

· 电路与控制 ·

面向全光信号处理的三角形光脉冲产生技术

袁 瑾, 宁提纲, 李月琴, 张鲁娜, 李 晶

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘 要: 三角形光脉冲在时域范围内具有前后沿恒定变化特性, 使得其在全光信息处理领域获得了广泛应用。主要针对目前国内外提出的两类三角形光脉冲产生方法: (1) 电光法; (2) 全光法, 简单介绍了几种具体的获得稳定三角形光脉冲串的方法, 从所产生三角形脉冲的重复频率、脉冲宽度以及系统稳定性、实验优缺点等方面进行分类比较, 并重点介绍了一种利用连续波光调制结合色散所致功率衰落的脉冲生成方法。

关键词: 全光信号处理; 三角形光脉冲; 可调谐性

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-05-0060-05

Triangular Light Pulse Generation Technology for All-optical Signal Processing

YUAN Jin, NING Ti-gang, LI Yue-qin, ZHANG Lu-na, LI Jing

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

Abstract: Triangular optical pulse is widely used in all-optical information processing for linear upping and falling edges in time domain. According to two methods, such as electro-optical and all-optical method of triangular pulse generation in China and foreign countries, the detailed methods of obtaining stable triangular optical pulse train are introduced briefly. The repetition frequency and pulse width of the generated triangular pulse, system stability and the advantages and disadvantages of the experiment are compared classifiably. And a pulse generation method resulting power fading using continuous wave modulation with dispersion is introduced.

Key words: all-optical signal processing; triangular optical pulse; tunability

随着社会的发展和科技的进步, 大容量甚至超容量的数据业务不断出现, 传统电光信号处理技术的网络复杂性、处理速率低、消耗严重等缺点凸显, 而全光信号处理的复杂程度和耗能程度远不及电光处理技术, 且不存在光电转换的障碍, 可以从根本上解决传统电光信号处理中“电子瓶颈”的问题。三角形光脉冲是一种前后沿恒定变化的特殊脉冲形式, 这一特殊时域特性使其在全光信号处理中发挥独特的作用。例如: OFC'08 会议上提出利用 XPM

效应, 对称三角形光脉冲为泵浦可实现信号光高效全光波长转换^[1]; ECOC'08 会议上提出利用对称三角形光脉冲, 实现光时分复用信号到波分复用信号的全光变换^[2]以及用于进行脉冲压缩、信号再生^[3]; 期刊^[4]报到了结合 XPM 和非线性克尔效应, 对称三角形光脉冲为泵浦还可用于光脉冲信号的时域和频域同时拷贝。可见, 三角形光脉冲在全光信息处理技术中扮演着重要的角色, 研究低成本获得稳定输出的光脉冲将具有非常重要的学术价值。

收稿日期: 2014-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61177069)资助课题

作者简介: 袁瑾(1990-), 山西忻州人, 硕士研究生, 主要研究方向为微波光子器件、RoF 等。

1 全光法产生三角形光脉冲串方案

1.1 三角形光脉冲在正色散光纤中的产生

2011年,王华提出利用一种无源非线性脉冲整形方法,实现了在普通正色散(ND)光纤中产生三角形光脉冲^[5]。如图1所示。实验采用锁模光纤激光器(MLFL)作为脉冲光源。对锁模光纤激光器施加由码型发生器(PPG)产生的电脉冲序列,使脉冲重复频率降低。脉冲在光纤中传输,群速度色散将导致脉冲具有一定的线性啁啾。带有预啁啾的光脉冲经过EDFA放大后输入到ND光纤中以实现光脉冲的整形,形成三角形光脉冲。实验测得不同预啁啾光纤长度下,所得最优化的三角形脉冲的时域形状,并给出三角形拟合脉冲。这种产生三角形脉冲的方法简单有效,有望在全光信号处理及高速光通信系统中重要应用。

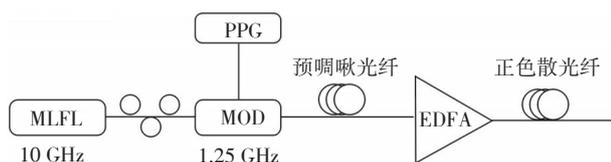


图1 三角形脉冲产生装置图^[5]

1.2 基于频率-时域变换生成三角形光脉冲

2011年,Jia Ye等人提出一种基于频率-时间变换的全光法来生成周期性三角脉冲的方法^[6]。如图2a所示,由锁模激光(MLL)产生的光脉冲作为光源发送到调制器来调节脉冲重复频率。利用一个基于偏振干涉的频谱整形器来过滤宽带超短脉冲序列的光谱,从而获得光学三角形频谱。图2b中,整形器是由两个串联的正弦滤波器模块和带宽可调光滤波器组成的,其工作方式类似于一个基于偏振的干涉仪。在本实验中,所产生的超短脉冲序列被发送到电光马赫-曾德调制器,调制器产生的脉冲串被发送到的频谱整形器。实验证明此三角形脉冲的产生方法是可行的,且三角形脉冲发生器具有可调谐性。

2 电光法产生三角形光脉冲串方案

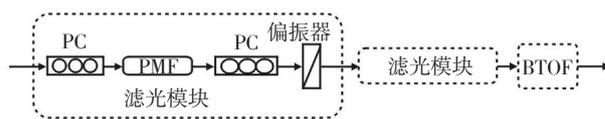
2.1 Sagnac环采用偏振调制器方案

2013年,W Liu等人提出一种新方法^[7],在Sa-

gnac环的单偏振调制器(PolM)中使用正弦信号去调制光脉冲来实现。图3中,从TLS发出的线性极化连续光波通过PC1和PBS发送到Sagnac回路。由于速度不匹配,只有顺时针光波能被偏振调制器中的正弦微波信号有效地调制而逆时针光波不被调制。沿顺时针方向,偶数阶边带被抑制。利用光学带通滤波器消除负阶边带,并把包含光载波的正阶边带输入到光电探测器,就会生成了重复率与参考微波信号频率相同的三角波形。该系统可生成有很大调谐范围的重复率可调三角波,且由于Sagnac回路的使用,系统稳定性得以保证。



(a)三角形脉冲产生装置图^[5]



(b)频谱整形器结构图^[6]

图2 基于频率-时间变换的全光法生成周期性三角脉冲

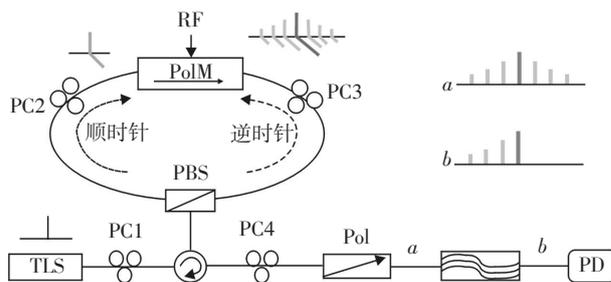


图3 三角波形发生器的原理图^[7]

随后,Weilin Lin等人又进一步研究,在新的实验中提出了三角波形产生的一个详细的理论和实验研究^[8]。并且通过操纵系统参数,如输入的RF功率电平,系统中的不同位置的偏振状态,发电机可以重新配置,以产生锯齿波等其他类型的微波波形。

2.2 基于DPMZM的三角光脉冲产生方法

2013年,F Zhang等人提出了一种新的方法来产生三角波脉冲^[9],即利用由单一频率射频信号驱动的双平行马赫-曾德尔调制器来产生三角脉冲。如图4所示。激光二极管产生的CW光被发送到一个无啁啾DPMZM。矢量信号发生器产生的RF信号

由一个 90° 的宽带电混合耦合器分成两部分,然后引入到DPMZM的两个RF输入端口。由于MZM1和MZM2工作在无啁啾状态且两个射频信号具有 90° 的相位差,偶次谐波将被抑制。通过适当地设定偏置电压,并对DPMZM的RF信号选择适当的功率,光强度的第一和第三阶谐波构成周期性三角波脉冲串的频谱,即产生三角形脉冲。实验证明,三角形脉冲序列的重复频率可以通过调整RF的频率来改变。在该方案中,不需要光学滤波或色散元件,这显然会使系统简化。

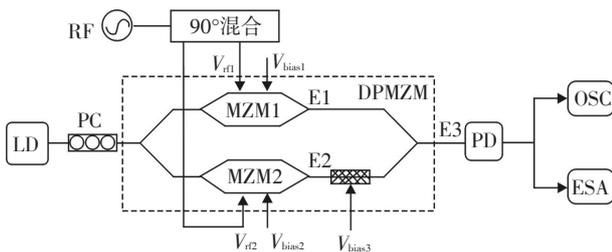


图4 三角脉冲发生器的实验装置^[9]

2.3 改进的基于DPMZM的三角光脉冲产生方法

2014年,W Li等人提出一个基于DPMZM的不同方案^[10],不仅可以得到三角波形,还可以得到其他波形。其原理图如图5所示。在方案2.2中,用了一个与 90° 的电混合耦合器相结合的DPMZM,不能够产生其他类型的射频波形。此外,该方案中的正弦RF信号仅驱动到DPMZM的子MZM中的一个,而另一个子MZM没有驱动信号。

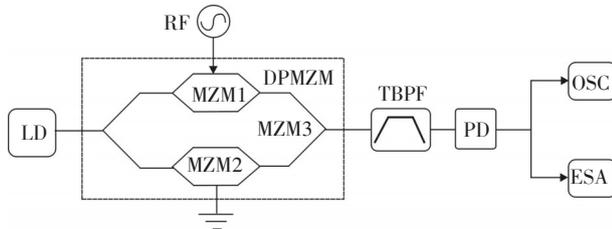


图5 三角波形发生器原理图^[10]

如图5所示,从LD发出的光载波被耦合到DPMZM上。DPMZM的MZM1由正弦射频信号驱动。偶次和奇次光边带的功率可以通过分别调整MZM1的偏置电压来控制。可调带通滤波器(TBPB)用来消除所有的负边带(或正边带)。经过光学探测器,检测到具有可控谐波的RF信号,可以通过分别操纵其谐波来产生一个具有完整占空比的所需射频波

形。正弦RF信号施加到DPMZM的子MZM上,通过实验生成一个三角波形,且所得光信号由一个光载波和一系列边带组成,偶次边带被抑制。此外,实验还证明所提到的RF波形产生器的频率具有可调谐性。由于最多只能控制至三阶射频谐波的功率,所以仅能得到所需信号波形的近似值,这降低了这种产生任意波形方法的灵活性。

2.4 基于光载波抑制调制和光纤色散效应的实现方案

2013年,J Li等人提出了基于连续光射频调制的周期性三角形光脉冲光子发生器^[11],利用了光纤色散所导致的射频功率衰落效应,实现了光强度表达式向三角形傅里叶级数的有效逼近,并最终获得了稳定的周期性三角形光脉冲。

如图6所示,该方案采用连续波(CW)激光器作为光源,并引入一个 180° 混合耦合器。正/余弦本振输出的射频信号首先经过混合耦合器的 180° 电桥实现相位反转,然后驱动DD-MZM的两个射频输入端口。调制器偏置于最小传输点(MITP),可实现光载波抑制调制。该方案利用的是单模光纤传输,会有色散的影响。通过控制色散量,可以抑制四次谐波成分,剩余的有效频率成分构成了三角形光脉冲串。

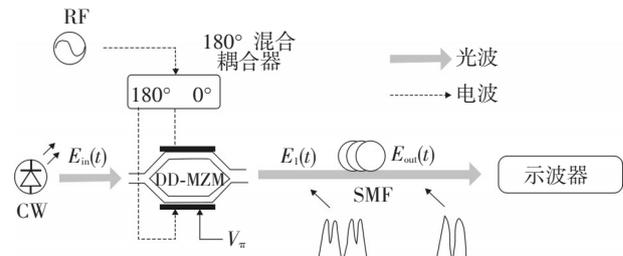


图6 基于DD-MZM光载波抑制调制和光纤色散效应实现方案原理图^[11]

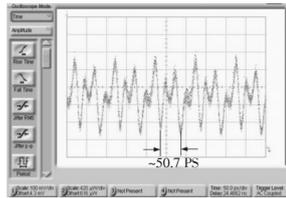
光强度可表示为^[11]

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

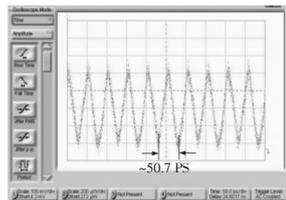
理想对称三角形光脉冲的傅里叶展开式如(2),通过对比,式(1)实现前两项的谐波拟合^[11]。

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

实验对接入单模光纤前后光强度进行了测量,实验结果如图7所示^[11]。



(a)单模光纤接入前测量的光脉冲串



(b)单模光纤接入后测量的光脉冲串^[11]

图7 接入单模光纤前后光强度测量结果^[11]

实验进一步检验了不同重复频率的三角形光脉冲串的生成,测量接入另一段单模光纤后所生成的光脉冲串,可以发现脉冲重复频率下降,而单个脉冲的全宽变宽。利用此方法(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。

3 三角脉冲生成方法的比较

在文中提到的方案中,前两种方案(方案1.1和方案1.2)属于全光法。全光脉冲整形是目前获得对称三角形光脉冲所采用的最常用最直接的方法,但是由于这类方法采用脉冲激光为光源,通常会存在脉冲锁模频率相对固定、调谐灵活性欠佳以及实现成本较高的问题。全光法也有其优势,如高带宽,抗电磁干扰能力和可重构性。表1对文中提到的两种全光法方案作了对比。

其余几种方案属于电光法。由于采用连续激光作为光源,可以从根本上降低光脉冲产生的成本。调谐方式更灵活,实现成本更低廉。表2对文中提到的几类电光法作了简单对比。

表1 两种全光法方案对比结果

	方案1.1	方案1.2
优点	①脉冲啁啾较大时,光纤长度有较大的选择自由度,更易获得三角形光脉冲; ②结构简单、易操作、不需任何复杂元件或特殊器件的设计。	①对光学相位不敏感,更适合于微波信号的产生; ②结构较为简单,不需要复杂元件。
缺点	①接入的光纤的参数不能再调节,方法灵活性差; ②脉冲整形过程受光纤参量影响大,须严格控制; ③所需的色散和非线性在实际应用中是很难操作。	①光纤滤波器产生的波形大多局限于正弦脉冲包络线; ②频率-时间映射的参数精度较差; ③光纤长度的选择范围较小,系统不够灵活。

表2 几种电光法方案对比结果

	方案2.1	方案2.2,方案2.3	方案2.4
脉冲重复频率的调谐能力	较好的重复率调谐能力	产生的RF波形的重复速率被限制,但仍可产生高速射频频信号波形	脉冲重复频率的动态调谐能力不足
脉冲占空比	产生具有完整占空比的波形	产生一个具有完整占空比的射频波形	脉冲占空比不可调节且恒定为1
系统稳定性	SBS效应对环境波动敏感,造成系统不稳定	使用DPMZM的紧凑结构,使系统稳定	方案具有极强的稳定性
系统应用	只能生成三角波光脉冲,器件成本低,倍频效率高	改进后可生成任意波形,但产生任意波形方法的灵活性差	只能生成三角波光脉冲,方法简单、成本低
系统结构	结构简单,但系统性能较差	方案除调制器外不需要其他光学滤波或色散元件,导致系统简化	需要其他光学装置,增加了系统的复杂性

4 结论

从光源选择的角度,将三角形光脉冲生成方法

分为全光法和电光法。文中提到的六种方案为较成熟的全光信息处理领域的三角形光脉冲生成方法,分别对发生器的工作原理、参数影响和结果讨论等

不同方面进行了分析。但研究仅仅局限于光脉冲的产生机制研究,有很多关键技术还有待解决,比如稳定性、调谐能力等。希望能够在上述成果的基础上,通过进一步的数值分析和仿真验证,提出可行的三角形光脉冲稳定输出的条件,简化调谐过程并进一步拓展三角形光脉冲的调谐范围,获得较为理想的三角形光脉冲输出。三角形光脉冲由于其特殊的时域形状,在全光信息处理技术中扮演着越来越重要的角色,也引起了业内广泛的关注。因此,稳定可靠、低成本的三角形光脉冲发生器具有进一步研究的价值。

参考文献

- [1] Parmigiani F, Ibsen M, Ng T T, et al. Efficient optical wavelength conversion using triangular pulses generated using a superstructured fiber bragg grating. 2008 Optical Fiber Communication Conference[C]// San Diego, CA, USA, 2008.
 - [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. The 34th European Conference on Optical Communication (ECOC 2008) [C]// Brussels, Belgium, 2008.
 - [3] Latkin A I, Boscolo S, Bhamber R S, et al. Optical frequency conversion, pulse compression and signal copying using triangular pulses. The 34th European Conference on Optical Communication (ECOC 2008) [C]// Brussels, Belgium, 2008.
 - [4] Latkin A I, Boscolo S, Bhamber R S, et al. Turitsyn doubling of optical signals using triangular pulses[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 2009,126:1492-1496.
 - [5] 王华. 三角形光脉冲在正色散光纤中产生的实验研究[J].物理学报,2012,61(12):124-212.
 - [6] YE Jia, YAN Lian-shan, PAN Wei, et al. Photonic generation of triangular-shaped pulses based on frequency-to-time conversion[J]. Opt. Lett., 2011, 36(8): 1458-1460.
 - [7] Liu W, Gao L, Yao J P. Photonic generation of triangular waveforms based on a polarization modulator in a Sagnac loop. 2013 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2013) [C]//Alexandria, Virginia, USA, 2013:28-31.
 - [8] Liu W, Yao J. Photonic generation of microwave waveforms based on a polarization modulator in a Sagnac loop [J]. J. Lightw. Technol., 2014,31:1636-1644.
 - [9] Zhang F, Ge X, Pan S. Triangular pulse generation using a dual-parallel Mach-Zehnder modulator driven by a single-frequency radio frequency signal[J]. Opt. Lett.,2013,38(2): 4491-4493.
 - [10] Li W, Wang W, Zhu N. Photonic generation of radio-frequency waveforms based on dual-parallel mach-zehnder modulator[J]. J. Lightw. Technol., 2014,6(3).
 - [11] 李晶,宁提纲,裴丽. 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):154-215.
-
- (上接第46页)
- 技导报,2009(19):24.
 - [7] 赵振刚,吕建平. 单目红外目标跟踪机器人视觉系统设计[J]. 光电技术与应用,2008(11):48-53.
 - [8] Rafael C, Gonzalez, Richard E Woods. Digital Image Processing[M]. 北京:电子工业出版社,2011.
 - [9] 陈兴美,严壮志. 基于FPGA的红外光斑中心实时检测[J]. 红外与激光工程,2005(4):401-405.
 - [10] 刘舟平,张磊,郭晓亮,等. 提高红外光斑图像跟踪定位精度的新方法[J]. 中国激光,2010(1):186-189.
 - [11] 张新明,党留群,徐久成. 基于十字滑动窗口的快速自适应图像中值滤波[J]. 计算机工程与应用,2007,43(27):37-43.
 - [12] 徐正光,鲍东来,张利欣. 基于递归的二值图像连通域像素标记算法[J]. 计算机工程,2006,32(24):186-188.
 - [13] Chang F, Chen C, Lu C. A liner-time component-labeling algorithm using contour tracing technique[J]. Computer Vision and Image Understanding,2004, 93(2):317-327.
 - [14] 刘学东,贾玉林. 相关算法中跟踪稳定性问题的研究[J]. 红外与激光工程,1998,27(1):13-14.
 - [15] 张宇. 步进电机驱动噪音的消除方法[J]. 火控雷达技术,2000,29:25-27.