

无线光通信系统纠错编码研究进展

梁静远¹, 李梦茹¹, 王佳帆¹, 柯熙政^{1,2,3}

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院通信工程系, 陕西 西安 710048;

2. 陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710048;

3. 陕西理工大学物理与电信工程学院, 陕西 汉中 723001)

摘要: 无线光通信的信道环境复杂, 易受雨、雪、雾等自然现象的影响, 通常采用信道编码的方式纠正信道噪声引起的误码, 信道编码有里德-所罗门 (RS, Reed-Solomon) 码、Turbo 码、低密度奇偶校验 (LDPC, low density parity check) 码和极化码等多种类型。梳理了纠错码的发展脉络, 总结了纠错码用于无线光通信的研究进展并进行对比分析, 在此基础上介绍了西安理工大学在该领域的理论和实验研究进展, 比较分析了 RS 码、Turbo 码、LDPC 码在雨、雪、雾环境下的纠错特性。最后, 指出了该领域未来可能的研究方向和挑战, 为相关领域未来的发展和研究提供参考。

关键词: 无线光通信; 纠错编码; 误码率

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

doi:10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00276

Research progress of error correction coding in optical wireless communication system

LIANG Jingyuan¹, LI Mengru¹, WANG Jiafan¹, KE Xizheng^{1,2,3}

1. Department of Communication Engineering, School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2. Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an 710048, China

3. School of Physics and Telecommunications Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China

Abstract: The channel environment of the optical wireless communication is complicated, susceptible to various natural phenomena such as rain, snow, and fog. The channel code is usually used to correct the error caused by the channel noise. Common channel codes are Reed-Solomon (RS) code, Turbo code, low density parity check (LDPC) code, polarization code and other types. The development of the error correction code was combed, the research progress of the error correction code for the optical wireless communication were summarized and the comparative analysis was made, which introduced the progress of Xi'an University of Technology in this field of theory and experimentation. RS code, Turbo code, LDPC code were comparable to the error correction characteristics in rain, snow and fog environments. Finally, the future possible research direction and challenges were pointed out, providing references for the future development and research in the relevant fields.

Key words: optical wireless communication, error correction coding, bit error rate

收稿日期: 2021-12-14; 修回日期: 2022-05-27

通信作者: 柯熙政, xzke@xaut.edu.cn

基金项目: 陕西省重点产业创新项目 (No.2017ZDCXL-GY-06-01); 西安市科技计划项目 (No.2020KJRC0083)

Foundation Items: The Shaanxi Province Key Industry Innovation Project (No.2017ZDCXL-GY-06-01), The Xi'an Science and Technology Plan Project (No.2020KJRC0083)

0 引言

在信息技术飞速发展的时代,云计算、人工智能和多媒体等业务不断增加,海量的数据需要通信网络进行传输和存储,对通信网络的带宽、速率和时延提出了更高的要求。具有大带宽、大容量、高速率的光通信得到了长足的发展。无线光通信是一种在无线光信道中进行语音、图像、文字等传输的技术,在解决“最后一公里”接入、抢险救灾应急通信等方面有着良好的应用前景。无线光信道中的自然现象会对激光通信产生不良影响,如造成通信的脉冲范围展宽、信噪比减小、误码率增大^[1]。对于抑制的信道劣化,需要通过差错控制编码也就是纠错码,增加信号的冗余提高信息的抗干扰性能,以达到系统的指标要求。将纠错码引入无线光通信系统是纠错码应用的又一新实践。研究、发展具有良好抗干扰性能、高速率的编码技术,成为了无线光通信领域的重点课题之一^[2]。

1 纠错码的研究进展

Shannon 于 1948 年创建了信息论,发表了开创性文献《A mathematical Theory of Communication (通信的数学理论)》,这标志着信息与编码理论学科的诞生,也是纠错编码理论发展的开端^[3]。自此,大批学者投身于纠错编码的研究,随着编码方式的改善和计算能力的提升,纠错性能更优、更接近香农极限的纠错编码方式相继出现。

1950 年,Hamming 提出了一种线性分组码,可以纠正一个独立错误,人们称之为 Hamming 码。Hamming 码可以指明出错数据错误所在位置,纠正 7 bit 中发生的单比特错误^[4]。1954 年,Muller 提出了一种结构丰富的代数编码方案^[5],同年,美国 Massachusetts Institute of Technology 的 Reed 针对该代数编码方案的分层构造提出了高效的译码算法——大数逻辑译码算法,该代数编码方案被称为 RM (Reed-Muller) 码。RM 码也是一种线性分组码,但相较于 Hamming 码可以纠正多个错误^[6],并且后来在火星探测方面得到了应用。同年,Golay 研究了 Hamming 码的缺点,在此基础上提出了 Golay 码,Golay 码可以纠正任意 3 bit 错误^[7],有效地提高了编码效率。前面几种纠错编码均为线性分组码,1955 年,Elias 提出了卷积码。与前面几种分组码不同,卷积码是一种非分组码,比较适用于前向纠错,在多种实际应用场合,卷积码的性能优于线性分组码,且运算量

较小。卷积码能更好地利用各个模块之间的相关性,其当前时刻的编码输出取决于当前时刻的输入和前一时刻的输入,因此可以获得更高的编码增益,卷积码的出现也使无线通信有了跳跃式的发展^[8]。

1957 年,Prange 提出了循环码,这是线性分组码中的一种重要的码,不仅具有一般线性分组码的特性,还具有任意码字经过循环移位后得到的序列仍是码字的循环特性^[9]。循环码具有很强的检错和纠错能力,可以检测随机和一些突发的误码^[10],而且编码和解码设备较为简单,但纠正多个随机误码的能力有限。在此基础上,1959 年,Hocquenghem 提出了 BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) 码,此码是一种能够纠正多个随机误码的循环码,可以弥补 Prange 提出的循环码纠正多个随机误码的能力有限的问题,也是人们研究得比较多的一种编码^[11]。Reed 和 Solomon 于 1960 年提出了能够有效纠正随机符号错误和随机突发错误的 RS 码,该码是一类纠错能力很强的特殊多进制的 BCH 码^[12],是在 Hocquenghem 提出的 BCH 码基础上的改进,特别适用于多进制调制的场合。循环码在线性约束的基础上增加了约束条件,是目前研究最为成熟的一类码,多数有实用价值的纠错码都属于循环码。

随后学者提出的几种纠错编码方案的编码效率都十分接近香农极限,极大推动了纠错码的发展。1962 年,Gallager 提出低密度奇偶校验 (LDPC, low density parity check) 码,该码是基于稀疏矩阵的一种性能非常接近香农极限的线性纠错码,此码在码组很长的时候优势更加显著,当时计算机计算能力不强,不能处理冗长的码组,因此它并没有受到学者的重视^[13-14],后来随着计算机计算能力的增强,LDPC 码重新受到重视,如今已广泛应用于移动通信和光纤通信等诸多领域。1993 年,Berrou 和 Glavieux 提出了 Turbo 信道编码方案,该方案具有逼近香农极限的编码效率^[15]。Turbo 码的提出打破了传统的信道编码方法,融入了卷积编码器和交织器,有效减小了码间相关性,使编码序列具有极大的随机性,此码的解码算法非常复杂。LDPC 码和 Turbo 码的编码效率都十分接近香农极限,但是二者的译码时延都较高,因此更适用于对实时性要求较低的通信系统。2009 年,Arikan 等首次提出 Polar 码,这是一类从理论上被证明逼近香农极限的纠错码,理论证明其能达到任意二进制输入离散无记忆对称信道容量,是编译码复杂度比较低的信道编码方案^[16-17]。

以上是对各种纠错码的出现以及优缺点的分析,在纠错码发展的过程中,学者们对各种编码方式进行了改进并且将不同的纠错码级联,出现了不同组合的级联码,提高了编码性能。

2006年,李川等^[18]将 BCH 码和 LDPC 码级联,结果表明级联码和 LDPC 码的误码率相近,但其信噪比的性能更优。2007年,康伟民等^[19]将 RS 码和 BCH 级联码用于纠正随机错误和突发错误,可以有效降低泊松信道中的误码率。2009年,张威等^[20]发现 RS 码和 Turbo 码级联后作为纠错码的性能比 RS 码与卷积码的级联码至少有 1 dB 的编码增益;且在误码率为 10^{-6} 时约有 2 dB 的编码增益。2010年,袁建国等^[21]通过仿真证明在误码率水平相同时,使用 RS 码和 BCH 级联码,较单独采用 RS 码取得更大的编码增益,系统的纠错性能有了较大的提高。2017年, Dong 等^[22]在子信道码率最优分配和不规则准循环-低密度奇偶校验(QC-LDPC, quasi-cyclic low-density parity-check)码构造方面进行研究,重点优化多级编码调制方案。以上结果均表明,级联码可以有效提高纠错性能和编码效率,不同编码方式的组合优于单一码,级联码的涌现进一步推动了纠错编码的发展,纠错码研究进展见表 1。

表 1 纠错码研究进展

| 年份 | 人物 | 研究进展 |
|-------|------------------|--------------------------|
| 1948年 | Shannon | 发表《通信的数学理论》 |
| 1950年 | Hamming | 纠正独立错误的线性分组码——汉明码 |
| 1954年 | Reed, Muller | RM 码 |
| | Golay | Golay 码 |
| 1955年 | Elias | 卷积码 |
| 1957年 | Prange | 循环码 |
| 1959年 | Hocquenghem | BCH 码 |
| 1960年 | Reed, Solomon | RS 码 |
| 1962年 | Gallager | LDPC 码 |
| 1993年 | Berrou, Glavieux | Turbo 码 |
| 2009年 | Arikan | Polar 码 |
| 2006年 | 李川 | BCH-LDPC 级联码,性能更优 |
| 2007年 | 康伟民 | RS-BCH 级联码用来校正随机和突发的混合误码 |
| 2009年 | 张威 | RS-Turbo 级联码可以提高编码增益 |
| 2010年 | 袁建国 | RS-BCH 级联码提高了系统的纠错能力 |
| 2017年 | Dong W | 不规则 QC-LDPC 码构造进行研究 |

2 纠错码在无线光通信中应用的研究进展

无线光通信的信道环境为大气,通信链路极易

受大气效应的影响,恶劣的信道环境会导致通信质量下降,为了抑制信道对光信号的干扰,信道编码是一种可采用的方法,信道编码可以提高信号的抗干扰能力,提高无线光通信系统的通信性能。

应用于无线光通信系统的纠错码一般采用前向纠错码,1993年,Ohtsuki 等^[23]将 RS 码应用于无线光通信系统,并对该系统进行分析。2003年,Josephm 等^[24]将 Turbo 码与无线光通信系统结合,并针对该方案进行了理论计算和仿真研究。2005年,Jaime 等^[25]从信息论的角度分析了无线光通信的大气信道容量,并引入 LDPC 码抑制信道噪声,获得了较大的净编码增益。在无线光通信系统中应用 RS 码、Turbo 码和 LDPC 码 3 种编码方式,可以提高系统的性能,大量学者对其进行改进及优化,提高了编码增益。

RS 码、Turbo 码和 LDPC 码 3 种编码方式都可以提高系统的通信性能,后来有学者将几种编码方式从不同的角度进行了比较。2008年,何小梅等^[26]推导出在无线光通信系统信道信息已知时,未编码和采用 RS 码两种情况下的平均误码率,并比较了使用 RS 码和 Turbo 码两种方案的系统性能,结果表明使用 Turbo 码的方案可以有效降低所需要的接收功率,在弱湍流条件下, Turbo 码对湍流的适应性更强,比 RS 码更适用于无线光通信系统。后来,学者们将级联码应用于无线光通信系统。2010年, Wen 等^[27]研究了卫星通信的信道编码,引入了喷泉码和非二进制 LDPC 码,包括它们的编码和解码算法;利用类似稀疏图形的特性,提出了喷泉码的串联和非二进制 LDPC 码,仿真结果显示了级联码的良好性能。2011年,姜晓峰等^[28]优化了交织 RS 码的性能,当交织深度固定时,计算了最佳的编码效率,仿真结果表明,交织 RS 码在衰落信道中能明显地提高通信系统的性能,当编码效率为 1/2 时,具有最强的抗干扰能力。

极化码的优良性能吸引了大量学者深入研究,2013年, Habif 等^[29]将极化码与脉冲位置调制方式结合,采用直接探测,在弱相干状态下实现了每个接收光子 4.8 位的光子信息效率。2015年, Wu 等^[30]将极化码应用于光通信系统,研究了相干超密集波分复用光接入网方案中冗余 7% 的极化码传输性能,在误码率为 10^{-3} 时获得了 1.4 dB 的性能增益。2018年,方嘉飞等^[31]分析了 Polar 码在大气湍流信道中的性能。结果表明,在中、强湍流信道下 Polar 码能有效

地抑制大气湍流产生信号的衰落，并且其编码复杂度较低。2019年，Iqbal等^[32]提出了一种采用正交幅度调制的数据速率可调的相干光极化编码传输系统。该系统基于多对一星座整形方法，设计了隐式凿孔极化编码调制系统。该方案在波分复用系统中进行了实验评估，提出了一种新的凿孔极化码，与传统的凿孔极化码相比，整形增益为 1.2 dB，最大通信距离增加了 200~400 km。为了提高在大气弱湍流信道下的传输效率，2019年，张晗等^[33]设计了一种自适应码率极化码，证明在不同湍流强度下，当误帧率为 10^{-8} 时，自适应码率极化码可以获得 1.7~2.3 dB 的性能增益。以上结论的得出多依靠理论计算和仿真，2019年，敖珺等^[34]使用 Raptor10 码组合无线光和射频信道，在 1.87 km 的城市链路上进行了无线光通信演示，将 Raptor 码应用于实际的信道编码，证明其能最大限度地提高链路利用率。

为了抑制大气湍流对通信系统的影响，多输入多输出 (MIMO, multiple input multiple output) 的收发方式被提出，2021年，文豪等^[35]提出了一种适用于无线光通信的 MIMO 极化编码方案，以解决通信链路容易受大气湍流影响的问题，可以在保持低复杂度的同时，获得更好的系统性能。此后，学者们对极化码的译码方式进行了改善，2021年，文豪等^[36]又提出了基于松弛极化码的分段式极化码-循环冗余校验-串行抵消列表译码方法，此方法可以明

显改善自由空间光通信系统误码性能，提高信噪比。同年，鲁信金等^[37]对信道极化中信道组合和信道分解两部分进行了详细分析，并且进一步研究了极化码的编译码过程，讨论了不同信道中极化的计算方法以及编码参数对误码率的影响。

对其他编码方案的优化和改进也从未停止，其中，LDPC 码在无线光通信系统中的研究较多且较为成熟。2021年，Cao等^[38]为了获得更好的通信性能，提出了动态调整的对数似然比 (LLR, log likelihood ratio) 作为 LDPC 解码器的输入。与传统的 LLR 输入相比，仿真结果表明，基于动态调整 LLR 的 LDPC 码具有较强的抗湍流能力，在不同大气湍流条件下的误差性能更好。2021年，Sonali等^[39]提出了通过模拟验证的分析模型，评估了在多种信道条件下的无线光通信链路中 LDPC 码的性能，在快速衰落信道和空间多路复用无线光通信信道中分析和制定了 LDPC 码的 BP 算法。在快速衰落信道和空间多路复用无线光通信信道中，最大编码增益分别为 13.95 dB 和 17.83 dB。纠错码在无线光通信中的应用研究进展见表 2。

3 无线光通信系统纠错编码的仿真研究

无线光通信系统的性能受多种因素的干扰，影响无线光通信系统性能的各种因素之间的关系如图 1 所示。对准误差会引起光斑漂移，使信噪比降低、探测信号产生随机起伏；大气吸收会引起功率

表 2 纠错码在无线光通信中的应用研究进展

| 年份 | 人物 | 研究进展 |
|-------|---------|--|
| 1993年 | Ohtsuki | RS 码用于无线光通信系统 |
| 2003年 | Josephm | Turbo 码与无线光通信系统结合 |
| 2005年 | Jaime | 引入 LDPC 码抑制信道噪声 |
| 2008年 | 何小梅 | Turbo 码所需要的接收功率更低 |
| 2010年 | Wen | 喷泉码和二进制 LDPC 码级联性能更好 |
| 2011年 | 姜晓峰 | 交织 RS 码编码效率为 1/2 时具有最强抗干扰能力 |
| 2013年 | Habif | 将极化码与脉冲位置调制方式结合 |
| 2015年 | Wu | 极化码用于光通信系统 |
| 2019年 | Iqbal | 设计隐式凿孔极化编码调制系统 |
| 2019年 | 敖珺 | 使用 Raptor10 码组合 FSO 和射频信道 |
| 2019年 | 张晗 | 自适应码率极化码用于弱湍流信道 |
| 2021年 | 文豪 | 极化码用于自由空间光通信 MIMO 系统中 PC-CRC-SCL 译码方法用于自由空间光通信系统 |
| 2021年 | 鲁信金 | 不同信道中极化计算方法和编码参数对误码率的影响 |
| 2021年 | Cao | 基于动态调整 LLR 的 LDPC 码性能更佳 |
| 2021年 | Sonali | 分析和制定 LDPC 码的 BP 算法 |

衰减，使平均信噪比降低；散射会引起光功率衰减和光脉冲展宽，引起码间串扰、信噪比降低；大气湍流会引起光强起伏、光束漂移、到达角起伏和光束扩展，也引起光信号波前畸变，使平均信噪比降低、接收信号产生随机起伏。本文仅分析无线光通信信道对误码率性能的影响。从 2002 年起，西安理工大学就对无线光通信系统的差错控制编码问题进行了研究，将 RS 码、Turbo 码、LDPC 码、喷泉码和极化码用于无线光通信系统，对各类编码在无线光通信系统中的性能进行了仿真研究。

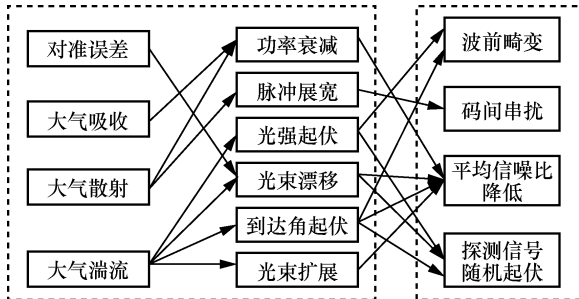


图 1 影响无线光通信系统性能的各种因素之间的关系

3.1 基于 RS 码的纠错控制

RS 码将原始信息分组，然后对每一组信息附加一定的监督码元。将每 9 个符号分为一组，并在每组符号后面添加 6 位监督码元。RS 译码器采用流水线译码算法，对 RS(30,10)码用于无线光通信系统的性能进行了仿真^[40-41]，不同天气条件下 RS(30,10)码纠错前后误码率如图 2 所示。

3.2 基于 LDPC 码的差错控制

LDPC 码属于线性纠错码，其性能可以十分接近香农极限，是性能优越的好码。不同天气条件下 LDPC 码纠错前后误码率^[42]如图 3 所示。

3.3 基于 Turbo 码的差错控制

不同天气条件下 Turbo 码纠错前后误码率^[43]如图 4 所示，可以看出 Turbo 码对不同天气的误码率都有不同程度的改善，采用纠错编码虽然使系统变得复杂，但是系统性能得到较大改善。

3.4 基于喷泉码的差错控制

喷泉码 (fountain code) 是一类由 k 个原始数据

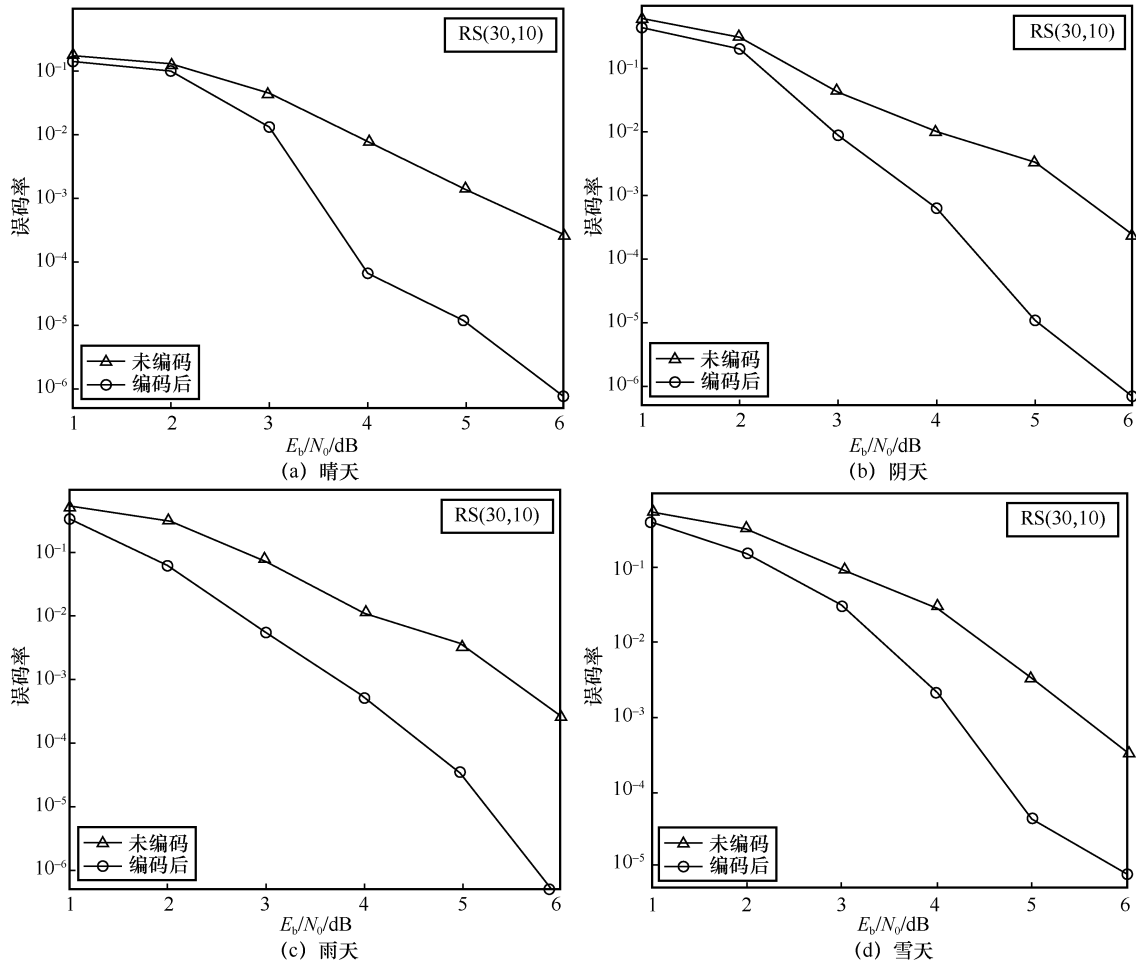


图 2 不同天气条件下 RS(30,10)码纠错前后误码率

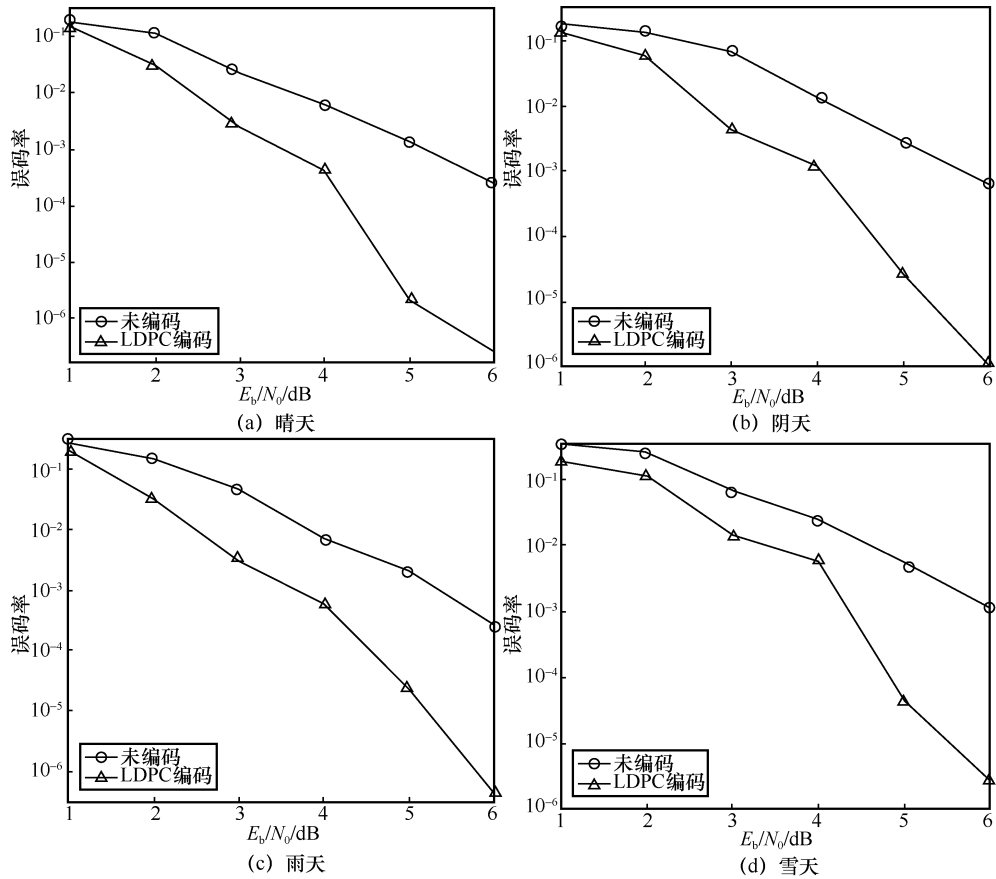


图3 不同天气条件下 LDPC 码纠错前后误码率^[42]

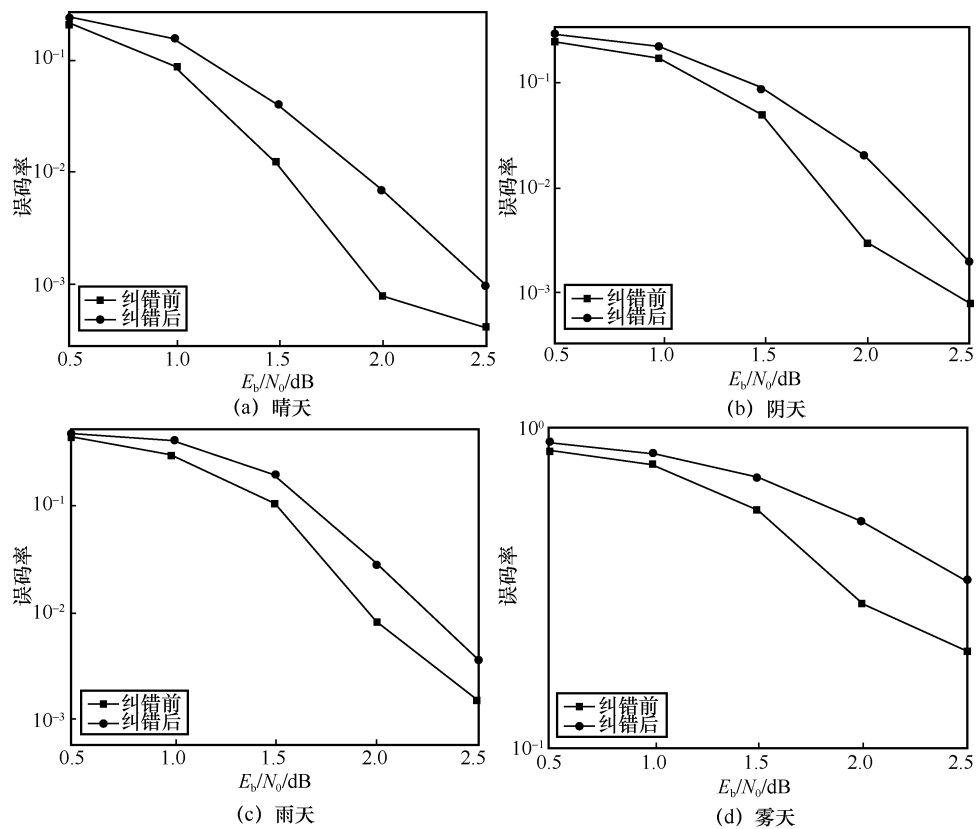


图4 不同天气条件下 Turbo 码纠错前后误码率^[43]

分组生成任意数量编码分组的纠错码，仅接收到其中任意 n 个编码分组即可恢复全部原始数据分组。卢比变换 (LT, Luby transform) 码和 Raptor 码是喷泉码的具体实现方式^[45]。

3.4.1 LT 码

LT 码的译码成功率与度分布有密切的关系，Luby 给出了两种实用的度分布：Ideal-soliton 和 Robust-soliton 分布由于 Ideal-soliton 分布度数为 1 的校验单元只占总校验单元的 $1/k$ ，数量很少且波动较大，有时可能不存在度为 1 的节点，同时有些原始分组则根本没有与之相连的校验节点，这导致无法从接收信息中正确恢复原始信息，恢复效果较差。改进的 Robust-soliton 分布增加了两个参数 c 和 δ ，能得到比 Ideal-soliton 分布更好的效果^[45]。

采用 Ideal-soliton 与 Robust-soliton 两种度分布下 LT 码性能比较^[45]如图 5 所示，其中，横坐标为编码开销，定义为 $\varepsilon = k/n - 1$ ，纵坐标为译码失败率， $k = 155$ 、 $c = 0.8$ 、 $\delta = 0.05$ 。从图 5 可以看出，当 $n = 1.6k$ 时，Ideal-soliton 分布下的译码失败率约为 0.15，而采用 Robust-soliton 分布的失败率为 0.1，译码失败率明显减小。

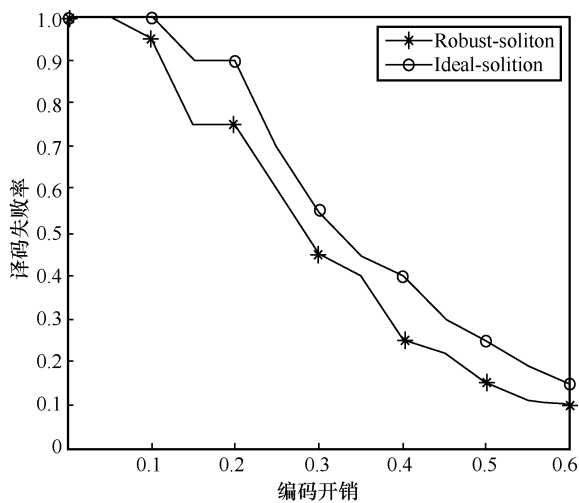


图 5 两种度分布下 LT 码性能比较^[45]

3.4.2 Raptor 码

LT 码译码后恢复了 $k' < k$ 个原始输入符号，定义恢复失败率为 $\eta = (k - k') / k$ ，只要 η 小于 RS 码的纠错能力，那么错误的符号就可以由 RS 码恢复过来。LT 码与 Raptor 码性能比较^[45]如图 6 所示，其中， $k = 155$ 、 $c = 0.8$ 、 $\delta = 0.05$ 。

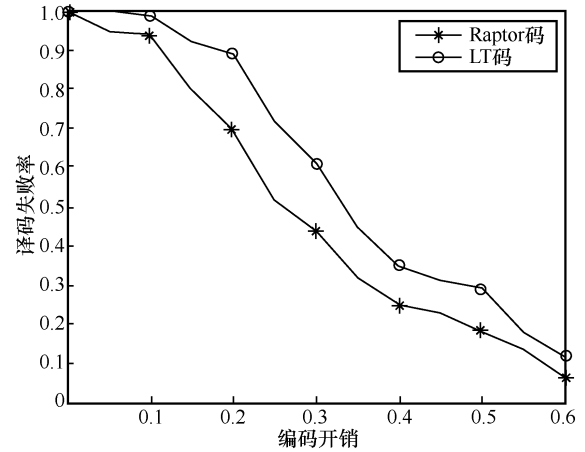


图 6 LT 码与 Raptor 码性能比较^[45]

采用 Raptor 码后，由于 RS 码能把 LT 码无法恢复的一部分错误纠正过来，大大降低了误码率。当接收到的编码分组 $n = 1.6k$ 时，采用 LT 编码方法时译码失败率约为 0.12，而采用 Raptor 码译码失败率仅为 0.08 左右。因此，Raptor 码是高度优化的一种编码^[45]。

喷泉码在 k 值越大时，译码失败率就越小，适用于较大数据量的传输。在相同的接收冗余度情况下， $k = 100$ 、 $k = 1000$ 时译码失败率如图 7 所示。

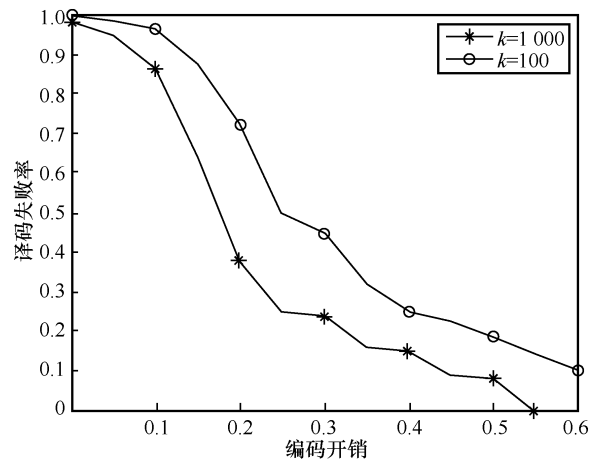


图 7 $k = 100$ 、 $k = 1000$ 时译码失败率^[45]

从图 7 可以看出， $k = 1000$ 时比 $k = 100$ 时译码失败率低，当接收到的编码分组 $n = k$ 时，较长数据分组的译码失败率为 0.98，而较短数据分组的译码失败率为 1。当数据分组 $n \geq 1.1k$ 时，译码失败率迅速降低。当编码分组 $n = 1.55k$ 时较长的数据分组已全部恢复，而较短的数据分组译码失败率约为 0.1^[45]。

当分布一定时，原始的输入数据分组越多，误

码率随着开销的增大变化越大,与小数据量相比具有明显的优势。在接收到的数据分组 n 略大于 k ($n > 1.1k$) 时,译码失败率迅速降低。但当 n 较大时,误码率的变化就比较缓慢。随着接收编码分组的增加,译码成功率也在不断增大,且与原始数据分组的数量有关^[45]。

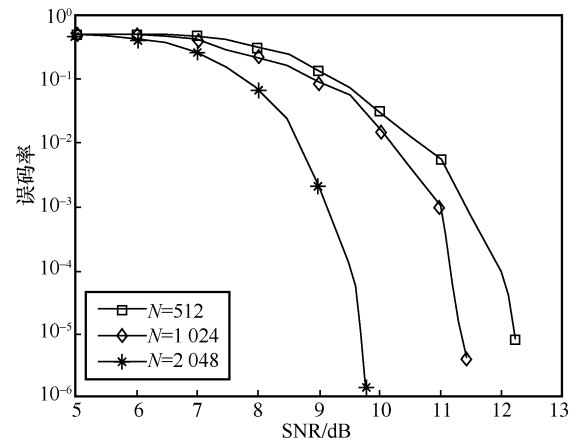
3.5 基于极化码的差错控制

极化码编码复杂度低,是唯一被证明能够逼近香农限的纠错码。本节主要分析串行抵消(SC, successive cancellation)译码算法的性能以及脉冲位置调制(PPM, pulse position modulation)对大气激光信道中极化码性能的影响。实验结果表明了副载波调制下极化码的纠错性能^[46-47]。极化码作为一种可达信道容量的差错控制编码方法,自入选 5G 控制信道编码方案以来,如何实现有限码长时的高效编码设计,以及与 MIMO、非正交多址接入相结合的高能效、高谱效空口数据传输技术,已成为提高未来 6G 无线传输性能的重要研究方向之一^[48]。

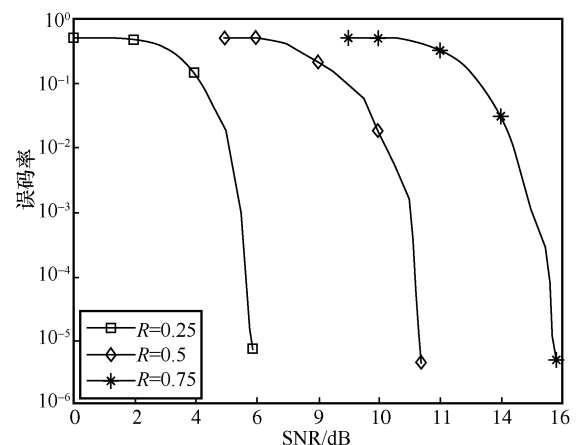
3.5.1 SC 译码算法性能仿真

使用高斯近似构造的弱湍流信道下极化码 SC 算法译码仿真结果如图 8 所示。在信噪比较高时,极化码在弱湍流信道下的误码率可达到 10^{-6} 。相同码率 $R=0.5$,不同码长 $N=512$ 、1 024、2 048^[47]误码率性能比较如图 8(a)所示,在码率相同的情况下,随着码长的增加极化码的性能趋好。1 024 码长与 512 码长相比有约 0.8 dB 的编码增益,而 2 048 码长与 1 024 码长相比有约 1.5 dB 的编码增益。可见,增大码长可以提升极化码的编码增益,但这同时增加了编码器和译码器的开销与时延,其编码和译码的渐进复杂度为 $O(N \log N)$ 。相同码长 $N=1 024$,不同码率 $R=0.25$ 、0.5、0.75^[47]误码率性能比较如图 8(b)所示,能够看出码率对极化码的影响非常大。这是因为随着码率的增加,有更多未被完全极化的信道用于信息的传输,噪声对这部分信道的影响随着码率的增加越明显,从而使得误码率增加,译码性能降低^[46-47]。

考虑码长 $N=1 024$ 、码率 $R=0.5$ 时弱湍流噪声对通信系统的影响,不同湍流强度时采用 SC 算法译码的误码率仿真曲线如图 9 所示,可以看出大气湍流使系统的性能降低,随着湍流强度的增加,降低越明显。在码率和码长相同的情况下,湍流越强,被完全极化的信道就越少,使误码率增加^[47]。



(a) 相同码率 $R=0.5$, 不同码长 $N=512$ 、1 024、2 048^[47]



(b) 相同码长 $N=1 024$, 不同码率 $R=0.25$ 、0.5、0.75^[47]

图8 弱湍流信道下极化码 SC 算法译码仿真结果^[47]

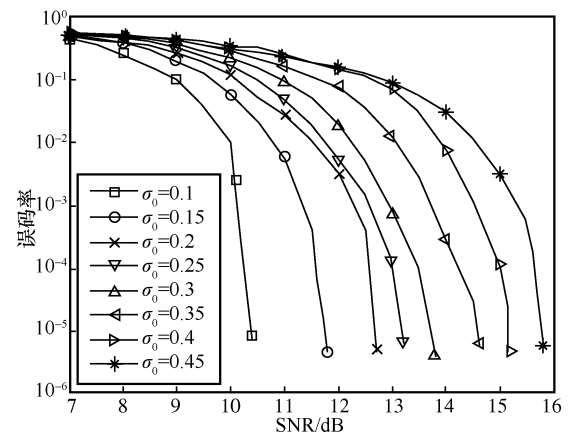


图9 不同湍流强度时采用 SC 算法译码的误码率仿真曲线^[47]

3.5.2 脉冲相位调制技术下极化码性能仿真

不同码长的 2-PPM 方式与二进制开关键控(OOK, on-off keying)调制的误码率性能仿真如图 10 所示,码率均是 0.5,可以看出,采用 2-PPM 能够获得明显的性能提升。在相同码长和码率参数下,2-PPM 相较于 OOK 调制可获得 3.5~3.8 dB 的编码增益^[47]。

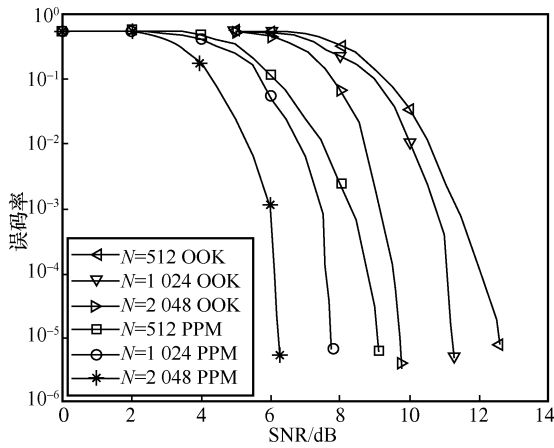


图 10 不同码长的 2-PPM 方式与二进制 OOK 调制的误码率性能仿真^[47]

随着 M -PPM 调制阶数 M 增大, PPM 时隙数对误码率的影响如图 11 所示, 可以看出, 当时隙数较小时, 误码率随着 M 的增加而增加, 随着调制阶数 M 继续增大, 16-PPM 比 OOK 调制性能差, 这是因为随着调制阶数 M 的增加, 每一帧解调的错误率也随之增加, 并且 M 的增大会带来更多湍流噪声与高斯噪声的影响, 从而降低了其解调译码性能。但是, 随着时隙数的增加, 发射端所需要的激光平均功率降低了, 采用高阶 PPM 调制具有更高的功率利用率, 从而可提高无线光通信的有效通信距离, 因此在实际应用场景需进行合理折中选择^[47, 49]。

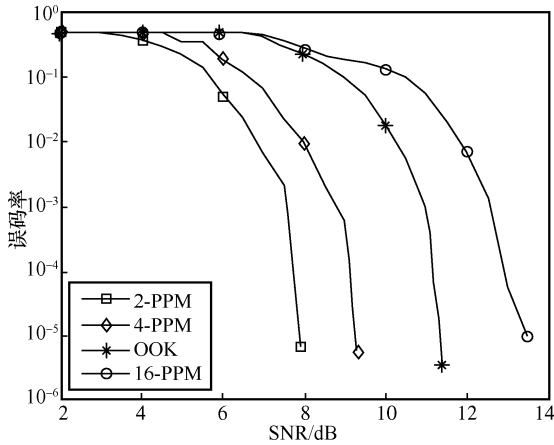


图 11 PPM 时隙数对误码率的影响^[47]

3.5.3 副载波调制技术下极化码性能仿真与实验

实验与仿真中极化码所用译码算法均为 SC 算法, 码长为 512、码率为 0.5。不同湍流强度 ($\sigma_0 = 0.1$ 、 $\sigma_0 = 0.2$ 、 $\sigma_0 = 0.3$) 信道及不同信噪比下, 未编码的二进制相移键控 (BPSK, binary phase shift keying) 及正交相移键控 (QPSK, quadrature phase shift keying) 副载波调制系统误码率^[47]如图 12 所示。

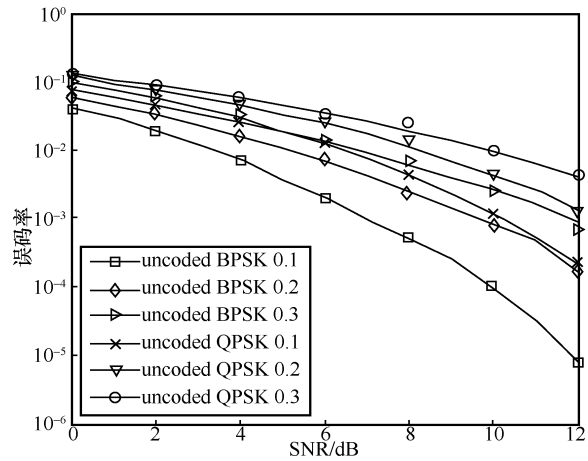


图 12 未编码的 BPSK 和 QPSK 副载波调制系统误码率^[42]

BPSK 副载波系统误码率^[47]如图 13 所示, QPSK 副载波系统误码率^[47]如图 14 所示, 对比可见, 基于极化码编码的 BPSK 副载波系统误码率优于 QPSK 副载波系统误码率, 可获得 4.8 dB 的编码增益^[42]。

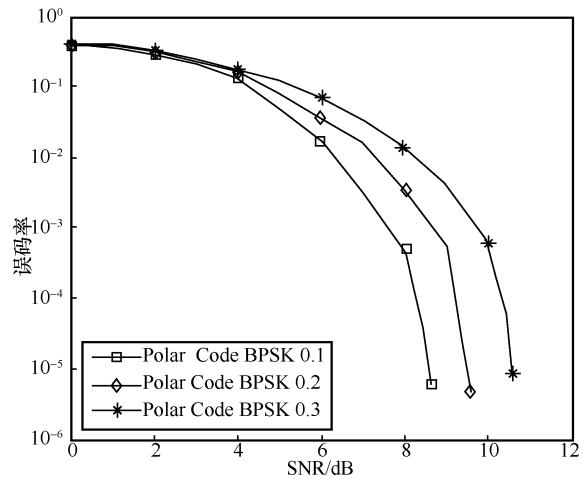


图 13 BPSK 副载波系统误码率^[47]

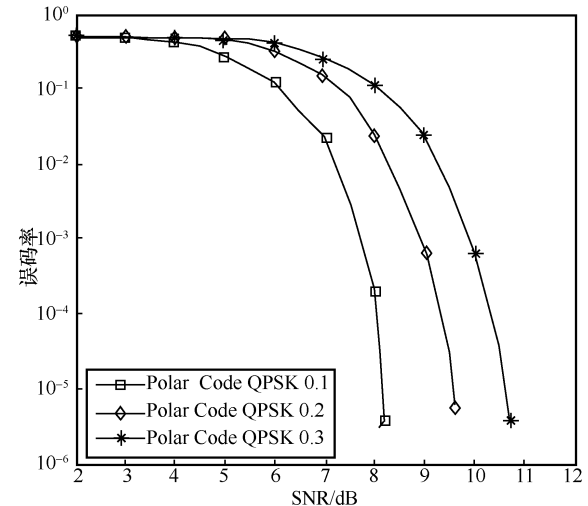


图 14 QPSK 副载波系统误码率^[47]

不同天气条件下无线光副载波调制系统实测数据分析^[42]见表 3, 采用极化码可使误码率特性改善一个量级, 可有效提升无线光通信系统的误码率性能^[47]。

表 3 不同天气条件下无线光副载波调制系统实测数据分析^[42]

| | 晴天 | 阴天 | 雨天 |
|---------|----------|-------------|----------|
| 发送码元/个 | 10 240 | 12 288 | 13 824 |
| 解调误码数/个 | 122 | 12 | 147 |
| 译码误码数/个 | 12 | 0 | 18 |
| 解调误码率 | 0.011 9 | 0.000 097 7 | 0.010 6 |
| 译码误码率 | 0.002 34 | 0 | 0.002 61 |

4 实验测量

实验测量时间为 2006 年 9 月—2008 年 1 月, 实验在 2 个大楼之间进行, 属于斜程传输方式。其中, RS 纠错码采用 RS(15,9)码和循环缩短码 RS(30,10); LDPC 码的码率为 1/2, 码长为 128; Turbo 码的码率为 1/3, 交织长度为 64。

雾天天气条件下的误码率^[50]见表 4, 由于晴天、阴天时, 系统误码率较低, 纠错后没有发现误码。部分雨天天气条件下的误码率^[50]见表 5, 部分雪天天气条件下的误码率^[50]见表 6。

实验结果表明, 纠错码虽然可以改善无线光通信系统的部分性能, 但是在有雾和有雪的天气下有效性较为一般, 在有雪、有雾的天气下误码率大大增加。在恶劣天气下, 误码率可达 10^{-3} 甚至 10^{-2} 。采用纠错编码后, 误码率大都可以改善到 10^{-5} 。通过 Turbo 码和 RS(30,10)码纠错后, 其误码率均在 10^{-5} 以下。中小雨天气时误码率可以维持在 10^{-4} , 通过 RS(15,9)码和 LDPC 码纠错后, 误码率基本可以维持在 10^{-6} 。晴天和阴天时, 平均误码率小于 10^{-7} , 但是在纠错后, 误码率可以优于 10^{-9} ^[50]。

4.1 RS 码

两种 RS 码在不同天气条件下实测的纠错前后误码率变化如图 15 所示, 可以看出, 在小雨和中雨的情况下, 使用 RS(15,9)码后误码率有了明显的改善, 从 10^{-4} 降到了 10^{-6} 左右。但是对于误码率较高的情况, 改善效果较差。对于小雨到大雨的条件下, RS(30,10)码的误码率可以从 10^{-4} 下降到 10^{-7} 。所以对于一般雨天情况而言, 使用 RS(30,10)码完全可以应对。在一些天气较为恶劣的情况下, 系统的误码率一般会在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$, 经过对系统进行纠错后, 误码率可以有效下降, 一般维持在 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ ^[50]。

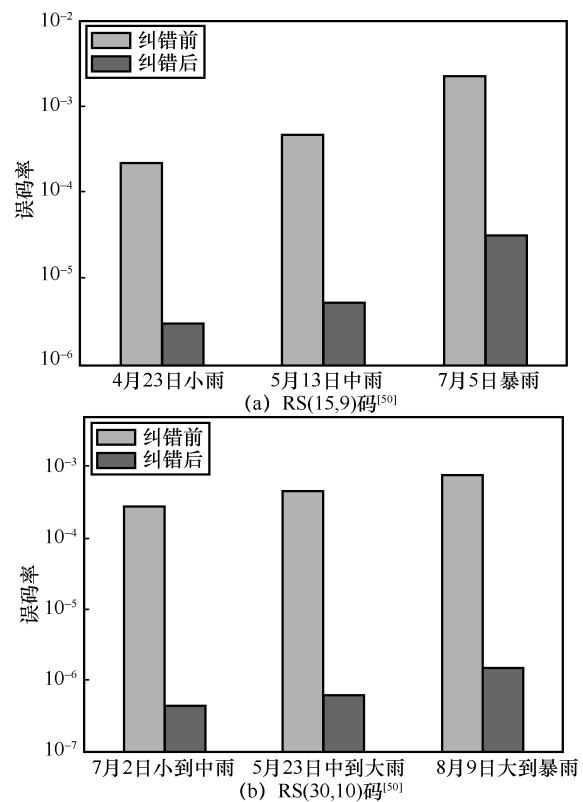


图 15 两种 RS 码在不同天气条件下实测的纠错前后误码率变化

表 4 雾天天气条件下的误码率^[50]

| 时间 | 天气情况 | 能见度/m | 纠错前误码率 | 纠错方式 | | | |
|------------------------|------|--------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| | | | | LDPC | Turbo | RS(15,9) | RS(30,10) |
| 2006 年 10 月 26 日 | 大雾 | 200 | 3.41×10^{-3} | 5.74×10^{-5} | | 5.10×10^{-5} | |
| 2006 年 10 月 27 日 | 大雾 | 200 | 3.35×10^{-3} | 2.96×10^{-5} | | 2.72×10^{-5} | |
| 2007 年 12 月 8 日 | 雨雾 | 150 | 7.3×10^{-3} | | 5.4×10^{-5} | | 3.2×10^{-5} |
| 2007 年 12 月 9 日 | 大雾 | 200 | 2.6×10^{-3} | 4.4×10^{-5} | | | 7.6×10^{-6} |
| 2007 年 12 月 10 日 | 大雾 | 400 | 1.3×10^{-3} | | | 8.4×10^{-6} | 2.5×10^{-6} |
| 2006 年 9 月—2006 年 10 月 | 晴天 | 15 000 | $\leq 10^{-7}$ | $< 10^{-9}$ | | | |
| | 阴天 | 3 000 | $\leq 10^{-6}$ | $< 10^{-9}$ | | | |

表5 部分雨天天气条件下的误码率^[50]

| 时间 | 天气情况 | 降雨量/mm | 纠错前误码率 | 纠错方式 | | | |
|-------------|------|--------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| | | | | LDPC | Turbo | RS(15,9) | RS(30,10) |
| 2007年4月23日 | 小雨 | 0.2 | 2.2×10^{-4} | 3.3×10^{-6} | | 3.0×10^{-6} | |
| 2007年7月4日 | 大雨 | 19.8 | 6.8×10^{-4} | | 4.0×10^{-6} | | 2.4×10^{-6} |
| 2007年6月17日 | 中雨 | 27.5 | 3.5×10^{-4} | | 8.4×10^{-7} | | 6.8×10^{-7} |
| 2007年7月5日 | 暴雨 | 34.1 | 2.4×10^{-3} | 4.2×10^{-5} | 8.8×10^{-6} | 3.2×10^{-5} | |
| 2007年8月9日 | 大雨 | 28.6 | 7.7×10^{-4} | | 2.2×10^{-6} | | 1.5×10^{-6} |
| 2007年8月26日 | 大暴雨 | 76.9 | 8.2×10^{-3} | | | 1.04×10^{-5} | |
| 2007年8月30日 | 小到中雨 | 21.4 | 4.4×10^{-4} | | | 5.0×10^{-6} | 6.4×10^{-7} |
| 2007年8月31日 | 中到小雨 | 2.4 | 3.8×10^{-4} | | 1.06×10^{-6} | 4.8×10^{-6} | |
| 2007年9月3日 | 中到小雨 | 10.1 | 4.0×10^{-4} | | | 5.4×10^{-6} | 8.6×10^{-7} |
| 2007年9月7日 | 中到大雨 | 33.5 | 5.8×10^{-4} | | 3.4×10^{-6} | | |
| 2007年9月27日 | 小雨 | 7.0 | 2.6×10^{-4} | 4.2×10^{-6} | 8.3×10^{-7} | | |
| 2007年9月28日 | 小雨 | 8.7 | 3.2×10^{-4} | | | 4.0×10^{-6} | |
| 2007年9月29日 | 小雨 | 3.0 | 3.5×10^{-4} | 4.3×10^{-6} | | 3.8×10^{-6} | |
| 2007年10月8日 | 毛毛雨 | 0.2 | 7.6×10^{-5} | | | 5.3×10^{-7} | |
| 2007年10月9日 | 小雨 | 1.6 | 2.0×10^{-4} | 3.2×10^{-6} | 7.8×10^{-7} | 3.0×10^{-6} | 7.2×10^{-7} |
| 2007年10月10日 | 小雨 | 6.6 | 2.6×10^{-4} | 3.5×10^{-6} | | 3.1×10^{-6} | |
| 2007年10月11日 | 小到中雨 | 12.0 | 4.8×10^{-4} | 6.6×10^{-6} | 1.8×10^{-6} | | |
| 2007年10月12日 | 小到中雨 | 24.6 | 4.0×10^{-4} | | | 5.4×10^{-6} | 8.8×10^{-7} |
| 2007年10月27日 | 大雨 | 20.3 | 7.5×10^{-4} | | 2.4×10^{-6} | | 1.8×10^{-6} |
| 2007年5月13日 | 中雨 | 13.6 | 5.0×10^{-4} | 6.6×10^{-6} | 7.5×10^{-7} | 5.2×10^{-6} | |
| 2007年10月15日 | 中雨 | 10.3 | 3.3×10^{-4} | 5×10^{-6} | | 6×10^{-6} | |
| 2007年7月2日 | 中雨 | 11.9 | 2.8×10^{-4} | | 5.4×10^{-7} | | 4.5×10^{-7} |
| 2007年5月23日 | 小到中雨 | 9.2 | 4.7×10^{-4} | | | 5.2×10^{-6} | 6.1×10^{-7} |
| 2007年5月24日 | 阴雨 | 0.8 | 1.5×10^{-4} | 1.8×10^{-6} | | 2.0×10^{-6} | |
| 2007年7月4日 | 中到大雨 | 19.8 | 6.2×10^{-4} | 8.4×10^{-6} | | 8.2×10^{-6} | |
| 2007年5月23日 | 中雨 | 12.2 | 4.5×10^{-4} | 5.4×10^{-6} | 7.3×10^{-6} | | |

表6 部分雪天天气条件下的误码率^[50]

| 时间 | 天气情况 | 降雪量/mm | 纠错前误码率 | 纠错方式 | | | |
|------------|------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | | | LDPC | Turbo | RS(15,9) | RS(30,10) |
| 2007年1月3日 | 中雪 | 1.9 | 4.6×10^{-3} | 7.8×10^{-5} | | 8.4×10^{-5} | |
| 2008年1月11日 | 中雪 | 2.5 | 3.4×10^{-4} | | 2.1×10^{-6} | | 1.2×10^{-6} |
| 2008年1月12日 | 大雪 | 5.6 | 6.2×10^{-3} | 8.8×10^{-5} | | | 3.6×10^{-5} |
| 2008年1月18日 | 大雪 | 6.4 | 5.5×10^{-3} | | 3.8×10^{-5} | | 2.5×10^{-5} |
| 2008年1月20日 | 大雪 | 6.0 | 4.4×10^{-3} | | 1.6×10^{-5} | | 9.2×10^{-6} |
| 2008年1月21日 | 大雪 | 4.8 | 4.5×10^{-3} | 6.3×10^{-5} | | 5.7×10^{-5} | |

4.2 Turbo 码

为了进一步验证 Turbo 码对无线光通信系统^[51]误码率的改善, 对中雨、大雨和暴雨天气的误码率进

行了实验测量, Turbo 码性能改善直方图^[45]如图 16 所示, 可以看出, Turbo 码对误码率为 10^{-4} 左右的系统改善效果较好, 但是对误码率为 10^{-3} 左右的系

统则校正能力一般。Turbo 码适用于中小雨天气以及薄雾等天气^[50]。

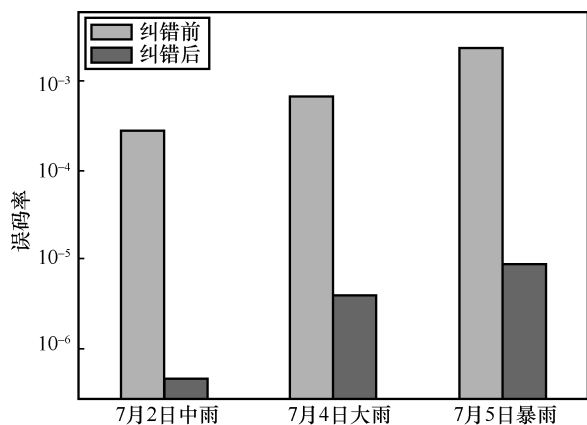


图 16 Turbo 码性能改善直方图^[45]

4.3 LDPC 码

采用码长为 128、码率为 1/2 的 LDPC 码，性能改善直方图^[44]如图 17 所示，可以看出，在小雨和中雨的条件下，误码率在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 时，纠错后误码率为 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 。在暴雨时，误码率为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ ，纠错后的系统误码率仍大于 10^{-5} 。LDPC 编码适用于误码率较小的场景，在恶劣天气条件下对系统误码率的改善不明显^[50]。

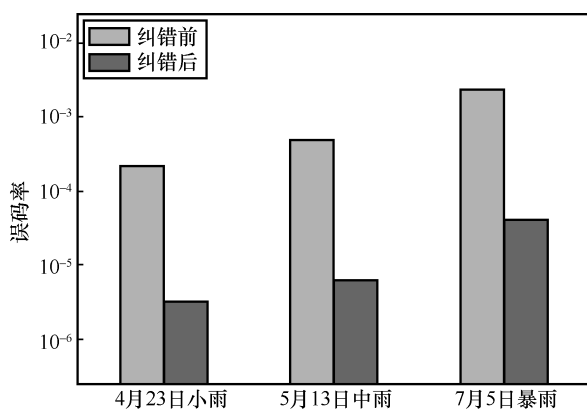


图 17 LDPC 码性能改善直方图^[44]

5 结束语

本文系统地总结了纠错控制编码在无线光通信领域的应用，介绍了西安理工大学相关领域的工作^[51]，包括 RS 码、Turbo 码和 LDPC 码和极化码在不同调制方式的纠错性能仿真和实验。这些系统在仿真和实验测量中都表现出优异的性能，可以有效降低无线光通信系统的误码率^[52]。无线光通信系统中纠错编码发展趋势大致可以归纳如下。

1) 采用前向纠错，简化系统实现

通信系统的有效性固然重要，但准确无误地将信息传输到接收端也是目标之一，前向纠错可以有效提高信号的可信度，是一种可以将传输过程中出现的误码纠正的差错控制方式。简化系统实现是将纠错编码技术应用于无线光通信系统的重要前提。

2) 探索可以逼近香农极限的好码，降低编码和译码计算复杂度

针对目前纠错编码方式存在的编码效率和计算复杂度的问题，提出性能更优的好码。极化码出现的时间较晚，其他纠错码已经应用到各个领域，因此在实际应用中遇到了问题，应该积极地将极化码应用于实际通信系统。不断优化纠错码的编码和译码算法，降低编码和译码的计算复杂度，研究更易实现的编译码系统。

3) 在编码复杂度与纠错性能之间进行合理的折中，并为纠错编码选择与其最匹配的信源调制方法，提高效率

每种纠错码的编码复杂度都不同，为不同的无线光通信系统选择合适的编码方式，并选择合适信源编码方式，达到信源编码和纠错编码的匹配状态，有效地将纠错码的性能发挥出来，较大限度地提高无线光通信系统的编码效率。

4) 探索各种纠错码在实验中对实际无线光通信系统性能的提升效果并进行改进

当前对纠错码应用于无线光通信系统的研究多为理论计算与仿真，虽然可以得到不同纠错码应用于系统的性能，但理论与实践结合才能找到适用于不同通信系统的编码方式，并且有助于优化实际应用中遇到的系统性能恶化的问题，切实提高无线光通信系统抑制大气湍流的能力。

纠错编码的发展，为抑制湍流信道对通信系统性能的影响提供了支持，有利于无线光通信技术的推广与应用。

参考文献:

- [1] 柯熙政, 殷致云. 无线激光通信系统中的编码理论[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
KE X Z, YIN Z Y. Coding Theory in Wireless Laser Communication System [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [2] 柯熙政, 赵黎, 殷致云, 等. 无线激光通信中差错控制实验研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(6): 18-23.
KE X Z, ZHAO L, YIN Z Y, et al. Experimental research on the error control of wireless laser communication[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(6): 18-23.

- [3] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423.
- [4] HAMMING R W. Error detecting and error correcting codes[J]. The Bell System Technical Journal, 1950, 29(2): 147-160.
- [5] MULLER D E. Application of Boolean algebra to switching circuit design and to error detection[J]. Transactions of the I R E Professional Group on Electronic Computers, 1954, EC-3(3): 6-12.
- [6] REED I. A class of multiple-error-correcting codes and the decoding scheme[J]. Transactions of the IRE Professional Group on Information Theory, 1954, 4(4): 38-49.
- [7] GOLAYM J. Note on digital coding[EB]. 1949.
- [8] ELIAS P. Coding for two noisy channels[EB]. 1955.
- [9] PRANGE E. Cyclic error-correcting codes in two symbols[M]. Cambridge, Mass: Air Force Cam-bridge Research Center, 1957.
- [10] BOSE R C, RAY-CHAUDHURI D K. On a class of error correcting binary group codes[J]. Information and Control, 1960, 3(1): 68-79.
- [11] HOCQUENGHEM A. Codes correcteurs d'erreurs[EB]. 1959.
- [12] REED I S, SOLOMON G. Polynomial codes over certain finite fields[J]. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 1960, 8(2): 300-304.
- [13] GALLAGER R. Low-density parity-check codes[J]. IRE Transactions on Information Theory, 1962, 8(1): 21-28.
- [14] FANG Y, HAN G J, CAI G F, et al. Design guidelines of low-density parity-check codes for magnetic recording systems[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(2): 1574-1606.
- [15] BERROU C, GLAVIEUX A, THITIMAJSHIMA P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: turbo-codes. 1[C]//Proceedings of ICC '93 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 1993: 1064-1070.
- [16] ARIKAN E. Systematic polar coding[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(8): 860-862.
- [17] ARIKAN E. Channel polarization: a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(7): 3051-3073.
- [18] 李川. LDPC 码及 LDPC 级联码的性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006: 71-73.
- LI C. Research on the performance of LDPC code and its serial concatenated code[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006: 71-73.
- [19] 康伟民. 空间光通信 RS 码技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- KANG W M. Research of RS code technology in space optical communication[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [20] 张威, 徐熙宗, 张克, 等. RS 级联编码在超短波通信与卫星通信信道的仿真分析[J]. 通信技术, 2009, 42(2): 27-29.
- ZHANG W, XU X Z, ZHANG K, et al. Simulation analysis of RS concatenated code in ultra short wave communication and satellite communication channels[J]. Communications Technology, 2009, 42(2): 27-29.
- [21] 袁建国, 梁天宇, 何丽, 等. 光通信系统中交织型级联码性能的研究[J]. 半导体光电, 2010, 31(2): 273-276.
- YUAN J G, LIANG T Y, HE L, et al. Research on the performance of the interleaved concatenated code for optical communication systems[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(2): 273-276.
- [22] PODEMSKI R, HOLUBOWICZ W, BERROU C, et al. Hamming distance spectra of turbo-codes[J]. Annales Des Télécommunications, 1995, 50(9/10): 790-797.
- [23] OHTSUKI T, SASASE I, MORI S. Overlapping multi-pulse pulse position modulation in optical direct detection channel[C]//Proceedings of ICC '93 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 1993: 1123-1127.
- [24] ZHU X M, KAHN J M. Performance bounds for coded free-space optical communications through atmospheric turbulence channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(8): 1233-1239.
- [25] ANGUIA J A, DJORDJEVIC I B, NEIFELD M A, et al. Shannon capacities and error-correction codes for optical atmospheric turbulent channels[J]. Journal of Optical Networking, 2005, 4(9): 586.
- [26] 何小梅, 李晓峰, 张冬云, 等. 高效纠错编码技术在无线光通信中的性能分析[J]. 光子学报, 2008, 37(12): 2427-2429.
- HE X M, LI X F, ZHANG D Y, et al. Performance for efficient error correction coding in wireless optical communication[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(12): 2427-2429.
- [27] WEN L, LEI J, WEI J B. Design of concatenation of fountain and non-binary LDPC codes for satellite communications[C]//Proceedings of 2010 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-4.
- [28] 姜晓峰, 赵尚弘, 李勇军, 等. 星地光通信交织 RS 码设计及性能研究[J]. 半导体光电, 2011, 32(3): 401-404.
- JIANG X F, ZHAO S H, LI Y J, et al. Design of interleaved R-S code of satellite-to-ground optical communication system[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32(3): 401-404.
- [29] HABIF J L, DUTTON Z, GUHA S. Polar coded optical communications with weak coherent states[C]//Proceedings of CLEO: 2013. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-2.
- [30] WU Z F, FISCHER J K, LANKL B. Experimental investigation of polar code performance for coherent UDWDM PONs[C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. Washington, D.C.: OSA, 2015: 1-3.
- [31] FANG J F, BI M H, XIAO S L, et al. Performance investigation of the polar coded FSO communication system over turbulence channel[J]. Applied Optics, 2018, 57(25): 7378-7384.
- [32] IQBAL S, DA SILVA E P, YANKOV M P, et al. An experimental demonstration of rate-adaptation using shaped polar codes for flexible optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(13): 3357-3364.
- [33] 张晗, 涂巧玲, 曹阳, 等. 适用于大气弱湍流信道的自适应码率极化码[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(7): 265-273.
- ZHANG H, TU Q L, CAO Y, et al. Adaptive rate polar codes for atmospheric weak turbulence channel[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(7): 265-273.
- [34] 敖琨, 谈新园, 马春波, 等. 基于 Raptor10 码的自由空间光通信系统设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(9): 173-178.
- AO J, TAN X Y, MA C B, et al. Design of free space optical communication system based on Raptor10 code[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(9): 173-178.
- [35] 文豪, 曹阳, 彭小峰, 等. 自由空间光通信中的 MIMO 极化编码方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1906004.
- WEN H, CAO Y, PENG X F, et al. MIMO polarization-coding method in free space optical communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1906004.
- [36] 文豪, 曹阳, 彭小峰, 等. 大气弱湍流信道下松弛极化码译码方法[J].

- 光通信技术, 2021, 45(2): 36-40.
- WEN H, CAO Y, PENG X F, et al. Decoding method of relaxed polarization code in weak atmospheric turbulence channel[J]. Optical Communication Technology, 2021, 45(2): 36-40.
- [37] 鲁信金, 舒冰心, 雷菁. Polar 码编译码技术研究[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(6): 780-788.
- LU X J, SHU B X, LEI J. Research on encoding and decoding technology of polar codes[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(6): 780-788.
- [38] CAO P, RAO Q M, YANG J, et al. LDPC code with Dynamically adjusted LLR under FSO turbulence channel[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1920(1): 012023.
- [39] SONALI, DIXIT A, JAIN V K. Analysis of LDPC codes in FSO communication system under fast fading channel conditions[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2021, 2: 1663-1673.
- [40] 杜安源, 柯熙政. 大气激光通信系统中 RS 码的研究与实现[J]. 光电工程, 2004, 31(S1): 44-47.
- DU A Y, KE X Z. Study and implementation of Reed-Solomon code in an atmospheric laser communication system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(S1): 44-47.
- [41] 杜安源. 大气激光通信系统中 RS 码的研究与实现[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- DU A Y. Research and implement of reed-Solomoncodes in atmosphere communication system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005.
- [42] 贾科军. 大气激光通信系统中 LDPC 码的设计与实现[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- JIA K J. Design and implementation of LDPC codes in atmosphere laser communication system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- [43] 刘健. 大气激光通信系统中 Turbo 码的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- LIU J. Research of turbo codes in atmosphere communication system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.
- [44] 殷致云. FSO 广义信道特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- YIN Z Y. Research on the characteristics of FSO generalized channel[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [45] 孙玉双. 低压电力线载波抄表系统中的喷泉码研究与实现[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- SUN Y S. Research and implementation of fountain code in low-voltage power line carrier meter reading system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [46] 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.
- SHAO J H, KE X Z, CHEN Q. A suitable polar coding modulation scheme for atmospheric weak turbulence channel[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(8): 1831-1836.
- [47] 陈强. 无线光通信系统中极化编码研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2014.
- CHEN Q. Research on polarization coding in wireless optical communication system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014.
- [48] 牛凯, 戴金晟, 朴瑁楠. 面向 6G 的极化码与极化处理[J]. 通信学报, 2020, 41(5): 9-17.
- NIU K, DAI J S, PIAO J N. Polar codes and polar processing for 6G wireless systems[J]. Journal on Communications, 2020, 41(5): 9-17.
- [49] 柯熙政, 雷思琛, 邵军虎, 等. 基于极化码的无线光通信副载波误码性能分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1849-1853.
- KE X Z, LEI S C, SHAO J H, et al. Analysis on error rate of wireless

optical communication using subcarrier modulation based on polar code[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(6): 1849-1853.

- [50] 王先鹏. 大气激光通信系统误码特性的实验测量与分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- WANG X P. Experimental measure and analysis of the error code characteristic in the ALC system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
- [51] 柯熙政, 吴加丽, 杨尚君. 面向无线光通信的大气湍流研究进展与展望[J]. 电波科学学报, 2021, 36(3): 323-339.
- KE X Z, WU J L, YANG S J. Research progress and prospect of atmospheric turbulence for wireless optical communication[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(3): 323-339.
- [52] 柯熙政, 杨尚君, 吴加丽, 等. 西安理工大学无线光通信系统自适应光学技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(8): 30-52.
- KE X Z, YANG S J, WU J L, et al. Research progress of adaptive optics in wireless optical communication system for Xi'an University of Technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(8): 30-52.

[作者简介]



梁静远 (1989-), 女, 西安理工大学自动化与信息工程学院通信工程助理工程师, 主要研究方向为无线光通信系统调制解调技术。



李梦茹 (1996-), 女, 西安理工大学自动化与信息工程学院通信工程硕士生, 主要研究方向为无线光相干通信技术。



王佳帆 (2001-), 女, 西安理工大学自动化与信息工程学院通信工程在读, 主要研究方向为无线光通信技术。



柯熙政 (1962-), 男, 博士, 西安理工大学二级教授, 陕西省教学名师, 中国电子学会会士, 主要研究方向为无线光通信理论与技术。