

CDMA/OFDMA 异构网络中最小化中断概率的网络选择方案

李 宁* 林家儒

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室 北京 100876)

摘 要: 该文针对采用周期式负载测量机制的 CDMA/OFDMA 异构网络场景, 提出了一种最小化 SIR 中断概率 (Minimizing SIR Outage Probability, MSOP) 网络选择方案。该算法采用 Wilkinson 近似方法得出呼叫最佳接纳概率。仿真结果证明, 在较长的测量周期下, 该算法能有效实现负载均衡, 获得更高的中继增益, 提高资源的使用效率; 同时, 该算法也能大大降低呼叫的平均中断概率, 使用户获得更好的通信体验。

关键词: 无线异构网; 网络选择; 负载均衡; 中断概率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)12-2965-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00387

Network Selection Strategy for Minimizing Outage Probability in CDMA/OFDMA Heterogeneous Networks

Li Ning Lin Jia-ru

(Key Lab of Universal Wireless Communications, Ministry of Education,
Beijing University of Post and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: A network selection algorithm for CDMA/OFDMA heterogeneous networks using periodic load measurement scheme, which is named as Minimizing SIR Outage Probability (MSOP) network selection. In this algorithm, the best access probability is derived through the Wilkinson approximation method. Simulation results show that the MSOP algorithm can realize load balancing with long measurement interval, and consequently get better trunking gain, so as to improve the resource efficiency. Mean while, the average SIR outage probability is also decreased, so users can get better experience.

Key words: Wireless Heterogeneous Network (WHN); Network selection; Load balance; Outage probability

1 引言

众所周知, 异构性是下一代移动通信系统的典型特征之一。异构网络为用户提供了随时随地的接入能力, 并且使用户有条件选择最优质的网络服务。同时, 无线资源的汇聚也便于网络运营商采取更高效的资源管理机制, 提高无线资源利用率, 获得更高的经济收益。本文着重讨论异构网络环境下的一个重要议题——网络选择。

第 3 代与第 4 代移动通信系统分别以码分复用多址(CDMA)和正交频分多址(OFDMA)技术为标志, 并且会在相当长的一段时间内并存, 因此, 研究 CDMA/OFDMA 异构网络环境下的网络选择具有非常重要的意义。可是, 目前对这一课题的相关文献还很少。文献[1]设计了一种分布式的网络选择

算法, 终端估计并选择功耗较低的网络进行接入, 从而实现节省能耗的目的。文献[2]则以提高用户满意度为目标, 采用加强学习算法对性能进行优化。需要注意的是, 这两种方法都仅仅考虑了用户的利益。

由于负载均衡能够提高系统稳定性^[3]并获得中继增益^[4], 因此在网络选择算法设计中备受重视^[5,6]。但是, 极少有人关注到作为这些算法基础的负载测量带来的一些问题。常用的负载测量机制有两种: 触发式和周期式, 前者会造成较大的接入时延^[7], 并且难以实时监测网络状态; 而后者则需要占用固定的带宽用于信令传输, 若测量周期设置不当还会降低测量结果的置信度^[8], 从而导致错误的决策, 降低系统性能。

另一方面, 作为衡量信道质量的重要 QoS 指标, 信号能量干扰比(Signal to Interference Ratio, SIR)也是在网络选择算法设计中应当考虑的重要优化指标^[9]。

2011-04-20 收到, 2011-09-29 改回

国家重点基础研究发展计划(973 项目)资助课题(2007CB310604)

*通信作者: 李宁 lining.bupt@gmail.com

本文针对异构网中的初始网络选择问题，提出了基于 SIR 中断概率最小化模型的(MSOP)算法，该算法能够得出呼叫接入的最佳接纳概率。仿真表明，MSOP 算法通过动态调整最佳接纳概率实现降低中断概率以及负载均衡的目的。另外，MSOP 算法受测量周期影响较小，比一般的负载均衡(LB)算法性能更优，频谱利用率更高，呼叫阻塞率更低。

2 系统模型

在图 1 所示的 CDMA/OFDMA 多小区异构网络场景中，假设所有小区半径相同，基站位于小区中心，并且与另一网络小区的六角形顶点位置重合。当前用户所在的家乡小区(home cell)编号 0，CDMA 的 0 号小区周围有 N_{oc} 个邻小区，编号 $1 \sim N_{cc}$ ；OFDMA 的 0 号小区周围有 N_{oc} 个邻小区，编号 $1 \sim N_{cc}$ 。假设用户在小区内均匀分布且不考虑其移动性。CDMA 与 OFDMA 系统使用不同的频段，不存在系统间干扰。小区间频率复用因子设为 1。信号传输经历路径损耗和阴影衰落，不考虑小尺度衰落的影响。

3 MSOP 算法

3.1 问题描述

中断概率指的是 SIR 低于预订门限的概率。CDMA 是干扰受限系统，干扰随着网络负载的升高而增加；在 OFDMA 系统中，干扰来自其他小区的同频子载波，负载越高，遭遇同频子载波干扰的几率越大，称为碰撞概率^[10]。因此，SIR 中断概率与网络负载有关。MSOP 算法是在已知网络负载水平的前提下，寻找使下行 SIR 中断概率最小的最佳接纳概率问题。

本文的分析建立在单业务场景中。假设移动台位于 CDMA 系统的 0 小区与 OFDMA 系统的 0 小区重叠覆盖区域内(图 1 中的阴影部分)。呼叫接入 CDMA 小区的概率记为 θ ，接入 OFDMA 小区的概率为 $(1 - \theta)$ ， $\theta \in [0,1]$ 。若 $\theta = 1$ ，则表示新呼叫以

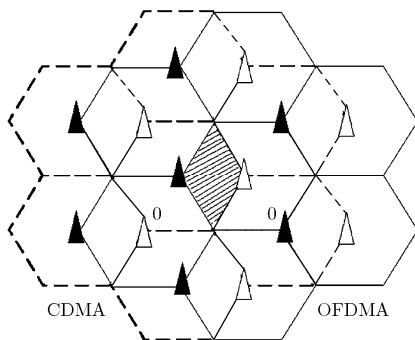


图 1 CDMA/OFDMA 多小区异构网络场景

100%的可能性接入 CDMA 系统；如果 $\theta = 0$ ，则以 100%的可能性接入 OFDMA 系统；若 $\theta = 0.5$ ，则接入两个网络的可能性分别为 50%。记 $P_{out}(\theta)$ 为新呼叫被接纳后的平均中断概率，则问题可以描述为寻求最佳接纳概率 θ_{best} ，使得

$$\theta_{best} = \arg \min_{\theta} P_{out}(\theta) \quad (1)$$

3.2 中断概率的计算

(1)负载水平 记第 i 个 CDMA 小区有 N_{ci} 个可用码字，被占用 n_{ci} 个，则第 i 个小区的负载水平为

$$L_{ci} = n_{ci} / N_{ci} \quad (2)$$

记第 i 个 OFDMA 小区有 N_{oi} 个可用子载波，被占用 n_{oi} 个，则第 i 个小区的负载水平为

$$L_{oi} = n_{oi} / N_{oi} \quad (3)$$

(2)SIR 记基站的总发射功率分别为 P_T^c 和 P_T^o ，业务速率记为 R ，系统总带宽分别记为 W_c 和 W_o 。用时间占用比 β_u 表示用户 u 传输的业务的时间占用比，则可知在 CDMA 系统中，业务占用的带宽为 $\beta_u \cdot W_c$ ，而在 OFDMA 系统中，业务占用的带宽为 $\beta_u \cdot cW_o / N_{o0}$ ，其中 c 为单个用户占用的子载波数。在单一业务场景下，可以认为在平均意义上业务的时间资源占用是相同的^[10,11]，即 $\beta_u = 1$ 。

假设忽略加性噪声，仅考虑干扰，CDMA 系统中下行干扰来自于相邻小区基站和本小区的其他用户信号。用 PL_i 表示第 i 个基站到移动台的路径损耗，则下行单位比特 SIR 为

$$\left(\frac{E_b}{I_0} \right)_c = \frac{\frac{P_T^c}{n_{c0}} \left(PL_0 \cdot 10^{\frac{\chi_0}{10}} \right)^{-1}}{\sum_{i=1}^{N_{cc}} P_T^c \cdot \left(PL_i \cdot 10^{\frac{\chi_i}{10}} \right)^{-1} + \left[\rho \cdot P_T^o \left(1 - \frac{1}{n_{c0}} \right) \right] \left(PL_0 \cdot 10^{\frac{\chi_0}{10}} \right)^{-1}} \cdot W_c / R \quad (4)$$

其中 χ_i 是均值为 0，方差为 σ_i^2 的正态分布随机变量，表示第 i 个小区基站到移动台的阴影衰落。 ρ 为正交因子， $\rho = 0$ 表示码字之间完全正交。

OFDMA 系统中干扰来自邻小区基站，单个子载波与第 i 个小区的碰撞概率可以表示为

$$\varphi_i = L_{oi} / N_{o0} \quad (5)$$

因此，OFDMA 系统的下行单位比特 SIR 可由下式给出

$$\left(\frac{E_b}{I_0} \right)_o = \frac{\frac{P_T^o}{n_{o0}} \left(PL_0 \cdot 10^{\frac{\chi_0}{10}} \right)^{-1}}{\sum_{i=1}^{N_{cc}} P_T^o \cdot \varphi_i \left(PL_i \cdot 10^{\frac{\chi_i}{10}} \right)^{-1}} \frac{cW_o}{N_{o0} \cdot R} \quad (6)$$

(3)Wilkinson 近似求解中断概率 记业务的目标 E_b / I_0 为 ε , 则中断概率可以表示为

$$P^\varphi = P\left\{\left(\frac{E_b}{I_0}\right)_\varphi < \varepsilon\right\} \quad (7)$$

角标 $\varphi \in \{c,o\}$, c 表示 CDMA 系统, o 表示 OFDMA 系统。

将式(4)和式(6)代入式(7)中, 得到中断概率的通用表达形式为

$$P^\varphi = P\left\{\sum_{i=1}^{N_{\varphi c}} a_i > T_\varphi\right\} = P\{A > T_\varphi\} \quad (8)$$

对于 CDMA 系统

$$\left. \begin{aligned} a_i &= \left(\frac{PL_0}{PL_i}\right) \cdot 10^{\frac{\chi_0 - \chi_i}{10}} \\ T_c &= \frac{1}{N_{c0} \cdot L_{c0}} \left[\frac{W_c}{\varepsilon R} - \rho \left(1 - \frac{1}{N_{c0} \cdot L_{c0}}\right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

对于 OFDMA 系统

$$a_i = L_{o0} L_{oi} \left(\frac{PL_0}{PL_i}\right) \cdot 10^{\frac{\chi_0 - \chi_i}{10}}, T_o = \frac{cW_o}{N_{o0} \varepsilon R} \quad (10)$$

为了求得式(8)中的中断概率, 需要先得到 A 的分布概率密度。显然, a_i 服从对数正态分布, 对于对数正态随机变量的和的分布, 在数学上并没有确定解, 一般采用近似方法进行逼近。文献[12]介绍了几种常见的近似方法并对它们的性能进行了评估。由于 Wilkinson 方法的计算复杂度较低且近似度较高, 因此在本文中选择这种方法进行中断概率的推导。

记 m_{a_i} 与 $\sigma_{a_i}^2$ 分别为对数正态变量 a_i 的均值与方差。假设 χ_0 与 χ_i 相互独立, 根据对数正态随机变量的性质, 很容易得到。

对于 CDMA 系统

$$\left. \begin{aligned} m_{a_i} &= E[\ln a_i] = \ln\left(\frac{PL_0}{PL_i}\right) \\ \sigma_{a_i}^2 &= \text{Var}[\ln a_i] = \alpha^2 (\sigma_0^2 + \sigma_i^2) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

对于 OFDMA 系统

$$\left. \begin{aligned} m_{a_i} &= E[\ln a_i] = \ln\left[L_{o0} \cdot L_{oi} \left(\frac{PL_0}{PL_i}\right)\right] \\ \sigma_{a_i}^2 &= \text{Var}[\ln a_i] = \alpha^2 (\sigma_0^2 + \sigma_i^2) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中 $\alpha = \ln 10 / 10$ 。Wilkinson 近似方法基于“对数正态随机变量之和也近似服从对数正态分布”的假设, 即 $A \sim \log \mathcal{N}(m_A, \sigma_A^2)$ 。根据文献[12], m_A 和 σ_A^2 可以按照式(13)计算得出

$$\left. \begin{aligned} m_A &= 2 \ln \left[\sum_{i=1}^{N_{\varphi c}} e^{m_{a_i} + \frac{\sigma_{a_i}^2}{2}} \right] \\ &\quad - \frac{1}{2} \ln \left[\sum_{i=1}^{N_{\varphi c}} e^{2m_{a_i} + 2\sigma_{a_i}^2} + 2 \sum_{i=1}^{N_{\varphi c}-1} \sum_{k=i+1}^{N_{\varphi c}} e^{m_{a_i} + m_{a_k} + \sigma_{a_i}^2} \right] \\ \sigma_A^2 &= \ln \left[\sum_{i=1}^{N_{\varphi c}} e^{2m_{a_i} + 2\sigma_{a_i}^2} + 2 \sum_{i=1}^{N_{\varphi c}-1} \sum_{k=i+1}^{N_{\varphi c}} e^{m_{a_i} + m_{a_k} + \sigma_{a_i}^2} \right] \\ &\quad - 2 \ln \left[\sum_{i=1}^{N_{\varphi c}} e^{m_{a_i} + \frac{\sigma_{a_i}^2}{2}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

因此, 式(8)中的中断概率可以进一步表示为

$$P^\varphi = P\{X > T_\varphi\} = Q\left(\frac{\ln T_\varphi - m_A}{\sigma_A}\right) \quad (14)$$

将式(11)-式(13)代入式(14)求解, 即可得到当前用户的中断概率。

3.3 最小平均中断概率

业务以接纳概率 θ 进行网络选择时, 可以认为该业务对 CDMA 网络产生的速率贡献为 θR , 对 OFDMA 网络产生的速率贡献为 $(1 - \theta)R$, 因此平均中断概率是 θ 的函数

$$P_{\text{out}}(\theta) = \theta \cdot P^c + (1 - \theta) \cdot P^o \quad (15)$$

其中 P^c , P^o 分别为用户接入 CDMA 系统与 OFDMA 系统的中断概率。

θ 取值为最佳接纳概率 θ_{best} 时, 可以计算得到系统的最小平均中断概率。

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{out}}^{\min} &= \theta_{\text{best}} \cdot Q\left(\frac{\ln \frac{1}{N_{c0} \cdot L_{c0}} \frac{W_c}{\theta_{\text{best}} \varepsilon R} - m_A}{\sigma_A}\right) \\ &\quad + (1 - \theta_{\text{best}}) \cdot Q\left(\frac{\ln \frac{cW_o}{(1 - \theta_{\text{best}}) \varepsilon R N_{o0}} - m_B}{\sigma_B}\right) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中为了便于区分, OFDMA 对应的变量角标用大写字母 B 表示。

显然, θ_{best} 和 P_{out}^{\min} 与用户位置有关, 如果通过直接积分的方式对其在空间位置上求平均比较困难。根据统计学原理, 抽样均值是总体均值的无偏估计[13], 因此本文采用大量随机散点并计算抽样平均值的方法得出结果, 即

$$\left. \begin{aligned} \bar{\theta}_{\text{best}} &= \langle \theta_{\text{best}}(x_i, y_i) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_{\text{best}}(x_i, y_i) \\ \bar{P}_{\text{out}}^{\min} &= \langle P_{\text{out}}^{\min}(x_i, y_i) \rangle = \sum_{i=1}^N P_{\text{out}}^{\min}(x_i, y_i) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中 (x_i, y_i) 为第 i 个样点的坐标。 N 为撒点数, 根据大数定律, 抽样均值收敛于总体均值。 设 $N = 2000$, 在 0.95 的置信水平下边际误差小于 5%, 对结果统计来说精度已经足够。

3.4 MSOP 的实现机制

MSOP 算法是一个周期性动态调整的过程, 包括 3 步:

(1) 每个周期开始, 进行负载测量;

(2) 根据路径损耗和负载水平寻找最佳接纳概率。 为了节省计算开销, 可以提前将可能取值离散化为多个区间, 并计算出最佳接纳概率存储为表格, 呼叫到来时只需查表即可;

(3) 在一个周期内, 新的呼叫请求均按照此最佳接纳概率进行接入。

4 仿真结果与分析

本节首先通过数值仿真对算法性能进行总体评价, 接着改变负载测量周期并对性能进行比较分析。 仿真结果与采用固定周期负载测量的普通负载均衡 (LB) 算法进行了比较。

仿真小区半径设为 1 km, 仅考虑第 1 层邻小区的干扰, 即 $N_{cc} = N_{oc} = 6$ 。 CDMA 的码片速率为 3.84 Mps, 可用码字数为 64; OFDMA 带宽为 5 MHz, 可用子载波 300 个, 每个子载波上的平均速率为 13 kbps^[14], 业务速率 32 kbps, 占用 3 个子载波。 业务的 SIR 门限为 6 dB。 路径损耗与传播距离指数成正比, d_i 为 i 小区基站到移动台的距离, 有 $PL_0/PL_i = (d_0/d_i)^\gamma$, γ 为路径损耗指数, 设为 4。 小区内阴影衰落标准差设为 2.5, 小区间标准差设为 8^[10]。

一般情况下评价网络选择算法的性能时, 更关注高负载状态下的性能指标, 因此, 在数值仿真中负载水平设置在 0.7 至 1.0 之间。 离散状态仿真中的业务强度设置为 200 Erlang。

4.1 数值仿真结果

图 2 显示了 $\bar{\theta}_{best}$ 随负载水平的变化趋势。 首先, 在两个网络负载水平相同的情况下, $\bar{\theta}_{best}$ 总是小于 0.5, 即呼叫接入 CDMA 概率总低于接入 OFDMA 概率。 这是因为 CDMA 系统对干扰较敏感, 低接纳概率可以降低系统的平均中断概率。 其次, 当 CDMA 系统负载固定时, $\bar{\theta}_{best}$ 随 OFDMA 系统负载的上升而增高; 同样, OFDMA 负载一定时, $\bar{\theta}_{best}$ 随 CDMA 负载的上升而下降。 这说明 MSOP 算法能够通过对接纳概率的调整实现网络间的负载均衡。

图 3 是 MSOP 算法与 LB 算法的平均中断概率

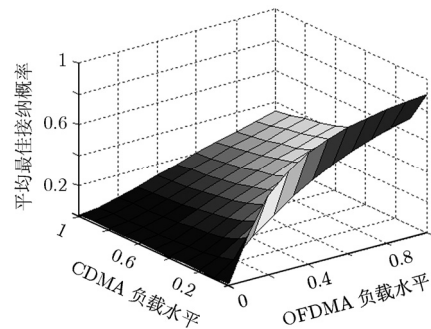


图 2 平均最佳接纳概率与负载水平的关系

\bar{P}_{out}^{min} 比较。 图 3(a) 中, 任何一个网络的负载水平上升, 平均中断概率都会提高, 但是最大值低于 0.2。 图 3(b) 中, OFDMA 系统的负载水平低于 CDMA 时, 呼叫被接入 OFDMA, 且中断概率随负载的上升而增长; OFDMA 系统的负载水平高于 CDMA 时, 呼叫全部接入 CDMA, 从而发生跳变。 跳变后呈一直线是因为同一条曲线代表固定的 CDMA 负载。 对比两张图片, 在同样的负载条件下, MSOP 算法的中断概率远低于 LB 算法, 可见, MSOP 算法可以有效降低系统的中断概率。

4.2 离散状态仿真结果

本节给出了离散状态仿真的结果。 图 4 显示了两个网络负载水平差值的累积分布。 周期为 100 s 时, 两种算法的负载均衡能力相仿。 当周期增长到 200 s 后, MSOP 算法性能基本不变, LB 算法的性能大幅下降。 可见, 长周期下 MSOP 算法的负载均衡性能更优秀。

图 5 是负载测量周期为 100 s 和 200 s 时的频带利用率。 显然, 短周期下两种算法的频带利用率相差不多, 而在长周期下, MSOP 算法比 LB 算法有着更高的频带利用率。 这是由于 MSOP 算法在长周期情况下具有更优越的负载均衡性能, 因此能够获得更高的中继增益 (trunking gain)。 图 6 进一步给出了频带利用率的波动方差仿真柱状图, 显然, MSOP 算法相比 LB 算法具有更高的稳定性, 并且这种优势在长周期下表现的更为明显。

表 1 给出了呼叫阻塞概率的对比仿真结果。 为了排除单次仿真的偶然性, 结果经过了多次仿真平均。 从结果可以看出, 周期为 100 s 时, 两种算法的呼叫阻塞率相差不多, 周期增长为 200 s 后, MSOP 算法的呼叫阻塞率明显低于 LB 算法。

虽然相比触发式的负载测量机制, 周期式机制要占用固定的带宽用于信令传输, 但是能降低接入时延, 适合实时性较强的业务。 对于非实时性业务, 可以权衡选择适当的测量机制。 事实上, 由于 MSOP

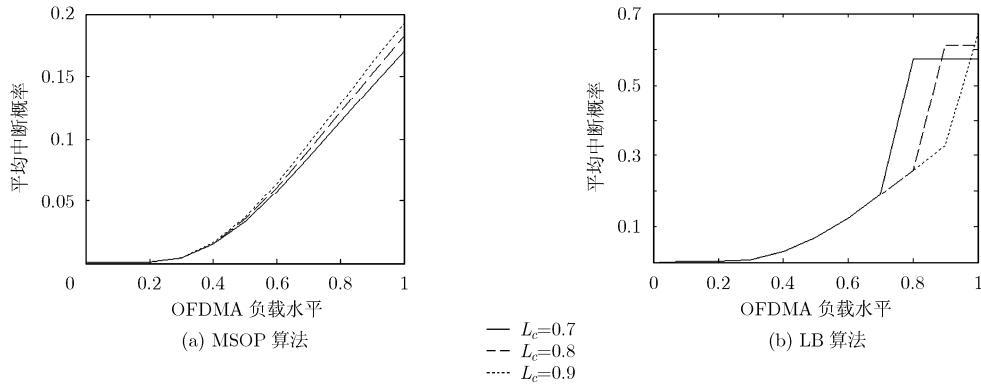


图 3 平均中断概率比较

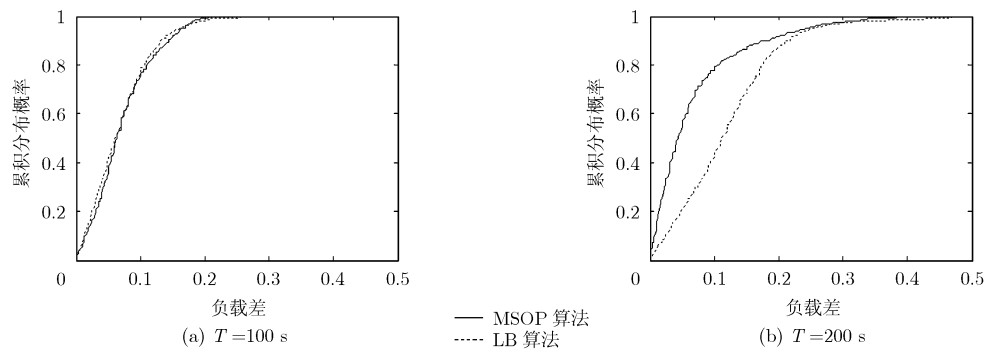


图 4 负载差的累积分布概率比较

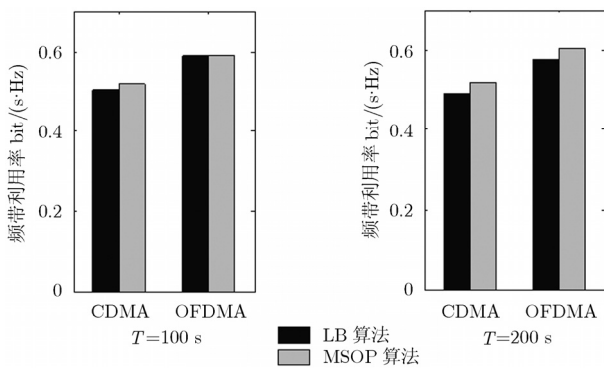


图 5 频带利用率

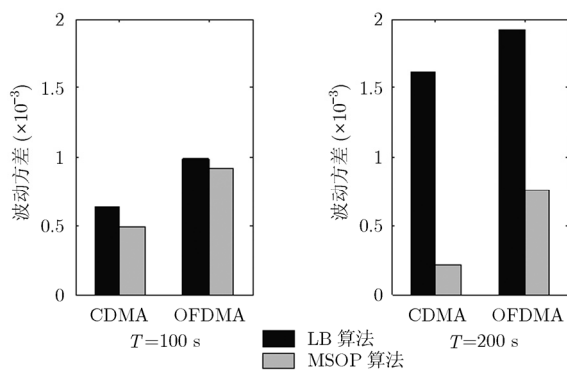


图 6 频带利用率波动方差

表 1 呼叫阻塞率对比

	T=100 s		T=200 s	
	LB	MSOP	LB	MSOP
呼叫阻塞率	0.2150	0.2017	0.2236	0.1969

算法在较长测量周期下表现出的良好性能，使用周期式机制同样能将测量带来的信令开销降低到可以忽略的程度，篇幅所限，对于信令开销的评估在此不加赘述。

5 结论

本文提出了一种适用于 CDMA/OFDMA 场景的 MSOP 网络选择算法。算法借助 Wilkinson 近似得到了网络选择的最佳接纳概率，既实现了负载均衡，也有效地降低了平均中断概率。该算法适用于周期性的负载测量机制。仿真结果表明，在较长的测量周期下，该算法相比传统的负载均衡算法有明显的性能提升，有效地降低了呼叫阻塞概率，同时频带利用率也得到提升。可以预见，在实际应用中使用该算法能够有效降低测量带来的各项开销，同时保持良好的性能，在高负载的网络状态下，该算法能够带来的效益尤为明显。

参 考 文 献

- [1] Huiling J, Zhaoyang Z, Guanding Y, *et al.* Distributed call admission control and network selection scheme for hybrid CDMA-OFDMA Networks [C]. Wireless Communications and Networking Conference, Kowloon, 2007: 3777-3782.
- [2] Vucevic N, Perez-Romero J, Sallent O, *et al.* Joint radio resource management for LTE-UMTS coexistence scenarios [C]. 2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Tokyo, 2009: 12-16.
- [3] Olabisi E, Falowo H, Anthony C, *et al.* Joint call admission control algorithms: requirements, approaches, and design considerations [J]. *Computer Communications*, 2008, 31(6): 1200-1217.
- [4] 冯智勇, 张平, 张永靖, 等. 可重配置系统中的联合负载控制及其终端选择算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 893-896. Feng Zhi-yong, Zhang Ping, Zhang Yong-jing, *et al.* A joint load control algorithm with terminal selection for the reconfigurable system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 893-896.
- [5] Giupponi L, Agusti R, Perez-Romero J, *et al.* Fuzzy neural control for economic-driven radio resource management in beyond 3G networks [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2009, 39(2): 170-189.
- [6] Cavalli S and Zizza F. Method to balance traffic load between nearby LTE/WiMAX cells grouped into inner and border constellations [P]. United States, 20100014426, 2010.
- [7] Orange. On traffic load reporting in LTE (R3-060426)[S]. Sophia Antipolis, 3GPP, 2006.
- [8] 3GPP TR 25.881 v5.0.0. Improvement of RRM across RNS and RNS/BSS (Release 5) [S]. 2001.
- [9] Fei Y and Vikram K. Optimal joint session admission control in integrated WLAN and CDMA cellular networks with vertical handoff [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2007, 6(1): 126-135.
- [10] Hyukmin S, Sanghoon L, Soo-Chang K, *et al.* Soft Load balancing over heterogeneous wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(4): 2632-2638.
- [11] Viering I, Döttling M, and Lobinger A. A mathematical perspective of self-optimizing wireless networks[C]. IEEE International Conference on Communications(ICC), Dresden, 2009: 1-6.
- [12] Abu-Dayya A and Beaulieu N C. Outage probabilities in the presence of correlated lognormal interferers [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1994, 43(1): 164-173.
- [13] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 第 4 版, 北京: 高等教育出版社, 2008: 158-160.
- [14] Dubuc C, Starks D, and Creasy T. A MIMO-OFDM prototype for next-generation wireless WANs[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2004, 42(12): 82-87.

李 宁: 女, 1981 年生, 博士, 研究方向为异构网络无线资源管理.

林家儒: 男, 1958 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信、信息处理、编码理论等.