光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023090102

QAM调制下基于卷积码与累加编码调制级联的纠错码性能研究

向劲松，陈怀柔*

（重庆邮电大学 通信与信息工程学院，重庆 400065）

摘　要： 基于卷积码与累加编码的PPM调制级联码(SCPPM)在泊松信道光PPM调制下具有极优异的性能。文章将这种累加编码结构引入到QAM调制中，分析其性能。将卷积码＋累加编码＋QAM调制串行级联(SCAQAM)纠错方案与常规基于卷积码、并行级联卷积码(Turbo)以及低密度奇偶校验码(LDPC)的比特交织编码调制迭代译码(BICM-ID)系统进行比较，并进一步比较了SCAQAM系统的自然、格雷、反格雷星座映射方式。结果表明，在高阶QAM调制下，这种纠错结构具有极优异的误码性能。对于16QAM及64QAM调制，SCAQAM相对于另外几种纠错码结构的BICM-ID系统分别有约0.3和0.5 dB的性能提升，只有卷积码与累加码结合才更具性能优势。并且SCAQAM将累加后的比特流以反格雷方式映射具有更优异的性能。

关键词： 正交幅度调制；星座映射；迭代译码；累加编码

中图分类号： TN911.22　**文章编号：** 1001－5868(2023)06－0924－07

Research on the Performance of Error Correction Codes Based on Convolutional Code and Accumulative Code Modulation Cascade under QAM Modulation

XIANG Jinsong, CHEN Huairou

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecomm., Chongqing 400065, CHN)

Abstract: The PPM modulation cascade code based on convolutional codes and acumulative code (SCPPM) has excellent performance in Poisson channel optical PPM modulation. In this paper, this acumulative code structure was introduced into QAM modulation and its performance was analyzed. A comparison was made between the convolutional code, acumulative code, and QAM modulation serial concatenation (SCAQAM) error correction scheme and the conventional bit interleaved encoding modulation iterative decoding (BICM-ID) system based on convolutional code, parallel concatenated convolutional code (Turbo), and low density parity check code (LDPC). And further compared the nature, Gray, and anti-Gray constellation mapping methods of the SCAQAM system. The results show that under high-order QAM modulation, this error correction structure has excellent error rate performance. For 16QAM and 64QAM modulation, SCAQAM has a performance improvement of about 0.3 and 0.5 dB, respectively, compared to other BICM-ID systems with error correction code structures. Only the combination of convolutional code and accumulation code has a performance advantage. And SCAQAM has superior performance in mapping the accumulated bitstream in an anti-Gray manner.

Key words: QAM; constellation mapping; iterative decoding; accumulative code

收稿日期：2023－09－01.

基金项目：国家自然科学基金资助项目(61571072).

* **通信作者：**陈怀柔　**E-mail:** 1205396731@qq.com

0　引言

在无线通信系统快速发展的过程中，纠错编码一直以来都是人们研究的重点，不同的编码方式和调制方式结合迭代译码技术对系统的纠错性能影响很大，卷积码、并行级联卷积码（Parallel Concatenated Convolutional Codes，PCCC，也称 Turbo 码）以及低密度奇偶校验码（Low Density Parity Check Code，LDPC）是目前最通用的编码方式。随着人们对通信信道容量的需求不断加大，1992 年，Zehavi[1] 提出比特交织编码调制（Bit-Interleaved Coded Modulation，BICM），提高了信道容量，但该系统在加性高斯白噪声信道下，因交织器会减小信号间的欧式距离的原因，性能下降；1997 年，Li 等[2] 提出基于硬判决反馈的比特交织编码调制迭代译码（Bit-Interleaved Coded Modulation with Iterative Decoding，BICM-ID）系统；又在 2002 年，提出基于软判决反馈的 BICM-ID 系统[3]，因其带宽效率高，至今仍被广泛研究与应用。文献[4-6]对 BICM-ID 系统进行了进一步研究，通过改进编码方式提升系统。

2005 年美国 NASA 在深空光通信系统中提出了串行级联脉冲位置调制（Serially Concatenated Pulse Position Modulation，SCPPM）编码方式，获得极优异性能[7]。SCPPM 编码端通过卷积码、交织器、累加器和脉冲位置调制（Pulse Position Modulation，PPM）器串行级联而成，与常规 BICM-ID 相比，在交织器与调制器之间增加了一个累加器。译码端通过信息在解调器和译码器的交换实现迭代解调和译码。在 2013 年，美国 NASA 将该纠错码作为主要信道编码方式应用于月球激光通信演示系统（MLCD）中[8]；国际空间数据系统咨询委员会（CCSDS）推荐了这种纠错码方案作为空间光通信的纠错码；并且在 matlabR2022b 版本中，提供了该纠错码的工具箱。但目前这种累加器结构只在光 PPM 通信系统中被应用，未见在其他调制方式下的研究报道。

正交幅度调制（Quadrature Amplitude Modulation，QAM）因其频带利用率高，在无线通信、光纤通信中得到广泛应用，是应用最广泛的一种高阶调制方案。分析这种累加编码结构在 QAM 调制下的应用可能性具有重要意义。因此，本文将 SCPPM 中的累加器结构与 QAM 调制相结合构建 BICM-ID 系统，分析其纠错性能，并与其他常规卷积码、Turbo 码和 LDPC 码构成的 BICM-ID 系统进行误码性能比较。

1　系统模型

1.1　SCAQAM 系统编码原理

如图 1 所示，用户信息经过循环冗余校验（Cyclic Redundancy Check，CRC）模块后传入编码系统。编码器由两个主要部分（外码和内码）和一个比特交织器组成，内码和外码通过交织器相连。外码是一个短约束长度卷积码，内码由累加编码器和 QAM 调制器组成，简称 AQAM；整个纠错结构称为 SCAQAM（Serial Cascade Accumulative Encoding QAM Modulation，SCAQAM）系统的基本结构与 SCPPM 的基本结构类似[7]。

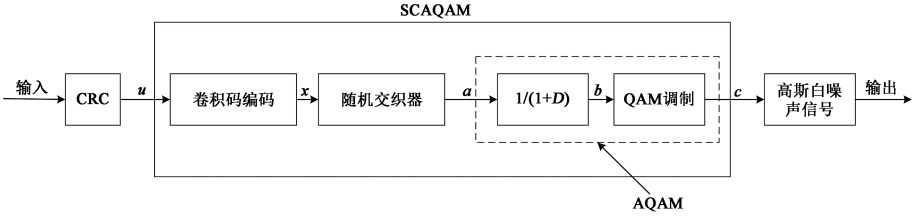


图 1　SCAQAM 编码结构

外码一般为递归或非递归系统卷积码，本文采用约束长度为 3，码率为 1/2 的（2，1，3）非递归系统卷积码[9]。输入数据经过卷积码编码后的序列传输给随机交织器，交织后的比特信息经过如图 2 所示的累加器编码后，内码 AQAM 的累加器部分由一个简单的寄存器和加法器组成，传递函数为 $1/(1+D)$，可实现信息比特序列的递归累加。序列 $\boldsymbol{a}$ 通过累加编码后产生序列 $\boldsymbol{b}$，累加后再由采用星座映射方式的 QAM 调制使其变为适合在信道中传输的符号信息，经过高斯白噪声信道传输后的符号信息 $\boldsymbol{r}_k$ 是一个复信号，通过最大似然比估计（Maximum Likelihood Estimation，ML）算法计算出信道信息似然比[10]，然后送入译码端。

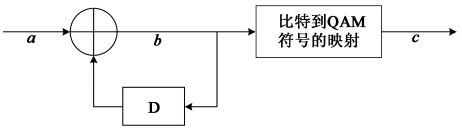


图 2 AQAM 结构图

1.2 SCAQAM 系统译码原理

SCAQAM 系统译码结构如图 3 所示，与常规 BICM-ID 译码相比，解累加与 QAM 解调作为一个整体处理，无单独的 QAM 解调及解累加环节[11]。译码端利用解调器和卷积译码器输出的外部信息之间的相互迭代实现译码，首先经过编码和信道传输的信息传入解调器，解调器输出的外信息经解交织处理后，作为先验信息传入译码器。而译码器输出的外信息经交织后再送回解调器，用于调整解调结果。接着进行下一轮迭代，在经过一定次数的迭代后，译码器逐渐收敛。

具体译码过程为[7]，$L(C1;I)$表示经过信道传输后的符号计算出的对数似然，作为信道信息传入 AQAM 解调器，$L(U1;I)$表示内码译码器的输入符号对数似然比，经过 AQAM 译码后，获得新的符号对数似然比 $L(U1;O)$，接着将 $L(U1;O)$减去 $L(U1;I)$得到外信息 Le，解交织后转换为比特似然比得到卷积译码器的输入比特似然比 $L(C2;I)$，译码后的比特似然比 $L(C2;O)$减去卷积码译码器输入比特似然比 $L(C2;I)$得到外部信息 Le，再进行交织后转化为符号似然比 $L(U1;I)$，达到最大迭代次数后就对卷积译码器输出的比特对数似然比 $L(U2;O)$进行硬判决得到比特信息[12]。译码端将 QAM 解调也纳入了迭代译码过程中，累加器与 QAM 调制器作为一个整体，和卷积码的译码部分一样，采用经典的软输入软输出(Soft Input Soft Output，SISO)译码方式，即 BCJR 算法进行译码，具体算法参考文献[13]。

在 SCAQAM 系统的整个译码过程中，各个部分通过比特似然比和符号似然比之间的转换进行信息交流实现迭代译码。

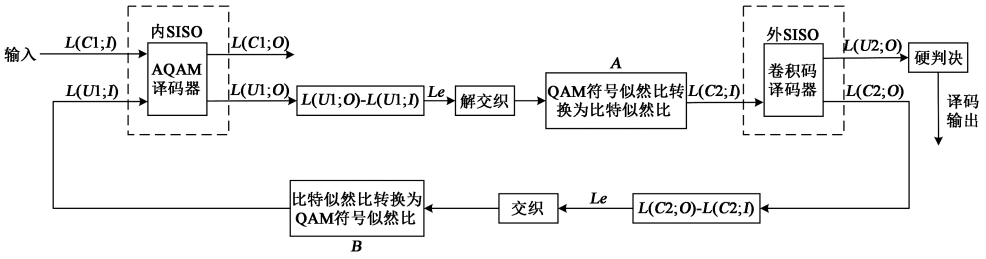


图 3 SCAQAM 译码结构

符号对数似然比转化为比特信息似然比，也就是模块 A 过程，选择 16QAM，令 a_0，a_1，a_2，a_3，表示 AQAM 译码后的二进制序列的 4 个比特，都有“0”或“1”两种取值，第一位比特为“1”或“0”时，比特 a_0 的后验概率分别为 $P(a_0=1;I)$和 $P(a_0=0;I)$，第 j 帧 QAM 符号的第一个信息比特对数似然比为[14]：

$$L(a_0)=\log[P(a_0=1;I)/P(a_0=0;I)] \quad (1)$$

以此类推，可以计算出 a_1，a_2，a_3 的后验概率。

令 b_k 表示一个 QAM 符号，该符号由 4 个比特组成，$b_{k,n}$ 表示第 k 个符号的 4 位比特中的第 n 个比特，$L(u_k=i)$表示第 k 个符号在星座图上的第 i 个点时的符号对数似然比，c_i^j 表示当 u_k 为星座图中第 i 个星座点时每个比特的值，那么 MQAM 的信息比特似然比为[7]：

$$L(b_{k,n})=\log\left[\sum L(u_k=i);c_i^j=1\right]-\log\left[\sum L(u_k=i);c_i^j=0\right] \quad (2)$$

模块 B 的过程，信息比特似然比 $L(b_{k,n})$通过式(3)转换为符号对数似然比 $L(u_k)$，

$$L(u_k=i)=\sum_{i=1}^{\log_2 M}\frac{1}{2}(-1)^{c_i^j}L(b_{k,n}) \quad (3)$$

1.3 基于 Turbo/LDPC-QAM/AQAM 的 BICM-ID 系统

Turbo 码编码器由两个相同的递归卷积码作为分量码并行级联组成[15]，Turbo-QAM 和 Turbo-AQAM 的 BICM-ID 系统与 SCAQAM 系统类似。Turbo 码由两个卷积码和交织器联合组成，卷积译码器对应编码器中的两个分量码，通过两个卷积译码器相互之间交换外信息实现译码，因此 Turbo 码译码需要迭代多次。Turbo 码的译码一般用最大后验概率(Maximum A Posteriori Probability，MAP)算法实现，本文选用 MAP 算法的对数形式，即 Log-MAP 算法，可以进一步降低运算量[16]。LDPC 码是一种具有多个校验比特的线性分组码，大小为

(m,n)的 LDPC 码表示码长为 n，m 位校验比特，$m-n$ 位信息比特[17]。LPDC 译码算法选择基于软判决的置信传播(Belief Propagation，BP)译码算法，可以充分利用系统的软信息达到较好的译码效果[18]。

基于 Turbo/LDPC-AQAM 的 BICM-ID 系统编译码结构如图 4 所示，在译码端依靠似然比信息在 Turbo 和 LDPC 译码器与 AQAM 解调器之间相互传递进行译码，并且 Turbo 和 LDPC 译码器本身存在内部迭代。因此基于 Turbo 和 LDPC 的 BICM-ID 系统一般有两层迭代译码。基于 Turbo/LDPC-QAM 的 BICM-ID 系统结构如图 5 所示。

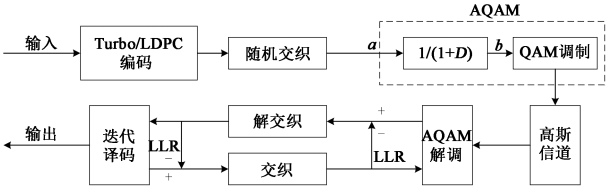


图 4　Turbo/LDPC-AQAM 系统的编译码结构

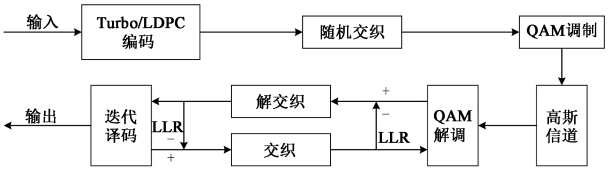


图 5　Turbo/LDPC-QAM 系统的编译码结构

2　比特到符号的映射

映射方式对于 QAM 调制相当重要，一般情况下，QAM 采用 Gray 映射具有更好的误码性能，但在文献[19]中，基于 16QAM 调制的 BICM-ID 系统，采用类 anti-Gray 映射的方式更好；在文献[7]中，SCPPM 采用 anti-Gray 映射更具备性能优势。所以本文考虑 AQAM 码累加前后的四种比特到符号的映射方式：自然映射(nature)、格雷映射(Gray)、反格雷(anti-Gray)和集分割映射(SP)进行仿真分析对比。

发射端产生随机信息比特 $\boldsymbol{u}$，经过外码编码后产生序列 $\boldsymbol{x}$，经过比特交织之后生成序列 $\boldsymbol{a}=(a_1,a_2,\cdots,a_N)$，其下标 N 表示序列总长，累加编码后的序列 $\boldsymbol{b}$，由 QAM 调制生成序列 $\boldsymbol{c}=(c_1,c_2,\cdots,c_N)$，其中每个 a_i 代表一个 $\log_2 M$ 大小的比特信息，每个 c_i 是相应的 M 阶 QAM 符号。

以 16QAM，b 点数据定义的 anti-Gray 映射为例，每 4 个比特映射在星座图 16 个星座点中的位置如图 6 所示。

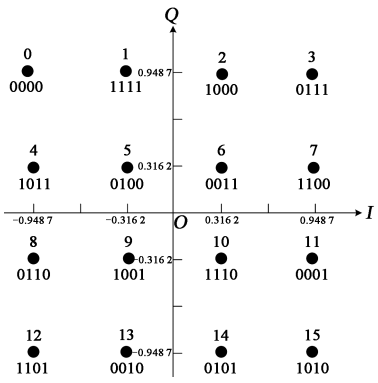


图 6　16QAM 调制星座图

表 1 和表 2 分别表示累加器状态为“0”和“1”时，每 4 个比特对应在星座图中的位置序列，其中 State 表示累加编码状态，每 $\log_2 M$ 个信息比特划分为一小帧，初始状态设为“0”，将比特累加后，得到的最后一个比特作为下一帧的累加编码状态“0”或“1”。

a 是给定状态下累加器的 4 位输入，b 是相应输出，然后再由 a 点(累加前)或 b 点(累加后)数据决定每组比特对应在星座图中的位置。nature 映射的 4 位比特按“0000～1111”的顺序依次映射到星座点上，Gray 映射要求相邻星座点间的比特只相差 1 位，anti-Gray 映射要求相邻星座点间的比特相差 4 位或者 3 位。改变累加器状态会使累加器的第一个输出比特对同一输入反相，例如在“0”状态下，4 位比特为“0101”，则在“1”状态下，比特信息就变为“1010”。

3　仿真分析

纠错帧符号长度设为 2 330 个 QAM 符号，模拟数据为 200 帧，分别采用 4，16 和 64 阶的 QAM 调制，信道干扰为零均值加性高斯白噪声进行仿真分析。仿真图中横坐标是信噪比，单位为 dB，纵坐标为误比特率。

采用 1/2 码率的卷积码，Turbo 码的两个分量码都选择码率为 1/2 的递归系统卷积码，LDPC 码大小为(1165，2330)，码率为 1/2。Turbo 码和 LDPC 码内部迭代次数都为 10 次，BICM-ID 外部迭代译码 5 次。采用累加结构时以 b 点定义的 anti-Gray 为映射方式，无累加结构时以 Gray 为映射方式。

如图 7 所示，在 16QAM 调制下，SCAQAM 相对于 Turbo-QAM 和 LDPC-QAM 分别有有约 0.3

和 0.4 dB 的性能优势。随着信噪比的增加，SCAQAM 系统相比无累加的卷积＋QAM 系统的误码率快速下降，可见对于基于卷积码的 BICM-ID 系统，增加一个累加编码结构可明显提升系统误码性能。

如图 8 所示，采用 64QAM 仿真，SCAQAM 相对于 Turbo-QAM 和 LDPC-QAM 分别有有约 0.5 和 0.6 dB 的性能优势。

在 4QAM 调制下，SCAQAM 与其他三种系统的性能对比如图 9 所示。在 4QAM 调制下，Turbo 码要优于SCAQAM，LDPC码的误码率与 SCAQAM 相差不大。

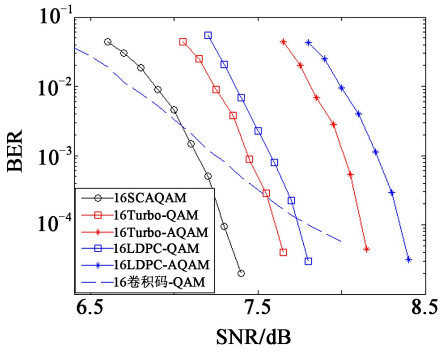


图 7 16 阶 SCAQAM 与卷积码/Turbo/LDPC-QAM/AQAM 迭代译码误码性能对比

表 1 “0”状态下比特到符号的映射

State	a	b	a-nature	a-Gray	a-anti-Gray	b-nature	b-Gray	b-anti-Gray
0	0000	0000	0	0	0	0	0	0
0	0001	1111	1	12	11	15	10	1
0	0010	1110	2	4	13	14	6	10
0	0011	0001	3	8	6	1	12	11
0	0100	1100	4	3	5	12	2	7
0	0101	0011	5	15	14	3	8	6
0	0110	0010	6	7	8	2	4	13
0	0111	1101	7	11	3	13	14	12
0	1000	1000	8	1	2	8	1	2
0	1001	0111	9	13	9	7	11	3
0	1010	0110	10	5	15	6	7	8
0	1011	1001	11	9	4	9	13	9
0	1100	0100	12	2	7	4	3	5
0	1101	1011	13	14	12	11	9	4
0	1110	1010	14	6	10	10	5	15
0	1111	0101	15	10	1	5	15	14

表 2 “1”状态下比特到符号的映射

State	a	b	a-nature	a-Gray	a-anti-Gray	b-nature	b-Gray	b-anti-Gray
1	0000	1111	0	0	0	15	10	1
1	0001	0000	1	12	11	0	0	0
1	0010	0001	2	4	13	1	12	11
1	0011	1110	3	8	6	14	6	10
1	0100	0011	4	3	5	3	8	6
1	0101	1100	5	15	14	12	2	7
1	0110	1101	6	7	8	13	14	12
1	0111	0010	7	11	3	2	4	13
1	1000	0111	8	1	2	7	11	3
1	1001	1000	9	13	9	8	1	2
1	1010	1001	10	5	15	9	13	9
1	1011	0110	11	9	4	6	7	8
1	1100	1011	12	2	7	11	9	4
1	1101	0100	13	14	12	4	3	5
1	1110	0101	14	6	10	5	15	14
1	1111	1010	15	10	1	10	5	15

从图 7，8，9 可看出，卷积码级联累加编码(SCAQAM)才有效果，对于 Turbo 及 LDPC 码，级联累加编码反而降低了性能。此外 QAM 阶数越高，SCAQAM 相对 Turbo 及 LDPC 的优势越明显。所以累加编码只有与卷积码结合使用，才能在 BICM-ID 系统中获得性能提升。

将累加编码用于串行级联 QAM 调制系统，分别以累加之前的数据(即 a 点的比特信息)和累加之后的数据(即 b 点的比特信息)定义 nature，Gray，anti-Gray 和 SP 四种映射方式。SCAQAM 系统迭代译码次数为 5 次，如图 10 所示，以 16QAM 调制仿真，结果显示采用 b 点定义的 anti-Gray 方式性能

最优，以 a 点定义的 Gray 映射性能稍次，但相比其他映射方式至少有 0.1 dB 的性能提升。

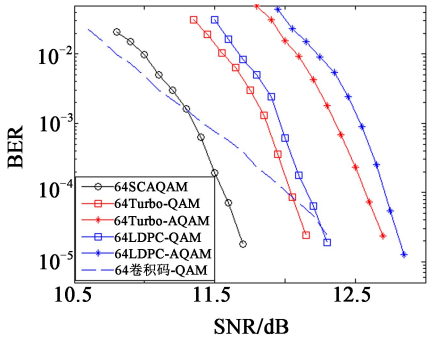


图 8　64 阶 SCAQAM 与卷积码/Turbo/LDPC-QAM/AQAM 迭代译码误码性能对比

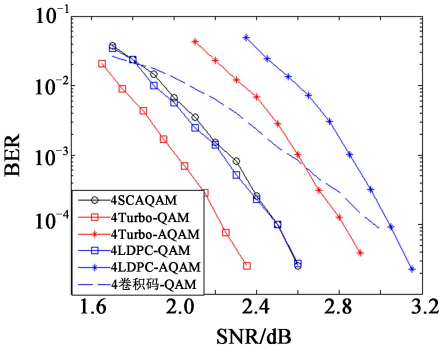


图 9　4 阶 SCAQAM 与卷积码/Turbo/LDPC-QAM/AQAM 迭代译码误码性能对比

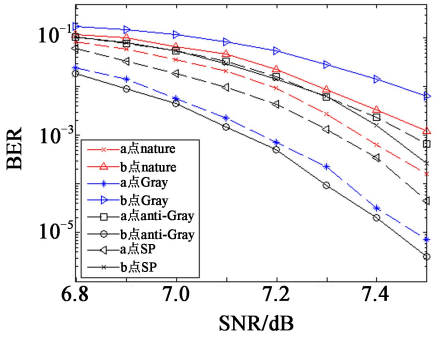


图 10　不同映射方式下 16SCAQAM 系统误码率性能

4　结论

将 SCPPM 中的累加器结构应用于基于 QAM 调制的 BICM-ID 系统中，分别将卷积码、Turbo 编码、LDPC 码与累加编码相结合，给出了所选的三种纠错码的 BICM-ID 系统结构。在译码端采用迭代译码方式，将 AQAM 解调也纳入迭代过程，通过信息比特似然比与符号对数似然比之间的相互转化实现迭代译码，其结论与累加编码在 SCPPM 中类似。然后分析了映射方式对系统性能的影响，根据累加前后的数据运用 nature，Gray，anti-Gray 和 SP 四种映射方式进行星座映射。

仿真结果表明：

(1)当采用 16 阶和 64 阶的 QAM 调制时，卷积码与累加码结合并以 b 点定义 anti-Gray 映射方式的 SCAQAM 系统，相对于基于卷积码、Turbo 码和 LDPC 码的 BICM-ID 系统更具性能优势，并且累加编码只有与卷积码结合，系统的纠错性能才会得到提升；

(2)卷积码与累加编码结合，阶数越高越能反映优势；

(3)以 b 点定义的 anti-Gray 映射方式性能最具优势，以 a 点定义的 Gray 映射方式性能稍差，但都比其他映射方式性能更好。

参考文献：

[1] Zehavi E. 8-PSK trellis codes for a Rayleigh channel[J]. IEEE Trans. on Communications, 1992, 40(5): 873-884.

[2] Li X, Ritcey J A. Bit-interleaved coded modulation with iterative decoding[C]//1999 IEEE International Conference on Communications, 1999, 2: 858-863.

[3] Li X, Chindapol A, Ritcey J A. Bit-interleaved coded modulation with iterative decoding and 8 PSK signaling[J]. IEEE Trans. on Communications, 2002, 50(8): 1250-1257.

[4] Fazeli A, Nguyen H H, Yanikomeroglu H. Bit-interleaved coded energy-based modulation with iterative decoding[J]. IEEE Trans. on Communications, 2023, 71(3): 1243-1258.

[5] Bu Y, Fang Y, Han G, et al. Design of protograph-LDPC-based BICM-ID for multi-level-cell (MLC) NAND flash memory[J]. IEEE Communications Lett., 2019, 23(7): 1127-1131.

[6] Fang Y, Zhang G, Cai G, et al. Root-protograph-based BICM-ID: A reliable and efficient transmission solution for block-fading channels[J]. IEEE Trans. on Communications, 2019, 67(9): 5921-5939.

[7] Moision B, Hamkins J. Coded modulation for the deep-space optical channel: serially concatenated pulse-position modulation[J]. IPN Progress Report, 2005, 42(161): 1-26.

[8] Boroson D M, Robinson B S. The lunar laser communication demonstration: NASA's first step toward very high data rate support of science and exploration missions[J]. The Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer Mission (LADEE), 2014, 185: 115-128.

[9] 眭惠巧，赵一菲，李亮辉，等. 一种基于校验矩阵的非系统卷积码识别方法[J]. 无线电通信技术，2022, 48(3): 555-558.
Sui Huiqiao, Zhao Yifei, Li Lianghui, et al. A non system convolutional code recognition method based on check matrix [J]. Radio Communication Technol., 2022, 48(3): 555-558.

[10] 王硕同，王建新. 8PSK 与 16QAM 调制信号的 Turbo 译码研究[J]. 电子设计工程，2021, 29(9): 29-34.
Wang Shuotong, Wang Jianxin. Research on Turbo decoding of

8PSK and 16QAM modulated signals[J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(9): 29-34.

[11] Yang Z, Fang Y, Cheng Y, et al. Protograph LDPC-coded BICM-ID with irregular mapping: An emerging transmission technique for massive internet of things[J]. IEEE Trans. on Green Communications and Networking, 2021, 5(3): 1051-1065.

[12] 赵振华, 彭 华. 一种适用于BICM-ID系统的迭代载波同步算法[J]. 电路与系统学报, 2013, 18(2): 383-389.
Zhao Zhenhua, Peng Hua. An iterative carrier synchronization algorithm suitable for BICM-ID systems[J]. J. of Circuits and Systems, 2013, 18(2): 383-389.

[13] Che H, Bai Y. M-BCJR algorithm with channel shortening based on ungerboeck observation model for faster-than-Nyquist signaling[J]. China Communications, 2021, 18(4): 88-98.

[14] 向劲松, 吴 涛, 黄 胜, 等. 串行级联脉冲位置调制码辅助的时隙同步技术[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 63-70.
Xiang Jinsong, Wu Tao, Huang Sheng, et al. Time slot synchronization technology assisted by serial cascaded pulse position modulation codes[J]. J. of Optics, 2016, 36(8): 63-70.

[15] 宋惠轩, 郭 嘉, 潘雅茹. 可配置的高码率Turbo码编译码器的设计及实现[J]. 通信技术, 2023, 56(3): 383-390.
Song Huixuan, Guo Jia, Pan Yaru. Design and implementation of a configurable high bit rate Turbo coder[J]. Communication Technol., 2023, 56(3): 383-390.

[16] Xu C, Liang D, Sugiura S, et al. Reduced-complexity approx-log-MAP and max-log-MAP soft PSK/QAM detection algorithms[J]. IEEE Trans. on Communications, 2013, 61(4): 1415-1425.

[17] Wang Q, Cai S, Ma X. Free-ride coding for constructions of coupled LDPC codes[J]. IEEE Trans. on Communications, 2023, 71(3): 1259-1270.

[18] Rosseel J, Mannoni V, Fijalkow I, et al. Decoding short IDPC codes via BP-RNN diversity and reliability-based post-processing[J]. IEEE Trans. on Communications, 2022, 70(12): 7830-7842.

[19] 任利华. BICM-ID光通信系统中一种新颖星座映射方案的优化分析[J]. 半导体光电, 2015, 36(3): 451-454, 460.
Ren Lihua. Optimization analysis of a novel constellation mapping scheme in BICM-ID optical communication systems [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(3): 451-454, 460.

作者简介:

向劲松(1975—),男,四川省达州市人,理学博士,教授,主要研究方向为空间光通信;

陈怀柔(1998—),女,重庆市万州区人,硕士研究生,主要研究方向为光通信。