

# 新型度分布的 LT 码在自由空间光通信中应用

任发韬, 曹 阳, 张 勋, 彭小峰, 刘世涛  
(重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054)

**摘 要:** 由于自由空间光通信(FSO)受到大气湍流效应的影响,运用信道编码技术来保证 FSO 系统的稳定性。研究 LT 码原理,并将其引入 FSO 系统。分析 LT 码度分布需要满足的条件,引用泊松鲁棒孤子度分布来减小 LT 码译码开销、降低编译码复杂度,并应用于 FSO 系统来提高 FSO 系统性能。采用 MATLAB 进行仿真,比较泊松鲁棒孤子度分布与鲁棒孤子度分布的性能,并模拟在不同湍流信道中的 FSO 系统误码率。结果表明,泊松鲁棒孤子度分布具有较小的平均度值,能够减小 LT 的译码开销、降低编译码复杂度;且应用泊松鲁棒孤子度分布的 LT 码能够降低 FSO 系统中的误码率,保证 FSO 系统稳定。

**关键词:** LT 码;泊松鲁棒孤子度分布;FSO;大气湍流

**中图分类号:** TN929.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.09.020

## Application of LT code with new degree distribution in free space optical communication

REN Fa-tao, CAO Yang, ZHANG Xun, PENG Xiao-feng, LIU Shi-tao  
(School of Electrical and Electronic Engineering,  
Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

**Abstract:** As free space optical communication (FSO) is affected by the atmospheric turbulence, the channel coding technique is used to ensure the stability of FSO system. The principle of LT code was studied, and LT code was introduced to the FSO system. The required conditions of the LT code distribution were analyzed, the Poisson robust soliton degree distribution (PRSD) was used to reduce the decoding cost of LT codes and reduce the complexity of coding and decoding, and it is applied to FSO system to improve the performance of FSO system. The performances of PRSD and RSD were compared, and the bit error rate of FSO system in different turbulence channels was simulated by MATLAB. The results show that PRSD has a smaller average degree, and can reduce the decoding cost, the encoding and decoding complexity of LT code. The LT code using PRSD can reduce the bit error rate in FSO system, so it improves the stability of FSO system.

**Key words:** LT code; Poisson robust soliton distribution; FSO; atmospheric turbulence

### 1 引 言

自由空间光通信(Free Space Optical Communi-

cation, FSO)为一种无线通信方式,由于其具有高带宽、无需频谱许可证、安全保密性强和收发设备小等

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(No. 61205106);博士后科学基金(No. 2014M552329);重庆市教委基金(No. KJ120827);重庆市教委科学技术项目(No. KJ1500934)资助。

**作者简介:** 任发韬(1994 - ),男,硕士研究生,主要从事信道编码方面的研究。E-mail:1451812314@qq.com

**通讯作者:** 曹 阳(1977 - ),男,博士后,副教授,主要从事光通信方面的研究。E-mail:3394212041@qq.com

**收稿日期:** 2017-01-06; **修订日期:** 2017-02-14

优点,因而有巨大的应用潜力<sup>[1]</sup>,近年来许多国家都进行研究开发;但自由空间光通信的缺点是,光信号在大气信道中传输,受到大气湍流效应的影响,导致传输的光信号质量严重下降,进一步造成自由空间光通信系统的误码率增加、信道容量减小、中断概率增大等系统性能下降,严重影响了通信系统的稳定性和可靠性<sup>[2]</sup>。

为了降低大气湍流对 FSO 的影响,采用信道编码技术来提高 FSO 系统性能<sup>[3]</sup>。文献[4]将 RS 码引入 FSO 系统,文献[5]将 Turbo 码引入 FSO 系统,但是降低 FSO 系统误码率有限。文献[6]提出将 LT 码用于 FSO 系统进一步降低其误码率。LT 码是由 Luby 提出第一个能够实现的数字喷泉码,其编译码算法较为简单,译码开销和复杂度较低<sup>[7-8]</sup>。度分布对 LT 码性能起主要作用<sup>[9]</sup>。为进一步降低 LT 码译码开销,提高 FSO 系统性能,本文采用泊松分布(Poission Distribution, PD)和鲁棒孤子分布(Robust Soliton Distribution, RSD)有机结合的泊松鲁棒孤子分布(Poisson Robust Soliton Distribution, PRSD)<sup>[10]</sup>。

文中首先给出 FSO 系统模型和大气湍流信道模型;然后通过模拟比较不同度分布的性能,分析 PRSD 的优点;最后通过 MATLAB 对不同大气湍流条件下采用 PRSD 和 RSD 的 LT 码误码率进行仿真,结果表明,应用 PRSD 的 LT 码改善了 FSO 系统的性能。

## 2 系统模型

FSO 系统由信源、信宿、信源编/译码器、信道编/译码器、调制/解调器、半导体激光器、发射机光学天线、大气信道、接收机光学天线以及光电探测器组成,其系统框图如图 1 所示。信源信号经过信源编码器、信道编码器与调制器进行编码与调制,半导体激光器将电信号转换为光信号,通过发射机光学天线将光信号发射出去,经过大气信道,由接收机光学天线接收,再将光信号输送到光电探测器转换为电信号,将此电信号通过解调器、信道译码器与信源译码器进行还原,将还原的信号输送到信宿。

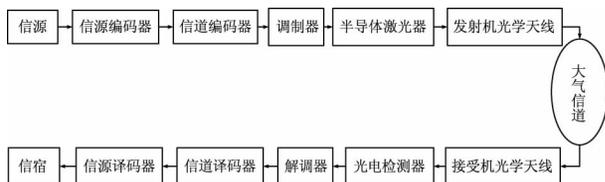


图 1 FSO 系统  
Fig. 1 FSO system

光信号在 FSO 信道中传输主要受大气湍流效应影响<sup>[11-12]</sup>,在穿过不同湍流环境时,光信号强度的变化可以用由 Al-Habash 提出的概率统计模型来描述<sup>[13]</sup>,闪烁指数  $\sigma^2$  等于 Rytov 方差  $\sigma_R^2$ ,即  $\sigma^2 = \sigma_R^2$ 。该模型采用双伽马分布函数来表示大气湍流的强度,其概率密度函数:

$$p(i_k) = \frac{2i_k^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta i_k}) (\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}, i_k > 0 \quad (1)$$

式中,  $i_k$  是信号强度;  $K_{\alpha-\beta}$  是修正的第二类贝塞尔函数,阶次为  $\alpha - \beta$ ;  $\alpha$  与  $\beta$  分别是大尺度起伏与小尺度起伏相关的信道参数:

$$\begin{cases} \alpha = \left( \exp\left[ \frac{0.49\sigma_R^2}{(1 + 1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right)^{-1} \\ \beta = \left( \exp\left[ \frac{0.51\sigma_R^2}{(1 + 0.69\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right)^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中,在平面波条件下,

$$\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (3)$$

式中,  $C_n^2$  是大气湍流折射率结构常数;  $k = 2\pi/\lambda$  为波长;  $L$  为传输距离。

LT 码编译码原理如下:根据选定的度分布  $\rho(d)$  随机选择一度值  $d$ ;再从给定的  $k$  个源数据包中随机均匀选取  $d$  个不同的源数据包,将该  $d$  个源数据包进行异或运算,生成一个编码数据包;重复这一过程,可得到无限长的编码序列;从接受到的序列中随机选取一个度为 1 的编码数据包,将该编码数据包赋给与其相连的源数据包,并将该编码数据包删除,其中已经恢复出来的源数据包,将其与相连的所有其他编码符号进行异或运算,用运算结果取代原编码符号的值,从而使得这些编码数据包的度减 1,新的度为 1 的编码数据包就可能会产生;重复该译码过程,直到成功译出所有的源数据包或没有度为 1 的编码数据包生成为止。

## 3 度分布

由 LT 码的编译码过程可以发现,度分布的设计影响 LT 码的译码开销与计算复杂度,因此度分布的选取对 LT 码至关重要。为了减小译码开销,度分布应该有一定概率取较大度值,以减少成功译码所需的编码符号;为了降低编译码复杂度,度分布应使所有编码符号的度数之和尽可能小,即度分布

取值集中在低度值范围。

鲁棒孤子分布 (RSD) 通过引进两个参数  $c$  与  $\delta$  来保证度为 1 的编码数据包  $s$  的期望值为:

$$s = c \ln\left(\frac{k}{\delta}\right) \sqrt{k} \quad (4)$$

其函数如下:

$$\mu(d) = \frac{\rho(d) + \tau(d)}{Z} \quad (5)$$

式中:

$$\rho(d) = \begin{cases} 1/k & d = 1 \\ 1/d(d-1) & d = 2, 3, \dots, k \end{cases} \quad (6)$$

$$\tau(d) = \begin{cases} \frac{s}{kd}, d = 1, 2, \dots, (k/s) - 1 \\ \frac{s}{k} \log(s/\delta), d = k/s \\ 0, d > k/s \end{cases} \quad (7)$$

$$Z = \sum_{d=1}^k (\rho(d) + \tau(d)) \quad (8)$$

上述公式(8)中,  $\mu(d)$  是当采用鲁棒孤子分布进行编码时, 度为  $d (d = 1, 2, \dots, k)$  的编码数据包概率,  $k$  为源数据包的数量,  $\delta$  为译码器未能完全恢复源数据包的概率,  $c$  为 0 到 1 之间的常数。

泊松分布函数 (PD) 如下:

$$P(d) = \frac{m^d e^{-m}}{d!}, d = 1, 2, \dots, k \quad (9)$$

式中,  $m$  是一个固定值。相比于 RSD, PD 能够产生更多度为 1 的编码数据包。随着度为 1 的编码数据包增加, 编码数据包的平均度值减小, 编译码过程中的异或运算也降低了, 因此, PD 能够降低编译码复杂度。

然而, PD 在译码开始时需要更多度为 1 的编码数据包; RSD 在接受编码数据包较少时, 其译码性能较低。基于上述分析, 本文将 RSD 与 PD 进行有机结合形成泊松鲁棒孤子分布 (PRSD)。其函数如下:

$$\Omega(d) = \frac{\theta(d) + \tau(d)}{\sum_{d=1}^k \theta(d) + \tau(d)} \quad (d = 1, 2, \dots, k) \quad (10)$$

式中,  $\theta(d)$  为修正的泊松分布, 其函数如下:

$$\theta(d) = \begin{cases} \frac{1}{2}, d = 2 \\ \frac{\lambda^d e^{-\lambda}}{d!}, \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\lambda$  为固定值。文献[10]给出参数  $\lambda, \delta$  和  $c$  计算方法, 本文  $\lambda$  取 3.04。

#### 4 仿真结果及其分析

基于仿真结果来分析 PRSD 与 RSD 的性能。图 2 为 PRSD 与 RSD 在  $k = 500, c = 0.03, \delta = 0.2$  时的概率分布图。

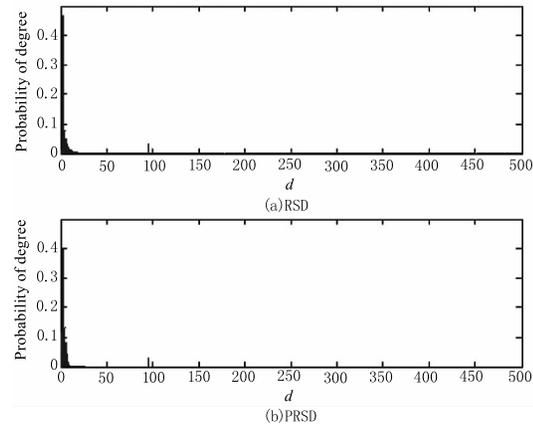


图 2 RSD 和 PRSD 的概率分布

Fig. 2 Probability distributions of RSD and PRSD

从图 2 中可以清楚地看到 PRSD 的度值相比于 RSD 的度值更多地集中在低度值 (1~15), 除了在度为 90 左右的地方有一定概率取到, 其他的度值概率均为 0; 而 RSD 的度值除了在低度值和度为 90 左右的地方有一定的概率取到, 其他的度值均以较低概率分布。

图 3 为采用 PRSD、RSD 的 LT 码译码成功率与译码开销间的关系,  $k$  分别取 1000 和 2000。

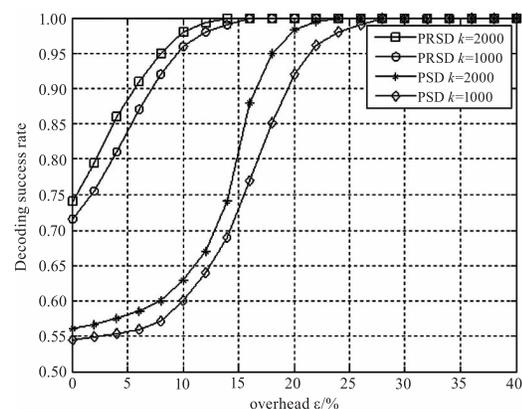


图 3 不同  $k$  值 PRSD、RSD 的译码开销与译码成功率关系

Fig. 3 Decoding success rate versus overhead for PRSD and RSD with different  $k$

图中, 随着译码开销的增加, 度分布为 PRSD 和 RSD 的 LT 码译码成功率均呈上升趋势; 但是,

在译码器接受编码符号较少的情况下,采用 PRSD 的 LT 码具有更高的译码成功率,并且其译码成功率随译码开销的增加而上升的速率大于采用 RSD 的 LT 码;在译码开销同时无论采用 PRSD 还是 RSD,  $k = 2000$  时 LT 码的译码成功率都要优于  $k = 1000$  时。

表 1 为采用 PRSD 与 RSD 的 LT 码参数对比。表中显示成功译码  $k$  个源数据包时的平均译码开销和平均度值。很明显,采用 PRSD 的 LT 码平均译码开销低于采用 RSD 的 LT 码(10.63% ~ 14.15%),如  $k = 1000$  时,相比于 RSD,PRSD 的译码开销减小了 12.8%。在平均度值方面,PRSD 较 RSD 而言,其具有更低的度值,如  $k = 2000$  时,两者的平均度值相差约 5。简而言之,采用 PRSD 的 LT 码在编译码时进行的异或运算量减少了,缩短了编译码的时间。

表 1 RSD 与 PRSD 的性能比较

Tab. 1 Performance comparison for RSD and PRSD

源数据包 $k$	平均译码开销 $\varepsilon/\%$		平均度值	
	PRSD	RSD	PRSD	RSD
500	9.22	23.37	6.12	10.03
1000	7.36	20.16	6.62	11.34
2000	5.87	16.50	7.05	12.17

本次仿真实验的相关参数设置如下:FSO 系统的通信传输距离为 1 km,发射激光的波长为 1550 nm,  $c$  与  $\delta$  的取值分别为 0.09、0.25,  $k = 1000$ ,大气湍流信道参数如表 2 所示。

表 2 大气湍流仿真参数

Tab. 2 Parameters of atmospheric turbulence

湍流环境	$C_n^2$	$\sigma_R^2$	$\alpha$	$\beta$
弱	$2 \times 10^{-15}$	0.28	8.43	7.30
强	$2 \times 10^{-13}$	3.12	4.12	2.42

图 4 是度分布为 PRSD、RSD 的 LT 码在不同湍流条件下进行的信道仿真所得的误码率(BER)与信噪比间的关系。图中,强湍流条件下,PRSD 对 LT 码的编码增益约为 1.8 dB;弱湍流条件下,PRSD 对 LT 码的编码增益约为 0.6 dB。因此,在强湍流和弱湍流的条件下,采用 PRSD 的 LT 码性能都要优于采用 RSD 的 LT 码,PRSD 能够有效改善 LT 码在不同

湍流条件下的性能。

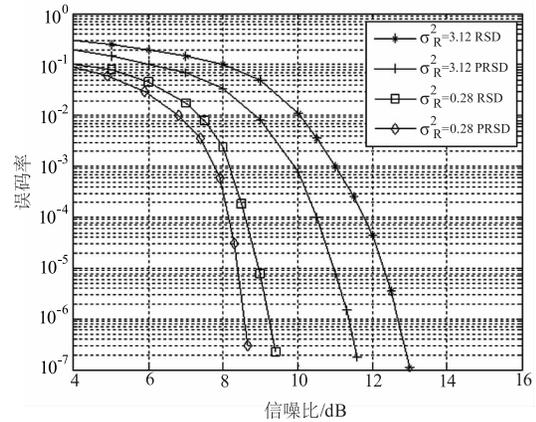


图 4 不同大气湍流强度下的 FSO 系统误码率

Fig. 4 BER of FSO System with different atmospheric turbulence

### 5 结论

本文采用一种基于 RSD 和 PD 的联合度分布——泊松鲁棒孤子分布(PRSD)来改善 LT 码性能,进而降低 FSO 系统的误码率。仿真结果表明,相比于 RSD,PRSD 低度值产生的概率提高了,降低了编码过程中的平均度值,进而减少编译码过程中的运算量,缩短编译码时间。度分布为 PRSD 的 LT 码在译码开销和译码成功率方面均有优势,译码开销较采用 RSD 的 LT 码减少了 10.63% ~ 14.15%;译码成功率在译码开销较低时,远高于采用 RSD 的 LT 码。在不同湍流条件下,采用 PRSD 的 LT 码均能有效降低 FSO 系统中的误码率。因此,运用 PRSD 的 LT 码能够进一步保证 FSO 系统的稳定性。

### 参考文献:

- [1] Wang J Y, Wang J B, Chen M, et al. Outage analysis for relay-aided free-space optical communications over turbulence channels with nonzero boresight pointing errors[J]. IEEE Photon. J., 2014, 6: 1 - 15.
- [2] Wang Jiang'an, Zhao Yingjun, Chen Dong, et al. Effects of turbulence sizes on the error rate of atmospheric laser communication system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(4): 655 - 659.
- [3] HAO Shiqi, LENG Jiaofeng. Performance analysis of optical wireless communication based on LDPC codes and MIMO[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39 (B06): 175 - 180. (in Chinese)  
郝士琦,冷蛟峰.基于 LDPC 码和 MIMO 的无线光通信系统性能[J].中国激光,2012,39(B06):175 - 180.

- [4] Zhijun Zhao, Rui Liao, Stephen D. Lyke, Michael C. Roggemann. Reed-Solomon coding for free-space optical communications through turbulent atmosphere [J]. IEEE Aerospace Conference, 2010: 1 - 12.
- [5] Anh TPham, Truong C. Thang, S. Guo, Z. Cheng. Performance bounds for Turbo-coded SC-PSK/FSO communications over strong turbulence channels [J]. International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2011), 2011: 161 - 164.
- [6] Geetha Prakash, Muralidhar Kulkarni, U. Sripati, Mahesh Nayak Kalyanpur. Performance analysis of free space optical links encoded using luby transform codes [J]. International Conference on Communication, Information & Computing Technology (ICCICT), 2012: 1 - 6.
- [7] Mackay D. Fountain codes [J]. IEEE Communications Proceedings, 2005, 152(6): 1062 - 1068.
- [8] Luby M. LT codes [J]. Proceedings of 43rd annual IEEE symposium on foundations of computer science (FOCS), USA: IEEE Press, 2002: 271 - 280.
- [9] NIU Fanglin, WANG Hongyu, HAI Long. SLT codes with single feedback in erasure channel [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2015, 55(04): 399 - 404. (in Chinese)
- 牛芳琳, 王洪玉, 海龙. 删除信道下单反馈 SLT 编码 [J]. 大连理工大学学报, 2015, 55(04): 399 - 404.
- [10] Weiqing Yao, Benshun Yi, Taiqi Huang, et al. Poisson robust soliton distribution for LT codes [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(8): 1499 - 1502.
- [11] LI Fei, WU Yi, HOU Zaihong. Analysis and experimental reasearch on bit error rate for free-space optical communication systems through turbulent environment [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0606002. (in Chinese)
- 李菲, 吴毅, 侯再红. 湍流大气光通信系统误码率分析与实验报告 [J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0606002.
- [12] WANG Deifei, CHU Zhenfeng, REM Zhenglei, et al. Influence of atmospheric turbulence on BER of laser communication system [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(4): 390 - 393. (in Chinese)
- 王德飞, 楚振峰, 任正雷, 等. 大气湍流对激光通信系统误码率影响的研究 [J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 390 - 393.
- [13] Al-Habash M A, Larry C A, Ronald L P. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media [J]. Optical Engineering, 2001, 40(8): 1554 - 1562.