

面向星地激光通信的光功率动态均衡技术研究

蔡岳丰, 刘海锋, 刘 波, 林 炜

(南开大学电子信息与光学工程学院, 天津市光电传感器与传感网络技术重点实验室, 天津 300350)

摘 要: 针对大气湍流在星地激光通信接收端引起的光强闪烁现象会影响通信质量的问题, 研究一种基于增益竞争的光功率均衡系统。实验验证接收功率波动会增加通信误码率, 研究增益竞争下均衡系统的静态输出曲线并对动态时域信号进行均衡性能测试, 实验证明该系统可以将动态信号的功率波动范围压缩至4 dB。

关键词: 大气湍流; 增益竞争; 光功率均衡; 动态时域信号

中图分类号: TN256

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021022

Research on Dynamic Equalization of Optical Power for Satellite-Ground Laser Communication

CAI Yuefeng, LIU Haifeng, LIU Bo, LIN Wei

Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Sensor and Sensing Network Technology, College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China

Abstract: Aiming at the problem of light intensity scintillation caused by atmospheric turbulence at the receiver of satellite-ground laser communication will affect the communication quality, an optical power balance system based on gain competition was studied. The experiment verified that the received power fluctuation increased the communication bit error rate. The static output curve of the equalization system under gain competition was studied and the equalization performance of the dynamic time domain signal was tested. The experimental results showed that the system could compress the power fluctuation range of the dynamic signal to 4 dB.

Keywords: atmospheric turbulence, gain competition, optical power equalization, dynamic time domain signal

1 引言

卫星通信作为一种已投入使用且近年来迅猛发展的通信技术, 在无线通信领域具有重要地位^[1]。以微波为通信载体的卫星通信方式难以满足卫星通信在通信速率、数据传输质量以及通信容量等方面的巨大需求, 卫星激光通信技术成为了解决这一瓶颈的主要手段之一^[2]。卫星激光通信技术在满足高速率和大容量通信的同时, 还具有功耗低、设备体积小、抗干扰能力强、安全性好等诸多优势, 是卫星通信领域的热门研究课题^[3]。

星地激光链路作为卫星光通信重要的组成部分, 是连接卫星组网与地面光纤组网的桥梁。星地激光链路的光通信信道中含有大气信道, 其中由于大气流动产生的流动状态称为大气湍流, 其强度与大气温度及大气湿度

等环境参数具有较强的相关性。大气湍流效应造成卫星通信的光波在大气信道中的传输出现弯曲传播、光束漂移、传输损耗增大以及相干性退化等现象, 严重影响星地激光通信链路的通信质量^[4]。其中, 链路接收端的光强闪烁现象会导致接收信号强度超出接收机的工作范围, 是影响卫星通信信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 和误码率 (Bit Error Rate, BER) 的重要因素^[5]。光功率均衡技术指当激光链路接收端的功率波动范围超出接收机的工作范围时, 可以通过实时改变增益系数等手段实现接收功率在波动范围的有效压缩, 最终维持接收机的正常工作^[6]。

有关光功率均衡技术的研究主要有: 参考文献[7]通过将前向反馈与后向反馈组合实现了对掺铒光纤放大器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) 的光功率瞬态

控制；参考文献[8]利用受激布里渊散射放大了其内部放大器中低于阈值的光功率，实现了对光学频率梳的平坦化；参考文献[9]提出了一种反射式半导体放大器，通过调整注入电流密度使放大器达到饱和状态，在保证信号质量的情况下显著抑制了数据包之间的功率波动。目前相关研究采用的方法分为电控制与全光控制，电控制由于其控制电路中存在不可避免的瞬态电路响应时延以及光/电转换效率不稳定等问题，会对信号质量造成影响。全光控制的弛豫时间相对较短，但放大器在饱和状态下的输出会降低信号的信噪比，同时复杂的光控系统结构对系统参数的控制提出了更高的要求。本文研究一种光功率均衡技术，利用信号光与控制光在EDFA处的增益竞争现象可以有效抑制大气湍流效应在星地激光通信接收端产生的光强闪烁现象，实现误码率的改善和通信质量的提升。相比于光功率均衡技术，本文提出的方法系统结构简单，对信号传输的影响小，对波动范围的压缩幅度大，在提升星地激光通信的质量方面具有较大的应用潜力。

2 大气湍流引起光强闪烁对星地激光通信的影响

当星地通信链路的激光光束在大气中传输时，大气层中不同尺度的大气湍流导致大气环境中各区域的折射率发生随机涨落，传输光波经过这种折射率无规则起伏的区域时，其振幅也会随之产生明显的波动，造成链路接收端的接收功率不稳定。这将严重降低卫星通信光束的传输性能，限制卫星通信系统的通信性能和星地激光链路的可靠性。

大气折射率结构常数 C_n^2 作为大气光学的基本参数之一，通常被用来表征湍流的强弱。在分析湍流强度时，一般将折射率结构参数低于 10^{-16} 的湍流称为弱湍流，高于 10^{-14} 的湍流称为强湍流。考虑到大气本身在时间和空间上的变化，折射率结构参数具有较强的随机性。本文假设光强分布满足Gamma-Gamma分布模型，可知概率密度为^[9-10]

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

其中， I 为通信链路接收端接收到的平均光强， $K_\nu(x)$ 为 ν 阶第二类修正贝塞尔函数， $\Gamma(x)$ 为Gamma函数。在平面波情况下，根据Rytov理论，Gamma-Gamma分布可以看作大尺度光强信号对小尺度光强信号的调制，参数 α 和 β 分别表示小尺度和大尺度湍流涡旋的数目。根据Rytov近似，平面波的光强波动方差表达式为

$$\sigma_0^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2)$$

其中， L 为大气信道中的通信距离， k 为波数， C_n^2 为大气折射率结构常数。

假设整个通信系统的调制解调方式为开关键控强度调制直接检测，选择将误码率作为表征通信质量的参数，则平均误码率可以表示为

$$P_e = \int_0^\infty f(I) Q\left(\frac{\eta I}{\sqrt{2N_0}}\right) dI \quad (3)$$

其中， $Q(y)$ 为Gaussian-Q函数。

从式(3)中可以看出，当湍流强度增大时，折射率结构参数随之增大，导致了更加剧烈的光强抖动。对于工作范围固定的星地激光通信链路接收机，大幅度的接收功率波动将明显增加卫星通信系统的误码率，影响通信质量。图1给出了卫星通信系统在不同接收功率下的光通信误码率，实验所采用的接收机的工作范围为2~10 dBm，从中可以看出接收机的正常工作范围只有约8 dB。当接收功率超出接收机的工作下限或工作上限时都会引起误码率的上升，因此过于剧烈的功率波动会导致通信质量的降低。图2给出了固定信噪比条件下湍流强度对通信误码率的影响情况。从图2中可以看出，随着湍流强度的增大，通信误码率总体呈现上升的趋势，对于信噪比为30 dB的实验条件，误码率由初始时的 10^{-9} 增加至 10^{-6} ，且更强的湍流也导致眼图的张开程度变小，实际情况下甚至会发生通信中断的情况。这也说明了高强度的湍流引起更剧烈的接收功率抖动，从而造成通信质量下降。因此，为了保证接收功率的波动范围不会超出实际接收机的工作范围，实现对大气湍流效应引起的光强闪烁现象的抑制，需要采取相关的方法实现光功率均衡。

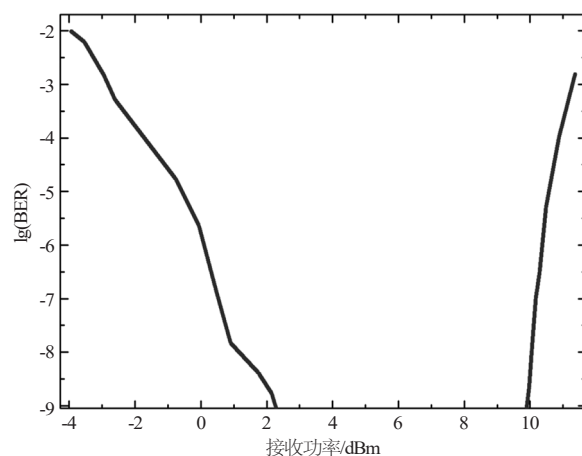


图1 卫星通信系统在不同接收功率下的通信误码率

3 基于增益控制的光功率均衡技术

基于对星地激光通信链路接收端的大幅度功率起伏

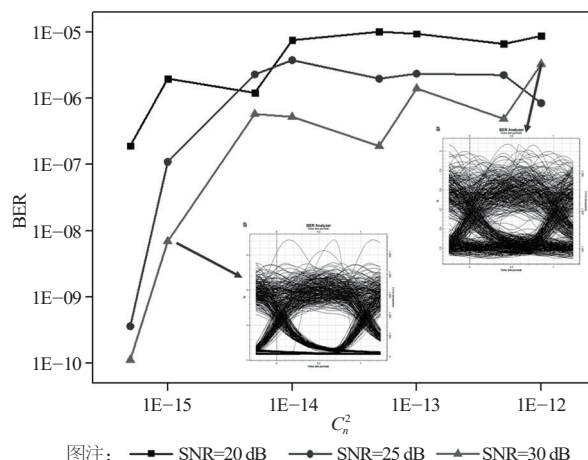


图2 固定信噪比条件下湍流强度对通信误码率的影响

进行抑制来改善通信质量, 本文研究了一种光功率均衡系统, 将接收端接收到的光束按照一定的分光比进行分光, 产生信号光和控制光。利用信号光与控制光在EDFA处发生的增益竞争现象, 可以实现将大幅度波动压缩输出的目标。

3.1 EDFA中的增益竞争现象

通常情况下, EDFA利用铒离子能级中亚稳态和基态间的粒子数反转分布实现对信号光的放大, 此时如果保持泵浦光功率不变, 信号光将获得稳定的信号增益。当存在两束光同时经过掺铒光纤时, 这两束光将在放大器内部发生增益竞争, 表现为其中一束光所获得的光增益的变化, 且变化的程度与另一束光的光强有关。图3为发生增益竞争现象时的铒离子竞争机制, 如果将其中一束光作为信号光且另一束光作为控制光, 则信号光的信号增益将同时取决于泵浦光功率和控制光功率, 因此对于固定的泵浦条件, 调整控制光的光强即可实现对信号增益的控制。实验中为了将信号光与控制光合理地地区分, 选择将信号光与控制光分别从相反的方向经过掺铒光纤。

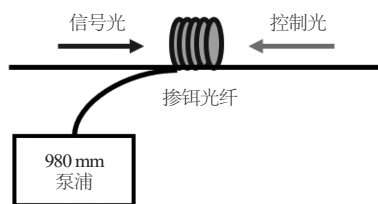


图3 铒离子竞争机制

为了获得在增益控制条件下EDFA的输出曲线, 本文

进行了一组测试实验。根据图3, 实验中分别使用两个连续光源作为信号光和控制光的光源, 并设定控制光源的输出功率分别为-12.6 dBm、-8.1 dBm和-3.4 dBm; 之后与不在增益控制条件下的EDFA输出曲线进行比较, 得到的结果如图4所示。从图4中可以看出, 控制光的引入使EDFA的线性增益区域宽度发生了压缩, 在低功率区域可以提升信号光获得的增益, 在高功率区域可以抑制信号光获得的增益, 且当信号光的输入功率低于-10 dBm时几乎保持恒定的输出功率。以控制光强-12.6 dBm为例, 当输入信号功率在-30 dBm与0之间变化时, 对应输出信号功率的变化范围是-15~-2 dBm, 即对于30 dB的输入信号功率范围, 通过增益控制可以压缩至约13 dB。

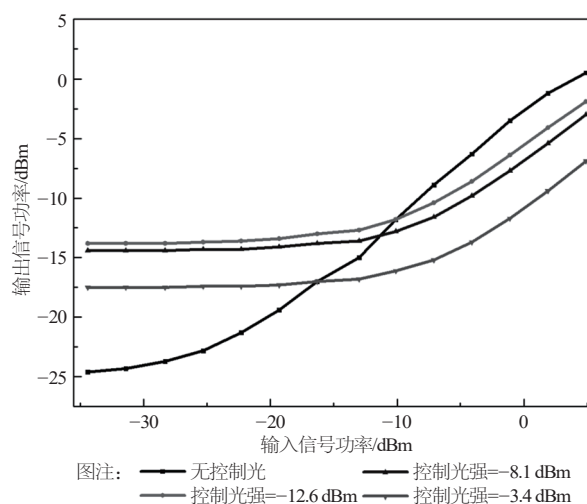


图4 增益竞争下信号光的EDFA输出曲线

恒定的控制光功率可以将输入光功率的波动范围压缩至13 dB, 但参考图1的接收机工作范围, 此时的输出光功率变化范围依然超出了接收机的工作极限, 影响通信质量。因此, 需要采取合适的方法使控制光功率随输入信号强度的变化而变化, 才能进一步压缩输出信号的功率变化范围。

3.2 光功率均衡系统结构及原理

本文研究了一种光功率均衡系统, 其结构如图5所示。输入光通过分光计按照相应比例产生信号光和控制光, 此时控制光强会随着输入光功率的变化而发生实时的改变。由于分光后控制光功率较低, 对信号增益的影响程度较低, 采用EDFA2对控制光进行放大, 并沿着与信号光相反的方向经过EDFA1, 与信号光在EDFA1内部发生增益竞争。其中, EDFA1可前后双向放大, 即放大器内部可以分别对两个方向的传输光进行前向和后向放

大。考虑到输出的信号光会沿控制光的传播路径反向传播,可使用环行器实现信号输出光与控制光的分离。

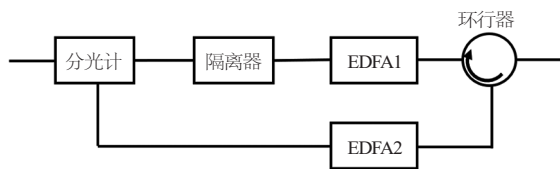


图5 光功率均衡系统结构

均衡系统的工作原理主要基于控制光对信号增益的抑制能力与控制光功率之间的相关性。由于分光计的分光比例是固定的,因而控制光功率会随着输入光功率的变化而改变,对于高功率的输入信号可以产生较大程度的光增益抑制,而对低功率输入信号的抑制程度较低。实验中,可以通过调节EDFA2的泵浦功率以及分光比的分光比例对控制光进行调控,存在最佳的系统参数可以将输出功率的波动范围压缩至5 dB以下。考虑到输出信号在波动范围被压缩的同时平均功率也可能受到影响,因而需要在均衡系统后面添加额外的线性光放大器,使各时刻的输出功率不超出接收机的正常工作范围。

4 系统均衡效果实验研究

基于所研究的光功率均衡系统,本文搭建了实际的通信系统分别进行了静态和动态的均衡效果测试实验。静态测试中,输入光的光源为连续光源,可以进行对均衡系统输出曲线的测试;动态测试中,采用强度调制器对输入光功率进行调制,从而模拟大气湍流引起星地激光通信链路接收端的光强闪烁现象,考察均衡系统对大气湍流影响下的星地激光通信链路接收端的功率均衡性能。

4.1 静态均衡效果

实验中使用连续光源产生输入光,设置连续光源的输入功率为不同值,测试均衡系统的输出功率。实验中,EDFA1内部的掺铒光纤长度为3 m,泵浦电流设置为500 mA,EDFA2内部掺铒光纤长度为2 m,泵浦电流为50 mA。输入功率的变化范围设置为-40~-20 dBm,从而使无竞争下的放大器可以工作在线性放大区。在保证其他系统参数不变的情况下,分别调整系统中分光计的分光比为9:1、8:2和7:3,得到测试结果如图6所示。

从图6中可以看出,均衡系统可以对输出功率实现大幅度的压缩,由无竞争时的20 dB以上压缩至5 dB以内。与图4结果相似,控制光的引入使大功率信号获得的增益急剧降低,而对小功率信号的增益有所提升。值得

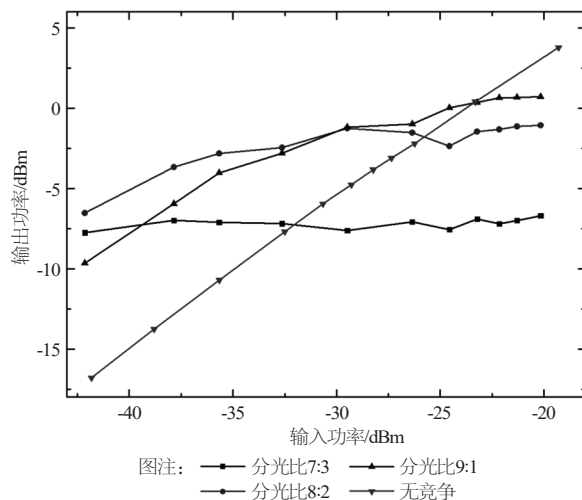


图6 不同分光比下的静态均衡效果

注意的是,由于控制光功率是随着输入光功率而不断改变的,因此曲线的形状发生了较大变化,波动范围也实现了进一步的压缩。对于7:3分光比的系统参数,输出功率的波动范围只有约1 dB,且输入功率的变化几乎不会对输出信号的强度产生影响。此外,通过比较不同分光比条件下的输出曲线可以发现,随着控制光的比例的增加,大功率输入信号对应的输出功率逐渐下降并趋于小功率输入信号对应的输出功率;输出功率的波动范围也由9:1时的10 dB降低至8:2时的5 dB和7:3时的1 dB,即均衡效果随着分光比的降低而逐渐优化。但分光比的设定存在最佳值,当分光比低于最佳值时会产生“过抑制”现象,即大功率输入信号的输出功率低于小功率输入信号的输出功率,此时的输出信号波动范围会随着分光比的减小而不断的输出功率增大。

4.2 动态均衡效果

实际中的大气湍流在星地激光通信链路接收端产生的光强闪烁是一个时域上的动态信号。为了模拟这一动态信号,实验中采用强度调制器对输入光进行实时的调制,使用单片机对强度调制器进行供电,产生时域动态变化的电压信号,以获得动态变化的输入光信号。强度调制器的调制深度为17 dB,调制频率为100 Hz,调制后的信号以正弦函数的形式变化,输入信号功率为7 dBm,EDFA1的掺铒光纤长度为3 m,泵浦电流为300 mA,其余系统参数与静态测试实验相同。

保持分光比等系统参数恒定,使用功率计记录输出信号的时域变化情况,功率计的采样时间间隔为100 ms。实验过程中约每200 s调整一次EDFA2的泵浦电流,分别

将泵浦电流设定为0、20 mA、50 mA和90 mA，得到的动态均衡效果如图7所示。

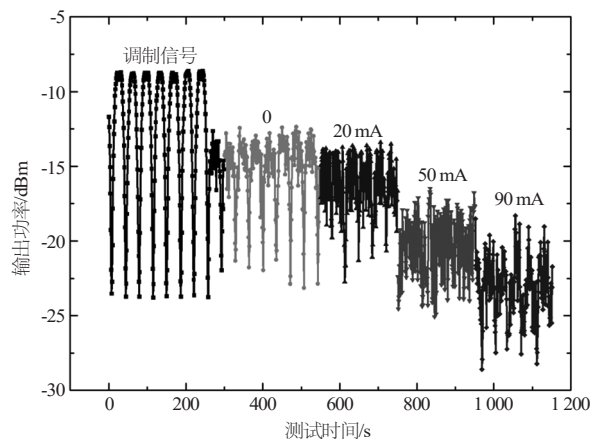


图7 不同泵浦电流下的动态均衡效果

从图7可以看到，均衡系统将信号的波动范围由调制后的17 dB分别压缩至10 dB、4 dB、5 dB和8 dB。根据前文的分析可知，调整EDFA2的泵浦电流可以在保持信号光稳定的情况下调整控制光的功率，且与分光比等系统参数类似，泵浦电流同样存在均衡效果最优的最佳值。当泵浦电流低于最佳值时，对调制信号的均衡程度较低，对信号光波动范围的压缩十分有限，如图7中泵浦电流为0时的输出结果所示；当泵浦电流高于最佳值时，弱输入信号的输出功率超过强输入信号，同样会引起剧烈的时域抖动，如图7中泵浦电流为90 mA时的输出结果所示。值得注意的是，当泵浦电流增加时，输出信号的平均功率也发生了明显的下降，由20 mA时的-15 dBm下降至90 mA时的-25 dBm。此时需要提高下一级放大器的增益系数才能帮助输出功率落在接收机的实际工作范围内，对实验系统提出了更为苛刻的条件。因此，在实际的均衡系统中，系统参数的设定要兼顾输出信号的波动范围和信号功率。

5 结束语

大气湍流在星地激光通信系统的接收端会导致接收功率的大幅度波动，所以有关大气湍流效应产生的光强闪烁现象抑制的研究对于卫星通信质量具有重要意义。本文通过实验分析了接收端的功率起伏与湍流强度的关系，并验证了大幅度的接收功率波动会对通信质量产生较大影响。基于通过抑制接收功率的大幅度起伏改善通信质量，本文研究了一种基于增益竞争的光功率均衡系统，通过测试实验得到了该系统在静态下的均衡输出曲线并讨论了分光比对均衡效果的影响，结果表明该均衡

系统在静态时可以将接收端功率波动范围压缩至1 dB。利用时域动态信号光模拟实际中接收端的光强闪烁现象，证明了均衡系统对于动态信号依然可以实现将波动范围由17 dB压缩至4 dB。本文所研究的光功率均衡方法在大气湍流抑制和卫星光通信质量改善等方面具备较大的应用潜力。

参考文献：

- [1] 都文和, 李林军. 大气湍流对星地激光通信影响的分析[J]. 科技与经济, 2008(4): 83-84, 121.
DU W H, LI L J. Analysis of the influence of atmospheric turbulence on satellite-ground laser communication[J]. Journal of Transportation Science & Economy, 2008(4): 83-84, 121.
- [2] 杨清波. 星地下行相干激光通信系统接收性能研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.
YANG Q B. Research on reception performance of coherent underground laser communication system[D]. Harbin Institute of Technology, 2012.
- [3] 左海成. 大气湍流影响下卫星光通信探测光斑分布与定位算法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
ZUO H C. Research on spot distribution and location algorithm of satellite optical communication detection under the influence of atmospheric turbulence[D]. Harbin Institute of Technology, 2010.
- [4] 李菲, 吴毅, 侯再红. 湍流大气光通信系统误码率分析与实验研究[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 28-33.
LI F, WU Y, HOU Z H. Bit error rate analysis and experimental study of optical communication system in turbulent atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 28-33.
- [5] 解孟其, 柯熙政. 大气湍流对无线光通信系统信噪比的影响研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 65-71.
XIE M Q, KE X Z. Influence of atmospheric turbulence on signal-to-noise ratio of wireless optical communication system[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 65-71.
- [6] 蔡岳丰, 李晓龙, 闫宝罗, 等. 基于铈离子竞争机制的光功率均衡技术[J]. 光通信技术, 2020, 44(9): 58-62.
CAI Y F, LI X L, YAN B L, et al. Optical power equalization technology based on erbium-ion competition mechanism[J]. Optical Communications Technology, 2020, 44(9): 58-62.
- [7] 徐佩佩, 陶智勇. 基于前馈加反馈的EDFA光功率瞬态控制方法研究[C]//第十三届全国青年通信学术会议. 北京: 国防工业出版社, 2008.
XU P P, TAO Z Y. Research on EDFA optical power transient control method based on feedforward and feedback[C]//The 13th

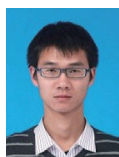
National Youth Communication Academic Conference. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.

- [8] LI W, WANG W T, SUN W H, et al. Generation of flat optical frequency comb using a single polarization modulator and a brillouin-assisted power equalizer[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(2):1-8.
- [9] HUANG L, HONG W, JIANG G. All-optical power equalization based on a two-section reflective semiconductor optical amplifier[J]. Optics Express, 2013, 21(4):4598-4611.
- [10] 吴君鹏, 刘泉, 于林韬. Gamma-Gamma大气湍流中部分相干光通信系统性能研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(3): 145-151.
- WU J P, LIU Q, YU L T. Performance of partially coherent optical communication system in Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(3): 145-151.
- [11] 韩立强, 王祁, 信太克归. Gamma-Gamma大气湍流下自由空间光通信的性能[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1318-1322.
- HAN L Q, WANG Q, XIN T K G. Performance of free space optical communication in Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1318-1322.

[作者简介]



蔡岳丰（1997-），男，南开大学电子信息与光学工程学院硕士生，主要研究方向为自由光通信系统设计及关键技术。



刘海锋（1986-），南开大学电子信息与光学工程学院实验师，主要研究方向为光纤激光放大技术和光电子技术。



刘波（1975-），男，南开大学电子信息与光学工程学院教授，主要从事光纤传感、现代光通信和光电子技术方向的研究工作。主要研究方向包括空间光通信关键技术、光纤传感及网络化技术、光纤生物医学感测技术、微结构光纤光栅的理论实验、光纤时频传递技术、智能感知与信息处理等。



林炜（1988-），男，南开大学电子信息与光学工程学院讲师，主要研究方向为新型光纤光子器件及其应用研究、全息技术等。