

引用格式: 王婵飞, 崔永艳, 何继爱, 等. 基于集分割策略的差分空间调制算法研究及性能优化 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(5): 717-722.  
WANG C F, CUI Y Y, HE J A, et al. Research and performance optimization of a differential spatial modulation algorithm based on set partitioning strategy[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(5): 717-722.

# 基于集分割策略的差分空间调制算法研究及性能优化



王婵飞\*, 崔永艳, 何继爱, 许亚美

(兰州理工大学 计算机与通信学院, 兰州 730050)

**摘要:** 差分空间调制 (DSM) 是一种多天线技术, 通过在该技术中融合集分割策略, 提出了基于集分割策略的差分空间调制算法。该算法引入冗余码设计, 重新设计了 DSM 系统发射端的符号调制规则, 实现了集合分割的操作, 既保持了频谱效率的提升, 又通过增强同一信息块内所有调制符号间的关联性, 显著增强了编码增益。通过进一步设计天线激活矩阵, 对在仅使用两根发射天线场景下的系统性能进行了优化。仿真结果表明: 该算法相比于传统 DSM 系统, 在相同的频谱效率下, 展现出更低的误码率。

**关键词:** 空间调制; 差分空间调制; 集分割; 编码增益

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.12178/1001-0548.2024191

## Research and performance optimization of a differential spatial modulation algorithm based on set partitioning strategy

WANG Chanfei\*, CUI Yongyan, HE Jiai, and XU Yamei

(School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** By integrating the set segmentation strategy in differential spatial modulation (DSM), a multi-antenna technology, a differential spatial modulation algorithm based on the set partitioning strategy is proposed. This algorithm introduces redundant code design, redefines the symbol modulation rules at the DSM system's transmitter end, and implements set partitioning operations. This approach not only improves spectral efficiency but also significantly enhances coding gain by strengthening the correlation among all modulation symbols within the same information block. By further designing the antenna activation matrix, the system performance is optimized in the scenario where only two transmitting antennas are used. Simulation results show that the proposed algorithm, compared with the traditional DSM systems, exhibits a lower bit error rate under the same spectral efficiency.

**Key words:** spatial modulation; differential spatial modulation; set partitioning; coding gain

空间调制 (spatial modulation, SM) 技术巧妙地借助发射天线的索引来额外传递信息, 同时在每个时隙内仅激活一根发射天线, 此举在保障频谱效率的同时, 有效规避了空间复用中常见的天线间同步难题及信道间干扰的挑战<sup>[1-2]</sup>。然而, SM 系统在检测端对信道估计的依赖, 却成为其在信道动态变化环境下性能受限的关键因素, 因为信道快速移动会极大增加信道估计的难度, 进而削弱系统性能。为突破这一瓶颈, 文献 [3-4] 提出了差分空间调制

(differential spatial modulation, DSM) 系统, 该系统在继承 SM 系统诸多优势的基础上, 通过在接收端实施非相干检测策略进而避免了信道估计。这一创新不仅简化了系统复杂度, 还增强了系统在复杂信道条件下的鲁棒性。尽管研究表明, 与经典的 SM 系统相比, DSM 系统可能面临一定的误码率性能折损<sup>[5]</sup>。但其独特的优势, 尤其是在无须信道估计的场景下展现出的卓越性能, 为无线通信领域的研究与应用开辟了新的路径。

收稿日期: 2024-07-27

基金项目: 国家自然科学基金 (62061024); 甘肃省科技厅项目 (22ZD6GA055)

作者简介: 王婵飞, 博士, 副教授, 主要从事通信系统中的信号检测与处理方面的研究。

\*通信作者 E-mail: wangchanfei@163.com

DSM 作为差分技术与空间调制融合的产物, 展现了一种独特的调制策略。为进一步提升数据传输速率, 文献 [6-7] 将振幅相移键控调制方式 (amplitude and phase shift keying, APSK) 融入 DSM 框架中, 这一创新在保持相同吞吐量的前提下, 降低了系统的误码率。文献 [8] 提出了重排序振幅相移键控辅助差分空间调制算法, 该算法为解决误差传播问题提供了较好的思路。为了实现 DSM 系统的高速率传输, 文献 [9] 提出了复合相移角度旋转正交振幅调制辅助的差分空间调制 (ARQAM-aided DSM) 方案, 该方案相较于传统的多环 APSK 辅助 DSM 系统, 在通信质量上展现出了一定的优势与提升。文献 [10] 则提出差分正交空间调制算法, 使用不同的天线索引矩阵分别传输数据符号的实部和虚部, 由于选择了附加的天线激活矩阵, 实现了频谱效率的显著提升。文献 [11] 在 DSM 与 SM 技术之间架起了一座桥梁, 提出了长块 DSM 的概念。长块 DSM 通过融合两种调制技术的精髓, 不仅继承了 DSM 的优势, 还实现了传输速率的飞跃性提升, 为追求更高性能要求的通信系统提供了强有力的技术支持。

为了在确保高效传输速率的同时, 有效节约接收端天线资源的消耗, 针对 DSM 系统在传统模式下难以实现发射分集的问题, 文献 [12] 提出了 Unified DSM 系统。该系统通过将发射天线划分为多个子集, 每个子集内的天线协同工作并发送相同的符号, 从而灵活实现任意低于或等于总发射天线数量的发射分集阶数。这一策略虽以牺牲部分频谱效率为代价, 却显著降低了系统的误码率, 为资源优化提供了新思路。文献 [13] 则深入探索了代数域扩展在差分空间调制中的应用, 提出了 FE-DSM 算法。通过代数域扩展的方法精心构造差分空时码块, FE-DSM 实现了满分集增益。尽管这一算法在一定程度上降低了传输速率, 但其在分集性能上的卓越表现仍具有重要意义。文献 [14] 在 DSM 架构中使用循环信号星座, 该方案能够在两根发射天线的配置下实现满发射分集, 极大地增强了信号传输的可靠性。然而, 其应用受限于天线数量, 且须对参数进行优化以达到较优性能。文献 [15-17] 另辟蹊径, 在 DSM 框架的调制矩阵中采用 Alamouti 编码结构, 这一创新策略成功实现了分集增益的获取, 提升了系统的性能。

在此技术革新的背景下, 为兼顾频谱资源的高效利用与编码增益的显著优势, 并力求系统模型的

简洁性, 本文提出了一种基于集分割策略的差分空间调制优化算法。通过独特的冗余编码设计以及优化天线激活矩阵的策略, 实现了频谱效率、编码增益与系统模型简化之间的平衡。

## 1 差分空间调制系统模型

考虑具有  $N_t$  个发射天线和  $N_r$  个接收天线的 DSM 系统。天线对之间的信道是平坦瑞利衰落信道, 并且彼此独立。DSM 系统的每个发送信号包含  $M_t$  个时隙, 每个时隙仅激活一根发射天线, 故发送的信号矩阵  $\mathbf{S}_{N_t \times N_t}$  的每行每列只有一个非零元素。则接收信号  $\mathbf{Y}_{N_r \times N_t}$  可表示为:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{S} + \mathbf{N} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{H}_{N_r \times N_t}$  为信道矩阵;  $\mathbf{N}_{N_r \times N_t}$  为加性高斯白噪声矩阵。 $\mathbf{H}$  和  $\mathbf{N}$  中的元素分别服从均值为 0 的独立复高斯分布  $\text{CN}(0, 1)$  和  $\text{CN}(0, N_0)$ 。

在第  $k$  个传输块内,  $\mathbf{S}_k$  由上一次发送的矩阵  $\mathbf{S}_{k-1}$  和  $\mathbf{X}_k$  联合得到:

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{S}_{k-1}\mathbf{X}_k \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{X}_k$  表示携带传输信息的  $N_t \times N_t$  维数据矩阵, 由天线激活矩阵与调制矩阵联合构成。初始发送信号  $\mathbf{S}_0$  一般为  $N_t \times N_t$  维的单位矩阵。当  $\mathbf{S}_k$  经过信道, 接收信号可表示为:

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{H}\mathbf{S}_k + \mathbf{N}_k \quad (3)$$

则可以得出:

$$\mathbf{Y}_{k-1} = \mathbf{H}\mathbf{S}_{k-1} + \mathbf{N}_{k-1} \quad (4)$$

由式 (3) 和式 (4) 联合可得:

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{Y}_{k-1}\mathbf{X}_k - \mathbf{N}_{k-1}\mathbf{X}_k + \mathbf{N}_k \quad (5)$$

利用最大似然检测算法实现检测:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \arg \min_{\mathbf{X}_k \in \mathcal{Z}} \|\mathbf{Y}_k - \mathbf{Y}_{k-1}\mathbf{X}_k\|^2 \quad (6)$$

式中,  $\mathcal{Z}$  表示  $\mathbf{X}_k$  所有可能值的集合;  $\|\cdot\|$  表示矩阵的 F-范数。在接收端使用检测算法检测出数据后, 可根据映射规则解调出实际发送的信息比特流。

## 2 基于 8PSK 集分割策略的差分空间调制系统

### 2.1 集分割策略

集分割映射策略作为网格编码调制技术的一种映射方法, 其精髓在于将冗余码添加在调制信号中,

在空间上对信号进行划分, 网格编码调制技术将信道编码与调制过程进行联合设计, 实现了两者间的协作<sup>[18]</sup>。在网格编码调制技术中, 卷积编码后的比特流被巧妙地用来指引对信号空间的精细划分, 进而选择出最优的子集。本文在此基础上进一步创新, 在符号比特序列中嵌入一致的冗余码段, 这一设计不仅简化了子集选择的复杂度, 还增强了数据传输的鲁棒性。随后, 剩余的符号比特则承担起在选定子集中精确挑选信号点的重任, 实现了对信号空间的高效利用与精准控制。这一集分割映射方法, 不仅保留了网格编码调制技术原有的优势, 更在子集选择与信号点定位上展现出灵活性与精确度。

集分割技术是一种星座图优化策略, 它遵循一定的规则, 逐步将星座图上的信号点进行层次分明的划分, 最终构建出多个子集<sup>[18]</sup>。通过对信号集的分割, 将原本庞大的信号点群体巧妙地划分为多个子集。使用这样的分集方式可以使得信号集中的信号点之间的最小的欧式距离不断扩大, 编码增益也随之增大。随着分割的深入, 虽然每个子集内的信号点数量在逐渐减少, 但每个子集内的信号点之间的最小的欧式距离却实现了最大化, 从而增强了信号传输的抗干扰能力和可靠性。

### 2.2 发射端结构

基于集分割策略的 DSM 系统的编码与发送流程如图 1 所示。假设系统发射端配备有  $N_t$  个发射天线, 当  $B$  个比特的二进制数据进入系统的发射端后, 这些比特被分为 3 个部分:  $B_1$ 、 $B_2$  和  $B_3$ , 它

们各自承载着不同的信息。其中前  $B_1$  为  $\lfloor \log_2(N_t!) \rfloor$  个比特, 负责确定天线激活矩阵  $A_k$ , 该矩阵是差分空间调制策略的核心, 决定了哪些天线将被激活以传输信号。随后, 利用  $B_2$  和  $B_3$  部分的协同作用, 共同构建调制矩阵, 其中  $B_2$  部分为冗余码,  $B_3$  部分是传输的有效码。有效码一般被分为  $N_t$  组, 每组具有相同的比特长度。为了实现 8PSK 信号点的灵活集分割, 系统巧妙地调整冗余码与有效码的长度比例。具体而言, 当冗余码长度为 1, 有效码长度为 2 时, 实现对信号点集合的 1 次集分割, 这种配置促进了信号空间的精细划分。反之, 若将冗余码长度扩展至 2, 而将有效码缩短为 1, 则可实现更为深入的 2 次集分割, 进一步提升了信号设计的灵活性与系统的性能潜力。接下来, 系统将冗余码与相应的有效码组进行配对, 形成  $N_t$  个复合比特组, 这些比特组随后被送入 8PSK 调制器进行调制处理。从 8PSK 星座图中选择  $N_t$  个调制符号  $(x_1, x_2, \dots, x_{N_t})$ , 这些符号承载着传输比特与调制方式的信息。紧接着, 调制符号经历对角化处理, 形成调制矩阵  $x_k = \text{diag}\{x(k)\}$ 。最终, 通过调制矩阵  $\text{diag}\{x(k)\}$  与天线激活矩阵  $A_k$  的乘法运算, 生成数据矩阵  $X_k$ , 将  $X_k$  进行差分处理后通过天线向空间发送。值得注意的是, 由于每根天线上传输的信号点均共享相同的冗余码, 这种设计赋予了调制后的符号内在的相关性, 从而提高了数据传输的可靠性, 增强了系统对抗信道干扰的能力。

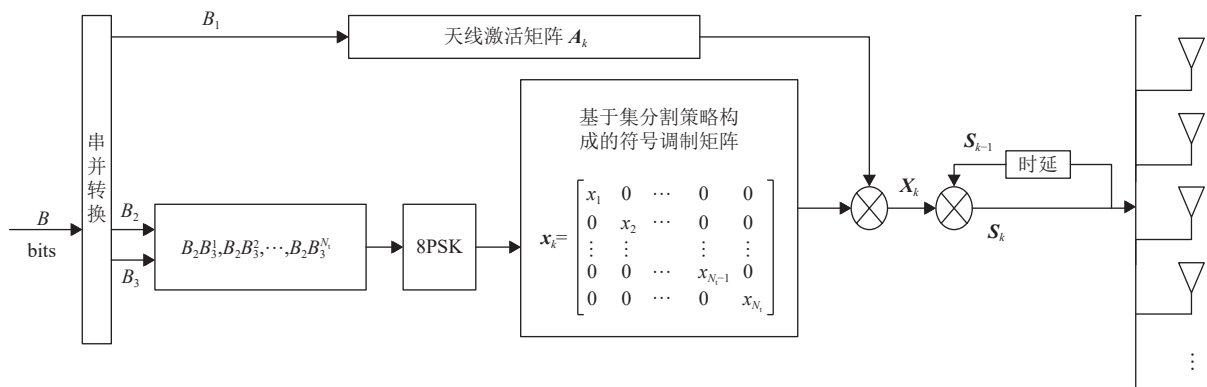


图 1 基于集分割策略的 DSM 系统发射端模型

### 2.3 优化天线激活矩阵的构造策略

为了提升系统的性能增益, 在发射天线为 2, 8PSK 调制下且有效码长度为 1 时, 设计了一种新的天线激活矩阵算法。该算法的核心在于, 针对调制矩阵中的每一组调制符号, 实施天线激活矩阵转换策略: 当调制符号组内的两个调制符号相同且天

线激活矩阵为单位矩阵时, 在天线激活矩阵中引入一个特定的旋转角度变换; 当调制符号组内的两个调制符号各异且天线激活矩阵是反对角矩阵的情况下, 也在天线激活矩阵中引入一个特定的旋转角度变换; 当调制符号组内的两个调制符号以及天线激活矩阵是其他情况时, 在天线激活矩阵中不引入

特定的旋转角度变换。表 1 展示的是针对上述算法设计的双发射天线系统的天线激活矩阵映射表 ( $N_t=2$ )。其中,  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\theta \neq n\pi/4$ ,  $n$  为整数。

表 1 天线激活矩阵映射表

调制符号	天线激活比特	天线激活顺序	天线激活矩阵
$x_1 = x_2$	0	(1, 2)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} e^{j\theta}$
	1	(2, 1)	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
$x_1 \neq x_2$	0	(1, 2)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
	1	(2, 1)	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} e^{j\theta}$

### 3 频谱效率分析

基于上述设计准则, 对于一个具有  $N_t$  根发射天线的基于集分割策略的 DSM 系统, 对 8PSK 信号点集合进行 1 次分割, 即冗余码长度设置为 1, 有效码长度为 2, 每  $N_t$  个时隙发送的比特长度为  $[\log_2(N_t!)] + 1 + 2N_t$ , 则所提出的 DSM 系统的频谱效率可以表示为:

$$R = \frac{B_1 + B_2 + B_3}{N_t} = \frac{[\log_2(N_t!)] + 1 + 2N_t}{N_t} \quad (7)$$

$R$  的单位为 bits/s/Hz。

若对于一个具有  $N_t$  根发射天线的基于集分割策略的 DSM 系统, 对 8PSK 信号点集合进行 2 次分割, 每  $N_t$  个时隙发送的比特长度为  $[\log_2(N_t!)] + 2 + N_t$ , 则所提出的 DSM 的频谱效率可以表示为:

$$R = \frac{B_1 + B_2 + B_3}{N_t} = \frac{[\log_2(N_t!)] + 2 + N_t}{N_t} \quad (8)$$

综上所述, 所提出的基于集分割策略的 DSM 系统的频谱效率与发射天线的数目、集分割次数以及调制方式有关。

### 4 仿真结果

本节展示了基于集分割策略的 DSM 系统的误码性能仿真结果, 并将其与传统的 DSM 系统以及文献 [9] 中的 ARQAM-aided DSM 系统进行了比较。为了更直观地评估在 DSM 中引入冗余码后的误码性能, 统一采用查表法作为天线激活顺序算法, 并在接收端采用最大似然检测算法以确保检测的准确性。此外, 所有经过冗余码增强的方案均采用了 8PSK 调制方式。具体地, 定义以下 3 种 DSM 算法变体以进行对比分析。

SP1-DSM: 代表基于集分割策略的 DSM 算法, 其中嵌入了 1 位冗余码, 旨在通过增加少量冗余码来提高传输的可靠性。

SP2-DSM: 同样基于集分割策略, 但在此基础上增加了 2 位冗余码, 进一步增强了 DSM 系统的抗误码能力。

SPR2-DSM: 此算法引入了 2 位冗余码以及 1 位有效码, 还同时优化了天线激活矩阵, 通过双重策略来最大化地降低基于集分割策略的 DSM 算法的误码率。

为了在同一频谱效率下比较所提 DSM 算法与传统 DSM 算法的性能, 在传统 DSM 系统的同一个信息块的  $N_t$  个时隙内灵活采用多种符号调制方式。以  $N_t = 3$  为例, 在一个信息块的 3 个连续时隙中分别采用 8PSK、QPSK 和 BPSK 调制技术。为便于标识, 使用“8”来代表 8PSK 调制, 用“Q”来代表 QPSK 调制, 而用“B”来代表 BPSK 调制, 具体在 DSM 系统中的含义阐述如下。

DSM QQQ:  $N_t = 3$ , 信息块的 3 个时隙均采用 QPSK 调制方式。

DSM QQ8:  $N_t = 3$ , 信息块的前 2 个时隙采用 QPSK 调制方式, 第 3 个时隙采用 8PSK 调制方式。

DSM BBB:  $N_t = 3$ , 信息块的 3 个时隙均采用 BPSK 调制方式。

DSM QQB:  $N_t = 3$ , 信息块的前 2 个时隙采用 QPSK 调制方式, 第 3 个时隙采用 BPSK 调制方式。

DSM QQ:  $N_t = 2$ , 信息块的 2 个时隙均采用 QPSK 调制方式。

图 2 展示了在发射天线数量满足  $N_t = 3$ , 且分别考虑接收天线数量  $N_r = 3, 2$  场景下, 对比了在频谱效率分别为 3.00 bits/s/Hz 和 2.67 bits/s/Hz 时, 添加 1 位冗余码时所提算法与传统 DSM 算法的误码率性能。这两种频谱效率的设置旨在评估不同接收天线配置以及不同调制方式对算法性能的影响, 同时考察冗余码对提升系统可靠性的效果。通过图 2 可以清晰地观察到所提算法在引入 1 位冗余码后, 相较于传统 DSM 算法, 在相同频谱效率下, 展现出更低的误码率。特别是随着信噪比的升高和接收天线数目的增多, 所提算法的 BER 下降更为显著。

图 3 展示了在发射天线数量满足  $N_t = 3$ , 且分别考虑接收天线数量  $N_r = 3, 2$  场景下, 对比了在频谱效率分别为 2.33 bits/s/Hz 和 1.67 bits/s/Hz 时, 添加 2 位冗余码时所提算法与传统 DSM 算法的误码率

性能。通过图 3 可以清晰地观察到所提算法在引入 2 位冗余码后, 相较于传统 DSM 算法, 在相同频谱效率下, 展现出了更低的误码率。且随着信噪比的升高和接收天线数目的增多, 所提算法的优势更加明显。

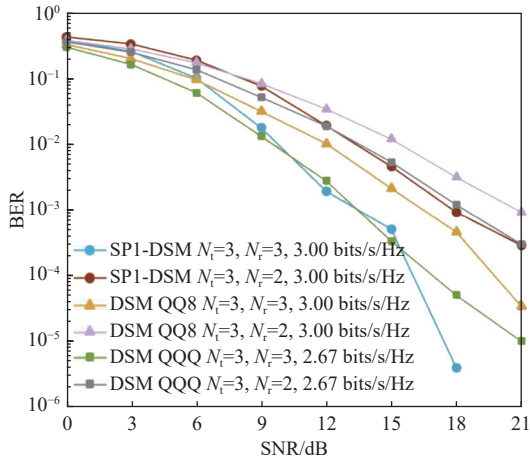


图 2 SP1-DSM 与 DSM 的 BER 性能比较

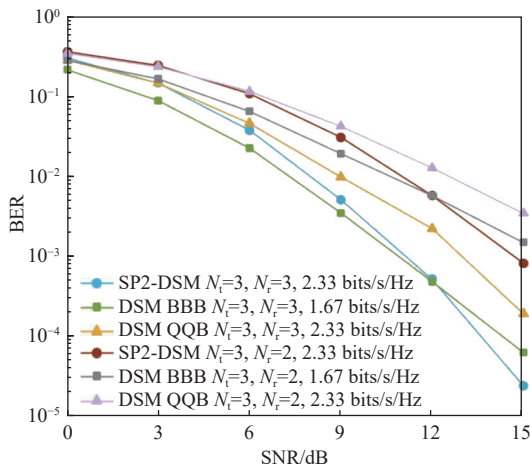


图 3 SP2-DSM 与 DSM 的 BER 性能比较

图 4 展示了在发射天线数  $N_t=2$ , 接收天线  $N_r=1$  的情况下, 频谱效率为 2.5 bits/s/Hz 时, 添加 2 位冗余码以及 1 位有效码时, 采用优化天线激活矩阵构造策略的基于集分割的两天线 DSM 算法与未采用优化天线激活矩阵构造策略的基于集分割的 DSM 算法以及传统 DSM 算法的 BER 性能曲线。通过图 4 可以观察到, 对集分割策略中的天线激活矩阵进行优化后的算法, 在 BER 性能上优于传统 DSM 算法以及未对集分割策略中的天线激活矩阵进行优化设计的算法。

图 5 展示了在发射天线数量  $N_t=2$  的条件下, 聚焦于接收天线数量为  $N_r=2$  的场景, 对比引入

1 位冗余码后, 所提出的算法与文献 [9] 中提出的 ARQAM-aided DSM 算法在 BER 性能上的表现。为确保比较的公正性, 图中展示的所有调制方案均被设定为具有相同的星座平均功率。图中标注的“16ARQAM of DSM”指文献 [9] 采用 16ARQAM 调制技术实现的 DSM 系统, ARQAM 表示角度旋转正交振幅调制, 16 是 ARQAM 调制的阶数。从图 5 中可以看出, 尽管相较于 ARQAM-aided DSM 算法, 所提出的算法在频谱效率上可能面临一定的折中, 但在误码率控制方面却展现出了较大优势。这一发现为进一步评估和优化通信系统的性能提供了参考。

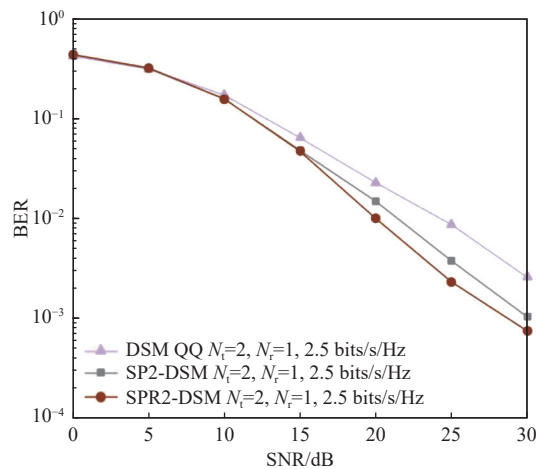


图 4 SPR2-DSM 与 SP2-DSM 以及 DSM 的 BER 性能比较

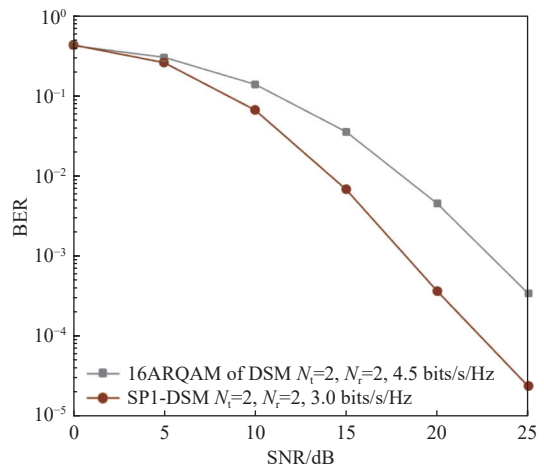


图 5 SP1-DSM 与 ARQAM-aided DSM 算法的 BER 性能比较

## 5 结束语

本文深入探讨了基于集分割策略的 DSM 系统, 通过在同一信息块的每组符号调制比特中嵌入相同的冗余码, 实现了集分割的效果, 这一设计显

著提升了系统的传输速率。更为重要的是,通过设计子集映射机制增强了系统的抗干扰和容错能力。当算法的有效码长度设定为 1 时,通过利用调制符号之间的关系以及天线激活顺序来选择天线激活矩阵,成功地在仅使用两天线的配置下,进一步提高了系统性能。

### 参考文献

- [1] MESLEH R, HAAS H, AHN C W, et al. Spatial modulation-A new low complexity spectral efficiency enhancing technique[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Communications and Networking in China. Beijing: IEEE, 2006: 1-5.
- [2] MESLEH R Y, HAAS H, SINANOVIC S, et al. Spatial modulation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(4): 2228-2241.
- [3] BIAN Y Y, WEN M W, CHENG X, et al. A differential scheme for spatial modulation[C]//Proceedings of the IEEE Global Communications Conference. Atlanta: IEEE, 2013: 3925-3930.
- [4] BIAN Y Y, CHENG X, WEN M W, et al. Differential spatial modulation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(7): 3262-3268.
- [5] WEN M W, DING Z G, CHENG X, et al. Performance analysis of differential spatial modulation with two transmit antennas[J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(3): 475-478.
- [6] MARTIN P A. Differential spatial modulation for APSK in time-varying fading channels[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(7): 1261-1264.
- [7] LIU J, DAN L, YANG P, et al. High-rate APSK-aided differential spatial modulation: Design method and performance analysis[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(1): 168-171.
- [8] YANG L, XIU H T, YU D Z, et al. Reordered amplitude phase shift keying aided differential spatial modulation: DFDD-based low-complexity detector and performance analysis over fading channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(10): 7913-7925.
- [9] FAN Y J, YANG L Q, ZHANG D L, et al. An angle rotate-QAM aided differential spatial modulation for 5G ubiquitous mobile networks[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2022, 27(5): 1828-1840.
- [10] MESLEH R, ALTHUNIBAT S, YOUNIS A. Differential quadrature spatial modulation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(9): 3810-3817.
- [11] WEI R Y, CHEN B C, LEE Y C. Long-block differential spatial modulation[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 13223-13231.
- [12] ISHIKAWA N, SUGIURA S. Unified differential spatial modulation[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2014, 3(4): 337-340.
- [13] RAJASHEKAR R, ISHIKAWA N, SUGIURA S, et al. Full-diversity dispersion matrices from algebraic field extensions for differential spatial modulation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(1): 385-394.
- [14] ZHANG W L, YIN Q Y, DENG H. Differential full diversity spatial modulation and its performance analysis with two transmit antennas[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(4): 677-680.
- [15] XIAO L X, XIAO Y, YANG P, et al. Space-time block coded differential spatial modulation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(10): 8821-8834.
- [16] 曹鑫, 王磊, 薛奕蕾. 采用二重天线激活矩阵的差分空间调制算法[J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(10): 36-44.  
CAO X, WANG L, XUE Y L. Differential spatial modulation with twofold antennas selection[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(10): 36-44.
- [17] 王志成, 陈志刚, 王磊. 基于正交空时分组码的差分空间调制方案[J]. *通信学报*, 2017, 38(9): 148-158.  
WANG Z C, CHEN Z G, WANG L. Differential spatial modulation scheme based on orthogonal space-time block coded[J]. *Journal on Communications*, 2017, 38(9): 148-158.
- [18] UNGERBOECK G. Channel coding with multilevel/phase signals[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1982, 28(1): 55-67.

编辑 张莉