

文章编号: 1001 - 893X(2011)08 - 0154 - 05

两跳 MIMO 中继系统通信性能分析的研究进展^{*}

李光平^{1,3}, 杨 亮², 冯久超³, Steven D Blostein⁴

(1. 广东工业大学, 广州 510006; 2. 暨南大学, 广州 510632; 3. 华南理工大学, 广州 510641;

4. Queen's University, Kingston, Ontario, Canada K7L3N6)

摘 要: 描述了两跳 MIMO (Multiple - input and Multiple - output) 中继系统模型, 概述了中继通用的转发策略以及系统性能分析常涉及到的信道模型和信源发射方案, 详细介绍了两跳 MIMO 中继系统通信性能分析国内外的研究进展, 通过一个具体的例子比较了不同发射策略系统的性能, 最后探讨和展望了两跳 MIMO 中继系统下一步的研究方向。MIMO 中继系统的性能分析为 MIMO 中继系统的工程应用提供了有价值的理论参考。

关键词: MIMO; 两跳中继系统; 信道模型; 通信性能分析

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001 - 893x.2011.08.032

Research Progress on Performance Analysis of Two-hop MIMO Relay Systems

LI Guang-ping^{1,3}, YANG Liang², FENG Jiu-chao³, Steven D Blostein⁴

(1. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Jinan University, Guangzhou

510632, China; 3. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

4. Queen's University, Kingston, Ontario, Canada K7L3N6)

Abstract: This paper describes a system model of two - hop MIMO (Multiple - input and Multiple - output) relay network and introduces relaying strategies, channel models and transmit methods at the source. Then it presents the research progress on performance analysis of two - hop MIMO relay systems leading to a better understanding of actual MIMO relay systems and compares the performances of MIMO relay systems with different transmit methods through an example. Finally it discusses and expects some future research directions on the system under consideration. Performance analysis of MIMO relay system helps to guide its engineering applications.

Key words: MIMO; two-hop relay system; channel model; performance analysis

1 引 言

随着用户对各种实时多媒体业务需求的增加和互联网技术的迅猛发展, 传统的单天线传输技术已经无法满足无线业务的要求。MIMO (Multiple - input and Multiple - output) 技术极大地提高了通信系统的

频率效率和改善了通信链路的可靠性^[1], 成为无线通信领域一种关键的核心技术。然而 MIMO 传输无法解决“蜂窝边缘”的性能问题。中继转发技术在不增加发射功率的前提下延伸了网络的覆盖范围, 是解决“蜂窝边缘”问题的一种重要手段^[2], 也已经作为一种关键技术纳入 3GPP LTE - Advanced 和 IEEE 802.16m 标准中。MIMO 与中继转发技术的结合具

^{*} 收稿日期: 2011 - 06 - 23; 修回日期: 2011 - 08 - 01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60771056); 广东省自然科学基金资助项目 (10451009001004407)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 60771056); The Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 10451009001004407)

有覆盖范围大、传输速率高、稳定性强等特点,研究 MIMO 中继系统性能对于掌握 MIMO 中继系统的优势以及存在的问题,具有重要的学术意义和实际应用价值。本文首先描述了两跳 MIMO 中继系统的模型,然后概述了中继通用的转发策略以及系统性能分析常涉及到的信道模型和信源发射的方案,接着详细介绍了两跳 MIMO 中继系统通信性能分析国内外的研究现状,最后对两跳 MIMO 中继系统下一步研究进行了探讨和展望。

2 系统模型

考虑信源、中继和终端分别有多根天线的两跳 MIMO 中继网络,如图 1 所示。忽略了信源和终端的直接通信链路(适合于信源和终端之间的通信链路处于深衰落或者信源和终端相距很远的情形)。由于无线通信信道严重的衰减以及发射电路和接收电路之间不足的电气隔离,因此采取半双工的信号传输方式,也就是说中继不能在相同的时隙或频率同时发射和接收信号。

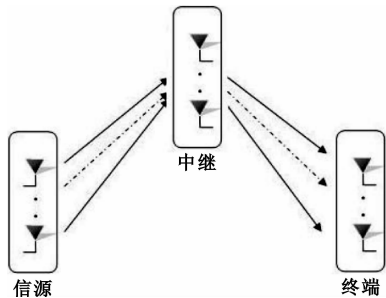


图 1 系统模型
Fig.1 System model

3 中继转发策略

无线中继的转发策略通常分为解码转发(Decode – and – forward, DF)和放大转发(Amplify – and – forward, AF)。解码转发指的是中继解码来自发射端的信号,然后再重新编码转发给接收端。放大转发是一种简单的中继转发策略,即中继只是放大来自发射端的信号,然后不做任何信号处理转发给接收端。放大转发根据中继获得信道状态信息(CSI)的多少又可分为可变增益的放大转发和固定增益的放大转发。对于可变增益中继,中继需要实时地估计来自发射端的信道状态信息,这样增加了中继的复杂度,在实际中配置比较困难。固定增益放大转发的中继不需要估计来自发射端的信道状态信息,只

需要知道发射端和中继链路的统计分布即可,是一种低复杂度易于配置的中继转发策略。利用可变增益的放大转发,终端接收信噪比如下:

$$\gamma = \frac{\gamma_{SR}\gamma_{RD}}{\gamma_{SR} + \gamma_{RD} + 1} \tag{1}$$

式中, γ_{SR} 表示信源到中继链路的信噪比, γ_{RD} 表示中继到终端链路的信噪比。利用固定增益的放大转发,终端接收信噪比如下:

$$\gamma = \frac{\gamma_{SR}\gamma_{RD}}{C + \gamma_{RD}} \tag{2}$$

式中, C 是常数,取决于固定增益的放大因子。通常,固定增益的中继有两种方案。方案一需要计算平均接收信号功率加噪声功率倒数的期望,因此常数 C 如下:

$$C = \frac{1}{E[\frac{1}{\gamma_{SR} + 1}]} \tag{3}$$

方案二只需要计算接收信号功率的期望,因此常数 C 如下:

$$C = E[\gamma_{SR}] + 1 \tag{4}$$

4 信道模型

在两跳 MIMO 中继系统性能分析的文献中,通常假定信道经历了理想的瑞利衰落(Rayleigh fading),然而 Nakagami 分布比瑞利分布和莱斯分布更适合于模拟实际的衰落信道。Nakagami 分布可以用下面的概率密度函数表示

$$p_{\alpha}(x) = \frac{2m^m x^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega_p^m} e^{-\frac{mx^2}{\Omega_p}}, \quad m \geq \frac{1}{2} \tag{5}$$

式中, $\Omega_p = E[\alpha^2]$, $\Gamma(\cdot)$ 表示伽马函数。因此单根发射与接收天线链路间信噪比的概率密度函数如下:

$$p_{\gamma_i}(x) = (\frac{m_i}{\gamma_i})^{\frac{m_i}{2}} \frac{x^{\frac{m_i}{2}-1}}{\Gamma(\frac{m_i}{2})} e^{-\frac{mx}{\gamma_i}} \tag{6}$$

其中, $\overline{\gamma_i} = E[\gamma_i^2]$ 。

如果天线之间没有充分的间距或者基站附近存在不充足的散射,空间相关分布是比较合适的信道模型。对于空间相关信道,一般进行理论分析时采用 Kronecker 模型,因此从发射端到中继的信道 $\mathbf{H}_{SR}$ 和从中继到接收端的信道 $\mathbf{H}_{RD}$ 可以分别写成

$$\mathbf{H}_{SR} = \mathbf{H}_{\omega} \mathbf{R}_S^{\frac{1}{2}}, \mathbf{H}_{RD} = \mathbf{R}_D^{\frac{1}{2}} \mathbf{H}_{\omega} \tag{7}$$

其中, $\mathbf{H}_{\omega}$ 中的每个元素是独立同分布的均值为 0、方差为 1 的复高斯标量, $\mathbf{R}_S$ 是发射端空间相关矩阵, $\mathbf{R}_D$ 是接收端空间相关矩阵。空间相关程度与天

线的空间结构、AOA 分布、互耦以及天线阵的布置(如天线之间的距离、天线阵的形状,即线状或环状)等因素有关,其中不同的 AOA 统计分布有不同的相关值,AOA 分布的选择取决于所处的环境,通常采用如下应用广泛的 Jakes 模型:

$$R[i, j] = J_0[2\pi f_d(i - j)d/\lambda] \quad (8)$$

式中, $J_0(\cdot)$ 是第一类 0 阶贝塞尔函数, f_d 是最大多普勒频谱, d 是天线间距, λ 是波长。

5 信源发射方案

信源发射方案根据在信源获得信道状态信息的多少通常有以下 3 种。

(1) 策略 1: 最大比发射

$\gamma_{SR} = \sum_i \gamma_{SR}^i$ 。这是已有文献研究中常用的一种发射方案,此方案需要中继反馈完全的信道状态信息到信源,然而在存在中继的实际通信情形中,具有多根天线的发射端要获得完全的信道状态信息是不现实的,因此最大比发射是难以实现的、理想的策略。

(2) 策略 2: 天线选择

$\gamma_{SR} = \max_i \gamma_{SR}^i$, 即发射端选择发射天线与中继之间信噪比最大的信道来发送信息。天线选择节省了多条无线通信链路的配置,同时又维持了 MIMO 技术的大部分优势,而且发射端只需要比特级别的反馈信息,因此天线选择是 MIMO 中继系统中一种易于实现的发射方案。

(3) 策略 3: 正交空时分组编码

$$\gamma_{SR} = \sum_i \frac{\gamma_{SR}^i}{N_S}, \text{ 其中 } N_S \text{ 为发射端的天线数目,}$$

发射端-中继-接收端链路接收信噪比为 $\frac{T}{K}\gamma$, T 是一个正交空时分组编码的时间长度, K 是一个正交空时分组编码所包含的符号数目。正交空时分组编码(OSTBC)不需要任何的反馈信息,是 MIMO 中继系统中另一种易于实现的发射方案。但正交空时分组编码的缺点是增加了终端解码的延迟。

6 国内外研究现状

6.1 国外研究现状

国外涉及中继系统性能分析比较早。T. Cover 和 A. E. Gamal 首先分析了无线中继转发系统的信道容量,随后大量的文献研究了无线中继转发系统的通信性能,然而这些研究都假定了单天线的情形

(即信源、中继和终端均只有单根天线)。MIMO 技术通过空间分集的方式极大地提高了通信链路的可靠性,因此 MIMO 与中继转发技术的结合引起了众多研究者的兴趣。首先, Louie R. H. Y. 等人建立了发射端和接收端有多根天线而中继只有单根天线的两跳 MIMO 中继系统模型,针对该系统模型,研究者采用了最大比发送和最大比接收的策略,导出了瑞利衰落下可变增益放大转发系统中中断概率的封闭表达式和精确的误码率表达式,同时也分析了发射端和接收端的天线配置对整个系统性能的影响^[3];文献[4]和[5]分别研究了上述系统在 Nakagami 衰落和空间相关衰落信道下的性能;文献[6]采用了固定增益的中继,分析了上述系统在空间相关衰落信道下的性能。以上文献均假定发射端采用了最大比发送的策略。

在 MIMO 中继系统中,配置多根天线的发射端要获得完全的信道状态信息是非常困难的,因此最大比发送是一种难以实现的理想发射策略。众所周知,OSTBC 不需要任何信道状态信息,是 MIMO 中继系统中易于实现的发射策略。近来,研究者将注意力转移到了 OSTBC 发射策略中。文献[7,8]在发射端采用了 OSTBC 的发射策略,导出了可变增益放大转发的两跳 MIMO 中继系统的平均误比特率表达式,然而文献所使用的方法只适用于发射端和接收端天线数目相等的情形。文献[9]导出了上述系统中中断概率的封闭表达式,文献[10]分析了固定增益放大转发下两跳 MIMO 中继系统在瑞利衰落下的性能,文献[11]假定了可变增益的中继,分析了上述系统在 Nakagami 衰落下的性能。

天线选择节省了多条无线通信链路的配置,同时又维持了 MIMO 技术的大部分优势,而且发射端只需要比特级别的反馈信息,因此天线选择是 MIMO 中继系统中另一种易于实现的发射策略。文献[12,13]分析了所有节点均利用天线选择的可变增益放大转发的两跳 MIMO 中继系统在瑞利衰落下的性能。文献[14]分析了上述系统在 Nakagami 衰落下的性能,文献[15]分析了上述系统在多跳中继转发下的性能,文献[16]设计了发射天线选择算法并理论分析了系统的分集阶数。

6.2 国内研究进展

在国内,北京邮电大学的王文博教授研究组建立了发射端有多根天线而中继和接收端均只有一根天线的两跳中继系统模型,在发射端利用 OSTBC,导出了中断概率的封闭表达式和误码率的精确表达

式^[17]。文献[18,19]分析了发射端和接收端具有不同天线数目时两跳 MIMO 中继系统在瑞利衰落下的性能,同时也分析了发射端和接收端之间直接通信链路存在时系统的性能,比较了可变增益放大转发的两跳 MIMO 中继系统和点对点 MIMO 系统的性能,确定了中继的位置对系统性能的影响。同时,北京邮电大学的杨大成教授研究组以及暨南大学的杨亮教授分别研究了直接通信链路存在时上述系统的性能^[20-22]。对于天线选择策略,王世博教授研究组导出了在发射端利用天线选择、接收端利用最大比合并、瑞利衰落下可变增益放大转发的两跳 MIMO 中继系统中断概率和误码率的理论表达式^[23]。

7 通信性能比较

利用了文献中理论导出的表达式比较了 3 种发射策略分别利用可变增益和固定增益时系统的中断概率和平均误码率性能。其中,假定了瑞利衰落的信道模型,发射端和接收端分别配置两根天线而中继单根天线的系统。在中断概率分析中,设置系统的信噪比门限为 0 dB,调制方式为 BPSK。从仿真结果可以看出,最大比发送策略性能最好,OSTBC 性能最差,然而最大比发送需要完全的反馈信息,而 OSTBC 策略不需要任何反馈信息。可变增益转发和固定增益转发在低信噪比下性能相差不大,但随着信噪比的增大,性能差距明显,但它们具有相同的分集阶数。

8 未来研究方向

8.1 接近于实际情形的 MIMO 中继系统性能分析

综上所述,目前两跳 MIMO 中继系统通信性能的研究基本上采用了复杂度高的可变增益中继,或者假定的信道模型过于简单(瑞利衰落信道),或者发射端的策略过于理想(最大比发射),与现实情形中 MIMO 中继系统的性能分析还存在一定距离。因此,对采用低复杂度的中继方案、易于实现的发射策略在更能模拟实际情形的信道模型(比如前部分提及到的 Nakagami 衰落和空间相关衰落模型)下的系统进行性能分析更具有实际的意义,导出的通信性能有助于通信工程师设计根据不同的需求选择不同的发射策略、系统模型等。这将是下一步两跳 MIMO 中继系统性能分析研究的重点。

8.2 中继最优位置的确定

中继的位置对整个系统的通信性能有很大的影

响,现有研究均未从理论上分析中继的位置对整个通信系统性能的影响,因此以导出的性能指标封闭表达式为目标函数,通过优化理论来确定中继的最优位置也是将来的一个研究方向。

8.3 功率分配和优化

功率是通信系统中一个很重要的参数。在保证通信质量的情况下尽可能地降低功率可以降低干扰,也可以降低整个系统的功耗,节省能量。因此 MIMO 中继系统的功率优化是一个很重要的研究方向,如何优化分配发射端和中继之间的功率,具体可用下面的公式来表达:

$$\min_{\eta} \bar{P}_e \quad \text{s.t. } 0 < \eta < 1 \quad (9)$$

式中, $\bar{P}_e$ 表示系统平均误码率的表达式, η 是信源的功率和系统总的功率之比。

9 结 论

目前, MIMO 中继系统还处于研究阶段,其应用还有许多问题需要解决。本文详细地概述了两跳 MIMO 中继系统通信性能分析的国内外研究现状,提出了未来研究的几个重要方向,比较了不同发射策略 MIMO 中继系统的性能。MIMO 中继系统精确的性能分析,为它的工程应用奠定了理论基础,为不同 MIMO 中继系统的选择提供了依据。

参考文献:

- [1] David Gesbert, Shafi M, Da-shan Shiu, et al. From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems[J]. IEEE Journals on Selected Areas in Communications, 2003, 21(3): 281-302.
- [2] Peters Steven, Ali Y Panah, Kien T Truong, et al. Relay Architectures for 3GPP LTE-Advanced[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2009(2009): 1-15.
- [3] Louie R H Y, Yonghui Li, Vucetic B. Performance Analysis of Beamforming in Two Hop Amplify and Forward Relay Networks[C]// Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Communications. Beijing: IEEE, 2008: 4311-4315.
- [4] Costa D B da, Aissa S. Cooperative Dual-hop Relaying Systems with Beamforming over Nakagami-m Fading Channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(8): 3950-3954.
- [5] Louie R H Y, Yonghui Li, Suraweera H A, et al. Performance analysis of beamforming in two hop amplify and forward relay networks with antenna correlation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(6): 3132-3141.
- [6] Suraweera H A, Garg H K, Nallanathan A. Beamforming in Dual-Hop Fixed Gain Relay Systems with Antenna Correla-

- tion[C]//Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Communications. Cape Town, South Africa: IEEE, 2010:1-5.
- [7] In - Ho L, Dongwoo K. Coverage Extension and Power Allocation in Dual - Hop Space - Time Transmission With Multiple Antennas in Each Node[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(6):3524-3532.
 - [8] In - Ho L, Dongwoo K. End - to - end BER Analysis for Dual - hop OSTBC transmissions over Rayleigh Fading Channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2008, 56(3):347-351.
 - [9] Chalise B K, Vandendorpe L. Outage Probability Analysis of a MIMO Relay Channel with Orthogonal Space - time Block Codes [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(4):280-282.
 - [10] Dharmawansa P, McKay M R, Mallik R K. Dual Hop MIMO Relaying with Orthogonal Space - Time Block Codes [C]// Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Communications. Dresden, Germany: IEEE, 2009:1-5.
 - [11] Duong T Q, et al. Amplify - and - Forward MIMO Relaying with OSTBC over Nakagami - m Fading Channels [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Cape Town, South Africa: IEEE, 2010:1-5.
 - [12] Kim J B, Kim D. BER Analysis of Dual - Hop Amplify - and - Forward MIMO Relaying with Best Antenna Selection in Rayleigh Fading Channels [J]. IEICE Transactions on Communications, 2008, E91 - B(8):2772-2775.
 - [13] Suraweera H A, Karagiannidis G K, Yonghui Li, et al. Amplify - and - forward Relay Transmission with End - to - End Antenna Selection [C]// Proceedings of 2010 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Sydney, Australia: IEEE, 2010:1-6.
 - [14] Gao Y, Ge J. Outage Probability Analysis of Transmit Antenna Selection in Amplify - and - forward MIMO Relaying over Nakagami - m Fading Channels [J]. Electronics Letters, 2010, 46(15):1090-1092.
 - [15] In - Ho L, Dongwoo K. Outage Probability of Multi - hop MIMO Relaying with Transmit Antenna Selection and Ideal Relay Gain over Rayleigh Fading Channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(2):357-360.
 - [16] Peters S, Heath R W. Nonregenerative MIMO Relaying With Optimal Transmit Antenna Selection [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2008, 15(1):421-424.
 - [17] Chen Shuping, Wenbo Wang, Xing Zhang, et al. Performance Analysis of OSTBC Transmission in Amplify - and - Forward Cooperative Relay Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(1):105-113.
 - [18] Li Guangping, Blostein S D, Qin Jiayin. Performance Analysis of Two - Hop OSTBC Transmission over Rayleigh Fading Channels [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2010(2010):1-8.
 - [19] Li Guangping, Blostein S D. Exact Symbol Error Rate of a Cooperative Network with Multiple Antennas and OSTBC [C]// Proceedings of the 12th International Conference on Communication Technology. Nanjing: IEEE, 2010:1023-1026.
 - [20] Chen Shuping, Wenbo Wang, Xiang Zhang, et al. Ergodic and Outage Capacity Analysis of Amplify - and - Forward MIMO Relay with OSTBCs [C]// Proceedings of 2010 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Sydney, Australia: IEEE, 2010:1-6.
 - [21] Yang Liang, Zhang Q T. Performance Analysis of MIMO Relay Wireless Networks With Orthogonal STBC [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(7):3668-3674.
 - [22] Cao L, Chen Li, Zhang Xin, et al. Cooperative Diversity with OSTBC Transmission and Adaptive - gain Amplify - and - forward MIMO Relaying [C]// Proceedings of IEEE Global Communications Conference. Miami, USA: IEEE, 2010:1-5.
 - [23] Chen Shuping, Wenbo Wang, Xing Zhang, et al. Performance of Amplify - and - forward MIMO Relay Channels with Transmit Antenna Selection and Maximal - Ratio Combining [C]// Proceedings of 2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Budapest, Hungary: IEEE, 2009:1-6.

作者简介:

李光平(1981—),男,湖南桂阳人,2009年于中山大学获博士学位,现为广东工业大学讲师,主要研究方向为多用户 MIMO 传输优化、MIMO 协作分集;

Li Guang - ping was born in Guiyang, Hunan Province, in 1981. He received the Ph.D. degree from Sun Yat - sen University in 2009. He is now a lecturer. His research concerns optimization in multiuser MIMO systems and cooperative MIMO.

Email: ligp@gdut.edu.cn, gilbert.gpli@gmail.com

杨亮(1977—),男,湖南邵阳人,2006年获通信与信息系统专业博士学位,现为暨南大学教授,主要研究方向为 MIMO 协作分集;

YANG Liang was born in Shaoyang, Hunan Province, in 1977. He received the Ph.D. degree in 2006. He is now a professor. His research concerns cooperative MIMO.

冯久超(1964—),男,四川西充人,2002年于香港理工大学获博士学位,现为华南理工大学教授、博士生导师、广东省高校特聘教授(“珠江学者”),主要研究方向为非线性理论与应用、信号处理与通信;

FENG Jiu-chao was born in Xichong, Sichuan Province, in 1964. He received the Ph.D. degree from The Hong Kong Polytechnic University in 2002. He is now a professor and also the Ph.D. supervisor. He is listed in the Zhujiang Scholars. His research concerns nonlinearity theory and application, signal processing and communication.

Steven D. Blostein (1960—),男,1988年于 University of Illinois at Urbana - Champaign 获博士学位,现为加拿大 Queen's University 教授、博士生导师,主要研究方向为多用户 MIMO 系统、协作分集技术。

Steven D. Blostein received his Ph.D. degree in Electrical and Computer Engineering from the University of Illinois at Urbana - Champaign in 1988. He has been on the Faculty at Queen's University since 1988 and currently holds the position of Professor of the Department of Electrical and Computer Engineering. Dr. Blostein's research interests include multiuser MIMO and cooperative diversity.