

## 排列模式索引调制正交频分复用系统

邵凯<sup>\*①②③</sup> 金庚<sup>①</sup> 王光宇<sup>①②③</sup> 周博文<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

<sup>②</sup>(移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)

<sup>③</sup>(移动通信教育部工程研究中心 重庆 400065)

**摘要:** 多模索引调制正交频分复用系统(MM-OFDM-IM)在索引调制正交频分复用系统的基础上采用不同星座集对系统中的全部子载波进行索引调制,能有效地提高系统的子载波利用率和频谱效率。但全部子载波的利用影响了系统的子载波间抗干扰能力,导致误码率性能下降。针对这一问题,该文提出排列模式索引调制正交频分复用系统(PM-OFDM-IM)。该系统在MM-OFDM-IM的基础上重新引入静默子载波,既能保证系统较高的频谱效率,又能提高系统的误码率性能。同时该文提出一种基于幅值相移键控的分类映射模式,即按半径大小排列的星座集分类模式(PCC-R),该模式能够良好结合系统传输的额外信息。最后仿真结果验证,该系统能够更优地均衡系统的频谱效率和误码率性能,且所提分类映射方案可以达到更优的系统性能。

**关键词:** 索引调制; 正交频分复用; 频谱效率; 比特误码率

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)09-2640-07

DOI: [10.11999/JEIT200248](https://doi.org/10.11999/JEIT200248)

## Permutation-mode Orthogonal Frequency Division Multiplexing System with Index Modulation

SHAO Kai<sup>①②③</sup> JIN Geng<sup>①</sup> WANG Guangyu<sup>①②③</sup> ZHOU Bowen<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

<sup>②</sup>(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing 400065, China)

<sup>③</sup>(Engineering Research Center of Mobile Communications of the Ministry of Education, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Multi-Mode Orthogonal Frequency Division Multiplexing system with Index Modulation(MM-OFDM-IM) uses different constellation sets on the basis of orthogonal frequency division Multiplexing with index modulation to index modulate all subcarriers in the system, which can effectively improve the subcarrier utilization and spectrum efficiency. However, the utilization of all subcarriers will affect the anti-interference ability of the system sub-carriers, which will cause the system's bit error rate performance to decrease. To solve this problem, a Permutation-Mode Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation (PM-OFDM-IM) is proposed, which is based on the MM-OFDM-IM. This system re-introduces the silent subcarrier, which can ensure the system's higher spectral efficiency and improve the system's bit error rate performance. Further, a classification mapping mode is proposed based on amplitude phase shift keying, i.e. a Permutation Constellation set Classification mode arranged by Radius (PCC-R). This mode can combine system information well. Finally, simulation results verify that the system can better balance the spectral efficiency and the bit error rate performance of the system, and the proposed classification mapping scheme can achieve better system performance.

**Key words:** Index modulation; Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM); Spectral efficiency; Bit Error Rate(BER)

### 1 引言

5G时代，移动数据服务的爆发式增长和智能移动设备的普及，对通信系统提出了高频谱效率和能量效率<sup>[1-3]</sup>的要求。索引调制(Index Modulation, IM)技术作为一种新兴技术，针对天线、时隙和子载波等物理资源，通过选择不同索引序号来传输更多的信息。因此IM系统与传统系统相比能够显著提高系统的频谱效率和能量效率，使得该技术以各种形式应用于毫米波传输<sup>[4,5]</sup>、大规模多输入多输出<sup>[6]</sup>和信道编码<sup>[7]</sup>等无线通信系统中，并在5G中获得越来越多的关注<sup>[8]</sup>。

文献<sup>[9]</sup>提出索引调制正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation, OFDM-IM)系统将IM技术应用到OFDM系统上，该方案使用系统激活子载波的索引序号传输额外信息，大大提高了系统的频谱效率和能量效率。频谱效率是无线通信中的一个重要指标<sup>[10]</sup>，但当调制阶数较大或静默子载波的比例较高时，该方案的频谱效率受到限制。因此部分学者提出泛化索引调制正交频分复用系统<sup>[11]</sup>和混合同相/正交索引调制的正交频分复用系统<sup>[12]</sup>，增加系统中索引传输的额外信息来提高系统频谱效率。同时部分学者提出双模索引调制的正交频分复用系统<sup>[13]</sup>和泛化双模索引调制的正交频分复用系统<sup>[14]</sup>。这两种方案舍弃了IM系统中的静默子载波，使用两种星座集调制全部子载波，但仍使用一种星座集调制的子载波索引传输额外信息，提高了系统频谱效率。文献<sup>[15]</sup>在此基础上提出多种模式索引调制的正交频分复用(Multiple-Mode OFDM with Index Modulation, MM-OFDM-IM)系统。MM-OFDM-IM方案增加了调制子载波的星座集种类对子载波进行区分，利用子载波索引的排列信息传输额外信息，以同时增加索引传输的额外信息和增加传统调制传输的信息的方式来提高系统的频谱效率。但MM-OFDM-IM系统激活全部子载波会增强载波间干扰的影响<sup>[16]</sup>，降低系统的误码率性能。

本文为解决这一问题提出了排列模式索引调制的正交频分复用 (Permutation-Mode Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation, PM-OFDM-IM)系统。该系统在子块中以索引方式加入静默子载波。这既保证系统拥有较高的频谱效率，同时增强系统子载波间抗干扰能力，使系统在频谱效率和误码率性能间得到更好的均衡。因为PM-OFDM-IM系统的误码率性能与星座点之间的最小欧氏距离有关，所以本文提出一种适用于该系统的基于幅值相移键控的分类映射模式。

全文安排如下：首先给出PM-OFDM-IM系统的系统模型和实现方案；其次，分析系统的抗频偏和可达比特速率性能；然后介绍提出的星座图映射方案；最后仿真验证该方案的误码率、可达比特速率、抗频偏能力等性能并得出结论。

### 2 系统模型

#### 2.1 PM-OFDM-IM模型

为减少系统子载波间干扰和提高比特误码率(Bit Error Rate, BER)性能，PM-OFDM-IM系统中加入静默子载波，并改进索引比特以提高系统频谱效率。如图1所示PM-OFDM-IM系统的发送架构，系统子载波按块划分， $g$ 个子块具有相同数量的子载波。输入系统的总发送比特也被均分为 $g$ 份，每份有 $P$ 比特。输入子块中的比特继续分为两部分， $P_1$ 为索引比特， $P_2$ 为传输比特。 $P_1$ 又包括索引激活比特 $P_{11}$ 和索引排列比特 $P_{1s}$ ，其中 $P_{11}$ 用来选择子块中的激活子载波， $P_{1s}$ 用来选择激活子载波的排列模式。

以一个 $L - J$ PM-OFDM-IM系统为例，假设子块共有 $L$ 个子载波，激活其中 $J$ 个子载波，则子块的索引激活比特表示为

$$P_{11} = \lfloor \log_2 C_L^J \rfloor \tag{1}$$

其中，符号 $\lfloor \cdot \rfloor$ 为取底函数， $C_L^J$ 为二项式系数。激活子载波再进行数学排列，根据排列组合公式， $J$ 种不同映射模式的星座符号排列后，索引排列比特位数表示为

$$P_{1s} = \lfloor \log_2 J! \rfloor \tag{2}$$

其中， $J!$ 表示 $J$ 的阶乘。因此，额外信息的总比特数 $P_1$ 为式(1)和式(2)的相加。设 $M_i$ 为第 $i$ 个激活子载波上星座集的阶数，其中 $i=1, 2, \dots, J$ 。则传输比特 $P_2$ 表示为

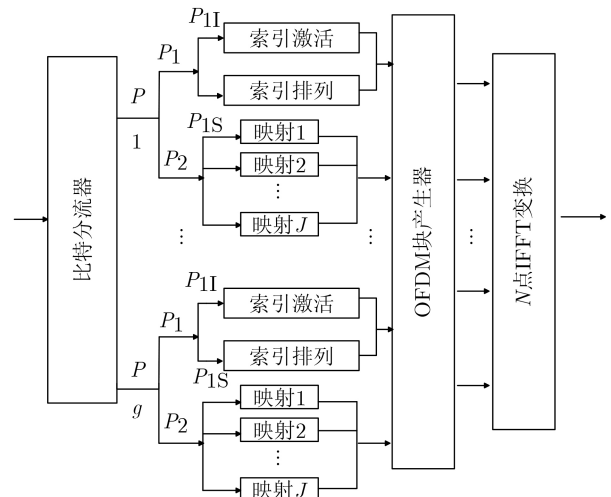


图1 PM-OFDM-IM发送框图

$$P_2 = \sum_{i=1}^J \log_2 M_i \quad (3)$$

则PM-OFDM-IM系统的子载波利用率 $\eta_{\text{PM-OFDM-IM}}$ 表示为

$$\eta_{\text{PM-OFDM-IM}} = \frac{[\log_2 C_L^J] + [\log_2 J!] + \sum_{i=1}^J \log_2 M_i}{L} \quad (4)$$

其中,  $L$ 表示子块中包含的子载波总数,  $J$ 表示子块中激活的子载波数,  $M_i$ 表示各激活子载波上映射星座集的模式大小。相同配置MM-OFDM-IM系统的系统频谱效率表示为

$$\eta_{\text{MM-OFDM-IM}} = \frac{[\log_2 L!] + L \log_2 M}{L} \quad (5)$$

其中,  $M$ 表示MM-OFDM-IM系统中映射子载波的星座集大小。对比上述式(4)和式(5), 其中 $[\log_2 C_L^J] + [\log_2 J!]$ 和 $[\log_2 L!]$ 之间差值可以忽略不计, 故当 $L-J$ 为1时, 两公式之间相差最小。为方便比较假设系统使用星座集的大小都为 $M$ , 此时两个系统的频谱效率之差可表示为

$$\eta \leq \frac{\log_2 L! - \log_2 J! - \log_2 L + \log_2 M}{L} \leq \frac{\log_2 M}{L} \quad (6)$$

由于实际情况中 $M$ 通常取2或4, 则当 $L$ 不断增大时,  $\eta$ 越来越小。可以得出结论, 与MM-OFDM-IM系统相比PM-OFDM-IM系统的频谱效率会略有损失。但由于系统中使用部分子载波, 所以PM-OFDM-IM系统比MM-OFDM-IM系统有更高的能量效率。

## 2.2 PM-OFDM-IM实现方案

在PM-OFDM-IM系统中, 为实现额外信息的调制与解调, 采用查表法作为实现方法。首先, 系统在发送端输入一份查找表, 表中提供索引激活比特、索引排列比特与子载波发送模式的对应信息。然后, OFDM块产生器将子块中的子载波转换成额外信息对应的发送模式。系统再将查找表发送到接收端, 接收端解调器根据表格信息从接收到的子载波发送模式中还原出额外信息。例如, 在3-2 PM-OFDM-IM系统中, 激活子载波可选择 $C_3^2 = 3$ 种, 而可排列仅为 $2! = 2$ 种。根据式(1)和式(2), 系统的索引激活比特和索引排列比特都为1。在任意一个子块中, 设传输比特经过不同星座映射后的符号分别为 $Q_1, Q_2$ 。则每个子块的发送模式与索引激活比特、索引排列比特的对应关系如表1所示。其中, 索引比特控制“0”, 即静默子载波的位置, 而排列比特控制 $Q_1, Q_2$ 两种星座符号的排序。在接收端通过发送模式的符号顺序首先解调出表中对应的索

表1 PM-OFDM-IM系统发送表

索引激活比特	索引排列比特	发送模式
0	0	$[Q_1, Q_2, 0]^T$
0	1	$[Q_2, Q_1, 0]^T$
1	0	$[0, Q_1, Q_2]^T$
1	1	$[0, Q_2, Q_1]^T$

引排列比特, 然后通过静默子载波的位置解调出相应的索引激活比特, 最后解调出接收信息传输的传输比特。

## 3 PM-OFDM-IM性能分析

### 3.1 频偏分析

在PM-OFDM-IM系统的频偏性能分析中, 单个子载波调制出的星座集符号用 $S_k$ 表示, 则 $S_k$ 可能为零或传统调制符号。PM-OFDM-IM系统架构表示为 $\mathbf{S} = [S_0, S_1, \dots, S_n, \dots, S_{N-1}]$ , 其中 $N$ 为系统的子载波总数即傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)的大小。经过IFFT过程后, 信号的时域表达式为

$$x_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} s_n e^{j \frac{2\pi}{N} kn}, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (7)$$

为简化计算, 本文在信道中只考虑载波频率偏移(Carrier Frequency Offset, CFO)和高斯噪声的影响。通过信道后, 接收信号的时域表达式为 $y_k = (x_k \otimes h_k) e^{j \frac{2\pi}{N} n \epsilon} + w_k$ , 其中 $\epsilon$ 是归一化频偏系数,  $h_k$ 代表信道脉冲响应,  $\otimes$ 为循环卷积符号,  $w_k$ 为时域下服从正态分布的高斯噪声。经过傅里叶变换后, 信号的频域表达式表示为

$$Y_n = p_0 S_n H_n + \sum_{m=0, m \neq n}^{N-1} p_{m-n} S_m H_m + W_n \quad (8)$$

其中,  $W_n$ 为频域下的高斯噪声,  $H_m$ 为第 $m$ 个子载波的信道系数, 而 $p_{m-n}$ 为频域中载波间干扰(Inter-Carrier Interference, ICI)系数, 表示为

$$p_{m-n} = \frac{\sin(\pi(m-n+\epsilon))}{N \sin\left(\frac{\pi}{N}(m-n+\epsilon)\right)} e^{j \pi \frac{N}{N-1}(m-n+\epsilon)} \quad (9)$$

由式(9)可得, 子载波的ICI系数来自除其本身以外所有子载波的干扰叠加。由于PM-OFDM-IM系统与MM-OFDM-IM系统相比, 它的系统结构中存在静默子载波, 所以公式中存在部分 $S_m=0$ 。相应地我们得出结论, PM-OFDM-IM系统的抗频偏能力要比MM-OFDM-IM系统好。

### 3.2 可达比特速率

本节分析具有信道估计误差的PM-OFDM-IM

系统的可达速率。设PM-OFDM-IM系统的子载波总数为 $N$ ，共分为 $G$ 个OFDM子块。每个子块包含 $L$ 个子载波，系统激活其中 $J$ 个子载波传输星座符号。系统的可达速率使用互信息公式可以表示为 $R_{\text{PM-OFDM-IM}} = \frac{1}{N} E_h [\text{I}(\mathbf{X}; \mathbf{Y} | \mathbf{h})]$ ，式中 $\text{I}(\cdot)$ 为求互信息， $E_h$ 代表变量的数学期望， $\mathbf{X}$ 为发送的频域信号， $\mathbf{Y}$ 为接收的频域信号， $\mathbf{h}$ 为信道矩阵。在PM-OFDM-IM系统中，子块传递的信息独立发送，独立接收。因此，上式可以进一步表示为

$$\begin{aligned} R_{\text{PM-OFDM-IM}} &= \frac{1}{N} \sum_{g=1}^G E_{h,g} [\text{I}(\mathbf{X}_g; \mathbf{Y}_g | \mathbf{h}_g)] \\ &= \frac{1}{N} \sum_{g=1}^G E_{h,g} [\text{I}(\mathbf{X}_S, \mathbf{X}_I, \mathbf{X}_P; \mathbf{Y}_g | \mathbf{h}_g)] \end{aligned} \quad (10)$$

其中，子块的频域信号 $\mathbf{X}_g$ 分成3部分：传输频域信号 $\mathbf{X}_S$ 、索引激活信号 $\mathbf{X}_I$ 、索引排列信号 $\mathbf{X}_P$ 。进一步计算式(10)得到

$$\begin{aligned} R_{\text{PM-OFDM-IM}} &= \frac{1}{L} \times [\text{H}(\mathbf{X}_S, \mathbf{X}_I, \mathbf{X}_P) \\ &\quad - E_{h,g} [\text{H}(\mathbf{X}_S, \mathbf{X}_I, \mathbf{X}_P; \mathbf{Y}_g | \mathbf{h}_g)]] \\ &= \frac{1}{L} \text{H}(\mathbf{X}_S, \mathbf{X}_I, \mathbf{X}_P) \\ &\quad - \frac{1}{L} E_{h,g} [\text{H}(\mathbf{X}_S, \mathbf{X}_I, \mathbf{X}_P; \mathbf{Y}_g | \mathbf{h}_g)] \end{aligned} \quad (11)$$

其中， $\text{H}(\cdot)$ 表示求信息熵。由式(11)可得出结论，PM-OFDM-IM系统的可达速率由两个主要因素决定。其一是子块载波间的相关性。在衰落信道中，相关性较小的子载波同时经历一样深度的衰落的可能性较低。因此，在索引系统中加入交织技术，可以有效地提高衰落信道下系统的可达速率。其二是系统激活子载波的传统调制模式，主要取决于星座图上各点间的最小欧氏距离。各点之间的最小欧氏距离越大，调制性能会变得越好，系统可达速率相应会越高，故本文提出一种适应于PM-OFDM-IM系统的星座分类映射方案。

## 4 星座分类映射方案

### 4.1 PCC-R

本文提出基于半径尺寸排列的星座分类模式(Permutation Constellation Classification mode by Radius size, PCC-R)，该方法使用 $M$ 阶幅度相位键控(Amplitude Phase Shift Keying, APSK)调制。APSK的星座点分布沿半径从中心向外发散，均匀地落在每个同心圆上。并且在每个圆上都有等距的映射点，映射点的聚合表达式写为

$$Q_k = r_k \cdot \exp \left\{ j \left( \frac{2\pi}{b_k} d_k + \theta_k \right) \right\} \quad (12)$$

其中， $r_k$ 表示第 $k$ 个圆的半径， $b_k$ 表示同心圆上星座映射点的总数， $\theta_k$ 表示第 $k$ 个圆上第1个星座点相对水平位置的相位， $d_k$ 表示 $b_k$ 中的第 $d$ 个星座映射点，其中 $d = 0, 1, \dots, b_k - 1$ 。根据同心圆的半径大小，PCC-R被分为多个映射圆，每个圆对应着一种映射。假设每个圆上的星座映射点都是 $M$ 个，则星座点之间的距离可以由式(13)计算

$$l_j = 2r_j \sin(\pi/M_j) \quad (13)$$

系统的误比特率(Bite Error Rate, BER)性能与星座点之间的最小欧氏距离相关，因此映射需要确定点与点之间的最大距离。例如，当 $J = 3$ 时，每个圆上有4个星座点，且圆的半径分别为1,2,3。在半径最小的圆上，欧氏距离等于 $\sqrt{2}$ ，然后以每一星座点为中心，以半径为 $\sqrt{2}$ 画圆，与外层圆相交点共有8个，得最近两个星座点在圆上的中点4个。使用这种方法，可以得到当前圆上的星座点与内部圆上的星座点之间的距离要大于 $\sqrt{2}$ 。

### 4.2 PCC-R解调

PCC-R调制由多个同心圆组成。在接收端，首先通过半径大小来区分不同的圆， $y(\alpha)$ 的半径表达式为

$$R(\alpha) = \{\Re(y(\alpha))\}^2 + \{\Im(y(\alpha))\}^2 \quad (14)$$

通过映射圆的半径比较 $R(\alpha)$ ，也可以得到对应着映射圆的每个信号点，解调出索引和排列信息。例如在表2中， $J = 3$ ，比较完每个子块中同心圆的大小后得到可能的排列模式。

当解调星座符号时，星座点和横轴之间的角度 $\hat{\theta}$ 可以根据几何关系算出

$$\hat{\theta} = \Re(y(\alpha)) / \Im(y(\alpha)) \quad (15)$$

在比特映射的角度范围内判断 $\hat{\theta}$ ，可以解调出星座符号。

## 5 仿真分析

本节首先通过仿真验证PM-OFDM-IM系统与其他经典系统的BER性能，然后对PM-OFDM-IM系统的抗频偏能力和可达比特速率进行仿真，最后验证了PCC-R模式的性能。

表2  $J=3$ ，可能的排列模式

子块	1	2	3	...	$g$
圆半径(大)	$y_1(3)$	$y_2(1)$	$y_3(3)$	...	$y_g(1)$
圆半径(中)	$y_1(1)$	$y_2(3)$	$y_3(2)$	...	$y_g(3)$
圆半径(小)	$y_1(2)$	$y_2(2)$	$y_3(1)$	...	$y_g(2)$

### 5.1 BER性能

图2仿真了高斯信道下传统OFDM, OFDM-IM, MM-OFDM-IM和PM-OFDM-IM几个系统的BER性能, 以系统子载波利用率作为统一标准。当信噪比低于9 dB时, MM-OFDM-IM系统BER性能达到最优, PM-OFDM-IM系统占次。随着信噪比上升, PM-OFDM-IM系统的BER性能达到最优, 传统OFDM系统最差。图3对传统OFDM系统、OFDM-IM系统、MM-OFDM-IM系统和PM-OFDM-IM系统在瑞利衰落信道下的BER性能进行仿真比较。从图中可以观察到信噪比高于12时, PM-OFDM-IM系统的性能达到最优。综合图2和图3的仿真结果得出结论, 在相同系统子载波利用率下, PM-OFDM-IM系统与其他多种索引系统相比在高斯和瑞利衰落信道中的BER性能更好。

### 5.2 载波偏移

图4仿真了载波偏移系数分别为 $\epsilon = 0.02$ ,  $\epsilon = 0.05$ 和 $\epsilon = 0.1$ 的情况下, 传统OFDM, OFDM-IM, MM-OFDM-IM和PM-OFDM-IM系统的抗频偏能力。为方便比较, 信道中只考虑频率偏移和加性噪声对

系统的影响。从3幅子图中可看出, 随着载波频率偏移(Carrier Frequency Offset,CFO)逐渐增加, 所有系统的BER性能都开始变差。比较 $\epsilon = 0.02$ 和 $\epsilon = 0.05$ 下的仿真结果, 观察到当BER为 $10^{-4}$ 时, PM-OFDM-IM系统和OFDM-IM系统的信噪比损失2 dB, 而MM-OFDM-IM系统损失5 dB。从损失性能的大小比较, PM-OFDM-IM系统和OFDM-IM系统的性能更好。当频偏系数 $\epsilon = 0.10$ 时, 所有的系统都遭受到严重的恶化。同时观察到, 系统子载波利用率为1.25 bps/Hz时的PM-OFDM-IM系统的BER性能比1.75 bps/Hz时的PM-OFDM-IM系统要好, 这说明子载波利用率越高, 系统的抗频偏能力越低, 验证了载波间相关性对抗频偏能力的影响。最后得出结论, 与其他经典系统相比, PM-OFDM-IM系统的抗频偏能力更好。

### 5.3 可达比特速率

图5仿真了PM-OFDM-IM系统和传统OFDM, OFDM-IM, MM-OFDM-IM几个系统的可达比特速率。PM-OFDM-IM系统和OFDM-IM系统的OFDM子块中含有4个子载波, 并激活其中3个进行

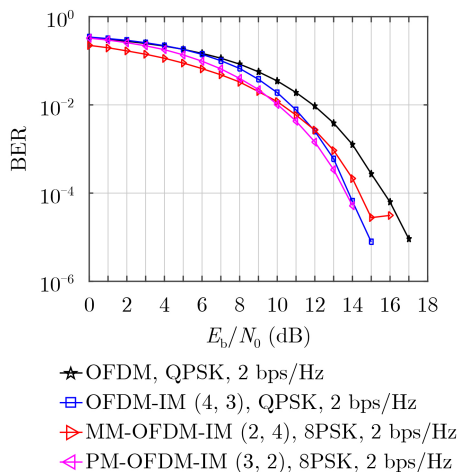


图2 高斯信道下PM-OFDM-IM系统BER性能比较

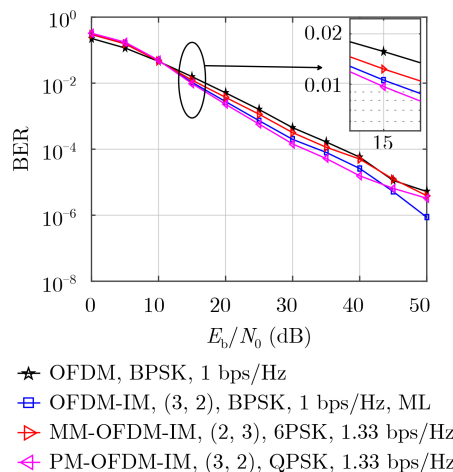


图3 瑞利衰落信道下PM-OFDM-IM系统BER性能比较

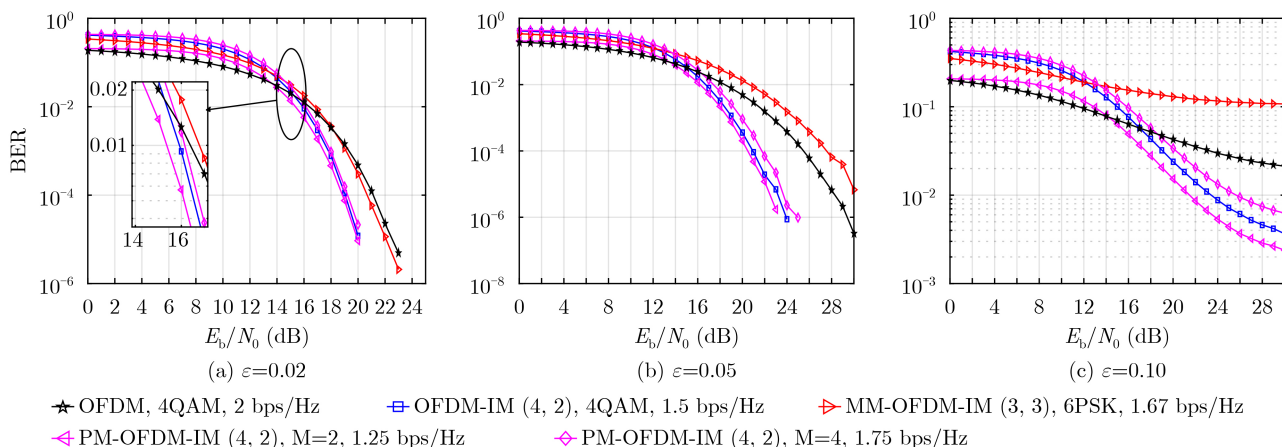


图4 PM-OFDM-IM系统的抗频偏能力比较

调制映射。同时本文考虑到MM-OFDM-IM系统的特殊性，MM-OFDM-IM系统使用6PSK星座集调制且一个OFDM子块中只设置3个子载波。仿真结果表明，在每个子载波上设置相同阶数的星座图映射时，PM-OFDM-IM系统相较于传统OFDM系统和OFDM-IM系统能达到更高的可达比特速率。同时PM-OFDM-IM系统与相同配置下的MM-OFDM-IM系统相比会损失部分可达比特速率。

### 5.4 PCC-R调制模式下的BER性能

图6仿真了使用PCC-R调制模式的PM-OFDM-IM系统的BER性能。当 $J = 3, M = 4$ 时，PCC-R模式中共有3个同心圆，每个圆上有4个星座点。图中仿真结果显示，半径最大的圆的BER性能最好，半径最小的圆的BER性能最差。原因是同心圆的半径越大，星座点的判断角 $\hat{\theta}$ 越好，从而产生更优的BER性能。同时图中可以看出，该系统的BER性能与使用4QAM的OFDM系统相似，但是PM-OFDM-IM系统的比特速率大于OFDM系统。当信道条件不理想时，半径小的圆上的比特映射是导致

PM-OFDM-IM系统BER性能变差的关键因素。为提高PCC-R调制模式下PM-OFDM-IM系统的BER性能，设计需要增加内部圆上星座点之间的距离。

## 6 结束语

本文基于MM-OFDM-IM系统提出优化方案PM-OFDM-IM，通过引入索引信息保证系统频谱效率，并增加静默子载波提高系统子载波间抗干扰能力，提高了系统的BER性能。仿真证明系统提高了系统的抗频偏能力，且在瑞利衰落信道下与其他现有的索引调制方案相比BER性能更优。为进一步提高PM-OFDM-IM系统的性能，提出一种基于半径尺寸排列的星座分类模式。按此模式设计的星座图与PM-OFDM-IM系统的额外信息实现达到高度契合。最后仿真验证，与传统星座图设计相比，使用PCC-R模式的星座图可以使PM-OFDM-IM系统取得更优的BER性能和更低的PAPR。随着索引信息和排列信息的引入，系统在额外信息方面会得到很大的提升，但同时这种引入不可避免地会提高系统检测的复杂度。后续工作将以降低系统接收端信号检测的复杂度为主要方向。

## 参考文献

- [1] BAKER M. From LTE-advanced to the future[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(2): 116–120. doi: 10.1109/MCOM.2012.6146490.
- [2] WANG Chengxiang, FOURAT H, GAO Xiqi, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 122–130. doi: 10.1109/MCOM.2014.6736752.
- [3] MAO Tianqi, WANG Qi, WANG Zhaocheng, et al. Novel index modulation techniques: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(1): 315–348. doi: 10.1109/COMST.2018.2858567.
- [4] SACCHI C, RAHMAN T F, HEMADEH I A, et al. Millimeter-wave transmission for small-cell backhaul in dense urban environment: A solution based on MIMO-OFDM and Space-Time Shift Keying (STSK)[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 4000–4017. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2680435.
- [5] RAHMAN T F, HABIB A, SACCHI C, et al. Mm-Wave STSK-aided Single Carrier block transmission for broadband networking[C]. 2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), Heraklion, Greece, 2017: 507–514. doi: 10.1109/ISCC.2017.8024579.
- [6] CUI Yaping and FANG Xuming. Performance analysis of

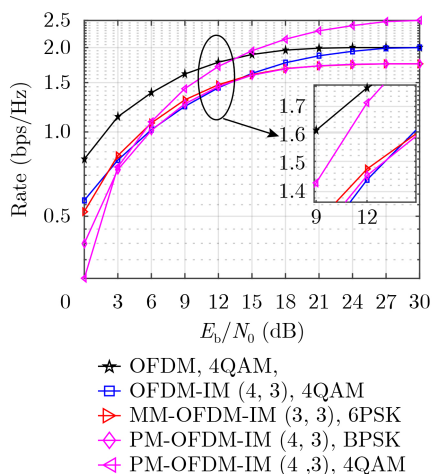


图 5 PM-OFDM-IM系统的可达速率比较

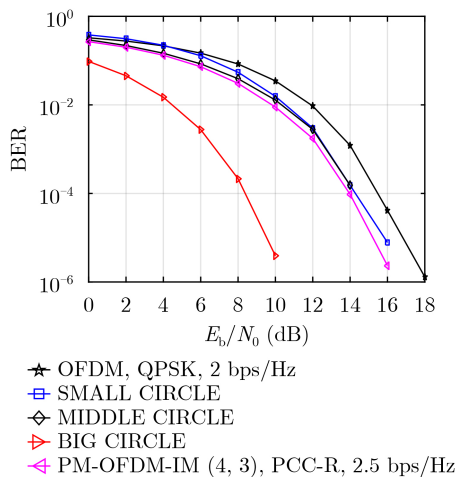


图 6 使用PCC-R, PM-OFDM-IM系统的BER比较

- massive spatial modulation MIMO in high-speed railway[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(11): 8925–8932. doi: [10.1109/TVT.2016.2518710](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2518710).
- [7] SUDHAKARAN D U and RAJAN B S. Index coded PSK modulation for prioritized receivers[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(12): 11151–11165. doi: [10.1109/TVT.2017.2737141](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2737141).
- [8] WEN Miaowen, CHENG Xiang, and YANG Liuqing. Index Modulation for 5G Wireless Communications[M]. Cham: Springer, 2017: 103–149.
- [9] BAŞAR E, AYGÖLÜ Ü, PANAYIRCI E, *et al.* Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(22): 5536–5549. doi: [10.1109/TSP.2013.2279771](https://doi.org/10.1109/TSP.2013.2279771).
- [10] 李泳志, 陶成, 刘留, 等. 莱斯信道下分布式大规模MIMO系统基站选择算法的研究[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(4): 856–862. doi: [10.11999/JEIT150811](https://doi.org/10.11999/JEIT150811).
- LI Yongzhi, TAO Cheng, LIU Liu, *et al.* Base station selection algorithm for distributed massive MIMO system over rician fading channels[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(4): 856–862. doi: [10.11999/JEIT150811](https://doi.org/10.11999/JEIT150811).
- [11] FAN Rui, YU Yajun, and GUAN Yongliang. Generalization of orthogonal frequency division multiplexing with index modulation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(10): 5350–5359. doi: [10.1109/TWC.2015.2436925](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2436925).
- [12] WEN Miaowen, YE Binbin, ERTUGRUL B, *et al.* Enhanced orthogonal frequency division multiplexing with index modulation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(7): 4786–4801. doi: [10.1109/TWC.2017.2702618](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2702618).
- [13] MAO Tianqi, WANG Zhaocheng, WANG Qi, *et al.* Dual-mode index modulation aided OFDM[J]. *IEEE Access*, 2016, 5: 50–60. doi: [10.1109/ACCESS.2016.2601648](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2601648).
- [14] MAO Tianqi, WANG Qi, and WANG Zhaocheng. Generalized dual-mode index modulation aided OFDM[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(4): 761–764. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2635634](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2635634).
- [15] EN Miaowen, BASAR E, LI Qiang, *et al.* Multiple-mode orthogonal frequency division multiplexing with index modulation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(9): 3892–3906. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2710312](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2710312).
- [16] 彭聪, 许鹏, 陈翔, 等. MIMO-OFDM系统中各天线独立相位噪声的影响[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(12): 2999–3003. doi: [10.11999/JEIT170260](https://doi.org/10.11999/JEIT170260).
- PENG Cong, XU Peng, CHEN Xiang, *et al.* Influence of independent phase noises on MIMO-OFDM systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(12): 2999–3003. doi: [10.11999/JEIT170260](https://doi.org/10.11999/JEIT170260).
- 邵凯: 男, 1977年生, 副教授, 研究方向为新型多载波调制技术、新型多址接入技术。
- 金庚: 男, 1996年生, 硕士生, 研究方向为索引调制技术与应用。
- 王光宇: 男, 1964年生, 教授, 研究方向为新型多载波调制技术、新型多址接入技术。
- 周博文: 男, 1993年生, 硕士生, 研究方向为新型调制技术。

责任编辑: 马秀强