

## 多蜂窝分布式系统下行链路性能分析

刘玉玺<sup>①</sup> 刘 琚<sup>\*①②</sup> 郑丽娜<sup>①</sup> 许宏吉<sup>①②</sup> 郭卫栋<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(山东大学信息科学与工程学院 济南 250100)

<sup>②</sup>(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

**摘要:** 在多蜂窝分布式通信系统中,当移动用户在蜂窝内运动时,该文研究其下行链路的系统容量变化情况,并且推导出容量的闭合表达式。多数文献采用中心极限定理(CLT)把干扰加噪声项看作高斯白噪声来进行性能分析,其前提条件是干扰项足够多。当干扰项较少时,此种方法存在一定的误差。该文在放宽此限制条件的前提下,利用矩生成函数(MGF)对系统性能重新进行分析并且解决了存在重根时系统容量闭合表达式的推导问题。理论分析和数值仿真表明,此分析方法能更确切地体现信道衰落对干扰信号的影响,进而能更好地描述系统的性能。

**关键词:** 无线通信; 分布式天线系统; 系统容量; 多蜂窝; 小小区间干扰

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)10-2287-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00157

## Downlink Performance Analysis of Distributed Antenna Systems in Multi-cell Environment

Liu Yu-xi<sup>①</sup> Liu Ju<sup>①②</sup> Zheng Li-na<sup>①</sup> Xu Hong-ji<sup>①②</sup> Guo Wei-dong<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

<sup>②</sup>(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The capacity of a Mobile User (MU) is analyzed for downlink distributed communication system in multi-cell environment, when MU locates at any position within the cell. Moreover, the closed-form expression of the capacity is derived. Most papers adopt Central Limit Theory (CLT), and the precondition of it is that the interference terms are more enough. If the interference terms are few, the CLT method has defects in system performance analysis. The contribution of the paper is that the constraint condition is relaxed. The interference plus noise is considered as Gaussian noise with fixed variance when adopting CLT. On the contrary, the variance of the interference plus noise is considered as a random variable influenced by transmit power as well as propagation pathloss in the paper. Under the relaxed condition, the system performance is re-analyzed and the repeated-root problem making use of Moment Generation Function (MGF) is overcome. Through theoretical analysis along with numerical simulations, it demonstrates that the proposed analytical method can represent the propagation pathloss effect on interference more accurately. Thus, the whole system performance is improved.

**Key words:** Wireless communication; Distributed Antenna Systems (DAS); System capacity; Multi-cell; Inter-cell interference

### 1 引言

随着移动用户(Mobile User, MU)数量的迅速增加以及对所拥有业务的要求的提高,对无线通信系统的频谱资源需求变得日益迫切。如何充分利用有限的频谱资源为移动用户提供尽可能大的系统容量(或尽可能多的服务)是我们重点研究的课题。分布式通信系统是解决上述困难的有效技术之一。最初,

分布式天线系统(Distributed Antenna Systems, DAS)用于覆盖室内无线通信系统中的盲点(dead point)<sup>[1]</sup>,现在DAS已经不再局限于其原来的功能,它作为一种新兴技术出现在B3G(Beyond Third Generation in mobile communication system)或者4G(the Fourth Generation)通信技术领域。与传统的蜂窝系统相比, DAS具有以下优点:扩大覆盖范围、提高系统容量、节省发射功率等,这些优点符合当今社会所倡导的“绿色通信”标准。文献[2-4]对DAS进行概念性的描述,指出其结构特点,并与传统蜂窝系统进行性能比较。

在传统蜂窝(或小区)系统中,只有位于小区中心的基站向移动用户发射信号;在DAS中,除中心

2011-02-28 收到, 2011-06-15 改回

国家自然科学基金(60872024), 高等学校科技创新工程重大项目培育资金(708059), 移动通信国家重点实验室开放基金(2010D10)和山东大学自主创新基金(2010JC007)资助课题

\*通信作者: 刘琚 juliu@sdu.edu.cn

基站可以发射信号外, 小区内的其它位置也放置了用于发射信号的天线模块(或称为接入点), 这些天线模块通过大容量、低延迟的光纤或专用射频链路连接到中心处理单元(Central Processing Unit, CPU)上。在下行链路中, CPU对小区内的分布式天线模块进行调度; 在上行链路中, CPU汇总各分布式天线的接收信息。因此, 蜂窝小区内的分布式天线模块连同中心基站构成了一种新的通信技术——协作通信<sup>[5-7]</sup>。分布式协作通信有两种类型: 区内协作<sup>[8]</sup>; 区间协作<sup>[9]</sup>。结合多天线的概念, 分布式通信系统上/下行链路可以分别看成虚拟SIMO (Virtual Single Input Multiple Output, V-SIMO) 和虚拟MISO (Virtual Multiple Input Single Output, V-MISO)。

文献[3]对CDMA中DAS上行链路的信道容量进行分析并提出虚拟小区的概念。文献[10]只分析了单个小区DAS的系统容量, 而没有对多个小区的情况进行分析。针对多个小区的情形, 文献[8,11]采用中心极限定理(把干扰加噪声看作高斯白噪声, 当给定发射功率和路径损耗时, 其方差是固定的)分析DAS的系统容量。当干扰项比较多时, 采用中心极限定理(Central Limit Theory, CLT)方法分析的系统性能比较准确; 干扰项比较少时, CLT方法分析的系统性能存在较大的误差。本文把各个分布式天线的发射功率与移动用户到相应发射天线的路径损耗的乘积称之为“根”, 如果根相等, 则称存在“重根”。文献[8]只分析了MU从中心基站出发沿3小区交汇点方向移动时的情况, 通过几何分析可知, 在这种情况下不存在重根问题; 对于存在重根的情况, 文献[8]并没有对其进行分析。

本文主要研究小区内所有分布式天线模块全部参与传输信号的情况, 并分析小尺度衰落与路径损耗这两种因素对系统容量的影响。在放宽上述假设条件(CLT方法)的前提下, 将干扰加噪声项的功率看作随小尺度衰落(short term fading)变化的随机变量而非常数, 利用矩生成函数(Moment Generation Function, MGF)研究区内协作的分布式通信存在重根(或非重根)时的系统性能并给出系统容量的闭合表达式。

研究发现, 本文所采用的分析方法更能体现小尺度衰落对系统性能的影响并且很好地解决了重根的问题。另外, 理论和实验结果表明, 此方法更加准确地反应移动用户的性能。

## 2 信号模型和参数说明

本文以3小区Wyner<sup>[12,13]</sup>平面模型作为研究对象, 主要考虑小区内各个分布式天线模块的协作, 如图1所示。

在DAS中, 各个小区的中心基站与其相应的分

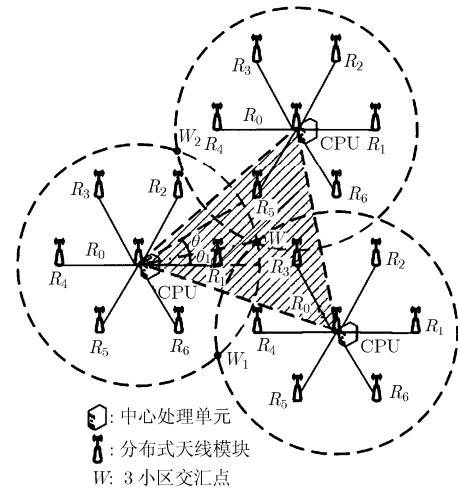


图1 3小区Wyner平面模型

布式天线模块通过专用线路连接到CPU。通过CPU协调处理所有发射天线或接收天线的信号, 以达到更好的信号处理效果。各个小区中分布式天线模块的数量主要取决于以下几方面的因素: 小区覆盖范围、MU数量以及其它环境因素<sup>[8,14]</sup>。在本文中, 我们在每个小区中采用1个中心基站、6个分布式天线模块作为一种比较合理的配置。以图1中参考小区的阴影部分为研究对象, MU与参考小区中心基站以及水平方向的夹角为 $\theta$ , W(3小区交汇点)与参考小区中心基站以及水平方向的夹角为 $\theta_1$ 。

假设各个中心基站、分布式天线模块以及MU都只有一根全向天线, 相邻发射天线之间的辐射半径为 $2r$ 。图中所画虚线圆代表小区(蜂窝), 其半径为 $R$ , 每个小区的中心基站标记为 $R_0$ , 小区中其余天线模块记为 $R_i$  ( $i=1, \dots, 6$ )。第 $j$ 个小区中第 $i$ 个分布式天线模块的发射功率标记为 $P_i^{(j)}$ , 并且任意小区的总的发射功率都为 $P = \sum_{i=0}^6 P_i^{(j)}$ 。由图可知, 任意小区内的MU同时受到两个相邻小区中发射信号的干扰。

假设每个小区内某一时刻只有一个MU进行通信, 此种方式可以通过以下几种技术来实现: 时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA), 频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA), 码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)以及正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)。

在任意时隙, MU端的接收信号为

$$y = \mathbf{h}^{(0)} \mathbf{x}^{(0)} + \sum_{j=1}^2 \mathbf{h}^{(j)} \mathbf{x}^{(j)} + n \quad (1)$$

其中 $\mathbf{h}^{(j)} = [\sqrt{L_0^{(j)}} h_0^{(j)}, \sqrt{L_1^{(j)}} h_1^{(j)}, \dots, \sqrt{L_6^{(j)}} h_6^{(j)}]$ 是第 $j$ 个小区的信道向量,  $h_i^{(j)}$ 表示第 $j$ 个小区中第 $i$ 个发射天线模块到移动用户的小尺度衰落, 这些小尺度衰落

是服从独立同分布的瑞利随机变量  $\sim CN(0,1)$ ;  $L_i^{(j)}$  与  $h_i^{(j)}$  的描述类似, 代表小区  $j$  中第  $i$  个天线模块与移动用户之间的路径损耗;  $\mathbf{x}^{(j)} = [x_0^{(j)}, x_1^{(j)}, \dots, x_6^{(j)}]^T$  是第  $j$  个小区的发射信号向量, 并且假设各个发射信号之间相互独立;  $n$  是 MU 端的加性高斯白噪声, 其均值为 0, 方差为  $E[nn^H] = \sigma_n^2$ 。

### 3 分布式协作通信系统性能分析

假设接收端已知信道状态信息(Channel State Information, CSI), 在这一节中, 我们分析分布式通信系统的信道容量随着 MU 的位置是如何变化的。

信道容量通常具有 3 种表示形式: 遍历容量、中断容量和最小信息率容量。本文主要研究 MU 的遍历容量, 其表达式如下:

$$C = E_h [\log_2 (1 + \gamma)] \quad (2)$$

其中  $\gamma$  为信干噪比并且满足下列等式:

$$\gamma = \text{SINR} = \frac{[\mathbf{h}^{(0)}] \mathbf{S}^{(0)} [\mathbf{h}^{(0)}]^H}{\sum_{j=1}^2 [\mathbf{h}^{(j)}] \mathbf{S}^{(j)} [\mathbf{h}^{(j)}]^H + \sigma_n^2} \quad (3)$$

在式(3)中,  $\mathbf{S}^{(j)}$  代表小区  $j$  中所有发射向量  $\mathbf{x}^{(j)}$  的协方差矩阵, 根据前面的假设条件可以得到下列等式:  $\mathbf{S}^{(j)} = \text{diag}[P_0^{(j)}, P_1^{(j)}, \dots, P_6^{(j)}]$ , 其中  $\text{diag}[\cdot]$  表示对角矩阵。

把等式(3)代入等式(2)中, 通过代数运算可以得到下列等式

$$\begin{aligned} C &= E_h [\log_2 (1 + \gamma)] \\ &= E_h \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{[\mathbf{h}^{(0)}] \mathbf{S}^{(0)} [\mathbf{h}^{(0)}]^H}{\sum_{j=1}^2 [\mathbf{h}^{(j)}] \mathbf{S}^{(j)} [\mathbf{h}^{(j)}]^H + \sigma_n^2} \right) \right] \\ &= E_h \left[ \log_2 \left( \sum_{j=0}^2 [\mathbf{h}^{(j)}] \mathbf{S}^{(j)} [\mathbf{h}^{(j)}]^H + \sigma_n^2 \right) \right. \\ &\quad \left. - \log_2 \left( \sum_{j=1}^2 [\mathbf{h}^{(j)}] \mathbf{S}^{(j)} [\mathbf{h}^{(j)}]^H + \sigma_n^2 \right) \right] \\ &= E_h \left[ \underbrace{\log_2 \left( 1 + \frac{1}{\sigma_n^2} \sum_{j=0}^2 [\mathbf{h}^{(j)}] \mathbf{S}^{(j)} [\mathbf{h}^{(j)}]^H \right)}_{C_1} \right. \\ &\quad \left. - \underbrace{\log_2 \left( 1 + \frac{1}{\sigma_n^2} \sum_{j=1}^2 [\mathbf{h}^{(j)}] \mathbf{S}^{(j)} [\mathbf{h}^{(j)}]^H \right)}_{C_2} \right] \quad (4) \end{aligned}$$

对式(4)进行变量替换, 令

$$\gamma_1 = \frac{1}{\sigma_n^2} \sum_{j=0}^2 [\mathbf{h}^{(j)}] \mathbf{S}^{(j)} [\mathbf{h}^{(j)}]^H = \frac{1}{\sigma_n^2} \sum_{j=0}^2 \sum_{i=0}^6 |h_i^{(j)}|^2 L_i^{(j)} P_i^{(j)} \quad (5)$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{\sigma_n^2} \sum_{j=1}^2 [\mathbf{h}^{(j)}] \mathbf{S}^{(j)} [\mathbf{h}^{(j)}]^H = \frac{1}{\sigma_n^2} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=0}^6 |h_i^{(j)}|^2 L_i^{(j)} P_i^{(j)} \quad (6)$$

然后对式(5), 式(6)再进行变量替换, 并令

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= 1/L_0^{(0)} P_0^{(0)}, \dots, a_6 = 1/L_6^{(0)} P_6^{(0)} \\ a_7 &= 1/L_0^{(1)} P_0^{(1)}, \dots, a_{13} = 1/L_6^{(1)} P_6^{(1)} \\ a_{14} &= 1/L_0^{(2)} P_0^{(2)}, \dots, a_{20} = 1/L_6^{(2)} P_6^{(2)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

把等式(7)写成向量形式:  $\mathbf{a} = [a_0, a_1, \dots, a_{20}]$ , 把  $\mathbf{a}$  中互不相等的元素重新标记为  $\mathbf{d}$ ,  $\mathbf{d}$  中的每个元素  $d_i$  在  $\mathbf{a}$  中的个数记为  $g_i$  (当不存在重根<sup>1)</sup>时  $g_i = 1$ ),  $l_1$  是向量  $\mathbf{d}$  中元素的个数<sup>2)</sup>。

通过分析可知,  $\gamma_1$  具有加权-卡方-分布和的形式, 利用矩生成函数的性质可以求得  $\gamma_1$  的矩生成函数, 然后对其进行拉普拉斯反变换即可得到  $\gamma_1$  的概率密度函数, 可表示为

$$\begin{aligned} f(\gamma_1) &= \sigma_n^2 \sum_{i=0}^{l_1-1} \sum_{p=1}^{g_i} \frac{n_{ip}}{(p-1)!} (\sigma_n^2 \gamma_1)^{p-1} \exp(-d_i \sigma_n^2 \gamma_1) \\ &= \sum_{i=0}^{l_1-1} \sum_{p=1}^{g_i} \frac{n_{ip}}{(p-1)!} (\sigma_n^2)^p \gamma_1^{p-1} \exp(-d_i \sigma_n^2 \gamma_1) \quad (8) \end{aligned}$$

其中  $n_{ip} = \frac{1}{(g_i - p)!} \frac{d_i^{g_i-p}}{ds^{g_i-p}} [\Phi_{\gamma_1}(s)]$ ,  $p=1, \dots, g_i$ 。

$\Phi_{\gamma_1}(s) = \prod_{i=0}^{20} \frac{a_i}{a_i + s}$  表示  $\sum_{j=0}^2 \sum_{i=0}^6 |h_i^{(j)}|^2 L_i^{(j)} P_i^{(j)}$

的矩生成函数<sup>[15]</sup>。

则

$$\begin{aligned} C_1 &= E_h [\log_2 (1 + \gamma_1)] \\ &= \frac{1}{\ln 2} \sum_{i=0}^{l_1-1} \sum_{p=1}^{g_i} \frac{n_{ip}}{(p-1)!} (\sigma_n^2)^p \\ &\quad \cdot \int_0^\infty \ln(1 + \gamma_1) \gamma_1^{p-1} \exp[-(d_i \sigma_n^2) \gamma_1] d\gamma_1 \\ &= \frac{1}{\ln 2} \sum_{i=0}^{l_1-1} \sum_{p=1}^{g_i} \frac{n_{ip}}{(p-1)!} (\sigma_n^2)^p \Phi_p \quad (9) \end{aligned}$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= \left\{ \frac{1}{d_i \sigma_n^2} [-\exp(d_i \sigma_n^2) \text{Ei}(-d_i \sigma_n^2)] \right\} \\ \Phi_p &= \left\{ \frac{1}{(d_i \sigma_n^2)^{p-1}} \left[ \Phi_1 \sum_{k=1}^p (-d_i \sigma_n^2)^{k-1} \right] + \sum_{k=2}^p \frac{k-1}{(d_i \sigma_n^2)^k} \right\}, p \geq 2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

等式(10)中,  $\text{Ei}(x)$  表示指数积分函数<sup>[16]</sup>。

<sup>1)</sup>根据前面的定义,  $L_i^{(j)} P_i^{(j)}$  称之为“根”。

<sup>2)</sup>如果  $\mathbf{a}=[0,1,1,2,3]$ , 则  $\mathbf{d}=[0,1,2,3]$ , 并且  $g_1=1, g_2=2, g_3=1, g_4=1$ 。

令  $\mathbf{b} = [a_7, a_8, \dots, a_{20}]$ , 把  $\mathbf{b}$  中互不相等的元素重新标记为  $\mathbf{e}$ ,  $\mathbf{e}$  中的每个元素  $e_i$  在  $\mathbf{b}$  中的个数记为  $k_i$  (当不存在重根时  $k_i = 1$ ),  $l_2$  是向量  $\mathbf{e}$  中元素的个数。同理, 对  $\gamma_2$  概率密度函数的推导过程如下:

$\gamma_2$  服从加权-卡方-分布, 其概率密度函数为

$$f(\gamma_2) = \sigma_n^2 \sum_{i=0}^{l_2-1} \sum_{q=1}^{k_i} \frac{m_{iq}}{(q-1)!} (\sigma_n^2 \gamma_2)^{q-1} \exp(-e_i \sigma_n^2 \gamma_2) \\ = \sum_{i=0}^{l_2-1} \sum_{q=1}^{k_i} \frac{m_{iq}}{(q-1)!} (\sigma_n^2)^q \gamma_2^{q-1} \exp(-e_i \sigma_n^2 \gamma_2) \quad (11)$$

其中  $m_{iq} = \frac{1}{(k_i - q)!} \frac{d^{k_i - q}}{ds^{k_i - q}} [(s + e_i)^{k_i} \Phi_{\gamma_2}(s)]$ ,  $q=1, 2, \dots, k_i$ ,

$\Phi_{\gamma_2}(s) = \prod_{i=7}^{20} \frac{a_i}{a_i + s}$  为  $\sum_{j=1}^2 \sum_{i=0}^6 |h_i^{(j)}|^2 L_i^{(j)} P_i^{(j)}$  的矩生成函数<sup>[15]</sup>。则

$$C_2 = E_h [\log_2(1 + \gamma_2)] \\ = \frac{1}{\ln 2} \sum_{i=0}^{l_2-1} \sum_{q=1}^{k_i} \frac{m_{iq}}{(q-1)!} (\sigma_n^2)^q \\ \cdot \int_0^\infty \ln(1 + \gamma_2) \gamma_2^{q-1} \exp[-(e_i \sigma_n^2) \gamma_2] d\gamma_2 \\ = \frac{1}{\ln 2} \sum_{i=0}^{l_2-1} \sum_{q=1}^{k_i} \frac{m_{iq}}{(q-1)!} (\sigma_n^2)^q \Psi_q \quad (12)$$

其中

$$\Psi_1 = \left\{ \frac{1}{e_i \sigma_n^2} [-\exp(e_i \sigma_n^2) \text{Ei}(-e_i \sigma_n^2)] \right\} \\ \Psi_q = \left\{ \frac{1}{(e_i \sigma_n^2)^{q-1}} \left[ \Psi_1 \sum_{k=1}^q (-e_i \sigma_n^2)^{k-1} \right] + \sum_{k=2}^q \frac{k-1}{(e_i \sigma_n^2)^k} \right\}, q \geq 2 \quad (13)$$

因此, 移动用户的遍历信道容量可以表示为

$$C = C_1 - C_2 \\ = \frac{1}{\ln 2} \left[ \sum_{i=0}^{l_1-1} \sum_{p=1}^{g_i} \frac{n_{ip}}{(p-1)!} (\sigma_n^2)^p \Phi_p \right. \\ \left. - \sum_{i=0}^{l_2-1} \sum_{q=1}^{k_i} \frac{m_{iq}}{(q-1)!} (\sigma_n^2)^q \Psi_q \right] \quad (14)$$

#### 4 系统仿真和性能比较

在这一节中, 我们通过系统仿真来验证上述分析的正确性。对仿真参数设置作如下说明: 把 MU 与第  $j$  个小区中第  $i$  个分布式天线模块的归一化距离记为  $d_i^{(j)}$ , 根据路径损耗与距离及损耗系数之间的关系可知:  $L_i^{(j)} = (d_i^{(j)})^{-\sigma}$ , 其中  $\sigma$  是路径损耗系数。设每个小区总的发射功率为  $P$ , 它主要分为小区中心基站的发射功率 ( $0.4P$ ) 和 6 个分布式模块的发射功率 (每个模块  $0.1P$ ) 两部分。

系统仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

发射功率	$P=10$ dB
噪声功率	1 W/Hz
路径损耗系数	4.0
归一化距离	(0,1)

图 2(a)描述的是无重根时(沿中心基站到  $W$  点方向), 系统容量随 MU 距离变化的情况。当 MU 接近中心基站时, 本文所用方法与文献[8]的分析方法性能几乎相等; 当 MU 距离小区边缘比较近时, 本文所用分析方法更能反映系统的性能。这是因为当 MU 距离中心基站比较近时, 接收信号的能量主要由中心基站来决定, 干扰和噪声比较小。位于小区边缘时, 距离 MU 比较近的分布式天线模块的发射信号起主导作用。由于干扰信号的方差看作是受小尺度衰落影响的随机变量而非常数, 小尺度衰落对干扰的影响显现出来, 进而影响系统容量。当小区内的分布式模块的数量比较少, 效果更为明显。

图 2(b)给出存在重根时系统容量随 MU 距离变化的曲线图。当  $d=0.65$  时, 系统容量远远高于不存在重根的情形。因为存在重根时, 小区内所有分布式天线模块的发射功率乘以相应的路径损耗比其它情况要大, 使得 MU 的接收信号功率高于其它位置, 通过几何关系分析也可以得出这样的结论。

图 2(c)描述当 MU 在参考小区中心基站与两干扰小区中心基站连线范围内(图 1 阴影部分中参考小区一侧, 参考小区内的其它位置可以通过选择其它干扰小区作为研究对象, 分析过程类似)的任意位置变化时, 系统容量的变化情况。从图中可以看出, 在  $d=0.65$  时, 系统容量比在此方向上的周围其它位置要高, 这与图 2(b)的描述一致。当 MU 到中心基站的距离相同而方向不同时, 沿  $\theta = 0$  方向(水平方向)的系统容量高于其它方向, 因为在此种情况下参考小区内的某一发射模块距离 MU 最近, 根据路径损耗公式可知其  $L$  最大, 因此系统容量最大。

图 3(a)描述无重根时路径损耗系数对系统容量的影响。在此图中可以明显看到, 放宽限制条件后, 小尺度衰落对干扰项的影响比较大。因此, 本文所采用的方法能更好的描述系统的性能。

图 3(b)给出的是存在重根时( $\theta = 0$ ), 路径损耗系数对系统容量的影响。对比图 3(a), 3(b), 可以得出以下结论: 在相同的路径损耗系数前提下, 有重根时的信道容量要大于无重根的情况。其原因与图 2(b)的描述一致。

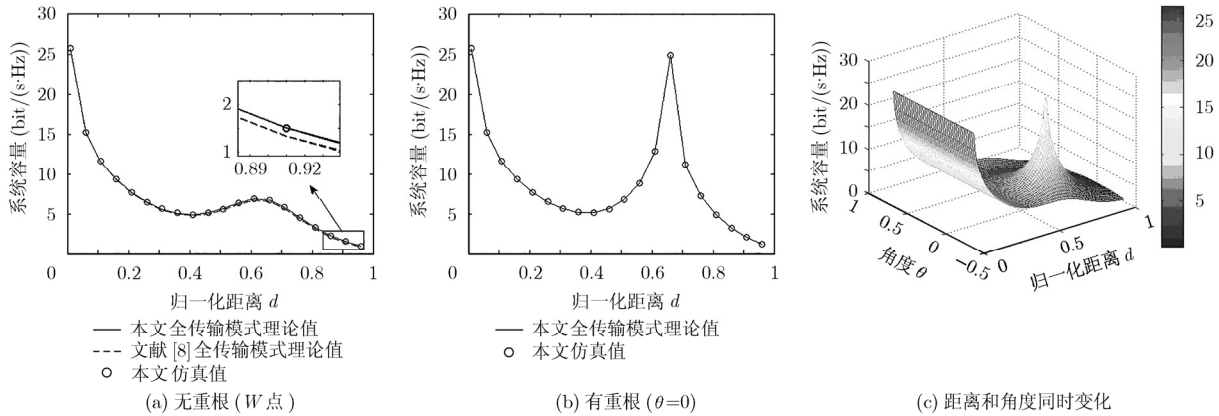


图 2 系统容量随 MU 距离(有重根、无重根)以及角度变化曲线图

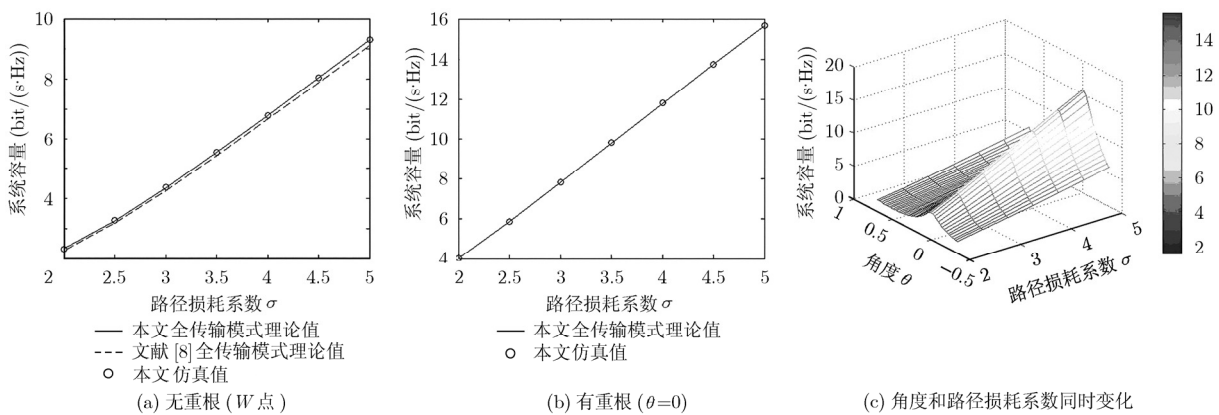


图 3 系统容量随路径损耗系数(有重根、无重根)以及角度变化曲线图

图 3(c)描述  $d=0.6$  时，角度以及路径损耗系数对系统容量的影响。当 MU 到参考小区中心基站的距离相同时，不同位置的系统容量不尽相同。当  $\theta = 0$  时性能最好，而在  $W$  点方向性能差，这是因为当  $\theta = 0$  时，MU 距离其中的一个分布式天线模块最近(几乎为 0)，按照路径损耗公式可知  $L$  比较大。

由图 3(a), 3(b), 3(c)还可以得出下面的结论：系统容量与路径损耗系数成正比，由路径损耗计算公式  $L_i^{(j)} = (d_i^{(j)})^{-\sigma}$  可知， $\sigma$  越大，路径损耗就越小。

### 5 结束语

本文放宽 CLT 方法中干扰项的限制条件，把干扰加噪声项的功率看作随小尺度衰落的随机变量而非具有固定方差的常数，利用 MGF 方法研究了分布式协作通信中下行链路的系统性能：遍历系统容量，并且推导出其闭合表达式。分析了用户在小区内不同位置的系统容量变化情况以及路径损耗对干扰的影响，进而影响系统的整体性能。另外，本文很好地解决了存在重根时系统容量的闭合表达式的推导。通过分析可知，存在重根时，系统性能要优于无重根的情况。

### 参考文献

- [1] Saleh A, Rustako A, and Roman R. Distributed antennas for indoor radio communications [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1987, 35(12): 1245-1251.
- [2] Zhou S D, Zhao M, Xu X B, et al. Distributed wireless communication systems: a new architecture for future public wireless access [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(3): 108-113.
- [3] Dai L, Zhou S D, and Yao Y. Capacity analysis in CDMA distributed antenna systems [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 4(6): 2613-2620.
- [4] Castanheira D and Gameiro A. Distributed antenna system capacity scaling [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2010, 17(3): 68-75.
- [5] Nosratinia A, Hunter T E, and Hedayat A. Cooperative communication in wireless networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42(10): 74-80.
- [6] Gesbert D, Hanly S, Huang H, et al. Multi-cell MIMO cooperative networks: a new look at interference [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(9): 1-29.

- [7] Ng B L, Evans J, and Hanly S. Distributed downlink beamforming with cooperative base stations [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 54(12): 5491-5499.
- [8] Choi W and Andrews J. Downlink performance and capacity of distributed antenna systems in a multicell environment [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(1): 69-73.
- [9] You X H, Wang D M, and Sheng B, *et al.* Cooperative distributed antenna systems for mobile communications [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2010, 17(3): 35-43.
- [10] Xiao L, Dai L, Zhang H R, *et al.* Information-theoretic capacity analysis in MIMO distributed antenna systems [C]. The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference. Orlando, Florida, USA, 2003: 779-782.
- [11] Choi W and Andrews J. Theoretical Limits of Cellular Systems with Distributed Antennas [M]. In *Distributed Antenna Systems: Open Architecture for Future Wireless Communications*, Auerbach, CRC Press, Boca Raton, Fla, USA, 2007: 65-86.
- [12] Wyner A. Shannon-theoretic approach to a Gaussian cellular multiple-access channel [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1994, 40(6): 1713-1727.
- [13] Park J, Song E, and Sung W. Capacity analysis for distributed antenna systems using cooperative transmission schemes in fading channels [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(2): 586-592.
- [14] Zhang N B, Kang G X, Guo Y Y, *et al.* Adaptive transmitted distributed antenna selection strategy in distributed antenna systems with limited feedback beamforming [J]. *Electronic Letters*, 2009, 45(21): 1079-1081.
- [15] Ross S M. *Introduction to Probability Models* [M]. London: UK, Academic Press, 2007: 64-73.
- [16] Gradshteyn I and Ryzhik I. *Table of Integrals, Series, and Products* [M]. London: UK, Academic Press, 2003: 883-884.
- 刘玉玺: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为分布式系统、协作通信.
- 刘 璐: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为多媒体信息处理、通信与信号处理.
- 郑丽娜: 女, 1980 年生, 讲师, 博士, 研究方向为无线传感器网络、协作通信.
- 许宏吉: 男, 1976 年生, 讲师, 博士, 研究方向为空时信号处理、智能天线.
- 郭卫栋: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为协作通信、天线选择.