

异构网络中基于负载传递的联合接纳控制算法

夏玮玮, 丁兆明, 沈连丰

(东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 提出异构网络中基于负载传递的联合接纳控制 (LJAC, load-transfer-based joint admission control) 算法, 该算法基于负载均衡接纳用户的接入请求, 在异构网络交叠覆盖区域引入业务的动态负载传递, 同时考虑异构网络的布局以及垂直切换等因素的影响。将异构网络融合系统建模为多维马尔可夫链, 获得稳态概率, 推导异构网络融合系统的服务质量 (QoS, quality of service) 性能指标。基于泊松点过程理论, 获得满足 QoS 限制时的异构网络容量上界。以最大化资源使用率同时保证用户的 QoS 为目标, 优化异构网络融合系统的接纳参数。仿真结果表明, LJAC 算法能实现更低的业务阻塞率和垂直切换请求失败率以及更高的系统容量增益。

关键词: 异构网络; 负载传递; 接纳控制; 服务质量; 泊松点过程

中图分类号: TN 929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018075

Joint admission control algorithm based on load transfer in heterogeneous networks

XIA Weiwei, DING Zhaoming, SHEN Lianfeng

National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China

Abstract: A load-transfer-based joint admission control (LJAC) algorithm in heterogeneous networks was proposed. The access requirements of users were admitted based on load balancing, the dynamic load transfer of traffics in the overlapping coverage areas of heterogeneous networks were introduced, and the influence of such factors as the layout of heterogeneous networks and the vertical handoff was considered in the algorithm. The integrated system of heterogeneous networks was modeled as a multidimensional Markov chain, the steady-state probabilities were obtained and the quality of service (QoS) performance metrics were derived. Based on the Poisson point process theory, the upper bound of capacity of the heterogeneous networks satisfying QoS limitations was obtained. The admission control parameters of the integrated system of heterogeneous networks were optimized in order to maximize the resource utilization rate as well as guaranteeing the QoS of users. The simulation results demonstrate lower traffic blocking probability, lower failure probability of vertical handoff requirements, and larger system capacity gain can be achieved by using the proposed LJAC algorithm.

Key words: heterogeneous network, load transfer, admission control, quality of service, Poisson point process

1 引言

多种无线通信系统并存构成了异构的网络环境。随着宽带无线应用的推广, 无线资源日趋紧张, 如何通过设计合理的资源优化算法实现异构资源

的优势互补与协调管理, 从而最大化资源利用率, 向用户提供具有服务质量保证的服务是异构网络融合场景下必须要解决的一个问题^[1]。国内外已有的研究成果表明, 资源优化算法的研究主要集中在接纳控制、资源调度、资源分配等方面。其中, 接

收稿日期: 2017-10-19; 修回日期: 2018-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61741102, No.61471164)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61741102, No.61471164)

纳控制算法能够对异构网络资源进行合理配置，在保证不同用户不同业务服务质量的同时，对于优化网络拓扑、合理利用网络资源、实现用户最佳体验等方面具有重要的意义，成为一项重要的研究课题。

已有文献对异构网络融合场景中的接纳控制算法进行了研究。文献[2]提出了一种基于动态带宽分配的联合呼叫接纳控制（CAC, call admission control）算法，以最大化系统的效用函数为优化目标，以 QoS 需求和带宽容量为约束，将异构网络融合场景中的呼叫接纳控制和带宽分配转化为一个优化问题求解。文献[3]将竞拍机制引入异构网络的呼叫接纳控制中，提出了呼叫接纳控制机制，包括网络评估、网络选择和价格计算这 3 个部分的算法。该机制可以适用于各种不同类型的异构网络中，但复杂度也较高。文献[4]提出了异构网络中 QoS 敏感的能量有效的联合无线资源管理最优机制，该机制基于半定马尔可夫决策过程模型提供异构网络的最优控制策略，在保证网络性能的同时可以大大降低系统能耗。然而该机制并没有考虑用户在不同网络之间的垂直切换。文献[5]提出能应用于异构密集网络的接纳控制算法，该算法考虑了多种业务类型以及在分组级和连接级的多个接纳参数，并且使用基于批量马尔可夫业务到达过程（BMAP, batch Markovian arrival process）的分析模型来分析异构网络性能。但该算法没有考虑异构网络的交叠覆盖以及不同的布局方式。文献[6]提出一种基于马尔可夫决策过程的迭代式接纳控制算法，用于决策不活跃多播流业务请求到达无线网络时的接入许可。文献[7]提出了一种联合群组接纳控制（JGAC, joint group admission control）算法，首先基于负载均衡策略为每个网络分配用户数，然后以最大化总用户满意度为目标确定将每个用户分配到合适的网络。相对于这种集中式的将用户分配到不同网络中的算法，文献[8]则提出了基于负载感知的以用户为中心、网络辅助的无线网络选择智能接入机制，和传统的基于最小信噪比（SNR, signal to noise ratio）阈值的无线保真（Wi-Fi, wireless fidelity）优先的接入机制相比，该算法进一步考虑了 Wi-Fi 和 eNodeB（evolved NodeB）的负载情况，因而可以有效改善网络性能。然而，该算法没有充分考虑异构网络的交叠覆盖情形以及用户的垂直切换。文献[9]针对异构网络中动态偏移的

自动设置，提出了一种负载感知的网络选择算法，使宏蜂窝可以动态地选择信道状态的偏移量，指导用户执行网络选择以及网络进行接纳控制的智能决策。但是，该算法的复杂度较高。文献[10]基于马尔可夫决策过程理论，提出异构网络中区分业务类型的接纳控制理论模型以及基于模糊逻辑的接纳效用评估机制，在保证各类业务接入和切换成功率的基础上，推导出使接纳效用最大的最优接纳控制策略。然而，该策略没有考虑异构网络的交叠覆盖情形。文献[11]提出了区分业务和呼叫类型的联合接纳控制算法，通过设置多级接入带宽阈值以确定各类业务和呼叫的优先级，并且采取了带宽调整机制，对是否接纳连接请求及接入的目标网络进行控制。然而，该算法没有考虑异构网络之间的负载平衡。

以上现有的接纳控制算法都是在满足 QoS 性能、带宽容量限制或能耗等约束前提下设计的接纳策略，没有考虑如何最大化资源利用率且保证业务的 QoS。为了有效地利用异构网络的资源，在各网络交叠覆盖区域有必要引入动态负载传递。但是在现有的接纳控制算法的研究中，很少有文献考虑交叠区域内的动态负载传递并进行性能分析。此外，由于异构网络往往相互交叠覆盖，网络布局与覆盖方式对系统性能和容量有很大的影响^[12,13]。然而，目前关于异构网络融合系统接纳控制算法研究的文献没有充分考虑异构网络之间不同的覆盖情形与布局方式，也很少有文献使用数学建模的方法来研究相互交叠覆盖的异构网络融合系统的容量^[14,15]。

本文提出了异构网络融合场景中基于负载传递的联合接纳控制（LJAC, load-transfer-based joint admission control）算法，该算法基于负载均衡接纳用户的接入请求，在异构网络交叠覆盖区域内引入业务的动态负载传递，充分考虑了异构网络之间的布局以及用户在不同网络之间垂直切换等因素的影响。使用多维马尔可夫链和标值点过程理论建立系统模型，针对多个异构网络相互交叠覆盖的融合场景，分析和推导基于 LJAC 算法的系统性能和满足 QoS 指标要求的系统容量上界，并且优化了接纳参数。理论分析与仿真结果表明，所提算法能实现更好的系统性能和更高的系统容量增益。

表 1 列出本文使用的数学符号及其含义。

表 1 数学符号及其含义

符号	含义
RAN- i	无线接入网络 i ($i=1, \dots, I$)
$R(A_m)$	子区域 A_m 中的接入请求能够接入的 RAN 集合
U	集合 $R(A_m)$ 中元素的个数
$A(R_i)$	RAN- i 覆盖范围内子区域的集合
$N(A_m)$	子区域 A_m 相邻区域的集合
N_i^{\max}	N_i^{\max} 中能够接纳的最大接入请求数目
N^{\max}	异构网络融合系统容量上界
N_r^{\max}	参考系统容量
N_{ij}^{\max}	子区域 A_j 中接入 RAN- i 的业务请求的最大数目
T_m	用户在每个子区域 A_m 的停留时间
$p^{j \rightarrow m}$	用户从子区域 A_j 进入 A_m 的概率
σ_m	用户在子区域 A_m 中的分布密度
η_m	用户在子区域 A_m 中的离开率
$E[H]$	接入请求的业务长度均值
μ_i	RAN- i 中业务的服务率
L_i	RAN- i 的当前负载状况
L_i^{th}	RAN- i 的负载门限
δ_i	RAN- i 中已接纳接入请求的传递率
G_i	RAN- i 中始发接入请求和被传递的接入请求的接纳阈值
N_i	RAN- i 中垂直切换请求的接纳阈值
n_{j_i}	区域 A_j 中接入到 RAN- i 的业务请求数目
$n_i(s)$	系统状态为 s 时, RAN- i 接纳的业务请求数目
λ_{om}	子区域 A_m 中始发接入请求的到达率
$\lambda_{oj,i}$	子区域 A_j 的始发接入请求进入 RAN- i 的到达率
$\lambda_{h(j \rightarrow m),k}$	用户从子区域 A_j 移动到 A_m 时, 垂直切换至 RAN- k 的到达率
γ_i	RAN- i 接纳的用户从子区域 A_j 移动到 A_m 时, 由于垂直切换失败导致的业务离开率
$\lambda_{ij,(i \rightarrow k)}$	子区域 A_j 中由 RAN- i 传递至 RAN- k 的接入请求到达率
$\lambda_{hj,i}$	进入 A_j 区域并垂直切换到 RAN- i 的业务请求到达率
λ_{oj}	始发接入请求进入区域 A_j 的平均到达率
λ_o	异构网络融合系统中始发接入请求的到达率
λ_0	单位面积的区域中业务的到达率
B_{oi}	始发请求接入 RAN- i 时的阻塞率
$B_{oa,j}$	始发接入请求进入区域 A_j 时的阻塞率
B_o	异构网络融合系统中始发接入请求的平均阻塞率
D_n	向 RAN- i 发出的垂直切换请求的阻塞率
$D_{n,j}$	向子区域 A_j 发出的垂直切换请求的阻塞率
D_n	异构网络融合系统中垂直切换平均失败率
\bar{S}_i	RAN- i 中用户的平均吞吐量
\bar{S}_{ij}	接纳至 RAN- i 的子区域 A_j 中用户的平均吞吐量
\bar{S}	异构网络融合系统中用户的平均吞吐量
P_{ij}	子区域 A_j 中接入到 RAN- i 的业务请求的网络饱和率
$\hat{P}_{b,j}$ 和 \hat{S}_j	子区域 A_j 中接入到 RAN- i 的业务请求的网络饱和率和平均吞吐量上界
\hat{B}_o 、 \hat{D}_n 和 \hat{S}	异构网络融合系统中始发接入请求的平均阻塞率上界、垂直切换失败率上界、吞吐量下界
$H_{N^{\max}}$	系统容 N_i^{\max} 量增益

2 异构网络融合场景

考虑相互交叠覆盖的异构网络融合场景，如图 1 所示。图 1(a)给出了异构网络融合的实际场景，在该场景中，公众蜂窝移动通信网络和无线局域网（WLAN, wireless local access network）等网络相互交叠覆盖。假设该场景中的移动终端均为多模终端，公众蜂窝移动通信网络提供了全局大范围的覆盖，WLAN 提供了热点区域的局部覆盖，并假设每个宏蜂窝具有相同的布局，因此，本文以一个宏蜂窝为例进行建模。图 1(b)给出了建模抽象场景。该场景中含有 I 个无线接入网络（RAN, radio access network），这些 RAN 相互交叠覆盖，并且其无线资源以集中的方式被联合管理。设给定的区域被分成 M 个互不相同的子区域 $A_m (m=1, \dots, M)$ ，子区域 A_m 中到达的接入请求能够接入的 RAN 的集合用 $R(A_m)$ 表示，且满足

$$R(A_m) \neq R(A_j), \forall m \neq j, m, j = 1, \dots, M \quad (1)$$

设 RAN- $i (i=1, \dots, I)$ 覆盖范围内子区域的集合为 $A(R_i)$ ，子区域 A_m 相邻区域的集合为 $N(A_m)$ 。设 N_i^{\max} 表示 RAN- i 中能够接纳的最大接入请求数目， $T_m (m=1, \dots, M)$ 表示用户在每个子区域的停留时间，其服从指数分布，均值为

$$E[T_m] = (\eta_m)^{-1} \quad (2)$$

假设用户从子区域 A_j 进入 A_m 的概率为 $p^{j \rightarrow m}$ [16]，用户在子区域 A_m 中的分布密度用 σ_m 表示。 L_i 表示

无线接入网 RAN- $i (i \in R(A_m))$ 的当前负载状况，其可以使用文献 [17,18] 的方法测量得到，集合 $R(A_m)$ 中的元素按 L_i 的升序排列，集合中元素的个数表示为

$$U = |R(A_m)| \quad (3)$$

相互交叠覆盖的异构网络融合场景中业务和接入请求的建模如表 2 所示。

表 2 相互交叠覆盖的异构网络融合场景中业务和接入请求的建模

类型	服从的分布	重要参数
子区域 A_m 中始发接入请求到达过程	泊松分布	到达率 λ_{om}
接入请求的业务长度	指数分布	均值 $E[H]$
RAN- i 中业务的服务时间	指数分布	服务率 μ_i [19]

3 基于负载传递的联合接纳控制算法

针对相互交叠覆盖的异构网络融合场景，本节提出基于负载传递的联合接纳控制算法，算法模型如图 2 所示。该算法的设计思路是对于到达的接入请求，将其能够接入的网络按照负载从低到高进行排序，优先选择负载较低的 RAN 进行接入，如果被拒绝，则选择其他负载较高的 RAN 接入；当某个无线接入网的负载高于门限值时，在该无线接入网与其他网络的交叠覆盖区域内引入业务的动态负载传递，将该高负载无线接入网中的部分业务传递至其他负载较低的网络中。

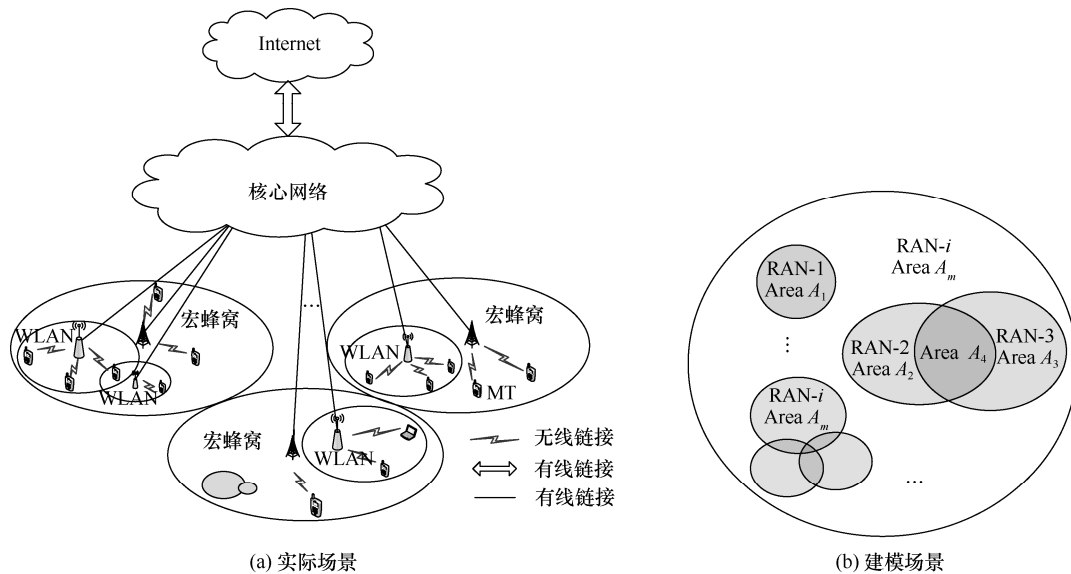


图 1 相互交叠覆盖的异构网络融合场景

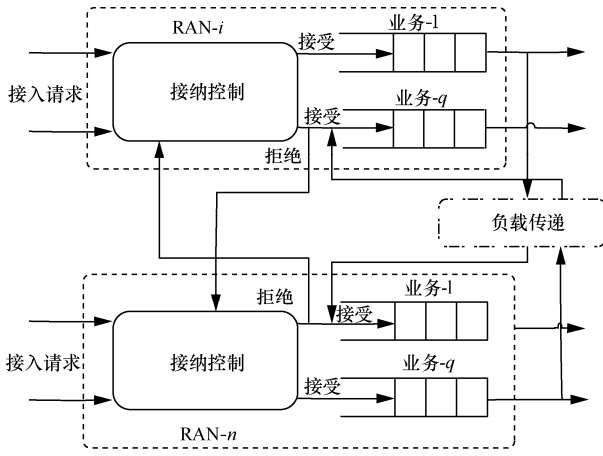


图 2 基于负载传递的联合接纳控制算法模型

当无线接入网 RAN- i ($i=1, \dots, I$) 的负载 L_i 高于门限 L_i^th 时, 则启动负载传递过程。事实上, 在不同的 RAN 之间的负载传递过程就是垂直切换过程, 该过程是由网络的负载状态而触发的, 发生在多个 RAN 的交叠覆盖区域内; 而由用户移动触发的垂直

切换则一般发生在网络覆盖的边缘。上述负载传递过程既可在紧耦合的异构网络融合系统中以集中控制的方式执行, 也可在松耦合的系统以分布式的方式执行^[20]。在本文中, 该过程以集中控制的方式执行。当系统检测到 RAN- i 的负载高于门限 L_i^th 时, 则通知 RAN- i 接入点或基站中的垂直切换模块, 进而 RAN- i 中正在承载业务的移动终端以概率 δ_i 向其所在区域中可以接入的其他负载较低的网络发起垂直切换请求。概率 δ_i 对于交叠区域资源的合理使用以及用户的服务质量保证都具有重要的影响, 因而需要进行合理的设置与优化, 第 5 节将详细介绍其优化过程。

基于负载传递的联合接纳控制算法的详细流程如图 3 所示。到达异构网络子区域 A_j 的接入请求分为始发接入请求、垂直切换请求和被传递的接入请求 3 类。垂直切换请求是当用户从区域 A_j 移动到 $A_m(m \in N(A_j))$ 时, 向覆盖 A_m 的其他网络发出的切换

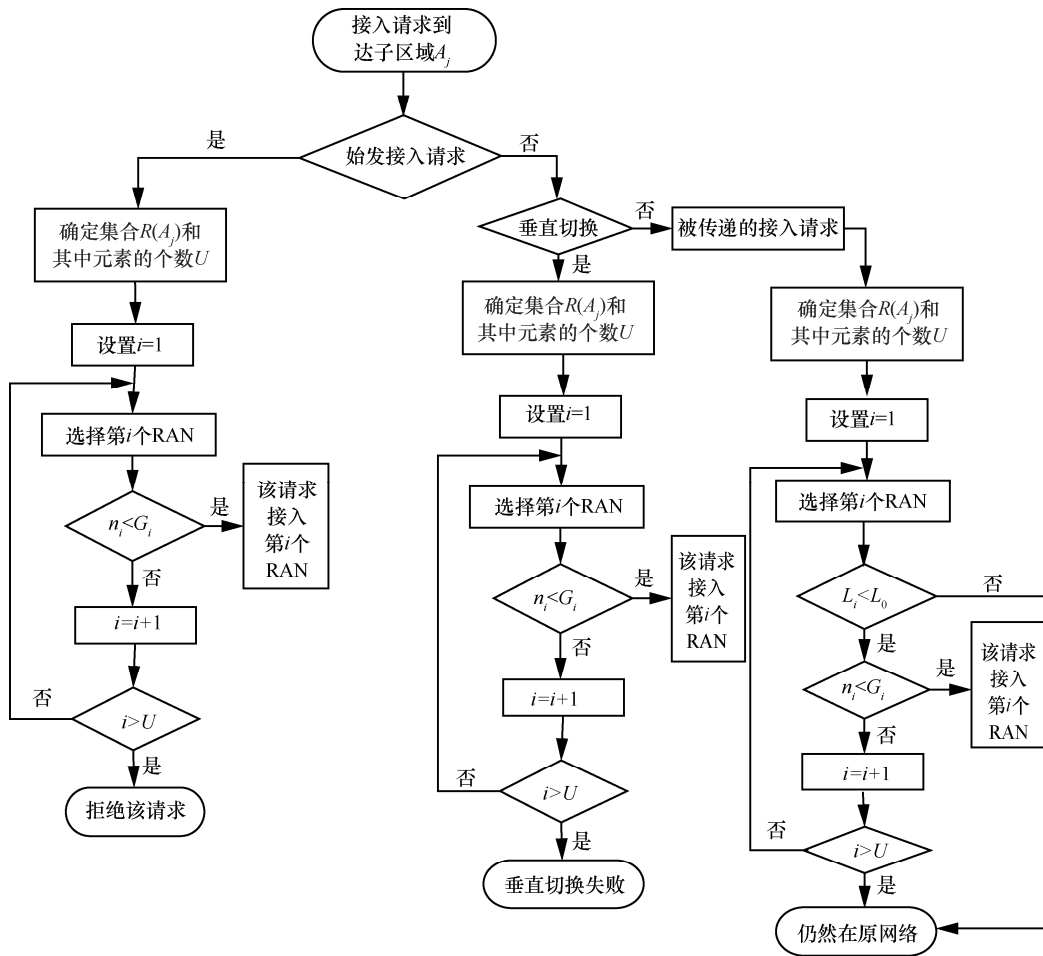


图 3 基于负载传递的联合接纳控制算法流程

请求。被传递的接入请求是当无线接入网络 RAN- i 的负载 L_i (高于门限 L_i^h)，将该网络内已接纳的业务传递到其覆盖范围内可以接入的负载较低的其他网络时，所发出的接入请求。

本文赋予 RAN- i 中到达的垂直切换更高的优先级，设置始发接入请求和被传递的接入请求的阈值为 G_i ($G_i \leq N_i^{\max}$)，其中 N_i^{\max} 为 RAN- i 的容量上界。当接入请求到达子区域 A_j 时，首先判断是否为始发接入请求，如果是始发接入请求，则优先选择集合 $R(A_j)$ 中负载最低的 RAN- i ($i \in R(A_j)$) 进行接入，如果正在进行的业务数量 n_i 达到了阈值 G_i ，那么就选择集合 $R(A_j)$ 中其他有更高负载量的 RAN 接入；如果 $R(A_j)$ 中所有的 RAN 都无法接纳该请求，则该接入请求被拒绝。当接入请求为垂直切换请求时，则优先选择 $R(A_j)$ 中负载最低的 RAN- i 进行接入，如果正在进行的业务数量 n_i 达到了接纳阈值 N_i ($N_i \leq N_i^{\max}$)，那么就选择集合 $R(A_j)$ 中其他有更高负载量的 RAN 接入；如果 $R(A_j)$ 中所有的 RAN 都无法接纳该请求，则该垂直切换失败。当接入请求为由负载传递所引起的接入请求时，则将可接入的 RAN- i ($i \in R(A_j)$) 中的负载 L_i 与请求消息中携带的原网络的负载 L_0 进行比较，来决定是否进行接入或保留在原网络。

4 系统性能分析

本节首先给出异构网络融合系统模型，然后推导重要的服务质量指标，包括始发接入请求阻塞率、垂直切换请求的失败率和用户平均吞吐量。接着基于泊松点过程理论，分析满足 QoS 限制时的异构网络容量上界。

4.1 多维马尔可夫模型与状态转移

将异构网络融合系统建模为多维马尔可夫链，

系统状态 s 表示为

$$s = (n_{11}, \dots, n_{j1}, \dots, n_{M1}, \dots, n_{1i}, \dots, n_{ji}, \dots, n_{Mi}, \dots, n_{1I}, \dots, n_{jI}, \dots, n_{MI}) \quad (4)$$

其中，非负整数 n_{ji} ($j=1, \dots, M, 1 \leq i \leq I$) 表示在区域 A_j 中接入 RAN- i 的业务请求数目。当系统状态为 s 时，RAN- i 接纳的业务请求总数为

$$n_i(s) = \sum_{j \in A(R_i)} n_{ji} \quad (5)$$

则多维马尔可夫链的状态空间 S 为

$$S = \{s | 0 \leq n_i(s) \leq N_i^{\max}, i=1, \dots, I\} \quad (6)$$

假设当前状态为 s ，则在不同的事件触发下，系统从状态 s 到后续状态 s' 的转移过程如图 4 所示。

从图 4 可以看出，5 种事件会导致多维马尔可夫链的状态发生转移，分别是始发接入请求被接纳、业务完成、垂直切换请求被接纳、垂直切换失败、被传递的接入请求被接纳。当某始发接入请求到达子区域 A_j 时，由于该区域可能被多个网络覆盖，该业务请求接入其中一个网络 RAN- i ($i \in R(A_j)$)。因而，进入 RAN- i 的接入请求到达率为

$$\lambda_{oj,i} = \alpha_{ji} \lambda_{oj} \quad (7)$$

其中， λ_{oj} 为子区域 A_j 的始发接入请求到达率，比例因子 α_{ji} 满足 $\sum_{i \in R(A_j)} \alpha_{ji} = 1$ 。由于提出的接纳控制算

法根据网络的负载情形决定将接入请求接纳至某个网络，因而，比例因子计算式为

$$\alpha_{ji} = 1 - \frac{L_i}{\sum_{i \in R(A_j)} L_i} \quad (8)$$

当被 RAN- i ($i \in R(A_j)$) 接纳的用户从区域 A_j 移动到相邻区域 A_m ($m \in N(A_j)$) 时会发生垂直切换。由于 A_m 可能被多个网络覆盖，则垂直切换到其中一个网络 RAN- k ($k \in R(A_m)$) 的接入请求到达率为

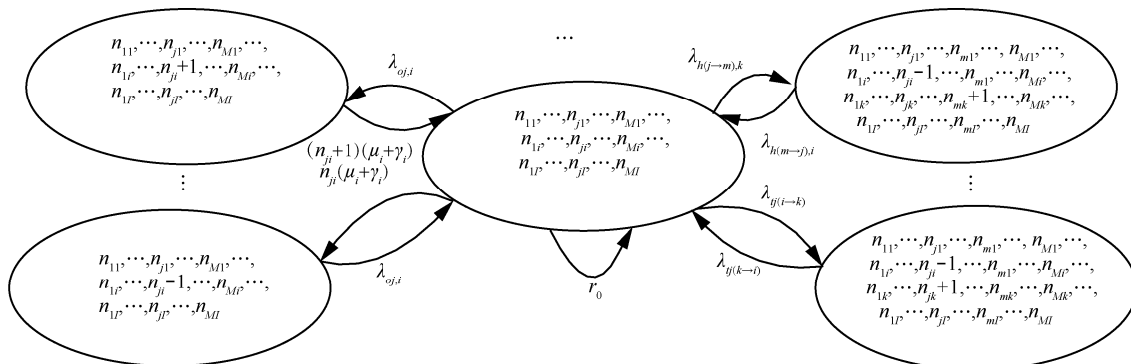


图 4 多维马尔可夫链的状态转移

$$\lambda_{h(j \rightarrow m),k} = E[n_{ji}] \eta_j p^{j \rightarrow m} \beta_{(j \rightarrow m),k} \quad (9)$$

其中, 接入 RAN- k 的比例因子 $\beta_{(j \rightarrow m),k}$ 满足

$$\beta_{(j \rightarrow m),k} = 1 - \frac{L_k}{\sum_{k \in R(A_m)} L_k} \text{ 且 } \sum_{k \in R(A_m)} \beta_{(j \rightarrow m),k} = 1 \quad (10)$$

当用户从子区域 A_j 移动到相邻区域 A_m 时, 若从 RAN- i ($i \in R(A_j)$) 到覆盖 A_m 的所有 RAN- k ($k \in R(A_m), i \notin R(A_m)$) 的垂直切换均失败, 则进行中的业务离开系统, 离开率为

$$\gamma_i = E[n_{ji}] \eta_j p^{j \rightarrow m} \prod_{k \in R(A_m)} \beta_{(j \rightarrow m),k} \quad (11)$$

当无线接入网 RAN- i ($i \in R(A_j)$) 的负载高于事先设置的门限时, 系统会启动负载传递过程, 将处于子区域 A_j 并已经接入 RAN- i 的业务切换到覆盖该子区域的其他无线接入网 RAN- k ($k \in R(A_j), k \neq i$) 中。则子区域 A_j 中由 RAN- i 传递至 RAN- k 的接入请求到达率为

$$\lambda_{y,(i \rightarrow k)} = \omega_{jk} (\lambda_{oj,i} + \lambda_{h(m \rightarrow j),i}) \delta_i \quad (12)$$

其中, 比例因子 $\omega_{jk} = 1 - \frac{L_k}{\sum_{k \in R(A_j), k \neq i} L_k}$ 。

状态转移率 $r_0 = r(s, s)$ 的计算式为

$$r(s, s) = - \sum_{s' \neq s, s \in S, s' \in S} r(s, s') \quad (13)$$

使用图 4 列出的状态转移率和 $r(s, s)$, 可以得到多维马尔可夫链的生成矩阵 \mathbf{R} 。稳态概率矢量 \mathbf{II} 可以通过求解等式 $\mathbf{IIe} = 1$ 和 $\mathbf{II}\mathbf{R} = 0$ 得到, 其中, \mathbf{e} 和 $\mathbf{0}$ 分别是全 1 和全 0 的矢量。通过数值方法求解等式, 就可以获得多维马尔可夫链的稳态概率 π_s [21], 进而可以推导异构网络融合系统的各项 QoS 性能指标。

4.2 QoS 性能分析

本节针对相互交叠覆盖的异构网络融合的典型场景, 对所提基于负载传递的联合接纳控制算法进行性能分析, 推导重要的服务质量指标, 包括始发接入请求阻塞率、垂直切换请求失败率、用户平均吞吐量等。

1) 始发接入请求阻塞率

B_{oi} 表示始发请求接入 RAN- i 时被阻塞的概率, 由多维马尔可夫模型的稳态概率 π_s 计算得出

$$B_{oi} = \sum_{s \in B_i} \pi_s, B_i = \{s | G_i \leq n_i(s) \leq N_i^{\max}\}, \quad i = 1, \dots, I \quad (14)$$

$B_{oa,j}$ 表示始发接入请求进入区域 A_j 被阻塞的概率, 由式(15)计算得

$$B_{oa,j} = \prod_{i \in R(A_j)} B_{oi}, \quad j = 1, \dots, M \quad (15)$$

则异构网络中始发接入请求的平均阻塞率为

$$B_o = \frac{\sum_{j=1}^M B_{oa,j} \lambda_{oj}}{\sum_{j=1}^M \lambda_{oj}} \quad (16)$$

其中, λ_{oj} 为始发接入请求进入区域 A_j 的平均到达率。

2) 垂直切换请求失败率

向 RAN- i 发出的垂直切换请求被阻塞的概率为

$$D_{hi} = \sum_{s \in D_i} \pi_s, D_i = \{s | N_i \geq n_i(s) \geq N_i^{\max}\}, \quad i = 1, \dots, I \quad (17)$$

向子区域 A_j 发出的垂直切换请求被阻塞的概率为

$$D_{ha,j} = \prod_{i \in R(A_j)} D_{hi}, j = 1, \dots, M \quad (18)$$

则异构网络中垂直切换平均失败概率可以表示为

$$D_h = \frac{\sum_{m=1}^M D_{ha,m} \sum_{j \in N(A_m)} \sum_{k \in R(A_m)} \lambda_{h(j \rightarrow m),k}}{\sum_{m=1}^M \sum_{j \in N(A_m)} \sum_{k \in R(A_m)} \lambda_{h(j \rightarrow m),k}} \quad (19)$$

3) 用户平均吞吐量

RAN- i 中用户的平均吞吐量为

$$\bar{S}_i = \frac{\sum_{j \in A(R_i)} \int_{A_j} \int_{r_1}^{r_2} R'_i(r_i) \sigma_j dA_j dr_i}{E[n_i]} \quad (20)$$

其中, r_{i1} 和 r_{i2} 表示 A_j 区域距离 RAN- i 的基站或接入点的最近和最远距离。式(20)中的信息传输速率 $R'_i(r_i)$ 为

$$R'_i(r_i) = \sum_{j \in A(R_i)} [\lambda_{oj,i} (1 - B_{oi}) + \lambda_{hj,i} (1 - D_{hi})] E[H] \quad (21)$$

其中, $\lambda_{hj,i}$ 是进入 A_j 区域并垂直切换到 RAN- i 的业务请求到达率, 计算式为

$$\lambda_{hj,i} = \sum_{m \in N(A_j)} \lambda_{h(m \rightarrow j),i} \quad (22)$$

式(22)考虑了 RAN- i 中的业务负载, 包括接入 RAN- i 的始发请求和垂直切换请求。

接纳至 RAN- i 的子区域 A_j 中用户的平均吞吐量为

$$\bar{S}_{ij} = \int_{A_j} \int_{r_i=r_{i1}}^{r_{i2}} \frac{R_i'(r_i) \sigma_j dA_j dr_i}{E[n_{ij}]} \quad (23)$$

则异构网络融合系统中所有用户的平均吞吐量为

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^I S_i E[n_i]}{\sum_{i=1}^I E[n_i]} \quad (24)$$

4.3 容量分析

定义异构网络容量为满足各个网络要求的 QoS 指标限制时，各网络能接纳的最大用户数^[22]，即 RAN- i ($i=1, \dots, I$) 的容量上界为

$$N_i^{\max} = \sum_{j \in A(R_i)} N_{ij}^{\max} \quad (25)$$

其中， N_{ij}^{\max} 为子区域 A_j 中接入 RAN- i 的业务请求的最大数目。

RAN- i 中业务请求的到达形成泊松过程， $x_n \in R^1$ 是每个业务请求到达 RAN- i 的时间。标值 $y_n \in R^1$ 表示到达 RAN- i 的每个接入请求在当前子区域的信道保持时间，若子区域为 A_j ($j \in A(R_i)$)，则满足

$$E[y_n] = (\mu_i + \eta_j)^{-1} \quad (26)$$

其中，标值 y_n 为相互独立同分布的随机变量，并且独立于 RAN- i 中业务请求的到达。由于用户在子区域的停留时间服从指数分布，业务请求在 RAN- i 中的服务时间服从指数分布，所以业务请求在当前子区域的信道保持时间 y_n 也服从指数分布。标值 $z_n \in R^1$ 表示到达的业务请求所处的子区域，对于所有的 $n \geq 1$ ，满足 $z_n \in A(R_i)$ 。下标 n 表示到达 RAN- i 的接入请求数目。随机过程 $n_{ij}(t)$ 表示时刻 t 在区域 A_j 中接入 RAN- i 的正在进行的业务请求数目，根据文献[23]中的定义可知，其为滤过泊松过程。 $n_{ij}(t)$ 的计算式为

$$n_{ij}(t) = \sum_{n \geq 1} w_j(t - x_n, y_n, z_n = j) = \sum_{n \geq 1} w_j(t - x_n, y_n) \quad (27)$$

其中，

$$w_j(t - x_n, y_n) = \begin{cases} 1, & 0 < t - x_n \leq y_n \\ 0, & t - x_n \leq 0 \text{ 或 } t - x_n > y_n \end{cases} \quad (28)$$

子区域 A_j 中的业务请求到达 RAN- i 的过程也可建模为分布在空间 $R^1 \times R^1 \times R^1$ 上的标值点过程

$\bar{\Phi} = \{(x_n, y_n, z_n), n \geq 1\}$ 。标值点过程 $\bar{\Phi}$ 是强度为 Λ_{ij} 的泊松点过程（证明见附录定理 1），且强度 Λ_{ij} 可以表示为

$$\Lambda_{ij} = (\mu_i + \eta_j)^{-1} (\lambda_{oj,i} + \lambda_{nj,i}) \quad (29)$$

由于标值点过程 $\bar{\Phi}$ 是泊松点过程，可以根据泊松点过程的集中不等式推导网络容量上界^[24,25]。而根据标值点过程定义可知，标值点过程是一类特殊的滤过泊松过程^[23]。因此，在推导容量上界时可以利用滤过泊松过程的性质。

考虑网络饱和率为计算网络容量时需要满足的一个 QoS 指标，可表示为

$$P_{b,ij} = P(\bar{n}_{ij} \geq N_{ij}^{\max}) \quad (30)$$

其中，

$$\begin{aligned} \bar{n}_{ij} &= \lim_{t \rightarrow \infty} n_{ij}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \int w_j d\bar{\Phi} \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{n \geq 1} w_j(t - x_n, y_n) \end{aligned} \quad (31)$$

由于 $w_j(t - x_n, y_n) : R^1 \times R^1 \rightarrow R^1$ 是可测非负函数，且有界，即

$$|w_j(t - x_n, y_n)| \leq \omega \quad (32)$$

其中， ω 为 $w_j(t - x_n, y_n)$ 的上界， $\omega = 1$ 。因此满足泊松点过程集中不等式的条件^[24,25]，即

$$P(\bar{n}_{ij} \geq N_{ij}^{\max}) \leq \exp \left(-\frac{E[n_{ij}^2]}{\omega^2} g \left(\frac{(N_{ij}^{\max} - E[n_{ij}])\omega}{E[n_{ij}^2]} \right) \right) \quad (33)$$

其中， $\omega = 1$ ， $g(x) = (1+x)\ln(1+x) - x$ 。为方便起见，把式(33)的右边部分表示为 $P_{u,ij}$ 。 $E[n_{ij}]$ 和 $E[n_{ij}^2]$ 的详细推导过程见附录定理 2。

本文使用吞吐量为计算网络容量时需要满足的另一个 QoS 指标。则 RAN- i ($i=1, \dots, I$) 的 QoS 限制 $\hat{P}_{b,ij}$ 和 \hat{S}_{ij} 都满足时异构网络容量上界 N_i^{\max} 的确定过程如下。

步骤 1 设置 N_{ij}^{\max} ($i=1, \dots, I, j=1, \dots, |A(R_i)|$) 的初始值。

步骤 2 对 $i=1, j=1$ ，根据附录的运算过程计算 $E[n_{ij}]$ 和 $E[n_{ij}^2]$ ，根据式(33)计算 $P_{u,ij}$ 。

步骤 3 比较 $P_{u,ij}$ 和 $\hat{P}_{b,ij}$ ，如果 $P_{u,ij}$ 大于 $\hat{P}_{b,ij}$ ，设置 N_{ij}^{\max} 增加 1，重复步骤 2 直到 N_{ij}^{\max} 满足 $P_{u,ij}$ 小于或等于 $\hat{P}_{b,ij}$ ；否则设置 N_{ij}^{\max} 减少 1，重复步骤 2 直到 $P_{u,ij}$ 大于 $\hat{P}_{b,ij}$ ，停止减小 N_{ij}^{\max} 并令 N_{ij}^{\max} 增加 1。

步骤 4 根据式(11)计算 \bar{S}_{ij} , 如果 \bar{S}_{ij} 大于或等于 \hat{S}_{ij} , 令 N_{ij}^{\max} 增加 1, 直到 \bar{S}_{ij} 小于 \hat{S}_{ij} , 则停止增加 N_{ij}^{\max} 并令 N_{ij}^{\max} 减少 1; 否则, 返回步骤 1 重新搜索。

步骤 5 对 $j=2, \dots, |A(R_i)|$, 使用步骤 2~步骤 4 的方法确定满足 $\hat{P}_{b,ij}$ 和 \hat{S}_{ij} 限制的 N_{ij}^{\max} 。然后根据式(25)计算 N_i^{\max} 。

步骤 6 对 $i=2, \dots, N$, 使用步骤 2~步骤 5 的方法确定 N_i^{\max} 。

5 LJAC 算法接纳参数优化

在异构网络融合系统中, 接入请求应该通过接纳参数的优化而被恰当地分配到各 RAN 中。因为不同的无线接入网具有不同的 QoS 支持能力和资源共享策略, 各个 RAN 接纳域的配置对于整个系统的性能有重要的影响。对于 LJAC 算法, 可以得到接纳参数 $(N_i, G_i, \delta_i, i=1, \dots, I)$ 的最优配置, 以最大化异构网络融合系统的资源使用率, 同时保证用户的 QoS。

令 \hat{B}_o 、 \hat{D}_h 和 \hat{S} 分别表示异构网络融合系统中始发接入请求阻塞概率的上界、垂直切换失败概率的上界和吞吐量的下界。接纳参数的优化可以表示如下。

目标函数: $\max \lambda_o$

$$\text{约束条件: } B_o \leq \hat{B}_o, D_h \leq \hat{D}_h, \bar{S} \geq \hat{S}, i=1, \dots, I \quad (34)$$

其中, λ_o 是到达异构网络融合系统始发接入请求的到达率, 可以表示为

$$\lambda_o = \sum_{i=1}^I \sum_{j \in A(R_i)} \lambda_{oj,i} \quad (35)$$

λ_o 的最大化意味着系统中总的能够接纳的业务负载的最大化, 也意味着系统资源利用率的最大化。算法 1 总结了决定接纳参数 $(N_i, G_i, \delta_i, i=1, \dots, I)$ 的详细过程。在接纳参数的优化过程中, 首先推导满足吞吐量和网络饱和率限制的每个 RAN 的容量上界 N_i^{\max} ($i=1, \dots, I$), 然后在 $[0, N_i^{\max}]$ ($i=1, \dots, I$) 的范围内迭代搜索满足异构网络融合系统始发接入请求阻塞概率、垂直切换失败概率和吞吐量要求的接纳参数。在最优接纳参数的每一次搜索循环中, 当 λ_o 收敛时, 满足 QoS 要求的接纳参数和 λ_o 被记录下来。最后, 输出使 λ_o 最大化的接纳参数 $(N_i, G_i, \delta_i, i=1, \dots, I)$ 。

算法 1 LJAC 算法接纳参数优化过程

```

1) for  $i=\{1, 2, \dots, I\}$  do
2)   根据 4.3 节推导 QoS 限制  $\hat{P}_{b,ij}$  和  $\hat{S}_{ij}$  都满足时无线接入网络 RAN- $i$  容量上界  $N_i^{\max}$ 
3) end for
4) for  $n_1=0$  to  $N_1^{\max}$  do
      :
5)   for  $n_I=0$  to  $N_I^{\max}$  do
6)     初始化  $\lambda_{o,\min}$  和  $\lambda_{o,\max}$ 
7)      $\lambda_o = \frac{\lambda_{o,\min} + \lambda_{o,\max}}{2}$ 
8)      $l_r=0$ 
9)     loop
10)      确定最优的满足  $B_o \leq \hat{B}_o$ ,  $D_h \leq \hat{D}_h$ ,  $\bar{S} \geq \hat{S}$  的  $(G_i, \delta_i, i=1, \dots, I)$ 
11)      if  $(G_i, \delta_i, i=1, \dots, I)$  存在, then
12)         $\lambda_{o,\min} = \lambda_o$ 
13)         $\lambda_o = \frac{\lambda_{o,\min} + \lambda_{o,\max}}{2}$ 
14)      else
15)         $\lambda_{o,\max} = \lambda_o$ 
16)         $\lambda_o = \frac{\lambda_{o,\min} + \lambda_{o,\max}}{2}$ 
17)      end if
18)      if  $\lambda_o$  收敛, then
19)        for  $i=\{1, 2, \dots, I\}$  do
20)           $N_i = n_i$ 
21)        end for
22)        记录  $(N_i, G_i, \delta_i, i=1, \dots, I)$ 
        以及  $\lambda_o$  的值
23)         $l_r = l_r + 1$ 
24)      end if
25)      if  $l_r \neq 0$  then
26)        exit loop
27)      end if
28)    end loop
29)  end for
      :
30) end for
31) 输出使  $\lambda_o$  最大化且能满足 QoS 要求的接纳参数  $(N_i, G_i, \delta_i, i=1, \dots, I)$ 

```

6 仿真结果与讨论

本节评估 LJAC 算法性能，将 LJAC 算法与已有的异构网络融合场景中的无联合接纳控制 (NJAC, non-joint admission control) 算法以及联合组群接纳控制 JGAC 算法^[7]进行分析比较。重点分析与讨论公众蜂窝移动通信网络和无线局域网的交叠覆盖情形下始发接入请求阻塞率、垂直切换请求的失败率以及满足 QoS 指标时的系统容量。在 NJAC 算法中，每个 RAN 分别根据始发接入请求阻塞率、垂直切换请求失败率和吞吐量的限制对用户的接入请求进行接纳决策。在 JGAC 算法中，首先根据负载平衡策略确定分配到每个网络的用户数目，然后以最大化总用户满意度为目标确定将每个用户分配到合适的网络。

本文以通用移动通信系统 (UMTS, universal mobile telecommunications system) 和 IEEE 802.11b 无线局域网的融合为例，研究公众蜂窝移动通信网络和无线局域网融合的多种交叠覆盖情形，如图 5 所示。需要注意的是，尽管以 UMTS 和 IEEE 802.11b WLAN 为例进行了算法仿真研究，但提出的 LJAC 算法也同样适用长期演进 (LTE, long term evolution) 等其他公众蜂窝移动通信网络和 IEEE 802.11g 等 WLAN 网络。在图 5(a)中，UMTS 的基站和 WLAN-1 的 AP、WLAN-2 的 AP 处于相同的位置，称为共同覆盖场景 (co-located scenario)，该场景在 UMTS/WLAN 融合的紧耦合系统中比较常见。图 5(c)中，UMTS 的小区范围内离散地分布着 2 个 WLAN 小区，这 2 个 WLAN 小区彼此不相交，此场景称为离散覆盖场景 (isolated scenario)。图 5(b)的覆盖情形介于图 5(a)和图 5(c)之间，在该场景中，UMTS 的小区范围内分布着 2 个相交的 WLAN 小

区，称为相交覆盖场景 (overlapping scenario)。设 UMTS 小区、WLAN-1 小区和 WLAN-2 小区的形状都为圆形，UMTS 小区半径是 500 m，WLAN-1 小区半径为 50 m，WLAN-2 小区半径是 10 m。图 5(b)和图 5(c)中，2 个 WLAN 接入点之间的距离分别是 50 m 和 70 m。考虑 UMTS 系统中一个小区的覆盖区域为研究区域，在某个子区域中的用户以相同的概率移动到其他相邻子区域，子区域 $A_j(j=1, \dots, M)$ 中的业务到达率满足

$$\lambda_{oj} = \int_{A_j} \sigma_j \lambda_0 dA_j \quad (36)$$

其中， σ_j 为用户在子区域 A_j 中的分布密度， λ_0 为单位面积的区域中业务的到达率。重要的仿真参数如表 3 所示。

表 3 仿真参数

参数	取值
UMTS 的最大发射功率/W	20
UMTS 的载波带宽/MHz	5
WLAN 带宽/MHz	22
WLAN 的发射功率/mW	100
UMTS 的传播模型中路径损耗指数	3.52
UMTS 的传播模型中阴影衰落的方差/dB	8
WLAN 传播模型中的衰减/(dB·m ⁻¹)	0.3
WLAN 的传播模型中阴影衰落的方差/dB	3
业务请求的平均呼叫长度 E[H]/KB	64
UMTS 的业务服务时间(μ_1) ⁻¹ /min	3
WLAN1 和 WLAN2 的业务服务时间(μ_2) ⁻¹ , (μ_3) ⁻¹ /min	1
单位面积的区域中业务的到达率 λ_0 /(min ⁻¹ ·m ⁻²)	0.000 1

本文首先以离散覆盖场景为例分析 RAN-1 中已接纳接入请求的传递概率 δ_1 随系统中业务负载的变化情况。图 6(a)为用户在 WLAN-1 区域的离开

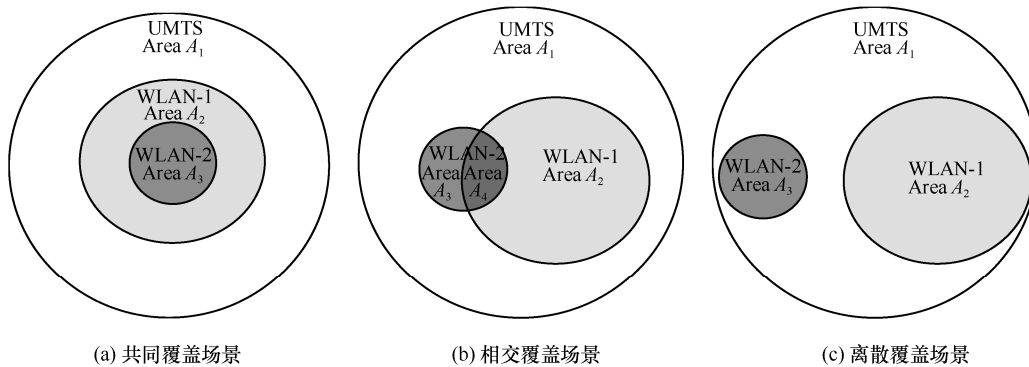
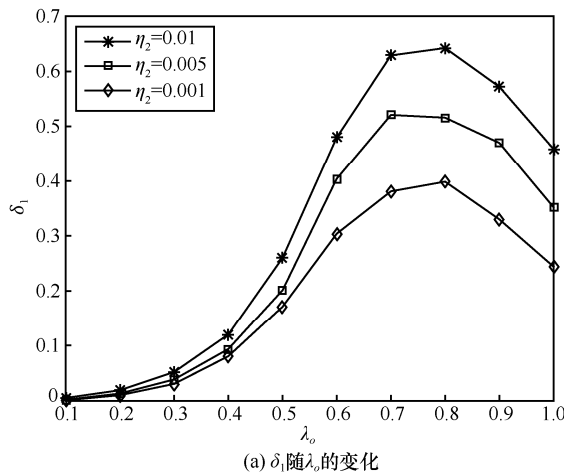
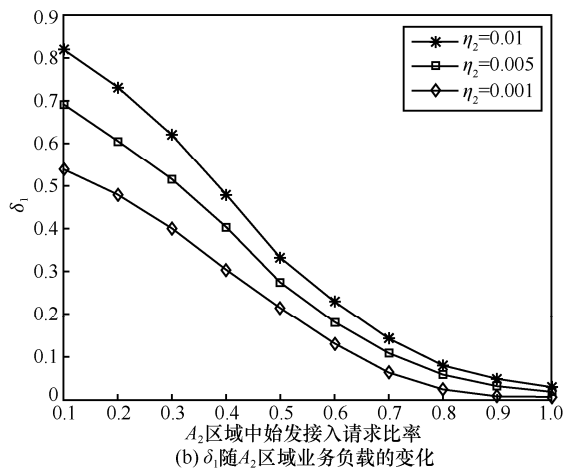


图 5 不同的 UMTS/WLAN-1/WLAN-2 交叠覆盖场景

率 η_2 改变时, δ_1 随 λ_o 的变化情况。从图 6(a)可以看出, 当 λ_o 开始增大时, δ_1 随之增大并达到最大值, 当 λ_o 继续增大, 则 δ_1 减小。这是因为随着系统中到达的接入请求增加, UMTS 中的负载增加, 位于 WLAN-1 和 WLAN-2 区域的更多的业务请求被传递到 WLAN-1 或 WLAN-2 中, 但是随着 λ_o 的继续增大, 由于本身的容量限制, WLAN-1 和 WLAN-2 不能接纳更多的传递请求, 因而 δ_1 减少。从图 6(a)还可以看出, 当固定 λ_o 且 η_2 增大时, δ_1 也增加。这是因为 η_2 增大时用户在 WLAN-1 区域的停留时间减小, 更多的用户停留在区域 A_1 , 增加了 UMTS 的负载, 因而 δ_1 增大以平衡系统中接入各 RAN 的负载。



(a) δ_1 随 λ_o 的变化



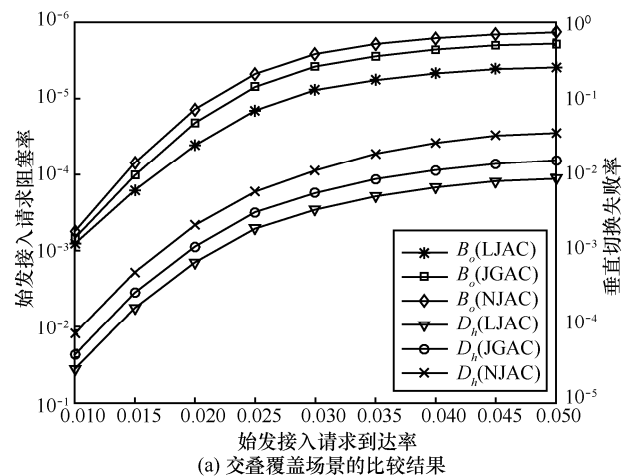
(b) δ_1 随 A_2 区域业务负载的变化

图 6 RAN-1 中已接纳接入请求的传递概率随业务负载的变化情况

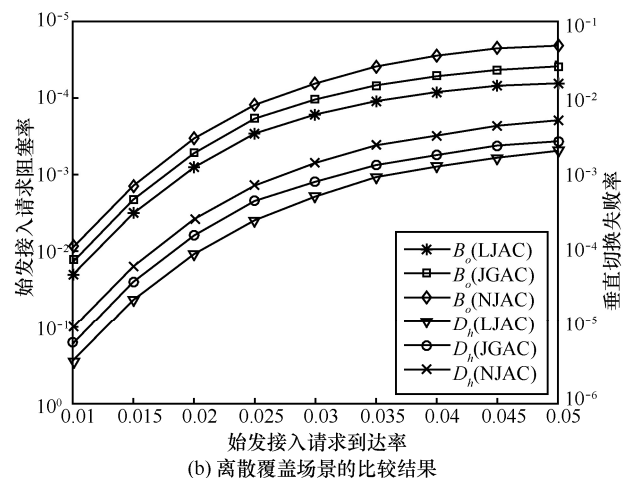
图 6(b)给出了 δ_1 随 A_2 区域业务负载的变化情况。从图 6(b)可以看出, 当 A_2 区域中的始发接入请求比率增加时, δ_1 减少。这是因为当 A_2 区域中的始发接入请求比率较小时, 进入 UMTS 区域中的接入请求较多, 增加了 UMTS 的负载, 则 δ_1 较大, 以

传递接入请求至 WLAN-1 或 WLAN-2; 而随着 A_2 区域中的始发接入请求比率增加, WLAN-1 容纳了更多的接入请求, 负载增加了, 则不能接纳更多的传递接入请求, 因此, δ_1 减少。

图 7(a)和图 7(b)分别表示交叠覆盖与离散覆盖场景中, 始发接入请求到达率 λ_o 变化时始发接入请求阻塞率 B_o 和垂直切换失败概率 D_h 的值。从图 7 可以看出, 在 2 种覆盖场景中, 提出的 LJAC 算法的 B_o 和 D_h 均低于 NJAC、JGAC 算法。例如, 当 $\lambda_o=0.03$ (即每秒 0.03 个呼叫) 时, 在交叠覆盖场景中, 提出的 LJAC 算法与 NJAC、JGAC 算法相比, B_o 减少了 66.31%和 50.87%, D_h 减少了 69.51%和 39.55%; 在离散覆盖场景中, B_o 减少了 60.63%和 36.40%, D_h 减少了 63.67%和 35.92%。这是因为基于负载传递的联合接纳控制算法有效地平衡了 3 个 RAN 中的业务负载, 始发接入请求和垂直切换请求有更好的机会保持连接, 从而导致了更低的 B_o 和 D_h 。JGAC 算法虽然基于负载平衡决定分配到不同 RAN 的用户数,



(a) 交叠覆盖场景的比较结果



(b) 离散覆盖场景的比较结果

图 7 始发接入请求阻塞率和垂直切换失败率比较结果

然而在为每个用户选择目标网络时以最大化所有用户的总满意度为目标，没有考虑接纳到 RAN 中的用户的阻塞率、垂直切换失败率等 QoS 需求。而 NJAC 算法由于每个 RAN 分别根据各自的 QoS 限制对用户的接入请求进行接纳决策，没有考虑异构网络之间的负载平衡，使用户的 QoS 不能得到有效保证，导致其 B_o 和 D_h 最高。

在系统容量的仿真中，考虑 UMTS/WLAN-1/WLAN-2 融合系统容量增益 $H_{N_{max}}$ ，定义为

$$N_{N_{max}} = \frac{N^{max} - N_r^{max}}{N^{max}} \quad (37)$$

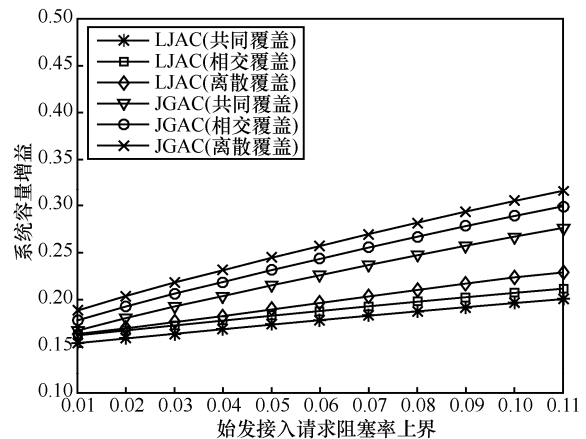
其中， N^{max} 为异构网络融合系统容量上界，计算式为

$$N^{max} = \sum_{i=1}^I N_i^{max} \quad (38)$$

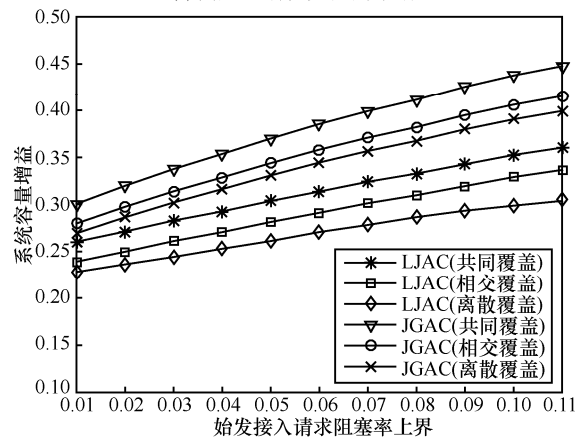
设 N_r^{max} 为参考系统容量，由文献[26]计算获得。图 8(a)显示了融合系统内用户均匀分布时，容量增益随阻塞率限制 \hat{B}_o 的变化情况，并且平均吞吐量下界 $\hat{S} = 500$ kbit/s。从图 8(a)可以看出，在 LJAC 和 JGAC 这 2 种接纳控制算法下，离散覆盖场景的系统容量增益都为最大，共同覆盖场景的系统容量增益最小，而相交覆盖场景的系统容量增益则介于两者之间。这是因为在相交覆盖场景中，子区域 A_1 中的用户只能选择 UMTS 进行接入，子区域 A_2 中的用户能选择 UMTS 或 WLAN-1 进行接入，子区域 A_3 中的用户能选择 UMTS 或 WLAN-2 进行接入，而子区域 A_4 中的用户能选择 UMTS、WLAN-1 或 WLAN-2 进行接入。用户可以选择接入的网络越多，被阻塞的概率就越低。因此，当用户在系统内均匀分布时，子区域 A_1 中的业务请求阻塞成为系统容量的主要限制因素。离散覆盖场景中子区域 A_1 的面积小于相交覆盖场景，而相交覆盖场景中子区域 A_1 的面积又小于共同覆盖场景。所以，离散覆盖场景中子区域 A_1 内的用户数目最少，系统内用户被阻塞的平均概率也就最低，该场景下系统容量增益最大。

图 8(b)显示了融合系统内用户非均匀分布时，容量增益随阻塞率限制 \hat{B}_o 的变化情况，并且平均吞吐量限制 $\hat{S} = 500$ kbit/s。图 8(b)考虑了融合系统内用户在热点区域的分布密度高于其他区域的情形，设 60% 的业务到达 WLAN-2 覆盖区域，其他 40% 的业务到达均匀分布在 UMTS 小区内 WLAN-2 覆

盖范围以外的区域。从图 8(b)可以看出，在 LJAC 和 JGAC 这 2 种接纳控制算法下，共同覆盖场景的系统容量增益均为最大，离散覆盖场景的系统容量增益最小，而相交覆盖场景的系统容量增益则介于两者之间。当用户非均匀分布时，系统中的大部分用户处于 WLAN-2 和 UMTS 都能覆盖到的区域内，WLAN-2 覆盖区域内的业务请求阻塞成为系统容量的主要限制因素。因此，当 WLAN-2 覆盖区域内有最多的资源可用时，系统容量达到最大。在共同覆盖场景中，WLAN-2 区域内的业务请求可以接入 UMTS、WLAN-1 和 WLAN-2 这 3 种网络，因此，该区域内业务请求的可用资源最多，融合系统容量增益达到最大。对于离散覆盖场景，WLAN-2 区域内的业务请求只能接入 WLAN-2 和 UMTS，相交覆盖场景中 WLAN-2 区域内处于 A_4 子区域的部分业务请求能接入 WLAN-1、WLAN-2 和 UMTS 这 3 种网络，因此，离散覆盖场景的系统容量增益最小，相交覆盖场景的系统容量增益介于共同覆盖场景和离散覆盖场景之间。



(a) 用户均匀分布时的系统容量增益



(b) 用户非均匀分布时的系统容量增益

图 8 融合系统容量增益比较

比较图 8(a)和图 8(b)可以发现, 在相同的覆盖场景下使用相同的接纳控制算法时, 融合系统内用户在热点区域密集分布时的系统容量增益大于用户均匀分布时的容量增益。这是因为当用户均匀分布时, 大部分的 WLAN 带宽资源没有被充分利用, 只有较少的用户使用了 WLAN 的高带宽, 因此, 总体系统容量增益较小。而当业务主要分布在 WLAN 热点区域时, 较多用户充分利用了 WLAN 的带宽资源, 提高了系统容量。从图 8 可以看出, 无论系统内用户是非均匀或均匀分布, 无论哪种交叠覆盖场景, LJAC 算法都能实现比 JGAC 算法更高的系统容量增益。这是因为 LJAC 算法的负载管理机制将更多的用户分配给具有高带宽资源的 WLAN-1 或 WLAN-2, 使 UMTS 在 WLAN-1、WLAN-2 以外区域能够接纳更多的用户, 从而更为有效地利用融合系统的资源。

7 结束语

本文提出了异构网络融合场景中基于负载传递的联合接纳控制算法, 该算法的特点是基于负载均衡接纳用户的接入请求, 在异构网络交叠覆盖区域内引入业务的动态负载传递, 并且充分考虑了异构网络之间的布局以及用户在不同网络之间垂直切换等因素的影响。基于多维马尔可夫模型, 分析了所提算法对异构网络融合系统性能的影响, 推导了始发接入请求阻塞率、垂直切换失败率、用户平均吞吐量等 QoS 性能指标; 基于泊松点过程理论, 推导了满足阻塞率和平均吞吐量这 2 个重要的 QoS 指标限制的容量上界, 优化了所提 LJAC 算法的接纳参数, 以最大化异构网络融合系统的资源使用率, 同时保证用户的 QoS。使用网络仿真实验评估了所提接纳控制算法的性能, 并和现有的其他算法进行比较。结果表明, LJAC 算法能实现更低的业务阻塞率和垂直切换请求失败率以及更高的系统容量增益。

附录 定理 1 和定理 2 的证明

定理 1 标值点过程 $\bar{\Phi}$ 是强度为 Λ_{ij} 的泊松点过程, 且强度满足 $\Lambda_{ij} = (\mu_i + \eta_j)^{-1}(\lambda_{oj,i} + \lambda_{hj,i})$ 。

证明 $\bar{\Phi}$ 为分布于空间 $R^1 \times R^1 \times R^1$ 的标值点过程。到达子区域 A_j ($j \in A(R_i)$) 中并接入 RAN- i 的业务请求包括 2 个部分: 来自 A_j 区域的新业务请求和来自相邻区域的垂直切换请求, 到达率分别为 $\lambda_{oj,i}$ 和 $\lambda_{hj,i}$ 。根据第 2 节关于业务请求

到达过程、服务时间以及停留时间的假设可知, 对于任意子集 $A \in R^1 \times R^1 \times R^1$, $\bar{\Phi}_A$ 即为到达子区域 A_j 中并接入 RAN- i 的业务请求数目, 其是泊松随机变量, 即

$$P(\bar{\Phi}_A = k) = e^{-\Lambda_{ij}} \frac{\Lambda_{ij}^k}{k!} \quad (39)$$

其中, $\Lambda_{ij} = (\mu_i + \eta_j)^{-1}(\lambda_{oj,i} + \lambda_{hj,i})$ 。

又由于系统中业务请求的到达彼此相互独立, 因而标值点过程 $\bar{\Phi}$ 满足泊松点过程定义的 2 个条件^[23,24], 是参数为 Λ_{ij} 的泊松点过程。

定理 2 式(33)中的 $E[n_{ij}] = E[n_{ij}^2] = (\mu_i + \eta_j)^{-1}(\lambda_{oj,i} + \lambda_{hj,i})$ 。

证明 由滤过泊松过程的性质可知^[23]

$$E[n_{ij}(t)] = \lambda_{ij} \int_0^t E[w_j(t-x_n, y_n)] dx_n = \lambda_{ij} \int_0^t E[w_j(r, u)] dr \quad (40)$$

按照 $w_j(r, u)$ 的定义, 有

$$w_j(r, u) = \begin{cases} 1, & r \leq u \\ 0, & r > u \end{cases} \quad (41)$$

将式(41)代入式(40)中, 得到

$$E[n_{ij}(t)] = \lambda_{ij} \int_0^t P(u > r) dr = \lambda_{ij} \int_0^t [1 - F_u(r)] dr \quad (42)$$

其中, F 是 u 的分布函数。当 $t \rightarrow \infty$ 时, 式(42)为

$$E[n_{ij}] = \lim_{t \rightarrow \infty} E[n_{ij}(t)] = \Lambda_{ij} \int_0^\infty [1 - F_u(r)] dr = \lambda_{ij} E[u] \quad (43)$$

由于 x_n 为泊松过程, 其到达率满足

$$\lambda_{ij} = \lambda_{oj,i} + \lambda_{hj,i} \quad (44)$$

且 y_n 服从均值为 $E[y_n]$ 的指数分布, 则结合式(26)可得

$$E[n_{ij}] = (\mu_i + \eta_j)^{-1}(\lambda_{oj,i} + \lambda_{hj,i}) \quad (45)$$

同理可证, $E[n_{ij}^2]$ 满足

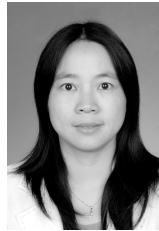
$$E[n_{ij}^2] = (\mu_i + \eta_j)^{-1}(\lambda_{oj,i} + \lambda_{hj,i}) \quad (46)$$

参考文献:

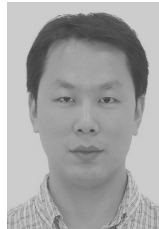
- [1] YEH S P, TALWAR S, WU G, et al. Capacity and coverage enhancement in heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3): 32-38.
- [2] YANG Z, QI B, SHENG J, et al. A novel joint call admission control algorithm based on dynamic bandwidth allocation for heterogeneous wireless networks[C]//Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM). 2012: 1-4.
- [3] KIM S. Adaptive call admission control scheme for heterogeneous overlay networks[J]. Journal of Communications and Networks, 2012, 14(4): 461-466.
- [4] CARVALHO G, WOUNGANG I, ANPALAGAN A, et al. QoS-aware energy-efficient joint radio resource management in multi-RAT heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8): 6343-6365.

- [5] WALINGO T M and TAKAWIRA F. Performance analysis of a connection admission scheme for future networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(4): 1994-2006.
- [6] KIM T O, DEVANARAYANA C N, ALFA A S, et al. An optimal admission control protocol for heterogeneous multicast streaming services[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(6): 2346-2359.
- [7] LIAN R, TIAN H, FEI W, et al. QoS-aware load balancing algorithm for joint group call admission control in heterogeneous networks[C]// IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring). 2012: 1-5.
- [8] ANDREEV S, GERASIMENKO M, GALININA O, et al. Intelligent access network selection in converged multi-radio heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(6): 86-96.
- [9] HADDAD M, WIECEK P, SIDI H B A, et al. An automated dynamic offset for network selection in heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016, 15(9): 2151-2164.
- [10] 邓强, 陈山枝, 胡博, 等. 异构无线网络中基于马尔可夫决策过程的区分业务接纳控制的研究[J]. 通信学报, 2010, 31(12): 27-36.
DENG Q, CHEN S Z, HU B, et al. Research of service-differentiated admission control based on Markov decision processes in heterogeneous wireless networks[J]. Journal on Communications, 2010, 31(12): 27-36.
- [11] 凌毓涛. 异构无线网络中联合无线资源管理[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
LIN Y T. Study on joint radio resource management technologies for heterogeneous wireless networks[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012.
- [12] AMIN R, MARTIN J, RUSSELL H B. Assessing performance gains via the use of global resource controller for realistic heterogeneous wireless networks[C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2014: 1374-1379.
- [13] LI P, FANG Y. On the throughput capacity of heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(12): 2073-2086.
- [14] SAKER L, ELAYOUBI S E, CHAHED T, et al. Energy efficiency and capacity of heterogeneous network deployment in LTE-advanced[C]// 18th European Wireless Conference. 2012: 1-7.
- [15] LI Y, PENG Q, WANG X. Multicast capacity with max-min fairness for heterogeneous networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2014, 22(2): 622-635.
- [16] SONG W, ZHUANG W. Performance analysis of probabilistic multi-path transmission of video streaming traffic over multi-radio wireless devices[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(4): 1554-1564.
- [17] GIUPPONI L, RAMON A, JORDI P, et al. A novel approach for joint radio resource management based on fuzzy neural methodology[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(3): 1789-1805.
- [18] GELABERT X, PEREZ-ROMERO J, SALLENTO O, et al. A Markovian approach to radio access technology selection in heterogeneous multi-access/multiservice wireless networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(10): 1257-1270.
- [19] TANG S, LI W. An adaptive bandwidth allocation scheme with preemptive priority for integrated voice/data mobile networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(10): 2874-2886.
- [20] SONG W, ZHUANG W, CHENG Y. Load balancing for cellular/WLAN integrated networks[J]. IEEE Network, 2007, 21(1): 27-33.
- [21] STEWART W J. Introduction to the numerical solution of Markov chains[M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1995.
- [22] SACHS J, MAGNUSSON P. Assessment of the access selection gain in multi-radio access networks[J]. European Transactions on Telecommunications, 2009, 20(3): 265-279.
- [23] MARTIN J. Point process theory and applications[M]. Boston: Birkhäuser Basel, 2006.
- [24] IBE O C. Fundamentals of stochastic networks [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- [25] BACCELLI F, BLASZCZYKSYN B. Stochastic geometry and wireless networks: volume I theory[J]. Foundations and Trends in Networking, 2010, 3(3-4): 249-449.
- [26] GELABERT X, SALLENTO O, PEREZ-ROMERO J, et al. Erlang capacity degradation in multi-access/multi-service wireless networks due to terminal/coverage restrictions[C]// The 11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'08). 2008. 1-5.

[作者简介]



夏玮玮 (1975-), 女, 江苏句容人, 博士, 东南大学副研究员, 主要研究方向为异构网络资源管理和移动性管理、移动云计算。



丁兆明 (1978-), 男, 山东日照人, 东南大学博士生, 主要研究方向为异构网络资源管理、软件定义无线传感器网络、拓扑控制。



沈连丰 (1952-), 男, 江苏邳州人, 东南大学教授, 主要研究方向为宽带移动通信、车联网。