

## $\varphi$ -OTDR 振动传感系统中的相位模糊问题

李永倩, 马 立

(华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

**摘 要:** 针对  $\varphi$ -OTDR 振动传感系统中的相位模糊问题, 推导了背向瑞利散射光功率与干涉光场相位差、干涉光场相位差与光纤应变的关系式, 分析了相位模糊现象的发生原因及表现形式, 研究了相位模糊对传感系统性能的影响及系统最大可检测应变与空间分辨率的关系, 并进行了仿真验证。结果表明: 相位模糊是限制系统应变测量范围的主要因素, 它会引起振动频率的误判和振动幅度的测量错误, 还可能导致大应变信息的漏报; 系统空间分辨率越高, 应变测量范围越大, 说明  $\varphi$ -OTDR 振动传感系统适用于高空间分辨率振动的测量。研究结果为  $\varphi$ -OTDR 振动传感系统参数设计和系统优化提供了理论参考。

**关键词:** 相位模糊;  $\varphi$ -OTDR; 振动传感; 仿真

**中图分类号:** TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2800-05

## Phase ambiguity in $\varphi$ -OTDR vibration sensing system

Li Yongqian, Ma Li

(Department of Electronics and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Aimed at the phase ambiguity phenomenon existing in the  $\varphi$ -OTDR based vibration sensing system, the expression to describe the relationship between the Rayleigh backscattering power and the phase difference of optical interference fields, and the expression to describe the relationship between the phase difference of optical interference fields and the strain of optical fiber induced by vibration were derived. The cause and manifestation of the phase ambiguity phenomenon and the influence of the phase ambiguity phenomenon on system performance as well as the relationship between the maximum detectable strain and the spatial resolution of the sensing system were studied theoretically, and demonstrated by Matlab simulation. The results show that the phase ambiguity phenomenon is the main factor that limits the strain measurement range of the  $\varphi$ -OTDR based vibration sensing system, and it may cause mistakes in the measurement of vibration frequency and amplitude, and a failure in reporting large strain information. And the higher the spatial resolution, the larger the detectable strain range, which indicates that the  $\varphi$ -OTDR based vibration sensing system is very suitable for applications in the measurement with high spatial resolution. This study provides a theoretical support for the parameter design and optimization of the sensing system.

**Key words:** phase ambiguity;  $\varphi$ -OTDR; vibration sensing; simulation

收稿日期: 2015-01-16; 修订日期: 2015-02-25

基金项目: 河北省自然科学基金(E2012502045, F2014502098); 国家自然科学基金(61377088)

作者简介: 李永倩(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光通信与光传感方面的研究。Email: liyq@ncepubd.edu.cn

## 0 引言

1993 年, H. F. Taylor 提出基于相位敏感光时域反射计 (Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometer,  $\varphi$ -OTDR) 的振动传感技术, 采用极窄线宽激光器光源, 通过检测光纤瑞利散射光的干涉作用引起的光功率的波动来感知振动信息, 实现动态应变的监测<sup>[1]</sup>。 $\varphi$ -OTDR 振动传感技术具有灵敏度高、响应速度快、实时性好和全分布式的特点, 与传统振动传感器相比, 它具有更广阔的应用空间, 例如安防、输油管道泄漏预警及大型建筑物的结构监测等<sup>[2-3]</sup>。

近年来, 各国科研工作者对  $\varphi$ -OTDR 振动传感技术的研究主要集中于振动频率信息的提取、振动频率检测范围的扩展和信噪比的改善<sup>[2,4]</sup>, 而对振动幅度解调的研究则鲜有报道。2012 年, 梁可桢等人采用数字相干解调的方法实现了距离为 3.5 km、空间分辨率为 5 m、频率为 200 Hz 扰动信号的传感, 并利用维纳滤波的方法降低了相位噪声和探测器加性噪声<sup>[4]</sup>; 同年, Zengguang Qin 等人采用小波去噪的方法实现了频率为 0.5~1 kHz 振动信号的检测<sup>[5]</sup>。2013 年, A. Masoudi 等利用马赫-曾德干涉仪 (Mach-Zehnder Interferometer, MZI) 和  $\varphi$ -OTDR 的联合系统及强度检测技术实现了传感距离为 100 m、频率为 0.5~5 kHz、应变为 380 nε 振动信号的测量, 指出最大可检测应变、振动频率和被测光纤长度存在相互制约关系, 为了能正确地检测大应变扰动, 要求系统对 MZI 输出信号的采样率正比于振动频率与 MZI 输出干涉条纹的乘积<sup>[3]</sup>, 说明应变测量范围受限是强度检测传感系统的固有问题。因此, 若在  $\varphi$ -OTDR 振动传感系统中采用相位展开技术解调振动信号, 一方面可能会限制系统振动频率响应上限, 另一方面可能会大大增加信号采集处理单元成本。2015 年, Ling Zhou 等人采用 FFT 信号提取技术, 在 9 km 传感光纤上实现了空间分辨率为 2 m、应变分辨率为 10 nε、振动频率为 1 kHz、应变为 490 nε 的应变和振动的同时测量<sup>[2]</sup>。

文中针对  $\varphi$ -OTDR 振动传感系统中应变测量范围受限的问题, 理论分析瑞利散射光的干涉过程, 推导散射光功率与干涉光场相位差、干涉光场相位差与光纤所受应变的关系; 分析相位模糊现象的产生

原因、表现形式及其对振动传感系统性能的影响, 探讨基于强度检测的振动传感系统的优化设计方法。

## 1 基本理论

分布式振动传感系统一方面要实现振动源的定位, 另一方面要实现振动源振动频率和振动幅度信息的检测。振动源的定位通常采用 OTDR 技术, 在排除盘缆等人为误差源的情况下, 定位精度可用空间分辨率来表示。 $\varphi$ -OTDR 振动传感系统对振动频率和振动幅度的检测则通常采用对多条背向散射曲线联合分析, 建立散射光功率与光场相位和时间的关系来实现。

### 1.1 $\varphi$ -OTDR 振动传感原理

图 1 为  $\varphi$ -OTDR 振动传感系统中传感光纤散射点分布示意图。

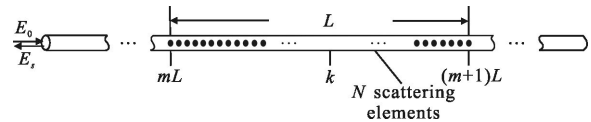


图 1 光纤散射点分布示意图

Fig.1 Schematic layout of the scattering point in fiber

图中,  $E_0$ 、 $E_s$  分别表示传感光纤入射光和背向散射光的光场幅度,  $L$  表示一个空间分辨率长度,  $N$  表示长度为  $L$  的传感光纤上散射点总数。距离光纤始端  $mL$  处的一个空间分辨率长度内的所有散射点产生的背向散射光场之和  $E_s(mL)$  可表示为<sup>[6]</sup>:

$$E_s(mL) = E_0 \sum_{k=1}^N p_k \gamma_k \exp[j(2\varphi_k + \phi_k) \exp(-\alpha mL)] \quad (1)$$

式中:  $p_k$ 、 $\gamma_k$  分别表示第  $k$  个散射点的偏振系数和反射系数;  $\alpha$  为光纤衰减系数;  $\varphi_k = 2\pi n_0 L_k / \lambda$  为散射光场相位, 其统计值服从瑞利分布,  $L_k$  为第  $k$  个散射点距入射端的距离,  $n_0$  为光纤纤芯折射率,  $\lambda$  为入射光波长;  $\phi_k$  为散射单元固有相位, 在  $[0, 2\pi]$  内服从平均分布, 由于散射光场的叠加作用, 该值可忽略<sup>[4]</sup>。背向散射光在光电检测器内发生干涉, 故光电检测器输入光功率可以表示为:

$$P_s(t) = |E_s(mL)|^2 = |E_0|^2 \exp(-2\alpha mL) \cdot \left[ \sum_{k=1}^N p_k \gamma_k + 2 \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N p_k p_l \gamma_k \gamma_l \cos[2\varphi_{kl}(t)] \right] \quad (2)$$

式中： $\varphi_{kl}(t)=\varphi_l(t)-\varphi_k(t)$ 表示第  $k$  个和第  $l$  个散射点的散射光场相位差，即干涉光场相位差。假设传感光纤施加  $\varepsilon(t)$  的动态应变，则光纤长度和纤芯有效折射率随时间的变化关系分别如公式(3)和(4)所示<sup>[7-8]</sup>：

$$L_{kl}'(t)=\left[\frac{\varepsilon(t)}{\sqrt{1+\mu^2}}+1\right]L_{kl} \quad (3)$$

$$n_0'(t)=n_0\{1-A\varepsilon(t)\} \quad (4)$$

式中： $L_{kl}'(t)$ 和  $n_0'(t)$ 分别为施加应变后散射单元的长度和有效折射率； $\mu$ 为光纤材料的泊松比； $L_{kl}$ 和  $n_0$ 为无应变时光纤散射单元长度和纤芯有效折射率； $A$ 为与光纤弹光系数、泊松比及纤芯折射率有关的常数，且  $A<1$ 。由于散射单元长度和纤芯折射率随光纤应变变化，干涉光场相位差亦因受到动态应变的调制而发生变化，其变化关系如公式(5)所示：

$$2\varphi_{kl}'(t)=2\cdot\frac{2\pi n_0 L_{kl}}{\lambda}\cdot\left[1+\left(\frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}}-A\right)\varepsilon(t)-\frac{A}{\sqrt{1+\mu^2}}\varepsilon^2(t)\right] \quad (5)$$

假设应力均匀作用在传感光纤上，则  $L_{kl}$  的取值范围为  $[0, L]$ 。由公式(5)可知，两散射点距离越远，相应散射光干涉产生的相位差越大，光纤应变越大，干涉光场相位差越大。振动频率通过公式(2)和(5)的变换表现为在一个空间分辨率长度上背向散射光功率随时间变化的快慢，而振动幅度则通过二式的变换表现为背向散射光功率变化的大小，因此，通过检测背向散射光功率的变化就可以获得振动的频率和幅度信息。

### 1.2 相位模糊的产生原因

由 1.1 节分析可知，在  $\varphi$ -OTDR 振动传感系统中，无论是采用直接检测还是采用相干检测，若传感光纤所受应变引起的干涉光场相位差超过三角函数单调取值范围，背向散射光功率就会出现周期性多值现象，即发生相位模糊现象。

根据公式(2)和(5)可做出不同应变作用下的  $\varphi$ -OTDR 振动传感系统背向散射曲线，如图 2 所示。图中设置入射光波长 1 550 nm、传感光纤长度 100 m、空间分辨率 1 m，在传感光纤 54 m 处施加应力，且假设光纤均匀受力。对于低频振动，在一个光脉冲发射周期内可近似认为振动幅度恒定不变，即一条散射曲线只反映某一时刻的光纤应变。图 2(a)、(b)、(c)分别表示无应变、应变为 45 nε 和 735 nε 时的散射曲

线，可见光纤应变会引起明显的散射功率变化。对比图 2(b)和(c)可知，尽管光纤所受应变明显不同，但背向散射功率却近似相等，说明图 2(c)发生了相位模糊现象。图 2(d)为应变从 -1 000~1 000 nε 变化时的背向散射曲线，可见随着应变的增加，背向散射光功率呈周期性起伏，周期约为 690 nε。

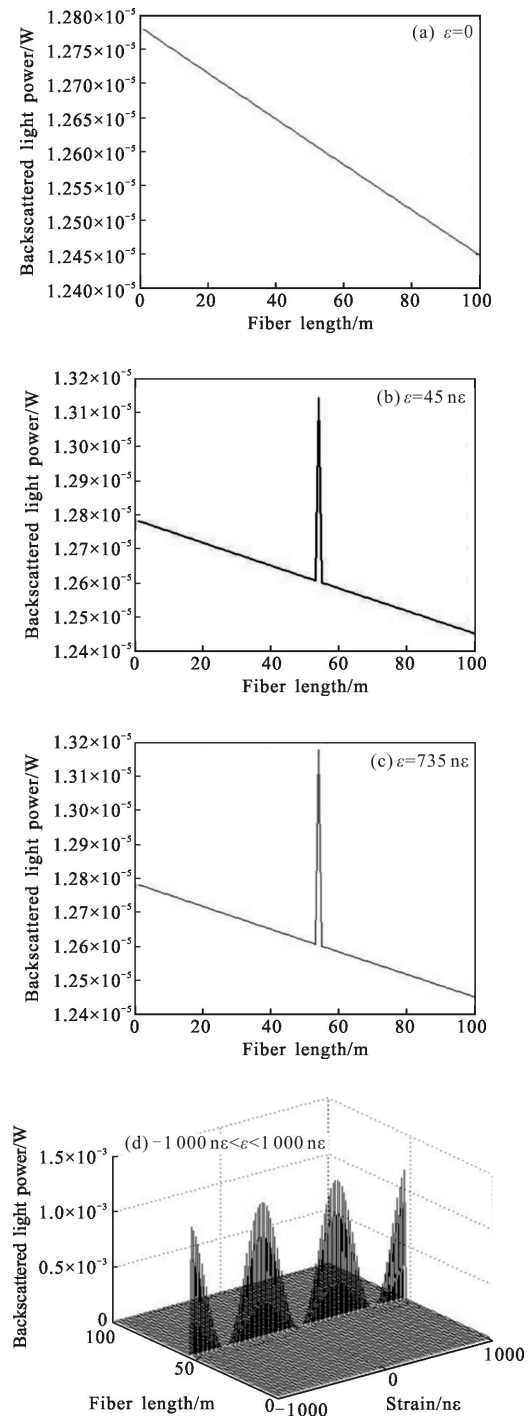


图 2 不同应变下的背向散射曲线  
Fig.2 Backscattering traces under different strains

## 2 相位模糊对传感系统性能的影响

当均匀作用在传感光纤上的应变超过一定范围时会引起相位模糊现象,在不采用相位展开运算的情况下必然会导致被测信号的不确定性,从而影响系统性能。

### 2.1 对应变测量范围的影响

光纤应变较小时,光功率变化比较微弱,若信噪比低于系统为达到一定测量精度所要求的信噪比,则无法正确解调应变信息。因此, $\varphi$ -OTDR 振动传感系统应变测量范围下限主要由系统信噪比决定。

动态应变测量范围上限表示系统能够准确检测的最大应变。由公式(2)可知,为了避免相位模糊现象的发生,从而准确地检测出光纤的动态应变,应变引起的干涉光场相位差变化范围为 $[0, \pi]$ 。公式(5)中, $\varepsilon^2$ 项的系数很小,因此在一定的光纤应变范围内,干涉光场相位差 $2\varphi_{kl}'(t)$ 与 $\varepsilon$ 呈近似线性关系,线性度为0.95。因此,系统可准确检测的最大应变受相位模糊现象限制。

### 2.2 对振动频率和幅度测量的影响

对于 $\varphi$ -OTDR 振动传感系统,振动频率和幅度都是待测量,在不采用相位展开技术的情况下,因为接收端无法识别超过主值的相位变化,从而会将较大的应变变化误判为高频振动信息,图3给出了应变发生位置处光功率随时间的波动情况。

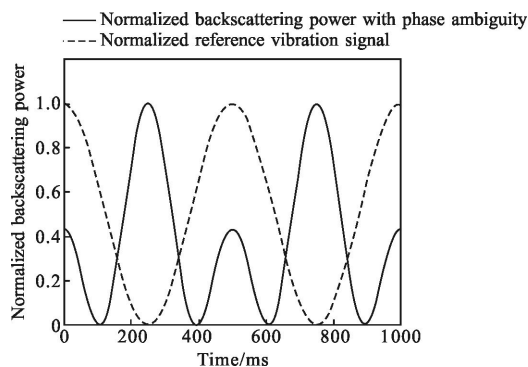


图3 相位模糊引起的散射光功率波动频率变化

Fig.3 Change of fluctuation frequency of backscattering power caused by phase ambiguity

图3中,虚线为动态应变小于系统测量范围时的参考振动信号,实线为动态应变大于系统应变测量范围时散射光功率随时间的变化曲线。为了直观

表示散射光功率波动频率与外加振动信号频率的关系,图3将两种信号做了归一化处理。当系统发生相位模糊时,超过测量范围的应变信号产生新的光功率凸起,造成振动频率的误判;在确定振动幅度时会造成应变测量的错误;若超过主值的干涉光场相位差所对应的背向散射光功率小于系统的最小可检测功率,还会因散射信号被淹没在噪声中而发生应变信息的漏报。

## 3 应变测量范围与空间分辨率的关系

振动频率的误判、振动幅度的测量错误和应变信息的漏报都会降低传感系统的可靠性,为了解决相位模糊问题,获得正确的相位分布,可以对包裹相位进行相位展开处理。但在实际应用中,相位展开过程受噪声影响严重,常用的相位展开算法都围绕如何减小噪声对展开行为的影响而进行,导致相位展开算法复杂<sup>[9-10]</sup>。而且相位展开技术的采用还会限制系统的振动频率测量范围和增加信号采集处理单元的成本<sup>[3]</sup>。实际测量时,包裹相位包含无法完全消除的剩余噪声,可能导致相位展开失败。因此,利用相位展开技术来解决相位模糊问题不仅复杂,而且存在展开失败的风险。所以,有必要研究扩展系统应变测量范围的方法。

假设动态应变均匀作用在传感光纤一个空间分辨率长度上,散射点产生的散射光在光电检测器中发生干涉作用,公式(5)中令 $L_{kl}=L$ ,即考虑一个空间分辨率长度上的最大干涉光场相位差,可得干涉光场相位差与空间分辨率、光波长和最大可检测应变值之间的关系。 $\lambda=1550\text{ nm}$ 时,系统最大可检测应变值与空间分辨率的关系如图4所示。

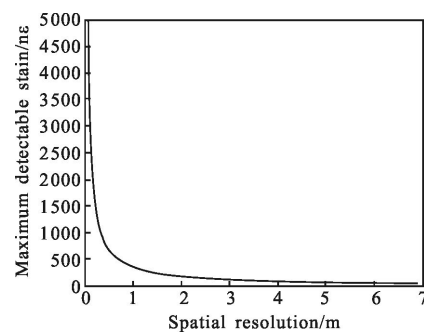


图4 最大可检测应变与空间分辨率的关系

Fig.4 Maximum detectable strain vs spatial resolution

由图 4 可知,系统最大可检测应变与空间分辨率近似呈反比例关系,空间分辨率为 10 cm 时,最大可检测应变约为  $3.45 \mu\epsilon$ ,而空间分辨率为 7 m 时,最大可检测应变只有  $50 n\epsilon$ 。由此可知, $\varphi$ -OTDR 振动传感系统空间分辨率越高,最大可检测应变越大,通过提高空间分辨率可增大系统应变测量范围。

#### 4 分析与讨论

由上述分析可知,相位模糊不但会引起振动频率和振动幅度测量的错误,还会导致应变信息的漏报,从而严重限制了系统的动态应变测量范围。提高空间分辨率是增大系统最大可检测应变的有效途径,但由于系统指标的相互制约关系,该做法将对系统信噪比产生不利影响。从避免相位模糊、增加应变测量范围方面考虑,系统空间分辨率越高即入射光脉冲宽度越小越好,但脉冲宽度越小,其携带能量越少,产生的背向散射光功率越低,从而使系统信噪比越低,导致传感距离减小和应变测量灵敏度降低。为了提高系统信噪比可以适当提高入射光功率,另一方面需要最大限度地降低系统噪声。

避免相位模糊现象的发生可以从两方面入手:首先,根据实际工程要求优化  $\varphi$ -OTDR 振动传感系统结构、合理规划布线方案,防止传感光纤应变超过相位模糊临界值,从而达到预防相位模糊现象发生的目的;其次,综合考虑被测目标对系统最大可检测应变和空间分辨率、应变测量灵敏度和传感距离的要求,合理设置脉冲宽度、幅度、占空比等参数,通过提高空间分辨率来增大不发生相位模糊现象的应变测量范围,并通过优化激光器特性和系统噪声特性提高系统信噪比。

#### 5 结论

文中通过对  $\varphi$ -OTDR 振动传感系统背向散射光干涉过程进行理论分析,推导了系统散射光功率及干涉光场相位差与光纤应变关系的表达式,分析了相位模糊现象的发生原因及表现形式,研究了相位模糊对传感系统性能的影响及系统最大可检测应变与空间分辨率的关系,并进行了仿真验证。结果表明,相位模糊和系统信噪比是限制系统应变测量范

围的主要因素;相位模糊会引起振动频率和幅度测量的错误,以及大应变信息的漏报;系统空间分辨率越高,最大可检测应变越大。文中还通过讨论系统最大可检测应变、空间分辨率、信噪比、应变检测灵敏度和传感距离之间的关系,给出了预防相位模糊和提高系统性能的方法。文中关于  $\varphi$ -OTDR 振动传感系统相位模糊问题的研究为优化系统设计提供了有价值的参考。

#### 参考文献:

- [1] Taylor H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US, 5194847[P]. 1993-03-06.
- [2] Zhou Ling, Wang Feng, Wang Xiangchuan. Distributed strain and vibration sensing system based on phase-sensitive OTDR [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2015, 27(17): 1884-1887.
- [3] Masoudi A, Belal M, Newson T P. A distributed optical fiber dynamic strain sensor based on phase-OTDR [J]. *Meas Sci Technol*, 2013, 24: 1-7.
- [4] Liang Kezhen, Pan Zhengqing, Cai Haiwen, et al. Multi-parameter vibration detection system based on phase sensitive optical time domain reflectometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(8): 1-5. (in Chinese)
- [5] Qin Zengguang, Chen Liang, Bao Xiaoyi. Continuous wavelet transform for non-stationary vibration detection with phase-OTDR[J]. *Opt Express*, 2012, 20(18): 20459-20465.
- [6] Park J, Lee W, Taylor H F. A fiber optic intrusion sensor with the configuration of an optical time domain reflectometer using coherent interference of Rayleigh backscattering[C]//SPIE, 1998, 3555: 49-56.
- [7] Liu Hongwen. *Mechanics of materials II* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese)
- [8] Li Zhuoming. Research on distributed optical fiber temperature and strain sensing technology based on Brillouin scattering [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2007. (in Chinese)
- [9] Carballo G F, Fieguth P W. Probabilistic cost functions for network flow phase unwrapping [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2192-2201.
- [10] Hao Hongxing, Wu Lingda. PUMA-SPA: A phase unwrapping method based on PUMA and second-order polynomial approximation [J]. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2014, 11(11): 1906-1910.