

基于粒子群算法的分布式 MIMO 系统圆形小区 天线位置优化研究

李岳衡,王 莉,崔 磊,居美艳,黄 平,谭国平

(河海大学计算机与信息学院,江苏南京 211100)

摘 要: 本文研究分布式 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)系统圆形小区基站侧天线端口的的位置优化问题.论文首先建立了包含小尺度 Nakagami 衰落、阴影衰落和路径损耗的复合衰落信道模型,然后在收发端皆配置多根天线、移动台于小区内具任意概率分布、发射和接收端分别实施选择性传输和最大比合并方案下,在高信噪比条件下推导出圆形小区下行平均遍历容量的近似闭型表达式;随后通过对小区进行相应的区域预划分,采用粒子群算法而非传统遗传算法以快速搜索当前区域内天线端口的最佳位置,并最终根据小区天线端口位置的整体搜索结果确定天线优化布局.仿真结果表明,本文所推导的平均遍历容量近似表达式能较好地反映分布式 MIMO 系统性能,且所采用的基于粒子群算法的小区最优天线端口位置搜索结果也能较好地接近理论最佳位置.

关键词: 分布式 MIMO; 粒子群算法; 平均遍历容量; 天线位置优化

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)06-1144-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.06.016

Antenna Port Placement Optimization of Distributed MIMO System in Circular Cell Based on Particle Swarm Optimization

LI Yue-heng, WANG Li, CUI Lei, JU Mei-yan, HUANG Ping, TAN Guo-ping

(College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: This paper focused its main research on the antenna port (AP) placement optimization of distributed multiple-input multiple-output (DMIMO) system in a circular cell. For this purpose, a composite channel model integrating with Nakagami-m fading, shadow fading, and path loss was established firstly; next, an approximate closed-form expression of downlink average cell ergodic capacity was deduced under the condition that high signal-to-noise ratio (SNR) was assumed, and multiple antennas were equipped at both the transmitter and receiver sides, which applied selective transmission (ST) and maximum ratio combining (MRC) schemes respectively, and moreover, the distribution of mobile station (MS) in the cell was arbitrary; then, a fast searching method based on particle swarm optimization (PSO) instead of traditional genetic algorithm was proposed to find the optimum positions of APs in the circular cell through dividing the cell into several predefined sections; and finally, the optimum APs' layout was provided according to the overall cell searching results. Computer simulation results show that, the approximate closed-form expression can exactly represent the performance of the DMIMO system, and the finally searched results of optimum AP positions in the cell based on PSO are very close to the theoretical antenna locations.

Key words: distributed multiple-input multiple-output; particle swarm optimization; average ergodic capacity; antenna port placement optimization

1 引言

随着无线通信技术的快速发展,分布式多入多出(Distributed Multiple Input and Multiple Output, DMIMO)系统以其覆盖范围广、平均消耗功率低、频谱效率高、天线端口以及信道等通信资源可智能调度等突出优点而逐

渐成为以绿色、智能通信为特征的新一代移动通信系统的热门研究方向之一.相对于传统集中式多入多出(Colocated MIMO, CMIMO)系统将收发天线统一集中配置于小区中心的特点,DMIMO 可将天线端口根据系统及用户需求而灵活安置于小区内不同的地理位置,进而通过减小用户端与天线接入端的平均接入距离而改

善整个网络系统的性能^[1,2].

正是由于 DMIMO 系统是以改善用户与基站天线端口的平均接入距离来提升性能的此一理论揭示,显然其天线接入端口位置在小区内的具体分布将对系统最终的各项性能指标,比如小区平均遍历容量、系统中断概率、接收信号的误符号率等产生非常直接而重要的影响^[3,4],故天线端口位置的优化就显得极其重要,业已成为未来移动通信系统小区上层网络规划的核心问题和重点研究方向之一.目前,国内外研究 DMIMO 系统基站侧天线接入端口小区最优位置分布的工作已取得了一批初步的成果,但相对于早期即已开展的有关 DMIMO 系统性能分析以及其与 CMIMO 系统性能比较方面的工作而言,总的来说,相关文献还不是非常得丰富,所研究的内容和深度也都还需要进一步完善和提升.文献[5]以小区平均误码率为优化目标,在考虑路径损耗、相关阴影、以及指数多径衰落条件下,分析了线型小区中多天线的最优分布位置;该文研究内容非常新颖并具开创性,但考虑到线型小区主要应用于高速公路、铁路等特殊应用背景,其优化建模与分析结果并不适用于基于传统移动通信的蜂窝小区结构.文献[6]则以小区下行平均遍历容量为优化目标,基于最小平方距离准则,通过 Jensen 不等式从用户与天线端口的距离入手,运用 K 均值算法对线型小区 DMIMO 系统天线端口位置进行优化,开展了与文献[5]相类似的部分工作.

鉴于传统蜂窝小区的六边形结构并不适合进行理论建模与分析,故国内外不少学者选择基于圆形小区的简化模型对平面 DMIMO 系统的基站侧天线端口位置优化进行研究.其中文献[6,7]考虑了圆形单小区工作环境中,基站侧在综合了路径损耗、阴影衰落和 Rayleigh 小尺度衰落的复合信道条件下,分别以小区下行平均遍历容量和接收信噪比下限为优化目标,研究了与之相应的天线端口优化配置策略.不过这两篇文献在系统建模时只考虑了移动终端(Mobile Station, MS)配置一根接收天线的情形,因此并不符合现代移动通信系统中 MS 也应配置多根天线以提高信息传输效率的发展趋势,研究结果具有一定的局限性.

除天线配置根数会对系统性能产生较大影响之外,小区中的移动用户分布模型亦对 DMIMO 系统的性能和天线端口位置的优化产生非常重要的影响,而上述文献中小区移动台的用户分布模型却均假设为小区内均匀分布,故而一旦结合实际的移动用户场景,比如考察城市中心地带、移动台有可能会因某一突发事件而分散聚集到某一热点区域且服从非均匀分布时,此种基于 MS 均匀分布情形所得出的研究结论就可能无法满足实际系统需求.

文献[8]虽然在上述相同的复合衰落模型下考察了小区 MS 用户模型对系统性能和天线端口位置最优配置的影响,但从简化问题数学分析的角度考虑,仍然只采用了单天线接收模型;此外,该文献基于遗传算法对优化模型进行求近似解的方法亦存在计算复杂度较大、收敛速度相对较慢的问题,一旦未来 DMIMO 系统的小区网络规划采用诸如天线端口多点布设、依用户需求进行智能休眠/激活机制的自动配置方案进行重新系统规划与设计时,则不能对天线端口的位置进行快速搜索.有关 DMIMO 系统天线端口位置优化的国内外其他研究成果还包括:文献[9]将目光投向多小区通信环境,基于将相邻小区干扰引入待观测系统平均遍历容量公式的方法,通过数值分析和计算机仿真分析了相邻小区干扰对天线位置摆放的影响;文献[10]则在综合了路径损耗和 Rayleigh 小尺度衰落的复合信道下,探讨了三节点单天线中继系统功率分配和中继节点位置的联合优化问题.

本文将在前人工作成果基础之上,将研究重点面向以圆型小区为简化模型的单小区蜂窝 DMIMO 系统,以小区下行平均遍历容量为优化目标,在分布式天线端口采用选择性传输方案(Selective Transmission, ST)以及接收端采用最大比合并(Maximum Ratio Combining, MRC)方案的条件下,基于粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法对小区基站侧天线端口最优配置位置进行理论分析与计算机仿真验证.为了克服前述分析中提及的相关文献中存在的不足,论文将首先建立一包含 Nakagami-m 小尺度衰落、路径损耗、以及阴影衰落在内的复合衰落信道模型,以此作为后续理论推导与分析的信号传输模型基础;接下来在假设基站天线端口和移动台皆配置多根收发天线的情形下、充分考虑移动台在小区内随热点分布的可能性,在高信噪比条件下推导出圆形小区下行平均遍历容量的近似闭型表达式;随后以该闭型表达式为优化目标,采用基于 PSO 优化的、更具描述直观性和快速收敛特征的智能优化算法搜索小区最优天线布局方案,并在此基础上研究了不同系统参数对天线端口最优位置的影响,同时亦对该算法的搜索精度作了相应的分析.

2 系统模型

如图 1 所示,考虑一半径为 R 的圆形小区 DMIMO 系统.假设小区内分布有 N 个分布式天线端口(Distributed Antenna Unit, DAU),其中小区中心固定配置一 DAU,记为主处理单元(Main Processing Unit, MPU)或中心端口 DAU1,其余 $N-1$ 个 DAU 与移动终端 MS 则随规划布设在小区内某固定位置;又设每个 DAU 配 L 根天线,MS 配 M 根天线;不失一般性,分别用 (ρ, θ) 和 (r_i, β_i) ($i =$

$1, 2, \dots, N$) 表示 MS 和 DAI i 在小区内的极坐标位置. 为后文描述方便起见, 将上述圆形小区 DMIMO 系统记为 (M, N, L) -DMIMO.

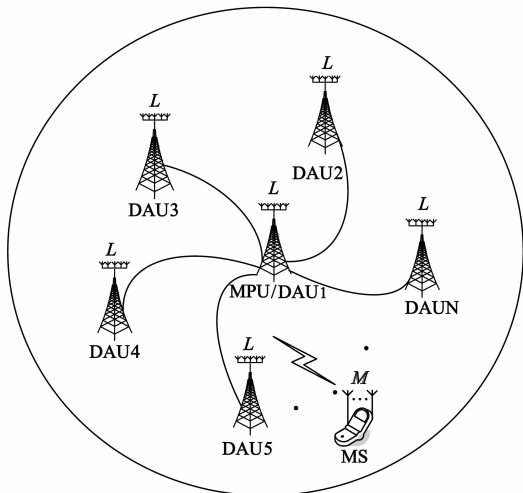


图1 圆形小区DMIMO系统示意图

假设所研究的 DMIMO 系统工作在噪声受限环境, 且信道是平坦或准静态的. 系统下行链路中, 假设接收端已知信道状态信息, 发送端采用选择性传输方案 ST, 即在 N 个 DAI 中选择具有最佳信道状况的一个 DAI 进行下行信号传输; 因此, MS 接收端的信号可表示为

$$\mathbf{y} = \sqrt{P_t} \mathbf{H}_i \mathbf{w} x + \mathbf{n} \quad (1)$$

上式中, $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_M]^T$ 是接收信号向量; x 是发送符号, 且满足 $E[|x|^2] = 1$; \mathbf{H}_i 是对应 DAI i 的 $M \times L$ 维信道传输矩阵; P_t 是发送功率; \mathbf{w} 是发送端的 L 维权重向量, 有 $E[\|\mathbf{w}\|^2] = 1$; \mathbf{n} 是独立零均值单位方差复高斯噪声向量, 有 $E(\mathbf{n} \mathbf{n}^H) = \mathbf{I}_M$, 其中 \mathbf{I}_M 为 M 维单位矩阵. 由于小区内各 DAI 是分散布设的, 考虑到小区复杂的通信环境, DMIMO 系统在进行信道建模时不仅应包含传统小尺度衰落, 还应考虑大尺度衰落, 也即需考虑基站端与移动终端之间的路径损耗与阴影衰落的影响. 由此, 可对 MS 与 DAI i 之间的复合衰落信道综合建模为

$$\mathbf{H}_i = \sqrt{\frac{c s_i}{d_i^\alpha}} \mathbf{g}_i, 1 \leq i \leq N \quad (2)$$

上式中, 依据文献[11]的定义, 常数 $c = \gamma R^\alpha / P_t$, 其中 γ 表示发送信噪比, R 为小区半径, α 是路径损耗指数, 通常在 3.0 到 5.0 之间; s_i 代表阴影效应, 服从均值为零、方差为 σ_{sh}^2 的对数正态分布, 即 $10 \log_{10} s_i \sim (0, \sigma_{sh}^2)$; \mathbf{g}_i 表示 MS 与 DAI i 之间的小尺度衰落矩阵, 服从参数为 m_i 的 Nakagami 分布; d_i 是 MS 与 DAI i 之间的距离, 依据系统模型可得 d_i 的计算表达式为

$$d_i = \sqrt{\rho^2 + r_i^2 - 2\rho r_i \cos(\theta - \beta_i)} \quad (3)$$

接收端采用最大比合并 MRC 后所获得的输出信号可表示为

$$\mathbf{z} = (\mathbf{H}_i \mathbf{w})^H \mathbf{y} = \sqrt{P_t} (\mathbf{H}_i \mathbf{w})^H (\mathbf{H}_i \mathbf{w}) x + (\mathbf{H}_i \mathbf{w})^H \mathbf{n} \quad (4)$$

此时输出信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 有如下式

$$\text{SNR}_i = P_t (\mathbf{H}_i \mathbf{w})^H (\mathbf{H}_i \mathbf{w}) = P_t \left(\sum_{p=1}^L \sum_{q=1}^L w_p w_q^* \sum_{k=1}^M h_{kp} h_{kq}^* \right) \quad (5)$$

其中, h_{kp} 表示接收端第 k 根天线与发送端第 p 根天线之间的信道增益系数. 由文献[12]知, 当 $(w_p w_q^*)^* =$

$\frac{\sum_{k=1}^M h_{kp} h_{kq}^*}{\left| \sum_{k=1}^M h_{kp} h_{kq}^* \right|}$ 时输出信噪比最大, 此时最大输出信噪比可表示为

$$\text{SNR}_i = P_t \left(\sum_{p=1}^L \sum_{q=1}^L \left| \sum_{k=1}^M h_{kp} h_{kq}^* \right| \right) \quad (6)$$

3 小区系统平均遍历容量分析

当接收端 MS 采用选择性传输策略, 也即从 N 个基站发送天线端口中选择输出 SNR 最大的端口作为最后信号输出端时有

$$\text{SNR}_m = \max \{ \text{SNR}_1, \text{SNR}_2, \dots, \text{SNR}_N \}, m \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (7)$$

由上述表达式可知: 在选择发送条件下, DAI m 将被选择与 MS 建立通信链路. 此时, 可得小区下行点对点遍历信道容量计算公式为^[13]

$$C(\rho, \theta) = E_H \left\{ \log_2 \det \left(\mathbf{I}_K + \frac{P_t}{L} \mathbf{Q} \right) \right\} \quad (8)$$

式中, \mathbf{I}_K 表示 K 阶单位矩阵, $K = \min(L, M)$; $\det(\cdot)$ 表示

求行列式运算; 矩阵 $\mathbf{Q} = \begin{cases} \mathbf{H}_m^H \mathbf{H}_m, & M > L \\ \mathbf{H}_m \mathbf{H}_m^H, & M \leq L \end{cases}$, 其中 \mathbf{H}_m 是对应第 m 个端口的 $M \times L$ 信道矩阵. 运算符 $E_H \{\cdot\}$ 表示对矩阵 \mathbf{H}_m 求数学期望, 为描述简便起见省略了下标 m .

下面将根据收发两端天线数目配置的不同, 借鉴文献[14]中有关公式类似的推导过程, 在高信噪比 P_t / σ^2 条件下 (假设 $\sigma^2 = 1$), 分别针对 $M > L$ 和 $M \leq L$ 两种天线配置情况下的点对点系统链路遍历容量公式进行分析与推导.

(1) $M > L$

$$\begin{aligned} C(\rho, \theta) &= E_H \left\{ \log_2 \det \left(\mathbf{I}_L + \frac{P_t}{L} \mathbf{H}_m^H \mathbf{H}_m \right) \right\} \\ &= E_{s, g} \left\{ \log_2 \det \left(\mathbf{I}_L + \frac{\gamma}{L} \Omega \mathbf{g}_m^H \mathbf{g}_m \right) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

上式中 $\Omega = \left(\frac{R}{d_m} \right)^\alpha s_m$; $\gamma = \frac{c P_t}{R^\alpha}$ 可用来衡量天线端口的发射功率, 其中噪声功率已归一化. 由恒等式 $\det(\mathbf{I} + \mathbf{AB})$

$= \det(\mathbf{I} + \mathbf{BA})$, 式(9)可改写为

$$C(\rho, \theta) = E_{s,g} \left\{ \log_2 \det \left(\mathbf{I}_L + \frac{\gamma}{L} \Omega \mathbf{g}_m \mathbf{g}_m^H \right) \right\} \quad (10)$$

在高信噪比条件下, 式(10)在计算矩阵行列式时可忽略对角阵 \mathbf{I} 的影响而近似为

$$\begin{aligned} C(\rho, \theta) &\cong E_{s,g} \left\{ \log_2 \det \left(\frac{\gamma}{L} \Omega \mathbf{g}_m \mathbf{g}_m^H \right) \right\} \\ &= L \log_2 \left(\frac{\gamma}{L} \right) + E_s \{ \log_2 \det(\Omega) \} \\ &\quad + E_g \{ \log_2 \det(\mathbf{g}_m \mathbf{g}_m^H) \} \end{aligned} \quad (11)$$

上式中, 由于 $\det(\Omega) = \left[\left(\frac{R}{d_m} \right)^\alpha s_m \right]^L$, 且 $E(\ln s_m) = 0$, 有

$$\begin{aligned} E_s \{ \log_2 \det(\Omega) \} &= E_s \left\{ L \log_2 \left[\left(\frac{R}{d_m} \right)^\alpha s_m \right] \right\} \\ &= L \log_2 \left(\frac{R}{d_m} \right)^\alpha \end{aligned} \quad (12)$$

由于 $(\mathbf{g}_m \mathbf{g}_m^H)$ 服从 Wishart 分布, 依据文献[15]中的定理 2.11, 则有

$$E_g \{ \log_2 \det(\mathbf{g}_m \mathbf{g}_m^H) \} = \frac{1}{\ln 2} \sum_{i=0}^{L-1} \psi(M - i) \quad (13)$$

其中 $\psi(\cdot)$ 是欧拉 digamma 函数. 将式(12)和(13)代入式(11)可得

$$\begin{aligned} C(\rho, \theta) &\cong L \log_2 \left(\frac{\gamma}{L} \right) + L \log_2 \left(\frac{R}{d_m} \right)^\alpha \\ &\quad + \frac{1}{\ln 2} \sum_{i=0}^{L-1} \psi(M - i) \end{aligned} \quad (14)$$

$$(2) M \leq L$$

$$C(\rho, \theta) = E_H \left\{ \log_2 \det \left(\mathbf{I}_M + \frac{P_t}{L} \mathbf{H}_m \mathbf{H}_m^H \right) \right\} \quad (15)$$

上式可转化为

$$C(\rho, \theta) = E_{s,g} \left\{ \log_2 \det \left(\mathbf{I}_M + \frac{\gamma}{L} \left(\frac{R}{d_m} \right)^\alpha s_m \mathbf{g}_m \mathbf{g}_m^H \right) \right\} \quad (16)$$

与上面 $M > L$ 天线配置情形的推导过程相类似, 在高信噪比条件下, 亦可得式(16)的理论近似表达式为

$$\begin{aligned} C(\rho, \theta) &\cong M \log_2 \left(\frac{\gamma}{L} \right) + M \log_2 \left(\frac{R}{d_m} \right)^\alpha \\ &\quad + \frac{1}{\ln 2} \sum_{i=0}^{M-1} \psi(L - i) \end{aligned} \quad (17)$$

综合上述式(14)和式(17)的理论推导结果, 不难发现: 在发送端采用选择性传输策略时, DMIMO 系统下行点对点遍历容量的理论表达式在两种不同的基站天线端口与移动终端天线数目配置下, 可统一为

$$\begin{aligned} C(\rho, \theta) &\cong K_1 \log_2 \left(\frac{\gamma}{L} \right) + K_1 \log_2 \left(\frac{R}{d_m} \right)^\alpha \\ &\quad + \frac{1}{\ln 2} \sum_{i=0}^{K_1-1} \psi(K_2 - i) \end{aligned} \quad (18)$$

其中 $K_1 = \min(M, L)$, $K_2 = \max(M, L)$.

由于上述推导的遍历容量公式是有关移动终端 MS

位置 (ρ, θ) 的函数, 为了能全面反映天线端口位置这一待考察目标对系统容量的影响, 需要将以上表达式中的用户位置坐标 (ρ, θ) 进行统计平均以消除其对容量公式的影响. 考虑到 MS 在小区内任意分布的特点, DMIMO 系统小区下行平均遍历容量可表示为

$$\begin{aligned} \bar{C}(\boldsymbol{\mu}) &= E_{\rho, \theta} \{ C(\rho, \theta) \} \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^R C(\rho, \theta) f(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $f(\rho, \theta)$ 是极坐标下移动终端 MS 在小区内分布的统计概率密度函数, $\boldsymbol{\mu} = \{(r_1, \beta_1), (r_2, \beta_2), \dots, (r_N, \beta_N)\}$ 表示 DMIMO 系统各天线端口小区极坐标位置集合. 由于 MS 在小区内是任意分布的, 这将导致函数 $f(\rho, \theta)$ 的表达式比较复杂, 故式(19)通常意义上并无闭合解. 为此, 本文拟利用复化 Simpson 积分公式将小区平均遍历容量表达式(19)作近似处理为^[16]

$$\bar{C}(\boldsymbol{\mu}) = \frac{2\pi R}{9PQ} \sum_{p=0}^P \sum_{q=0}^Q \delta_{p,q} \rho_p C(\rho_p, \theta_q) f(\rho_p, \theta_q) \quad (20)$$

其中, P 和 Q 是划分极半径和极角的等距节点数; $\delta_{p,q}$ 是权值矩阵 \mathbf{W} 的第 $P+1$ 行、第 $Q+1$ 列元素. 特别地, 矩阵 \mathbf{W} 为

$$\begin{aligned} \mathbf{W} &= [\delta_{p,q}]_{(P+1) \times (Q+1)} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 & 4 & \cdots & 2 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 8 & 16 & \cdots & 8 & 16 & 4 \\ 2 & 8 & 4 & 8 & \cdots & 4 & 8 & 2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 4 & 16 & 8 & 16 & \cdots & 8 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 2 & 4 & \cdots & 2 & 4 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

4 天线端口小区位置优化

从以上有关 DMIMO 系统小区平均遍历容量公式的推导过程不难发现: 小区天线端口位置对系统容量的计算有着极大的影响. 故为提高 DMIMO 系统的容量性能, 有必要考虑小区天线端口位置的最优布设问题. 本节即以第 3 小节所推导得到的小区下行平均遍历容量作为优化目标函数, 以天线端口小区位置作为约束条件, 进而对天线端口位置进行优化设计. 不难看出, 该优化问题可描述为

$$\begin{aligned} \max \quad & \bar{C}(\boldsymbol{\mu}) \\ \text{s.t.} \quad & \boldsymbol{\mu} = \{(r_1, \beta_1), (r_2, \beta_2), \dots, (r_N, \beta_N)\}, \\ & 0 \leq r_n \leq R, 0 \leq \beta_n \leq 2\pi \end{aligned} \quad (22)$$

由式(22)可以看出, 本文所涉及的小区天线端口位置优化问题, 实际上属于数学优化问题中著名的非线性多项式 (Non-deterministic Polynomial, NP) 难问题. 根据现代优化理论的研究结果^[17], 目前尚没有传统多项式算法能够有效解决该问题. 为此, 后人提出了一系列智能优化算法, 比如遗传算法、蚁群算法、粒子群算法等, 以期

从侧面解决这一难题.其中粒子群算法^[18]通过模拟自然界中处于某一区域内的鸟群快速相互追寻、迁徙以觅食的物理过程来获得上述 NP 难问题的全局最优解.具体而言,在试图求解式(22)这一优化问题的过程中,可以将鸟类所寻觅的食物当作天线端口最优点,把鸟离食物的距离当作函数的适应度即系统平均遍历容量,通过遵循个体和群体协调一致的机理,可将鸟觅食的物理过程模拟成寻访天线端口在小区内最佳位置的寻优过程;尤其可以通过预先对所布设的天线进行分片划区的方法获得最优天线位置解的快速、低复杂搜索,因而从可行性角度而言,粒子群算法对解决本文所提出的天线位置优化问题有着较强的适用性.此外,从后文仿真数据也可看出,以粒子群收敛轨迹所表示的天线端口小区最佳位置的寻优过程和搜索结果也能非常直观地以图形方式加以表述.正是基于这些考虑,本文拟采用粒子群算法对天线端口位置进行优化求解.

为便于理解与表述本文所用的粒子群算法,首先给出以下说明:设 \mathbf{x}_n 表示粒子 n 的位置, \mathbf{v}_n 为粒子移动速度, \mathbf{pBest}_n 表示粒子 n 获得的局部最优解, \mathbf{gBest}_n 表示粒子群获得的全局最优解.下面给出粒子群算法的简要搜索步骤:(1)对粒子群进行随机初始化.包括随机群体的位置和速度等;(2)将初始化的粒子位置 \mathbf{x}_n 代入式(20)计算每个粒子的适应度.具体计算公式如下

$$\text{fit}_n = \frac{2\pi R}{9PQ} \sum_{p=0}^P \sum_{q=0}^Q \delta_{p,q} \rho_p C(\rho_p, \theta_q) f(\rho_p, \theta_q) \quad (23)$$

然后将其所对应的粒子位置 \mathbf{x}_n 作为该粒子所获得的局部最优解 \mathbf{pBest}_n ,再将所有粒子中适应度最大的粒子位置作为初始全局最优解 \mathbf{gBest}_n ; (3)更新粒子的位置和速度.对任意粒子 n 而言,其更新后的位置和速度有如下表达式

$$\begin{cases} \mathbf{v}_n' = \omega \mathbf{v}_n + \lambda_1 \kappa_1 (\mathbf{pBest}_n - \mathbf{x}_n) + \lambda_2 \kappa_2 (\mathbf{gBest}_n - \mathbf{x}_n) \\ \mathbf{x}_n' = \mathbf{x}_n + \mathbf{v}_n' \end{cases} \quad (24)$$

其中, \mathbf{x}_n' 和 \mathbf{v}_n' 分别表示粒子更新后的位置和速度, ω 是惯性系数, λ_1 和 λ_2 是学习因子, κ_1 和 κ_2 是 $[0,1]$ 内的随机数,服从均匀分布.需要注意的是,应当判断作为天线端口位置表征的粒子在更新后是否还处在圆型小区内,如果不在,则需重复这一步骤;(4)计算并更新各粒子在新位置的适应度.如果获得的新适应度比原来的 \mathbf{pBest}_n 大,则令 $\mathbf{pBest}_n = \mathbf{x}_n$, 否则不变;如果新的适应度比 \mathbf{gBest}_n 大,则还需更新全局最优解;(5)重复步骤(2)~(4),直至达到所设定的最大迭代次数,从而获得全局最优解.

需要强调的是,在小区实际天线端口位置的优化过程中,以上基于 PSO 的搜索方法需建立在对小区进行合理区域划分的基础上.本文中小区区域划分主要

以小区结构、移动用户分布以及天线端口数目为依据.由于本文所研究的基于圆形小区 DMIMO 系统更侧重于考察实际用户分布模型对系统性能的影响,故而于图 2 中给出了一种称为“热岛效应”的用户分布示意图^[19]:图中将半径为 R 的圆形小区分为两个区域,其中区域 1 即 ψ_1 是中心坐标为 $(0,0)$ 、半径为 r 的圆,其余部分为区域 2 则记为 ψ_2 .

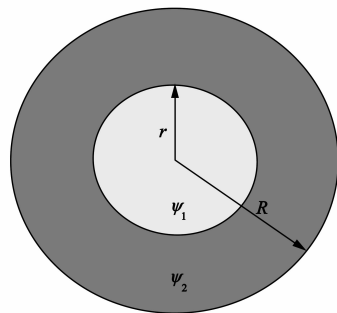


图2 移动用户分布模型示意图

假设 MS 在小区内分布的概率密度函数为

$$f(\rho, \theta) = \begin{cases} \lambda/S_1, & (\rho, \theta) \in \psi_1 \\ (1-\lambda)/(S-S_1), & (\rho, \theta) \in \psi_2 \end{cases} \quad (25)$$

其中, S 代表整个圆形小区的面积; S_1 是区域 1 的面积. $\lambda \in [0,1]$ 表示 MS 分布在区域 1 的概率,其取值决定了 MS 在小区的具体分布情况:当 $\lambda > S_1/S$ 时,其物理意义表示 MS 集中分布在区域 1 中;当 $\lambda < S_1/S$ 时,MS 则集中分布在区域 2;当 $\lambda = S_1/S$ 时,该概率密度函数退化为传统均匀分布.显然,采用图 2 所标示的具“热岛效应”的分布模型的优点是:通过灵活调节参量 λ ,可以获得比较接近实际用户分布状况和研究所需的实验室用户分布模型.由于本文所研究的优化问题中所需优化的天线端口数目较少,从一般布局角度而言且结合圆形小区天线覆盖特征,拟采用扇形区域划分规则对小区中天线端口的位置进行预分配.图 3(a)和图 3(b)分别给出了对五个和六个小区天线端口位置(其中一个端口固定在小区中心点)进行区域初始化预划分示意图.图中小区半径设为 $R = 1000\text{m}$,每个扇形区域初始阶段随机分布 10 个粒子,具体的天线布局方案将通过 PSO 搜索结果确定.

经过区域划分与粒子群体初始化之后,接下来就可以通过 PSO 搜索算法在 MS 分别处于均匀分布($\lambda = 0.25$)和非均匀分布($\lambda = 0.6$)两种条件下,对拥有中心天线的(4,5,2)DMIMO 与(3,6,4)DMIMO 两种系统配置方案分别进行天线端口的小区最优位置进行搜索.具体仿真参数设置为:圆形小区半径 $R = 1000\text{m}$, $r = 500\text{m}$, $m_i = 1$, $\sigma_{sh} = 8\text{dB}$, $\alpha = 3.7$, $P = 16$, $Q = 16$. PSO 算法参数设置:学习因子 λ_1, λ_2 设置为 2,惯性系数 $\omega = 1$,初

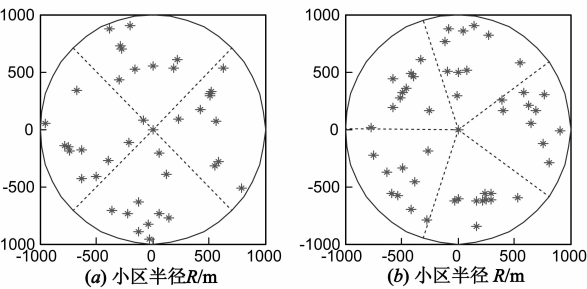


图3 区域划分初始化示意图

始化粒子移动速度 $\mathbf{v}_0 = (30, 3)^T$,其中 30 为粒子初始化速率,3 为粒子初始化相位弧度。

图 4 给出了 PSO 对上述两种不同配置 DMIMO 系统搜索结果.图中每个区域的粒子群体通过同步迭代方式经过 40 次迭代后最终都基本集中收敛于扇形区域的某一位置,此位置即为当前区域最优天线端口位置.从小区整体天线端口的布局角度考虑,观察图中基于 PSO 的搜索结果不难发现:各个区域中天线端口最优位置近似地均匀分布在一个同心圆上.需要特别注意的是,当 $\lambda = 0.6$,也即 MS 集中分布于区域 1 中时天线端口所在同心圆半径,比 $\lambda = 0.25$,亦即 MS 在圆内服从均匀分布时同心圆半径离圆心更近;这恰好说明天线端口的布局优化应考虑移动用户的分布特性.直观上看,一般天线端口的最优位置也自然会向用户密集区域靠近。

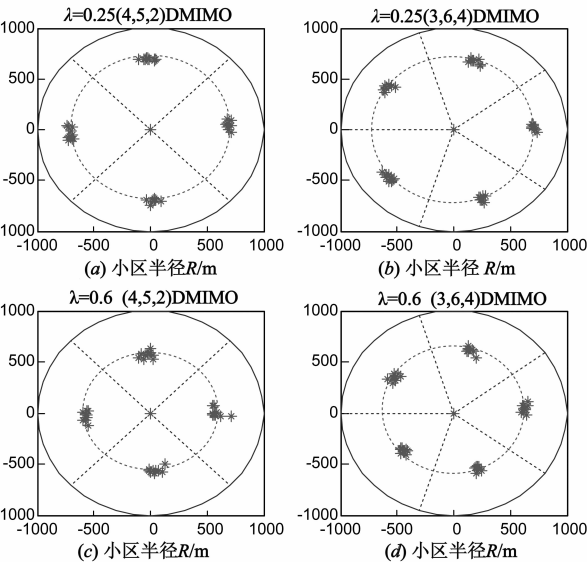


图4 PSO对不同配置DMIMO系统天线端口位置搜索结果

5 计算机仿真与分析

5.1 基于理论公式的系统遍历容量计算机仿真验证

从上节 PSO 小区天线端口最优位置的搜索结果可以得出:当待优化的天线端口数目较少时,在本文所分析的考虑移动用户 MS 分布特征的 DMIMO 系统模型

下,宜采用圆形布局方案对天线端口位置进行优化放置.下面将首先在这种小区天线端口圆形布局基础上,通过计算机仿真验证本文所推导的小区下行平均遍历容量理论近似表达式的准确性;然后再根据计算机穷尽搜索法比较天线端口位置的 PSO 理论值与计算机搜索值之间的差异。

表 1 系统平均遍历容量仿真参数

仿真参数	参数取值
圆形小区半径 R	1000m
用户分布模型内圆半径 r	500m
阴影衰落标准差 σ_{sh}	8dB
路径损耗系数 α	3.7
天线端口数 N	3~7
DAU 配置天线数 L	1~4
MS 配置天线数 M	2~4
极径等距节点 P	16
极角等距节点 Q	16
中心天线端口位置 (r_1, β_1)	(0,0)
圆环上天线端口位置 (r_n, β_n)	$(R/4, 2\pi(n-1)/(N-1))$

图 5 和图 6 分别给出了 MS 在均匀分布($\lambda = 0.25$)和非均匀分布($\lambda = 0.6$)条件下,不同 DMIMO 系统下行小区平均遍历容量仿真性能曲线.对于 $M > L$ 情形,在不同用户分布条件下,(4,5,2)DMIMO 和(2,4,1)DMIMO 系统的理论近似值与计算机 Monte-Carlo 仿真值在发送高信噪比条件下非常接近;同样,对于 $M \leq L$ 情形,MS 在 $\lambda = 0.25$ 或 $\lambda = 0.6$ 条件下(3,6,4)DMIMO 和(2,4,3)DMIMO 系统的高信噪比理论近似值与 Monte-Carlo 仿真值之间的误差也很小.因此,完全可以证明无论 MS 是满足均匀分布还是非均匀分布,本文所推导的发送高信噪比条件下的理论近似表达式可以很好地反映系统的实际性能.具体的各项仿真参数见表 1 所示。

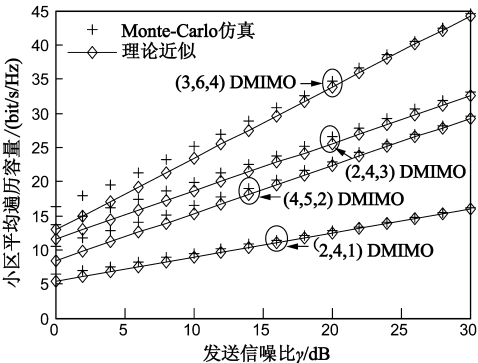


图5 $\lambda=0.25$ DMIMO系统小区下行平均遍历容量

5.2 系统性能参数对天线端口位置的影响

在前文第 4 节中虽然通过 PSO 算法以计算机搜索的方式给出了小区各天线端口的最优布局方案,但并没有对具体的天线端口位置作分析.在实际的优化过程中,天线端口最优位置与多种因素有关,下面将通过

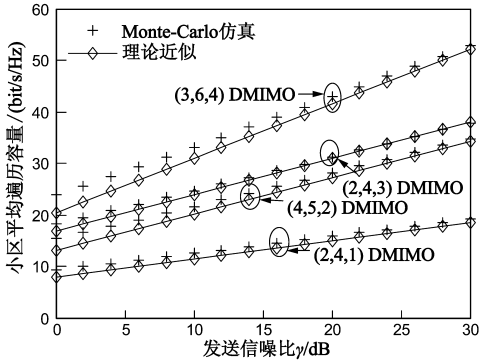


图6 $\lambda=0.6$ DMIMO系统小区下行平均遍历容量

计算机仿真来探索与分析 DMIMO 系统不同性能参数可能对天线端口位置的影响。

图 7 通过改变 DMIMO 系统天线端口数 N 与路径损耗系数 α , 给出了小区下行平均遍历容量随天线端口所在圆半径而变化的计算机仿真曲线。仿真中统一设置参数为: $\gamma = 1\text{ dB}$, $\sigma_{sh} = 8\text{ dB}$, $L = 3$, $M = 2$ 。观察图 7 中 (a) 和 (b) 两个子图可以发现: 在 MS 不同分布下, 当同心圆上天线端口数目越来越密集时, 小区平均遍历容量也随之不断增加, 这主要归功于 ST 方案下, MS 与通信链路质量更好的天线端口建立通信的概率增加, 故而能充分改善小区平均遍历容量。而由上述 PSO 搜索结果可知, 在 MS 特定分布下, 天线端口最优位置与扇形区域质心有关; 当天线端口数目增多时, 被划分的扇形区域个数增多, 每个扇形的质心会向外偏移, 因而图中天线端口最优位置向小区的边缘移动。

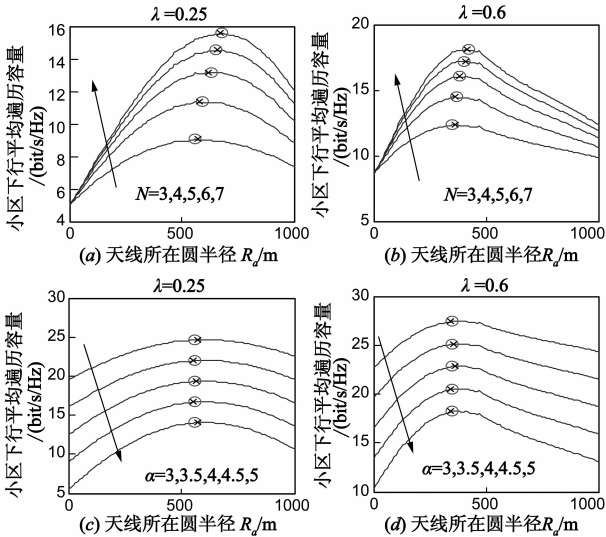


图7 小区平均遍历容量与天线端口位置关系

图 7 中子图 (c) 和 (d) 为基于 (2,4,3) DMIMO 系统的计算机仿真曲线。从图中亦不难发现, 在发射端功率固定的条件下, 随着路径损耗系数 α 的增大, 小区平均遍历容量不断减小, 但天线端口所处的最优圆半径基

本不发生变化。其中前一点比较好理解, 因为路径损耗系数 α 体现的正是信号在传输空间的衰减, α 变大自然导致接收信噪比的降低, 故而导致小区平均遍历容量越来越小; 至于改变 α 大小时天线端口最优位置基本不变的原因, 主要是因为天线端口最优位置与 MS 和天线端口之间的最小平均接入距离有关, 而路径损耗系数 α 对最小平均接入距离基本无影响^[8]。

5.3 PSO 搜索精度分析

上图 7 中, 符号 “o” 表示通过计算机搜索得到的最优天线端口位置, 而 “x” 则表示由 PSO 算法搜索得到最优位置; 不难发现, 无论 MS 是服从均匀分布还是非均匀分布, 计算机搜索值与 PSO 搜索值之间的误差很小。为进一步显示 PSO 的搜索精度, 图 8 给出了 MS 不同分布下、基于圆形布局方案, 对 (4,5,2) DMIMO 和 (3,6,4) DMIMO 系统最优天线端口位置分别实施 PSO 搜索与计算机穷尽搜索所得结果的对比。图中 r_o 表示计算机搜索最优值, r_{so} 是基于 PSO 的次优搜索值 (单位皆为: m)。仿真参数设置为: $\alpha = 3.7$, $\sigma_{sh} = 8\text{ dB}$, $\gamma = 1\text{ dB}$ 。仿真时, 除中心 DAU 外, 其他 DAU 皆对称布设在同一个圆周上。图中星号 “*” 是 PSO 在相应搜索方向上的 6 个粒子, 经过 $N_c = 20$ 次迭代后收敛所得的天线端口最优位置。对比图中搜索结果不难发现, 计算机搜索结果与 PSO 搜索结果之间的误差范围约在 0.89% ~ 2.04% 之间, 由此可见, 在误差允许的范围内, PSO 搜索方案可以很好地反映计算机穷尽搜索的最优结果。

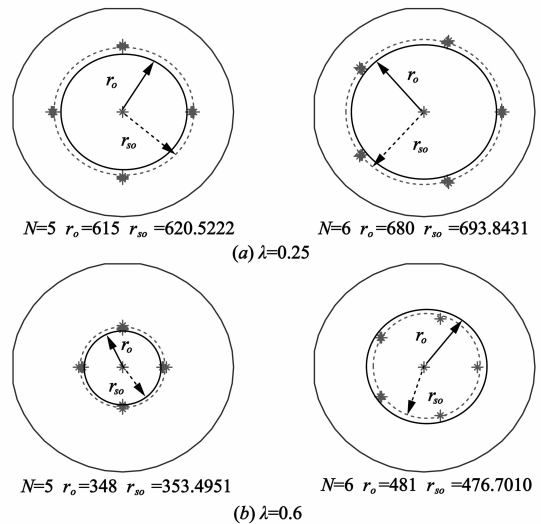


图8 MS在不同分布下计算机与PSO搜索最优位置结果对比

6 结论

本文以最大化小区下行平均遍历容量为目标, 基于 PSO 优化算法研究圆形小区 DMIMO 系统基站侧天线端口位置的最优配置问题。论文首先在高信噪比条件

下,运用天线端口选择方案,推导了小区平均遍历容量的理论近似闭型表达式;然后以此遍历容量近似公式为优化目标,在分布式天线端口数目较少的前提下,通过采用 PSO 算法搜索不同天线配置方案下 DMIMO 系统天线端口的可能最优位置布设,并根据 PSO 搜索结果确定了小区天线圆形布局方案。计算机仿真结果表明:首先,所推导的小区下行平均遍历容量近似闭型表达式其理论值与仿真值比较吻合;其次,采用 PSO 搜索的天线端口最优位置能够很好地反映天线端口的实际最优位置。本文研究结果可为未来基于 DMIMO 技术的新一代移动通信系统的上层网络规划提供理论设计参考。

参考文献

- [1] Wonil R. High Performance Distributed Antenna Cellular Networks[D]. Palo Alto: Stanford University, 2003.
- [2] Feng W, et al. On the deployment of antenna elements in generalized multiuser distributed antenna systems[J]. Mobile Networks and Applications, 2011, 16(1): 35 – 45.
- [3] Chen H M, et al. Outage performance of distributed antenna systems over shadowed Nakagami-m fading channels[J]. European Trans on Telecomm, 2009, 20(5): 531 – 535.
- [4] Wang J Y, Wang J B, Chen M, Dai J X. Average SER performance of distributed antenna systems over shadowed generalized-Gamma channels for different modulation schemes[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 75(2): 1099 – 1114.
- [5] Shen Y, et al. Optimal antenna location for STBC-OFDM downlink with distributed transmit antennas in linear cells[J]. IEEE Communication Letters, 2007, 11(5): 387 – 389.
- [6] Wang X Z, Zhu P C, Chen M. Antenna location design for generalized distribution antenna systems[J]. IEEE Communication Letters, 2007, 13(5): 315 – 317.
- [7] Park E, Lee S R, Lee I. Antenna placement optimization for distributed antenna systems[J]. IEEE Trans on Wireless Commun., 2012, 11(7): 2468 – 2477.
- [8] Wang J Y, Wang J B, Chen M. System capacity analysis and antenna placement optimization for downlink transmission in distributed antenna systems[J]. Wireless Pers Communications, 2013, 71(1): 531 – 554.
- [9] 刘田,等.多小区分布式发射天线位置优化[J].电子学报, 2011, 39(12): 2721 – 2725.
Liu T, et al. Antenna location optimization for distributed transmit antennas in a multicell environment[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(12): 2721 – 2725. (in Chinese)
- [10] Han L, et al. Optimization of power allocation and relay placement for decode-and-forward ARQ relaying[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(11): 2116 – 2119.
- [11] Qian Y Z, Chen M, Wang X Z. Antenna location design for distributed antenna systems with selective transmission[A]. International Conference on Wireless Communications & Signal Processing[C]. Nanjing: IEEE, 2009. 13 – 15.
- [12] Lo T K Y. Maximum ratio transmission[J]. IEEE Trans Commun, 1999, 47(10): 1458 – 1461.
- [13] Vucetic B, Yuan J. Space-Time Coding[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003. 1 – 47.
- [14] Wang D, Wang J, You X, Wang Y, et al. Spectral efficiency of distributed MIMO systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(10): 2112 – 2127.
- [15] Tulino M A, Verdu S. Random Matrix Theory and Wireless Communications[M]. Hanover, MA: Now Publishers Inc, 2004.
- [16] Burden R L, Faires J D. Numerical Analysis[M]. 9th ed. Boston: PWS KENT Publishing Company, 2011.
- [17] Kandukuri S, Boyd S. Optimal power control in interference-limited fading wireless channels with outage-probability specifications[J]. IEEE Trans on Wireless Commu, 2002, 1(1): 46 – 55.
- [18] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[A]. 6th International Symposium on Micromachine and Human Science[C]. Nagoya: IEEE, 1995. 39 – 43.
- [19] 王俊波,等.分布式天线系统中的系统下行中断概率分析[J].电子学报, 2011, 39(4): 785 – 790.
Wang J B, et al. System downlink outage probability analysis in distributed antenna systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(4): 785 – 790. (in Chinese)

作者简介



李岳衡 男, 1971 年出生, 湖南永兴人, 博士, 河海大学教授, 主要研究方向为通信信号处理、现代无线通信网络。

E-mail: yueheng_li@hhu.edu.cn



王莉 女, 1989 年出生, 江苏盐城人, 河海大学硕士研究生, 主要研究方向为现代无线通信网络和 MIMO 系统。

E-mail: wang_li_2013@126.com

崔磊 男, 1989 年出生, 江苏淮安人, 河海大学硕士研究生, 主要研究方向为现代无线通信网络和 MIMO 系统。