

基于泵浦功率限制下的光放大 PPM 发射系统优化

向劲松, 钟路*, 乔婉珍, 查高孟

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 为了研究光通信中发射端在不同脉冲位置调制(PPM)阶数下脉冲信号平均发射功率变化的问题, 基于掺铒光纤放大器理论分析模型, 采用两级放大系统, 通过优化增益光纤长度对不同调制阶数下的光发射系统平均输出功率特性进行了仿真研究。仿真结果表明: 在泵浦功率限制下, 不同调制阶数下的最优增益光纤长度会受泵浦功率的影响而变化, 随着调制阶数增大, 最优增益光纤长度也增大, 但对平均输出功率的影响较小; 当固定光发射系统硬件条件不变时, 不同调制阶数下的信号平均输出功率不相等, 128PPM 的平均发射功率只有 4PPM 的 51% 左右, 发射功率损失近 3 dB。

关键词: 光通信; 脉冲位置调制; 泵浦功率; 光纤长度; 平均功率

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)10-0012-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.10.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimization of optical amplification PPM transmission system based on pump power limitation

XIANG Jingsong, ZHONG Lu*, QIAO Wanzhen, CHA Gaomeng

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to study the change of average transmitting power of pulse signal in different order of pulse position modulation(PPM) at the transmitter end in optical communications, this paper uses a two-stage amplification system based on the theoretical analysis model of Yb-doped fiber amplifiers. By optimizing the length of gain fiber, the average output power characteristics of optical emission system with different modulation orders are simulated. The simulation results show that under the limitation of pump power, the optimal gain fiber length under different modulation orders will be affected by the pump power. As the modulation order increases, the optimal gain fiber length also increases, but it has little effect on the average output power; when the hardware conditions of the fixed optical transmission system are unchanged, the average output power of the signals at different modulation orders is not equal, the average transmission power of 128PPM is only about 51% of 4PPM, and the transmission power loss is nearly 3 dB.

Key words: optical communication; pulse position modulation; pump power; fiber length; average power

0 引言

在深空光通信中, 为了满足其远距离数据传输的需求, 需要提高发射端光源的发射功率和转换效率^[1]。高功率光纤放大器是一种新型的光源, 因其光束质量

好、成本低和稳定性好等优点得到广泛使用^[2]。在调制方面, 脉冲位置调制(PPM)方式可以在给定的光重复频率下, 用很小的平均功率达到很高的数据传输速率。在传统的光通信研究中, 人们通常假定发射端在不同 PPM 阶数下脉冲信号的平均发射功率是相等的^[3]。但是, 在实际的光发射过程中, 不同的发射系统设备会对其输出信号造成影响。因此, 这种假设在光纤放大仿真中是不合理的。

本文采用 Matlab 与 Optisystem 联合仿真的方法, 基于泵浦功率限制下主振荡功率放大(MOPA)的方式, 对两级光放大系统进行研究, 分析在不同调制阶数下平均输出光功率的变化情况。

收稿日期: 2020-01-17。

基金项目: 国家自然科学基金(61571072)资助。

作者简介: 向劲松(1975—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 现任教于重庆邮电大学通信与信息工程学院, 主要研究方向为空间激光通信等。主持或主研完成国家自然科学基金、国家“863 项目”及省部级项目多项。在国内外光学期刊及会议上发表论文数十篇, 其中 SCI/EI 检索 20 余篇; 授权发明专利 3 项。

* 通信作者: 钟路(E-mail: zll810@foxmail.com)。



1 掺镱光纤放大理论分析

在光发射系统中掺镱光纤放大器中 Yb^{3+} 离子光纤是一种双包层大规模场光纤, 其光纤内径和截面积相对较大, 单位截面积的相对密度和数量都相对较高。 Yb^{3+} 离子有 2 个吸收峰, 波长分别为 915 nm 和 975 nm。当发射光与 Yb^{3+} 离子之间的相互作用面积增加时, 离子的浓度与光的发射功率成一定比例。通过控制光纤长度以及光与 Yb^{3+} 离子之间相互作用的强度, 可以有效地控制光纤非线性效应的影响。非线性效应相对较弱, 在系统设计时可以忽略不计。在短光纤传输和高泵浦功率下, 双包层掺镱光纤输出信号的光功率为:

$$P_{\text{out}} = (1 - R_2) \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + R_2}} \right) \times \left[\frac{A_f (1 - e^{-(\Gamma_p \sigma_{\text{ap}} + \sigma_{\text{ep}}) L})}{2(\Gamma_p \sigma_{\text{ap}} + \sigma_{\text{ep}}) (a_s L - \ln(R_1 R_2)/2)} \right] - P_s \quad (1)$$

其中, R_1 、 R_2 分别表示掺镱光纤纤芯的内半径和外半径, σ_{ap} 表示双包层纤芯对泵浦光束的吸收系数, σ_{ep} 和 a_s 分别表示双包层光纤对泵浦光和激光的散射损耗系数, A_f 表示双包层光纤的有效截面积, Γ_p 表示泵浦场在掺杂区中的重叠系数, L 表示双包层光纤的长度, P_s 表示种子源激光器的饱和输出功率。基于理论计算和光纤放大器的设计^[4-6], 本文分析泵浦功率对光放大器的影响, 通过优化光纤长度来获得高稳定性信号高功率输出。

2 光放大 PPM 发射系统模型

基于掺镱光纤放大理论分析模型, 本文采用 Matlab 和 Optisystem 软件联合仿真的方法对光通信发射系统进行仿真测试和性能分析。基于泵浦功率限制下的光放大 PPM 发射系统模型如图 1 所示, 系统包括种子源信号部分和光纤放大器部分。

在发射端, 由信源产生一组随机二进制序列, 经过纠错编码、比特交织及 PPM^[7], 该信号编码调制过程由 Matlab 完成。编码调制后的二进制信号经过电脉冲

发生器连接到调制器, 对连续激光器输出的光脉冲信号进行调制输出种子源信号。种子源信号经过光隔离器后通过一级放大器。其中, 光隔离器能够提高光波的传输效率, 实现种子源信号光的预放大, 泵浦激光器选用 975 nm 半导体激光器; 再经过一个光隔离器后输入到二级光放大系统, 双向泵浦激光器选用 975 nm 和 915 nm 半导体激光器, 最后再通过一个光隔离器输出到空间信道中。在泵浦总功率一定时, 本文分析在不同调制阶数下光纤长度对平均输出功率的影响。仿真参数如表 1、表 2 所示。

表 1 种子源激光器相关参数

参数	数值
波长	1064 nm
功率	80 mW
带宽	10 MHz
初始光相位	0°

表 2 掺镱光纤仿真参数

参数	数值
激发态寿命	0.8 ms
核心半径	3.4 μm
Yb^{3+} 掺杂半径	3.4 μm
Yb^{3+} 离子浓度	$5.5 \times 10^{25} \text{ ions/m}^3$
数值孔径	0.2 μm

3 仿真结果和分析

当两级泵浦功率总值分别为 20 W 和 10 W 时, 改变光纤长度, 得到在不同阶数 PPM 下两级放大信号输出功率随光纤长度的变化情况。光纤放大器的增益光纤长度的选择影响光发射系统的功率输出。影响选择增益光纤长度的因素有很多, 比如掺镱光纤浓度、纤芯半径和泵浦功率等, 选择最优化增益光纤长度将有效提高激光器效率。本文在掺镱光纤浓度、纤芯半径一定时, 优化增益光纤长度使平均输出功率达到最佳。在光纤放大过程中有光纤损耗, 平均输出功率不仅和泵浦光的吸收有关, 过长的增益光纤对激发光也有吸收作用。其次, 若光纤太短, 泵浦光吸收不完全, 不能形成较高的上能级粒子数反转, 将明显降低输出光的功率。所以, 选择合适的泵浦功率和光纤长度对提高平均输出功率有极其重要的意义。本文在泵浦总

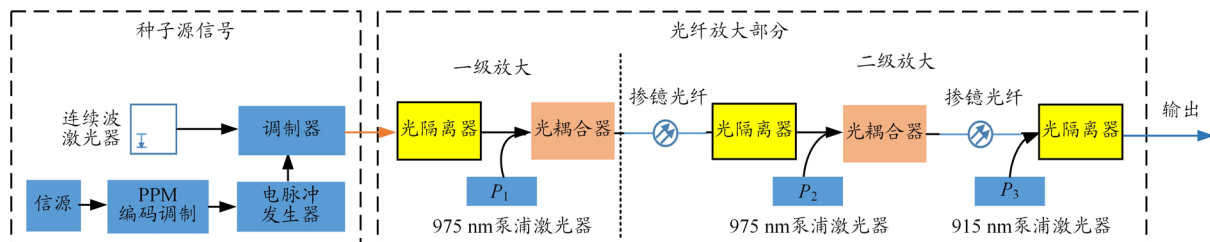


图 1 光放大 PPM 发射系统模型图

向劲松, 钟路, 乔婉珍, 等: 基于泵浦功率限制下的光放大 PPM 发射系统优化

功率为 20 W 和 10 W 时仿真信号平均输出功率随增益光纤长度变化情况, 具体过程如下。

3.1 一级放大不同调制阶数下平均输出功率和增益光纤长度关系

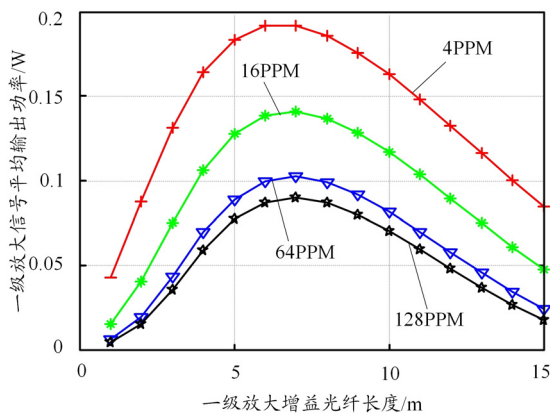
一级放大信号平均输出功率在泵浦功率 P_1 分别为 0.5 W 和 1 W 时, 不同调制阶数下平均输出功率随增益光纤长度的变化情况如图 2 所示。可以看出, 泵浦功率较小时, 对应调制阶数下的平均输出功率值更小。 $P_1=0.5$ W 时, 4PPM 时的最优增益光纤长度为 6 m, 16PPM、64PPM 和 128PPM 时的最优增益光纤长度为 7 m; $P_1=1$ W 时, 4PPM 和 16PPM 时的最优增益光纤长度为 9 m, 64PPM 和 128PPM 时的最优增益光纤长度为 8 m。随着泵浦功率增大, 相应调制阶数下的最优增益光纤长度变长; 随着调制阶数的增加, 同一泵浦功率下最优增益光纤长度略有变化, 但不同调制阶数下最优增益光纤长度所对应的平均输出功率差值不超过 3%。如当泵浦功率 $P_1=0.5$ W 时, 4PPM 时在增益光纤长度分别为 6 m 和 7 m 时的平均输出功率为 192.181 mW 和 192.151 mW, 其差值为 0.03 mW; 在

16PPM 时增益光纤长度分别为 6 m 和 7 m 时的平均输出功率为 138.719 mW 和 140.941 mW, 其差值为 2.222 mW。因此, 当泵浦功率一定时, 任一调制阶数下最优增益光纤长度对平均输出功率影响都不大。

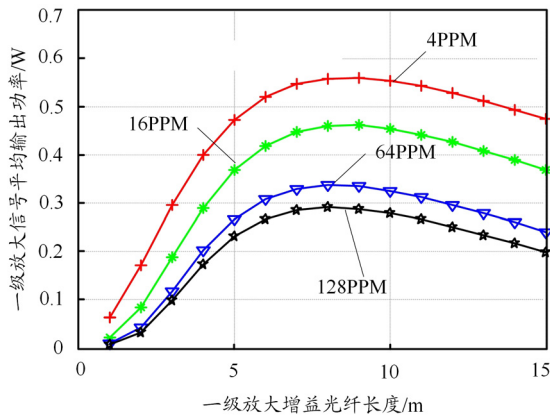
3.2 二级放大不同调制阶数下平均输出功率和增益光纤长度关系

在一级放大得到最优增益光纤长度的前提下进行二级放大, 当泵浦功率分别为 $P_2=0.5$ W、 $P_3=9$ W 和 $P_2=1$ W、 $P_3=18$ W 时, 不同调制阶数下平均输出功率随增益光纤长度的变化情况如图 3 所示。可以看出, 在不同泵浦功率、不同调制阶数下随着增益光纤长度的增加, 平均输出功率先呈递增趋势, 且调制阶数越小, 功率增益越明显, 但当增益达到饱和后, 都呈缓慢衰减趋势。不同阶数的 PPM 对最优增益光纤的长度都有所影响, 但对平均输出功率的影响不大。在进行二级放大时, 只需考虑某一调制阶数下的最优增益光纤长度即可。

由以上分析可知, 不同调制阶数下最优增益光纤长度对平均输出功率的影响较小, 因此 PPM 阶数调整

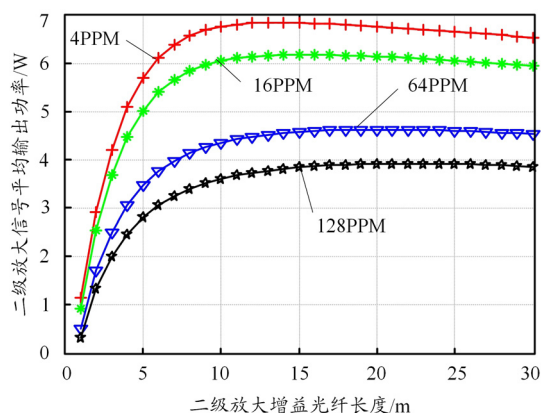


(a) 泵浦功率 $P_1=0.5$ W

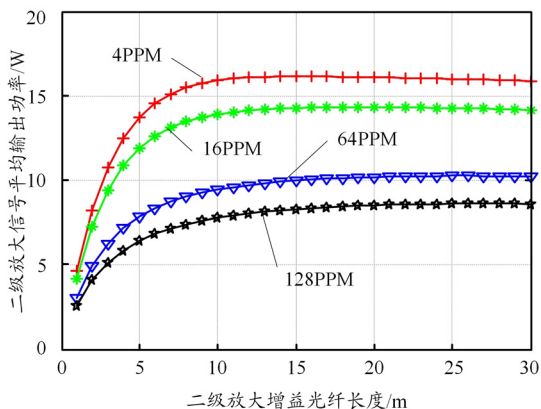


(b) 泵浦功率 $P_1=1$ W

图 2 一级放大不同调制阶数下平均输出功率和增益光纤长度关系



(a) 泵浦功率 $P_2=0.5$ W、 $P_3=9$ W



(b) 泵浦功率 $P_2=1$ W、 $P_3=18$ W

图 3 二级放大不同调制阶数下平均输出功率随增益光纤长度变化

时, 光放大器结构无需改变。当固定一级放大泵浦功率 $P_1=1\text{ W}$ 、光纤长度为 8 m 、二级放大泵浦功率 $P_2=1\text{ W}$ 、 $P_3=18\text{ W}$ 和光纤长度为 15 m 的光放大器结构不变时, 4PPM、16PPM、64PPM 和 128PPM 的平均功率及脉冲峰值功率的相对功率变化如表 3 所示。其中, 相对功率表示以 4PPM 时的功率值为基准数值 1, 其它阶数调制时的功率值与 4PPM 时的功率值的比值。

表 3 不同调制阶数下平均功率的理论值与实际值之比及脉冲峰值功率的理论值与实际值之比

参数名称	相对功率			
	4PPM	16PPM	64PPM	128PPM
平均功率受限理论值	1	1	1	1
平均功率之比	1	0.883	0.616	0.512
脉冲峰值功率受限理论值	1	1	1	1
脉冲峰值功率之比	1	3.532	9.856	16.384

从表 3 可知, 如将 4PPM 改为 128PPM, 虽然阶数的增加会使系统的灵敏度得以提升, 但在光发射系统硬件不变的条件下, 128PPM 的平均发射功率将只有 4PPM 平均发射功率的 51% 左右, 发射功率损失接近 3 dB。因此, 在设计 PPM 阶数时需要考虑这些特性。

4 结束语

本文采用半导体激光器作为种子源信号, 通过基

于泵浦功率限制下的 MOPA 发射技术仿真, 分析比较在不同 PPM 阶数下光纤长度和泵浦功率对平均输出功率的影响。仿真结果表明不同调制阶数下最优光纤长度对平均输出功率的影响较小。由于 PPM 光发射系统既不是平均功率受限系统, 更不是峰值功率受限系统, 因此在实际应用中应该考虑这些因素。

参考文献:

- [1] JIANG Huilin, TONG Shoufeng. The technologies and system of space laser communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [2] LU Huali, WANG Ming, DAI Xiajuan, et al. All-fiber self-mixing interferometer based on DFB laser and phase modulating technique [J]. IEEE Photon Technology Letters, 2001, 23(4): 221–223.
- [3] 柯熙政, 陈锦妮. 无线激光通信类脉冲位置调制性能比较[J]. 激光技术, 2012, 36(1): 67–76.
- [4] KELSON I, HARDY A A. Optimization of strongly pumped fiber lasers [J]. Lightwave Technology, 1999, 17(5): 891–898.
- [5] XIAO Limin, YAN Ping, GUO Mali, et al. An approximate analytic solution of strong pumped Yb-doped double-clad fiber laser without neglecting the scattering loss [J]. Optics Communication, 2004, 230(2): 401–410.
- [6] KIM N S, HAMADA T, PRABHU M, et al. Numerical analysis and experimental results of output performance for Nd-doped double-clad fiber lasers[J]. Optics Communication, 2000, 180(2): 329–337.
- [7] 向劲松, 吴涛, 黄胜, 等. 串行级联脉冲位置调制码辅助的时隙同步技术[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 63–70.