

分布式天线系统中的下行容量分析

王俊波^{1,2,3}, 王金元³, 赵曦滨⁴, 顾明⁴, 陈明³, 焦媛¹

(1. 南京航空航天大学 电子信息工程学院, 江苏 南京 210016;

2. 西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071;

3. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096; 4. 清华大学 信息系统安全教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 针对分布式天线系统 (DAS) 的下行容量问题展开研究。首先建立了包含路径损耗、阴影衰落和瑞利衰落的复合信道模型; 然后, 基于该信道模型, 分别对各态历经容量和中断容量进行了分析。考虑到小区内移动台的分布特点, 在选择分集传输策略下, 推导了各态历经容量和中断容量的近似解析表达式。仿真结果表明, 所推导的 2 个近似解析表达式均能准确地评估分布式天线系统的系统性能。

关键词: 分布式天线系统; 各态历经容量; 中断容量; 选择分集; 复合信道

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)06-0125-08

Downlink capacity analysis in distributed antenna systems

WANG Jun-bo^{1,2,3}, WANG Jin-yuan³, ZHAO Xi-bin⁴, GU Ming⁴, CHEN Ming³, JIAO Yuan¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China;

3. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;

4. Key Laboratory for Information System Security of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The downlink capacity was analyzed in distributed antenna systems (DAS). Firstly, a composite channel model was established, which took path loss, lognormal shadowing and Rayleigh fading into account. Then, based on the channel model, both the ergodic capacity and outage capacity were analyzed. After that, considering the distribution of mobile stations (MS) in the system, the approximate analytical expressions of the ergodic capacity and outage capacity were derived by making use of selective diversity (SD) transmission scheme for distributed antennas. Numerical results show that both the two approximate analytical expressions can provide sufficient precision for evaluating the system performance of DAS.

Key words: distributed antenna systems; ergodic capacity; outage capacity; selective diversity; composite channel

收稿日期: 2010-11-30; 修回日期: 2011-05-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973”计划) 基金资助项目 (2010CB328000); 国家自然科学基金资助项目 (61102068, 61073168, 60972023); 国家科技重大专项基金资助项目 (2010ZX03003-002, 2010ZX03003-004); 中国博士后科学基金资助项目 (20110490389); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20113218120017); 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助项目 (2010D01); 西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室开放研究基金资助项目 (ISN12-11); 南京航空航天大学基本科研业务费专项基金资助项目 (NS2011013)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 program) (2010CB328000); The National Nature Science Foundation of China (61102068, 61073168, 60972023); The National Science and Technology Important Special Project of China (2010ZX03003-002, 2010ZX03003-004); The Postdoctoral Science Foundation of China (20110490389); The Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20113218120017); The Open Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (2010D01); The Open Research Fund of the State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University (ISN12-11); The NUAU Research Fund (NS2011013)

1 引言

未来无线通信系统将提供非常高的数据传输速率和大量的无线接入服务, 这将使稀缺的频谱资源和多样化的用户需求之间的矛盾愈显突出。而近年来, 基于传统蜂窝小区的通信体制出现了系统干扰增加、规划复杂、切换频繁等问题, 已无法适应未来无线通信的发展要求。最近, 分布式天线系统引起了人们的广泛关注。分布式天线系统是不同于传统蜂窝系统的一种崭新的无线通信系统, 它将若干天线分布式放置在小区的不同地理位置上, 每个天线通过同轴电缆或光纤分别与小区的中央处理器相连。各分布式天线只负责发送或接收信号等简单的操作, 所有复杂的信号处理功能都在中央处理器完成。研究表明, 该系统不仅能提高接收信噪比, 降低发送功率, 提供更大的分集增益, 而且还减少了小区之间的切换次数^[1-3]。毋庸置疑, 分布式天线系统将极大地改善系统性能, 将会成为未来无线通信极具发展前景的方向之一。

容量是反映无线通信系统性能的重要指标, 并对系统的网络规划、天线布局等问题的研究具有重要的理论和应用价值。到目前为止, 已经有一些学者对分布式天线系统的容量性能进行了初步的研究。文献[4]分别研究了分布式天线系统上行链路和下行链路的信道容量问题, 但是信道模型中的路径损耗假定为一常数(0dB)。一般而言, 移动台到各分布式天线的距离是不同的, 并且不同地理位置的地形地貌也不尽相同, 因此路径损耗也是有差别的, 不能忽略路径损耗对系统性能的影响。而文献[5]和文献[6]同样对分布式天线系统的系统容量问题进行了分析, 但是信道模型没有考虑阴影衰落的影响。由于分布式天线在地理位置上相距较远, 因此假设所有分布式天线具有相同的阴影衰落是不合理的, 所推导的容量表达式缺乏一般性。文献[7]研究了阴影 Nakagami 复合信道中分布式天线系统的下行各态历经容量, 并推导出了各态历经容量的近似理论表达式。此外, 通过采用天线协作机制, 文献[8]分析了分布式 MIMO 系统的中断容量, 得到了中断容量的理论表达式。需要注意的是, 文献[7]和文献[8]所得到的各态历经容量和中断容量表达式只能计算移动台处于小区中某一具体位置时的容量, 还无法反映移动台在小区内的分布对整个系统性能的影响。理论上, 各态历经容量和中断容

量还与移动台在小区内的分布有关^[9]。到目前为止, 还未见到相关文献对分布式天线系统的各态历经容量和中断容量问题进行完整的分析, 因此有必要对其做进一步研究。

在文献[7]和文献[8]的研究基础之上, 本文在选择分集传输策略条件下, 进一步对分布式天线系统中的下行各态历经容量和中断容量问题进行研究。为了反映实际无线传播环境的复杂性, 文章首先建立了包含路径损耗、阴影衰落和瑞利(Rayleigh)衰落的分布式天线系统复合信道模型; 接着, 分析出各条链路中接收信噪比均服从伽马-对数正态(gamma-lognormal)分布, 并得到其概率密度函数表达式。然后, 考虑移动台在小区内的分布因素, 对分布式天线采用选择分集策略, 分析并推导了各态历经容量和中断容量的近似解析表达式。

2 系统模型

考虑一个如图 1 所示的单小区分布式天线系统。假设小区是一个半径为 R 的圆形小区, 小区的基站位于小区中心, 记为 DA_0 ; 各分布式天线任意地摆放在小区内的不同位置, 记为 DA_i ($i=1,2,\dots,N$)。考虑到系统实现的限制, 假设每个移动台(MS)只有一根天线, 并且移动台按一定的概率密度分布在小区范围内。不失一般性地, 移动台和 DA_i 的位置分别用极坐标 (ρ, θ) 和 (D_i, θ_i) ($i=0,1,2,\dots,N$) 表示, 其中, ρ 和 θ 为移动台相对于小区中心的距离和方位角, 而 D_i 和 θ_i 为 DA_i 相对于小区中心的距离和方位角。

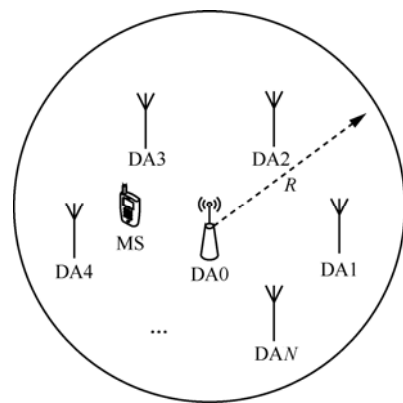


图 1 分布式天线系统

不失一般性, 本文考虑分布式天线系统的下行传输。对于下行传输, 所有的分布式天线均以同频广播的方式发送相同的信号, 移动台负责接收信

号。数学上, (ρ, θ) 处移动台接收到来自 DA i 的下行信号可以表示为

$$y_i = \sqrt{E} h_i x + z \in \mathbb{C}, \forall i \in \{0, 1, 2, \dots, N\} \quad (1)$$

其中, y_i 表示 (ρ, θ) 处移动台从 DA i 接收的信号, E 为分布式天线的下行传输功率, h_i 表示 DA i 和 (ρ, θ) 处移动台之间的信道增益, 而 z 表示夹杂在信号中的噪声。在本文中假设噪声是均值为 0, 方差为 N_0 的复高斯随机变量。

参照文献[10], 本文考虑由路径损耗、阴影衰落和小尺度衰落构成的复合信道。数学上, 式(1)中的信道增益 h_i 可以表示为

$$h_i = g_i \sqrt{P_i(\rho, \theta) S_i} \quad (2)$$

其中, $g_i, P_i(\rho, \theta)$ 和 S_i 分别表示小尺度衰落, 路径损耗和阴影衰落。本文假设这 3 种衰落彼此之间相互独立。不失一般性, 假设小尺度衰落 g_i 的包络服从 Rayleigh 分布, 则 $|g_i|^2$ 服从指数 (exponential) 分布^[11], 若 $|g_i|^2$ 的均值为 1, 则其概率密度函数可表示为

$$f_{|g_i|^2}(t) = \exp(-t), t \geq 0 \quad (3)$$

式(2)中的路径损耗 $P_i(\rho, \theta)$ 是关于移动台位置 (ρ, θ) 的函数, 可以描述为^[12]

$$P_i(\rho, \theta) = \left(\frac{d_0}{d_i(\rho, \theta)} \right)^{\beta_i} \quad (4)$$

其中, β_i 为路径损耗指数, d_0 为参考距离, $d_i(\rho, \theta)$ 为 DA i 和 (ρ, θ) 处移动台之间的距离, 可以表示为 $d_i(\rho, \theta) = \sqrt{\rho^2 + D_i^2 - 2\rho D_i \cos(\theta - \theta_i)}$ 。此外, 式(2)中的阴影衰落 S_i 服从对数正态 (lognormal) 分布, 假设其均值为 0 dB, 因此其概率密度函数为^[12]

$$f_{S_i}(s) = \frac{\xi}{\sqrt{2\pi}\sigma_i s} \exp\left[-\frac{(10\lg s)^2}{2\sigma_i^2}\right], s > 0 \quad (5)$$

其中, $\xi = 10/\ln 10$, σ_i (单位 dB) 为 $10\lg S_i$ 的标准差。

由式(1)和式(2)知, (ρ, θ) 处移动台从 DA i 接收信号时, 接收信噪比为

$$\gamma_i = \frac{E|h_i|^2}{N_0} = \Omega_i |g_i|^2 \quad (6)$$

其中, $\Omega_i = EP_i(\rho, \theta)S_i/N_0$ 。由于 S_i 服从 lognormal

分布, 则 Ω_i 也服从 lognormal 分布, 其概率密度函数可表示为

$$f_{\Omega_i}(\omega) = \frac{\xi}{\sqrt{2\pi}\sigma_i \omega} \exp\left[-\frac{(10\lg \omega - \mu_i(\rho, \theta))^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (7)$$

其中, $\mu_i(\rho, \theta) = 10\lg(EP_i(\rho, \theta)/N_0)$ 为 $10\lg \Omega_i$ 的均值。进一步地, 由式(3)和式(6)可以得到 γ_i 的条件概率密度函数为^[13]

$$f_{\gamma_i|\Omega_i}(r|\omega) = \frac{1}{\omega} \exp\left(-\frac{r}{\omega}\right), r \geq 0 \quad (8)$$

相应地, γ_i 的概率密度函数可由式(7)和式(8)得到

$$f_{\gamma_i}(r) = \int_0^{+\infty} \frac{1}{\omega} \exp\left(-\frac{r}{\omega}\right) \frac{\xi}{\sqrt{2\pi}\sigma_i \omega} \exp\left[-\frac{(10\lg \omega - \mu_i(\rho, \theta))^2}{2\sigma_i^2}\right] d\omega \quad (9)$$

由式(9)可知, γ_i 服从 gamma-lognormal 分布。

假设发射端已知 DA i 和 (ρ, θ) 处移动台之间的信道状态信息, 并且采用选择分集传输策略, 也就是只选择能使移动台接收信噪比最大的一个分布式天线传输信息, 则接收信噪比可表达为

$$\gamma = \max\{\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_N\} \quad (10)$$

3 各态历经容量分析

在本节中, 将对分布式天线系统下行传输的各态历经容量进行分析。为了便于下文的理论分析, 首先将式(9)中服从 gamma-lognormal 分布的 γ_i 近似为服从 lognormal 分布; 然后, 基于选择分集传输策略, 推导了给定移动台位置时的容量表达式; 最后, 考虑到移动台在小区内的分布情况, 进一步推导出了分布式天线系统的各态历经容量近似解析表达式。

3.1 概率密度函数 $f_{\gamma_i}(r)$ 的近似表达

从式(9)可以看出, γ_i 的概率密度函数是一个复杂的积分函数, 很难通过数值积分方法求出其解析表达式。参照文献[14], 式(9)中的 gamma-lognormal 分布可以近似为 lognormal 分布

$$f_{\gamma_i}(r) \approx \frac{\xi}{\sqrt{2\pi}\tilde{\sigma}_i r} \exp\left[-\frac{(10\lg r - \tilde{\mu}_i(\rho, \theta))^2}{2\tilde{\sigma}_i^2}\right] \quad (11)$$

其中, $\tilde{\mu}_i(\rho, \theta)$ 是所近似的 lognormal 分布的均值, 可以表示为

$$\tilde{\mu}_i(\rho, \theta) = \mu_i(\rho, \theta) - 2.50675 \quad (12)$$

而式(11)中的 $\tilde{\sigma}_i^2$ 代表近似 lognormal 分布的方差, 可以表示为

$$\tilde{\sigma}_i^2 = \sigma_i^2 + 31.0215 \quad (13)$$

3.2 给定移动台位置时的各态历经容量分析

由于各分布式天线在地理位置上分开放置且相距较远, 可以认为式(10)中各信噪比 γ_i ($i = 0, 1, \dots, N$) 彼此之间相互独立。因此, 接收信噪比 γ 的累积分布函数 (CDF) 可以表示为

$$F_\gamma(r) = \prod_{i=0}^N \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{10 \lg r - \tilde{\mu}_i(\rho, \theta)}{\sqrt{2\tilde{\sigma}_i}} \right) \right] \quad (14)$$

其中, $\operatorname{erfc}(\alpha) = (2/\sqrt{\pi}) \int_\alpha^{+\infty} \exp(-x^2) dx$ 表示互补误差函数。式(14)的具体推导过程见附录 A。然后, 对式(14)求导, 得到 γ 的概率密度函数为

$$\begin{aligned} f_\gamma(r) &= \sum_{i=0}^N \left[f_{\gamma_i}(r) \prod_{j=0, j \neq i}^N F_{\gamma_j}(r) \right] \\ &= \sum_{i=0}^N \left\{ \frac{\xi}{\sqrt{2\pi\tilde{\sigma}_i}r} \exp \left(-\frac{(10 \lg r - \tilde{\mu}_i(\rho, \theta))^2}{2\tilde{\sigma}_i^2} \right) \right. \\ &\quad \left. \prod_{j=0, j \neq i}^N \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{10 \lg r - \tilde{\mu}_j(\rho, \theta)}{\sqrt{2\tilde{\sigma}_j}} \right) \right] \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

因此, (ρ, θ) 处移动台的下行各态历经容量可以表示为

$$\begin{aligned} C(\rho, \theta) &= E_\gamma [C_\gamma(\rho, \theta)] \\ &= \sum_{i=0}^N \int_0^{+\infty} \operatorname{lb}(1+r) \left[\prod_{j=0, j \neq i}^N F_{\gamma_j}(r) \right] f_{\gamma_i}(r) dr \quad (16) \end{aligned}$$

其中, $C_\gamma(\rho, \theta) = \operatorname{lb}(1+\gamma)$ 表示信道瞬时容量。不难发现, 式(16)也是一个复杂的积分问题, 很难求解。利用 Gauss-Hermite 积分公式^[15], 可以将其进一步化简为

$$\begin{aligned} C(\rho, \theta) &\approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=0}^N \sum_{n=1}^{N_p} \left\{ H_n \operatorname{lb} \left(1 + 10^{(\sqrt{2\tilde{\sigma}_i} t_n + \tilde{\mu}_i(\rho, \theta))/10} \right) \right\} \\ &\quad \prod_{j=0, j \neq i}^N \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{2\tilde{\sigma}_i} t_n + \tilde{\mu}_i(\rho, \theta) - \tilde{\mu}_j(\rho, \theta)}{\sqrt{2\tilde{\sigma}_j}} \right) \right] \quad (17) \end{aligned}$$

其中, t_n, H_n 分别为 N_p 阶 Hermite 多项式的基点和权值。式(17)的具体推导过程见附录 B。

3.3 各态历经容量分析

到目前为止, 式(17)推导出了下行各态历经容量的近似表达式, 但该表达式是关于移动台位置的函数, 即给定一个移动台位置, 可以得到一个各态历经容量。可见该容量还无法评估移动台在小区内的不同位置对系统性能的影响。理论上, 各态历经容量还与移动台在小区内的分布有关。下面考虑小区内移动台的分布特点, 令 $\delta(\rho, \theta)$ 为极坐标下移动台在小区内分布的概率密度函数, 则各态历经容量可以描述为

$$\begin{aligned} C_{\text{ergodic}} &= E_{\rho, \theta} [C(\rho, \theta)] \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^R C(\rho, \theta) \delta(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \quad (18) \end{aligned}$$

由于移动台在小区内的分布是任意的, 函数一般比较复杂, 因此式(18)通常没有闭式解。在本文中, 进一步利用二维复化 Simpson 积分公式^[16], 将系统下行的各态历经容量近似表达为

$$C_{\text{ergodic}} \approx \frac{hk}{9} \sum_{p=0}^P \sum_{q=0}^Q [a_{p,q} \rho_p C(\rho_p, \theta_q) \delta(\rho_p, \theta_q)] \quad (19)$$

其中, P 和 Q 分别为极径和极角划分的等距节点数, $h = R/P$, $k = 2\pi/Q$, 而 $\rho_p = hp$, $\theta_q = kq$ 。此外, $a_{p,q}$ 为权值, 为矩阵 \mathbf{A} 的第 $p+1$ 行第 $q+1$ 列元素。其中, 矩阵 \mathbf{A} 为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 & 4 & \dots & 2 & 4 & 1 \\ 416 & 816 & \dots & 816 & 4 \\ 2 & 8 & 4 & 8 & \dots & 4 & 8 & 2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 416 & 816 & \dots & 816 & 4 \\ 1 & 4 & 2 & 4 & \dots & 2 & 4 & 1 \end{bmatrix}_{(P+1) \times (Q+1)} \quad (20)$$

4 中断容量分析

在本节中, 将对分布式天线系统下行传输的中断容量进行分析。首先在系统选择分集传输策略下, 分析给定移动台位置时的中断容量近似表达

式；然后，考虑到移动台在小区内的分布情况，进一步推导出了分布式天线系统的中断容量近似解析表达式。

4.1 给定移动台位置时的中断容量分析

中断容量是指信道瞬时容量小于某一给定目标容量 C_{th} 时的中断概率^[8]。同样假设式(10)中各信噪比 γ_i ($i = 0, 1, \dots, N$) 彼此之间相互独立。因此，在给定移动台位置时系统的中断容量 $P_{outage}(\rho, \theta)$ 可以表示为

$$\begin{aligned} P_{outage}(\rho, \theta) &= \Pr(C_\gamma(\rho, \theta) \leq C_{th}) \\ &= \Pr(\gamma \leq 2^{C_{th}} - 1) \\ &= \prod_{i=0}^N \Pr\{\gamma_i \leq 2^{C_{th}} - 1\} \end{aligned} \quad (21)$$

利用式(9)和 Gauss-Hermite 积分公式^[15]， $\Pr\{\gamma_i \leq 2^{C_{th}} - 1\}$ 可以近似为

$$\begin{aligned} &\Pr\{\gamma_i \leq 2^{C_{th}} - 1\} \\ &\approx \sum_{n=1}^{N_p} H_n \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[1 - \exp\left(-\frac{2^{C_{th}} - 1}{10 \frac{\sqrt{2}\sigma_{t_n} + \mu_i(\rho, \theta)}{10}}\right) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

其中，式(22)的详细推导过程见附录 C。然后，将式(22)代入式(21)，可以得到给定移动台位置时的中断容量为

$$P_{outage}(\rho, \theta) \approx \prod_{i=0}^N \sum_{n=1}^{N_p} \frac{H_n}{\sqrt{\pi}} \left[1 - \exp\left(-\frac{2^{C_{th}} - 1}{10 \frac{\sqrt{2}\sigma_{t_n} + \mu_i(\rho, \theta)}{10}}\right) \right] \quad (23)$$

其中， t_n, H_n 分别为 N_p 阶 Hermite 多项式的基点和权值。

4.2 中断容量分析

与各态历经容量类似，中断容量同样与移动台在小区内的分布有关。考虑到小区内移动台的分布，则中断容量可以表示为

$$\begin{aligned} P_{outage} &= E_{\rho, \theta} [P_{outage}(\rho, \theta)] \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^R P_{outage}(\rho, \theta) \delta(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \end{aligned} \quad (24)$$

其中， $\delta(\rho, \theta)$ 为小区内移动台分布的概率密度函数。

然后，进一步利用二维复化 Simpson 积分公式^[16]，

将系统下行中断容量近似表达为

$$P_{outage} \approx \frac{hk}{9} \sum_{p=0}^P \sum_{q=0}^Q [a_{p,q} \rho_p P_{outage}(\rho_p, \theta_q) \delta(\rho_p, \theta_q)] \quad (25)$$

其中，各参数的取值与式(19)中类似，此处不再赘述。

5 数值结果

本节将通过蒙特卡罗 (Monte Carlo) 仿真，给出路径损耗指数、分布式天线数目、移动台在小区内的分布等因素对容量性能的影响，并验证系统下行传输的各态历经容量和中断容量理论表达式的准确性。不失一般性地，考虑一个半径为 R 的圆形小区作为测试系统。在这个系统中，基站位于小区中心，其余分布式天线均匀分布在半径为 $R/2$ 的圆上，相邻天线节点间的角度为 $2\pi/N$ 。此外，为描述移动台在小区内分布的非均匀性，把小区划分为如图 2 所示 2 部分，位于小区中心且半径为 R_h 的圆形区域为区域 1，记为 Ψ_1 ；小区中除区域 1 的其他部分为区域 2，记为 Ψ_2 。不失一般性地，移动台在小区内分布的概率密度函数 $\delta(\rho, \theta)$ 可以假设为

$$\delta(\rho, \theta) = \begin{cases} \frac{\lambda}{S_h}, & (\rho, \theta) \in \Psi_1 \\ \frac{1-\lambda}{S-S_h}, & (\rho, \theta) \in \Psi_2 \end{cases} \quad (26)$$

其中， S_h 为区域 1 的面积， S 为整个小区的面积。 $\lambda \in [0, 1]$ 表示移动台分布在区域 1 中的概率。不难发现， λ 取值不同，对应的概率密度函数也不同，也即移动台在小区内的分布情况不同。当 $\lambda = S_h/S$ 时，移动台在整个小区内服从均匀分布；当 $\lambda > S_h/S$ 时，区域 1 为热点区域，大多数移动台分布在区域 1；当 $\lambda < S_h/S$ 时，区域 2 为热点区域，移动台则主要分布于区域 2。特别地，当 $\lambda = 0$ 时，移动台全部分布在区域 2；而当 $\lambda = 1$ 时，移动台则全部分布在区域 1。需要强调的是，只要 $\lambda \neq S_h/S$ ，移动台在整个小区内就是非均匀分布。为了观察移动台非均匀分布对系统性能的影响，不失一般性地，下文的仿真中取 $\lambda = 0.4$ 作为非均匀分布场景。系统的主要参数如表 1 所示。

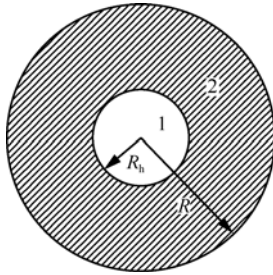


图 2 移动台在小区内分布

表 1 主要参数

参数	取值
小区半径 R	800 m
微小区半径 R_h	200 m
分布式天线个数 N	6
参考距离 d_0	40 m
阴影衰落标准差 σ_i	8 dB
路径损耗指数 β_i	2
容量门限 C_{th}	1 bit/s/Hz
Hermite 多项式阶数 N_p	40
极径等距节点数 Q	12
极角等距节点数 P	12
基站位置 (D_0, θ_0)	(0,0)

图 3 和图 4 分别给出了当移动台均匀分布 ($\lambda = S_h/S$) 和非均匀分布 ($\lambda = 0.4$) 时, 不同路径损耗指数对各态历经容量性能的影响。从 2 图中可以看出, 随着发送信噪比 (E/N_0) 的增加, 接收端输出信噪比也随之增加, 使得各态历经容量均逐渐增加。此外, 还可以看出, 当给定发送信噪比时,

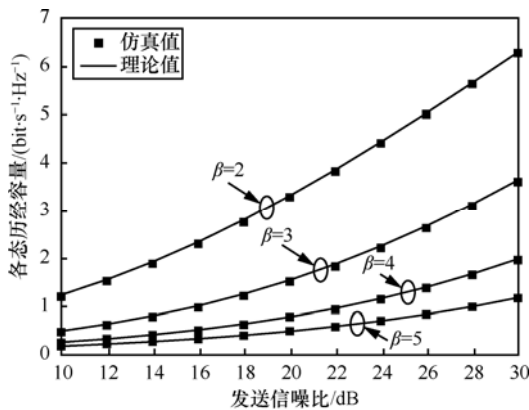


图 3 移动台均匀分布时, 不同路径损耗指数对各态历经容量性能的影响

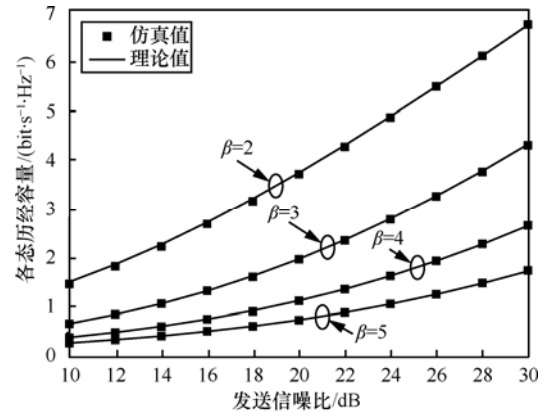


图 4 移动台非均匀分布时, 不同路径损耗指数对各态历经容量性能的影响

随着路径损耗指数的增加, 路径损耗越来越大, 进而使移动台的接收信噪比降低, 并导致各态历经容量性能越来越差。值得注意的是, 当发送信噪比较小时, 图中不同曲线之间的各态历经容量性能差距相对较小; 而随着发送信噪比的增加, 其不同曲线之间的系统性能差距变得越来越大。

图 5 和图 6 则分别给出了当移动台均匀分布 ($\lambda = S_h/S$) 和非均匀分布 ($\lambda = 0.4$) 时, 不同分布式天线数目对中断容量性能的影响。从 2 图中可以看出, 随着发送信噪比 (E/N_0) 的增加, 接收信噪比也将随之增加, 满足容量约束的移动台数量也越来越多, 进而使得中断容量逐渐降低。从 2 图中还可看出, 分布式天线数目越多, 所得到的中断容量越小。这是因为分布式天线数目越多, 系统的分集度越高, 可以使接收端获得更高的信噪比增益; 另一方面, 移动台接入系统的平均距离也随着分布式天线数目的增加而减小, 使得信道增益中的路径损耗变小, 进而使接收信噪比变大, 最终使得中断容量随分布式天线数目的增加而逐渐降低。

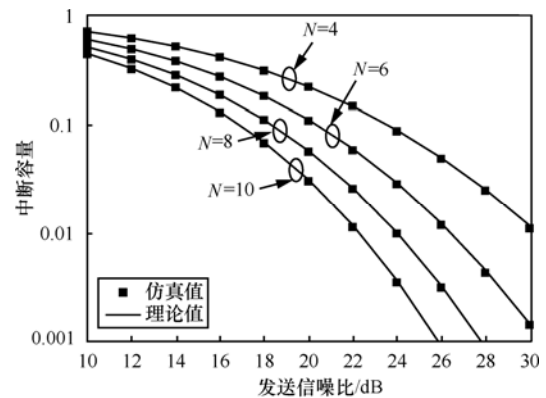


图 5 移动台均匀分布时, 不同分布式天线数目对中断容量性能的影响

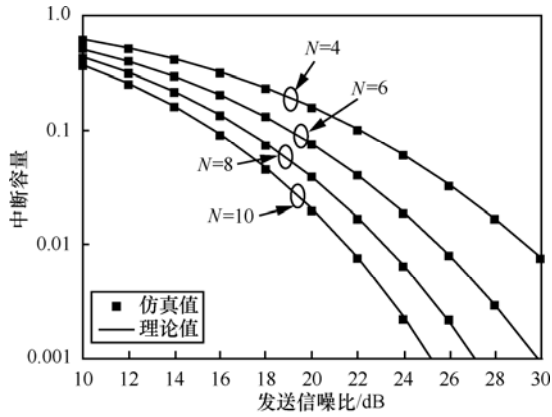


图 6 移动台非均匀分布时，不同分布式天线数目对中断容量性能的影响

需要强调的是，图 3~图 6 中，移动台在小区内不论是均匀分布还是非均匀分布，各态历经容量和中断容量的仿真值与理论值之间的误差均十分小以至于可以忽略不计，因此本文提出的分布式天线系统中的系统下行各态历经容量和中断容量表达式具有很好的准确性，可广泛用于评估各种场景下的分布式天线系统的各态历经容量和中断容量性能。

6 结束语

本文研究了基于选择分集传输策略的分布式天线系统下行传输的容量问题。在所建立的复合信道模型下，分析并推导了各态历经容量和中断容量近似解析表达式。数值结果表明，用本文所推导的 2 个近似解析表达式计算所得到的理论值与计算机仿真值均非常吻合，因此它们具有极好的准确性，可广泛用于各种场景下容量性能的评估，为下一步分布式天线系统的小区规划、天线布局等问题的研究奠定了基础。

附录 A

在式(10)中，由于所有 γ_i ($i = 0, 1, 2, \dots, N$) 彼此之间相互独立，因此接收信噪比 γ 的 CDF 可以表达为

$$F_\gamma(r) = \prod_{i=0}^N F_{\gamma_i}(r) \tag{27}$$

其中， $F_{\gamma_i}(r)$ 为 γ_i 的 CDF。此外，由式(11)知， $F_{\gamma_i}(r)$ 可以表达为

$$F_{\gamma_i}(r) = \int_0^r \frac{\xi}{\sqrt{2\pi\sigma_i r}} \exp\left[-\frac{(10\lg r - \tilde{\mu}_i(\rho, \theta))^2}{2\sigma_i^2}\right] dr \tag{28}$$

令 $x = (10\lg r - \tilde{\mu}_i(\rho, \theta))/\sqrt{2}\sigma_i$ ，并代入式(28)， $F_{\gamma_i}(r)$

可进一步表达为

$$F_{\gamma_i}(r) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{10\lg r - \tilde{\mu}_i(\rho, \theta)}{\sqrt{2}\sigma_i}} \exp(-x^2) dx = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{10\lg r - \tilde{\mu}_i(\rho, \theta)}{\sqrt{2}\sigma_i}\right) \tag{29}$$

其中， $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 表示互补误差函数。把式(29)代入式(27)即得式(14)。

附录 B

由文献[15]中式(25.4.46)知，Gauss-Hermite 积分公式为

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \exp(-x^2) dx \approx \sum_{n=1}^{N_p} H_n f(t_n) \tag{30}$$

令 $x = (10\lg r - \tilde{\mu}_i(\rho, \theta))/\sqrt{2}\sigma_i$ ，代入式，并运用式(30)，得到 (ρ, θ) 处移动台的下行容量表达式为

$$C(\rho, \theta) = \sum_{i=0}^N \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \operatorname{lb}\left(1 + 10^{(\sqrt{2}\sigma_i x + \tilde{\mu}_i(\rho, \theta))/10}\right) \left[\prod_{j=0, j \neq i}^N F_j\left(10^{(\sqrt{2}\sigma_j x + \tilde{\mu}_j(\rho, \theta))/10}\right) \right] \exp(-x^2) dx \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=0}^N \sum_{n=1}^{N_p} \left\{ H_n \operatorname{lb}\left(1 + 10^{(\sqrt{2}\sigma_i x + \tilde{\mu}_i(\rho, \theta))/10}\right) \right\} \prod_{j=0, j \neq i}^N \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{2}\sigma_j t_n + \tilde{\mu}_j(\rho, \theta) - \tilde{\mu}_i(\rho, \theta)}{\sqrt{2}\sigma_j}\right) \right] \tag{31}$$

因此，式(31)即为式(17)。

附录 C

利用式(9)，并交换积分次序，可将 $\Pr\{\gamma_i < 2^{C_{th}} - 1\}$ 化简为

$$\Pr\{\gamma_i < 2^{C_{th}} - 1\} = \int_0^{2^{C_{th}} - 1} f_{\gamma_i}(\gamma) d\gamma = \int_0^{+\infty} \frac{\xi}{\sqrt{2\pi\sigma_i \omega}} \left[1 - \exp\left(-\frac{2^{C_{th}} - 1}{\omega}\right) \right] \exp\left[-\frac{(10\lg \omega - \mu_i(\rho, \theta))^2}{2\sigma_i^2}\right] d\omega \tag{32}$$

然后，令 $x = (10\lg \omega - \mu_i(\rho, \theta))/\sqrt{2}\sigma_i$ ，再利用 Gauss-Hermite 积分，可进一步得到

$$\Pr\{\gamma_i < 2^{C_{th}} - 1\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[1 - \exp\left(-\frac{2^{C_{th}} - 1}{10 \frac{10^{(\sqrt{2}\sigma_i x + \mu_i(\rho, \theta))/10}}{10}}\right) \right] \exp(-x^2) dx$$

$$\approx \sum_{n=1}^{N_p} H_n \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[1 - \exp \left(- \frac{2^{C_{th}} - 1}{10 \frac{\sqrt{2}\sigma_{f_n} + \mu_i(\rho, \theta)}{10}} \right) \right] \quad (33)$$

因此, 式(33)即为式(22)。

参考文献:

[1] 唐苏文, 陈明. 分布式天线系统的功率有效性分析[J]. 通信技术, 2009, 42(3): 30-32.
TANG S W, CHEN M. Power efficiency in distributed antenna systems[J]. Communications Technology, 2009, 42(3): 30-32.

[2] YOU X, WANG D, SHENG B, *et al.* Cooperative distributed antenna systems for mobile communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(3): 35-43.

[3] FENG W, XU X, ZHOU S, *et al.* Sum rate characterization of distributed antenna systems with circular antenna layout[A]. IEEE 69th Vehicular Technology Conference[C]. Barcelona, Spain, 2009.

[4] ROH W, PAULRAJ A. MIMO channel capacity for the distributed antenna systems[A]. IEEE 56th Vehicular Technology Conference[C]. Vancouver, Canada, 2002. 706-709.

[5] DAI L, ZHOU S, YAO Y. Capacity analysis in CDMA distributed antenna systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 4(6): 2613-2620.

[6] ZHUANG H, DAI L, XIAO L, *et al.* Spectral efficiency of distributed antenna system with random antenna layout[J]. IEE Electronics Letters, 2003, 39(6): 495-496.

[7] CHEN H, CHEN M. Capacity of the distributed antenna systems over shadowed fading channels[A]. IEEE 69th Vehicular Technology Conference[C]. Barcelona, Spain, 2009.

[8] CHEN H, WANG J, CHEN M. Spectral efficiency of the distributed MIMO system with antenna cooperation[A]. IEEE 71st Vehicular Technology Conference[C]. 2010.

[9] QIAN X, CHEN M, WANG X, *et al.* Antenna location design for distributed antenna systems with selective transmission[A]. International Conference on Wireless Communication and Signal Processing[C]. Nanjing, China, 2009.

[10] 李汉强, 郭伟, 刘辉. 分布式天线系统 MIMO 信道容量分析[J]. 通信学报, 2005, 26(8): 134-138.
LI H Q, GUO W, LIU H. Analysis of MIMO channel capacity for distributed antenna system[J]. Journal on Communications, 2005, 26(8): 134-138.

[11] MCDONOUGH R, WHALEN A. Detection of Signals in Noise (2nd edn)[M]. California: Academic Press, 1995.

[12] GOLDSMITH A. Wireless Communication[M]. New York: Cambridge University Press, 2005.

[13] PAPOULIS A. Probability, Random Variables and Statistic Processes (3rd edn)[M]. NewYork: McGraw-Hill Companies. Inc, 1991.

[14] STUBER G. Principles of Mobile Communication (2nd edn)[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.

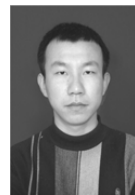
[15] ABRAMOWITZ M, STEGUN I. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables (9th edn)[M]. New York: Dover Publications, 1970.

[16] BURDEN R, FAITES J. Numerical Analysis Fourth Edition[M]. Boston: PWS KENT Publishing Company, 1989.

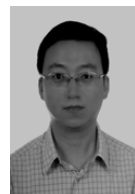
作者简介:



王俊波 (1979-), 男, 安徽合肥人, 南京航空航天大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为移动通信中的无线资源管理、网络规划及无线光通信。



王金元 (1986-), 男, 山东聊城人, 东南大学移动通信国家重点实验室博士生, 主要研究方向为分布式天线系统的性能分析与网络规划。



赵曦滨 (1973-), 男, 江苏扬州人, 博士, 清华大学讲师, 主要研究方向为分布式系统访问控制、无线自组织网络安全及安全风险管理等。



顾明 (1962-), 女, 辽宁沈阳人, 清华大学教授, 主要研究方向为操作系统、分布式应用系统支撑平台、系统安全及电子商务等。



陈明 (1968-), 男, 江苏扬州人, 东南大学移动通信国家重点实验室教授、博士生导师, 主要研究方向为移动通信系统中的基带信号处理及无线资源管理等。



焦媛 (1987-), 女, 安徽宿州人, 南京航空航天大学电子信息工程学院硕士生, 主要研究方向为无线可见光通信。