

空间光通信中系统 Raptor 码的优化迭代译码算法

任发韬,曹阳*,彭小峰,陈果,李小红

(重庆理工大学 电气与电子工程学院,重庆 400054)

摘要:为降低自由空间光通信(FSO)中系统 Raptor 码的译码延时和误码率,提出一种优化的迭代译码算法(EIDA)。通过重新构造系统 Raptor 码的 Tanner 图,将 LDPC 码与 LT 码进行组合迭代译码以提高译码速度和可靠性;建立 Gamma-Gamma 信道模型,分别对优化算法和传统算法进行仿真。仿真结果表明:优化算法在相同条件下能够改善 FSO 系统的译码延时和误码率。

关键词:自由空间光通信;系统 Raptor 码;译码算法;误码率;译码时间

中图分类号:TN929.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)01-0010-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.01.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Enhanced iterative decoding algorithm of systematic Raptor code for space optical communication

REN Fatao, CAO Yang*, PENG Xiaofeng, CHEN Guo, LI Xiaohong

(School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: In order to reduce the decoding delay and bit error rate of Raptor codes in free space optical communication(FSO), this paper proposes an enhanced iterative decoding algorithm (EIDA). By reconstructing Tanner diagram of system Raptor code, the paper combines the LDPC code and LT code to decode iteratively to improve the decoding speed and reliability. The Gamma-Gamma channel model is established, and the enhanced algorithm and the traditional algorithm are simulated respectively. The simulation results show that the enhanced algorithm can improve the decoding delay and bit error rate of FSO under the same conditions.

Key words: FSO; systematic Raptor code; decoding algorithm; bit error rate; decoding time

0 引言

自由空间光通信(FSO)具有带宽高、功率损耗低以及保密性好等优点,已受到广泛关注^[1]。但 FSO 链路易受大气湍流影响,导致接收功率衰减、光强随机起伏,严重影响了 FSO 的系统性能。

收稿日期:2018-08-09。

基金项目:重庆市教委基金(KJ120827)资助;重庆市教委科学技术研究项目(KJ1500934)资助;重庆市教委科学技术研究项目(KJ1709205)资助;重庆市科委社会事业与民生保障科技创新专项(cstc2017shmsA40019)资助。

作者简介:任发韬(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为信道编码,参与了题为“大气激光通信中圆偏振相干 OFDM 复用技术研究”的重庆市教育委员会科学技术研究项目,主要负责项目中信道编码(喷泉码)的理论研究以及 FPGA 的硬件实现,在校时多次获得校级奖学金和国家研究生奖学金。

* 通信作者:曹阳(E-mail:caoyang@cqu.edu.cn)。



利用前向纠错码(FEC)能够极大地改善 FSO 的误码率。喷泉(LT)码是由 Michael Luby 和 John Byers 等人于 1998 年提出的一种无码率纠错码,它的无码率特性使其不需确知信道状态信息就能自动消除干扰的影响,能够动态适配信道变化且接近信道容量^[2]。Raptor 码是 LT 码的扩展,它由低密度奇偶校验(LDPC)码与 LT 码级联构成,能够实现线性时间译码。Riccardo Pernice 等人通过模拟实验证实了 Raptor 码能够有效消除由大气湍流引起的误码,提高系统性能^[3];Vasic B 等人研究了 Raptor 码在时间相关 FSO 信道下的性能,表明 Raptor 码可以在各种传输速率和湍流条件下获得优异的性能^[4];Min Lu 等人证实了 Raptor 码能够在不同湍流环境下最大化信道利用率^[5]。为了提高 Raptor 码在无线通信系统中的译码性能,Venkiah A 等人提出了利用 Raptor 码组成码(LDPC

码、LT 码)软信息的联合迭代译码算法(Joint Iterative Decoding Algorithm, JIDA)^[6]。当采用 JIDA 译码时,由于系统 Raptor 码能够直接从信道获取初始迭代值而具有一定优势^[7]。但是,系统 Raptor 码的 JIDA 存在高译码延时、高误码率的缺点,不能满足 FSO 高质量的通信要求。

针对此问题,本文首先介绍 Gamma-Gamma 信道模型;然后重新构造系统 Raptor 码的 Tanner 图;在此基础上,提出一种优化的迭代译码算法(Enhanced Iterative Decoding Algorithm, EIDA);最后,对 EIDA 和 JIDA 的译码性能进行仿真分析。

1 系统模型与信道模型

FSO 系统结构如图 1 所示。信源通过 Raptor 码编码器得到编码符号,经过二进制相移键控(BPSK)调制后,由光学天线发射到大气信道,光学接收天线接收传输信号并将其送入软解调器解调,解调后信号经由 Raptor 码迭代译码器译码。若译码成功,则发送反馈信号给 Raptor 码编码器停止编码。

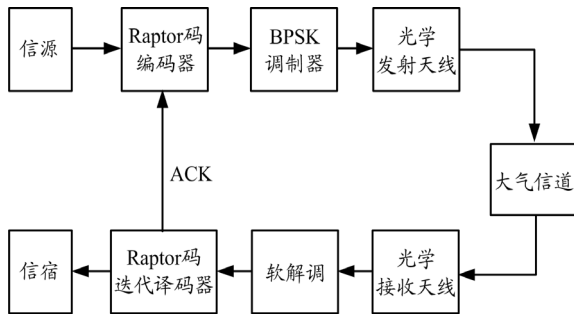


图 1 FSO 系统框图

激光信号在大气链路中传输时,易受大气湍流等影响,进而造成光强起伏、光束漂移等问题,降低 FSO 的通信质量。目前已有多种统计模型可以用来描述大气湍流强度,其中 Gamma-Gamma 分布适合所有湍流情况^[8],其概率密度函数为:

$$f_I(I) = \frac{2(ab)^{\frac{a+b}{2}}}{\Gamma(a)\Gamma(b)} I^{\frac{a+b}{2}-1} K_{a-b}(2\sqrt{abI}), I>0 \quad (1)$$

其中, I 为光强; Γ 是伽马函数; K_{a-b} 是修正的第二类贝塞尔函数,阶次为 $a-b$, a 与 b 是概率密度函数的参数,可表示为:

$$\frac{1}{a} = \exp \left[\frac{0.49\delta^2}{(1+0.18d^2+0.56\sigma^{\frac{12}{5}})^{\frac{7}{6}}} \right] - 1$$

$$\frac{1}{b} = \exp \left[\frac{0.51\delta^2 (1+0.69\delta^{\frac{12}{5}})^{-\frac{5}{6}}}{(1+0.9d^2+0.62d^2\sigma^{\frac{12}{5}})^{\frac{5}{6}}} \right] - 1 \quad (2)$$

其中, Rytov 方差 $\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}}$, 波数 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, L 为传输距离, C_n^2 为折射率结构常数。

2 EIDA 原理

2.1 系统 Raptor 码的 Tanner 图修正

本文重新构造 Tanner 图的目的是使系统 Raptor 码中 LT 码与 LDPC 码具有相同的译码结构,便于两者使用相同的迭代译码算法和终止准则,消除不必要的迭代运算^[6]。Tanner 图的修正过程如图 2 所示,其中 n 为总的编码符号数, N 为预编码后的中间符号数, K 为信源长度;蓝色方框是系统 Raptor 码的传统 Tanner 图;绿色方框为修正的 Tanner 图;白色圆圈代表 LDPC 码与 LT 码中的信源部分;白色菱形代表 LDPC 码的校验部分;黑色菱形代表 LDPC 码的校验节点;白色正方形代表 LT 码的校验部分,由给定的度分布 $\Omega(x)$ 生成。根据系统 LT 码的特性,编码节点 c_i 等价于信息节点 u_i , $i \leq K$, 因此编码节点 c_j 可表示为:

$$c_j = \bigoplus_{i \in \chi_j} c_i, j > K \quad (3)$$

其中, χ_j 表示 LT 码中与编码节点 j 相连的所有信息节点集合。

为使系统 LT 码 Tanner 图的结构与 LDPC 码 Tanner 图的结构一致,本文将系统 LT 码的编码节点转换成比特节点,再加入校验节点(图 2 中黑色正方形表示系统 LT 码的检验节点)。根据式(3),系统 LT 码的

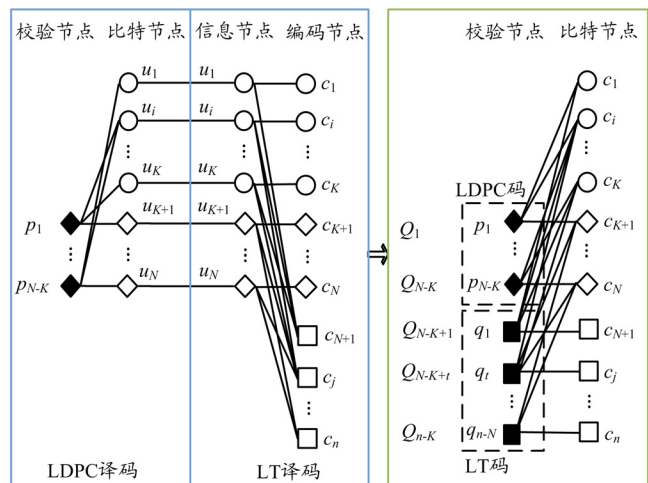


图 2 系统 Raptor 码的 Tanner 图修正过程

校验节点可表示为:

$$q_i = \bigoplus_{j \in C_i} c_j = c_j \bigoplus_{i \in \chi_j} c_i \quad (4)$$

其中, $C_i = \{j, i | j = i + N, i \in \chi_j\}$ 。

文献[9]已经证实了基于修正的 Tanner 图的系统 LT 码迭代译码算法能够提供更可靠的软信息,进而提高译码性能。系统 LT 码性能的改善将提升系统 Raptor 码的性能。

2.2 基于修正 Tanner 图的迭代译码算法

基于修正的 Tanner 图,系统 LT 码与 LDPC 码能够采用相同的译码算法。本文将 LDPC 码的校验节点 $p_1 \cdots p_{N-K}$ 与系统 LT 码的校验节点 $q_1 \cdots q_{n-N}$ 重新编号为 $Q_1 \cdots Q_{n-K}$,则系统 LT 码与 LDPC 码进行组合译码。假设采用和积算法,则 EIDA 的具体译码步骤如下:

①初始化。计算经信道后接收到的初始 LLR 值为:

$$c_j = \lg \frac{p(x_j=0|y_j)}{p(x_j=1|y_j)}, 1 \leq j \leq n \quad (5)$$

令 $c_{j,m} = c_j, 1 \leq m \leq n-K, c_{j,m}$ 表示从比特节点 j 向校验节点 m 传递的信息。

②系统 Raptor 码的校验节点更新。对每个校验节点计算其往外传递的信息:

$$Q_{m,j} = 2 \tanh^{-1} \left(\prod_{j' \in N_m, j' \neq j} \tanh \left(\frac{c_{j',m}}{2} \right) \right) \quad (6)$$

其中, $Q_{m,j}$ 表示从校验节点 m 向比特节点 j 传递的信息, N_m 表示系统 Raptor 码中与校验节点 m 相连的所有比特节点集合。

③系统 Raptor 码的比特节点更新。对每个比特节点计算其往外传递的信息:

$$c_{j,m} = c_j + \sum_{m' \in N_j, m' \neq m} Q_{m',j} \quad (7)$$

其中, N_j 表示系统 Raptor 码中与比特节点 j 相连的所有校验节点集合, m' 表示一个属于集合 N_j , 且不等于 m 的变量。

④计算系统 Raptor 码比特节点的 LLR 值总和。对 $j=1, 2, \cdots, N$, 计算 c_j^{total} :

$$c_j^{\text{total}} = c_j + \sum_{m \in N_j} Q_{m,j} \quad (8)$$

⑤终止准则:令

$$\hat{c} = \begin{cases} 1, & c_j^{\text{total}} < 0 \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (9)$$

当满足 LDPC 码校验矩阵或者达到最大迭代次数时,停止译码;否则,重复步骤②~步骤⑤。

相比于 JIDA, EIDA 避免了传统的 LT 码与 LDPC 码单独译码,利用了两个译码器的组合软信息。因此, EIDA 能够减少近一半的译码时间,提高了译码可靠性。同时, EIDA 将 LT 码与 LDPC 码并行译码,能够消除不必要的译码过程,进一步缩短了译码时间。表 1 为一次迭代译码中 JIDA 和 EIDA 的信息更新数,其中 V2C 为变量节点向校验节点传递信息, C2V 为校验节点向变量节点传递信息; JIDA 中 $\alpha_{\max}, \beta_{\max}$ 取 1, $\alpha_{\max}$ 为 LT 译码中信息节点与编码节点的最大迭代次数; $\beta_{\max}$ 为 LDPC 译码中校验节点与比特节点的最大迭代次数; E 为 Tanner 图中总的边数。在一次迭代译码中, EIDA 比 JIDA 信息更新数减少了 $2N-n$, 有效降低了译码复杂度,特别是当迭代次数高和信源符号数大时。

表 1 不同算法的复杂度分析(一次迭代)

算法	V2C 更新数	C2V 更新数
JIDA	E	E
EIDA	$E+n-2N$	$E+n-2N$

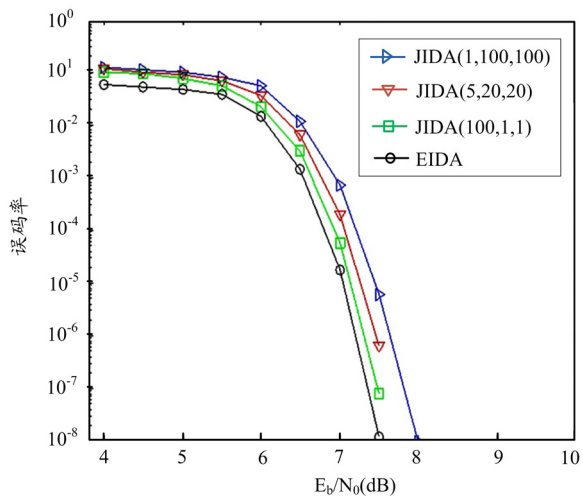
3 仿真结果与分析

本文在 Gamma-Gamma 分布湍流信道模型下,采用 BPSK 调制方式,分别在强湍流和弱湍流两种情况下对 EIDA 和 JIDA 进行比较,采用码率为 0.95 的非规则 LDPC 码作为 Raptor 码的预编码, LT 码的度分布为 $c=0.5, \delta=0.03$ 的鲁棒孤子度分布。仿真参数设置如表 2 所示。

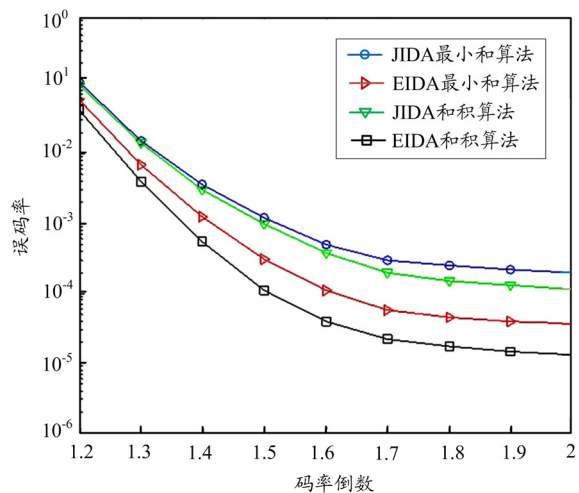
表 2 仿真参数

湍流	长度(m)	波长(nm)	$C_n^2(\text{m}^{-2/3})$	σ_R^2	α	β
弱湍流	1000	1550	6×10^{-16}	0.3	8.43	7.30
强湍流	1000	1550	2×10^{-14}	2.1	4.12	2.42

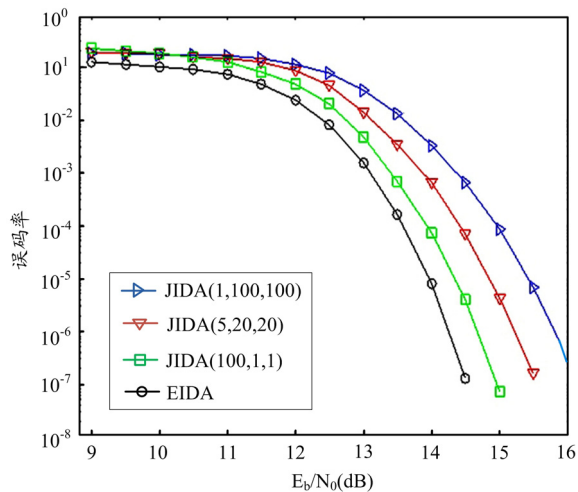
在弱湍流和强湍流情况下,不同译码算法的误码率与信噪比的关系如图 3 所示。其中 $(\eta_{\max}, \alpha_{\max}, \beta_{\max})$ 分别取 $(1, 100, 100)$ 、 $(5, 20, 20)$ 和 $(100, 1, 1)$, $\eta_{\max}$ 为传统 Tanner 图中比特节点与信息节点的最大迭代次数, $\gamma_{\max}$ 为修正后 Tanner 图中校验节点与比特节点的最大迭代次数, $\gamma_{\max}$ 取 100, 信源长度 K 为 4750, Raptor 码的码率为 $2/3$, 均采用和积算法。从图 3(a)可以看出,在弱湍流情况下,随着信噪比增大,误码率曲线呈现下降趋势; JIDA 中当 $(\eta_{\max}, \alpha_{\max}, \beta_{\max})$ 为 $(100, 1, 1)$ 时,译码性能达到最佳; EIDA 误码性能较



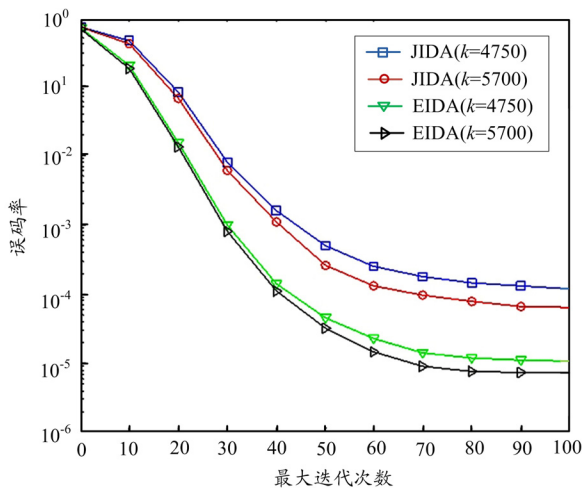
(a) 弱湍流



(a) 误码率与码率的关系



(b) 强湍流



(b) 误码率与最大迭代次数的关系

图3 不同湍流情况下的误码率比较

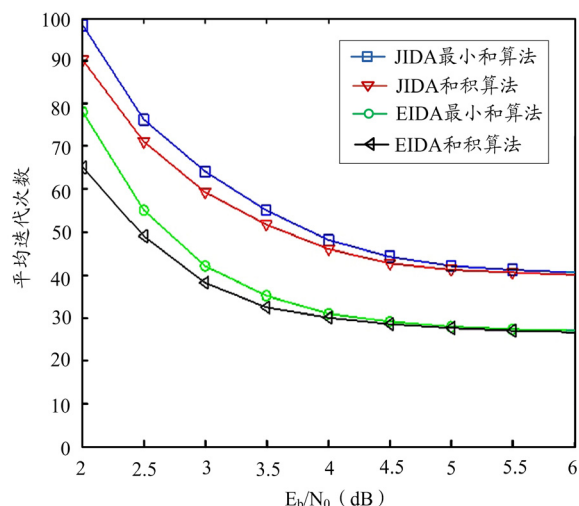
图4 不同译码算法的误码性能比较

JIDA 略提升。从图 3(b)可以看出,强湍流情况下各译码算法的性能差距较大,EIDA 误码性能较 JIDA 有明显提升。JIDA 在 $\alpha_{\max}=\beta_{\max}=1$ 时,译码性能达到最佳,EIDA 在不同湍流情况下误码率均优于 JIDA,且在高信噪比区域,相较于 JIDA 能够获得数量级意义上的性能提升。

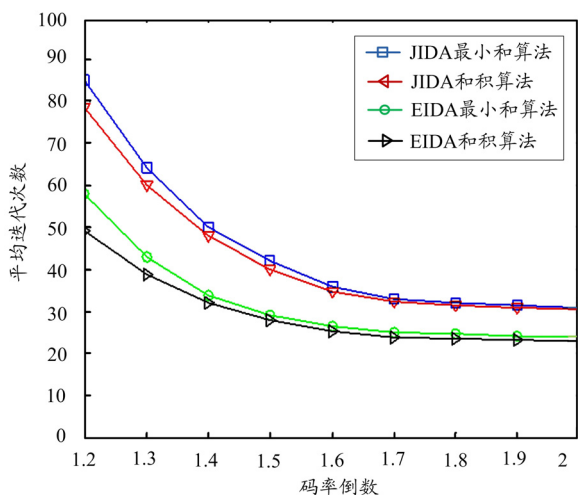
在弱湍流、信噪比为 5dB 情况下,分别采用 JIDA 和 EIDA 时,Raptor 码的误码性能比较如图 4 所示。其中,图 4(a)为信源长度 $K=4750$, $(\eta_{\max},\alpha_{\max},\beta_{\max})$ 取 $(100,1,1)$, $\gamma_{\max}$ 取 100,采用和积算法和最小和算法时,误码率与码率倒数 $(1/R)$ 的关系;图 4(b)为信源长度 K 为 4750 和 5700 时,Raptor 码的码率为 $2/3$, $\alpha_{\max}=\beta_{\max}=1$,采用和积算法时,误码率与最大迭代次数的关系。从图 4(a)可知,当 Raptor 码的码率降低时,误码率也随之降低;无论采用和积算法还是最小和算法,

EIDA 性能明显优于 JIDA;在低码率区域,EIDA 较 JIDA 能够极大地提升译码性能;当误码率相同时,EIDA 的译码开销明显低于 JIDA,且随着误码率的降低,差距更大。从图 4(b)可知,当最大迭代次数增加时,误码率随之下降,下降速率为先急后缓;Raptor 码的信源长度越大,误码率则越低。从以上可以看出,EIDA 性能明显优于 JIDA;修正的 Tanner 图更适合系统 Raptor 码的迭代译码。

当信源长度 $K=4750$ 时,在弱湍流情况下,JIDA 与 EIDA 的平均迭代次数比较如图 5 所示。图 5(a)为 Raptor 码的码率取 $2/3$ 时,平均迭代次数与信噪比的关系;图 5(b)为信噪比取 5dB 时,平均迭代次数与码率倒数 $1/R$ 的关系。从图 5(a)可知,码率固定时,EIDA 平均译码迭代次数要少于 JIDA。从图 5(b)可知,当信噪比不变时,EIDA 的平均译码迭代次数依然少于



(a) 码率相同



(b) 信噪比相同

图5 不同译码算法的平均迭代次数比较

JIDA, 即译码开销相同时, EIDA 的复杂度低于 JIDA, 且在译码开销较低时, EIDA 优势更大。无论是 JIDA 还是 EIDA, 采用和积算法的平均迭代次数都少于最小和算法; EIDA 较 JIDA, 译码所需的迭代次数更少, 因此能够减小译码时间。

4 结束语

本文针对系统 Raptor 码的 JIDA 应用于 FSO 时存在高译码延时、高误码率的问题, 重新构造系统 Raptor

码的 Tanner 图, 提出了一种基于修正 Tanner 图的 EIDA 来降低系统误码率、减少译码时间。在不同湍流环境下比较两种算法的性能。仿真结果表明: 在相同条件下, 与 JIDA 译码算法相比, EIDA 能够改善系统误码率, 且在高信噪比区域, 该算法能够获得数量级意义上的性能提升; EIDA 译码所需的迭代次数要少于 JIDA, 从而降低译码时延; EIDA 能够在更低的译码开销下获得与 JIDA 相同的性能。因此, 相较于 JIDA, EIDA 能够在更低的译码开销下, 有效改善 FSO 系统的误码率和通信时延。

参考文献:

- [1] LIU J, ZHANG X, BLOW K, et al. Performance analysis of packet layer FEC codes and interleaving 3 in FSO channels [J]. IET Communications, 2017, 11(13): 2042–2048.
- [2] SUN L, REN P, DU Q, et al. Fountain-Coding Aided Strategy for Secure Cooperative Transmission in Industrial Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 12(1): 291–300.
- [3] PERNICE R, PARISI A, ANDO A, et al. Error mitigation using RaptorQ codes in an experimental indoor free space optical link under the influence of turbulence[J]. Communications let, 2015, 9(14): 1800–1806.
- [4] VASIC B, HILDNER B, ANGUIA J A, et al. Rateless Coding on Experimental Temporally Correlated FSO Channels [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(7): 990–1002.
- [5] LU M, LIU L, HRANILOVIC S. Raptor-coded free-space optical communications experiment[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2016, 8(6): 398–407.
- [6] ZHANG M, KIM S, KIM W Y, et al. Soft decoding for raptor codes with an efficient early termination algorithm [C]//The 18th IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE 2014), June 22–25, 2014, Madrid, Spain. Washington: IEEE, 2014.
- [7] GROBLER T L, ACKERMANN E R, OLIVIER J C, et al. Systematic Luby Transform codes as incremental redundancy scheme[C]//Africon, Sep. 13–15, 2011, Livingstone, Zambia. Washington: IEEE, 2011.
- [8] FAROOQ E, GUPTA S K, SAHU A. BER analysis of OOK and DPSK schemes in gamma-gamma turbulence channel with PIN and APD photodetector [C]// 2017 8th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), July 3–5, 2017, Delhi, India. Washington: IEEE, 2017.
- [9] ZHANG M, KIM S. A New Soft Decoding Method for Systematic LT Codes [C]// European Wireless Conference, May 14–16, 2014, Barcelona, Spain. Washington: IEEE, 2014.

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告