

基于可重构智能面的双空间调制方案设计

卜祥燕¹ 刘传举¹

BU Xiangyan LIU Chuanju

摘要

随着 5G 物联网技术的快速发展,降低系统能耗、提高信号传输可靠性已成为无线通信的首要问题。文章提出了一种基于可重构智能面(reconfigurable intelligent surfaces, RIS)的双空间调制(double spatial modulation, DSM)方案,简称 DSM-RIS。因其在发送端进行两次独立的空间调制,显著提升了系统的频谱效率。同时,为了克服无线信道传输的不确定性,通过可重构智能面对信息进行转发,通过优化可重构智能面的相位角提高系统传输可靠性。文章推导了 DSM-RIS 方案的平均比特错误概率(average bit error probability, ABEP)并进行了蒙特卡洛仿真,仿真结果证明了所提方案性能的优越性。

关键词

可重构智能面;双空间调制;相位优化;平均比特错误概率;5G

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.04.030

0 引言

作为一种特殊的多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)技术,空间调制(spatial modulation, SM)^[1-2]技术已得到了广泛的研究和应用。在每个时隙,SM 使用附加信息比特仅激活一根发射天线传输信息,因此,相比 MIMO,SM 提高了频谱效率,降低了接收端的

检测复杂度。而正交空间调制(orthogonal spatial modulation, QSM)^[3-4]作为一种新型的 SM 技术,从另一角度提高了频谱效率和系统性能。在每个时隙, QSM 在发送端激活两个发射天线,分别传输相互正交的调制符号实部和虚部。因此, QSM 降低了天线间的相互干扰。在文献[5]中,一种双空间调制(double spatial modulation, DSM)技术被提出。DSM 通过在发送端独立地进行两次空间调制将系统的频谱效率提高两倍,同时联合星座优化问题提高了整

1. 山东劳动职业技术学院 山东济南 250301

- [4] 曾强,刘晓群,郝娟.基于 RNN 与级联损失函数的图像超分辨率研究[J].信息技术与信息化,2024(10):81-84.
- [5] 夏雪,闫恩来,李喜武.Transformer 在时间序列预测中的应用综述[J].信息技术与信息化,2024(3):124-128.
- [6] MA X Z, ZHOU C T, KONG X, et al. Mega: moving average equipped gated attention[DB/OL].(2023-01-28)[2024-06-11]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.10655>.
- [7] KLINKER F. Exponential moving average versus moving exponential average[DB/OL].(2020-01-20)[2024-10-12]. <https://doi.org/10.1007/s00591-010-0080-8>.
- [8] QIU X R, ZHU R J, CHOU Y H, et al. Gated attention coding for training high-performance and efficient spiking neural networks[C]//Proceedings of the Thirty-Eighth AAAI Conference on Artificial Intelligence and Thirty-Sixth Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence and Fourteenth Symposium on Educational Advances in Artificial Intelligence. Palo Alto: AAAI, 2024: 601-610.

- [9] REN L L, LIU Y, WANG S H, et al. Sparse modular activation for efficient sequence modeling[C]//Proceedings of the 37th International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: ACM, 2023: 19799-19822.
- [10] ZHANG X, ZHAO J B, LECUN Y. Character-level convolutional networks for text classification[C]//Proceedings of the 29th International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: ACM, 2015: 649-657.
- [11] TRIPATHI S, MEHROTRA R, BANSAL V, et al. Analyzing sentiment using IMDb dataset[C]//2020 12th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN). Piscataway: IEEE, 2016: 520-523.

【作者简介】

许惠惠(1983—),女,山西洪洞人,硕士,讲师,研究方向:计算机应用、数据分析与挖掘。

(收稿日期:2024-12-05)

个系统的可靠性。

目前,随着 5G 技术、光网络技术甚至 6G 技术的快速发展,对传输质量的要求逐步提高。但在复杂的无线传输环境中,信号会不可避免地遇到许多障碍,产生折射、反射、衍射等现象,从而导致信道衰落,影响信号传输质量。在此背景下,可重构智能面(reconfigurable intelligent surfaces, RIS)^[6-7]的概念被提出, RIS 具有许多小型的、无源的、低成本的反射元件,通过调整这些反射元件的反射角灵活智能地控制无线通信环境,抵抗信道衰落,从而提高了通信质量,增强了接收端的接收信号。因此, RIS 技术在国内外得到了广泛研究。许多研究将 RIS 技术和 SM 技术进行结合,既能保留 SM 技术高频谱效率的优点,又可以克服信道衰落,提高信息传输可靠性。

在文献[8]中,提出了 RIS 辅助 QSM,进一步提高了 QSM 的可靠性。在文献[9]中, RIS 辅助通信被引入到索引调制(index modulation, IM)中。 RIS 单元的相位被调整以将信号聚焦在特定的接收天线,从而通过接收天线索引传输额外的信息比特。该方案在非常低的信噪比(signal-to-noise, SNR)下提供了可观的频谱效率。在文献[10]中, RIS 辅助的接收 SM (receive sm, RSM) 方案被提出,该方案通过联合优化功率分配矩阵和 RIS 反射系数来提高系统可靠性。

在上述已有方案的启发下,本文提出了一种基于可重构智能面(reconfigurable intelligent surfaces, RIS)的双空间调制(double spatial modulation, DSM)方案,简称 DSM-RIS。此方案联合天线选择和星座优化来提升系统频谱效率和传输可靠性。在发送端, DSM-RIS 进行两次独立的空间调制,即选择两根发送天线和两个调制符号。其中,第 1 个调制符号由第 1 根发送天线直接发送;第 2 个调制符号先旋转一个最优角度,然后由第 2 根发送天线发送。同时,为了克服无线信道传输的不确定性,将 RIS 与 DSM 方案进行结合,通过可重构智能面对信息进行转发,优化可重构智能面的相位角进一步提高系统传输可靠性。本文对 DSM-RIS 方案的平均比特错误概率(average bit error probability, ABEP)进行了分析推导,同时给出了其性能仿真。仿真结果证明了本文所提方案性能的优越性。

1 系统模型

图 1 为 DSM-RIS 的系统模型,发送端具有 N_t 根发送天线,接收端具有 N_r 根接收天线。系统采用双跳路径模型,不考虑直连路径。 RIS 作为中继位于发射端和接收端之间用以转发信息。 RIS 配备有 N 个无源的、低成本的反射元件,其反射相移

矩阵表示为 $\Phi \in N \times N$,第 i 个反射元件的反射相移可表示为 $\tau_i = e^{j\theta_i}$ 。因此可得, $\Phi = \text{diag}(\tau_1 e^{j\theta_1}, \tau_2 e^{j\theta_2}, \dots, \tau_N e^{j\theta_N})$,这里,相位角 $\theta_i \in [-\pi, \pi]$,反射系数 $\tau_i = 1$ 。假设发射端到 RIS 的信道响应为 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N \times N_t}$,这里, $H_{i,k} = \alpha_{i,k} e^{-j\phi_{i,k}}$, $i = 1, 2, \dots, N_r$, $k = 1, 2, \dots, N_t$ 。 RIS 到接收端的信道响应为 $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N_r \times N}$,这里, $G_{i,l} = \beta_{i,l} e^{-j\phi_{i,l}}$, $l = 1, 2, \dots, N_r$ 。 $\mathbf{H}$ 和 $\mathbf{G}$ 为服从高斯分布 $\text{CN}(0,1)$ 的平坦瑞利衰落信道。

对于 DSM-RIS 方案,其频谱效率可表示为:

$$\eta = 2\log_2 N_t + 2\log_2 M \quad (1)$$

输入的信息比特可分为两部分,一部分是 $2\log_2 N_t$ 个比特,并被平均分成两组,分别用来选择第 m 根和第 n 根发送天线;另一部分是 $2\log_2 M$ 个比特,同样被平均分成两组,分别用来选择调制符号 x_i 和 x_j 。然后,第 m 根发送天线发送符号, x_j 先进行最优角度的旋转,然后由第 n 根发送天线发送。

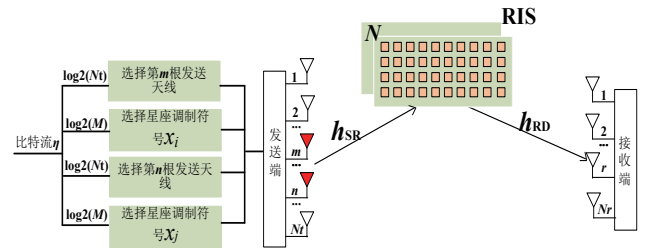


图 1 DSM-RIS 系统模型

因此,发送端的发送信号可表示为:

$$\mathbf{x} = \left[0, \dots, 0, \underbrace{x_i}_{m}, \dots, \underbrace{x_j e^{j\varphi}}_n, \dots, 0 \right] \quad (2)$$

式中: φ 表示最优旋转角,对于 BPSK、4-QAM 和 8-QAM 星座,其最优旋转角分别为 90° 、 45° 和 60° 。

发送信号经发送端发送后,经过 RIS 转发到达接收端。接收端接收到的信号可表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\Phi\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{C} = \mathbf{G}\Phi\mathbf{H}$ 是从发射端到 RIS 和从 RIS 到接收端的级联信道; $\mathbf{n}$ 为均值为 0,方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。

在接收端,采用最大似然检测,可得:

$$[\hat{m}, \hat{n}, \hat{i}, \hat{j}] = \arg \min_{m, n, i, j} \|\mathbf{y} - \mathbf{C}\mathbf{x}\|^2 \quad (4)$$

式中: $\hat{m}$ 和 $\hat{n}$ 分别表示检测到的发送天线的序号; $\hat{i}$ 和 $\hat{j}$ 分别表示检测到的星座符号的序号。

2 RIS 相位确定

在本节中,讨论了 RIS 的相位角 θ_i 的优化及确定。这里,以最大化系统的平均接收信噪比为依据确定每个反射元件的相位角。复合信道 $\mathbf{C}$ 可表示为:

$$\mathbf{C} = \mathbf{G}\Phi\mathbf{H} = \sum_{i=1}^N \mathbf{g}_i e^{j\theta_i} \mathbf{h}_i^T \quad (5)$$

式中: $\mathbf{g}_i$ 表示矩阵 $\mathbf{G}$ 的第 i 列; $\mathbf{h}_i$ 表示矩阵 $\mathbf{H}$ 的第 j 行。

因此, 问题可转换为:

$$\max_{\theta_i} \|\mathbf{C}\| = \max_{\theta_i} \left\| \sum_{i=1}^N \mathbf{g}_i e^{j\theta_i} \mathbf{h}_i^T \right\|, \text{ s.t. } |e^{j\theta_i}| = 1 \quad (6)$$

上述问题是非凸的, 无法直接求解。可根据余弦相似定理得到一个次优解。因此, 每个 RIS 相位的优化可确定为:

$$\begin{cases} \theta_i^h = \arccos \left(\frac{\langle \mathbf{h}_i, \tilde{\mathbf{h}}_i \rangle_{\text{Re}}}{\|\mathbf{h}_i\| \|\tilde{\mathbf{h}}_i\|} \right) \\ \theta_i^g = \arccos \left(\frac{\langle \mathbf{g}_i, \tilde{\mathbf{g}}_i \rangle_{\text{Re}}}{\|\mathbf{g}_i\| \|\tilde{\mathbf{g}}_i\|} \right) \\ \theta_i = -(\theta_i^h + \theta_i^g) \\ \Phi = \text{diag}(e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_N}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\tilde{\mathbf{h}}_i$ 、 $\tilde{\mathbf{g}}_i$ 分别表示为 $\tilde{\mathbf{h}}_i = [h_{i,1}, |h_{i,2}|, \dots, |h_{i,N_i}|]^T$, $\tilde{\mathbf{g}}_i = [g_{i,1}, |g_{i,2}|, \dots, |g_{i,N_i}|]^T$ 。

3 性能分析

在本节中, 对 DSM-RIS 方案的 ABEP 性能进行了分析。假设信道是独立的平坦瑞利衰落信道, 利用联合上界技术, 可将 DSM-RIS 方案的 ABEP^[11] 表示为:

$$P_{e,\text{bit}} \leq \frac{1}{\eta 2^\eta} E_c \left[\sum_{\Gamma} \sum_{\hat{\Gamma}} N(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}) \Pr(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) \right] \quad (8)$$

式中: $\Gamma = \langle m, n, i, j \rangle$ 表示发送端发送的联合索引; $\hat{\Gamma} = \langle \hat{m}, \hat{n}, \hat{i}, \hat{j} \rangle$ 表示接收端检测的联合索引; $N(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}})$ 表示 $\mathbf{x}$ 和 $\hat{\mathbf{x}}$ 之间错误比特的数量; $\Pr(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}})$ 表示成对错误概率; $E_c[\cdot]$ 表示对复合信道取均值。

$$\begin{aligned} \Pr(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) &= \Pr(\|\mathbf{y} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}\|_F^2 > \|\mathbf{y} - \mathbf{C}\mathbf{x}\|_F^2) \\ &= \Pr\left\{ \|\mathbf{C}\mathbf{x}\|^2 - \|\mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}\|^2 - 2\Re\{\mathbf{y}^H(\mathbf{C}\mathbf{x} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}})\} > 0 \right\} \\ &= Q\left(\sqrt{\frac{\|\mathbf{C}\mathbf{x} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}\|^2}{2\sigma^2}}\right) = Q(\sqrt{\gamma}) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\gamma = \frac{\|\mathbf{C}\mathbf{x} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}\|^2}{2\sigma^2}$ 表示接收端的信噪比; $Q(\cdot)$ 表示 Q 函数。因此, DSM-RIS 方案的 ABEP 最终可表示为:

$$P_{e,\text{bit}} \leq \frac{1}{\eta 2^\eta} \sum_{\Gamma} \sum_{\hat{\Gamma}} N(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}) E_c[Q(\sqrt{\gamma})] \quad (10)$$

4 仿真与结果分析

在本节中, 对所提的 DSM-RIS 方案进行了 Matlab 仿真, 得出不同参数下的 ABEP 性能曲线并详细说明了不同参数对 DSM-RIS 方案的影响。同时, 将 DSM-RIS 方案与传统的 DSM 方案及其他不同的方案进行对比, 证明了本文所提方案

性能的优越性。仿真中, 当 $M=2$ 时, 采用 BPSK 进行符号调制; 当 $M>2$, 采用 M -QAM 进行符号调制。

图 2 为 DSM-RIS 方案在不同反射元件数 N 条件下的性能比较。这里, 设置 $N_t=8$ 、 $N_r=4$ 、 $M=2$ 。由图 2 可知, 在其他参数相同的情况下, 系统性能随着反射元件数 N 的增加而提升。例如, 当 $\text{ABEP}=10^{-4}$ 时, $N=128$ 较 $N=64$ 、 $N=32$ 、 $N=16$ 时分别大约有 3.1 dB、6.5 dB 以及 10.0 dB 的信噪比增益。这是因为随着 N 的增加, 接收信号的能量增加。因此, 在接收端正确接收信息的概率增加, 性能更优。

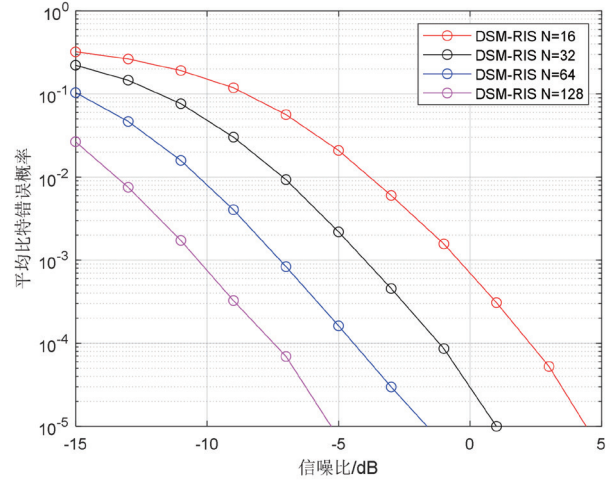


图 2 DSM-RIS 方案在不同反射元件数 N 下的性能比较

图 3 为相同频谱效率下, DSM-RIS 方案与其他已经存在的 SM-RIS 方案以及 QSM-RIS 方案的性能比较。

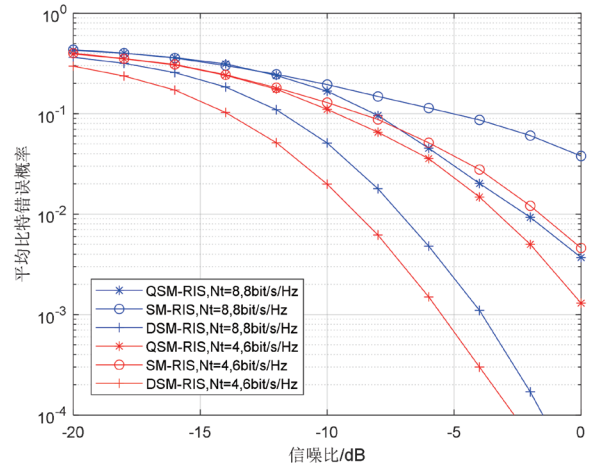


图 3 DSM-RIS 方案与其他方案性能的比较

这里, 设置 $N_r=4$ 、 $N=32$ 。在 $N_t=8$ 和 $N_t=4$ 两种情况下, 分别通过改变调制阶数 M 使不同方案的频谱效率达到一致。由图 3 可知, 不论在频谱效率为 $6 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$, 还是 $8 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 的情况下, 相比其他两种已存在的方案, 本文所提 DSM-RIS 方案的都体现出很大的性能优势。这是因为在

相同频谱效率下, DSM-RIS 方案、QSM-RIS 方案以及 SM-RIS 方案的调制阶数分别为 $M=2$ 、 $M=4$ 和 $M=32$ 。随着 M 的减小, 符号间的欧式距离变大, 符号间干扰减小, 因此出现错误的概率变小, 从而使性能变优。

图 4 为 DSM-RIS 方案与传统 DSM 方案的性能比较。这里, 设置 $N_t=4$ 、 $N_r=4$ 、 $N=32$ 。通过对 $6 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 、 $8 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 以及 $10 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 的频谱效率下分别对 DSM-RIS 方案与传统 DSM 方案的性能仿真可以看出, 本文所提 DSM-RIS 方案性能远远优于传统 DSM 方案。这是因为在所有参数都相同的情况下, 本文所提 DSM-RIS 方案能够通过 RIS 的转发缓解无线传输信道的衰落, 从而使得信号传输更加可靠。

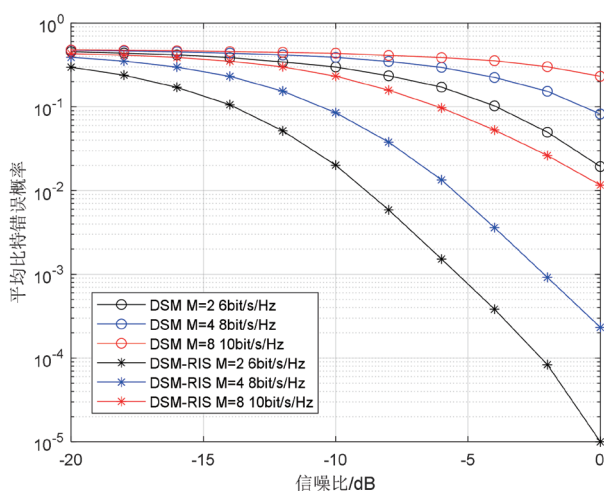


图 4 DSM-RIS 方案与传统 DSM 方案的性能比较

5 总结

本文提出的 DSM-RIS 方案, 将 RIS 技术应用于 DSM 方案, 一方面减小了无线信道传输的不确定性, 提高了信号传输的可靠性, 另一方面又保留了 DSM 方案高频谱效率的优势。因此, 本文所提方案具有一定的研究价值。但仍可在此基础上进行更深入的研究, 接下来将在低复杂度检测等方面进行深入研究, 使所提方案更好地应用于 5G 乃至 6G 通信技术中。

参考文献:

- [1] MESLEH R Y, HAAS H, SINANOVIC S, et al. Spatial modulation[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2008, 57(4): 2228-2242.
- [2] YANG P, LI S Q, XIAO Y, et al. Design guidelines for spatial modulation[J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2015, 17(1): 6-26.
- [3] MESLEH R, IKKI S S, AGGOUNE H M. Quadrature spatial

modulation[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2015, 64(6): 2738-2742.

- [4] CAI Y Y, BAI Z Q, LIU H W, et al. Quadrature spatial modulation based orthogonal time frequency spatial system[J]. AEU-international journal of electronics and communications, 2023, 160: 154495.
- [5] YIGIT Z, BASAR E. Double spatial modulation: a high-rate index modulation scheme for MIMO systems[C]//2016 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). Piscataway: IEEE, 2016: 347-351.
- [6] BASAR E, RENZO M D, ROSNY J D, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE access, 2019, 7: 116753-116773.
- [7] 刘凤麟, 李方伟, 王明月. 智能反射面辅助广义空间调制性能分析[J]. 电讯技术, 2023, 63 (9): 1383-1390.
- [8] SANILA K S, RAJAMOHAN N. Intelligent reflecting surface assisted transceiver quadrature spatial modulation[J]. IEEE communications letters, 2022, 26(7): 1653-1657.
- [9] BASAR E. Reconfigurable intelligent surface-based index modulation: a new beyond MIMO paradigm for 6G[J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(5): 3187-3196.
- [10] DINAN M H, RENZO M D, FLANAGAN M F. RIS-assisted receive quadrature spatial modulation with low-complexity greedy detection[J]. IEEE transactions on communications, 2023, 71(11): 6546-6560.
- [11] 卜祥燕, 白智全, 庞珂, 等. 双联合收发空间调制方案设计性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(7): 1797-1803.

【作者简介】

卜祥燕 (1995—), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 空间调制的优化设计、协作通信技术、可重构智能面。

刘传举 (1995—), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 计算机虚拟仿真、信息安全。

(收稿日期: 2024-11-29)