

# 基于退偏振比探测的大气激光通信

张岱 郝士琦 赵青松 孙韩

中国人民解放军电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要** 针对大气激光通信中多径散射效应产生的通信链路码间串扰问题,提出了一种基于退偏振比探测的大气激光通信传输方案。利用光子追迹和 Stokes 矢量变换进行了 Monte Carlo 仿真;通过设置不同的云层物理厚度和消光系数,得到接收光退偏振比与云层光学厚度的一一对应关系;基于 Stotts 公式,得到接收光退偏振比与平均脉冲时间展宽的对应关系。提出了在多径效应影响下的最佳通信传输速率方案,该方案在激光通信系统接收端直接进行退偏振比探测,可有效评估大气信道环境的多径强度,进而在保证激光通信传输质量的同时实现最大的通信传输速率。该研究在星地激光通信以及自适应激光通信的通信链路优化领域具有理论指导意义和应用价值。

**关键词** 光纤光学; 大气激光通信; 多径效应; 码间串扰; 退偏振比

**中图分类号** TN012      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1106008

## Atmospheric Laser Communication Based on Depolarization Ratio Detection

Zhang Dai Hao Shiqi Zhao Qingsong Sun Han

State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering  
Institute of PLA, Hefei, Anhui 230037, China

**Abstract** A transmission scheme of atmospheric laser communication based on depolarization ratio detection is proposed to solve the problem that the intersymbol interference in the communication link is caused by the multipath scattering effect in atmospheric laser communication. A Monte Carlo simulation is carried out by using the technologies of photon tracing and Stokes vector transform. The correspondence relationship between the depolarization ratio of received light and the optical depth of clouds is obtained through setting different physical depths and extinction coefficients of clouds. The relationship between the depolarization ratio of received light and the average pulse broadening time is obtained based on the Stotts formula. An optimal communication rate scheme under the multipath effect is proposed. This scheme can detect the depolarization ratio at the receiver of the laser communication system directly, evaluate the multipath intensity in atmospheric channel environment effectively, and achieve the largest communication transmission while ensuring the quality of laser communication. The research has theoretical guiding significance and application value in communication link optimization of satellite-ground laser communication and adaptive laser communication.

**Key words** fiber optics; atmospheric laser communication; multipath effect; intersymbol interference; depolarization ratio

**OCIS codes** 060.2605; 140.3330; 350.1820

## 1 引 言

对于无线光通信系统尤其是大气激光通信系统而言,大气效应对激光的传输效率产生很大的影响。大气效应主要包括大气吸收衰减、大气散射效应和大气湍流效应。当激光通信脉冲信号在大气信道中传输时,

**收稿日期:** 2016-05-17; **收到修改稿日期:** 2016-07-15

**基金项目:** 国家自然科学基金(61571446)、安徽省自然科学基金(1308085MF83)

**作者简介:** 张岱(1993—),男,博士研究生,主要从事大气激光通信方面的研究。

E-mail: daishen1208@126.com

**导师简介:** 郝士琦(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事大气激光通信、卫星通信方面的研究。

E-mail: liu\_hsq@126.com(通信联系人)

经多次散射产生激光传输多径效应,使得接收机接收到的脉冲产生时域延迟,即激光脉冲在大气中传输时产生了时间展宽效应。此时,接收的激光信号经光电转换和解调后极易导致传输编码序列的码间串扰等现象,增加了激光通信链路的传输误码率,严重降低了大气激光通信的通信传输质量<sup>[1-2]</sup>。

激光在大气中传输时存在脉冲时间展宽效应,目前主要通过降低激光通信发射速率来增加激光脉冲信号时间间隔,从而减弱脉冲时间展宽效应。然而,激光通信传输速率的降低削弱了高传输速率的性能优势<sup>[3]</sup>。对此,基于自适应激光通信系统原理,并通过评估当前激光传输信道的多径效应强弱,自适应地选择激光通信速率及调制样式<sup>[4-5]</sup>。本文基于自适应激光通信系统,提出了基于退偏振比探测的大气激光通信多径效应评估方法;通过选择不同的激光传输速率和调制样式,提出了一种大气激光通信自适应传输方案。该方案可有效应对由大气激光传输多径效应引起的脉冲时间展宽效应,在保证通信质量的同时最大限度地利用了激光通信系统的传输速率。

## 2 基于 Monte Carlo 理论的激光大气传输退偏振比探测

### 2.1 激光大气多径传播 Monte Carlo 模型

激光在大气中传输时,主要受大气分子散射和大气粒子散射的影响。当激光传输路径经过近地面低云层时,受云滴的影响,激光的散射效应远大于在洁净大气中的散射效应,从而产生传输多径效应<sup>[6-7]</sup>。通过分析近地面低云层(简称云层)的多径散射效应,研究了激光脉冲时间展宽效应。

大气云层中云滴的颗粒尺寸  $r$  服从修正 Gamma 分布:

$$\Gamma(r) = N_0 r^a e^{-br}, \quad (1)$$

式中  $N_0$  为由大气液态水含量( $N_{LWC}$ )计算得到的常量; $a$ 、 $b$  为 Gamma 分布参数,它们与云滴有效尺寸  $d_{eff}$  的关系为<sup>[7]</sup>

$$d_{eff} = \frac{2(a+3)}{b}. \quad (2)$$

光子从云顶到第一次散射位置的传播距离  $L_1$  可表示为

$$L_1 = \log [1 - R_F(1 - T_1)] / \alpha, \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为消光系数; $T_1$  为沿着光子轨迹从云顶到云底的单路径透射率; $R_F$  为随机因子, $R_F \in [0, 1]$ 。光学厚度  $\tau$  可由消光系数  $\alpha$  和光传播路径几何长度  $z$  的乘积表示,即

$$\tau = \alpha z. \quad (4)$$

将(3)式中的  $T_1$  替换为  $T_2$ ,即可得到光子由第一次散射位置传播至第二次散射位置的距离。

在垂直于光波传播方向的平面内,光矢量可能具有各种不同的振动状态,这种振动状态即为光波的偏振态。采用 Stokes 矢量对偏振态进行描述,记  $x$  方向为平行偏振方向, $y$  方向为垂直偏振方向,Stokes 矢量共包括 4 个分量,可表示为<sup>[8-10]</sup>

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x + I_y \\ I_x - I_y \\ I_{45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ I_{rcp} - I_{lcp} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $S_0$  为光波沿  $x$  方向线偏振分量强度  $I_x$  和沿  $y$  方向线偏振分量的强度  $I_y$  之和, $S_1$  为  $I_x$  与  $I_y$  的差; $S_2$  为与  $x$  方向成  $\pm 45^\circ$  角的线偏振分量的强度  $I_{45^\circ}$ 、 $I_{-45^\circ}$  之差; $S_3$  为圆偏振度,其中  $I_{rcp}$  为右旋圆偏振光强度, $I_{lcp}$  为左旋圆偏振光强度。

以线偏振光为例,分析初始偏振沿  $x$  方向的任一光子在大气云层中的传播过程。偏振光经过某一光学介质,Stokes 矢量发生相应改变(由  $\mathbf{S}$  变为  $\mathbf{S}'$ ),这两个矢量间的变换可表示为

$$\mathbf{S}' = [S'_0 \ S'_1 \ S'_2 \ S'_3]^T = \mathbf{M}_{4 \times 4} \mathbf{S}, \quad (6)$$

式中  $\mathbf{M}$  为散射介质的穆勒矩阵。对于云滴等球形散射介质,其分布通常为对称结构,可表示为<sup>[11]</sup>

$$\mathbf{M}(\theta) = \begin{bmatrix} M_{1,1}(\theta) & M_{1,2}(\theta) & 0 & 0 \\ M_{1,2}(\theta) & M_{1,1}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{3,3}(\theta) & M_{3,4}(\theta) \\ 0 & 0 & -M_{3,4}(\theta) & M_{3,3}(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5(1 + \cos^2\theta) & 0.5 \sin^2\theta & 0 & 0 \\ 0.5 \sin^2\theta & 0.5(1 + \cos^2\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $M_{i,j}(\theta)$  为球形散射粒子的结构系数,  $i=1,2,3,4; j=1,2,3,4$ 。

在光子的散射传播过程中,传播方向随机改变,通常用  $(\theta, \varphi)$  描述,其中  $\theta$  为散射倾斜角,  $\varphi$  为散射方向角。基于 Stokes 矢量和  $\mathbf{M}$  矩阵,散射相函数  $F(\theta, \varphi)$  可表示为

$$F(\theta, \varphi) = M_{1,1}(\theta)S_0 + M_{1,2}(\theta) [S_1 \cos(2\varphi) + S_2 \sin(2\varphi)]。 \quad (8)$$

单位立体角下的概率密度函数  $P(\theta, \varphi)\Delta\Omega$  可表示为

$$P(\theta, \varphi)\Delta\Omega = \frac{\int_0^\infty F(\theta, \phi)P(r)dr \Delta\Omega}{\iint F(\theta, \phi)P(r)dr d\Omega}, \quad (9)$$

式中  $\Delta\Omega$  为散射点与接收面之间的单位立体角。结合上述公式,持续计算光子的传播轨迹,直至传播超出接收望远镜视场或穿过云层区域。最后统计进入接收望远镜视场光子的 Stokes 矢量,完成激光大气多径传播的 Monte Carlo 仿真实验<sup>[12]</sup>。

## 2.2 利用退偏振比计算大气云层光学厚度

在激光大气多径传播的 Monte Carlo 仿真原理基础上,测量激光经大气云层传播后的退偏振比。通过在地面激光通信接收端添加偏振分光镜,可将激光光束分光至正交偏振通道与初始偏振通道<sup>[13-14]</sup>,结构原理如图 1 所示。通过检测两个通道中传输激光的光强,计算得到退偏振比参数  $P_{dr}$

$$P_{dr} = 1 - (I_x - I_y) / (I_x + I_y) = 2I_y / (I_x + I_y), \quad (10)$$

式中  $I_x$  和  $I_y$  为进入大气激光通信系统接收端且分别处于初始偏振态和正交偏振态的激光光强。结合(5)式中的 Stokes 矢量模型,  $P_{dr}$  也可表示为

$$P_{dr} = (S_0 - S_1) / S_0。 \quad (11)$$

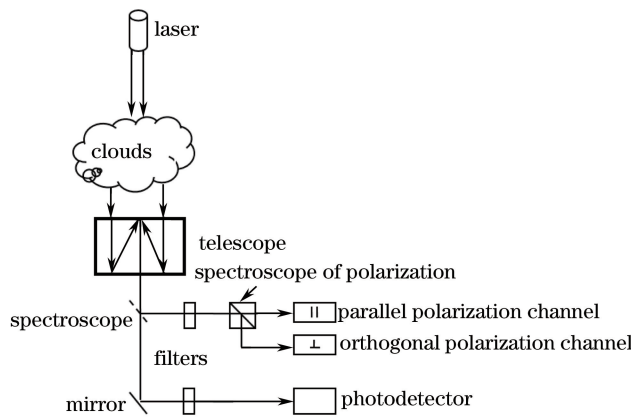


图 1 地面激光通信接收端结构原理图

Fig. 1 Structural schematic of laser communication receiver on the ground

假设星载激光通信系统发送端发射垂直方向激光束,并在激光通信系统地面接收端放置垂直方向的望远镜。激光的初始偏振态设为  $(1, 1, 0, 0)$ ,  $d_{eff} = 6 \mu\text{m}$ ,  $N_{LWC} = 0.057 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,接收望远镜视场(FOV)角  $\Phi_{FOV} = 5 \times 10^{-3} \text{ rad}$ ,传播光子数为  $1 \times 10^5$ 。按照以上条件进行 Monte Carlo 仿真实验,仿真流程如图 2 所示。

设云层物理厚度  $z$  的取值范围为  $0.5 \sim 3 \text{ km}$ ,消光系数  $\alpha$  的取值为  $10, 15, 20 \text{ km}^{-1}$ 。仿真得到的对应接

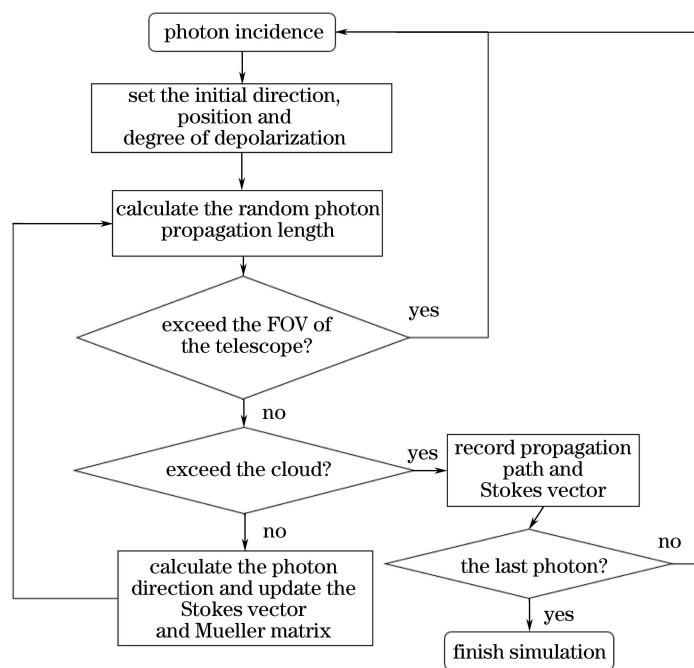


图 2 大气激光传输 Monte Carlo 仿真流程图

Fig. 2 Monte Carlo simulation flow chart of atmospheric laser propagation

收光束退偏振比  $P_{dr}$  如图 3 所示。

分析图 3 可得,在 Monte Carlo 仿真实验中,随着激光传输经过的云层物理厚度的增加,接收光的退偏振比逐渐增加;随着云层消光系数的增加,接收光的退偏振比也逐渐增加。由(4)式可知,光学厚度  $\tau$  可由消光系数  $\alpha$  和光传播路径几何长度  $z$  的乘积表示。若光沿垂直方向传播(即传播路径集合长度等于云层物理厚度),得到的光学厚度即为云层光学厚度。利用 Monte Carlo 实验得到的退偏振比以及云层光学厚度  $\tau$  和接收光退偏振比的关系如图 4 所示。

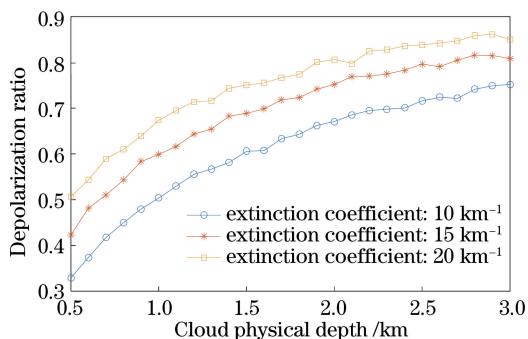


图 3 云层物理厚度与退偏振比的关系

Fig. 3 Relationship between cloud physical depth and depolarization ratio

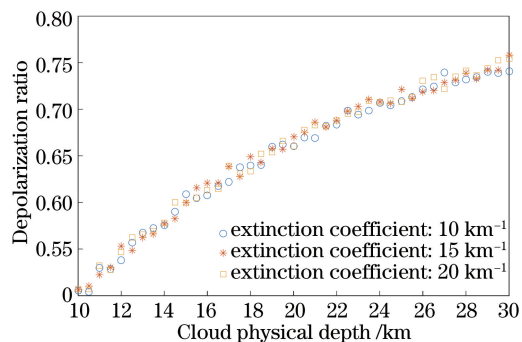


图 4 云层光学厚度与退偏振比的关系

Fig. 4 Relationship between cloud optical depth and depolarization ratio

分析图 4 可得,在设定不同消光系数的情况下,接收光束的退偏振比仍与云层光学厚度  $\tau$  具有一一对应关系。Monte Carlo 实验表明,接收光束的退偏振比完全取决于激光传输云层的光学厚度,从关系图趋势可看出二者具有一一对应关系,进而表明基于退偏振比探测直接计算大气云层光学厚度的可行性,避免了对大气云层消光系数的实时测量。

### 3 大气激光通信多径效应分析及抗多径传输方案研究

根据激光脉冲时间展宽 Stotts 公式,在获取激光传输云层光学厚度  $\tau$  的基础上,计算平均激光脉冲时间

展宽  $\Delta t_c$  (位于同一激光脉冲信号内最大幅值的 70.7% 处的时间间隔),  $\Delta t_c$  可表示为<sup>[7]</sup>

$$\Delta t_c = \frac{z}{c} \left\{ \frac{0.3}{\omega\tau\gamma^2} [(1 + 2.15\omega\tau\gamma^2)^{3/2} - 1] - 1 \right\}, \quad (12)$$

式中  $c$  为光速,  $\omega$  为单散射反照率,  $\gamma$  为均方根散射角。通常设定  $\omega = 1$ , 对于大气云层中的卷云,  $\gamma \approx 0.037$  rad。以  $z = 2$  km 为例, 利用第 2 节中得到的 Monte Carlo 仿真实验数据, 得到退偏振比与平均激光脉冲时间展宽  $\Delta t_c$  的对应关系如图 5 所示。

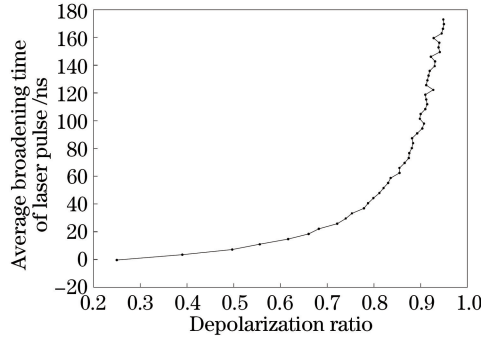


图 5 退偏振比与平均激光脉冲时间展宽的关系

Fig. 5 Relationship between depolarization ratio and average broadening time of laser pulse

以开关键控(OOK)调制为例, 若大气激光通信接收端探测到接收激光光束的退偏振比  $P_{dr}$  为 0.67 (对应的平均激光脉冲时间展宽约为 20 ns), 则设定传输速率分别为 10, 25, 50, 80 Mbit/s, 仿真得到对应的眼图如图 6 所示。

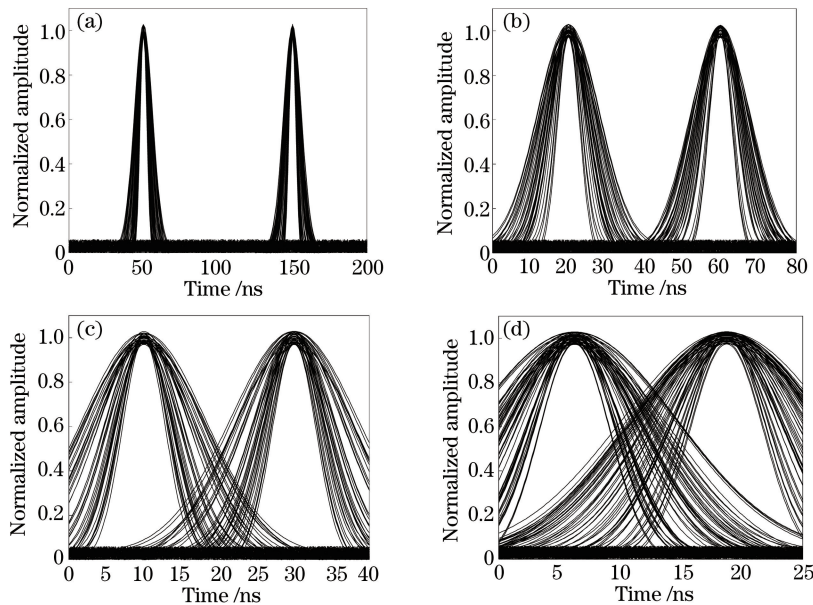


图 6 激光通信速率对应的眼图。(a) 10 Mbit/s; (b) 25 Mbit/s; (c) 50 Mbit/s; (d) 80 Mbit/s

Fig. 6 Eye pictures corresponding to different laser communication rates. (a) 10 Mbit/s;

(b) 25 Mbit/s; (c) 50 Mbit/s; (d) 80 Mbit/s

由图 6 可知, 当激光通信速率超过当前信道环境的多径效应阈值时, 随着激光通信速率的增大, 眼图张开的宽度越来越小; 当通信速率为 80 Mbit/s 时, 激光信号经解调后发生严重的码间串扰, 通信质量急剧下降; 当通信速率低于 50 Mbit/s 时, 仍可保持较高的通信质量。基于 Monte Carlo 实验中退偏振比与光学厚度、平均激光脉冲时间展宽的对应关系, 得到不同接收光的退偏振比  $P_{dr}$  以及不同激光脉冲调制方式<sup>[15]</sup> 对应的最佳通信传输速率  $R_{op}$ , 如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 与 OOK 调制方式相比, 采用脉冲位置调制 (PPM) 可允许使用更高的传输速率。这是由于在同样的传输速率下, PPM (除 2-PPM 外) 的脉冲间隔普遍大于 OOK 的脉冲间隔, 在大气中传输时受

码间串扰影响相对较小。主要考虑厚云层天气情况下的大气激光通信传输方案,对于薄云层或无云层天气情况,激光通信速率可普遍达到 10~100 Gbit/s,此种情况下无须进行传输速率的选择和调整。表 1 中将采用 OOK 调制、4-PPM 调制、16-PPM 调制 3 种调制方式得到的数据作对比。

表 1 不同退偏振比条件下的最佳通信传输速率

Table 1 Optimal communication transmission rates under different depolarization ratios

Mbit /s

$P_{dr}$	$R_{op}$		
	OOK	4-PPM	16-PPM
0-0.3	$\geq 10^3$	$\geq 2 \times 10^3$	$\geq 8 \times 10^3$
0.3-0.4	$(0.5-1) \times 10^3$	$(1-2) \times 10^3$	$(2-8) \times 10^3$
0.4-0.5	100-500	$(0.2-1) \times 10^3$	$(0.4-2) \times 10^3$
0.5-0.6	50-100	100-200	200-400
0.6-0.8	20-50	40-100	80-200
0.8-0.9	10-20	20-40	40-80
0.9-1.0	0-10	0-20	0-40

## 4 结 论

在研究激光大气传播多径效应模型的基础上,建立了激光通信退偏振比探测模型并进行了激光经大气云层多径传播的 Monte Carlo 仿真实验。通过设置不同的云层物理厚度和消光系数,得到接收光的退偏振比与云层光学厚度的一一对应关系。基于 Stotts 公式,研究了大气激光通信脉冲时间展宽效应,并得到接收光的退偏振比与平均脉冲展宽时间的对应关系。

基于以上分析,针对大气激光通信中由多径散射效应引起的通信链路码间串扰问题,提出了一种大气多径效应影响下的激光通信传输方案。该方案在激光通信接收端探测退偏振比,并在保证激光通信传输的同时实现最大的通信传输速率。该研究可在厚云层天气情况下有效选择激光通信的最佳传输速率,以保证在大气多径效应影响下仍可获取较高的通信质量,避免通信链路中断。所建立的退偏振比探测模型以及相关结论在星地激光通信领域和自适应激光通信领域具有理论指导意义和应用价值。

## 参 考 文 献

- Grabner M, Kvicera V. Multiple scattering in rain and fog on free-space optical links [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(3): 513-520.
- Qiang Ruoxin, Zhao Shanghong, Liu Yun. Influence of pulse broadening on bit error rate of ultraviolet communication [J]. Laser & Infrared, 2015, 45(5): 559-563.  
强若馨, 赵尚弘, 刘 韵. 脉冲展宽对紫外光通信误码率的影响 [J]. 激光与红外, 2015, 45(5): 559-563.
- Xu Bo, Guo Qun, Tan Min, *et al.* Effect of the feedback time delay on the time-domain equalizer for high-speed optical digital receivers [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, 26(11): 2096-2103.  
许 渤, 郭 群, 谭 敏, 等. 反馈时延对高速率光数字接收机时域均衡器影响的分析 [J]. 光电子 • 激光, 2015, 26(11): 2096-2103.
- Koziratskii A Y, Prokhorov D V, Lysikov V F. A mathematical model of two-stage search of receiving channels in a laser communication line when establishing communication in conditions of interference [J]. Telecommunications and Radio Engineering, 2008, 67(14): 1281-1293.
- Zhu B C, Cheng J L, Wu L N. A distance-dependent free-space optical cooperative communication system [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(6): 969-972.
- Nguyen V D, Faber D J, van der Pol E, *et al.* Dependent and multiple scattering in transmission and backscattering optical coherence tomography [J]. Opt Express, 2013, 21(24): 29145-29156.
- Chen Chunyi, Yang Huamin, Jiang Huilin, *et al.* Temporal dispersion of laser pulse through clouds and channel equalization [J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(11): 1325-1329.  
陈纯毅, 杨华民, 姜会林, 等. 激光脉冲云层传输时间扩展和信道均衡 [J]. 兵工学报, 2008, 29(11): 1325-1329.
- Kim D, Cheong H D, Kim Y, *et al.* Optical depth and multiple scattering depolarization in liquid clouds [J]. Optical Review, 2010, 17(6): 507-512.

- 9 Zhu Yingbin, Du Xinyue, Zhao Daomu. Generalized Stokes parameters for polarization properties of stochastic electromagnetic beams on propagation[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2332-2336.  
朱映彬, 杜新悦, 赵道木. 基于广义 Stokes 参量的随机电磁光束偏振态传输特性[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2332-2336.
- 10 Hu Qiaoyun, Yang Weifeng, Hu Yadong, *et al.* Principle and simulation of a spatially modulated full Stokes parameters polarization imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0211004.  
胡巧云, 杨伟锋, 胡亚东, 等. 空间调制型全 Stokes 参量偏振成像系统原理及仿真[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211004.
- 11 Mueller D W Jr, Crosbie A L. Analytical expressions for the radiation emergent from a scattering medium exposed to a polarized laser beam[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2000, 67(6): 395-428.
- 12 Wu Fangping, Zhang Xi, Yang Jun, *et al.* Simulation of ocean upward laser telecommunication based on Monte Carlo method[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(1): 22-26.  
吴方平, 章 曦, 杨 军, 等. 海洋上行激光通信的蒙特卡罗模拟[J]. 激光与红外, 2015, 45(1): 22-26.
- 13 Zhai Fengxiao, Yang Kun, Zhu Xiang, *et al.* Simultaneous measurement system for Stokes parameters of linear polarized light[J]. Journal of Zhengzhou University of Light Industry (Natural Science), 2012, 27(1): 101-104.  
翟凤潇, 杨 坤, 朱 祥, 等. 线偏光 Stokes 参量同步测量系统[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2012, 27(1): 101-104.
- 14 Jaruwatanadilok S. Underwater wireless optical communication channel modeling and performance evaluation using vector radiative transfer theory[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(9): 1620-1627.
- 15 Pei Weicheng, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan, *et al.* Pulse width interval modulation scheme in wireless optical communication system[J]. Optical Communication Technology, 2014, 11: 46-49.  
裴伟程, 徐智勇, 汪井源, 等. 无线光通信中的脉冲宽度间隔调制方案[J]. 光通信技术, 2014, 11: 46-49.