

分布式天线系统的多用户分集

郑海波 王京 周世东 粟欣

(清华大学电子工程系清华信息科学与技术国家实验室 北京 100084)

摘要: 分布式天线系统(DAS)由于其具有更大的覆盖范围,较好的功率效率,以及更高的系统容量在近年来备受关注,但很多文献都只是基于以上几个方面进行分析,而没有考虑多用户分集。该文提出了一种考虑用户公平性的最小容量损失轮询调度算法,并以该算法为基础,从多用户分集的角度研究了基于迫零波束成形算法的下行分布式天线系统的信道容量。结果表明,在天线数目和总功率相同的情况下,采用分布式天线系统可以得到比集中放置天线系统(CAS)更大的多用户分集增益。最小容量损失轮询调度算法明显优于普通轮询调度算法,该算法对 DAS 和 CAS 都适用。

关键词: 移动通信; 分布式天线系统; 多用户分集; 信道容量; 轮询调度

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)11-2603-03

Multiuser Diversity in Distributed Antenna System

Zheng Hai-bo Wang Jing Zhou Shi-dong Su Xin

(Tsinghua National Laboratory of Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In recent years, there has been considerable interest in distributed antenna system due to its promising improvement in coverage, power efficiency and channel capacity. But many papers are only focused on these cases and do not consider multiuser diversity. A minimal capacity loss Round-Robin scheduling algorithm is presented in this paper. Coupled with this algorithm, the multiuser diversity is studied in downlink distributed antenna system based on zero-forcing beamforming. The results show that with the same antenna number and sum power Distributed Antenna System (DAS) is preferable to Co-located Antenna System (CAS) in term of multiuser diversity gain. The minimal capacity loss Round-Robin scheduling algorithm distinctly outperforms common Round-Robin scheduling algorithm and it can be used in DAS and CAS.

Key words: Mobile communication; Distributed Antenna System (DAS); Multiuser diversity; Channel capacity; Round-Robin (RR) scheduling

1 引言

在传统的蜂窝系统中,多天线一般集中放置在基站组成天线阵。这种系统一般称为集中天线系统(CAS)。天线集中放置实际上限制了天线的数量,不利于空间资源的充分利用,小区边界的用户往往性能很差。小区分裂和扇区化可以在一定程度上提高系统容量,但由于切换频繁、干扰和成本等因素的影响,也不能无限制地进行下去。分布式天线系统(DAS)将蜂窝系统中的基站简化为收发天线和信号转换装置,各天线用光纤连接到一个中央处理单元进行统一的收发信号处理^[1,2]。天线的数目由所需传输的业务量等因素决定,天线可以尽可能靠近无线用户终端,以便于减小无线信号发送功率,提高整个系统的功率效率。与蜂窝系统相比,分布式无线通信网络可以提供高得多的传输速率和系统容量。很多文献都是基于DAS的覆盖范围、功率效率等方面进行分析

^[2-4],而没有考虑多用户分集。多用户分集是利用不同用户的衰落信道的随机波动,总是选择信道条件最好的用户一起工作而得到多用户分集增益^[5]。

本文从多用户分集的角度研究了基于迫零波束成形算法的下行分布式天线系统的容量,并和CAS做了比较。迫零波束成形算法在用户数趋于无穷的时候可以逼近广播信道的和容量,但其要求发送天线的数目必须大于等于所有同时工作的用户天线数目之和。本文提出了一种考虑用户公平性的最小容量损失轮询调度算法,该算法在一般轮询调度算法的基础上选择用户间信道正交性最好的用户一起工作,在满足迫零波束成形算法用户数目限制的同时可以得到多用户分集增益。

2 系统模型及发送算法描述

考虑一个用户数为 K 的下行多用户分布式天线系统, n_T 根发送天线,每个用户为 n_j 根接收天线。第 j 个用户的信道矩阵为 $\mathbf{H}_j \mathbf{F}_j$ 。其中 \mathbf{H}_j 为 $n_j \times n_T$ 维矩阵,各元素为服从独立同分布,均值为 0,方差为 1 的复高斯随机变量。 \mathbf{F}_j

2006-04-17 收到, 2006-09-15 改回
国家自然科学基金(90204001)和国家 863-B3G(2003AA12331002)资助课题

为 $n_T \times n_T$ 维对角矩阵, 表示第 j 个用户分别到 n_T 个分布式天线的大尺度衰落。假定大尺度衰落仅取决于路径损耗而不考虑阴影衰落, 则

$$\mathbf{F}_j = \text{diag}(d_{1,j}^{-\gamma/2}, d_{2,j}^{-\gamma/2}, \dots, d_{n_T,j}^{-\gamma/2}) \quad (1)$$

其中 $d_{i,j}$ 表示第 i 根发射天线和第 j 个用户之间的距离, γ 为路径衰减因子。第 j 个用户接收到的信号可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_j &= \mathbf{H}_j \mathbf{F}_j \sum_{i=1}^K \mathbf{T}_i \mathbf{b}_i + w_j \\ &= \mathbf{H}_j \mathbf{F}_j \mathbf{T}_j \mathbf{b}_j + \mathbf{H}_j \mathbf{F}_j \tilde{\mathbf{T}}_j \tilde{\mathbf{b}}_j + w_j \end{aligned} \quad (2)$$

其中 \mathbf{T}_j 为第 j 个用户的波束成形矩阵, \mathbf{b}_j 为第 j 个用户的发送矢量。 $\tilde{\mathbf{T}}_j$ 和 $\tilde{\mathbf{b}}_j$ 分别表示 K 个用户的波束成形矩阵和发送矢量中去除 \mathbf{T}_j 和 \mathbf{b}_j 而形成的组合矩阵和矢量。定义为

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{T}}_j &= [\mathbf{T}_1 \cdots \mathbf{T}_{j-1} \mathbf{T}_{j+1} \cdots \mathbf{T}_K] \\ \tilde{\mathbf{b}}_j^T &= [\mathbf{b}_1^T \cdots \mathbf{b}_{j-1}^T \mathbf{b}_{j+1}^T \cdots \mathbf{b}_K^T] \end{aligned} \quad (3)$$

上标 T 表示转置。为了消除多用户干扰, 文献[6]提出的迫零波束成形算法对用户 $i \neq j$ 施加约束 $\mathbf{H}_i \mathbf{F}_i \mathbf{T}_j = \mathbf{0}$ 。定义

$$\tilde{\mathbf{H}}_j = [\mathbf{F}_1^T \mathbf{H}_1^T \cdots \mathbf{F}_{j-1}^T \mathbf{H}_{j-1}^T \mathbf{F}_{j+1}^T \mathbf{H}_{j+1}^T \cdots \mathbf{F}_K^T \mathbf{H}_K^T]^T \quad (4)$$

可以通过选择 \mathbf{T}_j 使其位于 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 的零空间来满足这个约束。要使 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 的零空间存在, 必须满足

$$n_T - \sum_{j=1, j \neq k}^K n_j > 0 \quad \forall k \quad (5)$$

即要求发送天线的数目必须大于等于所有同时工作的用户天线数目之和。采用迫零波束成形算法可以把一个多用户下行的多天线系统转变成若干个平行独立的单用户多天线系统。定义

$$\mathbf{H}_j \mathbf{F}_j \mathbf{T}_j = [\mathbf{U}_j^{(1)} \mathbf{U}_j^{(0)}] \Sigma_j [\mathbf{V}_j^{(1)} \mathbf{V}_j^{(0)}]^H \quad (6)$$

为 $\mathbf{H}_j \mathbf{F}_j \mathbf{T}_j$ 的 SVD 分解。其中 $\mathbf{U}_j^{(1)}$ 和 $\mathbf{V}_j^{(1)}$ 分别对应于 Σ_j 的非零奇异值部分, 上标 H 表示复共轭转置。在迫零波束成形算法下要使用户 j 的信息速率最大, 可以在发射端采用 $\mathbf{T}_j \mathbf{V}_j^{(1)}$ 作为发射矢量, 接收端采用 $\mathbf{U}_j^{(1)}$ 作为接收矢量, 发射功率按照 Σ_j 的非零奇异值进行注水分配。具体分析可见文献[6]。本文基于迫零波束成形算法研究下行分布式天线系统的容量主要原因是其实现复杂度低, 而且该算法在用户数趋于无穷的时候可以逼近广播信道的和容量[7]。

3 最小容量损失轮询调度算法

假设 N 为满足式(5)约束的最大的采用空间复用的方法共享同一信道的用户数, 一种简单的策略就是对于所有的 K 个用户采用轮询的方法依次选取不多于 N 个用户同时工作, 直到所有的用户都选择完毕。这种方法虽然能保证用户的公平性, 但不能避免空间相关性强的用户同时工作的情况。而在这种情况下采用迫零波束成形算法抵消其他用户的干扰会有很大的发送功率损失, 从而影响了系统容量的提高。采用普通的轮询调度算法得不到多用户分集的好处。

一种实际的方法是将轮询调度算法和用户选择结合起来, 每次轮询的时候都选择空间正交性最好的用户同时工

作。因为如果同时工作的用户理想正交, 那么发端的迫零运算实际上就相当于一个矩阵旋转运算, 从而没有因抵制其他用户的干扰而造成的容量损失。当然, 这种理想情况只有在用户数趋近无穷的时候才能实现, 这其实也就是迫零波束成形算法能逼近广播信道和容量的原因。实际情况中只要选择用户间信道正交性最好的用户一起工作, 就可以在满足迫零波束成形算法用户数目限制的同时可以得到多用户分集增益。文献[7]提出了一种用户选择的算法, 但其只考虑了用户端是单天线的情况, 而且其选择准则考虑用户信道间的正交性和信道的增益的综合作用结果。但对于轮询调度算法, 由于为了兼顾公平性, 每个用户无论信道增益强度如何, 都有机会占用信道。因此在用户选择的时候, 信道间的正交性是主要起作用的因素。如果在判定进行用户选择的过程中, 同时考虑了用户信道的强度, 很可能某用户虽然和其他已选择的用户正交性较弱, 但因为其信道增益大而被选择, 从而影响了用户对用户信道正交性的判断。在本文提出的结合用户选择的轮询调度算法中, 以迫零过程中容量的损失为判断用户间正交性的量度。很显然, 用户间的正交性越好, 容量的损失越小。在本文的仿真中将把文献[7]的方法推广到用户端是多天线的情况, 并和本文提出的算法进行比较。

由于在用户选择的过程中迫零造成的容量损失可以定义为当前已经选择用户的和容量和这些用户为抵消新增的用户干扰而进行迫零操作后的和容量之差。由于在用户选择过程中, 已经选择的用户的和容量不变, 所以可以用迫零后当前已选择用户的和容量的最大化表征最小容量损失。每次用户选择都在所有未选择的用户中选择使迫零后当前已选择用户的和容量的最大的用户, 直到所有用户选择完毕。具体用户选择步骤如下:

步骤 1 $m = 1, S = \{1, 2, \dots, K\}$ 。

步骤 2 从集合 S 中任选用户 k_1 , $\Theta_m = \{k_1\}$, $S = S \setminus \Theta_m, i = 1$ 。

步骤 3 定义 $\tilde{\mathbf{H}}_{k_i} = [\mathbf{F}_{k_1}^T \mathbf{H}_{k_1}^T \cdots \mathbf{F}_{k_{i-1}}^T \mathbf{H}_{k_{i-1}}^T \mathbf{F}_{k_{i+1}}^T \mathbf{H}_{k_{i+1}}^T \cdots \mathbf{F}_{k_i}^T \mathbf{H}_{k_i}^T]$, 其中当 $l = 0$ 或 $l > i$ 时, $\mathbf{F}_{k_l}^T \mathbf{H}_{k_l}^T = \emptyset$, $k_{i+1} = \arg \max_{j \in S} \left(\sum_{l=1}^i \mathcal{C}_l \left(\mathbf{H}_{k_l} \mathbf{F}_{k_l} \times \text{null} \left([\tilde{\mathbf{H}}_{k_i} \cup \mathbf{F}_j^T \mathbf{H}_j^T]^T \right) \right) \right)$ 其中 $\text{null}(\mathbf{T})$ 表示信道矩阵 \mathbf{T} 的零空间, $\mathcal{C}(\mathbf{T}) = \sum_{r=1}^R$

$\log \left(1 + \frac{\rho_k}{\sigma^2} \Lambda_k \right)$ 为信道矩阵 \mathbf{T} 的信道容量, R 为 $\mathbf{T} \mathbf{T}^H$ 的秩, σ^2 为噪声方差, Λ_k 是矩阵 $\mathbf{T} \mathbf{T}^H$ 的特征值, ρ_k 为发送功率,

可以通过功率注水得到: $\rho_k = \left(\mu - \frac{\sigma^2}{\Lambda_k} \right)^+ \sum_{r=1}^R \rho_k = P$ 。

步骤 4 $\Theta_m = \Theta_m \cup \{k_{i+1}\}, S = S \setminus \Theta_m, i = i + 1$ 。

步骤 5 重复步骤 3 到步骤 4 直到 $i = N$ 或 $S = \emptyset$, 一次轮询完毕。 $m = m + 1$ 。

步骤 6 重复步骤 2 到步骤 5 直到 $S = \emptyset$, 全部用户轮询完毕。

4 仿真分析

考虑有 6 根发送天线, 每个用户为 2 根接收天线的分布式天线系统。发送天线采用文献[3]的方法在给定圆形区域内等概率随机分布。作为对照, CAS 的发送天线在圆心集中放置。DAS 和 CAS 天线数目和发射功率相同。用户都是等概率随机分布。路径衰减因子 $\gamma = 4$ 。

图 1 比较了本文提出的最小容量损失轮询调度算法和文献[7]的算法推广到用户端是多天线的情况下在不同信噪比下系统的 10% 中断率和容量。仿真结果表明只考虑用户间正交性的最小容量损失轮询调度算法是优于同时考虑信道增益和正交性的算法。

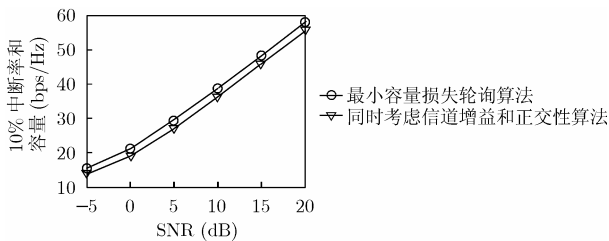


图 1 算法比较($K=120$)

图 2 比较了最小容量损失轮询调度算法和用户随机选择的普通轮询调度算法下 DAS 和 CAS 的 10% 中断率和容量和信噪比之间的关系。用户数 $K=120$ 。

图 3 比较了最小容量损失轮询调度算法和普通轮询调度算法下 DAS 和 CAS 的 10% 中断率和容量和用户数之间的关系。SNR=10dB。

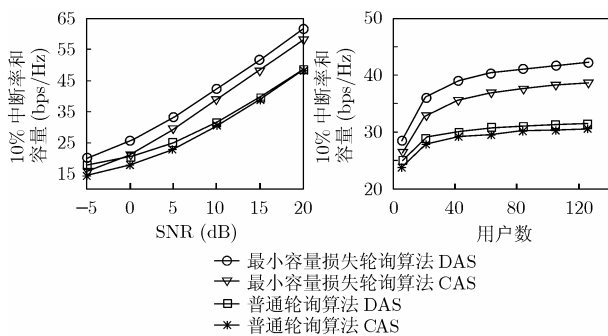


图 2 DAS 和 CAS 容量比较($K=120$)

图 3 DAS 和 CAS 容量比较(SNR=10dB)

由图 2 和图 3 可见, 采用本文提出的最小容量损失轮询调度算法, 在不同信噪比和不同用户数的情况下, DAS 相比 CAS 都能得到明显的容量分集增益。无论是 DAS 还是 CAS, 采用最小容量损失轮询调度算法都能得到比普通轮询调度算法更高的信道容量。如果采用普通的轮询调度算法, 则 DAS 的容量分集增益不明显。特别是在高信噪比时, DAS 和 CAS 的容量曲线几乎重合。在 DAS 中由于天线的分布特性比 CAS 有更大的空间自由度, 采用用户选择策略选择到相对正交性好的用户的几率更大一些。因此能得到明显的容量

分集增益。如果不进行用户选择则利用不到这个自由度, 也就没有多用户分集增益。图 2 中采用普通调度算法在低信噪比下也有优势, 主要是因为低信噪比时噪声占优, DAS 由于接入距离近有功率上的优势, 所以容量也较大。而高信噪比的时候干扰占优, 不进行用户调度, 就得不到多用户分集的好处。

5 结束语

本文提出了一种最小容量损失轮询调度算法, 该算法在一般轮询调度算法的基础上选择用户间信道正交性最好的用户一起工作, 可以在保证用户公平性的同时得到多用户分集增益。以该算法为基础, 从多用户分集的角度研究了基于迫零波束成形算法的下行分布式天线系统的信道容量。结果表明, 在天线数目和总功率相同的情况下, 采用分布式天线系统可以得到比集中放置天线系统(CAS)更大的多用户分集增益。最小容量损失轮询调度算法明显优于普通轮询调度算法, 该算法对 DAS 和 CAS 都适用。

参考文献

- [1] Zhou S D, Zhao M, and Xu X B, *et al.* Distributed wireless communication system: A new architecture for future public wireless access [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(3): 108-113.
- [2] Clark M V, Willis T M III, and Greenstein L J, *et al.* Distributed versus centralized antenna arrays in broadband wireless networks [A]. Proc IEEE Vehicular Technology [C]. Rodes, Greece: IEEE Vehicular Technology Society, 2001, 1: 33-37.
- [3] Zhuang H R, Dai L, and Xiao L, *et al.* Spectral efficiency of distributed antenna system with random antenna layout [J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(6): 495-496.
- [4] Xiao L, Dai L, and Zhuang H R, *et al.* Information-theoretic capacity analysis in MIMO distributed antenna systems [A]. Proc IEEE Vehicular Technology [C], Jeju, Korea: IEEE Vehicular Technology Society, 2003, 1: 22-25.
- [5] Tse D N. Multiuser diversity in wireless networks [A]. Wireless communication seminar [C], Stanford: Stanford University, 2000.
- [6] Spencer Q H, Swindlehurst A L, and Haardt M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2004, 52(2): 461-471.
- [7] Dimic G and Sidoropoulos N D. Low-complexity downlink beamforming for maximum sum capacity [A]. Proc IEEE Acoustics, Speech, and Signal Processing [C], Montreal, Canada: IEEE Signal Processing Society, 2004, 4: 701-704.

郑海波: 男, 1970 年生, 博士生, 研究方向为通信信号处理、多用户 MIMO 等。

王京: 男, 1958 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为未来宽带移动通信系统与网络。