

# 基于线性啁啾光栅简化设计和频率-时间映射理论的任意波形产生技术研究

李敏, 牟宏谦\*, 王目光, 韦新航, 官祥帅

北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

**摘要** 基于频率-时间映射理论,提出一种简单、全光纤任意波形产生方法。该方法简化了具有任意反射谱的线性啁啾光栅设计方法,结合啁啾光栅的色散特性,能够实现用户定义的任意波形脉冲信号。利用由传输损耗公式推导的折射率调制幅度与光栅反射率的关系,可实现具有任意形状反射谱的啁啾光栅的逆向设计;微调折射率调制幅度伸缩因子和折射率调制顶点的归一化光谱位置可优化反射谱形状,在保证高反射率的情况下( $\geq 90\%$ ),设计误差可降低至 10% 以下。阐明啁啾光栅色散特性引入的频率-时间映射关系,将设计的光谱形状映射到时域波形,改变光栅设计参数,可灵活控制输出脉冲的形状和脉宽。基于 Matlab 和 Optisystem 仿真软件,以常用重要波形(三角形、锯齿形、矩形、梯形、高斯型、抛物型脉冲)为例验证了系统的可行性。该方法简单灵活,对任意波形产生和应用研究具有一定的参考价值。

**关键词** 光通信;任意波形产生;频谱整形;频率-时间映射;啁啾光栅;三角形滤波器

**中图分类号** TN929.11

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202148.2006001

## 1 引言

任意波形发生器可实现高频率、大带宽、任意波形的微波、射频信号,在通信、雷达、信号处理等领域具有广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>。尤其是特殊形状的脉冲,如三角形脉冲、锯齿形脉冲、矩形脉冲、梯形脉冲、抛物型脉冲和高斯型脉冲等更受到广泛关注<sup>[3-6]</sup>。三角形脉冲因线性边沿特性可应用于信号再生、波长变换等信号处理领域<sup>[3]</sup>;锯齿形脉冲作为特殊的三角形脉冲,在波长变换、时分复用等领域优势明显<sup>[4]</sup>;矩形脉冲和梯形脉冲分别在脉冲校准测量、雷达系统中具有重要的研究意义<sup>[5]</sup>;而抛物型脉冲和高斯型脉冲则广泛应用于非线性光学、超宽带通信等领域<sup>[6]</sup>。基于电子技术的任意波形产生系统受限于电子瓶颈,采样率难以超过几十 GHz,而光学任意波形产生方法可以打破电子技术在速率和带宽方面的限制,成为近年来的研究热点。常见的光学任意波形产生方法包括空-时脉冲整形、基于傅里叶变

换光脉冲整形、时域脉冲整形、外调制技术、光谱整形和频率-时间映射等。基于空-时脉冲整形技术的任意波形发生器,通过控制空间分布的信号分量能够实现时域波形重构,从而产生任意波形,但其系统体积大、插入损耗高且难以集成<sup>[7]</sup>。采用傅里叶变换光脉冲整形技术的任意波形发生器同样可以实现用户定义的任意脉冲,但对滤波器的频谱分辨率要求严格,而高频谱分辨率的可编程滤波器成本高昂<sup>[8]</sup>。基于电光强度调制器的时域脉冲整形系统可以通过改变调制器的驱动信号实现输出波形的重构,该系统只能产生波形对称的射频脉冲,限制了其在任意波形领域的应用<sup>[9]</sup>。基于外调制技术产生任意波形的方法可以实现任意波形信号且系统稳定性强,但存在系统调节参数多、结构复杂、环境稳定性低等问题<sup>[10-13]</sup>。

与上述方法相比,基于光谱整形和频率-时间映射技术的任意波形产生系统优势明显,具有损耗低、稳定性强、易于系统集成等优点<sup>[14-15]</sup>。该系统主要

收稿日期: 2021-01-04; 修回日期: 2021-01-31; 录用日期: 2021-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(61775015)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(2019JBM010)

通信作者: \*hongqianmu@bjtu.edu.cn

由宽谱光源模块、光谱整形模块和色散模块构成,输出脉冲的形状由整形后的光谱形状决定,因此光谱整形模块是系统设计的关键。目前,光谱整形模块主要基于空间光调制器<sup>[16]</sup>、全光纤结构<sup>[17]</sup>或啁啾光纤光栅(CFBG)<sup>[18-22]</sup>进行光谱构造。其中,广泛研究的基于空间光调制器的光谱整形模块尽管具有可重构性,但是其体积大、成本高、难以集成,且需要额外的数千米长的光纤作为色散器件才能实现频率-时间映射功能,光纤传输损耗大,系统结构复杂<sup>[16]</sup>。全光纤结构也可构造光谱整形模块,如文献<sup>[17]</sup>通过并联至少 4 个高双折射光纤环形镜来整形三角形、锯齿形和矩形光谱,其中每段保偏光纤长度需要精确匹配,再通过环内偏振控制器来调整消光比和相位,该控制器同样需要额外的色散器件才能实现频率-时间映射,系统结构复杂且对外界环境变化敏感。文献<sup>[18]</sup>提出将线性啁啾光栅同时用作光谱整形模块和色散模块,但该方案采用的啁啾光栅反射谱设计不仅设计方法复杂,且实现难度很大。后续基于啁啾光纤光栅同时实现频谱整形和频率-时间映射功能的任意波形发生器研究,仅关注了频率啁啾和相位编码微波脉冲的产生,无法实现任意波形信号<sup>[19-21]</sup>。为了提升光栅反射谱滤波器的可调谐性,实现动态可调谐的任意波形发生器,还有文献基于光栅温度敏感特性,级联多个加热元件分布式控制线性啁啾光栅透射谱,该方法具有一定的可重构性,但实现难度大、调谐速度慢,而且光栅透射谱没有色散特性,还需要额外的色散器件才能实现频率-时间映射<sup>[22]</sup>。

本文基于频率-时间映射理论,结合线性啁啾光栅的反射特性和色散特性,理论研究并验证了一种简单可行的任意波形产生方案。首先提出具有任意形状反射谱的线性啁啾光栅简化设计方法,由传输

损耗公式推导出光栅反射率与折射率调制幅度变化的关系式,对任意形状光栅反射谱进行折射率调制逆向设计,再微调折射率调制幅度伸缩因子  $M_1$  或折射率调制顶点的归一化光谱位置  $M_2$ ,则可在保证高反射率的情况下( $\geq 90\%$ ),将设计误差降低到 10% 以下。对比其他已报道的基于各类复杂算法的光栅反射谱设计方法<sup>[23]</sup>,本方法不需要复杂的参数迭代优化过程,更为简单、灵活。将设计的啁啾光栅同时用作光谱整形和色散器件,阐明频率-时间映射关系;并以常用脉冲波形(三角形、锯齿形、矩形、梯形、高斯型、抛物型脉冲)的产生为例,验证了该方法实现任意波形的可行性。此外,还具体分析了光栅参数对不同光栅反射谱形状的影响,并基于误差计算公式对设计的反射谱以及频率-时间映射后生成的时域脉冲进行误差分析。

## 2 基本原理

### 2.1 基本原理

本文所用的任意波形产生系统由宽谱脉冲光源、环形器、啁啾光栅和光电探测器构成,结构简单,如图 1 所示。宽谱脉冲光源发射的周期性光脉冲信号由环形器进入线性啁啾光栅后,通过控制线性啁啾光栅的反射谱形状对宽谱光源进行光谱整形,并结合线性啁啾光栅的色散特性同时实现频率-时间映射。当啁啾光栅色散满足  $|\Phi_2| \gg \Delta t^2 / 2\pi$  ( $\Phi_2$  为群速度色散;  $\Delta t$  为输入光脉冲宽度)时,可以实现频率-时间映射<sup>[24]</sup>。啁啾光栅的色散特性还可以用色散系数  $d$  来描述,  $d = 2n_{\text{eff}} / (c\Delta\lambda)$ , 式中  $n_{\text{eff}}$  是光栅有效折射率,光速  $c = 3 \times 10^8$  m/s,光栅波长带宽  $\Delta\lambda = 2n_{\text{eff}}CL$ ,  $C$  是光栅的啁啾系数,  $L$  是光栅长度。啁啾光栅的色散特性引入频率-时间映射后输出脉冲的形状与光谱形状相同,而脉冲时宽大小为

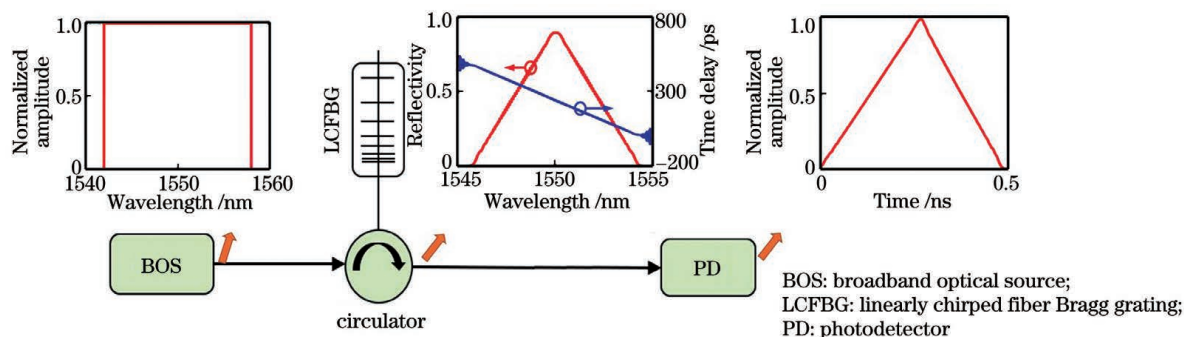


图 1 基于线性啁啾光栅的任意波形产生系统原理图

Fig. 1 Schematic diagrams of the proposed arbitrary waveform generation system using a linearly chirped fiber Bragg grating

$$\Delta\tau = d \cdot L \cdot \Delta\lambda_{3\text{ dB}} = \frac{\Delta\lambda_{3\text{ dB}}}{c \cdot C}, \quad (1)$$

式中  $\Delta\lambda_{3\text{ dB}}$  为光栅反射谱的 3 dB 谱宽。

接着,理论阐述本文提出的具有任意反射谱形的线性啁啾光栅简化设计方法。线性啁啾光栅的折射率调制幅度沿光纤轴向( $z$  轴)的变化可表示为

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \bar{\delta} n_{\text{eff}}(z) \left\{ 1 + \nu \cdot \cos \left[ \frac{2\pi}{\Lambda(z)} z \right] \right\}, \quad (2)$$

式中: $\bar{\delta} n_{\text{eff}}(z)$  表示有效折射率调制的空间变化包络;条纹可见度  $\nu$  设为 1;光栅周期  $\Lambda(z) = \Lambda_0 + C(z - L/2)$ ,  $\Lambda_0$  是光栅起始周期。对于给定目标的发射谱  $R(\lambda)$ ,由光栅谐振波长与光栅周期关系  $\lambda(z) = 2n_{\text{eff}}\Lambda(z)$ ,可知光栅反射率  $R(z)$ ;再由传输损耗公式  $R(z) = 1 - 10^{\left\{ [\eta \cdot \bar{\delta} n_{\text{eff}}(z)]^2 \cdot \frac{1.478}{10|C|} \right\}}$  (纤芯模式能量分数  $\eta$  设为 1) 推导出折射率调制幅度变化函数,表达式为<sup>[25]</sup>

$$\bar{\delta} n_{\text{eff}}(z) = \sqrt{-6.77 |C| \cdot \lg[1 - R(z)]}. \quad (3)$$

光栅反射率  $R(z)$  恒小于 1,当增大折射率调制幅度变化  $\bar{\delta} n_{\text{eff}}(z)$  时, $R(z)$  也相应增大,但限于实际情况, $\bar{\delta} n_{\text{eff}}(z)$  取值不能过大。由逆推得到的折射率调制幅度变化  $\bar{\delta} n_{\text{eff}}(z)$ ,采用传输矩阵法可得到实际的光栅反射谱。以下基于传输矩阵法的分析中,将长为  $L$  的线性啁啾光栅分为  $W$  段等长子光栅,每段子光栅按均匀光栅处理。因此,对于用户定义的任意目标发射谱  $R(\lambda)$ ,先由光栅谐振波长与光栅周期的关系式确定  $R(z)$ ,再由传输损耗公式逆推光栅折射率调制幅度变化函数  $\bar{\delta} n_{\text{eff}}(z)$ ,最后基于传输矩阵法并结合(2)式来实现具有用户定义反射谱的啁啾光栅。

## 2.2 三角形与锯齿形反射谱光栅设计

三角形反射谱的数学表达式为

$$\begin{cases} R(z) = R_{\text{max}} \frac{z}{M_2 L}, & 0 \leq z \leq M_2 L \\ R(z) = R_{\text{max}} \frac{L - z}{(1 - M_2)L}, & M_2 L \leq z \leq L \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $L$  是光栅的长度; $R_{\text{max}}$  是预设的光栅最大反射率;变量  $M_2$  用于描述归一化不同形状反射谱的顶点位置( $0 \leq M_2 \leq 1$ ),本节用于描述三角形反射谱的顶点位置变化,以控制三角谱斜率。将(4)式代入(3)式得到光栅折射率调制幅度变化函数  $\bar{\delta} n_{\text{eff}}(z)$ ,引入伸缩因子  $M_1$  调整  $\bar{\delta} n_{\text{eff}}(z)$  的大小来修正反射谱形状,再由传输矩阵法得到相应的三角谱。以等腰三角谱的设计为例( $M_2 = 1/2$ ),具体阐述三角谱

啁啾光栅的简化设计方法。此外,下文分析中引入误差计算公式用于衡量实际设计的光栅反射谱与目标光栅反射谱的相符度,表达式为

$$\xi_{\text{error}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \hat{R}_i)^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^n R_i^2}, \quad (5)$$

式中, $i$  是取样点数, $R_i$  为实际的反射谱输出, $\hat{R}_i$  为目标反射谱。

设光栅长度  $L$  为 5 cm,啁啾系数  $C$  为 0.6 nm/cm,有效折射率为 1.45,光栅的起始周期  $\Lambda_0 = 534.5$  nm,分段数  $W$  为 500。目标三角形反射谱 3 dB 谱宽为 4.4 nm, $R_{\text{max}} = 0.9$ ,由(3)式逆向设计得到的光栅折射率调制幅度变化[图 2(a)],调整光栅折射率调制的伸缩因子  $M_1$ ,并由传输矩阵法计算出实际反射谱,如图 2(b)所示,改变  $M_1$  大小可调控实际反射谱谱形。当  $M_1 = 1.7$  时,实际光栅反射谱的最大反射率约为 0.89,谱宽约为 4.5 nm,计算误差  $\xi_{\text{error}}$  为 11.8%。为了研究不同峰值反射率下本设计方法的可行性,保持目标三角形反射谱 3 dB 谱宽 4.4 nm 不变,将  $R_{\text{max}}$  改为 0.95,设计的光栅折射率调制幅度变化和反射谱分别如图 2(c)和图 2(d)所示。当  $M_1 = 1.7$  时,实际光栅反射谱的最大反射率为 0.94,略小于 0.95,3 dB 谱宽约为 4.5 nm,计算误差  $\xi_{\text{error}}$  为 12.4%。由图可见,过大或过小的  $M_1$  取值都会使三角形反射谱形状偏离目标谱形。在此基础上,若调整光栅折射率调制顶点在光谱的归一化位置  $M_2$  可进一步修正反射谱的形状,降低设计误差。在图 2(a)和图 2(b)的基础上,保持其他参数不变,仅调整  $M_2 = 0.44$ ,如图 3 所示,得到的反射谱形状比  $M_2 = 0.5$  时更接近目标三角谱,可见微调折射率调制顶点的归一化光谱位置  $M_2$  可以进一步减小设计误差。

锯齿形是一种特殊的三角形,锯齿形三角谱在光纤传感、全光信号处理等领域均有重要应用。基于上述线性啁啾光栅简化设计方法可以有效设计锯齿形三角谱。锯齿谱相当于(4)式中, $M_2 = 1$  或  $M_2 = 0$  的三角谱。设目标锯齿形反射谱的 3 dB 谱宽为 4.4 nm, $R_{\text{max}}$  为 0.9,由(3)式逆推得到的锯齿形三角谱的折射率调制变化如图 4(a)所示,令  $M_1 = 1.7$  不变,得到实际光栅反射谱,如图 4(b)所示。若不对其折射率调制顶点的归一化光谱位置  $M_2$  进行微调处理,即对应图 4(b)中  $M_2 = 1$  时的锯齿谱,反射谱上纹波明显,与目标锯齿形反射谱相差较大,这是由光栅尾端折射率调制幅度突变引起的。



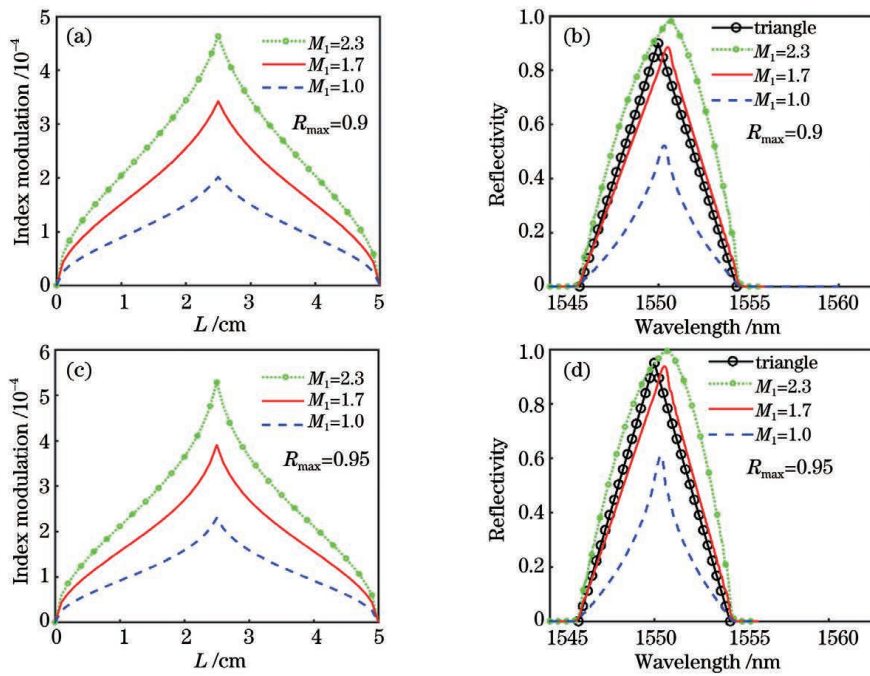


图 2 目标光栅最大反射率分别设为  $R_{\max}=0.9$  和  $R_{\max}=0.95$  时光栅折射率调制特性及其反射率随折射率调制伸缩因子  $M_1$  的变化。(a)(c)折射率调制特性;(b)(d)反射谱

Fig. 2 Refractive index modulation and reflection spectra of grating varying with refractive index modulation scaling factor  $M_1$  when  $R_{\max}$  is set to be 0.9 or 0.95. (a) (c) Index modulations; (b) (d) reflection spectra

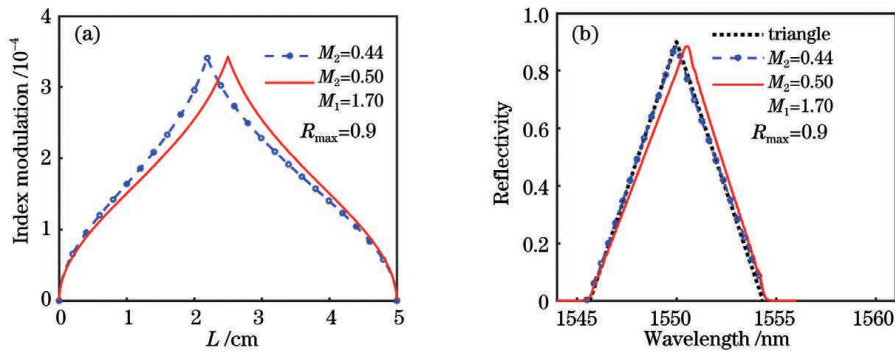


图 3 折射率调制顶点的归一化光谱位置  $M_2$  对设计误差的影响。(a)折射率调制;(b)反射谱

Fig. 3 Influence of normalized spectral position of refractive index modulated vertex  $M_2$  on design error. (a) Index modulations; (b) reflection spectra

微调光栅折射率调制顶点在光谱的归一化位置  $M_2$ , 当  $M_2=0.91$  时得到的反射谱形状更接近目标锯齿谱, 计算误差为 8.6%。为了进一步验证该方案可灵活产生不同斜率的三角谱, 改变折射率调制顶点在光谱的归一化位置, 当  $M_2=1/4, 1/2$  和  $3/4$  时, 得到谱宽不变、不同形状的三角形反射谱, 如图 4(c)和图 4(d)所示。

下面研究光栅长度  $L$  和啁啾系数  $C$  对本文提出的啁啾光栅简化设计方法的影响。设  $R_{\max}$  为 0.9,  $M_2=1/2, M_1=1.7$ , 有效折射率 1.45、光栅啁啾系数  $C$  为 0.6 nm/cm 不变, 仅改变光栅长度

(1~5 cm), 研究光栅折射率调制幅度与对应三角形反射谱的变化。如图 5 所示, 当光栅长度  $L$  设为 1, 2, 3, 4, 5 cm 时, 测量对应三角形反射谱的 3 dB 谱宽分别为 0.9, 1.8, 2.7, 3.6, 4.5 nm。可见, 光栅反射谱的谱宽与光栅的长度成正比; 图中光栅长度较长时, 可得到更接近其理论设计的光栅反射谱。接下来分析不同的啁啾系数  $C$  对光栅谱的影响, 设  $R_{\max}$  为 0.9,  $M_2=1/2, M_1=1.7$ , 有效折射率 1.45、固定  $L=5$  cm 不变, 仅改变光栅啁啾系数  $C$ , 研究光栅折射率调制幅度与对应三角形反射谱的变化。如图 6 所示, 当光栅啁啾系数  $C$  设为 0.4, 0.5, 0.6,

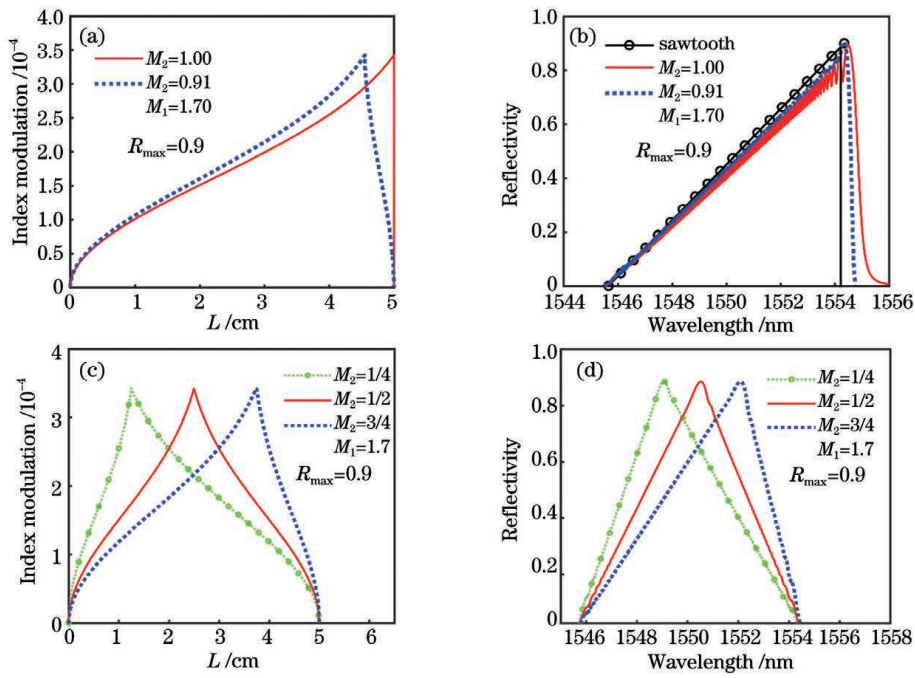


图 4 改变折射率调制顶点的归一化光谱位置  $M_2$  的仿真结果。(a)(c) 折射率调制;(b)(d) 反射谱

Fig. 4 Simulation results with different normalized spectral position of refractive index modulated vertex  $M_2$ . (a)(c) Index modulations; (b)(d) reflection spectra

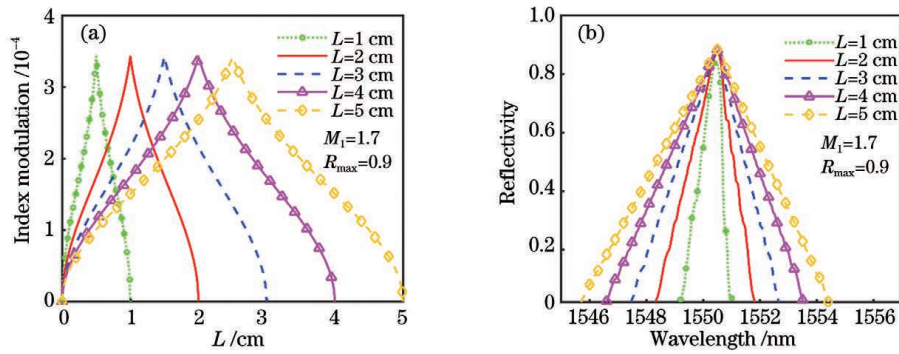


图 5 不同光栅长度 ( $L=1, 2, 3, 4, 5$  cm) 下的仿真结果。(a) 折射率调制;(b) 反射谱

Fig. 5 Simulation results with different grating lengths ( $L=1, 2, 3, 4, 5$  cm). (a) Index modulations; (b) reflection spectra

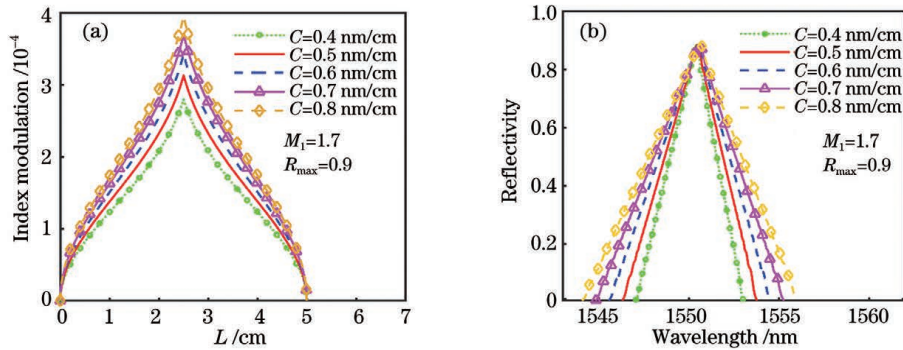


图 6 不同的啁啾系数 ( $C=0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$  nm/cm) 下的仿真结果。(a) 折射率调制;(b) 反射谱

Fig. 6 Simulation results with different chirp coefficients ( $C=0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$  nm/cm). (a) Index modulations; (b) reflection spectra

0.7, 0.8 nm/cm 时, 测量对应三角形反射谱的 3 dB 谱宽分别是 3.0, 3.8, 4.5, 5.2, 6.0 nm。可见, 光栅反射谱的谱宽与光栅的啁啾系数也成正比; 由(3)式可知, 较大的光栅啁啾系数对应较大的光栅折射率调制变化幅度值, 而最大反射率峰值不变。

光栅实际制作过程中, 对折射率调控会不可避免地引入制作误差, 主要包括折射率调制深度制作误差和光栅周期制作误差。下面分别讨论这两种制作误差对光栅反射谱的影响。首先研究折射率调制深度制作误差对光栅反射谱的影响。对有效折射率调制的空间变化包络  $\bar{\delta}n_{\text{eff}}(z)$  引入扰动因子  $a(z)$  后, 有效折射率调制的空间变化包络变为  $\delta'n_{\text{eff}}(z) = \bar{\delta}n_{\text{eff}}(z) \cdot [1 + a(z)]$ 。  $a(z)$  服从均值为 0, 方差为 1 的正态分布。不同微扰误差下, 光栅折射率调制

和光栅反射谱如图 7 所示, 当折射率调制扰动因子幅度在 10% 范围内变化时, 光栅反射谱变化较小, 即本文设计方法对折射率调制深度制作误差的最大容忍度可达 10%。其次研究光栅周期制作误差对光栅反射谱的影响。由于光栅周期  $\Lambda(z) = \Lambda_0 + C(z - L/2)$  与啁啾系数  $C$  相关, 对啁啾系数引入扰动因子  $a(z)$ , 则啁啾系数变为  $C(z) = C \cdot [1 + a(z)]$ , 本研究将用此公式来模拟光栅周期制作误差对光栅反射谱的影响。啁啾系数微扰  $a(z)$  同样服从均值为 0, 方差为 1 的正态分布。不同微扰误差下, 光栅啁啾系数和光栅反射谱如图 8 所示, 当啁啾系数扰动因子幅度达到 10% 时, 光栅反射谱出现较大振荡, 本设计方法对光栅周期制作误差容忍度低于对折射率调制深度制作误差的容忍度。

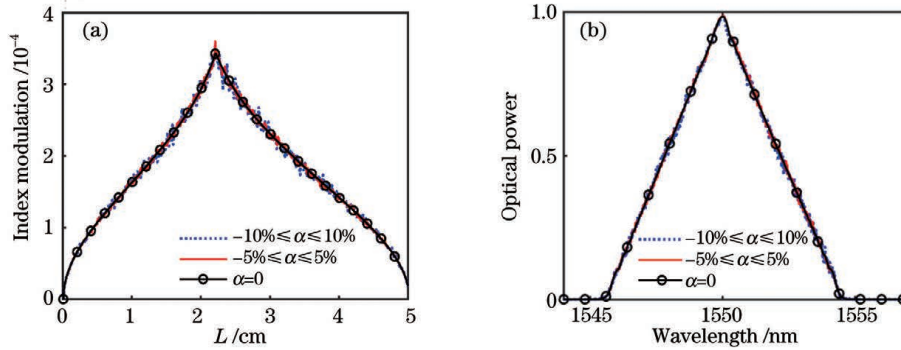


图 7 不同折射率调制深度误差下的仿真结果。(a) 折射率调制; (b) 反射谱

Fig. 7 Simulation results with different index modulation errors. (a) Index modulations; (b) reflection spectra

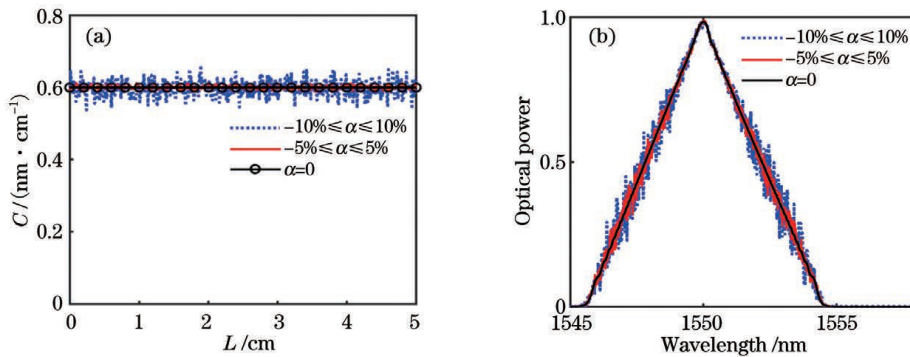


图 8 不同光栅周期制作误差下的仿真结果。(a) 啁啾系数; (b) 反射谱

Fig. 8 Simulation results with different CFBG period errors. (a) Chirp coefficients; (b) reflection spectra

### 2.3 梯形与矩形反射谱光栅设计

本文提出的任意谱形光栅简化设计方法还可用于设计梯形与矩形反射谱。等腰梯形反射谱的数学表达式为

$$\begin{cases} R(z) = R_{\max} \frac{z}{M_2 L}, & 0 \leq z \leq M_2 L \\ R(z) = R_{\max}, & M_2 L < z \leq (1 - M_2)L, \\ R(z) = R_{\max} \frac{L - z}{M_2 L}, & (1 - M_2)L < z \leq L \end{cases} \quad (6)$$



式中  $M_2$  用于描述等腰梯形顶点的归一化光谱位置变化。设光栅长度  $L$  为 5 cm, 啁啾系数  $C$  为 0.6 nm/cm, 光栅折射率调制的伸缩因子  $M_1 = 1.7, M_2 = 1/3$ , 目标等腰梯形谱 3 dB 谱宽为 5.8 nm,  $R_{\max} = 0.9$ 。由(3)式逆向设计光栅折射率调制幅度, 再由传输矩阵法计算实际反射谱, 得到的光栅折射率调制和梯形反射谱如图 9(a)和图 9(b)所示。设计得到的梯形反射谱 3 dB 宽度为 6 nm, 对比目标等腰梯形谱, 其设计误差约为 12.75%。

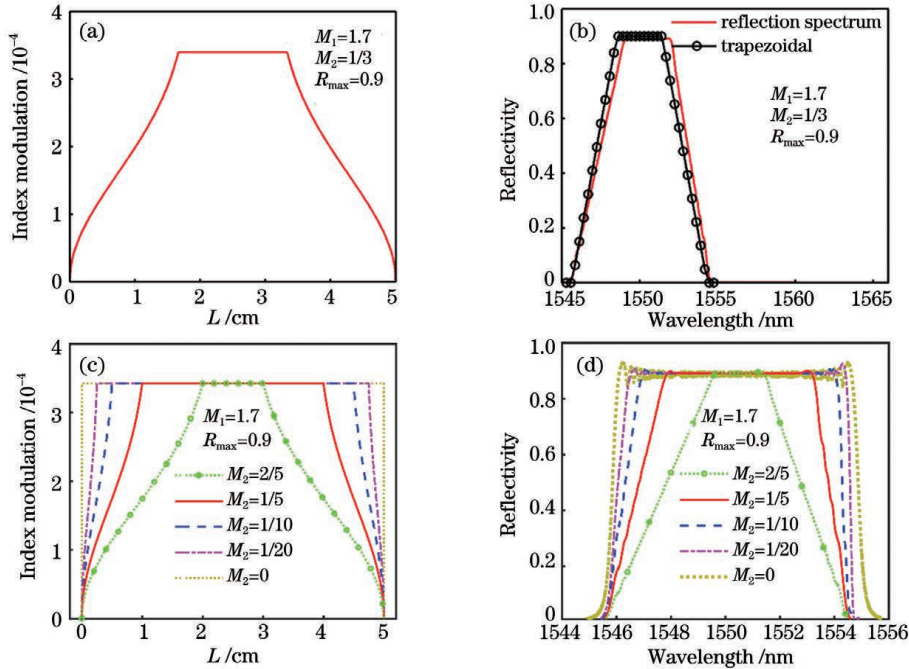


图 9 梯形谱与矩形谱光栅设计的仿真结果。(a)  $M_2 = 1/3$  时折射率调制; (b)  $M_2 = 1/3$  时反射谱; (c)  $M_2 = 0, 1/20, 1/10, 1/5, 2/5$  时折射率调制; (d)  $M_2 = 0, 1/20, 1/10, 1/5, 2/5$  时反射谱

Fig. 9 Simulation results of the CFBGs with trapezoidal-shaped spectra and rectangular-shaped spectra. (a) Index modulation for  $M_2 = 1/3$ ; (b) corresponding reflection spectrum for  $M_2 = 1/3$ ; (c) index modulations for  $M_2 = 0, 1/20, 1/10, 1/5, 2/5$ ; (d) corresponding reflection spectra for  $M_2 = 0, 1/20, 1/10, 1/5, 2/5$

### 2.4 高斯型与抛物型反射谱光栅设计

本文提出的任意谱形光栅简化设计方法还可以用于设计高斯型反射谱与抛物型反射谱。高斯型与抛物型谱的数学表达式分别为

$$R(z) = R_{\max} \exp\left[-\frac{(z - L/2)^2}{2g^2}\right], 0 \leq z \leq L, (7)$$

$$R(z) = R_{\max} - R_{\max} \frac{4(z - L/2)^2}{L^2}, 0 \leq z \leq L, (8)$$

式中  $g$  描述高斯宽度。目标高斯型反射谱的 3 dB 谱宽为 2.9 nm,  $R_{\max} = 0.9$ 。取  $g = L/9$ , 由(3)式来逆向设计光栅折射率调制幅度变化; 调整光栅折射率调制的伸缩因子  $M_1 = 1.7$ , 折射率调制归一化顶点位置  $M_2 = 0.45$ , 由传输矩阵法计算实际反射谱

通过调整  $M_2$  的大小, 可以得到任意等腰梯形谱, 如图 9(c)和图 9(d)所示。当(6)式中  $M_2$  趋近于零时, 该方法还可得到矩形光谱。  $M_2 = 0$  时, 由(3)式逆推可知矩形谱的折射率调制幅度变化为常数, 由于光栅首尾端折射率调制幅度存在突变, 矩形反射谱纹波较大。为了减小反射谱纹波, 考虑  $M_2$  略大于 0, 比如  $M_2 = 1/20$ , 如图 9(d)所示, 反射谱纹波明显减少, 形状接近理想矩形反射谱。对于非等腰梯形谱, 也可采用此设计方法灵活实现。

如图 10 所示。设计得到的高斯型反射谱 3 dB 宽度约为 3 nm, 对比目标高斯型反射谱, 其设计误差约为 5.9%。类似思路可以设计 3 dB 宽度为 6.3 nm,  $R_{\max} = 0.9$  的抛物型反射谱; 同样调整光栅折射率调制的伸缩因子  $M_1 = 1.7$ , 折射率调制归一化顶点位置  $M_2 = 0.45$ , 设计得到的抛物型反射谱 3 dB 宽度约为 6.1 nm, 对比目标抛物型反射谱, 其设计误差约为 4.9%, 如图 11 所示。

### 3 仿真及分析

基于 Optisystem 软件平台搭建任意波形产生系统的仿真模型, 如图 12 所示。该系统主要由三部分组成: 宽谱光源模块、光谱整形与色散模块, 以及

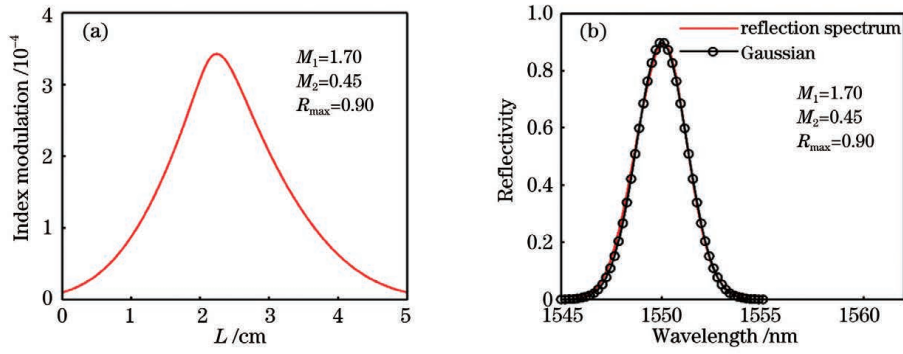


图 10 高斯型谱光栅设计的仿真结果。(a)折射率调制;(b)反射谱

Fig. 10 Simulation results of the CFBG with Gaussian-shaped spectrum. (a) Index modulation; (b) reflection spectrum

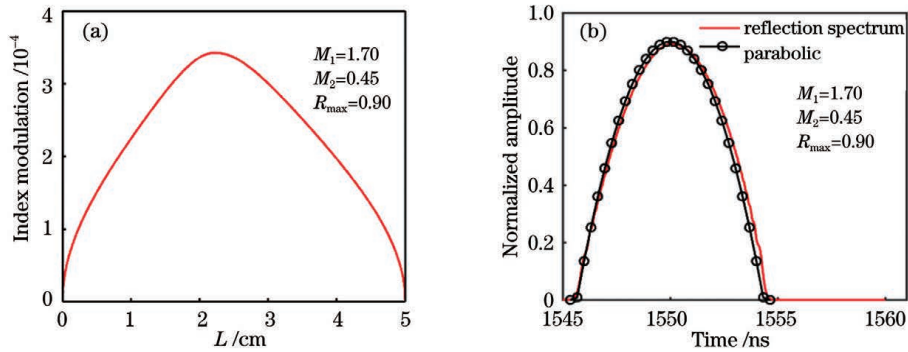


图 11 抛物型谱光栅设计的仿真结果。(a)折射率调制;(b)反射谱

Fig. 11 Simulation results of the CFBG with parabolic-shaped spectrum. (a) Index modulation; (b) reflection spectrum

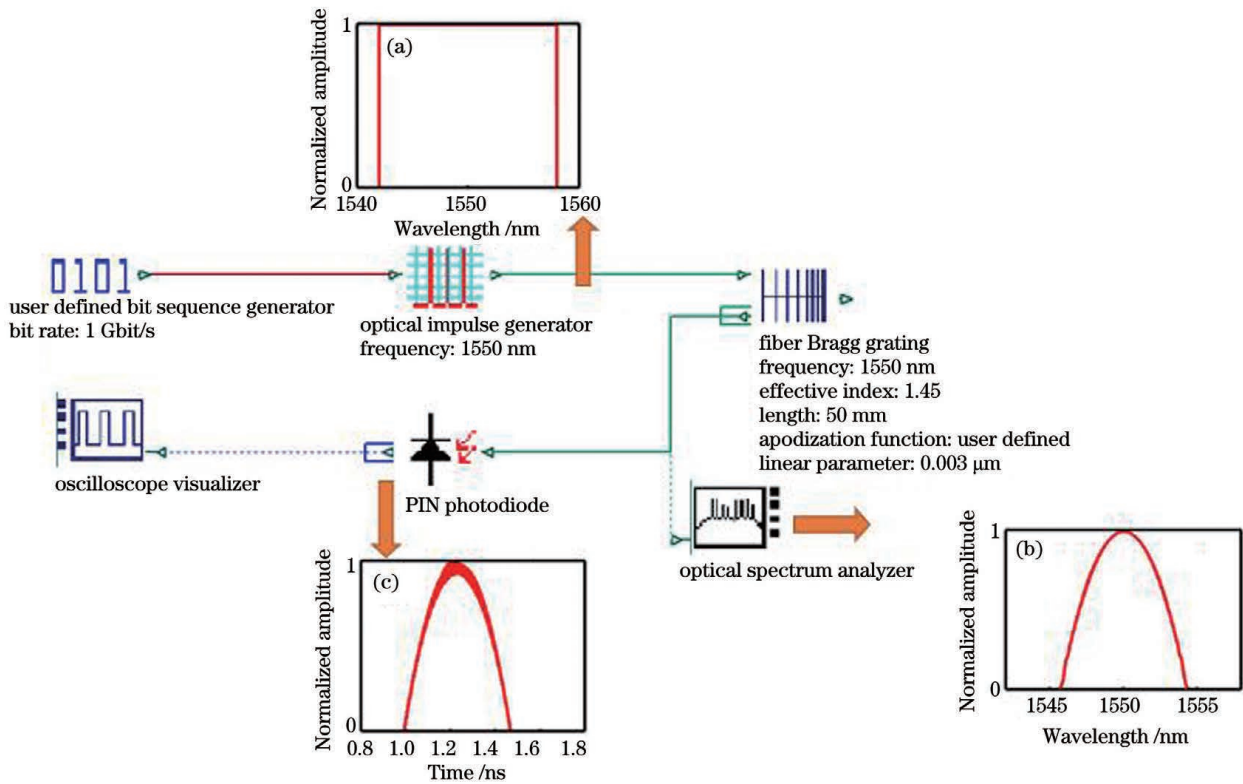


图 12 光任意波形产生系统仿真结构图

Fig. 12 Simulation setup of proposed arbitrary waveform generation system



光电探测模块;其中,啁啾光栅可同时实现光谱整形和频率-时间映射功能。设置光脉冲发生器的重复频率为 1 GHz,中心波长 1550 nm,输出波长范围为 1542~1558 nm 的光谱。线性啁啾光栅长度为 5 cm,啁啾系数为 0.6 nm/cm,中心波长为 1550 nm,有效折射率为 1.45,光栅的切趾函数设为自定义模式,导入设计得到的光栅折射率调制数值进行仿真。以抛物型脉冲的产生为例介绍此系统。光源产生谱宽为 16 nm 的平顶宽谱信号[图 12(a)],经光栅反射后,光谱被整形为 3 dB 谱宽约为 6.1 nm 的抛物型光谱[图 12(b)],光栅色散引入频率-时间映射,光电探测器输出为脉宽 0.34 ns 的抛物型脉冲序列[图 12(c)]。

以下仿真分析中,光栅几个基本参数保持不变:长度 5 cm,啁啾系数 0.6 nm/cm,有效折射率 1.45,光栅起始周期  $\Lambda_0 = 534.5$  nm。首先以三角形反射谱光栅的设计以及光栅色散引起频率-时间映射产生三角形脉冲为例,仿真分析系统性能和可行性。目标三角形反射谱 3 dB 谱宽 4.4 nm,  $R_{\max} = 0.9$ ,中心波长 1550 nm,将设计的光栅切趾函数导入

Optisystem 软件,设置分段数  $W = 100$ 。光谱仪测得光栅反射谱是 3 dB 宽度为 4.4 nm 的三角谱[图 13(a)],示波器测得光电探测器的输出信号是脉宽为 0.24 ns 的三角形脉冲序列[图 13(b)],按照频率-时间映射理论,对比映射后的理想三角脉冲,误差仅为 3.9%。但是局部放大后,脉冲边沿存在较小的纹波,这主要是由于仿真设置的分段数过少所致。增大光栅分段数,  $W = 500$ ,光栅反射谱和频率-时间映射得到的脉冲分别如图 13(c)和图 13(d)所示,脉冲纹波基本消失,误差对比理想三角脉冲进一步减小,减小到 3.3%。可见增大分段数  $W$ ,可以减小误差。考虑到实际操作的可行性,分段数无法设置过大。下面仅以光栅分段数  $W = 100$  为例进行分析。此外,频率-时间映射后的三角脉冲下降沿存在微小凹陷,这是由于光谱边沿的陡峭变化引起的。通过减小折射率调制幅度变化因子  $M_1$  来降低反射率最大值,或通过增大啁啾系数  $C$  来增大反射谱宽,均可减小光栅反射谱边沿陡峭度,同时在保证输出三角形形状和时宽不变的条件下,减小脉冲边沿凹陷。

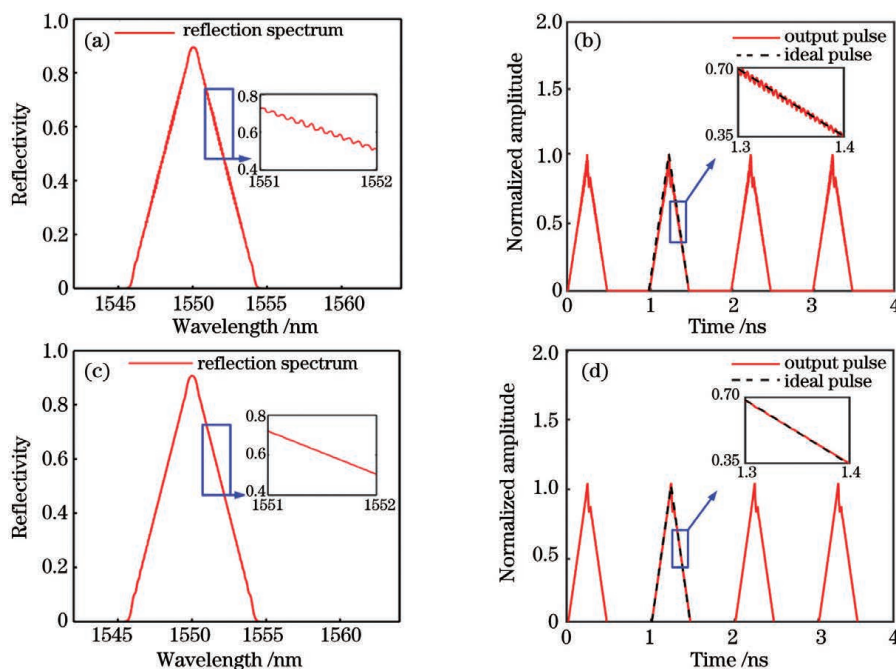


图 13 不同分段数下光栅反射谱和频率-时间映射后时域脉冲仿真图。(a)  $W = 100$  时的三角谱;(b)  $W = 100$  时的三角脉冲;(c)  $W = 500$  时的三角谱;(d)  $W = 500$  时的三角脉冲

Fig. 13 Simulation results of grating reflection spectra and time-domain pulses after frequency-to-time mapping under different number of segments  $W$ . (a) Triangular-shaped spectrum with  $W = 100$ ; (b) triangular pulses with  $W = 100$ ; (c) triangular-shaped spectrum with  $W = 500$ ; (d) triangular pulses with  $W = 500$

其他常用波形(锯齿形、矩形、梯形、高斯型、抛物型等)也可以通过本文提出的任意波形产生系统来实现。仍保持线性啁啾光栅几个基本参数不变,

将不同的光栅切趾函数分别导入 Optisystem 软件。用光谱仪测量不同啁啾光栅的反射光谱,分别得到上述常用波形反射谱[图 14(a)(c)(e)(g)(i)],

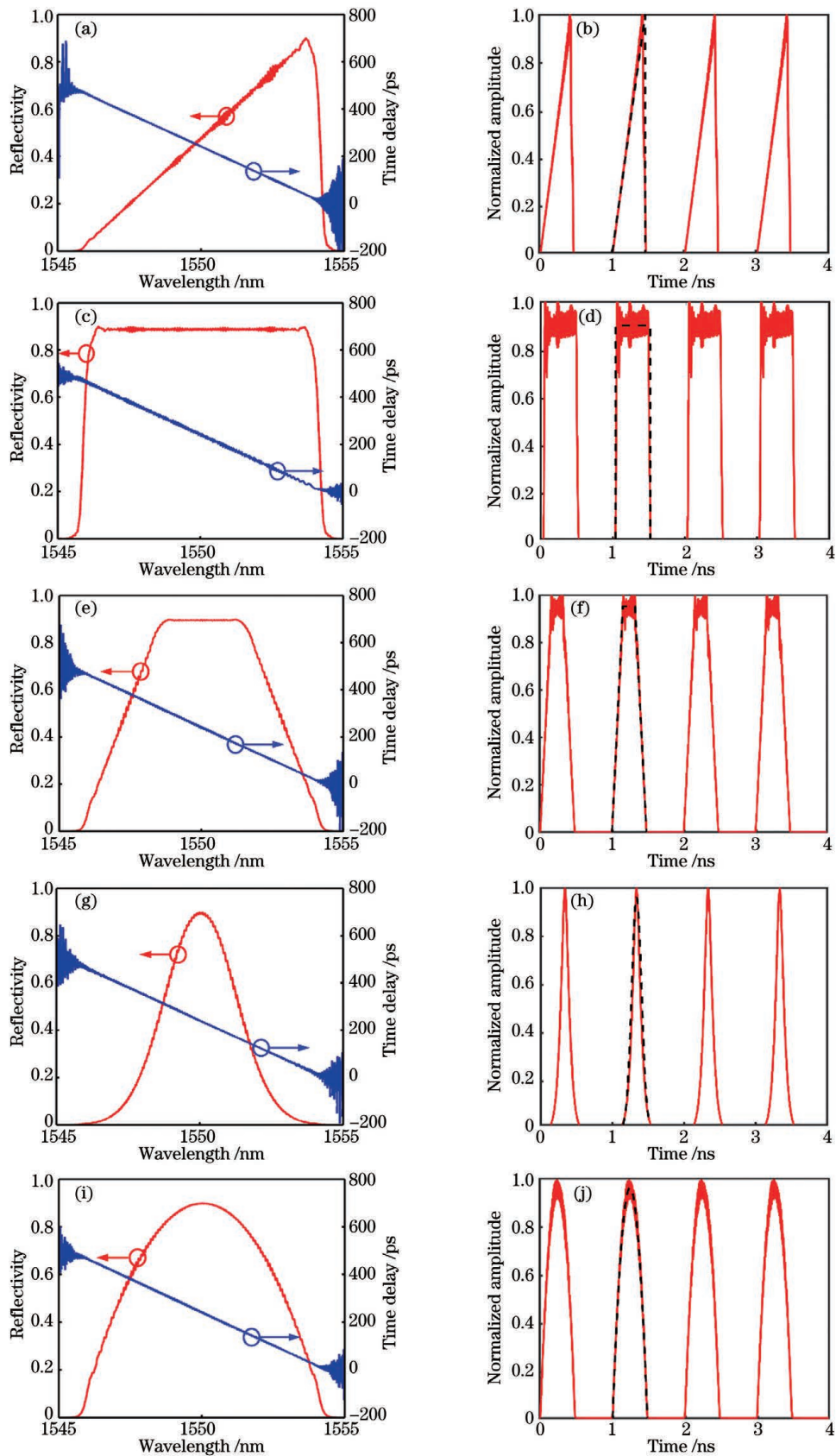


图 14 不同形状的反射谱及其相应形状脉冲产生的仿真结果。(a)(c)(e)(g)(i) 反射谱;(b)(d)(f)(h)(j)频率-时间映射得到的脉冲(黑色虚线为理想脉冲)

Fig. 14 Simulated reflection spectra with different shapes and the corresponding output pulses. (a)(c)(e)(g)(i) Designed reflection spectra; (b)(d)(f)(h)(j) output pulses after frequency-to-time mapping (black dashed lines are ideal pulses)

对应 3 dB 谱宽分别为 4.5, 8.3, 5.8, 3.0, 6.1 nm, 其中反射谱的微小纹波可以通过增大分段数  $W$  消除。为了验证设计光栅的频率-时间映射能力,用示波器测量光电探测器的输出电脉冲信号,得到对应的脉冲半峰全宽分别约为 0.25, 0.46, 0.33, 0.17, 0.34 ns。由图 14(b)(d)(f)(h)(j) 可见,生成波形与理想设计脉冲形状相比,相差不大;而矩形脉冲和梯形脉冲存在顶部振荡,这是由于光栅分段数  $W$  不足,以及反射谱边沿变化陡峭引起的。当分段数  $W$  足够大时,矩形脉冲和梯形脉冲的振荡将明显减小。此外,也可通过降低反射率最大值  $R_{\max}$ ,或增大反射谱宽来减小顶部

振荡。

最后,以抛物型脉冲产生为例研究不同光栅长度和脉冲重复速率对输出脉冲宽度和重复频率的影响。当光栅长度分别为 2.5 cm 和 8 cm 时,输出脉冲的半峰全宽分别为 0.17 ns 和 0.55 ns,如图 15(a) 和图 15(b) 所示,这是因为增大光栅长度将增加光谱宽度,从而拉伸由频率-时间映射得到的脉冲宽度。改变宽谱光脉冲源的重复频率可以控制输出脉冲的重复频率,当光脉冲源的重复频率分别为 0.5 GHz 和 2 GHz 时,频率-时间映射后得到重复频率分别为 0.5 GHz 和 2 GHz 的抛物脉冲序列如图 15(c) 和图 15(d) 所示。

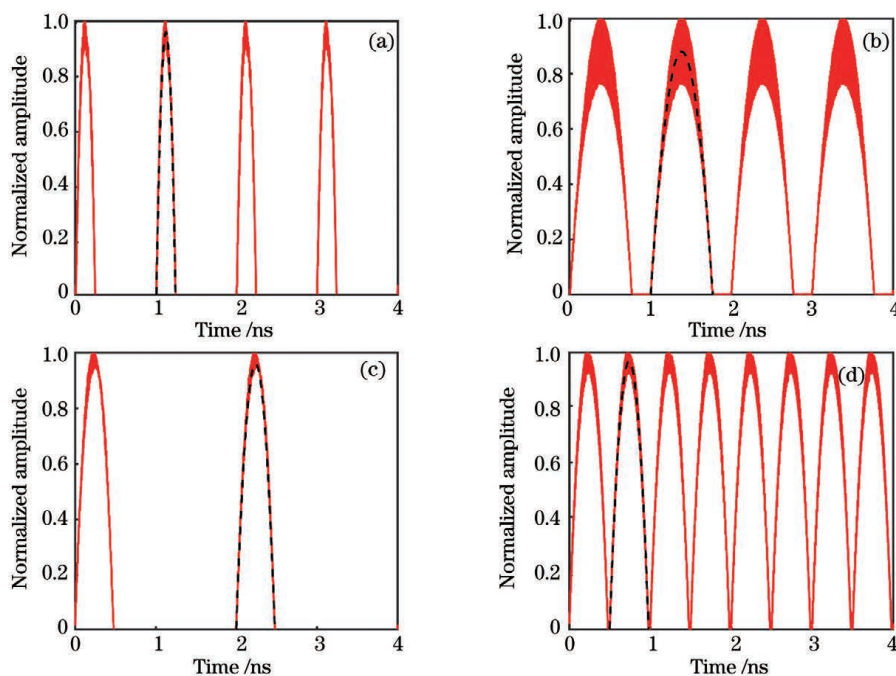


图 15 不同光栅长度和脉冲光源重复频率下的仿真结果。(a)(b)光栅长度分别为 2.5 cm 和 8 cm,频率-时间映射后得到的抛物型脉冲序列;(c)(d)宽谱脉冲光源重复频率分别为 0.5 GHz 和 2 GHz,频率-时间映射后得到的抛物型脉冲序列(黑色虚线为理想脉冲)

Fig. 15 Simulation results with different grating lengths and pulse repetition rates. (a)(b) Parabolic-shaped pulse sequence after frequency-to-time mapping for grating length  $L = 2.5$  cm and 8 cm, respectively; (c)(d) parabolic-shaped pulse sequence after frequency-to-time mapping for repetition rate of 0.5 GHz and 2 GHz, respectively (black dashed lines are ideal pulses)

## 4 结 论

基于频率-时间映射理论,提出并验证了一种任意波形产生的低成本、全光纤方案。简化具有任意形状反射谱的线性啁啾光栅设计机理,并结合啁啾光栅的色散特性能够实现不同的时域波形。通过控制光栅设计参数生成不同形状的光栅反射谱,频率-时间映射后成功产生多种对应形状的脉冲(如三角

形、锯齿形、矩形、梯形、抛物型、高斯型),验证了理论分析。由传输损耗公式推导得出光栅反射率与折射率调制幅度变化的关系,可对任意形状反射谱进行逆向设计;引入折射率调制幅度伸缩因子  $M_1$  和折射率调制顶点的归一化光谱位置  $M_2$  进一步优化反射谱形状,在保证高反射率的情况下( $\geq 90\%$ ),将设计误差降低到 10% 以下。由于折射率调制幅度突变,该方法应用于具有陡峭边沿反射谱的光栅时



设计误差会略高。Matlab 结合 Optisystem 软件仿真验证系统的可行性,并具体分析光栅参数,如光栅长度、啁啾系数、折射率调制幅值伸缩因子、折射率调制顶点的归一化光谱位置等对反射谱形状的影响,以及啁啾光栅长度和宽谱脉冲光源重复频率对输出脉冲时宽和重复频率的作用。此外,采用宽谱变换的极限脉冲光源,对应相干色散傅里叶变换,也可采用时域门控的连续宽谱光源,对应非相干色散傅里叶变换;宽谱脉冲光源成本高,频率-时间映射得到的脉冲信噪比也很高,而时域门控的连续宽谱光源成本低,但是需要多次时域平均处理来提高信噪比,无法实时产生波形。本文提出的任意波形产生方案简单灵活,对任意波形产生和应用研究具有一定参考价值。

### 参 考 文 献

- [1] Yao J P. Photonic generation of microwave arbitrary waveforms[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(15): 3723-3736.
- [2] Cundiff S T, Weiner A M. Optical arbitrary waveform generation[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(11): 760-766.
- [3] Yuan J, Ning T G, Li J, et al. Investigation on optical wavelength conversion based on SPM using triangular-shaped pulses[J]. *Optik*, 2016, 127(5): 3049-3054.
- [4] Kashiwagi K, Hasegawa A, Kurokawa T. Efficient wavelength conversion using sawtooth pulse generated by optical pulse synthesizer[C]//*Nonlinear Optics 2013*, July 21-26, 2013, Kohala Coast, Hawaii, United States. Washington, D. C.: OSA, 2013: NW3A.2.
- [5] Yang C S, Tang H L, Jiang H, et al. Beat-frequency matching for multi-target based on improved trapezoid wave with FMCW Radar[C]//*2011 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, September 14-16, 2011, Xi'an, China. New York: IEEE Press, 2011: 1-4.
- [6] Huh J, Azaña J. Generation of high-quality parabolic pulses with optimized duration and energy by use of dispersive frequency-to-time mapping [J]. *Optics Express*, 2015, 23(21): 27751-27762.
- [7] Ashrafi R, Li M, LaRochelle S, et al. Superluminal space-to-time mapping in grating-assisted co-directional couplers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 6249-6256.
- [8] Kirchner M S, Diddams S A. Grism-based pulse shaper for line-by-line control of more than 600 optical frequency comb lines [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(19): 3264-3266.
- [9] Li M, Han Y C, Pan S L, et al. Experimental demonstration of symmetrical waveform generation based on amplitude-only modulation in a fiber-based temporal pulse shaping system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(11): 715-717.
- [10] Peng H T, Wang J, Ma C, et al. Arbitrary waveform generation of enhanced high-order harmonics based on injection locking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0419001.  
彭海涛, 王菊, 马闯, 等. 基于注入锁定增强高次谐波的任意波形产生[J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0419001.
- [11] He Y T, Jiang Y, Zi Y J, et al. Frequency doubled triangular waveform generation based on injection locking and time-domain synthesis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0101005.  
何禹彤, 江阳, 訾月姣, 等. 基于注入锁定和时域综合的倍频三角波产生技术[J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0101005.
- [12] Sun Y Y, Bai G F, Hu L. Triangular photonic microwave-signal generation based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator and influence factors of its similarity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110602.  
孙亚园, 白光富, 胡林. 双平行马赫-曾德尔调制器产生三角形光子微波及相似度影响因素[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 110602.
- [13] Zhang K, Zhao S H, Jiang W, et al. Reconfigurable triangular and square waveforms generation using optical polarization division modulation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 170603.  
张昆, 赵尚弘, 蒋炜, 等. 基于光偏振复用调制的可重构三角波和方波产生的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 170603.
- [14] Li M, Azaña J, Zhu N H, et al. Recent progresses on optical arbitrary waveform generation[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2014, 7(3): 359-375.
- [15] Mu H Q, Wang M G, Li M. Power-efficient FCC-compliant UWB generator using polarization-maintaining FBG-based spectral shaper and incoherent wavelength-to-time mapping[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 50: 271-276.
- [16] Jason C, Yan H, Bahram J. Adaptive RF-photonic arbitrary waveform generator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(4): 581-583.
- [17] He H J, Shao L Y, Wang C, et al. Arbitrary spectral synthesis and waveform generation with HiBi fiber loop mirrors [J]. *IEEE Photonics Technology*

- Letters, 2018, 30(10): 943-946.
- [18] Wang C, Yao J P. Simultaneous optical spectral shaping and wavelength-to-time mapping for photonic microwave arbitrary waveform generation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(12): 793-795.
- [19] Wang C, Yao J P. Large time-bandwidth product microwave arbitrary waveform generation using a spatially discrete chirped fiber Bragg grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(11): 1652-1660.
- [20] Wang C, Yao J P. Phase-coded millimeter-wave waveform generation using a spatially discrete chirped fiber Bragg grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(17): 1493-1495.
- [21] Wang C, Yao J P. Fiber Bragg gratings for microwave photonics subsystems[J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22868-22884.
- [22] Abtahi M, Simard A D, Doucet S, et al. Characterization of a linearly chirped FBG under local temperature variations for spectral shaping applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(5): 750-755.
- [23] Al-Muraeb A, Abdel-Aty-Zohdy H. Optimal design of short fiber Bragg grating using bat algorithm with adaptive position update [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1-11.
- [24] Torres-Company V, Leaird D E, Weiner A M. Dispersion requirements in coherent frequency-to-time mapping[J]. Optics Express, 2011, 19(24): 24718-24729.
- [25] Ibsen M, Durkin M K, Zervas M N, et al. Custom design of long chirped Bragg gratings: application to gain-flattening filter with incorporated dispersion compensation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(5): 498-500.

## Arbitrary Waveform Generation Based on Simple Design of Linearly Chirped Fiber Bragg Grating and Frequency-to-Time Mapping

Li Min, Mu Hongqian<sup>\*</sup>, Wang Muguang, Wei Xinhang, Guan Xiangshuai

*Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

### Abstract

**Objective** The arbitrary waveform generator (AWG) has been widely utilized in wireless communications, radar systems, and signal processing due to its benefits of high frequency and large bandwidth. More emphasis has been paid to creating commonly used pulses (triangular, sawtooth, rectangular, parabolic, and Gaussian). Conventional AWG, based on electronics, has a sampling rate up to a few tens of GHz, whereas photonic-assisted AWG, which can break the speed and bandwidth limits of electronics, has become a topic of interest. Compared with other photonic-assisted AWGs, spectral shaping and frequency-to-time mapping can realize arbitrary waveforms with the advantages of low loss, strong system reliability, and easy integration. To further simplify the AWG system based on spectral shaping and frequency-to-time mapping, linearly chirped fiber Bragg grating (LCFBG) is operated as both the spectral shaper and dispersion device for the generation of frequency-chirped and phase-coded pulses. For the generation of arbitrary waveforms, it is difficult to employ CFBG as both the spectral shaper and dispersion device because of the complicated design method and fabrication process of CFBG with an arbitrary spectral response. This paper proposes a simple all-fiber method for arbitrary waveform generation based on the frequency-to-time mapping. The design scheme of CFBG with an arbitrary spectral response is simplified, and with the assistance of the dispersion characteristic of CFBG, the user-defined arbitrary waveform can be achieved accordingly.

**Methods** This study proposes an all-fiber and straightforward method for arbitrary waveform generation based on frequency-to-time mapping. First, the design scheme of LCFBG with an arbitrary spectral response is simplified. The relationship between refractive index modulation amplitude and grating reflectivity is derived from the transmission loss formula. By adjusting the amplitude scaling factor  $M_1$  and the normalized position of the spectral vertex of the refractive index modulation  $M_2$ , the reflective spectral response can be optimized to achieve high reflectivity ( $\geq 90\%$ ) and low error (less than  $10\%$ ). The effects of grating parameters, such as length and chirp coefficient, on reflection spectrum shape are analyzed. And then, frequency-to-time mapping introduced by the

dispersion characteristic of LCFBG has been utilized to convert the designed reflection spectrum of LCFBG into a temporal waveform. In this way, the user-defined arbitrary waveform can be realized. Generated pulse shape and temporal width can be adjusted flexibly by redesigning the LCFBG, and the repetition rate is identical to that of the broadband optical source. This simple and flexible method may provide a useful reference for arbitrary waveform generation and application.

**Results and Discussions** The system feasibility and performance are analyzed and verified on Matlab and Optisystem platforms. Triangular-shaped LCFBG is taken as an example to demonstrate the proposed design scheme of LCFBG. To realize target triangular-shaped LCFBG, we derive the refractive index modulation using the transmission loss formula and obtain the corresponding reflection spectrum via the transfer matrix method. The amplitude scaling factor  $M_1$  and normalized position of a spectral vertex of the refractive index modulation  $M_2$  is introduced to reduce the error between the target triangular-shaped spectrum and obtained reflection spectrum (Fig. 2 and Fig. 3). In addition, the effects of grating length and chirp coefficient on the spectral bandwidth are analyzed (Fig. 5 and Fig. 6). We explore the effects of the grating period and index modulation depth errors introduced in the grating fabrication process for practical applications. The grating period error has a more serious effect than index modulation depth error (Fig. 7 and Fig. 8). Besides the triangular-shaped spectrum, the proposed LCFBG design scheme also caters to LCFBG with an arbitrary spectral response. We present the simulation results of LCFBGs with sawtooth-, rectangular-, trapezoidal-, Gaussian-, and parabolic-shaped spectra (Fig. 4 and Figs. 9–11). User-defined arbitrary waveforms are then realized with the help of LCFBG's dispersion characteristic. To examine and test the system viability, examples of commonly used key waveforms (triangular, sawtooth, rectangular, trapezoidal, Gaussian, and parabolic pulses) are employed (Fig. 13 and Fig. 14). Small amplitude oscillation on frequency-to-time mapped waveforms are induced by both limited uniform pieces in transfer matrix method and steep leading edge of the reflection spectrum.

**Conclusions** Based on a simple design of LCFBG and frequency-to-time mapping, a low-cost, all-fiber scheme for arbitrary waveform generation is suggested in this paper. The relationship between grating reflectivity and refractive index modulation amplitude is derived from the transmission loss formula, leading to the reverse design of LCFBG with an arbitrary spectral response. The amplitude scaling factor  $M_1$  and the normalized position of a spectral vertex of the refractive index modulation  $M_2$  are introduced to optimize the reflective spectral response with high reflectivity ( $\geq 90\%$ ) and low error ( $\leq 10\%$ ); and yet, for designing LCFBG reflection spectrum with steep leading edge, the error will be higher. The dispersion characteristic of LCFBG maps the specified reflection spectrum into a temporal waveform. We tested the system's practicality and performance using the Matlab and Optisystem platforms. After frequency-to-time mapping, various waveforms (triangular, sawtooth, rectangular, trapezoidal, Gaussian, and parabolic waveforms) have been successfully created.

Furthermore, both transform-limited pulse sources and temporally-gated incoherent sources can provide broadband spectrum for arbitrary waveform generation, corresponding to coherent and incoherent frequency-to-time mapping. Compared with coherent frequency-to-time mapping used in this manuscript, incoherent frequency-to-time mapping has a lower cost but requires averaging operation to improve the signal-to-noise ratio, hindering real-time measurement. This simple and flexible method of arbitrary waveform generation has a certain reference value for arbitrary waveform generation and application.

**Key words** optical communications; arbitrary waveform generation; spectral shaping; frequency-to-time mapping; chirped fiber Bragg grating; triangular filter

**OCIS codes** 060.5625; 320.5540; 060.3735; 060.2330