

异构无线网络中的共享载波垂直网络转换算法

赵亮, 金梁, 黄开枝, 杨梅樾

(国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 为了提高异构无线网络的频谱利用率, 将认知无线电中合作动态频谱分配 (DSA) 的思想应用于以基站和用户为基本单元的异构无线网络, 将多模终端用户垂直切换的思想引入基站侧, 提出了异构无线网络中的共享载波垂直网络转换 (SCVNT) 算法。理论分析与仿真实验表明, SCVNT 算法可有效提高异构无线网络的总体信道利用率, 改善资源分配的公平性, 并可实现平滑升级, 具有较高的应用价值。

关键词: 异构无线网络; 频谱利用率; 认知无线电; 动态频谱分配; 多模基站

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)01-0079-10

Shared carrier vertical network transformation algorithm in heterogeneous wireless networks

ZHAO Liang, JIN Liang, HUANG Kai-zhi, YANG Mei-yue

(National Digital Switching System Engineering & Technological R&D Center, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to enhance the spectrum efficiency in heterogeneous wireless networks, the idea of dynamic spectrum allocation (DSA) used in cognitive radio was introduced into the heterogeneous wireless networks, the idea of vertical handoff for multi-mode mobile users was introduced into the base station side, thereafter, the shared carrier vertical network transformation (SCVNT) algorithm in heterogeneous wireless networks was proposed. The theoretical analysis and simulation results show that SCVNT algorithm can effectively enhance the total channel efficiency in heterogeneous wireless networks, improve fairness in resource allocation, and will be able to achieve smooth upgrade, which is of a relatively high application value.

Key words: heterogeneous wireless networks; spectrum efficiency; cognitive radio; dynamic spectrum allocation; multi-mode base station

1 引言

随着无线通信技术的发展, 基于基站和移动用户架构的异构无线网络层出不穷。由于不同移动业务对通信速率、误比特率、时延抖动、安全性和移动性有不同的需求, 需要使用不同的无线通信技

术, 形成以业务需求区分的异构无线网络。同时, 基于建设成本和服务质量的考虑, 在标准演进中每种无线网络建成后都要运营相当长的一段时间, 不会在短时间内被采用新技术的无线网络取代, 形成以技术水平区分的异构无线网络。此外, 由于运营商之间存在竞争关系, 导致同一种业务需求和技术

收稿日期: 2010-07-02; 修回日期: 2010-12-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863计划”)基金资助项目(2009AA011202, 2009AA011205); 国家科技重大专项基金资助项目(2009ZX03006-007); 新世纪优秀人才支持计划基金资助项目

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2009AA011202, 2009AA011205); The National Science and Technology Major Project of China (2009ZX03006-007); The Program for New Century Excellent Talents in University

水平也会产生互不兼容的标准,形成以运营机构区分的异构无线网络^[1]。以我国的频谱规划为例,目前典型蜂窝无线网络的载波带宽、每载波语音信道数和已分配频段如表 1 所示。

表 1 我国典型蜂窝无线网络的载波带宽、每载波语音信道数和已分配频段

蜂窝无线网络	载波带宽 /MHz	每载波语音信道数	已分配频段/MHz
GSM/GPRS/EDGE	0.2 × 2	8	885-915/930-960, 1710-1755/1805-1850
PHS	0.3	4	1900-1915
DECT	1.728	12	1905-1920
cdma2000/EV DO	1.25 × 2	30	825-835/870-880, 1920-1935/2110-2125
WCDMA/HSPA	5 × 2	60	1940-1955/2130-2145
TD-SCDMA/HSPA	1.6	24	1880-1920,2010-2025
TDD-LTE	1.25~20	/	1880-1920,2010~ 2025,2300~2400
FDD-LTE	(1.25~20) × 2	/	1755-1785/1850-1880, 1920-1980/2110-2170

从上面的分析可以看出,未来采用多种技术和标准的异构无线网络将会在相当长的时间内共存,并按市场竞争驱动的原则确定各自的市场定位,并相互补充,在下一代网络统一平台的基础上逐步趋向融合,而不是统一^[2,3],这就带来了一些新的问题。

为了避免干扰,目前的蜂窝无线网络一般使用固定频谱分配(FSA)的方式,频谱一旦分配给一种无线网络就无法为其他无线网络所用,大量频谱资源还需要被预留用于开发新的无线网络,而由于在不同区域和不同时间异构无线网络之间的频谱利用率差别很大,导致大量频谱资源被浪费。而随着宽带和超宽带通信技术逐步得到广泛应用,这种频谱资源的浪费将会更加严重^[3,4]。认知无线电技术通过对无线环境的检测、分析、学习、推理和规划,调整传输参数以使用最适合的无线资源完成无线通信,可以在时间和空间上充分利用频谱资源,是提高频谱利用率的有效方法^[5]。动态频谱分配(DSA)作为认知无线电的频谱接入方式,可获得比FSA更高的频谱利用率。基于认知无线电的DSA的思想在IEEE 1900.1标准^[6]、IEEE 1900.4标准^[7-9]和ETSI技术报告^[10]中已经有所体现,但其仅定义了网络融合与频谱资源共享的框架,并没有具体给

出异构无线网络之间的频谱分配策略。在目前的研究中,非合作DSA是指非授权用户进行频谱检测,在授权用户不使用的频段进行频谱接入。而合作DSA则是采用特定的算法对频谱资源进行统一的动态分配^[5,11]。目前针对合作DSA的研究主要包括基于干扰控制的DSA^[12]、基于博弈的DSA^[11,13]、基于拍卖的DSA^[14]以及基于遗传算法的DSA^[15]等。但是,这些研究所建立的系统模型往往不完善,缺乏对业务模型瞬态分布的分析,且对于实际系统设计中存在的垂直切换、多模基站、载波单元划分和网内信道分配等问题考虑较少。

为了提高服务质量,多模终端用户可以根据无线网络环境、业务需求和价格偏好等因素通过多目标决策在各种异构无线网络之间进行垂直切换^[16-18]。但由于无线网络种类繁多,差异很大,导致多模终端的芯片设计复杂,且多无线网络信号质量检测的功耗较高,而用户对成本和功耗的要求比基站严格得多,所以将这种芯片成本和功耗转移到基站侧是更好的选择。此外,传统应用是用户在不同的小区之间切换以适应基站的变化。而随着基站的数量越来越多,智能化程度越来越高,让基站适应用户的变化成为一种发展趋势,这种思想在分布式无线通信系统中已经有所体现^[19]。

经过长时间的研究开发,目前基于软件无线电的多模基站技术已经比较成熟。美国的MIT于1995年即开始进行SpectrumWare项目从事软件无线电系统的开发,其中部分人所创办的Vanu公司已经开发出基于软件无线电的商用GSM/CDMA/iDEN多模基站。法国的wireless3G4Free项目也已经开发出基于软件无线电的采用RTLinux操作系统的3GPP UMTS/TDD全IP无线网络。目前华为、中兴、诺基亚西门子以及家庭基站开发商picoChip等公司开发的基于软件无线电平台的多模基站产品已经得到商用,并且涵盖了表1所涉及的大部分无线网络。但是,不同于已经商用的多模终端用户的垂直切换技术,目前对多模基站的系统设计大部分局限于多种无线网络的集成,并未考虑异构无线网络之间的频谱资源共享问题。

可以看出,如果能设置共享载波频段自由承载不同的无线网络,就可以正常使用预留频段,并使有限的频率资源得到充分利用。据此,本文提出了异构无线网络中基站的共享载波垂直网络转换(SCVNT, shared carrier vertical network transfor-

mation)算法。作为合作 DSA 的一种具体应用策略,该算法的基本思想是多模基站通过对不同异构无线网络中用户业务量需求的分析和预测,将更多的共享载波分配给业务量需求高的无线网络,从而平衡异构无线网络的频谱利用率,而其中共享载波所承载的网络发生改变的过程称为垂直网络转换。为了介绍该算法,第 2 节给出了系统模型,包括蜂窝系统模型和网内信道分配策略,第 3 节介绍 SCVNT 算法的基本原理和系统仿真流程,并给出了用户数已知和用户数未知时 2 种 SCVNT 算法的信道数更新策略;第 4 节进行了仿真实验与性能分析;第 5 节是结束语。

2 系统模型

2.1 蜂窝系统模型

本文仅研究 2 种无线网络 A、B 中单模终端用户到多模基站的反向信道。假设无线网络 A、B 的蜂窝小区个数为 N_{cell} ,对每个小区考察的干扰小区个数为 N_{rnd} 。为了避免边界小区所受到的干扰无法表达,将对称位置的小区 and 用户模型复制到边界小区周边,在原有的 N_{cell} 个小区基础上扩展 N_{ext} 个小区,仅提供干扰数据。基于本文仿真参数的蜂窝小区扩展方案如图 1 所示^[20,21]。

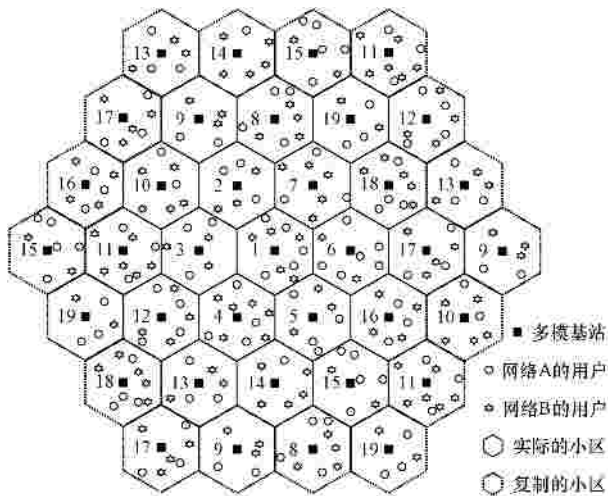


图 1 基于本文仿真参数的蜂窝小区扩展方案

在本文的分析中,右上标为 A 表示网络 A 中的参数,右上标为 B 表示网络 B 中的参数,右上标为 tot 表示网络 A、B 的总体参数,而无右上标则表示泛指网络 A 或 B 的参数。虽然文中的参数是针对每个小区的分析,但给出的仿真结果为 N_{cell} 个小区中

仿真数据的均值。

设无线网络 A、B 的用户发起新呼叫的位置在每个小区内服从随机均匀分布,且通信时保持静止,则可忽略水平切换和垂直切换问题^[17]。基于路径传播损耗模型,任一点上的信号功率是接收机和发射机之间距离的函数,则不考虑阴影衰落时基站接收距离 d 处的用户的信号功率为

$$P(d) = P_{ref} \left(\frac{d_{ref}}{d} \right)^a \quad (1)$$

其中, a 为路径损耗因子, P_{ref} 是近地参考距离 d_{ref} 处基站的接收功率,而 P_{ref}/P_N 由基站接收小区边界用户信号的信噪比确定:

$$SNR_{edge} = P(d_{edge})/P_N \quad (2)$$

其中, d_{edge} 为蜂窝小区的半径, P_N 为热噪声功率。考虑慢衰落和阴影效应的影响,大尺度对数正态阴影衰落为

$$L_i = 10^{s x_i / 10} \quad (3)$$

其中, x_i 是均值为 0,方差为 1 的正态随机变量, s 为阴影损耗因子。考虑信干噪比主要取决于加性高斯白噪声以及相邻 N_{rnd} 个小区中其他使用相同信道的用户带来的同频干扰,则基站接收某个用户信号的信干噪比为

$$SINR_0 = \frac{P(d_0)L_0}{P_N + \sum_{i=1}^{N_{rnd}} P(d_i)L_i} \quad (4)$$

其中, d_0 为该用户与服务基站的距离, d_i 为周围第 i ($i = 1 \dots N_{rnd}$) 个小区中的干扰用户与该用户服务基站的距离。考虑存在阴影效应和小区间干扰,实际使用的导致呼叫阻塞和通话中断的信干噪比门限应满足 $SINR_{th} < SINR_{edge}$ 。蜂窝系统的参数如表 2 所示。

表 2 蜂窝系统的参数

参数	定义	取值
N_{cell}	仿真的蜂窝小区数	19
N_{ext}	扩展的蜂窝小区数	18
N_{rnd}	对每个蜂窝考察的干扰小区数	6
g	FCA 的频率复用系数	3
d_{ref}	近地参考距离	1m
d_{edge}	蜂窝小区的半径	1 000m
a	路径损耗因子	3.5
s	阴影损耗因子	6.5
SNR_{edge}	基站接收小区边界用户信号的信噪比	20dB
$SINR_{th}$	呼叫阻塞和通话中断的信干噪比门限	10dB

2.2 网内信道分配策略

设 2 种网络均使用实时固定速率业务，定义如果新用户发起呼叫时已无信干噪比高于门限的空闲信道，则认为呼叫阻塞。如果用户在通信过程中由于其他用户的接入导致信干噪比降低到低于门限且无可用空闲信道，则认为通信中断^[20]。

考虑无线网络 A、B 内部可以使用频率复用系数为 g 的固定信道分配 (FCA) 或动态信道分配 (DCA)。FCA 是指无论蜂窝小区中用户数的多少，每个小区的信道数固定，使用较高的频率复用系数控制小区间干扰，所以其中断率可忽略不计。DCA 是指每个小区的信道数可变，最多时可以使用所有信道，在进行空闲信道分配时同时进行信干噪比测量，如果某信道的信干噪比超过门限则可分配，而若在通信过程中某信道的信干噪比低于门限，则选择新的信干噪比高于门限的空闲信道，若无可用空闲信道则通信中断^[21~23]。

使用 engset 流量模型，系统服从有限用户数的损失制 $M/M/C/0/U$ 排队过程。设每个小区的信道数为 C ，用户总数为 U ，已接入用户数为 H 。设每个用户的呼叫请求次数服从参数为 $l = 1/T_{arr}$ 的泊松分布，其中， T_{arr} 为呼叫周期的期望，且有 $P\{N(T) = n\} = \frac{(lT)^n}{n!} e^{-lT}$ ，其中， $N(T)$ 为时间 T 内的呼叫次数。通信时间服从参数为 T_{hold} 的负指数分布，其中， T_{hold} 为通信时间的期望，且有 $P\{T_{hold} > t\} = 1 - e^{-mt}$ ， $m = 1/T_{hold}$ ， $t \geq 0$ 。则服务系统的负荷 $r = l/m = T_{hold}/T_{arr}$ ，且稳态分布下的理论阻塞率为^[24,25]

$$p_{blk} = \binom{U-1}{C} r^C / \sum_{i=0}^C \binom{U-1}{i} r^i \quad (5)$$

设仿真中的采样时间间隔为 T_{step} ，仿真持续时间为 T_{sim} ，仿真中的总呼叫次数为 N_{call} ，且期望为 $E(N_{call}) = UT_{sim}/T_{arr}$ ，被阻塞的呼叫次数为 N_{blk} ，被中断的呼叫次数为 N_{brk} ，则网络 A、B 的阻塞率和中断率以及 2 种网络的总阻塞率和总中断率分别为

$$\begin{cases} p_{blk}^A = N_{blk}^A / N_{call}^A, p_{brk}^A = N_{brk}^A / (N_{call}^A - N_{blk}^A), \\ p_{blk}^B = N_{blk}^B / N_{call}^B, p_{brk}^B = N_{brk}^B / (N_{call}^B - N_{blk}^B), \\ p_{blk}^{tot} = (N_{blk}^A + N_{blk}^B) / (N_{call}^A + N_{call}^B), \\ p_{brk}^{tot} = (N_{brk}^A + N_{brk}^B) / (N_{call}^A - N_{blk}^A + N_{call}^B - N_{blk}^B) \end{cases} \quad (6)$$

3 SCVNT 算法

3.1 SCVNT 算法的原理和仿真参数

由表 1 可以看出，根据已分配频段，每种蜂窝无线网络都可以占有数量一定的载波，但这些载波并不能由不同的无线网络共享。这里假设异构无线网络 A、B 都有多个可承载一定数量信道的载波。SCVNT 算法的原理是如果某种网络的信道利用率高，而另一种网络的信道利用率低，则基站对 2 种网络的共享载波进行重新分配，以减少信道利用率低的网络的载波数为代价增加信道利用率高的网络的载波数，从而提高 2 种网络的总体信道利用率。为了保证服务质量，需要为每个网络保留不能进行网络转换的私有载波。根据本文的仿真参数，假设异构无线网络 A、B 各具有 1 个私有载波和 18 个共享载波，则 SCVNT 算法的载波分配策略如图 2 所示。

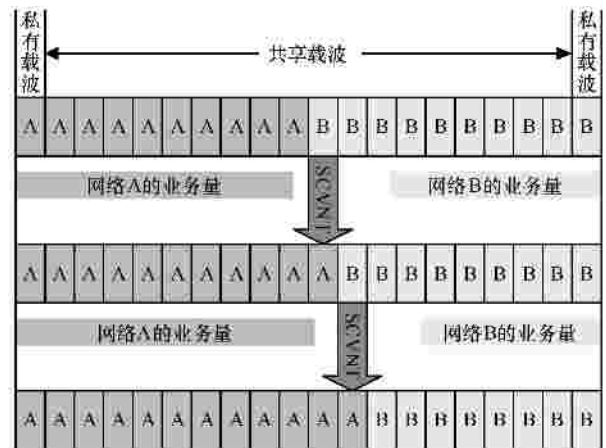


图 2 SCVNT 算法的载波分配策略

使用 SCVNT 算法时，网络 A、B 中有关无线资源分配的参数的定义和默认取值如表 3 所示。

表 3 中关于信道数的参数满足 $C^A + C^B = C_{ini}^A + C_{ini}^B = C_{pvt}^A + C_{pvt}^B + C_{sha}^{tot}$ 。设 t_{CAJP} 表示上一次网络 A、B 内信道分配判决的时间， t_{NTJP} 表示上一次 SCVNT 算法判决的时间，则使用 SCVNT 算法时的系统仿真流程如图 3 所示。

3.2 MTBP-SCVNT 算法

当用户数和接入分布模型已知或可预测时，对于网络 A、B 的每个小区，设 $\{H(t), t \geq 0\}$ 表示时刻 t 的已接入用户数，对于任意小的时间 Δt ，有转移概率函数^[26,27]：

表 3 网络 A、B 中有关无线资源分配的参数

参数	定义	默认取值
T_{step}	仿真中的采样时间间隔	10s
T_{hold}	每个用户通信时间的期望	100s
T_{arr}	每个用户呼叫周期的期望	1 000s
T_{sim}	仿真的持续时间	100 000s
T_{CAJ}	FCA/DCA 的判决周期	10s
T_{NTJ}	SCVNT 算法的判决周期	10s
U^A, U^B	每个小区中的用户数	250,300,350, 400,450,500
C_{car}	每个载波包含的信道数	5
C^A, C^B	不使用 SCVNT 算法时每个小区的信道数	50
C_{pvt}^A, C_{pvt}^B	使用 SCVNT 算法时每个小区的私有信道数	5
C_{sha}^{not}	使用 SCVNT 算法时每个小区的共享信道数	90
C_{ini}^A, C_{mi}^B	使用 SCVNT 算法时每个小区的初始信道数	50
C_{nt}	SCVNT 算法单次网络转换信道数	5
D_{th}	MRCB-SCVNT 算法中的冗余信道差值门限	10

$$p_{ij}(\Delta t) = P\{H(t + \Delta t) = j | H(t) = i\} = \begin{cases} (U - i)l \Delta t + o(\Delta t), & j = i + 1, 0 \leq i < C - 1 \\ im \Delta t + o(\Delta t), & j = i - 1, 1 \leq i < C \\ o(\Delta t), & |i - j| \geq 2 \end{cases} \quad (7)$$

则 $\{H(t), t \geq 0\}$ 为状态空间 $E = \{0, 1, 2, \dots, C\}$ 上的生灭过程。根据生灭过程微分方程组解的存在性，对有限状态 E 的生灭过程，若满足瞬时概率分布 $p_j(t) \geq 0, \sum_{j=0}^C p_j(t) = 1$ ，则对任给的初始条件，方程组的解存在、唯一，且有 $p_j(t) \geq 0, \sum_{j=0}^C p_j(t) = 1, t \geq 0$ 。则该生灭过程的微分方程组为

$$\begin{cases} p_j'(t) = (U - j + 1)l p_{j-1}(t) - [(U - j)l + jm] p_j(t) + (j + 1)m p_{j+1}(t), & j = 1, 2, \dots, C - 1 \\ p_0'(t) = -U l p_0(t) + m p_1(t) \\ p_C'(t) = (U - C + 1)l p_{C-1}(t) - C m p_C(t) \end{cases} \quad (8)$$

由于状态数有限，即最大的队列数为 C ，此时 Kolmogorov 前向方程为

$$\frac{d}{dt} P(t) = P(t)Q \quad (9)$$

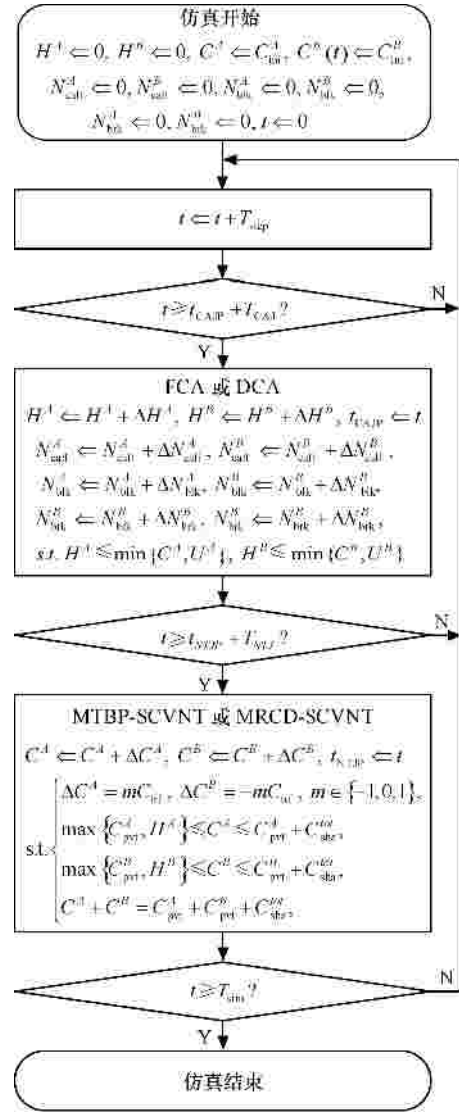


图 3 使用 SCVNT 算法时的系统仿真流程

其中， $P(t) = [p_0(t), p_1(t), \dots, p_C(t)]$ 是状态概率的行向量，而无穷小生成子 Q 可由式(8)确定。则方程(9)的一般解为

$$P(t) = P(0)e^{Qt} \quad (10)$$

其中， $P(0) = [p_0(0), p_1(0), \dots, p_C(0)]$ 为状态概率的初始值，由于矩阵 Q 为三角阵且次对角线元素同号，则矩阵 Q 与以其特征值为元素的对角矩阵相似，即

$$Q = MDM^{-1} \quad (11)$$

其中， M 是非奇异矩阵，张成 $C + 1$ 维空间， $D = \text{diag}(s_0, s_1, \dots, s_C)$ ， s_i 是 Q 的第 i 个特征值，且 $s_C < s_{C-1} < \dots < s_1 < s_0 = 0$ ， M 的第 i 列是对应于 s_i 的右特征向量。由于

$$e^{Qt} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(MDM^{-1})^n}{n!} t^n = \sum_{n=0}^{\infty} M \frac{D^n t^n}{n!} M^{-1} = M \text{diag}(e^{s_0 t}, e^{s_1 t}, L, e^{s_C t}) M^{-1} \quad (12)$$

所以有

$$P(t) = P(0) M \text{diag}(e^{s_0 t}, e^{s_1 t}, L, e^{s_C t}) M^{-1} \quad (13)$$

当蜂窝网络中的已接入用户数为 H 时, 有 $p_H(0) = 1, p_i(0) = 0, 0 \leq i < C, i \neq H$ 。则时间 t 之内系

$$\hat{p}_{\text{blk}}^{\text{tot}}(U^A, U^B, H^A, H^B, T_{\text{NTJ}}, C^A, C^B) = \frac{\hat{p}_{\text{blk}}^A(U^A, H^A, T_{\text{NTJ}}, C^A) \hat{N}_{\text{call}}^A(U^A, H^A, T_{\text{NTJ}}) + \hat{p}_{\text{blk}}^B(U^B, H^B, T_{\text{NTJ}}, C^B) \hat{N}_{\text{call}}^B(U^B, H^B, T_{\text{NTJ}})}{\hat{N}_{\text{call}}^A(U^A, H^A, T_{\text{NTJ}}) + \hat{N}_{\text{call}}^B(U^B, H^B, T_{\text{NTJ}})} \quad (16)$$

由于单次网络转换的信道数为固定值 $C_{\text{trf}} = C_{\text{carr}}$, 网络转换的判决结果仅有 3 种情况, 可以将满足限制条件且使系统总阻塞率取最小值时网络 A、B 的信道数作为网络转换判决的输出。虽然系统总阻塞率的求解比较复杂, 但由于各参数取值的状态空间有限, 当 U^A, U^B 和 T_{NTJ} 确定时, 每次求解时系统总阻塞率最多仅有 $(C_{\text{sha}}^{\text{tot}})^4 / (C_{\text{carr}})^2$ 种取值情况, 且算法对计算精度的要求不高, 可采用查表法求近似解, 所以在实际应用中一般可以接受。由于算法基于最小总阻塞率 (MTBP, minimum total blocking probability), 所以称为 MTBP-SCVNT 算法。使用该算法时, 图 3 中的信道数更新策略为 $[C^A, C^B]$

$$\begin{aligned} &\leftarrow \arg \min_{\{C^A, C^B\}} \left\{ p_{\text{blk}}^{\text{tot}}(U^A, U^B, H^A, H^B, T_{\text{NTJ}}, C^A, C^B) \right\} \\ &\text{s.t.} \begin{cases} [C^A, C^B] \in \{C^A, C^B\}, [C^A + D_{\text{trf}}, C^B - D_{\text{trf}}], \\ [C^A - D_{\text{trf}}, C^B + D_{\text{trf}}] \\ \max\{C_{\text{pvt}}^A, H^A\} \leq C^A \leq C_{\text{pvt}}^A + C_{\text{sha}}^{\text{tot}} \\ \max\{C_{\text{pvt}}^B, H^B\} \leq C^B \leq C_{\text{pvt}}^B + C_{\text{sha}}^{\text{tot}} \\ C^A + C^B = C_{\text{pvt}}^A + C_{\text{pvt}}^B + C_{\text{sha}}^{\text{tot}} \end{cases} \quad (17) \end{aligned}$$

需要说明的是, 虽然在实际应用中 MTBP-SCVNT 算法要求用户数已知的条件可能无法满足, 但该算法的结果作为理想条件下的性能上界, 可以为其他算法的性能评价提供重要参考。

3.3 MRCD-SCVNT 算法

虽然对 engset 模型而言用户数 U 已知, 但实际应用中用户数和接入分布模型往往是未知的, 且难以预

统阻塞率的估计值为

$$\hat{p}_{\text{blk}}(U, H, t, C) = p_C(U-1, H, t, C) = N_{\text{blk}}(U, H, t, C) / N_{\text{call}}(U, H, t) \quad (14)$$

而在时间 t 之内呼叫次数的估计值为

$$\hat{N}_{\text{call}}(U, H, t) = (U - H) l t \quad (15)$$

将式(14)和式(15)代入式(6), 可求出 T_{NTJ} 之内系统总阻塞率的估计值为

测, 从而无法估计出下一个时间段内的总阻塞率。考虑这种应用场景, 以公平性为原则, 可以将满足限制条件且使 2 种网络的冗余信道差值 D^{tot} 取最小值时网络 A、B 的信道数作为网络转换判决的输出。通过对垂直切换中乒乓效应的分析^[16,18], 为了避免出现乒乓网络转换, 应增加冗余信道差值门限 D_{th} 作为算法的判决条件, 并取 $D_{\text{th}} > C_{\text{carr}}$ 。为了避免信道数不均衡时产生不合理的判决, 还需增加信道利用率的限制条件。由于该算法基于最小冗余信道差值 (MRCD, minimum redundant channel difference), 所以称为 MRCD-SCVNT 算法。使用 MRCD-SCVNT 算法时, 图 3 中的信道数更新策略如图 4 所示。

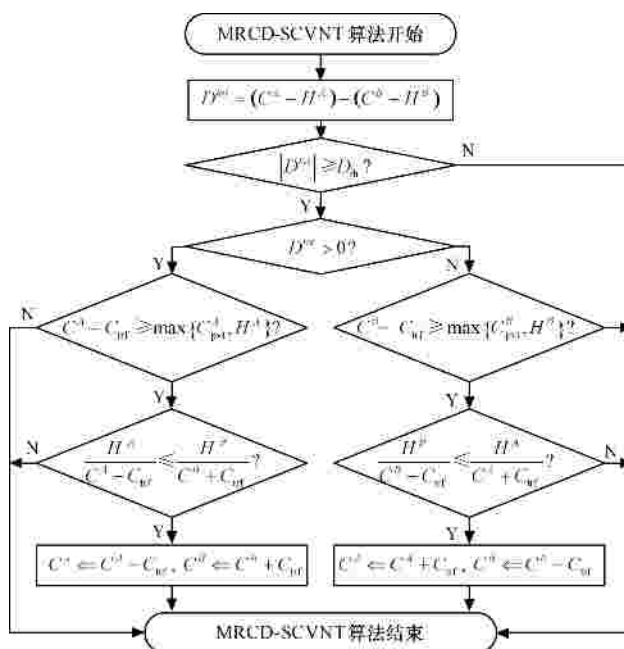


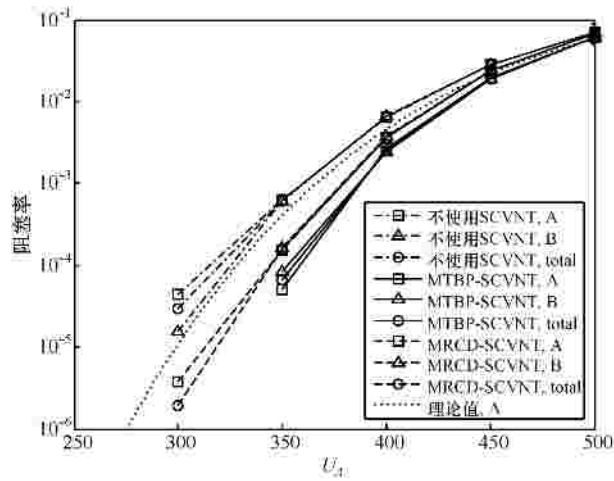
图 4 MRCD-SCVNT 算法的信道数更新策略

可以看出,在实际应用中 MRCD-SCVNT 算法的已知条件一般可以满足,且复杂度很低,具有广泛的适用性。但是该算法的性能不是最优的,并且需要根据实际条件对 D_{th} 、 T_{NTJ} 等判决参数进行优化选择。

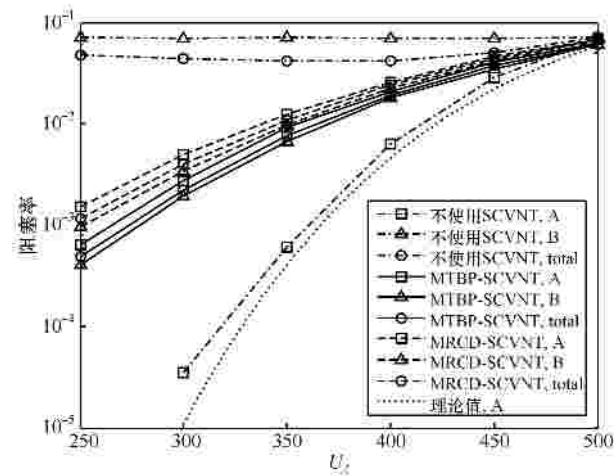
4 仿真实验与性能分析

4.1 使用 FCA 时 2 种 SCVNT 算法的性能

使用 FCA 作为网内信道分配方式,则 MTBP-SCVNT 算法和 MRCD-SCVNT 算法的性能比较如图 5 所示。仿真中网络 A 的阻塞率略高于理论值是因为当用户信号的信干噪比低于门限时也将被阻塞接入。可以看出,当 2 种网络的用户数很少时,信道利用率很低,SCVNT 算法可以同时降低 2 种网络的阻塞率。但随着 2 种网络用户数的增多和信道利用率的提高,系统性能的提升则不再明显。另外,



(a) 阻塞率, $U^B=U^A$



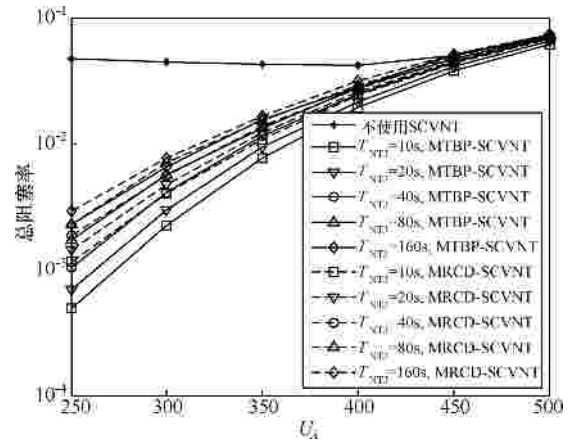
(b) 阻塞率, $U^B=500$

图 5 使用 FCA 时 2 种 SCVNT 算法的性能

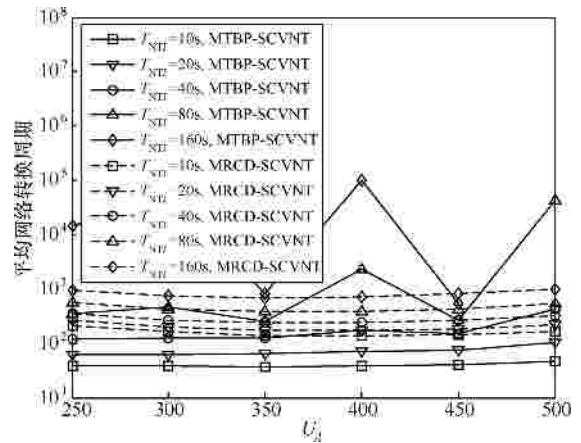
与 $U^B = U^A$ 时相比,当 $U^B = 500$ 时使用 SCVNT 算法时总阻塞率的降低更为明显。这是因为 2 种网络的用户数不同导致信道利用率不同,SCVNT 算法以略微提高信道利用率较低的网络的阻塞率为代价,大幅度降低了信道利用率较高的网络的阻塞率,不仅降低了两种网络的总阻塞率,还提高了 2 种网络之间的公平性。考虑 SCVNT 算法更适用于信道利用率不均衡的无线网络,在后面的分析中仅考虑该条件。另外在各种条件下,理想的 MTBP-SCVNT 算法的性能均优于 MRCD-SCVNT 算法。

4.2 使用 FCA 时 SCVNT 算法中 T_{NTJ} 的选择

使用 FCA 作为网内信道分配方式,当使用 MTBP-SCVNT 算法或 MRCD-SCVNT 算法时,在判决周期 T_{NTJ} 取不同值时,网络 A、B 的总阻塞率和平均网络转换周期如图 6 所示,其中平均网络转换周期为网络转换间隔时间的统计平均值。可以看出,由于难以跟踪业务量的快速变化,SCVNT 算法的判决周期 T_{NTJ} 越长,其触发的概率越小,性能改善也越小。



(a) 总阻塞率, $U^B=500$



(b) 平均网络转换周期, $U^B=500$

图 6 使用 FCA 时 T_{NTJ} 取不同值时 2 种 SCVNT 算法的性能

同时,虽然 MTBP-SCVNT 算法在所有条件下的总阻塞率均低于 MRCD-SCVNT 算法,具有更好的性能,但当 T_{NTJ} 较短时其平均网络转换周期远小于 MRCD-SCVNT 算法,导致系统稳定性较差。

下面对 T_{NTJ} 的取值问题作进一步分析。当使用 FCA 作为网内信道分配方式而初始用户数 H 取不同值时,网络的理论阻塞率与不使用 SCVNT 算法的持续时间的关系如图 7 所示,其中, $U=500$, $C=50$ 。可以看出,SCVNT 算法的判决周期 T_{NTJ} 越长,其性能的改善越小,且当 $T_{NTJ} > 300s$ 时将失去其时效性。

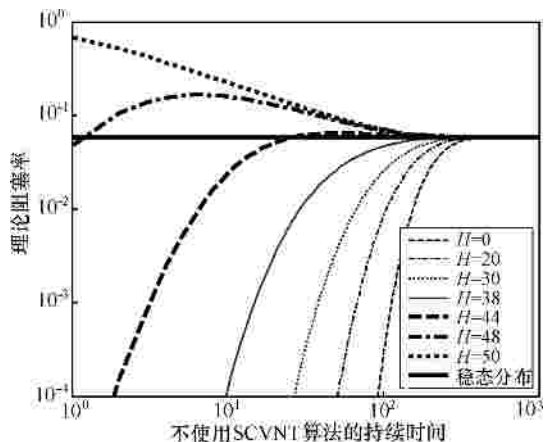


图 7 网络的理论阻塞率与不使用 SCVNT 算法的持续时间的关系

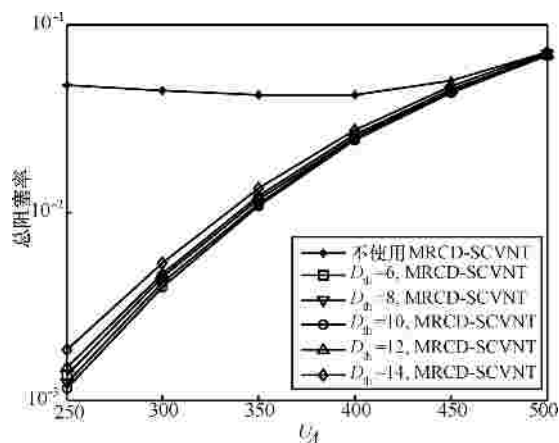
4.3 使用 FCA 时 MRCD-SCVNT 算法中 D_{th} 的选择

使用 FCA 作为网内信道分配方式,当使用 MRCD-SCVNT 算法时,如果网络转换判决门限 D_{th} 取不同值时,网络 A、B 的总阻塞率和平均网络转换周期如图 8 所示。可以看出,增大 D_{th} 时平均网络转换周期增大,可提高系统的稳定性。同时,当 $D_{th}=10$ 时,MRCD-SCVNT 算法的总阻塞率性能达到最佳,而增大或减小 D_{th} 均导致总阻塞率性能变差,所以本文的仿真中默认取 $D_{th}=10$ 。与 T_{NTJ} 类似,可以根据实际应用需求对 D_{th} 进行必要的调整。

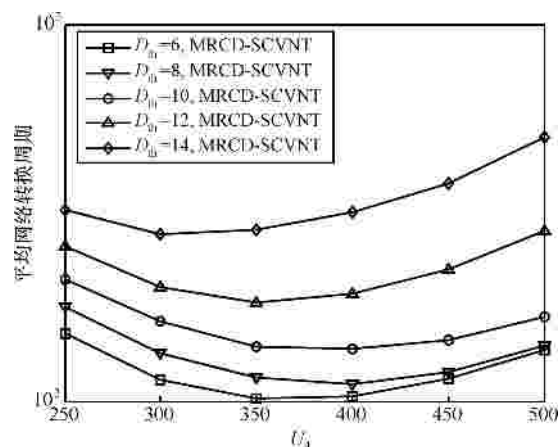
4.4 使用 DCA 时 2 种 SCVNT 算法的性能

使用 DCA 作为网内信道分配方式,则 MTBP-SCVNT 算法和 MRCD-SCVNT 算法的性能比较如图 9 所示。可以看出,使用 SCVNT 算法时系统的总阻塞率略有降低,但其所带来的性能提升远低于使用 FCA 时。另外,SCVNT 算法导致了系统总中断率的升高。这是因为较之 FCA 而言,DCA 已经在网络内部对信道资源进行了充分利用,导致网络转换被触发的概率较低,而触发的网络转换由于没

有考虑小区间干扰问题,导致更多用户的通信中断。所以使用 DCA 时需要针对该问题对 SCVNT 算法进行优化。



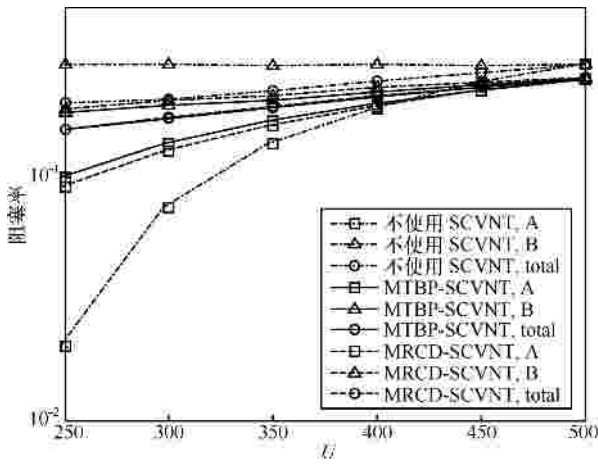
(a) 总阻塞率, $U^B=500$



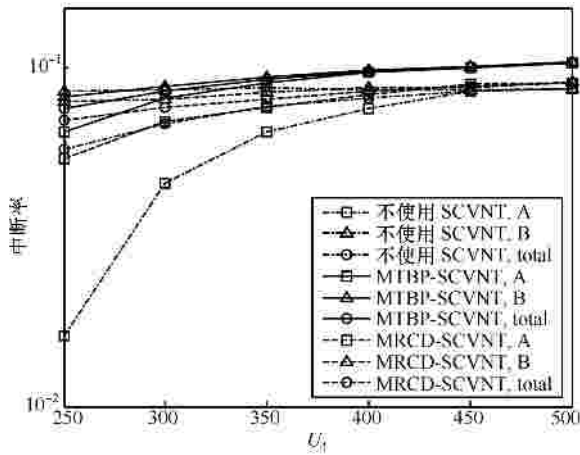
(b) 平均网络转换周期, $U^B=500$

图 8 使用 FCA 时 D_{th} 取不同值时 MRCD-SCVNT 算法的性能

事实上,DCA 算法由于会导致小区间干扰,往往会增加系统的中断率,而在实际应用中采用各种优化算法则会大大提高系统设计的复杂度,所以目前应用较少^[22,23]。而 SCVNT 算法实际上是一种异构无线网络之间的动态载波分配,具有不同的优化目标。使用 FCA 时,SCVNT 算法仅需每个多模基站单独在异构无线网络之间进行载波资源分配,不需要考虑小区间干扰,也不会导致用户通信中断,且复杂度较低,所以具有更高的应用价值。考虑到异构无线网络之间不可能做到理想同步,在实际应用中 SCVNT 算法与异构无线网络内部的信道分配是相互独立的,该功能的配置与否不会影响每种无线网络内部的工作状态,这也使得 SCVNT 算法具有很好的兼容性与扩展性。



(a) 阻塞率, $U_B=500$



(b) 中断率, $U_B=500$

图 9 使用 DCA 时两种 SCVNT 算法的性能

5 结束语

从理论分析和仿真实验可以看出,在使用 FCA 时 SCVNT 算法具有较高的应用价值,但在使用 DCA 时其应用价值不高。同时,SCVNT 算法在异构无线网络之间信道利用率不均衡时优势更为明显。MTBP-SCVNT 算法的总阻塞率性能是最优的,但算法要求用户数已知的条件不易满足,且复杂度较高,在判决周期较短时系统稳定性较差。MRCD-SCVNT 算法虽然不是最优的,但其应用条件易于满足,且复杂度较低,所以具有更高的实用价值。增大判决周期和提高冗余信道差值门限会降低 SCVNT 算法的性能,但却可提高系统的稳定性,所以需要对这些参数进行合理选择。总之,SCVNT 算法在大部分条件下可以有效降低异构无线网络的总阻塞率,提高信道分配的公平性,并且可以实现平滑升级,是提高异构无线网络频谱利用率的有

效方法。本文对 SCVNT 算法的研究仅是一个开始。下一步的研究将引入用户的移动性,同时考虑各种异构无线网络中具体的接入控制与信道分配准则,水平切换与垂直切换策略,以及速率控制与功率控制方法,并针对更多的异构无线网络和更多的业务种类对算法进行优化。

参考文献：

- [1] AKYILDIZ I F, MOHANTY S, XIE J. A ubiquitous mobile communication architecture for next-generation heterogeneous wireless systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(6): 29-36.
- [2] MUNASINGHE K S, JAMALIPOUR A. Interworked WiMAX-3G cellular data networks: an architecture for mobility management and performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(4): 1847-1853.
- [3] ETSI. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Evolution of 3GPP System[R]. ETSI TR 121 902 V7.0.0, 2007.
- [4] BHARGAVA V, HUSSAIN E. Cognitive Wireless Communication Networks[M]. New York: Springer, 2007.
- [5] MITOLA J. Cognitive radio architecture evolution[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(4): 626-641.
- [6] IEEE Communications Society. IEEE Standard Definitions and Concepts for Dynamic Spectrum Access: Terminology Relating to Emerging Wireless Networks, System Functionality, and Spectrum Management[S]. IEEE Std 1900.1-2008.
- [7] IEEE Communications Society. IEEE Standard for Architectural Building Blocks Enabling Network-Device Distributed Decision Making for Optimized Radio Resource Usage in Heterogeneous Wireless Access Networks[S]. IEEE Std 1900.4-2009.
- [8] BULJORE S, HARADA H, FILIN S, et al. Architecture and enablers for optimized radio resource usage in heterogeneous wireless access networks: the IEEE 1900.4 working group[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(1): 122-129.
- [9] MODY A N, SHERMAN M J, MARTINEZ R. Survey of IEEE standards supporting cognitive radio and dynamic spectrum Proceedings of the IEEE MILCOM[C]. San Diego, CA, USA, 2008. 1-7.
- [10] ETSI. Reconfigurable Radio Systems (RRS); Cognitive Radio System Concept[R]. ETSI TR 102 802 V1.1.1, 2010.
- [11] ZHAO Q, SADLER B M. A survey of dynamic spectrum access[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 79-89.
- [12] HOUZE P, RUIZ D, JEMAA S B, et al. Dynamic spectrum allocation algorithm for cognitive networks[A]. Proceedings of the IEEE ICWMC[C]. Guadeloupe, France, 2007. 25-29.
- [13] SUBRAMANIAN A P, AL-AYYOUB M, GUPTA H, et al. Near-optimal dynamic spectrum allocation in cellular networks[A]. Proceedings of the IEEE DySPAN[C]. Chicago, IL, USA, 2008. 1-11.

- [14] XING Y P, CHANDRAMOULI R, MANGOLD S, *et al.* Dynamic spectrum access in open spectrum wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 626-637.
- [15] THILAKAWARDANA D, MOESSNER K. A genetic approach to cell-by-cell dynamic spectrum allocation for optimising spectral efficiency in wireless mobile systems[A]. Proceedings of the IEEE CrownCom[C]. Orlando, FL, USA, 2007, 367-372.
- [16] LEE S, SRIRAM K, KIM K, *et al.* Vertical handoff decision algorithms for providing optimized performance in heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(2): 865-881.
- [17] LIU M, LI Z C, GUO X B, *et al.* Performance analysis and optimization of handoff algorithms in heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(7): 846-857.
- [18] 贺昕, 李斌. 异构无线网络切换技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2008.
- HE X, LI B. Handoff Technologies in Heterogeneous Wireless Networks[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2008.
- [19] ZHOU S D, ZHAO M, XU X B, *et al.* Distributed wireless communication system: a new architecture for future public wireless access[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(3): 108-113.
- [20] ZANDER J, KIM S L, ALMGREN M, *et al.* Radio Resource Management for Wireless Networks[M]. Boston, London: Artech House, 2001.
- [21] HARADA H, PRASAD R. Simulation and Software Radio for Mobile Communications[M]. Boston, London: Artech House, 2002.
- [22] ARGYROPOULOS Y, JORDAN S, KUMAR S P R. Dynamic channel allocation in interference-limited cellular systems with uneven traffic distribution[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48(1): 224-232.
- [23] BUBLIN M, KONEGGER M, SLANINA P. A cost-function-based dynamic channel allocation and its limits[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(4): 2286-2295.
- [24] VASSILAKIS V G, LOGOTHETIS M D. The wireless Engset multi-rate loss model for the handoff traffic analysis in W-CDMA networks[A]. Proceedings of the IEEE PIMRC[C]. Cannes, France, 2008. 1-6.
- [25] 唐应辉, 唐小我. 排队论——基础与分析技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- TANG Y H, TANG X W. Queueing Theory—Basic and Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [26] GROSS D, HARRIS C M. Fundamentals of Queueing Theory (3rd edition)[M]. New York: John Wiley and Sons, 1998.
- [27] RAJARATNAM M, TAKAWIRA F. Hand-off traffic characterisation in cellular networks under Engset new call arrivals and generalised service times[A]. Proceedings of the IEEE WCNC[C]. New Orleans, LA, USA, 1999.423-427.

作者简介:



赵亮 (1982-), 男, 河北深县人, 国家数字交换系统工程技术研究中心博士生, 主要研究方向为超宽带无线通信、移动通信网络与无线资源管理。

金梁 (1969-), 男, 北京人, 国家数字交换系统工程技术研究中心教授、博士生导师, 主要研究方向为第三代移动通信、超宽带无线通信、软件无线电与通信信号处理。

黄开枝 (1973-), 女, 安徽来安人, 国家数字交换系统工程技术研究中心副教授、硕士生导师, 主要研究方向为第三代移动通信与异构无线网络。

杨梅樾 (1981-), 男, 河南郑州人, 国家数字交换系统工程技术研究中心讲师, 主要研究方向为网络流量分析与网络资源分配。