

一种分布式天线无线通信系统中的功率控制算法

张新祥, 彭建华, 郭淑明

(信息工程大学 国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 提出了一种基于平均信道增益矩阵的分布式天线无线通信系统下行功率控制算法。该算法根据接收端通过理想信道估计获得的信道状态信息(CSI), 对各中心基站经光纤传送的发射功率在其所属各天线单元处进行加权分配, 在保证整个覆盖区域内的所有移动台达到平衡的信干比的前提下使各个中心基站的发射功率达到最小。仿真结果表明, 与现有的分布式天线系统中的功率控制算法相比, 新算法可以显著地降低各中心基站的发射功率, 提高整个系统的容量。

关键词: 分布式天线; 信道增益; 功率控制; 算法

中图分类号: TN820 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0673(2011)02-0188-05

Novel Power Control Algorithm for the Distributed Antenna Wireless Communication Systems

ZHANG Xin-xiang, PENG Jian-hua, GUO Shu-ming
(National Digital Switch System Engineering & Technological R&D Center,
Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: A power control algorithm for the downlink of a distributed antenna wireless communication system is proposed by the use of the average channel gain matrix. On the basis of channel state information (CSI) the receiver obtains by the ideal channel estimation, the algorithm allocates the transmit power of the BS via optical fiber to each antenna at a weight relative to the channel gain between antennas and mobile stations to minimize the transmit power of every BS under the condition that the SIR of all the mobile stations in the coverage area are balanced. Simulation results show that compared with the existing power control algorithm in distributed antenna systems, the new algorithm can significantly reduce the transmit power of the central base stations and improve the overall system capacity.

Key words: distributed antenna; channel gain; power control; algorithm

0 引言

随着无线通信系统对高速和高容量多媒体业务需求的迅速增长, 传统的单天线无线通信系统已经很难满足用户需求。为此, 一些学者提出分布式天线技术来增强信号质量, 提高系统容量和扩大覆盖^[1]。

收稿日期: 2010-11-30; 修回日期: 2011-01-17

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2009AA011202, 2009AA011205)

作者简介: 张新祥(1985-), 男, 硕士生, 主要研究方向为 cdma2000 无线通信、无线网络协议分析, E-mail: charlie1213@163.com;

彭建华(1966-), 男, 教授、硕士生导师, 主要研究方向为移动通信安全、3G 通信协议分析;

郭淑明(1977-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为移动通信、信令分析。

然而,由于分布式天线无线通信系统中不同小区的天线在同一个信道发射信号,小区间的同信道干扰(Co-Channel Interference, CCI)就成为影响系统性能的最主要因素。文献[2]中提出了一种分布式系统功率控制算法,该算法在满足目标信号干扰比(SIR)要求的前提下最小化平均发射功率,但是其在发射端采取各天线均分中心基站功率的策略,降低了基站发射效率。文献[3-5]讨论了传统小区结构中基于信号干扰比(SIR)均衡的功率控制(CPC)方法,将优化的发射功率的计算归纳为利用非负不可约矩阵的性质对信道增益矩阵的特征值求解,并且达到在所有接收端最大化最小SIR的目的。但由于分布式天线系统中用户可同时接收多个天线的信号,自由度远大于传统小区结构,无法推算出文献[3-5]中的互干扰矩阵,故该算法不适用;文献[6]针对分布式天线系统提出了一种选择到移动台增益最大的天线作为基站发射天线的功率控制算法,虽然较固定天线功率控制算法有较高的增益,但没有充分利用天线间的协作发挥分布式天线系统的优势;文献[7]提出的分布式功率控制以离移动台最近的天线为基准,所有的天线发射同样的功率,虽然可以使用户获得宏分集增益,但是会增大小区间干扰。

本文在分布式天线无线通信系统架构下,提出了一种基于平均信道增益矩阵的下行功率控制算法(Channel Gain Power Control, CGPC)。该算法在通过信道估计获知信道状态信息(CSI)的基础上,将小区基站经光纤传送的发射信号功率与各天线单元至移动终端间平均信道增益成正比例进行分配,在使系统内各个用户的信干比达到平衡的前提下,通过对信道增益矩阵求特征值得到各个中心基站应发送的最小功率值,从而优化了各基站及所属天线的发射功率,减小了系统的小区间干扰,提高了系统容量。

1 分布式天线无线通信系统架构

图1给出了分布式天线无线通信系统的模型。系统中,多个分布式天线单元通过光纤连接到中心基站,每个天线单元可以接收移动台发出的扩频无线信号,并经光缆传送到中心基站,也可以接收中心基站经光纤传送过来的光信号,经光/电转换器转换为移动台可以接收的无线射频信号后发射出去。采用光纤传输的优点是传输损耗及误码率都很低。天线单元是功能简单、价格低廉、分布在不同位置的全向或定向天线,只配备了光/电和电/光转换器,发送和接收来自基站和移动台的无线射频信号。所有复杂的功能,例如射频调制、解调、信道控制等,都由中心基站来完成。

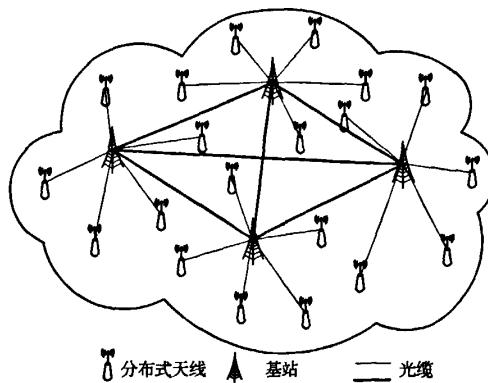


图1 分布式天线无线通信系统示意图

采用分布式天线的最大优点是宏分集效果,由于每个分布式天线间的距离足够远,每个天线处由阴影效应引起的衰落也相互独立,所以采用分布式天线系统不仅可以抗多径衰落,同时也可以补偿阴影衰落,从而提高系统的传输容量。

2 系统模型

本节给出了分布式无线通信系统下行链路模型的详细描述,其中符号用大写字母表示。考虑到一个由 L 个小区组成的蜂窝系统,且每个小区配置一个基站。移动台的位置在小区内随机分布。基站的天线

数目用 N_l 表示, 第 l 个小区有 N_l 根天线, 而覆盖区域内共有 K 个用户。用 B_i 表示小区 i 的基站, M_i 表示小区的移动台, $H_{l,m,k}$ 表示为第 l 个小区中第 m 根天线与第 k 个用户之间的信道, 可表示为^[2]

$$H_{l,m,k} = \sqrt{d_{l,m,k}^{-\beta} 10^{0.1A_{l,m,k}}} h_{l,m,k} \quad (1)$$

其中, $d_{l,m,k}$ 为第 l 个小区中第 m 根天线与第 k 个用户间的距离, β 为路径损耗因子, $A_{l,m,k}$ 表征阴影衰落, 服从对数正态分布。 $h_{l,m,k}$ 表征小尺度衰落, 为服从标准复高斯分布的随机变量。

由于光纤的传输损耗及噪声均极低, 而且在实际系统中, CCI 的影响远大于高斯白噪声, 在本文的分析中, 光纤的传输损耗及高斯白噪声忽略不计, 移动台受到的干扰只考虑多用户的同信道干扰, 不考虑邻信道干扰。假设第 i 个用户属于第 B_i 个小区, 同小区用户之间互不干扰, 系统的频率复用因子为 1, 第 i 个用户的接收信号为

$$Y_i = \sum_{m=1}^{N_{B_i}} H_{B_i,m,i} X_{B_i,m,i} + \sum_{l \neq B_i, m=1}^L \sum_{k=1}^K H_{l,m,k} \sum_{l' \neq i} X_{l,m,k} \quad (2)$$

式中, $X_{l,m,k}$ 为第 l 个小区中第 m 根天线对第 k 个用户的发送信号, 若第 k 个用户不在该小区的定向天线发射角度内, 则 $H_{l,m,k} = 0$ 。⁽²⁾ 式中第 1 项为第 i 个用户接收的有用信号, 第 2 项为来自其余小区的干扰。

设 $P_{l,m,k}$ 为第 l 个小区中第 m 根天线对第 k 个用户的发射功率, $P_{T,i}$ 表示基站 B_i 的发射功率。与传统蜂窝系统相比, 分布式天线系统中各天线分布较为密集, 与用户距离较近, 小尺度衰落影响很小, 故在本文的分析中, 忽略小尺度衰落, 只考虑路径衰落和阴影衰落, 由(1)式, 令 $G_{l,m,k} = d_{l,m,k}^{-\beta} 10^{0.1A_{l,m,k}}$, 表征平均信道增益。根据(2)式, 第 i 个用户的 SIR 即为

$$SIR_i = \frac{\sum_{m=1}^{N_{B_i}} G_{B_i,m,i} P_{B_i,m,i}}{\sum_{l \neq B_i, m=1}^L \sum_{k=1}^K G_{l,m,k} \sum_{l' \neq i} P_{l,m,k}} \quad (3)$$

为了使各个用户的 SIR 平衡, 要求满足:

$$\gamma = SIR_1 = SIR_2 = \dots = SIR_K \quad (4)$$

γ 为系统可达的 SIR。

4 基于信道增益矩阵的下行功率控制算法

文献[6]中提出的以到移动台增益最大的天线作为发射天线的功率控制方案, 虽然较传统的功率控制方案有较大的改进, 但没有充分发挥分布式天线系统的分集增益, 对系统容量的提高有限。文献[7]中提出的所有的天线以离移动台最近的天线为基准发射同样功率的功率控制方案, 如果第 l 个小区的第 i 个用户到各个天线的信道衰落特性相近, 各天线对用户的发送功率的贡献也应相近, 此算法能使用户获得较好的分集增益; 但当第 l 个小区的第 i 个用户靠近第 m 个天线时, 该用户的 SIR 很容易由第 m 根天线发送的信号满足。小区内的其余天线若对该用户发送信号的功率如果还与第 m 根天线相同, 对第 i 个用户的增益很小, 反而会增大小区间的 CCI, 从而降低系统性能。

本文提出了一种基于平均信道增益矩阵的功率控制算法, 各天线单元将其与目标用户间的信道增益乘以一个加权因子 μ (为常数) 作为对中心基站发射功率的加权系数, 即

$$P_{l,m,i} = \mu G_{l,m,i} P_{T,l} \quad (5)$$

将(5)式代入(3)式,

$$SIR_i = \frac{\mu \sum_{m=1}^{N_{B_i}} G_{B_i,m,i} G_{B_i,m,i} P_{T,B_i}}{\sum_{l \neq B_i, m=1}^L \sum_{k=1}^K G_{l,m,k} P_{T,l}} = \frac{P_{T,B_i}}{\sum_{l \neq B_i} P_{T,l} ((\sum_{m=1}^{N_{B_i}} \sum_{k=1}^K G_{l,m,k}) / \sum_{m=1}^{N_{B_i}} G_{B_i,m,i}^2)} \quad (6)$$

(6)式中分子为第 i 个用户的有用信号, 分母为系统对其余小区内用户发送的信号第 i 个用户造成的干扰, 再令:

$$\omega_{i,l} = \begin{cases} ((\sum_{m=1}^{N_{B_i}} \sum_{k=1}^K G_{l,m,k}) / \sum_{m=1}^{N_{B_i}} G_{B_i,m,i}^2), & l \neq B_i \\ 0, & l = B_i \end{cases} \quad (7)$$

再由(4)式得

$$\gamma \sum_{l=1}^L P_{T,l} \omega_{l,i} = P_{T,i} \quad (8)$$

将(8)式中的 L 个方程写成矩阵形式,则有

$$WP = \frac{1}{\gamma} P \quad (9)$$

(9)式中 P 为一个 $L \times 1$ 的矢量,其 i 个元素为 P_i , W 为一个 $L \times L$ 的矩阵,其中第 i 行第 k 列元素为 $\omega_{i,k}$ 。

文献[5]中证明了当一个矩阵每行中只有一个元素为 0,其余元素都大于 0 时,是一个非负不可约矩阵。由于在实际系统中,其它所有用户到各个天线的信道增益不可能都为 0,故 W 是一个非负不可约矩阵,由非负不可约矩阵的性质, W 有且仅有一个实特征值 λ_M ,且有 $\lambda_M = \max_{1 \leq i \leq \text{Rank}(W)} \{ |\lambda_i| \}$,对应的特征向量 P 中各元素同号,得到最大可达的 SIR,进而得到各个基站发送功率的可行解 P_M 。

由上面的推导可知,如果第 L 个小区的第 i 个用户到各个天线的信道衰落特性相近,根据本文所提的算法进行功率分配,各天线对用户的发送功率的贡献近似相等,此算法能使用户获得较好的分集增益;而当第 L 个小区的第 i 个用户靠近第 m 个天线时,其到该天线的信道增益也必然增大,该天线对第 i 个用户的发送功率也越大,其它较远的天线对其的发送功率相应依次降低,依然使用户获得较好的分集增益,在满足了用户 SIR 要求的同时也降低了系统的 CCI,从而提高了系统容量。

而且由于 W 的非负不可约性,CGPC 算法可以方便地转化为分布式算法,简化系统实现的难度,具体步骤如下:

①令所有基站对移动台发送的功率相同,

$$P_{T,1} = P_{T,2} = \cdots = P_{T,L} = P_{Initial} \quad (10)$$

②根据(6)式,计算第 i 个用户的接收信噪比 $\gamma_i^{(n)}$,令初始迭代变量 $n=0$ 。

③按照下面的公式更新各个基站的发送功率,

$$P_{T,i}^{(n+1)} = P_{T,i}^{(n)} \frac{\alpha}{\gamma_i^{(n)}}, \alpha > 0 \quad (11)$$

④令 $n=n+1$,如果 $n>N$,迭代结束,否则返回②。 N 为预定的总迭代次数。

文献[4]中已证明对非负不可约性矩阵,上述步骤可以使各基站的发送功率收敛至(6)式。

4 数值仿真结果

以 cdma2000 1x 分布式天线无线通信系统为例进行仿真,系统由 7 个小区组成,每个小区 6 根天线,天线位置均匀分布。为了衡量 CGPC 的性能,在各中心基站所属天线总发射功率相同的前提下,将其与文献[6]中按用户与最近基站距离功控的算法(MEPC)以及选择增益最好天线的非协作单天线算法(No Co-operative Power Control, NCPC)进行比较,仿真中的 DCGPC 算法对应 CGPC 分布式算法。在仿真过程中,路径损耗因子 α 设为 4, $A_{l,m,l}$ 为服从均值为 0, 方差 8dB 的高斯变量。假设所有距离对小区半径归一化,所有发射端功率对初始功率归一化,用户位置随机分布,SIR 为信号功率与干扰加噪声功率的比值。接收端通过理想信道估计,对 CSI 完全已知。

图 2 显示了在不同的用户数下,分布式 CGPC 算法的收敛性能。图中横轴为分布式 CGPC 的迭代次数,纵轴为迭代计算后所有用户中的最小 SIR。计算了总用户数分别为 180 和 240 下的情况。从图中可以看出,随着迭代次数的增加,分布式 CGPC 算法快速收敛到一个固定值。在迭代次数取 7 左右时,分布式的 CGPC 就可以基本达到收敛,显示算法有良好的收敛性能。

图 3 给出了各个算法中基站平均相对功率随目标信干比增加的变化情况。由图可知,基站平均发射功率随目标信干比的增加而增加。相对于无协作的 NCPC 算法,随着目标 SIR 的提高,各天线协作的 CGPC 算法和 MEPC 算法都能以较小的发射功率达到用户要求的目标 SIR;而 CGPC 算法较 MEPC 算法需要的基站平均发射功率更低。这是因为与 MEPC 相比,CGPC 能更有效合理地分配基站的发射功率,减少了 CCI,因此可以以较小的发射功率达到与 MEPC 相同的目标 SIR。同时可见,在不同的目标信干比下,分布

式 CGPC 算法的性能都很接近 CGPC 算法。

图 4 仿真了各个算法的不同用户数与目标平均 SIR 的关系。横坐标为系统中的用户数,纵坐标为目标平均 SIR。由图可见在不同的用户数下,基于分布式天线协作的 CGPC 算法及 MEPC 算法对无协作的 NCPC 算法的增益都很明显;而 CGPC 又优于 MEPC,在相同的 SIR 下,CGPC 的容量约为 MEPC 的 2 倍到 3 倍,在不同用户下均有约 5dB 的 SIR 增益。说明在不同的目标 SIR 下,CGPC 算法都能较大地改善系统性能,提高系统容量。这是由于 CGPC 算法能根据平均信道增益的大小合理调配各天线的发射功率,提高对目标终端贡献较大天线的发射功率,减小对目标终端贡献较小天线的发射功率,降低了系统干扰,从而提高了系统容量。从图中还可以看出,随着用户数的增多,分布式 CGPC 算法能很好地逼近 CGPC 算法。

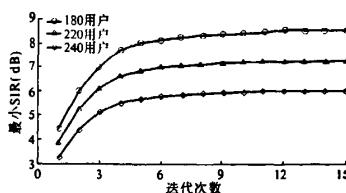


图 2 分布式 CGPC 算法的收敛性能

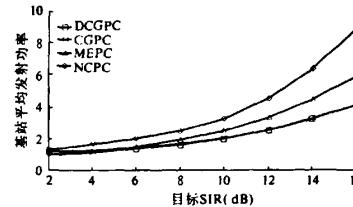


图 3 不同目标 SIR 下各个算法的基站平均发射功率比较

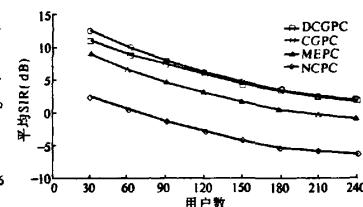


图 4 不同用户数下各算法的平均 SIR 比较

5 结束语

本文通过将文献[3-5]中传统蜂窝网络基于信道增益矩阵优化基站发射功率的思想扩展到分布式天线无线通信系统中,提出了一种适用于分布式天线无线通信系统架构的下行功率控制算法。各分布式天线在获知 CSI 信息的基础上,根据信道增益的大小对基站的发射功率进行加权分配。同时,该算法还可以很方便地转化为分布式算法,减少算法实现的复杂度。仿真结果表明,算法有效地减少了系统的同信道干扰,在保证整个覆盖区域内各移动终端用户 SIR 平衡的前提下以一定的复杂度为代价换取各中心基站发射功率的最小化,提高了系统的性能。

参考文献:

- [1] 刘彤. 分布式天线无线通信系统性能分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(3): 390-393.
- [2] 赵昆. 多输入多输出天线蜂窝系统中的分布式功率控制方法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(11): 1681-1685.
- [3] Zander J. Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1994, 41(1): 57-62.
- [4] Zander J. Distributed cochannel interference control in cellular radio systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1992, 41(3): 305-311.
- [5] Grandhi A, Vijayan R, Goodman J, et al. Centralized power control in cellular radio systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1993, 42(4): 466-468.
- [6] Demirkol M F, Ingram M A. Power-controlled capacity for interfering MIMO links[C]//IEEE Vehicular Technology Conf. VTC 2001 Fall. 2001, 1: 187-191.
- [7] Xiao L, Dai L, Zhuang H, et al. Information-theoretic capacity analysis in MIMO distributed antenna system[C]//IEEE Vehicular Technology Conference Spring. 2003, 1: 779-782.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>