

# 基于 APD 自适应增益控制的近地无线激光通信信道 大气湍流抑制方法研究

周畅<sup>1,2</sup>, 于笑楠<sup>2</sup>, 姜会林<sup>2\*</sup>, 王潼<sup>2</sup>, 安宁<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup> 长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;

<sup>3</sup> 中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站, 吉林 长春 130117

**摘要** 随着 5G 时代的到来, 自由空间光通信成为无线通信领域的研究热点, 限制激光通信系统在大气信道下发展的主要因素是湍流闪烁效应。为了提高激光通信系统在大气信道下的通信性能, 本文提出了一种基于雪崩光电二极管自适应增益控制的激光传输终端大气湍流的抑制方法, 建立了大气湍流信道时域频域模型, 编写了一套闭环调节算法并在湍流条件下搭建了具有自适应增益控制算法的无线激光通信实验。结果表明: 在弱湍流条件下, 光强闪烁方差由 0.057 降低至 0.023, 开启自动增益控制的功率谱曲线更加符合 5/3 次幂律谱, 系统误码率降低两个数量级。经多次试验证明, 自适应增益控制算法有效地抑制了湍流引起的信号功率波动, 实现了高抗干扰能力的无线激光通信。

**关键词** 光通信; 自由空间光通信; 大气湍流; 雪崩光电二极管; 自适应增益控制

**中图分类号** TN929.1

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202249.0406002

## 1 引言

以激光作为传输载体的无线激光通信技术结合了微波通信及光纤通信的优势, 自由空间光通信(FSO)具有通信速率高、通信距离长、抗干扰性强、功耗低等优点, 并且不需要铺设光纤线缆, 已成为当前无线通信技术领域的研究热点<sup>[1-5]</sup>。对于无线自由空间激光通信, 最严重的问题是大气信道的影响, 其中大气湍流引起的光强闪烁效应使接收机接收到的通信数据叠加了抖动和衰落, 这必然会导致通信质量下降。

近年来, 针对大气湍流引起的光强闪烁现象, 人们提出了众多解决方案, 如 Yuksel 等<sup>[6-7]</sup>提出了一种孔径平均的方法, 即利用多帧图像分析接收的强度闪烁模式以优化设计和配置自由空间光学通信链路。Lee 等<sup>[8]</sup>研究了分集相干和非相干接收机在衰落、背景噪声等各种干扰条件下的性能并发现分集

相干检测比分集直接检测的功率增益明显增多。Li 等<sup>[9]</sup>阐述了采用正交阵列相移键控(QPSK)调制的海上大气相干自由空间光学的性能, 并利用自适应光学(AO)技术补偿大气湍流。Zhang 等<sup>[10]</sup>研究了一种基于低密度奇偶校验(LDPC)编码轨道角动量(OAM)的均匀圆形阵列自由空间光学系统在大气湍流衰落信道下的信道估计。尽管这些方法都在抑制大气湍流方面具有独特的作用, 但这些方法都有较大的成本, 如体积过于庞大、软硬件较为复杂、信息传输过程中容易损失数据等。

在大气湍流信道中, 探测器探测后进行光电转化得出的电信号可直接表征光信号的强度起伏<sup>[11-12]</sup>。Yao 等<sup>[12]</sup>提出了对自由空间链路上基于雪崩光电二极管(APD)探测器的多电平脉冲幅度调制(M-PAM)光信号传播模型的性能进行表征, 表明通过增加 APD 的增益来降低 APD 的噪声是提高传输速率的有效方法, 分析了在相同大气湍流

收稿日期: 2021-05-17; 修回日期: 2021-06-18; 录用日期: 2021-06-30

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20200801050GH)

通信作者: \*hljiang@cust.edu.cn

条件下, APD 增益越大对降低平均误码率 (ABER) 性能效果越明显, 但并未对大气湍流闪烁效应提出改善方法。从通信的角度来讲, 解决信号抖动衰落等问题最直接的方法是自动增益控制, 通常采用的方法是放大器自动增益控制 (AMP-AGC), 即在后端放大器电路上进行自动增益控制。但是这种方法抑制抖动和衰落的能力十分有限, 会受到前端放大器的限制, 且动态范围没有明显改变, 因此本文采用的方法是对前端雪崩光电二极管进行自动增益控制 (APD-AGC), 该项技术是更改反偏电压以控制 APD 的倍增因子, 总倍增因子范围可从 2 倍调整至 20 倍, 因此从理论上讲, 动态范围可扩大 3~13 dB, 对抑制大气湍流和扩大动态范围起到了重要作用。

本文介绍了 APD-AGC 技术, 对该技术建立了理论模型, 设计了 APD 电流反馈和偏置控制电路, 编制一套比例、积分微分 (PID) 闭环调节算法, 并在湍流信道条件下开展了距离为 500 m 的弱湍流抑制 FSO 实验。

## 2 大气湍流对空间激光通信影响机理分析

大气湍流是由地球表面和大气之间的温度差所引起的, 在这种温度梯度存在的情况下, 吹过地球表面空气动力学粗糙区域的风会造成大气折射率的随机波动, 从而形成光学湍流。通过大气湍流传播所接收到的光强起伏称作“闪烁”。当湍流经过半径远大于湍流自身的光束时, 许多尺寸不一的涡旋会对经过其中的光束进行散射、衍射和反射等, 多光束相互干涉而造成光强在时间及空间内随机起伏, 这种现象称为光强闪烁。

闪烁指数 ( $\sigma_I^2$ ) 的定义是光波的归一化光强的方差, 可表示为<sup>[13-15]</sup>

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1, \quad (1)$$

式中,  $I$  为光强,  $\langle \rangle$  为平均运算符。

光波传播的理论研究传统上分为弱涨落理论和强涨落理论。当使用 Kolmogorov 谱研究沿长度为  $L$  的路径传播的平面波或球面波时, 通常用 Rytov 方差 ( $\sigma_R^2$ ) 来区分这些情况<sup>[14]</sup>。

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k'^{7/6} L^{11/6}, \quad (2)$$

式中:  $C_n^2$  为大气折射率结构常数, 是折射率波动强度的度量, 量纲为  $m^{-2/3}$ ;  $k'$  为波数;  $L$  为传播距离。通常, Rytov 方差也是表述湍流强弱程度的物理量,

弱湍流对应强度为  $\sigma_R^2 < 1$ , 此时的 Rytov 方差从物理意义上可视为光强闪烁系数<sup>[14]</sup>。

光强闪烁会造成接收机的功率损失和起伏, 并最终导致接收信号衰减至低于可检测阈值。在这样的环境下, 可以从概率密度函数 (PDF) 的数学模型推导出随机光强衰落信号。

弱湍流情况下的光强概率密度函数  $p_I(I)$  服从对数正态分布<sup>[15]</sup>

$$p_I(I) = \frac{1}{I} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_R^2}} \exp \left[ -\frac{\left( \ln I + \frac{1}{2}\sigma_R^2 \right)^2}{2\sigma_R^2} \right], \quad (3)$$

式中,  $I$  为在湍流情况下接收的归一化光强。

由于大气湍流具有一定的不确定性, 采用随机场理论对其进行分析。对于时间的确定且可积函数  $f(t)$  来说, 该时间函数的频率可由傅里叶变换表示

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} f(t) dt, \quad (4)$$

式中,  $\omega$  是角频率。原函数  $f(t)$  可以从  $F(\omega)$  的傅里叶逆变换得知

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} F(\omega) d\omega. \quad (5)$$

而对于复杂平稳随机过程来说, 可以用黎曼积分来进行表述<sup>[16]</sup>

$$B_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega\tau} S_x(\omega) d\omega, \quad (6)$$

式中,  $S_x(\omega)$  是随机过程  $x(t)$  的功率谱, 也叫作功率谱密度。(6) 式也证明了功率谱  $S_x(\omega)$  是协方差函数  $B_x(\tau)$  的逆变换, 二者互为傅里叶变换对, 即维纳辛钦定理, 如下所示

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\tau} B_x(\tau) d\tau. \quad (7)$$

大气湍流是随时间和空间不断变化的, 因此时间和空间统计之间的关系是大气测量的中心问题。同时, 大气湍流具有各向同性及各态历经性, 结合泰勒“冰冻”假说的相关内容, 通过观测方向上的平均风速, 将空间统计数据转换为时间统计数据, 根据 Ishimaru<sup>[16]</sup> 和 Tatarski<sup>[17]</sup> 的理论, 功率谱密度  $S_I(\omega)$  可以由时间协方差函数的傅里叶变换定义

$$S_I(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} B_I(\tau, L) e^{-i\omega\tau} d\tau = 4 \int_0^{\infty} B_I(\tau, L) \cos(\omega\tau) d\tau, \quad (8)$$

式中,  $B_I(\tau, L)$  是时间的协方差函数。根据上述给出的傅里叶变换与逆变换内容, 可得出傅里叶逆变换结果

$$B_I(\tau, L) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S_I(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega, \quad (9)$$

在此,将 Kolmogorov 的结构函数理论推广到统计均匀的、各向同性的温度波动,得到了与纵向速度波动相同的幂律关系<sup>[14]</sup>,即

$$D_n(R) = \begin{cases} C_n^2 l_0^{-4/3} R^2, & 0 \leq R \ll l_0 \\ C_n^2 R^{2/3}, & l_0 \ll R \ll L_0 \end{cases}, \quad (10)$$

式中, $D_n(R)$ 为结构函数, $C_n^2$ 是折射率结构常数, $R$ 为传播距离, $l_0$ 是内尺度, $L_0$ 是外尺度。

Kolmogorov 通过量次分析表明,折射率的结构函数在惯性副区遵从 5/3 次幂律,惯性副区内的折射率波动的三维功率谱  $\Phi_n(\kappa)$  可以由 5/3 次幂律表示

$$\Phi_n(\kappa) = C_n^2 \epsilon_0^{2/3} \kappa^{-5/3}, \quad (11)$$

式中: $\epsilon_0$ 为平均能量耗散率; $\kappa$ 是空间波数, $1/L_0 \ll \kappa \ll 1/l_0$ 。

大气湍流引起的波动会直接影响探测器的信噪比参数,从而影响误码率(BER,  $R_{BE}$ )<sup>[17]</sup>。定义 OOK 激光通信系统的误码率关系为

$$R_{BE} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}}, \quad (12)$$

式中: $\operatorname{erfc}(x)$ 为互补误差函数; $Q = (A_1 - A_0)/(\sigma_1 + \sigma_0)$ , $A_1$ 和 $\sigma_1$ 代表信息位为 1 时的信号幅值和噪声幅值, $A_0$ 和 $\sigma_0$ 为信息位为 0 时的信号幅值及噪声幅值。

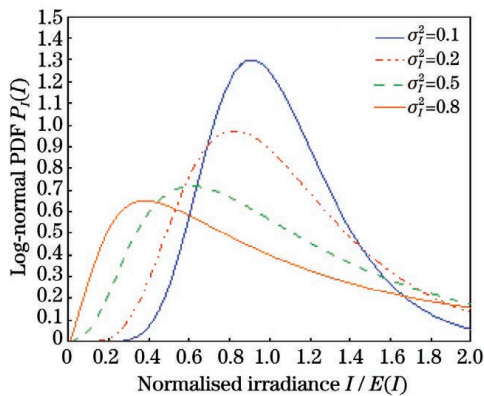


图 1 不同闪烁方差下的光强概率密度分布曲线

Fig. 1 Light intensity probability density distribution under different optical intensity flicker

在此仅考虑大气湍流影响下的信噪比方程,以建立闪烁方差及误码率的关系式,信噪比的表达式如下

$$R_{SN} = \frac{\langle A_1^2 \rangle}{\langle \sigma_1^2 + \sigma_0^2 \rangle} = Q^2 = \frac{1}{\sigma_I^2}. \quad (13)$$

结合(12)式及(13)式可得出闪烁方差变化及通信误

码率之间的关系。可以看出,当误码率值在  $1 \times 10^{-6}$  左右,此时闪烁方差应控制在 0.05 左右,信噪比为 20 dB;误码率值在  $1 \times 10^{-9}$  左右,对应光强闪烁方差在 0.03 之内,此时信噪比为 33 dB 左右。综上所述,不同光强闪烁的变化可以引起通信误码率及信噪比的变化。

### 3 自适应乘法 APD 接收机方案

在明确大气湍流对通信质量的影响之后,考虑 APD 增益控制补偿的原理。APD 乘法闭环调节算法符合雪崩光电二极管的乘法特性。根据 APD 检测理论<sup>[19]</sup>,APD 的响应方程为

$$i_s = \eta PM, \quad (14)$$

式中: $P$ 为输入光功率; $i_s$ 为 APD 的输出电流; $\eta$ 为探测器的响应率; $M$ 为倍增因子,倍增因子在信号放大和增益控制算法中发挥着关键作用, $M$ 的增加有助于提高 APD 的探测灵敏度,实现改善通信系统信噪比的目的。可利用 APD 此特性改善激光通信系统接收端对大气湍流闪烁效应的抑制效果。

$M$ 可表述为

$$M \approx \left[ 1 - \left( \frac{V}{V_B} \right)^{n'} \right]^{-1}, \quad (15)$$

式中, $V$ 为反向偏压, $V_B$ 为击穿电压, $n'$ 与材料、器件结构及入射波长相关且为一常数。本文采用 Voxel Siletz BSI RIP1-JJRC 系列雪崩光电二极管,该 APD 的击穿电压为 64 V,根据 APD 手册中的增益偏置曲线计算出  $n'$  为 1.62。将(15)式代入(14)式中,可以看出反向偏置电压  $V$  对输出电流的控制效果,根据湍流大小实时调整 APD 增益因子  $M$ ,实现 APD 增益因子的闭环调控,有效弥补湍流闪烁效应对通信系统的影响。

在此基础上,实验设计了 APD 增益控制接收机,接收机的硬件如图 2 所示。APD 的阴极与控制终端,包括电流镜检测光电流,接入的电流镜可提取 APD 光生电流的镜像,经过低通滤波器整形消除调制信息的影响,得到平均光电流值,经放大、模数转换(ADC)实现光功率的采集,并反馈给控制数字模拟转换器(DAC)的微控制器来控制高压电源进而调节 APD 增益。APD 的阳极与跨阻放大器(RTIA)连接,对通信数据实现电流到电压的转换,经放大、判决、时钟数据恢复(CDR)等电路完成数据信号的解调。

控制算法流程图如图 3 所示,首先设置定时器每 500  $\mu\text{s}$  中断一次,并由 ADC 对 APD 的平均光电

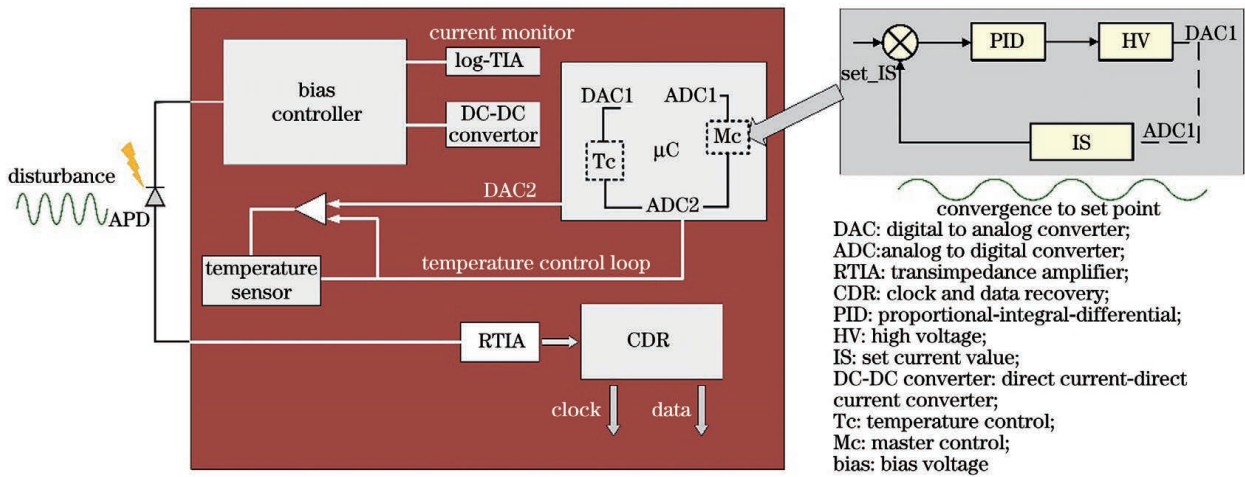


图 2 APD 接收机结构图

Fig. 2 APD receiver architecture diagram

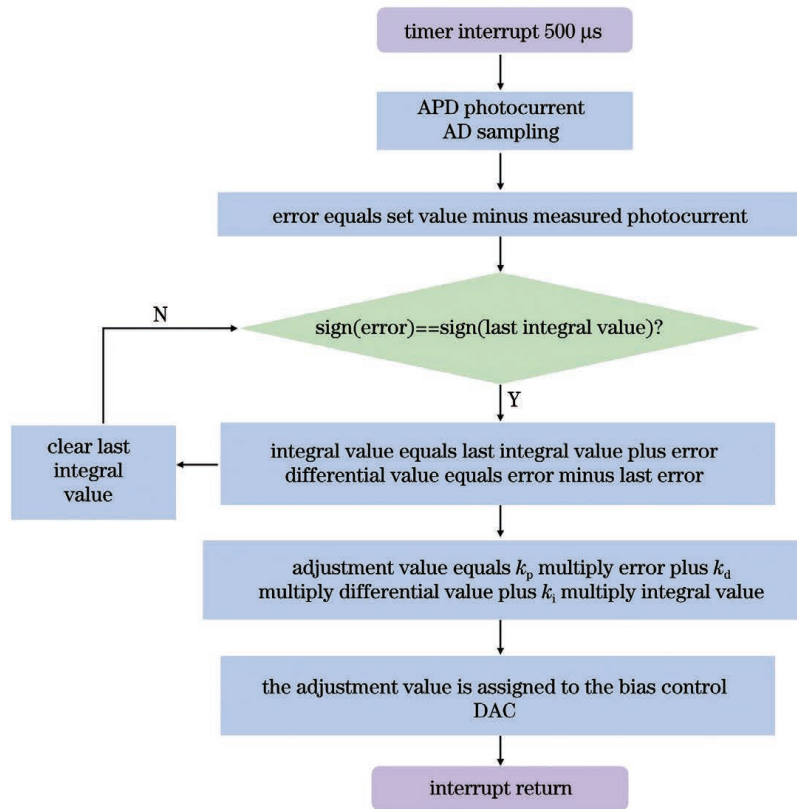


图 3 自适应控制算法流程图

Fig. 3 Flow chart of adaptive control program

流值进行采样,该值为被测光电流,然后将被测光电流与设定的电流值进行比较,其中设定的电流值主要取决于激光通信链路接收到的平均光功率,并产生反馈误差,该反馈误差即为控制器的输入,通过PID滤波和调节高压来实现补偿。将该反馈误差与上一个积分值作为清除积分值的判据,而后开始生成积分、微分值。积分值是由上一个积分值和电流误差累加而形成的,微分值则等于电流误差减去上

一个误差值,上述过程即为PID滤波器算法。 $k_p$ 、 $k_d$ 、 $k_i$ 分别为比例、微分、积分系数。

#### 4 实验与结果

为了验证上述方法,设计如下实验,自由空间光通信系统普遍采用强度调制(IM)/直接探测(DD)的方式,假定通信系统仅受到大气信道湍流的影响,实验总体框图如下:

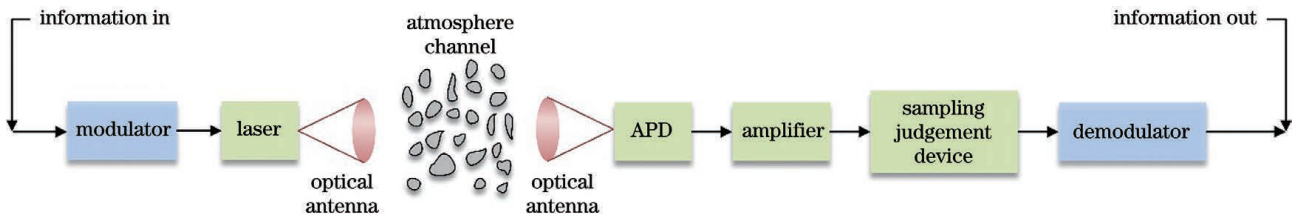


图 4 通信系统框图

Fig. 4 Communication system diagram

IM/DD 通信模型从结构上可以分为发射端和接收端两部分。发射端待传数据经调制后加载在激光器上,通过光学天线整形后以平行光发射,经过大气信道到达接收端,由光学天线将信号光汇聚在 APD 靶面上,完成光信号到电信号的转换,而后通过信号处理得到数据的恢复。

在上述理论和实践的基础上,进行了 500 m 弱湍流情况下等效激光通信验证实验,旨在验证在弱湍流情况下,通过 APD 增益闭环控制抑制湍流引起的光强抖动。

在广东省东莞市华为松山湖基地进行通信距离为 500 m 的激光通信试验,实验当日情况为平均气温 25 °C,天气状况为多云微风。实验系统由 APD 接收端和 LD 发射端组成,测试现场如图 5 所示。分别测试在 500 m 弱湍流情况下,固定 APD 增益和自适应

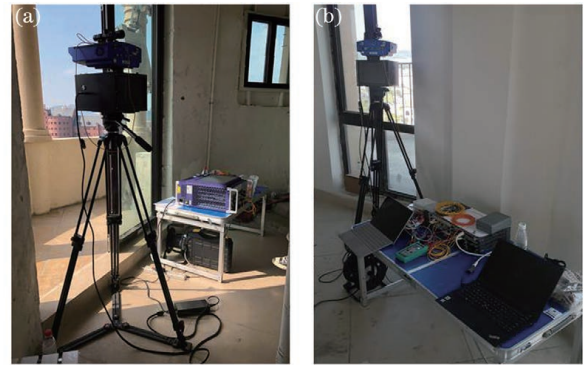


图 5 实验现场图。(a)A 端实验现场图;(b)B 端实验现场图

Fig. 5 Experimental site map. (a) A side of experimental site map; (b) B side of experimental site map

APD 增益控制两种状态下的概率分布图及功率谱。

图 6、7 是固定增益和自适应增益下光功率的时

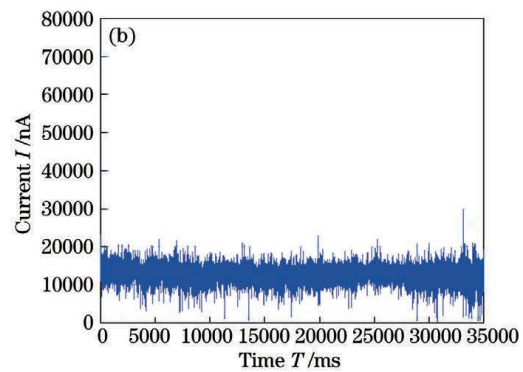
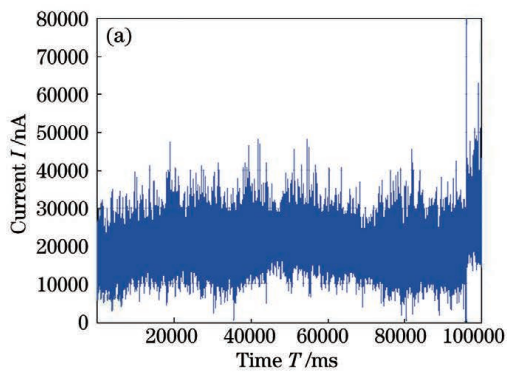


图 6 弱湍流条件下接收光信号强度图。(a)无增益控制;(b)有增益控制

Fig. 6 Received light signal intensity map for medium turbulence conditions. (a) Without control; (b) with control

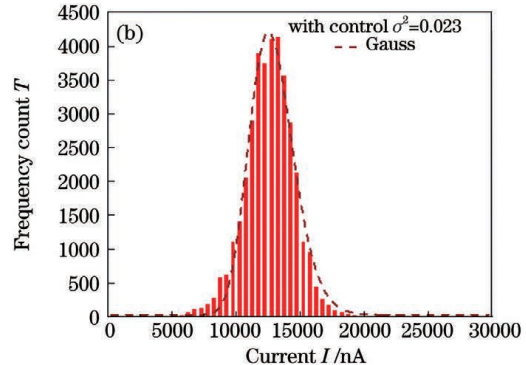
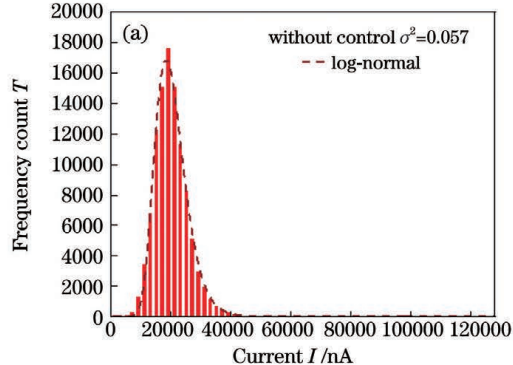


图 7 500 m 无、有增益控制的概率分布图。(a)无增益控制;(b)有增益控制

Fig. 7 Probability distribution for 500 m without and with gain control. (a) Without control; (b) with control

域曲线图及概率分布曲线图。从图 6(a)、7(a)可看出,在湍流存在的条件下,光功率分布值在 1000~40000 nA,概率密度曲线呈对数正态分布,闪烁方差为 0.057。当添加 APD 增益自适应控制时,从图 6(b)、7(b)可观察到光强明显集中于 10000~20000 nA,最大范围小于 20000 nA,呈典型的高斯分布。而且闪烁方差由 0.057 降低到 0.023,说明自适应增益控制在很大程度上抑制了湍流引起的信号功率波动。

图 8 给出了东莞地区大气链路下未开启增益控制以及开启增益控制后的功率谱。一般地,以能谱密度  $S(x)$  为纵坐标,频率  $f$  为横坐标,绘制双对数坐标谱图,双对数坐标谱图可以使湍流功率谱低频部分横坐标被充分放大,清晰地了解到功率谱随频率的变化特征。用快速傅里叶变换的方法计算得出功率谱曲线,由于采样数据长度及采样频率限制,有

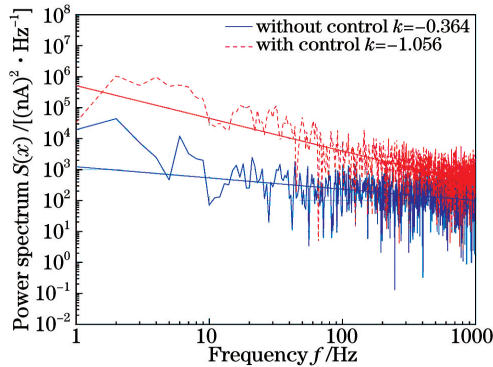
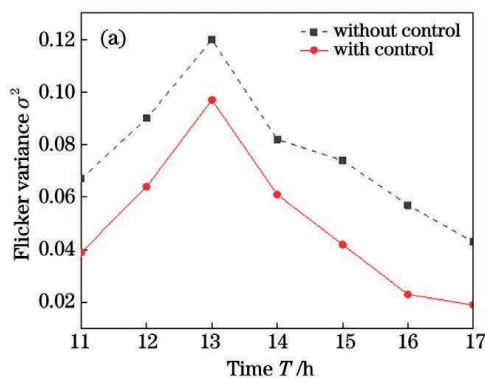


图 8 500 m 激光通信实验功率谱

Fig. 8 Experimental power spectrum for 500 m laser communication



效的频率范围为 1000 Hz 以内。其中,  $k$  为斜率。

从图 8 的功率谱可看出开启增益控制情况下的曲线斜率为  $-1.056$ ,未开启增益控制情况时的曲线斜率为  $-0.364$ ,斜率愈平缓对噪声抑制作用愈低,可见开启自动增益控制的情况与 Kolmogorov 的  $5/3$  次幂律更为符合。在此条件下测试通信系统误码率,未控制时系统的平均误码率为  $1.75 \times 10^{-8}$ ,闭环调控后平均误码率为  $3.99 \times 10^{-10}$ ,系统误码率降低了两个数量级。

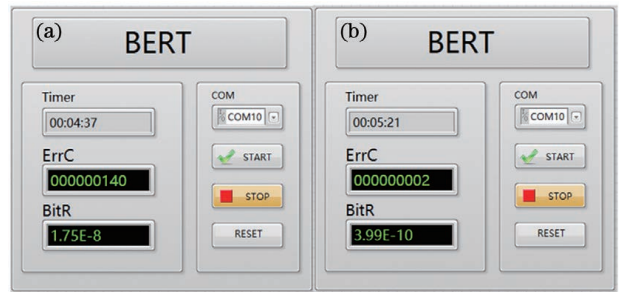


图 9 500 m 通信实验误码率测试(BERT)图。(a)无增益控制;(b)有增益控制

Fig. 9 BERT charts for 500 m communication experiments.

(a) Without control; (b) with control

为进一步验证 APD 自适应增益控制对探测系统的通信性能改善效果,对一天中不同时间段即 11 时至 17 时的闪烁方差及误码率进行测试。采用相同的测试模式,分别在开启自适应增益控制及未开启自适应增益控制的情况下采集 APD 探测到的电流值,而后统计不同时刻的闪烁方差,结果如图 10(a)所示,不同时刻的误码率结果如图 10(b)所示。

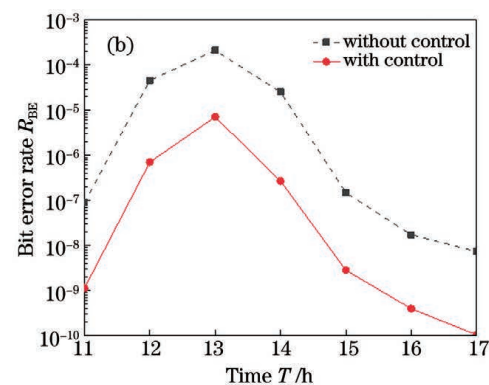


图 10 不同时段测试图。(a)闪烁方差测试图;(b)误码率测试图

Fig. 10 Test plots for different time periods. (a) Flicker variance test plots; (b) BER test plots

从图 10 可知,闪烁方差在 13 时左右达到最大,大气湍流强度较强,在未控制时系统平均误码率为  $10^{-4}$  数量级,经自适应调控后系统误码率改善将近

两个数量级。实验结果表明,APD 增益闭环调控的方法可以有效减小系统的误码率,改善通信质量,增加大气信道下的激光通信性能的可靠性。

## 5 结 论

本文研究了大气湍流对激光通信系统的影响,提出了基于 APD 增益因子闭环调控的通信探测接收方法。通过搭建无线激光通信实验,验证了 APD 增益闭环调控方法在湍流的衰落信道下,对系统性能有明显的改善作用。以上实验表明,APD 的增益控制可以有效抑制大气湍流抖动产生的光功率波动,从而显著提高通信性能。在弱湍流条件下,开启自动增益控制的功率谱曲线更符合 5/3 次幂律谱,光强闪烁方差由 0.057 降低至 0.023,系统误码率由  $1.75 \times 10^{-8}$  降为  $3.99 \times 10^{-10}$ ,降低了两个数量级,并统计不同时间段下的湍流强度及对应的系统平均误码率变化曲线。结果表明了自适应增益控制算法有效地抑制了湍流引起的信号功率波动,实现了高抗干扰能力的无线激光通信。

### 参 考 文 献

- [1] Han L Q, You Y H. Performance of multiple input multiple output free space optical communication under atmospheric turbulence and atmospheric attenuation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0706004.  
韩立强, 游雅晖. 大气衰减和大气湍流效应下多输入多输出自由空间光通信的性能[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0706004.
- [2] Jiang H L, Tong S F, Zhang L Z. The technologies and systems of space laser communication technologies and systems of space laser communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 50-113.  
姜会林, 佟首峰, 张立中. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 50-113.
- [3] Cao M H, Wu X, Wang H Q, et al. Performance of faster-than-Nyquist optical communication system under Gamma-Gamma atmospheric turbulence [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0906003.  
曹明华, 武鑫, 王惠琴, 等. Gamma-Gamma 大气湍流下超奈奎斯特光通信系统性能 [J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0906003.
- [4] Li X Y, Zhang P, Tong S F. Bit error rate performance for modulating retro-reflector free space optical communication system based on adaptive threshold under atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0606001.  
李晓燕, 张鹏, 佟首峰. 大气湍流影响下基于自适应判决门限的逆向调制自由空间光通信系统误码率性能分析[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0606001.
- [5] Cao Y, Li Y, Li X H. Research on construction method of polarization code in wireless optical communication [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2106003.  
曹阳, 李岳, 李小红. 无线光通信中极化码构造方法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2106003.
- [6] Yuksel H, Davis C C. Aperture averaging for studies of atmospheric turbulence and optimization of free space optical communication links[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5892: 58920P.
- [7] Yuksel H, Milner S, Davis C C. Aperture averaging for optimizing receiver design and system performance on free-space optical communication links[J]. Journal of Optical Networking, 2005, 4(8): 462-475.
- [8] Lee E J, Chan V W S. Diversity coherent and incoherent receivers for free-space optical communication in the presence and absence of interference[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2009, 1(5): 463-483.
- [9] Li M, Cvijetic M. Coherent free space optics communications over the maritime atmosphere with use of adaptive optics for beam wavefront correction [J]. Applied Optics, 2015, 54(6): 1453-1462.
- [10] Zhang Y, Wang P, Liu T, et al. Performance analysis of a LDPC coded OAM-based UCA FSO system exploring linear equalization with channel estimation over atmospheric turbulence [J]. Optics Express, 2018, 26(17): 22182-22196.
- [11] Yao H F, Chen C Y, Ni X L, et al. Analysis and evaluation of the performance between reciprocity and time delay in the atmospheric turbulence channel[J]. Optics Express, 2019, 27(18): 25000-25011.
- [12] Yao H F, Ni X L, Chen C Y, et al. Performance of M-PAM FSO communication systems in atmospheric turbulence based on APD detector[J]. Optics Express, 2018, 26(18): 23819-23830.
- [13] Yaglom A M, Newell G. An introduction to the theory of stationary random functions[J]. Journal of Applied Mechanics, 1963, 30(3): 479.
- [14] Yi X. Research on irradiance scintillation and mitigation technology in atmospheric laser communications[D]. Xi'an: Xidian University, 2013: 23-27.  
易湘. 大气激光通信中光强闪烁及其抑制技术的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013: 23-27.
- [15] Dang N T, Pham A T. Performance improvement of FSO/CDMA systems over dispersive turbulence channel using multi-wavelength PPM signaling [J]. Optics Express, 2012, 20(24): 26786-26797.
- [16] Ishimaru A. Wave propagation and scattering in random media[J]. Wave Propagation & Scattering in

- Random Media, 1978, 1(6): 407-460.
- [17] Tatarski V I. Wave propagation in a turbulent medium[M]. New York: Academic Press, 1961: 338-366.
- [18] Li Y, Li M, Poo Y, et al. Performance analysis of OOK, BPSK, QPSK modulation schemes in uplink of ground-to-satellite laser communication system under atmospheric fluctuation [J]. Optics Communications, 2014, 317: 57-61.
- [19] Yariv A, Yeh P. Photonics: optical electronics in modern communications[M]. New York: Oxford University Press, 2006: 529-530.

## Atmospheric Turbulence Suppression Methods for Near the Earth Wireless Laser Communication Channels Based on Avalanche Photodiode Adaptive Gain Control

Zhou Chang<sup>1,2</sup>, Yu Xiaonan<sup>2</sup>, Jiang Huilin<sup>2\*</sup>, Wang Tong<sup>2</sup>, An Ning<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> National and Local Engineering Research Center of Space Optoelectronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>3</sup> Changchun Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130117, China

### Abstract

**Objective** Owing to 5G, free-space optical communication (FSO) has high communication rate, long communication distance, strong anti-interference and low power consumption. It does not require laying fibre optic cables and has become the current research hot spot in wireless communication. For wireless free-space laser communication, the most severe problem is the impact of the atmospheric channel. The light intensity scintillation effect caused by atmospheric turbulence causes the communication data received by the receiver to be superimposed with jitter and fading, inevitably leading to degradation in communication quality. The front-end avalanche photodiode avalanche photodiode (APD) method is used in this study. In this technique, the reverse bias voltage is changed to control the multiplication factor of APD, which is essential in suppressing atmospheric turbulence and extending the dynamic range.

**Methods** In order to improve the communication performance of laser communication systems under atmospheric channels, this study proposes a laser transmission terminal atmospheric turbulence suppression algorithm based on APD adaptive gain control (AGC). Additionally, we design an APD current feedback and bias control circuit and write a set of closed-loop regulation schemes. Furthermore, a wireless laser communication experiment with an adaptive gain control algorithm under medium and weak turbulence is developed.

**Results and Discussions** A laser communication test with a 500 m communication distance was conducted at Huawei's Songshan Lake base in Dongguan, Guangdong Province. The average temperature was 25 °C and weather was cloudy and breezy weather on the experiment day. The experimental system consists of an APD receiver and laser diode (LD) transmitter (Fig. 5). The probability distributions and power spectra were tested under 500 m of weak turbulence, with fixed APD gain and adaptive APD gain control, respectively. The results show that the optical power distribution ranges from 1000 to 40,000 nA (Fig. 6) under weak turbulence conditions, with a log-normal probability density curve. In a typical Gaussian distribution, the light intensity is concentrated at 10,000–20,000 nA (Fig. 6), with a maximum range of less than 20,000 nA, when APD gain adaptive control is added. The optical intensity flicker variance is reduced from 0.057 to 0.023 (Fig. 7). The power spectrum shows that the slope of the curve with gain control is  $-1.056$ , and the slope of the curve without gain control is  $-0.364$ . The flatter the slope, the lower is the noise suppression effect. Thus, the power spectrum with automatic gain control is more consistent with the  $5/3$  power-law spectrum (Fig. 8), and the system bit error rate ( $R_{BE}$ ) is reduced by two orders of magnitude (Fig. 9). Furthermore, the flicker variance and BER were tested at different times of the day to verify



the effect of APD adaptive gain control on the communication performance of the detection system. The flicker variance reaches its maximum at around 1:00 (PM) hours when the atmospheric turbulence is strong, and the average  $R_{BE}$  of the system is  $10^{-4}$  orders of magnitude when uncontrolled (Fig. 10). The experimental results show that the APD gain closed-loop regulation method can effectively reduce the  $R_{BE}$  of the system and improve the communication quality. It can also increase the reliability of the laser communication performance under the atmospheric channel.

**Conclusions** This study investigated the effect of atmospheric turbulence on laser communication systems and proposed a communication detection and reception method based on closed-loop regulation of the APD gain factor. Building a wireless laser communication experiment verifies that the APD gain closed-loop regulation method significantly improves the system performance under the turbulence fading channel. The above experiments show that the APD gain control can effectively suppress the optical power fluctuations generated by atmospheric turbulence jitter; thus, significantly improving the communication performance. Under weak turbulence conditions, the power spectrum curve with AGC is more consistent with the 5/3 power-law spectrum. The variance of light intensity flicker is reduced from 0.057 to 0.023; the system  $R_{BE}$  is reduced from  $1.75 \times 10^{-8}$  to  $3.99 \times 10^{-10}$ , a reduction of two orders of magnitude. Finally, the turbulence intensity and corresponding system average  $R_{BE}$  variation curves under different periods are calculated. This shows that the adaptive gain control algorithm effectively suppresses turbulence-induced signal power fluctuations and achieves high interference immunity for wireless laser communication.

**Key words** optical communications; free space optical communication; atmospheric turbulence; avalanche photodiode; adaptive gain control