

文章编号: 1001-3806(2011)03-0388-03

基于 LDPC 码的无线光通信副载波误码性能分析

陈丹, 柯熙政*

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

摘要: 为了研究信道编码技术对无线光通信副载波系统差错性能的影响, 基于无线光通信链路噪声特性, 建立了大气信道等效数学模型。采用低密度奇偶校验(LDPC)码作为信道编码方式引入无线光通信, 在不同光强闪烁指数下对基于副载波相移键控调制无线光通信系统进行了差错性能仿真, 比较分析了 LDPC 编码前后副载波调制系统的误比特率, 并对二相相移键控及四相相移键控两种系统进行了对比。结果表明, 副载波二相相移键控调制系统的差错性能优于四相相移键控系统, 同时 LDPC 码在弱湍流信道具有优越的纠错能力, 可以获得比未编码系统较高的编码增益, 在无线光通信领域具有一定的应用价值。

关键词: 光通信; 低密度奇偶校验码; 副载波相移键控; 误比特率; 性能

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.03.026

Analysis on error rate of wireless optical communication using subcarrier modulation on LDPC code

CHEN Dan, KE Xi-zheng

(School of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to study the effect of channel code technology on bit error rate (BER) performance of wireless optical communication subcarrier systems, based on noise characteristics of wireless optical communication, atmospheric channel model was found. Low density parity check (LDPC) code was introduced as the channel code in wireless optical communication, the error rate of wireless optical communication using subcarrier modulation was simulated under different scintillation distribution, and the BER performance between LDPC code coded and uncoded systems of binary phase shift keying (BPSK) and quaternary phase shift keying (QPSK) system was compared. The simulation results show that error performance of the BPSK system is better than that of QPSK system, and LDPC code has excellent error correction capabilities with a larger coding gain, and has some applicable values in the field of wireless optical communication.

Key words: optical communication; low density parity check code; subcarrier phase shift keying; bit error rate; performance

引言

大气无线光通信具有频率高、方向性强、容量大、保密性好、无需频率申请、造价低、室外设备安装方便等优点, 是一种具有广泛应用前景的通信技术。但由于大气吸收、散射及湍流效应等, 造成传输误比特率的增大, 严重影响了整个系统的性能^[1]。因此, 合适的

调制和编码方式成为大气激光通信面临的重要问题。

无线光通信普遍采用强度调制/直接检测(intensity modulated-direct detection, IM/DD)系统, 开关键控(on-off keying, OOK)作为无线光通信主要调制方案, 受大气闪烁的影响较大^[2]。副载波强度调制是一种有效的战胜大气湍流的调制方法, 参考文献[3]和参考文献[4]中已经证实了在大气湍流环境下, 副载波相移键控的性能优于OOK。目前差错控制编码技术的研究主要集中在卷积码、Turbo码及低密度奇偶校验(low density parity check, LDPC)码上^[5-6]。LDPC码在大气无线光通信领域的研究较少, 国外ANGUITA等人在这方面作过一定研究^[7], 大气信道采用的是强湍情况下的gama-gama理论模型。近几年, 国内也出现了一些光通信LDPC码的研究, 见参考文献[8]和参考文献[9]。

本文中引入LDPC码作为大气激光通信的信道编

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60977054); 国防重点实验室基金资助项目(9140C3601010701); 军队八六三创新计划资助项目(2008AAJ159); 西安理工大学青年科学研究计划资助项目(105-210816); 西安理工大学科技创新科学研究资助项目(105-211014)

作者简介: 陈丹(1975-), 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向为大气激光通信及信号与信息处理。

* 通讯联系人。E-mail: xzke@263.net

收稿日期: 2010-08-16; 收到修改稿日期: 2010-09-17

码方式,在分析大气传播信道基础上,针对弱湍流大气信道分别讨论了副载波二相相移键控(binary phase shift keying, BPSK)和四相相移键控(quaternary phase shift keying, QPSK)调制下应用 LDPC 码的系统误码性能,最后,通过仿真对在弱湍流信道下基于副载波调制 LDPC 编码前后的系统误码性能进行了比较分析。

1 大气传播信道及系统模型

对于大气无线光通信系统,其噪声主要包括了背景光噪声、接收机噪声以及大气湍流引起的大气闪烁。大气湍流是由于大气温度和大气压强的微小变化引起的大气折射率在时间和空间上随机起伏,主要体现在接收端光强闪烁。在直接探测强度调制系统中,影响通信性能最主要的因素就是强度起伏,即光强闪烁,很多科研人员针对湍流信道条件下光强闪烁的数学模型进行了研究,其中 RYTOV 提出的弱湍流下光强的对数正态分布模型受到了学术界的普遍认可,这里仅考虑大气弱湍流对光通信的影响。

弱湍流信道下,对于光强度调制通信系统,接收光功率 $P(t)$ 为:

$$P(t) = X(t)P_s(t) + n(t) \quad (1)$$

式中, $P_s(t)$ 为无湍流下的接收光功率, $n(t)$ 为高斯白噪声, $X(t)$ 为等可能概率过程引起的光强闪烁,其概率密度函数:

$$p(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s X} \exp\left\{-\frac{(\ln X + \sigma_s^2/2)}{2\sigma_s^2}\right\} \quad (2)$$

式中,平均闪烁指数 X 已经归一化, σ_s^2 为 X 的对数方差, σ_s 也称为光强闪烁指数。当 $\sigma_s^2 = 1$ 时, $\sigma_s^2 = \sigma_X^2$ ($\sigma_X^2 = \exp(\sigma_s^2) - 1 \approx \sigma_s^2$)。 σ_s^2 由大气状态及传输路径长度决定,数值越大表示闪烁越严重,一般 $\sigma_s^2 < 0.2 \sim 0.5$ ^[10]。

假设系统接收机采用雪崩光电二极管(avalanche photo diode, APD)探测器,由 APD 接收机的暗电流和热噪声引起的接收机信号计数的波动可用一个高斯随机过程来模拟^[11],其中参考文献[9]中详细分析了背景光计数的概率密度函数。综上所述,对于大气无线光通信系统,考虑的系统噪声主要包括背景光噪声、APD 噪声等加性噪声以及基于对数正态分布的乘性噪声大气闪烁。大气信道等效的数学模型框^[9,12]如图 1 所示。

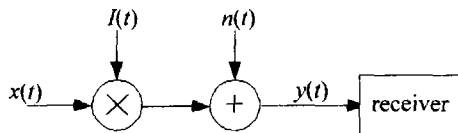


Fig. 1 Equivalent atmospheric channel mathematics model

图 1 中 $x(t)$ 表示发射信号, $y(t)$ 为接收机接收信号, $I(t)$ 和 $n(t)$ 分别为大气信道的乘性和加性噪声。加性噪声独立于发送光信号,而乘性噪声大气闪烁并不独立于发送光信号,它和信号的有无及大小有关,当发送“0”比特信号光时,噪声干扰也就不存在了,而且随着对数振幅起伏均方差的增大,通信链路中传输比特的错误概率增加,通信性能进一步劣化。由图 1 可知, $y(t) = I(t) \cdot x(t) + n(t)$,其中,乘性噪声 $I(t)$ 是信道状态信息,表征为大气的湍流强度,弱湍流情况下服从对数正态分布,其均值为 $\exp(-2\sigma_s^2)$,方差为 $2\sigma_s^2$,本文中研究弱湍流情况。加性噪声 $n(t)$ 满足均值为 0 且方差为 σ^2 的高斯分布随机变量。

LDPC 码 BPSK 副载波强度调制/直接检测大气激光通信系统框图如图 2 所示。信源产生的信息序列经

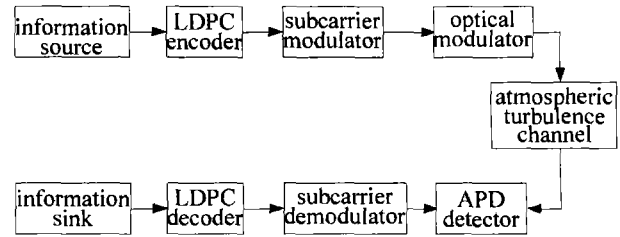


Fig. 2 Wireless optical communication system on LDPC code subcarrier

过 LDPC 信道编码后先进行副载波 BPSK 电调制,然后对光源进行强度调制,通过发射天线进入大气信道。接收端通过 APD 光电探测器进行光电转换,再通过电解调和信道解码还原出信息比特,最后计算系统的误比特率。

2 LDPC 码

LDPC 码是一种基于稀疏矩阵的接近 Shannon 限的的线性纠错码,其性能甚至可以超过 Turbo 码^[13],因其具有译码复杂度低,可并行译码以及译码错误的可检测性等特点,成为信道编码理论新的研究热点。LDPC 传统编码算法和一般的线性分组码类似,需要求出生成矩阵,再根据生成矩阵进行编码,编码过程运算复杂度高,难以具有实用性。作者采用 LU 分解编码算法,不再生成矩阵,直接利用校验矩阵进行编码,从而获得较低的编码复杂度。

将校验矩阵 $H_{m \times n}$ 写成如下形式:

$$H_{m \times n} = [H_1 \ H_2] \quad (3)$$

式中, H_1 为 $m \times k$ 阶, H_2 为 $m \times n$ 阶。

设编码后的码字行向量为 c ,长度为 n ,可写为: $c = [s \ p]$,其中, s 为信息码行向量,长度为 k , p 为校验码行向量,长度为 m 。根据校验等式有: $H \cdot c^T = 0$,即:

$$[H_1 \ H_2] \cdot \begin{bmatrix} s^T \\ p^T \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

展开该矩阵方程,并考虑到运算是在二元域中进行的,得到:

$$\mathbf{H}_2 \mathbf{p}^T = \mathbf{H}_1 \mathbf{s}^T \quad (5)$$

由(5)式可直接由校验矩阵进行编码。

LDPC码译码采用 log likelihood ratio based belief propagation(LLR-BP)算法,具体步骤见下。

(1)初始化。计算信道传递给变量节点的初始概率似然比消息 $L(p_i)$, $i=1,2,\dots,n$ 。然后设定变量节点 i 向与其相邻的所有校验节点 j 所传递的初始消息,其中 $j \in C_i$:

$$L^{(0)}(q_{ij}) = L(p_i) = 2y_i/\sigma^2, (\text{迭代次数 } l=0) \quad (6)$$

式中, C_i 表示与变量节点 i 相连的校验节点的集合, y_i 是经大气信道后直接解调的信号, σ^2 为高斯白噪声方差。

(2)校验节点消息更新。由下式利用变量节点消息对校验节点消息进行更新:

$$L^{(l)}(r_{ji}) = 2 \tanh^{-1} \left\{ \prod_{i' \in R_j \setminus i} \left[\frac{1}{2} L^{(l-1)}(q_{ij'}) \right] \right\} \quad (7)$$

式中, R_j 表示与校验节点 j 相连的变量节点的集合, $R_j \setminus i$ 表示除 i 外与校验节点 j 相连的其它变量节点的集合。

(3)变量节点消息更新。由下式利用校验节点消息对变量节点消息进行更新:

$$L^{(l)}(q_{ij}) = L(p_i) + \sum_{j' \in C_i \setminus j} L^{(l)}(r_{ji'}) \quad (8)$$

式中, $C_i \setminus j$ 表示除 j 外与变量节点 i 相连的其它校验节点的集合。

(4)译码判决。对所有变量节点计算硬判决消息: $L^{(l)}(Q_i) = L(p_i) + \sum_{j' \in C_i \setminus j} L^{(l)}(r_{ji'})$, 对 $L^{(l)}(Q_i)$ 进行硬判,产生译码结果 \hat{c}_i , 若 $L^{(l)}(Q_i) > 0$, 则 $\hat{c}_i = 0$, 否则为 1。最后,检验判决是否满足校验矩阵的要求,即 $\hat{c}_i \mathbf{H}^T = 0$, 满足迭代停止, 否则从步骤(2)继续迭代,直至到达最大迭代次数。

3 系统仿真分析

图3中给出了未编码的副载波 BPSK 调制及

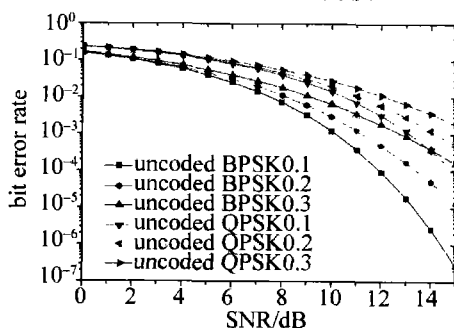


Fig.3 Bit error rate performance of uncoded subcarrier system

QPSK 光无线通信系统在不同湍流强度 ($\sigma_s = 0.1$, $\sigma_s = 0.2$, $\sigma_s = 0.3$) 信道及不同信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 的误比特率仿真曲线。图4和图5中分别

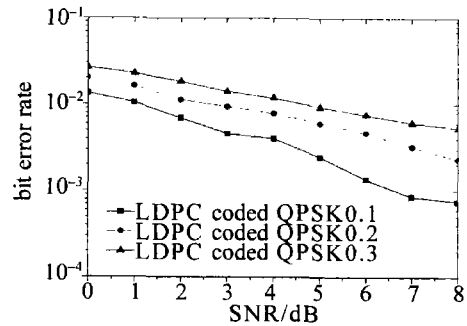


Fig.4 Bit error rate performance of LDPC code QPSK subcarrier system

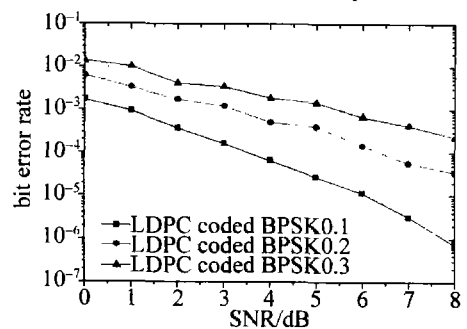


Fig.5 Bit error rate performance of LDPC code BPSK subcarrier system

给出了基于 LDPC 码的无线光通信副载波 QPSK 调制及 BPSK 调制系统在不同湍流强度信道下的误比特率性能曲线,两种调制方式下 LDPC 编译码仿真均采用 LLR-BP 译码算法,信息码长 256, 比特率为 0.5, 最大迭代次数为 10 次。

4 结论

基于大气信道特性建立了大气无线光通信信道的数学模型。在弱湍流信道下,分别进行了不同闪烁强度指数下的副载波 BPSK 调制及 QPSK 调制系统误比特率仿真分析,同时引入 LDPC 码作为大气无线光通信信道编码,对 LDPC 编码和未编码的副载波调制系统误码率进行了对比分析,通过仿真可知,基于 LDPC 码的 BPSK 系统性能优于 QPSK,可获得约 6.8dB 的编码增益。此外,LDPC 码对大气湍流引起的光强闪烁有很好的抗干扰性,两种副载波调制系统均可获得与未编码系统相比较高的编码增益,可以有效提高无线光通信系统的可靠性。

参考文献

- [1] MA D T, WEI J B, ZHUANG Zh W. Performance evaluation and channel modeling of multiple-beam propagation for atmospheric laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(8): 1020-1024 (in Chinese).
- [2] MA X Sh, ZHU W Y, RAO R Zh. Annular-aperture averaging factor of optical scintillations in turbulent atmosphere[J]. Acta Optica Sini-

(下转第 402 页)

GdVO₄ 内腔式喇曼激光器的运转。通过分别利用两块不同初始透过率的饱和吸收体,详细研究和比较了被动调 Q Nd:YGA/GdVO₄ 内腔式喇曼激光器的输出特性包括平均输出功率、脉冲能量、脉冲宽度和脉冲重复率。通过数值求解考虑空间分布的速率方程,得到的理论结果与实验结果大致相符。

参 考 文 献

- [1] POWELL J T, POWELL R C, PEYGHAMBARIAN N, *et al.* Generation of 1.5 μm radiation through intracavity solid-state Raman shifting in Ba(NO₃)₂ nonlinear crystals[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(9): 1017-1019.
- [2] MAJOR A, AITCHISON J S, SMITH P W E. Efficient Raman shifting of high-energy picosecond pulses into the eye-safe 1.5 μm spectral region by use of a KGd(WO₄)₂ crystal[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(4): 421-423.
- [3] JELINKOVA H, SULC J, BASIEV T T, *et al.* Stimulated Raman scattering in Nd: SrWO₄[J]. *Laser Physics Letters*, 2005, 2(1): 4-11.
- [4] SU F F, ZHANG X Y, WANG Q P, *et al.* Output properties of external resonator SrWO₄ Raman laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5): 693-696 (in Chinese).
- [5] SU F F, ZHANG X Y, WANG Q P, *et al.* Passively Q-switched Nd: GdVO₄ self-Raman laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(10): 1831-1835 (in Chinese).
- [6] LIU B, ZHANG X Y, WANG Q P, *et al.* Diode-pumped intracavity frequency-doubled Nd: YVO₄ self-Raman yellow laser[J]. *Acta Photonica Sinica* 2007, 36(10): 1777-1780 (in Chinese).
- [7] JIA P, ZHANG X Y, WANG Q P, *et al.* Laser diode-pumped Nd: YVO₄ self-stimulated Raman laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(2): 1309-1313 (in Chinese).
- [8] LIU T H, TAN H M, WANG B Sh, *et al.* Laser diode-pumped Nd: GdVO₄ microchip laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(12): 1593-1596 (in Chinese).
- [9] KAMINSKII A A, UEDA K, EICHLER H J. Tetragonal vanadates YVO₄ and GdVO₄-new efficient χ⁽³⁾-materials for Raman lasers[J]. *Optics Communications*, 2001, 194(1/3): 201-206.
- [10] HU D W, YU H H, WANG Zh P, *et al.* Efficient stimulated Raman scattering of YVO₄ crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(6): 918-920 (in Chinese).
- [11] CHEN Y F. Compact efficient self-frequency Raman conversion in diode-pumped passively Q-switched Nd: GdVO₄ laser[J]. *Applied Physics*, 2004, B78(6): 685-687.
- [12] CHEN Y F. Efficient 1521nm Nd: GdVO₄ Raman laser[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(22): 2632-2634.
- [13] BASIEV T T, VASSILIEV S V, KONJUSHKIN V A. Diode pumped 500-picosecond Nd: GdVO₄ Raman laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2004, 1(5): 237-240.
- [14] DEMIDOVICH A A, APANASEVICH P A, BATAY L E. Sub-nanosecond microchip laser with intracavity Raman conversion[J]. *Applied Physics*, 2003, 76(5): 509-514.
- [15] CHEN W B, INAGAWA Y J, OMATSU T. Diode-pumped, self-stimulating, passively Q-switched Nd: PbWO₄ Raman laser[J]. *Optics Communications*, 2001, 194(4/6): 401-407.
- [16] LOIKO Y V, DEMIDOVICH A A, VOITOVICH A P. Stokes pulse energy of Q-switched lasers with intracavity Raman conversion[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2005, B22(11): 2450-2458.
- [17] DEMIDOVICH A A, VOITIKOV S V, BATAY L E. Modeling and experimental investigation of short pulse Raman microchip laser[J]. *Optics Communications*, 2006, 263(1): 52-59.
- [18] ZHANG X Y, ZHAO S Z, WANG Q P. Modeling of passively Q-switched lasers[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2000, B17(7): 1166-1175.
- [19] HUANG W, TAKAYANAGI J, SAKANAKA T, *et al.* Atmospheric optical communication system using subcarrier PSK modulation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1993, E76-B(9): 1169-1177.
- [20] LIU Q, LIU Q Ch, MITCHELL G S. Performance analysis for optical wireless communication systems using sub-carrier PSK intensity modulation through turbulent atmospheric channel[J]. *IEEE Global Telecommunications Conference*, 2004, 29(3): 1872-1875.
- [21] LI J, LIU J Q, TAYLOR D P. Optical communication using subcarrier PSK intensity modulation through atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(8): 1598-1605.
- [22] OHTSUKI T. Turbo-coded atmospheric optical communication system[J]. *IEEE International Conference on Communications*, 2002, 5: 2938-2942.
- [23] ANGUIA J A, DJORDJEVIC I B, NEILFELD M A, *et al.* Shannon capacities and error-correction codes for optical atmospheric turbulent channels[J]. *Journal of Optical Networking*, 2005, 4(9): 586-600.
- [24] SUN L H, CHEN M S, LI T S, *et al.* Study about LDPC codes applied in underwater laser communication[J]. *Laser Technology*, 2009, 33(6): 604-606 (in Chinese).
- [25] LIANG J X. The research on LDPC of atmospheric optical wireless communication system under weak turbulence[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007: 64-68 (in Chinese).
- [26] XIE W L, TANG J X. Analysis on characterization of atmospheric optical wireless communication system based on turbo code[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(9): 835-838 (in Chinese).
- [27] CAGLIARDI R M, KARP S. *Optical telecommunications*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998: 36-45.
- [28] ZHU X M, KAHN J M. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Transaction Communication*, 2002, 50(8): 1293-1300.
- [29] SHARMA M, CHADHA D. Maximum likelihood decoding of low density parity check coded subcarrier modulation in optical wireless systems[C]//India Annual Conference. New Delhi, India: IEEE, 2006: 1-6.

(上接第 390 页)

- [30] ca, 2007, 27(9): 1543-1547 (in Chinese).
- [31] HUANG W, TAKAYANAGI J, SAKANAKA T, *et al.* Atmospheric optical communication system using subcarrier PSK modulation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1993, E76-B(9): 1169-1177.
- [32] LIU Q, LIU Q Ch, MITCHELL G S. Performance analysis for optical wireless communication systems using sub-carrier PSK intensity modulation through turbulent atmospheric channel[J]. *IEEE Global Telecommunications Conference*, 2004, 29(3): 1872-1875.
- [33] LI J, LIU J Q, TAYLOR D P. Optical communication using subcarrier PSK intensity modulation through atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(8): 1598-1605.
- [34] OHTSUKI T. Turbo-coded atmospheric optical communication system[J]. *IEEE International Conference on Communications*, 2002, 5: 2938-2942.
- [35] ANGUIA J A, DJORDJEVIC I B, NEILFELD M A, *et al.* Shannon capacities and error-correction codes for optical atmospheric turbulent channels[J]. *Journal of Optical Networking*, 2005, 4(9): 586-600.
- [36] SUN L H, CHEN M S, LI T S, *et al.* Study about LDPC codes ap-