

分布式天线系统下行功率分配算法的研究^{*}

吴佳青^{**}, 胡宗福, 沈达, 杜天瑜

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

【摘要】研究了分布式天线系统 (DAS, Distributed Antenna System) 的下行容量问题。首先建立了包括路径损耗、阴影衰落和快衰落的复合信道模型; 然后基于该模型, 在对常见功率分配算法信道容量分析的基础上, 提出基于注水算法的功率分配方案, 并仿真研究了各算法的信道容量差异。仿真结果显示, 在功率受限时, 与等功率分配和最大合并比 (MRC) 功率分配算法相比, 采用注水算法的信道容量分别有 1 bits/(s·Hz) 和 0.5 bits/(s·Hz) 的提高, 系统性能得到了显著改善。

【关键词】分布式天线系统; 功率分配; 注水算法

【中图分类号】TN929.5

【文献标识码】A

【文章编号】1002-0802(2013)08-0015-04

Power Allocation Algorithm for Downlink Distributed Antenna System

WU Jia-qing, HU Zong-fu, SHEN Da, DU Tian-yu

(Electronic and Information Engineering College, Tongji University, Shanghai 201804, China)

【Abstract】This paper discusses the power allocation algorithm for downlink distributed antenna system. Firstly, a channel model including path loss, shadow fading and fast fading is set up. Then two kinds of common allocation algorithms are analyzed and a better power allocation based on water filling algorithm is proposed. Finally, different capacities of the algorithms are simulated. The simulation results indicate that the capacity of water filling algorithm could improve 1 bits/(s·Hz) and 0.5 bits/(s·Hz), as compared with those of equal power allocation and MRC power allocation algorithms respectively in power constraint system. The antenna system performance could be improved significantly.

【Key words】distributed antenna system; power allocation; water filling algorithm

0 引言

随着移动通信的发展, 为适应人们日益增长的业务需求, 各国学者提出了许多技术来提高信号质量, 增加系统容量, 扩大信号覆盖。其中有一种利用多个天线的方式, 在较大的空间范围内安装多个基站天线, 每个基站天线将接收到的移动台信号统一传送到一个中心基站进行处理, 而中心基站也可以将信号同时通过多个基站天线发送给移动台, 这种利用多个天线的方式被称为分布式天线系统^[1]。分布式天线系统得益于其分布式天线配置, 与传统的单基站相比, 在提高无线网络覆盖的同时, 体现了巨大的容量优势^[2-3]。但另一方面, 不同功率分配

系统下的信道容量和性能存在着差异, 因此合理地控制各个分布式天线(下行)的发射功率, 显得非常重要。

1 系统模型

文中基于如图 1 的一个 DAS 小区, 将注水算法^[4]应用到此系统中, 来分析下行信道的容量性能, 并通过与采用等功率分配方案和最大合并比(MRC)方案的比较^[5-6], 体现出采用注水分配算法 DAS 的容量优势, 进而改善了系统性能。

图 1 所示为一个典型的 DAS 小区, 它包括多个分散在小区各处的远端天线单元 (RAU) 和一个位于小区中心的基站 (BS), 它们之间通过光纤连接^[7-8]。因为采用这种方式, 在 RAU 和 BS 间只要使

* 收稿日期: 2013-02-25; 修回日期: 2013-06-28。

** 通讯作者: wjq1221@gmail.com。

用光电转换器件和放大器完成光电信号的转换即可，这就大大降低了 RAU 侧的设备复杂度。

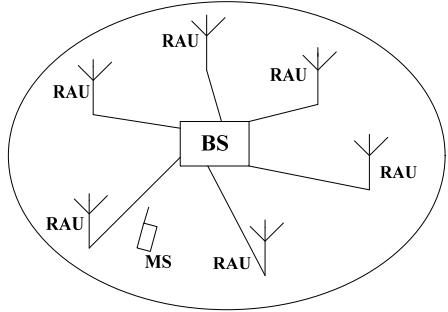


图 1 一个典型的 DAS 小区

将此 DAS 小区的下行链路抽象为如图 2 的一个 MISO 系统。文中考虑线性时不变的系统模型，信道模型建模为经受路径损耗、阴影衰落和快衰落的复合衰落信道，并假设信道是准静态的，即在一帧内的信道是不变的。

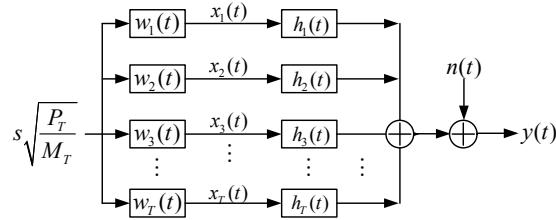


图 2 MISO 天线系统模型

假设基站总的发射功率为 P_T ，发射天线有 M_T 个，则对应每个发射信号的初始发射信号为：

$$x_i = \sqrt{\frac{P_T}{M_T}} w_i s \quad (i=1,2,\dots,M_T), \text{ 其中, } \frac{P_T}{M_T} \text{ 为每个}$$

发送天线单元分配的功率； s 为单位信号，是一个标量； w_i 为每个发送信号的权值，对应的权值向量为 $\bar{w}=[w_1, w_2, \dots, w_{M_T}]^T$ ，它必须满足 $\|\bar{w}\|^2=M_T$ ，以保证发送信号的总功率为 P_T 。所有信号所经历的信道可以表示为 $\bar{h}=[h_1, h_2, \dots, h_{M_T}]^T$ 。文中考虑复合衰落信道，信道增益 h_i 可以表示成：

$$h_i = g_i \sqrt{L_i \cdot S_i}, \quad (1)$$

式中， g_i ， L_i 和 S_i 分别表示小尺度衰落，路径损耗和阴影衰落。文中假设这 3 种衰落之间彼此独立。不失一般性，假设小尺度衰落服从 Rayleigh 分布；路径损耗描述为 $L_i = cd_i^{-\alpha}$ ， d 是移动台到第 i 根天线的距离， α 表示衰减系数，通常取 2~4， c 为常数；阴影衰落 S_i 服从零均值对数正态(lognormal)分布。 n 为零均值加性高斯白噪声，并满足 $E(|n|^2)=N_0$ 。因此，系统接收端的信号可以表示为：

$$y = \sqrt{\frac{P_T}{M_T}} \left(\sum_{i=1}^{M_T} h_i w_i s \right) + n, \quad (2)$$

从上式可以看出，不同的权值向量代表了不同的功率分配方式。文中首先分析等功率发送和最大比合

并发送两种方案，在此基础上提出分布式天线系统基于注水算法的功率分配方案。

2 DAS 下行功率分配算法

2.1 等功率发送方案

当采用等功率发送时，权值向量 $\bar{w}=[1,1,\dots,1]^T$ ，则接收端信号为：

$$y = \sqrt{\frac{P_T}{M_T}} \sum_{i=1}^{M_T} h_i s + n, \quad (3)$$

由于 $\sum_{i=1}^{M_T} h_i / \sqrt{M_T}$ 仍然是一个零均值复高斯随机变量，上式可等效为：

$$y = \sqrt{P_T} hs + n, \quad (4)$$

上式等价于一个 SISO 系统，相比于单天线系统，在容量上没有提升。给出其接收端平均信噪比为：

$$SNR = \frac{|\bar{h}|^2 P_T}{N_0}, \quad (5)$$

归一化信道容量为：

$$C = 1b(1+SNR) = 1b(1+\frac{|\bar{h}|^2 P_T}{N_0})b / (s \cdot Hz). \quad (6)$$

2.2 最大合并比 (MRC) 方案

当发送端已知信道状态信息(CSI)时，可以采用 MRC 功率发送方案。由文献[9]可知，最大化接收信噪比的权值向量应该满足： $\bar{w}=\sqrt{M_T} \frac{\bar{h}^H}{\sqrt{\|\bar{h}\|^2}}$ ，此时，

接收信号为：

$$y = \sqrt{\|\bar{h}\|^2 P_T} \cdot s + n, \quad (7)$$

根据上式计算信噪比及归一化信道容量得：

$$SNR = \frac{\|\bar{h}\|^2 P_T}{N_0}, \quad (8)$$

$$C = 1b(1+SNR) = 1b(1+\frac{P_T}{N_0} M_T)b / (s \cdot Hz), \quad (9)$$

从上式可以看出，随着发送天线数目和信噪比分量的增加，系统能够获得更大的信道容量。

2.3 分布式天线系统中基于注水算法的功率分配方案

上面给出了两种功率分配的方案：等功率发送方案实现简单，管理方便，但是其容量提高有限；采用 MRC 发送方案虽然提升了信道容量，但是要利用所有的发射天线才能获得最大容量，实现起来较为复杂。因此，这里提出一种在 DAS 系统中的基于注水算法的功率分配方案。

与 MRC 方案相同，在发送端已知 CSI 时，对于 M_T 个独立的高斯信道，设噪声功率分别为 N_1, N_2, \dots, N_{M_T} ，有效带宽为 W ，则根据香农容量公

式, M_T 个信道的总容量为:

$$C = \max_{p_i} W \sum_{i=1}^{M_T} \text{lb}(1 + \frac{p_i}{N_i}), 1 \leq i \leq M_T, \quad (10)$$

式中, p_i 是信道 i 上的信号功率, 满足功率限制:

$\sum_{i=1}^{M_T} p_i = P_T$, P_T 是系统总功率约束。利用拉格朗日乘数法, 得到使得总容量最大的功率分配必须满足:

$$p_i = (\lambda - N_i)^+, 1 \leq i \leq M_T, \quad (11)$$

式中, $(x)^+ \triangleq \max(0, x)$, 待定系数 λ 即注水线满足:

$\sum_{i=1}^{M_T} (\lambda - N_i)^+ = P_T$, 它可以通过数值计算方法得到。

因此, 此信道的归一化容量可以表示为:

$$C = \sum_{i=1}^{M_T} \text{lb}(1 + \frac{(\lambda - N_i)^+}{N_i}), \quad (12)$$

由上式可知, 信道的噪声功率越小, 分配的功率越多, 噪声功率越大, 分配的功率越少, 当噪声功率超过 λ 时, 甚至不使用此信道。

3 数值分析结果

前面从理论分析上论述了各种功率分配算法对信道容量的增益的差异, 下面通过 Matlab 程序仿真, 对三种功率分配的系统的信道容量进行比较。

在 CSI 已知的情况下, 无线信道为复合衰落信道。图 3 所示为在功率受限时, 发射天线数为 4 的情况下, 三种不同功率分配方案在不同信噪比条件下的信道容量。可以看出, 在低信噪比条件下, 采用注水功率算法的信道容量最大, 相比于等功率分配最大增益约 1 bits/(s·Hz), 相比于 MRC 功率分配最大增益约为 0.5 bits/(s·Hz)。

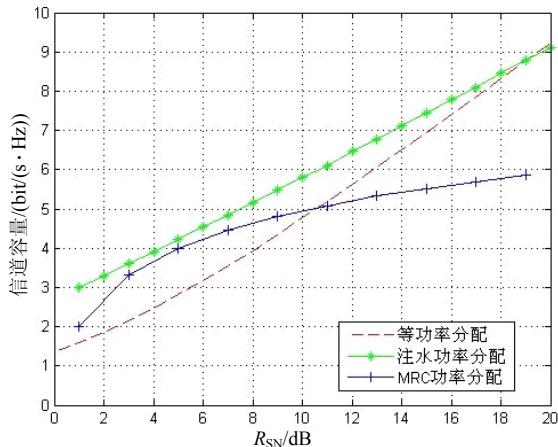


图3 三种功率分配算法的信道容量比较(发射天线数为4根)

图 4 和图 5 所示为不同发射天线数的 DAS 系统中, 采用不同功率分配算法时, 信噪比与信道容量的关系。从中可以清楚地看出功率分配算法对信道容量的增益。如图 4 所示, 蓝色线表示注水算法, 红色表示等功率分配方案。相比于单天线系统(虚

线), 随着天线数量的增加, DAS 系统的信道容量均有显著增加, 增益约为 0.2~1 bits/(s·Hz)。图 4 也显示了注水算法与等功率分配方案相比, 在信噪比较低时(<10 dB), 其信道容量大约有 1 bits/(s·Hz) 的提升。随着信噪比的增大, 注水算法的增益优势逐渐减小, 从仿真结果中可以观察到, 在信噪比为 20 dB 时注水算法与等功率分配系统的信道容量已经很接近。

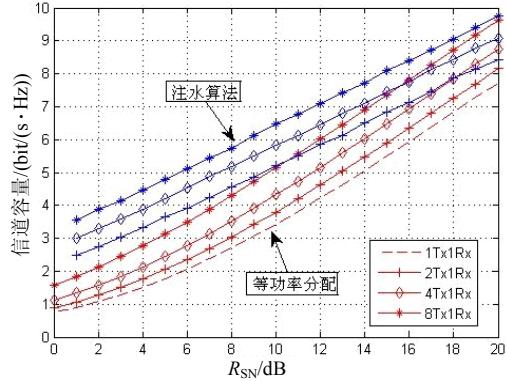


图4 注水算法和等功率分配两种系统的系统容量比较

如图 5 所示为注水算法(蓝色线)与 MRC(红色线)分配算法的信道容量与信噪比的关系。在信噪比小于 3 dB 或者大于 7 dB 的情况下, 采用注水算法的功率分配系统相比于 MRC 系统有显著的容量的增益。因此, 由仿真结果可知, 注水功率分配算法将发射功率适当地分配到各子信道中, 从而使 DAS 系统的信道容量有了显著的提升, 尤其是在低信噪比的条件下。

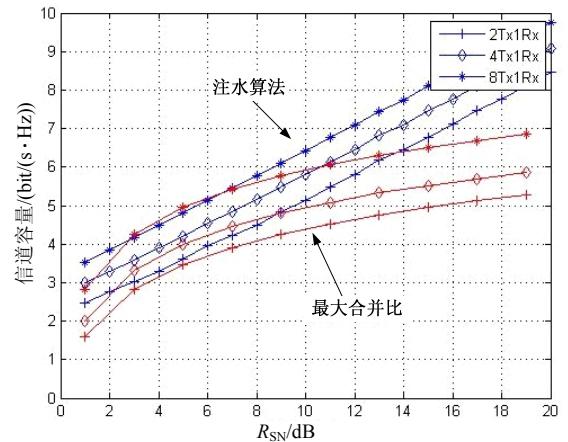


图5 注水算法和 MRC 功率分配两种系统的系统容量比较

4 结语

文中分析了 DAS 下行链路的功率分配方案。在 DAS 中采用注水功率分配算法, 通过与等功率分配和 MRC 分配方案比较, DAS 的信道容量有了很大改善。从结果可以得出在复合衰落信道的 DAS 中, 注水功率分配是最优的功率分配方案, 对在实际应用中具有指导意义。

参考文献

- [1] SALEH A, RUSTAKO A, ROMAN R. Distributed Antennas for In-door Radio Communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 1987, 35(12) :1245-1251.
- [2] 崔金, 李署坚, 杨文慧. 基于信道状态的 MIMO 预编码算法[J]. 信息安全与通信保密, 2011(01) :61-62.
- [3] 姜维, 唐俊华. 随机无线通信信道功率分配策略研究[J]. 信息安全与通信保密, 2013(01) :40-42.
- [4] YU W, GINIS G, CIOFFI M J. Distributed Multiuser Power Control for Digital Subscriber Lines[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(05) :1105-1115.
- [5] DAI L, ZHOU S, YAO Y. Capacity Analysis in CDMA Distributed Antenna Systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(06) : 2613-2620.
- [6] CAVERS K J. Single-User and Multiuser Adaptive Maximal Ratio Transmission for Rayleigh Channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, November 2000, 49(06) :2043-2050.
- [7] 孙琦, 吴勇, 郑昕, 等. 光纤通道技术在统一航空电子网络中的应用[J]. 通信技术, 2009, 42(05) :80-82.
- [8] 李冰冰. ROF 技术在网络融合中的应用[J]. 通信技术, 2012, 45(10) :50-51.
- [9] LO N. Maximal Ratio Transmission[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(10) : 1458-1461.

作者简介:

- 吴佳青 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式天线系统;
- 胡宗福 (1959-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤通信, 光载无线通信;
- 沈达 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为基于 ROF 的 60 GHz 高速无线接入;
- 杜天瑜 (1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为数字 ROF。

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>