

【文章编号】 1004-1540(2013)04-0415-04

# 自由空间光通信系统天线阵接收的误码率分析

张秋丽, 王 怡, 杜 凡

(中国计量学院 信息工程学院, 浙江 杭州 310018)

**【摘要】** 为了提高通信链路接收端的接收性能,降低系统的误码率,提出了分布式天线阵接收技术。采用开关键控(OOK)强度调制直接检测(ID/DD),研究了对数大气湍流信道下自由空间光通信的性能。在接收端我们采用最大比合并(OC)和等增益合并(EGC)技术,推导出分布式天线阵接收的平均误码率表达式。仿真结果表明,等增益合并下,误码率的性能受天线阵子天线个数的影响比较大;选取最佳的分布式天线阵子天线的个数和减小子天线的间距可以降低信道误码率,提高空间光通信的接收性能。

**【关键词】** 自由空间光通信; 大气湍流; 分布式天线阵; 误码率。

**【中图分类号】** TN929.1

**【文献标志码】** A

## Research on the BER performance of receiver antenna arrays in free space optical communication systems

Zhang Qiuli, Wang Yi, Du Fan

(College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to improve the communication link performance and decrease bit error rates, we investigated the bit error rate (BER) performance of FSO links with antenna arrays receiving and aperture averaging over log-normal atmospheric turbulence fading channels. The intensity modulation direct detection (ID/DD) with on-off keying (OOK) was used in FSO communication systems. We employed optimal combining (OC) and equal gain combining (EGC) at the receiver and derived the average BER of the receiving antenna array for FSO communication. The simulation results showed that BER was significantly affected by the sub-antenna number of the receiver. The performance of communication link can be improved and BER can be reduced by choosing the optimum number of sub-antenna and reducing the sub-antenna interval of the receiver.

**Key words:** free-space optical communication; atmospheric turbulence; antenna array; bit error rate

相对于传统的微波通信,自由空间光通信具有带宽宽、抗干扰性强、保密性好、无需频率申请、

【收稿日期】 2013-07-22      《中国计量学院学报》网址:zgjl.cbpt.cnki.net

【基金项目】 浙江省自然科学基金资助项目(No. Q12F050034)。

【作者简介】 张秋丽(1987-),女,河南省周口人,硕士研究生,主要研究方向为信号与信息处理. E-mail:zql1214@126.com

通讯联系人:王 怡,女,副教授. E-mail:wcy16@cjlu.cn

体积小、功耗低等特点,近些年受到了广泛的关注。但是,大气湍流引起的强度闪烁、相位起伏、光束漂移、和波前畸变<sup>[1-4]</sup>等效应,使自由空间光通信系统的接收性能受到严重影响。

为了克服大气湍流的影响,提高自由空间光通信的接收性能。研究者提出了很多种大气湍流信道模型,主要信道模型有:对数正态分布、指数分布、K分布、I-K分布、Gamma-Gamma分布等。韩立强<sup>[5]</sup>以Gamma-Gamma分布为模型研究了基于开关键控调制的大气湍流对自由光通信的影响。Hossein<sup>[6]</sup>等利用子载波BPSK调制以K分布为模型研究了空间光通信的性能,子载波BPSK调制可以有效地减弱大气湍流引起的信号衰落。柯熙政<sup>[7]</sup>等人采用PPM调制Gamma-Gamma信道模型分析了多孔径接收下的无线激光通信的误码率性能。然而以上讨论的仅仅是自由空间光通信系统的误码率性能与信噪比的关系,没有考虑到子天线的间距对误码率的影响。

本文首先分析了开关键控调制的系统模型和对数正态分布大气湍流信道模型,在系统接收端我们选择最大比合并(OC)和等增益合并(EGC)技术,推导出天线阵接收下的平均误码率表达式,然后在不同的子天线个数和间距下对误码率随信噪比的关系进行仿真。

## 1 系统和大气湍流信道模型

### 1.1 系统模型

自由空间光通信系统采用开关键控强度调制直接检测(ID/DD),假设信道为高斯白噪声信道,则系统模型<sup>[5]</sup>为:

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

式中:y—接收端得到的电信号,x $\in$ {0,1}为调制信号, $\eta$ —光电转换效率;I—接收器接收到的光强;v是均值为0,方差为 $\sigma_v^2 = \frac{N_0}{2}$ 的加性高斯白噪声。定义系统信噪比SNR和均值 $\mu$ 分别为:

$$\text{SNR} = \frac{\eta^2 I^2}{N_0}, \mu = \frac{\eta^2 E[I]^2}{N_0}$$

式中, $E[\cdot]$ 为数学期望值,把 $E[I]$ 归一化,即 $E[I]=1$ 。

### 1.2 大气湍流信道模型

大气湍流是影响激光通信链路的最主要因

素,大气湍流对光束的影响主要表现为光束闪烁,光强闪烁会引起接收光强的随机起伏,影响链路通信的性能。采用天线阵接收可以有效地抑制湍流引起的衰落,与单个天线相比,子天线较小,制造容易,终端体积、质量和成本较低,并且可以灵活调整子天线的位置,形成较完整的成像。定义发射端到第n个接收天线的信道衰落系数为<sup>[8]</sup>:

$$I_n = I_0 \exp(2X_n) \quad (2)$$

式中: $I_0$ —无湍流情况下的信号光强度; $X_n$ —光学信号的对数振幅满足均值为 $\mu_x$ ,方差为 $\sigma_x^2$ 的统一分布的高斯随机变量。光强随机起伏符合对数分布:

$$f(I_n) = \frac{1}{2I_n} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left(-\frac{(\ln(I_n/I_0)-2\mu_x)^2}{8\sigma_x^2}\right) \quad (3)$$

为了确保衰落不衰减或者增强平均功率,把 $E[I_n/I_0]$ 归一化,即 $E[I_n/I_0]=1$ 。

在平面波情况下,方差为<sup>[9]</sup>:

$$\sigma_x^2 = 0.307 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^{7/6} L^{11/6} C_n^2 \quad (4)$$

式中: $\lambda$ —波长; $L$ —传输距离; $C_n^2$ —大气折射率结构常数。目前普遍接受的模型为H-V5/7模型,表达式为<sup>[10]</sup>:

$$C_n^2(h) = 0.00594(v/27)^2 (10^{-5}h)^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + A \exp(-h/100) \quad (5)$$

式(5)中: $H$ —高度; $v$ —风速; $A$ —近地面的大气结构常数,一般取值 $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。天线阵接收端的空间相关矩阵 $R$ 为<sup>[11]</sup>

$$R = \begin{bmatrix} 1 & b(d_{12}) & \cdots & b(d_{1n}) \\ b(d_{21}) & 1 & \cdots & b(d_{2n}) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b(d_{n1}) & b(d_{n2}) & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (6)$$

式中: $d_{ij}$ —第*i*个和第*j*个子天线的间距。公式(6)中**(d)**为标准对数协方差函数,定义如下:

$$b(d_{p_1, p_2}) = \frac{E[X(p_1)X(p_2)] - E[X(p_1)]E[X(p_2)]}{\sigma_x^2} \quad (7)$$

式中: $d_{p_1, p_2}$ — $P_1, P_2$ 两点间距离。则空间协方差矩阵 $\Gamma$ 为 $\Gamma = \sigma_x^2 R$ 。

## 2 系统性能

### 2.1 单个天线接收的平均误码率

系统采用开关键控强度调制直接检测,在接

收端有可用的信道信息,其误码率为<sup>[5]</sup>:

$$P_e = p(0)p(e/0) + p(1)p(e/1) \quad (8)$$

式中: $p(0)$ 和 $p(1)$ —发送0和1的概率; $p(e/0)$ 和 $p(e/1)$ 分别为发送0和1的条件概率.我们假设 $p(0)=p(1)=0.5$ ,则<sup>[11]</sup>:

$$P(e|I) = P(e|1, I) = P(e|0, I) = Q\left(\frac{\eta I}{\sqrt{2N_0}}\right) \quad (9)$$

$Q(\cdot)$ 为高斯函数,定义为:

$$Q(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_x^{\infty} \exp(-t^2/2) dt \quad (10)$$

与互补误差函数的关系为:

$\text{erfc}(x) = 2Q(\sqrt{2}x)$ . 则平均误码率的表达式为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{aligned} P_e &= \int_0^{\infty} f_I(I) Q\left(\frac{\eta I}{\sqrt{2N_0}}\right) dI \\ &\approx \int_{-\infty}^{\infty} \Omega(x, -\sigma_x^2, \sigma_x^2) Q\left(\frac{\eta I_0 e^{2x}}{\sqrt{2N_0}}\right) dx \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $\Omega(\mu, \nu, \omega)$ 定义为:

$$\Omega(\mu, \nu, \omega) = (1/\sqrt{2\pi\omega}) \exp(-(\mu - \nu)^2/2\omega) \quad (12)$$

## 2.2 天线阵接收的平均误码率

自由空间光通信接收端由 $N$ 个子天线组成的天线阵接收时,开关键控调制直接检测下的误码率为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{aligned} p_e(0 | I_n) &= p_e(1 | I_n) = \\ &Q\left(\frac{1}{2\sigma_v} \sqrt{\sum_{n=1}^N (\eta I_n)^2}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

则采用最佳合并比的 $N$ 个子天线组成的天线阵接收的平均误码率为:

$$\begin{aligned} P_e &= \int_I f(I) Q\left(\frac{\eta I_0}{2N\sigma_v} \sqrt{e^I}\right) dI \\ &\approx \int_{-\infty}^{\infty} \Omega(x, \mu_0, \sigma_{x0}^2) Q\left(\frac{\eta I_0}{2N\sigma_v} \sqrt{e^x}\right) dx \end{aligned} \quad (14)$$

式中噪声方差为: $\sigma_v^2 = N_0/2N$ ,均值和方差分别为: $\mu_0 = \log N + 4\sigma_x^2 - \frac{\sigma_{x0}^2}{2}$ , $\sigma_{x0}^2 = (1/N^2) \sum_{l,k} 16 \Gamma_{lk}$ .

采用等增益合并的天线阵接收的平均误码率为:

$$\begin{aligned} P_e &= \int_I f(I) Q\left(\frac{\eta I_0}{2N\sigma_v} e^{2I}\right) dI \\ &\approx \int_{-\infty}^{\infty} \Omega(x, \mu_0, \sigma_{x0}^2) Q\left(\frac{\eta I_0}{2N\sigma_v} e^{2x}\right) dx \end{aligned} \quad (15)$$

## 3 数值模拟与分析

本文取波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ,传输距离 $L$ 为1 km. 如图1所示,方差为 $\sigma_x^2 = 0.1$ ,等增益合并的不同子天线个数下误码率与信噪比的关系.由图1知:误码率随着信噪比的增加而减小,信噪比一定时,误码率随着子天线的个数的增加而减小,但是子天线个数增加到一定程度时,误码率不再降低.由图1可知增加信噪比或者子天线的个数可以降低系统的误码率,且存在最佳的接收子天线个数.

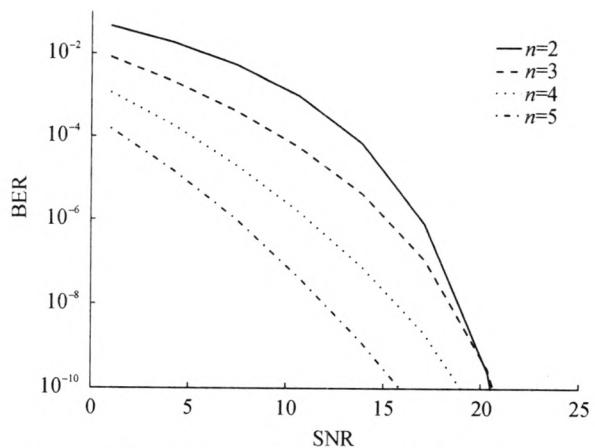


图1 不同子天线个数下,平均误码率随信噪比的变化关系

Figure 1 Average bit error rate(BER) as a function of SNR for different values of sub-antennas number of the receiver

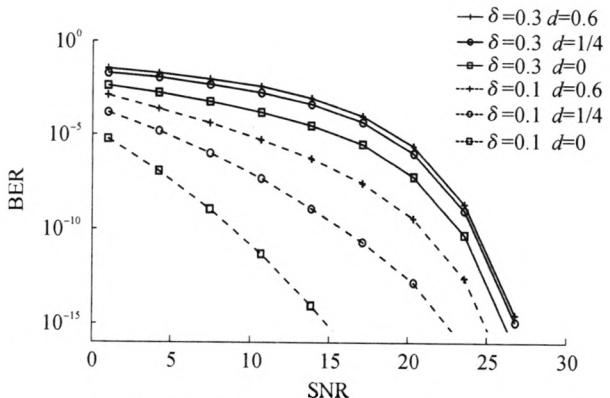


图2 不同子天线间距下,平均误码率随信噪比的变化关系

Figure 2 BER as a function of SNR for different values of sub-antenna interval of the receiver

由图2知:在等增益合并下,方差分别为0.1

和0.3时不同子天线间距下的误码率与信噪比的关系。由图2知：方差为0.1时的误码率低于方差为0.3时的误码率，方差和信噪比确定时，误码率随着间距的增大而增大。

图3为方差为0.1时，分别采用等增益合并和最佳合并，不同子天线个数下的误码率与信噪比的关系，由图3知：采用最佳合并的方法时，误码率随子天线个数的增加变化不大，且比等增益合并方法值大，由此可知选择等增益合并方法优于最佳合并方法。

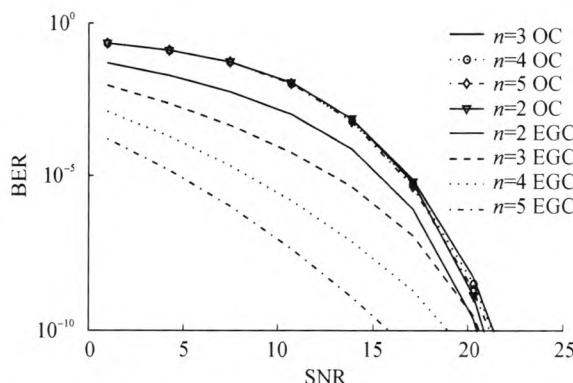


图3 分别采用等增益合并和最佳合并，不同子天线个数下的误码率与信噪比的关系

Figure 3 Comparison of OC and EGC receivers for FSO link with different values of sub-antennas number of the receiver

#### 4 结语

本文以对数分布为大气湍流信道模型，采用开关键控调制直接检测方法研究了在大气湍流影响下的自由空间光通信的性能。分别采用等增益合并和最佳合并方式，推导了天线阵接收下的平均误码率表达式。通过仿真分析了在不同子天线个数、间距大小和方差下，误码率随信噪比的变化关系。由仿真可知：噪声方差的值越小，误码率越低。在方差一定时，等增益合并下，误码率随着子天线个数的增加而减小，个数增加到一定程度时，误码率不再变化，说明存在最佳的子天线个数；最佳合并下，误码率与子天线个数关系不大；误码率随子天线间距的减小而减小。则选取最佳的子天线个数和小间距的天线阵可以降低接收系统的误码率，提高空间光通信的接收性能。

#### 【参考文献】

- [1] Tan Liying, Yang Qingbo, Yu Siyuan. Statistical distribution of fiber-coupling efficiency in the satellite-to-ground downlink[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(10): 105001.
- [2] Wu Hanling, Yan Haixing, Li Xinyang. Modal correction for fiber-coupling efficiency in free-space optical communication systems through atmospheric turbulence[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2010, 121(19): 1789-1793.
- [3] 郭立新, 骆志敏, 吴振森. 湍流大气中的光波闪烁研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2001, 28(3): 214-217.  
Guo Lixin, Luo Zhimin, Wu Zhensen, et al. Study on characteristics of fluctuation for optical wave propagation in the atmospheric turbulence[J]. *Journal of Xi dian University*, 2001, 28(3): 214-217.
- [4] 吴振森, 骆志敏, 郭立新. 湍流大气中光波闪烁的斜程问题研究[J]. 电波科学学报, 2002, 17(3): 255-257.  
Wu Zhensen, Luo Zhimin, Guo Lixin. Study on the scintillation of optical wave propagation in the slant path through the atmospheric turbulence[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2002, 17(3): 255-257.
- [5] 韩立强, 王祁, 信太克归. Gamma-gamma 大气湍流下自由空间光通信的性能[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1319-1322.  
Han Liqiang, Wang Qi, Katsunori S. Performance of free space optical communication over gamma-gamma atmosphere turbulence[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1319-1322.
- [6] Samimi H, Azmi P. Subcarrier intensity modulated free-space optical communications in K-distributed turbulence channels[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2010, 2(8): 625-632.
- [7] 柯熙政, 宋鹏, 裴国强. 无线激光通信中的多孔径接收技术研究[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1-6.  
Ke Xizheng, Song Peng, Pei Guoqiang. Research on multi-aperture reception in wireless laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1-6.
- [8] Studer C, Bolcskei H. Soft-input soft-output sphere decoding[C]//Proceedings of the International Symposium on Information. Toronto: IEEE, 2008: 2007-2011.
- [9] Karp S, Gagliardi R, Moran S E. *Optical Channels*[M]. USA: Plenum Hall, 1988: 3331-3450.
- [10] Andrews L C, Phillips R L, Yu P T. Optical scintillations and fade statistics for a satellite-communication system [J]. *Applied Optics*, 1995(34): 7742-7751.
- [11] Navidpour S M, Uysal M, Kavehrad M. BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(8): 2813-2819.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>

---



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>