

# 相位光时域反射仪中声信号测量范围的提升

钟镇<sup>1,2</sup>,张旭苹<sup>2\*</sup>,邹宁睦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>常州工学院光电工程学院,江苏 常州 213032; <sup>2</sup>南京大学智能光传感与调控技术教育部重点实验室,江苏 南京 210093; <sup>3</sup>美国佐治亚理工学院计算机科学系,美国 亚特兰大 30332

**摘要** 本文提出一种基于辅助光的相位展开的新方法,用来打破传统相位解缠绕算法的限制条件,进而扩大相位 信号的测量范围。首先基于相干探测型相位光时域反射仪中缠绕的统计相位,可以求解出参考位置和后续位置之 间缠绕的差分相位。然后基于联合脉冲序列按照传统相位解缠绕算法展开缠绕的差分相位,将展开的差分相位求 解得到的相位变化曲线叠加在一起。正确实施了传统相位解缠绕算法的光纤位置可以由叠加的相位变化曲线的 线性特征获取,因而,基于相位变化的线性特征可以正确地获取扰动源所对应的相位信号。在实验中,一个相邻采 样点之间最大绝对相位差值为 3.7154 的相位信号能够被完美地重构出来。

关键词 光纤光学;光纤传感;相位光时域反射仪;定量测量;测量范围

中图分类号 TN29 文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1306023

## Enhancement of Measurable Range for Acoustic Signal in Phase Optical Time Domain Reflector

Zhong Zhen<sup>1,2</sup>, Zhang Xuping<sup>2\*</sup>, Zou Ningmu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Photoelectric Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, Jiangsu 213002, China; <sup>2</sup> Key Laboratory of Intelligent Optical Sensing and Manipulation, Ministry of Education,

Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;

<sup>3</sup> School of Computer Science, Georgia Institute of Technology, Atlanta 30332, USA

**Abstract** This paper proposes a new method of phase unwrapping based on auxiliary light, which is used to break the limitation of traditional phase unwrapping algorithm and expand the measurement range of phase signal. First, based on the wrapped statistical phase in coherent detection based phase optical time domain reflectometer, the wrapped differential phase the reference position and the subsequent position can be solved. Then, based on the joint pulse sequence, the wrapped differential phase is unwrapped according to the traditional phase unwrapping algorithm, and the phase change curves retrieved from the unwrapped differential phases are superimposed together. The position of fiber that correctly implements the traditional phase unwrapping algorithm can be obtained from the linear feature of the superimposed phase change curve. Therefore, the phase signal corresponding to the disturbance source can be correctly obtained based on this linear feature of phase change. In the experiment, a phase signal with a maximum absolute phase difference of 3.7154 between adjacent sampling points can be perfectly reconstructed.

Key words fiber optics; fiber sensing; phase optical time domain reflector; quantitative measurement; measurable range

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 120.4640

收稿日期: 2021-02-03; 修回日期: 2021-05-05; 录用日期: 2021-05-19

基金项目:国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(61627816)、常州工学院引进人才科研启动项目(E3620720073) 通信作者: \*xpzhang@nju.edu.cn

## 1 引 言

相位光时域反射仪(\otop-OTDR)作为典型的分布 式光纤传感系统,在国民经济建设中得到了越来越 多的关注<sup>[1-3]</sup>。在相位光时域反射仪中,由于激光具 有高度相干特性,数据采集装置直接获取的探测曲 线会呈现出高低起伏的散斑状特征。若有一个外界 扰动作用在光纤上,则探测曲线的分布就会发生变 化<sup>[4-5]</sup>。理论上,相位光时域反射仪中背向瑞利散射 信号的相位变化量与外界扰动呈线性相关<sup>[6]</sup>。因 此,为了从探测曲线的相位变化中提取出外界扰动 的信息,研究者们提出了诸如双脉冲干涉、啁啾脉 冲、脉冲编码、多频探测、全息解调和双波长探测等 一系列方案<sup>[7-12]</sup>,基于这些方案成功提取了确知的 相位信号。

对于绝大多数的解调方法而言,相位的提取均 会涉及光纤上两点之间的相位差。光纤上可以选择 的作差点位置有很多,但存在的噪声点也很多。如 果将含有噪声的点作为作差点,那么就极有可能错 误地将噪声判定为有用信号。在提取相位的过程中 会经历反正切运算,计算的结果在 $-\pi \sim \pi$ 之间。为 了获取正确的相位信号,相位解缠绕的过程是不可 避免的。然而,传统的相位解缠绕算法要求数字相 位信号中相邻两点的相位差值的绝对值小于 π<sup>[12-13]</sup>。为了区别于其他差分结果,将相邻两点之 间的绝对相位差值称为相位跳跃。在实际应用中, 相位会经常出现大的扰动,随之出现了大于 $\pi$ 的相 位跳跃。在相位光时域反射仪中,通过减小脉冲周 期来增加采样率,被认为是减小相位跳跃值的有效 办法。然而基于单频信号光的传统解调方法中,脉 冲周期的减小会受制于光纤的长度。因此,相位跳 跃值的减小也将受制于光纤的长度。在传统的相位

解缠绕算法中,只有将相位跳跃值减小到 π 以下,才 能成功地提取相位信号。为了进一步解决相位跳跃 受限于 π 的问题,需要解决两个问题。第一个问题就 是在不清楚扰动具体特征的情况下,判断当前的相位 跳跃是否大于 π,而仅仅基于光纤上两点之间的相位 进行作差来提取相位信号,有可能将错误解缠绕得到 的结果判断为正确的相位信号。第二个问题是当相 位跳跃值大于 π 时,如何准确地提取相位信号。

在以往的研究中,研究者们注意到了传统相位 解缠绕算法对相位信号求解的限制,但是未注意到 相位跳跃值的连续增加,也未对非确知信号进行阐 述<sup>[12-16]</sup>。针对第一个问题,即在信号波形非确知的 状态下如何判断当前的求解信号是正确的,基于相 干探测方式的相位光时域反射仪中,提出依据扰动 前后的相位变化沿着光纤长度方向变化的线性特征 进行判别的简单方法。针对第二个问题,即为了获 得大于π的相位跳跃值进而扩大测量范围,将辅助 探测脉冲光引入相位光时域反射仪中,而辅助探测 脉冲光和原先的主探测脉冲光只存在细微的频率差 异。光纤上任意一点的原探测脉冲光和辅助探测脉 冲光所提取的相位随着光纤位置的不同而不同[17], 因此在没有任何相位补偿的情况下,辅助探测脉冲 光无法直接起到增加采样率的作用。相反,本文不 考虑采样率增加的问题,而是在相位跳跃值大于 $\pi$ 的条件下并且在传统相位解缠绕算法的基础上,使 用辅助探测脉冲光来帮助主探测脉冲光正确地提取 非确知的相位信号。

### 2 基本原理

#### 2.1 单频光解调的相位特征

在相干探测型相位光时域反射仪中,基于单频 光的相位提取过程如图 1(a)所示<sup>[18]</sup>。



图 1 在相干探测型相位光时域反射仪中基于单频光的相位提取。(a)相位提取过程; (b)小扰动下相位变化的典型特征;(c)大扰动下相位变化的典型特征

Fig. 1 Phase extraction in coherent  $\varphi\text{-}\mathrm{OTDR}$  based on the single frequency light. (a) Process of phase extraction;

(b) phase change of one pulse under a small perturbation; (c) phase change of one pulse under a large perturbation

#### 研究论文

每一个探测脉冲光将会产生一个瑞利探测曲线,在一个探测脉冲内,探测曲线随时间变化的时间 轴称为"快时间轴",对应图1的光纤长度。随着探 测脉冲光被陆续注入光纤中,数据采集装置会依序 采集探测曲线,而相邻脉冲的时间间隔是相等的。 探测脉冲随时间变化的时间轴称为"慢时间轴",未 在图1标示。因此,探测曲线可以表示为

 $E(t,z) \propto A_{B}A_{LO}\cos[\varphi(t,z) + \psi(t,z)],$  (1) 式中: $A_{B}$ 和 $A_{LO}$ 分别为瑞利散射光和参考光的振幅;t为对应"慢时间轴"的光脉冲注入光纤的时刻; z为对应"快时间轴"的光纤与注入端口之间的距离; $\varphi$ 为由扰动引起的相位变化量; $\psi$ 为探测脉冲光 沿着光纤长度方向的相位积分。

与扰动信息相关的相位信号,即沿着"慢时间 轴"的一系列相位值包含在 $\varphi$ 中。为了获取相位信 息,往往使用正交解调的方法。正交解调的结果是 数值分布在 $-\pi \sim \pi$ 之间所包裹的统计相位。此时, 即使相位跳跃值全部小于π,包裹的统计相位也会 受到来自光源和调制器等所产生的噪声的影响。因 此,从缠绕的统计相位直接解缠绕进而求得的相位 信息无法很好地表达外界的扰动。为了尽可能地消 除这些噪声的影响,借助于相位变化的线性特征,在 扰动位置之前且紧挨扰动位置处选取一个在"相位 变化-光纤长度"平面上处于平滑曲线的位置作为参 考位置,接着将参考位置之后所有采样位置上缠绕 的统计相位与参考位置上缠绕的统计相位作差,作 差的结果称为缠绕的差分相位,再对每一个光纤采 样位置上缠绕的差分相位沿着"慢时间轴"方向按照 传统相位解缠绕算法进行相位展开。传统的相位解 缠绕算法的表达式为

 $\Theta_{i} = \begin{cases} \Theta_{i-1} + \Delta \Omega_{i} - 2\pi, & \text{if } \Delta \Omega_{i} > \pi \\ \Theta_{i-1} + \Delta \Omega_{i} + 2\pi, & \text{if } \Delta \Omega_{i} < -\pi, \\ \Theta_{i-1} + \Delta \Omega_{i}, & \text{other} \end{cases}$ (2)

式中:i 为自然数; $\Omega$  为缠绕的相位值; $\Delta\Omega_i$  为 $\Omega_i$  和  $\Omega_{i-1}$  的差值; $\Theta$  为解缠绕后的相位值。

将缠绕的差分相位解缠绕后就可得到展开的差 分相位。通常情况下,除了噪声以外,扰动之后的任 意位置上所展开的差分相位会呈现出与扰动波形相 似的特征。然而,对于初始脉冲而言,光纤折射率分 布的不均会引起初始相位的随机性。出于精确测量 的考虑,正如文献[18]所描述的,为了可靠地消除不 同初始相位值的影响,引进一个以所有脉冲对应相 位在慢时间轴上的均值作为参考相位,接着将所有 脉冲所展开的差分相位与参考相位作差,即剔除(1) 式中的 \u03c6,在无扰动区域就可得到随光纤长度方向 线性变化的相位变化,记作 \u03c6。

在图 1(b)中,假设在 AB 区域存在一个扰动, 并且假设扰动所产生的相位跳跃值均小于 π。位置 O 是为了获取缠绕的差分相位而选择的参考位置。 在探测脉冲光未遭遇扰动之前,光纤中返回的背向 瑞利散射信号不会受到扰动的影响。理想情况下, 沿着光纤长度方向的相位变化应为零。随着探测脉 冲光继续向前传输,探测脉冲光和扰动区域的重合 程度逐渐增加,相位变化的幅度值也从零开始发生 变化,整体上呈现逐渐增加的趋势。最终,探测脉冲 光将离开扰动区域 AB,相位变化的幅度值将达到 另一个稳定的值。然而,在实际应用中,基于相干探 测方式的相位光时域反射仪还将会受到各种噪声的 影响,对于最终求解的相位信号而言,这些噪声会降 低信噪比,而文献[18]中基于整体最小二乘的数据 拟合方法被用来抑制这种噪声的影响。本文关注于 突破相位跳跃值对于 $\pi$ 的限制,从而扩大非确知声 信号的测量范围。因此,为了简单起见,不再采用数 据拟合的方法来求解信号,而是在紧挨扰动前后的 位置处选择 A 点和 B 点,接着将两点处的相位  $\phi(x_A)$ 和 $\phi(x_B)$ 作差,并直接将作差的结果视为代 表外界扰动信息的最佳相位信号。需要指出的是, 位置 A 和位置 B 都是选择在呈现线性特征的相位 变化所在的位置,因此可依据线性特征来排除噪声 位置,由相位 $\phi(x_A)$ 和 $\phi(x_B)$ 作差得到的相位信号 可以正确地表达非确知信号。忽略  $\phi(x_A)$  所受噪 声的细微影响,则 φ(x<sub>A</sub>)值为零,在最佳的求解相 位信号中,任意相邻两脉冲间的相位绝对差值即为 求解的相位跳跃值。

另一方面,不同光纤采样位置处背向瑞利散射信 号的初始相位是不同的,当外界扰动变大而造成相位 跳跃值大于 π 时,将会导致解缠绕后的差分相位发生 意外的错误,从而使相位变化也会变得杂乱无章。正 如图 1(c)所示,相位变化沿着光纤长度方向的线性特 征在扰动区域之后消失了。线性特征的消失意味着 最终的相位信号无法被正确提取,也意味着此时探测 系统中物理上的相位跳跃值已经大于 π。

#### 2.2 辅助光参与解调的相位特征

为了解决传统相位解缠绕算法中要求相位跳跃 值必须小于π的问题,在相位光时域反射仪中引入 与原探测脉冲光的频率有微小差异的辅助探测脉冲 光。两个不同频率的探测脉冲光交替排列,如 图 2(a)所示。



图 2 两个频率探测脉冲光的分析。(a)原探测脉冲光和辅助探测脉冲光的混合序列;(b)理想状态的差分相位分布; (c)(d) 错误解缠绕时的差分相位分布;(e)正确解缠绕的差分相位分布

Fig. 2 Analysis of two frequency lights. (a) Pulse train with the original probe light and the auxiliary light; (b) distribution of differential phase under ideal state; (c)(d) distribution of differential phase under wrong unwrapping condition;(e) distribution of differential phase under correct unwrapping condition

假设第一个脉冲处于零时刻,光频分别为 f<sub>1</sub> 和 f<sub>2</sub> 的脉冲间隔为τ,同频光脉冲等间隔 T 出现。 若不考虑实际的计算解调过程,在相干探测型相位 光时域反射仪中引入辅助探测脉冲光后,真实物理 意义上的差分相位可以表示为

$$\theta(k, x) = \\ \theta_1(k = 2j + 1, x) = \varphi_1(j, x) + \psi_1(j, x) \\ \theta_2(k = 2j, x) = \varphi_2(j, x) + \psi_2(j, x) , \quad (3)$$

式中:x 为原坐标点z 与参考位置的距离;k 为j 与 t 相对应的脉冲个数且为自然数,j 由k 拟定;下标 1 和 2 分别代表原探测脉冲光序列和辅助探测脉冲光 序列。

在相干探测型相位光时域反射仪中,相位积分  $\phi$ 沿着光纤长度方向具有不一致性,使得光纤各采 样点上 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 的差值以及 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 的差值也各不 相同,这显然会对相位的解缠绕产生显著的影响。 为了进一步解释相位积分对相位解缠绕的影响,由 两种探测脉冲光所对应的差分相位生成的4种典型 情况如图 2(b)~2(e)所示。事实上,在任意一个周 期 T 内会循环往复地出现这4种情况。以零时刻 为起点且以 T 为周期所出现的点来代表原探测脉 冲光所对应的差分相位,以  $\tau$  时刻为起点且以 T 为 周期所出现的点来代表辅助探测脉冲光所对应的差 分相位,并将差分相位按照图 2(a)的序列依次排 列。为了便于分析,假设由外界扰动产生的相位变 化 φ 和时间 t 成正比例,且假设 τ 值为 T 值的一半。 假设单频光的相位跳跃,即图 2 中任意间隔的两个 点之间的绝对差值大于  $\pi$ 。图 2(b)中  $\phi_1$  与  $\phi_2$  的差 值正好为零,而且所有点均在同一条直线上。辅助 探测脉冲光的加入使得每对相邻点之间的绝对相位 差值小于π,这满足了传统相位解缠绕算法的基本 要求。在多数情况下, $\phi_1$ 与 $\phi_2$ 的差值不为零,不同 光频所对应的点出现图 2(c)~2(e)的情况。尽管 引入辅助探测脉冲光,而图 2(c)中  $\theta(\tau)$  和 $\theta(T)$ 的 绝对差值,以及图 2(d)中 $\theta(0)$ 和 $\theta(\tau)$ 的绝对差值 依然大于 π。因此,当传统的相位解缠绕算法作用 于图 2(c)和图 2(d)中的差分相位时,依旧会输出错 误结果,这将会导致这些位置的相位变化呈现混乱 的状态。幸运的是,还有一些位置上不同光频所对 应的点交叉组合后的结果如图 2(b)和图 2(e)所示, 这些不同光频所对应的点重新组合后,新序列里任 意两点之间的绝对差值均小于 π。对于这些光纤采 样位置而言,尽管原探测脉冲光所对应的相位跳跃 值大于π,而引入辅助探测脉冲光后的新序列中任 意两点间的绝对相位差值却减小到 π 以下,满足了 传统相位解缠绕算法正常有效的基本条件。虽然两 个不同频率的探测脉冲光沿着光纤长度方向的相位 积分值是不同的,但是两者的差值沿着光纤长度方

#### 研究论文

第 41 卷 第 13 期/2021 年 7 月/光学学报

向的变化却是相对缓慢的,因此在图 2(b)和图 2(e) 的位置会聚集在一起形成相对有规律的区域,而在 图 2(c)和图 2(d)的位置也会聚集在一起形成混乱 的区域。

为了准确地获取相位跳跃值大于 π 的相位信 号,设计图 3(a)的相位提取过程。



图 3 相干探测型相位光时域反射仪注入辅助探测脉冲光后的相位提取过程。(a)相位提取的新过程; (b)大扰动条件下按新过程提取的相位变化典型特征

Fig. 3 Phase extraction in coherent φ-OTDR with auxiliary light. (a) New process of phase extraction;(b) phase change of one pulse under a large perturbation

图 3(a)设计的前提就是在相干探测型相位光 时域反射仪中注入辅助探测脉冲光。根据信号的载 波频率,首先使用带通数字滤波器将数据采集装置 采集到的探测曲线分离成两个不同载频分量的调制 波。然后对分离后的每一部分调制波进行运算,得 到对应载频分量的且缠绕的统计相位和差分相位, 此时将两部分缠绕的差分相位按照图 2(a)的自然 序号重新组合成一个新的序列。准确地讲,对于每 一个光纤采样位置均有一列重新组合的且缠绕的差 分相位序列。传统的相位解缠绕算法是在每一个光 纤采样位置作用一次,将缠绕的差分相位运算为展 开的差分相位。值得一提的是,由于  $\phi_1$  与  $\phi_2$  的差 值沿着光纤长度方向不是常数,严格表征外界扰动 信息的相位变化也就无法直接从相位解缠绕算法所 生成的展开的差分相位中进行求解。否则,计算得 到的相位变化就有众多不确定的初始值,在精确表 达外界扰动过程中将出现困惑。为此,将包含两个 载频分量的展开的差分相位进行分离,以原探测脉 冲光所对应的展开的差分相位作为后续求解相位信 号的基础量,忽略噪声的影响,对这一基础量计算得 到的相位变化如图 3(b)所示。正如上一段所述,由 于大扰动引起的相位跳跃值大于 π,引入探测脉冲 光后,扰动区域之后的相位变化包括了正确解缠绕 和错误解缠绕的两个交替的部分。

## 3 实验装置和实验结果

为了对所提方案进行验证,设计图 4 的实验 装置。

激光器件是一个高稳频的光源,实验过程中频 率漂移低于 50 kHz。激光器件发出的光经过 90:10 的耦合器后分成两路,携有90%能量的上路光用作 探测信号光,而仅携有10%能量的下路光用作参考 光。上路光继续由 50:50 的 OC 2 后分成两路强度 相等的探测信号光,两路探测信号光分别被 40 MHz 和 80 MHz 移频的声光调制器调制成探测 脉冲光。在实验中,将 40 MHz 移频处所对应的探 测脉冲光视为原探测脉冲光,而将 80 MHz 移频处 所对应的探测脉冲光视为辅助探测脉冲光。需要指 出的是,原探测脉冲光和辅助探测脉冲光的频率差 (40 MHz)比实验中观测到的最大频率漂移 (50 kHz)大得多,因此可以认为主探测脉冲光和辅 助探测脉冲光所引起的相位积分差与激光器件本身 的频率漂移没有关系。两路探测脉冲光的重复频率 比外界扰动的频率大得多,单频脉冲光的频率设为



图 4 有无辅助探测脉冲光的相干探测型相位光时域反射仪的实验装置及其原理示意图 Fig. 4 Experimental setup and its schematic for coherent &-OTDR with/without the auxiliary light

50 kHz。脉冲的宽度均设为 200 ns,主探测脉冲光 和辅助探测脉冲光则相隔 9 μs。两路探测脉冲光经 过由 50:50 的 OC 3 后合成为一路探测脉冲光,并 由掺铒光纤放大器进行放大,放大后的探测脉冲光 由环形器注入测试光纤中。为了便于验证,实验中 使用已知的正弦信号来代替非确知信号,一个被正 弦信号驱动的压电陶瓷加载在距离光纤注入端口约 1.25 km 的光纤上,用来模拟声振动信号,作用在压 电陶瓷的光纤长度为 10 m。光纤中返回的背向瑞 利散射光和参考光通过 50:50 的 OC 4 混合后一起 注入 BPD 中,BPD 输出的电信号经过可变放大器 放大后输入电脑中的数据采集卡上。数据采集卡每 秒采集 3.125×10<sup>8</sup> 个点。

首先将一个频率为 600 Hz 和幅度为 2.5 V 的 正弦信号加载在压电陶瓷上,用来模拟一个小的扰 动事件,此扰动事件所引起的相位跳跃值小于 π。 如果此时相位光时域反射仪中只存在原探测脉冲 光,由正交解调求解得到瑞利散射信号的强度曲线 如图 5(a)所示。

从图 5(a)可以看到,强度信息在光纤长度为 1250 m的附近区域发生剧烈变化,因此可以据此 判断在 1250 m 附近区域存在一个扰动事件,即实 验所加载的 PZT 驱动信号。然后,将 121.6 m 的 采样位置作为参考位置,再按照图1(a)进行一系 列的运算,最终得到的1000条相位变化曲线如 图 5(b)所示。显然,在光纤长度为 1250 m 的附近 区域,相位变化的幅度急遽变化,而在该事件区域 的前部和后部,相位变化的幅度并没有明显改变。 基于这些没有明显变化的相位变化,最终的相位 信号就可以很轻易地求取出来。为了简单起见, 不再在本文给出最终的相位信号曲线。该相位信 号由 1000 个相位值组成,任意相邻两点之间的绝 对差值即为相位跳跃值,计算得到的最大相位跳 跃值为 2.5796,值比 π小。正因为如此,此时的相 位信号可以仅由原探测脉冲光工作时就能够正确 求取出来。







件的定位。对图 6(b)和图 5(b)进行比较,可以发现

图 6(b)中扰动事件之后的相位变化曲线非常杂乱,

这与图 5(b)中相应区域的相位变化趋势完全不同,

而且相位信号也没有办法从图 6(b)的相位变化中

提取出来。结合图1可以判定,此时的扰动在仅有

原探测脉冲光工作的情况下,相应的相位跳跃值超

## 研究论文

接着,保持压电陶瓷驱动信号的频率不变,将幅 度由 2.5 V 增加到 5.0 V,用来增大相位跳跃值。 如果相位光时域反射仪中依旧只有原探测脉冲光在 工作,瑞利散射信号的强度曲线和相位变化曲线的 叠加图分别如图 6(a)和图 6(b)所示。

对图 6(a)和图 5(a)进行比较,可以发现彼此非常相似,由此可见相位跳跃值的增加并不会影响事



过了π。

图 6 驱动信号幅度为 5.0 V 时相位光时域反射仪中仅由原探测脉冲光探测曲线计算得到的叠加图。 (a) 瑞利散射信号的强度;(b)相位变化

Fig. 6 Superposition of retrieved results when the amplitude of driving signal is 5.0 V in \$\phi\$-OTDR only using the original probe light. (a) Intensity of Rayleigh scattering signal; (b) phase change

因此,本文采用所提方法求解相位信号。借助 于辅助探测脉冲光的作用,按照图 3(a)的解调过程 求得用原探测脉冲光表达的相位变化,如图 7(a)所 示。从图 7(a)可以看到,相位变化的分布呈现出非 连续的模式,相位变化沿着光纤长度方向呈线性变 化和杂乱分布的情况交替出现。在线性分布区域, 尽管原探测脉冲光和辅助探测光各自对应的初始脉 冲时刻的相位随光纤位置的不同而不同,但是 图 2(a)序列所对应的相邻相位绝对差值小于 π,因 此可以采用传统的相位解缠绕算法正确展开该区域 光纤位置处缠绕的差分相位。基于这些线性区域的 相位变化,求得的最终相位信号如图 7(b)所示,该 相位信号的相位值仅来自原探测脉冲光,基于这些 相位值可以求得 999 个相位跳跃值。其中有 180 个 相位跳跃值大于 π,最大值为 3.7154。由于存在大 于 π 的相位跳跃值,所以产生图 6(b)杂乱的相位变 化曲线,而图 7(b)中相位信号的完美获取,说明了 引入辅助探测脉冲光的方法可以有效解决相位跳跃 值大于 π 的相位解缠绕问题。

在实验过程中,模拟外界扰动的 PZT 驱动信号 呈正弦变化。因此,增加正弦驱动信号的幅度和频 率都可以增加被测相位信号的最大相位跳跃值。

将 PZT 驱动信号的幅度设为 5 V,以 100 Hz 的频率为步进来增加驱动信号的频率,并采用基于 辅助探测脉冲光的解调方法来求解相位信号。各相 位信号所对应的最大相位跳跃值如图 8(a)所示。

从图 8(a)可以看到,随着 PZT 驱动信号频率的增加,最大相位跳跃值从 0.8531 增加到 4.4601。



图 7 辅助探测脉冲光参与探测时原探测脉冲光获取的结果。(a)相位变化叠加图;(b)相位信号 Fig. 7 Retrieved results from the original probe light when auxiliary probe light is used in φ-OTDR. (a) Superposition of phase changes; (b) phase signal

#### 研究论文

看到,最大相位跳跃值从 2.6271 增加到 4.4601,而

相位跳跃值的增加也反过来意味着外界扰动可测量

范围提升到了140%。

然后,将 PZT 驱动信号的频率固定在 700 Hz,再将 驱动信号的幅度以 0.5 V 为步进从小向大进行调 整,最大相位跳跃值如图 8(b)所示。从图 8(b)可以



图 8 不同参数下的最大相位跳跃值。(a)频率;(b)幅度

Fig. 8 Maximum phase jump values under different parameters. (a) Frequency; (b) amplitude

不过需要强调的是,实验的过程中如果施加在 PZT上的驱动信号为矩形波,即使矩形波的幅度小 于信号能够正确解调时的施加在 PZT 上的正弦波 的幅度,信号也没有办法通过所提的新方法进行正 确提取,这是因为矩形波的波形阶跃使得相位跳跃 超过了新方法所能解调的范围。因此,尽管所提的 新方法打破了传统相位解缠绕算法关于相位跳跃 π 值的限制,但是外界扰动可测量范围的增加依旧是 需要建立在相位跳跃值能够正确获取的基础上。

## 4 结 论

在相干探测型相位光时域反射仪中,辅助探测 脉冲光的引入使得相位跳跃值突破了传统的相位解 缠绕算法中有关π的限制,由此增强了探测能力。 根据求解的相位变化是否沿光纤长度方向呈线性特 征,用来判断当前物理意义上的相位跳跃值是否大  $= \pi_{0} \, \epsilon_{\pi} \, \delta_{\pi} \,$ 助探测脉冲光会组成新的序列脉冲光。基于新的脉 冲序列,传统的相位解缠绕算法可以在一些位置处 正确地展开相位,这些正确展开相位的位置聚集在 一起会形成断续性的线性区域。基于这些线性区域 的相位变化,能够成功地求解相位跳跃值大于 $\pi$ 的 相位信号。在实验中,展示了判断相位跳跃值是否 大于 π 和求解相位跳跃值大于 π 的相位信号的能 力,并在此过程中,展示了一个最大相位跳跃值为 3.7154 的正弦信号。更多的实验结果表明,相位跳 跃值高达 4.4601 的相位信号都能够被正确地求解 出来。相应地,相位信号的测量范围也提升到了 140%.

致谢 感谢南京大学的王峰副教授和南京航空航天

大学的王祥传副教授在文章写作过程中有益的讨论 和各项帮助。

#### 参考文献

- [1] Ma H Y, Wang X X, Ma F, et al. Research process of Φ-OTDR distributed optical fiber acoustic sensor
  [J]. Laser & Optoelectronics Process, 2020, 57 (13): 130005.
  马皓钰,王夏霄,马福,等. Φ-OTDR 型分布式光纤 声波传感器研究进展[J].激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 130005.
  [2] Song M P, Zhuang S W, Wang Y X. High-frequency
- [2] Song M P, Zhuang S W, Wang Y X. High-frequency vibration detection of phase-sensitive optical time-domain reflectometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0506001.
  宋牟平,庄守望,王轶轩.相位敏感光时域反射计的 高频 振 动 检测 [J]. 中 国 激 光, 2020, 47(5): 0506001.
- [3] Sheng Q H, Yu Z, Lu B, et al. Real-time phasesensitive optical time-domain reflectometry signal processing system based on heterogeneous accelerated computing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47 (1): 0104002.
  盛庆华, 俞钊, 卢斌, 等. 基于异构加速的 Φ-OTDR 实时信号处理系统[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0104002.
- [4] Peng F, Duan N, Rao Y J, et al. Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(20): 2055-2057.
- [5] Lu Y L, Zhu T, Chen L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR
   [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28 (22): 3243-3249.
- [6] Fu Y, Xue N T, Wang Z N, et al. Impact of I/Qamplitude imbalance on coherent  $\Phi$ -OTDR [J].

#### 研究论文

Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(4): 1069-1075.

- [7] Liu T, Wang F, Zhang X P, et al. Interrogation of ultra-weak FBG array using double-pulse and heterodyne detection[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(8): 677-680.
- [8] Pastor-Graells J, Martins H F, Garcia-Ruiz A, et al. Single-shot distributed temperature and strain tracking using direct detection phase-sensitive OTDR with chirped pulses [J]. Optics Express, 2016, 24 (12): 13121-13133.
- [9] Dorize C, Awwad E. Enhancing the performance of coherent OTDR systems with polarization diversity complementary codes [J]. Optics Express, 2018, 26 (10): 12878-12890.
- [10] Wang Z Y, Pan Z Q, Fang Z J, et al. Ultrabroadband phase-sensitive optical time-domain reflectometry with a temporally sequenced multifrequency source[J]. Optics Letters, 2015, 40(22): 5192-5195.
- [11] Murray M J, Davis A, Redding B. Multimode fiber Φ-OTDR with holographic demodulation [J]. Optics Express, 2018, 26(18): 23019-23030.
- [12] He H J, Yan L S, Qian H, et al. Enhanced range of the dynamic strain measurement in phase-sensitive OTDR with tunable sensitivity [J]. Optics Express,

2020, 28(1): 226-237.

- [13] Itoh K. Analysis of the phase unwrapping algorithm[J]. Applied Optics, 1982, 21(14): 2470.
- [14] Wyant J C. Testing aspherics using two-wavelength holography[J]. Applied Optics, 1971, 10(9): 2113-2118.
- [15] Polhemus C. Two-wavelength interferometry [J]. Applied Optics, 1973, 12(9): 2071-2074.
- [16] Sagues M, Piñeiro E, Cerri E, et al. Twowavelength phase-sensitive OTDR sensor using perfect periodic correlation codes for measurement range enhancement, noise reduction and fading compensation[J]. Optics Express, 2021, 29 (4): 6021-6035.
- [17] Wakisaka Y, Iida D, Oshida H. Distortionsuppressed sampling rate enhancement in phase-OTDR vibration sensing with newly designed FDM pulse sequence for correctly monitoring various waveforms [C] // Optical Fiber Communication Conference 2020, March 8-12, 2020, San Diego, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2020: Th3F.5.
- [18] Zhong Z, Wang F, Zong M, et al. Dynamic measurement based on the linear characteristic of phase change in Φ-OTDR [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(14): 1191-1194.