

# 自由空间光通信中 LT 码的优化译码研究

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:** 为降低译码开销和通信时延, 提出一种 BP 译码与 OPD 译码相结合的优化算法。通过 Optisystem 与 Matlab 对优化算法的性能进行仿真, 结果表明, 该优化算法在保证误码率不变的同时, 能够有效降低译码开销; 虽然译码复杂度稍有提高, 但能够减少译码器的等待时间, 从而降低自由空间光通信(FSO)系统的通信时延。

**关键词:** 自由空间光通信; LT 码; 优化算法; 译码开销; 通信时延

**中图分类号:** TN911.22    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1002-5561(2018)04-0055-04

**DOI:** 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.04.015

## Research on optimal decoding of LT codes in free 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 decoding overhead and communication delay, this paper proposes an optimization algorithm based on BP decoding and OPD decoding. The performance of the optimized algorithm is simulated by Optisystem and Matlab. The results show that the optimization algorithm ensuring the BER unchanged, simultaneously, reduces the decoding overhead effectively; while the decoding complexity is slightly higher, it is possible to reduce the waiting time of the decoder and the communication delay of FSO system.

**Key words:** FSO; LT code; optimization algorithm; decoding overhead; communication delay

### 0 引言

与传统无线通信相比, 自由空间光通信(FSO)具有带宽高、通信容量大和无需频率申请等优点, 已成为通信领域的研究热点<sup>[1]</sup>。激光信号在大气信道中传输时, 易受大气湍流效应影响, 导致传输光束质量严重下降, 降低了 FSO 的通信质量<sup>[2]</sup>。

采用信道编码技术可以有效降低大气湍流对 FSO 的影响, 信道编码中的喷泉码是一种基于删除信道的稀疏度分布的编码方式<sup>[3]</sup>, 它包括 LT(Luby Transform)码、Raptor 码等, 其中 LT 码是第一种具体可行的喷泉

码<sup>[4]</sup>, 具有编译码算法简单和译码开销低等特点, 已成为新的信道编码研究方向。另外, LT 码还具有无码率特性, 发射端不需要根据信道信息改变码率, 这是其与传统编码方案的主要优势<sup>[5]</sup>。为提高 FSO 通信质量, 可将 LT 码应用于其中。Ivan B.证实了传统编码应用于 FSO 系统时往往需要交织器, 而喷泉码不需要<sup>[6]</sup>。Jaime A.等人对喷泉码与 LDPC 码在 FSO 中的性能进行了室内模拟实验, 实验结果表明在低信噪比时喷泉码更接近信道容量<sup>[7]</sup>。Anuj Nayak 分析了 LT 码和 BCH 码在 RF/FSO 系统中的性能, 表明 LT 码能够以比 BCH 码更低的发射功率实现通信<sup>[8]</sup>。Geetha Prakash 等人将 LT 码结合选择重传机制(ARQ)来提高 FSO 性能, 结果表明 LT 码能够降低反馈次数<sup>[9]</sup>。但是, 上述文献中 LT 码均采用置信传播(Belief Propagation, BP)译码算法, BP 译码算法简单, 可其过于依赖度为 1 的编码符号, 造成 BP 译码的译码开销比高斯消元(Gauss Elim-

收稿日期: 2018-01-17。

基金项目: 重庆市教委基金(KJ120827)资助; 重庆市教委科学技术项目(KJ1500934)资助; 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1709205)资助; 重庆理工大学研究生创新基金(YCX2016207)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。

\* 通信作者: 曹阳(E-mail: caoyang@cqut.edu.cn)。

ination, GE)译码所需的大,而GE译码的缺点是译码复杂度。因此,本文提出一种BP译码算法与最优部分译码(Optimal Partial Decoder, OPD)算法<sup>[10]</sup>相结合的优化算法来降低LT码的译码开销。

## 1 系统模型和空间光信道模型

### 1.1 系统模型

假设FSO系统采用开关键控(OOK)强度调制,信道无记忆平稳遍历且为加性高斯白噪声(AWGN),则系统模型表示如下<sup>[11]</sup>:

$$y = x\eta I + \mu \quad (1)$$

其中, $y$ 为接收端收到的电信号, $\eta$ 为光电转换效率, $I$ 为接收器接收到的光强, $x \in (0,1)$ 为调制信号, $\mu$ 为信号无关的AWGN,其方差为 $\sigma_\mu^2$ 。

### 1.2 FSO模型

光波在大气中传播时,受大气湍流、散射和分子吸收等影响,降低了FSO系统的通信质量。大气湍流是大气中温度、湿度和压力局部变化的结果,它可以用统计模型来描述。目前,已经提出了几种信道模型来模拟FSO信道。本文采用Gamma-Gamma分布函数来模拟FSO信道,其概率密度函数为<sup>[12]</sup>:

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

其中, $I$ 为信号强度, $\Gamma$ 是伽马函数, $K_{\alpha-\beta}$ 是修正的第二类贝塞尔函数,阶次为 $\alpha-\beta$ , $\alpha$ 与 $\beta$ 是概率密度函数的参数,可通过式(3)和通信链路参数计算得到:

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

$$\beta^{-1} = \left[ \exp \left( \frac{0.51\delta^2 \left(1 + 0.69\delta^2 \frac{12}{5}\right)^{-\frac{5}{6}}}{\left(1 + 0.9d^2 + 0.62d^2 \sigma^2 \frac{12}{5}\right)^{\frac{5}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (3)$$

其中, $d = \sqrt{kD^2/(4L)}$ , $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, $\lambda$ 为波长, $L$ 为通信距离, $D$ 是接收端的接收孔径; $\sigma^2$ 表示Rytov方差,即 $\sigma^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ , $C_n^2$ 为大气结构常数。

## 2 LT码原理

### 2.1 编码原理

由信源序列 $s_1, s_2, s_3, \dots, s_N$ 产生编码符号 $c_n$ 的过

程如下:由选定的度分布 $\rho(d)$ 随机选择一度值 $d$ ,从给定的 $N$ 个信源符号中随机选取 $d$ 个不同的信源符号,将该 $d$ 个信源符号进行异或运算,生成一个编码符号;重复这一过程,可得到无限长的编码序列。

### 2.2 译码原理

目前,LT码的译码算法主要为BP算法,译码步骤如下:①从接收到的编码符号中查找度为1的编码符号,若未找到则接收端继续接收编码符号,直到度为1的编码符号出现;②将度为1的编码符号值赋给与其相连的信源符号 $x_i$ ,并删除该编码符号;③将信源符号 $x_i$ 与其相连的所有编码符号 $y_j(i \neq j)$ 进行异或运算,并用运算结果取代原编码符号的值,即 $y_j = x_i \oplus y_j$ ;④删除与信源符号 $x_i$ 相连的所有边;⑤重复以上步骤,直到所有的信源符号恢复出来或者没有度为1的编码符号,则译码结束。

## 3 优化算法

### 3.1 OPD算法原理

OPD算法利用矩阵变换,在接收部分编码符号时进行译码,能够最大限度地恢复出信源符号。为便于理解,本文所用符号的概念如表1所示。

表1 符号概念

| 符号    | 概念                 | 符号    | 概念           |
|-------|--------------------|-------|--------------|
| $G$   | 生成矩阵               | $l$   | $e$ 最左边1的位置  |
| $N$   | 信源符号数量             | $e$   | 编码符号的生成式     |
| $y_l$ | $M$ 第 $l$ 行对应的编码符号 | $r_l$ | $M$ 的第 $l$ 行 |
| $x_i$ | 第 $i$ 个信源符号        | $M$   | $N$ 阶矩阵 $M$  |

OPD译码算法描述如下:

①初始化一个零矩阵 $M$ 。

②接收一个新的编码符号 $c$ 时,将其生成式 $e$ 插入矩阵 $M$ ,并执行下列迭代过程:查找生成式 $e$ 中最左边1的位置 $l$ ,如果矩阵 $M$ 第 $l$ 行 $r_l$ 是满秩(不全为零),则 $e = e \oplus r_l$ ,相应地, $c = c \oplus y_l$ ;然后查找生成式 $e$ 中下一个1的位置 $l$ ,重复上述异或操作,直到查找完生成式 $e$ 中所有的1。

③查找生成式 $e$ 中最左边1的最新位置 $l$ ,并将 $e$ 存储在 $M$ 的第 $l$ 行( $r_l = e, y_l = c$ )。

④最后对 $M$ 的第 $l$ 列进行检查,如果发现第 $i$ 行存在1,则执行( $r_i = r_i \oplus r_l, y_i = y_i \oplus y_l$ )。

假设接收端已经接收到矩阵,该矩阵如图1(a)所

|           |                             |                    |
|-----------|-----------------------------|--------------------|
| 1 0 1 1 0 | 1 0 1 1 0                   | 1 0 0 0 0          |
| 0 1 1 0 0 | 0 1 1 0 0                   | 0 1 0 1 0          |
| 0 0 0 0 0 | 0 0 1 1 0                   | 0 0 1 1 0          |
| 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0                   | 0 0 0 0 0          |
| 0 0 0 0 1 | 0 0 0 0 1                   | 0 0 0 0 1          |
| (a) 原始矩阵  | (b) 将 $e$ 存入<br>第 3 行后得到的矩阵 | (c) 异或操作后<br>得到的矩阵 |

图 1 OPD 译码时  $M$  的变换过程

示,现在收到一个新的编码符号,其生成式  $e=11101$ 。最左边 1 位于  $e$  的第 1 列,因此,检查矩阵第 1 行是否满秩。因为是满秩,所以第 1 行与  $e$  进行异或操作,得到  $e=11101 \oplus 10110=01011$ 。下一个 1 的位置是第 2 列,所以第 2 行与  $e$  进行异或操作,因此  $e=01011 \oplus 01100=00111$ 。因为第 3、4 行为 0,所以  $e$  不变。第 5 行为满秩,因此,  $e=00111 \oplus 00001=00110$ 。将  $e$  存入第 3 行,得到的矩阵如图 1(b)所示。检查  $M$  的第 3 列,发现第 1、2 行存在 1,因此将第 1、2 行分别与第 3 行进行异或操作,得到如图 1(c)所示矩阵。可以看出,第 1 行的度为 1,可将第 1 个信源符号译出。

### 3.2 优化算法

文献[10]指出,在每个编码符号到达前,OPD 算法就能够恢复出最大数目的信源符号。但是 OPD 算法的计算复杂度大于 BP 译码,造成 FSO 通信的时延,因此,本文提出一种 BP 译码与 OPD 译码相结合的优化算法,该算法步骤如下:

①初始化。根据接收到的编码符号,赋值  $T$ 。

②根据  $T$  产生初始生成矩阵  $G$ ,译码过程如下:

(a)记初始计数值  $t=0$ 。

(b) 根据刚接收到的编码符号更新  $G$ ,按行遍历  $G$ ,计算编码包  $T_m$  的度  $d(T_m)$ 。如果  $d(T_m)=1$  且  $G(m, i)=1$ ,则令  $G(m, i)=0, x_i=T_m$ 。同时,对  $G$  进行更新,若存在其它行的  $i$  列是 1,则该行与  $m$  行进行异或,结果存入该行,相应的编码符号也进行异或运算;若不存在度为 1 的编码包,则执行步骤(d)。

(c)按 OPD 算法进行译码,并更新  $G$ ,转到步骤(b)。

(d)接收新的编码符号,判断其度是否为 1。若为 1,则执行步骤(b);否则执行步骤(c)。

(e)每译出一个信源符号,令  $t=t+1$ ,若  $t < N$ ,则继续步骤(d)。

③完成所有信源符号的译码,退出程序。

## 4 仿真结果及分析

为了验证本文提出的优化译码算法在 FSO 系统中的性能,我们采用 Optisystem 与 Matlab 对 FSO 系统性能和提出的算法性能进行了仿真。在仿真过程中,LT 码的度分布为参数  $c, \delta$  分别取 0.05、0.01 的 RSD 分布,主要仿真参数如下:通信距离  $L$  为 1000m,  $C_n^2$  为  $1.13 \times 10^{-13} m^{-2/3}$ ,  $\lambda$  为 1550nm,发射机孔径  $D$  为 10mm,接收机孔径  $D$  为 80mm。

BP 译码算法与优化算法的译码开销如图 2 所示,可以看出译出符号所占比例(译出符号数与信源符号数的比值)与译码开销的关系,提出的优化算法相比于 BP 译码算法能有效减少译码时所需的译码开销。当  $N=1000$  时,优化算法大约减小了 0.05 的译码开销;当  $N=500$  时,优化算法大约减小了 0.03 的译码开销。另外,优化算法在接收到  $N$  个编码符号时,就能恢复出约 60%的信源符号;而 BP 译码需要接收更多的编码符号才能达到优化算法的性能。

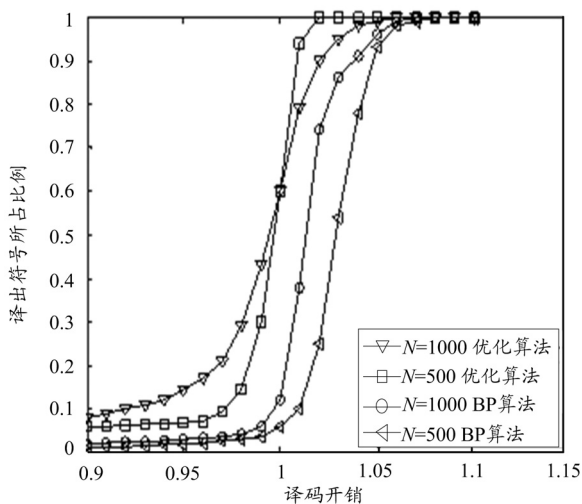


图 2 不同译码算法的译码开销比较

OPD、BP 和优化算法的译码复杂度(译码操作数是反映译码复杂度的一个指标,译码操作数越大说明译码复杂度越高)随信源符号数的变化如图 3 所示,可以看出,BP 译码的复杂度最低,OPD 译码复杂度最高,而提出的优化算法译码复杂度介于 BP 与 OPD 之间。优化算法相比于 BP 译码,译码复杂度稍有增加。

在  $C_n^2=1.13 \times 10^{-13} m^{-2/3}$ 、 $n=1200$ 、 $N=1000$  且为 OOK 调制时,采用 BP 和优化算法译码时 FSO 误码率性能如图 4 所示。可以看出,与未编码时相比,采用 LT 码对 FSO 性能有一定提升,而且两种译码算法对 FSO 系

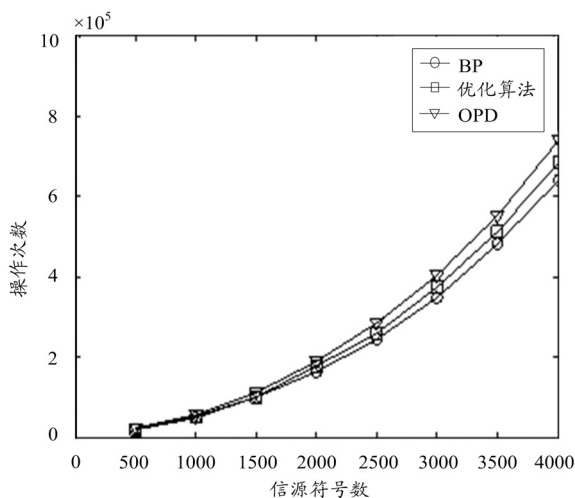


图3 不同算法的译码复杂度

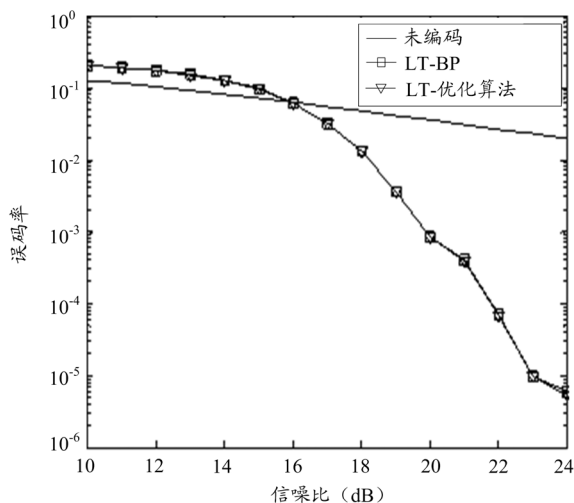
图4  $C_n^2=1.13 \times 10^{-13} m^{-2/3}$  时FSO误码率性能

表2 两种译码算法的运行时间对比

| 信源符号数 $N$ | BP算法运行时间(s) | 优化算法运行时间(s) |
|-----------|-------------|-------------|
| 500       | 1.81        | 1.22        |
| 1000      | 10.50       | 8.83        |
| 2000      | 24.65       | 19.70       |

统的误码率并没有影响,两种译码算法的误码性能相近。另外,在  $N$  取值不同的情况下,分别采用BP和优化算法时FSO系统成功译码的运行时间对比如表2所示,优化算法的译码时间短于BP译码,表明优化算法能够减小FSO系统的通信时延。

## 5 结束语

当LT码应用于FSO系统时,由于BP译码过于依赖于度为1的编码符号,造成译码器需要接收更多的编

码符号,进而增加了FSO系统的通信时延。因此,本文提出了BP译码与OPD译码相结合的优化算法,本算法可有效减低FSO系统的通信时延。仿真结果表明,在保证误码率不变的情况下,本优化算法能够有效降低译码开销,虽然译码复杂度比BP译码稍有提高,但能够减少译码器等待的时间,从而降低FSO系统的通信时延。

## 参考文献:

- [1] NGUYEN-HUU D, DUONG T, NGUYEN T. Location Assisted Coding for FSO Communication [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017 (99):1-1.
- [2] 王江安, 赵英俊, 陈冬, 等. 湍流尺度对大气激光通信系统误码率的影响[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 655-659.
- [3] BYERS J, LUBY M, MITZENMACHER M. A digital fountain approach to reliable distribution of bulk data [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1998, 28(4): 56-67.
- [4] SORENSEN J H, POPOVSKI P, OSTERGAARD J. Design and Analysis of LT Codes with Decreasing Ripple Size [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(11): 3191-3197.
- [5] RICCARDO Pernice, ANTONINO Parisi, ANDREA Andò, et al. Error mitigation using RaptorQ codes in an experimental indoor free space optical link under the influence of turbulence [J]. IET Commun., 2015, 9(14): 1800-1806.
- [6] IVAN B D. Coding for Free Space Optical Communications [C]// Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, November 9-13, 2008, Newport Beach, USA. Washington: IEEE, 2015.
- [7] 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.
- [8] NAYAK A. Performance analysis of LT codes and BCH codes in RF and FSO Wireless Sensor Networks [C]//International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, September 24-27, 2014, Delhi, India. Washington: IEEE, 2014.
- [9] PRAKASH G, NAYAK A, KULKARNI M, et al. On the Improved Performance of Luby Transform codes over Selective Repeat ARQ in turbulent Free Space Optical Links [C]//2013 IEEE 16th International Conference on Computational Science and Engineering, December 3-5, 2013, Sydney, Australia. Washington: IEEE, 2013.
- [10] BIOGLIO V, GRANGETTO M, GAETA R, et al. An Optimal Partial Decoding Algorithm for Rateless Codes[C]//2011 IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings, July 31-August 5, 2011, St. Petersburg, Russia. Washington: IEEE, 2011.
- [11] FARID A A, HRANILOVIC S. Outage Capacity Optimization for Free-Space Optical Links With Pointing Errors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(7): 1702-1710.
- [12] UYSAL M, LI J, YU M. Error rate performance analysis of coded free-space optical links over gamma-gamma atmospheric turbulence channels[J]. IEEE Trans. Wirel. Commun., 2006, 5(6): 1229-1233.