

# 时分半双工 MIMO 中继系统性能分析

祖立军, 王 平, 王 玉 金, 韩 静, 刘富强

(同济大学嵌入式系统与服务计算教育部重点实验室宽带无线通信与多媒体实验室, 上海 200092)

**摘 要:** 分析并推导在解码-转发中继方式下时分半双工 MIMO 中继信道的容量公式, 在 2 种不同的中继选择算法下, 应用蒙特卡罗仿真比较 MIMO 中继系统与一般蜂窝系统的性能。仿真结果表明, 在使用适当的中继选择算法后, 与一般蜂窝系统相比, 时分半双工 MIMO 中继系统在容量、覆盖范围等方面均有更好的性能, 且中继用户的能量消耗较低。

**关键词:** 多输入多输出; 中继信道; 时分半双工; 解码-转发

## Performance Analysis of Time-division Half-duplex MIMO Relay System

ZU Li-jun, WANG Ping, WANG Yu-jin, HAN Jing, LIU Fu-qiang

(Broadband Wireless Communications and Multimedia Laboratory, Key Laboratory of Embedded System and Service Computing, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**【Abstract】** This paper derives the capacity formula of time-division half-duplex MIMO decoder-forward relay channel, and compares the performance between time-division half-duplex MIMO relay system and general cellular system by using Monte-Carlo simulation. Simulation results show that, due to the use of an appropriate relay selection algorithm, time-division half-duplex MIMO relay system is better than general cellular system in capacity, coverage. It is prominent that relay user need not use a high transmit power to obtain capacity gain.

**【Key words】** MIMO; relay channel; time-division half-duplex; decoder-forward

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.02.030

### 1 概述

下一代宽带无线通信系统需要具备超高的数据传输能力, 多输入多输出(MIMO)技术能够利用多天线间的协作, 产生分集复用增益, 被认为是未来宽带无线通信系统的关键技术之一。然而由于频谱资源稀缺, 可使用的频段都为较高频段, 而高频段信号的传输将受到无线环境中信道影响严重衰减。为解决该问题, 人们对中继技术进行研究。文献[1]提出了中继信道的概念; 文献[2]推导出了高斯信道下三节点无线中继信道的容量公式。为了在中继系统中利用空间分集增益, 文献[3-4]分别研究了单天线多中继传输时的空时编码以及信道容量问题。一些研究分析了中继信道中各节点配置了多天线的情况<sup>[5-6]</sup>。然而, 在上述研究中, 中继节点大多采用全双工方式。由于中继节点在同一频段上同时接收和发送信息会造成发送信号对接收信号的严重干扰, 因此本文考虑了应用的实际性, 在时分半双工 MIMO 中继场景下, 分析应用解码-转发中继方式的信道容量, 并对系统进行性能分析。

### 2 多天线三节点中继信道模型

多天线三节点中继信道模型如图 1 所示。该信道模型包括一个源节点 S、一个目的接收节点 D 和一个中继节点 R。每个节点都采用多天线技术。

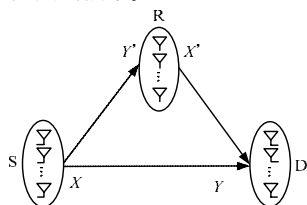


图 1 多天线三节点中继信道模型

文献[3]对一般的无线中继信道容量进行分析, 证明了三节点无线中继信道的容量为:

$$C = \max_{p(x,x')} \min \{I(X, X'; Y), I(X; Y, Y' | X')\} \quad (1)$$

其中, 第 1 项的是从源节点 S 到中继节点 R 和目的接收节点 D 这一广播信道传输的最大传输速率; 第 2 项是从源节点 S 和中继节点 R 到目的接收节点 D 这一多址接入信道传输的最大传输速率。

### 3 时分半双工 MIMO 中继系统

在实际中继系统中, 考虑到中继节点的射频设备的限制, 中继节点在同一频段上很难做到同时接收和发送信息。为了区分发送与接收, 一般采用时分半双工模式, 即中继节点用不同的时隙接收和发送信息。同时, 因解码-转发中继方式具有噪声不会被二次传递的优点, 已成为了研究领域主要考虑的中继转发方式。

使用解码-转发中继方式的时分半双工 MIMO 中继传输机制如图 2 所示。第 1 个时隙源节点向中继节点与目的接收节点广播数据信息, 此时中继节点对接收到的数据进行处理,

**基金项目:** 国家科技重大专项基金资助项目“IMT-Advanced 增强 MIMO 技术研发”(2008ZX03003); 国家“863”计划基金资助项目“基于移动中继技术的车辆通信网络的研究”(2007AA01Z239); 上海市重大科技攻关基金资助项目“宽带无线组网性能测试方法及其关键技术研究”(07dz15006\_2)

**作者简介:** 祖立军(1986-), 男, 硕士, 主研方向: 宽带无线通信; 王 平, 讲师、博士; 王 玉 金, 博士; 韩 静, 硕士; 刘富强, 教授、博士后

**收稿日期:** 2010-06-10 **E-mail:** liufuqiang@tongji.edu.cn

准备转发;第2个时隙只有中继节点进行数据信息的发送,源节点不发送数据,目的接收节点接收信号,然后与之前第1个时隙收到的源节点的广播信息进行最大比合并解码获得分集增益。

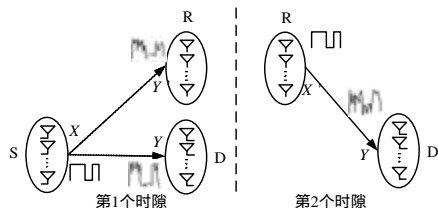


图2 多天线时分半双工解码-转发传输机制

### 3.1 容量公式推导

定义时隙分配比  $\mu$  为第1个时隙与第2个时隙的比值。假设各节点的天线数目都相等为  $M$ ;源节点的发射功率为  $P$ ;中继节点的发射功率为  $P'$ ;中继节点和目的接收节点的噪声协方差矩阵分别为  $N_0 I_M$  和  $N_0 I_M$  的零均值循环对称复高斯噪声向量。另外假设信道是平坦衰落,且接收端对信道状态  $H$  已知;而发射端对信道状态  $H$  未知且信道没有首选方向,这意味着信号独立且发射天线等功率。

对于第1个时隙,目的接收节点并不进行解码,此时广播信道的样本容量(单位为 bit/样本)为:

$$C_1 = \frac{\mu}{1+\mu} \max_{\mathbf{X}} I(\mathbf{X}; \mathbf{Y}) = \frac{\mu}{1+\mu} \sum_{i=1}^M \text{lb det}(1 + \frac{P}{MN_0} \lambda_{ri}) \quad (2)$$

考虑到信道带宽为  $W$ ,则由于每秒有  $2W$  个样本(奈奎斯特准则),则此信道容量(单位为 bit/s)为:

$$C_1' = \frac{W\mu}{1+\mu} \sum_{i=1}^M \text{lb det}(1 + \frac{P}{MN_0 W} \lambda_{ri}) \quad (3)$$

在第2个时隙,目的接收节点将此时隙接收到的信号与之前一个时隙接收到的源节点发送的信号进行合并解码,能获得时间分集增益。由于采用最大比合并,因此该信道容量(单位为 bit/s)为:

$$C_2' = \frac{W}{1+\mu} \text{lb det}(I_M + \frac{P}{MN_0 W} A_D + \frac{P'}{MN_0 W} A_D') \quad (4)$$

其中,  $A_D$  和  $A_D'$  分别为  $H_{SD} H_{SD}^H$  和  $H_{RD} H_{RD}^H$  的正特征值,  $H_{SD}$  和  $H_{RD}$  分别表示第1个时隙由源节点到接收节点的信道状态矩阵和第2个时隙由中继节点到接收节点的信道状态矩阵。因此,最终的中继信道容量(单位为 bit/s)为:

$$C = \min\{C_1', C_2'\} \quad (5)$$

### 3.2 中继选择算法

在进行中继系统性能分析时,中继选择会对系统性能产生很大的影响。文献[7]给出了基于距离的中继选择算法,本文在此基础上提出一种目标系统容量次优的中继选择算法。

#### 3.2.1 基于距离选择的中继选择算法(MDS 算法)

MDS 算法流程如下:

- (1) 计算备选中继节点到目的接收节点的距离。
- (2) 对第(1)步的计算结果进行排序,选择最接近目的接收节点的节点作为中继节点。
- (3) 计算系统的吞吐量。

MDS 算法保证了中继传输中第2个时隙的链路质量,且算法只涉及第2个时隙节点间距离信息的处理,因此,该算法在工程实现方面较为容易,可通过测距阶段获得各节点的距离信息。但根据最大流最小割定理,系统的传输容量应是第1个时隙与第2个时隙容量的最小值,然而该算法并没有考虑中继传输中第1个时隙的链路质量对整个系统的影响,

因此,当第1个时隙的链路质量恶化时,系统容量将会下降。

#### 3.2.2 信道容量次优中继选择算法(MCWJS 算法)

由式(5)可见,系统容量受带宽、信道衰落、天线数目和发射功率和时隙分配比等诸多因素影响,可能会导致在采用协作中继传输后的系统容量反而不如蜂窝系统。因此,在进行中继节点的选择时,首先需要判断用户是否需要使用协同中继传输数据。本文设定当协作中继传输系统高出一般蜂窝系统一定的容量阈值  $C_{th}$  时,即  $C_{co} > C_{unco} + C_{th}$ ,才使用协作中继传输方式。在选择协作中继时,先进行预筛选,将距离目的接收节点前  $n$  个最近的节点作为备选中继节点。然后在备选节点中选择使系统容量最大的节点作为中继节点。

MCWJS 算法流程如下:

- (1) 计算所有其他节点到目的接收节点的距离。
- (2) 选择距离目的接收节点前  $n$  个最近的节点作为备选中继节点。
- (3) 如果在备选节点中至少有1个节点满足  $C_{co} > C_{unco} + C_{th}$ ,则在备选节点中,选择信道容量最大的节点作为中继节点;否则采用直接传输方式传输。

MCWJS 算法通过一个判断机制,保证了第1个时隙的链路质量可能恶化的问题,同时限制在  $n$  个离目标节点最近的节点内再进一步选择的方式,也使得该算法的性能在算法复杂性与信道容量之间达到较好的平衡。

## 4 仿真与分析

仿真场景中所使用的参数取值如表1所示。

表1 仿真参数

参数	取值
阴影衰落标准差	8 dB
路径损耗指数	4
小区半径	1 500 m
工作频率	2.5 GHz
带宽	5 MHz
天线数目	4
发射总功率	40.5 dBm
时隙分配比	1

为比较时分半双工MIMO中继系统与传统蜂窝系统的性能比较,本文使用了容量对比度指标:

$$\text{Metric} = \left( \frac{\text{throughputA}}{\text{throughputB}} - 1 \right) \times 100\% \quad (6)$$

容量对比度表征系统A的系统容量比系统B多出的百分比。如取值为20%,则表示系统A的系统容量比系统B多出20%。在本文中,系统A为使用MCWJS中继选择算法时的时分半双工MIMO中继系统,系统B为传统蜂窝系统。限于篇幅,本文选取部分数据罗列。

#### 4.1 天线数目对系统的影响分析

不同天线数目下的系统容量对比如图3所示。

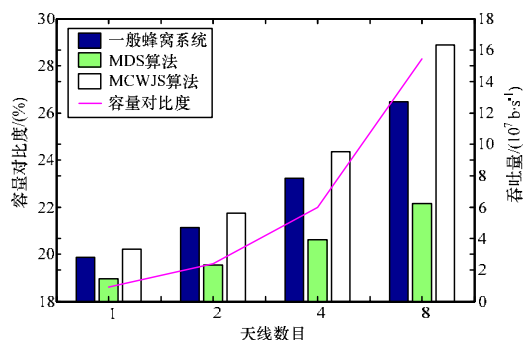


图3 不同天线数目下的系统容量对比

可见,随着天线数目的增加,无论是采用 MDS 算法还是 MCWJS 算法的中继系统都与一般蜂窝系统一样,系统容量有显著的增加。当天线数为 4 时,采用 MDS 算法和采用 MCWJS 算法的系统容量为 39.038 Mb/s 和 95.382 Mb/s;当天线数为 8 时,系统容量提升为 62.165 Mb/s 和 163.29 Mb/s。

相对于一般系统的容量,MDS 算法并没有像 MCWJS 算法一样表现出优越性,相反其容量比传统蜂窝系统有大幅的减少。例如在天线数为 2 的情况下,使用 MDS 算法时的容量值仅为一般蜂窝系统容量的一半。当出现图 4(a)这样的情况时,由于源节点到中继节点的距离比源节点到接收节点的长,第 1 个时隙的容量就会偏低,而这正如前文分析,MDS 算法并没有考虑第 1 个时隙的容量。而在 MCWJS 算法中,是在距离前  $n$  个最近的节点中选出一个系统容量最高的作为中继节点,这样  $n$  个节点都出现图 4(a)的概率很小,避免了图 4(a)这样的情况,使节点模型基本都如图 4(b)所示。

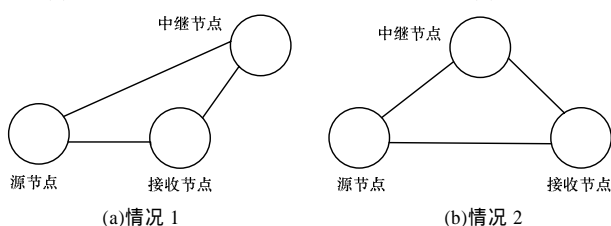


图 4 中继节点分布

另外在图 3 中还显示,随着天线数的增加,容量对比度从 18.6%上升到了 28.3%。说明在采用 MCWJS 算法的情况下,中继技术与 MIMO 技术的结合能给系统容量带来更大的增益。从而验证了 MIMO 中继系统的优越性。

#### 4.2 小区半径对系统的影响分析

时分半双工 MIMO 中继系统在不同小区半径下的容量对比如图 5 所示。

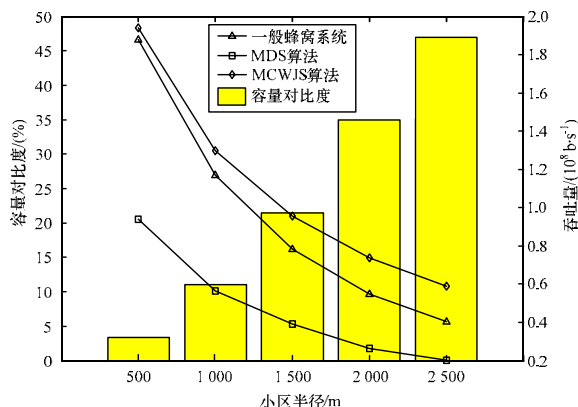


图 5 不同小区半径下的系统容量对比

可见,随着小区半径的增加,系统容量逐渐减少。在各种小区半径的情况下,采用 MCWJS 算法的系统容量性能都是最优的。观察系统容量对比度相对于小区半径的变化,采用 MCWJS 算法在大小区半径时系统容量增益更为明显。当小区半径为 2 500 m 时,容量对比度为 47%,即意味着采用 MCWJS 算法的系统容量比一般蜂窝系统提高了近 50%。从上述分析中,可以得出采用 MCWJS 中继选择算法可以更好地改善时分半双工 MIMO 中继系统对于大小区半径的系统容量,从而改善了小区覆盖能力。

#### 4.3 功率分配比对系统的影响分析

由于在时分半双工 MIMO 中继系统中存在用户协作,这就需要考虑各用户节点的功率消耗问题。笔者在保持系统总

功率不变的情况下(40.5 dBm),改变源节点与中继节点的发射功率比( $P_{BS}/P_{RS}$ ),观察系统容量以及容量对比度的变化。不同功率分配比下对应的源节点功率和中继节点功率如表 2 所示。

表 2 不同功率分配比下对应的功率

$P_{BS}/P_{RS}$	$P_{BS}/\text{dBm}$	$P_{RS}/\text{dBm}$
0.5	38.7	41.8
1.0	40.5	40.5
1.5	41.3	39.5
2.0	41.8	38.7
2.5	42.0	38.0
3.0	42.3	37.5

在不同功率分配比的情况下,系统的容量值与容量对比度变化如图 6 所示。可以看到,在 0.5~2.0 区间内,随着功率分配比的增加,时分半双工 MIMO 中继系统容量随之增加。其中使用 MCWJS 算法功率分配为 1.5 时,系统容量达到最大值;而 DMS 算法在功率分配为 2.0 时,容量也达到了最大值。

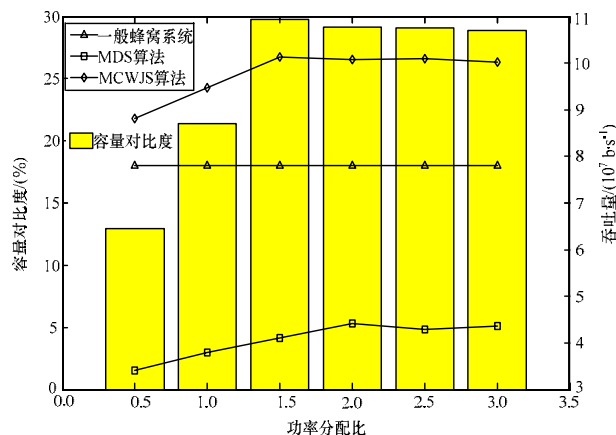


图 6 不同功率分配比下的系统容量对比

另外,从图 6 中还可以看到,继续增大功率分配比后,时分半双工 MIMO 中继系统的容量值并不会有明显的下降,这一特性提高了该系统在未来宽带无线通信中应用可行性。当小区内的移动中继为其他用户节点时,由于用户受终端电池使用寿命的限制,因此如何在降低移动用户发射功率的同时又保持较理想的系统容量是一个很大的挑战。

#### 5 结束语

本文在基于距离的中继选择算法的基础上,提出一种目标系统容量次优的中继选择算法。并在这 2 种中继选择算法下,对时分半双工 MIMO 中继系统进行仿真分析。时分半双工 MIMO 中继系统除了需要考虑多天线和中继方式对于系统的影响,还需要同时考虑功率分配的影响。通过仿真分析,使用适当的中继选择算法,时分半双工 MIMO 中继系统比一般蜂窝系统的容量提高近 20%~30%,且在大小区半径时系统有更高的容量增益,更具有实际应用价值的是系统并不需要中继用户用较高的发射功率换来系统的容量增益。

下一步的研究工作将考虑在 MIMO-OFDM 两跳中继系统下,联合考虑源节点与中继节点资源最优分配问题。由于两跳系统中的两跳子信道质量存在差异性,因此中继用户在第 1 个时隙和第 2 个时隙分配资源时,需要考虑信道匹配问题。此外,由于中继节点也需要占用系统总发射功率,因此源节点与中继节点联合最优功率分配也是未来的研究方向。

(下转第 93 页)