

# 无线光通信系统误码性能分析及方法研究

贾科军<sup>1</sup> 赵延刚<sup>2</sup> 陈辉<sup>3</sup> 薛建彬<sup>1</sup> 王惠琴<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 兰州理工大学计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050  
<sup>2</sup> 中广核工程有限公司, 广州 深圳 518031  
<sup>3</sup> 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050

**摘要** 误码率(BER)是衡量无线光通信系统设计优劣的重要指标,如何正确统计误码性能显得尤为重要。利用 Matlab 软件,研究基于蒙特卡罗仿真实现无线光通信系统误码性能分析的方法。介绍了无线光通信系统以及利用蒙特卡罗仿真进行性能估计的原理;研究了误码性能仿真方法,详细地给出了仿真中的信源产生方法、信道模型、信噪比参数计算方法、误码率统计方法等,并给出了部分核心 Matlab 程序;给出了基于低密度奇偶校验(LDPC)码、脉冲位置调制(PPM)的无线光通信系统仿真图,详细介绍了各仿真参数的设置,并在不同天气和不同信噪比条件下统计了系统性能。统计结果表明,此性能分析方法准确可行。

**关键词** 无线光通信;误码率;蒙特卡罗方法;仿真

**中图分类号** TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.030603

## Analysis and Methodology Study of Bit Error Performance of FSO System

Jia Kejun<sup>1</sup> Zhao Yangang<sup>2</sup> Chen Hui<sup>3</sup> Xue Jianbin<sup>1</sup> Wang Huiqin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China  
<sup>2</sup> China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518031, China  
<sup>3</sup> College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China

**Abstract** Bit error rate (BER) is an important evaluation index of free space optical communication (FSO), and how to exactly get the BER statistics is rather important. We study the technique of analyzing the BER of FSO based on Monte Carlo simulation using Matlab software. The FSO system and the principle of Monte Carlo simulation are introduced. The method of getting the BER statistics is researched, and the method of generating information source, the channel model, and the calculation of signal-to-noise ratio (SNR) parameter for simulation are given detailedly. Moreover, part of the core Matlab program is presented. The modeling and simulation based on the low-density parity check (LDPC) code and pulse position modulation (PPM) are implemented. The analysis results under different conditions of weather and signal-to-noise ratio indicate the this method is accurate and practical.

**Key words** free space optical communication; bit error rate; Monte Carlo method; simulation

**OCIS codes** 060.4080; 200.2605

## 1 引言

无线光通信(FSO)具有无电磁干扰、组网机动灵活、安装维护方便、通信可靠性高、保密性好、性能价格比高等优点,可传输多种速率的数据、语音、图像,具有广阔的应用前景。在设计和研究 FSO 通信系统时,针对不同方案必然涉及到评价性能好坏的问题,即质量指标问题。其中衡量系统信息传输可靠程度的误码率(BER)是一个重要的指标。

**收稿日期**: 2011-08-10; **收到修改稿日期**: 2011-10-09; **网络出版日期**: 2012-01-12

**基金项目**: 国家自然科学基金(61005026,61062002)和甘肃省自然科学基金(0914ZTB097)资助课题。

**作者简介**: 贾科军(1978—),男,硕士,讲师,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: kjia@lut.cn

本文研究如何对 FSO 系统误码率性能进行评估,并给出了基于蒙特卡罗仿真的 FSO 系统仿真图以及设计中的详细参数。分析了在不同天气状况下的系统性能。

## 2 FSO 系统性能估计原理

常用的衡量 FSO 系统性能的可靠性指标是误码率,定义为<sup>[1]</sup>

$$P_e = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_e}{N}, \quad (1)$$

式中  $N$  为通过系统的总比特数,  $N_e$  为发生错误的比特数。

由数字通信系统基础知识可知,误码率理论值的计算是根据接收端信号的概率密度函数,然后设置判决门限电平,积分计算得到结果。比如 FSO 系统采用开关键控(OOK)调制时,误码率为

$$P_{\text{OOK}}(e) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{R_{\text{SN}}}\right), \quad (2)$$

式中  $\operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2) dt$  为误差函数,  $R_{\text{SN}}$  为信噪比(SNR)。信噪比定义为

$$R_{\text{SN}} = \frac{E_b}{N_0}, \quad (3)$$

式中  $E_b$  为每比特能量,  $N_0$  为加性信道噪声单边功率谱密度。

实际仿真分析时,能处理的  $N$  往往是有限的。因此,一般采用蒙特卡罗方法对差错概率做近似计算。差错概率估计为

$$\hat{P}_E = \frac{N_e}{N}. \quad (4)$$

蒙特卡罗估计是无偏的,  $N$  越小估计的方差越大,  $N$  越大估计的方差越小。当  $N \rightarrow \infty$  时,则估计值收敛于真实值<sup>[1]</sup>。本文采用的蒙特卡罗仿真计算 FSO 系统 BER<sup>[2,3]</sup> 的系统简单模型如图 1 所示。

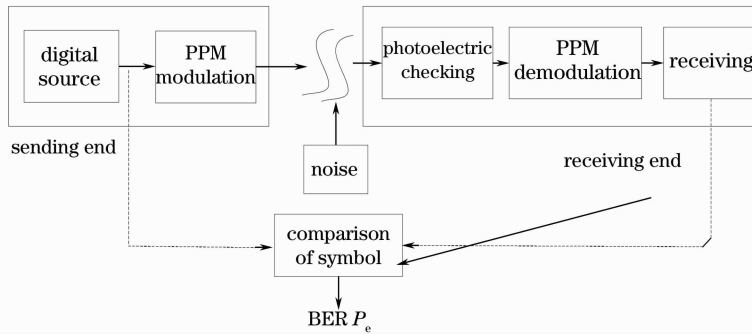


图 1 FSO 系统原理框图

Fig. 1 Block diagram of FSO system

信源产生随机发送序列,进行脉冲位置调制(PPM),然后驱动电路使得激光器发光,通过光学发射天线发射出去;激光脉冲信号进入信道传输,受到湍流和背景噪声等大气效应的影响,发生衰减、展宽、变形、漂移等。接收端的光通信机通过光学接收天线将收集到的光信号会聚到光探测器上;通过光电检测,光信号转换成电信号,送入解调器进行解调,最后到信宿还原出信息。对比接收数字序列和数字信源产生的序列,计算错误的码元数和误码率。通过改变 SNR,得到相应的 BER,可以做出在不同信噪比条件下的误码率二维曲线图,以直观地表示系统性能。

## 3 FSO 系统误码率性能仿真方法

### 3.1 信源信号产生

实际通信系统信源通常输出的是语音信号、电视信号等,这类信号的自变量和函数值都取连续值,称为

模拟信号或者时域连续信号。如果信号的自变量取离散值,而函数值取连续值,则称为时域离散信号,这种信号通常来源于对模拟信号的采样。在 Matlab 中是用时域离散信号表示时域连续信号的,时域离散信号存储在一组向量或矩阵中。对模拟信号  $x_a(t)$  进行等间隔采样,采样间隔为  $T_s$ ,得

$$x_a(t) \Big|_{t=nT_s} = x_a(nT_s), \quad -\infty < n < \infty, \quad (5)$$

式中时间引数  $n$  取整数。在实际通信仿真中为了简化,采样间隔可以不写,形成信号  $x(n)$ ,单位常用 V。要注意采样时间间隔为  $T_s$ ,采样频率  $f_s = 1/T_s$ 。

### 3.1.1 时域离散信号的功率

定义时域离散信号  $x(n)$  的瞬时功率为

$$P_{\text{inst}} = x^2(n), \quad (6)$$

式中假设系统的电阻为  $1 \Omega$ 。假设信号  $x(n)$  的  $N$  个抽样值表示瞬时功率的平均值,则平均功率

$$P_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2(n). \quad (7)$$

Matlab 计算可用命令语句为

$$p_{\text{pav}} = \text{sum}(x.^2)/\text{length}(x)$$

定义信号  $x(n)$  的方差为

$$\sigma^2(x) = E[x^2] - [E(x)]^2, \quad (8)$$

如果信号  $x(n)$  的均值为 0,则由(8)式可得方差等于平均功率。

### 3.1.2 时域离散信号的能量

功率是能量对时间的导数,因此瞬时功率对时间积分即是信号在该时间内的能量。总能量等于平均功率乘以信号持续时间:

$$E_{\text{total}} = P_{\text{ave}} t = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2(n) N T_s = T_s \sum_{n=1}^N x^2(n) = \frac{1}{f_s} \sum_{n=1}^N x^2(n). \quad (9)$$

用 Matlab 表示总能量的计算语句为

$$e_{\text{total}} = \text{sum}(x.^2)/f_s$$

### 3.1.3 平均每比特能量的计算

平均每比特能量  $E_b$  即序列的总能量除以序列的比特数:

$$E_b = \frac{1}{N f_s} \sum_{n=1}^N x^2(n), \quad (10)$$

用 Matlab 计算(10)式的语句为

$$e_b = \text{sum}(x.^2)/[\text{length}(x) * f_s]$$

## 3.2 信道模型

信道是信息传输的通道。激光信号在大气中传输时,一方面受到大气分子和气溶胶粒子的吸收和散射,造成辐射能量衰减;另一方面受到由大气折射率的随机起伏造成的光束闪烁、弯曲、跳动、扩展等大气湍流效应。在接收端光电检测还会产生热噪声和散粒噪声等。简单的信道仿真模型如图 2 所示,将各种吸收和散射衰减用衰减系数表示为乘性噪声,热噪声、背景光等用加性高斯噪声表示。

信道衰减系数可以通过测量系统得到,或者采用已有的经典模型。加性高斯白噪声是通信理论中极为重要的一类随机噪声,其概率分布服从高斯分布,功率谱密度在整个频率范围内是常数。设噪声单边功率谱密度为  $N_0$ ,  $x(n)$  的抽样频率为  $f_s$ ,由耐奎斯特定理可得系统带宽为  $B = f_s/2$ 。所以噪声平均功率为

$$p_n = \frac{N_0 f_s}{2}. \quad (11)$$

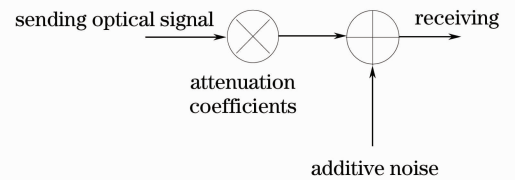


图 2 FSO 信道模型

Fig. 2 Channel model of FSO

用 Matlab 产生方差为  $p_n$  的高斯噪声的语句为

$$n = \text{sqrt}(pn) * \text{randn}[1, \text{length}(x)]$$

### 3.3 接收端信号

接收到的光信号经过光电转换,采用电平判决进行检测,然后送入解调器输出数字信号序列。假设数字信源输出信息序列为  $T_x$ ,解调器输出信息序列为  $R_x$ 。因  $T_x$  要经过调制器、信道和解调器再到信宿,所以进入到信宿端的信号既受到信道噪声的干扰,又产生了信号延迟。那么接收端信号中的有用信息序列前后就会有无用信息序列存在。如图 3 所示,接收端信息序列加入了因为信号延迟所产生的无用信息。在 Matlab 仿真计算误码率时,要将接收端序列中的有用信息序列和发送端的信源信息序列进行比较以确定误码数目。因此,要在接收序列中确定出有用信息序列。

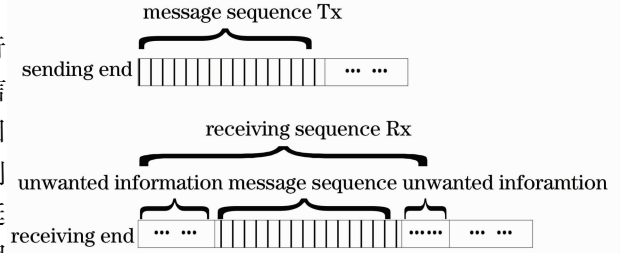


图 3 接收端信号

Fig. 3 Signal at the receiving end

在 Matlab 仿真时,利用序列相关法,即用  $R_x$  和  $T_x$  进行相关运算,确定出  $R_x$  中和  $T_x$  相关函数最大的一段序列,认为就是接收端的有用信息序列。

假设发送信源序列  $T_x$  长度为  $l_{Tx}$ ,接收端序列长度为  $l_{Rx}$ ,则接收端信息序列相对于发送端的信息序列向后偏移量  $l_{off}$  的范围是  $0 \leq l_{off} \leq l_{Rx} - l_{Tx}$ 。Matlab 仿真命令语句为

```
for lag = 1 : lRx - lTx + 1
    cor(lag) = xcorr{Tx,Rx[1,lag:(lag + lRx - 1)]};
end
m == max(cor);
offset = find(m) - 1
```

### 3.4 计算误码率

比较  $T_x$  和  $R_x$  中的信息序列以计算误码数目。Matlab 的命令语句为

```
err = Tx - Rx[1,offset + 1:offset + length(Tx)]
error = sum[abs(err)]
ber = error/length(Tx)
```

式中  $err$  表示两序列相减,如对应位相同则相减值为 0,不同则相减值为  $\pm 1$ 。 $error$  表示求出  $err$  序列中所有非 0 位的个数。 $ber$  表示误码率,即非 0 位数目除以序列总长度。

## 4 FSO 仿真

根据 FSO 系统误码性能估计原理和仿真方法,利用 Matlab 软件建立 FSO 系统的蒙特卡罗仿真图,如图 4 所示。原理如下。

1) 数字信源:Bernoulli 二进制数产生器生成随机比特序列。

2) 信道编码:采用低密度奇偶校验(LDPC)码<sup>[4~7]</sup>作为纠错码。码长为 1024 bit,码率为 1/2,编码和译码实现模块如图 5 所示。

3) PPM<sup>[8]</sup>:生成输入激光器的 PPM 驱动信号。本系统选择 256 进制 PPM。将 LDPC 编码后的每 8 bit 设为一组,转换成 256 进制的整数,一个 PPM 信息帧向量由 512 个元素组成,其中前 256 个元素皆为“0”,称为静默时段(又称保护时段),后 256 个元素只有一个为“1”,其余的皆为“0”,根据元素“1”出现的位置来表示不同的信息。PPM 信息帧的结构如图 6 所示。

4) 激光器:根据 PPM 驱动信号,激光器发出激光脉冲。驱动信号为“1”时,激光器发出激光脉冲;驱动信号为“0”时,激光器处于静默状态,不发射激光脉冲。这样,激光器输出的光信号与驱动信号的结构一致。一个激光脉冲信息帧可用向量  $R_m$  来表示,

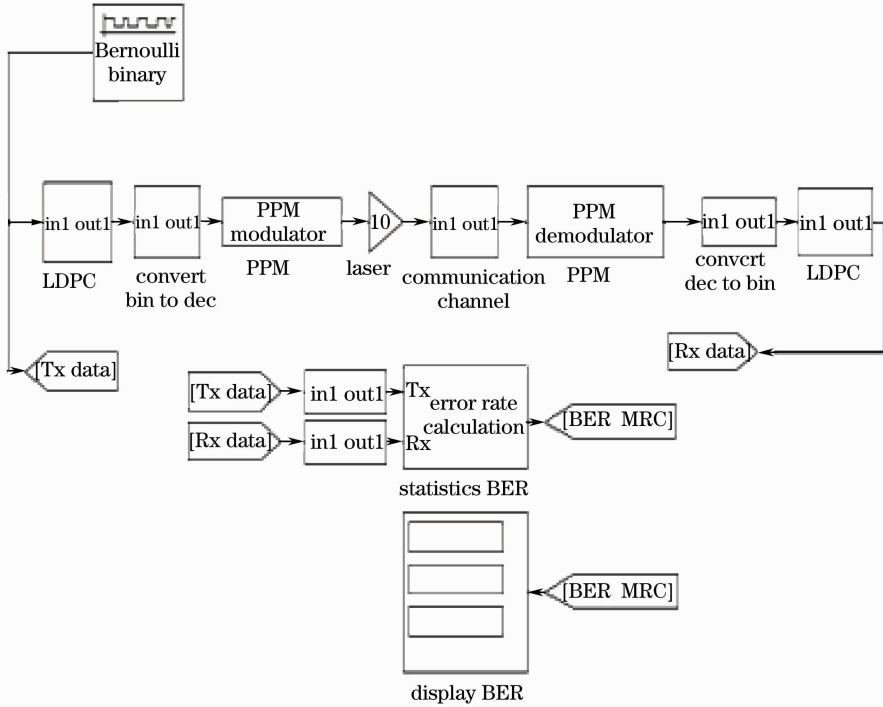


图 4 Simulink 仿真图

Fig. 4 System simulation modeling based on Simulink

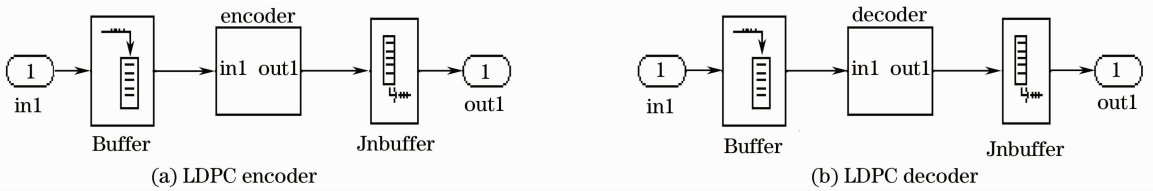


图 5 LDPC 码编码和译码模块

Fig. 5 Modules for encoding and decoding of LDPC codes

$$\mathbf{R}_{in} = [0 \cdots 0 \cdots 0 \cdots 0 \cdots 0 M 0 \cdots 0], \quad (12)$$

其中  $M$  表示激光器的驱动强度。

5) 信道模型<sup>[9,10]</sup>: 将随机大气信道衰减和背景噪声的影响加到激光器输出的 PPM 光信息帧中。

将大气信道中各种吸收和散射衰减用衰减系数表示为乘性噪声。热噪声、背景光等用加性高斯噪声表示。在实验系统测量和理论分析的基础上建立信道模型, 主要要考虑信道衰减系数和背景噪声的确定。

信道衰减系数的测量方法如下。激光器发出的激光脉冲信号经发射天线准直后发射到大气信道。在接收端, 激光信号被接收天线接收后, 会聚成光斑点像照射在接收屏上, 在接收屏前加暗箱以抑制背景光的影响, 利用光功率计将光斑点转化为功率值, 再由数据采集系统传输到计算机中。

信道衰减系数的计算公式为

$$\tau = \frac{P_R}{P_O}, \quad (13)$$

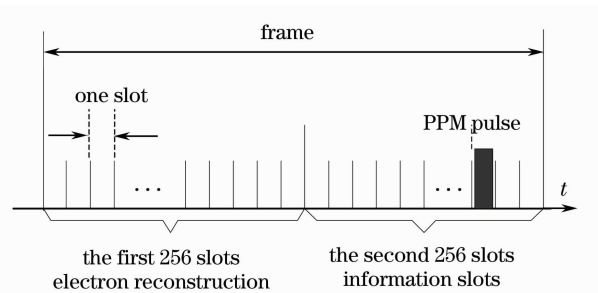


图 6 PPM 信息帧结构图

Fig. 6 Frame structure of PPM

式中  $P_R$  为接收到的激光功率值,  $P_O$  为激光器输出功率值。

背景噪声包括背景光、探测器本身产生的散弹噪声和热噪声。背景噪声测量方法为:大气背景光不经过暗箱处理,直接由光学天线接收,在接收屏上会聚光斑,光功率计检测到后,由数据采集系统存储至计算机中。

建立的光 PPM 信道模型原理图如图 7 所示。

激光器发出的光 PPM 向量  $\mathbf{R}_{in}$  与  $\tau$  相乘,得到信道衰减以后的信号向量  $\mathbf{R}_1$ :

$$\mathbf{R}_1 = \tau \mathbf{R}_{in} = [0 \cdots 0 \underbrace{0 \cdots 0}_{256} \underbrace{0 \cdots 0}_{256} (\tau M) 0 \cdots 0]. \quad (14)$$

读取噪声向量  $\mathbf{R}_N$ , 与  $\mathbf{R}_1$  进行加法运算,得到信道输出向量  $\mathbf{R}_{out}$ :

$$\mathbf{R}_N = [M_1 M_2 \cdots M_{511} M_{512}], \quad (15)$$

$$\mathbf{R}_{out} = \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_N = [0 \cdots 0 \underbrace{0 \cdots 0}_{256} \underbrace{0 \cdots 0}_{256} (\tau M) 0 \cdots 0] + [M_1 M_2 \cdots M_{511} M_{512}] = [M_1 \cdots M_{256} \cdots (\tau M + M_k) \cdots M_{512}], \quad (257 \leq k \leq 512). \quad (16)$$

在不同信道条件下,通过改变激光器的放大倍数或者信道特性,改变信噪比,可以分别统计误码率。

图 8 为在不同信道条件下的 FSO 系统误码率特性图。在晴朗和雨天的天气条件下,大气衰减系数和背景噪声比较小,信噪比为 6 dB 时,误码率分别为  $10^{-6}$  和  $10^{-5}$ ,大气激光通信有较高的可靠性;雪、雾天气条件下,大气衰减系数和背景噪声增加,信噪比为 6 dB 时,误码率分别为  $10^{-4}$  和  $10^{-3}$ ,系统性能较差。

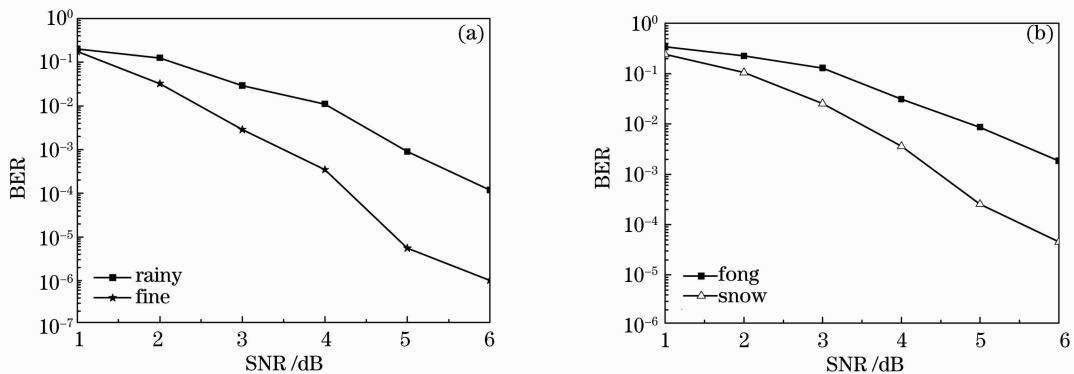


图 8 不同信道条件下的误码率

Fig. 8 BER under different channel conditions

## 5 结 论

本文对如何统计 FSO 数字通信系统的误码率性能进行了详细论述,并用实例介绍了统计系统误码性能的原理,期望能对 FSO 数字通信系统的设计研究和性能评估提供帮助。

## 参 考 文 献

- Justin Redd. The estimate of BER of the numerical communication system[J]. *Test and Automation*, 2005, (1): 68~70  
Justin Redd. 数字通信系统中的误码率估计[J]. *测试与自动化*, 2005, (1): 68~70
- Qiang Shijin. Comparison of error-correcting code performance in wireless optical communication simulative systems[J]. *Study on Optical Communications*, 2008, (3): 17~18  
强世锦. 基于大气激光通信仿真系统的纠错码性能比较[J]. *光通信研究*, 2008, (3): 17~18
- Long Wei. BER analysis for wireless optical communication system[J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2007,

2(5): 396~400

龙 伟. 无线通信系统误码率分析[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(5): 396~400

4 Jia Kejun. Design and Implement of LDPC Codes in Atmosphere Laser Communication System[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007

贾科军. 大气激光通信系统中 LDPC 码的设计与实现[D]. 西安:西安理工大学, 2007

5 Hu Hongfei. Performance analysis of LDPC in the PPM channel of FSO [J]. *Space Electronic Technology*, 2006, (3): 20~25

胡宏飞. LDPC 码在空间光通信 PPM 信道中的性能与分析[J]. 空间电子技术, 2006, (3): 20~25

6 R. G. Gallager. Low density parity check codes [J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 1962, 8(3): 208~220

7 Rich Echard, Shih-Chun Chang. The  $\pi$ -rotation low-density parity-check codes [C]. IEEE Global Telecommunications Conference, 2001, 980~984

8 Jia Kejun, Xue Jianbin, Peng Duo *et al.*. Modulation technologies under weak atmospheric turbulence channel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, 36(3): 569~573

贾科军, 薛建彬, 彭 铎 等. 弱湍流信道中的调制技术[J]. 中国激光, 2009, 36(3): 569~573

9 Wang Lili. The testing saystem for optical power through atmosphere[J]. *Chinese J. Light Scattering*, 2006, 17(4): 378~383

王丽黎. 基于大气激光通信系统的试验测量研究[J]. 光散射学报, 2006, 17(4): 378~383

10 Zhou Xiangchen. Research of Free-Space Optics Access Network Archtechure[D]. XI'an: XI'an University of Technology, 2006

周向臣. 无线光接入网的体系结构研究[D]. 西安:西安理工大学, 2006