

三角形光脉冲在正色散光纤中产生的实验研究

王华[†]

(江西省电力公司信息通信中心, 南昌 330077)

(2011年7月18日收到; 2011年11月10日收到修改稿)

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, 此方法依赖于脉冲预啁啾和脉冲在 ND 光纤中传输时群速度色散与自相位调制的相互作用. 实验研究表明, 在较宽的脉冲预啁啾值范围内, 通过优化脉冲输入功率和脉冲传输的 ND 光纤长度, 均可得到典型的三角形光脉冲: 脉冲时域形状前后沿的变化率接近恒定、整个脉冲具有线性频率啁啾. 另外, 在不同的脉冲预啁啾下, 要得到高质量的三角形光脉冲, 均需要较高的脉冲输入功率; 并且脉冲预啁啾较大时, 三角形脉冲的形成对 ND 光纤长度和脉冲输入功率有较大的容差, 易获得三角形光脉冲.

关键词: 三角形光脉冲, 正色散光纤, 非线性, 预啁啾

PACS: 42.65.-k, 42.65.Re, 42.79.Sz, 42.81.-i

1 引言

高速发展的全光通信网络促使全光信号处理技术成为通信中的研究热点之一. 在超大容量、超高速率和超长距离的光传输网络中, 光网络节点处需要相匹配的高速全光处理技术来处理相应的数据信息, 目前涉及到的全光波长转换、全光缓存及光时分复用中的全光解复用等光信号处理技术引起了人们的广泛关注^[1-4]. 近来, 高重复频率的具有特殊时域形状的超短光脉冲的产生及其在全光信号处理中的应用得到了深入研究, 比如抛物型脉冲、矩形脉冲和三角形脉冲等^[4-8]. 其中, 三角形光脉冲在全光波长转换、全光分插复用、全光时分复用—波分复用的信号转换等应用中显示出比传统的高斯脉冲或双曲正割脉冲明显的优势^[9-12], 是一种极具吸引力的特殊脉冲形状. 三角形光脉冲的强度前后沿均为变化率恒定的直线, 具有一定功率的脉冲在光纤中传输时, 由自相位调制 (SPM) 或交叉相位调制 (XPM) 在脉冲前后沿附近引起的频率啁啾将分别为一常数^[13]; 也就是说, SPM 或 XPM 只导致产生两个恒定的频率移动, 不产生其他频率分量, 可有效实现脉冲能量向两个新

频率处的转移, 实现波长转换, 具有高转换效率、高消光比、高速率等优点. 正是基于此特点三角形光脉冲在全光信号处理中具有重要的应用前景.

由于三角形光脉冲的时域形状特殊, 研究产生三角形光脉冲的脉冲整形方法成为关键. 目前, 将传统的高斯形或双曲正割形脉冲转变成三角形脉冲的多种脉冲整形方法陆续被报道. Petropoulos 等利用超结构光纤布拉格光栅作为滤波器来控制脉冲的相位和振幅, 以实现脉冲形状从高斯形到三角形的转变^[4,8,9], 虽然能得到高质量的三角形光脉冲, 但此方法灵活性较差, 光栅一旦制作出来, 其参数不能再调节, 一个光栅结构只能用于具有特定参数的输入脉冲的整形; 为提高灵活性, Park 等提出了时域相干合成的脉冲整形方法^[14], 此方法利用多臂干涉仪或级联的双臂干涉仪将一系列具有不同时间延迟的输入脉冲复本相干叠加, 可实现变换极限的三角形光脉冲, 通过调节干涉仪不同臂之间的相对时间延迟可适用于不同的输入脉冲, 但是此方法结构较复杂, 同时对输入脉冲复本的相对时间延迟需要严格控制, 增加了操作难度. 近期, 阿斯顿大学的光子学教研组提出一种新颖的无源非线性脉冲整形方法^[15,16], 此方法依赖于脉冲的预啁啾和脉冲在正色散 (ND) 光纤中传输的共同作用. 脉

[†] E-mail: wzh_hf@163.com

冲传输过程中, ND 光纤中的 SPM 效应和群速度色散 (GVD) 相互作用将导致多种不同的脉冲整形过程, 通过调节脉冲的预啁啾值和输入光纤的脉冲功率即可实现抛物脉冲、矩形脉冲和三角形脉冲的产生^[16]; 当脉冲的预啁啾参量 C 为正时 (iCt^2 定义为脉冲相位), 可得到三角形光脉冲. 此脉冲整形方法结构简单、易操作、不需任何复杂元件或特殊器件的设计, 比以往报道的方法有明显优势. 研究组对其进行了理论分析和初步的实验验证^[17,18], 理论发现光纤参量和脉冲的多个特性参数对脉冲整形过程有显著影响, 因此有必要开展深入的实验研究, 探讨不同参量对产生三角形脉冲的影响, 优化参数以实现高质量三角形脉冲.

本文采用此无源非线性脉冲整形方法, 实验研究了三角形光脉冲在普通 ND 光纤中的产生. 脉冲特性测量采用基于二次谐波产生的频率分辨光开关法 (SHG-FROG). 在较宽的脉冲预啁啾值范围内, 分析了脉冲输入功率和脉冲传输的 ND 光纤长度对产生三角形光脉冲的影响, 同时讨论了三角形脉冲的产生对 ND 光纤长度和输入脉冲功率的容差. 研究发现, 在不同的脉冲预啁啾下, 脉冲输入功率较高时才能得到高质量的三角形光脉冲; 且脉冲预啁啾较大时, 三角形脉冲的形成对 ND 光纤长度和输入脉冲功率的容差较大, 易得到三角形脉冲输出.

2 实验装置

产生三角形脉冲的实验装置如图 1 所示. 所用

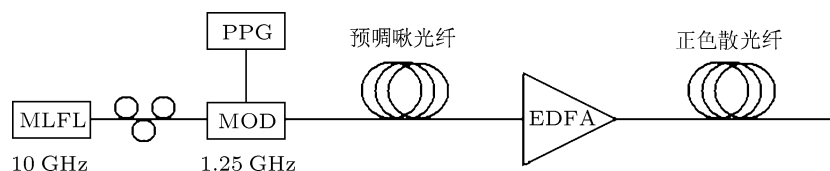


图 1 三角形脉冲产生的实验装置图

实验中利用 SHG-FROG 测量脉冲特性, 所得的 SHG-FROG 频谱图包含了较全面的脉冲特性信息, 通过处理 SHG-FROG 频谱图可恢复出脉冲的强度和频率啁啾^[19]; 另一方面脉冲强度和频率啁啾与 SHG-FROG 频谱图一一对应, 若测量两个脉冲得到相同的频谱图, 则可清晰表明两个脉冲具有相同的时域形状和频率啁啾. 脉冲的光谱图采用光谱分析仪直接测量, 光谱仪最小分辨率带宽 0.08 nm, 最

脉冲光源为 Pritel 公司的锁模光纤激光器 (MLFL), 输出脉冲为变换极限的双曲正割形脉冲, 脉冲序列重复频率 10 GHz, 中心波长 1550.2 nm, 脉宽 FWHM 为 2.8 ps. 为了利用实验现有掺铒光纤放大器 (EDFA) 较低的平均输出功率就可实现相对较高的脉冲峰值功率, 对锁模光纤激光器施加 1.25 GHz 的电脉冲序列 (由码型发生器 (PPG) 产生), 使脉冲重复频率从 10 GHz 降到 1.25 GHz.

脉冲的预啁啾器件通过一段预啁啾光纤 (pre-chirping fiber) 实现. 具有较低峰值功率的脉冲在一段光纤中传输, 光纤中的 GVD 将导致脉冲具有一定的线性啁啾^[13]. 系统中预啁啾光纤采用普通单模光纤 SMF-28, 在 1550.2 nm 处, 光纤色散参量 $D' = 16.3 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, 则二阶色散 $\beta_2' = -20.7 \text{ ps}^2/\text{km}$, 这使得脉冲预啁啾参量 $C = -\beta_2' L' / 2T_0^2 > 0$ (iCt^2 定义为脉冲相位), 其中 L' 为预啁啾光纤长度, T_0 为初始脉冲时域宽度. 通过改变预啁啾光纤的长度可控制参量 C 的大小. 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. 实验中采用 “TrueWave” 光纤作为 ND 光纤, 在 1550.2 nm 处, 光纤的色散参量 $D = -3.1 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, 非线性系数 $\gamma = 2.5 \text{ (W}\cdot\text{km)}^{-1}$, 色散斜率 $dD/d\lambda = 0.0669 \text{ ps}/(\text{nm}^2\cdot\text{km})$. 所用 EDFA 的最大输出功率为 18.0 dBm, 为使带有一定啁啾的脉冲在 ND 光纤中传输时产生 SPM 效应, 脉冲的输入平均功率需大于 11.0 dBm, 对应峰值功率大于 1.0 W.

高灵敏度为 -90dBm, 测量光谱范围 600—1700 nm.

3 实验结果与分析

实验中通过改变预啁啾光纤的长度来改变脉冲预啁啾值. 在输入脉冲峰值功率较高时, 对于不同的脉冲预啁啾值, 必须优化 ND 光纤长度才能得到质量较高的三角形光脉冲. 图 2 给

出了预啾啱光纤长度 L' 分别为 (a) 245 m, (b) 490 m, (c) 735 m 和 (d) 1049 m 时所得最优化的三角形脉冲的时域形状、频率啾啱、光谱图和 SHG-FROG 频谱图, 对应的最佳 ND 光纤长

度 L 分别为 (a) 1.4 km, (b) 2.9 km, (c) 4.4 km 和 (d) 5.8 km, 输入脉冲平均功率均为 15.6 dBm. 为便于比较, 图中同时给出了对应的三角形拟合脉冲(虚线).

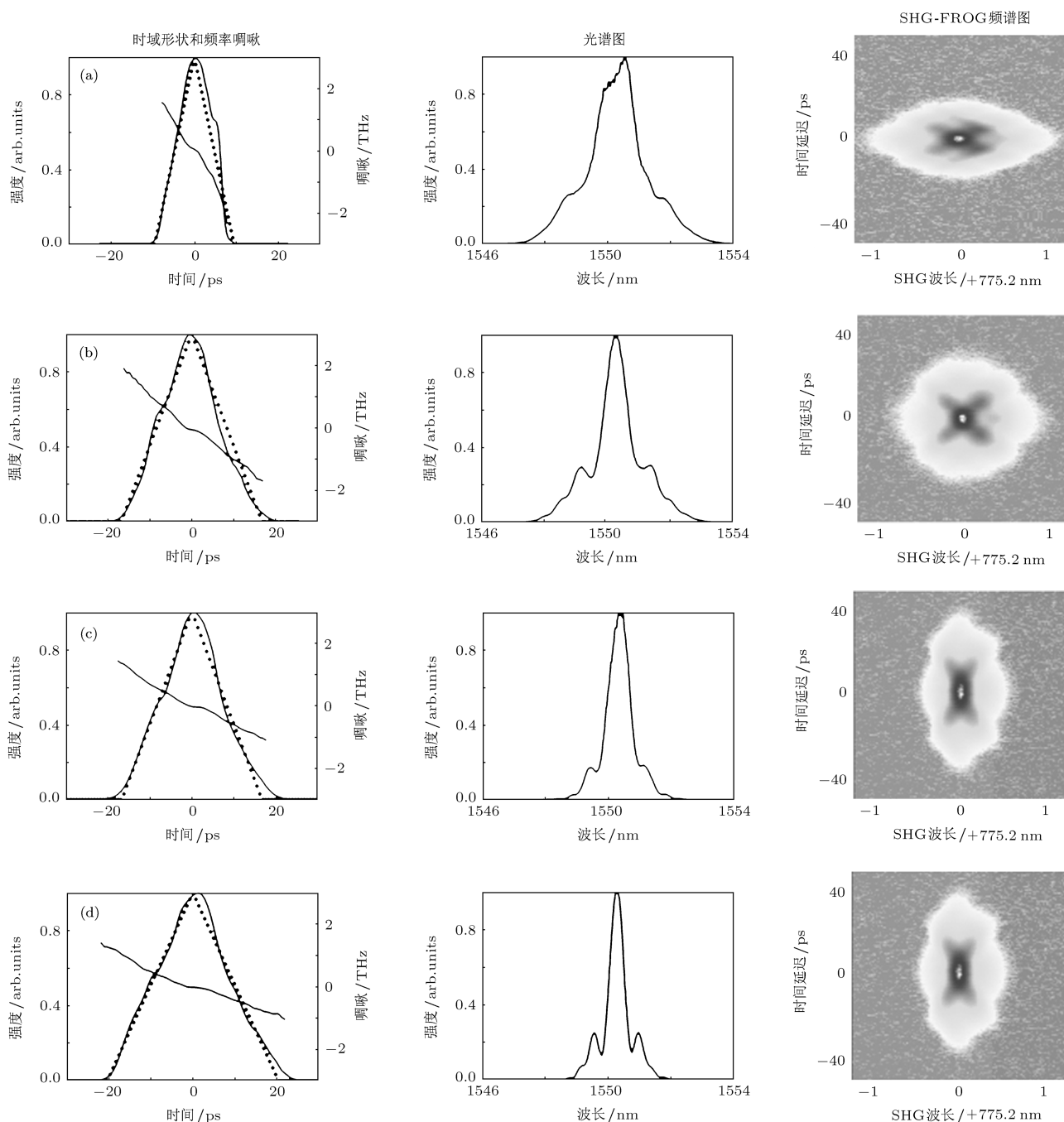


图 2 从 ND 光纤输出脉冲的时域形状、频率啾啱、光谱图和 SHG-FROG 频谱图, 对应 L' 和 L 分别为 (a) 245 m 和 1.4 km, (b) 490 m 和 2.9 km, (c) 735 m 和 4.4 km, (d) 1049 m 和 5.8 km, 输入平均功率 15.6 dBm

从图中可看出, 在较宽的脉冲预啾啱值范围内, 通过优化 ND 光纤长度, 均得到了质量较高的三角形光脉冲. 脉冲时域形状的上升沿和下降沿的斜率

接近恒定, 整个脉冲具有线性频率啾啱, 光谱中有两个旁瓣突起; 这些正是典型的三角形光脉冲所具有的特性. 同时所得脉冲的 SHG-FROG 频谱图与

文献 [18] 中的理论计算三角形脉冲的频谱图定量相符, 也充分证明所得脉冲时域形状接近理想的三角形.

产生三角形脉冲所需的最佳 ND 光纤长度 L 随脉冲预啁啾的增加而逐渐增长, 同时所得三角形脉冲的宽度也逐渐变宽, 这主要是由脉冲的预啁啾、光纤中的 SPM 效应和 GVD 相互作用决定的. 脉冲在光纤中传输时, GVD 和 SPM 效应将引入非线性的复合频率啁啾, 这使得脉冲的不同部分以不同的速度传输, 特别是在正常色散 ($\beta_2 > 0$) 下, 脉冲前沿附近的红移光传输较快, 超越前尾部的非红移光, 脉冲后沿附近的蓝移光则慢于后尾部的非蓝移光, 这导致脉冲宽度逐渐变宽, 同时时域形状发生明显变化; 另一方面不同的脉冲预啁啾的加入将使脉冲形状的演化截

然不同, 正的脉冲预啁啾与 SPM 所致啁啾的叠加可使脉冲形状趋于三角形 [13,16], 脉冲预啁啾越大, 就需要越长的 ND 光纤来增强 SPM 所致啁啾, 以实现两啁啾的叠加从而得到三角形光脉冲的输出.

另外实验发现, 三角形脉冲的形成对 ND 光纤长度 L 具有一定的容差, 此容差受到脉冲预啁啾的影响. 图 3 给出了预啁啾光纤长度 L' 分别为 245 m, 490 m, 735 m 和 1049 m 时, 经过不同长度的 ND 光纤 L 后所得脉冲的时域形状. 图中每一排具有相同的预啁啾光纤长度 L' , 中间一列对应最佳 ND 光纤长度 (与图 2 中相同), 脉冲为高质量的三角形光脉冲; 两侧脉冲对应的 ND 光纤长度相对最佳长度增加或缩短 0.4 km; 输入脉冲平均功率均固定在 15.6 dBm.

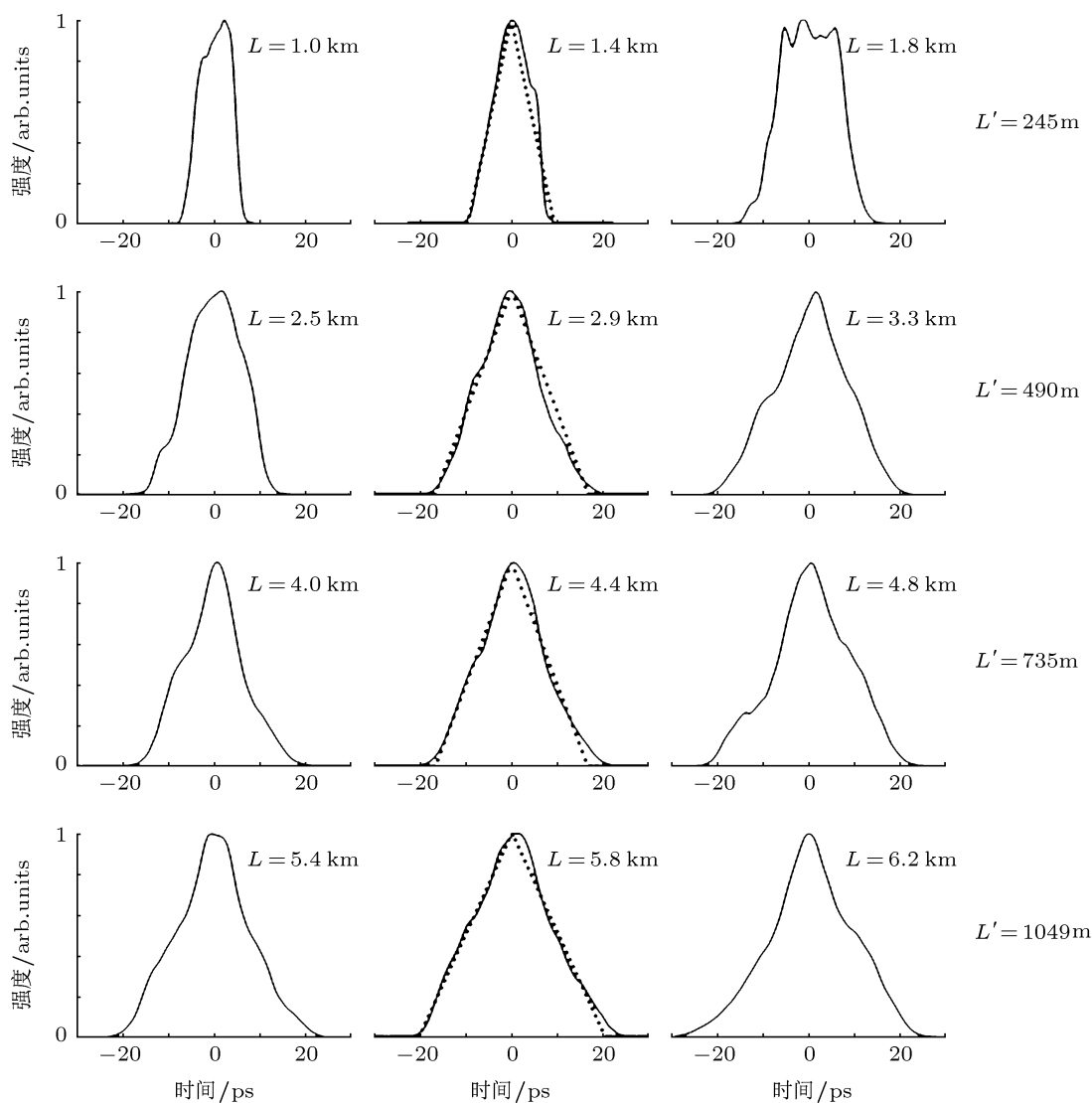


图 3 不同 ND 光纤长度后所得脉冲的时域形状, 每一排对应的 $L' = 245$ m, 490 m, 735 m 和 1049 m

从图中可看出, 在不同脉冲预啾啾下, 三角形脉冲的产生对 ND 光纤长度的容差明显不同. 当 ND 光纤长度相对最佳长度在 ± 0.4 km 范围上变化时, 对于较小的脉冲预啾啾 (L' 较短), 输出脉冲形状将明显偏离三角形, 若要得到较好的三角形脉冲, 实验显示 ND 光纤长度只有 ± 0.1 km 的变化容差; 而当脉冲预啾啾值较大 (L' 增长) 时, ND 光纤长度变化 ± 0.4 km, 所得脉冲形状也有部分失真, 但脉冲至少有一个脉冲沿儿的斜率保持恒定, 脉冲形状可基本保持为三角形, 为更清晰说明, 以预啾啾光纤长度 $L' = 735$ m 为例, 图 4 给出了对应的脉冲 SHG-FROG 频谱图, 图中三个脉冲频谱图与理想三角形脉冲的频谱图形状极为相似, 可表明所得脉冲为质量较高的三角形光脉冲, 三角形脉冲的产生对 ND 光纤长度的容差明显增加. 这主要是由于脉冲预啾啾越大所需的 ND

光纤长度越长, 当光纤长度绝对变化相同时, 脉冲预啾啾越大, 光纤长度相对变化率越小, 影响就越小; 换句话说, 当脉冲预啾啾较大时, 可允许有较大的光纤长度绝对变化值, 因此为得到较高质量的三角形光脉冲, ND 光纤长度可有较大的选择自由度. 这对实际中获得三角形光脉冲具有重要意义.

值得一提的是, 当脉冲具有不同的预啾啾时, 需要优化输入脉冲功率才能得到高质量的三角形脉冲. 对于不同的预啾啾, 当 ND 光纤长度固定在最佳长度时, 输入功率对产生三角形脉冲的影响基本相同, 输入脉冲功率在较高水平的较宽范围内变化时均可得到高质量的三角形脉冲. 以预啾啾光纤长度 $L' = 735$ m 为例, 对应的最佳 ND 光纤长度 $L = 4.4$ km, 不同输入平均功率时所得脉冲的时域形状、频率啾啾和光谱如图 5 所示.

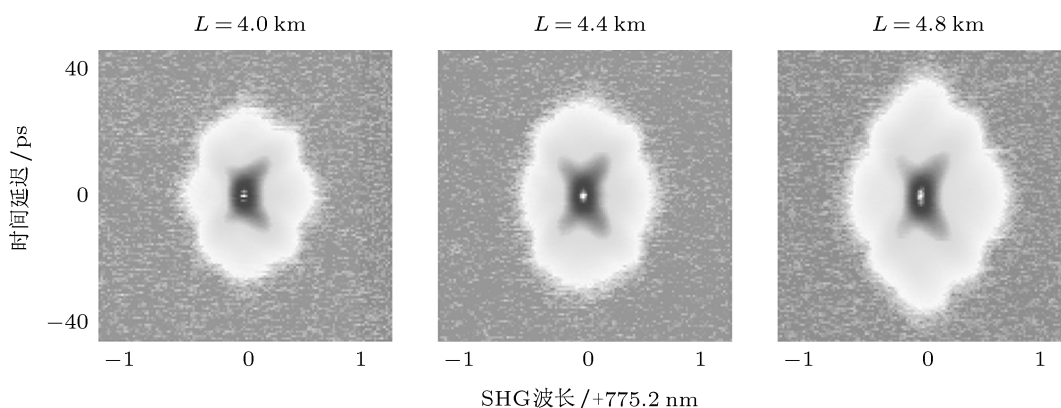


图 4 不同 ND 光纤长度后所得脉冲的 SHG-FROG 频谱图 (预啾啾光纤长度 $L' = 735$ m)

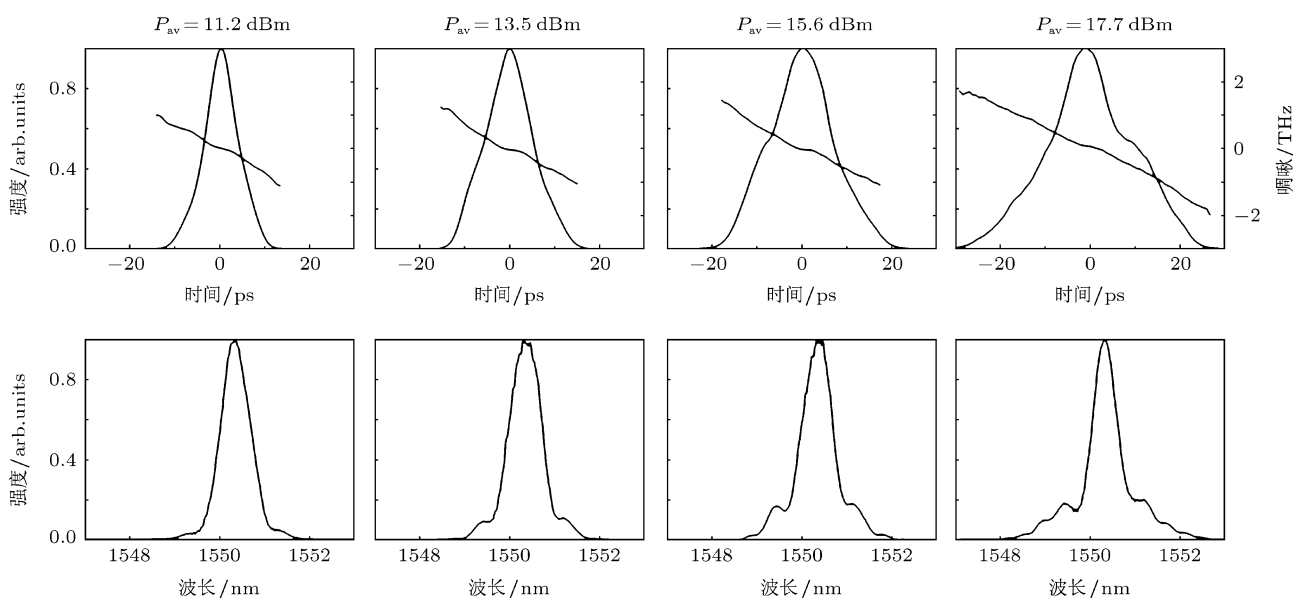


图 5 不同输入平均功率 (P_{av}) 时所得脉冲的时域形状、频率啾啾和光谱图, 对应 $L' = 735$ m, $L = 4.4$ km

从图可看出, 在平均输入功率由低到高增加过程中, 输出脉冲时域形状从近似高斯形逐渐向三角形演化, 而后逐渐偏离三角形. 脉冲输入功率逐渐增加的过程也就是光纤中 SPM 效应逐渐增强的过程, 逐渐增强的 SPM 所致啁啾与脉冲预啁啾的叠加导致脉冲形状如此演化. 当平均输入功率在 13.5 dBm—15.6 dBm 范围内变化时, 可得到清晰的三角形光脉冲, 三角形脉冲的产生同样对输入脉冲功率有较宽容差.

4 结论

利用基于脉冲预啁啾和光纤非线性的脉冲

整形方法实现了三角形脉冲在 ND 光纤中的产生. 实验发现, 当脉冲具有多个不同的正的预啁啾值时, 通过优化 ND 光纤的长度和输入脉冲功率, 均可得到高质量的三角形脉冲输出; 三角形脉冲的产生对 ND 光纤长度有一定的容差, 此容差受到脉冲预啁啾值的影响; 并且, 输入脉冲峰值功率较高时, 三角形脉冲的产生对输入脉冲功率的容差也较宽. 这种产生三角形脉冲的无源非线性全光纤脉冲整形方法简单有效, 有望在全光信号处理及高速光通信系统中有重要应用.

-
- [1] Kravtsov K, Deng Y, Prucnal P R 2009 *IEEE J. Quantum Electron.* **45** 396
 - [2] Camerlingo A, Parmigiani F, Xian F 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 628
 - [3] Lu Y X, Yang X, Sun S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2467 (in Chinese) [吕玉祥, 杨星, 孙帅 2009 物理学报 **58** 2467]
 - [4] Parmigiani F, Petropoulos P, Ibsen M 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 829
 - [5] Finot C, Dudley J M, Kibler B 2009 *IEEE J. Quantum Electron.* **45** 1482
 - [6] Kanaka R P, Masayuki K 2011 *New J. Phys.* **13** 023030
 - [7] Deng Y X, Tu C H, Lu F Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3173 (in Chinese) [邓一鑫, 涂成厚, 吕福云 2009 物理学报 **58** 3173]
 - [8] Parmigiani F, Ng T T, Ibsen M 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1992
 - [9] Parmigiani F, Ibsen M, Ng T T 2009 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21** 1837
 - [10] Li J, Olsson B E, Karlsson M 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 2654
 - [11] Latkin A I, Boscolo S, Bhamber R S 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 1492
 - [12] Bhamber R S, Latkin A I, Boscolo S 2008 *ECOC Brussels Belgium Th.1.B.2*
 - [13] Agrawal G P 2007 *Nonlinear Fiber Optics* (New York: Academic Press)
 - [14] Park Y, Asghari M H, Ahn T J 2007 *Opt. Express* **15** 9584
 - [15] Boscolo S, Latkin A I, Turitsyn S K 2008 *IEEE J. Quantum Electron.* **44** 1196
 - [16] Latkin A I, Boscolo S, Turitsyn S K 2008 *Proc. OFC Paper OTuB7*
 - [17] Wang H, Latkin A I, Boscolo S 2009 *CLEO-Europe Paper CD.P.32 TUE*
 - [18] Wang H, Latkin A I, Boscolo S 2010 *J. Opt.* **12** 035205
 - [19] Dudley J M, Barry L P, Bolland P G 1998 *Opt. Fiber Technol.* **4** 237

Experimental research of triangular optical pulse generation in normal dispersive fiber

Wang Hua[†]

(Centre of Information and Communications, Jiangxi Electric Power Corporation, State Grid, Nanchang 330077, China)

(Received 18 July 2011; revised manuscript received 10 November 2011)

Abstract

Generation of triangular optical pulses in conventional normal dispersive (ND) fiber is experimentally realized using a passive nonlinear pulse shaping method based on a combination of pulse pre-chirping, group-velocity dispersion and self-phase modulation in a section of ND fiber. It is found that by optimizing the parameters of launching pulse power level and ND fiber length, high-quality triangular optical pulses with nearly constant gradients of leading and trailing edges and linear frequency chirp profiles can be obtained for a wide range of different pulse pre-chirping values. For different pulse pre-chirpings, high launch power is required for triangular optical pulse generation. The tolerance of triangular pulse formation to ND fiber length and launch power level is improved with the increase of pulse pre-chirping, which means that it is easy to obtain triangular pulses for higher pulse pre-chirping.

Keywords: triangular optical pulse, normal dispersive fiber, nonlinear effects, pre-chirping

PACS: 42.65.-k, 42.65.Re, 42.79.Sz, 42.81.-i

[†] E-mail: wzh_hf@163.com