

# 基于 MIMO 的双向解调中继协议及 SER 性能

俞超<sup>1</sup>, 易辉跃<sup>1</sup>, 卜智勇<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050; 2. 上海翰讯无线技术有限公司, 上海 200050)

**摘要:**提出的基于 MIMO 的双向解调中继协议, 不仅可以提高频谱利用率, 还可以提高传输的可靠性。该协议包括两个用户终端和一个多天线解调转发中继节点。为了对协议进行性能评估, 推导了采用 QAM 调制的基于 MIMO 的双向解调转发中继协议的误符号率(SER)性能闭式解。仿真结果验证了理论推导的正确性。

**关键词:**通信技术; 中继; 解调转发; 多天线; 误符号率

**中图分类号:** TN911.6, TN915.04 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2011)01-0254-05

## MIMO-based demodulate-and-forward two-way relaying protocol and SER performance analysis

YUN Chao<sup>1</sup>, YI Hui-yue<sup>1</sup>, BU Zhi-yong<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Institute of Micro-system and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2. Shanghai Jushri Technologies, Inc., Shanghai 200050, China)

**Abstract:** A Multi-Input Multi-Output (MIMO) based two-way Demodulate-and-Forward (DMF) relaying protocol was proposed. Incorporating MIMO technology into the relaying protocol can not only increase the spectral efficiency, but also enhance the transmission reliability. This relaying protocol was composed of two user terminals and one multi-antenna DMF relaying node. Moreover, to evaluate the performance of the proposed relaying protocol, closed-form Symbol Error Rate (SER) expressions of Quadrature Amplitude Modulation (QAM) for this MIMO-based DMF relaying protocol was derived. Simulation results demonstrate SER performance of the two-way DMF relaying system and verify the theoretical analysis.

**Key words:** communication; relay; demodulate-and-forward; MIMO; SER

中继是一种提高无线网络覆盖的有效技术。中继技术中的一个关键因素是中继策略, 中继策略可以分为两类: 再生中继与非再生中继。再生中继策略需要中继站实施解调, 具体形式有解调转发<sup>[1]</sup> (Demodulate-and-forward, DMF) 和解码转发<sup>[2]</sup> (Decode-and-forward, DF)。非再生中继

策略中继站无需对数据进行解调, 例如放大转发<sup>[2]</sup> (Amplify-and-forward, AF)。依据中继信道模型的不同, 近期的中继研究工作可以分为两类: 一类是单向中继, 另一类是双向中继<sup>[3-4]</sup>。在无线中继网络中使用多天线 (Multiple-input multiple-output, MIMO) 技术可以有效提高链路可靠性和

收稿日期: 2009-02-17.

基金项目: “863”国家高技术研究发展计划项目(2006AA01Z280).

作者简介: 俞超 (1980-), 男, 博士研究生. 研究方向: 合作传输技术, 广播单播混合系统.

E-mail: chao.yun@jushri.com

频谱效率。文献 [5, 6] 在单向中继中引入 MIMO, 并对相应的检测方法进行了深入研究。相比之下, 对于采用 MIMO 技术的双向中继, 目前所做的研究比较少。文献 [7, 8] 研究了采用非再生中继策略的 MIMO 双向中继技术, 而基于再生中继策略的 MIMO 双向中继至今尚未见到相关研究。

本文提出一种采用再生中继策略的 MIMO 双向中继协议, 协议包括两个用户终端和一个多天线的转发中继节点。同时, 为了对所提出的中继协议进行性能评估, 本文推导了所提出中继协议的 SER 性能闭式解。仿真结果表明, 在不同的正交幅度调制 (Quadrature amplitude modulation, QAM) 方式下, 理论分析与实际分析吻合得很好。

## 1 本文协议

文中符号说明: 斜体大写字母表示矩阵, 斜体小写字母表示向量。\$\mathbf{I}\_N\$ 表示大小为 \$N\$ 的单位矩阵, \$\mathbb{C}^{N \times M}\$ 表示 \$N \times M\$ 的复数矩阵。\$(\cdot)^\*\$、\$(\cdot)^T\$ 和 \$(\cdot)^H\$ 分别表示共轭、转置和共轭转置。\$E[\cdot]\$ 表示期望, \$\text{var}[\cdot]\$ 表示方差, \$|\cdot|\$ 表示绝对值, \$\|\cdot\|\$ 表示 Frobenius 范数。

本文提出的基于 MIMO 的双向解调转发中继协议如图 1 所示。该协议包含两个用户终端 \$S\_1\$、\$S\_2\$ 以及一个中继站 RS 的网络。终端的天线数目为 1, 中继站 RS 的天线数目为 \$N\$ (\$N \geq 2\$)。协议包含 2 个时隙, 第一时隙为用户同时向中继站发送数据, 可视为 MIMO-MAC; 第二时隙为中

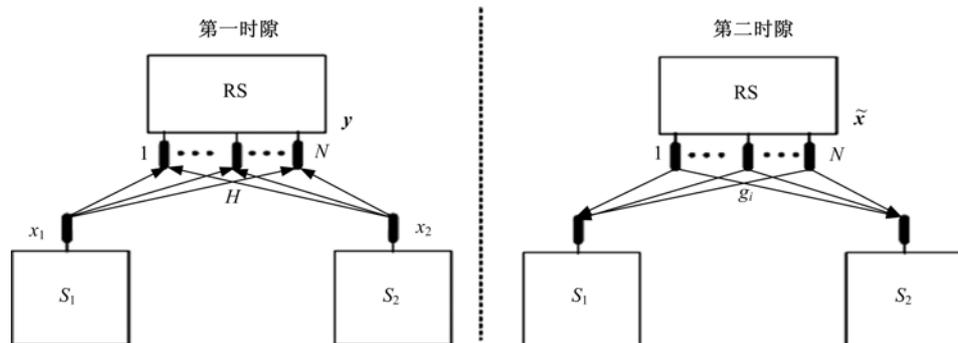


图 1 基于 MIMO 的双向解调转发中继系统模型

Fig. 1 MIMO-based demodulate-and-forward two-way relaying system model

中继站向用户转发解调后的数据, 可视为 MIMO-BC。

### 1.1 第一时隙

在第一时隙, \$S\_1\$ 和 \$S\_2\$ 同时向 RS 发送数据, 形成等效的 MIMO-MAC 结构。记 \$\mathbf{x} = [x\_1, x\_2]^T\$ 为二维的发射数据向量, 其中 \$x\_1\$ 和 \$x\_2\$ 分别是 \$S\_1\$ 和 \$S\_2\$ 的发射数据。两个发射数据之间互不相关, 且发送能量皆为 \$E\_s\$, 即 \$E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] = E\_s \mathbf{I}\_2\$。

在 RS, 接收到的等效基带信号可表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}_1 \quad (1)$$

式中: \$\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{N \times 1}\$ 为 RS 的接收数据向量; \$\mathbf{n}\_1 \in \mathbb{C}^{N \times 1}\$ 表示加性高斯白噪声 (Additive white gaussian noise, AWGN) 向量, 其均值为零, 且协方差矩阵为 \$E[\mathbf{n}\_1 \mathbf{n}\_1^H] = \mathcal{N}\_0 \mathbf{I}\_N\$, \$\mathcal{N}\_0\$ 为 AWGN 噪声方差; \$\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N \times 2}\$ 为 \$S\_1\$、\$S\_2\$ 与 RS 之间的信道矩阵, \$\mathbf{H}\$ 的任意元素服从均值为零、方差为 \$\sigma^2\$ 的复对称高斯分布。

RS 采用 MMSE 方法得到的数据可表示为

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{W}\mathbf{y} \quad (2)$$

式中: \$\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{2 \times N}\$ 为 MMSE 滤波矩阵, 满足 [9]

$$\mathbf{W} = \sqrt{E_s} \mathbf{H}^H (\mathbf{E}_s \mathbf{H} \mathbf{H}^H + \mathcal{N}_0 \mathbf{I}_N)^{-1} \quad (3)$$

对 \$\hat{\mathbf{x}}\$ 进行解调可得能量归一化的数据 \$\tilde{\mathbf{x}}\$, 即 \$E[\tilde{\mathbf{x}} \tilde{\mathbf{x}}^H] = \mathbf{I}\_2\$。

### 1.2 第二时隙

在第二时隙, RS 将第一时隙解调得到的数据广播给 \$S\_1\$ 和 \$S\_2\$。基于 MIMO 的双向解调转发中继系统中, RS 向用户传输数据的方法有两种 [7]: 一种是在 RS 采用物理层合并编码; 另一种是在 RS 端对信道进行预均衡操作。第一种方法中, 接收端需要知道信道信息以分离出自己所需的数据, 当 RS 端天线数目比较多时, 信道信息的传递需要很大的资源开销。第二种方法中, 接收端仅需知道一个与信道相关的标量因子, 因此可以有效地节省非数据信号传输的开销。这里采用第

二种方法,即把第二时隙当作 MIMO-BC 系统,在 RS 端对信道进行预均衡操作,具体过程如下。

记 RS 的发送数据为  $\mathbf{v}$ , 可表达为

$$\mathbf{v} = \frac{\sqrt{E_{RS}} \mathbf{B} \mathbf{u}}{\sqrt{\beta}} \quad (4)$$

式中:  $E_{RS}$  为 RS 的发射功率;  $\mathbf{u} = [\tilde{\mathbf{x}}_2, \tilde{\mathbf{x}}_1]^T$  为  $\tilde{\mathbf{x}}$  经过数据交换的结果;  $\mathbf{B} \in \mathbb{C}^{N \times 2}$  为预均衡矩阵;  $\beta$  为其功率归一化因子, 满足

$$\beta = \|\mathbf{B} \mathbf{u}\|^2 = \mathbf{u}^H \mathbf{B}^H \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (5)$$

预均衡矩阵  $\mathbf{B}$  由 MMSE 准则得到, 可表示为<sup>[10]</sup>

$$\mathbf{B} = \mathbf{H}^* \left[ \mathbf{H}^T \mathbf{H}^* + \frac{2 \mathcal{N}_0}{E_{RS}} \mathbf{I}_N \right]^{-1} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{H}$  已在式(1)中定义, 这里假设第一时隙与第二时隙的信道保持不变。

在用户端,  $S_1$  与  $S_2$  的数据可表示为

$$\hat{\mathbf{u}} = \sqrt{\beta}(\mathbf{H}^T \mathbf{v} + \mathbf{n}) = \mathbf{H}^T \mathbf{B} \mathbf{u} + \sqrt{\beta} \mathbf{n} \quad (7)$$

式中:  $\hat{\mathbf{u}} = [\hat{u}_1, \hat{u}_2]^T$ ,  $\hat{u}_1$  与  $\hat{u}_2$  分别为  $S_1$ 、 $S_2$  接收的数据, 其中  $\beta$  因子需由 RS 告知  $S_1$ 、 $S_2$ 。

对  $\hat{\mathbf{u}}$  进行解调得到  $\tilde{\mathbf{u}}$ , 即为  $S_1$ 、 $S_2$  的接收数据。

## 2 本文协议的 SER 性能分析

与所提出的中继协议分为两个时隙相似, SER 性能分析也可以分为两个部分: RS 的解调 SER 性能分析和用户的解调 SER 性能分析。

### 2.1 RS 的解调 SER 性能分析

RS 的解调 SER 性能分析可以看作是 MIMO-MAC 的 SER 性能分析。文献[9, 11]给出了基于多元相移键控调制的 MIMO-MAC 系统的 SER 性能。但在实际系统中, 往往采用 QAM 调制。为此, 本文给出基于 QAM 调制的 RS 解调 SER 性能分析。

由式(1), RS 端的接收数据可以改写为

$$\mathbf{y} = [\mathbf{H}]_1 x_1 + [\mathbf{H}]_2 x_2 + \mathbf{n}_1 \quad (8)$$

式中:  $[\mathbf{H}]_i (i = 1, 2)$  表示信道矩阵  $\mathbf{H}$  的第  $i$  列。

考察任意发送数据  $x_1$  或  $x_2$  的接收时, 可将另一个数据视为干扰。不失一般性, 考察  $x_1$  的接收, 则  $x_2$  视为干扰。

由文献[9],  $x_1$  的接收信噪比可表示为

$$\gamma = x_1^* \mathbf{R}^{-1} x_1 \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{N \times N}$  且满足  $\mathbf{R} = (E_s [\mathbf{H}]_2 [\mathbf{H}]_2^T + \mathcal{N}_0 \mathbf{I}_N)^{-1}$ 。

矩阵  $\mathbf{R}^{-1}$  可表达为  $\mathbf{U} \mathbf{\Lambda}^{-1} \mathbf{U}^H$ , 其中  $\mathbf{U} \in \mathbb{C}^{N \times N}$

为归一化矩阵,  $\mathbf{\Lambda} \in \mathbb{C}^{N \times N}$  为对角阵, 且主对角线上数据为  $\mathbf{R}$  的特征值, 记为  $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$ , 第一时隙中系统等效于  $2 \times N$  的 MIMO-MAC 系统, 因此  $\mathbf{R}$  的特征值  $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$  中  $N-1$  个元素等于  $\mathcal{N}_0$ 。向量  $\mathbf{e} = \mathbf{U}^H x_2 = [e_1, e_2, \dots, e_N]^T$  中的每个元素都满足方差归一化的高斯分布。记不等于  $\mathcal{N}_0$  的矩阵特征值下标为  $j$ , 则式(9)可改写为

$$\gamma = E_s \frac{|e_j|^2}{\lambda_j} + E_s \sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{|e_i|^2}{\mathcal{N}_0} \quad (10)$$

把  $\lambda_j$  视为常数, 则信噪比  $\gamma$  可视作两个随机变量  $a$  与  $b$  的和。考虑到  $\mathbf{e}$  中的元素皆为复数, 因此  $a = E_s \frac{|e_j|^2}{\lambda_j}$  满足方差为  $\frac{E_s}{\lambda_j}$  的二维  $\chi^2$  分布。  $b = \sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{|e_i|^2}{\mathcal{N}_0}$  满足方差为  $\frac{E_s}{\mathcal{N}_0}$  的  $2(N-1)$  维  $\chi^2$  分布。作为上述两个随机变量的和,  $\gamma$  的概率密度分布为

$$f(\gamma | \lambda_j) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\lambda_j \mathcal{N}_0 (\mathcal{N}_0 x)^{N-2}}{E_s^N (N-2)!} \exp\left(\frac{-\mathcal{N}_0 x}{E_s}\right) \exp\left(\frac{-\lambda_j(\gamma-x)}{E_s}\right) dx \quad (11)$$

由文献[12], 对于 QAM 调制, SER 与信噪比的关系为

$$P_{err} | \gamma = 4Q \sqrt{\frac{3\gamma}{M-1}} \left[ 1 - Q \sqrt{\frac{3\gamma}{M-1}} \right] \quad (12)$$

式中:  $M$  为 QAM 调制中星座图元素的个数, 则

$$P_{err} | \lambda_j = \int_0^{\infty} f(\gamma | \lambda_j) P_{err} | \gamma d\gamma \quad (13)$$

进而, RS 在第一时隙的解调误符号率为

$$P_{err} = \int_{\mathcal{N}_0}^{\infty} P_{err} | \lambda f(\lambda) d\lambda \quad (14)$$

式中:  $f(\lambda)$  可表示为<sup>[11]</sup>

$$f(\lambda) = \frac{(\lambda - \mathcal{N}_0)^{N-1}}{E_s^{N-1} (N-1)!} \exp\left\{\frac{-\lambda + \mathcal{N}_0}{E_s}\right\} \quad (15)$$

### 2.2 用户的解调 SER 性能分析

本文协议的第二时隙可当作 MIMO-BC 系统, 与 MIMO-MAC 过程不同, MIMO-BC 的信噪比概率密度分布很难准确得到。考虑到 MIMO-BC 与 MIMO-MAC 的相似性, 文献[10]指出可以利用对称性, 由 MIMO-MAC 来近似 MIMO-BC。对称的 MIMO-MAC 与 MIMO-BC 需要满足两个条件: ① MIMO-BC 中, RS 的发送功率与 MIMO-MAC 中每个终端的总发送功率相同; ② 链路的噪声功率相同。

显然,对于本文协议,假设 RS 发射功率为  $E_{RS}$ ,则第二时隙 MIMO-BC 的 SER 性能可由用户终端发送功率为  $E_{RS}$  的第一时隙 SER 性能来近似,即可由 2.1 节中的性能分析过程来近似,其中  $E_s = E_{RS}/2$ 。

分别记 RS 对原发送数据  $\mathbf{x}$ 、用户对 RS 解调后数据  $\mathbf{u}$  以及用户对原数据  $\mathbf{x}$  的解调 SER 概率为  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_{all}$ 。

由于第一个时隙的 RS 解调的错误概率为  $P_1$ ,则数据  $\mathbf{u}$  中正确的数据概率为  $1 - P_1$ 。第二时隙终端对数据  $\mathbf{u}$  进行解调,该阶段中解调错误的部分可以分为两个部分:一部分是第一时隙中已经解调错误的部分;另一部分是第二时隙传输过程中产生的错误。由于第二时隙的解调错误概率为  $P_2$ ,因此中继系统总的解调错误概率可以写为

$$P_{all} = P_1 + (1 - P_1)P_2 \quad (16)$$

### 3 仿真结果

仿真中,未编码的数据符号采用了 {QPSK, 16-QAM} 调制方式。假定信道满足平坦瑞利分布,两个用户到中继站的距离相等,链路的平均信噪比定义为  $\gamma = E_s/\mathcal{N}_0$ 。同时,假定 RS 的发射功率  $E_{RS} = 2E_s$ 。这样,由 2.2 节的分析可知,协议的第二时隙即为第一时隙的对称过程。

图 2 和图 3 分别给出了数据采用 QPSK 和 16-QAM 调制时的误符号率 SER 性能。随着天线数目的增加,解调可靠性大幅提升,这也正是基于 MIMO 的中继系统的优势。由图 2、图 3 可知,对于不同的调制方式以及不同的 RS 天线配置,系统 SER 仿真性能与分析性能吻合很好,验证了第 2 节中系统 SER 性能理论分析的正确性。

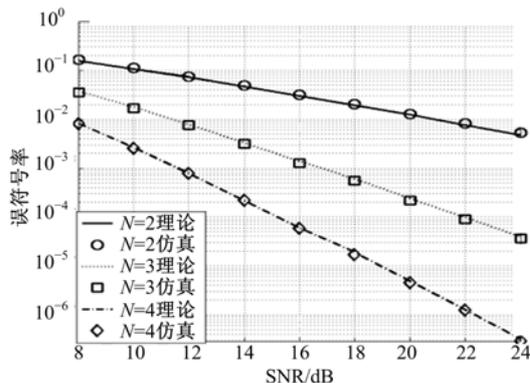


图 2 QPSK 用户解调 SER 性能

Fig. 2 SER performance of QPSK user

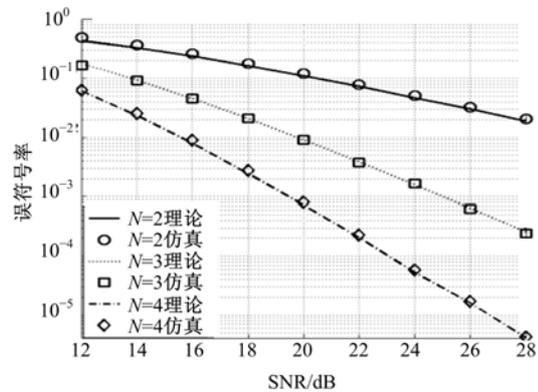


图 3 16-QAM 用户解调 SER 性能

Fig. 3 SER performance of 16-QAM user

### 4 结束语

提出了一种基于 MIMO 的双向解调转发中继协议,通过将中继协议的第一时隙和第二时隙分别等效于 MIMO-MAC 和 MIMO-BC,给出了基于 QAM 调制的本文协议的 SER 性能闭式解。仿真结果表明,MIMO 技术在中继系统中确实能够有效地提高链路传输可靠性。而且,仿真结果与理论分析结果吻合得很好,验证了理论分析的正确性。

#### 参考文献:

- [1] Chen D Q, Laneman J N. Modulation and demodulation for cooperative diversity in wireless systems [J]. IEEE Transaction Wireless Communications, 2006, 5(7): 1785-1794.
- [2] Laneman J N, Tse D N C, Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Transaction Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [3] Popovski P, Yomo H. Bi-directional amplification of throughput in a wireless multi-hop network [C] // Proc IEEE Vehicular Technology Conference, Melbourne, Australia, 2006: 588-593.
- [4] Larsson P, Johansson N, Sunell K E. Coded bi-directional relaying [C] // Proc IEEE Vehicular Technology Conference, Melbourne, Australia, 2006: 851-855.
- [5] Bolcskei H, Nabar R U, Oyman O, et al. Capacity scaling laws in MIMO relay networks [J]. IEEE Transaction Wireless Communications, 2006, 5(6): 1433-1444.
- [6] Abdulkareem A, Halim Y. Cooperative relaying in multi-antenna fixed relay networks [J]. IEEE

- Transaction Wireless Communications, 2007, 6(2): 533-544.
- [7] Unger T, Klein A. Applying relay stations with multiple antennas in the one- and two-way relay channel[C]//Proc IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Athens, Greece, 2007: 1-5.
- [8] Namyoon Lee, Heesun Park, Joohwan Chun. Linear precoder and decoder design for two-way AF MIMO relaying system [C] // Vehicular Technology Conference, Singapore, 2008: 1221-1225.
- [9] Chiani M, Win M Z, Zanella A, et al. Bounds and approximations for optimum combining of signals in the presence of multiple cochannel interferers and thermal noise[J]. IEEE Transaction Wireless Communications, 2003, 51(2): 296-307.
- [10] Shao X, Yuan J, Shao Y. Error performance analysis of linear zero forcing and MMSE precoders for MIMO broadcast channels [J]. IET Communications, 2007, 1(5): 1067-1074.
- [11] Zanella A, Chiani M, Win M Z. MMSE reception and successive interference cancellation for MIMO systems with high spectral efficiency [J]. IEEE Transaction Wireless Communications, 2005, 4(3): 1244-1253.
- [12] Proakis John G. Digital Communications[M]. 4th Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001: 276-280.