

# 基于分集增益与能量增益的多用户分集性能研究<sup>\*</sup>)

郭金淮 赵雄伟 徐晓建 于宏毅

(信息工程大学信息工程学院 郑州 450002)

**摘要** 协作分集通过形成虚拟天线阵的方式可以有效降低无线信道衰落特性对系统性能的影响,当存在多个可用中继时,通常采用基于空时码的协作策略,该方法具有较高的实现复杂度。为了使系统容易实现,机会分集技术成为近来研究的热点,本文基于分集增益与能量增益对机会分集技术中的多用户分集做了研究,并与相同条件下基于空时码的协作策略作了性能比较。结果表明,多用户分集技术与基于空时码的协作策略具有相同的分集度,同时前者可以获得能量增益。

**关键词** 多用户分集,分集增益,能量增益

## Performance Research of Multi-user Diversity Technologies Based on Diversity Gain and Energy Gain

GUO Jin-Huai ZHAO Xiong-Wei XU Xiao-Jian YU Hong-Yi

(Information Engineering Institute, Information Engineering University, Zhengzhou 450002)

**Abstract** Cooperative diversity can decrease the influence of channel fading to improve system performance effectively, when there are a lot of relays, the cooperative policy usually based STC which has high complexity. For simplicity of realization, opportunistic diversity technologies become the research hotspot. In this paper, the performance of multi-user diversity technologies is researched based on diversity gains and energy gains, and compared with the cooperative policy based on STC under the same condition. Results show that multi-user diversity technologies and cooperative policy based STC have same diversity order, and the former can achieve the benefits of energy accumulation.

**Keywords** Multi-user diversity, Diversity gain, Energy gain

## 1 引言

分集技术是无线通信系统克服信道衰落的有效途径。文[1]指出,分集技术的基本思想是在发射机与接收机之间建立多个独立信号路径以提高通信性能。传统分集技术主要指为克服无线信道的随机及衰落特性而提出的相关技术,包括时间分集、空间分集、角度分集、极化分集等。另外,基于协作通信技术提出的协作分集也属于传统的分集技术,比如说,文[2]研究的基于分布式空时码的分集方案即属于传统分集技术,其主要特点是将多个独立或接近独立的信道进行合并以降低无线信道的随机特性,使其统计特性接近常数,也就是说逼近高斯信道,以实现提高通信性能的目的。

也就是说,采用传统分集技术,可以获得分集增益,实现由随机信道向 AWGN 信道的转变。需要指出,当分集度达到一定程度时,由于其统计特性已经接近 AWGN 信道,分集度的进一步增加对系统性能的改善不大。同时,接收分集要求接收端有多个天线,采用接收分集可以获得能量累积的好处,该好处等效于文[4]研究的编码增益。

传统分集技术是一种宏观做法,其基本思想是基于一定方案将不同径信号合并起来,而不具体考虑各条径信道特性每一次变化及变化快慢。传统分集技术可以获得分集增益与能量累积的好处,同时,存在以下问题:

1)当分集度达到一定程度时,分集度的进一步增加对系

统性能的改善不大;

2)通常需要有多个节点参与协作,带来的负荷较高;

3)特别地,对于基于分布式空时码的协作方案来说,对同步等系统性能要求较高,实际系统中难以实现。

为了克服上述问题,提出了多用户分集技术、机会波束形成技术及网络路径选择技术等,本文将上述技术统称为机会分集技术,区别于传统分集技术,机会分集技术可以认为是一种微观做法,该技术需要考虑信道特性的每一次变化及其变化的快慢。本文重点研究其中的多用户分集技术,其中,基于分集增益与能量增益的多用户分集性能研究是本文的主要工作。

文章第2部分主要介绍了传统分集技术的本质及其特点。第3部分主要介绍了多用户分集技术及其特点,并分别研究了该技术的分集增益、能量增益并通过仿真与基于 ST-BC 协作方案进行了性能比较。最后是结论。

## 2 传统分集技术

传统分集技术利用多个独立或接近独立的信道进行合并以降低无线信道的随机特性,使其统计特性接近常数,也就是说逼近高斯信道,以克服无线衰落信道影响,实现提高通信性能的目的。

同时根据文[3]的研究结果可知,当独立信道数比较大时,合并后的瑞利信道会向 AWGN 信道转变。设有  $N$  径瑞利信道,假设各径平均功率相同,根据平均总功率为 1 的限

<sup>\*</sup>)基金项目:国家自然科学基金(No. 60472064)。郭金淮 博士生,主要研究方向为无线传感器网节能通信及分布式协作通信;赵雄伟 博士生,主要研究方向为 Ad-hoc 网络,协作通信;徐晓建 博士生,主要研究方向为分布式 MIMO 及无线网络交互层设计;于宏毅 教授,博士生导师,主要从事信号处理、自组织网及传感器网的研究。

制,则  $N$  条径的功率可分别表示为  $\frac{|x_1|^2}{N}, \frac{|x_2|^2}{N}, \dots, \frac{|x_i|^2}{N}, \dots, \frac{|x_N|^2}{N}$ , 根据瑞利信道的特性,  $|x_i|^2$  服从均值为 1 的指数分布。

合并后的总功率表示为:

$$T_{power} = \frac{1}{N} (|x_1|^2 + |x_2|^2 + \dots + |x_N|^2)$$

整理得到,合并后总功率的均值  $E[T_{power}] = 1$ , 方差  $D[T_{power}] = \frac{1}{N}$ 。显然,随着瑞利信道径数的增加,其方差趋近于零,因此合并后信道统计特性趋近于常数,即高斯信道。同时,该结论也适应于其它随机信道。

时间分集、空间分集、角度分集、极化分集均属于传统分集技术,基于 STC(空时码)的分集技术也属于传统分集技术,可以实现空间及时间分集。在接收端使用多个天线可以实现接收分集,通常情况下,接收分集可以同时获得分集增益与能量增益。

### 3 多用户分集技术

如引言中所述,传统分集技术是一种宏观的作法,不具体考虑各条径信道特性每一次变化及变化快慢,存在若干不足,考虑实际系统需要,利用信道特性的每一次变化及其变化的快慢,机会分集技术成为近来研究的热点,如上所述,机会分集技术包括多用户分集技术、机会波束形成技术及网络路径选择技术等,本文重点研究其中的多用户分集技术。

文[5]较早地对多用户分集技术做了研究,前提条件是不同用户间为独立时变信道。通常可用于蜂窝移动通信系统,通过反馈基站获得基站与不同用户间信道信息,以跟踪信道瞬时状态,并选择与信道瞬时状态较好的用户进行通信,因此,系统多采用 TDMA 方式。以系统容量为性能指标,图 1 给出了采用多用户分集技术时,瑞利信道与高斯信道下的系统容量,可以看出,高斯信道下系统容量固定,而随着用户数的增加,瑞利信道环境中系统容量会变大,该结论同样适应于其它随机信道。

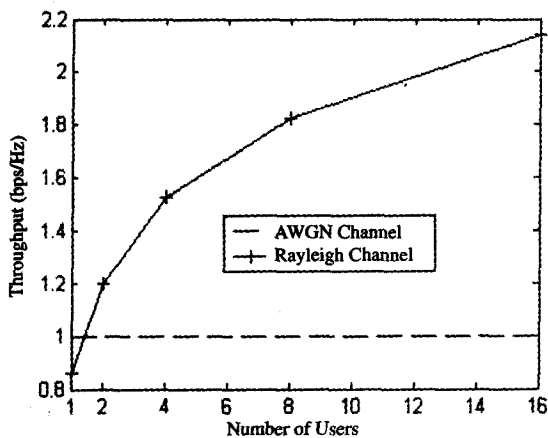


图 1 多用户分集系统容量

多用户分集技术的特点可以归纳如下:

- 1) 用户数目越大,系统性能越好。用户数目增加到一定程度后,系统性能改善量渐小。
- 2) 基站需要能够获得与多个用户间的信道信息,以跟踪信道瞬时状态,因此仅适应于慢衰落信道环境。

3) 实际系统中,考虑用户公平性等要求,需要对多用户分集技术进行修正,具体可参见文[1]。

下面主要从分集增益与能量增益两个角度出发,研究多用户分集技术的性能,并与基于 STBC 的协作方案进行性能比较。

#### 3.1 多用户分集技术的分集增益

分集增益通常用分集度来衡量,基于 SNR 统计特性的中断概率是研究某种协作方案分集度最常用的方法<sup>[2,6]</sup>。同理,考虑信噪比较高的情况,本文根据多用户分集技术的中断概率研究其分集度。

设系统有  $N$  个用户,不同用户与基站间信道均为独立瑞利衰落信道,分别表示为  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N$ , 考虑信道功率归一化,满足  $E(|x_i|^2) = 1$ , 则多用户分集技术的单位带宽容量可以表示为:

$$I_{MU} = \max_{i=1}^N \log_2 (1 + \gamma |x_i|^2) \quad (1)$$

其中,  $\gamma$  表示基站与任意用户通信时的平均信噪比。给定门限值  $R$ , 对应多用户分集技术的中断概率表示为:

$$\begin{aligned} P_{MU}^R &= P(I_{MU} < R) = P[\max_{i=1}^N \log_2 (1 + \gamma |x_i|^2) < R] \\ &= \prod_{i=1}^N P[\log_2 (1 + \gamma |x_i|^2) < R] = \prod_{i=1}^N (1 - e^{-\frac{2^R - 1}{\gamma}}) \end{aligned} \quad (2)$$

根据指数分布的性质,当平均信噪比  $\gamma$  较高时,上式整理为:

$$P_{MU}^R = \left( \frac{2^R - 1}{\gamma} \right)^N \quad (3)$$

可以看出,中断概率与信噪比的  $N$  次方成反比,因此对应分集度为  $N$ 。也就是说,采用多用户分集技术时,虽然每次只有一个用户参与通信,但其实现的分集度等于可供选择的用户数,采用基于 STBC 的协作策略时其分集度同样等于参与的用户数。也就是说,从分集增益角度考虑,多用户分集技术性能与基于 STBC 协作策略的性能相同。

#### 3.2 多用户分集技术的能量增益

由于多用户分集技术总是选择与最强径的用户进行通信,因此在固定总发射功率前提下,采用多用户分集技术可以获得能量增益,下面通过理论分析及仿真验证的方法来研究多用户分集技术可实现的能量增益。

##### 3.2.1 理论分析

上面分析了多用户分集技术的分集增益,通常情况下,分集增益决定采用该方案时系统的 BER 曲线斜率,分集度越高则系统性能越好。能量增益决定 BER 曲线的水平偏移量,同样能量增益越大,则系统性能越好,能量增益通常可以用接收信号的 SNR 均值来衡量。

采用与分集增益研究中相同的信道模型,不失一般性,选择与用户 1 通信时对应信噪比表示为:

$$\rho_1 = \gamma |x_1|^2 \quad (4)$$

结合指数分布的性质,可知  $\rho_1$  均值  $E[\rho_1] = \gamma$ , 方差  $D[\rho_1] = \gamma^2$ 。

采用多用户分集技术时,对应信噪比表示为:

$$\rho_{MU} = \gamma \max_{i=1}^N |x_i|^2 \quad (5)$$

令  $\max_{i=1}^N |x_i|^2 = X$ , 其分布函数表示为  $F(X) = P(X \leq x) = \prod_{i=1}^N P(|x_i|^2 \leq x) = (1 - e^{-x})^N$ , 对上式求导,得  $X$  的概率密度函数表示为:

$$f(x) = Ne^{-x}(1-e^{-x})^{N-1}, x \geq 0 \quad (6)$$

显然,采用多用户分集技术时,  $\rho_{MU}$  均值为  $\gamma \cdot E[X]$ , 由于根据式(6)难以直接得到  $\rho_{MU}$  均值的具体表达式, 下面根据  $N$  的具体取值通过仿真的方法研究  $\rho_{MU}$  的均值特性。

### 3.2.2 仿真结果

不失一般性,令  $\gamma=1$ , 考虑总发射功率相同及接收端有一个接收天线的情况,随着用户数  $N$  的变化,图 2 分别给出了基于多用户分集技术、基于 STBC 协作策略时接收端信噪比均值的变化趋势。

图中可以看出,基于 STBC 的协作策略接收端信噪比均值始终为 1, 不能获得能量增益。而采用多用户分集技术时可以获得能量增益,而且能量增益随着用户数的增加而提高。

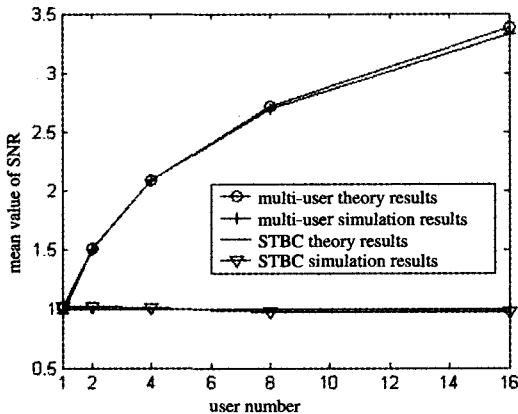


图 2 不同分集技术的信噪比均值特性

### 3.3 多用户分集与基于 STBC 协作方案性能比较

前面对多用户分集的性能做了详细研究,可以看出,相同条件下与基于 STBC 的协作策略相比,多用户分集技术可以获得相同的分集增益。另外,多用户分集技术还可以获得能量增益。下面通过仿真具体比较多用户分集技术与基于 STBC 的协作策略的误码性能。

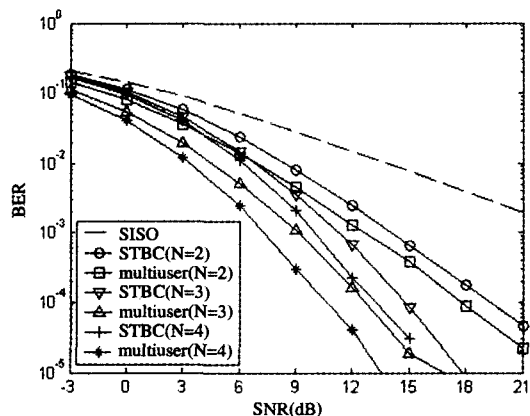


图 3 基于不同方案的系统性能比较

仿真中,采用 BPSK 信号及慢瑞利衰落信道,认为接收机已知信道状态信息。其中,用户数为 2、3、4 时,采用的 STBC 分别为 Alamouti 码<sup>[7]</sup>,文[8]中介绍的天线数为 3 的速率为 3/4 的空时分组码,文[9]中介绍的天线数为 4 的速率为 1/2 的空时分组码。上述三种空时分组码的速率分别为 1、3/4、1/2,由于 STBC 的速率不同,考虑公平性,仿真时要求不同方

案发射相同信息量时所消耗的总能量相同。仿真结果如图 3 所示,根据图 3 可以得到如下几点结论:

1) 单发、单收时系统性能最差,这是因为此时均不能获得分集增益与能量增益。

2) 对于基于 STBC 的协作方案和多用户分集技术的协作方案来说,协作用户数越多,系统性能越好。

3) 当协作用户数相同时,采用基于 STBC 的协作方案和多用户分集技术的协作方案对应的误码曲线有相同的斜率,原因是两者具有相同的分集度。同时可以看出,当用户数为 2、3、4 时,基于多用户分集技术的协作方案性能分别优于基于 STBC 的协作方案 1.5dB、2dB、3dB 左右。也就是说,用户数越多,多用户分集技术获得的能量增益越大,这与前面的理论分析一致。

**结论** 本文主要贡献有两点:一是根据实现方式的不同将分集技术分为传统分集技术与机会分集技术两种,并对上述两种分集技术的特点进行了分析与总结。二是基于分集增益与能量增益,研究了多用户分集技术的性能。在用户数及总发射功率相同的前提下,主要比较多用户分集技术与基于 STBC 协作策略的性能,可以看出两者可以获得相同的分集增益,同时前者可以获得能量增益的好处。结合理论分析及仿真结果可以看出,就系统误码性能来说,前者优于后者。另外,就系统要求来说,基于 STBC 的协作策略有严格的同步要求;而多用户分集技术需要跟踪信道状态,因此适用于慢衰落信道。

### 参考文献

- 1 Viswanath P, Tse D N C, Laroia R. Opportunistic beamforming using dumb antennas. *IEEE Trans Inform Theory*, 2002, 48(6): 1277~1294
- 2 Laneman J N, Wornell G W. Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks. *IEEE Trans Inf Theory*, 2003, 49(10): 2415~2425
- 3 Chen Z, Yuan J, Vucetic B. An improved space time trellis coded modulation scheme on slow Rayleigh fading channels. In: Proc. IEEE ICC'01, Helsinki, Finland, Jun 2001. 1110~1116
- 4 Tarokh V, Seshadri N, Calderbank A R. Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction. *IEEE Trans Inform Theory*, 1998, 44(2): 744~765
- 5 Knopp R, Humblet P. Information capacity and power control in single cell multiuser communications. In: Proc. IEEE Int Computer Conf. (ICC'95), Seattle, WA, June 1995
- 6 Laneman J N, Tse D N C, Wornell G W. Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(10): 3062~3080
- 7 Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE J. Select. Areas Commun*, 1998, 16(8): 1451~1458
- 8 Hochwald B, Marzetta T L, Papadias C B. A transmitter diversity scheme for wideband CDMA systems based on space-time spreading. *IEEE J. Select. Areas Commun*, 2001, 19(1): 48~60
- 9 Tarokh V, Jafarkhani H, Calderbank A R. Space-time block codes from orthogonal designs. *IEEE Trans Inform Theory*, 1999, 45(5): 1456~1467