文章编号:1001 - 893X(2011)05 - 0095 - 04

基于不同调度算法的多用户分集 MIMO 中继信道容量分析*

杨 亮,王晓灵,刘吉宁

(暨南大学 信息科学技术学院 电子系,广州 510632)

摘 要:采用平均容量性能来定量分析多用户分集多输入多输出(MIMO)中继信道,中继节点使用放大转发(Amplify - and - forward,AF)协议将接收到的源节点的发送信号重发给目的节点。研究了多用户 MIMO 中继信道的不同调度算法,即容量公平、最大特征根、最小特征根调度策略和空间独立性调度算法,结果表明空间独立性调度算法有最优容量性能。但是,矢量反馈调度策略的应用使得反向链路容量有较高的反馈负载,而相比于矢量反馈策略,标量反馈方案的反馈量较小。在选择调度方案的时候要充分考虑到这些特性,权衡利弊并折衷选择适宜的调度策略。

关键词:多用户分集;MIMO;中继信道;调度算法;信道容量

中图分类号:TN92 **文献标识码**:A doi:10.3969/j.issn.1001 - 893x.2011.05.020

Capacity Analysis of MIMO Relay Channels with Multiuser Diversity under Different Scheduling Policies

YANG Liang, *WANG Xiao-ling*, *LIU Ji-ning*

(Electronic Department, Information Science and Technology Institute, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: The performance of average capacity is used to quantitatively analyse the multiple-input multiple-output (MIMO) relay channels with multiuser diversity, where relay node uses the amplify - and - forward (AF) protocol to retransmit the received signal from the source to the destination. The multiuser MIMO relay channel scheduling algorithms such as Capacity Fairness Scheduling, Maximal Eigenvalue Scheduling and Minimal Eigenvalue Scheduling are studied. It can be conclude that spatial independence of the scheduling algorithm has optimal capacity performance. However, the application of vector feedback scheduling strategy allows the reverse link capacity of a higher feedback load. Compared with vector feedback strategy, the scalar feedback strategies have small amount of feedback. Therefore, during the actual scheduling, it should take full account of these characteristics, and then choose the appropriate scheduling policy on balance.

Key words: multiuser diversity; MIMO; relay channel; scheduling algorithm; channel capacity

1 引 言

最新研究进展表明,在多用户无线通信领域,人们可以通过数据包(Packet)调度策略在 MAC(Medium Access Control)层获取多用户分集,用户依此能够分配到具有最佳信道质量的无线频谱资源。多用户

* **收稿日期**:2011 - 03 - 22;**修回日期**:2011 - 04 - 07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61071114);广东省科技计划项目(2010A040306004);中央高校基本科研业务费专项资金项目(21610205);东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助课题(W200915)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61071114); Science and Technology Planning Project of Guangdong Province(2010A040306004); Fundamental Research Funds for the Central Universities(21610205); The Open Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory of Southeast University (W200915)

分集 MIMO 系统在文献[1－4]已经得到充分研究，文献[2]研究和探讨了多用户分集 MIMO 系统的多种不同调度算法，但是在接收端采用简单迫零处理方式使得其调度算法过于理想化，只能作为一种次优的传输策略。

3GPP LTE 以 OFDM/MIMO 作为基本技术，大量采用了目前移动通信领域最先进的技术和设计理念，从 Release 8 版本开始，LTE 已经完成了 Release 11版本。为了响应 ITU 关于 IMT－Advanced 国际建议的工作，将 LTE Release 10 以及后续版本又称为 LTE－Advanced，它是移动通信系统在 4G 阶段一个最重要的发展方向。上述提到的多用户分集调度算法是 LTE 中的关键技术，而中继技术目前则是无线通信领域的研究热点。LTE－Advanced 系统对通信系统容量要求极高，且在高频段的路径损耗和阴影衰落很大，难以实现无缝覆盖。采用无线中继技术不仅可有效地改善 LTE－Advanced 系统覆盖，而且能极大地提高系统容量。基于 lEEE 802.16j 标准的移动多跳中继系统的引入，使得宽带无线接入系统可以在低成本的前提下，有效地解决无线信道的衰落问题，实现无线宽带通信系统高速率、无处不在的覆盖目标。

最近，众多研究者的研究兴趣都集中在中继系统和 MIMO 系统两种概念的结合上，两种技术的融合可以更深层次利用多径衰落来提高信道容量。因此，研究者通常在中继系统的每个节点都配置 MIMO 天线[5－7]。文献[8,9]探讨了各节点配置单根天线的多用户分集中继信道的情况，而对于 MIMO 中继信道来说，现在的研究主要局限于单用户系统的情况。

本文采用类似于文献[2]的调度算法，探讨基于不同调度策略下的多用户分集 MIMO 无线中继网络性能，中继节点采用 AF(Amplify－and－Forward)协议来转发源节点到目的节点的信号，利用源节点和中继节点的空分复用技术作为 MIMO 中继信道优化传输策略来获取更高的信道容量，并分析比较不同调度策略下的平均容量。值得注意的是，MIMO 中继信道和多用户分集的结合不仅可以提供空间复用增益，而且可以提高通信可靠性。因此，这些调度算法可以运用于高速数据传输模式下的无线通信系统。

2 系统模型

考虑一个中继和 K 个用户的多用户 MIMO 中继系统(如图 1 所示)，在这里中继节点辅助源节点将信号传输给目的节点。假设所有的终端均配置 N 根天线且用户期望得到的信号是相同的，同时，源节点和目的中继节点都有相同的发射功率 P。本文考虑的是长距离传输或路径衰落导致直接链路信道质量差的场景，因此，在分析的时候将不考虑直接链路。

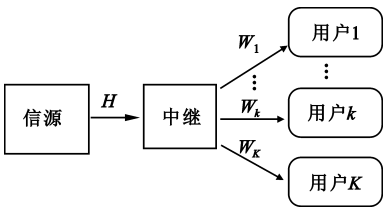

图 1 多用户 MIMO 中继系统框图

Fig.1 Block diagram of a multi－user MIMO relay system

本文中传输信道是采用两个时隙的正交信道。在第一个时隙，源节点将信号发送给中继节点。在中继节点接收到的信号可以表示为

$$\boldsymbol{y}_R = \sqrt{\frac{P}{N}}\boldsymbol{H}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{n}_R \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{x}$ 表示源节点的发送信号，其协方差是 $\boldsymbol{I}_N$；$\boldsymbol{y}_R$ 代表中继节点接收到的信号；$\boldsymbol{n}_R$是中继节点处具有均值为零且协方差矩阵相同的循环复高斯加性白噪声；$\boldsymbol{H}$ 则是信道增益矩阵，$\boldsymbol{H}$ 中的元素是相互独立同分布的方差为 1 的复高斯变量。

在第二个时隙，中继节点使用 AF 协议，且用归一化因子 $G = \sqrt{P/E\{|\boldsymbol{y}_R|^2\}}$来归一化接收信号的发射功率，然后转发信号给目的节点。于是，从中继节点到第 kth 用户的接收信号可以表示为

$$\boldsymbol{r}^k = G\boldsymbol{W}^k\boldsymbol{y}_R + \boldsymbol{n}^k = \sqrt{\frac{P}{N}}G\boldsymbol{W}^k\boldsymbol{H}\boldsymbol{x} + (G\boldsymbol{W}^k\boldsymbol{n}_R + \boldsymbol{n}^k) \tag{2}$$

通过特征值分解(SVD)可以得到增益矩阵 $\boldsymbol{H}$ 和加权系数 $\boldsymbol{W}^k$，这样 MIMO 信道可以被分解为平行的 SISO(单输入单输出)信道[6,7]。于是，可以求得 MIMO 中继信道第 k 个用户的瞬时容量[6]：

$$C^k = 0.5\sum_{i=1}^{N}\mathrm{lb}\left(1 + \frac{P}{N}\lambda_i\frac{G^2 w_i^k}{G^2 w_i^k + 1}\right) = 0.5\sum_{i=1}^{N}\mathrm{lb}\left(1 + \frac{P}{N}\eta_i^k\right) \tag{3}$$

式中，λ_i 和 w_i^k 分别为 $\boldsymbol{H}\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}$和 $\boldsymbol{W}^k(\boldsymbol{W}^k)^{\mathrm{H}}$的特征根。与传统 MIMO 系统相比，本文将 $\eta_i^k = \lambda_i\frac{G^2 w_i^k}{G^2 w_i^k + 1}$看

作是子信道的等效增益,因此,随机变量 η_i^k 不再是独立的变量,而是与参数 λ_i 相关联的。为了便于分析研究,将 η_i^k 按升序方式排列,可以得到 $Y_1^k \leqslant Y_2^k \leqslant \cdots \leqslant Y_N^k$。

3　调度策略分析

中继节点的存在改变了传统意义上的多用户调度过程,调度方式可能存在于源节点,也可能存在于中继节点[9]。第一种情况,所有的用户在中继节点的协助下,将反馈信息返回给源节点,调度者在源节点处作调度决策。而第二种情况,用户在中继节点作出选择,它只需要中继节点反馈给源节点哪个用户被选择了,这种中继网络结构相对比较简单,本文将重点研究这种中继网络的相关性能。

在本节中,首先考虑 3 种标量反馈策略,即通过信号质量 $\{C^k\}_{k=1}^K$、$\{Y_1^k\}_{k=1}^K$ 和 $\{Y_N^k\}_{k=1}^K$ 来选择目标用户,然后给出空间独立性调度技术的容量分析。

3.1　容量公平调度策略

为保证调度公平性,数据包调用程序决定将用户 k^* 按比例进行公平调度[1]:

$$k^* = \arg \max_{k=1,2,\cdots,K} \frac{C^k}{E(C^k)} \tag{4}$$

式中,$E(C^k)$表示第 k 个用户在窗口长度为 t_c 的时间内的平均容量。如此,分式的分母部分可以长期维持公平,可以用一个指数低通滤波器来更新它[1]:

$$E(C^{k^*})(t+1) = \begin{cases} (1-1/t_c)E(C^{k^*})(t) + \frac{1}{t_c}C^{k^*}(t), \\ \text{如果第 } k^* \text{ 个用户被选择} \\ (1-1/t_c)E(C^k)(t), \text{其它} \end{cases} \tag{5}$$

使用比例公平算法,具有最佳信道条件的用户将获得较高的平均容量,而较差信道条件下也能获得相当多信道资源。在文献[3]中,作者指出上述调度算法在调度时间 t_c 足够长($t_c \to \infty$,远大于动态衰落相关时间)条件下总会减少挑选高瞬时信道容量用户。因此,目标用户 k^* 将通过下面的策略进行选择:

$$k^* = \arg \max_{k=1,2,\cdots,K} C^k \tag{6}$$

这个策略需要计算每个用户和每条瞬时信道的容量,并且反馈容量信息给源节点,其计算量相当大。

3.2　最大特征根调度策略

现在我们考虑采用等效子信道增益来选择目标用户以取代计算每个用户容量 C^k 的调度算法。

假定源节点已知信息 $\{Y_N^k\}_{k=1}^K$,源节点按照如下的规则去分配信道给用户[2]:

$$k^* = \arg \max_{k=1,2,\cdots,K} Y_N^k \tag{7}$$

依据这种技术方案,多用户 MIMO 中继系统的平均容量可表示为

$$C = 0.5\sum_{i=1}^{N} E\left\{\mathrm{lb}\left(1 + \frac{P}{N}Y_i^{k^*}\right)\right\} \tag{8}$$

3.3　最小特征根调度策略

我们从用户处得到 $\{Y_1^k\}_{k=1}^K$ 信息,源节点采用如下算式来选择用户[2]:

$$k^* = \arg \max_{k=1,\cdots,K} Y_1^k \tag{9}$$

类似于公式(8),只要确定被选择用户,就可以计算出平均容量。

3.4　空间独立性调度策略

如果每根发射天线和每个用户之间的信道是相互独立的,且用户充分使用每根天线。这种策略在信道分配的时候考虑到使全局网络系统容量最大化。因此,这种矢量反馈方式有利于提高系统总体容量[2]。不同于标量反馈,矢量反馈需要将 $[\eta_i^k]_{i=1}^N$ 中所有的 i 和 k 全部反馈给源节点。空间独立性调度策略允许每根天线单独选择目标用户,这与标量反馈情况下所有发射天线全部服务于单个用户情形完全不同。

对于任意发射天线 i,目标用户 k_i^* 与发射天线 i 紧密联系,我们可以通过下述算式进行选择[2]:

$$k_i^* = \arg \max_k \eta_i^k \tag{10}$$

值得一提的是,在源节点处已知完整信道状态信息(CSI),应用注水算法可以进一步提高系统容量。

4　数值分析

在本节中,我们分别计算了 4 种不同调度算法下系统能够获取的平均容量,图 2 和图 3 分别给出 $N=3$ 时不同调度策略下的仿真结果。从图中可以看出,空间独立性调度策略能够获取最高容量性能,而最小化特征值调度策略的性能最差。同时发现在 4 种调度策略下,随着用户数 K 的增加,系统的容量显著增加。当然,还需要在反馈信息数量和获取容量两方面权衡利弊,并折衷选择适宜的调度策略。

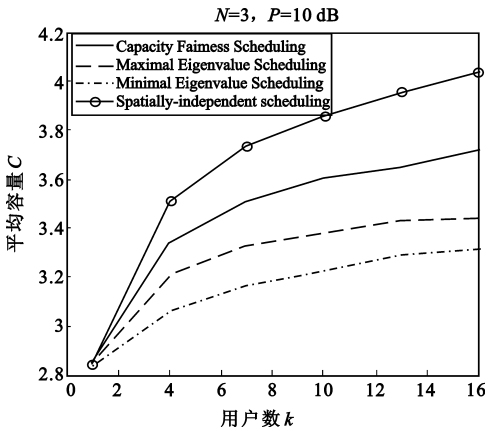

图 2　在不同调度算法下的用户数对平均容量影响的仿真结果

Fig.2 Average capacity versus the number of users under different scheduling algorithms

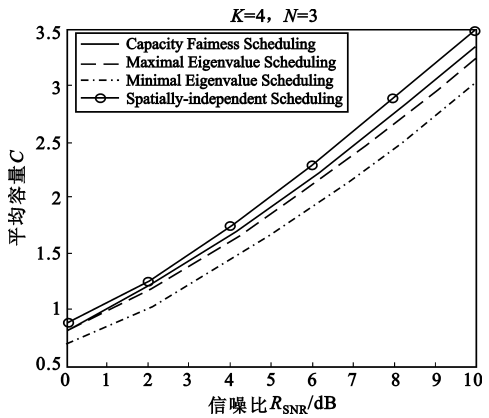

图 3　在不同调度算法下的信噪比对平均容量影响的仿真结果

Fig.3 Average capacity versus SNR under different algorithms

5　结束语

本文分析了多用户 MIMO 中继信道的不同调度算法。通过分析 3 种标量反馈策略(容量公平调度策略、最大特征根调度策略、最小特征根调度策略)和矢量反馈策略(空间独立性调度算法),结果显示,空间独立性调度算法有最优容量性能,但矢量反馈调度策略的应用使得反向链路容量有较高的反馈负载,相比矢量反馈策略,其它 3 种标量反馈策略的反馈量较小。因此,我们在实际调度的时候要充分考虑到这些特性,权衡利弊并折衷选择适宜的调度策略。中继调度算法的优化选择能有效地改善 LTE－Advanced 系统覆盖,而且极大地提高系统容量,为 LTE－Advanced 标准进一步发展提供理论指导。

参考文献:

[1] Viswanath P, Tse D N C, Laroia R. Opportunistic beamforming using dump antennas[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002, 48(6): 1277－1294.

[2] ChenC J, Wang L C. Performance analysis of scheduling in multiuser MIMO systems with zero－forcing receivers[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(7): 1435－1445.

[3] Chung J, Hwang C S, Kim K, et al. A random beamforming techniques in MIMO systems exploiting multiuser diversity [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(5): 848－855.

[4] Hochwald B M, Marzetta T L, Tarokh V. Multiple－antenna channel hardening and its implications for rate feedback and scheduling[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(9): 1893－1909.

[5] Bölcskei H, Nabar R U, Oyman ö, et al. Capacity scaling laws in MIMO relay networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(6): 1433－1444.

[6] Fan Y, Thompson J. MIMO configurations for relay channels: theory and practice[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(5): 1774－1786.

[7] Tang X, Hua Y. Optimal design of non－regenerative MIMO wireless relays[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(4): 1398－1407.

[8] Zhang X, Wang X, Ji X. Multiuser diversity in multiuser two－hop cooperative relay wireless networks(TCRN): system model and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicle Technology, 2009, 58(2): 1031－1036.

[9] Kim J B, Kim D. Comparison of two SNR－based feedback schemes in multiuser dual－hop amplify－and－forward relaying networks[J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(8): 557－559.

作者简介:

杨　亮(1977—),男,湖南邵阳人,2006 年获中山大学博士学位,现为讲师,主要研究方向为新一代无线通信技术;

YANG Liang was born in Shaoyang, Hunan Province, in 1977. He received the Ph.D. degree from Zhongshan University in 2006. He is now a lecturer. His research concerns new generation wireless communications.

Email: yangliang_xian@163.com

王晓灵(1987—),女,河南安阳人,2008 年获解放军信息工程大学学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为 LTE 功率控制。

WANG Xiao－ling was born in Anyang, Henan Province, in 1987. She received the B.S. degree from PLA Information Engineering University in 2008. She is now a graduate student. Her research concerns the power control for LTE system.

Email: wxl52100@126.com