

多用户分布式与集中式天线系统传输容量的分析与比较

陈晓明,张朝阳,王超

(浙江大学信息与通信工程研究所,浙江省综合信息网技术重点实验室,浙江杭州 310027)

摘要:为了能够对多用户条件下分布式和集中式天线系统所支持的用户分布密度和服务质量进行定量地比较,提出了一种基于随机几何的性能分析方法.当用户在小区内服从泊松分布时,这种方法可以得到精确的分布式与集中式天线系统的传输容量表达式.从分布式天线系统的传输容量表达式可以发现,在给定用户分布密度时,为了满足一定的服务质量要求,用户的接入距离存在一个上限.分析和仿真结果表明,在相同条件下,与集中式天线系统相比,分布式天线系统能够容纳更多的用户和支持更高的服务质量要求.

关键词:分布式天线系统;集中式天线系统;传输容量;服务质量要求;最大可容忍接入距离

中图分类号: TN914.51 **文献标识码:** A

Analysis and comparison of transmission capacity for multiuser distributed and co-located antenna systems

CHEN Xiao-ming, ZHANG Zhao-yang, WANG Chao

(Institute of Information and Communication Engineering, Zhejiang University,
and Zhejiang Provincial Key Laboratory of Information Network Technology, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to quantificationally compare the supported user distribution density and quality of service (QoS) by distributed antenna system (DAS) and co-located antenna system (CAS) under multiuser condition, a stochastic geometry based performance analysis method is proposed. When the users have a Poisson distribution in the cell, this method can obtain the exact expression of transmission capacity for the two multi-antenna systems. From the expression of transmission capacity for DAS, it is found that, given the user distribution density, in order to satisfy a certain QoS requirement, there is an upper bound of user access distance. Both theoretical analysis and simulation results show that, under the same condition, compared with CAS, DAS is able to admit more users and support higher QoS.

Key words: DAS; CAS; transmission capacity; QoS; maximum tolerable access distance

0 引言

当前,为了满足用户对各种无线多媒体业务的

要求,无线通信正以前所未有的速度向前发展.众所周知,资源受限和多径衰落是限制无线通信继续发展的两大因素,因此,开发高功率和频谱效率的绿色

收稿日期:2009-05-11;修回日期:2009-07-20

基金项目:中国高技术研究发展(863)计划(2007AA01Z257),国家自然科学基金项目(60972057)和国家重点基础研究发展(973)计划(2009CB320405)资助.

作者简介:陈晓明,男,1982年生,博士生.研究方向:有限反馈多用户多天系统,宽带无线通信. E-mail:chen_xiaoming@zju.edu.cn

通讯作者:张朝阳,教授. E-mail:ning_ming@zju.edu.cn

通信技术就势在必行了。而多天线系统,通过在发射端和/或接收端配置多根天线,可以极大的提高资源的利用效率^[1,2]。例如,在富散射条件下,多天线系统可以按最小收发两端天线数的比例提高频谱利用率。在多天线蜂窝系统中,根据基站端天线配置方式的不同,可以分为集中式和分布式天线系统两种。顾名思义,集中式天线系统的基站天线全部安装在位于小区中心的发射塔上,这一方式已被 LTE 等无线通信标准所采用。集中式天线系统的主要缺点在于:当基站端散射不够充分时,系统的可用空间自由度将会随着天线相关的增大而减少,甚至等效为单天线系统;另外,集中式天线系统还存在着远近效应,即小区边缘用户的性能远低于中心用户。而分布式天线系统把基站天线分布在整个小区内,用光纤或无线方式把它们同中央处理单元(CPU)连接起来^[3]。由于大大缩短了用户的平均接入距离,分布式天线系统可以减少发射功率,扩大覆盖范围,提高传输性能和消除远近效应^[4,5]。此外,这一系统还可以根据应用场景的需要,灵活地调整基站的的天线数。这些特点决定了分布式天线系统将在未来的宽带无线通信系统中具有很好的应用前景。

目前,已有一些文献通过理论分析、数据仿真和实际测量,对分布式和集中式天线的性能进行了比较。在文献[6]中,作者研究了单用户情况下,用户和天线位置都固定时,分布式天线系统的平均容量,给出了其上、下限,并进一步分析了当基站天线在小区内均匀随机分布时,分布式系统相对于集中式系统的性能优势。在文献[7]中,作者考虑了规则的多小区分布式天线系统,研究了存在小区间干扰时,不同的信道状态信息对系统容量的影响。前面的研究主要关注于单用户时的情形,而在实际的蜂窝系统中,由于多用户同时通信,往往存在着用户间的干扰。在多用户分布式天线系统中,有两个因素对系统性能有着重要的影响。首先,不同于集中式天线系统,分布式天线系统的基站天线位置和数量不再是确定的,其需要根据业务的特点而调整,如在热点地区配置更多的天线,从而可以有效地减小平均接入距离;其次,随着用户的移动,用户的位置也不是固定的,而用户和基站天线的相对距离直接影响着分布式天线系统的性能。因此,为了对分布式天线系统进行性能分析,很重要的一点是对基站天线和用户位置进行建模。在文献[8]中,作者考虑了一个下行分布式天线系统,并把基站天线的分布建模为一个二项式

点过程(BPP),分析表明,用户位置无论是固定还是随机时,天线选择的性能都将好于最大比例发射。另外,用户对无线业务都有一些服务质量的要求,如最大时延、传输速率,而前面的研究大多都关注于分布式与集中式天线系统的香农容量的比较。在本文中,我们研究在多用户上行链路中,多天线系统具有服务质量要求的传输容量。首先,我们将服务质量要求转化为对接收信干比的要求,然后,我们考虑在分布式天线和用户位置都随机分布时,研究两个系统的平均传输容量,并分析了各个系统参数对传输容量的影响。

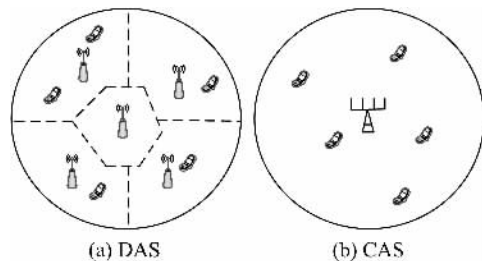


图 1 分布式与集中式天线系统模型

Fig. 1 Distributed and co-located antenna system model

1 系统模型

如图 1 所示,我们考虑单小区多用户分布式和集中式两种系统,但是,我们的分析方法可以很容易地扩展到多小区情形中。为了分析的方便,我们把小区形状看成为一个半径为 R 的圆。在分布式天线系统中,用户和基站天线形成两个独立稳态的泊松点过程(PPP) Π 和 Ω ,其密度分别为 λ 和 η 。大量文献证明,泊松点过程可以很好地刻画移动用户的分布模型。令 U_n 和 T_m 分别表示第 n 个用户和第 m 根基站天线的位置,则它们之间的距离为 $D_{n,m} = |U_n - T_m|$ 。接收端采用天线选择的方式,即基站选择距离用户最近的天线接收其信号,这样整个小区被划分为以基站天线为中心的多个网格,如图 1(a)所示,一旦用户进入某一网格,就选择与这一网格的基站天线进行通信。这一概念类似于微蜂窝系统,但是它比微蜂窝系统具有更大的灵活性和可扩展性,建设成本也更低。由于基站天线和用户的随机分布,某一用户选择任一基站天线进行通信的概率都相同,不失一般性,在下文中,我们考虑用户 U_0 与基站天线 T_0 进行通信。数据以帧为单位进行传输,在一个数据帧内,信道保持恒定,但在帧与帧之间则衰落独立。为了分析的简便,我们只考虑信道的路径损耗和

快衰落,假设接收端采用相干检测,则接受信干噪比可表示为

$$\text{SINR}_{\text{DAS}} = \frac{PD_{0,0}^{-\alpha} |h_{0,0}|^2}{N_0 + P \sum_{i \in U, i \neq 0} D_{i,0}^{-\alpha} |h_{i,0}|^2} = \frac{PD_{0,0}^{-\alpha} |h_{0,0}|^2}{N_0 + PI_0} \quad (1)$$

其中, P 为用户的发射功率; N_0 为噪声功率谱密度; D_i 为用户 U_i 到基站的距离; $h_{i,0}$ 为用户 U_i 到基站天线 T_0 的快衰落信道增益, 其为一零均值、单位方差的复高斯随机变量; α 为路径损耗因子, 其取值范围一般为 $2 \leq \alpha \leq 4$. $I_0 = \sum_{i \in U, i \neq 0} D_{i,0}^{-\alpha} |h_{i,0}|^2$ 是用户间干扰的等效信道增益. 在用户较多时, 系统为干扰受限, 这时噪声的影响可忽略不计, 在下文中, 我们主要关注接收端的信干比

$$\text{SIR}_{\text{DAS}} = \frac{D_{0,0}^{-\alpha} |h_{0,0}|^2}{I_0} \quad (2)$$

在集中式天线系统中, 所有基站天线都位于小区的中心, 为了比较的公平, 我们设基站天线数为 $N_a = \pi R^2 \eta$, 用户分布也为一密度为 λ 的泊松点过程. 同样, 我们也考虑用户 U_0 与基站间的通信, 假设采用最大比例合并的方法检测, 则接受信干比为

$$\text{SIR}_{\text{CAS}} = \frac{D_0^{-\alpha} \|\mathbf{h}_0\|^2}{\sum_{i \in U, i \neq 0} D_i^{-\alpha} \|\mathbf{\omega}_i^* \mathbf{h}_i\|^2} = \frac{D_0^{-\alpha} \|\mathbf{h}_0\|^2}{I_0} \quad (3)$$

其中, D_i 为用户 U_i 到基站的距离; \mathbf{h}_i 为用户 U_i 到基站的快衰落增益矢量, 它的每一元素都是独立同分布的零均值、单位方差的复高斯随机变量; $\mathbf{\omega}_i = \mathbf{h}_i / \|\mathbf{h}_i\|$ 为最大比例合并矢量. $I_0 = \sum_{i \in U, i \neq 0} D_{i,0}^{-\alpha} \|\mathbf{\omega}_i^* \mathbf{h}_i\|^2$ 为用户间干扰的等效信道增益.

2 多用户传输容量的分析与比较

在本文中, 我们关注具有服务质量要求的传输容量. 服务质量一般包括传输时延、吞吐量等, 很多研究表明, 这些服务质量要求都可以转化为对接受信噪比的要求. 本文结合多用户泊松分布的概念, 研究分布式和集中式天线系统的传输容量, 其定义为:

$$C^c = V \lambda (1 - \epsilon) \quad (4)$$

其中, V 为满足服务质量所需要的传输速率, 其可以表示为 $V = \log_2(1 + \gamma_{\text{obj}})$, γ_{obj} 为目标信干比; ϵ 为信干比的中断概率, 即瞬时接收信干比小于 γ_{obj} 的概率, 其可以表示为

$$\epsilon = \Pr(\text{SIR} < \gamma_{\text{obj}}) \quad (5)$$

这样, 传输容量可以理解为单位面积上符合服务质量要求的频谱效率.

给定 γ_{obj} 和 λ , 要得到系统的传输容量, 最重要的是得到信干比符合服务质量的概率, 也就是成功概率 $\beta = 1 - \epsilon = \Pr(\text{SIR} \geq \gamma_{\text{obj}})$. 对于分布式天线系统, 上述概率等效为

$$\beta = \Pr(|h_{0,0}|^2 \geq D_{0,0}^{-\alpha} I_0 \gamma_{\text{obj}}) \quad (6)$$

如前所述, $|h_{0,0}|^2$ 服从指数分布, 则给定 $D_{0,0}$, 成功概率为

$$\begin{aligned} \beta &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \exp(-x) dx d\Pr(I_0 \leq t) = \\ &= \int_0^{\infty} \exp(-D_{0,0}^{-\alpha} \gamma_{\text{obj}} t) f_{I_0}(t) dt = \\ &= E[\exp(-D_{0,0}^{-\alpha} \gamma_{\text{obj}} t)] \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $f_{I_0}(t)$ 为 I_0 的概率密度函数. 对于分布式天线系统, $I_0 = \sum_{i \in U, i \neq 0} D_{i,0}^{-\alpha} |h_{i,0}|^2$, 由文献[9,10]可知, 其为一具有独立同分布标记(mark) $|h_{i,0}|^2$ 的泊松射击噪声过程. 根据泊松射击噪声过程的性质, 式(7)可表示为

$$\begin{aligned} \beta &= \exp(-\lambda \int_{\mathbf{R}^2} (1 - E[\exp(-D_{0,0}^{-\alpha} \gamma_{\text{obj}} |h|^2 x^{-\alpha})]) dx) = \\ &= \exp(-\pi \lambda \delta (D_{0,0}^{-\alpha} \gamma_{\text{obj}})^{\delta} B(\delta, 1 - \delta)) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\delta = \frac{2}{\alpha}$ 为系统的稳定指数; $B(a, b) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(ab)}$, $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数.

由式(8), 可以得到如下推论.

推论 2.1 给定信干比要求 γ_{obj} , 要使得用户成功概率大于 β , 其距离最近基站天线的距离必须小于 D_{max} . 其中, $D_{\text{max}} = \sqrt{\frac{-\ln(\beta)}{\pi \lambda \delta \gamma_{\text{obj}}^{\delta} B(\delta, 1 - \delta)}}$.

由上述推论可知, 当用户对信干比要求较高时, 可以增加基站天线, 这样就缩小了用户的接入距离, 从而保持一定的成功概率; 反之, 则可以减少所配置的基站天线数. 灵活地调整天线的数目, 从而有效地利用资源和成本, 这是分布式天线系统作为绿色通信方式的一大优点.

前面在给定 $D_{0,0}$ 的条件下, 得到了用户成功概率. 实际上, 由于用户的随机分布, $D_{0,0}$ 也是一个随机变量, 其累积分布函数为 $\Pr(D_{0,0} \leq r) = 1 - \exp(-\pi \eta r^2)$, 因此其概率密度函数为

$$g(r) = 2\pi \eta r \exp(-\pi \eta r^2) \quad (9)$$

当天线密度为 η 时, 每根天线的服务半径约为 $d \approx$

$\sqrt{\frac{1}{\pi\eta}}$. 这样, 平均成功概率为

$$\begin{aligned} \bar{\beta} = & \int_0^d 2\pi\eta r \exp(-\pi\lambda\delta(r^\alpha\gamma_{\text{obj}})^\delta B(\delta, 1-\delta)) \cdot \\ & \exp(-\pi\eta r^2) dr = \\ & \frac{\eta}{\lambda\delta\gamma_{\text{obj}}^\delta B(\delta, 1-\delta) + \eta} \cdot \\ & (1 - \exp(-\pi(\lambda\delta\gamma_{\text{obj}}^\delta B(\delta, 1-\delta) + \eta)d^2)) \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10), 我们可以很容易地得到分布式系统的平均传输容量 $\bar{C}_{\text{DAS}} = \lambda \log_2(1 + \gamma_{\text{obj}})\bar{\beta}$.

同样, 我们可以计算集中式天线系统的传输容量. 首先, 其成功概率为

$$\begin{aligned} \phi = & \Pr(\|\mathbf{h}_0\|^2 \geq D_0^\alpha \bar{I}_0 \gamma_{\text{obj}}) = \\ & \int_0^\infty \sum_{k=0}^{N_a} \frac{(D_0^\alpha \gamma_{\text{obj}} t)^k}{k!} \exp(-D_0^\alpha \gamma_{\text{obj}} t) d\Pr(I_0 \leq t) = \\ & \sum_{k=0}^{N_a} \frac{(D_0^\alpha \gamma_{\text{obj}})^k}{k!} \frac{d^k}{d\psi^k} L(\psi) \Big|_{\psi=D_0^\alpha \gamma_{\text{obj}}} \end{aligned} \quad (11)$$

其中,

$$\begin{aligned} L(\psi) = & \exp\left(-\lambda \int_{\mathbf{R}^2} (1 - E[\exp(-D_0^\alpha \gamma_{\text{obj}} \|\mathbf{h}\|^2 x^{-\alpha})]) dx\right) = \\ & \exp(-\pi\lambda\delta(D_{0,0}^\alpha \gamma_{\text{obj}})^\delta) \cdot \\ & \sum_{k=0}^{N_a-1} \binom{N_a}{k} B(k+\delta, N_a-k-\delta) = \\ & \exp(-\lambda C \psi^\delta) \end{aligned} \quad (12)$$

其中,

$$C = \pi\delta \sum_{k=0}^{N_a-1} \binom{N_a}{k} B(k+\delta, N_a-k-\delta).$$

这样, 成功概率变为

$$\begin{aligned} \phi = & \sum_{k=0}^{N_a} \frac{(D_0^\alpha \gamma_{\text{obj}})^k}{k!} \frac{d^k}{d\psi^k} \exp(-\lambda C \psi^\delta) = \\ & \sum_{k=1}^{N_a} \frac{(D_0^\alpha \gamma_{\text{obj}})^k}{k!} \left(-\lambda C \prod_{m=0}^{k-1} (\delta-m)\psi^{\delta-k}\right) \cdot \\ & \exp(-\lambda C \psi^\delta) + \Theta(\lambda^2 C^2 \psi^{2\delta}) \end{aligned} \quad (13)$$

忽略 $\Theta(\lambda^2 C^2 \psi^{2\delta})$, 集中式天线系统的平均成功概率为

$$\begin{aligned} \bar{\phi} = & \int_0^R 2\pi\eta r \sum_{k=1}^{N_a} \frac{(r^\alpha \gamma_{\text{obj}})^k}{k!} \left(-\lambda C \prod_{m=0}^{k-1} (\delta-m)\psi^{\delta-k}\right) \cdot \\ & \exp(-\lambda C \psi^\delta) \exp(-\pi\eta r^2) dr \end{aligned} \quad (14)$$

由式(14), 我们可以得到集中式天线系统的平均传输容量为 $\bar{C}_{\text{CAS}} = \lambda \log_2(1 + \gamma_{\text{obj}})\bar{\phi}$.

3 仿真结果

在这一部分中, 对上文中分析的分布式与集中式天线系统的传输容量进行了仿真. 仿真中小区内用户数目满足密度为 λ 的泊松点过程 (PPP), 依照上文中式(10)和式(14)分别对分布式与集中式天线系统的传输容量在不同参数条件下进行了仿真.

图 2 中对于在不同目标信干比 γ_{obj} 条件下的传输容量进行了仿真, 参数设置如下: $\alpha=4$, $\eta=10^{-3}$, $\lambda=10^{-4}$, $N_a=4$. 对比图 2 中分布式和集中式传输容量可以观察到, 随着目标信干比增大, 传输容量先是有显著提升, 到达一定信干比后继而下降. 这是由于在目标信干比较低时, 提高信干比有助于增大满足服务质量所需要的传输速率 V , 从而提高系统的传输容量; 而信干比过高时, 较高的目标信干比门限使得传输的中断概率 ϵ 升高, 此时虽然提高目标信干比仍然提升传输速率 V , 但是中断概率 ϵ 的升高带来传输容量的降低成为主导因素, 因此降低了系统的传输容量.

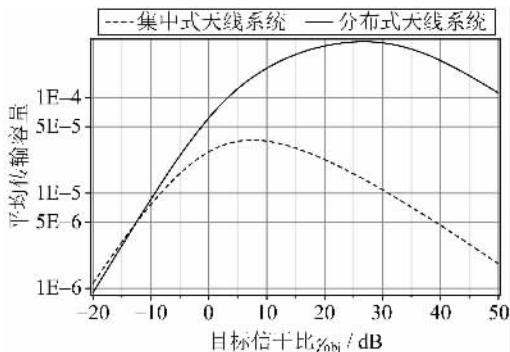


图 2 不同目标信干比条件下的平均传输容量比较

Fig. 2 Comparison of average transmission capacity with different objective SIR

对比集中式与分布式天线传输容量可以看出, 在低信干比的状态下, 集中式天线有着较大的传输容量, 随着信干比的升高, 分布式天线的传输容量迅速升高, 并超过集中式天线系统的传输容量.

图 3 中对于在不同用户分布密度条件下的传输容量进行了仿真, 参数设置如下: $\alpha=4$, $\eta=10^{-3}$, $N_a=3$, $\gamma_{\text{obj}}=10$ dB. 对比图 3 中分布式和集中式传输容量可以观察到, 当用户数目较大时, 传输容量趋近于一个恒定值, 在此状态下, 用户之间产生的干扰成为阻碍传输容量增长的主要因素, 接入额外的用户此时无法提升系统的传输容量.

对比集中式与分布式天线传输容量可以看出,

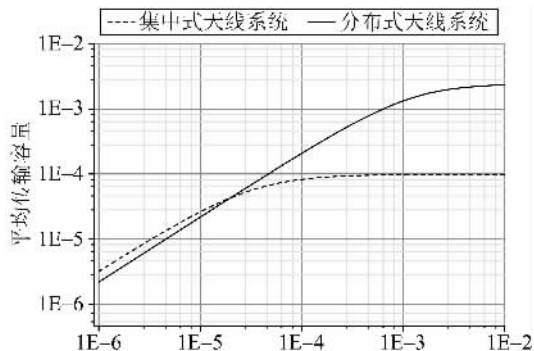


图 3 不同用户分布密度条件下的平均传输容量比较

Fig. 3 Comparison of average transmission capacity under with different user distribution densities

在低用户密度条件下,集中式天线有着较大的传输容量,随着用户数目的升高,分布式天线传输容量迅速升高超过集中式天线传输容量.并且随着用户数目的升高较慢地达到一个更高的传输容量平台.

4 结论

通过上文中的分析与仿真,本文试图通过对于分布式天线与集中式天线在不同环境下的传输容量的分析,来分析分布式天线在频谱效率、传输容量上的特点.通过对分布式天线和用户使用泊松点分布这一模型建模,可以较好地再现出真实环境中的情况.同时针对传输容量进行理论分析与仿真,结果表明无论分布式或集中式系统,目标信干比对于传输容量有一个特定最大传输容量的门限,在此门限下,传输容量随信干比升高而升高,超过此门限后,增大的中断概率成为影响传输容量的主要因素,因此传输容量开始减少.同时对于用户密度的升高,不同系统的传输容量都有所上升,当用户密度达到一定数量后,传输容量不再增加.

同时对比分布式与集中式天线,分布式天线在较高信干比条件下有着显著的优势,较高的目标信干比门限带来了较高的传输容量,同时非低用户密度条件下,相比集中式天线系统拥有较大的传输容量,同时用户密度饱和后最大传输容量也有显著地提高.

通过文中的比较,分布式天线在不同环境下相比于集中式天线拥有较大的传输容量,在相同资源配置环境下,拥有更高的资源利用率,同时配合以灵

活的配置,这些特点决定了分布式天线系统将在未来的绿色宽带无线通信系统中具有很好的应用前景.

参考文献(References)

- [1] Goldsmith A, Jafar S A, Jindal N, et al. Capacity limits of MIMO channels [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(5): 684-702.
- [2] Etkin R H, Tse D N C. Degrees of freedom in some underspread MIMO fading channels [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1576-1608.
- [3] Saleh A A M, Rustako Jr A J, Roman R S. Distributed antennas for indoor radio communications [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1987, 35(12): 1245-1251.
- [4] Zhou S, Zhao M, Xu X, et al. Distributed wireless communication system: a new architecture for future public wireless access [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(3): 108-113.
- [5] Clark M V, Willis T M, Greentain L J, et al. Distributed versus centralized antenna arrays in broadband wireless networks [C]// *Proceedings of 2001 IEEE 53rd Vehicle Technology Conference*. New York: IEEE, 2001: 33-37.
- [6] Han S, Zhou S, Wang J, et al. Capacity analysis of generalized distributed wireless communication system and transmit antenna selection for maximization of average capacity [C]// *Proceedings of 2004 IEEE 60th Vehicle Technology Conference*. New York: IEEE, 2004: 2186-2190.
- [7] Wan C, Andrews J G. Downlink performance and capacity of distributed antenna systems in a multicell environment [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(1): 69-73.
- [8] Zhang J, Andrews J G. Distributed antenna systems with randomness [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(9): 3636-3646.
- [9] Lowen S, Teich M. Power-law shot noise [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1990, 36(6): 1302-1318.
- [10] Weber S P, Yang X, Andrews J G, et al. Transmission capacity of wireless ad hoc networks with outage constraints [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(12): 4091-4102.