

基于谐波拟合产生周期性三角形光脉冲串的实验研究*

李晶¹⁾ 宁提纲¹⁾ 裴丽^{1)†} 简伟¹⁾ 郑晶晶¹⁾ 油海东¹⁾²⁾ 孙剑¹⁾
王一群¹⁾ 李超¹⁾

1)(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

2)(青岛农业大学理学与信息科学学院, 青岛 266109)

(2014年1月14日收到; 2014年3月12日收到修改稿)

实验研究了一种基于谐波拟合产生周期性三角形光脉冲串的方法, 方案首先利用马赫曾德调制器的载波抑制调制, 获得具有周期性起伏的连续光强度信号, 然后利用光纤色散所致的射频功率衰落效应, 对光强度表达式中四次谐波分量进行抑制, 调节调制深度后, 光强度表达式将向理想三角形傅里叶展开式的前三项进行逼近, 最后以谐波拟合的方式获得重复频率为射频调制频率二倍的周期性三角形光脉冲串. 结合实验, 在 9.862 GHz 和 7.678 GHz 射频调制频率下, 获得了脉冲重复频率 19.724 Gb/s(脉冲全宽约 50.7 ps) 和 15.356 Gb/s(脉冲全宽约 65.1 ps) 的稳定三角形光脉冲串输出, 改变色散量并反向调节调制频率, 可进一步改变脉冲的重复频率, 所获得的实验结果与理论预期基本符合.

关键词: 光纤通信, 微波光子, 三角形光脉冲串

PACS: 42.79.Sz, 84.40.-x, 42.79.Hp

DOI: 10.7498/aps.63.154210

1 引言

具有特殊时域波形的脉冲信号产生是微波光子学领域^[1-4]的一项重要研究内容. 其中, 周期性三角形光脉冲串, 是一种周期性且在时域范围内具有线性上升和下降沿的特殊光脉冲串. 利用光学非线性效应, 光脉冲所对应的强度上升沿与下降沿将分别对应两个相反的频率啁啾, 且它们的绝对值相等. 利用三角形光脉冲这种特殊的时域形状, 使其在全光信息处理技术领域^[5-9]获得了广泛的应用. 研究发现, 结合光学非线性效应, 三角形光脉冲可实现高效全光波长转换^[6]、光时分复用到波分复用的全光变换^[7]、光信号时域和频域拷贝^[8]、脉冲压缩、信号再生^[9]等项功能.

近年来, 国际上相继报道了一系列三角形光脉冲光子发生器的研究成果. 其中研究最为广泛

的是利用频谱整形和频率-时间映射 (frequency-to-time mapping, FTTM) 的原理对光脉冲整形的全光法^[10-14], 2006年, Parmigiani等利用超结构光纤光栅作为滤波器实现了特定参数高斯光脉冲到三角形光脉冲的转换^[10]; 2008年, Bosocole等又利用脉冲预啁啾和色散光纤中的SPM效应和群速度色散相互作用, 获得了三角形光脉冲^[11-13]; 2011年, Ye等又利用保偏光纤、偏振控制器和起偏器作为频谱整形单元, 结合FTTM, 获得三角形光脉冲^[14]. 除此之外, 利用连续波激光器 (continuous-wave laser, CW) 为光源的射频调制^[15,16], 也被用来产生三角形光脉冲, 2011年, Dai等利用射频调制产生类似锁模激光器 (mode-locked laser, MLL) 的梳状谱, 通过调节射频调制深度、电相位差及调制器偏置点, 进而改变梳状谱各谱线的幅度和相位, 并实现了包括三角形、锯齿形、平顶形和正弦形等多种时域形状的脉冲产生. 2012年, 我们报道了

* 中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2014JBM013) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lipei@bjtu.edu.cn

一利用光载波抑制调制和光纤色散效应产生周期性三角形光脉冲的方法^[17], 该方法采用了谐波拟合和光纤色散^[18,19]的原理, 通过对光强度表达式中的四次谐波分量进行调整, 实现向理想三角形傅里叶展开式前三项的逼近, 可以获得重复频率二倍于射频调制频率的三角形光脉冲串. 但是受当时实验及测量条件的限制, 文章只进行了初步的数值模拟和仿真. 该方案采用廉价的CW代替昂贵的MLL, 以及近乎零成本的色散光纤为光边带之间提供足够的相移, 可降低光子发生器的结构和成本, 相比之前的方法^[10-14]有一定的优势. 因此, 进一步的实验研究将是对该方案的一个重要补充.

本文以文献^[17]中的物理模型为基础, 结合北京交通大学光波所自身的实验条件, 在9.862 GHz和7.678 GHz射频调制频率下, 获得了脉冲重复频率19.724 Gb/s(脉冲全宽约50.7 ps)和15.356 Gb/s(脉冲全宽约65.1 ps)的稳定三角形光脉冲串输出, 改变色散量并反向调节调制频率, 可改变脉冲的重复频率, 通过比较, 实验与理论预期基本符合, 验证了方案的可行性.

2 三角形光脉冲串产生的原理

三角形光脉冲串产生的原理结构如图1所示, 方案采用连续波(CW)激光器作为光源, 正/余弦本振输出的射频信号直接驱动马赫曾德调制器的射频输入端口, 此时, 只有一个射频输入说明此时调制器处于推挽模式下. 调制器偏置于最小传输点, 可实现光载波抑制调制, 考虑最佳调制深度 $m = 2.305$ 时, 输出光电场可表示为(暂不考虑调制器消光比的影响)^[17]

$$E_1(t) = \frac{E_0(t)}{8} \left\{ \exp \left[j \frac{V_{LO}}{2V_\pi} \sin \Omega t \right] - \exp \left[-j \frac{V_{LO}}{2V_\pi} \sin \Omega t \right] - \exp \left[-j \frac{V_{LO}}{2V_\pi} \sin \Omega t \right] + \exp \left[j \frac{V_{LO}}{2V_\pi} \sin \Omega t \right] \right\} = \frac{E_{in}(t)}{8} \sum_{n=-3}^3 a_n \exp(jn\Omega t), \quad (1)$$

其中 $E_0(t) = E_0 \exp(j\omega_0 t)$ 为激光器输出光场(E_0 和 ω_0 分别为幅度和角频率分量), $V_{LO}(t) = V_{LO} \sin \Omega t$ 为射频调制信号(V_{LO} 和 $\Omega = 2\pi f$ 分别

为幅度和角频率分量), 各阶光边带幅度加权系数

$$a_n = [2 - 2(-1)^n] J_n \left(\frac{V_{LO}}{2V_\pi} \right). \quad (2)$$

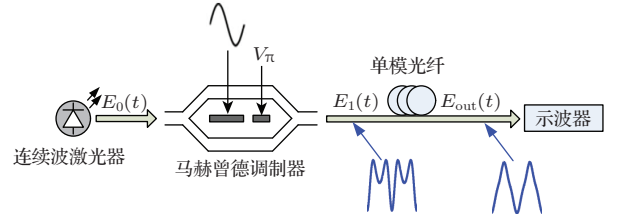


图1 三角形光脉冲串产生的原理结构

进一步考虑单模光纤色散的影响, 输出光场可以写为^[17]

$$E_2(t) \propto \sum_{n=-3}^3 a_n \exp \left(jn\Omega t + j \frac{1}{2} n^2 \beta_2 L \Omega^2 \right), \quad (3)$$

其中, $\beta_2 L$ 为光纤的色散量. 在此基础上求光强度的表达式, 可表示为^[17]

$$I(t) \propto \underbrace{\left[\frac{1}{2} a_0^2 + \sum_{n=1}^3 a_n^2 \right]}_{\text{Desired}} - \underbrace{\left[a_1^2 \cos(2\Omega t) + a_3^2 \cos(6\Omega t) \right]}_{\text{Undesired}} - 2a_1 a_3 \cos(4\beta_2 L \Omega^2) \cos(4\Omega t), \quad (4)$$

其中干扰项为四次谐波成分, 为了抑制它的影响, 色散量需控制在^[17](考虑调制器消光比后)

$$|\beta_2 L| = \frac{(2k+1)\pi}{8\Omega^2}, \quad k = 2, 5, 10, 13, 18 \dots \quad (5)$$

不考虑(4)式中的四次谐波成分后, 剩余的有效频率成分构成了三角形光脉冲串, 最佳调制系数条件($m = 2.305$)时, 可得 $\alpha_1^2 = 9\alpha_3^2$. 比较理想三角形光脉冲的傅里叶展开式为

$$T(t) = C + D \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cos[(2n-1)\omega t] = C + D \left(\cos \omega t + \frac{1}{9} \cos 3\omega t + \frac{1}{25} \cos 5\omega t + \dots \right), \quad (6)$$

此时(4)式实现了前三项的谐波拟合. 为进一步说明单模光纤接入前后, 光强度的变化情况, 图2(a), (b)所示为 $I(t)$ 的归一化时域波形, 比较图2(a)和(b), 二者变化明显, 原因是, 色散光纤接入前, 光强度中四次谐波成分存在, 破坏了整个时域特征, 而光纤接入后, 四次谐波被抑制掉, 因此, 光强度具有三角形特征.

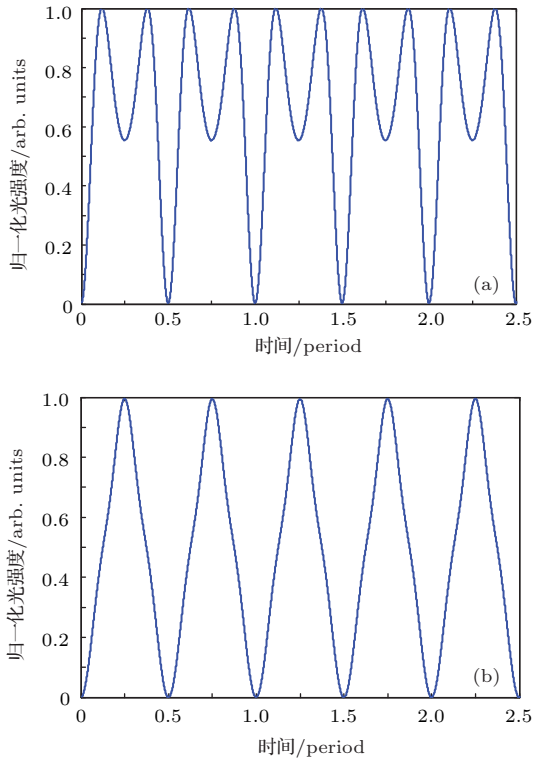


图2 (a) 单模光纤接入前 $I(t)$ 的归一化时域波形; (b) 单模光纤接入后 $I(t)$ 的归一化时域波形

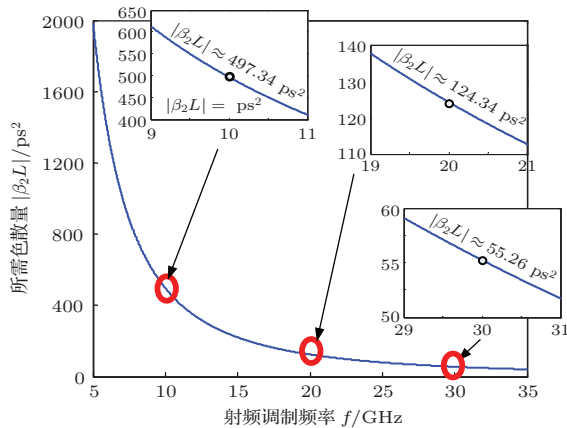


图3 所需色散量 $\beta_2 L$ 与射频调制频率 f 之间的关系图

进一步说明射频调制频率与色散量的关系(5)式, 以 $k = 0$ 为例, 图3所示为不同调制频率 f , 所需色散量 $\beta_2 L$ 的变化曲线, 由于方案对色散的正负没有要求, 因此图中色散量采用了绝对值的关系进行描述, 图中可以发现, 任意调制频率对一个色散量, 例如, 10 GHz 对应色散量约为 497.34 ps^2 , 20 GHz 和 30 GHz 分别对应 124.34 ps^2 和 55.26 ps^2 , 利用上述关系, 可以对所获得的三角形光脉冲串的重复频率进行调整. 除此之外, 从图3中可以发现, 对于较低频频段 ($f < 10 \text{ GHz}$), 方案对色散量 $\beta_2 L$ 的容忍度较高, 实际上所使用色散量的误差不会

影响方案的可行性, 但是缺点是, 所需色散量较高, 需要数十公里的单模光纤, 可以采用具有大色散量的啁啾光栅替代其作用. 对于较高频频段 ($f > 20 \text{ GHz}$), 方案对色散量 $\beta_2 L$ 的容忍度明显降低, 所需色散量需要精确到个位 (如图中 30 GHz 对应色散量 55.26 ps^2), 因此必须精确估量所采用色散材料的色散量, 优点是, 所需色散量很低, 仅需要几公里单模光纤即可, 当需要进行色散量精确调节时, 可以考虑适当调节光源中心波长, 从而实现对色散量的微量调节.

3 三角形光脉冲串产生的实验结构及测量结果

实验结构如图4所示, 可调谐激光器 (Agilent 8164A) 输出的光信号中心波长 1559.94 nm 、功率 8 dBm . 利用一个偏振控制器调节光信号的偏振态, 耦合进入光调制器 (Fujitsu FTM7962EP) 中, 实验中, 利用一个双平行马赫曾德调制器的其中一个子调制单元进行载波抑制调制, 而另外一个子调制器则不加载任何信号且偏置于最小偏置点, 此时, 整个双平行马赫曾德调制器可视为单个马赫曾德调制器, (调制器射频半波电压 $V_{\pi\text{RF}} = 3.5 \text{ V}$, 偏置半波电压 $V_{\pi\text{DC}} = 14 \text{ V}$, 消光比 $\epsilon_r = 22 \text{ dB}$). 电信号合成器 (Hewlett 83711B) 产生频率 9.862 GHz 的射频信号用以驱动调制器, 将调制器偏置于最小传输点, 此时输出信号为典型的载波抑制调制信号, 由光谱仪 (Ando AQ6317C) 测得调制器输出光谱如图5(a)所示, 中心载波基本上已经被抑制, 光谱中只保留了奇数阶光边带, 由于实验中集成电放大器过早达到增益饱和, 因此, 无法通过继续增大功率将调制系数提高到最佳值^[17], 如图5(a)所示, 其中 ± 1 阶与 ± 3 阶光边带功率差约为 17 dB , 对应调制系数 $m \approx 1.67$. 由于本方案最佳调制系数需达到 $m \approx 2.305$, 因此, 如图4所示, 实验利用一个可编程光滤波器 (Finisar 1000S) 对 ± 1 阶光边带进行适度衰减, 调整后的光谱如图5(b)所示, 此时, ± 1 阶与 ± 3 阶光边带功率差约为 9.5 dB , 对应调制系数 $m \approx 2.305$, 所使用的可编程光滤波器其插入损耗约 5 dB . 本实验中由于集成电放大器无法拆卸, 因此后续实验采用了可编程滤波器生成一个带阻滤波器对 ± 1 阶光边带功率进行了调整, 实际情况下, 直接提高电信号功率便可达到最佳调制系数 $m \approx 2.305$.

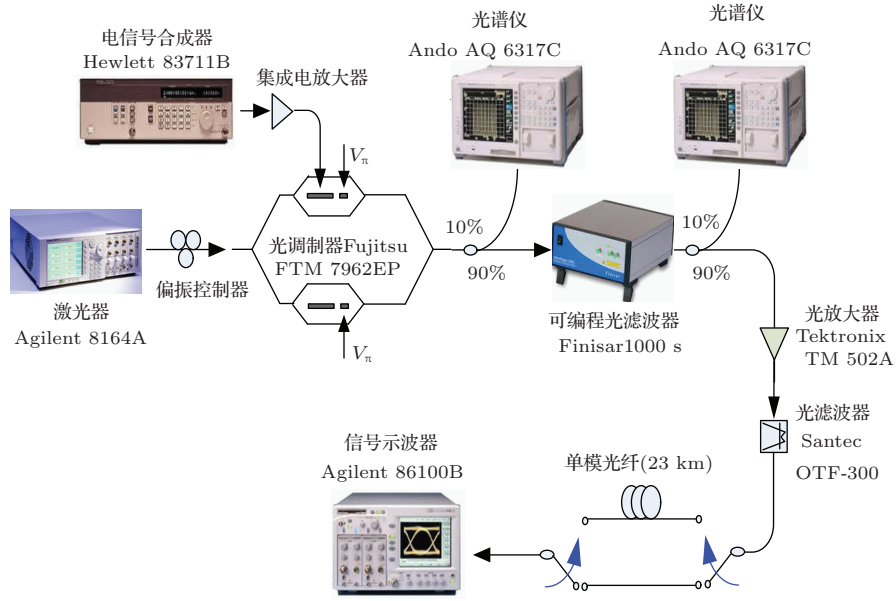


图4 实验结构图

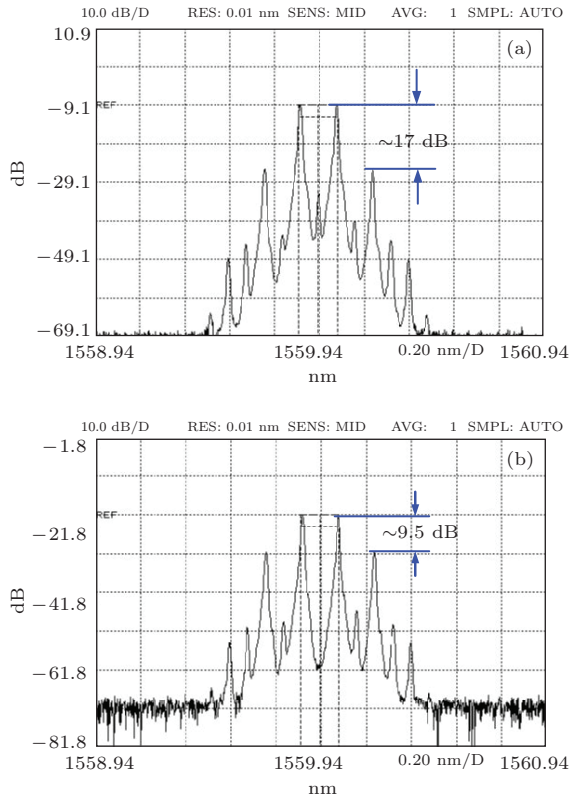


图5 测量光谱 (a) 滤波前; (b) 滤波后

随后, 光信号经功率可调的光放大器 (Tektronix TM502A) 放大后, 利用可调光滤波器 (Santec OTF-300) 可对自发辐射 ASE 噪声进行滤除。首先, 我们观测接入单模光纤之前的光强度 (用于连接的光纤跳线色散可忽略), 由信号示波器 (Agilent 86100B) 得到的周期性起伏的光强度如图 6 (a)

所示, 图中可得单个脉冲全宽约为 50.7 ps, 放大后的时域波形如图 6 (b) 所示, 比较理论值 (插图), 可以发现此时二者基本符合, 波形的误差在可以接受的范围。

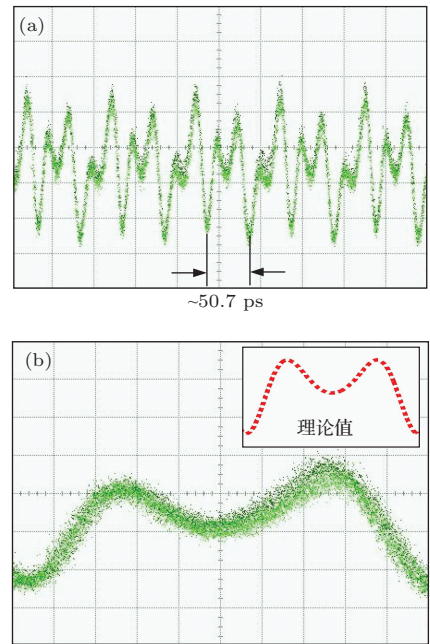


图6 单模光纤接入前测量的 (a) 光脉冲串及 (b) 放大后

接入 23 km 单模光纤 (1560 nm 处色散量 $\beta_2 L \approx -520 \text{ ps}^2$), 再次观察光脉冲串的时域波形, 得到如图 7 (a) 和 (b) 所示的结果, 得到了稳定输出的周期性三角形光脉冲串 (图 7 (a)), 单个光脉冲的全宽约 50.7 ps, 脉冲串重复频率 19.724 Gb/s,

图7(b)给出了4个三角形脉冲的时域波形,可以发现,实验结果与理论预期基本符合. 如果将实验所使用的参数 $f = 9.862$ GHz和 $\beta_2 L \approx -520$ ps²代入方案成立的条件(5)式,可以发现条件近似成立,同时也验证了方案在较低频段($f < 10$ GHz)对色散量容忍度较高的推论. 此外,从图7中可以发现,所获得的光脉冲没有直流基底,说明光脉冲的消光比较高.

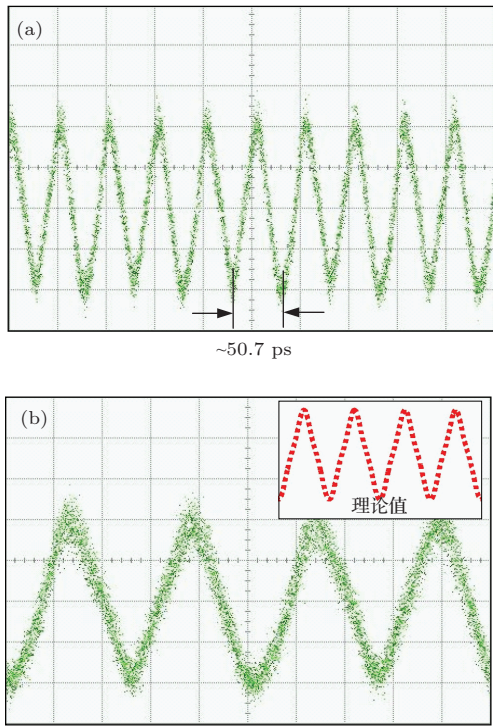


图7 单模光纤接入后测量的(a)光脉冲串及(b)放大后

进一步检验不同重复频率的三角形光脉冲串的生成,接入另一段单模光纤(1560 nm处色散量 $\beta_2 L \approx -850$ ps²),反向调节射频调制频率 f ,当 $f = 7.678$ GHz时,可得如图8(a), (b)所示的光脉冲串及部分放大后的时域波形,比较图7,可以发现,脉冲重复频率由原来的19.724 Gb/s下降为15.356 Gb/s,而单个脉冲的全宽由原来的约50.7 ps上升为65.1 ps.

利用上面的方法(进一步改变色散量并反向调节调制频率)可获得不同重复频率的三角形光脉冲串,除此之外,利用光纤光栅同样也能够获得与单模光纤相同的效果.

除此之外,采用本方案所获得的三角形光脉冲也具有稳定的输出能力,因为,从根本上来讲,本文所获得的是具有三角形包络的光波,依据(4)式也可以看到,组成本方案三角形包络的成分仅仅是

调制频率的二次(2Ω)及六次(6Ω)这两个频率的余弦信号叠加,而这两个频率的信号均来自于调制光边带的拍频,实验条件下保证调制系数和光纤色散量的固定,就可以保证脉冲的稳定输出,实验中,我们在30 min内所获得结果无明显区别.

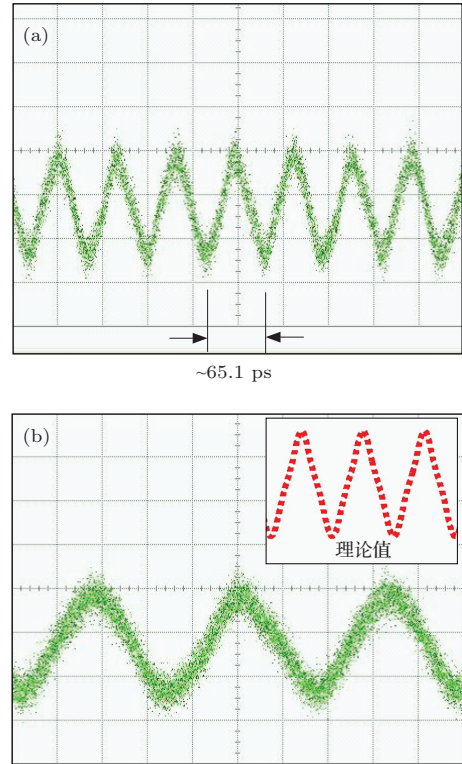


图8 不同单模光纤接入后测量的(a)光脉冲串及(b)放大后

4 结 论

本文实验研究了一种利用谐波拟合产生三角形光脉冲串的方法,方案以文献[17]中的物理模型为基础,实验采用固定光纤色散量,再反向调节射频调制频率的方法,得到了两种重复频率(19.724 Gb/s和15.356 Gb/s)光脉冲串的生成,通过比较,实验与理论预期基本符合,验证了该项技术的可行性. 本方案结构简单、性能稳定,且实现容易,结合可调谐色散及补偿技术,可广泛应用于全光信号处理. 本方案存在的问题也在于: 1) 脉冲重复频率的动态调谐能力不足,结合可调谐色散及补偿技术,将有助于解决这个问题; 2) 由于本方案所获得的是一系列强度周期性起伏的连续光信号,因此脉冲占空比不可调节且恒定为1,这一特征可应用于光时分复用到波分复用的全光变换[3]和脉冲的时域和频域拷贝[4]等应用中.

参考文献

- [1] Li J, Ning T, Pei L, Jian W, You H, Chen H, Zhang C, Li C 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 224210 (in Chinese) [李晶, 宁提纲, 裴丽, 简伟, 油海东, 陈宏尧, 张婵, 李超 2013 物理学报 **62** 224210]
- [2] Liu G, Pei L, Ning T, Gao S, Li J, Zhang Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 094205 (in Chinese) [刘观辉, 裴丽, 宁提纲, 高嵩, 李晶, 张义军 2012 物理学报 **61** 094205]
- [3] Pei L, Liu G, Ning T, Gao S, Li J, Zhang Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 064203 (in Chinese) [裴丽, 刘观辉, 宁提纲, 高嵩, 李晶, 张义军 2012 物理学报 **61** 064203]
- [4] Li J, Ning T, Pei L, Qi C 2010 *Chinese Optical Letter* **8** 138
- [5] Camerlingo A, Parmigiani F, Xian F, Poletti F, Horak P, Loh W H, Richardson D J, Petropoulos P 2010 *IEEE Photonics Technology Letters* **22** 628
- [6] Parmigiani F, Ibsen, Ng T T, L. Provost A, Petropoulos P, Richardson D J *Proceedings of the 2008 Optical Fiber Communication Conference (OFC'08)*, San Diego, CA, USA 2008, OMP3
- [7] Bhamber R S, Latkin A I, Boscolo S, Turitsyn S K *Proceedings of the 34th European Conference on Optical Communication (ECOC 2008)*, Brussels, Belgium, 2008, Th.1B.2
- [8] Latkin A I, Boscolo S, Bhamber R S, Turitsyn S K 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 1492
- [9] Latkin A I, Boscolo S, Bhamber R S, Turitsyn S K *Proceedings of the 34th European Conference on Optical Communication (ECOC 2008)*, Brussels, Belgium, 2008, Mo.3F.4
- [10] Parmigiani F, Petropoulos P, Ibsen M, Richardson D J 2006 *IEEE Photonics Technology Letters* **18** 829
- [11] Boscolo S, Latkin A I, Turitsyn S K 2008 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **44** 1196
- [12] Wang H, Latkin A I, Boscolo S, Harper P, Turitsyn S K 2010 *Journal of Optics* **12** 035205
- [13] Wang H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 124212 (in Chinese) [王华 2012 物理学报 **61** 124212]
- [14] Ye J, Yan L, Pan W, Luo B, Zou X, Yi S, Yao S 2011 *Opt. Lett.* **36** 1458
- [15] Dai B, Gao Z, Wang X, Kataoka N, Wada N 2011 *Electronics Letters* **47** 336
- [16] Dai B, Gao Z, Wang X, Chen H, Nobuyuki K, Wada N 2013 *Journal of Lightwave Technology* **31** 145
- [17] Li J, Zhang X, Hraimel B, Ning T, Pei L, Wu K 2012 *Journal of Lightwave Technology* **30** 1617
- [18] Liu H, Ren B, Feng J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 040501
- [19] Tian F, Zhang X, Weng X, Xi L, Zhang Y, Zhang W 2011 *Chin. Phys. B* **20** 080702

Experimental demonstration on triangular-shaped pulse train generation based on harmonic fitting*

Li Jing¹⁾ Ning Ti-Gang¹⁾ Pei Li^{1)†} Jian Wei¹⁾ Zheng Jing-Jing¹⁾ You Hai-Dong¹⁾²⁾
Sun Jian¹⁾ Wang Yi-Qun¹⁾ Li Chao¹⁾

1) (*Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

2) (*Science and Information College, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China*)

(Received 14 January 2014; revised manuscript received 12 March 2014)

Abstract

We demonstrate an approach for triangular-shaped pulse train generation experimentally based on harmonic fitting. The operation principle is that a Mach-Zehnder modulator is firstly employed to suppress modulation of the optical carrier. Thus a periodically variable lightwave can be obtained at the output. Then the signal is coupled into a section of dispersive fiber. Due to the dispersion-induced power fading, the undesired 4th order harmonics in the optical intensity can be fully removed. By adjusting modulation index to an optimum value ($m = 2.305$), the generated harmonics of the optical intensity can be made corresponding to the Fourier components of typical periodic triangular pulses. Finally, the triangular-shaped pulse train at a repetition rate two times of the driving frequency can be obtained. In the experiments, 19.724 Gb/s and 15.356 Gb/s triangular-shaped pulse trains are generated by using 9.862 GHz and 7.678 GHz driving signals respectively. Besides, the repetition rate can be switched to another value by using a different fiber dispersion ($\beta_2 L$). It is found that the experimental data agree well with theoretical results.

Keywords: optical communications, microwave photonic crystal, triangular-shaped pulse train

PACS: 42.79.Sz, 84.40.-x, 42.79.Hp

DOI: [10.7498/aps.63.154210](https://doi.org/10.7498/aps.63.154210)

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (Grant No. 2014JBM013).

† Corresponding author. E-mail: lipei@bjtu.edu.cn