

分层网络下行中断概率的闭式表达

张文健¹, 田茂¹, 何浩¹, 沈祖康²

(1. 武汉大学电子信息学院, 430079, 武汉; 2. 电信科学技术研究院, 100191, 北京)

摘要: 针对用边界值形式表示的共信道干扰限制分层网络的下行中断概率不够精确的问题, 采用随机几何理论建模网络结构, 并在此基础上推导了每层下行中断概率的闭式表达式. 首先构建了关于宏小区信号功率和毫微微小区聚合干扰功率的下行接收信干比函数, 然后以聚合干扰功率为条件, 根据宏小区信号功率的概率分布推导了接收信干比不高于门限值的概率, 最后利用聚合干扰功率的概率分布计算条件中断概率的期望值, 得到了中断概率闭式表达式. 仿真结果表明: 当毫微微小区基站发射功率降低 3.16 mW (小区平均数为 100), 或小区平均数减少 20 个 (基站发射功率为 100 mW) 时, 能够分别使宏小区下行中断概率减小约 20% 或 5%.

关键词: 分层网络; 毫微微小区; 共信道干扰; 中断概率

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)12-0059-05

Closed Expressions of Downlink Outage Probability in Tiered Networks

ZHANG Wenjian¹, TIAN Mao¹, HE Hao¹, SHEN Zukang²

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. China Academy of Telecommunication Technology, Beijing 100191, China)

Abstract: Since the downlink outage probability expressed with bound value is not precise enough in co-channel interference-limited tiered networks, the stochastic geometry theory is used to model network framework and closed-expressions of per-tier downlink outage probability are derived based on the framework. The received signal to interference ratio (SIR) is formulated as a function of macrocell signal power and femtocell aggregated interference power. Then the probability for received SIR less than a threshold is derived according to the probability distribution of macrocell signal power in the condition on the aggregated interference power. The downlink outage probability is obtained by applying the probability distribution of aggregated interference power to calculate the expectation of conditioned outage probability. Simulation results show that the downlink outage probability in macrocell reduces about 20% and 5%, respectively, when the femtocell transmit power decreases 3.16 mW (the number of femtocells is 100 on average) or the number of femtocells decreases 20 on average (the femtocell transmit power is 100 mW).

Keywords: tiered networks; femtocell; co-channel interference; outage probability

无线业务的迅猛发展要求传统蜂窝网络能够提供更高的数据速率, 网络运营商正积极部署一些补充性网络设备以应对挑战, 如分布式天线、中继和微小区等. 毫微微小区 (femtocell) 作为一种扩展室内覆盖、提升网络吞吐量的低成本解决方案, 受到了运营商、标准化组织和研究者的广泛关注^[1-3].
毫微微小区基站是一种基于移动技术的低功率接入点, 通过第三方回程链路与运营商网络连接, 如

数字网络用户线、电缆或光纤等. 毫微微小区具有较小的覆盖范围(通常半径为 10~50 m), 能够明显改善接收端信号质量和增加空间频率重用, 从而提升网络吞吐量. 与无线保真(wireless fidelity, Wi-Fi)接入点不同, 毫微微小区工作在运营商授权的频谱上. 从频谱效率角度来讲, 毫微微小区倾向与宏小区共享可用的频谱资源, 但由于毫微微小区和宏小区之间无法通过信令交互进行快速资源协调, 共信道多小区并发传输将相互干扰. 随着毫微微小区的大量部署, 层间和层内干扰将降低每层的传输性能, 抑制空间频率重用带来的吞吐量提升^[3-5].

传输中断(或成功)概率是衡量链路传输性能的重要指标. 文献[6-7]基于多天线传输和 Rayleigh 衰落信道, 分别推导了共信道分层毫微微小区网络下行传输成功概率和接收信干比的累积分布函数(cumulative distribution function, CDF), 但未考虑信道路损的影响; 文献[8]仅针对码分多址系统的上行传输, 基于路损和阴影衰落推导了宏小区中断概率和毫微微小区中断概率的紧凑下边界; 文献[9]同样基于路损和阴影衰落, 给出了毫微微小区下行传输中断概率的紧凑下边界, 但没有包含层间干扰的影响.

在无需信道信息和非机会调度的系统中, 小尺度衰落不会造成大的影响, 传输信号的功率衰减主要由路损决定, 因此基于信道路损量化共信道分层网络下行传输性能是有必要的, 但上述研究均未给出网络下行传输中断概率或接收信干比分布的闭式表达. 基于此, 本文采用随机几何理论建模毫微微小区的空间分布和聚合干扰, 考虑信道路损和干扰限制场景, 分别推导了宏小区和毫微微小区下行传输中断概率的闭式表达式, 阐明了共信道分层网络下行中断性能与各影响因素之间的关系.

1 网络结构及信道模型

考虑半径为 R_m (下标 m 表示宏小区) 的圆盘形宏蜂窝小区, 搭载单天线的基站 B_0 位于中心, 为覆盖区域 C 内均匀分布的用户提供服务, $|C| = \pi R_m^2$. 共信道部署的单天线毫微微小区基站分布在宏小区内, 每个毫微微小区基站仅为覆盖区域(半径为 R_f) 内均匀分布的授权用户提供服务. 在每个时隙内, 宏小区基站和每个毫微微小区基站分别在共享信道上调度一个用户的下行传输, 两种基站的下行发射功率分别表示为 P_m 和 P_f . 本文考虑干扰限制场景, 忽略网络中来自其他宏小区的干扰和接收端热噪声

的影响.

闭式接入毫微微小区基站通常由用户部署家中或办公室, 用于改善室内覆盖和提高数据传输速率, 因此其空间分布具有随机性. 为获得精确的分析结果, 本文将分布的随机性考虑在内, 采用随机几何理论建模毫微微小区的空间分布. 假设毫微微小区根据单一性空间泊松点过程(spatial Poisson point process, SPPP)模型部署在宏小区内, 毫微微小区基站集合表示为 Ω_f , 密度为 λ_f , 则在覆盖区域 C 内, 毫微微小区的平均数量为 $N_f = \lambda_f |C|$. 空间泊松点过程模型在之前的研究中已广泛应用^[6-10], 且有效性已得到确认^[11].

本文仅考虑信道路损的影响, 信号传输的功率衰减仅随传输距离变化, 这种假设是合理的, 尤其在采用鲁棒性接收(如 RAKE 接收)或具有足够分集(如多天线分集或分布式载波分配)的宽带系统中, 小尺度衰落的影响可以忽略. 在宏小区 B_0 内, 用户(宏小区用户或毫微微小区用户)的下行平均接收功率表示为

$$P_r = P_m A_{r,m} D_{r,m}^{-\alpha_{r,m}} \quad (1)$$

式中: $A_{r,m}$ 为传输固定损耗; $D_{r,m}$ 为用户和宏小区基站间的传输距离; $\alpha_{r,m}$ ($\alpha_{r,m} > 0$) 为路损指数. 传输距离 $D_{r,m}$ 与用户的随机位置有关, 对于均匀分布的用户, $D_{r,m}$ 的累积分布函数为

$$F_{D_{r,m}}(r) = \frac{(r - r_0)^2}{(R_m - r_0)^2} \quad (2)$$

式中: r_0 为接收端和发射端天线的最小距离, 可使短距离传输模型更精确^[12]. 相应地, 接收功率 P_r 的累积分布函数为

$$F_{P_r}(s) = 1 - F_{D_{r,m}}\left(\left(\frac{P_m A_{r,m}}{s}\right)^{1/\alpha_{r,m}}\right) \quad (3)$$

2 下行传输中断概率

2.1 宏小区下行传输中断概率

在宏小区 B_0 内, 用户接收到来自毫微微小区基站 F_k ($k=0, 1, \dots, N_f-1$) 的干扰信号, 忽略接收端热噪声, 宏小区用户下行接收信干比表示为

$$\Gamma_m = \frac{P_m A_m D_m^{-\alpha_m}}{\sum_{f \in \Omega_f} P_f A_{m,f} D_{m,f}^{-\alpha_{m,f}}} = \frac{S_m}{I_{m,f}} \quad (4)$$

式中: S_m 和 $I_{m,f}$ 分别表示宏小区用户接收的有用信号功率和层间聚合干扰功率. 由于宏小区用户均匀分布, S_m 的分布可由式(3)得到. 假设预定的宏小区下行传输信干比门限为 γ_m , 固定变量 $I_{m,f}$, 条件中断概率可表示为

$$p_m(\gamma_m | x) = P\left(\frac{S_m}{x} \leq \gamma_m\right) = 1 - F_{D_m}\left[\left(\frac{P_m A_m}{\gamma_m x}\right)^{1/\alpha_m}\right] = 1 - \left[\frac{P_m^{1/\alpha_m} A_m^{1/\alpha_m} \gamma_m^{-1/\alpha_m} x^{-1/\alpha_m} - r_0}{R_m - r_0}\right]^2 \quad (5)$$

在宏小区 B_0 内,当用户位于小区边缘时,接收的有用信号功率最小,因此 S_m 的最小值为 $K = P_m A_m R_m^{-\alpha_m}$. 基于此,当 $x \geq \frac{K}{\gamma_m}$ 时,式(5)成立,否则 $p_m(\gamma_m | x) = 0$.

考虑毫微微小区根据 SPPP 模型部署在宏小区内,来自毫微微小区的聚合干扰 $I_{m,f}$ 建模为幂律散弹噪声^[13]. 当路损指数 $\alpha_{m,f} = 4$ 时,聚合干扰 $I_{m,f}$ 的概率密度函数(probability density function, PDF)为^[14]

$$f_{I_{m,f}}(x) = \frac{\pi \lambda_f P_f^{1/2} A_{m,f}^{1/2}}{2} x^{-3/2} \exp\left(-\frac{\pi^3 P_f A_{m,f} \lambda_f^2}{4x}\right) \quad (6)$$

因此,通过对 $p_m(\gamma_m | x)$ 求期望值,可以得到宏小区下行传输中断概率

$$p_m(\gamma_m) = \int_0^\infty p_m(\gamma_m | x) f_{I_{m,f}}(x) dx = \int_{\frac{K}{\gamma_m}}^\infty [1 - (V \gamma_m^{-1/\alpha_m} x^{-1/\alpha_m} - W)^2] f_{I_{m,f}}(x) dx = \frac{1 - W^2}{\pi^{1/2}} \gamma \left(\frac{1}{2}, \frac{\pi U^2 \gamma_m}{K}\right) - \frac{V^2 U^{-4/\alpha_m}}{\pi^{1/2+2/\alpha_m} \gamma_m^{2/\alpha_m}} \Gamma\left(\frac{2}{\alpha_m} + \frac{1}{2}, \frac{\pi U^2 \gamma_m}{K}\right) + \frac{2 V W U^{-2/\alpha_m}}{\pi^{1/2+1/\alpha_m} \gamma_m^{1/\alpha_m}} \gamma\left(\frac{1}{\alpha_m} + \frac{1}{2}, \frac{\pi U^2 \gamma_m}{K}\right) \quad (7)$$

式中: $U = \frac{\pi \lambda_f P_f^{1/2} A_{m,f}^{1/2}}{2}$, $V = \frac{P_m^{1/\alpha_m} A_m^{1/\alpha_m}}{R_m - r_0}$, $W = \frac{r_0}{R_m - r_0}$, 均为中间变量; $\Gamma(p) = \int_0^\infty t^{p-1} e^{-t} dt$ 为标准伽马函数; $\gamma(p, x) = \int_0^x t^{p-1} e^{-t} dt$ 为不完全伽马函数, $p > 0$ ^[15].

特别地,考虑 $r_0 \ll R_m$, 参数 $W \approx 0$, 且当 $\alpha_m = 4$ 时, $p_m(\gamma_m)$ 化简为

$$p_m(\gamma_m) = \operatorname{erf}\left(\frac{\pi^{1/2} \gamma_m^{1/2} U}{K^{1/2}}\right) - \frac{V^2}{\pi U \gamma_m^{1/2}} \left(1 - \exp\left(-\frac{\pi U^2 \gamma_m}{K}\right)\right) \quad (8)$$

式中: $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ 为误差函数^[15].

2.2 毫微微小区下行传输中断概率

对于毫微微小区的下行传输,考虑最坏的一种场景,即假设毫微微小区用户均匀分布在其归属小区覆盖区域的边缘. 在参考毫微微小区 F_0 内,毫微微小区用户接收到的聚合干扰包括来自宏小区基站的层间干扰和来自毫微微小区基站 $F_k (k=1, 2, \dots, N_f-1)$ 的层内干扰,忽略接收端热噪声的影响,毫微微小区用户下行接收信干比表示为

$$\Gamma_f = \frac{P_f A_f R_f^{-\alpha_f}}{P_m A_{f,m} D_{f,m}^{-\alpha_{f,m}} + \sum_{f \in \Omega_f \setminus F_0} P_f A_{f,f} D_{f,f}^{-\alpha_{f,f}}} = \frac{S_f}{I_{f,m} + I_{f,f}} \quad (9)$$

式中: S_f 表示毫微微小区用户接收的有用信号功率; $I_{f,m}$ 和 $I_{f,f}$ 分别表示来自宏小区的层间干扰功率和来自其他毫微微小区的层内聚合干扰功率. 在宏小区 B_0 内,毫微微小区用户近似均匀分布, $I_{f,m}$ 的累积分布函数可由式(3)得到; $I_{f,f}$ 的概率密度函数可通过将式(6)中 $A_{m,f}$ 替换为 $A_{f,f}$ 得到.

假设预定的毫微微小区的下行传输信干比门限为 γ_f , 固定变量 $I_{f,f}$, 条件中断概率为

$$p_f(\gamma_f | x) = P\left(\frac{S_f}{I_{f,m} + x} \leq \gamma_f\right) = P\left(I_{f,m} \geq \frac{S_f}{\gamma_f} - x\right) \quad (10)$$

考虑 $I_{f,m}$ 的最小值为 $L = P_m A_{f,m} R_m^{-\alpha_{f,m}}$, 因此当 $x \geq \frac{S_f}{\gamma_f} - L$ 或 $\gamma_f \geq \frac{S_f}{L}$ 时, $p_f(\gamma_f | x) = 1$; 否则, $p_f(\gamma_f | x)$ 表示为

$$p_f(\gamma_f | x) = F_{D_{f,m}}\left[\left(\frac{S_f/\gamma_f - x}{P_m A_{f,m}}\right)^{-1/\alpha_{f,m}}\right] = \left[\frac{P_m^{1/\alpha_{f,m}} A_{f,m}^{1/\alpha_{f,m}} (S_f/\gamma_f - x)^{-1/\alpha_{f,m}} - r_0}{R_m - r_0}\right]^2 \quad (11)$$

定义中间变量 $X = \frac{\pi \lambda_f P_f^{1/2} A_{f,f}^{1/2}}{2}$, $Y = \frac{P_m^{1/\alpha_{f,m}} A_{f,m}^{1/\alpha_{f,m}}}{R_m - r_0}$, 通过对 $p_f(\gamma_f | x)$ 求期望值,可以得到毫微微小区下行传输中断概率

$$p_f(\gamma_f) = \int_0^\infty p_f(\gamma_f | x) f_{I_{f,f}}(x) dx = \int_0^{S_f/\gamma_f - L} \left[Y \left(\frac{S_f}{\gamma_f} - x\right)^{-1/\alpha_{f,m}} - W\right]^2 f_{I_{f,f}}(x) dx + \int_{S_f/\gamma_f - L}^\infty f_{I_{f,f}}(x) dx = F(\gamma_f) + \frac{1}{\pi^{1/2}} \gamma \left(\frac{1}{2}, \frac{\pi X^2 \gamma_f}{S_f - L \gamma_f}\right) \quad (12)$$

式中: 当 $L \neq 0$ 时, $F(\gamma_f)$ 无闭式表达式.

考虑当毫微微小区用户位于宏小区边缘且存在

穿透损耗时, $I_{m,f}$ 的最小值 $L \approx 0$, 则 $p_f(\gamma_f)$ 可近似为

$$p_f(\gamma_f) \approx \frac{W^2}{\pi^{1/2}} \left[1 - \gamma \left(\frac{1}{2}, \frac{\pi X^2}{u} \right) \right] + \frac{Y}{\pi^{3/4} X^{1/2}} \exp \left(-\frac{\pi X^2}{2u} \right) \cdot \left[\frac{Y \Gamma(\rho)}{u^{3/4-\rho}} W_{3/4-\rho, -1/4} \left(\frac{\beta}{u} \right) - \frac{2W \Gamma(\nu)}{u^{3/4-\nu}} W_{3/4-\nu, -1/4} \left(\frac{\beta}{u} \right) \right] \quad (13)$$

特别地, 考虑 $r_0 \ll R_m$, 参数 $W \approx 0$, 且当 $\alpha_{f,m} = 4$ 时, $p_f(\gamma_f)$ 进一步化简为

$$p_f(\gamma_f) \approx \frac{Y^2}{u^{1/2}} \exp \left(-\frac{\pi X^2}{u} \right) \quad (14)$$

式中: $\beta = \pi X^2$; $u = \frac{S_f}{\gamma_f}$; $\rho = 1 - \frac{2}{\alpha_{f,m}}$, $\nu = 1 - \frac{1}{\alpha_{f,m}}$, 且 $\rho > 0$, $\nu > 0$; $W_{k,m}(z)$ 为惠塔克 (Whittaker) 函数, 当满足 $\text{Re}(m-k) > -\frac{1}{2}$ 且 $|\arg z| < \pi$ 时^[15]

$$W_{k,m}(z) = \frac{z^k e^{-z/2}}{\Gamma(m-k+1/2)} \int_0^\infty e^{-t} t^{m-k-1/2} \left(1 + \frac{t}{z} \right)^{m+k-1/2} dt \quad (15)$$

3 仿真结果与分析

本节将通过仿真验证理论推导. 假设 P_m 为 40 W, R_m 为 1 000 m; 路损模型采用 ITU-R 测试模型^[16], 穿透损耗为 10 dB, 毫微微小区用户与归属基站间的路损指数为 3, 其他链路的路损指数均为 4. 图 1 首先给出了分层毫微微小区网络示意图, 毫微微小区根据 SPPP 模型部署在宏小区内, N_f 为 50, 用户分布在毫微微小区覆盖区域边缘.

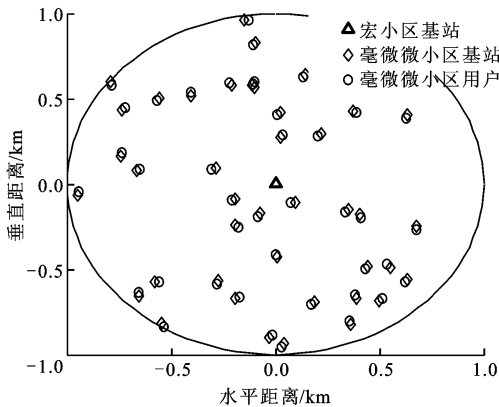


图1 分层毫微微小区网络示意图

图 2 给出了中断概率随预定信干比门限变化的曲线, 即用户接收信干比的累积分布函数. 由于毫微微小区用户与归属基站间的距离较小, 接收的有

用信号功率较强, 因此接收性能优于宏小区用户. 以毫微微小区基站发射功率为 100 mW 和 50% 用户为例, 毫微微小区用户接收信干比高于宏小区用户信干比约 25 dB. 随着毫微微小区基站发射功率的增加, 宏小区用户接收的有用信号功率不变, 而聚合干扰功率增加, 接收性能进一步退化. 对于毫微微小区用户, 接收到的有用信号功率和聚合干扰功率同时递增, 但在聚合干扰中占优势地位的层间干扰功率不变, 有用信号功率增速快于干扰功率增速, 毫微微小区用户接收性能进一步提升. 仍以 50% 用户为例, 当毫微微小区基站发射功率增长为 1 000 mW 时, 毫微微小区用户接收信干比高于宏小区用户信干比约 50 dB.

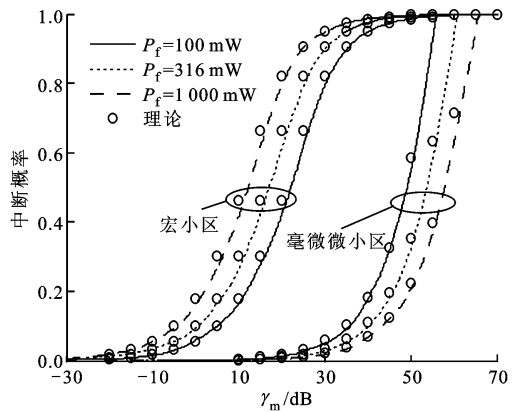


图2 用户接收信干比的累积分布函数

假设预定的宏小区和毫微微小区下行传输信干比门限分别为 0 dB 和 30 dB, 图 3 为下行传输中断概率随毫微微小区平均数的变化曲线. 毫微微小区平均数的增加, 将引起宏小区用户和毫微微小区用户接收的聚合干扰功率递增, 中断概率随之增加. 由于毫微微小区用户接收的聚合干扰中占优势地位的层间干扰功率不变, 毫微微小区下行中断概率增长缓慢. 以毫微微小区发射功率为 100 mW 时为例, 毫微微小区平均数从 20 递增到 100, 使宏小区下行中断概率增加约 25%, 而毫微微小区下行中断概率仅增加约 2%. 同图 2 分析, 提高毫微微小区发射功率将分别增加 (或减小) 宏小区 (或毫微微小区) 下行传输中断概率. 例如, 当毫微微小区平均数为 100 时, 毫微微小区发射功率提高 3.16 mW, 使宏小区下行中断概率增加约 20%, 而毫微微小区下行中断概率减小约 2%.

考虑毫微微小区用户位于归属小区覆盖区域边缘, 图 4 验证了毫微微小区下行传输中断概率随覆盖半径的变化. 随着毫微微小区覆盖半径的增加,

毫微微小区用户接收的有用信号功率降低,引起中断概率最大增加约 21%。同前面分析,增加毫微微小区基站发射功率将降低毫微微小区下行传输中断概率(半径为 50 m 时,发射功率提高 3.16 mW,中断概率减小约 9%)。

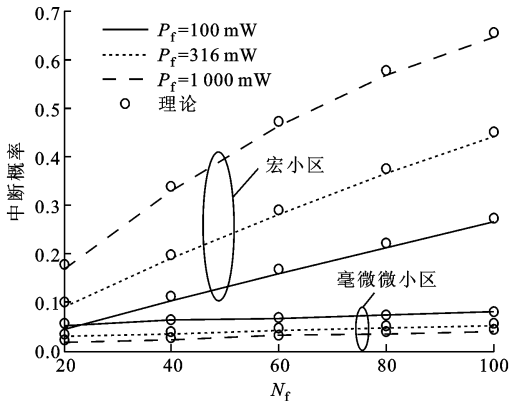


图 3 中断概率随毫微微小区平均数的变化曲线

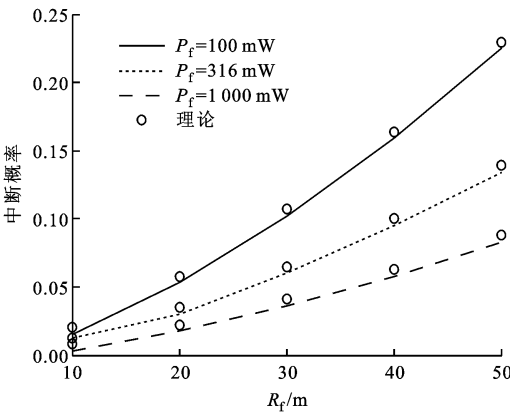


图 4 毫微微小区传输中断概率随覆盖半径的变化曲线

4 结束语

本文对共信道干扰限制分层毫微微小区网络的下行传输中断性能进行了研究. 通过采用随机几何理论建模毫微微小区的空间分布和聚合干扰,并基于信道路损,推导了宏小区和毫微微小区下行传输中断概率的闭式表达式. 下一步工作重点是设计功率控制、资源分配或干扰消除等算法,优化分层毫微微小区网络的传输性能。

参考文献:

[1] KNESELY D N, YOSHIZAWA Y, FAVICHIA F. Standardization of femtocells in 3GPP [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(9): 68-75.
[2] 徐鹏,方旭明,杨俊. 基于信号强度和功率损耗的分层

网络切换算法[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(1): 98-102.
XU Peng, FANG Xuming, YANG Jun. Handoff algorithm for hierarchical cell networks based on received signal strength and power loss [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(1): 98-102.
[3] CHANDRASEKHAR V, ANDREWS J G, GATHERER A. Femtocell networks: a survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(9): 59-67.
[4] 张建敏,张朝阳,黄爱苹. 基于 OFDM 的双层 Femto-cell 网络中子信道、速率和功率的最优分配[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(10): 1034-1038.
ZHANG Jianmin, ZHANG Zhaoyang, HUANG Aiping. Optimal subchannel, rate and power allocation for OFDM-based two-tier Femtocell networks [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2009, 39(10): 1034-1038.
[5] 刘磊,方旭明,夏莹莹. 毫微微小区系统中的干扰分析与节能技术利用[J]. 中兴通讯技术, 2010, 16(6): 24-28.
LIU Lei, FANG Xuming, XIA Yingying. Interference analysis and energy saving technologies in femtocell system [J]. ZTE Communications, 2010, 16(6): 24-28.
[6] CHANDRASEKHAR V, KOUNTOURIS M, ANDREWS J G. Coverage in multi-antenna two-tier networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(10): 5314-5327.
[7] PARK S, SEO W, KIM Y, et al. Beam subset selection strategy for interference reduction in two-tier femtocell networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3440-3449.
[8] CHANDRASEKHAR V, ANDREWS J G. Uplink capacity and interference avoidance for two-tier femto-cell networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(7): 3498-3509.
[9] CHANDRASEKHAR V, ANDREWS J G. Spectrum allocation in tiered cellular networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(10): 3059-3068.
[10] 陈昌海,尹长川,李娜娜,等. SBPC 策略下的 Ad Hoc 网络传输容量分析[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(3): 117-120.
CHEN Changhai, YIN Changchuan, LI Nana, et al. Analysis of transmission capacity of Ad Hoc networks with SBPC strategy [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33(3): 117-120.

- [11] HAENGGI M, ANDREWS J G, BACCELLI F, et al. Stochastic geometry and random graphs for the analysis and design of wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(7): 1029-1046.
- [12] BACCELLI F, BLASZCZYSZYN B, MUHLETHALER P. An Aloha protocol for multihop mobile wireless networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 421-436.
- [13] STEVEN B L, MALVIN C T. Power-law shot noise [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1990, 36(6): 1302-1318.
- [14] SOUSA E S, SILVESTER J A. Optimum transmission ranges in a direct-sequence spread-spectrum multihop packet radio network [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1990, 8(5): 762-771.
- [15] GRADSHTEYN I, RYZHIK I M, JEFFREY A. Tables of integrals, series, and products [M]. 7th ed. New York: Academic, 2007: 892-1028.
- [16] ITU. Recommendation M.1225 Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000 [S]. Geneva, Switzerland: ITU, 1997: 22-43.

[本刊相关文献链接]

毫米波通信系统中利用随机逼近的波束赋形算法. 西安交通大学学报, 2011, 45(10): 72-76.

宽带认知无线网络分布式协作压缩频谱感知算法. 西安交通大学学报, 2011, 45(4): 67-71.

一种增强型选择放大转发机会协作分集协议. 西安交通大学学报, 2010, 44(8): 53-57.

询问反馈策略下的门限截断机会波束系统. 西安交通大学学报, 2010, 44(8): 72-77.

无线通信中使用随机天线阵列的物理层安全传输方法. 西安交通大学学报, 2010, 44(6): 62-66.

译码转发系统中一种半分布式用户选择策略. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 115-119.

放大转发异步协作通信系统中的差分空时频传输方案. 西安交通大学学报, 2009, 43(6): 62-66.

正交频分多址系统中最低速率限制下的自适应载波分配. 西安交通大学学报, 2008, 42(2): 222-225.

分布式 Alamouti 空时码的信道容量分析. 西安交通大学学报, 2007, 41(8): 969-973.

(编辑 刘杨)