTE-based multi-tier femtocell networks: Requirements, challenges and solutions[J]. Computer Networks, 2015, 76: 17-41
- [10] Ge X, Martinez-Bauset J, Gasares-Giner V, et al. Modeling and performance analysis of different access schemes in two-tier wireless networks[C]//2013 IEEE Global Communications Conference. Atlanta, GA: IEEE, 2013: 4402-4407
- [11] Chandhar P, Das S S. Area energy efficiency analysis for OFDMA femtocell networks[C]//2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems. Barcelona: IEEE, 2014: 771-775
- [12] Chandhar P, Das S S. Analysis of area spectral efficiency for co-channel deployed macrocell-femtocell OFDMA networks[C]//2013 IEEE International Conference on Communications. Budapest: IEEE, 2013: 5010-5014
- [13] Galindo-Serrano A, Giupponi L. Distributed Q-learning for interference control in OFDMA-based femtocell networks[C]//2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference. Taipei: IEEE, 2010: 1-5
- [14] Guler B, Yener A. Selective interference alignment for MIMO cognitive femtocell networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(3): 439-450
- [15] Chen L, Li X, Ji H. An interference-mitigation channel allocation algorithm for energy-efficient femtocell networks[C]//2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Istanbul: IEEE, 2014: 2318-2323
- [16] Dong Quan, Li Jian-dong, Zhao Lin-jing, et al. Utility-Based Maximized Scheduling and Power Control in Multi-Cell Heterogeneous Networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2014, 37(2): 373-383 (in Chinese)
- [17] Wang Hong-lu, Chen Xin, Gao Chao-xin, et al. Generalized Stochastic Petri Nets Approach to Dynamic Energy Management in Data Centers[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(12): 3007-3014 (in Chinese)
- [18] 王鸿鲁, 陈昕, 高潮欣, 等. 基于 GSPN 的数据中心动态能耗管理研究[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(12): 3007-3014
- [19] Phung-Duc T, Kawanishi K. Performance analysis of call centers with abandonment, retrial and after-call work[J]. Performance Evaluation, 2014, 80: 43-62
- [20] Kim C, Klimenok V I, Dudin A N. Analysis and optimization of Guard Channel Policy in cellular mobile networks with account of retrials[J]. Computers & Operations Research, 2014, 43: 181-190
- [21] Dudnikova A, Panno D, Mastro Simone A. Measurement-based coverage function for green femtocell networks[J]. Computer Networks the International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 2015, 83(c): 45-58