

分布式天线系统中的系统下行中断概率分析

王俊波^{1,2}, 王金元¹, 陈华敏², 陈 明²

(1. 南京航空航天大学信息科学与技术学院, 江苏南京 210016; 2. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏南京 210096)

摘 要: 本文针对分布式天线系统的系统下行中断概率问题展开研究. 文章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. 接着, 在接收端采用最大比合并的方式接收信号, 并运用矩生成函数推导出输出信噪比的概率密度函数. 然后, 对分布式天线采用选择传输策略, 并分析出给定移动台位置时的中断概率的表达式. 最后, 考虑小区内移动台任意分布特点, 进一步推导出系统下行中断概率闭合表达式. 仿真结果表明, 所推导的闭合表达式能准确地评估系统中断概率性能.

关键词: 分布式天线系统; 系统中断概率; 最大比合并; 选择传输; 复合信道

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 04-0785-06

System Downlink Outage Probability Analysis in Distributed Antenna Systems

WANG Jun-bo^{1,2}, WANG Jin-yuan¹, CHEN Hua-min², CHEN Ming²

(1. College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: The main focus of this paper is to investigate the system downlink outage probability in distributed antenna systems (DAS). Firstly, this paper establishes a composite channel model which takes into account three factors such as path loss, log-normal shadowing and Rayleigh fading. Then, by making use of the moment generating function (MGF), this paper derives the probability density function (PDF) of the output signal-to-noise ratio (SNR) after maximal ratio combining (MRC) at the receiver. After that, an approximate analytical expression of the outage probability for a mobile station (MS) over a given position is derived with an antenna selective transmission (ST) scheme. Further, considering the distribution of MSs in the system, a closed-form expression of the system outage probability is obtained. Numerical results show that the closed-form expression can provide sufficient precision for evaluating the outage probability performance of DAS.

Key words: distributed antenna systems; system outage probability; maximal ratio combining; selective transmission; composite channel

1 引言

随着频谱资源的日益紧张和用户需求的持续增长, 传统蜂窝系统出现了切换频繁、干扰增加、成本提高等问题, 已无法满足未来无线通信系统的发展要求. 近年来, 分布式天线系统作为一种新兴技术引起了学术界的广泛关注. 分布式天线系统不论在提高系统容量、降低发射功率、提高分集度, 还是在减少切换次数、降低中断概率等方面都显示出传统蜂窝系统不可比拟的优

势^[1~3], 被认为是传统蜂窝系统的理想替代方案, 已成为未来无线通信极具发展前景的方向之一.

在无线通信中, 系统中断概率是反映用户会话接入性能的重要指标, 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中的中断概率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和下行链路的中断概率性能, 但是信道模型没有考虑阴影衰落的影响. 文献[5]研究了在阴影衰落和瑞利衰

收稿日期: 2010-05-19; 修回日期: 2010-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60972023); 国家科技重大专项(No. 2010ZX03003-002, No. 2010ZX03003-004); “区域光纤通信网与新型光通信系统”国家重点实验室开放课题(No. 2008SH06); 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(No. 2010D01); 东南大学移动通信国家重点实验室研究基金(No. 2010A06); “毫米波”国家重点实验室开放课题(No. K201001); 航空科学基金(No. 2009ZC52038); 南京航空航天大学新教师启动基金; 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(No. NS2010091); 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金

落下分布式天线系统的中断概率性能. 在文献[5]中, 各分布式天线和移动台间的路径损耗假定是相同的, 然而在实际系统中并非总是如此. 因此, 所得到的中断概率表达式缺乏一般性, 并不能用来作为评估系统在不同场景下中断性能的指标. 此外, 文献[4,5]均没有考虑分集传输和分集接收对系统性能的影响. 在文献[6]中, 我们曾基于选择传输策略, 针对分布式天线系统推导出在阴影衰落和 Nakagami 小尺度衰落下, 某一移动台上行传输的中断概率解析表达式. 为了进一步利用分布式天线系统分集特性, 我们在文献[7]中综合考虑分集传输和分集接收两方面的影响, 进一步分析出分布式天线系统下行传输的中断概率表达式. 需要注意的是, 文献[6]和文献[7]所得到的中断概率表达式只能计算移动台处于小区内某一具体位置时的中断概率, 还无法用于评估整个系统会话的中断概率性能. 理论上, 系统中断概率与移动台在小区内的分布有关. 到目前为止, 还未见到相关文献对系统中断概率问题进行完整的分析, 因此有必要对其做进一步研究.

在前期工作的基础上^[7], 本文在最大比合并(MRC)方式和选择传输(ST)策略下, 进一步针对分布式天线系统中下行传输的系统中断概率进行研究. 文章首先建立了包含路径损耗、阴影衰落和瑞利衰落的分布式天线系统复合信道模型. 接着, 在移动台接收端采用最大比合并的方式接收信号, 并运用矩生成函数推导出输出信噪比的概率密度函数表达式. 然后, 对分布式天线采用选择传输策略, 分析出给定移动台位置时的下行中断概率表达式. 最后, 考虑小区内移动台任意分布特点, 进一步分析出系统下行中断概率闭合表达式.

2 系统模型

考虑一个如图1所示的分布式天线系统. 假设小区是一个半径为 R 的圆形小区, N 个分布式天线任意地摆放在小区内的不同位置, 记为 $DA_i (i = 1, 2, \dots, N)$. 不失一般性地, 假设每个移动台(MS)均有 L 个天线, 并且移动台按一定的概率密度分布在小区范围内. 移动台和 DA_i 的位置分别用极坐标 (ρ, θ) 和 $(D_i, \theta_i) (i = 1, 2, \dots, N)$ 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.

本文只考虑分布式天线系统的下行传输. 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

$$\mathbf{Y}_i = [y_i^{(1)}, y_i^{(2)}, \dots, y_i^{(L)}]^T = \sqrt{E} \underbrace{[h_i^{(1)}, h_i^{(2)}, \dots, h_i^{(L)}]^T}_{\mathbf{h}_i} \mathbf{x} + \mathbf{Z} \in \mathbb{C}^{(L \times 1)} \quad (1)$$

其中, \mathbf{Y}_i 的第 j 个元素 $y_i^{(j)} (j = 1, 2, \dots, L)$ 表示 (ρ, θ) 处

移动台第 j 个接收天线的接收信号, E 为分布式天线的下行传输功率, 信道增益矢量 \mathbf{h}_i 的第 j 个元素 $h_i^{(j)}$ 表示 DA_i 和 (ρ, θ) 处移动台第 j 个天线间传输链路的信道增益, \mathbf{x} 为分布式天线发射的下行信号, 矢量 \mathbf{Z} 为夹杂在信号中的噪声矢量. 在本文中, 假设噪声矢量 \mathbf{Z} 中的每一个元素均为相互独立的零均值、方差为 N_0 的复高斯随机变量.

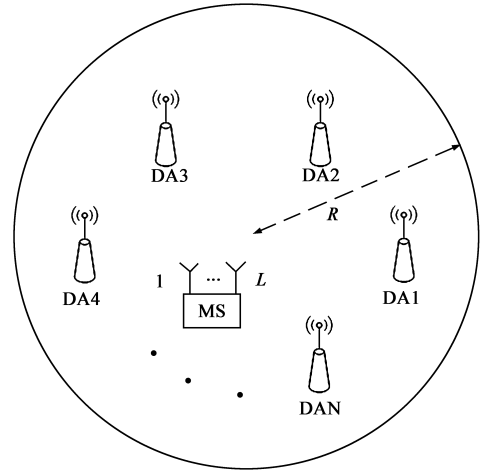


图1 分布式天线系统

参照文献[8], 分布式天线系统中的信道增益可建模为由路径损耗、阴影衰落和瑞利(Rayleigh)衰落构成的复合信道模型. 数学上, 式(1)中的信道增益 $h_i^{(j)}$ 可表达为

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

其中, $g_i^{(j)}$ 表示 DA_i 和 (ρ, θ) 处移动台第 j 个天线间的小尺度衰落的影响, 而 $P_i(\rho, \theta)$ 和 S_i 分别为 DA_i 和 (ρ, θ) 处移动台间路径损耗和阴影衰落的影响. 值得注意的是, $h_i^{(1)}, \dots, h_i^{(L)}$ 具有相同的路径损耗 $P_i(\rho, \theta)$ 和相同的阴影衰落 S_i . 此外, 假设 DA_i 和 (ρ, θ) 处移动台间的小尺度衰落、路径损耗和阴影衰落是相互独立的. 不失一般性, 假设小尺度衰落 $g_i^{(j)}$ 的包络服从 Rayleigh 分布, 则 $|g_i^{(j)}|^2$ 服从指数(Exponential)分布^[9]. 若 $|g_i^{(j)}|^2$ 的均值为 1, 则其概率密度函数可表示为

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

式(2)中的路径损耗 $P_i(\rho, \theta)$ 是移动台位置的函数, 可以描述为^[10]

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

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 与 (ρ, θ) 处移动台间的距离, 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, 若其均值为 0dB, 则其概率密度函数为^[10]

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

其中 $\xi = 10/\ln 10$, σ_i (单位 dB) 为 $10\log_{10}S_i$ 的标准差. 由式(1)和(2)知, (ρ, θ) 处移动台第 j 个天线从 DA_i 接收信号时, 接收信噪比为

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

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

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

其中 $\mu_i(\rho, \theta) = 10\log_{10}(EP_i(\rho, \theta)/N_0)$ 为 $10\log_{10}\Omega_i$ 的均值, 并且 $\omega > 0$. 进一步地, 由式(3)和(6)可以得到 $\gamma_i^{(j)}$ 的条件概率密度函数为^[11]

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

相应地, $\gamma_i^{(j)}$ 的概率密度函数可由式(7)和(8)得到

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

由式(9)知, $\gamma_i^{(j)}$ 服从 Gamma-lognormal 分布.

移动台采用最大比合并(MRC)方式处理接收到的信号, 则输出信噪比可以表示为

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^L \gamma_i^{(j)} = \Omega_i \sum_{j=1}^L |g_i^{(j)}|^2 \quad (10)$$

假设 $g_i^{(1)}, \dots, g_i^{(L)}$ 彼此之间相互独立, 则 γ_i 的条件矩生成函数(MGF)可表示为^[12]

$$M_{\gamma_i|\Omega_i}(p|\omega) = \prod_{j=1}^L M_{\gamma_i^{(j)}|\Omega_i}(p|\omega) = (1 - p\omega)^{-L} \quad (11)$$

其中 $M_{\gamma_i^{(j)}|\Omega_i}(p|\omega)$ 为 $\gamma_i^{(j)}$ 的条件矩生成函数. 因此, 给定 Ω_i 时 γ_i 的条件概率密度函数可以通过对 $M_{\gamma_i|\Omega_i}(-p|\omega)$ 求拉普拉斯逆变换得到

$$f_{\gamma_i|\Omega_i}(\gamma|\omega) = \mathcal{L}^{-1}[M_{\gamma_i|\Omega_i}(-p|\omega)] = \frac{\gamma^{L-1}}{\omega^L \Gamma(L)} \exp\left(-\frac{\gamma}{\omega}\right) \quad (12)$$

其中 $\mathcal{L}^{-1}(\cdot)$ 表示求拉普拉斯逆变换, $\Gamma(\cdot)$ 表示 Gamma 函数. 式(11)和(12)的具体推导过程见附录 A. 最后, 由式(7)和(12)可以得到 γ_i 的概率密度函数为

$$f_{\gamma_i}(\gamma) = \int_0^{+\infty} f_{\gamma_i|\Omega_i}(\gamma|\omega) f_{\Omega_i}(\omega) d\omega = \int_0^{+\infty} \frac{\gamma^{L-1}}{\omega^L \Gamma(L)} \exp\left(-\frac{\gamma}{\omega}\right) \frac{\xi}{\sqrt{2\pi}\sigma_{i,\omega}}$$

$$\times \exp\left[-\frac{(10\log_{10}\omega - \mu_i(\rho, \theta))^2}{2\sigma_i^2}\right] d\omega \quad (13)$$

显然, γ_i 同样服从 Gamma-lognormal 分布.

3 系统下行中断概率分析

系统中断概率是反映系统中用户会话接入性能的重要指标之一. 本节将分析分布式天线系统中的系统下行中断概率. 假设 DA_i 和 (ρ, θ) 处移动台间的信道状态信息已知, 且对分布式天线采用选择传输(ST)方式, 即只选择能使移动台接收信噪比最大的分布式天线来传输信息. 因此, 移动台的接收信噪比为

$$\gamma = \max\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N\} \quad (14)$$

由于分布式天线分开放置且相距较远, 可以认为所有信噪比 $\gamma_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 是相互独立的. 相应地, (ρ, θ) 处移动台的中断概率可以表示为

$$\delta(\rho, \theta) = \Pr(\gamma < \gamma_{th}) = \Pr(\gamma_1 < \gamma_{th}, \dots, \gamma_N < \gamma_{th}) = \prod_{i=1}^N \Pr(\gamma_i < \gamma_{th}) \quad (15)$$

其中 γ_{th} 为信噪比门限. 利用式(13)和 Gauss-Hermite 积分公式^[13], 式(15)中的概率 $\Pr(\gamma_i < \gamma_{th})$ 可表示为

$$\Pr(\gamma_i < \gamma_{th}) \cong 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}\Gamma(L)} \times \sum_{n=1}^{N_p} H_n \Gamma(L, \gamma_{th} 10^{-[\sqrt{2}\sigma_{i,t_n} + \mu_i(\rho, \theta)]/10}) \quad (16)$$

式(16)的具体推导过程见附录 B. 进一步地, 把式(16)代入式(15), 则得到位于 (ρ, θ) 处移动台的中断概率为

$$\delta(\rho, \theta) = \prod_{i=1}^N \left[1 - \frac{\sum_{n=1}^{N_p} H_n \Gamma(L, \gamma_{th} 10^{-[\sqrt{2}\sigma_{i,t_n} + \mu_i(\rho, \theta)]/10})}{\sqrt{\pi}\Gamma(L)} \right] \quad (17)$$

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

值得一提的是, 式(17)得到的中断概率是关于移动台位置 (ρ, θ) 的函数, 不能作为反映整个系统下行会话中断性能的指标. 理论上, 系统中断概率与移动台在小区内的分布有关. 因此, 考虑到移动台在小区中随机分布的影响, 分布式天线系统的系统下行中断概率可描述为

$$P_{out} = E_{\rho, \theta}[\delta(\rho, \theta)] = \int_0^{2\pi} \int_0^R \delta(\rho, \theta) r(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \quad (18)$$

其中, $r(\rho, \theta)$ 为极坐标下移动台在小区内分布的概率密度函数. 由于移动台在小区内的分布是任意的, 函数 $r(\rho, \theta)$ 一般比较复杂, 因此式(18)通常无闭式解. 在本文中, 我们进一步利用二维复化 Simpson 积分公式^[14],

将系统下行中断概率近似表达为

$$P_{\text{out}} \cong \frac{hk}{9} \sum_{p=0}^P \sum_{q=0}^Q [c_{p,q} \rho_p r(\rho_p, \theta_q) \delta(\rho_p, \theta_q)] \quad (19)$$

其中, P 和 Q 分别为极径和极角划分的等距节点数, $h = R/P$, $k = 2\pi/Q$, $c_{p,q}$ 为权值, 为矩阵 C 的第 $p+1$ 行第 $q+1$ 列元素. 特别地, 矩阵 C 为

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 & 4 & \cdots & 2 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 8 & 16 & \cdots & 8 & 16 & 4 \\ 2 & 8 & 4 & 8 & \cdots & 4 & 8 & 2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 4 & 16 & 8 & 16 & \cdots & 8 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 2 & 4 & \cdots & 2 & 4 & 1 \end{bmatrix}_{(P+1) \times (Q+1)} \quad (20)$$

4 数值结果

本节将通过计算机仿真, 给出路径损耗指数、每个移动台天线数目、移动台在小区内的分布等因素对系统中断概率性能的影响, 并验证系统下行中断概率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, 基站位于小区中央, 分布式天线节点均匀分布在半径为 $R/2$ 的圆上, 相邻天线节点间的角度为 $2\pi/N$ ^[7]. 此外, 为描述移动台在小区内分布的非均匀性, 我们把小区分为如图 2 所示两部分, 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 的其它部分为区域 2, 记为 Ψ_2 . 因此, 移动台在小区内分布的概率密度函数 $r(\rho, \theta)$ 可以假设为

$$r(\rho, \theta) = \begin{cases} \lambda/S_h, & (\rho, \theta) \in \Psi_1 \\ (1-\lambda)/(S-S_h), & (\rho, \theta) \in \Psi_2 \end{cases} \quad (21)$$

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, 移动台集中分布于区域 1; 当 $\lambda < S_h/S$ 时, 区域 2 为

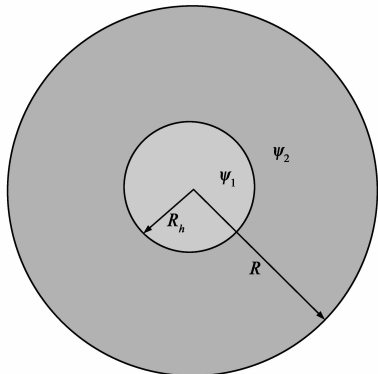


图2 移动台在小区内分布的示意图

热点区域, 移动台集中分布于区域 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. 系统的主要参数如表 1 所示.

表 1 主要参数

参数	取值
小区半径 R	1000m
微小区半径 R_h	250m
分布式天线个数 N	7
每个移动台天线数 L	1
参考距离 d_0	40m
阴影衰落标准差 σ_i	6dB
路径损耗指数 β_i	4
信噪比门限 γ_{th}	0dB
Hermite 多项式阶数 N_p	40
极径等距节点数 P	8
极角等距节点数 Q	8
分布式天线位置 $(D_i, \theta_i); i=1, 2, \dots, N$	$(R/2, 2\pi i/N)$

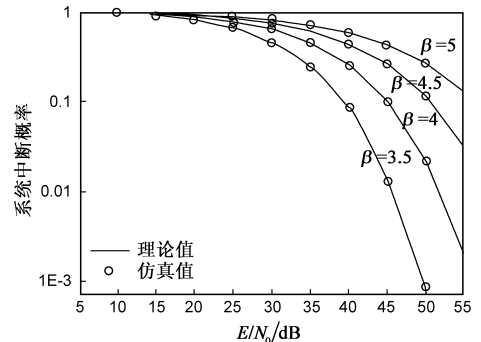


图3 移动台均匀分布时, 不同路径损耗指数对系统中断概率的影响

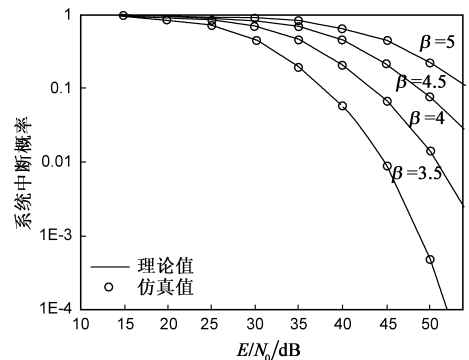


图4 移动台非均匀分布时, 不同路径损耗指数对系统中断概率的影响

图 3~6 分别给出了不同场景下, 系统下行中断概率随传输信噪比 (E/N_0) 的变化情况. 从这些图中可以看出, 随着传输信噪比的增加, 移动台的接收信噪比也随之增加, 使得系统中断概率不断减小. 图 3 和图 4 分别给出了移动台均匀分布 ($\lambda = S_h/S$) 和非均匀分布 ($\lambda = 0.4$) 时, 不同路径损耗指数 β 下, 系统中断概率随传输信噪比的变化情况. 从两图中可以看出, 随着路径损耗指数的增加, 路径损耗变得越来越小, 进而使移动台

接收信噪比降低,并导致系统中断概率升高,使系统性能变差。

图 5 和图 6 则分别给出了移动台均匀分布($\lambda = S_h/S$)和非均匀分布($\lambda = 0.4$)时,不同移动台天线数目 L 下,系统的下行中断概率性能. 两图表明,每个移动台拥有的天线数目越多,移动台接收信号的分集度就越高,对接收信号采取最大比合并后,移动台的接收信噪比得到显著提高,因而系统中断概率性能也得到很大提升。

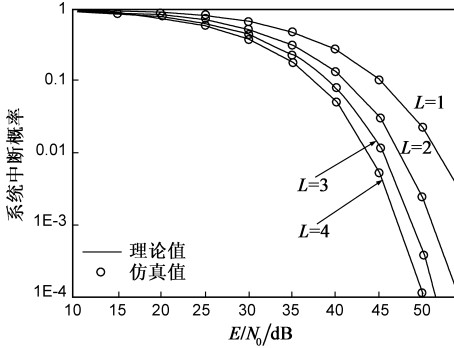


图 5 移动台均匀分布时,不同移动台天线数目对系统中断概率的影响

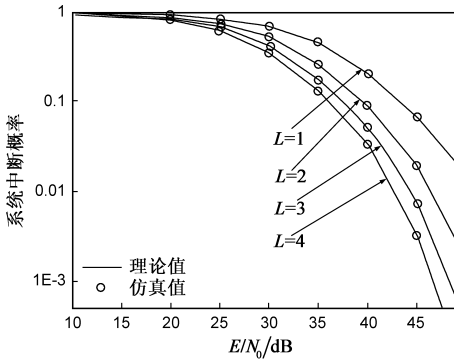


图 6 移动台非均匀分布时,不同移动台天线数目对系统中断概率的影响

需要注意的是,图 3~6 中,移动台在小区内不论是均匀分布还是非均匀分布,系统中断概率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中断概率表达式具有很好的准确性,可广泛用于分析各种场景下的系统中断概率。

5 结论

本文研究了分布式天线系统在复合信道下系统下行中断概率问题.为了充分利用系统的分集特性,在发送端采用了选择传输方式、接收端采用了最大比合并方式.文章首先推导了给定移动台位置时的中断概率表达式;然后考虑移动台在小区内任意分布特点,进一步推导出系统下行中断概率的闭合表达式.仿真结果显示该闭合表达式的理论值与计算机仿真值十分吻

合,表明该表达式可以广泛用于各种场景下系统中断概率的评估,为小区规划、天线布局等问题的研究奠定了基础。

附录 A

由文献[12]知,矩生成函数可定义为

$$M(p) = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(pt) f(t) dt \quad (22)$$

其中 $f(t)$ 为 t 的概率密度函数.将 $f_{\gamma_i^{(j)}|\Omega_i}(\gamma|\omega)$ 代入式(11),并求积分,得到 γ_i 的条件矩生成函数为

$$\begin{aligned} M_{\gamma_i|\Omega_i}(p|\omega) &= \prod_{j=1}^L M_{\gamma_i^{(j)}|\Omega_i}(p|\omega) \\ &= \prod_{j=1}^L \int_0^{+\infty} \exp(pt) \frac{1}{\omega} \exp\left(-\frac{t}{\omega}\right) dt \\ &= (1 - p\omega)^{-L} \end{aligned} \quad (23)$$

参照文献[15],可知如下拉普拉斯变换成立

$$\mathcal{L}(t^n e^{-at}) = n! / (p+a)^{n+1} \quad (24)$$

因此,对 $M_{\gamma_i|\Omega_i}(-p|\omega)$ 求拉普拉斯逆变换,并运用式(24),得到概率密度函数 $f_{\gamma_i|\Omega_i}(\gamma|\omega)$ 为

$$f_{\gamma_i|\Omega_i}(\gamma|\omega) = \mathcal{L}^{-1}[(1 + p\omega)^{-L}] = \frac{\gamma^{L-1}}{\omega^L \Gamma(L)} \exp\left(-\frac{\gamma}{\omega}\right) \quad (25)$$

可见,式(23)和(25)分别对应式(11)和(12). \square

附录 B

由式(13)知,概率 $\Pr(\gamma_i < \gamma_{th})$ 可表示为

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_i < \gamma_{th}) &= \int_0^{\gamma_{th}} \int_0^{\infty} \frac{\gamma_i^{L-1} e^{-\gamma_i/\omega}}{\omega^L \Gamma(L)} \frac{\xi}{\sqrt{2\pi\sigma_i\omega}} \\ &\quad \times \exp\left[-\frac{(10\log_{10}\omega - \mu_i(\rho, \theta))^2}{2\sigma_i^2}\right] d\omega d\gamma_i \end{aligned} \quad (26)$$

交换积分次序,并令 $t = \gamma_i/\omega$, 得到

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_i < \gamma_{th}) &= 1 - \int_{\gamma_{th}}^{\infty} \int_0^{+\infty} \frac{\gamma_i^{L-1}}{\omega^L \Gamma(L)} \exp\left(-\frac{\gamma_i}{\omega}\right) \\ &\quad \times \frac{\xi}{\sqrt{2\pi\sigma_i\omega}} \exp\left[-\frac{(10\log_{10}\omega - \mu_i(\rho, \theta))^2}{2\sigma_i^2}\right] d\omega d\gamma_i \\ &= 1 - \frac{1}{\Gamma(L)} \int_0^{+\infty} \Gamma\left(L, \frac{\gamma_{th}}{\omega}\right) \frac{\xi}{\sqrt{2\pi\sigma_i\omega}} \\ &\quad \times \exp\left[-\frac{(10\log_{10}\omega - \mu_i(\rho, \theta))^2}{2\sigma_i^2}\right] d\omega \end{aligned} \quad (27)$$

其中, $\Gamma(n, z) = \int_z^{+\infty} \exp(-t) t^{n-1} dt$ 为 Gamma 不完全函数.再令 $x = (10\log_{10}\omega - \mu_i(\rho, \theta))/(\sqrt{2}\sigma_i)$, 并运用文献[13]的 Gauss-Hermite 积分(式 25.4.46), 得

$$\Pr(\gamma_i < \gamma_{th}) = 1 - \frac{1}{\Gamma(L)} \int_0^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2)$$

$$\begin{aligned} & \times \Gamma(L, \gamma_{th} 10^{-[\sqrt{2}\sigma_x + \mu_i(\rho, \theta)]/10}) dx \\ & \cong 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}\Gamma(L)} \sum_{n=1}^{N_p} H_n \Gamma(L, \gamma_{th} 10^{-[\sqrt{2}\sigma_{f_n} + \mu_i(\rho, \theta)]/10}) \end{aligned} \quad (28)$$

可见,式(28)即为式(16)。□

参考文献:

- [1] 钱文玲,王新征,陈明. 分布式 OFDMA 系统下行资源分配算法[J]. 通信技术, 2009, 42(03): 45 - 47.
QIAN Wen-ling, WANG Xin-zheng, CHEN Ming. Resource allocation for distributed OFDMA downlink systems[J]. Communications Technology, 2009, 42(03): 45 - 47. (in Chinese)
- [2] 尤肖虎,赵新胜. 分布式无线电和蜂窝移动通信网络结构[J]. 电子学报, 2004, 32(12A): 16 - 21.
YOU Xiao-hu, ZHAO Xin-sheng. Distributed radio and cellular mobile communications network architecture[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(12A): 16 - 21. (in Chinese)
- [3] 王艺,赵明,周世东,等. 几种多天线系统的信道容量比较[J]. 电子学报, 2002, 30(6): 787 - 790.
WANG Yi, ZHAO Ming, ZHOU Shi-dong, et al. Channel capacity comparison of several multiple antennas systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(6): 787 - 790. (in Chinese)
- [4] DAI Lin, ZHOU Shi-dong, YAO Yan. Capacity analysis in CDMA distributed antenna systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 4(6): 2613 - 2620.
- [5] RohW, Paulraj A. Outage performance of the distributed antenna systems in a composite fading channel[A]. Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference[C]. Vancouver, Canada: IEEE Vehicular Technology Society, 2002. 1520 - 1524.
- [6] CHEN Hua-min, WANG Jun-bo, CEHN Ming. Outage performance of distributed antenna systems over shadowed Nakagami-m fading channels[J]. European Transactions on Telecommunications, 2009, 20(5): 531 - 535.
- [7] CHEN Hua-min, WANG Jun-bo, CHEN Ming. Downlink outage probability of distributed antenna systems over shadowed Nakagami-m fading channels with antenna selection[A]. Wireless Communication and Signal Processing [C]. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2009. 1 - 4.
- [8] 易新平,唐友喜,邵士海,等. 分布式发射天线 MIMO 信号的最优线性检测[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2694 - 2699.
YI Xin-ping, TANG You-xi, SHAO Shi-hai, et al. Optimal linear detection algorithm of MIMO with distributed transmit antennas[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2694 - 2699. (in Chinese)
- [9] Robert N McDonough, Anthony D Whalen. Detection of Signals in Noise (2nd edn) [M]. California: Academic Press, 1995. 105 - 150.

- [10] Goldsmith A. Wireless Communication[M]. Cambridge University Press: New York, 2005. 24 - 57.
- [11] Papoulis A. Probability, Random Variables and Stochastic Processes (3rd edn) [M]. California University: McGraw-Hill Companies. Inc, 2009. 63 - 85.
- [12] Simon M K, Alouini M S. Digital Communication over Fading Channels (2nd edn) [M]. New York: Wiley, 2005. 625 - 632.
- [13] Abramowitz M, Stegun IA. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables (9th edn) [M]. New York: Dover Publications, 1970. 890 - 890.
- [14] Richard L Burden, J Douglas Faires. Numerical Analysis[M]. Boston: PWS KENT Publishing Company, 1989. 226 - 240.
- [15] Charles L Phillips, John M Parr, Eve A Riskin. Signals, Systems and Transforms (4th edn) [M]. Upper Saddle River, NJ: PEARSON Prentice Hall, 2008. 335 - 397.

作者简介:



王俊波 男, 1979 年生于安徽合肥. 南京航空航天大学讲师, 硕士生导师. 主要研究方向为移动通信中的无线资源管理算法及无线光通信.
E-mail: jbwang@nuaa.edu.cn



王金元 男, 1986 年生于山东聊城. 南京航空航天大学信息科学与技术学院硕士研究生. 主要研究方向为分布式天线系统的性能分析与网络规划.
E-mail: jinyuan798@163.com



陈华敏 女, 1983 年生于浙江台州. 东南大学移动通信国家重点实验室博士研究生. 主要研究方向为分布式天线系统网络侧多天线的最优覆盖.
E-mail: hmchen@seu.edu.cn



陈明 男, 1968 年生于江苏扬州. 东南大学教授, 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.
E-mail: chenming@seu.edu.cn

