

文章编号: 0258-7025(2008)06-0861-06

拉曼放大对孤子传输特性的影响

郑宏军^{1,2} 刘山亮¹ 田 振¹ 黎 昕¹

(¹ 聊城大学光通信研究所, 山东 聊城 252059; ² 华中科技大学电子科学与技术系, 湖北 武汉 430074)

摘要 利用频率分辨光学门(SHG-FROG)技术研究了拉曼放大对光孤子传输特性的影响。研究表明,拉曼放大能够补偿光纤损耗,但不改变孤子脉冲的时域波形,对孤子脉冲的啁啾影响不大。当传输光纤长度小于拉曼放大有效光纤长度时,拉曼放大能够完全补偿光纤损耗;当传输光纤长度大于拉曼放大有效光纤长度时,拉曼放大能够部分补偿光纤损耗。拉曼放大对光纤损耗的补偿能力随着抽运功率的增加而增大。光孤子脉冲对拉曼放大抽运光偏振特性不敏感。

关键词 光通信;拉曼放大;频率分辨光学门;孤子;时域波形;线性啁啾

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Effects of Raman Amplification on Propagation Characteristics of the Soliton

Zheng Hongjun^{1,2} Liu Shanliang¹ Tian Zhen¹ Li Xin¹

(¹ Institute of Optical Communication, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China)
(² Department of Electronic Science and Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The effects of Raman amplification on propagation characteristics of the optical soliton are experimentally investigated by using second-harmonic generation frequency-resolved optical gating (SHG-FROG) technology. Raman amplification can compensate the fiber loss, does not change the temporal waveform and has little influence on the linear chirp of the soliton. And it can completely compensate the fiber loss when the propagation distance is smaller than effective fiber length, and can partially compensate the fiber loss when the propagation distance is larger than the effective fiber length. The fiber loss compensation of Raman amplification increases with the increase of the Raman pumping power. Experimental results show that the soliton is not sensitive to the polarization of Raman pumping source.

Key words optical communication; Raman amplification; second-harmonic generation frequency-resolved optical gating; soliton; temporal waveform; linear chirp

1 引 言

拉曼放大是基于受激拉曼散射原理,以光纤作为增益介质而实现的全光放大。相对于稀土掺杂的光纤放大而言,它具有更大的增益带宽、灵活的增益谱区、更低放大器自发辐射噪声以及能够有效抑制信噪比(SNR)的劣化等优点,在光纤传输系统中获得广泛的应用^[1~21]。目前,国内外对光纤拉曼放大的研究大多集中在线性传输系统中的抽运源数目、功率、波长等的选择和优化,对利用光纤拉曼放大的光孤子传输系统的研究较少,且大多采用自相关技

术测量脉冲时域变化,难于准确判断脉冲的时域波形^[16~21]。鉴于以往实验条件等各种因素的限制,本文采用能准确测量脉冲时域波形的频率分辨光学门(SHG-FROG)脉冲分析仪研究了拉曼放大对光孤子传输特性的影响。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。输入信号可以是连续光信号,或者是小信号脉冲,或者是孤子脉冲,WDM 为波分复用器,将抽运激光器产生的抽运波和输入

收稿日期:2007-08-07; 收到修改稿日期:2007-11-12

基金项目:国家自然科学基金(60778017)、山东省教育厅科研计划重点项目(J05C09)和聊城大学科研基金资助课题。

作者简介:郑宏军(1970—),男,山东人,副教授,主要从事高速光纤通信等方面的研究。E-mail:zhj@lcu.edu.cn

光信号耦合到光纤,实现抽运波对输入光信号的拉曼放大,输出信号可根据需要,进入光谱仪 AQ6319 或者脉冲分析仪 HR200 进行实验测量。实验中所用光纤是 G. 652 标准单模光纤。

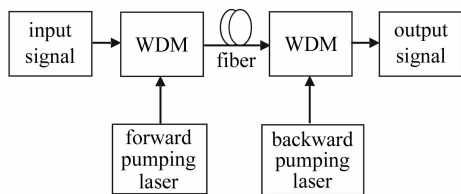


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

3 实验结果与讨论

3.1 拉曼抽运源特性及其自发放拉曼谱

实验中采用的两只拉曼抽运半导体激光器(连续抽运波)中心波长分别为1440 nm和1450 nm,其抽运光功率与抽运电流的关系如图2所示。当电流 $I = 0.1$ A时,两个激光器均处于开启状态,输出大约14 dBm光功率。随着电流的增加,输出光功率缓慢增加。对应相同的电流,1450 nm激光器输出的光功率比1440 nm激光器输出的光功率稍大。

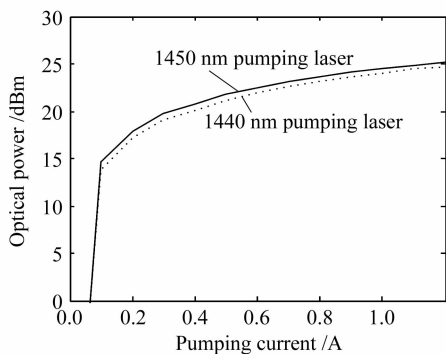


图 2 抽运光功率与抽运电流的关系

Fig. 2 Relation between pumping power and pumping current

图3是在抽运电流为1 A时1440 nm和1450 nm抽运源分别经过25.284 km标准单模光纤形成的自发放拉曼谱。由图可见,当抽运功率相同时,1440 nm后向抽运的自发放拉曼谱的功率比前向抽运的大2 dB左右;两者-3 dB带宽都从1521~1554 nm,约33 nm。当抽运功率增加时,1440 nm的后向抽运和前向抽运自发放拉曼谱的功率均随之增加;-3 dB带宽变化不大,仍然保持大约33 nm。

当抽运功率相同时,1450 nm后向抽运比前向抽运时的自发放拉曼谱的功率稍大;两者-3 dB带宽都从1521~1565 nm,大约44 nm,比1440 nm抽运

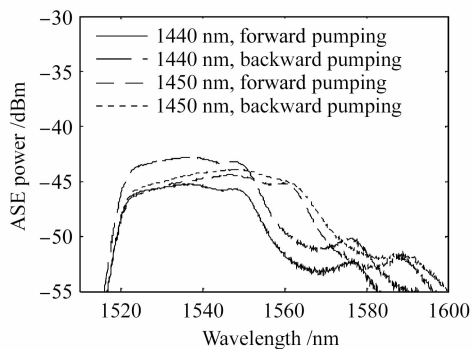


图 3 抽运电流为 1 A 时,1440 nm 和 1450 nm 抽运源分别经过 25.284 km 光纤所形成的自发放拉曼谱

Fig. 3 Amplified spontaneous emission (ASE) spectra of 1440 nm and 1450 nm pumping laser through 25.284 km fiber at pumping current of 1 A

时的33 nm宽得多,且向长波长方向延伸。当抽运功率增加时,1450 nm的后向抽运和前向抽运时自发放拉曼谱的功率随之增加;-3 dB带宽变化不大,仍然保持44 nm左右。可见,后向抽运优于前向抽运,1450 nm抽运源优于1440 nm。

3.2 拉曼放大对孤子传输特性的影响

3.2.1 输入孤子脉冲的特性

半导体锁模激光器 TMLL1550 输出的10 GHz, 1550 nm脉冲经 KPS 掺铒光纤放大器放大并获得光孤子脉冲。在孤子脉冲传输前,采用频率分辨率

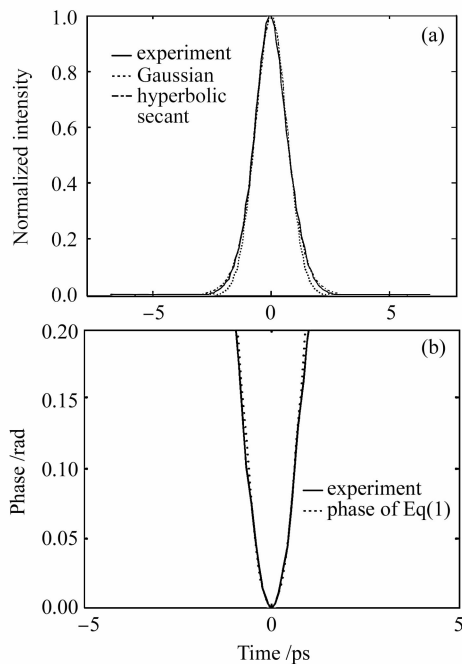


图 4 417 mW 输入孤子脉冲的时域波形(a)和相位曲线(b)

Fig. 4 Temporal waveform (a) and phase curve (b) of 417 mW input soliton

学门脉冲分析仪对输入孤子脉冲进行了实验测量,将孤子脉冲波形和相位数据由频率分辨光学门脉冲分析仪导入本文所研制的 Matlab 计算程序中进行曲线拟合,得到了实验中输入孤子脉冲的包络电场表达式和啁啾等参量。图 4 是 417 mW 输入孤子脉冲的时域波形(a)和相位曲线(b),与双曲正割脉冲

$$u(0, \tau) = \text{sech}(\tau) \exp(-0.5iC\tau^2) \quad (1)$$

的时域波形和相位曲线非常吻合。式中 u 为包络电场, $\tau = T/T_0$ 为归一化时间, $T_0 = 1.554/1.763$ ps 为脉冲半宽度, $C = -0.4$ 为线性啁啾参量。

图 5 是 468 mW 输入孤子脉冲的时域波形(a)和相位曲线(b),与双曲正割脉冲(1)式的时域波形和相位曲线非常吻合, $T_0 = 1.47/1.763$ ps, $C = -0.35$ 。

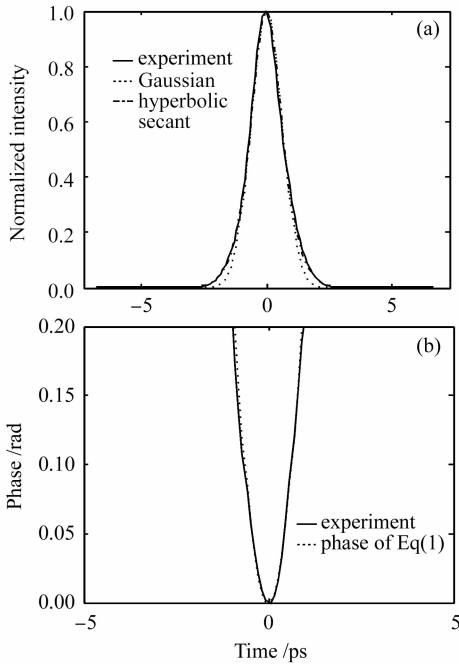


图 5 468 mW 输入孤子脉冲的时域波形(a)和相位曲线(b)

Fig. 5 Temporal waveform (a) and phase curve (b) of 468 mW input soliton

3.2.2 输出孤子脉冲的特性

考虑到上述自发拉曼谱,本文研究连续抽运波 1450 nm 后向抽运的拉曼放大对孤子传输特性的影响。在抽运光是连续波情况下,拉曼放大的有效光纤长度为

$$L_{\text{eff}} = (1/\alpha_p)[1 - \exp(-\alpha_p L)], \quad (2)$$

式中 α_p 为抽运光频率处的光纤损耗,在 1450 nm 处, $\alpha_p = 0.29$ dB/km。当光纤较长, $\alpha_p L \gg 1$ 时, $L_{\text{eff}} \approx \frac{1}{\alpha_p}$

$= \frac{1}{0.29 \times 4.343^{-1}} \approx 15$ km。因此,本文选择了两条不同长度的光纤进行实验。一条光纤为 25.284 km,模场直径为 $9.24 \mu\text{m}$, 1550 nm 处的色散参量 $D = 14.97$ ps/(nm·km), 光纤损耗为 0.182 dB/km, 色散斜率为 $k = 0.086$ ps/(nm²·km); 另一条光纤为 9 km, 模场直径为 $9.07 \mu\text{m}$, 1550 nm 处的色散参量 $D = 15.07$ ps/(nm·km), 光纤损耗为 0.188 dB/km, 色散斜率为 $k = 0.086$ ps/(nm²·km)。

将不同情况下的输出脉冲时域波形和相位数据由频率分辨光学门脉冲分析仪导入 Matlab 计算程序中进行曲线拟合,得到了输出脉冲时域波形和啁啾参量 C 。结果表明,10 GHz 孤子短脉冲经 9 km 光纤传输后,孤子脉冲时域波形仍与双曲正割脉冲波形保持一致,拉曼放大能够补偿光纤损耗。没有拉曼放大时,在光纤损耗的影响下,417 mW 孤子脉冲时域半峰全宽由输入脉宽 1.554 ps 逐渐展宽为 3.044 ps, 417 mW 孤子脉冲在无拉曼放大时经 9 km 光纤传输后的时域波形和相位曲线如图 6 实线所示。拉曼抽运电流为 1 A 时,417 mW 孤子输出脉冲时域半峰全宽为 2.167 ps, 比无拉曼放大时的输出脉冲宽度 3.044 ps 明显减小,比拉曼抽运电流为 0.5 A 时的输出脉冲宽度 2.492 ps 小,比输入脉宽

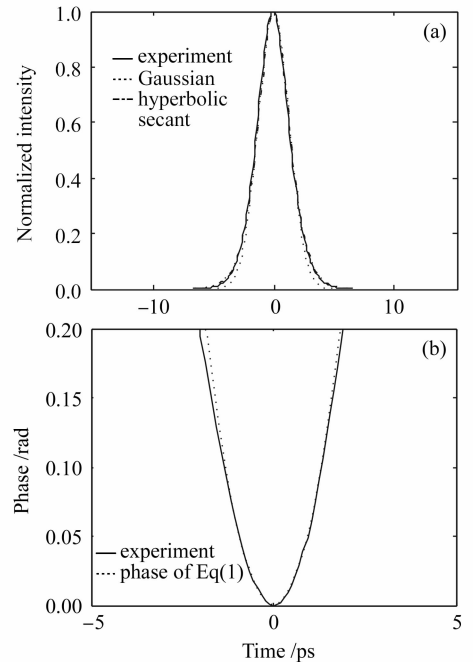


图 6 417 mW 孤子脉冲在无拉曼放大时经 9 km 光纤传输后的时域波形(a)和相位曲线(b)

Fig. 6 Temporal waveforms (a) and phase curves (b) of 417 mW input soliton after propagating through 9 km fiber without Raman amplification

1.554 ps稍宽。这与文献[22]中啁啾孤子在无衰减传输过程中脉冲峰值稍微减小、脉冲时域稍微展宽的理论研究一致。可见,拉曼放大补偿了光纤损耗。拉曼抽运电流为1 A时,417 mW孤子输出脉冲啁啾参量 $C = -0.4$ 与无拉曼放大时的输出脉冲啁啾参量 $C = -0.35$,拉曼抽运电流为0.5 A时的输出脉冲啁啾参量 $C = -0.35$ 和输入脉冲啁啾参量 $C = -0.4$ 相差不大。417 mW的孤子脉冲在拉曼放大抽运电流为1 A时经9 km光纤传输后的时域波形和相位曲线如图7所示。

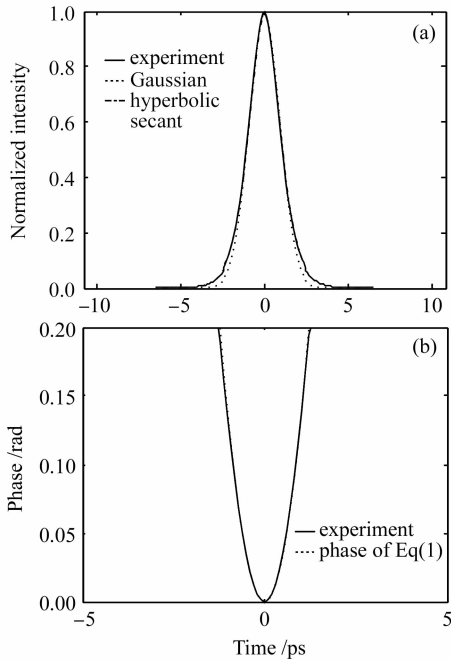


图7 417 mW孤子脉冲在拉曼放大抽运电流1 A时经9 km光纤传输后的时域波形(a)和相位曲线(b)

Fig.7 Temporal waveforms (a) and phase curves (b) of 417 mW input soliton after propagating through 9 km fiber with $I_{\text{Raman}} = 1$ A

没有拉曼放大时,在光纤损耗的影响下,468 mW孤子脉冲经9 km光纤传输后时域半峰全宽由输入脉宽1.47 ps逐渐展宽为2.712 ps。拉曼抽运电流为1 A时,468 mW孤子脉冲输出时域半峰全宽为1.934 ps,比无拉曼放大时的输出脉冲宽度2.712 ps明显减小,比拉曼抽运电流0.5 A时的输出脉冲宽度2.227 ps小,比输入脉宽1.47 ps稍宽。拉曼抽运电流为1 A时,468 mW孤子输出脉冲啁啾参量 $C = -0.33$ 与无拉曼放大时的输出脉冲啁啾参量 $C = -0.25$,拉曼抽运电流0.5 A时的输出脉冲啁啾参量 $C = -0.3$ 和输入脉冲啁啾参量 $C = -0.35$ 相差不大。468 mW孤子脉冲在拉曼放大抽运电流1 A时经9 km光纤传输后的时域波形和相位

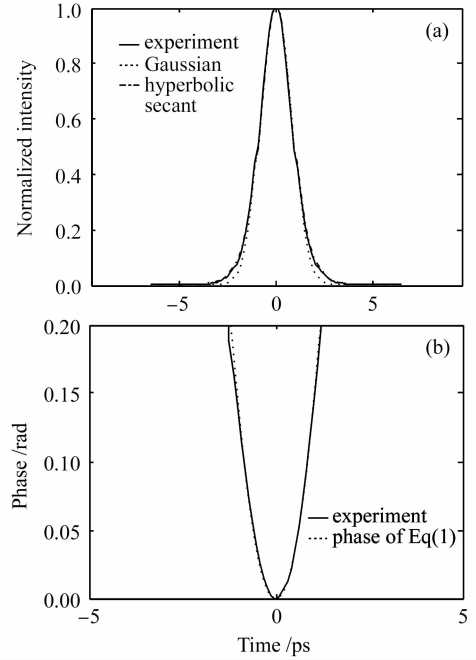


图8 468 mW孤子脉冲在拉曼放大抽运电流1 A时经9 km光纤传输后的时域波形(a)和相位曲线(b)

Fig.8 Temporal waveforms (a) and phase curves (b) of 468 mW input soliton after propagating through 9 km fiber with $I_{\text{Raman}} = 1$ A

曲线如图8所示。

10 GHz 孤子短脉冲经25.284 km 光纤传输后,孤子脉冲时域波形也与双曲正割脉冲波形保持一致,拉曼放大能够部分补偿光纤损耗。没有拉曼放大时,在光纤损耗的影响下,417 mW孤子脉冲时域半峰全宽由输入脉宽1.554 ps逐渐展宽为5.679 ps。拉曼抽运电流为1 A时,417 mW孤子输出脉冲时域半峰全宽3.536 ps比无拉曼放大时的输出脉冲宽度5.679 ps明显减小,是输入脉宽1.554 ps的2.3倍。拉曼抽运电流为1 A时,417 mW孤子输出脉冲啁啾参量 $C = -0.4$ 与无拉曼放大时的输出脉冲啁啾参量 $C = -0.38$ 和输入脉冲啁啾参量 $C = -0.4$ 近似相等。417 mW孤子脉冲在拉曼放大抽运电流为1 A时经25.284 km光纤传输后的时域波形和相位曲线如图9所示。

没有拉曼放大时,在光纤损耗的影响下,468 mW孤子脉冲经25.284 km光纤传输后时域半峰全宽由输入脉宽1.47 ps逐渐展宽为5.191 ps。拉曼抽运电流为1 A时,468 mW孤子脉冲输出时域半峰全宽为3.075 ps,比无拉曼放大时的输出脉冲宽度5.191 ps明显减小,是输入脉宽1.47 ps的2.1倍。拉曼抽运电流为1 A时,468 mW孤子输出脉冲啁啾参量 $C = -0.35$ 与无拉曼放大时的输出脉冲啁啾

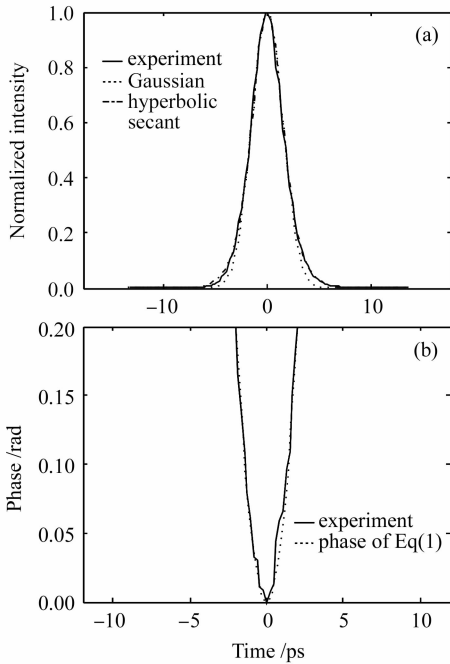


图 9 417 mW 孤子脉冲在拉曼放大抽运电流 1 A 时经 25.284 km 光纤传输后的时域波形(a)和相位曲线(b)

Fig. 9 Temporal waveforms (a) and phase curves (b) of 417 mW input soliton after propagating through 25.284 km fiber with $I_{\text{Raman}} = 1$ A

参量 $C = -0.4$ 和输入脉冲啁啾参量 $C = -0.35$ 相差不大。468 mW 孤子脉冲在拉曼放大抽运电流 1 A 时经 25.284 km 光纤传输后的时域波形和相位曲线如图 10 所示。

3.3 抽运光偏振特性对孤子传输特性的影响

图 11 所示是 1450 nm 后向抽运光偏振特性对孤子传输特性的影响。由图可得, 调节抽运光偏振, 光孤子脉冲最大平均功率和最小平均功率之差大约为 0.2 dBm。相同条件下, 将孤子脉冲更换为小信号脉冲时, 调节抽运光偏振, 小信号脉冲最大平均功率和最小平均功率之差约为 1 dBm。将孤子脉冲更换为小信号连续光时, 调节抽运光偏振, 小信号连续光最大平均功率和最小平均功率之差约为 2 dBm。实验研究表明, 光孤子脉冲对拉曼放大抽运光偏振特性不敏感。孤子脉冲对拉曼放大抽运光偏振特性不敏感性是一个重要的实验现象, 孤子脉冲在光纤中传输, 当损耗项满足条件 $\Gamma = \alpha L_D = \alpha \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \ll 1$ 时,

光纤损耗可以看成微扰^[1], 本文所用光纤的损耗项均为 $\Gamma < 0.002$, 都满足 $\Gamma \ll 1$ 条件。拉曼放大过程中, 孤子脉冲的输入功率较高, 抽运光波通过拉曼放大效应转化成孤子脉冲的成分较少, 拉曼放大对光纤中孤子脉冲损耗的补偿可近似看作是对孤子脉冲

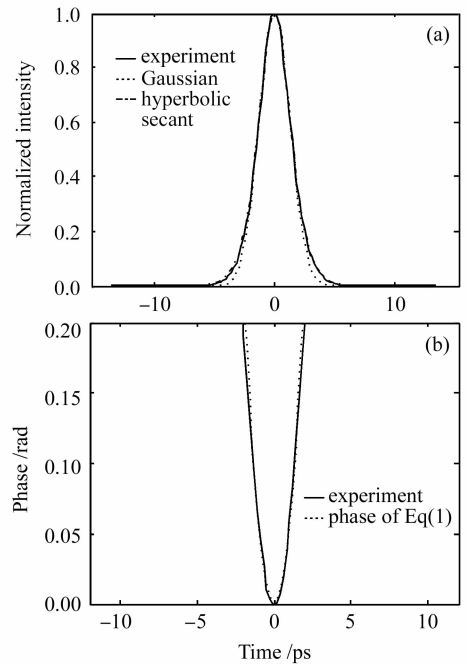


图 10 468 mW 孤子脉冲在拉曼放大抽运电流 1 A 时经 25.284 km 光纤传输后的时域波形(a)和相位曲线(b)

Fig. 10 Temporal waveforms (a) and phase curves (b) of 468 mW input soliton after propagating through 25.284 km fiber with $I_{\text{Raman}} = 1$ A

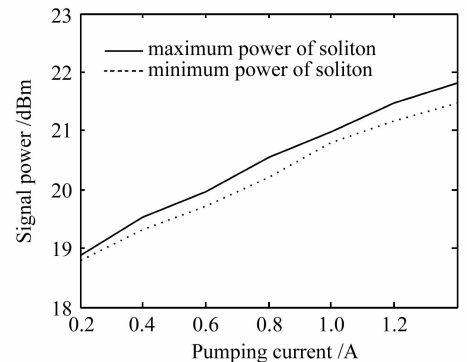


图 11 抽运光偏振特性对孤子传输特性的影响

Fig. 11 Effect of polarization of pumping optical wave on propagation of soliton

的微扰, 这样, 可认为孤子脉冲对拉曼放大抽运光偏振特性不敏感与上述微扰有关。然而, 拉曼放大光偏振特性的物理机制还需要作更加深入的理论和实验研究。

4 结 论

拉曼放大能够补偿光纤损耗, 但不改变孤子脉冲的时域波形, 对孤子脉冲的啁啾影响不大。在传输光纤长度小于拉曼放大有效光纤长度情况下, 拉曼放大能够完全补偿光纤损耗; 在传输光纤长度大

于拉曼放大有效光纤长度情况下,拉曼放大能够部分补偿光纤损耗。拉曼放大对孤子脉冲的压缩和对光纤损耗的补偿能力与抽运激光器特性有关,随抽运功率的增加而增大。光孤子脉冲对拉曼放大抽运光偏振特性不敏感。

参 考 文 献

- G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. New York: Academic Press, 1995. 51~262
- L. F. Mollenauer, K. Smith. Demonstration of soliton transmission over more than 4000 km in fiber with loss periodically compensated by Raman gain [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(8):675~677
- George Francis Levy. Raman amplification of solitons in a fiber optic ring [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1):72~76
- A. G. Okhrimchuk, G. Onishchukov, F. Lederer. Long-haul soliton transmission at 1.3 μm using distributed Raman amplification [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(6):837~841
- H. N. Ereifej, V. Grigoryan, G. M. Carter. 40 Gbit/s long-haul transmission in dispersion-managed soliton system using Raman amplification [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(25):1538~1539
- Erwan Pincemin, Dominique Hamoir, Olivier Audouin *et al.*. Distributed-Raman-amplification effect on pulse interactions and collisions in long-haul dispersion-managed soliton transmissions [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(5):973~980
- Sien Chi, Senfar Wen. Interaction of optical solitons with a forward Raman pump wave [J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(1):84~86
- Senfar Wen, Sun-Yee Wang, Sien Chi. The optical soliton transmission amplified by bidirectional Raman pumps with nonconstant depletion [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(8):2066~2073
- Govinl P. Agrawal. Effect of gain dispersion and stimulated Raman scattering on soliton amplification in fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(4):226~228
- Andrew A. B. Tio, P. Shum. Propagation of optical soliton in a fiber Raman amplifier [C]. *SPIE*, 2004, **5280**:676~681
- Yufeng Li, F. Cedric Salisbury, Zhaoming Zhu *et al.*. Interaction of supercontinuum and Raman solitons with microstructure fiber gratings [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(3):998~1007
- Fu Chengpeng, Yin Xinda, He Wanhui *et al.*. Relation between amplified spontaneous Raman scattering and Raman on-off gain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10):1211~1215
- 付成鹏,印新达,何万晖等. 拉曼放大器中放大的自发拉曼散射与拉曼开-关增益关系的研究 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(10):1211~1215
- Chi Ronghua, Lü Kecheng, Yun Peng *et al.*. Experimental study of fiber distributed Raman amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7):833~837
- 迟荣华,吕可诚,运鹏等. 分布拉曼光纤放大的实验研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(7):833~837
- Ma Yonghong, Xie Shizhong, Chen Minghua. Comparison of performance for Raman-amplified optical-fiber transmission systems [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(1):123~128
- 马永红,谢世钟,陈明华. 拉曼放大系统传输性能的比较 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(1):123~128
- Wang Chunhua, Li Li, Li Fengqin. Improving composite second order distortion performances of externally modulated CATV systems by optical fiber Raman amplifiers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9):1171~1175
- 王春华,李力,李风勤. 采用光纤拉曼放大改善 1550 nm 外调制有线电视系统的组合二阶失真指标 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(9):1171~1175
- Shen Tinggen, Zheng Hao, Li Zhenghua *et al.*. Research on gain of doped photonic crystal fiber with Raman amplification of soliton [J]. *J. Synthetic Crystals*, 2005, **34**(6):1065~1073
- 沈廷根,郑浩,李正华等. 掺杂光子晶体光纤的缺陷模增益谱与光孤子拉曼放大研究 [J]. *人工晶体学报*, 2005, **34**(6):1065~1073
- L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, M. N. Islam. Experimental demonstration of soliton propagation in long fibers, loss compensated by Raman gain [J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(5):229~231
- A. S. Gouveia-Neto, P. G. J. Wigley, J. R. Taylor. Soliton generation through Raman amplification of noise bursts [J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(20):1122~1124
- Katsumi Iwatsuki, Shigendo Nishi, Masatoshi Saruwatari *et al.*. 5 Gb/s optical soliton transmission experiment using Raman amplification for fiber-loss compensation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(7):507~509
- Katsumi Iwatsuki, Ken-ichi Suzuki, Shigendo Nishi. Adiabatic soliton compression of gain-switched DFB-LD pulse by distributed fiber Raman amplification [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(12):1074~1076
- T. E. Murphy. 10-GHz 1.3-ps pulse generation using chirped soliton compression in a Raman gain medium [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(10):1424~1426
- C. Desem, P. L. Chu. Effect of chirping on solution propagation in single-mode optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(4):248~250