

文章编号: 1001-3806(2012)03-0334-04

基于 LDPC 码和 BPPM 的无线光通信系统性能研究

冷蛟锋^{1,2} 郝士琦^{1,2*} 吕旭光^{1,2} 闫飞^{1,2}

(1. 电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037; 2. 电子工程学院 安徽省电子制约技术重点实验室, 合肥 230037)

摘要: 为了克服光在弱湍流大气条件传输时, 光强闪烁造成的突发错误, 在已知信道衰落信息(CSI)和未知信道衰落信息(NCSI)条件下, 研究了基于低密度奇偶校验(LDPC)码和二进制脉冲位置调制(BPPM)的无线光通信系统性能, 论述了BPPM光通信信道对称性的特点, 并与基于LDPC码和OOK调制的光通信系统性能进行了比较。结果表明, 在NCSI和CSI情况下, 基于LDPC码和BPPM的光通信系统相对于基于LDPC码和OOK调制的系统均有更优异的差错性能; 在NCSI情况下, 基于LDPC码和BPPM的光通信系统的性能相对于CSI情况下的系统性能损失并不大; 且采用LDPC码BPPM相对于LDPC码OOK调制的光通信系统, 随着湍流强度的增大系统性能损失较小。因此, 基于LDPC码和BPPM的光通信系统在不需要信道衰落信息估计的情况下, 能获得较大的编码增益, 便于工程实现, 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; 大气湍流信道

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.012

Performance study of optical wireless communication system based on LDPC code and BPPM

LENG Jiao-feng^{1,2}, HAO Shi-qi^{1,2}, LU Xu-guang^{1,2}, YAN Fei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China; 2. Key Laboratory of Electronic Restriction of Anhui Province, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Performance of optical wireless communication system based on binary pulse position modulation (BPPM) and low-density parity-check (LDPC) code through atmospheric turbulence channel was investigated in the both situations of perfect channel state information (CSI) and non-channel state information (NCSI) compared with LDPC coded optical wireless communication system based on on-off keying (OOK) with the same bite rate and the same average transmission power. Simulation results show that in the both situations of CSI and NCSI, optical wireless communication systems based on LDPC code and BPPM have more excellent bit error rate performance than that of LDPC coded optical wireless communication systems based on OOK, and when decoded with the average fading amplitude as an estimate of the NCSI channel, performance of optical wireless communication system based on LDPC and BPPM are not degraded too much compared to the CSI channel, and it was also found that LDPC coded optical wireless communication systems based on BPPM are less sensitive to turbulent intensity than the systems based on OOK. Therefore, in the situation of NCSI, LDPC coded optical wireless communication systems based on BPPM have excellent error correction capabilities and access to a larger coding gains, and the above scheme is well suited for optical wireless communication systems.

Key words: optical communication; low-density parity-check code; modulation scheme; atmospheric turbulence

引言

无线光通信具有光纤通信和微波通信的结合优

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60902017); 安徽省自然科学基金资助项目(1004060Q60)

作者简介: 冷蛟锋(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究工作是 LDPC 码在大气激光通信中的应用。

* 通讯联系人。E-mail: liu_hsq@126.com

收稿日期: 2011-08-31; 收到修改稿日期: 2011-10-04

势, 具有信息容量大、组网机动灵活、无需频谱申请和保密性好等优点^[1], 已成为目前大容量空间通信最具竞争力的解决方案。但是, 光信号通过大气传输时不仅会受到大气衰减和背景光的影响, 大气湍流也会引起接收光强的起伏, 造成传输误比特率的增大, 严重影响了整个通信系统的性能。考虑到无线光通信是功率受限系统, 以及发射功率对人眼安全的保证, 高性能的信道编码技术比如 turbo 码^[2]、turbo 乘积码^[3]、低密度奇偶校验(low-density parity-check, LDPC)码^[4-8]应用

到无线光通信中逐步得到重视。ZHANG 等人^[4]对在高斯信道和大气弱湍流信道中,基于 LDPC 码和脉冲位置调制(pulse position modulation, PPM)的光通信系统性能进行了分析和比较;WANG 等人^[5]研究了基于副载波相移键控强度调制和 LDPC 码的无线光通信系统性能,表明基于 LDPC 码和副载波相移键控强度调制的无线光通信系统,对于光强闪烁有很好的抗干扰作用;GUO 等人^[6]研究了基于 LDPC 和 PPM 编码的深空光通信系统中,PPM 不同时隙数与系统误比特率的关系;CHEN 等人^[7]在已知信道信息情况下,研究了大气弱湍流信道模型下基于 LDPC 和 PPM 编码的光通信系统中,PPM 不同时隙数与系统误比特率的关系;JIA 等人^[8]研究了不同结构的 LDPC 码在无线光通信中的性能。

综合考虑系统复杂性和可靠性,大气中的无线光通信系统一般采用强度调制/直接检测方式(intensity modulation/direct detection, IM/DD)^[9]。目前使用较多的调制方式是开关键控(on-off keying, OOK),OOK 受大气闪烁的影响较大,需要跟踪最佳判决门限;而二进制脉冲位置调制(binary pulse position modulation, BPPM)也具有调制简单的优点,并且在极大似然判决准则下能够获得更好的差错性能^[10]。LDPC 码的译码算法主要是迭代置信传播(belief propagation, BP)算法, BP 算法与系统信道模型密切相关,对于二进制对称信道和对称的平稳遍历噪声信道,LDPC 码的性能十分接近 Shannon 极限^[11]。基于 BPPM 的无线光通信信道具有二进制对称性的特点,作者在已知信道衰落信息(channel state information, CSI)和未知信道衰落信息(non-channel state information, NCSI)条件下,研究了基于 LDPC 码和 BPPM 光通信系统性能,在符号平均发射功率和比特速率相同的条件下,与基于 LDPC 码和 OOK 调制的无线光通信系统进行了比较分析。

1 无线光通信链路模型

由于光强闪烁会造成突发错误,需要进行信道交织将突发错误转化为随机错误。基于 LDPC 编码的激光通信系统链路信道模型见图 1,在发射端对信息比特进行 LDPC 编码,然后经信道交织和调制,最后将光信号通过大气信道传输;在接收端接收到的光信号由光电探测器完成光电转换,进而实现解调、去交织和译码。则 t 时刻光电探测器的检测输出电平为:

$$r(t) = Gg\alpha P_s + n(t) \quad (1)$$

式中 P_s 为激光器的发射功率; g 是功率衰减,与传输距离、能见度、天线损耗和光束发散角等因素有关; α 是大气湍流引起的乘性噪声; $G = \frac{M\eta q}{hf}$ (η 为探测器的

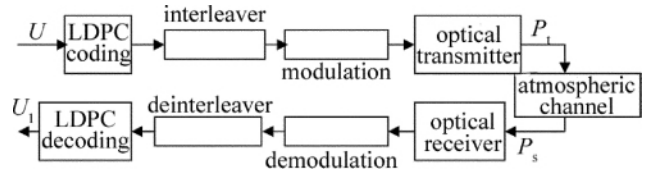


Fig. 1 Optical wireless communication system

量子效率; q 为电子电荷, M 是雪崩光电二极管(avalanche photo diode, APD)的平均增益; h 是普朗克常数, f 是光波频率; $n(t)$ 是加性高斯白噪声。

在弱湍流条件下,其接收光强一般服从对数正态分布。依据 Rytov 理论^[12],接收平面上光强相对于均值的概率密度函数为:

$$p(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln\alpha}} \exp\left[-\frac{\left(\ln\alpha + \frac{1}{2}\sigma_{\ln\alpha}^2\right)^2}{2\sigma_{\ln\alpha}^2}\right] \quad (2)$$

式中 $\alpha = P_s/P_0$, P_s 是瞬时接收功率, $P_0 = gP_t$ 是平均接收功率,使用 Kolmogorov 折射率起伏功率谱,对数强度方差 $\sigma_{\ln\alpha}^2$ 在水平均匀路径可表示为:

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

式中 k 是波数, L 是通信距离, C_n^2 是大气折射率结构常数。

2 LDPC 码的译码

信道编码的译码算法是决定编码性能的一个重要因素。LDPC 码的 BP 译码算法是一种基于编码因子图结构,采用软输出进行译码的技术,它通过进行多次迭代来改善译码纠错性能,使它最大限度地接近最大似然译码(maximum-likelihood decoding, MLD),其中初始消息对 LDPC 码的性能有着重要的影响^[13]。

2.1 BP 译码算法

LDPC 码的校验矩阵 H 可以用 Tanner 图表示, Tanner 图中包含 N 个变量节点和 M 个校验节点。假设 $N(m)$ 表示与校验节点 m 相连的所有变量节点集合, $M(n)$ 表示与变量节点 n 相连的所有校验节点集合; $N(m) \setminus n$ 表示集合 $N(m)$ 中去掉变量节点 n , $M(n) \setminus m$ 表示集合 $M(n)$ 中去掉校验节点 m 。对于二进制码,在实际的 LDPC 解码硬件实现方案中,多采用基于对数似然比的方法,定义 $R_{mn}^{(k)}$ 表示校验节点 m 向变量节点 n 传递的消息, $Q_{mn}^{(k)}$ 表示变量节点 n 向校验节点 m 传递的消息,其具体步骤如下。

(1) 初始化计算经过信道后接收到的初始对数似然比为:

$$\lambda_n^{(0)} = \ln \frac{p(x_i = 0 | y_i)}{p(x_i = 1 | y_i)} \quad (4)$$

(2) 校验节点更新。对每个校验节点 m 和 $n \in N(m)$, 计算:

$$R_{mn}^{(k)} = \left[\prod_{n' \in N(m) \setminus n} \text{sign}(Q_{mn'}^{(k-1)}) \right] \times \Phi^{-1} \left[\sum_{n' \in N(m) \setminus n} \Phi(|Q_{mn'}^{(k-1)}|) \right] \quad (5)$$

式中, sign 是符号函数, $\Phi(x)$ 定义为: $\Phi(x) = \Phi^{-1}(x) = \lg \frac{e^x + 1}{e^x - 1}$ 。

(3) 变量节点更新。对每个变量节点 n 和 $m \in M(n)$, 计算:

$$Q_{mn}^{(k)} = \lambda_n^{(0)} + \sum_{m' \in M(n) \setminus m} R_{m'n}^{(k)} \quad (6)$$

对于每个变量节点, 计算伪后验对数似然比:

$$Q_n^{(k)} = \lambda_n^{(0)} + \sum_{m \in M(n)} R_{mn}^{(k)} \quad (7)$$

(4) 译码判决。一次迭代完成后, 进行译码判决。由此可以得到关于译码码字的一个估计值 $\hat{y}(k)$, 再计算伴随式 $s(s = \hat{y}^T \times H)$, 其中 \hat{y} 为译码码字的估计值, T 表矩阵转置, H 为 LDPC 码的校验矩阵, 如果 $s = 0$, 那么译码成功, 结束译码, 并将作为 $\hat{y}(k)$ 有效输出值; 否则转步骤 (2) 继续迭代, 直至达到预定的最大迭代次数。

2.2 译码消息初始化

在采用 OOK 调制的无线光通信系统中, 假设: y_i 是接收信号; x_i 是发送的信息比特, $x \in \{0, 1\}$; α 是信道状态信息, 是大气湍流引入的乘性噪声。对于 OOK 调制, $y_i = \alpha x_i + n$, 并且发送的信息比特“0”和“1”的概率相等, n 是均值为 0, 方差为 σ_1^2 的高斯白噪声。则由 Bayes 公式可得基于 OOK 调制的 BP 译码算法的消息初始化值为:

$$\lambda_{n(\text{OOK})}^{(0)} = \ln \frac{p(x_i = 0 | y_i, \alpha)}{p(x_i = 1 | y_i, \alpha)} = \ln \frac{\exp\left(\frac{-y_i^2}{2\sigma_1^2}\right)}{\exp\left[\frac{-(y_i - \alpha)^2}{2\sigma_1^2}\right]} = \frac{\alpha^2 - 2y_i\alpha}{2\sigma_1^2} \quad (8)$$

可以看出, LDPC 译码利用接收信号、估计噪声值等作为软信息进行迭代译码。

当无线光通信系统采用 BPPM 方式时, 比特信号是在两个相邻时间间隔之一上进行脉冲发送, 在接收端按如下方式处理^[14]: 设同一个符号内发射比特和接收比特分别为 $x_k = (x_{k0}, x_{k1})$ 和 $y_k = (y_{k0}, y_{k1})$, $x_k = (0, 1)$ 和 $x_k = (1, 0)$ 分别表示发射“1”比特和“0”比特。设 $X_k = x_{k0} - x_{k1}$, $Y_k = y_{k0} - y_{k1}$, 则通过大气传输后的比特信号表示为 $Y_k = \alpha X_k + n_2$, α 是信道状态信息, 是大气湍流引入的乘性噪声, 接收器件等引入的加性高斯白噪声 $n_2 = n(t_1) - n(t_2)$, $n(t_1)$ 和 $n(t_2)$ 是一帧中前

后两时隙的加性噪声, 假设它们相互独立, 可得 n_2 是均值为 0, 方差为 $\sigma_2^2 = 2\sigma_1^2$ 的高斯白噪声。则相应的消息初始化值为:

$$\lambda_{n(\text{BPPM})}^{(0)} = \ln \frac{\exp\left[\frac{-(Y_k - \alpha)^2}{2\sigma_2^2}\right]}{\exp\left[\frac{-(Y_k + \alpha)^2}{2\sigma_2^2}\right]} = \frac{2\alpha Y_k}{\sigma_2^2} \quad (9)$$

可以看出, 对于 BPPM, LDPC 译码是利用每一帧中前后两时隙的信号差值作为软信息进行迭代译码。通过 (9) 式还可以证明, 基于 BPPM 的光通信信道具有对称性的特点。(8) 式和 (9) 式中, 信道状态信息 α 在 NCSI 情况下可以用 α 的均值 $E[\alpha]$ 估计(方框表均值) $E[\alpha]$ 可以由 (2) 式计算得到; 在 CSI 情况下, α 由接收端进行信道估计得到。

3 仿真分析

目前能比较客观地评价无线电数字通信系统差错性能的参量是归一化信噪比 $S_{\text{SNR}} = E_b/N_0$, 为保证符号功率相同, 编码后的信噪比 $S_{\text{SNR}_1} = RE_b/N_0$, E_b 为输入信道的平均比特能量, N_0 为信道噪声的单边功率谱密度, R 是比特率; 但是由于 IM/DD 体制无线光通信系统光电探测器的平方率特性, 定义编码前的信噪比^[15] $S_{\text{SNR}} = E[GP_0]^2/N_0$, 为保证符号的平均发射功率相同, 则编码后的信噪比 $S_{\text{SNR}_2} = R^2 \times S_{\text{SNR}}$; 另外在符号发射功率和比特速率相同的条件下, BPPM 的接收信噪比为 OOK 的接收信噪比的 1/2, 因此, 在后面的仿真分析中所用信噪比为 $S_{\text{SNR}} = S_{\text{SNR}_{\text{BPPM}}} = S_{\text{SNR}_{\text{OOK}}}/2$ 。根据参考文献 [16] 中的实验观测结果, 估测室外的大气湍流强度约在 $C_n^2 = 5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 的弱湍流区域附近, 通信距离 $L = 1.5 \text{ km}$, 波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 相应的 $\sigma_{\text{int}}^2 = 0.21$ 。假设信道完全交织, 图 2 中给出了大气信道下已知完美信道消息、未知信道消息以及高斯信道下基于 LDPC 码和 BPPM 的无线光通信系统的误比特率曲线和大气信道下未编码的 BPPM 的误比特率曲线, 其中 LDPC 码的码长为 2000, 比特率 $R = 0.5$, 最大迭代次数为 20 次。从图中可以看出, BPPM 的无线光通信

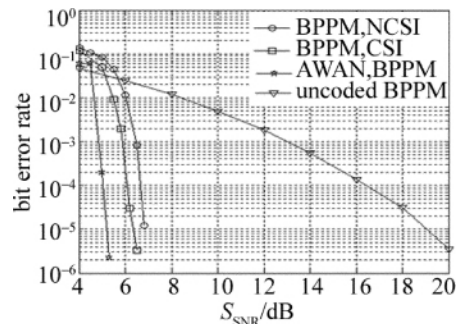


Fig. 2 BER of optical wireless communication system based on LDPC code and BPPM ($\sigma_{\text{int}}^2 = 0.21$)

的误比特率要达到 10^{-5} , 在 NCSI 的情况下, LDPC 编码的系统有 12dB 的编码增益, CSI 情况下有 12.7dB 的编码增益, 同时也可以看出 NCSI 相对于 CSI 只有 0.7dB 的损失, 大气湍流信道中的系统性能相对于加性高斯白噪声信道中的系统性能约有 1.5dB ~ 2dB 的损失。

图 3 中给出了 OOK 调制光通信系统的误比特率曲线, 其中未编码的误比特率曲线是采用理想的自适应最佳判决门限下情况下给出的。从图中可以看出, 当误比特率为 10^{-5} 时, NCSI 情况下, LDPC 编码的系统相对于未编码系统有 10dB 的增益, CSI 情况下有 13dB 的编码增益。

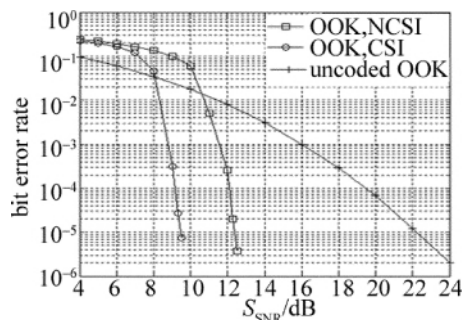


Fig. 3 BER of optical wireless communication system based on LDPC code and OOK modulation ($\sigma_{int}^2 = 0.21$)

对比图 2 和图 3 可以发现, 未编码的 BPPM 相对于 OOK 调制的光通信系统有 3dB 的增益, 这与参考文献 [17] 中的仿真结果一致; 当对系统进行 LDPC 编码时, 分别在 NCSI 和 CSI 情况下, BPPM 相对于 OOK 调制有 5.5dB 和 3.2dB 的增益。

图 4 是 $\sigma_{int}^2 = 0.293$ (其它仿真参量不变, $C_n^2 = 7 \times 10^{-15} \text{m}^{-2/3}$) NCSI 情况下 LDPC 编码分别与 OOK 调制和 BPPM 结合的误比特率曲线, 由图可知, 在误比特率等于 10^{-5} 时, LDPC + BPPM 相对于 LDPC + OOK 有 7dB 的增益; 与图 2、图 3 的曲线比较可以发现, 在不需要信道估计的条件下, 随着湍流强度的增大, LDPC + BPPM 相对于 LDPC + OOK 的优势更加明显; 在 $\sigma_{int}^2 = 0.293$ 的湍流强度下 LDPC + BPPM 的系统, 相比 $\sigma_{int}^2 = 0.21$ 的情况, 只有不到 1dB 的性能损失,

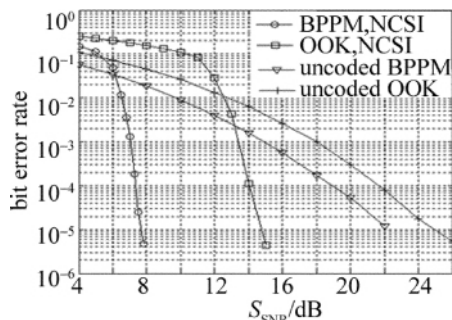


Fig. 4 BER of wireless communication systems based on BPPM and OOK modulation with LDPC code ($\sigma_{int}^2 = 0.293$)

而 LDPC + OOK 有约 2.5dB 的性能损失。

4 小结

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 BPPM 光通信系统性能, 在符号平均发射功率和比特率相同的条件下, 与基于 LDPC 码和 OOK 调制的无线光通信系统进行了比较分析。仿真结果表明, 在 NCSI 和 CSI 情况下, LDPC + BPPM 相对于 LDPC + OOK 都有较大的编码增益; 并且 LDPC + BPPM 的无线光通信系统在 NCSI 的情况下, 相对于 CSI 情况下的性能损失并不大; 另外在 NCSI 的情况下, 采用 LDPC + BPPM 相对于 LDPC + OOK 的无线光通信系统, 随着湍流强度的增大系统性能损失较小。因此, 基于 LDPC 码和 BPPM 的光通信系统在不需信道信息估计的情况下, 具有优越的纠错性能, 便于工程实现, 在无线光通信中将有一定的应用前景。

参考文献

- [1] WANG Ch, LIU J S. A novel differential optical modulation for the application of the spatial optic communication [J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 18-22 (in Chinese).
- [2] 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).
- [3] HAN Y Q, DANG A H, REN Y X, et al. Theoretical and experimental studies of turbo product code with time diversity in free space optical communication [J]. Optics Express, 2010, 26(18): 26978-26988.
- [4] ZHANG G Y, SU Y A, WANG H G, et al. Performance analysis for LDPC in PPM of ALC under weak turbulence [J]. Microcomputer Information, 2008, 24(27): 252-253 (in Chinese).
- [5] WANG Y, YU L, CAO J N. Performance of optical Wireless communication system basing on the sub-carrier PSK intensity modulation and LDPC code [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3295-3298 (in Chinese).
- [6] GUO J Zh, TAN Y, AI Y. Performance analysis of LDPC coded pulse position modulation for deep-space optical communications [J]. Technology of Optical Communication, 2007, 31(12): 57-59 (in Chinese).
- [7] CHEN J J, LI X F. Belief propagation decoding of low-density parity-check codes for atmospheric turbulent optical PPM communication [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(2): 405-409 (in Chinese).
- [8] JIA K J, KE X Zh, PENG Y Ch. Design of π -rotation LDPC for atmospheric laser communication system and its performance analysis [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2008, 34(4): 109-113 (in Chinese).
- [9] WANG H X, ZHU Y B, ZHANG T Y, et al. Performance study of optical wireless DH-PIM and DPIM [J]. Laser Technology, 2007, 31(1): 92-94 (in Chinese).
- [10] HU H, WANG H X, ZHOU M, et al. Modeling and analyzing of error performance for pulse position modulation and digital pulse interval modulation under turbulence [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(5): 1269-1274 (in Chinese).

(下转第 389 页)

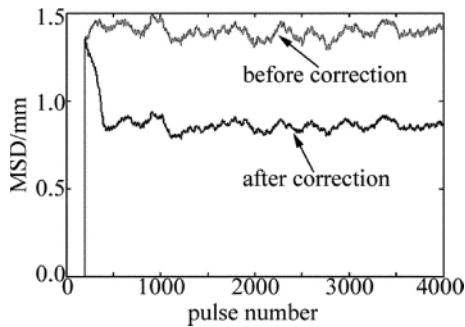


Fig. 9 MSD before and after correction with ground jitter

本文中以光束传递系统中校正脉冲激光器自身指向漂移的过程为例,根据探测到的偏移量,控制快速反射镜以调整光路校正漂移。模拟仿真中设定激光器自身的指向漂移量,并从结果中可看出已得到校正,说明该算法可以降低激光器自身所引起的光束漂移。在仿真结果中,还给出了加载地面抖动的前后的校正量对比图,从图像可以看出,该算法可以有效降低大地抖动引入的漂移,同理,可降低系统引起的随机抖动。综上所述,该算法对激光器自身以及外界环境引起的漂移有很好的校正效果。其不足之处在于未曾考虑光路中的其它元件变形所引入的漂移误差。

4 结论

基于MA值校正原理,提出一种算法对激光光束的指向漂移进行实时闭环校正。由仿真结果可以看出,该算法可以较好地校正指向漂移,经过长距离传输后,其引入的位置偏移明显降低;校正后的MA值经历一段脉冲数目的跳变后,逐步趋稳,相对于校正前的MA值降幅较大;校正后的MSD值降幅也较明显。该算法具有实用性,可以用于实际光路中。

激光器的指向稳定性不仅与激光器的内部设计及

其结构有关,而且也与测量的激光器的工作条件及所处环境有关,同时与系统的光学及机械装置的稳定性有关。温度的变化及光路中的气流的影响都会使得光强分布发生变化,从而引起光束方向的变化。因此,在实际运用中,校正激光光束指向漂移的算法考虑的影响因素应比本文中的多。

参考文献

- [1] ZHAO W Q, TAN J B, MA H W, *et al.* Laser collimation method based on the drift feedback control [J]. *Acta Optica Sinica* 2004, 24 (3): 373-377 (in Chinese).
- [2] ZHANG G X, CHEN G, HE H, *et al.* The beam-pointing stability for laser output measure by CCD camera [J]. *Journal of Applied Optics*, 1998, 19(2): 15-18 (in Chinese).
- [3] XIA J T. Automatic collimation controlling technology of photoelectricity detecting system [D]. Nanjing: Nanjing University of Information, 2008: 1-2 (in Chinese).
- [4] HUANG Z L. Error detection based on He-Ne laser beam drift [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004: 3-5 (in Chinese).
- [5] PAN J, VIATELLA J, DAS P P, *et al.* Performance and reliability of beam delivery unit for advance lithography [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5377: 1894-1901.
- [6] CYMER Inc. Lithography laser with beam delivery and beam pointing control: US, 2004/0022291A [P]. 2004-02-05.
- [7] LUBLIN L, WARKENTIN D, DAS P P, *et al.* High-performance beam stabilization for next-generation ArF beam delivery systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5040: 1682-1693.
- [8] WEIGL B, SANDSTROM R. Illumination apparatus and method for controlling energy of a laser source: US, 2009/0201955A1 [P]. 2009-08-13.
- [9] DAS P P, WEBB R K, GLOWANARDL M, *et al.* Lithography laser with beam delivery and beam pointing control: US, 2003/0022291A [P]. 2003-04-09.
- [10] HEINTZE J. Lithographic apparatus, device manufacturing method, performance measuring method, calibration method and computer program: China 03140753 [P]. 2003-12-17.

(上接第337页)

- [11] MACKEY D J C. Good error-correcting codes based on very sparse matrices [J]. *IEEE Transaction on Information Theory*, 1999, 45 (3): 399-431.
- [12] KAMRAN K. Performance analysis of free-space, on-off-keying optical communication systems impaired by turbulence [C]//*SPIE Free-Space Laser Communication Technologies XIV*. New York, USA: SPIE 2001: 150-161.
- [13] FOSSORIER M. Iterative reliability based on decoding of LDPC codes [C]//*2001 IEEE International Symposium on Information Theory*. New York, USA: SPIE 2001: 233.
- [14] GAO Ch, HAN Q Q, MA J, *et al.* Decoding of turbo code in atmospheric optical communication [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(4): 63-67 (in Chinese).
- [15] ANGUITA J A, DJORDJEVIC I B, NEIFELD M A. High-rate error-correction codes for the optical atmospheric channel [J]. *SPIE* 2005, 5892: 58920V/1-58920V/7.
- [16] MOORES J D, WALTHER F G, GRECO J A, *et al.* Architecture overview and data summary of a 5.4km free-space laser communications experiment [J]. *SPIE* 2009, 7464: 746404/1-746404/9.
- [17] CHAN V W S. Optical space communications [J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics* 2000, 6(6): 959-975.