

·测试、试验与仿真·

光时域积分器的性能分析与实验研究

张磊, 宁提纲, 李红梅, 李晶

(北京交通大学 光波技术研究所, 北京 100044)

摘要: 阐述了光时域积分器的实现方案, 对谐振腔型、布拉格光栅型、离散型、组合式等光时域积分器的实现方案和性能指标进行了分析比较, 指出了不同光时域积分器的原理和主要问题, 并对光时域积分器的研究方向和发展趋势做了一定探讨。详细论述了谐振腔型光积分器的组成、原理、性能、仿真、实验、应用和发展情况。

关键词: 光信号处理; 光时域积分器; 全光通信

中图分类号: TM503.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-04-0050-10

Performance Analysis and Experiment Research on Optical Temporal Integrator

ZHANG Lei, NING Ti-gang, LI Hong-mei, LI Jing

(Institute of Light Wave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The implementation schemes of optical temporal integrator are described. The implementation schemes and characteristics of optical temporal integrators such as resonant cavity, fiber Bragg grating, discrete and combination types are analyzed and compared. The principles and main problems of different integrators are figured out. The research directions and development trends of future optical temporal integrators are also discussed. The compositions, principles, performances, simulation, experiments, applications and developments of resonant cavity optical integrators are discussed.

Key words: optical signal processing; optical temporal integrator; all optical communication

随着全球通信量的急剧上升, 全光通信因其具有光通信大容量、高速度、抗干扰等诱人的特性, 受到研究者们越来越多的关注。光时域积分器作为全光信息处理的基本器件, 能够在光域对任意输入光信号进行时间积分运算。光时域积分器可以应用于光信号存储^[1]、全光计算^[2]、光脉冲整形和暗孤子检测^[3]、光模数转换^[4]等领域。目前, 光时域积分器主要实现方案可分为谐振腔型积分器、布拉格光栅型积分器、离散型积分器、组合式积分器等。根据积分器阶数不同, 可以分为一阶光时域积分器和高阶光时域积分器; 根据积分器工作时是否需要

源器件, 可分为有源积分器和无源积分器; 根据积分参数不同, 可分为光场积分器和光强积分器。文中分析比较了不同积分器实现原理及其性能。

1 谐振腔型光积分器

1.1 法布里珀罗谐振腔光积分器

1.1.1 组成结构

法布里珀罗(FP)谐振腔由两个反射镜面和中间的干涉腔组成。根据干涉腔结构可分为本征型

收稿日期: 2016-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(61177069)资助课题

作者简介: 张磊(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事光通信与光电子器件的研究。

(图 1a)和非本征型(图 1b)。本征型干涉腔一般由单模入射光纤和反射镜面组成,反射镜面可采用经过处理的光纤端面构成;非本征型干涉腔一般是空气或固体介质。

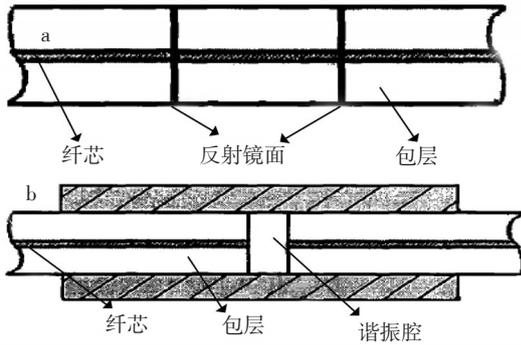


图1 本征型与非本征型FP谐振腔

在非本征的腔体中放置半导体光放大器 SOA, 构成 FP-SOA 光积分器的组成结构。

1.1.2 原理

从数学 k 角度看,理想积分器需要完成对输入函数的积分运算,即若输入信号为 $x(t)$, 输出信号 $y(t)$ 可表示为

$$y(t) = x(t) \times u(t) = \int_{-\infty}^t x(\tau) d\tau \quad (1)$$

容易获得其频域的传递函数为

$$U(\omega) = F(u(t)) \propto 1/j(\omega - \omega_0) \quad (2)$$

其中, $u(t)$ 是阶跃函数; ω 是输入信号的光频率; ω_0 是输入信号的载波频率。

FP 谐振腔积分器的原理^[5]如图 2 所示。

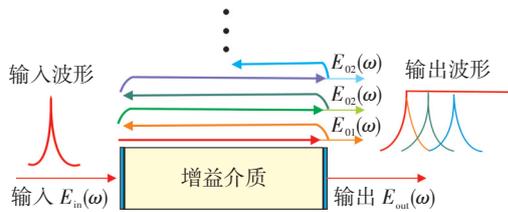


图2 有源FP腔积分器原理图

其传递函数^[5]可以表示为

$$H(\omega) = \frac{\sum_{i=1}^{+\infty} E_{oi}(\omega)}{E_{in}(\omega)} = \frac{\sqrt{(1-R_1)(1-R_2)G_s} \cdot e^{-j\omega\tau}}{1 - \sqrt{R_1 R_2} G_s e^{-j2\omega\tau}} \quad (3)$$

令 $\sqrt{R_1 R_2} G_s = 1$, 谐振频率 ω_0 附近的传递函数可表示为

$$H(\omega) \approx \frac{\sqrt{(1-R_1)(1-R_2)G_s}}{e^{j(\omega-\omega_0)\tau} - e^{-j(\omega-\omega_0)\tau}} = \frac{\sqrt{(1-R_1)(1-R_2)G_s}}{j2 \sin[(\omega-\omega_0)\tau]} \approx \frac{\sqrt{(1-R_1)(1-R_2)G_s}}{j2(\omega-\omega_0)\tau} \propto \frac{1}{j(\omega-\omega_0)} \quad (4)$$

上式表明,FP 谐振腔可以作为时域积分器。

无源 FP 谐振腔型积分器时间窗口有限是由光在谐振腔中传输损耗引起的。在谐振腔中引入增益补偿机制,如半导体增益放大器 SOA 作为增益介质,形成有源积分器,可以补偿损耗、扩展积分器的时间窗口。

1.1.3 仿真

对 FP 谐振腔积分器数值仿真。其传输谱^[6]如图 3 所示。自由谱范围(FSR)为 66.5 GHz。中心频率处拥有最大幅值,且中心频率处发生相位跳变,与理想积分器的特性一致。

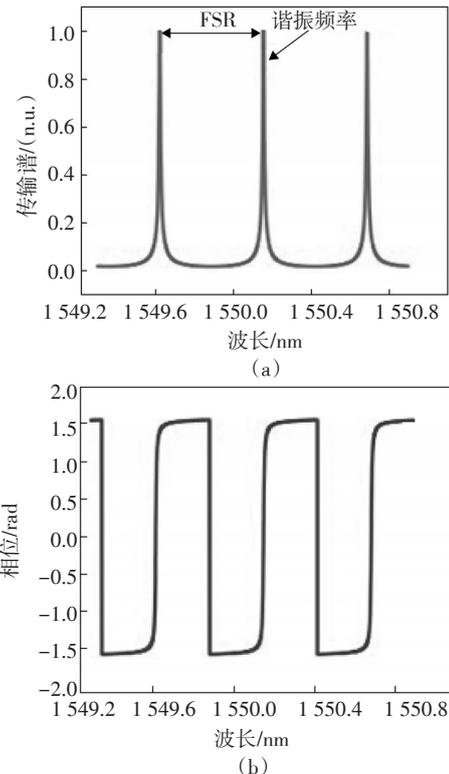
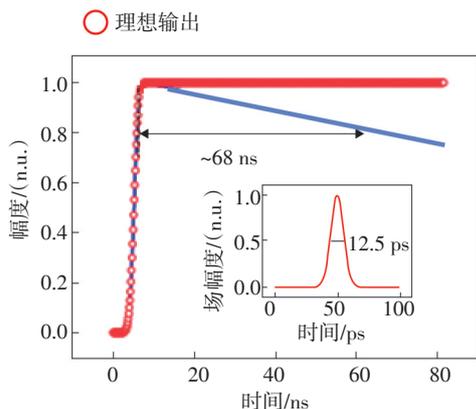


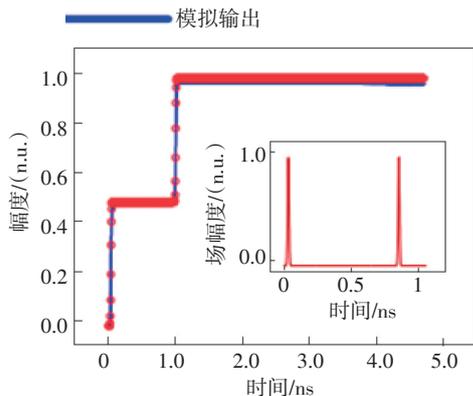
图3 FP腔积分器传输谱

通过不同输入信号来测试积分器的性能。当输入信号为3 dB宽度12.5 ps的高斯脉冲时,在积分时间窗口68 ns内,图4为FP腔积分器仿真结果^[6]。

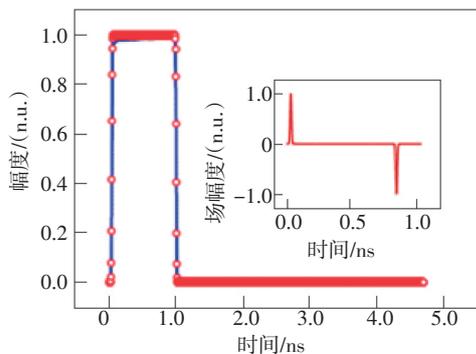
实际积分曲线与理想积分曲线近似相同(图4a)。当输入两个时延差为820 ps的相同高斯脉冲时,输出阶跃信号叠加为图4b阶梯信号。当输入两个时延差为820 ps的相同高斯脉冲相位相差 π 时,输入阶跃信号相消,输出为类方波信号(图4c)。图4d表明,输入方波信号时的波形为双峰脉冲。从图4b、图4c可知,已知脉冲的幅度和相位,根据积分结果,能求得未知脉冲的幅度和相位。



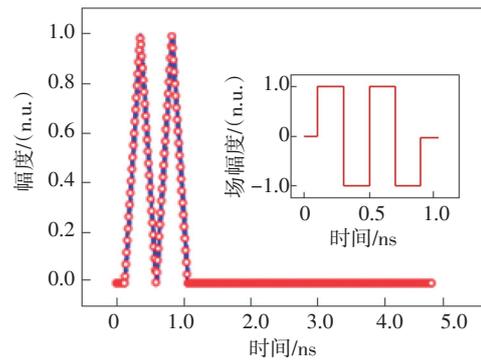
(a)实际积分曲线与理想积分曲线近似相同



(b)输出阶跃信号叠加为阶梯信号



(c)输入阶跃信号相消,输出为类方波信号

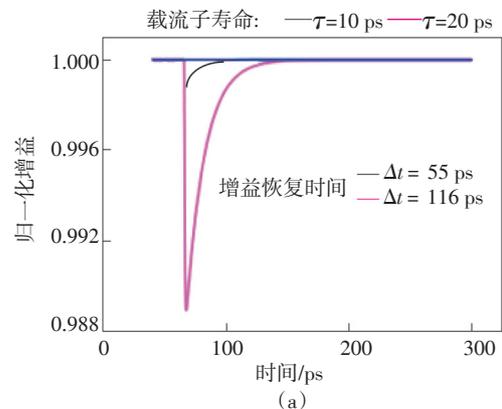


(d)输入方波信号时的波形为双峰脉冲

图4 FP腔积分器仿真结果

通过Q因子调整积分时间窗口,使注入电流接近阈值电流能提高Q因子获得更大积分窗口。操作带宽决定于自由谱宽度FSR。 $FSR = c/2nL$,真空中光速 c 固定,通过调整折射率 n 和谐振腔长度 L 可以控制操作带宽。该积分器通过在有源区注入电流的变化引起折射率变化,结果表明,间接改变折射率方式调节操作带宽的范围不大。而减少谐振腔长度增大操作带宽的同时会降低增益,因此选用大模式增益的SOA实现增益和操作带宽的折衷,网络模式增益为 4.1 cm^{-1} 时,操作带宽达180 G。

以上分析均建立在SOA的增益为常数的基础上,进一步考虑了SOA本身特性对积分器的影响^[6]。如SOA增益恢复时间,它是补偿过信号脉冲后,SOA本身增益曲线出现下降后恢复到初始值的时间。增益恢复时间影响积分时间窗口宽度。如图5所示^[6]。不同颜色曲线表示不同增益恢复时间,蓝色理想情况作为参照,黑色55 ps,粉色116 ps,黑色和粉色的积分时间窗口分别为4.5 ns和1.5 ns。因此,该积分器需要更快的增益恢复时间获得良好性能。改善增益恢复时间的手段包括提高微分增益和内建载流子储存区等。



(a)

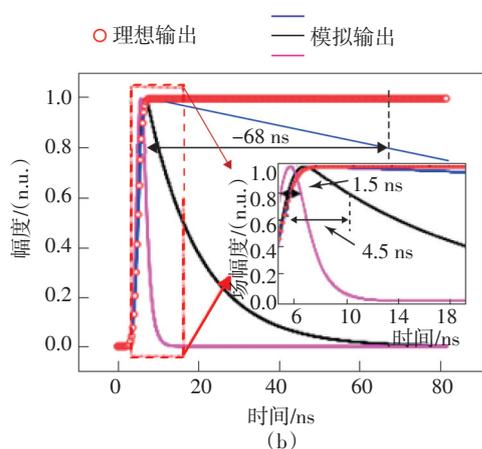


图5 增益恢复时间对积分时间窗口的影响

此外,作者分析了噪声的影响,实际应用中该积分器面临的挑战等。要获得更大的时间窗口需要高Q因子,即注入电流接近阈值电流,同时需要更准确的电流源和更稳定的SOA。仿真结果^[6]表明,该积分器的时间窗口达160 ns,操作带宽为180 GHz,时域带宽积(TBP)为28 800。

1.1.4 应用和发展

作为全光信号处理设备的基本组件,该类型光时域积分器能用作光信号记忆单元^[1]、全光计算^[2]、光模数转换^[4]等领域。其潜在需求是单片集成电路上的积分应用,作为全光计算机的基础组成部分。FP腔积分器发展趋势是单片集成电路化、结构简化,通过减少FP腔中的信号损耗或者优化增益补偿机制,使结构简单易于与其他设备集成,进一步改善器件兼容性。

1.2 微环谐振器光积分器

1.2.1 组成结构

微环是一种微米级环形光波导构成的谐振器。特定波长的光经过一周传输后能重现自身,其他波长的波不能重现。微环谐振腔主要分为全通型和上下载型,全通型有环状波导和一根直波导组成;上下载型微环谐振器环状波导和两根直波导构成。根据环状波导的数量,又分为单微环和多微环结构。

传统微环谐振器积分器为单微环上下载型结构如图6所示。由环状波导和两平行波导组成。

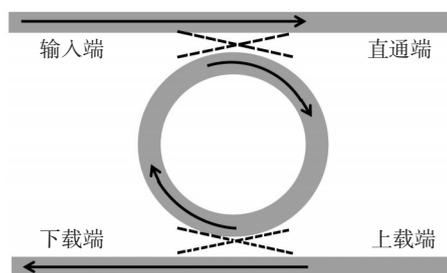


图6 上下载型单微环谐振器结构图

根据平行波导与环状波导是否同一平面又可分为横向耦合型和垂直耦合型,两者分析方法相似,在此仅介绍同平面横向耦合型微环谐振器。

1.2.2 原理

微环谐振器型光积分器是四端口器件,输入端和上载端输入信号,直通端和下载端输出信号,为研究方便,仅给输入端输入信号,从下载端输出的信号具有理想积分器输出信号特征。微环谐振器型可以等效为FP腔^[7],其输入输出关系如图7^[7]所示。

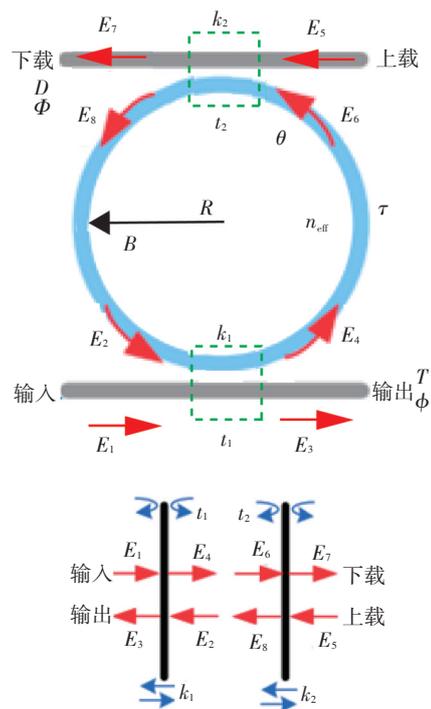


图7 上下载型微环模型与FP腔干涉仪模型

下载端输出信号 E_2 与输入信号 E_1 之比等效于

FP腔型积分器的传输函数,其下载端光强度谱线与有效相移满足谐振点处幅值最大、相位跳变的积分器特性,因此微环谐振器可以作为积分器。

1.2.3 性能

理想积分器应该能在没有外部激励时保持光信号强度不变,积分时间窗口理论上无限长。实际上由于实际信号的损耗,无源微环谐振器的积分时间窗口有限,小于50 ps。考虑到增益补偿机制将使器件复杂化且引入噪声,故微环积分器不引入增益补偿。在单片集成电路上,一个基于无源微环谐振器的光时域积分器得以实现^[8]。其信号分辨率为8 ps,积分窗口为800 ps,处理速度200 GHz左右,时域带宽积接近100。

1.2.4 实验

对微环积分器的设计验证实验装置^[8]如图8。

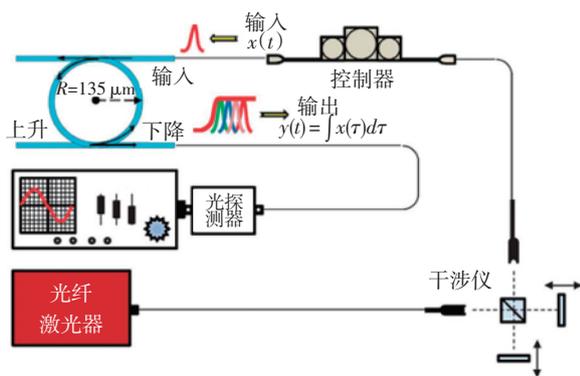
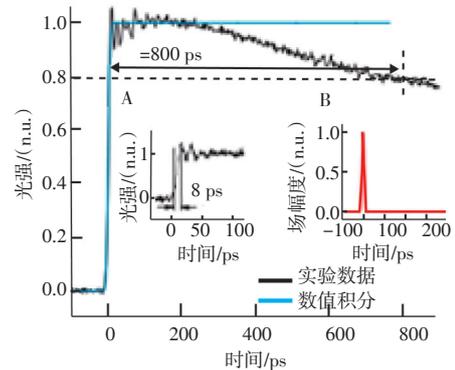


图8 微环积分器实验装置

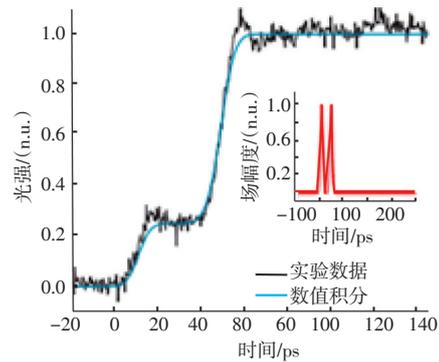
首先由光纤激光器发射高斯脉冲序列,然后使用基于干涉仪的脉冲整形器和偏振控制器产生待研究输入波形,将产生的波形输入微环谐振器的输入端,用光电检测器和示波器检测输出端口波形与仿真波形的一致性。

实验结果如图9^[8],红色曲线表示输入信号,蓝色曲线表示仿真输出信号,黑色曲线表示实验测得数据。单脉冲输入,800 ps时间窗口内与仿真结果一致(图9a),图9aA表示光电检测器的分辨率为8 ps的上升时间。双脉冲输入同相位不同延时的两个脉冲输出结果为阶梯状曲线(图9b、图9d);双脉冲输入 π 相位差不同时延的两个脉冲输出结果相互抵消,输出矩形脉冲(图9c、图9e)。此外还测试了复杂包络信号(FWHM为1 340 ps的啁啾脉冲)

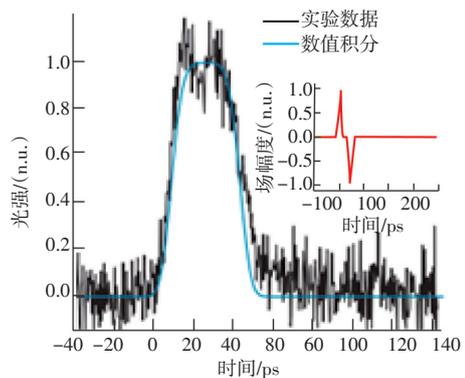
的输出曲线,实验结果与仿真曲线吻合较好。



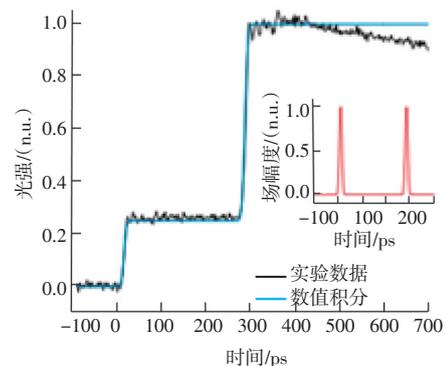
(a)



(b)



(c)



(d)

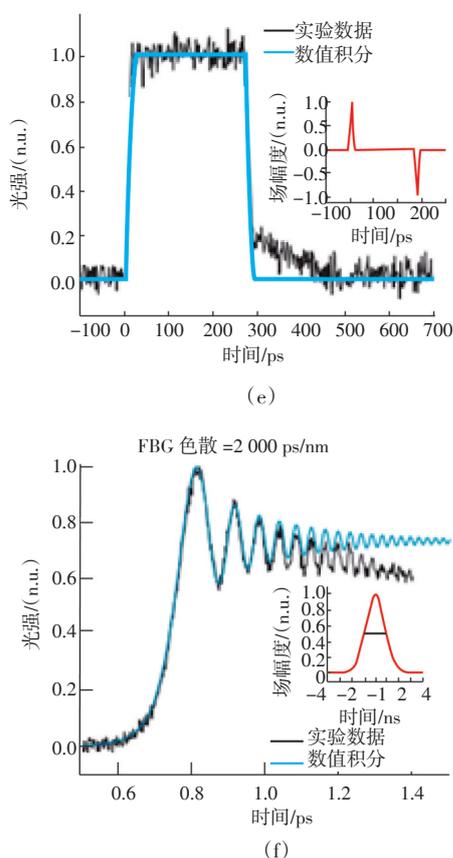


图9 微环积分器仿真和实验结果

1.2.5 应用与发展

作为高速光信息处理的基本组件,人们做了基于单片集成电路(PIC)的微环积分器研究^[8-10],该积分器能用于脉冲整形以及微分方程的实时光计算。

一方面,目前微环积分器积分时间窗口较窄,处理带宽有限,需要扩展积分时间窗口,增加处理带宽。在基于InP-InGaAsP材料的系统里^[9],增加半导体增益放大器SOA,SOA补偿微环谐振器的插入损耗,通过注入电流调节相位调制器实现微环波长调节。若提高了Q因子,微环直径会变大,自由谱带宽下降,处理信号的带宽下降;若实现大处理带宽同时提高Q因子,需要合理选取微环谐振器的直径。实现PIC上更长的积分时间窗口和可调操作波长的积分器。实验显示,积分时间窗口提高到6 331 ps,性能提高了两个数量级。

另一方面,可以寻找和设计不同形式的微环积分器,扩充积分器的实现种类和应用范围,如正在研究的光纤型光时域积分器。文献[11]、文献[12]指

出,光纤能够制作成微环谐振器。由于光纤型微环谐振器具有与光纤耦合更好等特性,该类型积分器很有研究价值。

2 布拉格光栅光积分器

2.1 光纤布拉格光栅积分器

2008年, José Azaña 在《optics letters》上发表了基于均匀布拉格光栅反射谱的光积分器的研究成果^[13]。相对于谐振腔型积分器的“频域研究方法”,光纤布拉格光栅(FBG)积分器采用“时域研究方法”,即通过分析理想时域积分器的时域响应为阶跃函数,从而把时域积分器视为特定时间长度上的无源线性滤波器,该滤波器在时间窗口内提供恒定时间脉冲响应。弱耦合均匀FBG的反射谱经过参数调整接近理想积分器的时域响应函数时,能实现时域积分器。

满足一定条件^[13]时,均匀FBG反射谱符合一阶积分器的时域响应。该积分器的积分时间窗口受光栅制造长度的限制,理论上可达1 ns,而能量效率依赖于输入信号的频谱宽度,频谱越宽,通过线性滤波器被过滤的频率成分越多,能量效率越低。同时,处理误差随着信号时间变长会增大。仿真表明,1 cm长度的光栅在193 THz谐振频率条件下,积分窗口为96.87 ps。

此外,人们还使用切趾布拉格光栅改进FBG积分器的设计^[14]来提高能量效率。

2.2 相移布拉格光栅积分器

相移布拉格光栅(PFBG)由两个均匀的布拉格光栅和中间的 π 移相器组成, π 移相器的作用是构造位于FBG反射带宽中心的谐振条件。PFBG积分器结构^[15]如图10所示。

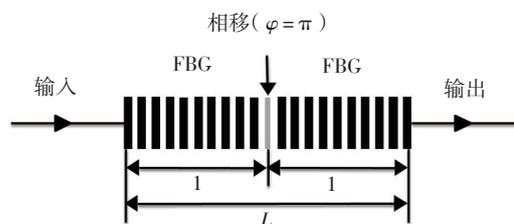


图10 PFBG积分器结构图

根据耦合模理论,其传输谱经过 z 变换可得

$$H_z(\omega) = \frac{[\cosh^2[\arctan h(r)]]^{-1}}{1 - |r|^2 z^{-1}} \quad (5)$$

当极点值 $z=r_2$ 时,其幅度和相位响应符合积分器转移函数特征。

对因果系统, $r=1.0$ 时,该积分器最接近理想积分器。但 $r=1$ 不能实现,只能接近,经仿真比较 $r=0.9999$ 时,时域积分器平均误差和能量效率相对合适。该积分器典型操作带宽为几百GHz,输入高斯脉冲FWHM为10~10000,能量效率为 $1.4e^{-3} \sim 75.9$,总平均误差为1.83~52.8。

3 离散型光积分器

3.1 梳状延迟线光积分器

2016年1月,《Optics Letters》发表了JIEJUN ZHANG和JIANPING YAO基于多通道布拉格光栅(MFBG)的光积分器的文章^[16]。该积分器结构^[16]如图11所示。

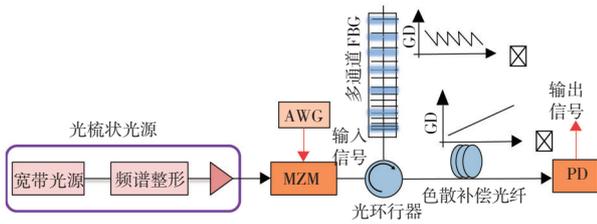


图11 梳状延迟线光积分器系统结构图

该积分器主要由MFBG和色散补偿光纤(DCF)组成。原理上,理想积分时域表达式的连续时间积分能够近似表示为离散数值累加的形式,有下式

$$y(m) = \sum_{n=0}^{m-1} x(t_0 + n \leftrightarrow \Delta t) \Delta t \quad (6)$$

这意味着输入信号的不同时间延迟值累加能够表示输入信号的积分。MFBG能对输入信号进行不同时长但时间间隔相等的时延,在输出端将不同时延信号按次序累加来获得积分结果。为了使每个通道内的FBG群时延(GDD)不引起输入信号畸变,需要消除每个通道内的群时延,该系统通过外接DCF抵消通道内的群时延。而相邻通道之间,存在相同时间间隔的群时延。因此,多通道布拉格光栅和DCF组成带有阶跃群延迟响应的光梳状延迟线积分器^[16]。积分过程如图12所示。

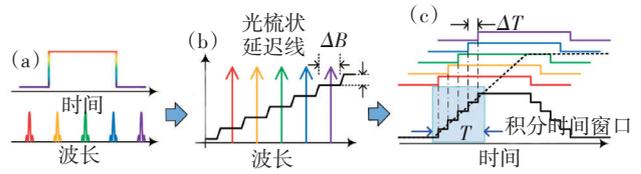


图12 梳状延迟线积分器原理图

时域方波被带有阶跃群延迟响应的梳状延迟线调制,得到图4b中的响应。每个延迟线位于通道中心。响应在积分时间窗口内可以近似为理想积分器输出曲线(虚线)。

实验表明,该积分器能处理带宽2.9GHz,积分时间窗口7ns,时域带宽积为20.3。操作带宽主要受到两个因素限制,其一是输入信号要小于上式中的 $1/\Delta t$,这样时延副本累加结果才能准确反映输入信号的积分;其二是每个通道内阶跃信号群延迟响应的带宽 ΔB ,双边带输入信号带宽需要小于 $\Delta B/2$ 。系统中的光电转换器件如调制器和光检测器PD也影响信号带宽。时延带宽积由光梳延迟线的数目决定,约为 $N-1$,积分时间窗口 $T=(N-1)\Delta t$ 。

3.2 牛顿-科斯特(Newton-Cotes)光积分器

牛顿-柯特斯积分法的基本思想是用高次的插值求积多项式去逼近被积函数,以获得高精度的积分值。据此原理设计出的积分器^[17]是离散时间积分器。P阶牛顿科斯特数字积分器的传递函数可以表示为

$$H_{mp}(z) = T \cdot \left[\sum_{i=0}^m b_i z^{-i} \right] \times \left[\frac{1}{1 - z^{-p}} \right] = T \cdot \left[\sum_{i=0}^m |b_i| e^{j\varphi_i} z^{-i} \right] \times \left[\frac{1}{1 - z^{-p}} \right] \quad (7)$$

借助FIR与IIR滤波器级联组成牛顿-科斯特积分器,其传递函数为

$$H_{mp}(z) = \left[\frac{-\sqrt{Gd^2}}{m+1} \right] \left[\sum_{i=0}^m |k_i| e^{j\varphi_i} e^{j\varphi_i} z^{-i} \right] \times \left[\frac{1}{1 - \sqrt{G(1-d)^2} e^{-2\alpha L_p} z^{-p}} \right] \quad (8)$$

其中,抽头系数幅值为 $|k_i| = \sqrt{0.5 - 0.5 \cos \varphi_i}$,相位为 $\varphi_i = \tan^{-1} \left[\frac{\sin \varphi_i}{\cos \varphi_i} \right]$,光强度增益 G 为 $G = \frac{1}{(1-d)^2 e^{-2\alpha L_p}}$,

$e^{-2\alpha L_p}$ 是波导环造成的强度损耗; α 是波导环损耗; L_p 是波导环长度。 φ_i 在 $0\sim 2\pi$ 变化。 d 为定向耦合器强度耦合系数; $m+1$ 为 FIR 滤波器抽头个数。

当 $p=1$ 时,一阶牛顿科斯特积分也即梯形积分,该积分器为梯形光积分器。其中 H_{31} 最接近理想积分器的幅度响应。 H_{11} 的幅度响应可以用来实现脉冲整形,将亮孤子转换为能够稳定传输的暗孤子。该积分器作者实验论证了牛顿科斯特积分器的实现可能性,并使用该积分器实现脉冲整形,将亮孤子脉冲转换成暗孤子脉冲。

该积分器处理速度有限,典型值为 GHz。

3.3 色散光积分器

由于连续时间积分可近似成离散的时延值累加,因此可借助光强度调制和群速度色散获得输入时间信号的不同时延副本,将这些时延副本累加可得到输入信号的强度积分^[18]。输入光强度信号副本主要由调制器产生,时延主要由单模光纤产生的群速度色散产生。

由于积分时间窗口也即色散带宽积 $T_h = \Delta\omega|\varphi|$, ($\Delta\omega$ 是光强度调制器的频谱带宽; φ 是群速度色散),输入光强度信号的全宽 T 应不大于积分时间窗口;另外虽然增大群速度色散能提高积分时间窗口,但群速度色散应该足够小以保证输入光强度信号不发生畸变,若最快输入信号时间特征为 dt ,可知 $|\varphi| < dt^2$ 。群速度色散应满足条件为

$$\frac{T}{\Delta\omega} \leq |\varphi| < dt^2 \tag{9}$$

本设计方案要求非相干光源的能量谱均匀分布,如矩形分布。由于能量谱的形状可以看作时域上光强信号的累积和的权重,因此能量谱的均匀性决定了积分过程的精确性,设计采用类方波能量谱。该积分器的积分时间窗口几纳秒,能够处理时间特征皮秒级的信号。

由于单模光纤色度色散较小,使用千米长的单模光纤来实现较大时间窗口。系统中非全光器件如非相干光源、光电调制器成为系统处理带宽的瓶颈,导致不能处理大带宽信号。人们也提出了模式色散的实时光强度积分器^[19],系统中不含非相干光源、光电调制器等复杂光电器件,系统得以简化,同时由模式色散大于色度色散,因此使用的光纤长度减小,避免了信号在超长单模光纤中受到高

阶色度色散和极化模色散的影响。且波长与带宽相互独立,能处理实时超快信号的强度积分。

4 组合式光积分器

为了提高色散型积分器的性能,有人提出一种级联离散时间积分器和高速模拟时间限光强度积分器的积分器实现方案^[20]。该积分器综合了离散时间光积分器和时限光强度积分器的优点,具有更大的时间窗口,即更大的 TBP。该积分器的原理^[20]如图 13 所示。

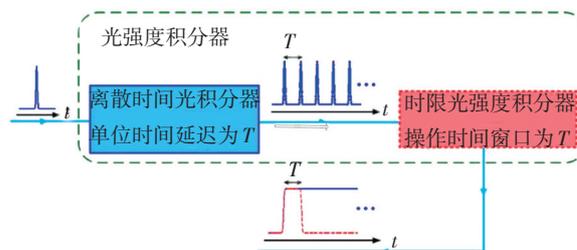


图 13 组合式光积分器原理图

离散时间光积分器输出时间延迟间隔为 T 的 N 个时延信号,时限光强度积分器将每个时延信号扩展为时间 T 的方波响应波形,因此信号处理的时间窗口为 NT ,扩大了 N 倍,进而系统的 TBP 也扩大了 N 倍^[21]。该设计提供时限光强度积分器的处理速度(几十 GHz),扩展了离散时间积分器的时间窗口。相对单一的积分器,该组合式积分器扩展了时间窗口,提高了积分器的性能。

5 高阶时域积分器

实现高阶时域积分器的最直接方法是级联上述任意的一阶时域积分器。如使用 Er-Yb 掺杂的有源光纤制作的级联 FBG 实现的高阶时域积分器^[22]。

高阶时域积分器能通过多相移结构来实现,避免了因直接级联一阶积分器造成能量效率降低、误差增大和器件复杂度增大等缺点。一种多相移布拉格光栅(MPFBG)结构积分器^[23]结构如图 14。



图 14 多相移布拉格光栅积分器结构图

其工作条件是被相移部分分开的每部分均匀FBG的峰值反射率接近100%。该积分器的处理带宽仍在数十GHz,已远大于电积分器的操作带宽极限。

根据耦合模理论,相移分布反馈式半导体光放大器(DFB-SOA)的传递函数与理想积分器的传递函数近似成正比^[24],可以实现积分功能。通过在激光发射阈值附近增加注入电流能获得更高的能量效率和更大的积分时间窗口。其多相移结构高阶积分器性能更优。

6 结论

分析了多种不同类型光时域积分器的设计方案和性能,重点阐述了谐振腔积分器的组成、原理、性能、仿真实验和应用发展,论述了积分器的研究方法。为更直观地理解上述各不同积分器的结构、原理、性能和应用,如表1所示,对不同积分器做了简要比较。

光时域积分器的现有实现方案均从理想光时域积分器的积分运算公式出发开始研究。既有从理想积分器频域响应分析传递函数的“频域研究方法”,找到其他器件传递函数与理想积分器传递函数的一致性研究的谐振腔型积分器。也有从积分

运算公式分析时域响应为阶跃函数的“时域研究方法”出发,把积分器看作线性滤波器的FBG积分器。还有通过连续时间积分转换为离散时延信号累加原理设计的离散时间积分器,梳状延迟线采用多通道FBG实现不同时延,牛顿-科斯特积分器通过可调抽头系数和移相器实现不同时延,色散积分器通过色度色散和模式色散实现不同时延。

研究器件传递函数,找到或调整参数设计近似得到器件传递函数与理想光时域积分器数学模型的一致性,使得器件传递函数在频域与理想传递函数频域形式 $1/j(\omega - \omega_0)$ 成正比。即可从原理上说明器件能作为积分器。通过这种分析方法得到的光时域积分器如谐振器型积分器,参数性能通常会优于其他类型的光时域积分器(如表1所示),这是因为该类型积分器设计时严格遵循了理想时域积分器的传输特性。仿真与实验结果^[6-8]均表明,时间窗口、操作带宽、时域带宽积在数百量级。谐振腔型积分器能做得尺寸更小,有利于将这种积分器应用到集成电路中,实现单片集成的光信息处理基础器件,为全光计算的发展打下坚实基础。此外,不同积分器均有不同应用,如其根据各自特征,在与相同器件协同工作时,同种器件构成的光积分器兼容性会更好。

表1 各不同光时域积分器的简要比较表

种类	结构	原理	性能	应用
谐振型积分器	FP腔积分器	有源FP谐振腔	FP谐振腔传输谱	时间窗口160 ns, 操作带宽180 GHz, 时域带宽积28 800
	微环积分器	上下载型微环	微环下载端传递函数	时间窗口800 ps, 操作带宽200 GHz, 时域带宽积100
布拉格光栅型	FBG积分器	布拉格光栅	弱耦合均匀FBG反射谱	时间窗口96.87 ps
	PFBG积分器	相移FBG	相移FBG传输谱	操作带宽数百GHz
离散型	梳状延迟线光积分器	多通道FBG	按连续积分可近似于离散值相乘累加	时间窗口7 ns, 操作带宽2.9 GHz, 时域带宽积20.3
	Newton-Cotes积分器	FIR、IIR波导滤波器	数值积分方法: 牛顿科斯特积分法	操作带宽约GHz
	色散积分器	多模光纤	模式色散	时间窗口几ns
组合式	离散型与光强积分	组合提高性能	时间窗口和时域带宽积比单色散型扩大N倍	1、光信号记忆单元 2、全光计算, 如光域计算微分方程 3、光模数转换 4、光脉冲整形与暗孤子检测等
高阶积分器	多相移FBG	各部分反射率接近100%时的传输谱	相比直接级联有更高能量效率更大时间窗口	

由于理想时域积分器的响应为无穷限阶跃函数,因此要求实际器件应有增益补偿机制,否则因

为器件相关的损耗会导致信号能量衰减,不可避免地造成积分器只能在很有限的时间窗口内工作。

无源积分器的大处理带宽和有源积分器的大时间窗口在设计上需要权衡考虑,这种权衡指标即时域带宽积TBP,TBP越大,积分器性能越好。

未来光时域积分器的发展趋势应该是较大的积分时间窗口和操作带宽,即大时域带宽积。同时光积分器的系统应尽量采用全光器件,设计和制造简单,保持和未来全光信息处理系统的良好兼容性,能量效率高,差错率低。光时域积分器的研究方向一方面是寻找和设计能实现积分器的其他光器件,另一方面在于通过各种手段获得更大时域带宽积的积分器,提高现有光积分器的性能。目前光时域积分器的研究多在仿真层面,未来光时域积分器也还需要更多的实验验证。作为光微分器的“反向”器件,更作为光信息处理的基础组件,光积分器拥有良好的发展潜力和应用前景。

参考文献

- [1] Asghari M H, Azana J. Photonic integrator-based optical memory unit[J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2011, 23(4):209-211.
- [2] Azaa J. Ultrafast analog all-optical signal processors based on fiber-grating devices[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, 2(3):359-386.
- [3] Ngo N Q. Optical integrator for optical dark-soliton detection and pulse shaping[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(26): 6785-6791.
- [4] Jin Y, Costanzo-Caso P A, Granieri S, et al. Photonic integrator for A/D conversion[J]. *ProcSpie*, 2010, 7797(1): 147-158.
- [5] Huang N, Zhu N, Ashrafi R, et al. Active Fabry-Perot resonator for photonic temporal integrator[C]// *Asia Communications and Photonics Conference*, 2013.
- [6] Huang N, Li M, Ashrafi R, et al. Active Fabry-Perot cavity for photonic temporal integrator with ultra-long operation time window[J]. *Optics Express*, 2014, 22(3):3105-16.
- [7] 张小贝. 微环谐振器及应用的理论与实验研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2009.
- [8] Ferrera M, Park Y, Razzari L, et al. On-chip CMOS-compatible all-optical integrator[J]. *Nature Communications*, 2010, 1(3):605-629.
- [9] Liu W, Li M, Guzzon R S, et al. A photonic temporal integrator with an ultra-long integration time window based on an InP-InGaAsP integrated ring resonator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20):3654-3659.
- [10] Ferrera M, Park Y, Razzari L, et al. All-optical 1st and 2nd order integration on a chip[J]. *Optics Express*, 2011, 19(23): 23153-61.
- [11] 董小伟, 裴丽, 冯素春, 等. 全光纤型微环谐振器的研制[J]. *光学学报*, 2007, 27(11):1935-1938.
- [12] 黎小蒙. 基于双芯光纤的新型低插损全光纤微环谐振器研究[D]. 北京:北京交通大学, 2012.
- [13] Azaña J. Proposal of a uniform fiber Bragg grating as an ultrafast all-optical integrator[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(1):4-6.
- [14] Asghari M, Wang C, Yao J, et al. High-order passive photonic temporal integrators[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1191-3.
- [15] Ngo N Q. Design of an optical temporal integrator based on a phase-shifted fiber Bragg grating in transmission[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(20):3020-2.
- [16] Zhang J, Yao J. Microwave photonic integrator based on a multichannel fiber Bragg grating[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(2):1047-1055.
- [17] Ngo N Q, Binh L N. Optical realization of Newton-cotes-based integrators for dark soliton generation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(1):563-572.
- [18] Park Y, Azaña J. Ultrafast photonic intensity integrator[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(5):1156-1158.
- [19] Tan Z, Wang C, Diebold E D, et al. Real-time wavelength and bandwidth-independent optical integrator based on modal dispersion[J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 14109-16.
- [20] Asghari M H, Park Y, Azaña J. Photonic temporal integration of broadband intensity waveforms over long operation time windows[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18):3557-9.
- [21] Asghari M H, Park Y, Azaña J. New design for photonic temporal integration with combined high processing speed and long operation time window[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2):425-35.
- [22] Slavík R, Park Y, Ayotte N, et al. Photonic temporal integrator for all-optical computing[J]. *Optics Express*, 2008, 16(22):18202-14.
- [23] Asghari M H, Azaña J. Design of all-optical high-order temporal integrators based on multiple-phase-shifted Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2008, 16(15):11459-69.
- [24] Jia X H, Ji X L, Xu C, et al. Analysis of all-optical temporal integrator employing phased-shifted DFB-SOA[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23):28530-28536.