

# 基于马尔可夫流体模型的无线中 继网络系统容量分析

詹卫许, 王桂娟, 张广驰, 秦家银

(1. 中山大学信息科学与技术学院, 广东广州 510275; 2. 中山大学数字家庭教育部重点实验室, 广东广州 510275)

**摘 要:** 本文建立了无线中继网络基于马尔可夫过程的流体模型, 信息源节点信息包的到达过程建模为马尔可夫调制泊松过程, 而发射过程刻画为一个依赖于信道状态信息的马尔可夫相位过程, 通过理论分析得出了系统的概率平衡方程, 利用母函数方法求出了队列长度的平稳分布概率和系统参数  $H$  值的计算方法, 并通过矩阵几何分析方法获得了系统有效容量分析表达式和系统平衡的条件, 同时对队列平均长度等 QoS 性能参数进行了理论分析, 仿真结果验证了理论分析的正确性和有效性。

**关键词:** 无线中继网络; 质量保障 (QoS); 有效容量; 马尔可夫过程; 队列分析

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2009)01-0038-05

## Effective Capacity Analysis for Markov Fluids Model in Incremental Relay System

ZHAN Wei-xu, WANG Gui-juan, ZHANG Guang-chi, QIN Jia-yin

(1. Department of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China;

2. Key Laboratory of Digital Life of Ministry of Education, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

**Abstract:** This paper builds the Markov fluids analytical model in Relay System where bursty traffic packet arrival process is generated by Markov modulated Poisson process and the transmission process is described by a phase type process based on the channel state information. We obtain the system's probability equilibrium equation and the asymptotic probability distribution of the system queue length using the master function method and get the method to achieve  $H$ . We use Matrix Geometric method to achieve the analytical expressions of effective capacity and the system's equilibrium condition. Moreover, the other quality of service (QoS) performance metrics such as average queue length and packet loss rate are derived. The simulated result shows that the theory model and analysis are valid.

**Key words:** relay networks; quality of service (QoS); effective capacity; Markov process; queuing analysis

### 1 引言

无线中继传输技术<sup>[1-3]</sup>在抗信道衰落、覆盖阴影区域、扩大无线蜂窝系统的有效覆盖半径, 增强特定区域数据速率等方面有很大的发展潜力, 无线中继技术已经成为 3G 系统演进的重点方向, 同时在 ad hoc/ sensor 网络和无线 mesh 网<sup>[4]</sup>中无线中继技术也得到了广泛的研究. 中继协作的形式多样, J. N. Laneman 等在文献[1]中进行了总结, 归纳为固定中继协助, 选择性中继协作和增量中继协作, 提出并论证了增量中继协作方式其频谱效率优于固定中继模型和选择性中继模型, 是一种低复杂性, 高效率的经典无线中继模型. 马尔可夫流体模型

是研究有线网络传输性能<sup>[5,6]</sup>和无线网络传输性能<sup>[7,8]</sup>的有效分析工具, 文献[9]应用马尔可夫流体模型对点到点的无线系统进行了基于信道状态信息的研究, 得出了系统的有效容量表达式, 文献[4]应用马尔可夫流体模型对无线中继系统中的两种不同优先级业务建立了调度模型并给出了相应的性能分析. 但在无线中继系统中尚未见到将马尔可夫流体模型应用于对既有数据到达又有数据发射的综合建模及其性能分析的报道.

本文在源节点采用了先进先出的队列分析模型, 对增量中继无线网络模型中基于信道状态信息的中继节点的启动采用马尔可夫过程进行描述, 而数据的到达和发射即可采用马尔可夫流体模型来进行建模. 通过流体

收稿日期: 2007-11-28; 修回日期: 2008-08-26

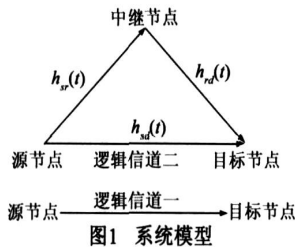
基金项目: 国家自然科学基金(No. 60672048); 广州市科技计划(No. 2008Z1-D151); 国家自然科学基金和广东省联合基金(No. U0635003); 广东省自然科学基金(No. 7301261)

分析模型, 得到了系统的平衡方程, 并采用矩阵几何的方法对系统的有效容量、系统的平衡条件等 QoS 性能参数进行了理论分析, 得出了队列平均长度和包丢失率等性能参数表达式, 仿真结果验证了理论分析的正确性和有效性.

## 2 系统模型

### 2.1 信道模型

本系统的基本结构由三个节点构成, 如图 1, 源节点发送信息, 目标节点接收该信息, 中继节点用于辅助源传递信息, 每个节点只配备一根天线. 无线信道均为时变平



坦瑞利衰落信道,  $h_{sd}(t)$ ,  $h_{sr}(t)$ ,  $h_{rd}(t)$  分别为发散时刻  $t$  源与目标、中继之间以及中继与目标之间信道的增益, 它们是相互独立的零均值复高斯随机变量, 方差分别为  $\sigma_{sd}^2$ ,  $\sigma_{sr}^2$  和  $\sigma_{rd}^2$ , 假设源节点和中继节点的发射功率相等, 均为  $P_s = P_r = P$ , 按照增量中继无线网络模型, 本文在逻辑上将信道划分以下两种: 逻辑信道一和逻辑信道二. 逻辑信道一: 当  $|h_{sd}(t)| \geq H$  时, 源节点和目标节点直接进行通信, 中继节点休眠, 其信道平均容量为

$$\bar{\mu}_1 = E \left\{ I_{|h_{sd}(t)| \geq H} \cdot \log_2 \left[ 1 + \frac{SNR |h_{sd}(t)|^2}{W} \right] \right\} \quad (1)$$

逻辑信道二: 当  $|h_{sd}(t)| < H$  时, 采用两阶段正交时分转发协议, 第一阶段源节点广播信息到中继节点和目标节点, 第二阶段中继节点收到信息后进行功率放大, 然后发射信息到目标节点, 目标节点对第一阶段的信号和第二阶段的信号进行最大比合并进行解码, 信道的平均速率为

$$\bar{\mu}_2 = \frac{W}{2} E \left\{ I_{|h_{sd}(t)| < H} \cdot \log_2 \left[ 1 + \frac{SNR}{W} \left( |h_{sd}(t)|^2 + \frac{|h_{rd}(t)|^2 |h_{rd}(t)|^2 SNR}{|h_{sr}(t)|^2 SNR + |h_{rd}(t)|^2 SNR + 1} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

其中  $I(\cdot)$  为示性函数, SNR 为无衰落条件下的信噪比,  $W$  为信道带宽.

### 2.2 数据源到达模型及其系统发射策略

马尔可夫调制泊松过程是一种双随机过程, 能够很好地刻画信源的到达过程, 在通信领域已经广泛的应用<sup>[5,6]</sup>, 因此本文也采用其作为数据到达模型, 即当马尔可夫链的状态为  $i$  时, 泊松过程的概率为  $\lambda_i$ ,  $i = 1, 2$ , 当  $\lambda_1 = \lambda_2$  时可以看到成为单随机泊松过程.

本文采用队列用于用户信息源的缓冲, 假设源节点能够获得逻辑信道一的完美信道状态信息, 当采用逻辑信道一进行通信, 记为相位状态一. 当通过逻辑信道二进行通信, 记为相位状态二, 当系统处于相位状态一时

其系统的平均发射速率为  $\mu_1$ , 当系统处于相位状态二时, 其系统的平均发射速率为  $\mu_2$ , 系统从相位状态一转移到相位状态二的转移率为  $\alpha$ , 从相位状态二转移到相位状态一的转移率为  $\beta$ , 其无穷小生成矩阵表示<sup>[9]</sup>为

$$Q = \begin{bmatrix} -\alpha & \alpha \\ \beta & -\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

记  $\tilde{n}(t)$  为队列长度,  $s(t)$  为  $h_{sd}(t)$  的状态, 从文献 [9] 可知  $s(t)$  为两状态的马尔可夫过程, 同时由于系统的数据达到过程为马尔可夫调制的泊松过程, 而系统数据的发射过程为复合泊松过程, 由大数定理知其发射率在状态一时为  $\mu_1 = \bar{\mu}_1$ , 在状态二时发射率为  $\mu_2 = \bar{\mu}_2$ , 从而二维过程  $(\tilde{n}(t) = n, s(t) = i)$ , 为基于  $h_{sd}(t)$  状态相位的马尔可夫过程, 其状态空间为  $\{(n, i), n \geq 0, 0 \leq i \leq 1\}$ , 记

$$P_{n,i} = \lim_{t \rightarrow \infty} P(\tilde{n}(t) = n, s(t) = i) \quad (4)$$

$$\text{其中 } s(t) = \begin{cases} 0, & |h_{sd}(t)| < H \\ 1, & |h_{sd}(t)| \geq H \end{cases} \quad (5)$$

令  $P_n = [P_{n,0} \ P_{n,1}]$ ,  $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2)$  为源节点数据达到速率矩阵,  $M = \text{diag}(\mu_1, \mu_2)$  为发射速率矩阵. 于是可得到系统的平衡方程

$$\begin{cases} P_0(\Lambda - Q) = P_1 M = 0 \\ P_{n-1} \Lambda - P_{n-1}(\Lambda - Q + M) - P_{n+1} M = 0 \quad (n \geq 1) \end{cases} \quad (6)$$

利用母函数分析方法<sup>[11]</sup>, 定义

$$g(z) = \sum_{n=0}^{\infty} z^n P_n$$

则由系统的平衡方程可得

$$\begin{cases} g(z)[\Lambda z^2 - (\Lambda - Q + M)z + M] = (1-z)P_0 M \\ g(z) = (1-z)P_0 M[\Lambda z^2 - (\Lambda - Q + M)z + M]^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

其中  $[\cdot]^{-1}$  为矩阵逆.

记  $A(z) = \Lambda z^2 - (\Lambda - Q + M)z + M$

$$g(z) = \frac{(1-z)}{\det A(z)} P_0 M \text{adj} | A(z) | \quad (8)$$

$$\text{记: } F_{\tilde{n}}(z) = g(z) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = g_0(z) + g_1(z)$$

因为  $F_{\tilde{n}}(1) = 1$ ,  $P_0 M \text{adj} | A(z) | 1 = 0$  可求得  $P_0$ , 从而可得到向量表达式  $g(z)$ ,  $g(z)$  的  $z^n$  的系数向量即为  $[P_{n,0} \ P_{n,1}]$ , 则队列平均长度为

$$E \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{n}(t) = F_{\tilde{n}}'(z) \Big|_{z=1} \quad (9)$$

队列的方差为

$$D \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{n}(t) = F_{\tilde{n}}''(z) \Big|_{z=1} + F_{\tilde{n}}'(z) \Big|_{z=1} - (F_{\tilde{n}}'(z) \Big|_{z=1})^2 \quad (10)$$

## 3 性能评估

### 3.1 中继节点的状态分析

中继节点将根据系统的逻辑信道的状态处于休眠

状态或激活状态,记中继节点的状态为  $R_s$ ,  $R_s = 0$  为休眠状态,  $R_s = 1$  为活动状态,则可以得到中继节点的休眠概率表达式:

$$P(R_s = 0) = P(I(h_{sd}(t)) \geq H) = 1 - e^{-H^2} \quad (11)$$

其中  $I(\cdot)$  为示性函数.

$$C = \alpha \bar{\mu}_1 + \beta \bar{\mu}_2 = \alpha \int_H^\infty W \log_2 \left[ 1 + \frac{SNR x^2}{W} \right] \cdot 2x e^{-x^2} dx \\ + \beta \iiint_{\substack{0 \leq x \leq \infty \\ 0 \leq y \leq \infty \\ 0 \leq z \leq \infty}} Wxyz e^{-(x^2+y^2+z^2)} \log_2 \left[ 1 + \frac{SNR}{W} \left( x^2 + \frac{\sigma_{sr}^2 \sigma_{rd}^2 y^2 z^2 SNR}{\sigma_{sr}^2 y^2 SNR + \sigma_{rd}^2 z^2 SNR + 1} \right) \right] dx dy dz$$

当  $\frac{\partial(\alpha \bar{\mu}_1 + \beta \bar{\mu}_2)}{\partial H} = 0$  时  $\alpha \bar{\mu}_1 + \beta \bar{\mu}_2$  达到最大值

$$\alpha \log_2 \left[ 1 + \frac{SNR \cdot H^2}{W} \right] - 2\beta \iiint_{\substack{0 \leq x \leq \infty \\ 0 \leq y \leq \infty \\ 0 \leq z \leq \infty}} yz e^{-(y^2+z^2)} \log_2 \left[ 1 + \frac{SNR}{W} \left( H^2 + \frac{\sigma_{sr}^2 \sigma_{rd}^2 y^2 z^2 SNR}{\sigma_{sr}^2 y^2 SNR + \sigma_{rd}^2 z^2 SNR + 1} \right) \right] dy dz = 0$$

$$\text{令 } f(H) = \alpha \log_2 \left[ 1 + \frac{SNR \cdot H^2}{W} \right] - \frac{\beta}{2} \iiint_{\substack{0 \leq x \leq \infty \\ 0 \leq y \leq \infty \\ 0 \leq z \leq \infty}} (x+y) \log_2 \left[ 1 + \frac{SNR}{W} \left( H^2 + \frac{\sigma_{sr} \sigma_{rd} SNR xy}{\sigma_{sr} SNR x + \sigma_{rd} SNR y + 1} \right) \right] dx dy$$

从而可以比较容易通过二分法得到  $H_0$  满足  $f(H_0) = 0$ .

### 3.3 系统的有效容量分析

用户的 QoS 保障是在我们研究新一代无线通信系统性能时必须考虑的重要因素,早在 20 世纪 90 年代就获得了广泛的研究,文献[12]给出了 QoS 指数的定义,有效容量是刻画系统性能更有力的工具,文献[8]对此概念进行了阐述,并给出了表达式如式(12)所示.

$$E_C(\theta) = - \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log_2(\omega \exp(Q - \theta M)t) \quad (12)$$

其中  $\omega$  为  $Q$  的平稳分布,  $\theta$  为 QoS 指数,由 Perron-Frobenius 定理<sup>[13]</sup>得:

$$E_C(\theta) = - \frac{1}{\theta} \max_i \nu_i \quad (13)$$

其中  $\{\nu_i\}$  为矩阵  $Q - \theta M$  的最大特征值

$$\det[M - (Q - \theta M)] = \det \begin{bmatrix} \gamma + \alpha + \theta \mu_1 & -\alpha \\ -\beta & \gamma + \beta + \theta \mu_2 \end{bmatrix} = \gamma^2 + (\alpha + \beta + \theta(\mu_1 + \mu_2))\gamma + \alpha\theta\mu_2 + \beta\theta\mu_1 + \mu_1\mu_2\theta^2 \quad (14)$$

则  $Q - \theta M$  的最大特征值为

$$E_C(\theta) = - \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log_2 \left[ \omega \exp \left( \begin{bmatrix} \gamma + \alpha + \theta \mu_1 & -\alpha \\ -\beta & \gamma + \beta + \theta \mu_2 \end{bmatrix} t \right) \right] \\ = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} + \frac{(\alpha + \beta) - \sqrt{(\alpha + \beta + \theta(\mu_1 + \mu_2))^2 - 4(\alpha\theta\mu_2 + \beta\theta\mu_1 + \theta^2\mu_1\mu_2)}}{2\theta} \quad (15)$$

从上述表达式可以看出有效容量是为 QoS 指数  $\theta$  的单调递减函数,当  $\theta \rightarrow 0$  时,可以得到系统的最大的平均发射容量.(见式(16))

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} E_C(\theta) = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} + \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{(\alpha + \beta) - \sqrt{(\alpha + \beta + \theta(\mu_1 + \mu_2))^2 - 4(\alpha\theta\mu_2 + \beta\theta\mu_1 + \theta^2\mu_1\mu_2)}}{2\theta} \\ = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} + \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{2(\alpha + \beta + \theta(\mu_1 + \mu_2))(\mu_1 + \mu_2) - 4(\alpha\mu_2 + \beta\mu_1 + 2\theta\mu_1\mu_2)}{4\sqrt{(\alpha + \beta + \theta(\mu_1 + \mu_2))^2 - 4(\alpha\theta\mu_2 + \beta\theta\mu_1 + \theta^2\mu_1\mu_2)}} \\ = \frac{\alpha\mu_1 + \beta\mu_2}{(\alpha + \beta)} \quad (16)$$

当  $\theta$  增大时,有效容量将变小,系统 QoS 约束要求越来越高,当  $\theta \rightarrow \infty$  时,得到最严格 QoS 条件下的系统有效容量.

$$\lim_{\theta \rightarrow \infty} E_C(\theta) = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} + \lim_{\theta \rightarrow \infty} \frac{(\alpha + \beta) - \sqrt{(\alpha + \beta + \theta(\mu_1 + \mu_2))^2 - 4(\alpha\theta\mu_2 + \beta\theta\mu_1 + \theta^2\mu_1\mu_2)}}{2\theta} \\ = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} + \lim_{\theta \rightarrow \infty} \frac{(\alpha + \beta)/\theta - \sqrt{((\alpha + \beta)/\theta + (\mu_1 + \mu_2))^2 - 4(\alpha\mu_2 + \beta\mu_1)/\theta - 4\mu_1\mu_2}}{2} \\ = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} - \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{2} = \min(\mu_1, \mu_2) \quad (17)$$

### 3.4 系统平衡条件分析

根据系统的有效容量表达式, 可得系统 QoS 指数为  $\theta$  时的系统平衡条件.

$$\lambda_1 P(R_s = 0) + \lambda_2 P(R_s = 1) \leq \mu_1 P(RS = 0) + \mu_2 P(RS = 1)$$

$$\frac{(\alpha + \beta) - \sqrt{(\alpha + \beta + \theta(\mu_1 + \mu_2))^2 - 4(\alpha\theta\mu_2 + \theta\mu_1 + \theta^2\mu_1\mu_2)}}{2\theta} + \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} \leq \frac{\alpha\mu_1 + \beta\mu_2}{(\alpha + \beta)} \quad (18)$$

当无 QoS 延时要求时, 即  $\theta \rightarrow 0$  时, 系统有效容量为系统的最大容量, 其系统平衡条件表示如下

$$\lambda_1 P(R_s = 0) + \lambda_2 P(R_s = 1) \leq \frac{\alpha\mu_1 + \beta\mu_2}{(\alpha + \beta)}$$

$$\alpha\lambda_1 + \beta\lambda_2 \leq \alpha\mu_1 + \beta\mu_2 \quad (19)$$

当系统 QoS 条件最严格, 即  $\theta \rightarrow \infty$  时, 系统达到源的平均速率不大于  $\min(\mu_1, \mu_2)$ , 则系统的平衡条件为

$$\frac{\alpha\lambda_1 + \beta\lambda_2}{(\alpha + \beta)} \leq \min(\mu_1, \mu_2) \quad (20)$$

### 4 仿真结果及其分析

根据前面的系统模型, 其仿真环境和条件如下, 系统带宽  $W = 11\text{MHz}$ , 假设源节点, 中继节点的发射功率相等, 源到目标, 源到中继、中继到目标的信噪比相同,  $\text{SNR} = 6\text{dB}$

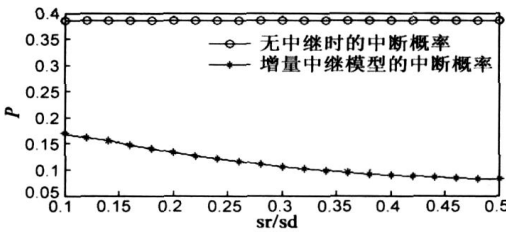


图2 不同中继位置的中断概率 (中断速率=1Mbps)

从图2可以看出当采用直接发射时, 系统的中断概率为 38% (其中断速率设置为 1Mbps), 而当采用无线中继网络时, 其中断概率大大降低了. 同时从图形可以看出系统的中断概率和中继的位置有关, 在无线中继位于源节点和目标节点的中间时其中断概率达到最小, 为 8.08%, 在两端时达到最大, 为 18.16%, 明显提高了系统稳定性.

图3为在源到目标、源到中继、中继到目标的归一化距离分别为 1, 0.1, 0.9 的条件下, 系统通过采用中继节点能够很好地提高系统的容量, 图3的结果说明了设置不同的信道参数  $H$ , 可以得到不同的系统容量, 当  $H$

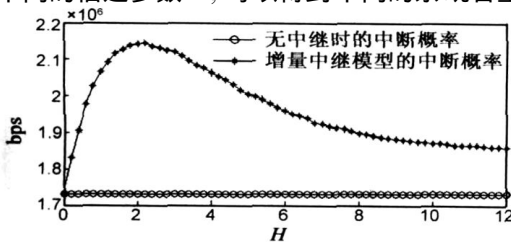


图3 不同H值对系统速率的影响

= 0 时不启动中继节点, 随着  $H$  的增大, 系统地容量得到提高, 当  $H = 1.9$  时系统的容量达到最大, 但是当  $H$  继续增大时, 中继的使用更加频繁, 但是系统容量下降并逐步达到稳定, 因此我们可以看出选择参数  $H$  的重要意义.

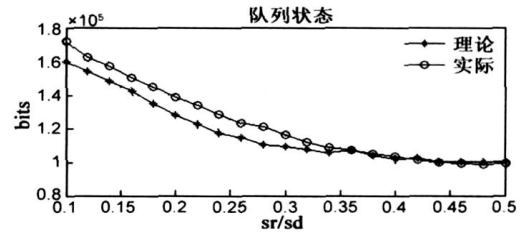


图4 系统队列状态理论计算和仿真对比

从图4为  $H = 1$ ,  $\lambda_1 = 0.9\text{Mb/s}$ ,  $\lambda_2 = 1.4\text{Mb/s}$  中继位于源节点和目标节点中间线上的不同位置时的队列延迟平均数目和通过理论模型得出的平均数目的对比, 通过图4可以看出用户的队列中的延迟的数量随着无线中继的位置变大而减小, 在不同位置的延迟队列长度稳定, 且和理论模型的计算的队列延迟期望值较为接近, 误差率较小, 说明了采用流体模型分析队列状态的有效性.

### 5 结论

本文利用马尔可夫过程的流体模型分析了无线中继网络的性能, 其中系统信息源节点信息包的到达过程建模为马尔可夫调制泊松过程, 而发射过程刻画为一个依赖于信道状态信息的两状态马尔可夫相位过程, 从而构成了一个接收和发射过程均基于相位状态的马尔可夫流体模型, 通过概率转移矩阵关系得出了系统的概率平衡方程, 利用母函数方法求出了队列状态的平稳分布概率, 并通过矩阵几何分析方法获得了系统有效容量分析表达式和系统平衡的条件, 同时对队列平均长度和包丢失率等 QoS 性能参数进行了理论分析, 仿真结果也证明了系统模型的合理性和理论分析的正确性.

#### 参考文献:

[1] J N Laneman, D N C Tse, G W Wornell. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Trans Inf Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.  
 [2] A Sendonaris, E Erkip, B Aazhang. User cooperation diversity part I: system description [J]. IEEE Trans Commun, 2003, 51

(11): 1927– 1938.

- [ 3 ] A Salman Avestimehr and N C Tse David. Outage capacity of the fading relay low-SNR regime[ J ]. IEEE Trans Inf Theory, 2007, 53( 4 ): 1401– 1415.
- [ 4 ] Afshin Fallahi, Ekram Hossain and S Alfa Attahiru. QoS and energy trade off in distributed energy limited mesh relay networks a queuing analysis[ J ]. IEEE Trans Parallel and Distributed System, 2006: 17( 6 ), 576– 592.
- [ 5 ] 陈鑫林. 现代通信中的排队论[ M ]. 北京: 电子工业出版社, 1999.
- [ 6 ] 盛友招. 排队论及其在现代通信中的应用[ M ]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [ 7 ] M M Krunz, J G Kim. Fluid analysis of delay and packet discard performance for QoS support in wireless networks[ J ]. IEEE J. Sel. Areas Commun, 2001, 19( 2 ): 384– 395.
- [ 8 ] D Wu, R Negi. Effective capacity: a wireless link model for support of quality of services[ J ]. IEEE Trans. Wireless Commun. 2003, 2( 4 ): 630– 643.
- [ 9 ] Lingjia Liu, Parimal Parag, Jia Tang. Resource allocation and quality of service evaluation for wireless communication systems using fluid models[ J ]. IEEE Trans Inf Theory, 2007 53( 5 ): 1767– 1777.
- [ 10 ] Jia Tang, Xi Zhang. Cross layer resource allocation over wireless relay networks for quality of service provisioning[ J ]. IEEE Journal on Selected Areas in Commun, 2007, 25( 4 ): 645– 655.
- [ 11 ] 复旦大学. 概率论[ M ]. 北京: 人民教育出版社, 1979.
- [ 12 ] C S Chang. Stability, queue length, and delay of deterministic and stochastic queueing networks[ J ]. IEEE Trans. Automat. Contr, 1994, 39( 5 ): 913– 931.
- [ 13 ] A Dembo and O Zeitouni. Large Deviations Techniques and Applications, ser. Stochastic Modeling and Applied Probability, 2nd ed[ M ]. New York: Springer Verlag, 1998.

#### 作者简介:



詹卫许 男, 1974 年出生于湖南浏阳, 中山大学博士生, 主要研究方向 MIMO 和无线资源调度.

E-mail: zszhanweixu@126.com



王桂娟 女, 1973 年出生于河北新乐, 中山大学博士生, 主要研究方向 WEB 挖掘和网络资源分配.



张广驰 男, 1982 年出生于广东广州, 中山大学博士生, 主要研究方向为多输入多输出(MIMO)技术, 协作通信技术以及无线通信系统性能优化.



秦家银 男, 1961 年出生于湖北荆门, 中山大学信息科学与技术学院副院长、电子与通信工程系教授、博士生导师, 主要研究方向为无线 CDMA 与移动通信技术和光电子技术与通信.