

基于单斜坡法的光电复合海缆温度、应变快速测量方法

徐志钮¹,胡宇航¹,赵丽娟¹,樊明月¹,郭文翰¹,覃华²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003;2. 广西电网公司 电网规划研究中心,广西 南宁 530000)

摘要:介绍了海缆监测的必要性和基于光纤分布式传感的高压光电复合海缆在线监测系统。为了提高基于布里渊散射的海缆温度、应变测量的实时性,介绍了单斜坡法的原理并将其引入海缆在线监测方法中。给出了基于洛伦兹模型时单斜坡法布里渊频移的计算公式。基于数值产生不同信噪比的布里渊谱和实测裸光纤/海缆复合光纤的布里渊谱。比较了单斜坡法和基于扫频方式的谱拟合法的准确性和实时性,重点研究了布里渊谱不同信噪比和光纤沿线布里渊频移不同程度波动情况下工作点的选择问题。结果表明:单斜坡法可使布里渊谱测量时间减少到原来的几分之一甚至更小,同时布里渊频移误差仅小幅增加。用于海缆温度和应变监测时单斜坡法工作点建议选择为光纤沿线布里渊频移的均值减去一半的线宽,所确定的工作点对不同信噪比和光纤/海缆复合光纤沿线布里渊频移常见程度波动情况均具有不错的适应性。

关键词:海缆;光纤分布式传感;温度和应变;单斜坡法;在线监测

中图分类号:P 756.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202005005

0 引言

海底电缆是跨海电力传输的主要手段^[1-2]。近年来,研究人员通过在海底电缆中埋入光纤构成光电复合海底电缆(简称海缆),可实现电能和电网信息的同时传输^[3]。不同于海底电缆和海底光缆分别敷设的方式,海缆含有高压电缆铠装,因而具有更高的可靠性和安全性,且成本更低、所需的后续维护更少,同时又可节约海洋的路由资源^[4-5]。海缆长期处于复杂的海底环境中,承受电应力和热应力,会逐渐老化进而影响其正常运行和寿命。另外,机械应力和环境应力也会对海缆正常运行造成较大的影响^[6]。随着海洋开发利用活动的日益增加,海缆事故日趋频繁,有统计表明埕岛油田在2003—2013年期间发生了37次海底电缆故障^[6]。2007年7月,福建平潭110 kV海缆被船锚拖断造成全岛大面积停电27天,损失严重,给工农业生产和人民生活造成了重大影响^[7]。

海缆不仅造价十分昂贵,更为关键的是它铺设于海底,维修不便且费用较高,因此非常有必要对其状态进行监测。海缆的状态监测经历了绝缘电阻测量、 $\tan \delta$ 测量^[8]、局部放电测量^[9]、泄漏电流测量等

方法。这些基于电气量的测量方法灵敏度较高,为海缆的运行维护和安全运行做出了贡献,但上述方法在传感原理上主要基于电子测量技术,易受电磁干扰。而且海缆埋入海底,超声法^[9]和特高频法^[9]等局部放电测量方法难以应用。另外,以上方法难以实现故障定位,而且对外力导致的机械破坏未必能实现有效测量。因此迫切需要一种能检测海缆绝缘和机械故障且能实现故障定位的方法,光纤分布式传感技术^[10]就是这样一种方法。

相比光纤光栅方式^[11],光纤分布式传感技术可以实现光纤沿线的温度和应变的分布式测量,且无需另外铺设光纤,在海缆在线监测系统中有着广泛的应用。目前针对福建平潭海缆^[12-13]和舟山海缆^[14]等已有多套在线监测系统投入运行,对保障海缆的稳定运行发挥了积极作用。目前,海缆在线监测系统均采用扫频方式获得布里渊谱,进而采取谱拟合等方式^[10,15-17]计算布里渊频移以及温度和应变。该方法准确性较高,但基于扫频方式的谱测量耗时较长。已有学者在快速测量^[18-20]和布里渊频移快速估算^[21-23]方面做了一些工作并取得了一些进步,但未在海缆监测中得到应用。

为克服以上问题,本文将单斜坡法^[24]引入基于分布式传感技术的海缆温度、应变监测方法中,根据数值产生布里渊谱和实测典型裸光纤、110 kV海缆复合光纤的布里渊谱,比较了单斜坡法和基于扫频方式的谱拟合法的准确性和实时性。考虑到单斜坡法的工作点对其准确性有显著影响,是算法成功与否的关键,本文基于不同信噪比和光纤沿线布里渊频移波动程度的谱信号系统研究了单斜坡法工作点的选择问题,并采用典型裸光纤、110 kV海缆复合光纤的实测布里渊谱验证了单斜坡法应用于海缆监测的有效性,同时针对工作点的选择给出了建议。

收稿日期:2019-08-18;修回日期:2020-03-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607066,61377088);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020YJ005,2019-MS090,2019MS085);河北省自然科学基金资助项目(E2019-502177)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51607066, 61377088), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2020YJ005, 2019MS090, 2019MS085) and the Natural Science Foundation of Hebei Province (E2019502177)

1 基于光纤分布式传感的海缆在线监测系统

福建平潭县 A、B 两海岛采用 3 根单相 110 kV YJQ41×300 mm² 海缆进行电能输送和电力系统通道通信,其主要部分敷埋于海底河床 2 m 以下的饱和水土壤中,相间间距为 60 m。三相海缆敷设示意图如图 1(a)所示。为保障该海缆的安全稳定运行,预防严重的绝缘和机械故障,课题组于 2012 年建设并完成了针对该 110 kV 光电复合海缆的立体综合监测系统^[12-13],该系统主要由基于布里渊光时域反射仪 BOTDR (Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry) 的 110 kV 海缆状态监测子系统、船舶自动识别系统 AIS (Automatic Identification System)、视频监控、海洋磁力仪等部分构成,其中 110 kV 海缆状态在线监测子系统如图 1(b)所示。

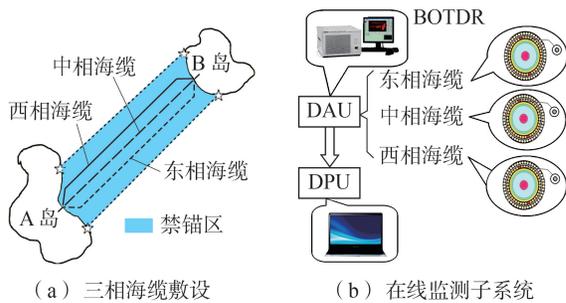


图1 三相海缆敷设和基于 BOTDR 的海缆状态监测子系统示意图

Fig.1 Schematic diagrams of submarine cable laying and submarine cable condition monitoring subsystem based on BOTDR

基于 BOTDR 的 110 kV 海缆状态监测子系统采用 BOTDR 实时监测海缆的应变、温度分布,旨在实现故障隐患预警、故障告警及故障点定位的功能,是整个系统中最重要的一部分,其与 AIS、视频监控系统结合还可实现对实时视频的采集和确认^[12]。该状态监测系统采用六通道的监测方法以保障光纤应变、温度数据采集的准确性,通道 1/2、3/4、5/6 分别应用于东、中、西三相海缆。BOTDR 测试设备放置在 B 岛侧,通过普缆连接后将激光脉冲入射进海缆复合单模光纤中,激光在光纤中传输产生布里渊散射光,布里渊散射光反向传输到达发射端,在发射端利用数据采集单元 DAU (Data Acquisition Unit) 和数据处理单元 DPU (Data Processing Unit) 检测布里渊散射光信号的频移即可得到光纤的应变、温度信息。该系统采用扫频方式获得布里渊谱,虽然准确性较高,但实时性较差。

2 单斜坡法

当入射脉冲光宽度大于 10 ns 后测量背向布里渊散射光得到的布里渊谱近似满足洛伦兹模型:

$$g_B(v) = g_0 \frac{(\Delta v_B/2)^2}{(v - v_B)^2 + (\Delta v_B/2)^2} \quad (1)$$

其中, g_B 为增益; v 为频率; g_0 为增益峰值; Δv_B 为线宽; v_B 为布里渊频移。

虽然布里渊谱的峰值、线宽和频移均与光纤的温度和应变有关,但布里渊频移抗噪能力最强、稳定性最高,因而被用于温度和应变的传感。目前获得布里渊频移的主要方式是采用扫频等方式获得布里渊谱,通过最小二乘拟合等数值方法提取布里渊频移。为克服该方法在实时性方面的不足,广大科研工作者开展了相关研究。文献^[24]研究发现固定频率点时对应的增益与布里渊频移有关,据此提出了一种根据固定频率点 v_0 下的增益计算布里渊频移的方法,称为单斜坡法,其原理表示为:

$$g_B(v_0) = g_0 \frac{(\Delta v_B/2)^2}{(v_0 - v_B)^2 + (\Delta v_B/2)^2} \quad (2)$$

光纤沿线布里渊频移的均值记为 v_{B0} , 光纤沿线的 v_B 在 $[v_{B0} - 2\Delta v_B, v_{B0} + 2\Delta v_B]$ 范围内变化, $v_0 = v_{B0} - \Delta v_B/2$ 时增益与布里渊频移的关系如图 2 所示,图中增益和增益梯度均取任意单位。

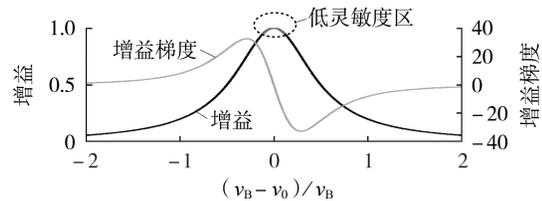


图2 频率固定时布里渊频移随增益及其梯度的变化

Fig.2 Brillouin frequency shift changing with gain and its gradient when frequency is fixed

由于单斜坡法仅需要测量 1 个频率点,测量时间通常比扫频法短很多,如果光纤长度较短则有望实现对振动的测量。相比相位敏感光时域反射 φ -OTDR (Phase-sensitive Optical Time-Domain Reflectometer) 技术,单斜坡法的优点是有望准确获得应变的幅值,而前者由于存在相位模糊而无法获得应变的准确值^[25]。

对式(2)所示的洛伦兹函数求一阶导数可得:

$$\frac{dg_B}{dv_B} = 2g_0 \frac{(\Delta v_B/2)^2 (v_0 - v_B)}{[(v_0 - v_B)^2 + (\Delta v_B/2)^2]^2} \quad (3)$$

若想获得采用单斜坡法时布里渊动态应变传感系统的灵敏度最大值,则需要令布里渊增益谱的斜率达到最大值。根据微分学中的极值原理,在布里渊增益谱的斜率最大值处二阶导数为 0。对式(2)求二阶导数可得:

$$\frac{d^2g_B}{dv_B^2} = 2g_0 \frac{3(\Delta v_B/2)^2 (v_0 - v_B)^2 - (\Delta v_B/2)^4}{[(v_0 - v_B)^2 + (\Delta v_B/2)^2]^3} \quad (4)$$

令该二阶导数为 0,即可得到布里渊增益谱动态

传感的最佳工作点,即洛伦兹模型的最佳工作点为:

$$v_0 = v_B \pm \frac{\Delta v_B}{2\sqrt{3}} \quad (5)$$

考虑到光纤沿线的布里渊频移会有波动,则将式(5)写为:

$$v_0 = v_{B0} \pm \frac{\Delta v_B}{2\sqrt{3}} \quad (6)$$

但该方式仅能保证当布里渊频移与工作点距离近似为 $\Delta v_B/2\sqrt{3}$,且噪声特性不随频率变化时,测得的布里渊频移准确性最高。而海缆沿线光纤受到温度和应变的作用导致布里渊频移在一定范围内波动,有些点可能会进入图2中增益峰值附近斜率较小的区域(低灵敏度区),误差会急剧增大,由此可见该工作点未必是最佳值。最佳工作点一旦确定,则根据式(2)可得布里渊频移计算方法为:

$$v_B = v_0 \pm \sqrt{\frac{g_0(\Delta v_B/2)^2}{g_B(v_0)} - (\Delta v_B/2)^2} \quad (7)$$

其中,“+”、“-”分别在工作点选择左侧半峰(工作点小于布里渊频移)、右侧半峰(工作点大于布里渊频移)时采用。如果洛伦兹模型与实测布里渊谱能很好地吻合,则可采用式(7)计算布里渊频移。如果洛伦兹模型与实测布里渊谱不能很好地吻合,则在单斜坡法中采用更多次叠加平均的方式得到高信噪比的布里渊谱并以其为基准值,然后采用插值方式计算布里渊频移。如果布里渊谱没有噪声,则根据式(7)可准确计算布里渊频移,但实测布里渊谱不可避免地含有噪声,将给布里渊频移测量结果带来误差。

计算得到布里渊频移后,可根据式(8)所示的布里渊频移与温度和应变的关系计算光纤温度、应变的变化量。

$$\begin{cases} \Delta T = (v_B(T) - v_{B0})/C_{B,T} \\ \Delta \varepsilon = (v_B(\varepsilon) - v_{B0})/C_{B,\varepsilon} \end{cases} \quad (8)$$

其中, v_{B0} 为温度为 T_0 并且无应变时的布里渊频移; $v_B(T)$ 、 $v_B(\varepsilon)$ 分别为不同温度(无应变)、应变(温度为 T_0)下的布里渊频移; $C_{B,T}$ 、 $C_{B,\varepsilon}$ 分别为针对布里渊频移的温度、应变敏感系数; ΔT 和 $\Delta \varepsilon$ 分别为温度和应变变化量的计算结果。

如果要想实现温度和应变的同时测量,则通常还需要借助其他与温度和应变相关的量,如布里渊强度^[26],此时温度和应变变化量的计算方法为:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{B,T} & C_{B,\varepsilon} \\ C_{P,T} & C_{P,\varepsilon} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_B(T, \varepsilon) - v_{B0} \\ P_B(T, \varepsilon) - P_B(T_0, 0) \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, $C_{P,T}$ 和 $C_{P,\varepsilon}$ 分别为针对布里渊强度的温度和应变敏感系数; $P_B(T, \varepsilon)$ 为温度、应变分别为 T 和 ε 时

的布里渊强度; $P_B(T_0, 0)$ 为温度、应变分别为 T_0 和 0 时的布里渊强度。

3 工作点选择

利用式(1)产生布里渊谱,线宽为40 MHz,增益峰值为1,扫频间隔为1 MHz。按照实测布里渊谱噪声特性对数值产生的谱添加高斯白噪声,峰值处信噪比分别设置为20、25、30、35和40 dB。设海缆长度为3 km,按空间分辨率为5 m产生布里渊谱; $v_{B0} = 10.7$ GHz,布里渊谱扫频范围为10.62到10.74 GHz。第1个测点的布里渊频移为 $v_{B0} - a\Delta v_B$ ($0.05 \leq a \leq 0.5$),沿着光纤到1.5 km处时线性增加到 $v_{B0} + a\Delta v_B$,到3 km处时线性减少到 $v_{B0} - a\Delta v_B$ 。本文将光纤沿线布里渊频移的脉动幅值 A_{BFS} 和脉动系数 C_{BFS} 定义为:

$$A_{BFS} = (v_{Bmax} - v_{Bmin})/2 \quad (10)$$

$$C_{BFS} = A_{BFS}/\Delta v_B \quad (11)$$

其中, v_{Bmax} 和 v_{Bmin} 分别为光纤沿线布里渊频移的最大值和最小值。本算例中 $a = C_{BFS}$ 。

考虑到噪声的随机性,每种情况下随机产生10000次含噪布里渊谱,采用单斜坡法计算布里渊频移。根据式(7)计算得到典型频移脉冲系数下布里渊频移误差与工作点的关系见图3。注意,图中布里渊频移误差为光纤沿线频移误差幅值的均值。

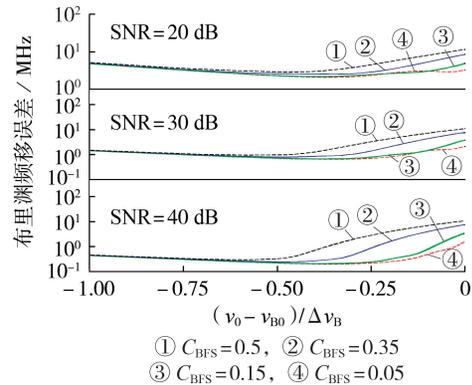


图3 工作点与单斜坡法布里渊频移误差的关系

Fig.3 Relationship between Brillouin frequency shift error evaluated by slope-assisted method and probe frequency

显然,图3中每条曲线的布里渊频移误差最小时对应的 v_0 即为最佳工作点。由图3可知,最佳工作点随光纤沿线布里渊频移脉动系数和信噪比的变化而变化。随着 C_{BFS} 的增加,最佳工作点与 v_{B0} 的差距有增加的趋势。统计仿真结果后发现最佳工作点在 $[v_{B0} - 0.775 \Delta v_B, v_{B0} - 0.2 \Delta v_B]$ 范围内变化,其均值为 $v_{B0} - 0.56 \Delta v_B$ 。如果在不同的光纤沿线频移脉动系数和信噪比下有一个固定的工作点,其误差比较接近真实的最佳工作点对应的误差,则有利于单斜坡法的推广应用。考虑到工作点在 $v_{B0} - 0.5 \Delta v_B$ 时布里渊频移误

差与最小误差差距不大,因此,本文暂定 $v_{B0}-0.5\Delta v_B$ 作为工作点。采用单斜坡法时,不同光纤沿线布里渊频移脉动系数及信噪比下的布里渊频移误差 E_{BFS} 与最佳工作点对应误差 E_{BFSm} 的相对误差见图4。

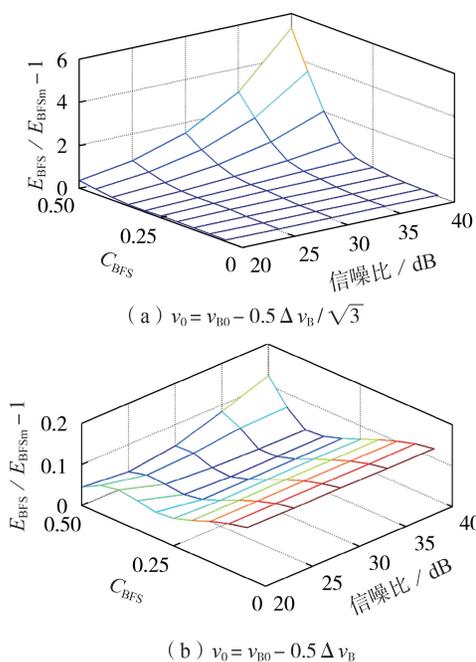


图4 采用单斜坡法时,不同脉冲系数和信噪比下

E_{BFS} 与 E_{BFSm} 的相对差距

Fig.4 Relative difference between E_{BFS} and E_{BFSm} with different values of C_{BFS} and SNR, when slope-assisted method is adopted

由图4可知,当工作点选择为 $v_{B0}-0.5\Delta v_B/\sqrt{3}$ 时, E_{BFS} 最大值约为最佳工作点对应误差 E_{BFSm} 的6倍;当工作点选择为 $v_{B0}-0.5\Delta v_B$ 时, E_{BFS} 最大值约为最佳工作点对应误差 E_{BFSm} 的1.1倍。从平均值上看,以上2种情况下的 E_{BFS} 分别比最佳工作点对应误差 E_{BFSm} 大56.22%和7.49%。因为海缆在运行中可能会存在过热点和受到应变的作用,导致布里渊频移发生不同程度的变化,当布里渊频移波动不大时选择 $v_{B0}-0.5\Delta v_B/\sqrt{3}$ 作为工作点准确性较高,但随着光纤沿线布里渊频移变化程度的增加,误差将增大;如果选择 $v_{B0}-0.5\Delta v_B$ 作为工作点则在本文提及的不同情况下均具有不错的准确性。因此,本文建议采用单斜坡法进行海缆在线监测时选择 $v_{B0}-0.5\Delta v_B$ 作为工作点。当然,实际应用时可根据光纤沿线布里渊频移的波动情况进行适当调整,即如果光纤沿线布里渊频移波动程度增加,则选择的工作点与 v_{B0} 的差距应更大一些。

针对以上数值产生的布里渊谱,采用基于洛伦兹模型的谱拟合法与单斜坡法(工作点设置为 $v_{B0}-0.5\Delta v_B$)的计算结果如表1所示。由表1可知:单斜坡法的误差更大;随着信噪比的增加,2种方法的布

里渊频移误差均有下降,当信噪比不小于30 dB时,单斜坡法的误差小于1 MHz。这说明采用单斜坡法时信噪比不能过低(叠加平均次数不能过少)。与扫频法动辄测量数十个频率点导致耗时较长不同,单斜坡法仅需测量固定频率点的增益,耗时较短,更加适合对准确性要求不高但对实时性要求较高的场合。另外,谱拟合法与单斜坡法的计算时间分别为40.68 ms和 3.81×10^{-5} ms,即单斜坡法的计算耗时明显短于扫频后的谱拟合法,这进一步保障了单斜坡法的实时性。

表1 谱拟合法与单斜坡法的布里渊频移计算误差 ($0.05 \leq C_{BFS} \leq 0.5$)

Table 1 Brillouin frequency shift error evaluated by spectrum fitting method and slope-assisted method, with $0.05 \leq C_{BFS} \leq 0.5$

信噪比 / dB	计算误差 / MHz	
	谱拟合法	单斜坡法 ($v_0 = v_{B0} - 0.5 \Delta v_B$)
20	0.38	2.56
25	0.23	1.42
30	0.14	0.80
35	9.56×10^{-2}	0.45
40	6.98×10^{-2}	0.26

4 实验验证

本节采用实验方式验证单斜坡法和对应的工作点选择方式的可靠性。在分析了大量实测海缆复合光纤沿线的布里渊频移后,本文选择2个典型案例。

(1) 案例1。

选取1根1 km左右的裸光纤,光纤在室温下由于缠绕产生应变,则布里渊频移随之有一定的变化,可模拟电气设备中敷设的光纤。采用中电科仪器仪表有限公司生产的AV6419型BOTDR测量布里渊谱。入射脉宽分别为50、100和200 ns;入射脉冲光波长为1550 nm;取样分辨率为0.1 m;扫频范围为10.52~10.92 GHz,扫频间隔为1 MHz;叠加平均次数分别设置为 2^{12} 和 2^{18} , 后者的信噪比很高。因此,针对叠加平均次数为 2^{18} 的情况采用基于洛伦兹模型和最小二乘的谱拟合法有望得到比较准确的结果,据此可获得谱拟合法和单斜坡法的误差。采用单斜坡法时,工作点与布里渊频移误差的关系如图5所示,不同工作点对应的光纤沿线布里渊频移误差见附录中的图A1;利用单斜坡法和谱拟合法计算得到的不同脉宽下光纤沿线的布里渊频移分布见附录中的图A2。

针对叠加平均次数为 2^{12} 的布里渊谱采用基于最小二乘和洛伦兹模型的谱拟合法与单斜坡法,2种方法的布里渊频移计算误差如表2所示。

(2) 案例2。

选取一根110 kV、型号为YJQ41×300 mm²海缆中复合的光纤,采用日本Advantest公司生产的

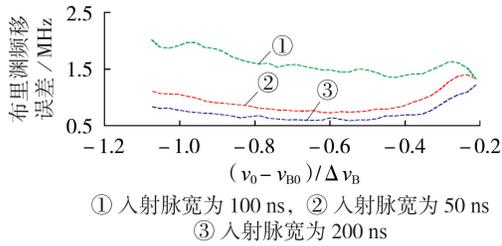


图5 采用单斜坡法时,不同工作点对应的布里渊频移误差(裸光纤)

Fig.5 Relationship between Brillouin frequency shift errors evaluated by slope-assisted method and probe frequency for bare fiber

表2 谱拟合法与单斜坡法的布里渊频移计算误差(裸光纤)

Table 2 Brillouin frequency shift errors evaluated by spectrum fitting method and slope-assisted method for bare fiber

脉宽 / ns	计算误差 / MHz		
	谱拟合法	单斜坡法 ($v_0=v_{B0}-0.5\Delta v_B/\sqrt{3}$)	单斜坡法 ($v_0=v_{B0}-0.5\Delta v_B$)
50	0.18	1.30	0.783
100	0.30	1.33	1.200
200	0.28	1.08	0.954

N8511型多通道BOTDR测量布里渊谱。入射脉宽和波长分别为200 ns和1550 nm;取样分辨率为0.1 m;扫频范围为10.71~11.03 GHz,扫频间隔为5 MHz,即针对一个谱的扫频点数为33;叠加平均次数设置为 2^{13} 。由于叠加平均次数和扫频点数不低,采用基于洛伦兹模型的谱拟合法有望得到相对比较准确的布里渊频移,以此作为准确值,可得到不同工作点下单斜坡法的误差,如图6所示。

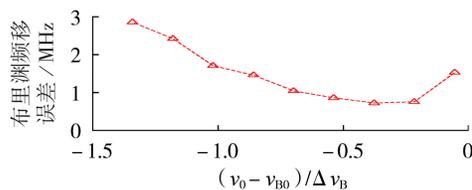


图6 采用单斜坡法时,不同工作点对应的布里渊频移误差(110 kV海缆)

Fig.6 Relationship between Brillouin frequency shift errors evaluated by slope-assisted method and probe frequency for 110 kV submarine cable

工作点为 $v_{B0}-0.5\Delta v_B$ (由于扫频间隔为10 MHz,实际的工作点为 $v_{B0}-0.54\Delta v_B$)时,单斜坡法和谱拟合法得到的布里渊频移见图7。对海缆中复合光纤进行标定,结果表明在基准温度下的布里渊频移 $v_{B0}=10.856$ GHz,应变敏感系数 $C_{B,\varepsilon}=0.0477$ MHz/ $\mu\varepsilon$ ($\mu\varepsilon$ 表示微应变),结合式(8)得到以上情况下不同方法求得光纤沿线的应变见图7。需要注意的是,结合实际情况考虑认为本案例中光纤沿线温度近似为

一恒定值,布里渊频移的变化是由应变导致。因此,如果实际情况中布里渊频移绝大部分是由温度变化导致的,则根据式(8)也可获得光纤沿线的温度。

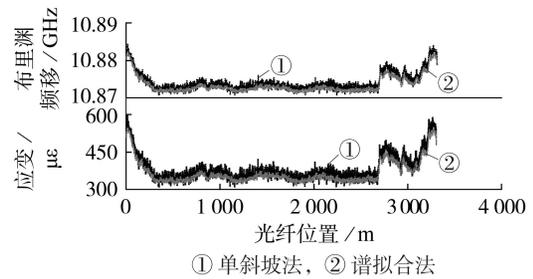


图7 单斜坡法和谱拟合法得到的光纤沿线的布里渊频移和应变(110 kV海缆)

Fig.7 Brillouin frequency shift and strain along fiber evaluated by spectrum fitting method and slope-assisted method for 110 kV submarine cable

图7中谱拟合法和单斜坡法的布里渊频移差距为0.77 MHz,对应应变的差距为 $16.14 \mu\varepsilon$ 。由图A2和图7以及表2可知,单斜坡法的布里渊频移误差要略大于谱拟合法的误差,但也能较好地反映光纤沿线布里渊频移以及温度、应变的变化情况(见图7),基本验证了单斜坡法在基于光纤分布式传感的海缆温度、应变测量方面的有效性。

结合图5、6和表2可见,当工作点选择为 $v_{B0}-0.5\Delta v_B$ 时,单斜坡法得到的布里渊频移近似有最小的误差。需要注意的是,对于不同脉宽(50、100和200 ns)下的裸光纤和110 kV海缆中复合光纤案例,光纤沿线的线宽分别为42.52、40.63、41.08和62.36 MHz,光纤沿线布里渊频移的最大值与最小值之差分别为8.40、6.89、6.29和10.99 MHz,对应的 C_{BFS} 分别为 9.85×10^{-2} 、 8.42×10^{-2} 、 7.66×10^{-2} 和 8.81×10^{-2} ,而针对实测谱的计算结果(图5、6)也与图3中 $C_{BFS}=0.05$ 和 $C_{BFS}=0.15$ 时的仿真结果基本吻合,即工作点为 $v_{B0}-0.5\Delta v_B$ 和工作点为 $v_{B0}-0.5\Delta v_B/\sqrt{3}$ 时的误差非常接近,验证了以上针对数值产生谱和实测谱的分析的可靠性。另外,如果光纤沿线的布里渊频移波动较大,则工作点选择为 $v_{B0}-0.5\Delta v_B/\sqrt{3}$ 时容易进入灵敏度较低的区域(如图2所示),增益较小的误差可能会对较大的布里渊频移误差,其误差情况可参考图3中 $C_{BFS}=0.5$ 的情况。综合考虑以上计算结果以及海缆沿线光纤布里渊频移的变化情况,同时考虑一定的裕度,本文建议工作点选择 $v_{B0}-0.5\Delta v_B$ 。

5 分析与讨论

图A2中的误差偏大,但这主要是为了能检测更高频率的振动而牺牲了准确性,如果增加叠加平均次数,则谱信噪比会增加,误差将会减少。同时该方法仅测量1个增益值,通常测量时间仅为基于扫频

方式的谱拟合法的几分之一甚至更小(原因见后续分析),而且前者的计算时间也是远小于后者。

布里渊谱测量时间的计算公式为^[27]:

$$T = N_{sf}(T_{sf} + N_{av}T_p) \quad (12)$$

其中, T_p 为泵浦脉冲光的周期; N_{av} 为叠加平均次数; N_{sf} 为扫频点数(扫描频率数); T_{sf} 为频率扫描的切换和稳定时间。

由式(12)可知测量时间与扫频点数成正比。考虑到单斜坡法仅需要测量1个频率点(扫频点数为1),则根据式(12)可知对于案例2中海缆中复合的光纤,单相测量一次耗时约为24.63 s,本案例中谱拟合法的扫频点数为33,如果采用单斜坡法则测量时间将减少为原来的1/33左右,约为0.75 s。本案例中监测光纤长度超过3 km,如果海缆距离较短,则采用单斜坡法有望实现对海缆低频振动的监测。因此,单斜坡法适用于对准确性要求不太高,但对测量实时性要求高,甚至动态测量的场合。

6 结论

本文对基于洛伦兹模型的单斜坡法的工作点选择问题进行了研究,然后将其引入基于光纤分布式传感技术的海缆温度、应变监测方法中,并比较了单斜坡法和基于扫频方式的谱拟合法的准确性和实时性,得到结论如下:

(1)单斜坡法可使布里渊谱测量时间减少到原来的几分之一甚至更小,同时布里渊频移误差仅有小幅增加,该方法能有效提高海缆温度、应变测量的实时性,适用于对实时性要求较高,但对准确性要求不太高的场合;

(2)单斜坡法工作点建议选择为光纤沿线布里渊频移的均值减去一半的线宽,所确定的工作点对不同信噪比和海缆复合光纤沿线布里渊频移常见程度的波动情况具有不错的适应性。

本文研究为海缆低频振动测量提供了一种潜在的解决方案。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 张磊,俞恩科,张占奎,等. 海底电力电缆过载能力分析及其试验验证[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):220-224.
ZHANG Lei, YU Enke, ZHANG Zhankui, et al. Overload capacity analysis of submarine cable and its experimental verification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 220-224.

[2] 兰贞波,赵常威,阮江军. 海底电缆-架空线路雷击过电压分析与计算[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):133-137.
LAN Zhenbo, ZHAO Changwei, RUAN Jiangjun. Analysis and calculation of submarine cable-overhead line lightning overvoltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 133-137.

[3] 赵健康,陈铮铮. 国内外海底电缆工程研究综述[J]. 华东电力,2011,39(9):1477-1481.
ZHAO Jiankang, CHEN Zhengzheng. Research on submarine cable projects at home and abroad[J]. East China Electric Power, 2011, 39(9): 1477-1481.

[4] 刘福寿. 海底电缆路由的海洋环境研究[J]. 黄渤海海洋, 1994, 12(1):60-64.
LIU Fushou. Studies on the marine environment for the routing of sea-bottom cable[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1994, 12(1): 60-64.

[5] 董秀春,董向华. 海洋路由勘测对海底光缆工程的影响分析[J]. 海岸工程,2007,26(1):11-14.
DONG Xiuchun, DONG Xianghua. Analysis of effect of marine route survey on submarine fiber-optic cable engineering[J]. Coastal Engineering, 2007, 26(1): 11-14.

[6] 郑春生. 埕岛油田海底电缆故障原因与分布规律[J]. 电气应用,2017,36(10):28-32,92.
ZHENG Chunsheng. Causes and distribution of submarine cable faults in Chengdao oil field[J]. Electrotechnical Application, 2017, 36(10): 28-32, 92.

[7] 吴飞龙,杨力帆. 光电复合技术在我国110 kV海底电缆中的首次应用[J]. 中国电力,2011,44(2):27-30.
WU Feilong, YANG Lifan. First application of optical fiber composite technology in 110 kV submarine cable in China [J]. Electric Power, 2011, 44(2): 27-30.

[8] SOMA K, AIHARA M, KATAOKA Y. Diagnostic method for power cable insulation[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1986, EI-21(6):1027-1032.

[9] 李军浩,韩旭涛,刘泽辉,等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术,2015,41(8):2583-2601.
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.

[10] 赵丽娟. 光纤布里渊散射特性测量方法及其应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.
ZHAO Lijuan. Research on the measurement method of optical fiber Brillouin scattering characteristics and its application [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.

[11] 黄新波,廖明进,徐冠华,等. 采用光纤光栅传感器的输电线路铁塔应力监测方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):68-72.
HUANG Xinbo, LIAO Mingjin, XU Guanhua, et al. Stress monitoring method applying FBG sensor for transmission line towers [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 68-72.

[12] 李永倩,赵丽娟,杨志,等. 基于BOTDR的海缆3D立体监测系统设计与实现[J]. 仪器仪表学报,2014,35(5):1029-1036.
LI Yongqian, ZHAO Lijuan, YANG Zhi, et al. Design and realization of the submarine cable three-dimensional monitoring system based on BOTDR[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 1029-1036.

[13] ZHAO Lijuan, LI Yongqian, XU Zhiniu, et al. On-line monitoring system of 110 kV submarine cable based on BOTDR[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 216: 28-35.

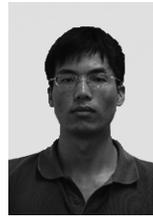
[14] 周路遥,刘黎,蒋榆宽,等. 光纤分布式传感技术在海底电缆状态监测中的应用[J]. 浙江电力,2018,37(2):6-10.
ZHOU Luyao, LIU Li, JIANG Yukuan, et al. Application of distributed sensing technology of optical fiber in submarine cable status monitoring[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(2): 6-10.

[15] ZHANG Yanjun, LI Da, FU Xinghu, et al. An improved Levenberg-Marquardt algorithm for extracting the features of Brillouin scattering spectrum[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 24(1):015204.

[16] ZHANG Yanjun, YU Chunjuan, FU Xinghu, et al. An improved

- Newton algorithm based on finite element analysis for extracting the Brillouin scattering spectrum features[J]. Measurement, 2014, 51: 310-314.
- [17] ZHAO L J, XU Z N, LI Y Q. An accurate and rapid method for extracting parameters from multi-peak Brillouin scattering spectra[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 232: 276-284.
- [18] ZHOU Dengwang, DONG Yongkang, WANG Benzhang, et al. Single-shot BOTDA based on an optical chirp chain probe wave for distributed ultra-fast measurement[J]. Light: Science and Applications, 2018, 7(1): 32-43.
- [19] PELED Y, MOTIL A, TUR M. Fast Brillouin optical time domain analysis for dynamic sensing[J]. Optics Express, 2012, 20(8): 8584-8591.
- [20] VOSKOBOINIK A, YILMAZ O F, WILLNER A W, et al. Sweep-Free distributed Brillouin Time-Domain Analyzer(SF-BOTDA) [J]. Optics Express, 2011, 19(26): B842-B847.
- [21] XU Zhiniu, ZHAO Lijuan. Estimation of error in Brillouin frequency shift in distributed fiber sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(4): 1829-1837.
- [22] XU Zhiniu, ZHAO Lijuan. Accurate and ultra-fast estimation of Brillouin frequency shift for distributed fiber sensors[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2020, 303: 111822.
- [23] 徐志钮, 胡宇航, 赵丽娟, 等. 基于改进二次多项式拟合的布里渊频移快速高精度提取算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(3): 842-848.
- XU Zhiniu, HU Yuhang, ZHAO Lijuan, et al. Fast and highly accurate Brillouin frequency shift extracted algorithm based on modified quadratic polynomial fit[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(3): 842-848.
- [24] BERNINI R, MINARDO A, ZENI L. Dynamic strain measurement in optical fibers by stimulated Brillouin scattering[J]. Optics Letters, 2009, 34(17): 2613-2615.
- [25] 李永倩, 马立. φ -OTDR 振动传感系统中的相位模糊问题[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2800-2804.
- LI Yongqian, MA Li. Phase ambiguity in φ -OTDR vibration sensing system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(9): 2800-2804.
- [26] PARKER T R, FARHADIROUSHAN M, HANDEREK V A, et al. Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers[J]. Optics Letters, 1997, 22(11): 787-789.
- [27] 涂晓波. 光纤布里渊矢量分布式传感技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- TU Xiaobo. Distributed fiber sensing technique employing vector Brillouin optical time domain analyzer[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.

作者简介:



徐志钮

徐志钮(1979—),男,浙江苍南人,副教授,博士,主要研究方向为光纤分布式传感技术及其在电气设备状态检测及故障中的应用等(E-mail: wzcjxx@sohu.com);

胡宇航(1996—),男,河北无极人,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究工作(E-mail: 1114055971@qq.com);

赵丽娟(1981—),女,河北涿源人,副教授,博士,通信作者,主要从事光通信与传感技术方面的研究工作(E-mail: hdzlj@126.com)。

(编辑 任思思)

Rapid temperature and strain measurement method for optic-electric composite submarine cable based on slope-assisted method

XU Zhiniu¹, HU Yuhang¹, ZHAO Lijuan¹, FAN Mingyue¹, GUO Wenhan¹, QIN Hua²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Grid Planning & Research Center, Guangxi Power Grid Corporation, Nanning 530000, China)

Abstract: The necessity of submarine cable monitoring and the on-line monitoring system of high voltage optic-electric composite submarine cable based on distributed optical fiber sensing technology are introduced. The principle of slope-assisted method is introduced and applied to the on-line monitoring of submarine cable in order to improve the real-time performance of temperature and strain measurement of submarine cable based on Brillouin scattering. The formula for calculating the Brillouin frequency shift of the slope-assisted method based on Lorentzian model is given, then the Brillouin spectrum with different values of SNR (Signal Noise Ratio) and the Brillouin spectrum of bare optical fiber / submarine cable composite optical fiber are numerically generated and measured. Then, the accuracy and real-time performance are compared between slope-assisted method and spectrum fitting method based on frequency sweeping, and the selection of probe frequency for varying degrees of fluctuation of Brillouin frequency shift along the fiber and SNR of Brillouin spectrum is emphatically studied. The result shows that the measurement time of Brillouin spectrum can be reduced by a few tens of times or even shorter by slope-assisted method, and the measurement error of Brillouin frequency shift only slightly increases. It is recommended to choose the average Brillouin frequency shift along optical fiber minus half of the linewidth as the probe frequency when slope-assisted method is applied to monitoring the temperature and strain of submarine cables, which has good adaptability to different values of SNR of Brillouin spectra and common fluctuation of Brillouin frequency shift along optical fiber / submarine cable composite optical fiber.

Key words: submarine cable; distributed optical fiber sensing; temperature and strain; slope-assisted method; on-line monitoring

附录

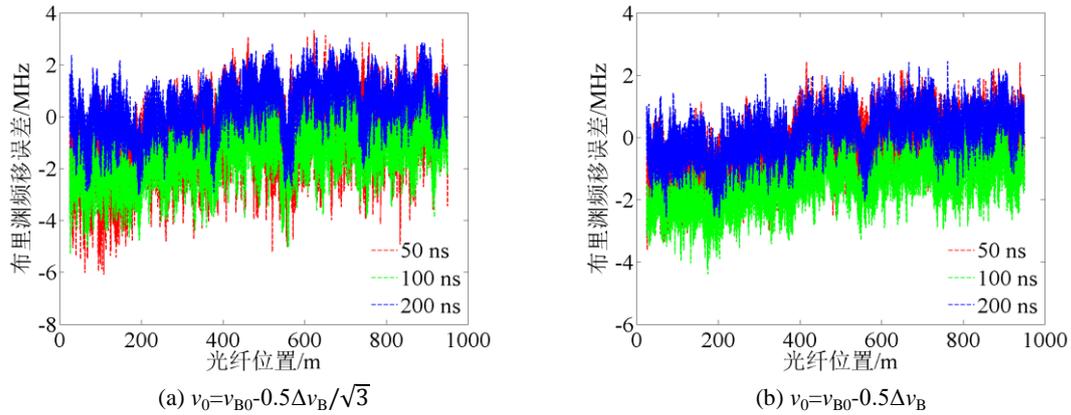


图 A1 不同工作点下单斜坡法得到的光纤沿线布里渊频移误差（裸光纤）

Fig.A1 Brillouin frequency shift error along bare fiber evaluated by slope-assisted method under different probe frequencies

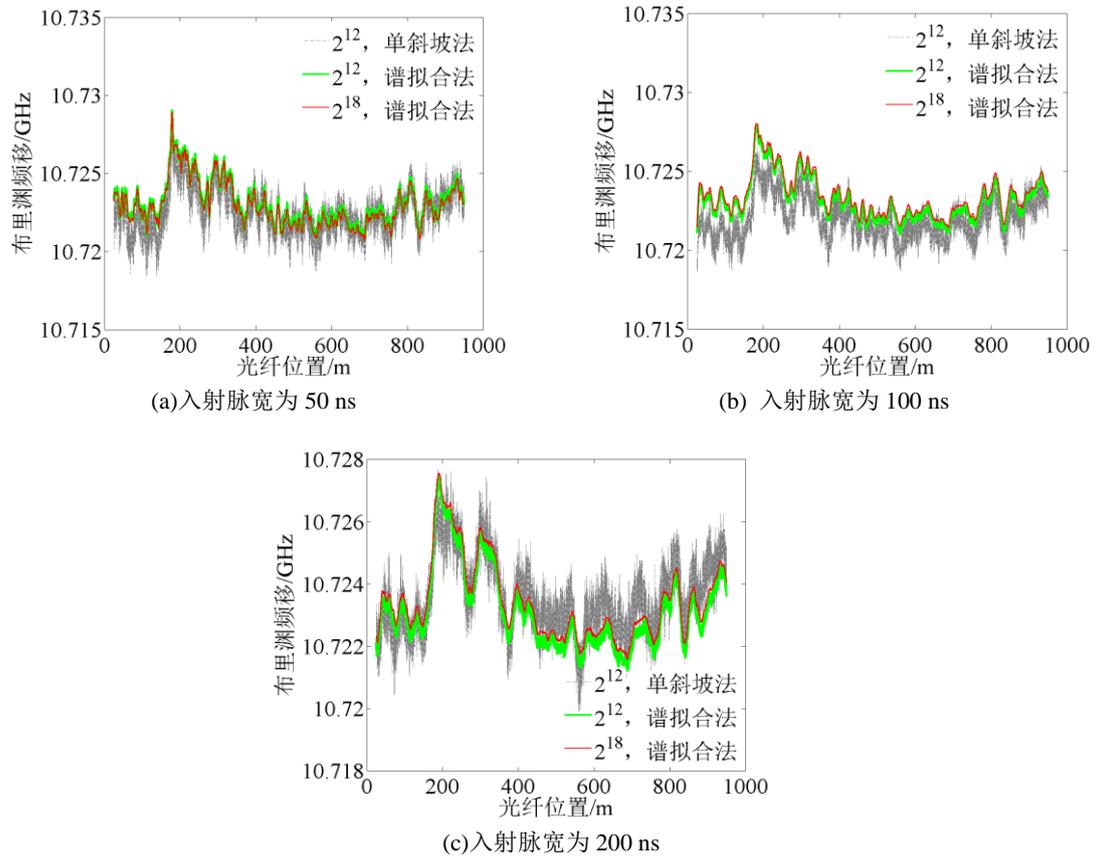


图 A2 单斜坡法和谱拟合法得到的光纤沿线布里渊频移（裸光纤）

Fig.A2 Brillouin frequency shift along bare fiber evaluated by spectrum fitting method and slope-assisted method