

文章编号: 1001-3806(2013)06-0833-05

## LDPC 在 $\gamma$ - $\gamma$ 信道下的性能分析

伍艳琼, 陈名松\*, 敖 珺

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 桂林 541004)

**摘要:** 为了提高无线光通信系统的性能, 将低密度奇偶校验码作为信道编码, 在已知信道状态信息的条件下, 对低密度奇偶校验码(LDPC) + 二进制脉冲位置调制(BPPM)系统与LDPC + 开关键控(OOK)系统分别在加性高斯白噪声(AWGN)、弱湍流、中等湍流和强湍流信道中的性能进行了比较; 仿真了OOK和BPPM在各个强度湍流信道下的编码增益; 并对LDPC结合不同进制数的脉冲位置调制(PPM)进行了分析。结果表明, LDPC + BPPM的性能优于LDPC + OOK, 且随着湍流强度的增大, 前者的优势则更加明显; OOK和BPPM在AWGN、弱湍流和中等湍流信道中, 编码增益都随着湍流强度的增大而增大, 不同的是, OOK在中等湍流中比强湍流中的大, 而BPPM则在中等湍流中的比强湍流中的小; LDPC + PPM时, 从4PPM到256PPM, PPM的进制数每翻1倍, 系统都有约1dB的损失。因此, 在湍流信道条件下, LDPC + PPM具有较大的编码增益, 且实现的复杂度较低, 在无线光通信中将有一定的应用前景。

**关键词:** 光通信; 低密度奇偶校验码; 调制方式;  $\gamma$ - $\gamma$  湍流信道

**中图分类号:** TN929.1      **文献标识码:** A      **doi:** 10. 7510/jgjs. issn. 1001-3806. 2013. 06. 029

## Performance analysis of LDPC codes in the $\gamma$ - $\gamma$ channel

WU Yan-qiong, CHEN Ming-song, AO Jun

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In order to improve the performance of wireless optical communication, the low density parity check (LDPC) code is used for the channel coding. When the channel state information is known, the performance of system LDPC + binary pulse position modulation (BPPM) and system LDPC + on-off keying (OOK) was compared respectively in additive white Gaussian noise (AWGN), weak, medium and strong turbulence channels. The result shows that the performance of LDPC + BPPM is better than that of LDPC + OOK, and with the increase of the turbulence intensity, the advantage of LDPC + BPPM becomes more apparent. The coding gain of OOK and BPPM was studied in various strength turbulence channels, both of the BPPM's and OOK's in AWGN, weak and medium turbulence channel, increase with the increase of the turbulence intensity. The difference is OOK coding gain in medium turbulence channel is bigger than that in strong turbulence. However, BPPM coding gain and OOK's are opposite. When coding, from 4PPM to 256PPM, when the number of binary is doubled, there is about 1dB loss than the original system. Therefore, system LDPC + PPM has a large coding gain in turbulence channel, and low complexity, and a certain application prospect in optical wireless communication.

**Key words:** optical communication; low density parity check code; modulation scheme;  $\gamma$ - $\gamma$  turbulence channel

### 引 言

无线光通信具有不需要申请频谱、通信可靠性

高、保密性好、信息容量大、无电磁干扰、组网机动灵活、安装维护方便等优点, 近年来已经成为通信领域的一个研究热点。目前的光通信系统大多设计为强度调制/直接检测(intensity modulation/direct detection, IM/DD)系统。应用于强度调制/直接检测光通信系统中最常见的有开关键控(on-off keying, OOK)和脉冲位置调制(pulse position modulation, PPM)<sup>[1]</sup>。大气湍流易对传输信道产生影响, 其引起的强度闪烁效应使光信号受到随机的寄生调制而呈

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61077036)

作者简介: 伍艳琼(1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究LDPC码及其在无线光通信中的应用。

\* 通讯联系人。E-mail: 843887575@qq.com

收稿日期: 2013-01-19; 收到修改稿日期: 2013-03-21

现出额外的大气湍流噪声,增大了通信系统的误比特率,成为影响通信系统性能的主要因素之一。引入差错控制编码技术,是有效地提高系统性能的方案之一。目前的研究均表明,低密度奇偶校验码(low density parity check, LDPC)是信道编码中纠错能力极强的一种码<sup>[2]</sup>,具有吞吐量大、较低的错误平底、极具高速译码潜力等优点<sup>[3]</sup>,非常适合作为高传输速率通信系统的前向纠错(forward error correction, FEC)方案。

LENG 等人<sup>[4]</sup>在已知信道衰落信息和未知信道衰落信息条件下,研究了基于 LDPC 码和二进制脉冲位置调制(binary pulse position modulation, BPPM)的光通信系统性能;参考文献[5]和参考文献[6]中对 LDPC 码在光 PPM 通信系统中的性能进行了研究;参考文献[7]中研究了在不同光强闪烁效应下 Turbo 码大气激光通信副载波系统的误比特性能。其中参考文献[4]中的信道衰落系数为实测而得,参考文献[5]、参考文献[6]和参考文献[7]中的信道衰落系数均为对数正态分布模型。一般的大气光通信中,光强的起伏大都出现在弱、中等和强起伏区,出现在饱和区及超饱和区的可能性很小。在弱到强起伏区的几种概率密度函数中,最为常用的有对数正态分布和 gamma-gamma 分布<sup>[8]</sup>。gamma-gamma 光强起伏概率分布与对数正太分布模型相比,具有更广的适用范围,能较准确地描述弱、中和强起伏区的光强起伏统计特性,且其概率分布的尾部与数值模拟及实验结果更为吻合。作者针对 gamma-gamma 湍流信道,对 LDPC 编码结合 OOK 或 PPM 调制的光通信系统进行了研究。

### 1 系统模型

图 1 中给出了采用 LDPC 编码结合 OOK (或 PPM)调制的无线光通信系统方框图。在发射端对信息比特序列进行 LDPC 编码,然后进行 OOK (或

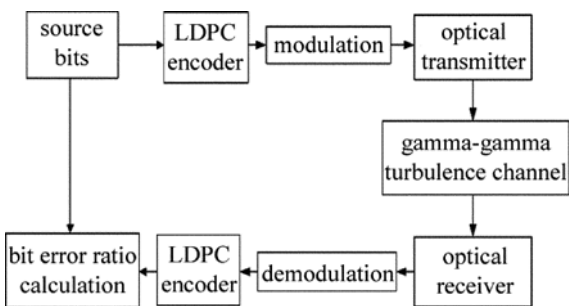


Fig. 1 Optical wireless communication system

PPM)调制,调制后的光信号将通过 gamma-gamma 大气信道传输;在接收端,解调器不输出解调值,而是产生调制到 OOK(或 PPM)上各个比特的似然值,译码器利用这些似然值采用对数似然比置信传播(log-likelihood ratios belief propagation, LLR-BP)算法译码。

### 2 湍流信道

仿真中的湍流信道模型为 gamma-gamma 模型,该分布表达式如下<sup>[9]</sup>:

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

式中,  $I$  是信号强度,  $\Gamma(\cdot)$  是伽马函数,  $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$  是第 2 类第  $\alpha-\beta$  阶修正的贝塞尔函数,  $\alpha$  和  $\beta$  是描述平面波闪烁的外尺度和内尺度参量:

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

式中,  $\sigma_R^2$  是 Rytov 方差,计算式为:

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L_0^{11/6} \quad (3)$$

式中,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  是波数,  $L_0$  为传输距离,  $C_n^2$  为大气折射率结构常数。

当  $\sigma_R^2 < 0.3$  时,为弱湍流;  $\sigma_R^2 \in [0.3, 25]$  为中等湍流;  $\sigma_R^2 \in (25, 100)$  为强湍流<sup>[10]</sup>。仿真中大气折射率结构常数  $C_n^2$  分别取为  $10^{-12} \text{m}^{-2/3}$ ,  $2.5 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$  和  $5 \times 10^{-15} \text{m}^{-2/3}$ , 传输距离  $L_0 = 1500\text{m}$ , 波长  $\lambda = 1550\text{nm}$ , 相应的弱湍流、中等湍流和强湍流的 gamma-gamma 分布曲线见图 2。

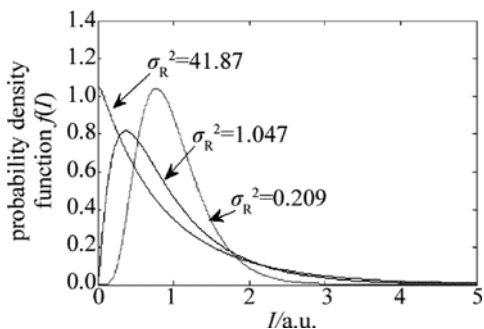


Fig. 2 Probability of distribution function for gamma-gamma pdfs

### 3 校验矩阵的构造及编码

实验中校验矩阵( $H$  矩阵)的构造是采用 MAC-

KAY 的构造法 1A。该方法构造的矩阵每列的重量都为固定值,随机地构造矩阵使每行的重量尽可能相等,而每两列之间重叠的 1 的个数不大于 1。这样构造的  $H$  矩阵不存在长度为 4 的环。图 3 为用该方法构造的列重为 3、行重为 6、码率为 0.5 的  $H$  矩阵。

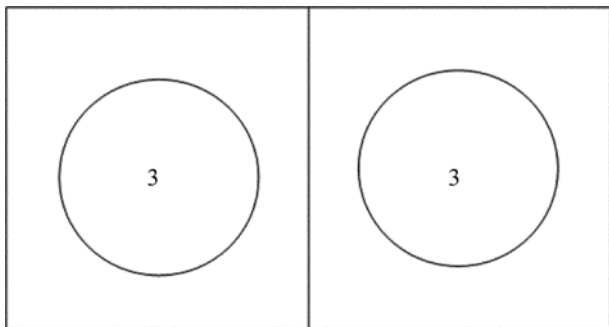


Fig. 3 The method of structuring check matrix  $H$

得到  $(n, k)$  码的校验矩阵  $H$  后,将  $H$  进行行列变换,使其成为校验矩阵的系统形式:

$$H = [I_{(n-k) \times (n-k)} \quad P_{(n-k) \times k}^T] \quad (4)$$

再利用生成矩阵  $G$  和校验矩阵  $H$  的正交性,可得生成矩阵:

$$G = [P_{k \times (n-k)} \quad I_{k \times k}] \quad (5)$$

若信息序列为:

$$u = [u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_k] \quad (6)$$

则编码后的码字为:

$$c = uG \quad (7)$$

#### 4 LDPC 译码初始化

建立在 Tanner 图上的 LDPC 码,其 BP 译码的每次迭代包括两步:校验节点的处理和变量节点的处理。在每次迭代中,所有校验节点从其相邻的变量节点处接收消息,处理后,再传回到相邻的变量节点;然后所有的变量节点进行同样的过程。最后变量节点收集所有可以利用的消息进行判决<sup>[11-13]</sup>。

作者采用 LLR-BP 译码,假设  $y_i$  是第  $i$  时隙光电探测器的检测输出电流信号,  $x_i$  是对应时隙的发射信号。则:

$$y_i = \rho I_i x_i + n_i \quad (8)$$

式中,  $\rho$  为接收机的光电转换效率;  $I_i$  是信道状态信息,表征大气湍流强度,符合 gamma-gamma 分布;  $x_i \in \{0, 1\}$ , 为无湍流时所接收光强;  $n_i$  是背景光经光电转换后所形成的噪声、光电转换过程及接收机电路引入的噪声的总和,可认为是独立同分布的高斯噪声<sup>[14-15]</sup>。  $n_i$  是均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的高斯随机

变量,且信源等概分布,即  $P_r(x_i = 1) = P_r(x_i = 0) = 0.5$ , 则 LLR-BP 译码初始化为<sup>[16-17]</sup>:

$$L(P_i) = \ln \left[ \frac{P(x_i = 0)}{P(x_i = 1)} \right] = \frac{I_i^2 - 2y_i I_i}{2\sigma^2} \quad (9)$$

采用  $L$  进制 PPM 调制时的 LLR-BP 译码初始化<sup>[4]</sup>:

$$L(P_i) = \ln \left( \sum_{X=(x_1, x_2, \dots, x_n)_{x_l=0}} L_l \right) - \ln \left( \sum_{X=(x_1, x_2, \dots, x_n)_{x_l=1}} L_l \right) \quad (10)$$

式中,  $L_l$  为第  $l$  时隙中有脉冲信号的似然比,即:

$$L_l = \frac{P_{r,s}(x_l)}{P_{r,n}(x_l)} = \exp \left( \frac{2\rho x_l I_l - \rho^2 I_l^2}{2\sigma^2} \right) \quad (11)$$

式中,  $P_{r,s}$  表示该时隙有脉冲的概率,  $P_{r,n}$  表示该时隙无脉冲的概率。

#### 5 仿真分析

在以下的仿真中,使用的 LDPC 码长均为 1056, 码率为 0.5, 采用 LLR-BP 译码算法译码,译码最大迭代次数为 10;未编码时,解调均采用硬判决方法;湍流信道为 gamma-gamma 模型,且接收端已知信道状态信息(channel state information, CSI)。

由图 4 和图 5 对比可知,误比特率达到  $10^{-5}$  时,

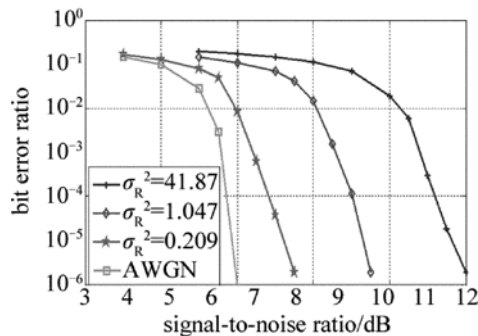


Fig. 4 BER of OOK modulation with LDPC code in different turbulence intensity

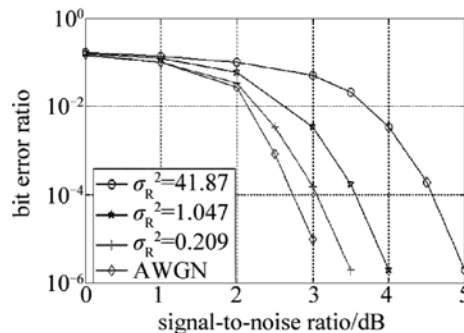


Fig. 5 BER of BPPM modulation with LDPC code in different turbulence intensity

LDPC + BPPM 系统比 LDPC + OOK 系统在加性高斯白噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN) 信道下有 2.8dB 的增益;在弱湍流信道下有 2.9dB 的增益;在中等湍流信道下有 5.4dB 的增益;在强湍流信道下有 6.8dB 的增益。由此可知,随着湍流强度的增大,LDPC + BPPM 系统相对于 LDPC + OOK 系统的优势更加明显。

对比图 4 和图 6 可以发现,当误比特率为  $10^{-5}$  时,LDPC + OOK 比 OOK 在 AWGN 信道下有 12dB 的增益;在弱湍流信道下有 26dB 的增益;在中、强湍流下则有更大的增益,而中等湍流信道中的编码增益比强湍流的大些。

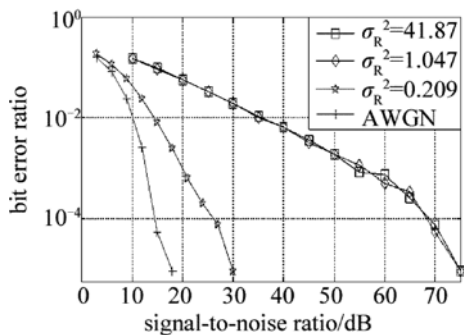


Fig. 6 BER of OOK modulation in different turbulence intensity

将图 5 和图 7 对比可知,当误比特率达到  $10^{-5}$  时,LDPC + BPPM 比 BPPM 在 AWGN 信道下有 13.5dB 的增益;在弱湍流信道下有 25.5dB 的增益;在中、强湍流下则有更大的增益,且随着湍流的增强编码也将更大。

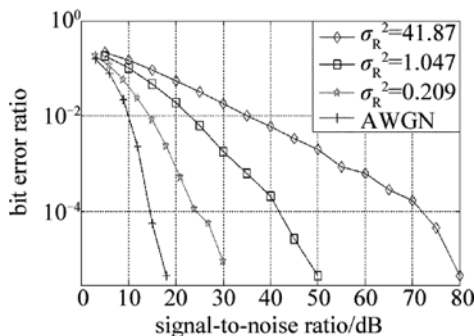


Fig. 7 BER of BPPM modulation in different turbulence intensity

由图 8 可以看出,采用 LDPC 编码,当误比特率达到  $10^{-5}$  时,4PPM 比 2PPM 有约 0.5dB 的损失;从 4PPM 到 16PPM,进制数每翻 1 倍,系统都有约 1dB 的损失;从 16PPM 到 256PPM,进制数每翻 2 倍,系统都有约 2dB 的损失。

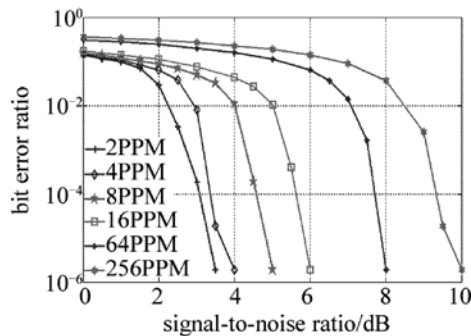


Fig. 8 BER of L-PPM modulation with LDPC code in weak turbulence intensity ( $\sigma_R^2 = 0.209$ )

## 6 结 论

在已知 CSI 的条件下,AWGN、弱湍流、中等湍流和强湍流信道中 LDPC + BPPM 系统比 LDPC + OOK 系统有更好的性能,且随着湍流强度增大,LDPC + BPPM 的优势更加明显。同时还对 OOK 和 BPPM 在各个强度湍流信道下的编码增益进行了仿真,OOK 和 BPPM 在 AWGN、弱湍流和中等湍流信道中,编码增益都随着湍流强度的增大而增大,不同的是,OOK 在中等湍流的编码增益比强湍流中的大,而 BPPM 在中等湍流的编码增益比强湍流中的小。采用编码时,从 4PPM 到 256PPM,进制数每翻 1 倍,系统都有约 1dB 的损失。

## 参 考 文 献

- [1] WANG J Y, ZHANG Zh X. PPM in wireless infrared communication[J]. Telecommunication Technology, 2000, 40(5):81-84 (in Chinese).
- [2] GUO Y F, ZHOU A S. Encoding and decoding algorithms of LDPC codes[J]. Spacecraft Engineering, 2008, 17(3):118-122 (in Chinese).
- [3] HU H F, ZHANG J X. Performance analysis of LDPC-codes in PPM channel of space communication[J]. Space Electronic Technology, 2006, 3:20-25 (in Chinese).
- [4] LENG J F, HAO Sh Q, LU X G, et al. Performance study of optical wireless communication system based on LDPC code and BPPM [J]. Laser Technology, 2012, 36(3):334-337 (in Chinese).
- [5] CHEN J J. Performance analysis of LDPC code in PPM communication system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008: 41-55 (in Chinese).
- [6] JIA K J, ZHAO Y G, CHEN H, et al. Analysis and methodology study of BFSO system[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2012(3):1-6 (in Chinese).
- [7] CHEN D, KE X Zh. Analysis on error rate of wireless optical communication using subcarrier modulation on turbo code [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10):2860-2863 (in Chinese).



- [8] WU H L, LI X Y, YAN H X. Bit error rate performance analysis of atmospheric optical communication system based on gamma-gamma turbulence channel[J]. Acta Optical Sinica, 2008, 28(s2):99-105 (in Chinese) .
- [9] DJORDJEVIC I B, DENIC S Z, ANGUIA J A, *et al.* LDPC-coded MIMO optical communication over the atmospheric turbulence channel[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(5):478-487.
- [10] HEHA Y, CHRISTOPHER C D. Aperture averaging for studies of atmospheric turbulence and optimization of free space optical communication links[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5892:1-13.
- [11] FENG X J, ZHOU W. Study of BP decoding algorithm of LDPC codes[J]. Electronic Test, 2009(7):41-43 (in Chinese) .
- [12] BARUA B, MAJUMDER S P. Performance analysis of a LDPC coded multiple input/multiple output free-space optical system with Q-ary pulse-position modulation [C]//2010 International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE). Rome, Italy:IEEE Press, 2010:376-379.
- [13] WU Y Sh, YANG A Y, SUN Y N, *et al.* An enhanced soft value calculation for LDPC coded pulse-position-modulation[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(5):745-747.
- [14] LENG J F, HAO Sh Q, LÜ X G, *et al.* Study on bit-symbol mapping method of MPPM and system performance based on low density parity check codes[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4):1-7 (in Chinese) .
- [15] HYUNCHEOL P, JOHN R B. Trellis-coded multiple-pulse-position modulation for wireless infrared communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(4):643-651.
- [16] LIN Sh, COSTELLO D J. Error control coding[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2007:561-580 (in Chinese) .
- [17] YUAN D F, ZHANG H G. LDPC code theory and application [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2008:130-142 (in Chinese) .