

基于SBS和光场包络叠加的三角波产生技术

贾振蓉 江 阳 马 闯 白光富 唐延林 祁小四 訾月姣 黄凤勤 吴廷伟

贵州大学理学院物理系, 贵州 贵阳 550025

摘要 提出并演示了一种结合外调制和受激布里渊散射(SBS)放大技术、通过信号包络恰当延时而叠加产生三角波信号的新方法。该方案中激光器发出的连续光分为两路,一路经过马赫-曾德尔调制器(MZM)产生频率为斯托克斯(Stokes)频移量三分之一的基频调制信号,另一路作为SBS抽运光放大调制信号的正三阶边带获得三倍频谐波信号。两路信号的包络经过独立相位控制和功率调节,恰当延时后叠加可产生良好近似的三角波信号。通过改变连续光波长,产生的三角波信号频率可实现一定范围内的调谐。理论仿真和实验结果均证明了此方案的可行性,其避免了复杂的谱线操作,提高了系统稳定性,为任意波形产生技术提供了新思路。

关键词 光纤光学; 三角波; 受激布里渊散射; 包络叠加

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0405004

Triangular Waveform Generation Technology Based on SBS and Superposition of Optical Field Envelopes

Jia Zhenrong Jiang Yang Ma Chuang Bai Guangfu Tang Yanlin Qi Xiaosi

Zi Yuejiao Huang Fengqin Wu Tingwei

Department of Physics, College of Science, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China

Abstract Combined with external modulation and stimulated Brillouin scattering(SBS) amplification technology, a new method of generating triangular waveform signal by synthesizing signal envelopes with proper time delay is proposed and demonstrated. In this scheme, the continuous light emitted by lasers is divided into two branches. One is modulated by Mach-Zehnder modulator and the fundamental frequency modulation signal, one third of the Stokes frequency shift is obtained. The other is used as SBS pump light to amplify the positive 3rd-order sideband of the modulation signal, and a frequency tripling harmonic signal is obtained. After independently controlling the phase and power of envelopes of the two harmonic signals, a triangular waveform signal with good approximation is generated by synthesizing these two signal envelopes with proper time delay. By changing the wavelength of continuous wave, the frequency of the generated triangular waveform signal can be tuned in a certain range. The feasibility of this scheme is proved in theoretical simulation and experiment. The scheme avoids complex spectral lines manipulation and the system stability is improved. It provides a new idea for arbitrary waveform generation technology.

Key words fiber optics; triangular wave; stimulated Brillouin scattering; envelope superposition

OCIS codes 060.2310; 060.2630; 060.4510

收稿日期: 2015-10-22; 收到修改稿日期: 2015-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(61061004, 61465002)、贵州省高层次创新型人才项目([2015]4010)、贵州省普通高等学校创新人才团队([2014]32)、贵州省科技创新人才团队([2015]4017)

作者简介: 贾振蓉(1990—),男,硕士研究生,主要从事高速光纤通信系统和微波光子技术方面的研究。

E-mail: jiazhenrong777@163.com

导师简介: 江 阳(1975—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事高速光纤通信系统和微波光子技术等方面的研究。

E-mail: jiangyang415@163.com(通信联系人)

1 引言

三角波信号在光学信号处理领域^[1-8]具有诸多重要应用,如脉冲压缩^[1]、光学信号时域和频域拷贝^[4]等,受到了研究者的广泛关注。早期三角波信号的产生主要依靠电子技术实现,但电子技术的带宽瓶颈严重制约了生成信号的带宽大小,因此相关的光子技术得到了迅速发展。

产生任意波形信号的一种主要方法是傅里叶合成法,它通过控制宽带梳状谱线的相位和幅度实现所需信号的产生,Jiang等^[9]曾演示了独立操控上百条光学谱线参数以实现信号处理的方案,此类方法通常采用空间光路完成对谱线参数的控制,在技术上提出了很高的要求;除了对谱线的逐一操控,Ye等^[10]则利用光谱整形结合频率-时间映射(FTTM)实现三角波的产生,此方案中所有谱线以整体形式得到控制,产生信号的准确性和灵活性不够理想。在这些方法中,通常使用锁模激光器(MLL)作为光源,提高了系统成本且所得三角波信号占空比常小于1。

外调制法是另一种波形产生的有效手段,它从连续光出发,通过对调制边带的控制获得所需波形。这一方法相对简单,近年来得到了广泛研究。此方法中,利用双平行马赫-曾德尔调制器(DP-MZM)和双电极马赫-曾德尔调制器(De-MZM)结合光纤色散^[11-14]、DP-MZM结合可调带通滤波器(TOBF)滤波特性^[15]等产生三角波的方案有较多报道。这几种方案中使用的De-MZM或DP-MZM价格较高,提高了系统成本;为满足各调制谐波分量间的功率比要求,需要精确调节多个偏压和调制电压,增加了操作难度。相比之下,利用单驱动马赫-曾德尔调制器(SD-MZM)完成三角波信号产生具有成本低、调节方便等特点,更具应用潜力。Li等^[16]利用SD-MZM载波抑制调制结合光交错复用器(OI)分路滤波特性及偏振控制仿真合成重复频率可调谐的三角波信号,该方案仅基于软件仿真而无实验验证;Liu等^[17]演示了一种内置偏振调制器的萨格纳克(Sagnac)环结构产生重复频率可调的光学函数信号,这一方案对偏振敏感,降低了系统稳定性。光纤中的非线性效应也用于实现调制边带的控制,Liu等^[18]通过受激布里渊散射(SBS)的光放大作用恢复载波抑制调制信号光载波的方法得到重复频率为5、8、10 GHz的三角波信号,这一方法对SBS的增益有严格要求,需要额外的滤波器滤除信号负阶边带以满足相位条件,系统较为复杂。

傅里叶合成法和外调制法都以谱线操控技术为核心,谱线操控易受环境影响,对技术要求较高,因此通过信号包络的控制和叠加获得三角波形也是一种理想选择。由于信号包络的相位和幅度不易受外界影响且控制方便,在稳定性和控制精度方面占有优势。2015年,Jiang等^[19-20]提出利用时域叠加的分析方法实现任意波形的产生,其中利用外调制和注入锁定技术结合信号包络叠加产生三角波信号^[19]的方案中需要额外使用一个半导体激光器,系统略显复杂。考虑到SBS具有很好的谱线选择放大能力,本文提出并分析演示了一种采用外调制和SBS放大技术结合、由信号包络叠加产生三角波信号的新方案。不同于前述基于谱线操控的SBS三角波形产生方案,此方案中光载波自身作为SBS抽运光且无需对SBS增益大小和放大后载波的相位情况进行严格控制,也不需要额外的滤波环节来满足三角波信号产生所需的相位条件,极大降低了系统控制难度,在稳定性、控制灵活性方面均表现出优势。

2 实验原理

三角波信号 $T(t)$ 的傅里叶级数展开式可表示为

$$T(t) = \alpha + \beta \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left[\frac{1}{n^2} \cos(n\omega t) \right], \quad (1)$$

式中 α 和 β 是常量, ω 是角频率, n 是谐波频率分量阶数。由(1)式可见,理想的三角波仅由奇次谐波分量组成,展开式系数随 n 的增加急剧减小,因此由展开式的前两项合成相加即可得到很好的近似,此时 $T(t)$ 可写为

$$T(t) = \alpha + \beta \cos(\omega t) + \frac{1}{9} \beta \cos(3\omega t). \quad (2)$$

可见,存在包络频率分别为 ω 和 3ω 的信号且幅度和相位满足上述关系时,通过合成可产生良好的三角波信号。基于上述思路所提出的三角波信号产生方案如图1所示。

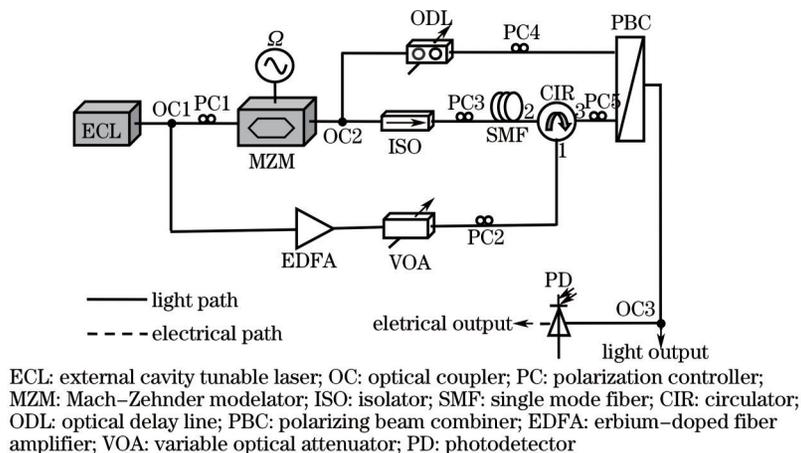


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

图1中,外腔可调谐激光器(ECL)发出的光场为

$$E(t) = E_0 \cos(\omega_0 t), \quad (3)$$

式中 E_0 和 ω_0 分别为光场幅度和角频率。初始光场经过 50:50 的耦合器 1(OC1)分为两路,下支路光场依次经过掺铒光纤放大器(EDFA)、可调光衰减器(VOA)的功率控制和偏振控制器 2(PC2)的偏振控制后,作为 SBS 抽运光从光环形器(CIR)1 口输入上支路的单模光纤(SMF),并与该路光场相向传输,这里 SMF 作为 SBS 的增益介质。OC1 分出的上支路光场经过 PC1 控制后进入 MZM,被正弦驱动信号调制。MZM 的调制输出可表示为

$$E_{out} = \frac{1}{2} E_0 \cos(\omega_0 t) \cos\left[\frac{\theta}{2} + \frac{\beta}{2} \cos(\Omega t)\right], \quad (4)$$

式中 Ω 表示驱动信号的角频率; β 为 MZM 调制系数, $\beta = \frac{\pi V_m}{V_\pi}$ (V_m 和 V_π 分别表示驱动信号幅度和 MZM 的半波电压); θ 是由 MZM 偏置电压引起的两臂间固定相移, $\theta = \frac{\pi V_{bias}}{V_\pi}$ (V_{bias} 是 MZM 的偏置电压)。方案中,调制器偏置在线性工作区,即 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 。控制调制信号的频率 Ω 为斯托克斯(Stokes)频移的 1/3,则调制后光场表达式为

$$E_1 = \frac{1}{2} E_0 \cos\frac{\pi}{4} \cos(\omega_0 t) \cos\left[\frac{\beta}{2} \cos(\Omega t)\right] - \frac{1}{2} E_0 \sin\frac{\pi}{4} \cos(\omega_0 t) \sin\left[\frac{\beta}{2} \cos(\Omega t)\right]. \quad (5)$$

利用贝塞尔展开式将(5)式展开得

$$E_1 = \frac{\sqrt{2}}{4} E_0 \cos(\omega_0 t) \left\{ J_0 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m J_{2m} \cos(2m\Omega t) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m J_{2m-1} \cos[(2m-1)\Omega t] \right\}, \quad (6)$$

式中 n 阶贝塞尔函数满足 $J_n = J_n\left(\frac{\beta}{2}\right)$ 。在小信号调制条件下,对(6)式取 3 阶近似可得

$$E_1 = \frac{\sqrt{2}}{4} E_0 \cos(\omega_0 t) [J_0 - 2J_1 \cos(\Omega t) - 2J_2 \cos(2\Omega t) - 2J_3 \cos(3\Omega t)]. \quad (7)$$

该光场经光电探测器(PD)检测后,输出的光电流 $i_1(t)$ 可表示为

$$i_1(t) \propto E_1(t) E_1^*(t) \propto \frac{1}{2} E_0^2 \cos^2(\omega_0 t) [A + \chi_1 \cos(\Omega t) + \chi_2 \cos(2\Omega t) + \chi_3 \cos(3\Omega t)], \quad (8)$$

式中 $A = \frac{1}{4} J_0^2 + \frac{1}{2} J_1^2 + \frac{1}{2} J_2^2 + \frac{1}{2} J_3^2$, $\chi_1 = J_1 J_2 - J_0 J_1 - J_2 J_3$, $\chi_2 = J_1^2 - J_0 J_2 - J_1 J_3$, $\chi_3 = J_0 J_3 - J_1 J_2$ 。

利用 OptiSystem 软件对该调制过程进行仿真,结果如图 2 所示。从图 2(a)可以看出,由于调制非线性的存在,经过调制的光场将产生高阶调制光边带,且边带间的间隔为 Ω 。信号各阶光边带功率按贝塞尔函数关系递减。调制信号对应的电谱如图 2(b)所示,信号通过调制很容易产生较弱的 2 阶和 3 阶谐波分量,此时调制频率功率远大于其高阶分量,从波形上看,此时为一个频率为 Ω 的正弦信号。由此,忽略 2 阶和 3 阶分量,光电流 $i_1(t)$ 可进一步近似表达为

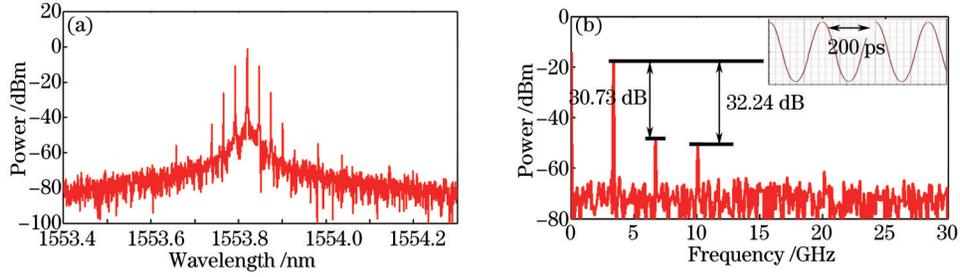


图2 调制信号仿真结果。(a) 光谱; (b) 电谱, 插图为对应波形

Fig.2 Simulation results of the modulation signal. (a) Optical spectrum; (b) electrical spectrum, the illustration shows corresponding waveform

$$i_1(t) \propto \frac{1}{2} E_0^2 \cos^2(\omega_0 t) [A + \chi_1 \cos(\Omega t)]. \quad (9)$$

该调制信号被 50:50 的 OC2 分为两路, 一路经过光延时线(ODL)的包络延时后直接进入偏振合束器(PBC), 另一路依次经过光隔离器(ISO)和 PC3, 进入长度为 2 km 的 SMF, 与环形器 2 口输出的 SBS 抽运光在 SMF 中共同作用产生 SBS。若先测出实验中产生的 Stokes 频移大小并设置调制频率 Ω 恰好等于其频率大小的 1/3, 则此时调制光场的 +3 阶边带将落在 SBS 增益峰位置, 其功率将得到极大增强。设 SBS 提供的光增益为 G , 在 3 阶近似条件下, 光场表达式可写为

$$E_2 = \frac{\sqrt{2}}{8} E_0 \cos(\omega_0 t) [J_0 - 2J_1 \cos(\Omega t) - 2J_2 \cos(2\Omega t) - 2GJ_3 \cos(3\Omega t)]. \quad (10)$$

光场经过 PD 检测, 光电流 $i_2(t)$ 表示为

$$i_2(t) \propto E_2(t) E_2^*(t) \propto \frac{1}{8} E_0^2 \cos^2(\omega_0 t) [B + \kappa_1 \cos(\Omega t) + \kappa_2 \cos(2\Omega t) + \kappa_3 \cos(3\Omega t)], \quad (11)$$

式中 $B = \frac{1}{4} J_0^2 + \frac{1}{2} J_1^2 + \frac{1}{2} J_2^2 + \frac{1}{2} G^2 J_3^2$, $\kappa_1 = J_1 J_2 - J_0 J_1 - G J_2 J_3$, $\kappa_2 = J_1^2 - J_0 J_2 - G J_1 J_3$, $\kappa_3 = G J_0 J_3 - J_1 J_2$ 。

若 $G=50$ dB, 上述放大过程对应的信号光谱、电谱和波形的仿真结果如图 3 所示。从光谱中可以看出, 原调制信号的 +3 阶边带被明显放大, 其功率高于光载波 9.25 dBm。信号经过 PD 检测的电谱如图 3(b) 所示, 从图中可以看出 3 阶谐波频率分量显著增强并高于其他分量, 此时所对应的信号波形可近似看成频率为 3Ω 的微波信号。1 阶和 2 阶谐波频率分量很小, 对信号影响较弱, 因此光电流 $i_2(t)$ 可忽略 1 阶和 2 阶分量, 近似为

$$i_2(t) = \frac{1}{8} E_0^2 \cos(\omega_0 t) [B + \kappa_3 \cos(3\Omega t)]. \quad (12)$$

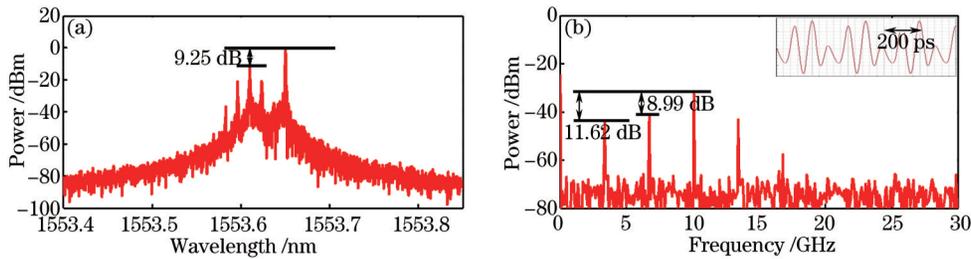


图3 SBS放大调制信号仿真结果。(a) 光谱; (b) 电谱, 插图为对应波形

Fig.3 Simulation results of the SBS amplification modulation signal. (a) Optical spectrum; (b) electrical spectrum, the illustration shows corresponding waveform

原调制信号包络与该 3 阶谐波信号包络分别经过恰当的延时后, 通过 PBC 可完成信号的叠加。采用 PBC 的原因有 2 个: 1) 两路信号具有相同的光载波, 因此利用 PBC 的正交合路特性可以避免两路信号的随机干涉^[21]; 2) PBC 可视为一个检偏器, 根据马吕斯定律, 通过 PC 分别调节 PBC 前两路信号的偏振态, 改变该路光场与 PBC 该路透振方向之间的夹角大小, 可以精确控制透过后该路信号包络的功率大小, 最终满足两路信号包络叠加时的功率比。合成信号经过 PD 检测后输出的光电流表示为

$$I_{\text{out}} \propto \frac{C^2}{4} i_1'(t + \Delta T) + D^2 i_2'(t) = \frac{1}{8} C^2 E_0^2 \cos^2(\omega_0 t) [A + \chi_1 \cos(\Omega t + \Omega \cdot \Delta T)] + \frac{1}{8} D^2 E_0^2 \cos^2(\omega_0 t) [B + \kappa_3 \cos(3\Omega t)] = \frac{1}{8} E_0^2 \cos^2(\omega_0 t) [C^2 A + D^2 B + C^2 \chi_1 \cos(\Omega t + \Omega \cdot \Delta T) + D^2 \kappa_3 \cos(3\Omega t)] \quad (13)$$

式中系数 $C = \cos \varphi$, $D = \cos \gamma$, φ 和 γ 分别为 PC4 和 PC5 控制的光场偏振方向与本路 PBC 透振方向之间的夹角。当满足 $\Omega \cdot \Delta T = 2k\pi$ (k 为大于 0 的整数) 且 $\frac{D^2 \kappa_3}{C^2 \chi_1} = \frac{1}{9}$ 时, (13) 式可简化为

$$I_{\text{out}} = \frac{1}{8} E_0^2 \cos^2(\omega_0 t) \left[C^2 A + D^2 B + C^2 \chi_1 \cos(\Omega t) + \frac{1}{9} C^2 \chi_1 \cos(3\Omega t) \right], \quad (14)$$

式中 $C^2 A + D^2 B$ 为常量。可见, (14) 式与理想三角波表达式相吻合, 对应的仿真波形和电谱如图 4 所示。需要注意的是, (14) 式是在对两路信号取谐波近似的条件下推得, 而仿真电谱中 2 阶跟 4 阶谐波分量依然保留, 但相对于 1、3 阶分量它们的功率较低, 并不影响最终结果。

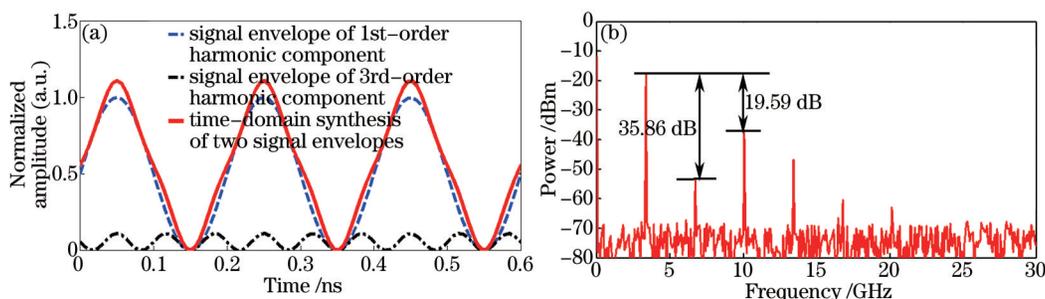


图 4 合成信号仿真结果。(a) 波形; (b) 电谱

Fig.4 Simulation results of the synthetic signal. (a) Waveform; (b) electrical spectrum

3 实验结果

对理论分析结果进行了实验验证。由图 1 所示的实验方案, ECL 输出中心波长为 1553.82 nm、功率为 1.7 dBm (1.7 dBm \approx 0.06 W) 的连续光, 被 OC1(50:50) 分为两路, 下支路光场经过 EDFA、VOA 的功率调整和 PC2 的偏振控制, 作为 SBS 抽运光从环形器输入进上支路中的 SMF, 此时测得光功率为 7.8 dBm (7.8 dBm \approx 0.26 W); 实验中, MZM 偏置在线性工作区, 产生调制光信号。实验测得 Stokes 频移量为 10.68 GHz, 驱动信号频率设置为 3.56 GHz, 此时其 3 阶调制边带可获得最佳 SBS 放大效果。上支路光场被调制产生的信号光谱、电谱以及波形如图 5 所示。

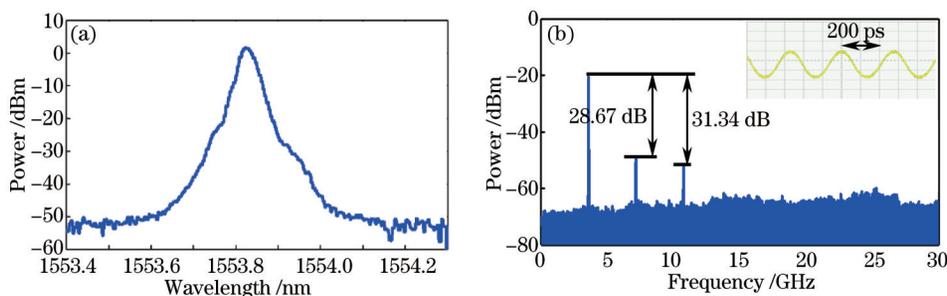


图 5 调制后的信号。(a) 光谱; (b) 电谱, 插图为对应波形

Fig.5 Modulated signal. (a) Optical spectrum; (b) electrical spectrum, the illustration shows corresponding waveform

实验用光谱仪的分辨率仅为 0.05 nm, 因此调制光边带在图 5(a) 中没有直接显示, 而图 5(b) 的电谱则反映了光场经过调制后各阶谐波分量的情况。测得 1 阶谐波分量功率分别高于 2、3 阶谐波分量 28.67 dB 和 31.34 dB。图 5 中插入的波形可以看出, 直接调制得到的是一个理想的正弦信号。调制后的光场被 OC2(50:50) 分成两路, 一路光场包络经 ODL 延时后进入 PBC, 实验采用的光延时线精度为 0.1 ps, 考虑到该路 3.56 GHz 信号周期为 280 ps, 这一调节精度对于该信号包络来说, 其相位调节精度可达 $(2\pi/2800)$ rad, 满足精确控制该路信号包络相位的需要。而另一路光场依次通过 ISO 和 PC3 进入长度为 2 km 的 SMF, 与相向传输的 SBS

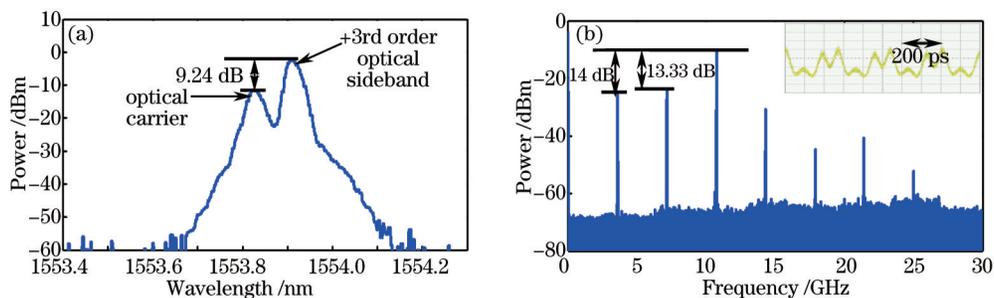


图6 SBS放大后的调制信号。(a) 光谱; (b) 电谱, 插图为对应波形
 Fig.6 Modulation signal after SBS amplification. (a) Optical spectrum; (b) electrical spectrum, the illustration shows corresponding waveform

抽运光共同作用放大自身的+3阶边带。放大后的信号光谱、电谱和波形如图6所示。

由图6(a)所示光谱可以看出,由于SBS的放大效果,调制信号的+3阶光边带功率明显增强,且与光载波功率比为9.24 dB。同样,在图6(b)所示电谱上,3阶谐波分量的功率得到增强,分别高于1、2阶谐波分量14 dB和13.33 dB。经SBS放大后的信号从CIR的3口输出,经PC5调节后与原调制信号一路共同输入PBC,合为一路。这里采用PBC进行合路,既避免了两信号的随机干涉,又通过调节PC4和PC5控制两路信号包络的功率比为9:1。合路信号的光谱、电谱和波形如图7所示。

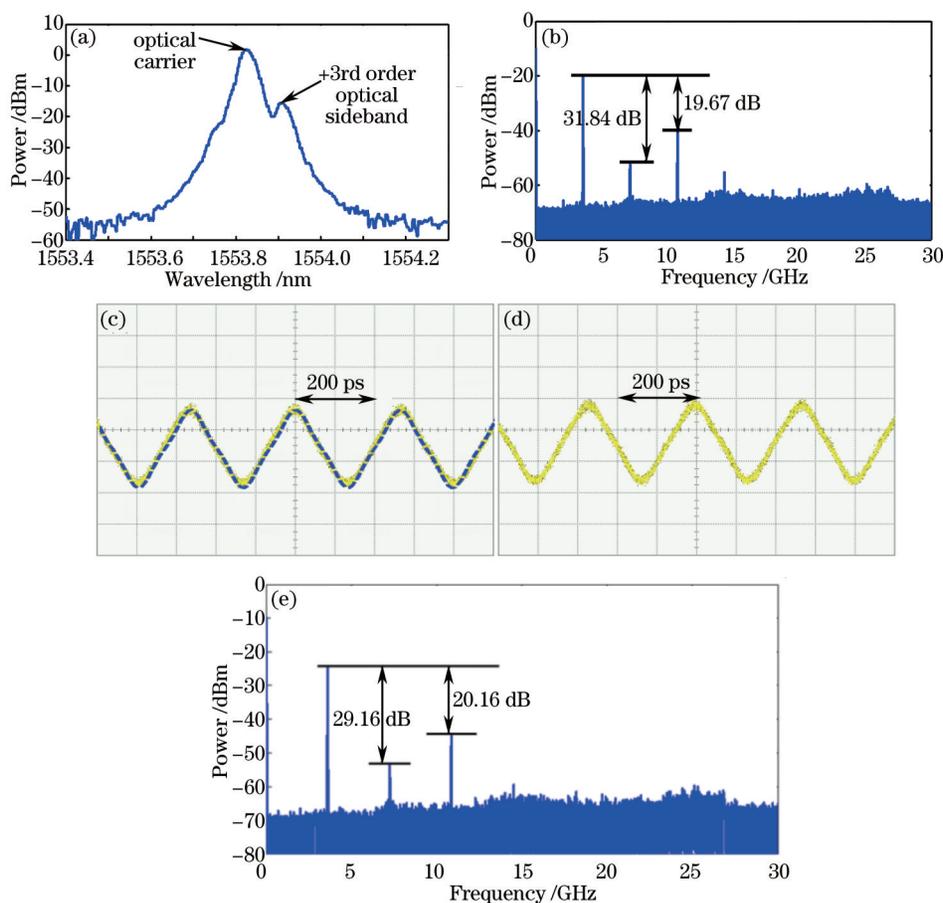


图7 合成信号的检测结果。(a) 调制频率为3.56 GHz时光谱; (b) 调制频率为3.56 GHz时电谱; (c) 调制频率为3.56 GHz时波形; (d) 调制频率为3.62 GHz时波形; (e) 调制频率为3.62 GHz时电谱

Fig.7 Test results of synthetic signals. (a) Optical spectrum with the modulation frequency of 3.56 GHz; (b) electrical spectrum with the modulation frequency of 3.56 GHz; (c) waveform with the modulation frequency of 3.56 GHz; (d) waveform with the modulation frequency of 3.62 GHz; (e) electrical spectrum with the modulation frequency of 3.62 GHz

图 7(a)的光谱表明合成后的信号仅表现出光载波、1阶和3阶光边带。从图 7(b)的电谱可以看出,1阶和3阶谐波分量的功率比为 19.67 dB,符合三角波展开式的功率比要求。电谱和波形[图 7(b)和(c)]都表明此为一重复频率为 3.56 GHz、占空比为 1 的三角波信号,与理论预期吻合,图 7(c)中虚线代表的是只有满足三角波条件的 1阶和3阶谐波分量存在时的仿真波形,对应实线表示实验中实际测量得到的三角波形,此时电谱中包含了 2阶和4阶分量,从图中可以看出,2阶和4阶分量的微弱存在并没有对三角波波形产生明显影响。已有实验研究表明,SBS抽运光波长的变化会使 Stokes 频移量发生改变^[22]。可见,通过改变初始光场载波波长可产生一定范围内频率可调谐的三角波信号,若光载波波长变为 1543.81 nm 并对应改变调制频率,可获得重复频率为 3.62 GHz 的三角波信号,对应高亮部分改为波形和电谱如图(d)和(e)所示。

4 结 论

分析并演示了利用外调制和SBS放大技术结合信号包络叠加的方法产生三角波信号的新方案。从信号包络叠加的角度分析和设计三角波信号的产生是一种与谱线操纵技术不同的新思路,避免了谱线参数操作复杂、信号质量不理想等问题。通过理论分析和实验可以看出,所提出的方案具有良好的可行性。这一方法的优势在于:对初始调制信号各阶谐波分量的功率比无需严格控制,三角波的合成通过两路信号的包络控制和叠加完成,而所需信号的功率比可以通过PC控制实现,放宽了技术要求,提高了系统稳定性。但该方案只是利用光子技术大带宽、抗干扰等优势产生微波频段的三角波信号,从光层面上看不是标准的光三角波信号,如需进一步获得全光的三角波信号,则在本方案基础上增加一级调制或作全光波长变换即可实现。实验中为演示方便,选择了光载波自身作为SBS的3阶谐波放大抽运光,但SBS的Stokes频移量大小限制了所产生三角波的频率调谐范围。这一限制可通过改变信号波长或更换光纤得到改善。若需得到更大带宽的调谐范围,可使用另一个独立光源作为SBS抽运光,则该系统所产生的三角波信号带宽可满足任意需求,真正意义上实现重复频率可调谐性^[23-24]。实验成功得到占空比为 1、重复频率为 3.56 GHz,且一定范围内可调谐的三角波信号。后续工作中将重点考虑如何实现更高阶的三角波近似。

参 考 文 献

- 1 Camerlingo A, Parmigiani F, Xian F, *et al.*. Wavelength conversion in a short length of a solid lead-silicate fiber[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(9): 628-630.
- 2 Bhamber R S, Latkin A I, Boscolo S, *et al.*. All-optical TDM to WDM signal conversion and partial regeneration using XPM with triangular pulses[C]. 34th European Conference on Optical Communication, 2008: Th.1.B.2.
- 3 Latkin A I, Boscolo S, Bhamber R S, *et al.*. Optical frequency conversion, pulse compression and signal copying using triangular pulses [C]. European Conference on Optical Communication, 2008: Mo.3.F.4.
- 4 Latkin A I, Boscolo S, Bhamber R S, *et al.*. Doubling of optical signals using triangular pulses[J]. J Opt Soc Am B, 2009, 26(8): 1492-1496.
- 5 Wang Shunyan, Jiang Yang, Wu Cinan, *et al.*. Experimental study on all-optical clock recovery of all-fiber mode-locking cavity configuration[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0505005.
王顺艳, 江 阳, 吴次南, 等. 全光纤锁模腔结构的全光时钟提取实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0505005.
- 6 Xu Jing, Jiang Yang, Zhou Zhuya, *et al.*. Return-to-zero/nonreturn-to-zero signal data format conversion based on microwave photonic filter[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0905008.
徐 静, 江 阳, 周竹雅, 等. 基于微波光子滤波器的归零到非归零码型转换研究[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0905008.
- 7 Li Hengwen, Jiang Yang, Xu Jing, *et al.*. Optical millimeter-wave sub-carrier generation based on optical parametric loop mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1006005.
李恒文, 江 阳, 徐 静, 等. 基于光纤参量环形镜的光毫米波副载波产生[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1006005.
- 8 Zhou Zhuya, Jiang Yang, Bai Guangfu, *et al.*. Optoelectronic hybrid optical clock frequency divider/multiplier[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0306002.
周竹雅, 江 阳, 白光富, 等. 光电混合的光时钟分频/倍频器[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0306002.
- 9 Jiang Z, Huang C B, Leaird D E, *et al.*. Optical arbitrary waveform processing of more than 100 spectral comb lines[J]. Nature Photon, 2007, 1(8): 463-467.

- 10 Ye J, Yan L S, Pan W, *et al.*. Photonic generation of triangular-shaped pulses based on frequency-to-time conversion[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(8): 1458-1460.
- 11 Zhang F Z, Ge X Z, Pan S L. Triangular pulse generation using a dual-parallel Mach-Zehnder modulator driven by a single-frequency radio frequency signal[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(21): 4491-4493.
- 12 Dai B, Gao Z S, Wang X, *et al.*. Generation of versatile waveforms from CW light using a dual-drive Mach-Zehnder modulator and employing chromatic dispersion[J]. *IEEE J Lightwave Technol*, 2013, 31(1): 145-151.
- 13 Li J, Zhang X P, Hraimel B, *et al.*. Performance analysis of a photonic-assisted periodic triangular-shaped pulses generator[J]. *IEEE J Lightwave Technol*, 2012, 30(11): 1617-1624.
- 14 Li Jing, Ning Tigang, Pei Li, *et al.*. Experimental demonstration on triangular-shaped pulse train generation based on harmonic fitting [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(15): 154210.
李 晶, 宁提纲, 裴 丽, 等. 基于谐波拟合产生周期性三角形光脉冲串的实验研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(15): 154210.
- 15 Li W, Wang W T, Zhu N H. Photonic generation of radio-frequency waveforms based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. *IEEE Photon J*, 2014, 6(3): 5500608.
- 16 Li J, Ning T, Pei L, *et al.*. Photonic-assisted periodic triangular-shaped pulses generation with tunable repetition rate[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(10): 952-954.
- 17 Liu W, Yao J. Photonic generation of microwave waveforms based on a polarization modulator in a Sagnac loop[J]. *J Lightwave Technol*, 2014, 32(20): 3637-3644.
- 18 Liu X K, Pan W, Zou X H, *et al.*. Photonic generation of triangular-shaped microwave pulses using SBS-based optical carrier processing [J]. *J Lightwave Technol*, 2014, 32(20): 3797-3802.
- 19 Jiang Y, Ma C, Bai G F, *et al.*. Photonic generation of triangular waveform utilizing time-domain synthesis[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2015, 27(16): 1725-1728.
- 20 Jiang Y, Ma C, Bai G, *et al.*. Photonic microwave waveforms generation based on time-domain processing[J]. *Opt Express*, 2015, 23(15): 19442-19452.
- 21 Jiang Y, Yu J L, Wang Y T, *et al.*. An optical domain combined dual-loop optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(11): 807-809.
- 22 Yang B, Jin X, Chi H, *et al.*. Optically tunable frequency-doubling Brillouin optoelectronic oscillator with carrier phase-shifted double sideband modulation[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 24(12): 1051-1053.
- 23 Lee J H, Nagashima T, Hasegawa T, *et al.*. Bismuth-oxide-based nonlinear fiber with a high SBS threshold and its application to four-wave-mixing wavelength conversion using a pure continuous-wave pump[J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(1): 22-28.
- 24 Zhou P, Zhang F Z, Pan S L. A tunable multi-frequency optoelectronic oscillator based on stimulated Brillouin scattering[C]. *International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN)*, 2015: 1-3.

栏目编辑: 王晓琰