中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

二阶泵浦种子光对三阶拉曼光纤放大器的影响

陈佟 刘伟 杨悦 李扬 龙函 吴剑军 项旻 成炬新

The influence of second-order pump seed light on third-order Raman fiber amplifier

CHEN Tong, LIU Wei, YANG Yue, LI Yang, LONG Han, WU Jian-jun, XIANG Min, CHENG Ju-xin

引用本文:
陈佟, 刘伟, 杨悦, 李扬, 龙函, 吴剑军, 项旻, 成炬新. 二阶泵浦种子光对三阶拉曼光纤放大器的影响[J]. 中国光学, 2025, 18(2): 266-273. doi: 10.37188/CO.2024-0170
CHEN Tong, LIU Wei, YANG Yue, LI Yang, LONG Han, WU Jian-jun, XIANG Min, CHENG Ju-xin. The influence of second-order pump seed light on third-order Raman fiber amplifier[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(2): 266-273. doi: 10.37188/CO.2024-0170

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2024-0170

文章编号 2097-1842(2025)02-0266-08

二阶泵浦种子光对三阶拉曼光纤放大器的影响

陈 佟[1], 刘 伟[2], 杨 悦[1], 李 扬[1], 龙 函[3*], 吴剑军[3], 项 旻[3], 成炬新[3]
（1. 国家电网有限公司信息通信分公司, 北京 100761;
2. 电力规划总院有限公司, 北京 100120;
3. 武汉光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430205）

摘要: 三阶拉曼光纤放大器因其较高的增益与较低的噪声指数被用于长距离无中继光传输中。三阶拉曼放大器作为拉曼放大的前沿技术, 目前国内的研究较少, 对于泵浦的配置与放大器的性能关系还不够明晰。为此, 本文通过实验测试了二阶泵浦种子光对三阶拉曼光纤放大器性能的影响。首先用功率耦合方程定性分析了不使用二阶泵浦种子光的可行性, 之后实验验证了在缺少二阶泵浦种子光的条件下, 三阶拉曼光纤放大器仍能实现对信号光的增益, 但较有二阶泵浦种子光时效率会降低。本文搭建了 47 波 200 km 的波分复用传输系统进行实验验证。结果表明: 在没有二阶泵浦种子光的情况下三阶拉曼光纤放大器也可以实现对信号光的增益, 但引入二阶泵浦种子光能显著提升性能, 仅 25 mW 的二阶泵浦种子光就能使信号得到最少 3.7 dB, 平均 6 dB 的功率提升以及平均 0.8 dB 的光信噪比提升。省去二阶泵浦种子光能降低成本, 但引入二阶泵浦种子光能显著提升三阶拉曼放大器的性能。

关 键 词: 三阶拉曼光纤放大器; 种子光; 受激拉曼散射; 自发拉曼散射
中图分类号: TN913.7 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2024-0170 **CSTR:** 32171.14.CO.2024-0170

The influence of second-order pump seed light on third-order Raman fiber amplifier

CHEN Tong[1], LIU Wei[2], YANG Yue[1], LI Yang[1], LONG Han[3*], WU Jian-jun[3], XIANG Min[3], CHENG Ju-xin[3]
（1. *State Grid Information and Telecommunication Brand*, *Beijing* 100761, *China*;
2. *China Electric Power Planning & Engineering Institute Co., Ltd.*, *Beijing* 100120, *China*;
3. *Accelink Technologies Co., Ltd*, *Wuhan* 430205, *China*）
* *Corresponding author*, *E-mail*: *han.long@accelink.com*

Abstract: As an advanced Raman amplification technology, third-order Raman fiber amplifiers are used in long-haul unrepeated optical transmission due to their higher gain and lower noise figure. But there is currently very limited research on it in China, and the relationship between the pump configuration and the amplifier's performance remains unclear. Therefore, this paper analyzes the influence of second-order pump seed

收稿日期: 2024-09-26; **修订日期:** 2024-10-24
基金项目: 国家电网有限公司科技项目（No. SGZB0000TGJS2301000）
Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGZB0000TGJS 2301000)

light on third-order Raman fiber amplifiers through experiments. First, the feasibility of not using second-order pump seed light was qualitatively analyzed. Then, it was experimentally verified that in the absence of second-order pump seed light, the third-order Raman fiber amplifier can still achieve signal light gain but at decreased efficiency. A 47-channel 200 km wavelength division multiplexing transmission system was constructed. The experimental results show that the third-order Raman fiber amplifier can amplify the signal light without the second-order pump seed light. However, introducing the second-order pump seed light can significantly improve its performance. A second-order pump seed light with only 25 mW can achieve a minimum signal power gain of 3.7 dB, an average gain of 6 dB, and an average signal-to-noise ratio gain of 0.8 dB. Eliminating second-order pump seed light can reduce costs, but introducing a second-order pump seed light brings significant performance improvements to third-order Raman amplifiers.

Key words: third-order Raman fiber amplifier; seed light; stimulated Raman scattering; spontaneous Raman scattering

1　引　言

随着光纤通信技术的发展, 无中继光的传输距离已从几十公里扩展到数百公里[1-3]。无中继光传输距离受光纤的损耗、色散和非线性[4-6] 等多方面因素限制。拉曼光纤放大器以传输光纤为放大介质, 实现信号的分布式放大, 因其具有高增益、宽带和低噪声的优点, 是无中继光传输系统的关键技术之一。

当光纤的传输损耗超过 90 dB 时, 传统的无中继光传输技术就无法突破传输损耗的限制, 因此需要探索新的光传输技术。一些研究表明, 与标准的一阶拉曼光纤放大器相比, 二阶拉曼光纤放大器具有更好的噪声特性和放大性能[7-9]。例如西安邮电大学的巩稼民等人用粒子群算法对二阶拉曼光纤放大器的泵浦配置做了一系列优化, 实现了 100 nm 带宽下 24.5 dB 高增益的性能, 且增益平坦度低于 1 dB[7]。结果表明相比一阶拉曼光纤放大器, 二阶拉曼光纤放大器在增益上的提升显著。

实际上, 在二阶拉曼光纤放大器的基础上进一步添加三阶拉曼泵浦可以实现更高的增益与更小的噪声[10-13], 而且高阶拉曼光纤放大有利于实现准无损传输[14]。然而, 三阶拉曼光纤放大作为一种前沿技术, 目前对其的研究较少。武汉邮电科学院的孙淑娟对三阶拉曼光纤放大器的配置与性能进行了研究, 对比一阶拉曼光纤放大器和二阶拉曼光纤放大器分别实现了 2.1 dB 和 1.2 dB 的性能提升[15]。2023 年, 上海交通大学的 Zhang 等人将三阶拉曼光纤放大器用于超宽带传输中, 在 130 nm 带宽下实现了−7.1 dB 的超低的等效噪声系数, 三阶拉曼光纤放大器展现出良好的应用前景[16]。2024 年, 陈佟等人提出用神经网络对三阶拉曼光纤放大系统进行建模, 计算精度可达 0.19 dB[17]。然而目前这些研究多聚焦于三阶拉曼光纤放大器的性能与应用, 尚未关注其本身的配置。

三阶拉曼光纤放大器与传统的一阶、二阶拉曼光纤放大器最大的区别在于其泵浦光的功率极高, 可达瓦量级, 因此二阶拉曼泵浦的功率不用太高, 使用功率为毫瓦量级的种子光即可。然而对于如何为三阶拉曼放大器配置低阶种子泵浦光的研究相对较少。实际上, 因为三阶拉曼泵浦功率足够大, 其自身也可以通过自发拉曼散射的形式激发二阶拉曼泵浦, 因此专门配置一个二阶泵浦用作种子光的必要性值得讨论, 据此, 本文对二阶泵浦种子光的影响进行了研究。

本文通过实验演示研究了不同二阶泵浦种子光配置下三阶拉曼光纤放大器的性能。首先从理论上分析了在没有设置二阶泵浦种子光的条件下, 三阶泵浦也能激发二阶泵浦光, 从而使三阶拉曼光纤放大器实现增益, 并用实验进行了验证。之后比较了在基于 200 km 标准单模光纤的 C 波段系统中使用不同二阶拉曼泵浦光时的系统性能。固定一阶与三阶泵浦, 调整二阶泵浦的数量, 证明引入二阶拉曼泵浦种子光对系统的性能有明显提升。本文研究对三阶拉曼放大器的实际应用具有指导意义。

2 三阶拉曼光纤放大器工作原理

2.1 拉曼散射原理

拉曼光纤放大器主要是基于受激拉曼散射。当频率较高的泵浦光与频率较低的信号光一同在光纤介质中传输时，若高频泵浦光功率较大，且泵浦光与信号光的频率差正好处于拉曼增益范围内，则会发生受激拉曼散射，此时，高频泵浦光会将能量转移到低频信号光上，实现对信号光的放大。

如果按照拉曼频移的思路在原基础上设置频率更高的高阶泵浦光，则高阶泵浦光将会通过受激拉曼散射将能量一级一级地转移到一阶泵浦光上，最后一阶泵浦光再通过受激拉曼散射对信号光进行放大。对于光纤通信常用的 1 550 nm 信号波段，根据光纤的拉曼增益特性，一阶泵浦光的波长通常为 14XX nm，二阶泵浦光的波长为 13XX nm，三阶泵浦光的波长为 12XX nm。由于拉曼散射可以在任意高频光与低频光之间发生，因此同一阶不同波长的泵浦之间，以及通信波段内不同波长的信号光之间也可以发生拉曼散射，整个过程如图 1(彩图见期刊电子版)所示。

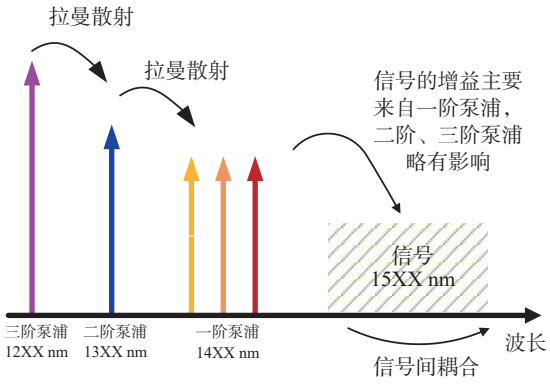

图 1 三阶拉曼光纤放大器工作原理

Fig. 1 Working principle of third-order Raman fiber amplifier

值得一提的是，即使没有低频光的存在，只要高频光功率足够，也会以自发拉曼散射的形式产生新的低频光。实际工程中三阶拉曼泵浦光的功率通常在 1 W 以上，因此在没有二阶泵浦光种子光的情况下，靠三阶泵浦光的自发拉曼散射也可以产生二阶泵浦光，该过程如图 2(彩图见期刊电子版)所示。

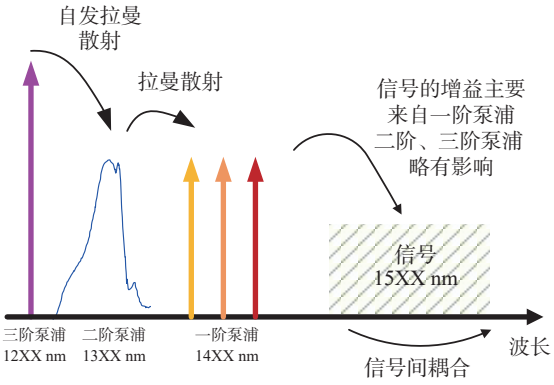

图 2 无二阶泵浦种子光时三阶拉曼光纤放大器工作原理

Fig. 2 Working principle of third-order Raman fiber amplifier without second-order pump seed light

2.2 三阶拉曼光纤放大器的理论模型

有关拉曼光纤放大器的理论模型，Kidorf H 等人给出了较为完备的拉曼功率耦合方程[18]，其可以表示为：

$$\begin{aligned}\frac{dP^{\pm}(z,\nu)}{dz}=&\mp\alpha(\nu)P^{\pm}(z,\nu)\pm\gamma(\nu)P^{\mp}(z,\nu)\pm\\&P^{\pm}(z,\nu)\sum_{\nu<\varsigma}\frac{g_R(\varsigma,\nu)}{K_{\text{eff}}A_{\text{eff}}}P(z,\varsigma)\pm\\&\sum_{\varsigma>\nu}\frac{g_R(\varsigma,\nu)}{A_{\text{eff}}}P(z,\varsigma)N(\varsigma,\nu)\mp\\&P^{\pm}(z,\nu)\sum_{\nu>\varsigma}\frac{\nu}{\varsigma}\frac{g_R(\nu,\varsigma)}{K_{\text{eff}}A_{\text{eff}}}P(z,\varsigma)\mp\\&2\sum_{\nu>\varsigma}\frac{g_R(\nu,\varsigma)}{A_{\text{eff}}}P^{\pm}(z,\nu)N(\varsigma,\nu)\end{aligned}\quad,\quad(1)$$

其中ν和ς为光频率，其中数值较大者对应泵浦光，数值较小者对应信号光；$P(z,\nu)$表示频率为ν的光在位置z处的功率，上标±分别对应正向传输和反向传输；$\alpha(\nu)$和$\gamma(\nu)$分别为光纤损耗和瑞利后向散射系数；$g_R(\varsigma,\nu)$代表泵浦光频率为ς、信号光频率为ν时的拉曼增益系数；A_{eff}为光纤有效面积；K_{eff}是与偏振态有关的一个因子，当泵浦光和信号光偏振状态一致时$K_{\text{eff}}=1$，处于正交时$K_{\text{eff}}=\infty$，二者关系一般随机，取值为$K_{\text{eff}}=2$；$N(\varsigma,\nu)$为自发拉曼散射的系数项，可表示为：

$$N(\varsigma,\nu)=h\nu\Delta\nu\left(1+\frac{1}{e^{h|\varsigma-\nu|/kT}-1}\right)\quad,\quad(2)$$

其中$\Delta\nu$为噪声带宽，h为普朗克常数，k为玻尔兹曼常数，T为开氏温度。

式 (1) 的右边 6 项分别对应光纤损耗、瑞利散射、泵浦对信号的增益、泵浦对信号的自发拉

曼散射、信号对泵浦的消耗以及自发拉曼散射对泵浦的消耗。当设置二阶泵浦种子光时, 其自身会被三阶泵浦光当做“信号”放大, 直至功率被放大到一定程度, 二阶泵浦光又会将能量转移到一阶泵浦光上。

根据式 (1) 可知, 三阶拉曼泵浦光的自发拉曼散射项的大小与作为“信号”的二阶泵浦光功率无关, 因此即使没有设置二阶泵浦种子光, 其功率初值为零, 三阶泵浦光仍会因自发拉曼散射而产生二阶泵浦光, 其频率取决于拉曼增益系数峰值所对应的频移, 其功率则主要取决于三阶泵浦光的输入功率。

3　实验验证

3.1　三阶泵浦光的自发拉曼散射验证

为验证没有二阶泵浦光作为种子光的条件下, 三阶泵浦光也能通过自发拉曼散射的形式产生二阶泵浦光, 使三阶拉曼放大器实现增益, 本文首先测试了没有信号光输入, 仅在泵浦光作用时, 输出端的光谱, 测试装置如图 3 所示。在输入端设置一个波长为 1 276 nm 的三阶泵浦光, 以及一个波长为 1 435 nm 的一阶泵浦光, 用合波器将两束泵浦光耦合进光纤, 经过 100 km G.652 光纤传输后在接收端用光谱仪采集光谱。

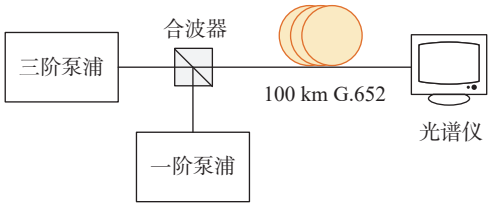

图 3　仅泵浦作用时的实验装置

Fig. 3　Experiment setup with only pumps as input

通过软件控制输入泵浦光的功率, 在三阶泵浦光功率为 2 W, 一阶泵浦光功率分别为 0 和 50 mW 时, 分别测试了仅三阶泵浦光输入, 以及一阶泵浦光+三阶泵浦光同时输入时输出端的光谱, 结果分别如图 4、图 5 所示。在仅有三阶泵浦光作为输入时, 输出端光谱在约 1 355 nm 处产生了新的频率的光, 即三阶泵浦光通过自发拉曼散射产生的二阶泵浦光, 在三阶泵浦光输入功率较大时, 最终光纤末端的二阶泵浦光功率甚至能超过三阶泵浦光, 同时在 1 420~1 450 nm 较宽范围内还能观察到二阶泵浦光再一次通过自发拉曼散射产生的一阶泵浦光, 但其功率较小。而在一阶泵浦光和三阶泵浦光同时输入时, 可观察到输出端光谱同样存在二阶泵浦光的尖峰, 且一阶泵浦光得到显著增益, 几乎能补偿传输光纤的损耗。这说明在不添加二阶拉曼泵浦种子光的条件下, 三阶拉曼放大器也能激发二阶泵浦光。

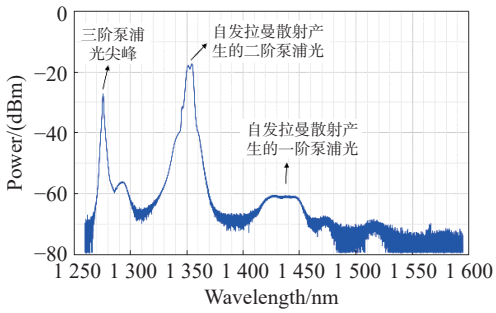

图 4　仅输入三阶泵浦光时输出端光谱

Fig. 4　The output spectrum when only third-order pump light is input

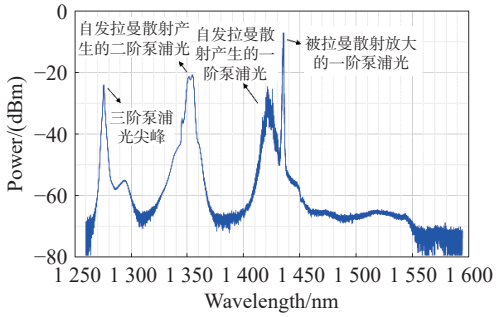

图 5　输入一阶和三阶泵浦光时输出端光谱

Fig. 5　The output spectrum when first-order and third-order pump lights are input

为进一步了解各泵浦光功率与输入三阶泵浦光功率的关系, 通过调整输入三阶泵浦光的功率, 分别在一阶泵浦光输入功率为 0 和 50 mW 的条件下得到图 6、图 7 的结果。在两种情况下, 三阶泵浦光的功率都呈现先增长而后衰减的特性, 峰值拐点约为 1 400 mW。这是因为三阶泵浦光功率会非线性转移到二阶泵浦光与一阶泵浦光上, 随着输入的三阶泵浦光功率的增大, 这部分拉曼散射带来的功率转移也将不断增大, 最终导致三阶泵浦光的输出功率随输入功率变大不增反降的结果。类似地, 二阶泵浦光也会存在峰值。在输入仅有三阶泵浦光时, 一阶泵浦光功率一直处于较低水平, 因此近乎线性增长; 而当输入为一阶泵浦光+三阶泵浦光时, 一阶泵浦光功率随输入增大

会有一个类似阈值形式的指数增长，相应地，二阶泵浦功率增大时，功率转移的过程逐渐由自发拉曼散射形式变为受激拉曼散射。

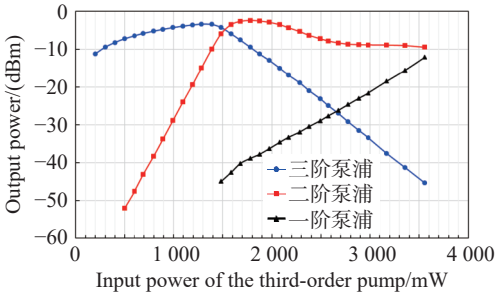

图 6 仅三阶泵浦光输入时，各阶泵浦光功率随三阶泵浦光输入功率的变化情况

Fig. 6 The relationship between the power of pumps and the input power of the third-order pump when only the third-order pump is input

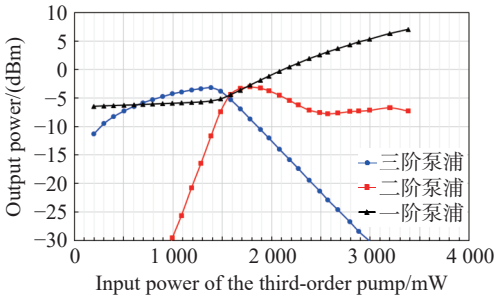

图 7 一阶+三阶泵浦光输入时，各阶泵浦光功率随三阶泵浦光输入功率变化

Fig. 7 The relationship between the power of pumps and the input power of the third-order pump when first-order pump and third-order pump are input

为明确二阶泵浦种子光的影响，本文还在图 3 的实验条件下，在输入端添加 20 mW 二阶泵浦种子光，以及不添加二阶种子光两种情况下，测试了输出端一阶泵浦光随输入三阶泵浦光功率的变化情况，结果如图 8 所示。

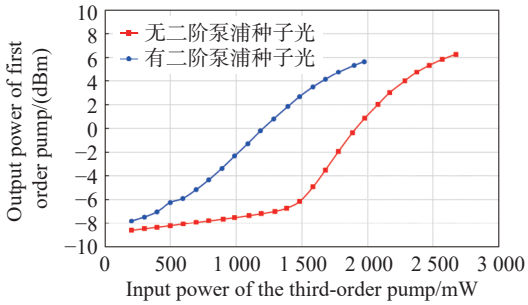

图 8 二阶泵浦种子光对一阶泵浦光输出功率的影响

Fig. 8 The influence of second-order pump seed light on the output power of first-order pump light

其中三、二、一阶泵浦光各波长分别为 1 276 nm、1 340 nm 和 1 435 nm。在二阶泵浦种子光一定的情况下，一阶泵浦光会更快地得到增益，为输出同样的一阶泵浦光功率，仅需 20 mW 的二阶泵浦种子光就能使输入的三阶泵浦光功率降低 500~1 000 mW，显著提升了能量转化的效率，而代价则是在输入端添加一个二阶泵浦光频率处的激光器。

3.2 二阶泵浦种子光对三阶拉曼光纤放大器的性能影响

上一节验证了三阶泵浦的自发拉曼散射，得到了没有二阶泵浦种子光时三阶拉曼光纤放大器也能实现增益的结论。这一节则是在有信号传输的情况下验证二阶泵浦种子光对三阶拉曼光纤放大器性能的影响。实验装置如图 9 所示，输入端信号由宽谱光源经波长选择开关梳状滤波产生，再经掺铒光纤放大器进行功率放大后进入 200 km 的 G.652 光纤传输，光纤末端设置有多个拉曼泵浦，最后用光谱仪采集信号光谱。输入信号是频率范围为 191.4~196 THz，间隔为 100 GHz 的 47 个模拟填充信道，进入光纤时的平均光功率为 −2.57 dBm，其光谱如图 10 所示。拉曼泵浦包含多个波长，三阶泵浦光为 1 276 nm，二阶泵浦光分别为 1 340 nm 和 1 360 nm，一阶泵浦光则为 1 410~1 470 nm 之间的 4 个波长。三阶泵浦光功率默认为 2 W，每个二阶泵浦光的功率为 0 或 25 mW，每个一阶泵浦光功率则均固定为 50 mW。

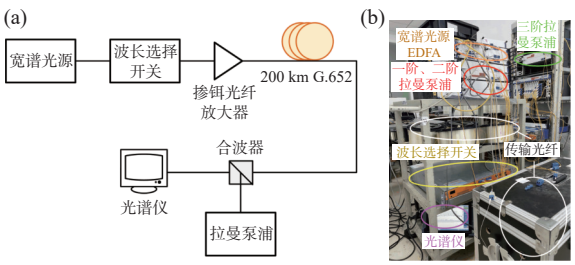

图 9 实验装置 (a) 框图及 (b) 实物图

Fig. 9 (a) Block diagram and (b) physical diagram of the experiment setup

拉曼光纤放大器最重要的参数是增益，增益可以反映为输出端信号光功率的提升，因此首先测试输出端的信号光功率，结果如图 11（彩图见期刊电子版）所示。在仅开启一阶与三阶泵浦，不设置二阶泵浦种子光的条件下，信号能获得最小为 5.6 dB，最大为 9.96 dB，平均为 7.1 dB 的开关

增益。而在一阶与三阶泵浦配置相同的情况下，相比没有二阶泵浦种子光情况，添加 25 mW 的 1 340 nm 二阶泵浦种子光能使各信道获得最小 3.7 dB，最大 9.5 dB，平均 6 dB 的增益提升，而各分别添加 25 mW 的 1 340 nm 和 1 360 nm 二阶泵浦种子光则能使各信道获得最小 10.4 dB，最大 13.5 dB，平均 11.9 dB 的增益提升。这表明即使很小的二阶泵浦种子光也能使最终信号的增益得到显著提升。

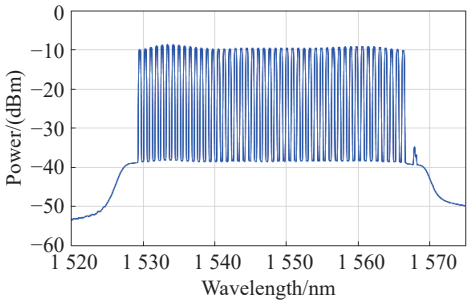

图 10　输入光谱

Fig. 10　The input optical spectrum

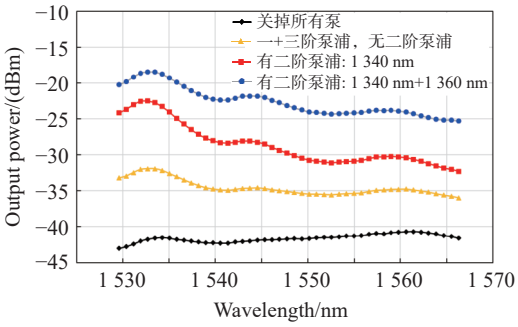

图 11　输出信号功率比较

Fig. 11　Comparison of output signal powers

增益的提升并不一定说明拉曼光纤放大器的性能变好，因为添加二阶泵浦种子光可能还会引入更多噪声，为此本文又测试了输出信号的光信噪比(optical signal to noise ratio, OSNR)，结果如图 12(彩图见期刊电子版)所示。测试结果表明引入二阶泵浦种子光同样使光信噪比得到提升，在仅引入 25 mW 的 1 340 nm 二阶泵浦种子光时，输出信号的光信噪比平均提升 0.8 dB，而引入 25 mW 的 1 340 nm 和 1 360 nm 二阶泵浦种子光时，输出信号的光信噪比平均能提升 1.6 dB。即二阶泵浦种子光能显著提升三阶拉曼光纤放大器的性能。

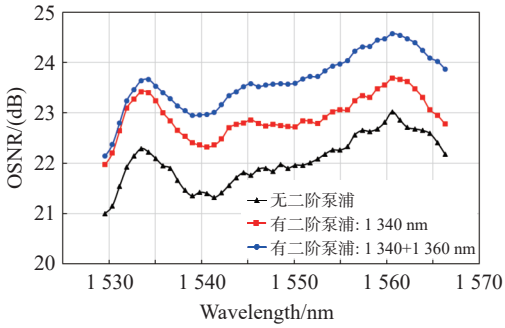

图 12　输出信号光信噪比比较

Fig. 12　Comparison of output signal OSNR

4　结　论

本文通过实验分析了二阶泵浦种子光对三阶拉曼光纤放大器性能的影响。本文先介绍了三阶拉曼光纤放大器的基本原理，以及用于分析的理论模型即功率耦合方程。之后，在仅有泵浦输入的情况下实验验证了即使缺少二阶泵浦种子光，三阶拉曼光纤放大器仍能实现增益，但引入二阶泵浦种子光能在实现同样一阶泵浦光功率时使输入的三阶泵浦光功率降低至少 500 mW，大大提升了效率。最后，本文搭建了 47 波的波分复用传输系统，实验对比了无二阶泵浦种子光以及有二阶泵浦种子光的情况下，三阶拉曼光纤放大器输出信号的功率与光信噪比。实验结果表明：仅 25 mW 的二阶泵浦种子光就能使信号得到最少 3.7 dB，平均 6 dB 的功率提升，以及平均 0.8 dB 的光信噪比提升。这说明省去二阶泵浦种子光虽能降低成本，简化系统，但引入二阶泵浦种子光能对三阶拉曼放大器带来显著的性能提升。

参考文献:

[1]　BISSESSUR H, BASTIDE C, DUBOST S, *et al*. . 80 × 200 Gb/s 16-QAM unrepeatered transmission over 321 km with third order Raman amplification[C]. *2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition* (*OFC*), IEEE, 2015: 1-3.

[2]　XU J, YU J K, HU Q G, *et al*. . 50G BPSK, 100G SP-QPSK, 200G 8QAM, 400G 64QAM ultra long single span unrepeatered transmission over 670.64 km, 653.35 km, 601.93 km and 502.13 km respectively[C]. *2019 Optical Fiber*

Communications Conference and Exhibition (*OFC*), IEEE, 2019: 1-3.

[3] WEN Q Y, LI J P, WANG Y, *et al*.. Real-time 100G and 200G unrepeatered transmission over 691.8km and 655.9km respectively[C]. *2024 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition* (*OFC*), IEEE, 2024: 1-3.

[4] 赵晗祺, 李娜, 吴斌, 等. 短距光纤通信系统中基于神经网络的非线性均衡器[J]. 中国光学 (中英文), 2025, 18(1): 114-120.
ZHAO H Q, LI N, WU B, *et al*.. Nonlinear equalizer based on neural network in high-speed optical fiber communication systems[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(1): 114-120. (in Chinese).

[5] 赵航宇, 王道斌, 张硕, 等. 基于实虚交替导频的 CO-OFDM-OQAM 通信系统激光器相位噪声抑制方法[J]. 中国光学 (中英文), 2024, 17(4): 950-958.
ZHAO H Y, WANG D B, ZHANG SH, *et al*.. Laser phase noise suppression method for a CO-OFDM-OQAM communication system with real-imaginary-alternate pilots[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 950-958. (in Chinese).

[6] 刘庆敏, 孙慧杰, 侯尚林, 等. 双包层掺铥光纤放大器中的受激布里渊散射[J]. 中国光学 (中英文), 2024, 17(1): 226-237.
LIU Q M, SUN H J, HOU SH L, *et al*.. Stimulated brillouin scattering in double-clad thulium-doped fiber amplifier[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(1): 226-237. (in Chinese).

[7] 巩稼民, 张玉蓉, 徐军华, 等. 二阶拉曼光纤放大器增益特性研究[J]. 光子学报, 2020, 49(8): 0806001.
GONG J M, ZHANG Y R, XU J H, *et al*.. Research on gain characteristics of second-order Raman fiber amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8): 0806001. (in Chinese).

[8] 迟荣华, 吕涛, 王飞, 等. 基于二阶拉曼放大器的 OTN 超长距光传输系统的理论和实验研究[J]. 电子器件, 2019, 42(4): 887-890.
CHI R H, LV T, WANG F, *et al*.. Theoretical and experimental study on OTN ultra-long distance optical transmission system based on second-order Raman amplifier[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2019, 42(4): 887-890. (in Chinese).

[9] 汪大洋, 曹晶, 李程, 等. 二阶拉曼放大器技术在电力超长站距光传输系统中的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2017, 15(8): 60-65.
WANG D Y, CAO J, LI CH, *et al*.. Application of second-order Raman amplifier in electric power ultra-long distance optical transmission system[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2017, 15(8): 60-65. (in Chinese).

[10] IQBAL M A, TAN M M, FORYSIAK W, *et al*. . Opportunities and challenges for discrete Raman amplifiers in ultrawideband transmission systems[C]. *2022 IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting Series* (*SUM*), IEEE, 2022: 1-2.

[11] 李晓琳. 新型光纤分布式拉曼放大技术研究进展[J]. 激光技术, 2024, 48(4): 1-14.
LI X L. Research progress on the novel distributed Raman amplification technologies[J]. *Laser Technology*, 2024, 48(4): 1-14. (in Chinese).

[12] 臧可. 高阶光纤拉曼放大器的特性研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
ZANG K. *Research on the characteristics of the higher-order Raman fiber amplifier*[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013. (in Chinese).

[13] 卢晨皓. 长距离光纤通信系统放大技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2022.
LU CH H. *Research on amplification technology of long-distance optical fiber communication system*[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022. (in Chinese).

[14] ANIA-CASTAÑÓN J D. Quasi-lossless transmission using second-order Raman amplification and fibre Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2004, 12(19): 4372-4377.

[15] 孙淑娟. 三阶拉曼光纤放大器的研究与应用[D]. 武汉: 武汉邮电科学研究院, 2019.
SUN SH J. *Research and application of third-order fiber Raman amplifier*[D]. Wuhan: FiberHome Technologies Group, 2019. (in Chinese).

[16] ZHANG W Y, DU J B, HE Z Y. 130 nm SCL-wideband and -7.1 dB effective-noise-figure amplification using third-order distributed Raman amplifier[C]. *2023 Opto-Electronics and Communications Conference* (*OECC*), IEEE, 2023: 1-3.

[17] 陈佟, 邓黎, 王谦, 等. 基于神经网络的三阶拉曼放大光传输系统建模[J]. 光通信研究, 2024: 1-10.

CHEN T, DENG L, WANG Q, *et al*.. Modeling of optical fiber transmission system with third order Raman amplifier based on neural network[J]. *Study on Optical Communications*, 2024: 1-10.

[18] KIDORF H, ROTTWITT K, NISSOV M, *et al*.. Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(5): 530-532.

作者简介：

陈　佟(1989—), 男, 江苏南通人, 硕士, 副教授级高工, 2014 年于美国斯蒂文斯理工学院获得硕士学位, 主要研究方向为电力通信网及超长距光通信传输技术。E-mail: 453381951@qq.com

龙　函(1991—), 男, 湖北黄冈人, 硕士, 2017 年于武汉邮电科学研究院获得硕士学位, 主要研究方向为超长距光通信传输系统。E-mail: han.long@accelink.com