

多天线系统中多中继传输的时间分配和功率分配优化方法

陈 遥 邱 玲

(中国科学技术大学 电子工程与信息科学系, 合肥 230027)

摘 要: 本文考虑单小区内的两个中继使用解码转发的方法为两个用户提供下行数据的场景, 基站和中继配置多根天线, 用户配置单天线。两中继使用相同的频率资源同时为两个用户提供服务。为减小两中继同时向两用户传输时产生的干扰, 中继到用户的传输采用协作干扰避免的策略; 相应的基站到中继的传输采用多用户空分复用的传输策略。本文在时间分配和功率分配两个方面对上述两跳传输过程进行了优化, 提出了两跳传输最优的时间分配策略。由于功率分配最优化问题难以求解, 本文提出了一种匹配链路容量的次优功率分配方法, 并对其进行简化以降低复杂度。通过仿真可以看出, 简化的功率分配方法与匹配链路容量的功率分配性能很接近; 所提出的时间分配和功率分配方案可以获得有效的性能提升。

关键词: 协作多中继; 多天线技术; 时间分配优化; 功率分配优化

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)03-0418-06

Time and Power Allocation Optimization for Multiple Relay Transmission in MIMO System

CHEN Yao QIU Ling

(Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: The scenario that base station (BS) transmits downlink data to two users with the assistance of two relays is considered in this paper. BS and relays have multiple antennas. The relays transmit to the users using the same frequency and time resources. Multi-user SDMA scheme and cooperative interference avoidance scheme are adopted in the first hop and the second hop, respectively, to reduce the interference generated when transmitting to or from the two relays simultaneously. Time allocation optimization and power allocation optimization are studied based on the joint usage of the two schemes. The optimal time allocation for the two hops is derived. The power allocation scheme at the base station is studied. Because it is difficult to solve the power allocation optimization problem directly, a suboptimal power allocation solution is proposed, which matches the two-hop transmission capacities of both the two relay links. The suboptimal power allocation solution can be realized by numerical iteration, and its simplified method is proposed to reduce complexity. Simulation results show that the performance of the simplified method is very close to the suboptimal power allocation solution, and the proposed time and power allocation methods effectively enhance the system throughput.

Key words: cooperative multi-relay; MIMO; time allocation optimization; power allocation optimization

1 引言

为了满足下一代无线通信的迫切需要, 如高速率的数据传输以及无处不在的信号覆盖, 中继节点 (RN, relay node) 辅助网络通信作为一种很有效的解决方案被提了出来^[1]。部署中继可以在不明显改变骨干网络

结构的同时显著提高性能。信息论领域关于中继的研究也由早期较为简单的单个中继辅助网络通信系统向较为复杂的多个中继辅助网络通信系统发展。已有研究表明, 在多个中继辅助网络通信系统中, 若中继和移动终端都已知信道信息, 则系统的容量与中继的个数呈对数增长关系^{[2][3]}。另外, 多天线技术的应用可以

在不增加系统带宽的条件下成倍的提高传输容量^[4],在基站和中继节点配备多根天线可以进一步提高系统的传输性能^[5]。由于中继存在上述优点,在最近讨论比较热烈的 LTE-Advanced 系统中,多天线中继也作为一项关键技术被引入。LTE-Advanced 系统中讨论的中继都以解码转发(DF)的方式工作,且一般只涉及两跳传输。

在多天线蜂窝系统中,为保证更广区域的信号覆盖,单个小区内可以存在多个中继。当两个中继在相同的时频资源上对两个用户进行下行传输时,会产生相互间的干扰。目前关于利用或者消除节点间干扰的方法已进行了很多研究^{[7][8]}。在两个中继都可以从基站得到两个用户的数据的前提下,两中继使用联合传输的方法为两用户提供服务的策略已经被讨论^[6],这种传输方式要求两个中继都从基站获得两个用户的数据,且需要两个中继之间交互信息。本文考虑基站通过多用户空分复用方式^[9]将两个用户的数据发给两个中继,之后两个中继同时分别向一个用户传送数据,并在传输时采取一定的干扰避免措施^[7],本文将这种传输方式称为多用户空分复用、多用户干扰避免方式,为表述方便,以下简称 MU-IA 方式。与一般中继传输类似,两跳容量的匹配程度会对 MU-IA 方式的性能产生明显影响,针对此问题,本文对 MU-IA 方式两跳传输的时间分配和基站端的功率分配进行了优化,给出了两跳传输最优的时间分配方法,并分析了基站端功率分配的优化问题,由于最优化问题难以求解,本文给出了一种次优的功率分配方法以及这种方法的简化方法,使两个传输阶段对应链路的容量尽量匹配。经仿真可以看出,优化方案可以明显提高系统容量;另外,本文将优化后的 MU-IA 方法与中继联合传输的方法进行了比较,仿真结果显示了优化的 MU-IA 方式的优势。

2 系统模型

考虑单小区内基站(BS)通过两个中继(RN1, RN2)在相同的时频资源上为两个用户(MS1, MS2)提供服务的系统模型^[6],如图1所示。由于基站和用户之间的距离较远,忽略基站和用户间的直接链路。

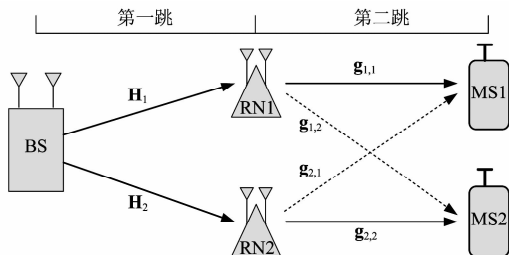


图1 单小区内通过两中继服务两用户的系统模型

假设系统模型中的各个信道均为满足块衰落(block fading)条件的平坦衰落窄带信道。基站和中继配置多根天线,用户单天线,基站和中继的天线数目分别为 L 和 M 。基站与两个中继之间的信道矩阵记为 \mathbf{H}_1 和 \mathbf{H}_2 ,中继1与两个用户之间的信道分别记为 $\mathbf{g}_{1,1}$ 和 $\mathbf{g}_{1,2}$,中继2与两个用户之间的信道分别记为 $\mathbf{g}_{2,1}$ 和 $\mathbf{g}_{2,2}$ 。假设单节点的发送功率受限,基站端的发射功率记为 P_{BS} ,两个中继的发射功率均为 P_{RN} 。接收端的噪声均为高斯白噪声。假设发送端可以获得与其相关的完全信道状态信息(CSIT):即基站可以获得 \mathbf{H}_1 和 \mathbf{H}_2 ,中继1可以获得 $\mathbf{g}_{1,1}$ 和 $\mathbf{g}_{1,2}$,中继2可以获得 $\mathbf{g}_{2,1}$ 和 $\mathbf{g}_{2,2}$ 。实际系统采用 TDD 双工方式时,发送端可以通过上下行的信道互易性获得信道状态信息,采用 FDD 双工方式时,需要接收端进行信道估计并向发送端反馈信道信息。由于信道估计、量化误差和延迟等原因会造成获得的信道状态信息与实际信道之间存在误差,但非理想信道信息的影响不在本文的研究范围之内。

解码转发也被称作再生转发,与非再生转发不同,采用解码转发时,两跳所使用的时间可以不同,可以根据两跳的信道传输速率分配传输时间,使两跳的容量尽量匹配。设完成两跳传输的总时间为一个时隙。一个完整的传输过程由两个阶段组成:基站在第一跳将两个用户的数据通过多用户空分复用方式发送给两个中继,中继将基站的数据解码并重新编码后在第二跳发送给两个用户。将第一跳两中继的容量记为 $C_1^{(1)}$ 和 $C_2^{(1)}$,第二跳两用户的容量记为 $C_1^{(2)}$ 和 $C_2^{(2)}$ 。

本文中第二跳两中继采用干扰避免的方法为两用户提供数据,相对于两中继采用联合传输的方式,干扰避免的方法不要求两个中继都从基站获得两个用户的数据,从而降低了对基站到中继链路质量的要求;另外,干扰避免的方式不要求两中继在发送时严格同步,对不便交互信息的两个中继来说,是一种更适应实际应用的方法。采用 MU-IA 方式时,与数据传输相关的信道主要有四个: $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \mathbf{g}_{1,1}$ 和 $\mathbf{g}_{2,2}$,另外两条信道 $\mathbf{g}_{1,2}$ 和 $\mathbf{g}_{2,1}$ 会干扰第二跳的传输。对于第二跳传输,称 $\mathbf{g}_{1,1}$ 和 $\mathbf{g}_{2,2}$ 为有用信道, $\mathbf{g}_{1,2}$ 和 $\mathbf{g}_{2,1}$ 为干扰信道。

3 MU-IA 传输方式时间分配和基站端功率分配的优化

本节首先介绍适用于两中继两用户场景 MU-IA 传输方式,然后重点探讨对两传输阶段时间分配方法和基站端的功率分配方案的优化。

第一个传输阶段基站将两个用户的数据使用多用

户空分复用的方式分发给两个中继。中继 k 收到的数据可以表示为:

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{W}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{H}_k \mathbf{W}_k \mathbf{s}_{\bar{k}} + \mathbf{n}_k \quad (1)$$

其中 $k=1,2$, 表示中继的编号, \bar{k} 表示集合 $\{1,2\}$ 中除去 k 后剩下的元素。式中的三项分别表示有用信号项, 干扰信号项和噪声项。 \mathbf{s}_k 表示基站发往中继 k 的信号向量, \mathbf{n}_k 表示噪声向量; \mathbf{W}_k 表示基站端为 \mathbf{s}_k 采用的预编码矩阵, 满足 $\text{trace}(\mathbf{W}_k \mathbf{W}_k^H) \leq p_k$, p_k 表示基站为 \mathbf{s}_k 分配的功率, 满足 $p_1 + p_2 = P_{BS}$ 。如果基站采用迫零 (ZF) 准则设计预编码矩阵, 使 $\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k = \mathbf{0}$, 基站到两中继的容量可以表示为:

$$C_k^{(1)} = \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{(\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k)(\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k)^H}{\sigma^2} \right) \quad (2)$$

中继解出第一阶段接收到的信号后重新编码为 d_k 发给用户, 用户 k 接收到的信号表示为:

$$y_k = \sqrt{P_{RN}} \mathbf{g}_{k,k} \mathbf{v}_k d_k + \sqrt{P_{RN}} \mathbf{g}_{\bar{k},k} \mathbf{v}_{\bar{k}} d_{\bar{k}} + n_k \quad (3)$$

式中 \mathbf{v}_k 表示中继 k 转发数据时采用的预编码向量, 与式(1)类似, 式中的三项分别表示有用信号项, 干扰信号项和噪声项。用户 k 的容量可以表示为:

$$C_k^{(2)} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{RN} \|\mathbf{g}_{k,k} \mathbf{v}_k\|^2}{P_{RN} \|\mathbf{g}_{\bar{k},k} \mathbf{v}_{\bar{k}}\|^2 + \sigma^2} \right) \quad (4)$$

设第一跳的传输用时为 $t^{(1)}$, 第二跳的传输用时为 $t^{(2)}$, $t^{(1)} + t^{(2)} = 1$ 。中继传输系统性能受限于两跳中性能较差的一跳, 用户 k 的等效容量可以表示为:

$$C_k = \min \{ C_k^{(1)} t^{(1)}, C_k^{(2)} t^{(2)} \} \quad (5)$$

系统容量可以表示为:

$$\begin{aligned} C &= C_1 + C_2 \\ &= \min(C_1^{(1)} t^{(1)}, C_1^{(2)} t^{(2)}) + \min(C_2^{(1)} t^{(1)}, C_2^{(2)} t^{(2)}) \end{aligned} \quad (6)$$

A. 时间分配策略的优化

式(6)中存在对一个时隙内两跳容量求最小值的操作, 如果两跳的容量不相等, 则必然造成容量浪费, 可以通过时间分配调整两跳的容量尽量匹配。对于单源单中继单目的系统, 如果已知第一跳容量 $C^{(1)}$ 和第二跳容量 $C^{(2)}$, 则最优的时间分配策略应满足 $C^{(1)} t^{(1)} = C^{(2)} t^{(2)}$, 这样可以确定

$$t^{(1)} = \frac{C^{(2)}}{C^{(1)} + C^{(2)}}, t^{(2)} = \frac{C^{(1)}}{C^{(1)} + C^{(2)}} \quad (7)$$

但对于两中继两用户的通信系统, 由于同时存在两组“基站-中继-用户”链路, 时间分配无法满足这两组链路的容量都匹配。如果设 $C^{(1)} = C_1^{(1)} + C_2^{(1)}$ 和 $C^{(2)}$

$= C_1^{(2)} + C_2^{(2)}$ 作为两跳的近似等效容量, 则式(7)确定了一种比较简单但非最优的时间分配策略, 式(7)给出的方法称为简单时间分配方法。

在已知 $C_1^{(1)}, C_2^{(1)}, C_1^{(2)}, C_2^{(2)}$ 的前提下, 这里给出两传输阶段的最优时间分配方法:

设第一传输阶段最优时间分配为 $t_{\text{opt}}^{(1)}$, 令 $t_{\text{candil}}^{(1)} = C_2^{(2)} / (C_1^{(1)} + C_1^{(2)})$, $t_{\text{candi2}}^{(1)} = C_2^{(2)} / (C_2^{(1)} + C_2^{(2)})$:

➤ 如果 $t_{\text{candil}}^{(1)} < t_{\text{candi2}}^{(1)}$: 如果 $C_2^{(1)} \geq C_1^{(2)}$, 则 $t_{\text{opt}}^{(1)} = t_{\text{candi2}}^{(1)}$, 否则 $t_{\text{opt}}^{(1)} = t_{\text{candil}}^{(1)}$;

➤ 如果 $t_{\text{candil}}^{(1)} \geq t_{\text{candi2}}^{(1)}$: 如果 $C_1^{(1)} \geq C_2^{(2)}$, 则 $t_{\text{opt}}^{(1)} = t_{\text{candil}}^{(1)}$, 否则 $t_{\text{opt}}^{(1)} = t_{\text{candi2}}^{(1)}$ 。

最优时间分配方法的证明见附录。可以看出, 最优的时间分配方法满足了两条“基站-中继-用户”链路其中一条的容量匹配要求, 这条“基站-中继-用户”链路的时间分配对系统容量的影响更为明显。

B. 功率分配策略的优化

基站对 \mathbf{s}_1 和 \mathbf{s}_2 进行功率分配优化时, 需要中继将第二跳的信道增益反馈给基站。假设基站按照功率分配因子 α ($0 \leq \alpha \leq 1$) 来分配功率, 即将 $p_1 = \alpha P_{BS}$ 的功率分配给中继 1, 将 $p_2 = (1 - \alpha) P_{BS}$ 的功率分配给中继 2; 根据式(2), 将第一跳基站到两中继的容量表示为 α 的函数, 记作 $C_1^{(1)}(\alpha)$ 和 $C_2^{(1)}(\alpha)$ 。

由之前的分析可知, 第一阶段最优的时间分配为 $t_{\text{candil}}^{(1)}$ 或 $t_{\text{candi2}}^{(1)}$, 使用功率分配使总容量最优化的问题表示为:

$$\begin{aligned} \max_{\alpha} \max \left\{ \min \{ C_1^{(1)}(\alpha) \cdot t_{\text{candil}}^{(1)}, C_1^{(2)}(1 - t_{\text{candil}}^{(1)}) \} \right. \\ \left. + \min \{ C_2^{(1)}(\alpha) \cdot t_{\text{candil}}^{(1)}, C_2^{(2)}(1 - t_{\text{candil}}^{(1)}) \} \right. \\ \left. \min \{ C_1^{(1)}(\alpha) \cdot t_{\text{candi2}}^{(1)}, C_1^{(2)}(1 - t_{\text{candi2}}^{(1)}) \} \right. \\ \left. + \min \{ C_2^{(1)}(\alpha) \cdot t_{\text{candi2}}^{(1)}, C_2^{(2)}(1 - t_{\text{candi2}}^{(1)}) \} \right\} \\ \text{s.t.} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \end{aligned} \quad (8)$$

上述最优化问题有多个求最大及求最小的操作存在, 直接求解较为复杂。下面考虑从使 MU-IA 方式两跳容量尽量匹配的思路出发, 设计基站端的功率分配方法。

I. 迭代功率分配方法

对于单条“基站-中继-用户”链路, 容量受限于两跳容量的较小者。对于 MU-IA 方式, 时隙分配不能保证两个用户两跳的容量都匹配。如果能调整 α 使:

$$C_1^{(1)}(\alpha) : C_1^{(2)}(\alpha) = C_2^{(1)} : C_2^{(2)} \quad (9)$$

则按照式(7)调节时间分配即可保证两个用户两跳容量匹配。

假设两个中继都使用最大发送功率进行发送,可以确定两个用户第二跳的容量。令 $C_1^{(2)} : C_2^{(2)} \triangleq K$, 在求解第一跳功率分配的问题时可视 K 为常数。

由式(9)并不容易得到 α 的解析表达式,可以使用数值迭代方法如弦截法来近似求解这个问题。满足式(9)后,可以直接根据式(7)进行时间分配,由于两跳容量匹配,其效果与最优时间分配是一致的。称这种方法为迭代功率分配方法。

II. 简化的功率分配方法

仍然沿用上述方法的思想,但仅简单地分配基站处的功率来匹配两跳的接收信干噪比,即调整 α 满足:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right)^N \cdot \frac{\det((\mathbf{H}_1 \mathbf{W}_1)(\mathbf{H}_1 \mathbf{W}_1)^H)}{\det((\mathbf{H}_2 \mathbf{W}_2)(\mathbf{H}_2 \mathbf{W}_2)^H)} \\ &= \frac{\|\mathbf{g}_{11} \mathbf{w}_{11}\|^2 \cdot (1 + (P_{RN}/\sigma^2) \|\mathbf{g}_{12} \mathbf{w}_{11}\|^2)}{\|\mathbf{g}_{22} \mathbf{w}_{22}\|^2 \cdot (1 + (P_{RN}/\sigma^2) \|\mathbf{g}_{21} \mathbf{w}_{22}\|^2)} \end{aligned} \quad (10)$$

其中 N 表示中继接收信号时使用的天线数目。简化的方法并不能使两跳的容量按照式(9)完全匹配,但起到了调节基站端功率分配使两跳容量尽量匹配的作用。由于容量并没有完全匹配,所以此时仍有必要按照最优的时间分配方法进行时间分配。称这种方法为简化的功率分配方法。

4 仿真结果

本节首先对采取不同时间分配方法及功率分配方法时 MU-IA 方式的平均性能以及两跳链路容量不匹配时的性能进行仿真,然后将经过功率分配和时间分配优化的 MU-IA 方式与已有文献里的方法进行仿真比较。

仿真中设定基站、中继、用户的天线数目分别为 $4/2/1$, 基站发送信号时,中继采用单天线进行接收,并根据天线增益进行接收天线选择。仿真中采用 MU-IA 方式时,第一跳采用迫零(ZF)的多用户 MIMO 传输方法^[9],完全消除两中继接收信号之间的干扰;第二跳采用 Max Virtual SINR^[7]的干扰避免方法。

图2给出了采用上述传输方法时 MU-IA 方式的平均容量以及两跳信道不匹配时的容量。由于基站可以拥有比中继更高的发送功率,这里假设第一跳的 SNR 比第二跳高 3dB。图2中,平均功率分配指基站处为 \mathbf{s}_1 和 \mathbf{s}_2 平均分配功率。由图2(a)可以看出,仅仅使用最优的时间分配可以使平均性能略有提高,而同时使用简化的功率分配和最优时间分配方案,或使用迭代功率分配时,可以使平均容量有明显提升。

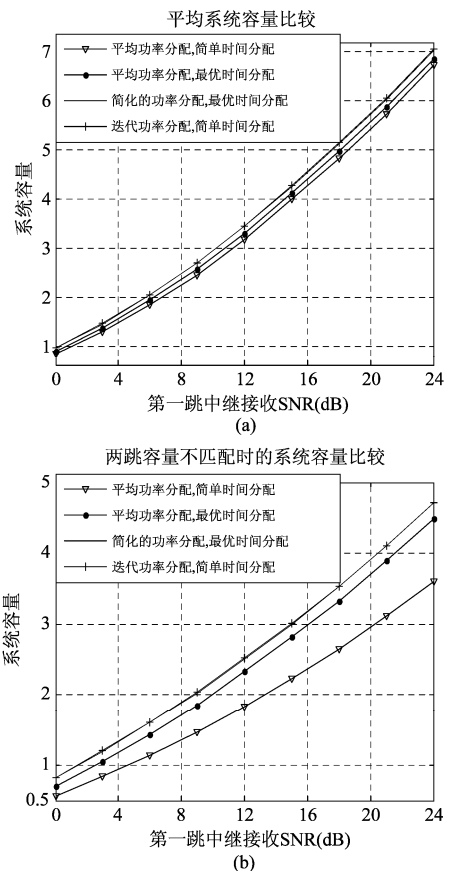


图2 经时间分配和功率分配优化后的性能与未优化时的性能比较

令 $\gamma = (C_{1\text{avg}}^{(1)} : C_1^{(2)}) / (C_{2\text{avg}}^{(1)} : C_2^{(2)})$, $\eta = \max\{\gamma, 1/\gamma\}$, 其中 $C_{1\text{avg}}^{(1)}, C_{2\text{avg}}^{(1)}$ 表示基站平均分配功率时第一跳的两中继的容量。易知 η 反映了功率均分时两跳性能的不匹配度, $\eta=1$ 表示两跳容量完全匹配, η 越大则表示越不匹配。图2(b)给出了两跳信道不匹配时 ($\eta > 4$) 的系统容量性能,相对于平均容量性能,优化后性能的提升更为明显,这说明所提出改进方案对于容量不匹配的情况更具有针对性。

由图2知,同时使用简化的功率分配和最优时间分配方法,与使用迭代功率分配性能很接近,而不需要进行迭代操作,是一种性能复杂度折中较好的方案。

如果第一跳使用多播方法,第二跳使用联合传输方法,则要求第一跳两中继都接收两个用户的数据,且多播容量受限于最差的一条“基站-中继”链路。MU-IA 方式在第一跳采用多用户空分复用方法,每个中继只接收一个用户的数据,与多播方法相比,达到相同的和速率时对基站到中继链路的要求较低,从而降低了第一跳成为系统容量瓶颈的可能性。接下来将使用简化的功率分配和最优时间分配的 MU-IA 方式与文献[6]中的三种方法进行比较,这三种方法都在第一阶段基站到两中继的传输采用多播(Multi-Cast)的方法,而第

二跳两中继到两用户的传输采用不同的协同传输的方法,分别称为:Cooperative MRC,ZF 和 BF1。仿真中使用这三种方法时,都按照式(7)为两个传输阶段分配时间。

设定第一跳中继接收的平均 SNR 为 12dB,第二跳有用信道的平均 SNR 比第一阶段低 3dB,有用信道和干扰信道强度之差由 -4dB 到 10dB 变化(负值表示干扰信道较强),优化的 MU-IA 方式和其它三种方法的性能比较如图 3(a)所示。由于干扰信道变弱更有利于干扰避免而不利于协作传输,可以看出,随着干扰信道的强度变弱,优化的 MU-IA 方法和 BF1 方法的性能逐渐变好,而 Cooperative MRC 方法的性能变差。可以看出,干扰信道越弱,优化的 MU-IA 方法相对于其它几种方法的性能优势越明显。

设第一阶段的平均 SNR 由 0dB 变化到 24dB,第二阶段有用信道的 SNR 总是比第一阶段低 3dB,干扰信道的强度比有用信道低 3dB,图 3(b)给出了几种策略的平均性能。可以看出优化的 MU-IA 方法的性能好于其它几种方法。Cooperative MRC 方法与优化的 MU-IA 方法性能比较接近,但 Cooperative MRC 方法要求两个中继在发送数据时严格同步,而优化的 MU-IA 方法不需要,也就是说优化的 MU-IA 方法更适合实际应用。

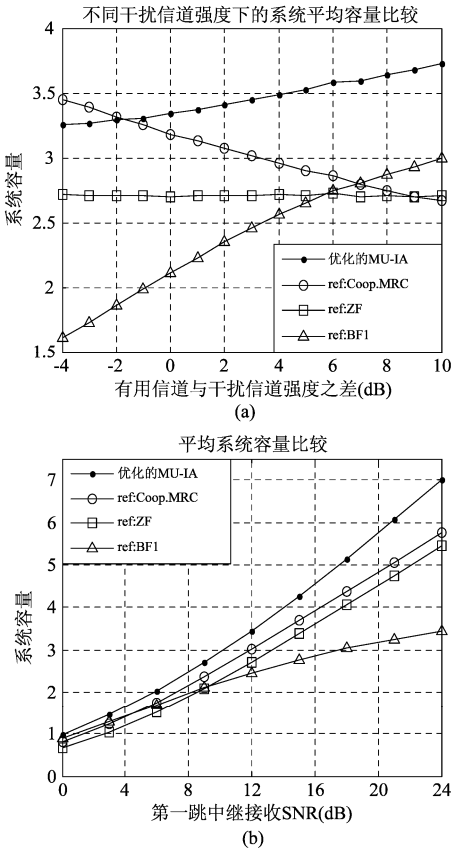


图3 优化的 MU-IA 方法与其他几种方法的性能比较

5 结论及进一步工作

本文对单小区内基站通过两个中继为两个用户下行数据的场景进行研究,第一跳采用多用户空分复用方法,第二跳采用协作干扰避免方法。本文给出了两跳传输最优的时间分配方法,并提出了一种基站端的次优功率分配方法及其简化方法,使两跳容量尽量匹配,从而提高系统容量。通过仿真可以看出,采用所提出的时间分配和功率分配方法后,MU-IA 方式的性能相对于使用平均功率分配和简单时间分配有明显提升;当干扰信道强度不太强时,优化的 MU-IA 传输策略与已有的 Cooperative MRC 等方法相比,有明显的性能优势。

单个小区内存在更多中继-用户对的情况将在进一步的工作中进行考虑,基站到中继的传输仍可采取多用户 SDMA 的传输方法,多中继到多用户的传输相应的需要采取更复杂的多点对多点的干扰避免方法;由本文第 3 节对时间分配方法的分析可知,最优的时间分配方法满足了两条“基站-中继-用户”链路中对系统容量影响较大的一条的容量匹配要求,对于多个中继-用户对的情况,时间分配方法也可按照此思路设计,使对系统容量影响最大的一条“基站-中继-用户”链路的容量尽量匹配;基站处的功率分配方法设计也可以沿用使各条“基站-中继-用户”链路两跳容量尽量匹配的思想。另外,在相同时频资源上调度过多的中继可能会产生比较严重的干扰,是否需要通过调度的方法减少在相同的时频资源上工作的中继-用户对以减少干扰,也是下一步工作中需要考虑的问题。

附录:

最优时间分配方法的证明:

将总容量和两用户分别的容量表示为第一跳时间 $t^{(1)}$ 的函数,分别记为 $C(t^{(1)})$, $C_1(t^{(1)})$ 和 $C_2(t^{(1)})$ 。设 $t_{\text{candil}}^{(1)} = C_1^{(2)} / (C_1^{(1)} + C_1^{(2)})$, $t_{\text{candi2}}^{(1)} = C_2^{(2)} / (C_2^{(1)} + C_2^{(2)})$, 暂假设 $t_{\text{candil}}^{(1)} < t_{\text{candi2}}^{(1)}$ 。这里首先使用分段讨论证明 $t_{\text{candil}}^{(1)} \leq t_{\text{opt}}^{(1)} \leq t_{\text{candi2}}^{(1)}$:

对于 $t^{(1)} < t_{\text{candil}}^{(1)}$, 由于 $C_1^{(1)} t_{\text{candil}}^{(1)} = C_1^{(2)} (1 - t_{\text{candil}}^{(1)})$, 可以得到

$$C_1(t^{(1)}) = \min \{ C_1^{(1)} t^{(1)}, C_1^{(2)} (1 - t^{(1)}) \} = C_1^{(1)} t^{(1)}$$

$$C_1(t^{(1)}) < C_1^{(1)} t_{\text{candil}}^{(1)} = \min \{ C_1^{(1)} t_{\text{candil}}^{(1)}, C_1^{(2)} (1 - t_{\text{candil}}^{(1)}) \}$$

其中 $C_1(t_{\text{candil}}^{(1)}) = \min \{ C_1^{(1)} t_{\text{candil}}^{(1)}, C_1^{(2)} (1 - t_{\text{candil}}^{(1)}) \}$, 所以有 $C_1(t^{(1)}) < C_1(t_{\text{candil}}^{(1)})$, 类似的, 由 $t^{(1)} < t_{\text{candil}}^{(1)} < t_{\text{candi2}}^{(1)}$ 可得到 $C_2(t^{(1)}) < C_2(t_{\text{candil}}^{(1)})$, 所以:

$$C_1(t^{(1)}) + C_2(t^{(1)}) < C_1(t_{\text{candil}}^{(1)}) + C_2(t_{\text{candil}}^{(1)})$$

可以得到系统容量的比较:

$$C(t^{(1)}) < C(t_{\text{candi1}}^{(1)})$$

同理对 $t^{(1)} \geq t_{\text{candi2}}^{(1)}$ 可最终得到 $C(t^{(1)}) < C(t_{\text{candi2}}^{(1)})$,

这样, $t_{\text{candi1}}^{(1)} \leq t_{\text{opt}}^{(1)} \leq t_{\text{candi2}}^{(1)}$ 即得到证明。

对于 $t_{\text{candi1}}^{(1)} \leq t^{(1)} \leq t_{\text{candi2}}^{(1)}$, 易知:

$$C_1(t^{(1)}) = \min \{ C_1^{(1)} t^{(1)}, C_1^{(2)} (1-t^{(1)}) \} = C_1^{(2)} (1-t^{(1)})$$

$$C_2(t^{(1)}) = \min \{ C_2^{(1)} t^{(1)}, C_2^{(2)} (1-t^{(1)}) \} = C_2^{(1)} t^{(1)}$$

系统容量表示为:

$$\begin{aligned} C(t^{(1)}) &= C_1(t^{(1)}) + C_2(t^{(1)}) = C_1^{(2)} (1-t^{(1)}) + C_2^{(1)} t^{(1)} \\ &= C_1^{(2)} + (C_2^{(1)} - C_1^{(2)}) t^{(1)} \end{aligned}$$

可以看出 $C(t^{(1)})$ 是关于 $t^{(1)}$ 的线性单调函数, 其单调性由 $(C_2^{(1)} - C_1^{(2)})$ 的符号决定。要使 $C(t^{(1)})$ 取得最大, 当 $(C_2^{(1)} - C_1^{(2)})$ 为正时应有 $t_{\text{opt}}^{(1)} = t_{\text{candi2}}^{(1)}$, 当 $(C_2^{(1)} - C_1^{(2)})$ 为负时应有 $t_{\text{opt}}^{(1)} = t_{\text{candi1}}^{(1)}$, 当 $C_2^{(1)} = C_1^{(2)}$ 时, $t_{\text{opt}}^{(1)}$ 可以取 $[t_{\text{candi1}}^{(1)}, t_{\text{candi2}}^{(1)}]$ 区间上的任意值。

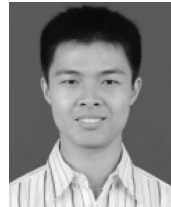
如果假设 $t_{\text{candi2}}^{(1)} < t_{\text{candi1}}^{(1)}$, 用相同的方法可以得到对称的结果。

参考文献

- [1] Ralf Pabst, Bernhard H. Walke, Daniel C. Schultz, Patrick Herhold, Halim Yanikomeroglu et al. Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio [J]. IEEE Commun. Mag., 2004, vol. 42, no. 9: 80-89.
- [2] Helmut Bolcskei, Rohit U. Nabar, Ozgur Oyman and Argyaswami J. Paulraj. Capacity scaling laws in MIMO relay networks [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2006, vol. 5, no. 6: 1433-1444.
- [3] Gerhard Kramer, Michael Gastpar and Piyush Gupta. Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2005 vol. 51, no. 3: 765-779.
- [4] Andrea Goldsmith, Syed Ali Jafar, Nihar Jindal, and Sriram Vishwanath. Capacity limits of MIMO channels [J]. IEEE J. Sel. Areas Commun., 2003, vol. 21, no. 5: 684-702.

- [5] Yijia Fan and John Thompson. MIMO Configurations for relay channels: Theory and Practice [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2007, vol. 6, no. 5: 1774-1786.
- [6] Jian Zhao, Marc Kuhn, Armin Wittneben and Gerhard Bauch. Cooperative Transmission Schemes for Decode-and-Forward Relaying [C]. Proc. of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2007, Athens, Greece.
- [7] Randa Zakhour and David Gesbert. Coordination on the MISO interference channel using the virtual SINR framework [C]. Proc. ITG/IEEE Workshop on Smart Antennas (WSA), 2009, Berlin, Germany.
- [8] Randa Zakhour and David Gesbert. Distributed multicell MISO precoding using the layered virtual SINR framework [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2010, vol. 9, no. 8: 2444-2448.
- [9] Quentin H. Spencer, A. Lee Swindlehurst and Martin Haardt. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels [J]. IEEE Trans. Signal Process., 2004, vol. 52, no. 2: 461-471.

作者简介



陈 遥 (1986-), 男, 出生于河南济源, 2008 年获中国科学技术大学学士学位; 现为中国科学技术大学通信与信息系统专业在读硕士研究生, 主要研究方向为无线多天线中继技术。

E-mail: chy04@mail.ustc.edu.cn



邱 玲 (1963-), 女, 生于江苏南京, 1999 年获中国科学技术大学博士学位; 现为中国科学技术大学电子工程与信息科学系教授、博士生导师。研究方向为宽带、空时无线通信方法, 包括 OFDM 技术、空时编解码方法、协作通信技术、MIMO-OFDM 信道估计以及自适应均衡、多用户 MIMO (MIMO-OFDM) 无线通信系统中的收发处理方法和多用户调度算法以及跨层协议和跨层优化算法。E-mail: lqiu@ustc.edu.cn