

大气激光通信中自适应调制编码技术的模式选择阈值

王磊, 郝士琦, 张岱, 赵青松, 孙韩

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 研究了一种用于大气激光通信自适应调制编码技术中的模式选择阈值的选取算法。分析了大气弱湍流信道性能, 并对高斯信道中阈值选取算法进行修正, 提出了一种信噪比-湍流强度选择方法来确定阈值区域模式, 并给出了阈值选取方程。分析了湍流强度分别为 0, 0.1, 0.2, 0.3 时 3 种传输模式下自适应调制编码系统的误码率, 得到了最大误码率为 10^{-4} 的条件下 3 种模式选择的信噪比与湍流强度阈值区域的对应关系。仿真结果表明, 所提方法可行且能够准确地进行模式选择。

关键词 光通信; 大气激光通信; 自适应调制编码技术; 大气弱湍流信道; 模式选择阈值

中图分类号 TN012 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.020605

Mode Selection Threshold in Adaptive Modulation Coding Technology for Atmospheric Laser Communication

Wang Lei, Hao Shiqi, Zhang Dai, Zhao Qingsong, Sun Han

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

Abstract A selection algorithm of mode selection threshold is proposed to applied to adaptive modulation coding technology for atmospheric laser communication is proposed. The performance of atmospheric weak turbulence channel is analyzed, the threshold selection algorithm for Gauss channel is modified. A selection method named signal to noise ratio-turbulence intensity is proposed to determine the mode for threshold region, and a equation for threshold selection is presented. The bit error rates of the adaptive modulation coding system are analyzed under three transmission modes when the turbulence intensity is 0, 0.1, 0.2, 0.3 respectively. The corresponding relationships between signal-to-noise ratio and turbulence intensity threshold region of the three transmission modes are obtained under the condition that the maximum bit error rate is 10^{-4} . Simulation results show that the proposed method is feasible, and it can accurately realize mode selection.

Key words optical communications; atmospheric laser communication; adaptive modulation coding technology; atmospheric weak turbulence channel; mode selection threshold

OCIS codes 060.2605; 060.2630

1 引言

大气激光通信(ALC)是一种将激光光束作为载体、将大气作为信道、直接进行信息双向传输的技术,具有信息容量大、保密性好、抗干扰能力强等特点,已成为空间卫星通信、军用安全通信、高速宽带无线接入等领域的热门技术^[1-2]。在大气激光通信技术的发展中,激光传输中的大气湍流是限制通信距离和通信质量的

收稿日期: 2016-10-19; **收到修改稿日期:** 2016-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(61571446)

作者简介: 王磊(1993—),男,硕士研究生,主要从事激光通信方面的研究。E-mail: 526084662@qq.com

导师简介: 郝士琦(1963—),女,硕士,教授,主要从事卫星通信和激光通信等方面的研究。

E-mail: liu_hsq@126.com(通信联系人)

主要因素之一^[3]。大气湍流会引起大气闪烁、光束漂移等现象,恶劣的信道环境造成了接收机误码率的增加、系统频带利用率的下降以及整个通信系统性能的降低,限制了大气激光通信技术的应用。针对上述问题,研究人员从物理层的角度提出了各种解决方案,包括分集技术^[4]、孔径平均技术^[5]、部分相干光传输技术^[6-7]等,从而有效抑制大气湍流的影响。但是,这些方案的实施受工程条件的制约,且需要很高的成本。

在大气激光通信中,一般根据信道最差的情况设计调制编码方案,以保证通信质量,因此无法充分利用信道的时变特性和信道容量。自适应调制编码技术中,在不改变发射功率的前提下,发射端可根据接收端反馈的信道状况自适应调整传输码模式(编码类别、码长、码率、调制阶数、星座图等),以匹配信道的动态变化,最终实现高效、可靠的信号传输^[8]。通过比较当前信道质量预测值与模式选择阈值,确定下一次传输应选择的调制编码方式。当信道噪声较小、湍流强度较弱时,选择吞吐量较大的传输模式;当信道噪声较大、湍流强度较强时,选择纠错性能良好而吞吐量相对较小的传输模式。在自适应调制编码技术中,阈值的选取决定了系统的误码率和吞吐量。张宇峰等^[9-10]提出了将自适应调制编码技术应用于大气激光通信中的方法,从信号层的角度解决了大气信道对系统误码率和吞吐量的影响,但该设计方案仅考虑了高斯信道条件下的模式选择阈值。实际中,大气信道是一种受大气湍流乘性噪声和加性高斯噪声叠加影响的级联信道^[12-13],因此在大气激光通信中应用自适应调制编码技术进行阈值的选取比高斯信道中更复杂。

针对上述问题,在分析了大气弱湍流信道性能的基础上,对高斯信道下的阈值选取方法进行了修正,提出了一种用于大气激光通信自适应调制编码的阈值选取算法。本文研究对自适应激光通信领域具有一定的理论指导意义和应用价值。

2 弱湍流信道性能分析

湍流是一种具有强烈涡旋性的不规则大气运动,湍流的存在使得大气折射率不断变化,导致激光光束的强度产生无规则的变化,从而影响激光信号的接收。经过弱湍流信道后的激光信号可表示为

$$y = Ix + n, I > 0, \quad (1)$$

式中 y 为接收端接收到的信号, x 为发送端的已调数字信号, n 为均值为 0、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声, I 为接收端接收到的光强。通常情况下, n 与 I 相互独立。

在弱湍流情况下,接收端 I 服从对数正态分布,其概率密度函数为

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

式中 σ_x^2 为湍流强度,取决于大气传输时的信道状态。弱湍流信道中的湍流强度 $\sigma_x^2 \leq 0.3$ 。

(1)式表明,大气湍流信道与普通高斯信道相比增加了大气湍流乘性噪声,因此系统的平均误码率可以表示为

$$R_{\text{BER}} = \int_0^\infty P_m(I) p(I, \sigma_x^2) dI = \int_0^\infty P_m(I) \frac{1}{I\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\left(\ln I + \frac{\sigma_x^2}{2}\right)^2 / 2\sigma_x^2\right] dI, \quad (3)$$

式中 $P_m(I)$ 为调制输出误码率。

通常,大气激光通信系统中采用强度调制/直接检测(IM/DD)的方式,与传统射频通信采用的调相、调频不同,IM/DD采用开关键控调制(OOK)、脉冲位置调制(PPM)、脉冲幅度调制(PAM)等方式。假设系统采用 PPM 调制方式,则调制后的调制输出误码率^[14]为

$$P_{\text{PPM}}(I) = \frac{M}{2} Q(R_{\text{SNR}} \sqrt{G_c \log_2 M}), \quad (4)$$

式中 M 为 PPM 的调制阶数, $Q(\cdot)$ 为高斯 Q 函数, G_c 为信道编码增益, R_{SNR} 为 PPM 下的系统信噪比(SNR),可表示为

$$R_{\text{SNR}} = \frac{I^2}{\sigma^2}. \quad (5)$$

将(4)式代入(3)式,得到弱湍流信道在 PPM 下的系统误码率为

$$R_{\text{BER}}(R_{\text{SNR}}, \sigma_x^2) = \int_0^\infty \frac{M}{2} Q(R_{\text{SNR}} \sqrt{G_c \log_2 M}) \frac{1}{I \sqrt{2\pi} \sigma_x} \exp\left[-\left(\ln I + \frac{\sigma_x^2}{2}\right)^2 / 2\sigma_x^2\right] dI. \quad (6)$$

从(6)式中很难看出系统误码率与湍流强度的关系,因此采用蒙特卡罗方法进行数值仿真,得到湍流强度 σ_x^2 与误码率 R_{BER} 的关系如图 1 所示。

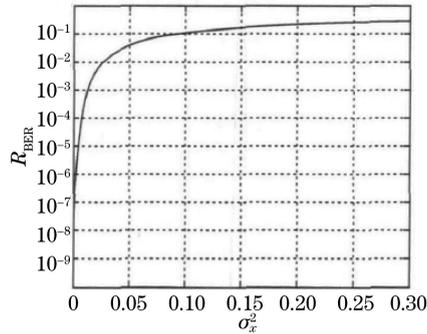


图 1 湍流强度与误码率的关系

Fig. 1 Relationship between turbulence intensity and bit error rate

由图 1 可知,对于同一种调制编码方式,当系统信噪比一定时,误码率随着湍流强度的增大而增大。当湍流强度小于 0.1 时,误码率随湍流强度的增加迅速增加;当湍流强度为 0.1~0.3 时,误码率随湍流强度的增加速度逐渐减小,并收敛于一个定值。

3 大气弱湍流信道下的自适应调制编码模式阈值选取

3.1 自适应调制编码技术的基本原理

自适应调制编码技术的基本原理示意图如图 2 所示,该技术的实现包括信道估计、编码调制模式阈值选取、发送端数据传输控制以及接收端调制编码信息接收^[9]4 个步骤。为实现自适应调制编码,首先需进行信道估计。阈值的选取是采用自适应调制编码方式提高系统性能的关键。常用的阈值选取原则有两种,一种原则是保证系统的误码率达到一定要求,另一种原则是保证系统吞吐量的最大化。大部分系统对误码率有一定的要求,因此将误码率达到最小作为确定阈值的原则。

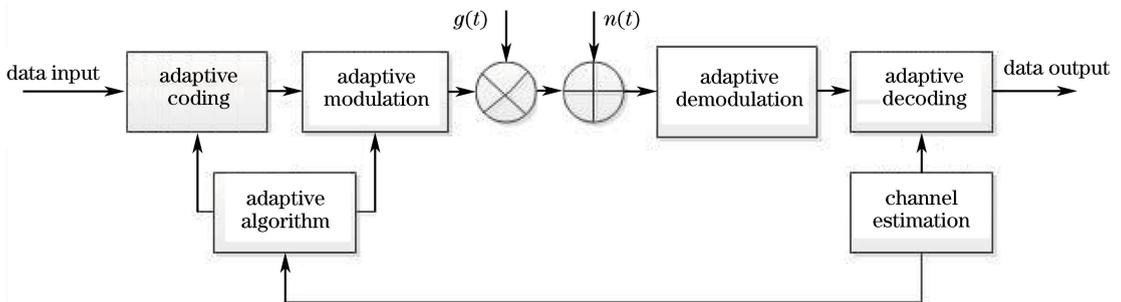


图 2 自适应调制编码技术的基本原理示意图

Fig. 2 Basic principle diagram of adaptive modulation coding technique

3.2 高斯信道下的阈值选取

在高斯信道下,信道估计的参量为系统的信噪比,系统通过比较信噪比估计值与模式选择阈值来确定传输模式。根据误码率优先原则,假设系统可承受的最大误码率 $R_{\text{BER},m} = C$,自适应调制编码中可供选择的调制编码模式包括 $\text{MCS}_1, \text{MCS}_2, \dots$,这些模式的吞吐量依次递增。当系统采用 PPM 时,

$$\frac{M_i}{2} Q(R_{\text{SNR},i} \sqrt{G_{c_i} \log_2 M_i}) = C, \quad (7)$$

式中 M_i 和 G_{c_i} 分别为传输模式 MCS_i 中的调制阶数和信道编码增益。

由(7)式得到的模式选择阈值可将信噪比划分为 $(n+1)$ 个连续的区间,即 $(-\infty, R_{\text{SNR},1})$ 、

$(R_{\text{SNR},1}, R_{\text{SNR},2})$ 、 $(R_{\text{SNR},2}, R_{\text{SNR},3})$ 、 \dots 、 $(R_{\text{SNR},n-1}, R_{\text{SNR},n})$ 、 $(R_{\text{SNR},n}, R_{\text{SNR},n+1})$ ，其中 $R_{\text{SNR},n+1} = \infty$ 。若信道估计得到的信噪比在区间 $(R_{\text{SNR},i}, R_{\text{SNR},i+1})$ 内，则选择 MCS_i 模式传输；若信道估计得到的信噪比在区间 $(-\infty, R_{\text{SNR},1})$ 内，说明信道恶劣，此时不传输数据。

3.3 大气弱湍流信道下的阈值选取

大气湍流信道不仅存在加性高斯噪声，还存在乘性湍流噪声，根据 3.1 节的分析，不同湍流噪声下每一种模式所对应的信噪比-误码率曲线是不同的。因此，湍流信道下的阈值选取应在高斯信道的基础上加一个修正项。当系统采用 PPM，假设最大误码率 $R_{\text{BER},m} = C$ ，则湍流信道下的模式阈值满足

$$\left\{ \int_0^\infty \frac{M_i}{2} Q(R_{\text{SNR},i} \sqrt{G_i} \log_2 M_i) \frac{1}{I \sqrt{2\pi} \sigma_{x_j}} \exp\left[-\left(\ln I + \frac{\sigma_{x_j}^2}{2}\right)^2 / 2\sigma_{x_j}^2\right] dI = C, i = 1, 2, \dots, n, \right. \\ \left. \sigma_{x_j}^2 \in (0, 0.3), j \in N^+ \right. \quad (8)$$

根据(8)式，在区间 $0 \sim 0.3$ 中选定湍流强度 $\sigma_{x_j}^2$ ，将其代入误码率公式可得到该湍流强度下的模式选择阈值 $R_{\text{SNR},i}$ ，从而构成一组阈值 $(R_{\text{SNR},i}, \sigma_{x_j}^2)$ 。

对于实际的大气湍流信道，不仅需要估计系统的信噪比，还需要估计湍流强度 σ_x^2 。因此，模式选择阈值范围为二维信噪比-湍流强度区域。

图 3、4 分别为高斯信道和湍流信道下的阈值选取原理图。如图 3 所示，在高斯信道下，调制编码模式 MCS_i 、 MCS_{i+1} 所对应的信噪比-误码率曲线是固定不变的，因此由(7)式得到的信噪比阈值 $R_{\text{SNR},i}$ 、 $R_{\text{SNR},i+1}$ 也是固定不变的；在湍流信道下，由(8)式可知，同一种调制编码模式在不同的湍流强度下的信噪比-误码率曲线是不同的，因此在不同湍流强度下确定的信噪比阈值也是不同的。如图 4 所示，调制编码模式 MCS_i 、 MCS_{i+1} 在湍流强度为 $\sigma_{x_1}^2$ 、 $\sigma_{x_2}^2$ ($\sigma_{x_1}^2 < \sigma_{x_2}^2$) 下的信噪比-误码率曲线是不同的，由此确定的信噪比阈值也不唯一，此时每种调制编码模式存在两个阈值，分别为 $R_{\text{SNR},i}$ 、 $R'_{\text{SNR},i}$ 和 $R_{\text{SNR},i+1}$ 、 $R'_{\text{SNR},i+1}$ 。

根据不同湍流强度下的阈值 $(R_{\text{SNR},i}, \sigma_{x_j}^2)$ ，在信噪比-湍流强度坐标系中描点，拟合出每一种模式对应的阈值与湍流强度的关系曲线，这些曲线将坐标平面分成 $(n+1)$ 个区域，每一个区域对应 1 种传输模式。根据接收端接收到的信号，得到信噪比及湍流强度的估计值，从而可以判断由这 2 个参数组成的点在 $R_{\text{SNR}} - \sigma_x^2$ 图中所属的区域，进而选择该区域上方曲线所对应的模式进行传输。

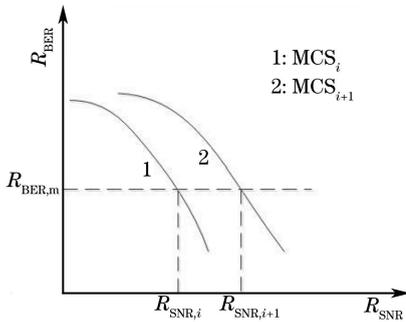


图 3 高斯信道下的阈值选取原理图

Fig. 3 Schematic of threshold selection for Gaussian channel

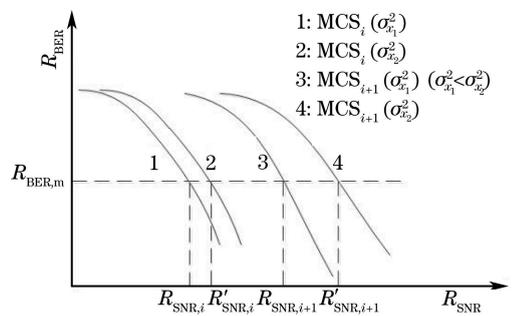


图 4 湍流信道下的阈值选取原理图

Fig. 4 Schematic of threshold selection for turbulence channel

由上述分析可知，不同于自适应调制编码在传统高斯信道中的应用，自适应调制编码应用于湍流信道中时还需要对湍流强度 σ_x^2 进行估计，实现该过程需采用矩量法^[15]。根据连续采样接收的信号，计算得到采样信号的 1 阶矩 m_1 和 2 阶矩 m_2 分别为

$$m_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_k, \quad (9)$$

$$m_2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_k^2, \quad (10)$$

式中 i_k 为采样信号的强度， N 为采样点数。湍流强度 σ_x^2 的估计值为

$$\hat{\sigma}_x^2 = m_2 - m_1^2 - \sigma^2. \quad (11)$$

4 实验仿真

采用蒙特卡罗方法进行仿真,仿真中采用 8-PPM 方式和低密度奇偶校验码(码长为 1024、码率为 $1/2$)^[16],仿真点数为 10^4 ,得到湍流强度分别为 0.05, 0.15, 0.25 时的误码率如图 5 所示。从图 5 可以看出,湍流强度越大,系统的误码率越高,表明同一种调制编码传输模式在不同湍流强度下的误码率曲线是不同的。假设系统可以承受的最大误码率 $R_{BER,m} = 10^{-4}$,则 3 种湍流强度下的阈值分别为 9.5 dB、10.2 dB、11.3 dB(图 5)。显然,湍流强度越大,系统所设定的信噪比阈值也越高。

假设自适应调制编码系统的调制编码模式如表 1 所示,利用蒙特卡罗方法对 MCS_1 、 MCS_2 、 MCS_3 模式进行仿真,湍流强度分别取 0, 0.1, 0.2, 0.3 时误码率随信噪比的变化如图 6 所示。可以看出,当湍流强度为 0 时,湍流信道为高斯信道。

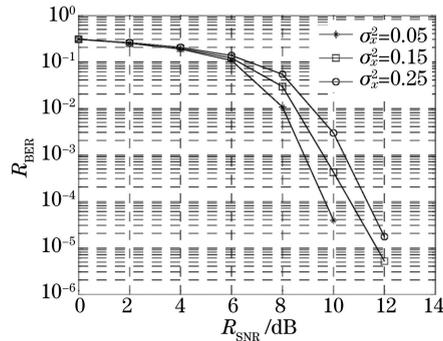


图 5 不同湍流强度下的误码率曲线图

Fig. 5 BER curves under different turbulence intensities

表 1 $MCS_1 \sim MCS_3$ 对应的调制阶数及码率

Table 1 Modulation order and coding rate corresponding to $MCS_1 \sim MCS_3$

Modulation encoding mode	PPM order	Coding rate
MCS_1	16	3/4
MCS_2	8	1/2
MCS_3	4	1/4

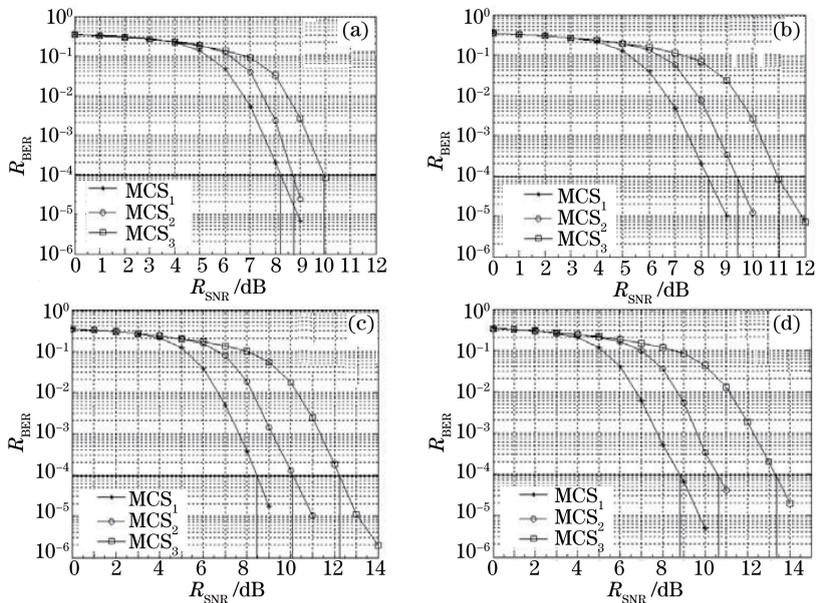


图 6 不同湍流强度下误码率随信噪比的变化。(a) $\sigma_x^2 = 0$; (b) $\sigma_x^2 = 0.1$; (c) $\sigma_x^2 = 0.2$; (d) $\sigma_x^2 = 0.3$

Fig. 6 Relationship between R_{BER} and R_{SNR} under different turbulence intensities.

(a) $\sigma_x^2 = 0$; (b) $\sigma_x^2 = 0.1$; (c) $\sigma_x^2 = 0.2$; (d) $\sigma_x^2 = 0.3$

不同湍流强度下, MCS_1 、 MCS_2 、 MCS_3 模式对应的信噪比阈值如表 2 所示。根据表 2 中的数据, 在 $R_{SNR}-\sigma_x^2$ 坐标系中描点, 再将数据进行拟合, 得到 3 种模式在弱湍流信道下的模式选择阈值区域如图 7 所示。

表 2 不同湍流强度下的信噪比阈值

Table 2 SNR thresholds under different turbulence intensities

σ_x^2	$R_{SNR,1}$	$R_{SNR,2}$	$R_{SNR,3}$
0	8.2	8.7	10.0
0.1	8.3	9.5	11.0
0.2	8.5	10.1	12.2
0.3	8.9	10.5	13.4

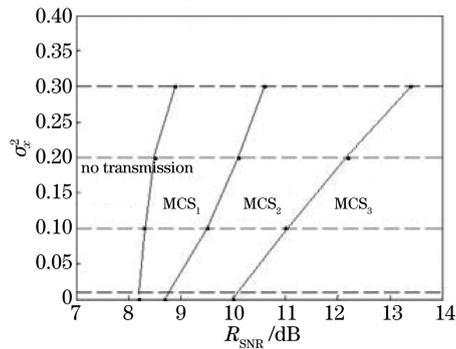


图 7 模式选取阈值区域分布

Fig. 7 Distribution of mode selection threshold regions

需要注意的是, 若仿真选取的湍流强度越强、间隔越密, 则绘制出的模式选择阈值区域就越准确。这里仅仿真了 4 组数据。从图 7 可以看出, $MCS_1 \sim MCS_3$ 模式在湍流强度为 0 和 0.3 时信噪比阈值差分别为 0.7 dB、1.8 dB、3.4 dB。可以看出, 吞吐量越高的模式在不同湍流强度下对应的信噪比阈值差越大。

在图 7 中作平行于横坐标的一条虚线, 由该虚线与 3 条曲线的交点可以确定某湍流强度下 3 种模式的一维信噪比阈值区间。例如, 当 $\sigma_x^2 = 0.1$ 时, 信噪比阈值区间为 $(-\infty, 8.3)$ 、 $(8.3, 9.5)$ 、 $(9.5, 11)$ 。在高斯信道中, 当信噪比估计值为 8.4 dB 时, 应该选择 MCS_1 模式, 而实际上当湍流强度 $\sigma_x^2 = 0.2$ 、信噪比为 8.4 dB 时, 从表 2 中可以看出, 此时应该选择无传输数据的阈值区域。由此可见, 采用信噪比-湍流强度模式选择阈值区域可以更准确地确定传输模式。

5 结 论

自适应调制编码技术广泛应用于传统微波通信中, 而在新兴大气激光通信中的应用相对较少。在微波通信中, 主要采用高斯信道模型来确定自适应调制编码中的模式选择阈值, 而实际大气信道是受大气湍流乘性噪声和加性高斯噪声影响的级联信道, 因此不能直接使用自适应调制编码在微波通信中的阈值选取方法。针对大气激光通信自适应调制编码中模式选取阈值的确定问题, 对传统高斯信道下的阈值确定方法进行了修正, 提出了一种大气弱湍流信道下的阈值选取算法, 并对具有 3 种传输模式的自适应调制编码系统进行了蒙特卡罗仿真, 绘制出了该系统的阈值区域图。仿真结果表明, 该算法具有可行性, 可准确地确定传输模式。

参 考 文 献

- [1] Zheng Y, Zheng J, Tong S, *et al.* Research on optimum local oscillator laser power of the space coherent laser communication[C]. SPIE, 2013, 8906: 89060H.
- [2] Han Liqiang, You Yahui. Cooperative schemes in all-optical free-space optical communication system[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(10): 1006004.
韩立强, 游雅晖. 全光自由空间光通信中继协作方案的研究[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1006004.
- [3] Yi Xiang. Research on irradiance scintillation and mitigation technology in atmospheric laser communications [D].

- Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2013: 16-18.
- 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: 16-18.
- [4] Simon M K, Alouini M S. Digital communication over fading channels[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [5] Rao Ruizhong, Gong Zhiben, Wang Shipeng, *et al.* Aperture averaging of saturated scintillation of laser propagation in atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(1): 36-40.
- 饶瑞中, 龚知本, 王世鹏, 等. 激光大气闪烁饱和的孔径平均效应[J]. 光学学报, 2002, 22(1): 36-40.
- [6] Ma Dongtang, Wei Jibo, Zhuang Zhaowen. Performance evaluation and channel modeling of multiple-beam propagation for atmospheric laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(8): 1020-1024.
- 马东堂, 魏急波, 庄钊文. 大气激光通信中多光束传输性能分析和信道建模[J]. 光学学报, 2004, 24(8): 1020-1024.
- [7] Ke Xizheng, Zhang Ya. Propagation properties of partially coherent array beams in free space optics system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 100601.
- 柯熙政, 张 雅. 无线光通信系统中部分相干阵列光束的传输特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 100601.
- [8] Ke Xizheng, Yin Zhiyun. Coding theory in wireless laser communication system[C]. Beijing: Science Press, 2009: 259.
- 柯熙政, 殷致云. 无线激光通信系统中的编码理论[C]. 北京: 科学出版社, 2009: 259.
- [9] Zhang Yufeng. Adaptive coding for laser communication in atmosphere[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008: 31-36.
- 张宇峰. 大气光通信中的自适应编码研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008: 31-36.
- [10] Shu fang, Ao Faliang, Sun Lihua. Applied research of the AMC technology in atmospheric laser communication[J]. Control & Automation, 2010, 26(15): 148-149.
- 舒 芳, 敖发良, 孙丽华. 自适应编码调制技术在大气激光通信中的应用研究[J]. 微计算机信息, 2010, 26(15): 148-149.
- [11] Hu Hao, Wang Hongxing, Zhou Min, *et al.* Modeling and analyzing of error performance for pulse position modulation and digital pulse interval modulation under turbulence[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1269-1274.
- 胡 昊, 王红星, 周 旻, 等. 湍流大气中脉冲位置调制和数字脉冲间隔调制差错性能的建模与分析[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1269-1274.
- [12] 中国科学院安徽光机所 203 组. 大气湍流对激光通讯的影响[J]. 激光, 1977, 4(3): 27-33.
- [13] Wang Yingjian, Wu Yi, Gong Zhiben. The statistics of atmospheric coherent length and Strehl ratio[J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(8): 1109-1113.
- 王英俭, 吴 毅, 龚知本. 大气湍流相干长度和 Strehl 比的统计特征[J]. 光学学报, 1996, 16(8): 1109-1113.
- [14] Jaiswal A, Jain V K, Kar S. Adaptive coding and modulation (ACM) technique for performance enhancement of FSO Link[C]. IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI), 2016: 15804058.
- [15] Khatoun A, Cowley W G, Letzepis N. Channel measurement and estimation for free space optical communications[C]. Communications Theory Workshop (AusCTW), 2011: 5728747.
- [16] Gallager R G. Low-density parity-check codes[M]. Cambridge: MIT Press, 1963.