

基于铒离子竞争机制的光功率均衡技术

蔡岳丰^{1,2}, 李晓龙^{1,2}, 闫宝罗^{1,2}, 刘波^{1,2*}, 刘海锋^{1,2}, 孟森森^{1,2}, 林炜^{1,2}

(1.南开大学 现代光学研究所, 天津 300350; 2.南开大学 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: 针对大气湍流效应引起的接收功率起伏问题, 提出了一种基于铒离子竞争机制的光功率均衡技术。讨论了基于 Gamma-Gamma 分布的大气信道模型中大气湍流对自由空间光通信的影响, 对不同湍流强度下的光功率均衡效果进行仿真, 仿真结果表明: 在中等强度湍流条件下, 该技术可将接收信号光功率波动范围压缩 16 dB 以上。

关键词: 自由空间光通信; 大气湍流; 接收功率起伏; 铒离子竞争机制; 光功率均衡

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)09-0058-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.09.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Optical power equalization technology based on Erbium Ion competition mechanism

CAI Yuefeng^{1,2}, LI Xiaolong^{1,2}, YAN Baoluo^{1,2}, LIU Bo^{1,2*}, LIU Haifeng^{1,2}, MENG Sensen^{1,2}, LIN Wei^{1,2}

(1. Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Sensor and Sensing Network Technology, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Aiming at the fluctuation problem of received power caused by atmospheric turbulence, an optical power equalization technology based on Erbium ion competition mechanism is studied. The influence of atmospheric turbulence on free space optical communication in the atmospheric channel model based on Gamma-Gamma distribution is discussed. The optical power equalization effect under different turbulence intensity is simulated. The simulation results show that the fluctuation range of received signal optical power can be reduced by more than 16 dB under the condition of medium intensity turbulence.

Key words: free space optical communication; atmospheric turbulence; received power fluctuation; Erbium ion competition mechanism; optical power equalization

0 引言

自由空间光通信作为一种光通信与无线通信的产物, 融合了微波通信与光纤通信的优势, 具有频带宽、通信容量大和通信速率高等特点^[1]。然而, 光信号在大气信道中的传输不可避免地会被大气湍流效应所影响, 导致其光强和相位在空间域和时间域上出现波动, 造成相位畸变、光强闪烁等现象^[2]。光功率均衡

技术指在输出功率波动范围较大情况下, 为了防止某时刻的输出功率超出接收机的工作范围, 通过改变增益系数等手段压缩输出功率的波动范围, 维持接收机的正常工作。

迄今为止, 已报道了许多有关光功率均衡技术的研究情况。王伟^[3]通过掺铒光纤放大器(EDFA)的功率均衡技术实现了输出功率的稳定度以及计算机(PC)的通信。Khamis 等人^[4]通过控制增益实现功率均衡, 减弱了 12 个通信信道中信道功率的波动。Santos 等人^[5]利用 130 nm 的互补金属氧化物半导体技术进行功率均衡控制, 可以为信号提供 26.5~36.9 dB 的功率增益。Xin Lv 等人^[6]利用数字开关改变指数逼近函数, 实现了 4 个动态范围的功率均衡。但是, 这些研究由于采用了控制电路, 因而存在电阻-电容(RC)或电阻-电感(RL)电路的瞬态响应时间延迟、光/电转换效率不稳定等问题, 会对信号处理造成影响。因此, 本文

收稿日期: 2020-04-24。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1802302)资助; 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(61727815)资助; 天津市高层次创新创业团队项目资助。

作者简介: 蔡岳丰(1997—), 男, 硕士研究生, 2019 年于大连理工大学获得理学学士学位, 现就读于南开大学电子信息与光学工程学院光学工程专业, 主要从事自由光通信系统设计及关键技术方面的研究工作。参与国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重大科研仪器研制项目等各类工程项目 6 项。

* 通信作者: 刘波(E-mail: liubo@nankai.edu.cn)。



提出一种基于铯离子竞争机制的光功率均衡技术, 以实现误码率的改善和通信质量的提升。

1 大气湍流对自由空间光通信的影响分析

由于大气中的分子每时每刻都在做无规则的运动, 大气环境中各处的压强、温度等会因此而出现随机涨落, 形成大气湍流。当光波在近地表面区域的平层大气中传输时, 大气湍流效应会导致平层中的大气折射率发生无规则的随机起伏, 从而使湍流中的光波振幅也随之发生起伏, 这是影响光波传输特性的主要因素^[7]。

本文采用 Gamma-Gamma 分布的光强分布模型, 用以描述弱、中及强湍流下的光强起伏。假设自由空间光通信系统采用开关键控强度调制直接检测, 其概率密度为^[8-9]:

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

其中, I 为接收光功率, $K_\nu(x)$ 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:

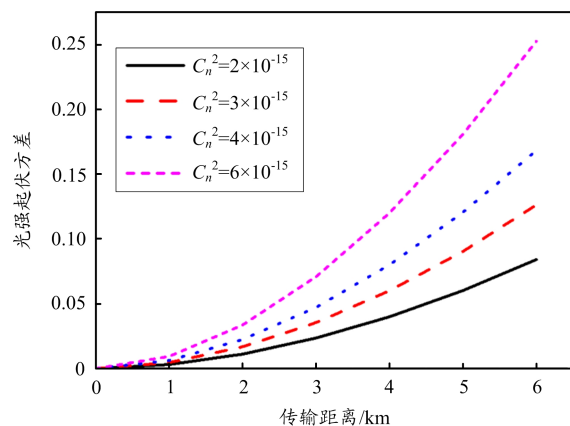
$$\sigma_0^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2)$$

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

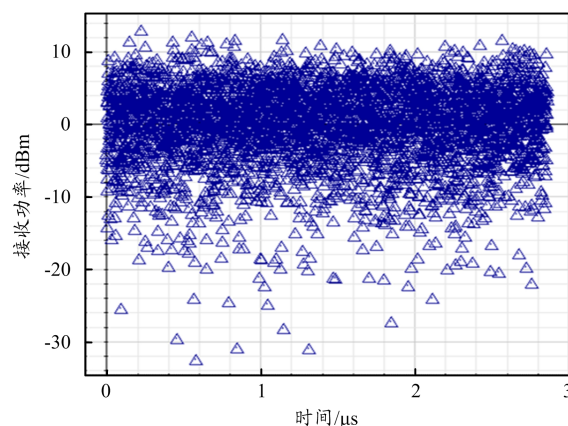
在中等强度大气湍流下, 波长为 1550 nm 的平面波在不同的大气折射率常数下的光强起伏方差随传输距离的变化情况如图 1(a) 所示。可以看出, 大气折射率常数越大, 光强起伏方差增加的速度也越快^[10]。当大气折射率常数为 6×10^{-15} 、通信距离为 6 km 时可以产生的接收功率起伏方差高达 0.25, 其对应的接收功率随时间抖动情况如图 1(b) 所示, 接收功率的波动范围高达 50 dBm, 非常不利于接收机的正常工作。因此, 对于接收系统来说, 大气湍流会导致十分剧烈的接收功率波动, 这将导致接收机发生饱和的概率激增, 造成通信系统的误码率升高等问题。

2 基于铯离子竞争机制的光功率均衡技术

为了有效改善大气湍流效应造成的接收功率大幅度波动问题, 减轻接收机因接收功率起伏而发生的饱和现象, 本文提出一种基于铯离子竞争机制的光功



(a) 光强起伏方差随传输距离的变化



(b) 接收功率抖动情况

图 1 大气湍流效应对自由空间光通信的影响

率均衡技术, 实现对输入信号波动范围的压缩以及对强输入信号的功率控制。

2.1 信号光与控制光之间的铯离子竞争机制

EDFA 在放大信号光时, 铯离子会从基态跃迁至泵浦态, 再迅速以非辐射方式驰豫至亚稳态。由于亚稳态上的载流子有较长的寿命, 在泵浦不断的作用下, 亚稳态和基态间的粒子数实现反转分布。在信号光的感应下, 亚稳态上的粒子以受激辐射的方式跃迁到基态, 对应于每一次跃迁都会产生一个与信号光子完全相同的光子。

铯离子的竞争机制如图 2 所示。图中黄色圆点表示处于亚稳态和基态上的铯离子, 红色圆点和蓝色圆点分别表示信号光和控制光形成的感应光子, 红色箭头和蓝色箭头分别表示参与竞争的信号光和控制光。在 EDFA 的放大系统中, 对于相同的泵浦功率, 存在相对固定的亚稳态粒子数量。此时, 如果在系统中引入与信号光波长相近的控制光, 则控制光会与信号光共同消耗亚稳态上发生受激辐射的粒子, 形成对铯离

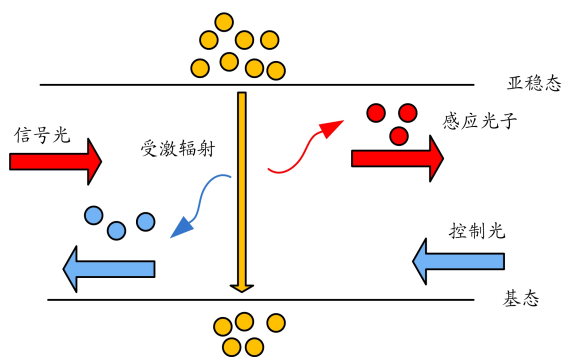


图2 铒离子竞争机制

子的竞争机制。在竞争的过程中,控制光会获得一定数量的受激辐射粒子来形成感应光子,从而使信号光激发的感应光子减少,即减小了信号光获得的增益。同时,随着控制光的强度增加,其在竞争机制中获得受激辐射粒子的数量也会随之上升,信号光激发的感应光子数减少,获得的增益下降。因此,通过改变控制光的功率可以实现对增益和输出功率的控制。

2.2 光功率均衡系统结构及原理

光功率均衡系统的整体结构如图3所示。系统分为信号链路和控制链路,信号链路中的信号EDFA主要用于信号光的基本放大;控制链路的控制EDFA则负责放大控制光的光强。进入系统的信号光经过分光器的分光后分别进入信号链路和控制链路,光强与输入功率相关的控制光在控制链路中经过控制EDFA系统的放大后沿着与信号光传播方向相反的方向通过信号EDFA,与信号光共同竞争信号EDFA中的高能级粒子。由于控制光的传播方向与信号光相反,其输出光不会被接收机接收。最终沿着信号光传播方向的输出光(即为被光功率均衡后的信号光),在系统末端作为均衡系统的输出光被接收机接收。

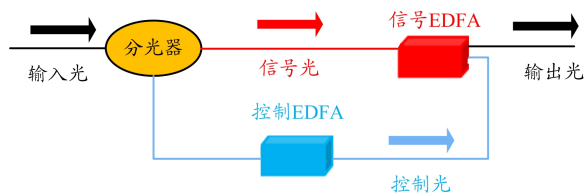


图3 系统结构及工作原理图

该系统的工作原理主要基于功率均衡程度与控制光强度的正相关性。对于强输入信号,其经过分光后产生的控制光光强也相应较强,因此强度更高的控制光可以在与信号光的竞争中获得更多的增益铒离子,使强输入信号获得的增益发生较大程度下降;对

于弱输入信号,其分光产生的控制光光强非常低,不足以与信号光形成竞争机制,并且相对于信号光和控制光的强度,信号EDFA高能级的铒离子数量满足信号光与控制光之间的竞争,控制光的引入无法影响到被信号光激发而发生辐射的粒子数量。因此,系统对弱输入信号的输出功率影响远小于强输入信号。此外,系统的输出功率也可以通过改变EDFA的参数进行控制。改变信号EDFA的泵浦功率、掺铒光纤长度和掺铒浓度等参数,可以调整信号光与控制光共同消耗的高能级粒子数,使信号光从中分得的粒子数发生变化,从而实现对信号光输出功率的直接控制;改变控制EDFA的参数,可以调整控制光的光强,进而影响到控制光在铒离子竞争机制中的竞争能力,使控制光消耗的高能级粒子数发生变化,实现对信号光输出功率的间接控制。

3 针对大气湍流的光功率均衡效果模拟仿真

基于上文介绍的光功率均衡系统,本文利用OptiSystem软件模拟该系统对大气湍流影响下的自由空间光通信系统的功率均衡性能。

3.1 不同系统参数下的光功率均衡效果

设置信号光波长为1552 nm,信号光的发射功率为25 dBm,通信距离为10 km,大气折射率常数为 $1.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-23}$,发射天线口径为10 cm,接收天线口径为25 cm。均衡系统中,设定信号链路中EDFA的掺铒光纤长度为1.4 m,掺铒浓度为 $1.6 \times 10^{25} / \text{m}^3$,泵浦方式为前向泵浦,信号泵浦功率为30 dBm。控制链路中设置EDFA的掺铒光纤长度为1.5 m。系统输出端采样数为4096,采样频率为 $1.43 \times 10^9 \text{ Hz}$ 。考虑到分出的控制光会导致信号光功率受到损失,所以为了保证弱信号的输出功率,本文将系统中分光器的分光比设定为19:1。

通常情况下,接收系统中接收机的工作范围上限为-10 dBm,图4分别显示了未添加和添加不同参数均衡系统后的输出功率分布,红色矩形框内为超出接收机工作范围上限的数据点, P_{pump} 表示控制链路中EDFA的泵浦功率, n 代表控制链路中EDFA的掺铒浓度。在未添加均衡系统时,最大接收功率高达14 dBm且有大量的数据点超出了接收机的工作范围上限,导致了严重的接收机饱和现象;添加不同参数的均衡系统后,最大输出功率的下降幅度可以达到20 dB以上,超出接收机工作范围上限的数据点也大幅度减少,接收机的饱和程度受到明显抑制。

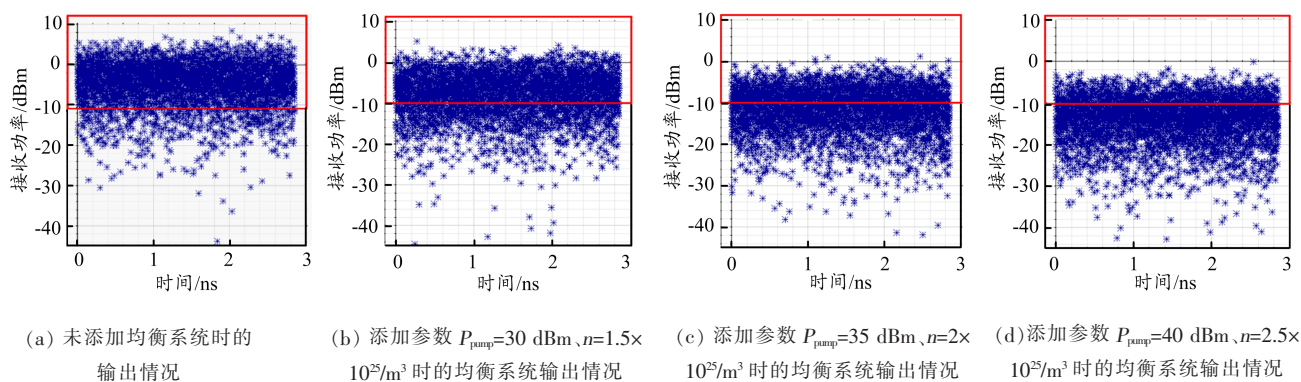


图4 添加均衡系统前后的功率均衡效果对比图

不同系统参数下的输出功率波动范围以及输出功率起伏方差的变化情况如图5所示。可以看出,均衡系统大幅度压缩了输出功率的波动范围,且随着系统参数的变化,输出功率的波动范围分别由最初的接近 50 dB 降低至 42 dB、38 dB 和 34 dB,有效减少了超出接收机工作范围的数据点数量。同时,输出功率光强的起伏方差也下降了,由最初的 1.54 下降至 1.49。这说明该均衡系统对大气湍流效应引起的接收功率闪烁现象有很强的抑制作用,可以有效降低通信系统的误码率,提升通信质量。

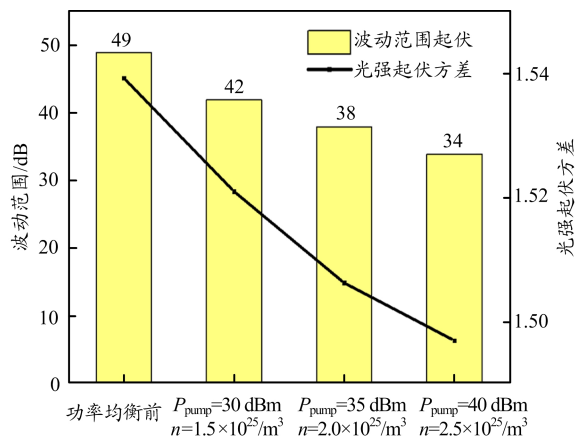


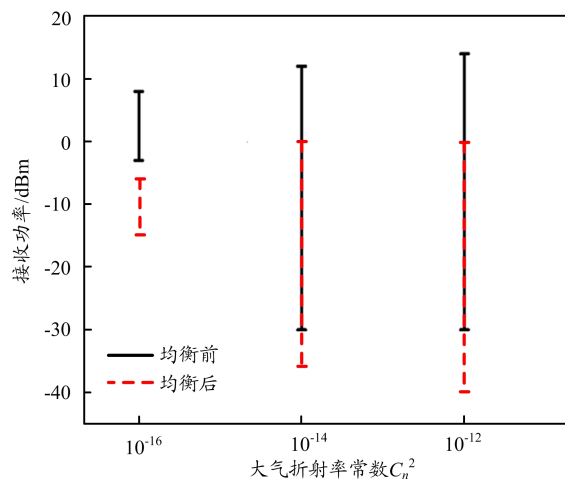
图5 不同均衡系统参数下输出功率的波动范围和起伏方差

3.2 不同湍流强度下的功率均衡效果

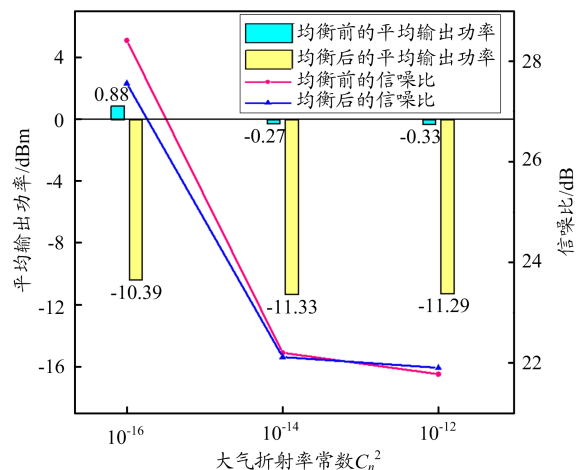
设定控制链路中 EDFA 的掺铒光纤长度为 2 m, 掺铒浓度为 $1.5 \times 10^{25}/\text{m}^3$, 泵浦功率为 30 dBm, 其余参数均与前文相同。将大气折射率常数设置为 10^{-16} 、 10^{-14} 和 10^{-12} , 分别对应于不同等级的湍流强度, 图6显示了不同大气湍流强度下进行光功率均衡前后的输出功率变化情况。

从图6(a)可以看出,3种强度的湍流环境下,信号的起伏范围分别由输入时的 11 dB、42 dB 和 44 dB 被

压缩至 9 dB、36 dB 和 40 dB, 峰值功率分别由输入时的 8 dBm、12 dBm 和 14 dBm 降至 -6 dBm、0 dBm 和 0 dBm; 从图6(b)可以看出, 各湍流强度下的平均输出功率衰减约为 10 dBm, 信噪比分别从输入时的



(a) 均衡前后的输出信号起伏范围比较



(b) 均衡前后的平均输出功率和信噪比变化

图6 不同湍流强度下的功率均衡效果

蔡岳丰,李晓龙,闫宝罗,等:基于铟离子竞争机制的光功率均衡技术

28.4 dB、22.2 dB 和 21.7 dB 变化为 27.5 dB、22.1 dB 和 21.9 dB,即均衡系统对信噪比产生的影响较小。通过对比可以看出,该均衡系统在各湍流强度下对输入功率上限的抑制明显高于下限,既改善了接收机的饱和情况,又维持了弱输入信号的基本增益,其性能未受到湍流强度变化的影响。因此,该光功率均衡系统的均衡性能具备对不同湍流条件的普遍性。

4 结束语

在自由空间光通信中,大气湍流是引起接收光功率起伏的主要原因,因此针对大气湍流效应抑制的研究具有重要的意义。光功率均衡技术作为一种控制信号输出功率小范围波动的手段,可以抑制大气湍流引起的接收功率闪烁现象。本文采用了 Gamma-Gamma 模型对大气湍流进行建模研究,分析了接收功率起伏与湍流强度的关系,并给出了时域中对应的接收功率变化情况。基于接收光强的大范围起伏问题,本文提出了一种基于铟离子竞争机制的光功率均衡技术,并证明了该技术可以将中等强度湍流环境下的接收功率波动范围压缩 16 dB 以上,最大输出功率降低 20 dB 以上,同时证明了该技术对不同的湍流强度具有普遍性。光功率均衡技术对于抑制大气湍流效应、改善误码率具有较高的价值,在提升通信质量方面具备较大的应用潜力。

参考文献:

- [1] 韩立强,游雅晖.大气湍流及瞄准误差联合效应下自由空间光通信的性能[J].光学学报,2014,34(11):90-95.
- [2] 韩立强,游雅晖.大气衰减和大气湍流效应下多输入多输出自由空间光通信的性能[J].中国激光,2016,43(7):229-236.
- [3] 王伟.基于 AGC 技术的 EDFA 自动功率控制研究[D].长春:长春理工大学,2010.
- [4] KHAMIS M A, ENNSER K. Gain control dynamics of thulium-doped fiber amplifier at 2 μ m [C]// Optical Components and Materials XIII, February 15-17, 2016, San Francisco, USA. Washington: SPIE OPTO, 2016. DOI: 10.1117/12.2212386.
- [5] SANTOS E L, LEITE B, MARIANO A B, et al. Multimode 2.4 GHz CMOS power amplifier with gain control for efficiency enhancement at power backoff [C]//IEEE 6th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS), February 24-27, 2015, Montevideo, Uruguay. New Jersey: IEEE, 2015: 1-4.
- [6] LV X, SHI J, ZOU J, et al. A low-power decibel-linear CMOS Automatic Gain Control [C]//IEEE international conference on microwave technology & computational electromagnetics, August 25-28, 2013, Qingdao, China. New Jersey: IEEE, 2013: 270-273.
- [7] 王飞,余佳益,刘显龙,等.部分相干光束经过湍流大气传输研究进展[J].物理学报,2018,67(18):9-22.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 柯熙政,张宇.部分相干光在大气湍流中的光强闪烁效应[J].光学学报,2015,35(1):56-62.
- [11] 刘小虎,彭天亮.大气湍流信道激光通信系统传输性能研究[J].国外电子测量技术,2019,38(3):40-44.