DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)06-0117-05.

基于脉冲激光快速响应传感的输电线路监测系统

李 为[1]，邓建中[1]，曾 嘉[2]，徐朝玉[2]，吴志超[2]，黄田野[2]

(1.广东电网公司东莞供电局，广东 东莞 523000；
2.中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院，湖北 武汉 430074)

摘 要：针对传统光纤传感器实现困难、结构复杂且检测速度低的问题，提出一种基于矢量孤子偏振解调原理的新型光纤扭转传感器。该传感器由偏振控制器、单模光纤和偏振分束器组成，其中偏振控制器和偏振分束器实现矢量孤子的偏振解调，单模光纤作为传感部件。通过记录偏振解调后矢量孤子光谱中特定波长的偏移，来实现对单模光纤的扭转方向及扭转角度的检测。进一步地，利用时域拉伸—色散傅立叶变化技术可以将光谱信息映射到时域，最终实现对扭转相关信息的快速解调。

关键词：矢量孤子；偏振态；光纤传感；传感器；监测
中图分类号：TP277 文献标识码：A 文章编号：1003−7241(2025)06−0117−05

Transmission Lines Monitoring System Based on Pulsed Laser Fast Response Sensing

LI Wei[1], DENG Jian-zhong[1], ZENG Jia[2], XU Chao-yu[2], WU Zhi-chao[2], HUANG Tian-ye[2]

(1. Dongguan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Company, Dongguan 523000, China;
2. School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the problem of hard realization, complex structure and low-speed detection in traditional fiber sensor, a new fiber torsion sensor based on the polarization resolution of vector solitons is proposed. The sensor is composed of a polarization controller, a segment of single mode fiber and a polarization beam splitter. The polarization resolution of vector solitons is realized by polarization controller and polarization beam splitter, and single mode fiber operates as sensing component. By recording the shift of specific wavelength in the spectrum of vector soliton after polarization resolution, the torsion direction and torsion angle of single mode fiber can be measured. Furthermore, the spectrum could be mapper to temporal domain by using time-stretch dispersion fourier transform technique, and the information of torsion could be resolved quickly.

Keywords: vector solitons; polarization; fiber sensing; sensor; monitor

0 引言

近年来，随着人们生活水平的逐渐提高和社会经济水平的不断发展，在生活生产中对于电力资源的需求日益增大，各类电力系统应用场景愈发复杂且工程规模也应需扩大。再者我国疆域广阔，随着电力系统网络覆盖范围的逐渐扩大，电力传输网需要跨越不同地质条件和气候环境的众多区域，尤其是在地质条件恶劣、气候环境多变的地区，输电线路能够持续稳定地传输工作便成为重点。输电线路能够安全、高效地进行工作，可以保证电力传输的稳定并避免不必要的损耗，大幅度地减小经济和财产损失。

在输电线路传输电力的过程中，需要实时监测线路相关工程参数以确保传输顺利进行，其中应变、温度、扭矩和侧向力等参数能反映传输过程中的具体情况。事实上，输电线路对于外界环境的变动并不敏感，但其所处的地质条件和气候环境还是会对线路产生较大影响甚至造成事故。当发生地震、泥石流等地质灾害时，剧烈的晃动或撞击会造成线路的强力摆动。而当遭遇气候急剧变化或处于极端气候环境时，例如强风、强降雨及覆冰等状况也会诱发输电线路的舞动。一旦摆动的力度、幅度过大或者时间过长，便会使得输电线路所受的应力增加进而产生扭转，轻则线路损伤、使用寿命降低，对输电安全构成威胁，重则线路断线断股、相互混线，引起输电线路重大事故，造成巨大的经济损失。因此，对于输电过程中线路相关参数的实时监测十分重要。得益于电类或电磁类传感器对于相关参数监测具有良好的实时性和准确性，其在输电线路的监测中得到了广泛应用[1−3]。

然而在一些特殊区域进行输电工作时，例如在高海拔地区，输电线路面临雷击、降雪和覆冰等极端天气的风险会大大增加。在此类环境因素恶化的现实下，传统的

收稿日期：2024-02-05

电类或电磁类传感器其测量数据的有效性便受到限制，可靠性也受到质疑。因此，光纤传感器相较于传统电类或电磁类传感器，其在恶劣环境下所具有的优势便得到研究人员的青睐[4-7]。光纤传感器抗电磁干扰能力强、抗腐蚀性环境能力强、灵敏度高并且噪声低，是研究人员广泛关注的焦点。过去数十年来，通过改进和完善光纤结构，各类基于光纤布拉格光栅(fiber bragg grating，FBG)、长周期FBG和光纤干涉仪的光纤传感器为人们所设计得到[8-10]。其中FBG不仅对外界的温度敏感，可以用作温度传感器，它还对自身的形变敏感，进而作为应变传感器，可以应用在关注应变相关参数的传感系统中；而如果需要确定旋转方向并测量扭转率，预扭转长周期FBG便可以达到预计的要求；另外在光学压力传感应用场景中，法布里－珀罗干涉仪传感器也得到了大量的使用[11-13]。

传统基于FBG、长周期FBG和光纤干涉仪的光纤传感器检测波长的漂移、光强的强度变化或实现波长偏移扫描，通常需要使用宽谱光源和商用示波器信号分析仪(oscilloscope signal analyzer，OSA)。虽然其具有较好的测量精度，但OSA的扫描速度限制了传感器的检测速度，此外对宽带光源的依赖也导致传感器的波长解调系统造价高昂且体积庞大。本文基于矢量孤子偏振解调的原理，分析扭转光纤所造成的矢量孤子相关参数变化对于光谱的影响，设计了一种新型的扭转传感器。然后利用时域拉伸－色散傅里叶变换(time-stretch dispersion fourier transform，TS-DFT)技术，将光纤扭转后的激光腔输出光谱映射到时域，完成对扭转信息的快速解调。

1 扭转传感原理及仿真分析

1.1 扭转传感原理矢量孤子

偏振解调装置主要组成部分包括一个偏振控制器(polarization controller，PC)和一个偏振分束器(polarization beam splitter，PBS)，矢量孤子的偏振解调原理示意图如图1所示。

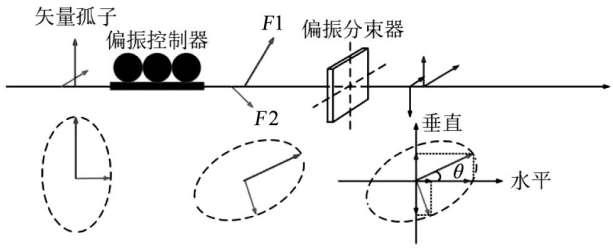


图1 矢量孤子偏振解调原理示意图

在该装置中，矢量孤子会沿着PBS的两个偏振轴产生投影，并且两个偏振轴上的投影结果可作为后续测量分析的重要基础。而在通过PBS进行偏振分光操作前，前置的PC可以通过旋转来改变矢量孤子两个偏振分量相较于PBS偏振轴的投影角度θ，并偏振分量之间的相位差也会发生变化。若调整PC恰好将两个偏振分量的偏振态与PBS的两个偏振态重合，便可以实现矢量孤子的完全分光。除了这种情况外，PBS的水平和垂直轴上都将接收到两个偏振分量各自相较于偏振轴的投影分量，来自不同偏振分量的投影分量在PBS进行叠加，最终实现矢量孤子偏振分量的投影叠加。

对于传统的标准矢量孤子，其两个正交偏振分量均为单脉冲，因此也被称为‘1+1’型矢量孤子。在其偏振分量之间的时间间隔不为0的前提下，经过偏振解调装置并进行投影叠加后，它便成为具有凹陷的孤子脉冲，同时其光谱中也因此产生凹陷。事实上，如果偏振解调装置中PC的圆盘按照顺时针转动，光谱中凹陷的中心波长会随着转动角度而发生线性红移，反向转动则产生线性蓝移。另外，凹陷中心波长偏移量与PC圆盘转动角度的线性关系具有较好的重复性。综上所述，矢量孤子投影叠加后光谱中凹陷的中心波长偏移量与PC的旋转角度具有良好的线性变化关系，而这一线性关系便是实现扭转传感器的基础。

1.2 扭转传感仿真分析

为了定量分析波长偏移量与旋转角度之间的线性关系，需要通过数值仿真来进行分析。假设‘1+1’型矢量孤子中的两个孤子脉冲均为双曲正割型脉冲F_1和F_2，它们在经过PC后可以表征为

$$F_1 = A_1 \operatorname{sech}\left(1.763\frac{t-\Delta T/2}{T_0}\right)\exp\left(i\frac{2\pi ct}{\lambda_1}\right) \tag{1}$$

$$F_2 = A_2 \operatorname{sech}\left(1.763\frac{t+\Delta T/2}{T_0}\right)\exp\left(i\frac{2\pi ct}{\lambda_2}+\varphi_t\right) \tag{2}$$

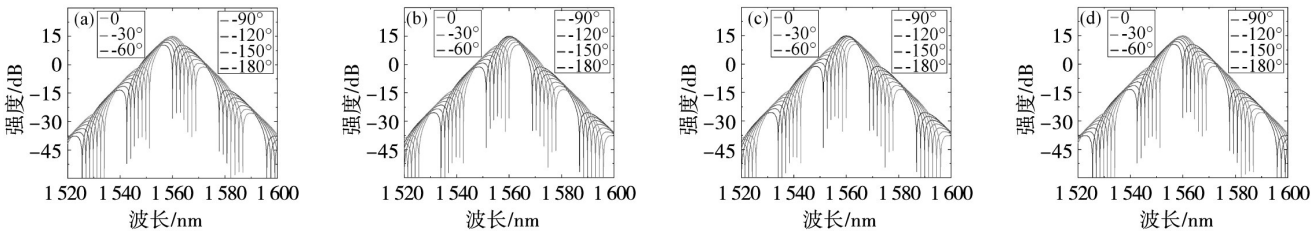
式中，A_1和A_2分别是矢量孤子中两个孤子脉冲的幅度，ΔT是两个孤子脉冲之间的时间间隔，并且两个孤子脉冲具有相同的脉冲宽度T_0，而λ_1和λ_2则分别是两个脉冲的中心波长。$\phi_t=\phi_i+\Delta\phi$为矢量孤子两个孤子脉冲的总相位差，其中ϕ_i为初始相位差，而$\Delta\phi$为经过PC后产生的相位差。进一步地，在矢量孤子经过PBS后，PBS的两个正交偏振轴上可以得到投影叠加结果，分别表示为

$$H = F_1\cos\theta + F_2\sin\theta \tag{3}$$

$$V = F_1\sin\theta - F_2\cos\theta \tag{4}$$

式中，H和V分别为PBS水平轴和垂直轴上的投影叠加结果，θ为F_1与PBS水平轴的夹角。

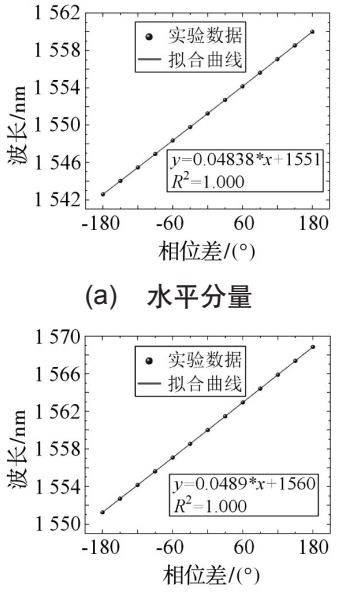
对于以上的参数，包括脉冲的强度(A)、脉宽(T_0)、时间间隔(ΔT)和中心波长(λ)在内的参数均由激光器谐振腔的腔内结构决定，而当其结构稳固确定下来后，矢量孤子的投影叠加结果便取决于投影角度(θ)和相位差(ϕ_t)。在本文中，主要研究引起光谱凹陷中心波长红移或蓝移的



(a) φ_t从0°到-180°时水平分量　(b) φ_t从0°到-180°时垂直分量　(c) φ_t从0°到180°时水平分量　(d) φ_t从0°到180°时垂直分量

图2　水平和垂直分量光谱中凹陷随相位差φ_t分别变化的数值仿真结果

主要参数ϕ_t，因此假定$A_1=A_2=1$、$\Delta T=0.5$、$T_0=0.5$、$\theta=45°$。在这些参数固定不变的前提下，通过数值仿真分析ϕ_t对光谱凹陷偏移的影响。图2显示了PBS两个正交偏振轴上投影叠加结果中，光谱凹陷的中心波长随着相位差ϕ_t变化而偏移的演化过程。图2(a)和图2(b)分别表示PBS水平轴和垂直轴上投影叠加结果光谱中凹陷随ϕ_t从0°到−180°变化的偏移过程，而图2(c)和图2(d)则表示随ϕ_t从0°到180°变化的偏移过程。由图2可以发现，凹陷波长的偏移量与ϕ_t的变化保持着较好的线性关系。ϕ_t的正向增加引起中心波长的右向偏移，反向增加引起中心波长的左向偏移，并且二者在ϕ_t变化相等的情况下偏移量完全相同。



(a) 水平分量

(b) 垂直分量

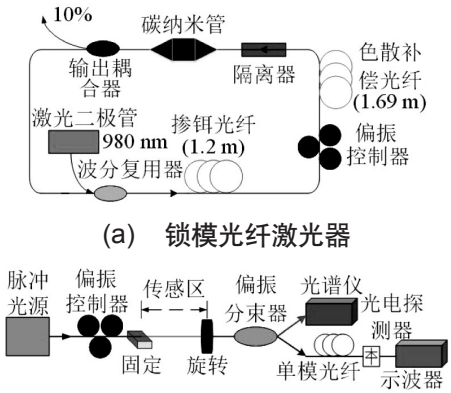
图3　水平和垂直分量光谱凹陷波长与相位差的线性拟合

以上的数值仿真结果定性地分析了相位差变化与波长偏移量的关系，为了进一步地定量分析二者的数值关系，图3(a)和图3(b)分别给出了PBS水平和垂直分量光谱中指定初始波长处的凹陷偏移量关于相位差的线性拟合结果。从图3可知，水平分量中初始在1 551 nm处的光谱凹陷(ϕ_t为0时波长为位于1 551 nm)，随ϕ_t变化的波长偏移灵敏度为0.048 38 nm/°；而垂直分量中初始在1 560 nm处的光谱凹陷，随ϕ_t变化的波长偏移灵敏度为0.048 9 nm/°。除此之外，从图2还可以得知，投影叠加后的两个正交分量在$\phi_t=-180°$时的光谱与$\phi_t=180°$时的光谱形状相同，证明光谱凹陷随ϕ_t的变化呈周期性，周期为360°。

2　扭转传感器实验装置设计

2.1　实验设计

基于上述的数值仿真结果和分析，搭建了基于矢量孤子的扭转测量实验装置，其示意图如图4所示。



(a) 锁模光纤激光器

(b) 扭转测量装置

图4　实验装置结构示意图

图4(a)为产生矢量孤子的光纤激光器，为了避免光谱中会存在影响光谱凹陷深度的Kelly边带等特征光谱，实验装置选择了净色散处于正色散区的光纤激光器，它产生的矩形光谱便于进行波长解调。对于该激光器，采用波长为976 nm的激光二极管作为泵浦光源，它通过980/1 550 nm的波分复用器进入激光腔内。其中增益介质采用1.2 m长的掺铒光纤(Nufern，SM−ESF−7/125)，另外还使用了长约10.76 m的单模光纤和1.69 m长的色散补偿光纤，使得总腔长达到了13.65 m。其中色散补偿光纤用于补偿腔内的负色散，使得腔内净色散值约为0.021 ps^2并达到预期要求。激光腔内通过自制的碳纳米管可饱和吸收体来实现自启动锁模，该可饱和吸收体在波长1 550 nm处具有20%的低强度吸收且具备4%的调制深度。另外偏振

不敏感的隔离器则是用来抑制有害反射来确保腔内的单向传播。

图4(b)为扭转测量实验装置示意图，其中使用两个光纤夹具将一段50 cm长的单模光纤作为传感器固定在光学平台上，一端使用夹具固定，另一端则可以扭转该传感器。扭转传感器与PC和PBS构成了矢量孤子偏振解调系统。输出的结果可以通过分辨率为0.02 nm的光谱仪(横河AQ6370)进行光谱测量，还可以通过由一段30 km长的标准单模光纤、一个5 GHz的光电探测器(Thorlabs，DET08CFC)和一台采样率为20 GSa/s、模拟带宽为8 GHz的示波器(LeCroy WavePro804HD)组成的TS-DFT测量系统将光谱映射至时域，实现传感信息的快速解调，从而最终检测出传感器的扭转率。

2.2 实验结果与讨论

当泵浦功率增加到约为240 mW时，适当调整腔内PC，便可实现激光器的自启动锁模，并获得矢量孤子输出。由于激光腔工作在正常色散区，孤子脉冲的光谱为标准的矩形谱，如图5中实线所示。除此之外，还存在具有凹陷的光谱(虚线)，证明矢量孤子的两个正交偏振分量在通过PBS后进行了投影叠加，存在着相互作用。

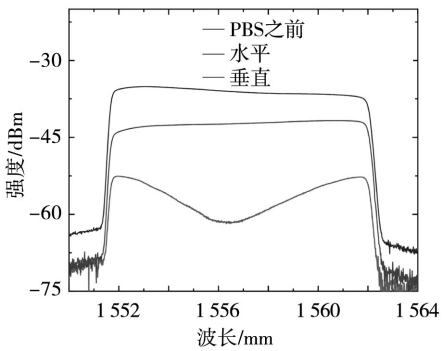


图5 OSA测得的光纤激光器平均光谱

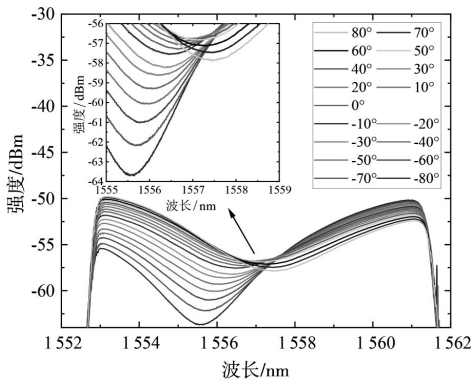
在得到光谱中具有凹陷的孤子脉冲后，固定传感装置中的两个PC，通过适当旋转夹具来实现50 cm长单模光纤的扭转，最终得到了光谱中凹陷处波长随扭转率变化而偏移的实验结果，如图6所示。

从图6(a)可以看出，当扭转角度以10°的步长从-80°增长到80°，光谱中凹陷的中心波长从1 555.61 nm偏移到1 557.63 nm。在实验过程中，光谱凹陷中心波长的偏移方向取决于对单模光纤的扭转方向，顺时针扭转单模光纤，会发生波长红移，而逆时针扭转，则会波长蓝移。图6(b)则进一步地给出了扭转角度范围更宽情况下凹陷中心波长与单模光纤扭转角度的对应关系，从中可以明确看到，当前激光器参数条件下的单模光纤扭转角度线性检测范围为-80°到80°。为了揭示扭转角度大小与光谱凹陷中心波长偏移量的数值关系，对实验数据进行线性拟合，二者的拟合结果如图6(c)所示。可以看出，在扭转角度为-80°到80°的范围内，二者具有良好的线性度(R^2=0.997 6)，且波长关于旋转角度的变化率为12.53 pm/°。

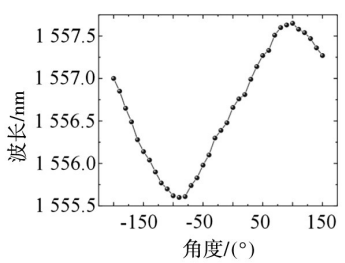
在旋转单模光纤的过程中，其扭曲率可以通过ω/L计算得出，ω和L分别是旋转角度和光纤长度。对于50 cm长的单模光纤，从-80°旋转到80°(每10°记录一次测量数据)，其扭曲率也从-2.79 rad/m变化到2.79 rad/m，步长为0.35 rad/m，最终得到扭曲灵敏度为0.36 nm/(rad/m)。

除了采用传统手段通过光谱仪获取输出结果外，还可以使用TS-DFT技术对输出结果进行快速解调。图7显示了OSA测得的平均光谱(实线)和TS-DFT测量系统通过示波器采集到的时域光谱(虚线)，从图中可以发现二者十分相似，从而验证了TS-DFT技术可以实现对于光纤扭转传感信息的时域解调。

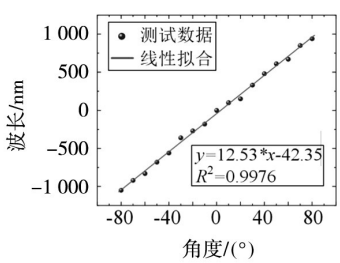
能够通过TS-DFT技术得到时域光谱后，便利用其记录在不同扭转角度下时域光谱凹陷中心波长的偏移过程，结果如图8所示。其中图8(a)显示了单模光纤从0°扭转到32°时凹陷中心波长线性右移，以及从0°扭转到-32°时波长线性左移的变化。而图8(b)则揭示了在-32°到32°的扭转角度范围内，时域光谱中时间偏移量与扭转角度的线性拟合结果，二者具有良好的线性度(R^2=0.993 1)，斜率为9.35 ps/(°)，得到扭转率的时间灵敏度



(a) 不同扭转角度下的光谱



(b) 凹陷处波长与扭转角度的映射



(c) 波长偏移量与扭转角度的线性拟合

图6 OSA光谱随扭转角变化

为0.28 ns/(rad/m)。TS-DFT技术的优势在于可以将光谱信息映射到时域，以时域信息的形式展现出来，因此可以得到光纤激光器所输出的每一个脉冲的光谱，所以扭转检测速率理论上最高为激光器的重复频率14.65 MHz，即68 ns，远小于光谱仪扫描一次所需时间，这将使得扭转检测的高速测量在实际应用中可能得到实现。

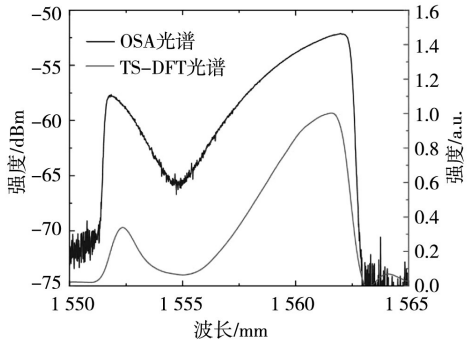
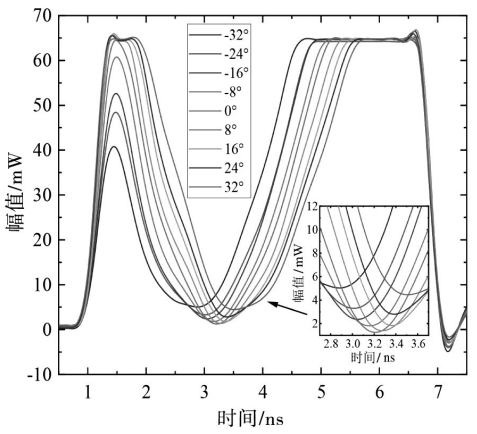
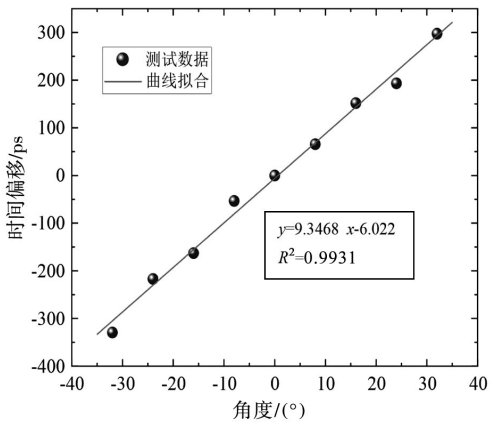


图7 OSA测得的平均光谱与TS-DFT采集到的时域单射光谱



(a) 不同扭转角度下的时域单射光谱



(b) 波长偏移量与扭转角度的线性拟合

图8 TS-DFT技术测量的光谱

3 结束语

基于矢量孤子偏振解调原理的高速光纤扭转传感器是一种新型光纤传感器，与传统扭转传感方案不同，它利用传感光纤的扭转角度与光谱中凹陷处中心波长的偏移量之间的线性关系实现传感，即通过波长偏移量的方向和大小来反映光纤扭转的方向和角度。该传感器结构简单、实现方便，由偏振控制器、单模光纤和偏振分束器组成，它在实验中所测得的扭转灵敏度为0.36 nm/(rad/m)。在传感器的检测方面，除了可以使用传统的光谱仪实现光谱的获取，还可以利用TS-DFT技术将扭转传感器的输出光谱映射到时域，完成对扭转传感信息的快速采集，从而实现整个传感系统的高速检测，理论测量时间可缩减至68 ns。本文所提出的光纤传感器可以为光纤传感和检测的实现提供一种新的思路，并有望对于极限、恶劣的输电线路监测工作中发挥重要作用。

参考文献：

[1] 赵增华，石高涛，韩双立，等.基于无线传感器网络的高压输电线路在线监测系统[J].电力系统自动化，2009，33(19)：80-84.

[2] 王晓希.特高压输电线路状态监测技术的应用[J].电网技术，2007，31(22)：7-11.

[3] 陈海波，王成，李俊峰，等.特高压输电线路在线监测技术的应用[J].电网技术，2009(10)：55-58.

[4] 李成宾，杨志，黄春林.光纤布里渊传感在输电线路覆冰监测中的应用[J].电力系统通信，2009(6)：37-41.

[5] 邓元实，贺含峰，刘凤莲，等.光纤光栅器件在输电线路覆冰监测中的应用[J].电瓷避雷器，2014(3)：39-43.

[6] 罗健斌.基于光纤传感技术的高压输电线路覆冰状态监测研究[D].广州：华南理工大学，2013.

[7] 栗鸣，徐拥军.光纤光栅传感技术用于架空输电线路状态监测[J].电力系统通信，2012，33(11)：59-64.

[8] Guo-ming Ma，Ya-bo Li，Nai-qiang Mao，et al.A Fiber Bragg Grating-Based Dynamic Tension Detection System for Overhead Transmission Line Galloping[J].Sensors，2018，18(2)：365.

[9] Luo J，Hao Y，Ye Q，et al.Development of Optical Fiber Sensors Based on Brillouin Scattering and FBG for On-Line Monitoring in Overhead Transmission Lines[J].Journal of Lightwave Technology，2013，31(10)：1559-1565.

[10] 赵娜，傅海威，邵敏，等.基于光纤粗锥型马赫-曾德尔干涉仪的高灵敏度温度传感器的研制[J].光谱学与光谱分析，2014，34(6)：1722-1726.

[11] O.Frazão，C.Correia，J.M.Baptista，et al.Ring Fibre Laser with Interferometer Based in Long Period Grating for Sensing Applications[J].Optics Communications，2008，281(22)：5601-5604.

[12] J.Chang，Q.Wang，X.Zhang，et al.Fiber-Optic Vibration Sensor System[J].Laser Physics，2008，18(7)：911-913.

[13] S.Liu，Y.Wang，C.Liao，et al.High-Sensitivity Strain Sensor Based On in-Fiber Improved Fabry-Perot Interferometer[J].Optics Letters，2014，39(7)：2121-2124.

作者简介：李为(1987—)，男，本科，工程师，研究方向：通信工程。