

垂直链路下的空间脉冲位置调制系统信道编码研究

李寅龙,毛忠阳,徐建武,刘锡国

(海军航空大学,山东 烟台 264001)

摘要:针对垂直链路下空间脉冲位置调制(SPPM)误码性能较差的问题,采用级联信道编码改善系统误码性能,对比分析了低密度奇偶校验(LDPC)码和极化(Polar)码在不同码长、不同码率下的误码性能。仿真结果表明:在码率为0.5、误比特率为 10^{-4} 时,Polar码具有优于LDPC码2 dB左右的性能;在码率为0.8时,二者的误码性能几乎相同,且在码率增大时,性能差距逐渐缩小;在SPPM系统中级联信道编码能够有效改善系统误码性能。

关键词:无线光通信;光空间调制;空间脉冲位置调制;低密度奇偶校验码;极化码

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2021)04-0016-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.04.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on channel coding in space pulse position modulation system under vertical link

LI Yinlong, MAO Zhongyang, XU Jianwu, LIU Xiguo

(Naval Aviation University, Yantai Shandong 264001, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor bit error performance of space pulse position modulation (SPPM) in vertical link, concatenated channel coding is used to improve the bit error performance of the system. The bit error performance of low density parity check (LDPC) code and polar code under different code length and different code rate is compared and analyzed. The simulation results show that when the bit error rate is 10^{-4} and the bit rate is 0.5, polar code has a better performance than LDPC code about 2 dB. When the bit rate is 0.8, the bit error performance of the two systems is almost the same, and the performance gap is gradually narrowed when the bit rate increases. In SPPM system, concatenated channel coding can effectively improve the system error performance.

Key words: free space optical communication; optical spatial modulation; spatial pulse position modulation; low density parity check code; Polar code

0 引言

信道编码作为改善系统误码性能的一种有效方式被逐渐应用于无线光通信中。随着5G标准的制定,极化(Polar)码成为低密度奇偶校验(LDPC)编码后的又一研究热点^[3]。安琪等人^[4]研究了无线光通信系统中Polar码编译码方法,指出采用循环冗余校验码辅助序

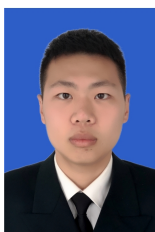
列连续消除(CRC-SCL)译码算法与未编码的系统相比可获得6 dB左右的编码增益。柯熙政等人^[5]提出一种适用于大气湍流信道中的Polar码编码调制方案,与递归构造方案相比具有1~1.4 dB的增益。方嘉飞等人^[6]针对自由空间光(FSO)通信在湍流信道下对Polar码性能进行研究,验证了Polar码(相比LDPC码)具有更好的抗湍流衰落能力。

目前,在光空间调制中信道编码选择方面的研究还有所欠缺,且缺少对编码方式选择问题的研究。因此,本文以空间脉冲位置调制(SPPM)系统为基础,对比分析该系统不同码长、码率下LDPC码与Polar码的误码性能,并给出合理的编码选择方案。

收稿日期:2020-09-13。

基金项目:国家自然科学基金项目(61701518)资助;山东省“泰山学者”建设工程专项经费基金项目(ts20081130)资助。

作者简介:李寅龙(1996—),男,辽宁大连人,海军航空大学硕士研究生,研究方向为现代通信理论与应用,主要研究内容为蓝绿激光通信调制编码技术,包括空时编码、空间调制和信道编码等方面,参与了大气无线光通信信道测量、无线光通信装备研制及体系论证等工作。



1 系统结构

1.1 级联信道编码的 SPPM 系统结构

在级联信道编码的 SPPM 系统中,发射端对二进制比特进行信道编码,经过 SPPM 映射后将每一个含有 B 比特信息的数据块分为 2 个分组 b_1 和 b_2 ; b_1 根据激光器映射表激活对应的激光器, b_2 经过 PPM 后将调制符号通过激活的激光器发射。接收端根据信道特性和接收到的调制符号分别计算激光器序号和发射信息的对数似然比(LLR),再经过译码器译码,系统模型如图 1 所示。图中 T 为发射天线, R 为接收天线, n 为高斯白噪声。

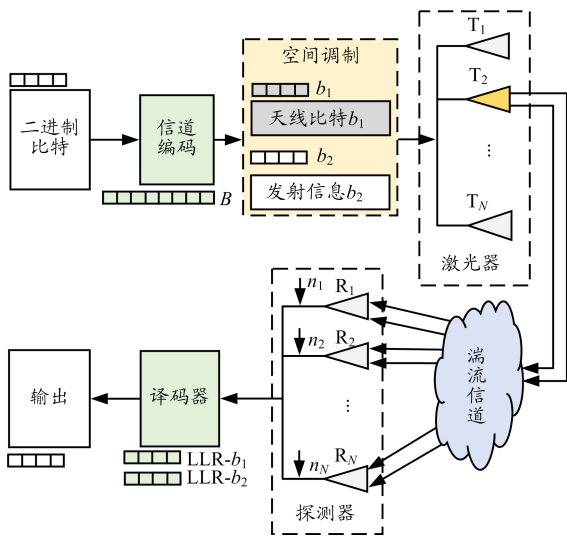


图 1 级联信道编码的 SPPM 系统结构

激光器的激活映射可表示为:

$$\mathbf{x}_a = [0, 0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]^T \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x}_a$ 为 $N_t \times 1$ 维的激光器激活映射向量, 1 所在的位置 i 为被激活激光器的序号, N_t 表示发射端总激光器数目, $i \in [1, N_t]$ 。在使用 Q-PPM 时, 调制符号 $\mathbf{x}_s = [0, 0, \dots, 0, A_m, 0, \dots, 0]$ 为 $1 \times Q$ 维向量, A_m 表示激光脉冲, 此时激光器传输矩阵 $\mathbf{x}_t = \mathbf{x}_a \cdot \mathbf{x}_s$ 。传输矩阵经激光器发射, 通过湍流信道后在接收端由探测器接收, 接收端信号可表示为:

$$\mathbf{Y} = \eta \mathbf{H}_c \mathbf{x}_t + \mathbf{Z} \quad (2)$$

其中, η 为光/电转换效率, 对于一般的光电二极管, $\eta \in [0.5, 0.7]$, $\mathbf{H}_c$ 为 $N_r \times N_t$ 的信道矩阵, $\mathbf{x}_t$ 为传输矩阵, $\mathbf{Z}$ 是均值为 0、方差为 σ_n^2 的高斯白噪声矩阵。

使用 (N_t, N_a, N_r) 标注空间调制参数, N_a 表示每次激活的激光器数目, N_r 表示探测器数目, (4, 1, 1)-SPPM 在每次传输时只激活一个激光器发射调制符号,

激光器映射方式如表 1 所示。

表 1 (4, 1, 1)-SPPM 激光器映射表

映射比特 b_1	激活的激光器序号
0 0	1
0 1	2
1 0	3
1 1	4

1.2 垂直链路湍流信道模型

假设机载激光发射器与水下探测器进

行通信, 此时可将通信链路视为垂直链路, 在水下通信中取波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 。空中-水下通信链路中大气信道占整体的 95% 以上, 因此考虑湍流时以大气湍流为主, 且认为空中至海面距离为激光在大气中的传输距离。

在水平链路中利用 Hufnagel-Valley (H-V) 模型^[7]描述大气结构常数 C_n^2 , 其表述为:

$$C_n^2(h) = 0.00594 \left(\frac{v}{27} \right)^2 (10^{-5} h)^{10} \exp \left(-\frac{h}{1000} \right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp \left(-\frac{h}{1500} \right) + A_0 \exp \left(-\frac{h}{100} \right) \quad (3)$$

其中, A_0 为地平面 $C_n^2(0)$ 的标称值, h 为高度, v 为风速。

由于 C_n^2 与海拔高度 h 有关, 因此在垂直链路计算中不能直接使用 $C_n^2(h)$ 进行计算。本文使用海拔高度为 0 的大气折射率结构常数 $C_n^2(0)$ 来描述湍流强度的大小。垂直链路下的 Rytov 方差^[8]由式 (4) 给出:

$$\sigma_R^2(0) = 2.25 k^{7/6} \sec^{11/6}(\zeta) \int_{d_0}^D C_n^2(h) \cdot (h - d_0)^{5/6} dh \quad (4)$$

其中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, ζ 为天顶角, d_0 为接收端距地面的高度, D 为发射端高度。垂直链路通信中近似认为天顶角 $\zeta = 0$, 此时整体链路中湍流强度为弱湍流, 可根据海面处不同湍流强度

表 2 不同湍流强度下, $C_n^2(0)$ 取值

海面湍流强度	$C_n^2(0)/m^{-2/3}$
弱湍流	1.7×10^{-15}
中湍流	1.7×10^{-14}
强湍流	1.7×10^{-13}

下的 $C_n^2(0)$ 计算链路的 Rytov 方差, $C_n^2(0)$ 取值如表 2 所示。

2 编译码原理

2.1 LDPC 编译码

2.1.1 校验矩阵构造

LDPC 码有 2 种表示方式: ①沿用线性分组码, 利用生成矩阵 $\mathbf{G}$ 或校验矩阵 $\mathbf{H}$ 表示; ②采用 Tanner 图表示, 能够更为直观地展现不同信息位、监督位之间的关系, 形象地描述 LDPC 编译码的特性。本文以 Tanner 图为例, 对 LDPC 码的表示方式进行说明。设 LDPC 码的校验矩阵 $\mathbf{H}$ 为 $m \times n$ 维, 其校验矩阵和 Tanner 图如式 (5) 和图 2 所示。

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

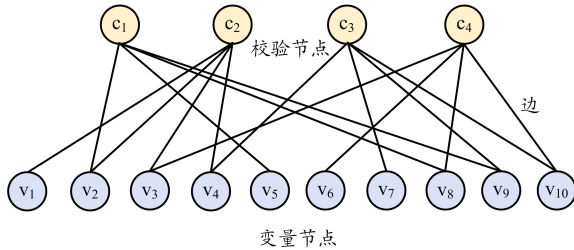


图2 LDPC码的Tanner表示

由图2可知,若存在长度为4的循环,则出现的错误信息经过2次循环后会返回节点导致错误传播,因此在构造校验矩阵时应尽可能避免短环的出现。本文使用 Mackay 1A 随机构造法构造校验矩阵。

2.1.2 LDPC 译码算法

LDPC 的译码可分为硬判决和软判决 2 种形式。硬判决译码主要为比特翻转(BF)译码,优点是译码简单、计算速度快,缺点是译码性能有限。软判决译码以和积译码算法为主,又被称为置信传播(BP)译码,优点是译码性能较好,缺点是计算较复杂、对硬件要求高。BP 译码算法将信道信息转化为 0 和 1 的概率信息,通过节点的不断迭代更新信息在接收端判决信号,可充分利用有效信息。BP 译码算法通常分为概率 BP 译码算法和 LLR-BP 译码算法。LLR-BP 译码算法将消息表示为 LLR,将大量乘法运算转变为加法运算来减少运算时间。

2.2 Polar 编译码

2.2.1 信道极化现象

信道极化现象是 Polar 码的核心,其本质是信道结合与分裂的过程。码长 $N=2^n$ 的极化码有 N 个子信道,其极化子信道 $W_N^{(i-1)}$ 和 $W_N^{(i)}$ 由信道 $W_{N/2}^{(i/2)}$ 极化而来,而子信道 $W_N^{(i)}$ 和 $W_N^{(i+1)}$ 由信道 $W_{N/2}^{[(i+1)/2]}$ 极化得到。对于二进制擦除信道(BEC),假设当前信道 W 的擦除概率为 p ,其信道容量可表示为:

$$\begin{cases} I(W_N^{(2i-1)}) = I(W_{N/2}^{(i)})^2 \\ I(W_N^{(2i)}) = 2I(W_{N/2}^{(i)}) - I(W_{N/2}^{(i)})^2 \\ I(W_1^1) = 1 - p \end{cases} \quad (6)$$

不同码长情况下,当 $p=0.5$ 时对称信道容量的分布情况如图3所示。可以看出,对于任意码长的 Polar 码,其信道容量主要分布于 0 和 1,但随着码长的增加,位于 0 和 1 的子信道占比逐渐增加,信道极化现象愈发明显;若定义信道容量大于 0.9 的子信道为优质信道,则不同码长下优质信道占比分别为 0.3984、0.4121、0.4346 和 0.4429。因此,码长越长,优质信道的占比越高。可以推测:当码长足够长时,信道容量将会集中分布于 0 和 1。在信道容量为 1 的信道上传输有用信息比特,而在信道容量为 0 的信道上只传输收发两端均已知的冻结比特,从而逼近信道容量。Polar 码作为一种特殊的线性分组码,其编码可以沿用线性分组码的通用表示方式,即:

$$X_1^N = u_1^N G_N^1 = u_1^N B_N F^{\otimes n} \quad (7)$$

其中, X_1^N 为编码后的码字, G_N^1 为生成矩阵, u_1^N 为输入待编码序列(包含信息比特、冻结比特), B_N 为比特反转

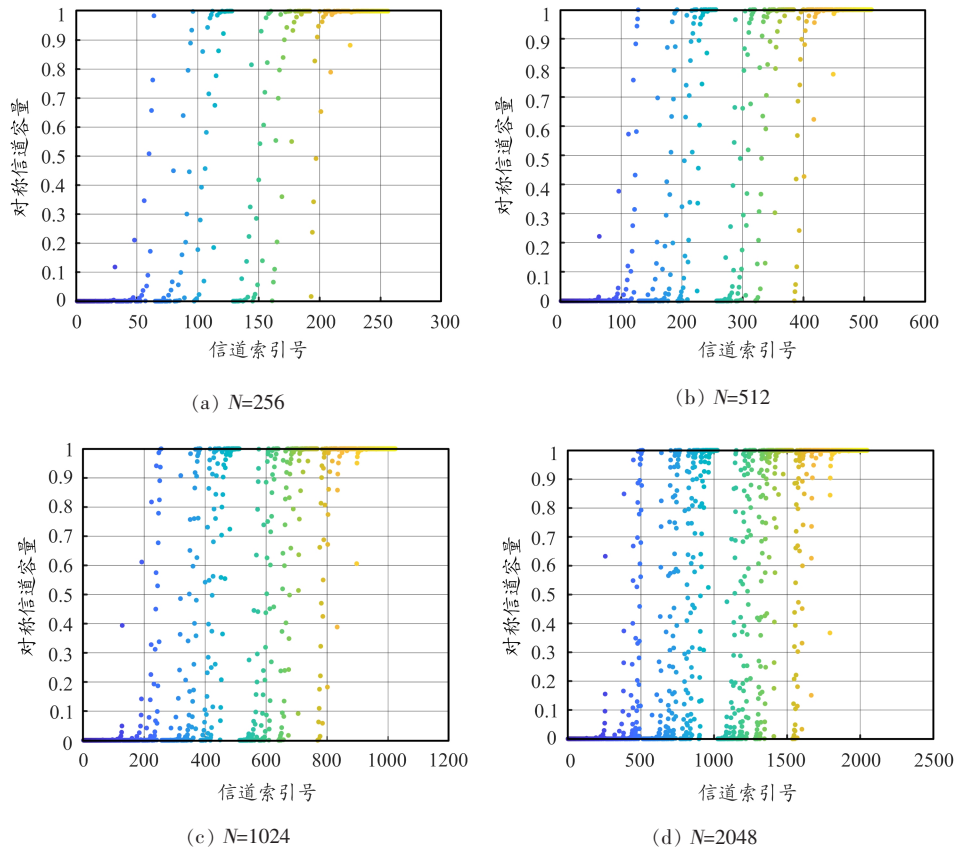


图3 不同码长下二进制擦除信道子信道容量分布

置换矩阵, $n=\log_2 N$, F 为极化变换核, 其定义为:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

且存在如下运算:

$$F^{\otimes 2} = \begin{bmatrix} F & 0 \\ 0 & F \end{bmatrix}, F^{\otimes n} = \begin{bmatrix} F^{\otimes n-1} & 0 \\ 0 & F^{\otimes n-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

当信道数目 $N_c=4$ 时, 有:

$$F^{\otimes 2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

同时, $B_N: (s_1, s_2, s_3, s_4) \rightarrow (s_1, s_3, s_2, s_4)$, 即 $F^{\otimes 2}$ 第 2 行与第 3 行互换位置, G_N^1 可表示为:

$$G_N^1 = B_N F^{\otimes n} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.2.2 Polar 码译码

Polar 码常用的 3 种译码算法有: 连续消除(SC)译码、序列连续消除(SCL)译码和循环冗余校验辅助的 SCL(CRC-SCL)译码。目前, CRC-SCL 译码算法可达到与 LDPC 码相同甚至优于 LDPC 码的性能^[9]。SCL 译码算法在 SC 译码算法的过程中同时保留 L_s 条候选路径, 并且考虑信息比特的 2 种取值, 避免 SC 译码算法中的错误传播。因此, 当 $L_s=1$ 时, SCL 译码算法与 SC 译码算法相同, 其优势在于可根据不同系统需求选择不同列表长度来获得近似于最大似然译码的性能。图 4 给出了码长 $N=4$ 、信息比特长度为 2 和列表长度 $L_s=2$ 时的模型。

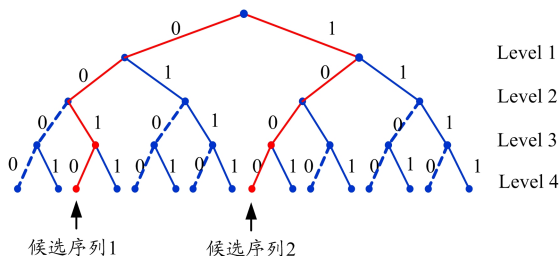


图 4 SCL 译码算法流程

CRC-SCL 译码算法以 SCL 译码算法为基础, 引入循环冗余校验(CRC)序列, 从所得的候选译码序列集合选择能够通过 CRC 校验的最大译码序列, 最终输出所提取的信息比特, 其译码流程如图 5 所示。

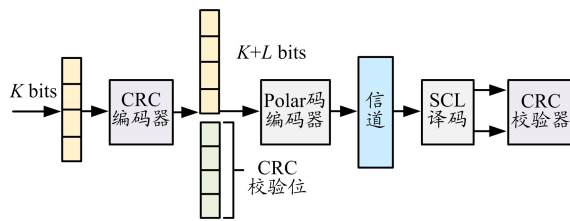


图 5 CRC-SCL 编译码算法流程

3 性能分析

本文在对比性能时主要针对湍流影响进行研究, 忽略传输路径损耗和衰减等因素。仿真中, LDPC 码利用 Mackay 1A 构造法构造校验矩阵并使用 BP 译码算法, Polar 码采用 CRC-SCL 译码算法, 其中 8 位 CRC 校验码使用标准生成多项式, 表示为 $g_8(x)=x^8+x^7+x^6+x^4+x^2+1$, 系统仿真条件如下:

①接收端已知信道信息, 且在一个符号周期内信道衰减特性保持不变。

②为减小发射光束间的相干性, 假设各激光器之间距离满足 $l \geq \sqrt{\lambda D}$ 。

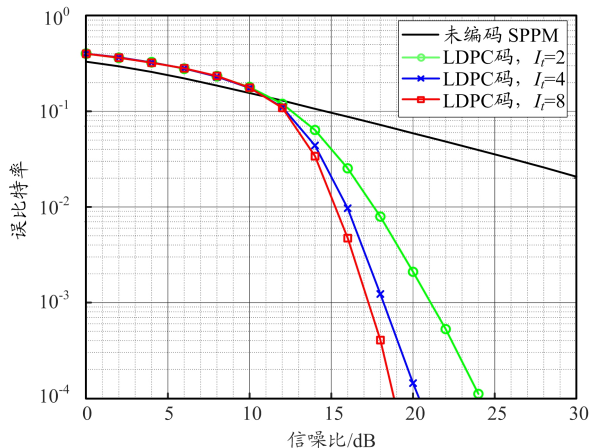
③各参数在未另行说明时取值如表 3 所示。

图 6 给出了码长 $N=128$ 、码率 $R=0.5$ 和误比特率为 10^{-4} 时, 不同迭代次数的 BP 译码与不同列表长度

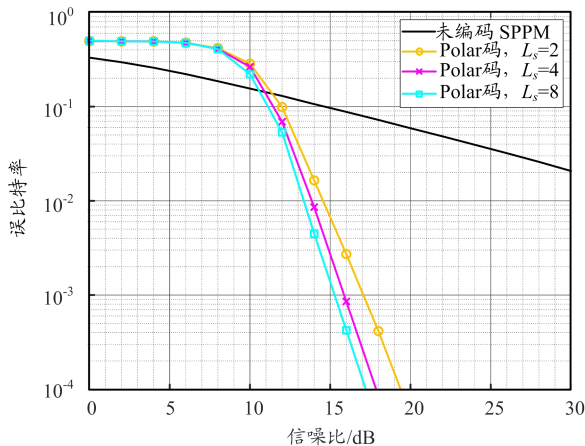
表 3 仿真中的参数取值

类别	参数	取值
SPPM	激光器数目 N_t	4
	探测器数目 N_r	1
	激活激光器数目 k	1
	PPM 符号长度 Q	4
	光/电转换系数 η	0.5
湍流信道	大气折射率结构常数 $C_n^2(0)$	1.7×10^{-14}
	海面风速 ν	5 m/s
	发射端高度 D	8 km
	接收端高度 D_0	0 km
	波长 λ	532 nm
信道编码	发射天顶角 ζ	0 rad
	湍流信道模型	Log-Normal
	BP 译码迭代次数 I_t	8
	CRC-SCL 译码列表长度 L_s	8
	CRC 校验矩阵长度 L_{CRC}	8

的 CRC-SCL 译码的误码性能。由仿真结果可知:①弱湍流信道下,SPPM 系统中级联信道编码能够有效地提升系统误码性能。对于 LDPC 码,其迭代次数会影响系统误码性能,随着迭代次数的增加,编码增益提高;对于 Polar 码,其列表长度会影响系统误码性能,随着列表长度的增加,编码增益提高。②当 BP 译码的迭代次数 $I_t=2$ 时,信噪比与 $I_t=4$ 时相差 3.5 dB;当 BP 译码的迭代次数 $I_t=4$ 时,信噪比与 $I_t=8$ 时相差 1.5 dB。说明在迭代次数达到一定数量时,译码方式对检测性能的提升效果逐渐降低,如图 6(a)所示。③不同 L_s 时 CRC-SCL 误码性能的变化规律与 BP 译码基本相同。当 $L_s=2$ 时,信噪比与 $L_s=4$ 相差 2 dB;当 $L_s=4$ 时,信噪比与 $L_s=8$ 相差 1 dB,可以看出列表长度对 Polar 码性能的影响低于迭代次数对 LDPC 码的影响,如图 6(b)所示。由于在迭代次数或列表长度较大时,继续增加迭代次数或列表长度获得的系统增益十分有限,因此实际应用中若已经满足系统误码性能的要求,此时迭代次数或列表长度不宜选择过大,避免增加系统计算



(a) BP 译码



(b) CRC-SCL 译码

图 6 不同迭代次数(列表长度)下译码性能比较

复杂度,降低译码速度。

不同码长和码率、误比特率为 10^{-4} 时 LDPC 码和 Polar 码在 SPPM 系统中的误码性能如图 7 所示。由仿真结果可知:①在码长一定时,随着码率 R 增加,系统误码性能下降,这是由于 R 的增加使传输的冗余减少,提升有效性的同时导致可靠性降低。②当码率较小($R=0.5$ 和 $R=0.6$)时,相同码长下 Polar 码性能优于 LDPC 码 2 dB 左右;但当码率较大($R=0.7$ 和 $R=0.8$)时,Polar 码的性能优势逐渐减小。在 $R=0.8$ 时,Polar 码与 LDPC 码在高信噪比的性能基本一致。③Polar 码在低信噪比的性能劣于 LDPC 码,随着码率提升,Polar 码的编码阈值逐渐高于 LDPC 码。仿真结果表明在 SPPM 系统中 Polar 码在低码率时性能更好,在高码率时性能与 LDPC 码区别不大。

综上所述,通过在 SPPM 系统中对 LDPC 码和 Polar 码的仿真结果分析可知:

①若系统在低码率的条件下,Polar 码凭借误码性

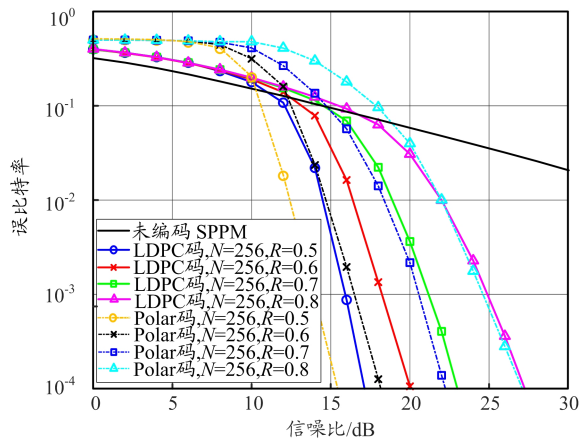
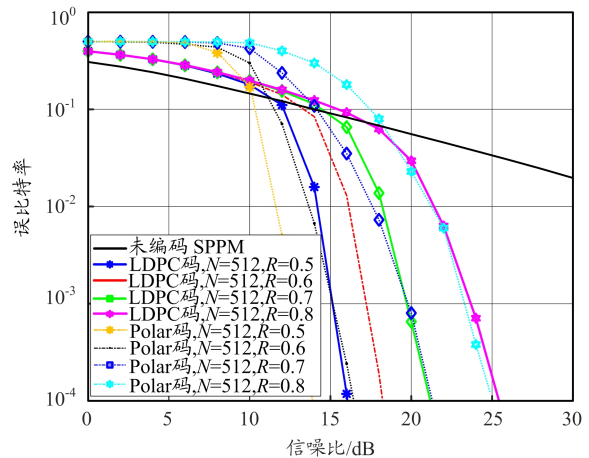
(a) $N=256$ (b) $N=512$

图 7 不同码长和码率下 LDPC 码与 Polar 码性能比较

能的优势可作为优先考虑的编码方案,但在码率较高时 Polar 码的性能优势逐渐消失。LDPC 码由于并行译码的优良特性,可获得更低时延,故其在高码率下是更为合理的编码方案。

②由于 Polar 码在低码率时相对于 LDPC 码有更低的编码阈值,更适用于系统功率受限的系统;LDPC 码由于在相同码率下,不同码长的编码阈值基本不变化,更适合于码长改变的自适应系统。

4 结束语

本文阐述了 LDPC 码和 Polar 码的编译码原理,以 SPPM 系统为基础研究了以空中-水下通信为背景的大气垂直链路下 LDPC 码和 Polar 码的编码性能,并研究了不同迭代次数和列表长度对译码性能的影响,以及不同码长、码率下编码系统的误码性能。仿真结果表明:随着迭代次数或列表长度增加,译码性能的改善效果逐渐降低,故应选择合适的迭代次数或列表长度以保证误码性能和系统复杂度的合理权衡;在码率较小时 Polar 码性能优于 LDPC 码,随着码率的增加,Polar 码与 LDPC 码性能差距逐渐减小。因此,对于 SPPM 系统,在低码率或功率受限时应优先考虑 Polar 码,在高码率或码长自适应系统中应优先考虑 LDPC 码。

参考文献:

- [1] RENZO M D, HAAS H, GHAYEB A, et al. Spatial modulation for generalized MIMO: challenges, opportunities, and implementation [J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(1): 56–103.
- [2] MESLEH R, ELGALA H, HASS H. Optical spatial modulation[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2011, 3(3): 234–244.
- [3] 于清苹, 史治平. 5G 信道编码技术研究综述 [J]. 无线电通信技术, 2018, 44(1): 1–8.
- [4] 安琪, 毛忠阳, 谢洪森, 等. 无线光通信系统中极化码编译码技术[J]. 海军航空工程学院学报, 2018, 33(5): 429–434+464.
- [5] 邵军虎, 柯熙政, 陈强. 一种适用于大气弱湍流信道的极化纠错编码调制方案[J]. 电子学报, 2016, 44(8): 1831–1836.
- [6] FANGJ F, BI M H, XIAO S L, et al. Polar-coded MIMO FSO communication system over gamma-gamma turbulence channel with spatially correlated fading [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(11): 915–923.
- [7] 李永亮, 王建宇, 徐睿, 等. 大气湍流对星地激光下行链路最大天顶角的影响[J]. 应用科学学报, 2011, 9(1): 22–26.
- [8] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005: 495–497.
- [9] TAL I, VARDY A. List decoding of Polar codes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(5): 2213–2226.