

基于正交相干接收的布里渊斯托克斯与反斯托克斯散射光分离技术

李威, 刘伟民, 周黎明, 程凌浩*, 关柏鸥

暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 510632

摘要 提出并设计了一种基于正交光相干接收的光载波上下边带信号分离技术, 可用在布里渊散射分布式光纤传感系统中, 实现对斯托克斯光和反斯托克斯光的无损分离。该技术利用正交光相干接收技术, 保留了光场的相位信息, 使光载波的上下边带在不同的输出端口处于相干叠加或相干抵消状态, 从而实现上下边带的分离。结果表明, 该技术可使光载波的上下边带分别从两个端口输出, 且输出与输入信号功率线性相关, 具有很好的线性度。分离之后的上边带光信号和下边带光信号之间的串扰小于 -20 dB。与常用的光学滤波器方法相比, 该技术无温度敏感器件, 具有很好的稳定性和可靠性。

关键词 光纤光学; 布里渊散射分布式光纤传感; 信号分离技术; 正交光相干接收; 布里渊散射

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0706003

Separation of Brillouin Stokes Scattering and Anti-Stokes Scattering Based on Orthogonal Coherent Receiving

Li Wei, Liu Weimin, Zhou Liming, Cheng Linghao, Guan Baiou

Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract We propose a technique to separate the upper and the lower sidebands of an optical carrier based on orthogonal optical coherent receiving, which can be used in Brillouin scattering distributed fiber-optic sensing systems to separate Stokes and anti-Stokes scattering without loss. In the orthogonal optical coherent receiving technology, phase information of the optical field is preserved. So the upper and the lower sidebands can be arranged in coherent addition or cancellation states in different outputs, and the separation of the upper and the lower sidebands is realized. The results show that the technique can output the upper and lower sidebands from different ports, with a good linear relationship between input power and output power. The crosstalk between the separated upper and lower sidebands can be less than -20 dB. Compared with frequently employed optical filtering, this technique has no temperature sensitive component and shows good stability and robustness.

Key words fiber optics; Brillouin scattering distributed fiber-optic sensing; technique of signal separation; orthogonal optical coherent receiving; Brillouin scattering

OCIS codes 060.2310; 230.3990; 290.5830

1 引 言

分布式光纤传感器不仅抗电磁干扰性好, 而且传感光纤集传感与传输于一体, 可连续感知光纤传

输路径上各点的温度和应变等空间分布和变化信息^[1], 在长距离监测领域, 如关于桥梁、隧道和高压线路等大型结构的监测, 有十分广阔的应用前景^[2]。

现有的分布式光纤传感器根据原理主要有瑞利

收稿日期: 2017-12-21; 收到修改稿日期: 2018-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(11474133)、广州市科技计划(201707010338)

作者简介: 李威(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事分布式光纤传感方面的研究。E-mail: levis0513@163.com

导师简介: 关柏鸥(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤器件和光纤传感技术方面的研究。

E-mail: tguanbo@jnu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: chenglh@ieee.org

散射分布式光纤传感器、拉曼散射分布式光纤传感器和布里渊散射分布式光纤传感器^[3-4]。因为布里渊散射对于温度应变均敏感,根据频移和功率即可实现对温度和应变的同时测量^[5],因此备受关注^[6-8]。在布里渊散射分布式光纤传感系统中,尤其在布里渊分布式光时域反射仪(BOTDR)系统中^[9],斯托克斯散射光和反斯托克斯散射光往往同时存在,且二者在频谱上相对于激发波长对称分布,频率间隔仅为 22 GHz 左右^[10]。多数系统仅分析斯托克斯散射光以进行分布式传感,并通过光学滤波的方法滤掉反斯托克斯散射光^[11]。可采用的光学滤波方法包括法布里珀罗干涉仪(FPI)^[12]、马赫-曾德尔干涉仪(MZI)^[13-14]和窄带宽光纤光栅滤波器(FBGF)^[15]等。在光域上若要从布里渊散射信号中滤除反斯托克斯光并保留斯托克斯光,则要求光学滤波器的过渡带必须足够陡峭^[16],这将不可避免地导致光学滤波器的插入损耗增大、斯托克斯光衰减、系统信噪比降低,进而导致传感距离和精度等指标劣化^[17]。此外,光学滤波器具有温度敏感性,中心波长随温度的漂移系数一般可达 GHz/°C 的水平^[18]。对于布里渊散射光的两个分量而言,温度漂移带来的影响十分显著。因此,需附加温度控制系统以保证光学滤波器进行恒温工作,这进一步增加

了系统的复杂度,降低了可靠性。

基于此,本文提出并设计了一种基于正交光相干接收的光载波上下边带信号分离技术,通过保留光场的相位信息,使光载波的上下边带在不同的输出端口处于相干叠加或相干抵消的状态,从而实现上下边带的分离。实验通过光电调制器产生抑制载波的双边带光信号或者单边带光信号,并用于模拟接收到的布里渊散射信号,并验证了该技术对布里渊斯托克斯光和反斯托克斯光无损分离的能力。结果表明,该技术具有很好的线性度和小于 -20 dB 的串扰,性能稳定可靠。

2 基本原理

图 1 为光载波上下边带分离技术的结构框图,主要由两部分组成。前一部分是光学双偏振相干接收机(ICR),用于接收输入的信号光和线偏振本地参考光源。信号光在偏振分束器(PBS)的作用下分成 X、Y 两个偏振态,分别与本地参考光在两个光学 90°混频器中混频,其输出被平衡光电探测器转换成电信号输出。后一部分则工作在射频(RF)域,由一对 90°射频混合耦合器构成。前一部分 ICR 的输出经过该部分的 90°射频混合耦合器后,实现光载波上下边带的分离。

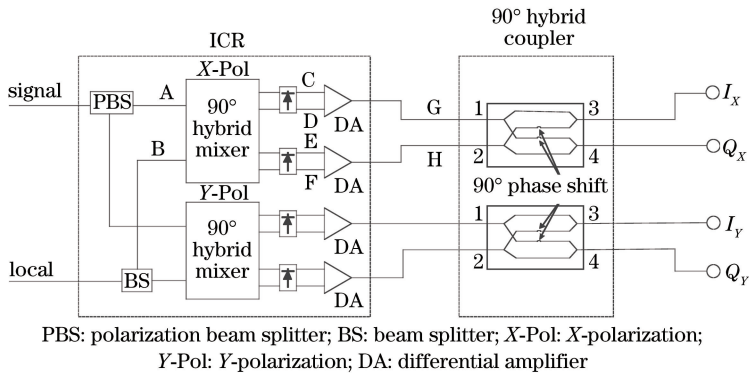


图 1 光载波上下边带分离技术的结构框图

Fig. 1 Schematic of the technique to separate the upper and lower sidebands of an optical carrier

以 X 偏振态为例,假设 A 和 B 处的信号分别为

$$A(t) = S(t) = A_{usb} \cos(\omega_{usb}t + \alpha) + A_{lsb} \cos(\omega_{lsb}t + \gamma), \quad (1)$$

$$B(t) = S_{lo}(t) = A_{lo} \cos(\omega_{lo}t + \beta), \quad (2)$$

式中: A_{lo} 为参考光幅值; A_{usb} 为上边带信号幅值; A_{lsb} 为下边带信号幅值; ω_{lo} 为参考光频率; ω_{usb} 为上边带信号频率; ω_{lsb} 为下边带信号频率; β 为参考光初始相位; α 为上边带信号初始相位; γ 为下边带信号初始相位。A 和 B 处的信号进入光学 90°混频器

后,经过波片与分束器,参考光被分支并延迟,相互之间具有严格的相位差,4 路参考光可分别表示为

$$S_{lo1}(t) = \frac{1}{2} A_{lo} \cos(\omega_{lo}t + \beta), \quad (3)$$

$$S_{lo2}(t) = \frac{1}{2} A_{lo} \cos\left(\omega_{lo}t + \beta + \frac{\pi}{2}\right), \quad (4)$$

$$S_{lo3}(t) = \frac{1}{2} A_{lo} \cos(\omega_{lo}t + \beta + \pi), \quad (5)$$

$$S_{lo4}(t) = \frac{1}{2} A_{lo} \cos\left(\omega_{lo}t + \beta - \frac{\pi}{2}\right), \quad (6)$$

边带信号相位不变,则可表示为

$$S(t) = A_{\text{usb}} \cos(\omega_{\text{usb}} t + \alpha) + A_{\text{lsb}} \cos(\omega_{\text{lsb}} t + \gamma)。$$

在 90°混频器内,不同相位的参考光与边带信号两两混频,则 C 处信号中含有交叉乘积项:

$$C(t) = S_{\text{lo1}}(t) \times S(t) = \frac{1}{4} A_{\text{usb}} A_{\text{lo}} \cos[(\omega_{\text{usb}} - \omega_{\text{lo}})t + \alpha - \beta] + \frac{1}{4} A_{\text{lsb}} A_{\text{lo}} \cos[(\omega_{\text{lo}} - \omega_{\text{lsb}})t + \beta - \gamma], \quad (8)$$

同理,D 处信号的交叉乘积项可表示为

$$D(t) = S_{\text{lo3}}(t) \times S(t) = -\frac{1}{4} A_{\text{usb}} A_{\text{lo}} \cos[(\omega_{\text{usb}} - \omega_{\text{lo}})t + \alpha - \beta] - \frac{1}{4} A_{\text{lsb}} A_{\text{lo}} \cos[(\omega_{\text{lo}} - \omega_{\text{lsb}})t + \beta - \gamma], \quad (9)$$

C 和 D 处的交叉乘积项的信号幅值和频率相等,相位相差 π 。经平衡探测器和差分放大器后,C 和 D 处信号中的共模项被抵消,只留下交叉乘积项,因此可得 G 处信号为

$$G(t) = \frac{1}{2} A_{\text{usb}} A_{\text{lo}} \cos[(\omega_{\text{usb}} - \omega_{\text{lo}})t + \alpha - \beta] + \frac{1}{2} A_{\text{lsb}} A_{\text{lo}} \cos[(\omega_{\text{lo}} - \omega_{\text{lsb}})t + \beta - \gamma]。 \quad (10)$$

同理,E 和 F 处信号的交叉乘积项以及 H 处信号可表示为

$$E(t) = S_{\text{lo2}}(t) \times S(t) = \frac{1}{4} A_{\text{usb}} A_{\text{lo}} \sin[(\omega_{\text{usb}} - \omega_{\text{lo}})t + \alpha - \beta] - \frac{1}{4} A_{\text{lsb}} A_{\text{lo}} \sin[(\omega_{\text{lo}} - \omega_{\text{lsb}})t + \beta - \gamma], \quad (11)$$

$$F(t) = S_{\text{lo4}}(t) \times S(t) = -\frac{1}{4} A_{\text{usb}} A_{\text{lo}} \sin[(\omega_{\text{usb}} - \omega_{\text{lo}})t + \alpha - \beta] + \frac{1}{4} A_{\text{lsb}} A_{\text{lo}} \sin[(\omega_{\text{lo}} - \omega_{\text{lsb}})t + \beta - \gamma], \quad (12)$$

$$H(t) = \frac{1}{2} A_{\text{usb}} A_{\text{lo}} \sin[(\omega_{\text{usb}} - \omega_{\text{lo}})t + \alpha - \beta] - \frac{1}{2} A_{\text{lsb}} A_{\text{lo}} \sin[(\omega_{\text{lo}} - \omega_{\text{lsb}})t + \beta - \gamma]。 \quad (13)$$

如图 1 所示,G 和 H 处的信号分别从 90°射频混合耦合器的端口 1、2 输入,再分别被分为等功率的两路,一路相位与输入信号保持不变,另一路相对于输入信号产生 90°相移。然后 90°相移的信号与另一端口相位保持不变的信号叠加,则得到端口 3 的输出信号,即 I_X 信号,这样可使上边带在端口 3

处于相干抵消状态,下边带在端口 3 处于相干叠加状态,可表示为

$$I_X(t) = \frac{\sqrt{2}}{4} A_{\text{usb}} A_{\text{lo}} \cos[(\omega_{\text{usb}} - \omega_{\text{lo}})t + \alpha - \beta] + \frac{\sqrt{2}}{4} A_{\text{lsb}} A_{\text{lo}} \cos[(\omega_{\text{lo}} - \omega_{\text{lsb}})t + \beta - \gamma] + \frac{\sqrt{2}}{4} A_{\text{usb}} A_{\text{lo}} \sin\left[(\omega_{\text{usb}} - \omega_{\text{lo}})t + \alpha - \beta - \frac{\pi}{2}\right] - \frac{\sqrt{2}}{4} A_{\text{lsb}} A_{\text{lo}} \sin\left[(\omega_{\text{lo}} - \omega_{\text{lsb}})t + \beta - \gamma - \frac{\pi}{2}\right] = \frac{\sqrt{2}}{2} A_{\text{lsb}} A_{\text{lo}} \cos[(\omega_{\text{lo}} - \omega_{\text{lsb}})t + \beta - \gamma]; \quad (14)$$

同理,端口 4 的输出信号即 Q_X 信号,下边带在端口 4 处于相干抵消状态,上边带在端口 4 处于相干叠加状态,可表示为

$$Q_X(t) = \frac{\sqrt{2}}{4} A_{\text{usb}} A_{\text{lo}} \cos\left[(\omega_{\text{usb}} - \omega_{\text{lo}})t + \alpha - \beta - \frac{\pi}{2}\right] + \frac{\sqrt{2}}{4} A_{\text{lsb}} A_{\text{lo}} \cos\left[(\omega_{\text{lo}} - \omega_{\text{lsb}})t + \beta - \gamma - \frac{\pi}{2}\right] + \frac{\sqrt{2}}{4} A_{\text{usb}} A_{\text{lo}} \sin[(\omega_{\text{usb}} - \omega_{\text{lo}})t + \alpha - \beta] - \frac{\sqrt{2}}{4} A_{\text{lsb}} A_{\text{lo}} \sin[(\omega_{\text{lo}} - \omega_{\text{lsb}})t + \beta - \gamma] = \frac{\sqrt{2}}{2} A_{\text{usb}} A_{\text{lo}} \sin[(\omega_{\text{usb}} - \omega_{\text{lo}})t + \alpha - \beta]。 \quad (15)$$

从(14)式和(15)式可以看出, I_X 信号中只包含下边带和参考光混频后的频率信息,即理论上此端口只会输出下边带与参考光的混频信号,而上边带与参考光的混频信号则完全被消除;同样, Q_X 信号中只包含上边带和参考光的混频信号。同理可知,Y 偏振态也可进行上下边带信号的分离操作。上下边带的分离和上下边带之间的相对相位无关,因为在理论分析过程中并不涉及初始相位 α 和 γ 之间的和或差的关系。无论 α 和 γ 是常量(例如通过微波信号调制产生的上下边带)还是随机的(例如斯托克斯光和反斯托克斯光),都不会影响边带分离。因此,完全可以用微波信号调制产生的上下边带来模拟斯托克斯光和反斯托克斯光,进而验证边带的分离。

综上所述,理论分析表明,通过 ICR 和 90°射频混合耦合器的共同作用,该分离技术可以实现光信号上下边带的分离,使二者从不同的端口无损输出。

3 实验结果与分析

为验证光载波边带分离技术,搭建了如图 2 所示的实验平台。实验中使用了布里渊散射分布式光纤传感系统中常用的窄线宽分布反馈式(DFB)激光器作为光源,其工作波长为 1550.116 nm,输出功率为 10 dBm,线宽小于 100 kHz。窄线宽激光器 99% 的输出被送入边带分离装置(即 ICR)作为本地参考光,另外 1% 的输出经偏振控制器调节偏振态后送入电光调制器进行调制产生边带信

号,用于模拟布里渊散射分布式光纤传感系统中的斯托克斯光和反斯托克斯光。电光调制器便于调节上下边带的相对功率,相比真实的布里渊散射分布式光纤传感系统,更易测量上下边带的分离程度。实验使用的是双平行马赫-曾德尔结构的电光调制器,由 10.835 GHz 微波源驱动产生所需边带信号。电光调制器输出的 99% 被送入 ICR 作为信号光,另外 1% 则被送入偏置点控制器,以反馈控制电光调制器的偏置点。用频谱分析仪分析边带分离所得信号。

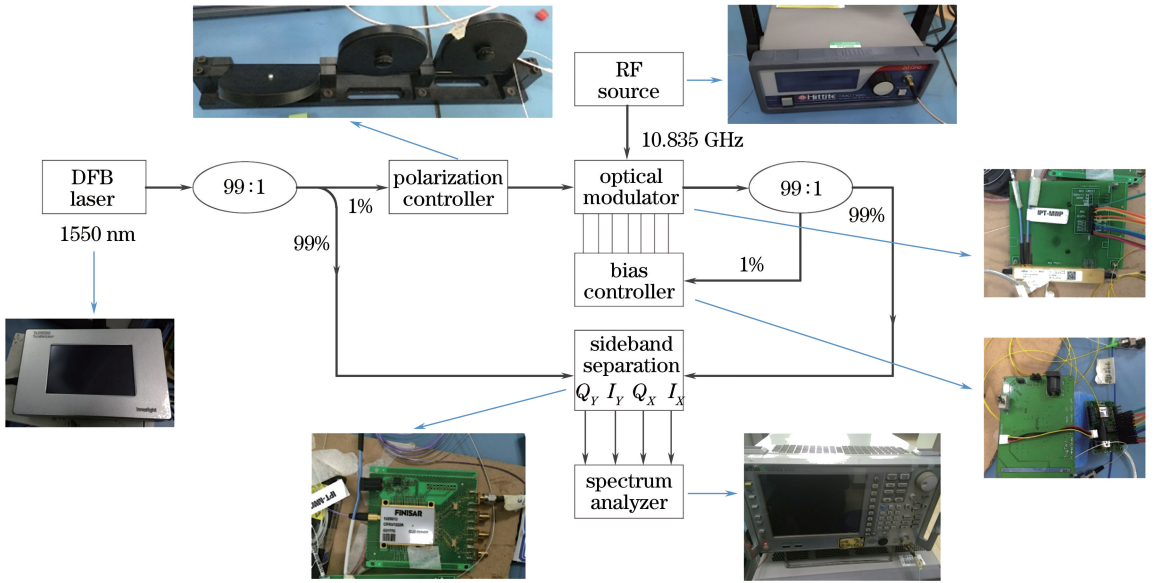


图 2 实验框图 and 对应实物图

Fig. 2 Experimental block diagram and corresponding equipment photos

3.1 载波抑制双边带光信号

利用电光调制器产生载波抑制的双边带光信号,模拟布里渊散射斯托克斯光与反斯托克斯光。当载波抑制双边带光信号与参考光进行正交相干接收后,从频谱仪上观察 X 偏振态下 I 和 Q 两路边带

信号的分离情况。微波信号为 15 dBm 时,调制好的载波抑制双边带光信号的光谱如图 3(a)所示。其中,上边带功率为 -47.056 dBm,波长为 1550.028 nm,载波功率为 -68.76 dBm,波长为 1550.116 nm,下边带功率为 -47.131 dBm,波长为

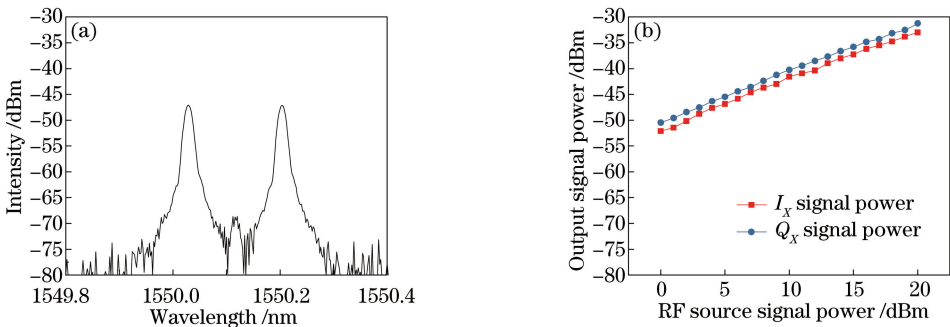


图 3 (a)载波抑制的双边带光信号;(b)载波抑制的双边带下的输出信号功率

Fig. 3 (a) Optical double sideband signal with suppressed carrier;
(b) output signal power in condition of optical double sideband signal

1550.204 nm。图 3(a)为光谱图类似布里渊散射分布式光纤传感系统接收的信号,尤其是 BOTDR 系统,即斯托克斯光和反斯托克斯光具有几乎相同的功率和相对载波的频移量。调谐微波信号功率,经边带分离后所得的 I_X 和 Q_X 两路频率为 10.835 GHz 的微波信号功率如图 3(b) 所示。图 3(b)显示 I_X 和 Q_X 输出信号功率均随微波信号的增长而线性增长,说明 I_X 和 Q_X 输出信号确实来自于上下边带与参考光的混频信号。两路输出信号功率之间有 2 dB~3 dB 的细微差异,该差异是与微波信号的输入功率无关的恒定值,两条曲线的整体斜率基本一致,这是光路和电路上两路信号通道的增益

不一致引起的,可在后期做补偿处理。另一方面,两路信号的功率接近,很难说明上下边带信号被成功分离,有可能上下边带信号均从 I_X 和 Q_X 两路输出。因此,需要利用单边带调制实验做进一步验证。

3.2 单边带光信号

调节电光调制器的偏置点,使电光调制器只产生上边带(频率较高)的光信号,并用此信号模拟布里渊散射的反斯托克斯光。当射频信号功率为 15 dBm 时,光信号如图 4(a)所示,波长 1550.030 nm 处,峰值功率为 -48.686 dBm。与参考光进行相干正交接收后,调节输入的微波信号功率,测得的 I_X 和 Q_X 两路频率为 10.835 GHz 的微波信号功率如图 4(b)所示。

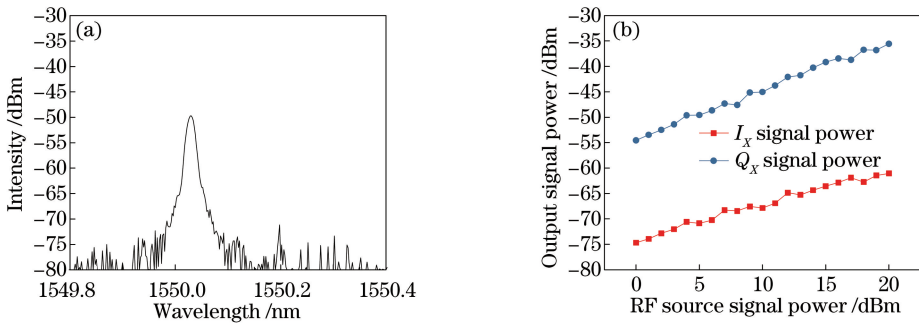


图 4 (a)调制仅产生上边带的光信号;(b)调制仅产生上边带后的输出信号功率

Fig. 4 (a) Only optical upper sideband signal; (b) only output signal power in condition of optical upper sideband signal

由图 4(b)可见,只产生上边带时,正交相干接收后 Q_X 和 I_X 输出信号功率均随射频信号功率的增加而线性增加,但 Q_X 信号功率更大,超出 I_X 功率 20 dB 以上。说明 Q_X 输出的信号为上边带与参考光的混频信号, I_X 输出的理论上为下边带与参考光的混频信号。由图 4(a)可见,只产生上边带时,下边带基本淹没在噪声当中,理论上 I_X 应该没有信号输出。在实验中 I_X 输出的信号只可能是上边带泄露到 I_X 的信号,即串扰信号,实验结果表明,对串扰的抑制达 20 dB 以上。图 4(b)表明,该抑制比与输入微波信号功率可能相关。为排除干扰,改变微波源频率,使 10.835 GHz 处的上下边带均不存在,即在该频率处两个边带没有相互串扰的信号,只有噪声存在。此时,观察 10.835 GHz 处输出信号功率与输入微波信号功率的关系。实验结果表明,10.835 GHz 处上下边带不存在时,10.835 GHz 输出信号功率不随输入微波信号功率的变化而变化,保持在 -75 dBm 附近不变。这说明图 4 中输入微波信号功率低时,噪声引起了大量测量误差。此时测得的输出信号功率接近系统噪声水平,容易产生较大误差。

因此,输入微波信号功率低时测得的串扰抑制比较低,而实际的串扰抑制比应该更接近输入微波信号功率较高时的测量值,即接近 30 dB。

实验还通过控制电光调制器仅产生下边带(频率较低)的光信号,模拟布里渊散射的斯托克斯光。射频信号功率为 15 dBm 时,光信号如图 5(a)所示,波长为 1550.204 nm,峰值功率为 -47.315 dBm。与参考光进行相干正交接收后,调节输入的微波信号功率,测得 I_X 和 Q_X 两路频率 10.835 GHz 的微波信号功率如图 5(b)所示。图 5 与图 4 的结果正好相反,即 I_X 的输出功率超过 Q_X 输出功率 20 dB 以上,表明下边带信号从 I_X 输出。结合图 4 可知,上下边带确实被分离并从两路端口分别输出,且端口间的串扰抑制接近 30 dB。

综上所述,当调制产生抑制载波的双边带光信号时,上下边带与参考光的混频信号从 I_X 和 Q_X 两个端口输出的结论得以验证;当调制产生只有上边带或者下边带的光信号时, I_X 输出下边带混频信号, Q_X 输出上边带混频信号的结论得以验证,且通道间的串扰抑制接近 30 dB。

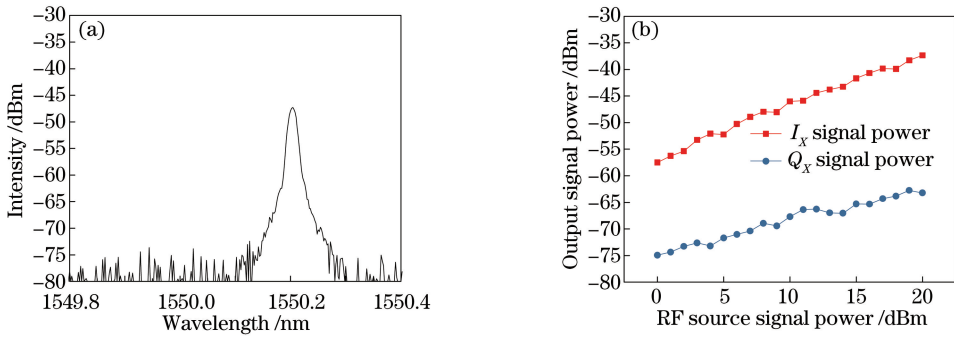


图 5 (a)调制只产生下边带的光信号;(b)调制只产生下边带后的输出信号功率

Fig. 5 (a) Optical low sideband signal; (b) output signal power in condition of optical low sideband signal

4 结 论

本文主要研究了一种基于正交相干接收的光载波边带信号的分离技术,可用来区分布里渊散射信号中的斯托克斯光和反斯托克斯光信号。对载波抑制双边带信号和单边带信号的实验结果表明,该方法可以实现对载波的上下边带的无损分离。本文提出的方法能够实现对布里渊散射信号中斯托克斯光和反斯托克斯光的区分,在不损伤信号的同时,完全保留两路光信号的信息,并且通道间的串扰抑制可达 30 dB。

参 考 文 献

- [1] Rao Y J. Recent process in ultra-long distributed fiber-optic sensing[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 074207.
饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 074207.
- [2] Zhou Z C, Wang X L, Su R T, *et al.* Application of distributed fiber sensing in fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080006.
周子超, 王小林, 粟荣涛, 等. 分布式光纤传感在光纤激光中的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080006.
- [3] Weng Y, Ip E, Pan Z, *et al.* Single-end simultaneous temperature and strain sensing techniques based on Brillouin optical time domain reflectometry in few-mode fibers [J]. Optics Express, 2015, 23(7): 9024-9039.
- [4] Liu R X, Zhang M J, Zhang J Z, *et al.* Temperature measurement accuracy enhancement in the Brillouin optical time domain reflectometry system using the sideband of Brillouin gain spectrum demodulation[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(24): 244203.
刘瑞霞, 张明江, 张建忠, 等. 一种利用布里渊增益谱边带解调提高布里渊光时域反射系统测温精度的方法[J]. 物理学报, 2016, 65(24): 244203.
- [5] Song M P, Qiu C. Long-distance Brillouin optical time domain reflectometer with two-parameter sensing for standard single-mode optical fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 954-958.
宋牟平, 裘超. 普通单模光纤的长距离双参量传感布里渊光时域反射计[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 954-958.
- [6] Li Y Q, Li X J, An Q. New method to improve the performance of Brillouin optical time domain reflectometer system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0106003.
李永倩, 李晓娟, 安琪. 提高布里渊光时域反射系统传感性能的方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0106003.
- [7] Wait P C, Newson T P. Landau Placzek ratio applied to distributed fiber sensing [J]. Optics Communications, 1996, 122(4/5/6): 141-146.
- [8] Parker T R, Farhadiroushan M, Handerek V A, *et al.* A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(7): 979-981.
- [9] Kurashima T, Horiguchi T, Izumita H, *et al.* Brillouin optical-fiber time domain reflectometry[J]. IEICE Transaction on Communication, 1993, 76(4): 382-390.
- [10] Huai H K, Gareth P L, Trevor P N, *et al.* All fiber system for simultaneous interrogation of distributed strain and temperature sensing by spontaneous Brillouin scattering [J]. Optics Letters, 2000, 25(10): 695-697.
- [11] Liang H. Research of Brillouin distributed optical fiber sensor based on coded pulses [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.
梁浩. 基于序列编码探测脉冲的布里渊光纤传感器的研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [12] Kurashima T, Horiguchi T, Izumita H, *et al.* Distributed strain measurement using BOTDR improved by taking account of temperature

- dependence of Brillouin scattering power [C] // Integrated Optics and Optical Fibre Communications, 11th International Conference on, and 23rd European Conference on Optical Communications. Edinburgh, UK: IET, 1997, 1: 119-122.
- [13] Souza K D, Wait P C, Newson T P. Double-pass configured fibre Mach-Zehnder interferometric optical filter for distributed fiber sensing [J]. Electronics Letters, 2002, 33(25): 2148-2149.
- [14] Yang R T, Zhu L Q, Lou X P, *et al.* Research on dual-pass tunable Mach-Zehnder interferometer for BOTDR[J]. Laser and Infrared, 2016, 46(8): 1001-1005.
杨润涛, 祝连庆, 娄小平, 等. 用于 BOTDR 的双通道可调 M-Z 干涉仪研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(8): 1001-1005.
- [15] Wait P C, Hartog A H. Spontaneous Brillouin-based distributed temperature sensor utilizing a fiber Bragg grating notch filter for the separation of the Brillouin signal [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(5): 508-510.
- [16] Wei W. High-precision tunable narrowband rectangular optical filter design and its application [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
魏伟. 高精度可调窄带矩形光学滤波器设计及应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [17] Shimizu K, Horiguchi T, Koyamada Y, *et al.* Coherent self-heterodyne Brillouin OTDR for measurement of Brillouin frequency shift distribution in optical fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 12(5): 730-736.
- [18] Zhuo Z C, Yu Y S, Zhao Z Y, *et al.* Temperature dependence of characteristics for sample fiber Bragg grating and temperature-compensating package [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2003, 24(5): 5-7.
卓仲畅, 于永森, 赵志勇, 等. 取样光纤光栅温度特性及其温度补偿封装[J]. 半导体光电, 2003, 24(5): 5-7.