

# 脉冲展宽对深空激光通信的影响与补偿研究\*

赵 卓, 刘向南, 王建军, 李晓亮, 谌 明  
(北京遥测技术研究所 北京 100094)

**摘要:** 深空激光通信系统下行链路的脉冲位置调制 PPM (Pulse Position Modulation) 信号在经过大气信道传输和单光子探测器接收时, 将出现脉冲展宽效应, 引起通信系统性能下降。分析了大气信道中的淡积云云层散射、大气湍流与气溶胶散射和单光子探测器的抖动特性所引起的脉冲展宽效应。在此基础上, 仿真分析了淡积云云层物理厚度对不同 PPM 调制阶数下通信速率的影响, 并研究了单光子探测器引起的脉冲展宽产生的抖动损失。为补偿脉冲展宽的影响, 提出了一种基于时隙似然比解调的补偿方法, 通过仿真验证了该方法能够有效降低深空 PPM 激光通信链路中脉冲展宽对通信误码率的影响。该研究对分析和提升深空 PPM 激光通信系统的链路性能具有一定的参考意义。

**关键词:** 深空激光通信; 脉冲展宽; 大气湍流; 脉冲位置调制; 似然比补偿

中图分类号: V443+.1 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)04-0056-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220510001

引用格式: 赵卓, 刘向南, 王建军, 等. 脉冲展宽对深空激光通信的影响与补偿研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(4): 56-61.

## Analysis of pulse broadening effect and compensation on deep space laser communication system

ZHAO Zhuo, LIU Xiangnan, WANG Jianjun, LI Xiaoliang, CHEN Ming  
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In the deep-space laser communication downlink, the pulse position modulation (PPM) laser signal will have a pulse broadening effect when it is transmitted through the atmospheric channel and received by the single-photon detector, and causes the performance of the communication system to decrease. This paper analyzes the pulse broadening effect caused by light cumulus cloud scattering, atmospheric turbulence and aerosol scattering in the atmospheric channel and the jitter characteristics of the single photon detector. On this basis, this paper analyzes the effect of the physical thickness of the pale cumulus cloud on the communication rate under different PPM modulation orders and the jitter loss caused by the pulse broadening of the single photon detector. To compensate the effect of pulse broadening, a method based on likelihood ratio demodulation is proposed which reduce the effect of pulse broadening on communication BER through simulation verification. This research has certain reference significance for analyzing and evaluating the link performance of deep space PPM laser communication system.

**Key words:** Deep space laser communication; Pulse broadening; Atmospheric turbulence; Pulse position modulation; Likelihood ratio compensation

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20220510001

**Citation:** ZHAO Zhuo, LIU Xiangnan, WANG Jianjun, et al. Analysis of pulse broadening effect and compensation on deep space laser communication system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(4): 56-61.

## 引 言

深空激光通信技术是当前空间激光通信领域的研究热点之一<sup>[1,2]</sup>。深空激光通信一般采用 PPM 调制体制, 激光链路在经过地球大气层时, 大气效应将导致传输光束的波前产生随机起伏, 引起光束偏移、光束扩展和光斑闪烁等现象<sup>[3]</sup>; 云、雾和气溶胶粒子将使光信号在传输过程中多次散射, 多径效应使得

\*基金项目: 国防基础科研项目 (JCKY2020560B001)

收稿日期: 2022-05-10 收修改稿日期: 2022-06-16

激光脉冲在时域上产生抖动<sup>[4]</sup>；接收端的单光子探测器抖动也会引起脉冲展宽，脉冲展宽将使得相邻脉冲信号间出现时隙间串扰和码间干扰，从而造成通信容量下降、误码率上升，甚至可能造成通信中断<sup>[5]</sup>。WANG 等<sup>[6]</sup>研究了云层粒子对于激光多次散射引起脉冲信号展宽以及码间干扰的影响。MOISION 等<sup>[7]</sup>研究了服从指数分布的单光子探测器抖动展宽对通信系统的影响。XIANG 等<sup>[8]</sup>研究对比了服从指数分布和高斯分布探测器时延抖动的脉冲展宽对通信系统的影响。上述文献研究了脉冲展宽对通信容量和误码率等性能的影响，但是对于深空激光系统而言，脉冲展宽还将引起激光链路的接收功率损失。为补偿脉冲展宽对通信误码率性能的影响，QUIRK 等<sup>[9]</sup>研究了 PPM 异步采样与时隙数据插值恢复的补偿方法。XIANG 等<sup>[10]</sup>研究了基于异步采样的数据恢复方法，采用 4 倍频 PPM 采样比 1 倍频采样提高了 0.8 dB 的解调性能，并且具有较好的算法稳健性。基于目前国内外对激光脉冲展宽效应的补偿方法研究，本文对深空激光通信系统中引起脉冲展宽效应的因素和产生的影响进行研究分析，并提出了更有效的脉冲展宽的补偿方法，对进一步提高深空激光通信链路性能具有重要意义。

本文分析了大气信道中的淡积云云层散射、气溶胶散射和大气湍流对光信号的脉冲展宽效应，以及单光子探测器的抖动特性对脉冲展宽的影响。在此基础上，仿真分析了淡积云云层物理厚度对不同 PPM 调制阶数下通信速率的影响和单光子探测器引起的脉冲展宽产生的抖动损失。为补偿脉冲展宽的影响，提出了一种基于时隙似然比解调的补偿方法，通过仿真验证该方法能够有效降低深空 PPM 激光通信链路中脉冲展宽对通信误码率的影响。该研究为深空 PPM 激光通信系统的链路性能分析和提升深空 PPM 激光通信系统的链路性能提供了一定的参考。

## 1 脉冲展宽的数学模型

激光通信接收端的单光子探测器实际探测到的脉冲光到达时间，相对于发射光脉冲信号，将出现一定的脉冲展宽。脉冲展宽使得 PPM 时隙内的光脉冲信号超过时隙界限展宽到相邻时隙中。引起脉冲展宽的因素主要有单光子探测器的响应时间抖动特性，大气信道中的云雾散射、气溶胶粒子散射和大气湍流等大气效应等。

### 1.1 单光子探测器抖动展宽

美国 MOISION 等<sup>[11]</sup>通过对光电倍增管、雪崩光电二极管和超导纳米线三种单光子探测器分别进行理论分析和实验验证，得到了三种单光子探测器的响应时间特性模型。实验结果表明单光子探测器的响应时间特性基本满足高斯分布，并给出了单光子探测器的抖动展宽高斯分布经验模型  $F_\delta(\delta)$ ：

$$F_\delta(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中， $\sigma$  为单光子探测器抖动展宽服从高斯分布的标准差， $\delta$  为探测器抖动随机变量。

### 1.2 云层散射展宽

美国 BUCHER<sup>[12]</sup>等通过实验研究了有关大气激光脉冲通过淡积云云层的特性。根据该实验建立了激光脉冲传输的多径时延模型，并得到了多径时延  $\Delta t$  和云层散射光学厚度  $\tau_d$  的实验关系式：

$$\Delta t = (0.74\tau_d^{0.82})/c \quad (2)$$

式中， $\tau_d$  为云层的光学厚度。

$$\tau_d = \frac{0.45S \times LCW_0 \times Q_{\text{ext}} (1 - \langle \cos\theta \rangle) T}{\rho_w r_0} \quad (3)$$

式中， $S$  为修正因子， $\rho_w$  为水密度， $r_0$  为观测点液滴的平均半径， $Q_{\text{ext}}$  为消光效率因子， $\langle \cos\theta \rangle$  为每次散射中入射光线和散射光线夹角的余弦平均值， $T$  为云层物理厚度， $LCW_0$  为观测点云的液态水含量。

对于 PPM 调制体制，展宽后的激光脉冲将有可能从单个时隙展宽为多个时隙，引起时隙间串扰。为了避免脉冲展宽可能引起的时隙间串扰或码间干扰，本文假设展宽后的脉冲总宽度与 PPM 时隙相等，

此时能够实现的最高可通信速率  $R_c$  为

$$R_c = \frac{\log_2 M}{(t_0 + \Delta t) \times M} \quad (4)$$

式中,  $M$  为 PPM 调制阶数,  $t_0$  为初始脉冲宽度。

如表 1 所示为淡积云云层的实验测量结果<sup>[12]</sup>, 仿真得到不同云层液态水含量下脉冲展宽与云层物理厚度的关系, 如图 1 所示。由图 1 可知, 随着云层物理厚度的增加, 脉冲展宽近似呈线性增加, 当云层物理厚度较小 ( $T=5$  m), 且云层含水量较大 ( $LCW_0=0.4$  g/m<sup>3</sup>,  $r_0=7.5$  μm) 时, 脉冲展宽仅为 0.2 ns。但是当云层物理厚度较厚 ( $T=80$  m), 且云层含水量较大 ( $LCW_0=0.7$  g/m<sup>3</sup>,  $r_0=3$  μm) 时, 脉冲展宽可达 7.2 ns。通常在深空激光通信链路中, PPM 调制的时隙宽度一般为 ns 或 0.1ns 量级, 因此当云层物理厚度较小时, 脉冲展宽对通信系统的影响较小。但是当激光链路穿过较厚的云层时, 脉冲展宽将极大影响激光链路的 PPM 脉冲宽度。

### 1.3 大气湍流与散射展宽

大气湍流与散射同样会导致脉冲展宽效应, 大气湍流引入的脉冲展宽可表示为<sup>[13]</sup>:

$$\Delta t = \left( t_0^2 + 8 \times \frac{0.391(1 + 0.171\delta^2 - 0.287\delta^{-5/3}) \times \int_{h_0}^{h_1} C_n^2(h) [1/L_0(h)]^{-5/3} dh \times \sec \zeta}{c^2} \right)^{1/2} \quad (5)$$

式中,  $t_0$  为初始脉冲宽度,  $\delta$  为湍流内尺度与外尺度之比,  $\zeta$  为天顶角,  $h$  为海拔高度,  $C_n^2(h)$  为服从 H-V21 模型的大气湍流折射率结构常数:

$$C_n^2(h) = 0.00594 \times (21/27)^2 \times (10^{-5}h)^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + 1.7 \times 10^{-14} \exp(-h/100) \quad (6)$$

$L_0(h)$  为大气湍流外尺度:

$$L_0(h) = \begin{cases} 3.21h^{-0.11}, & 1000 < h < 2000 \\ \frac{4}{1 + [(h - 8500)/2500]^2}, & 2000 \leq h \leq 17000 \\ 0.307 - 0.02764 \left( \frac{h}{1000} - 17 \right) + 0.00167 \left( \frac{h}{1000} - 17 \right)^2, & h > 17000 \end{cases} \quad (7)$$

大气中存在的气溶胶等粒子也会导致脉冲展宽<sup>[14]</sup>, 气溶胶引入的脉冲展宽可表示为:

$$\Delta t = \frac{L}{c} \left\{ \left[ \frac{8}{27} \cdot \frac{1}{\omega_0 \tau \gamma_0^2} \left( 1 + \frac{9}{4} \omega_0 \tau \gamma_0^2 \right)^{3/2} - 1 \right] - 1 \right\} \quad (8)$$

式中,  $L$  为激光链路的光程长度,  $c$  为光速,  $\omega_0$  为一次散射反照率,  $\tau$  为气溶胶的光学厚度,  $\gamma_0^2$  为气溶胶粒子的散射角均方根值。

表 1 典型淡积云参数

Table 1 Typical parameters of light cumulus cloud

$LCW_0$ (g/m <sup>3</sup> )	$r_0$ (μm)	$S$	$Q_{ext}$ (1 - ⟨cosθ⟩)
0.4	7.5	1	0.32
0.5	4.5	1.1	0.35
0.5	5	1.1	0.34
0.7	3	1.1	0.42
1.55	5	1.15	0.34

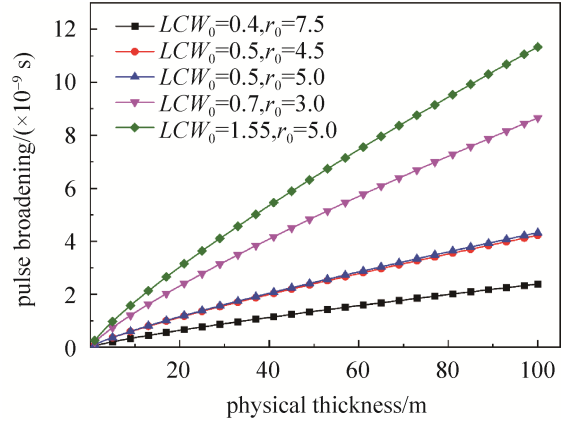


图 1 脉冲展宽与云层物理厚度的关系

Fig. 1 Pulse broadening in relation to the physical thickness of cloud

一般取湍流内外尺度之比  $\delta=0.1$ ，气溶胶一次散射反照率  $\omega_0=0.998$ ，气溶胶粒子的散射角均方根  $\gamma_0^2=0.792^\circ$ 。仿真得到大气湍流与散射展宽后的脉冲宽度与初始脉冲宽度的关系，如图2所示。由图2可知，不同天顶角的大气链路经过大气湍流与散射展宽后的脉冲宽度不同，天顶角越大则脉冲展宽越严重。当初始脉冲宽度小于10 fs时，脉冲展宽比大于1。因此在深空激光通信链路中，当 PPM 调制的脉冲宽度在飞秒量级时，脉冲展宽效应受大气湍流与散射的影响比较严重。

## 2 脉冲展宽的影响分析

### 2.1 探测器抖动展宽对通信链路的影响

探测器抖动引起的脉冲展宽将引起通信链路的信道容量下降，为达到相同的信道容量所需要提高的信号光功率即为抖动损失  $L_j^{[15]}$ ：

$$L_j = 10 \log_{10} (5\Psi^2 + 2\Psi + 1) \quad (9)$$

式中， $\Psi = \left( \frac{\sigma_j}{T_s} \right) \frac{(1 + \tanh(R - 1/2))}{1.25^{\log_2 M}}$ ， $\sigma_j$  为探测器抖动标准差， $T_s$  为 PPM 时隙宽度， $R$  为编码效率。

根据式(9)，给出了不同 PPM 调制阶数下的抖动损失  $L_j$  随探测器抖动标准差  $\sigma_j$  变化的抖动损失，如图3所示。当探测器抖动标准差越大，抖动损失越大，因此选取抖动标准差较小的单光子探测器对于提高通信链路的性能具有较大的提升作用。由图3可知，当单光子探测器的抖动标准差  $\sigma_j=100$  ps 时，若 PPM 调制阶数  $M=4$ ，探测器抖动损失  $L_j=-3.3$  dB；若 PPM 调制阶数  $M=64$ ，探测器抖动损失  $L_j=-1.3$  dB。因此当选取较高的 PPM 调制阶数时，探测器抖动损失较小，但是若选取 PPM 调制阶数  $M$  过高，将导致系统的通信速率下降，因此必须综合考虑 PPM 调制阶数的选取。

### 2.2 云层散射展宽对通信速率的影响

根据式(4)，仿真得到了在 PPM 调制体制下，当初始脉宽相同时，随着 PPM 调制阶数的变化，系统最大通信速率与淡积云物理厚度的关系，如图4所示。随着云层物理厚度的增加，最大通信速率不断减小并最终保持稳定。当 PPM 调制阶数  $M=4$  时，若云层物理厚度  $T=5$  m，最大通信速率  $R_c=261$  Mbps；若云层物理厚度  $T=50$  m，最大通信速率  $R_c=75.5$  Mbps。当 PPM 调制阶数  $M=64$  时，若云层物理厚度  $T=50$  m 的最大通信速率  $R_c=14.2$  Mbps。因此，云层物理厚度越大，对系统的通信速率影响越大，选取较小的 PPM 调制阶数将能够

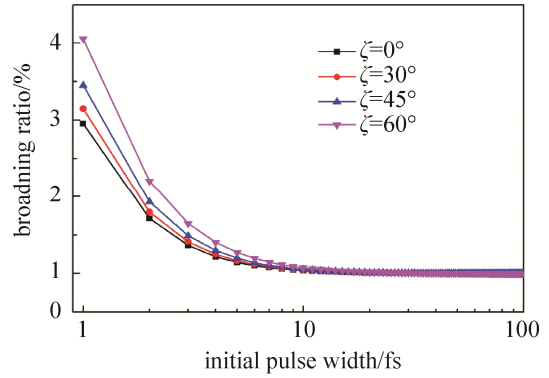


图2 大气湍流与散射影响下脉冲展宽比与初始脉宽的关系

Fig. 2 Relation between pulse broadening of different zenith angles with atmospheric turbulence and dispersion effect

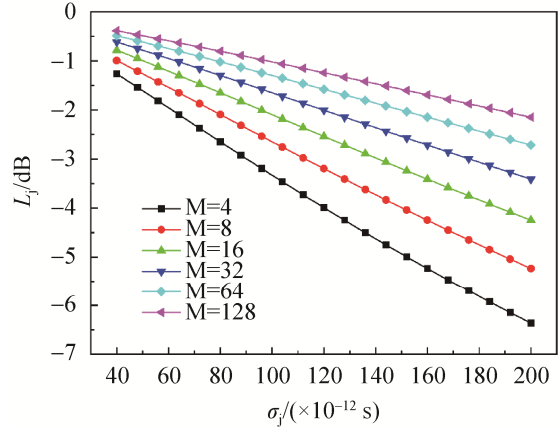


图3 不同 PPM 调制阶数下抖动损失与抖动标准差的关系

Fig. 3 Relation between jitter loss with different PPM modulation orders

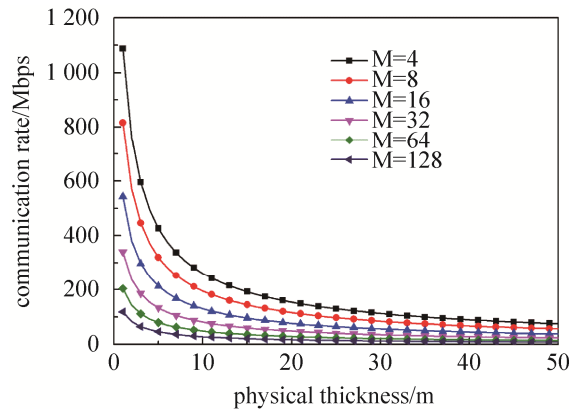


图4 不同 PPM 调制阶数下通信速率与云层物理厚度的关系

Fig. 4 Relation between communication rate of different PPM modulation orders with the thickness of cloud

降低云层散射导致的脉冲展宽对通信速率的影响。

### 3 补偿脉冲展宽的时隙似然比解调方法

#### 3.1 时隙似然比补偿方法

一个 PPM 帧中的  $M$  个时隙在经过随机脉冲展宽后, 被展宽时隙中的光子将可能被判决到相邻的时隙中, 从而引起解调错误<sup>[16]</sup>。每个光子展宽到相邻时隙的概率可用指数分布表示, 如式 (10) 所示, 其中  $\delta$  为脉冲展宽,  $\alpha$  为脉冲展宽的方差, 其时隙光子分布的表达式如式 (11) 所示,  $t$  为时间。为了对随机脉冲展宽的错误判决进行补偿, 在计算第  $p$  个时隙的似然比时, 将相邻时隙的似然比信息按特定权重与第  $p$  个时隙的似然比共同进行解调计算。

$$f(\delta) = e^{-\delta/\alpha} / (2\alpha) \quad (10)$$

$$f(t) = \begin{cases} e^{t/\alpha} (1 - e^{-1/\alpha}) / 2 & t < 0 \\ (2 - e^{(t-1)/\alpha} - e^{-t/\alpha}) / 2 & 0 \leq t \leq 1 \\ e^{-t/\alpha} (e^{1/\alpha} - 1) / 2 & t > 1 \end{cases} \quad (11)$$

#### 3.2 仿真结果

PPM 调制阶数  $M=16$ , 时隙宽度  $T_s=3.2$  ns, 背景光子数  $n_b=0.2$ , 采用 SCPPM 编译码, 通过 100 次蒙特卡洛仿真后统计平均结果, 如图 5 所示为脉冲展宽方差  $\alpha=0.1$ 、 $\alpha=0.2$ 、 $\alpha=0.4$  时, 经过时隙似然比补偿与未补偿的情况下通信误码率和信噪比的关系, 其中横坐标为信噪比  $\text{SNR}=10\log(n_s/(MT_s))$ , 纵坐标为误码率 BER。

随着脉冲展宽  $\delta$  的增大, 光子被误判决到相邻时隙的可能性变大, 相同信噪比下的误码率迅速降低。当  $\delta$  取值分别为 0.1、0.2 和 0.4 时, 未采用时隙似然比补偿的通信误码率较差, 采用时隙似然比补偿方法的通信误码率性能比未补偿时分别提高了 0.3 dB、0.5 dB 和 0.9 dB。由以上仿真看出, 随着脉冲展宽  $\delta$  的增大, 时隙似然比补偿方法对通信误码率性能的提升效果越明显。

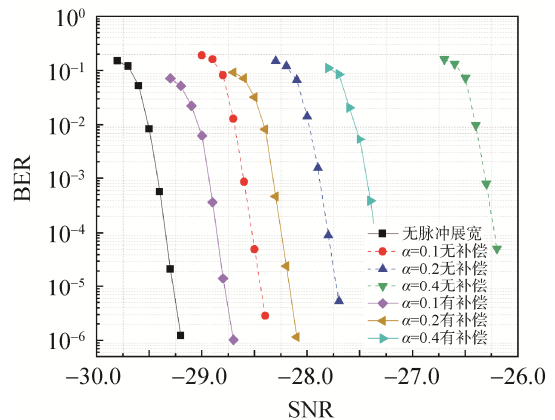


图 5 经过时隙似然比补偿与未补偿的通信误码率和信噪比的关系

Fig. 5 Relation between BER and SNR with slot likelihood compensation and no compensation

### 4 结束语

本文分析了在深空激光通信链路中, 淡积云云层散射、大气湍流与气溶胶散射和单光子探测器的抖动特性对脉冲展宽的影响。在此基础上, 仿真分析了淡积云云层物理厚度对不同 PPM 调制阶数下通信速率的影响和单光子探测器引起的脉冲展宽产生的抖动损失。为补偿脉冲展宽的影响, 提出了一种基于时隙似然比解调的补偿方法, 仿真分析结果表明, 当脉冲展宽  $\delta$  取值分别为 0.1、0.2 和 0.4 时, 采用时隙似然比补偿方法的通信误码率性能比未补偿时分别提高了 0.3 dB、0.5 dB 和 0.9 dB。该方法能够有效降低深空 PPM 激光通信链路中脉冲展宽对通信误码率的影响。

### 参考文献

- [1] 李海涛. 中国深空测控网光通信技术途径分析与发展展望[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(5): 1–13.  
LI Haitao. Technical approach analysis and development prospects of optical communication technology in China Deep Space TT&C Network[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(5): 1–13.
- [2] 李凉海, 刘向南, 李晓亮. 深空激光通信进展及应用研究[J]. 深空探测学报, 2019, 6(6): 523–529.

- LI Lianghai, LIU Xiangnan, LI Xiaoliang. Progress and application research of deep space laser communication[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(6): 523–529.
- [3] 基于脉冲激光的散射通信系统关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [4] SUNILKUMAR K, ANAND N, SATHEESH S K, et al. Enhanced optical pulse broadening in free-space optical links due to the radiative effects of atmospheric aerosols[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 1–12.
- [5] KETPROM U, KUGA Y, JARUWATANADILOK S, et al. Numerical studies on time-domain response of on-off-keyed modulated optical signals through a dense fog[J]. Applied Optics, 2004, 43(2): 496–505.
- [6] 王佳, 俞信. 自由空间光通信系统中光脉冲展宽问题的研究[J]. 光学技术, 2009, 35(1): 80–83.  
WANG Jia, YU Xin. The research of pulse stretch in free-space optical communication[J]. Optical Technique 2009, 35(1): 80–83.
- [7] MOISION B. Photon jitter mitigation for the optical channel[R]. IPN Progress Report, 2007, 42:171.
- [8] 向劲松, 王举, 吴涛, 等. 基于脉冲展宽波形的光脉冲位置调制异步采样信号的数据恢复技术[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 1–8.  
XIANG Jinsong, WANG Ju, WU Tao, et al. Data recovery technique for asynchronous sampling signal modulated by optical pulse position based on pulse broadening waveform[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 1–8.
- [9] QUIRK K J, SRINIVASAN M. Optical PPM Demodulation from slot-sampled photon counting detectors[C]// IEEE Military Communications Conference, 2013.
- [10] 向劲松, 肖刚. PPM 与 LDPC 光通信系统中脉冲展宽效应补偿办法[J]. 光通信研究, 2016, 4(8): 60–63.  
XIANG Jinsong, XIAO Gang. The compensation method of pulse broadening effect in PPM and LDPC optical communication system[J]. Study on Optical Communications, 2016, 4(8): 60–63.
- [11] MOISION B, FARR W. Communication limits due to photon detector jitter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(9): 715–717.
- [12] BUCHER E A. Computer-simulation of light pulse propagation for communication through thick clouds[J]. Applied Optics, 1973, 12(10): 2391–2400.
- [13] KELLY D E, ANDREWS L C. Temporal broadening and scintillations of ultrashort optical pulses[J]. Waves Random Media, 1999, 9(3): 307–325.
- [14] LI B Y, LI B, LI X, et al. Influence of atmosphere channel broadening on PPM optical communication rate[C]// Advanced Laser Technology and Applications, 2021.
- [15] KACHELMYER A, BOROSON D M. Efficiency penalty of photon-counting with timing jitter[J]. Proc. of SPIE, 2007, 6709: 670906.
- [16] ELSAYED E E, YOUSIF B B. Performance enhancement of hybrid diversity for M-ary modified pulse-position modulation and spatial modulation of MIMO-FSO systems under the atmospheric turbulence effects with geometric spreading[J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52(12): 1–18.

#### [作者简介]

- 赵 卓 1993 年生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为空间激光通信技术。  
刘向南 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为空间激光通信总体技术。  
王建军 1970 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为空间激光通信总体技术。  
李晓亮 1979 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为测控通信技术。  
湛 明 1977 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为测控通信技术。

(本文编辑: 潘三英)