

## 弱湍流条件下大气光通信的阈值优化方法

李 菲<sup>1</sup>, 路后兵<sup>1,2,3</sup>

- (1. 电子工程学院 光电系, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学 核探测与核电子学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026;
3. 中国科学技术大学 近代物理系, 安徽 合肥 230026)

**摘 要:** 大气湍流引起的闪烁效应会严重影响大气光通信系统的性能。自适应判决阈值技术虽然可以有效改善大气光通信系统的误码率(BER),但是难以进行实时应用。提出了一种根据各种参数统计值,将阈值设置为常量的阈值优化方法。主要考虑乘性高斯噪声并假设闪烁满足对数正态分布,分析了湍流信道中大气光通信系统的最优常量阈值,并将数值分析结果与弱湍流条件下的实验数据进行对比。对比的结果显示,最优常量阈值方法是有效可行的,相对于自适应阈值的性能降低也是可以接受的。分析还显示,在忽略孔径平均效应条件下,最优常量阈值主要取决于对数光强起伏方差和平均接收光功率,而其他参数的影响基本可以忽略。基于分析结果,提出了可以在实际应用中估计最优常量阈值的非线性模型。

**关键词:** 光通信; 大气湍流; 探测阈值; 误码率

中图分类号: TN929.12 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1211004

## Optimization method for detection threshold of atmospheric optical communication under weak turbulence condition

Li Fei<sup>1</sup>, Lu Houbing<sup>1,2,3</sup>

- (1. Department of Optoelectronics, Electronic Engineering Institute, Hefei 230031, China;
2. State Key Laboratory of Particle Detection & Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
3. Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Scintillation caused by atmospheric turbulence impairs the performance of the atmospheric optical communication system. Bit error rate (BER) of an atmospheric optical communication system can be improved by using an adaptive detection threshold, which is difficult to implement in real time. As a sub-optimum method, optimizing the threshold to a constant value according to statistics of parameters was proposed. Assuming multiplicative Gaussian noise and lognormal scintillation, the optimum constant threshold of an atmospheric optical communication in turbulence channel was analyzed. The result of numerical analysis was compared with experimental data obtained in weak turbulence. Results of experiment and numerical analysis show that optimizing constant threshold is necessary and the performance degradation compared to adaptive thresholding is acceptable. Neglecting aperture-averaging

收稿日期: 2016-04-15; 修订日期: 2016-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(11375263)

作者简介: 李菲(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事大气激光通信方面的研究。Email: 18019541288@189.com

effects, the dependence of the optimum constant threshold on log amplitude variance and average received signal power was analyzed and the influence of other parameters was proved to be negligible. Based on previous analysis, a non-linear model was proposed to estimate the optimum constant threshold in practice.

**Key words:** optical communications; atmospheric turbulence; detection threshold; bit error rate

## 0 引言

大气光通信是利用激光光波作为载体,在大气信道中直接进行信息传送的一种技术。相对于光纤通信系统,大气光通信的价格低廉且易于架设。而相对于微波通信系统,它具有通信容量大、保密性好、抗电磁干扰能力强、不需要无线电频率使用许可、设备体积小、重量轻和功耗低等优点。因此近年来作为一种独特的无线通信技术,大气光通信在国防和经济领域都获得了广泛的关注<sup>[1-2]</sup>。然而,大气光通信系统的性能受到很多因素的影响<sup>[3]</sup>,尤其在很大程度上依赖于收发两端之间的大气信道条件。目前,如何抑制大气效应和提高大气光通信系统性能,已经成为了研究的一个重点<sup>[4-8]</sup>。

在不受湍流影响且信号电平的均值和方差已知的条件下,使用基于最大似然原则的自适应阈值技术可以使误码率(BER)降低几个数量级。但是在实际大气信道中,闪烁效应会引起信号电平的波动,进而影响到最佳判决阈值。目前一种可行的阈值判决方法是使用卡尔曼滤波器跟踪信号电平均值和方差的波动,但是在实际系统中难以实现对信号电平的快速精确跟踪<sup>[9]</sup>。为此,提出了一种阈值优化的次优方法,即根据平均信号强度和湍流强度等相对缓变的统计量,计算得到一个在短时间内可视为常量的最优阈值。

基于 OOK 编码和强度调制/直接探测(IM/DD)工作方式,文中主要分析了大气湍流信道中激光通信系统最优常量阈值,建立了闪烁条件下的系统数学模型,将数值计算的结果与实验数据进行了对比分析,并使用非线性回归的方法得到了最优常量阈值的近似计算公式。相比之前使用跟踪预测得到的最优阈值,这种常量最优阈值对系统性能的提升效果较差,但是对于阈值更新的频率要求则低得多,因

而实现的技术难度也大大降低。相比之前使用跟踪预测得到的最优阈值,这种常量最优阈值对系统性能的提升效果较差,但是对于阈值更新的频率要求则低得多,因而实现的技术难度也大大降低。

## 1 系统模型

### 1.1 大气传输

为了简化模型,忽略了大气的吸收和散射效应,并假设信道是静态且各态遍历的。由于光通信传输速率远大于大气的扰动频率,所以可认为每个时隙内接收到的光强独立且稳定,若仅考虑光强起伏的影响,IM/DD 系统接收光功率  $P_R$  可表示为:

$$P_R = P_S X + P_B \quad (1)$$

式中:  $P_S$  为无湍流条件下的信号光功率;  $P_B$  为背景光功率,短时间内可以视为常量。光强起伏随机调制函数,其概率分布与光强概率分布相一致;  $S$  为一个无量纲随机变量,用于描述湍流引起的信号衰落;  $X$  为调制信号,发送“1”码时  $X=1$ ,发送“0”码时  $X=\varepsilon$ ,  $\varepsilon$  与调制器的消光系数有关。

通常情况下,湍流引起的光强起伏被认为服从对数正态分布(弱湍流条件)或 Gamma-gamma 分布(中强湍流)。考虑到孔径平均效应,对于在较长距离上工作的 FSO 系统,其光强起伏的概率密度函数服从对数正态分布,可以表示为<sup>[10]</sup>:

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

式中:  $\sigma_{\ln}^2$  为对数光强起伏方差,在弱湍流条件下通常认为小于 0.3。

### 1.2 光电探测

对于发射功率有限的大气光通信系统,通常希望尽可能提高接收灵敏度,因此通常使用 APD 探测器或 PIN 探测器。这两种常用探测器的输出电流中

都包含了不容忽视的乘性噪声部分,其大小与信号强度成正比。由于乘性噪声的影响,系统的最佳判决阈值会随着信号强度波动,并且无法通过简单形式的公式直接得到。

在对探测器输出电流的噪声分析中,通常考虑暗电流噪声、热噪声、背景噪声、散粒噪声和放大器噪声等。由于这些噪声源被认为是相互独立的,输出电流的方差可以认为是各个噪声方差之和。其中暗电流噪声较小,通常可以被忽略;背景噪声在一段时间内可以被视为常量;热噪声可以被视为零均值的高斯噪声,其方差可写作:

$$\sigma_T^2 = 4K_B T f G^2 / R_L \quad (3)$$

式中: $K_B$ 为玻耳兹曼常数; $T$ 为绝对温度; $f$ 为探测器工作带宽; $G$ 为放大器增益; $R_L$ 为负载电阻。散粒噪声描述了光电子产生过程中的随机起伏,其方差大小与信号强度有关,通常可以近似为零均值的高斯噪声。由于雪崩效应的影响,APD探测器的散粒噪声大于PIN探测器,可以写为:

$$\sigma_S^2 = 2efMNG\langle U_S \rangle = 2efM^2NG^2\langle P_R \rangle R \quad (4)$$

式中: $e$ 为电子电荷; $M$ 为APD倍增因子; $N$ 为APD噪声系数; $R$ 为 $M=1$ 时的探测器响应度; $U_S=MGP_R R$ 为信号电压; $\langle \rangle$ 表示系综平均。如果使用的探测器为PIN探测器,则将公式(4)中的 $M$ 和 $N$ 取为1即可。在以上噪声源中,散粒噪声的影响占主导地位。

### 1.3 误码率

所谓误码率就是指接收码元被误判的概率,由虚警概率 $P_F$ 和漏警概率 $P_M$ 两部分组成。虚警概率是指发送“0”码时噪声的幅度大于判决阈值的概率,漏警概率是指发送“1”码时信号与噪声之和小于判决阈值的概率。假设发送“0”码和“1”码的概率相等,那么无湍流影响时的误码率可以写作<sup>[11]</sup>:

$$\text{BER} = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left( \frac{U_T - \langle U_0 \rangle}{\sqrt{2\sigma_0^2}} \right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left( \frac{\langle U_1 \rangle - U_T}{\sqrt{2\sigma_1^2}} \right) \quad (5)$$

式中: $\operatorname{erfc}(\ )$ 为互补误差函数; $U_T$ 为判决阈值; $\langle U_0 \rangle$ 和 $\sigma_0^2$ 分别为“0”码信号电压的均值和方差; $\langle U_1 \rangle$ 和 $\sigma_1^2$ 则分别为“1”码信号电压的均值和方差。

由于接收光强的随机起伏,探测器输出电压的均值和方差也应当被视为随机变量。可以用无量纲变量 $S$ 的函数表示为以下形式:

$$U_n(S) = (P_S SX + P_B) MRG, (n=0, 1) \quad (6)$$

$$\sigma_n^2(S) = 2efM^2NG^2R(P_S SX + P_B) + 4K_B T f G^2 / R_L, (n=0, 1) \quad (7)$$

由于以上公式中的光功率在实际系统中难以测量,使用可以测量的电压量将公式进一步变形得到:

$$U_n(S) = \langle U_a \rangle + \frac{SX(\langle U_1 \rangle - \langle U_0 \rangle)}{1 - \epsilon} \quad (8)$$

$$\sigma_n^2(S) = \frac{2eBFGA^2(\langle U_1 \rangle - \langle U_0 \rangle)SX}{1 - \epsilon} + \sigma_a^2 \quad (9)$$

式中:电压均值 $\langle U_a \rangle$ 和噪声方差 $\sigma_a^2$ 描述了热噪声和背景噪声的综合影响,在忽略光束扩展的条件下,可以认为 $\langle U_1 \rangle = U_1(1)$ 且 $\langle U_0 \rangle = U_0(1)$ 。由于闪烁引起的信号与噪声随机起伏,误码率可以被看作 $S$ 的条件概率,因此可以推导出平均误码率公式<sup>[12]</sup>:

$$\text{BER} = \frac{1}{4} \int_0^\infty f(S) \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{U_1(S) - U_T}{\sqrt{2\sigma_1^2(S)}} \right) + \left( \frac{U_T - \langle U_0 \rangle}{\sqrt{2\sigma_0^2(S)}} \right) \right] dS \quad (10)$$

### 1.4 最优阈值

在不受湍流影响时,对应着最低误码率的最优判决阈值 $U_{OT}$ 可以根据贝叶斯似然比检验得到,其形式可以表示为<sup>[13]</sup>:

$$U_{OT} = \frac{\sigma_1 \sigma_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \sqrt{(U_1 - U_0)^2 + 2(\sigma_1^2 - \sigma_0^2) \ln \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \right)} + \frac{U_0 \sigma_1^2 - U_1 \sigma_0^2}{\sigma_1^2 - \sigma_0^2} \quad (11)$$

由公式(8)、(9)和(11)可见, $U_1$ 、 $U_0$ 、 $\sigma_1^2$ 和 $\sigma_0^2$ 等参数都是 $S$ 的函数,因而湍流条件下的最优阈值是一个随时间变化的量。通过跟踪信号均值和方差的随机变化,可以实现阈值的自适应优化,理论上能够得到最低的误码率。然而在实际的工程应用中,实现自适应阈值不仅有相当的技术难度,而且会大大提高系统的复杂程度。

为此,笔者提出了一种阈值优化的次优方法,即根据平均信号强度和湍流强度等相对缓变的统计量,计算得到一个在短时间内可视为常量的最优阈值。虽然大气湍流会引起光强的随机起伏,但是可以假设在一段较长时间 $t$ 内,光强的平均值和湍流的强度保持稳定。如果通过统计得到 $t$ 时间内的湍流强度和 $\langle U_1 \rangle$ 、 $\langle U_0 \rangle$ 、 $\langle \sigma_1^2 \rangle$ 、 $\langle \sigma_0^2 \rangle$ 等信号强度的平均值,将它们代入公式(11)中,就可以得到这段时间内的平均误码率BER与阈值 $U_T$ 的函数关系。通过数

值仿真和实验分析,发现得到的平均误码率曲线通常存在一个最小值,与之相对应着的阈值称之为常量最优阈值。相对于自适应阈值方法,使用常量最优阈值不仅可以降低一段时间内的平均误码率,提高系统性能,还可以大大降低阈值更新频率,更适用于实际工程中。

## 2 数值分析与实验

为了研究最优常量阈值在湍流信道中的特性,文中设计并实现了一套测量不同条件下误码率的实验系统。该系统收发两端的水平距离为 1 km,分别使用 670 nm 半导体激光器和口径 100 mm 的卡塞格伦望远镜作为发射光源和接收天线。APD 探测器被安放在望远镜焦点附近,输出的信号被接入 8 位数据采集卡,由计算机软件进行数据的采集和存储,数据每次采集时间为 2 s,采样频率为 100 MHz,采集样本点数为  $2 \times 10^8$ 。计算机软件通过对采集数据的分析处理,首先得到误码率与阈值的曲线,然后对曲线做逐点扫描后得到最小平均误码率和对应的常量最优阈值。

图 1 是对一组数据使用不同阈值时得到的平均误码率曲线。图中横坐标是信号电压的均值  $\langle U_S \rangle = \langle U_1 \rangle - \langle U_0 \rangle$ ,其大小与平均信号光强成正比;空心圆点和“+”分别代表当归一化阈值  $U_{TN} = (U_T - \langle U_0 \rangle) / \langle U_S \rangle$  设为 0.2 和 0.4 时测量得到的误码率;实线和虚线则分别代表  $U_{TN}$  设为 0.2 和 0.4 时,将实测参数值代入公式(11)后计算得到的误码率。

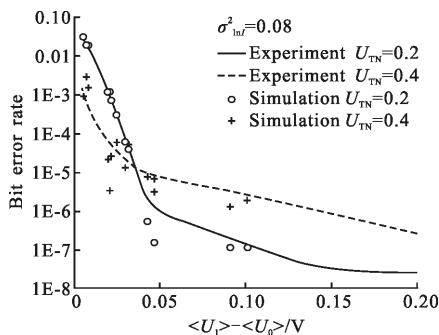


图 1 使用不同阈值得到的误码率曲线

Fig.1 BER curves versus signal voltage with different  $U_{TN}$

显然,实验数据与计算结果比较吻合,在一定程度上验证了仿真计算的可信度。根据以往经验,增大

信号光强可以显著地降低误码率,这一点在图 1 中也有所体现。但是图中还可以观察到,当信号强度增大到一定值以后,误码率降低的幅度明显减缓,甚至出现饱和的现象,这一点也与实验结果相吻合。即使信号光强相同,使用不同判决阈值所得到的误码率也会有几个数量级的差距。由此可见,在信号光较强的情况下,信号强度对误码率的影响减小,此时适当调节判决阈值能够更好地改善系统误码性能。还可以看出,在不同光强条件下,两条曲线的大小关系并不固定,这意味着最优阈值会随着信号强度的变化而变化。

如果不考虑更新频率的限制,使用自适应阈值可以得到实时误码率的理论最佳值;而常量最优阈值所对应的是一段时期的平均误码率,因此使用常量最优阈值会使误码性能相比理论值有一定的损失。如果可以选择较小的  $t$  值,把阈值更新频率提高到大气扰动频率的量级(kHz),那么这种性能损失可以缩小到忽略不计的程度,但同时也会遇到与自适应阈值同样的障碍。此外常量最优阈值是基于一段时间  $t$  内信号光强和湍流强度保持不变的假设,而随着  $t$  的增加,这个假设的可信度也会相应降低。为了衡量误码性能的损失程度,定义了性能损耗因子  $10 \log(BER_{CON} / BER_{ADP})$ ,其中  $BER_{CON}$  和  $BER_{ADP}$  是分别使用常量阈值和自适应阈值得到的最小误码率。图 2 是通过仿真计算得到的误码率与性能损耗因子等高线图,其中  $\langle P_S \rangle$  和  $\sigma_{lm}^2$  的取值范围是依照弱湍流条件下的典型大气光通信系统来设置。

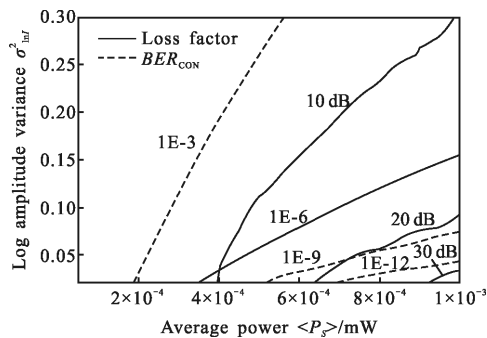


图 2 误码率与性能损耗因子的等高线

Fig.2 Contours of loss factor and  $BER_{CON}$

可以看出,性能损耗因子会随着信号光强  $\langle P_S \rangle$  的增加或对数光强起伏方差  $\sigma_{lm}^2$  的降低而迅速增加。



此外,性能损耗因子大部分情况下处于一个较低的水平(<10 dB),仅当 $\langle P_s \rangle$ 大于 $5 \times 10^{-4}$  mW 且  $\sigma_{in}^2$  小于 0.1 时,性能损耗因子可能超出 20 dB。考虑到在这种情况下,  $BER_{CON}$  的绝对值通常都小于国际通信标准  $10^{-9}$ , 因此可以认为使用常量最优阈值所带来的性能损失对于  $\sigma_{in}^2$  小于 0.3 的弱湍流条件下的常规系统是可以接受的。随着湍流强度的增大,性能损耗因子会趋近 0 dB,这也意味着在强湍流条件下,常量最优阈值的效果更加明显,可以达到与自适应阈值相当的水平。

实验数据显示,常量最优阈值  $U_{OTN}$  与  $\langle P_s \rangle$  和  $\sigma_{in}^2$  近似满足线性关系。图 3 和图 4 分别是仿真计算得到的常量最优阈值  $U_{OTN}$  与  $\langle P_s \rangle$  和  $\sigma_{in}^2$  的关系曲线。可以看出,曲线形状在一定范围内满足线性关系,这与实验数据相吻合。可以注意到,在图 3 中对于相同的  $\langle P_s \rangle$  值不同曲线的斜率值存在一定差异,在图 4 中也可以观察到类似现象,因此认为  $U_{OTN}$  与  $\langle P_s \rangle$  和  $\sigma_{in}^2$  的关系近似为指数函数或幂函数的组合。在实际系统中,使用能量控制等技术可以使  $\langle P_s \rangle$  保持稳定,但是  $\sigma_{in}^2$  是无法控制且随机变化的。通过比较可以看出,  $\langle P_s \rangle$  波动对于  $U_{OTN}$  的影响要大于  $\sigma_{in}^2$  波动的影响。进而可以推论出,只要能够保持  $\langle P_s \rangle$  的稳定,弱湍流条件下  $U_{OTN}$  的变化可以被忽略。

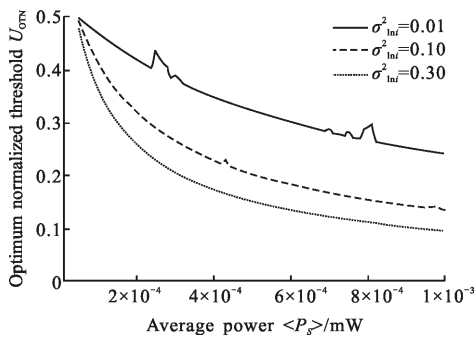


图 3  $U_{OTN}$  与  $\langle P_s \rangle$  的关系  
Fig.3  $U_{OTN}$  curves versus  $\langle P_s \rangle$

以上的  $U_{OTN}$  都是通过对误码率曲线做逐点扫描得到的,显然在实际系统中无法使用这种方法,因此找到一个类似于公式 (11) 的解析式变得非常有必要。要直接从误码率模型推导会非常困难,因此选择

使用非线性回归的方法来获得近似解。根据图 3 和图 4 中的曲线特征,假定  $U_{OTN}$  是一个关于  $\langle U_s \rangle$  和  $\sigma_{in}^2$

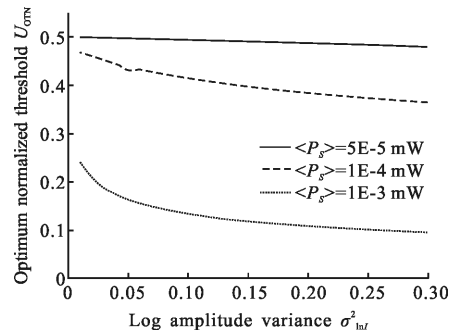


图 4  $U_{OTN}$  与  $\sigma_{in}^2$  的关系

Fig.4  $U_{OTN}$  curves versus and  $\sigma_{in}^2$

的函数,其形式可以写为:

$$U_{OTN}(\langle U_s \rangle, \sigma_{in}^2) = C_1 + C_2(\langle U_s \rangle)^{C_3} + C_4(\sigma_{in}^2)^{C_5} + C_6(\langle U_s \rangle)^{C_3}(\sigma_{in}^2)^{C_5} \quad (12)$$

式中:  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  是待定系数。使用逐点扫描的方法获得了不同条件下相应的  $U_{OTN}$  值,通过进行基于公式(12)的非线性回归,得到了各待定系数的数值解。图 5 是通过逐点扫描和非线性回归得到的  $U_{OTN}$  等高值曲线,图中实线代表逐点扫描的结果,虚线代表非线性回归的结果。拟合的统计数据显示, Reduced Chi-Sqr 的值大约为  $3.27 \times 10^{-5}$ , Adj. R-Square 的值大约为 0.995, 拟合残差的绝对值不大于 0.1, 可见拟合效果较好。对于实际系统,只要可以事先通过标定得到这些待定系数值,就可以在工作中根据  $\langle U_s \rangle$  和  $\sigma_{in}^2$  的测量值将阈值设置为最优值。

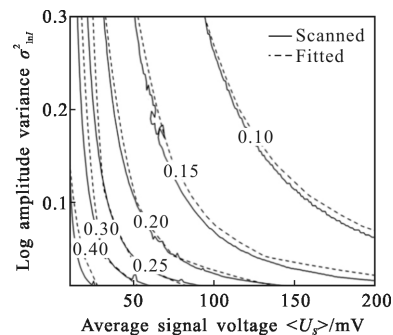


图 5 逐点扫描和非线性回归得到的  $U_{OTN}$  等高线  
Fig.5 Scanned and non-linear fitted contours of  $U_{OTN}$

### 3 结 论

大气光通信系统的性能很大程度上受判决阈值的影响。考虑到自适应阈值技术更新频率低的缺陷,提出了通过测量平均信号强度和湍流强度等相对缓变的统计量,计算得到一个在短时间内可视为常量的最优阈值。实验与仿真计算的结果显示,这种阈值优化方法实现简单,并且可以有效提升误码性能。虽然提升效果相比理论最佳值仍有一定的差距,但这种差距对于  $\sigma_{ln}^2$  小于 0.3 的弱湍流条件下的常规大气光通信系统是可以接受的。为了使常量最优阈值可以在实际工程中运用,使用非线性回归的方法得到了常量最优阈值的近似解析式。对于实际的大气光通信系统,只要可以事先通过标定得到该解析式的各项系数值,就可以根据信号强度和湍流强度的实测值计算得到常量最优阈值。

由于常量最优阈值近似解析式的各项系数是通过拟合得到,并没有与接收天线口径等系统参数联系起来。此外孔径平均效应对于光强概率分布函数的影响并没有被考虑进去。如果可以解决这些问题,研究成果的可靠性和准确性将会大大提高。

虽然以上的研究结论都是基于 IM/DD 通信系统给出的,但对于其他可以使用自适应阈值的通信系统仍然具有一定普适意义。至于相干光通信系统,其工作原理以及大气湍流的影响机理与 IM/DD 系统差异较大,常量最优阈值还需要进行改进,这些将在下一步的工作中实现。

#### 参 考 文 献:

- [1] Andrews L C, Philips R L, Hopen C Y. Laser Beam Scintillation with Applications [M]. Washington: SPIE Press, 2001.
- [2] Yang Xiuqing, Chen Haiyan. Application of optical communication technique in the Internet of Things [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 889–896. (in Chinese)  
杨秀清, 陈海燕. 光通信技术在物联网中的应用 [J]. *中国光学*, 2014, 7(6): 889–896.
- [3] Han Qiqi, Wang Qiang, Ma Jing, et al. Experimental research on vibration influence and compensation of space light to fiber coupling efficiency [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 932–939. (in Chinese)  
韩琦琦, 王强, 马晶, 等. 振动对空间光-光纤耦合效率影响及补偿实验研究 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 933–939.
- [4] Wang Yi, Zhang Ao, Ma Jing, et al. Effects of phase fluctuation and intensity scintillation caused by weak atmospheric turbulence to BER employing distributed antenna array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 758–763. (in Chinese)
- [5] Xu Shengchen, Yu Song, Ke Chaofan, et al. Experiment on auto-compensation method of phase drift in optical coherent-detection system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 481–484. (in Chinese)
- [6] Guo Shu, Zang Lingling, Han Mingzhu, et al. Interval pulse position modulation in visible light communication [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1760–1765. (in Chinese)  
郭树旭, 臧玲玲, 韩明珠, 等. 可见光通信的间隔多脉冲位置调制 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1760–1765.
- [7] Song Hongfei, Che Ying, Zhao Xin, et al. Improvement of fiber coupling efficiency in atmospheric turbulence [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3205–3211. (in Chinese)  
宋鸿飞, 车英, 赵馨, 等. 湍流环境中光纤耦合效率的提高 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3205–3211.
- [8] Wang Xu, Wang Tingfeng, Wang Dinan, et al. Rapid synchronization technology for wireless optical link [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 245–252. (in Chinese)  
王旭, 王挺峰, 王弟男, 等. 无线光链路快速同步技术 [J]. *中国光学*, 2014, 7(2): 245–252.
- [9] Burris H R, Reed A E, Namazi N M, et al. Adaptive threshold for free-space optical communication receivers with multiplicative noise [J]. *IEEE*, 2002, 3: 1473–1480.
- [10] Korotkova O, Andrews L C, Phillips R L. Model for a partially coherent beam in atmospheric turbulence with application in laser communication [J]. *Optical Engineering*, 2004, 43: 330–341.
- [11] Andrews L C, Philips R L. Laser Beam Propagation Through Random Media [M]. Washington: SPIE Press, 2005.
- [12] Li F, Hou Z H, Wu Y. Experiment and numerical evaluation of bit error rate for free-space communication in turbulent atmosphere [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 45: 104–109.
- [13] Gagliardi R M, Karp S. Optical Communications [M]. New York: Wiley-Interscience, 1995.