

离散速率条件下的大气激光通信 自适应调制编码系统性能

王 磊¹, 郝士琦¹, 张 岱¹, 王 勇^{1,2}

¹ 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;

² 通信信息控制和安全技术重点实验室, 浙江 嘉兴 314033

摘要 针对大气湍流引起的系统频带利用率下降的问题, 研究了一种离散速率条件下的大气激光通信自适应调制编码系统。从信号层角度建立了湍流信道模型, 给出了湍流信道下的瞬时信噪比概率密度函数, 并采用外场实验验证了该信道模型。理论推导了系统频带利用率和误码率表达式, 仿真结果表明大气激光通信自适应调制编码系统较传统单一传输模式系统具有优越性。研究了其频带利用率和误码率曲线特性, 分析了误码率要求和湍流强度对系统性能的影响。结果表明降低误码率要求可大幅提高系统的频带利用率, 且误码率要求越低, 湍流强度越弱, 频带利用率越高。

关键词 光通信; 大气湍流; 自适应调制编码; 频带利用率; 误码率

中图分类号 TN012 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0706002

Performance of Adaptive Modulation Coding System for Atmospheric Laser Communication Under Discrete Rate Condition

Wang Lei¹, Hao Shiqi¹, Zhang Dai¹, Wang Yong^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China;

² Science and Technology on Communication Information Security Control Laboratory, Jiaxing, Zhejiang 314033, China

Abstract For the decrease of system spectral efficiency caused by atmospheric turbulence, an adaptive modulation and coding system for atmospheric laser communication under discrete rate condition is studied. A turbulent channel model is established from the viewpoint of signal layer, and the probability density function of instantaneous signal to noise ratio in turbulent channel is presented and verified by outfield experiments. The system spectral efficiency and bit error rate formulas are derived theoretically. Simulation results indicate that the adaptive modulation and coding system for atmospheric laser communication is superior to the traditional single transmission mode system. In addition, the characteristics of spectral efficiency curves and error rate curves are studied. Influences of bit error rate requirement and turbulence intensity on system performance are analyzed. Results show that the spectral efficiency is greatly improved when we decrease the bit error rate requirement. The lower the bit error rate requirement is, the weaker the turbulence intensity is, and the higher the spectral efficiency is.

Key words optical communications; atmospheric turbulence; adaptive modulation and coding; spectral efficiency; bite error rate

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 010.1330

1 引 言

大气激光通信是一种以激光为载体、以大气为传输媒介的通信技术, 综合了光纤通信和其他无线通信方式, 具有信息容量大、保密性好、功耗低、体积小和重量轻等优点, 在最后 1 km 接入、局域网/城域网扩展、星

收稿日期: 2017-02-10; 收到修改稿日期: 2017-03-09

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: 王 磊(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事大气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, 博士生导师, 主要从事大气激光通信和卫星通信方面的研究。

E-mail: liu_hsq@126.com(通信联系人)

间通信、星地通信和空地通信等领域有着广阔的应用前景^[1-3]。然而,大气信道中由温度和压强的不均匀性引起的大气湍流会导致接收端光信号产生光强起伏和光束漂移等效应,严重影响系统性能,限制了大气激光通信的发展^[4]。近年来,自适应调制编码被认为是一种能够有效提高大气激光通信链路频带利用率的技术方案,相比于现有的分集技术^[5]、孔径平均技术^[6]和部分相干光传输技术^[7]等,具有频带利用率高、灵活可靠、成本低等优势。因此,研究自适应调制编码技术在大气激光通信中的应用具有重要意义。

自适应调制编码能够根据信道状态动态地调整发送速率,从而充分利用信道容量。自适应调制编码最初被应用在无线通信中,Goldsmith等^[8-9]对自适应调制编码进行了一系列理论推导和实用技术研究,结果表明几乎在所有衰落信道下自适应调制编码技术都能有效地提高系统频带利用率。但是,大气激光通信信道是一个受大气湍流乘性噪声和加性高斯噪声影响的级联信道^[10],比无线电通信中瑞利信道和莱斯信道条件更为恶劣,这决定了自适应调制编码在大气激光通信中的应用更复杂。针对自适应调制编码在大气激光通信中的应用,国内外学者进行了相关研究^[11-14]。张宇峰^[11]对大气激光通信中自适应调制编码中的信道估计进行了研究,改进了原有的信道估计算法,并给出了不同天气环境下的信噪比(SNR)范围,为自适应调制编码技术在大气激光通信中的应用提供了基础。Fatima等^[12]分析了不同调制阶数和不同编码码率对系统性能的影响,论证了自适应调制编码应用于大气激光通信的可行性。Djordjevic等^[13-14]建立了大气激光通信自适应调制编码系统模型,分析了功率自适应和调制阶数自适应对系统频带利用率的影响。但是,上述模型是建立在调制阶数任意可变的基础上,而在实际应用中,调制方式所能提供的速率都是离散的。

针对上述问题,本文在对大气湍流信道建模分析的基础上,设计了一种离散速率条件下的大气激光通信自适应调制编码系统,并推导了系统频带利用率及误码率表达式。仿真分析了自适应系统性能,研究了不同参数对系统性能的影响。本文研究结果对自适应调制编码技术在大气激光通信中的实际应用具有一定的理论指导意义。

2 大气激光通信自适应调制编码系统

2.1 系统模型

图1所示为大气激光通信自适应调制编码系统示意图。根据对信噪比的估计,通过射频反馈信道控制发送端同时改变调制阶数和编码码率。当信道条件良好时,通过提高调制阶数和编码码率来提高系统的频带利用率;当信道质量下降时,通过减小调制阶数和编码码率以降低系统误码率。理论上,理想的发送端速率应是任意可变的,以便充分适应信道变化。但在实际应用中,调制阶数和编码码率都是离散的,因此发送端只能提供几个经优化选择的调制编码组合。定义一组调制阶数与编码码率为一种传输模式。对于传输模式的确定,一般遵循以下原则:1)与相邻的传输模式相比,若该传输模式达到相同的目标误码率所需的信噪比大,则其频带利用率也应较高;2)传输模式要兼顾信道恶劣情况与信道良好情况;3)传输模式越多,越能充分利用信道资源,但系统的复杂度也越高,因此要在系统性能和复杂度之间折中选择,DVB-S2标准推荐最佳传输模式个数为7^[15]。

假设经优化选择后传输模式共有 n 种,分别为 $M_{CS1}, M_{CS2}, \dots, M_{CSn}$,各模式的编码码率和调制阶数分别

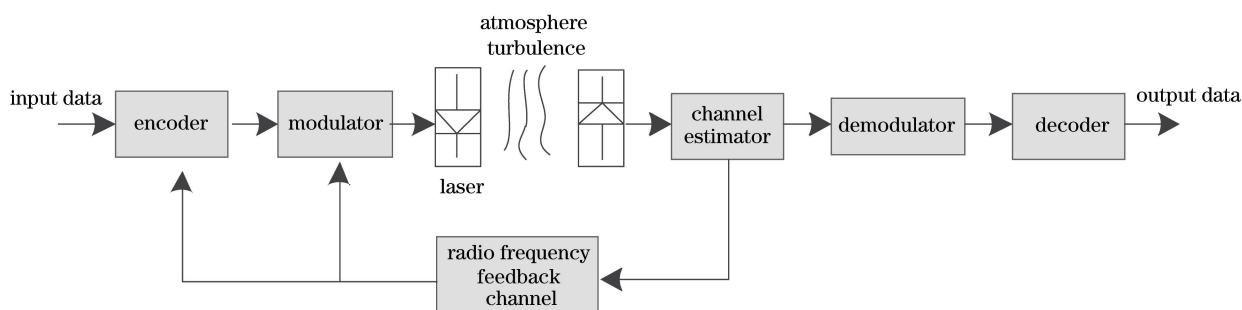


图1 大气激光通信自适应调制编码系统示意图

Fig. 1 Schematic of adaptive modulation coding system for atmospheric laser communication

为 $(r_1, M_1), (r_2, M_2), \dots, (r_n, M_n)$,且频带利用率是递增的。由于编码码率和调制阶数都是离散的,在考虑最佳自适应传输方案之前,首先必须找到最佳的划分方案,将信噪比划分为 $n+1$ 个区间,分别为 $(-\infty, \gamma_1), [\gamma_1, \gamma_2), [\gamma_2, \gamma_3), \dots, [\gamma_n, +\infty)$,每个区间对应一种传输模式,当信道估计值落在区间 $[\gamma_i, \gamma_{i+1})$ 时,则选择传输模式 M_{CS_i} ;当信道估计值小于 γ_1 时,表明信道环境过于恶劣,此时不传输数据,因此 γ_1 又称为截止信噪比,记为 γ_{th} 。假设系统采用脉冲幅度调制(PAM)和低密度奇偶校验码(LDPC),则误码率可表示为^[13]

$$B_{ER} \approx 0.2 \exp\left(-\frac{1.85\gamma_s G}{2^{2.19\log_2 M} - 1}\right), \quad (1)$$

式中 M 为PAM调制阶数, G 为LDPC编码增益, γ_s 为系统瞬时信噪比。

若要求系统误码率不得低于 P_{target} ,则根据(1)式,模式转换门限 γ_i 为

$$\gamma_i = \frac{(2^{2.19\log_2 M_i} - 1) \ln\left(\frac{1}{5P_{target}}\right)}{1.85G_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

式中 M_i 为 M_{CS_i} 的调制阶数, G_i 为 M_{CS_i} 的编码增益。此外,在实际应用中,模式转换门限 γ_i 常通过计算机仿真每一种传输模式的误码率-信噪比(BER-SNR)曲线得到。

2.2 信道模型

从信号层的角度建立湍流信道模型和研究湍流信道下瞬时信噪比 γ_s 的特性,对研究大气激光通信自适应调制编码系统的性能至关重要。对于大气湍流模型,现有文献主要是以接收端光强特性为研究对象,在弱湍流条件下接收端光强服从对数正态分布,在强湍流条件下接收端光强则大多采用K分布。Gamma-Gamma分布^[16]因其在各种湍流条件下能较好地预测接收光强起伏而倍受关注,其概率密度函数为

$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I), \quad (3)$$

式中 I 为接收端光强; $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数; $K_{\alpha-\beta}$ 是修正贝塞尔函数,阶次为 $\alpha-\beta$,其中 α 和 β 分别为大尺度起伏和小尺度起伏参数,可分别表示为

$$\alpha = \frac{1}{\exp\left[\frac{0.49\sigma_R^2}{(1+1.1\sigma_R^{12/5})^{7/6}}\right] - 1}, \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{\exp\left[\frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right] - 1}, \quad (5)$$

式中 σ_R^2 为Rytov方差, $\sigma_R^2 < 1$ 代表弱湍流, $\sigma_R^2 \approx 1$ 代表中湍流, $\sigma_R^2 > 1$ 代表强湍流。在平面波条件下, σ_R^2 满足

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

式中 C_n^2 为大气湍流折射率结构常数; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数,其中 λ 为激光波长, L 为传输距离。

由于大气激光通信系统大都采用强度调制/直接检测(IM/DD)模式,因此通常利用激光的强度信息来调制信号。当激光信号通过大气湍流信道时,接收信号 r_k 可以表示为

$$r_k = Ix_k + n_0, \quad (7)$$

式中 x_k 表示发送端的已调数字信号, n_0 表示均值为0、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。一般地, I 与 n_0 是相互独立的。

定义大气激光通信中接收端瞬时信噪比 γ_s 为

$$\gamma_s = \bar{\gamma}g, \quad (8)$$

式中 $\bar{\gamma}$ 为系统平均信噪比; g 为信噪比增益,可以表示为

$$g = \frac{\gamma_s}{\bar{\gamma}} = \frac{I^2/\sigma^2}{\left(\frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt\right)/\sigma^2} = \frac{I^2}{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt}, \quad (9)$$

式中 T 为信号持续时间。

假设在 T 时间内湍流环境保持稳定,则 $\frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt$ 为常数。令 $\frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt = P_r$, 即平均接收功率为 P_r , 此时瞬时信噪比 γ_s 可以表示为

$$\gamma_s = \frac{1}{P_r} \bar{\gamma} I^2. \quad (10)$$

将(10)式变形后代入(3)式,得到系统瞬时信噪比概率密度函数 $p_\gamma(\gamma_s)$ 为

$$p_\gamma(\gamma_s) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2} P_r^{\frac{\alpha+\beta-2}{4}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\bar{\gamma}^{\frac{\alpha+\beta-2}{4}}} \gamma_s^{\frac{\alpha+\beta-2}{4}} K_{\alpha-\beta} \left(2 \sqrt{\alpha\beta} \sqrt{\frac{P_r \gamma_s}{\bar{\gamma}}} \right), \quad (11)$$

则其概率分布函数 $F_\gamma(\gamma_s)$ 可表示为

$$F_\gamma(\gamma_s) = \int_0^{\gamma_s} p_\gamma(\gamma_s) d\gamma_s = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,3}^{2,1} \left[\alpha\beta \sqrt{\frac{P_r \gamma_s}{\bar{\gamma}}} \Big|_{\alpha, \beta, 0}^1 \right], \quad (12)$$

式中 $G_{m,n}^{p,q}(\cdot)$ 为梅耶尔-G 函数。

2.3 性能分析

频带利用率是衡量系统性能的一个重要指标,在大气激光通信自适应调制编码系统中,传输模式 M_{CSI} 的频带利用率 $\eta(i)$ 为

$$\eta(i) = r_i \log_2 M_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

则系统平均频带利用率为

$$\left(\frac{R}{B} \right)_e = \sum_{i=1}^n \eta(i) P_r(i), \quad (14)$$

式中 $P_r(i)$ 为系统选择传输模式 M_{CSI} 传输的概率,可表示为

$$P_r(i) = \int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}} p_\gamma(\gamma_s) d\gamma_s = \int_0^{\gamma_{i+1}} p_\gamma(\gamma_s) d\gamma_s - \int_0^{\gamma_i} p_\gamma(\gamma_s) d\gamma_s = F_\gamma(\gamma_{i+1}) - F_\gamma(\gamma_i). \quad (15)$$

将(13)、(15)式代入(14)式,可得 $(R/B)_e$ 为

$$\left(\frac{R}{B} \right)_e = \sum_{i=1}^n F_\gamma(\gamma_{i+1}) r_i \log_2 M_i - \sum_{i=1}^n F_\gamma(\gamma_i) r_i \log_2 M_i. \quad (16)$$

由(16)式可以看出,当发送功率一定时,平均接收功率 P_r 、模式转换门限 γ_i 和平均信噪比 $\bar{\gamma}$ 是影响系统平均频带利用率的 3 个重要参数。 P_r 由湍流环境即 Rytov 方差 σ_R^2 决定, γ_i 由系统误码率要求 P_{target} 决定。因此,系统的平均频带利用率由 σ_R^2 、 P_{target} 和 $\bar{\gamma}$ 共同决定。

自适应调制编码系统平均频带利用率的提高是通过牺牲高信噪比条件下的误码性能来实现的。在传统单一传输系统中,随着信噪比的提高,系统误码率也会相应地下降。在自适应系统中,假设此时传输模式为 M_{CSI} ,当信噪比提高到 γ_{i+1} 时,误码率不会继续下降而是会根据门限切换成 $M_{\text{CSI}+1}$ 模式,此时在选择 M_{CSI} 传输时能达到的最小误码率 $(P_{\text{er}})_{\text{min}}$ 为

$$(P_{\text{er}})_{\text{min}} = 0.2 \exp \left(- \frac{1.85 G_i \gamma_{i+1}}{2^{2.19 \log_2 M_i} - 1} \right). \quad (17)$$

因此,在大气激光通信自适应调制编码链路中,系统的误码率极小值 $P_{\text{e}_{\text{min}}}$ 为

$$P_{\text{e}_{\text{min}}} = \min[(P_{\text{er}})_{\text{min}}], \quad i = 1, 2, \dots, n - 1. \quad (18)$$

(18)式表明,大气激光通信自适应调制编码把系统的误码率限制在 $(P_{\text{target}}, P_{\text{e}_{\text{min}}})$ 范围内。在实际通信中,当语音业务的误码率达到 10^{-3} 、数字业务的误码率达到 10^{-5} 时,即可满足通信质量要求^[12]。因此,在满足一定误码率的前提下,通过牺牲高信噪比下的误码率来提高平均频带利用率具有可行性。

3 实验与仿真

图 2 所示为大气激光通信实验平台。通过外场实验验证所建立的湍流信道模型,并测定模型参数。利用空气加湿器模拟大气湍流,在发射端利用 1550 nm 激光器产生激光信号,信号经衰减器衰减、光电调制器调制[由于系统信噪比与调制方式无关,因此调制采用最简单的开关(OOK)调制],并由光纤送入准直镜发

射。在接收端,通过光电探测器—雪崩光电二极管(APD)将接收到的光信号转化为电信号,通过示波器采样并显示接收的光强信号,如图3所示,可以看出由于湍流的影响接收端光强有明显的起伏。设 $\mathbf{X}=[x_1, x_2, \dots, x_N]$ 表示经示波器采样后的输出数据,则系统瞬时信噪比 γ_s 可以表示为

$$\gamma_s(i) = \frac{x_i^2}{s_{\text{id}}(\mathbf{X})^2}, i = 1, 2, \dots, N, \quad (19)$$

式中 $s_{\text{id}}(\mathbf{X})$ 表示对向量 \mathbf{X} 求标准差。利用 Matlab 绘出 γ_s 的概率密度函数,如图4所示。根据实验所得数据,采用非线性拟合函数对(11)式进行拟合,结果表明实验曲线与理论曲线拟合良好,可得模型参数 $\alpha = 9.77, \beta = 8.93, \bar{\gamma} = 4.32, P_r = 6.17 \times 10^{-4}$ 。

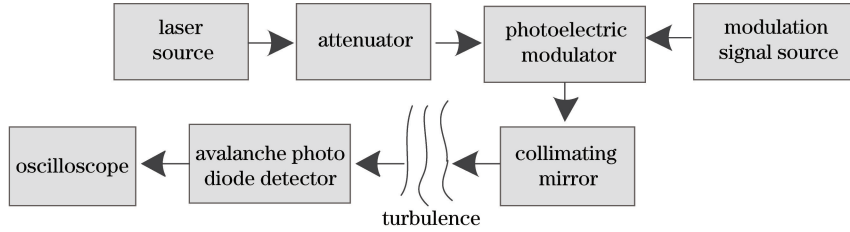


图2 大气激光通信流程框图

Fig. 2 Flow chart of atmospheric laser communication

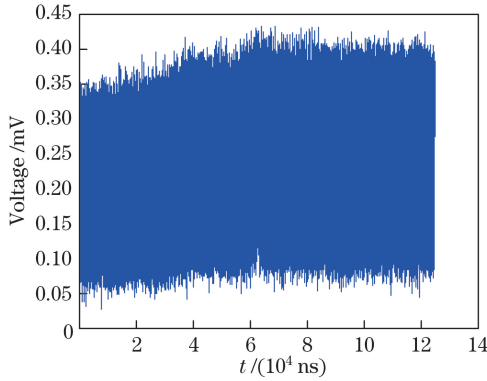


图3 OOK调制信号在湍流信道中的波形图

Fig. 3 Waveform of OOK modulated signal in turbulent channel

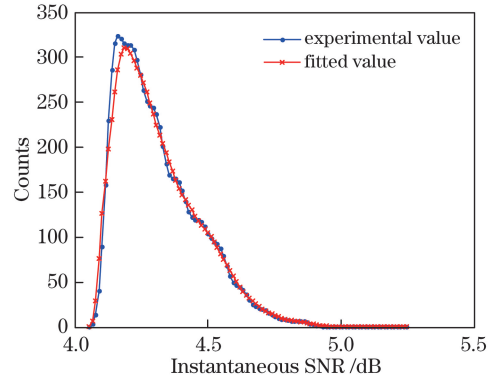


图4 瞬时信噪比概率密度函数

Fig. 4 Probability density function of instantaneous SNR

假设大气激光通信自适应调制编码系统发送端提供5种经优化选择的传输模式,每一种传输模式的编码码率及调制阶数如表1所示。利用 Matlab 仿真每一种传输模式在上述湍流环境下的误码率曲线,如图5所示。可以看出,随着 M_{CS1} 到 M_{CS5} 的频带利用率依次提高,其纠错性能依次下降,误码率为 10^{-4} 时 M_{CS1} 比 M_{CS5} 的信噪比(SNR)高 3.5 dB。当信道状态良好时,选择 M_{CS5} 等有效性高的模式传输可以提高系统频带利用率;当信道状态恶劣时,选择 M_{CS1} 等可靠性高的模式传输可以降低系统的误码率,最终可在保证系统误码性能的前提下提高平均频带利用率。

根据图5仿真的各传输模式的 BER-SNR 曲线,结合(2)式,给出系统误码率要求分别为 $10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ 时各个传输模式的转换门限,如表2所示。可以看出随着误码率要求的降低,各个模式的转换门限也随之提高。

表1 $M_{\text{CS1}} \sim M_{\text{CS5}}$ 调制阶数、编码码率和频带利用率

Table 1 Modulation order, code rate and spectral efficiency of $M_{\text{CS1}} \sim M_{\text{CS5}}$

$M_{\text{CS}i}$	Modulation order and code rate	Spectral efficiency / (bit·s ⁻¹ ·Hz ⁻¹)
M_{CS1}	4-PAM, $r = 1/4$	0.50
M_{CS2}	4-PAM, $r = 1/2$	1.00
M_{CS3}	4-PAM, $r = 3/4$	1.50
M_{CS4}	8-PAM, $r = 3/4$	2.25
M_{CS5}	16-PAM, $r = 3/4$	3.00

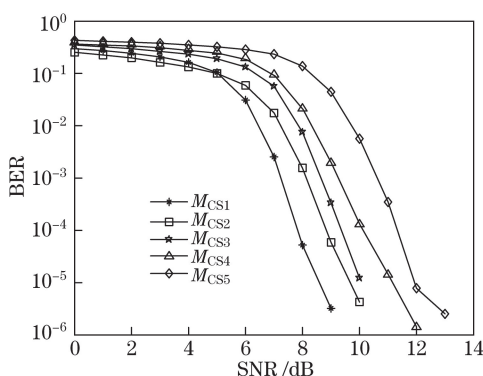


图 5 湍流信道下的误码率随信噪比的变化

Fig. 5 BER versus SNR under turbulence channel

表 2 不同 P_{target} 下的模式转换门限

Table 2 Mode switching threshold under different P_{target}

P_{target}	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5
10^{-3}	7.3	8.1	8.8	9.3	10.6
10^{-4}	7.8	8.9	9.4	10.1	11.3
10^{-5}	8.6	9.7	10.1	11.1	11.9

根据表 2 所示的模式转换门限和(16)式,仿真了不同误码率要求下的平均频带利用率随平均信噪比的变化,如图 6 所示。可以看出,随着平均信噪比 $\bar{\gamma}$ 的增加,平均频带利用率逐渐提高,最终达到 $3 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。对传统单一传输模式的大气激光通信而言,一般根据信道最差情况来设计调制编码方案,这导致无法充分利用信道的时变特性,频带利用率较低。例如当采用 M_{CS1} 作为单一传输模式时,系统频带利用率只能达到 $0.5 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$,远小于自适应模式。此外,图 6 还表明随着系统误码率要求 P_{target} 的降低,平均频带利用率也随之降低,即系统的可靠性提高了,但系统有效性降低了。因此,实际应用中需根据业务需求并在有效性和可靠性之间折中选择合适的目标误码率。

图 7 为 σ_R^2 分别为 0.21, 1.05, 4.2 时系统的平均频带利用率随平均信噪比的变化。可以看出,在平均信噪比为 25 dB 时,强湍流信道下的平均频带利用率分别比中湍流和弱湍流下的低 $0.1 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 和 $0.3 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。这是因为强湍流信道是最差的信道环境,激光信号到达接收端的功率最低,为保证系统的可靠性,发送端需采用纠错性能强而频带利用率低的传输模式,因此平均频带利用率最低。随着湍流强度变弱,信道环境得到改善,接收功率得到提高,在弱湍流和中湍流信道中采用频带利用率高的传输模式的概率增加,因此在较小的信噪比时便可获得较高的频带利用率。

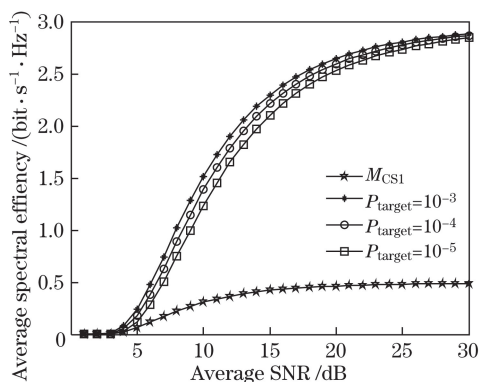


图 6 不同误码率要求下的平均频带利用率随平均信噪比的变化

Fig. 6 Average spectral efficiency versus average SNR under different BER requirements

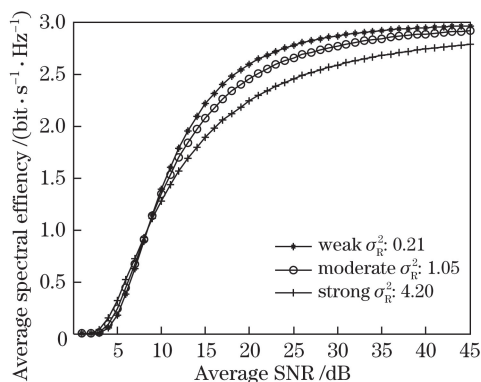


图 7 不同湍流下的平均频带利用率随平均信噪比的变化

Fig. 7 Average spectral efficiency versus average SNR under different turbulence

自适应调制编码通过牺牲高信噪比下的误码性能来提高平均频带利用率。图 8 所示为弱湍流信道 $\sigma_R^2 = 0.21$ 时, P_{target} 分别为 10^{-3} 和 10^{-4} 时自适应调制编码系统的误码率随信噪比的变化。可以看出自适应调制编码系统的误码率随信噪比的变化曲线呈锯齿状, 与单一传输模式相比, 其信噪比动态范围较大, 但其误码率分别被限制在 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 和 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 量级内。根据(18)式, 当 P_{target} 分别为 10^{-3} 和 10^{-4} 时, 误码率极小值分别为 3.1×10^{-5} 和 7.3×10^{-6} 。由图 8 也可以看出, 当 P_{target} 越小, 误码率的极小值也越小。图 9 为在不同湍流环境下自适应调制编码系统的误码率随信噪比的变化。可以看出随着湍流强度的增强误码率极小值也会相应增大, 同时截止信噪比 γ_{th} 会右移。

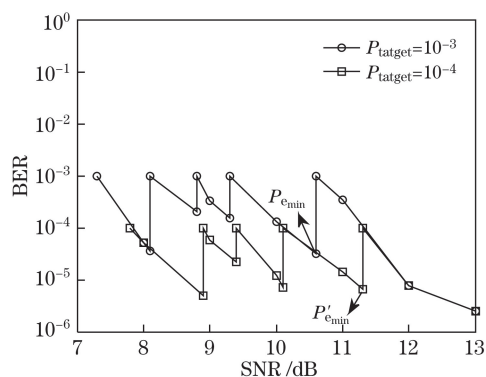


图 8 弱湍流信道下误码率随信噪比的变化

Fig. 8 BER versus SNR in weak turbulence channel

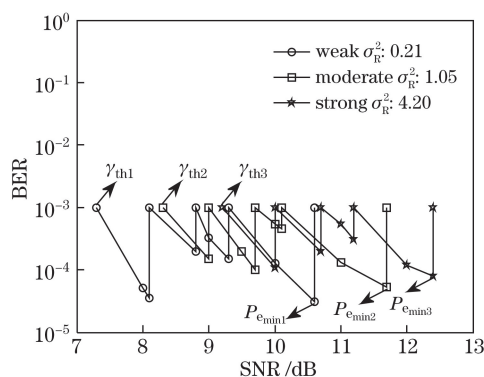


图 9 不同湍流环境下误码率随信噪比的变化 ($P_{\text{target}} = 10^{-3}$)

Fig. 9 BER versus SNR under different turbulence when $P_{\text{target}} = 10^{-3}$

4 结 论

以自适应调制编码模型的研究为基础, 设计了一种离散速率条件下的大气激光通信自适应调制编码系统。从信号层的角度建立了湍流信道模型, 推导了湍流信道瞬时信噪比概率密度函数, 并采用外场实验验证了湍流信道模型。从理论上推导了系统频带利用率和误码率表达式。仿真分析并比较了系统性能和各参数对系统的影响。结果表明离散速率条件下的大气激光通信自适应调制较传统单一传输模式具有显著的优越性, 在保证一定误码性能的基础上大幅提高了系统频带利用率。

所提出的模型是在假设信道估计理想的前提下建立的, 但在实际应用中, 由于信道恶劣、系统延时等, 还需要在模型中加入信道反馈信息存在误差的情况, 后续将进行进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Majumdar A K, Ricklin J C. Free-space laser communications: Principles and advances [M]. New York: Springer-Verlag New York, 2008.
- [2] Zhang Dai, Hao Shiqi, Zhao Qingsong, *et al.* Atmospheric laser communication based on depolarization ratio detection[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1106008.
张岱, 郝士琦, 赵青松, 等. 基于退偏振比探测的大气激光通信[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1106008.
- [3] Yang Yufei, Yan Changxiang, Hu Chunhui, *et al.* Polarization aberration analysis of coherent laser communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1106003.
杨宇飞, 颜昌翔, 胡春晖, 等. 相干激光通信光学系统偏振像差研究[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1106003.
- [4] Ghassemlooy Z, Popoola W, Rajbhandari S. Optical wireless communications: System and channel modelling with Matlab[M]. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [5] Wang Yong, Cao Jianian. Performance analysis of atmospheric laser communication system basing on asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing intensity modulation and lower density parity check code[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(12): 3031-3036.
王勇, 曹家年. 基于低密度奇偶校验码和非对称限幅光正交频分复用技术的大气激光通信系统性能[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3031-3036.
- [6] Vetelino F S, Young C Y, Andrews L C. Fade statistics and aperture averaging for Gaussian beam waves in moderate-

- to-strong turbulence[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(18): 3780-3789.
- [7] Wang Qingquan. Analysis of the influence of atmospheric turbulence on the performance of partially coherent laser communication[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
汪清泉. 部分相干激光通信性能受大气湍流影响的分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [8] Goldsmith A J, Varaiya P P. Capacity of fading channels with channel side information[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1997, 43(6): 1986-1992.
- [9] Goldsmith A J, Chua S G. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1997, 45(10): 1218-1230.
- [10] Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Zhi Yanan, *et al.* Research of DPSK modulation and self-differential homodyne coherent detection technology to overcome the effects of atmospheric turbulence effect in the satellite to ground laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706017.
马小平, 孙建锋, 职亚楠, 等. DPSK 调制/自差动零差相干探测技术克服星地激光通信中大气湍流效应的研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706017.
- [11] Zhang Yufeng. Adaptive coding for laser communication in atmosphere[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
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.
- [12] Fatima K, Muhammad S S, Leitgeb E. Adaptive coded modulation for FSO links[C]. *International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing*, 2012: 12998308.
- [13] Djordjevic I B. Adaptive modulation and coding for free-space optical channels[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2010, 2(5): 221-229.
- [14] Djordjevic I B, Djordjevic G T. On the communication over strong atmospheric turbulence channels by adaptive modulation and coding[J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 18250-18262.
- [15] Boussemart V, Brandt H, Berlioli M. Subset optimization of adaptive coding and modulation schemes for broadband satellite systems[C]. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2010: 11411976.
- [16] Al-Habash M A, Andrews L C, Phillips R L. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8): 1554-1562.