

基于 8 字型结构布里渊多波长光纤激光器的 可调谐高频微波产生

张 鹏^{1,2} 王天枢^{1,2*} 贾青松² 马万卓² 张立中^{1,2} 佟首峰^{1,2} 姜会林^{1,2}

(¹ 长春理工大学空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022)

² 长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022

摘要 提出基于 8 字型结构布里渊多波长光纤激光器的可调谐高频微波的产生方法, 该结构耦合输出奇次阶斯托克斯光, 从而实现间隔约为 20 GHz 或 0.16 nm 的双波长激光信号输出, 第一阶斯托克斯光和第三阶斯托克斯光功率变化在 ± 0.35 dB 以内。双波长激光信号通过外差的方式进入高速光电探测器产生 21.39 GHz 的微波信号, 得到微波信号的信噪比约为 20 dB, 通过拟合得到 3 dB 线宽约为 2 MHz, 微波信号功率变化在 ± 0.75 dB 以内。并对抽运光和第二阶斯托克斯光拍频的微波信号线宽, 线宽约为 2 MHz。通过调节抽运光的波长实现了微波信号可调谐, 范围为 ± 0.28 GHz。实验结果说明, 所提结构可实现近 20 GHz 的可调谐微波信号, 对进一步提高微波信号的质量进行了分析。

关键词 激光光学; 高频微波; 布里渊光纤激光器; 8 字型结构; 可调谐; 拍频

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1202006

Tunable Microwave Signal Generation Based on a Multi-Wavelength Brillouin Fiber Laser in a Figure of Eight Configuration

Zhang Peng^{1,2} Wang Tianshu^{1,2} Jia Qingsong² Ma Wanzhuo² Zhang Lizhong^{1,2}
Tong Shoufeng^{1,2} Jiang Huilin^{1,2}

¹ National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China
² Institute of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract A simple photonic approach to generate tunable microwave signal with a Brillouin fiber ring laser in a figure of eight configuration is proposed and experimentally demonstrated. A dual wavelength optical signal with about 20 GHz or 0.16 nm frequency spacing is achieved by removing the odd-order Stokes lines. The power variation of the first order Stokes and third order Stokes is less than ± 0.35 dB. The optical signal is heterodyned at the high speed photodetector (PD) to produce a 21.39 GHz microwave signal. The signal-to-noise rate (SNR) of the microwave signal is about 20 dB. The 3 dB linewidth is estimated as 2 MHz. The power variation of microwave signal is less than ± 0.75 dB. 3 dB linewidth of microwave signal is also about 2 MHz by beating Brillouin pump and the second order Stokes. Tunable microwave signal under ± 0.28 GHz can be obtained by adjusting the wavelength of pump laser. ~ 20 GHz tunable microwave signal can be achieved by the proposed scheme, and the result can be used to improved microwave signal in future.

Key words laser optics; high frequency microwave; Brillouin fiber laser; figure of eight configuration; tunability; beat frequency

OCIS codes 060.2840; 060.3510; 190.2640; 350.4010

收稿日期: 2014-06-06; 收到修改稿日期: 2014-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(60907020, 61007046, 61275080)

作者简介: 张 鹏(1985—), 男, 讲师, 博士, 主要从事激光通信及光纤激光器等方面的研究。

E-mail: zhangpeng@cust.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: wangts@cust.edu.cn

1 引 言

随着高频通信的发展,基于光子学产生高频微波的方法成为了近些年研究的热点^[1]。用于产生微波的光子学方法主要包括:光学锁相环法^[2]、电光调制器法^[3]、光注入锁定法^[4]等。多波长光纤激光器一直以来都是产生微波信号的理想选择,其中多波长布里渊光纤激光器由于阈值相对较低、具有线宽压窄的作用,并且激光输出间隔固定,所以常应用于微波的产生^[5-6]。为了产生高频微波信号,基于滤波器选频器件的多波长布里渊光纤激光器常被研究,该类方法可以通过滤波器选择所需的双波长输出来拍频实现微波信号^[7-8]。但所使用的滤波器往往为 3 dB 线宽小于 0.08 nm 且边界大于 20 dB 的滤波器,成本较为昂贵,限制了一定的应用。另外利用级联布里渊光纤激光器也是一种产生高频微波的途径^[9-11],该方法通过多组单模光纤产生的斯托克斯光级联来拍频产生微波。然而基于该方法进一步产生更高频微波信号时还需增加单模光纤组及光纤放大器,增加了系统的复杂性。

传统的布里渊光纤激光器的布里渊频移在 10 GHz 左右,所以能实现双倍布里渊频移的光纤激光器成为最近研究的热点^[12-15]。从产生高频微波的角度方面,基于双倍布里渊频移的光纤激光器的双波长输出拍频不失为一种好方法,该类布里渊光纤激光器间隔约 20 GHz,在一定抽运功率下容易实现更高阶的斯托克斯光。另外结合滤波器实现更高频微波信号时,对滤波器的性能要求低于文献^[7]。

本文采用一种 8 字型结构布里渊光纤激光器实现间隔约为 0.16 nm 的双波长输出,并通过高速光电探测器拍频得到约为 20 GHz 的微波信号。通过对比抽运光和第二阶偶数阶斯托克斯光双波长拍频,分析比较拍频得到微波信号的线宽。并通过调节抽运光的波长,实现了 20 GHz 微波信号的小范围调节。

2 实验结构及原理

实验结构如图 1 所示,8 字型结构分为左环和右环,主要由作为布里渊增益介质的一组 10 km 长的单模光纤(SMF)、3 个光耦合器组成。其中耦合器 1 为 1×2 的 3 dB 耦合器(C1),耦合器 2 为 6:4 的耦合器(C2),耦合器 3 为 1×2 的 3 dB 耦合器(C3)。另外布里渊抽运光(BP)由可调谐激光器及掺铒光纤放大器组成,最大输出功率大于 200 mW,

波长范围覆盖 C 波段,偏振态控制器(PC)用于调节光的偏振态,光隔离器(ISO)用于防止反方向的斯托克斯光进入 BP,光电探测器(PD)标称最大响应频率为 50 GHz,而用于测量微波信号的频谱仪(Agilent PXA signal analyzer N9030A)最大响应频率为 44 GHz。该结构工作原理为^[13]:BP 信号经过偏振控制器和光隔离器后沿着顺时针方向进入左环,一部分 BP 信号沿逆时针方向进入右环并进入 SMF。当 BP 光的强度高于产生布里渊阈值时,将产生与 BP 光相反方向的第一阶斯托克斯光。第一阶斯托克斯光被 C1 分成两部分,一部分光经过左环逆时针传输后由 C3 耦合输出,另一部分光在右环中顺时针方向传输,当第一阶斯托克斯光强度满足布里渊阈值时,将产生右环逆时针方向的第二阶斯托克斯光。第二阶斯托克斯光同 BP 光一样,得到第三阶光耦合输出,如此循环直到高阶斯托克斯光无法满足布里渊阈值为止。可知该结构能够将抽运光及偶数阶斯托克斯光限制在腔内,而将奇数阶斯托克斯光通过 C3 耦合输出。通过调节偏振控制器及 BP 的输出功率,使得第一阶和第三阶斯托克斯光稳定输出。稳定双波长激光输出到高速光电探测器,其拍频得到相应的微波信号由电频谱仪器测量。而通过改变耦合输出方向,如图 1 虚线所示,将得到抽运光和第二阶斯托克斯光输出,并拍频得到微波信号。

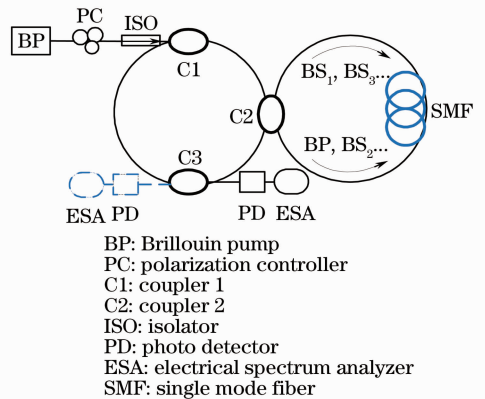


图 1 产生微波的实验结构图

Fig. 1 Experimental setup to generate the microwave signal

布里渊频移 V_B 可以表示为^[16]

$$V_B = \frac{2nV_a}{\lambda_p}, \quad (1)$$

式中 n 为光纤的折射率, V_a 为光纤中声波速度, λ_p 为抽运光波长。计算时取折射率 $n = 1.45$, $V_a = 5.98 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $\lambda_p = 1550 \text{ nm}$ 。通过计算可知,

双倍布里渊频移约为 20 GHz。从(1)式可知,当考虑无色散情况下,布里渊频移 V_B 严格反比于抽运光的波长 λ_P ;若考虑色散情况,布里渊频移 V_B 近似反比于抽运光的波长 λ_P 。所以拍频所得微波信号可以通过改变抽运光的波长来实现可调谐。且由(1)式可得,布里渊频移与抽运光波长成反比关系,系数约为 7 MHz/nm。

3 实验结果与讨论

基于 8 字型结构布里渊光纤激光器的双波长输出由光谱仪(AQ6370C)测量,其分辨率为 0.02 nm。通过调节偏振态控制器实现第三阶斯托克斯光稳定,而第五阶斯托克斯光被抑制,此时布里渊光纤激光器输出由第一阶和第三阶斯托克斯光组成的双波长,波长值分别为 1550.378 nm 和 1550.550 nm,如

图 2 所示,可以看出双波长激光的信噪比优于 30 dB。通过间隔为 10 min 的多次测量,双波长输出的功率抖动范围在 ± 0.35 dB 以内,而输出的波长基本没有变化,如图 3 所示。

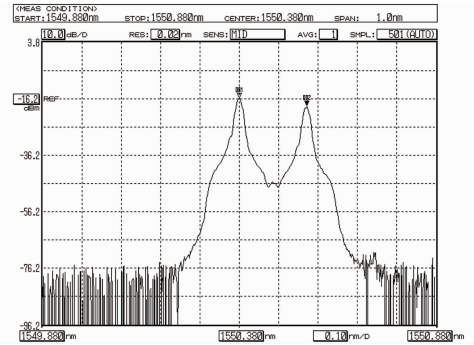


图 2 布里渊光纤激光器双波长输出光谱
Fig. 2 Output spectrum of dual-wavelength Brillouin fiber laser

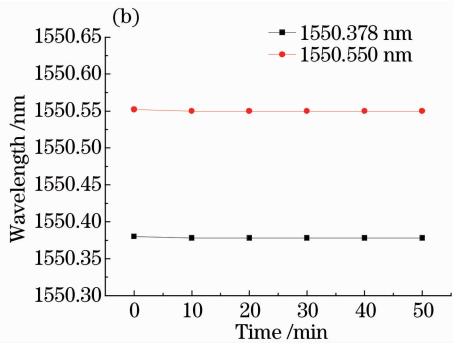
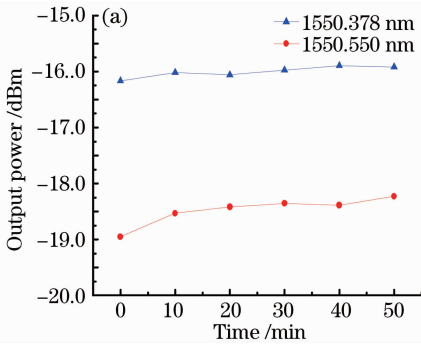


图 3 双波长激光输出稳定性。(a) 功率; (b) 波长

Fig. 3 Stability of output laser. (a) Output power; (b) wavelength

布里渊光纤激光器得到的双波长激光注入 50 GHz 响应频率的高速光电探测器。经过拍频得到 21.39 GHz 微波信号,图 4(a)所示为其在 3 MHz 分辨率、44 GHz 全范围下的电频谱,所得到微波信

号的信噪比约为 20 dB。通过间隔为 10 min 的多次测量,输出的功率抖动范围为 ± 1 dB,如图 4(b)所示。图 5 为电频谱的细节,通过拟合估算得到 3 dB 线宽为 2.03 MHz。

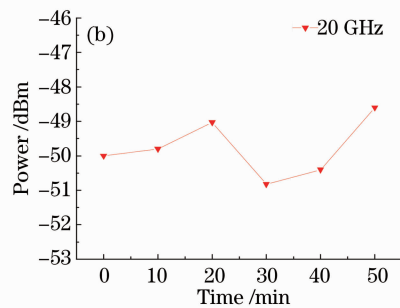
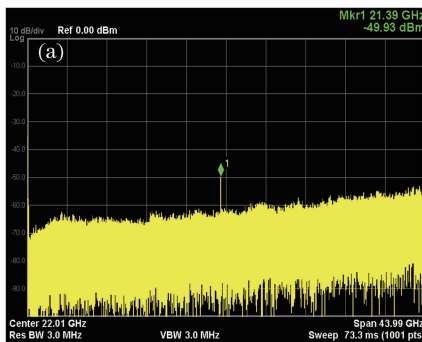


图 4 (a) 21.39 GHz 微波信号的电频谱图及(b) 功率稳定性

Fig. 4 (a) Electrical spectrum of generated microwave signal at 21.39 GHz and (b) its power stability

通过改变耦合器的输出方向,实现抽运光和第二阶斯托克斯光双波长输出并拍频得到 20 GHz 微波信号,如图 6 所示,通过同样的方法拟合,微波信号的

3 dB 线宽约为 2.44 MHz。可知布里渊光纤激光器具有线宽压窄的作用,斯托克斯光的线宽将比抽运光小很多^[17],第一阶和第三阶斯托克斯光线宽整体

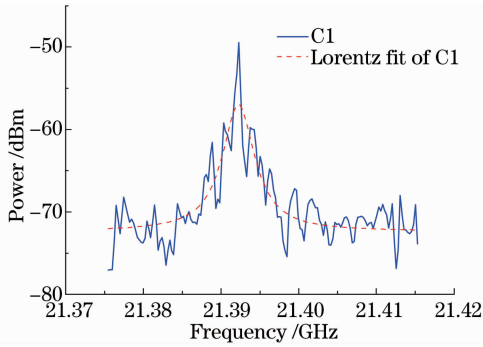


图 5 第一阶和第三阶斯托克斯光拍频微波信号的电频谱细节图

Fig. 5 Electrical spectrum of generated microwave signal in detail by beat frequency of the 1st Stokes and the 3rd Stokes

小于抽运光和第二阶斯托克斯光的线宽。由此可知抽运光和第二阶斯托克斯光拍频得到 20 GHz 微波信号线宽将大于第一阶和第三阶斯托克斯光拍频得到的微波信号的线宽。由图 5 和图 6 可知,两种微波信号的线宽改变不大,而且微波信号都出现了裂化的现象,即整个微波信号由多个微波频率组成。原因是所采用的增益光纤为 10 km 单模光纤,其自由光谱范围远大于布里渊增益范围几十兆赫兹,参与拍频双波长激光信号很有可能属于多纵模输出的状态,多纵模拍频将增大微波信号的线宽,从而无法体现第一阶和第三阶斯托克斯光拍频的优势。因此,可通过减小腔长或是采用其他辅助方式(如加入多环结构)来实现单纵模多波长的输出^[18-22],并通过单纵模双波长激光拍频得到窄线宽的微波信号。

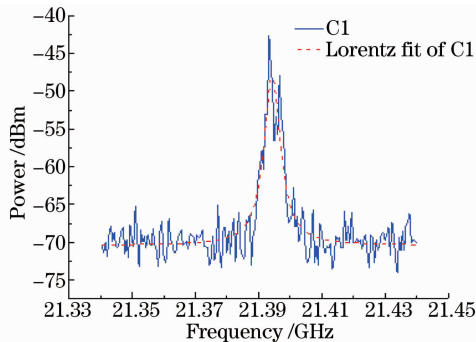


图 6 抽运光和第二阶斯托克斯光拍频微波信号的电频谱细节图

Fig. 6 Electrical spectrum of generated microwave signal in detail by Brillouin pump and the 2nd Stokes

根据文献[18,23]及(1)式可知,调节抽运光波长可实现微波信号频率的可调谐,如图 7 所示。微波信号频率调谐范围为 21.26~21.82 GHz。通过进一步分析得到抽运光波长与产生的微波信号具有

比较好的线性关系,约为 15 MHz/nm。

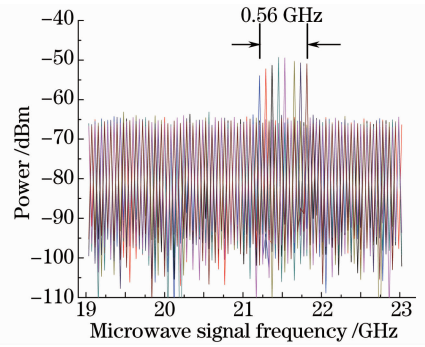


图 7 在不同抽运光波长下的可调谐微波信号
Fig. 7 Tunable microwave signal under different pump wavelengths

4 结 论

提出一种基于 8 字型结构布里渊多波长光纤激光器产生可调谐微波的方法,8 字型结构通过调节偏振态控制器可实现稳定的间隔为双倍布里渊频移的双波长激光输出,奇数阶斯托克斯光的双波长信号经过高速光电探测器外差拍频得到 21.39 GHz 微波信号,微波的信噪比约为 20 dB,微波信号的 3 dB 线宽约为 2 MHz,功率变化量在 ± 1.2 dB。通过改变耦合器的方向,得到抽运光和第二阶斯托克斯光,该双波长拍频信号的线宽与改变前的相比变化不大,分析原因主要是较长的增益光纤导致激光的多纵模输出,从而增加了微波信号的线宽。此外,通过调节抽运光的波长实现了微波信号的频率调谐,调谐范围为 21.26~21.82 GHz。

参 考 文 献

- 1 T Wang, G Liang, X Miao, *et al.*. Stable dual-wavelength single-longitudinal-mode ring erbium-doped fiber laser for optical generation of microwave frequency[J]. *Laser Phys*, 2012, 22(5): 948-952.
- 2 Johansson L A, Seeds A J. Generation and transmission of millimeter-wave data-modulated optical signals using an optical injection phase-lock loop[J]. *J Light-wave Technol*, 2003, 21(2): 511-520.
- 3 V Torres-Company, Fernández-Alonso M, Lancis J, *et al.*. Millimeter-wave and microwave signal generation by low-bandwidth electro-optic phase modulation[J]. *Opt Express*, 2006, 14(21): 9617-9626.
- 4 Goldberg L, Taylor H F, Weller J F, *et al.*. Microwave signal generation with injection-locked laser diodes[J]. *Electron Lett*, 1983, 19(13): 491-493.
- 5 Geng J, Staines S, Jiang S. Dual-frequency Brillouin fiber laser for optical generation of tunable low-noise radio frequency/microwave frequency[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(1): 16-18.
- 6 Gross M C, Callahan P T, Clark T R, *et al.*. Tunable millimeter-wave frequency synthesis up to 100 GHz by dual-wavelength Brillouin fiber laser[J]. *Opt Express*, 2010, 18(13):

- 13321–13330.
- 7 Liu J, Zhan L, Xiao P, *et al.*. Generation of step-tunable microwave signal using a multiwavelength Brillouin fiber laser [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(3): 220–223.
 - 8 Fu J, Chen D, Sun B, *et al.*. A novel-configuration multi-wavelength Brillouin erbium fiber laser and its application in switchable high-frequency microwave generation[J]. *Laser Phys*, 2010, 20(10): 1907–1912.
 - 9 Wu Z, Shen Q, Zhan L, *et al.*. Optical generation of stable microwave signal using a dual-wavelength Brillouin fiber laser[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22(8): 568–570.
 - 10 Wang R, Chen R, Zhang X. Two bands of widely tunable microwave signal photonic generation based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Opt Commun*, 2013, 287: 192–195.
 - 11 Liu J, Zhan L, Xiao P, *et al.*. Optical generation of tunable microwave signal using cascaded Brillouin fiber lasers[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(1): 22–24.
 - 12 Parvizi R, Shahabuddin N S, Ali N M, *et al.*. Generation of efficient 20 GHz optical combs in a Brillouin-erbium fiber laser [J]. *Laser Phys*, 2013, 23(1): 015103.
 - 13 Parvizi R, Arof H, Ali N M, *et al.*. 0.16 nm spaced multi-wavelength Brillouin fiber laser in a figure-of-eight configuration [J]. *Opt & Laser Technol*, 2011, 43(4): 866–869.
 - 14 Shee Y G, Al-Mansoori M H, Ismail A, *et al.*. Multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser with double-Brillouin-frequency spacing[J]. *Opt Express*, 2011, 19(3): 1699–1706.
 - 15 Zhao J F, Zhang C, Miao C Y, *et al.*. A widely tunable double-Brillouin-frequency spaced multiwavelength fiber laser with a 110 nm tuning range[J]. *Laser Phys*, 2013, 23(6): 065101.
 - 16 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. 4th edition. United States: Academic Press, 2006.
 - 17 Debut A, Randoux S, Zemouri J. Linewidth narrowing in Brillouin lasers: theoretical analysis[J]. *Phys Rev A*, 2000, 62(2): 023803.
 - 18 Feng X, Cheng L, Li J, *et al.*. Tunable microwave generation based on a Brillouin fiber ring laser and reflected pump[J]. *Opt & Laser Technol*, 2011, 43(7): 1355–1357.
 - 19 Liu Yi, Yu Jinlong, Wang Wenrui, *et al.*. Narrow linewidth single longitudinal mode Brillouin fiber laser based on feedback fiber loop[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1014003.
刘 毅, 于晋龙, 王文睿, 等. 基于反馈光纤环的窄线宽单纵模布里渊光纤激光器[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1014003.
 - 20 Chen X, Xian L, Ogusu K, *et al.*. Single-longitudinal-mode Brillouin fiber laser incorporating an unpumped erbium-doped fiber loop[J]. *Appl Phys B*, 2012, 107(3): 791–794.
 - 21 Liu Yi, Yu Jianglong, Wang Hongjie, *et al.*. Tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser based on feedback fiber loop[J]. *Chinese J lasers*, 2014, 41(2): 0202003.
刘 毅, 于晋龙, 王红杰, 等. 基于反馈光纤环的可调多波长布里渊掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0202003.
 - 22 Jiao Mingxing, Xing Junhong, Tong Congwei, *et al.*. Design and experimental study of two-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602013.
焦明星, 邢俊红, 同聪维, 等. 双波长单纵模掺铒光纤环形激光器设计及实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602013.
 - 23 Wang R, Chen R, Zhang X. Two bands of widely tunable microwave signal photonic generation based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Opt Commun*, 2013, 287: 192–195.

栏目编辑:张 雁