

# 噪声时域反射法实现多根电缆故障的同时检测

马培国<sup>1,2</sup>, 徐航<sup>1,2</sup>, 王冰洁<sup>1,2</sup>, 武光辉<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>太原理工大学物理与光电工程学院, 山西太原 030024;

<sup>2</sup>新型传感器与智能控制教育部和山西省重点实验室, 山西太原 030024

**摘要** 为了同时检测捆绑成束的电缆以及多芯电缆不同支路上的故障, 提出并实验验证了一种多通道噪声时域反射法。该方法利用多路滤波后的放大自发辐射噪声作为电缆束或者多芯电缆不同支路的探测信号, 基于相关探测技术, 可同时检测不同支路上电缆故障, 且没有相互干扰。实验结果表明该方法可以同时检测位于不同电缆支路上的断路、短路和阻抗失配等故障。当 URM43 型同轴电缆单个支路的噪声探测信号功率为  $-9.1$  dBm 时, 最远探测距离为 720 m。此外, 还进行实验证明了该方法可以实现电缆故障的在线检测。

**关键词** 测量; 故障检测; 多芯电缆; 电缆束; 噪声时域反射法; 放大自发辐射噪声

中图分类号 TN29 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.051205

## Simultaneous Detection of Multi-Cable Faults Based on Noise Time-Domain Reflectometry

Ma Peiguo<sup>1,2</sup>, Xu Hang<sup>1,2</sup>, Wang Bingjie<sup>1,2</sup>, Wu Guanghui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

<sup>2</sup> Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030024, China

**Abstract** In order to simultaneously detect the cable faults on different branches of the cable bundles and multi-core cables, a multi-channel noise time domain reflectometry is proposed and experimentally demonstrated. Amplified spontaneous emission (ASE) noises after multipath filtering serve as probe signals to detect different branches of cable bundles or multi-core cables. Based on correlation detection technology, the cable faults of different branches are detected simultaneously with no mutual interference. The experimental results indicate that the proposed method can detect open circuits, short circuits and impedance mismatches on different cable branches simultaneously. Moreover, for the single URM43 coaxial cable, a maximum detection range of about 720 m is obtained when the power of the noise detection signal is  $-9.1$  dBm. In addition, it is experimentally proved that the proposed method can realize live test of cable fault.

**Key words** measurement; fault detection; multi-core cable; cable bundles; noise time-domain reflectometry; amplified spontaneous emission noise

**OCIS codes** 120.1880; 120.1840; 140.2020

## 1 引言

电缆作为输送动力能源、传递控制信号和数据信息的重要传输媒介, 被广泛用于飞机、火车、轮船等大型运载工具中<sup>[1]</sup>。为了节省布线空间和重量, 大型运载工具所用电缆相比普通电缆更细、绝缘层更薄; 多数电缆捆绑成束固定, 电缆之间及电缆与固定框架之间的相互摩擦严重, 更易引发电缆故障。例如, 1996年, 美国环球航运公司的波音 747 客机因燃油供给系统的电缆短路而引发火灾, 导致 230 人遇难<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2016-12-13; 收到修改稿日期: 2017-01-23

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61401299, 51404165)、山西省自然科学基金(201601D011047)

作者简介: 马培国(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事电缆故障方面的研究。E-mail: mapeiguo0849@link.tyut.edu.cn

导师简介: 王冰洁(1978—), 女, 博士, 副教授, 主要从事随机信号的产生及其在线缆故障检测中的应用方面的研究。E-mail: wangbingjie@tyut.edu.cn(通信联系人)

目前已有多种电缆故障检测的方法被提出。其中,反射法因无需建立模型,且测量方法快捷、准确而成为首选技术<sup>[3]</sup>。依据探测信号的不同类型,反射法可分为:时域反射法(TDR)<sup>[4-5]</sup>、频域反射法(FDR)<sup>[6-7]</sup>、时频域反射法(TFDR)<sup>[8-9]</sup>、扩频时域反射法(SSTDR)<sup>[10-11]</sup>以及混沌时域反射法(CTDR)<sup>[12-14]</sup>。TDR发射电脉冲进入待测电缆,依据脉冲飞行时间确定故障位置,通过对比反射波与入射波的极性形状判断故障类型<sup>[4]</sup>。FDR是将频率可调正弦波耦合到待测电缆,通过检测反射波和入射波的相位差确定故障位置<sup>[7]</sup>。TFDR则是通过向待测电缆发射高斯包络调频信号作为探测信号,采用Wigner时频分布和互相关检测技术得出故障的精确位置,通过计算阻抗失配量来判断故障类型<sup>[8]</sup>。TDR、FDR和TFDR虽能实现高精度的故障定位,但由于发射的探测信号和电缆中的在线传输信号相互干扰严重,故无法实现电缆故障的在线检测。2005年,美国犹他大学Furse C教授提出了SSTDR,该方法利用正弦调制的伪随机码作为探测信号,基于相关检测技术实现电缆故障定位<sup>[10]</sup>。由于正弦调制的伪随机码具有很强的噪声免疫能力,因此,可实现电缆故障的在线检测。然而,SSTDR测量精度的进一步提高需要昂贵的高速伪随机码发生器,而且伪随机码的周期性会给测量结果引入虚警和误判。2014年,作者所在课题组提出了用于电缆故障在线检测的CTDR装置,并分别以Colpitts电路<sup>[12-13]</sup>和布尔电路产生的混沌信号<sup>[14]</sup>作为探测信号进行了实验研究。然而,CTDR采用非线性电路作为混沌信号源,其输出的混沌信号功率谱振荡明显,导致自相关曲线主峰附近存在较高旁瓣<sup>[15]</sup>。当故障定位距离较近时,旁瓣作为“鬼峰”会给测量结果引入误判。

目前,基于TDR对捆绑成束的多根电缆或者多芯电缆进行故障检测和定位时,都是采用依次轮流测试的方法,费时费力,可靠性不高。为了提高检测效率,可以接入多路测试信号,对多根电缆同时进行检测。采用多个信号源分别产生多路测试信号,显然系统复杂,成本增加。只采用一个信号源,再由分路器分为多路测试信号可以简化系统结构。但是对多根电缆之间的串扰故障(即电缆绝缘层破损,铜芯相连)进行故障定位时,由于测试信号之间的相关性,容易引起串扰故障位置的误判。

因此,本文提出了一种多通道噪声时域反射法,可同时实现多根电缆的故障检测且无相互干扰。相较于TDR、FDR、TFDR、SSTDR和CTDR,该方法的优势在于:1)利用多路滤波后的放大自发辐射噪声(ASE)作为探测信号,结合相关检测技术<sup>[16]</sup>,可实现多根电缆故障的同时诊断;2)ASE噪声具有宽而平坦的功率谱<sup>[17-18]</sup>,可以保证厘米量级的空间分辨率;3)ASE噪声还具有良好的自相关特性,可以实现电缆故障的在线检测。

## 2 实验装置及测量原理

多通道噪声时域反射法的实验装置如图1所示。光纤耦合的超辐射发光二极管(SLD, Thorlabs 1005s)产生宽谱的ASE光噪声信号,经过波分复用器(WDM, Agilecom DWDM-M108347124)得到中心波长为 $\lambda_1$ 的光噪声。该光信号通过雪崩光电二极管(APD, Newport 1647)转变为相应的电信号。再经过T形连接器分为两部分:一部分作为参考信号 $S_{ref}$ ,另一部分作为探测信号 $S_{pro}$ 注入到待测电缆中。探测信号 $S_{pro}$ 沿

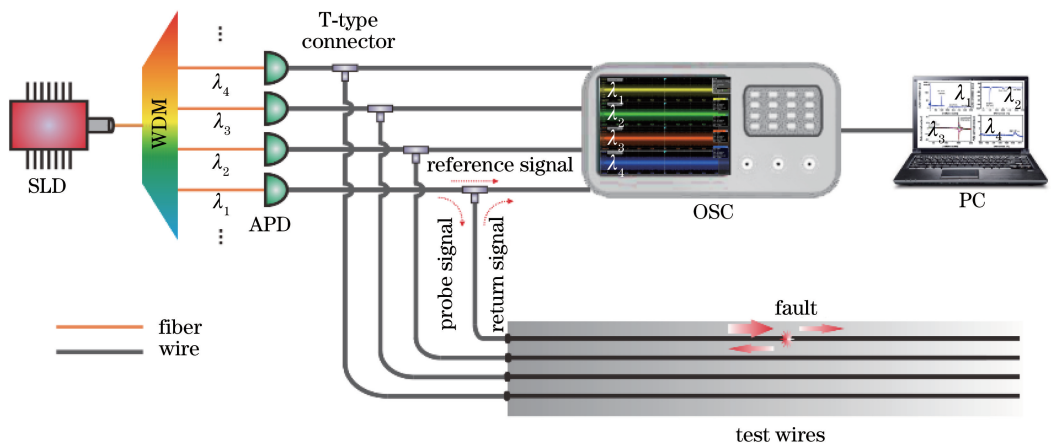


图1 多通道噪声时域反射法的实验装置

Fig. 1 Experimental setup of the multi-channel noise time-domain reflectometry

待测电缆传输,遇到故障后部分发生反射,回波信号  $S_{\text{ret}}$  和参考信号  $S_{\text{ref}}$  混合,由实时示波器(OSC, ROHDE&SCHWARZ RTO1024)接收和采集。最后由计算机(PC)对混合信号  $S_{\text{mix}}$  进行自相关计算,确定故障位置及类型。采用多个 APD 和 T 形连接器可以同时产生多路中心波长不同的光噪声信号作为探测信号,进而实现多路电缆的同时检测。实验所用的 SLD 由低噪声电流源(ILXLightwave LDX-3545B)驱动,SLD 的偏置电流设置为 400 mA(即 4.5 倍的阈值电流),工作温度由温度控制器(ILXLightwave LDT-5412)监控在 25 °C,此时输出功率为 8.4 dBm。WDM 分为 4 路,每路的波长间隔为 0.8 nm。APD 的带宽为 1 GHz,转换效率为 14 V/mW。OSC 的带宽和采样率分别为 1 GHz 和 5 G/s。

测量原理如下:设 SLD 产生的噪声信号为  $S(t)$ ,在 T 形连接处分为参考信号  $S_{\text{ref}}$  和探测信号  $S_{\text{pro}}$ ,探测信号  $S_{\text{pro}}$  在故障位置部分反射产生回波信号  $S_{\text{ret}}$ ,所以 OSC 接收的是参考信号和回波信号的混合信号  $S_{\text{mix}} = S_{\text{ref}} + S_{\text{ret}}$ 。其中,  $S_{\text{ref}} = k_1 S(t - \tau_1)$ ,  $S_{\text{ret}} = k_2 S(t - \tau_2)$ ,  $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别为  $S_{\text{ref}}$  和  $S_{\text{pro}}$  从注入点(T 形连接器)到 OSC 的传输时间,  $k_1$  和  $k_2$  分别为  $S_{\text{ref}}$  和  $S_{\text{pro}}$  相对于  $S(t)$  的衰减系数。探测信号注入点和电缆故障之间的往返时间  $\tau = \tau_2 - \tau_1$ 。对 OSC 接收的混合信号  $S_{\text{mix}}$  进行自相关运算,可以得到:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T S_{\text{mix}}(t) S_{\text{mix}}(t - t') dt = \frac{1}{T} \int_0^T [k_1 S(t - \tau_1) + k_2 S(t - \tau_2)] [k_1 S(t - \tau_1 - t') + k_2 S(t - \tau_2 - t')] dt \approx (k_1^2 + k_2^2) \delta(t') + k_1 k_2 \delta(t' - \tau) + k_1 k_2 \delta(t' + \tau) \quad (1)$$

自相关函数的最大值出现在延迟的位置,因为探测信号是无周期的随机噪声信号,则相关曲线中仅  $\delta(0)$  位置出现峰值,其他位置数值很低,可视为噪声。所以由(1)式可以看出,混合信号  $S_{\text{mix}}$  的相关曲线中存在分别位于  $t' = 0$  的基准峰和  $t' = \tau$  的反射峰,即可获得探测信号注入点和电缆故障之间的往返时间间隔  $\tau$ 。若已知探测信号在电缆中的传输速度  $v$ ,则故障点的位置  $d = vt/2$ ,同时可由相关峰的极性确定故障类型。而因子  $k = k_1 k_2$  则表明由于电缆信号衰减和故障反射引起反射峰值幅度降低。

### 3 滤波后的 ASE 噪声特性

SLD 产生的 ASE 光噪声经过 WDM 分为  $\lambda_1 \sim \lambda_4$  4 个通道,通道之间互不重叠。图 2 为不同中心波长的光噪声信号的光谱、时序、功率谱和自相关曲线。第 1 行是光谱图,输出信号的光谱从左到右依次为 1549.9, 1550.7, 1551.5, 1552.3;图 2 (a1)中的插图表明 ASE 噪声全谱的 -3 dB 线宽为 49 nm。第 2 行至第 4 行是不同波长的光噪声信号的时序、功率谱以及自相关曲线。时序表明噪声波形随机起伏;功率谱宽而平坦,受限于 APD 的 1 GHz 带宽,单波长的光噪声信号的平坦频谱范围为 0~1 GHz。从第 4 行自相关曲线中可以看出,噪声信号的自相关特性良好,呈现出  $\delta$  函数的形状,并且没有任何旁瓣。其自相关曲线的半峰全宽(FWHM)如图 2(a4)中的插图所示为 0.6 ns。

由于不同波长的光噪声信号之间不具有相关性,因此可以作为探测信号同时检测多个电缆分支而不相互干扰。图 3 为中心波长不同的两路光噪声信号的互相关函数。从图 3 中可以看出,不同波长的光噪声信号之间的互相关系数非常低且均低于 -20 dB,表明不同波长的光噪声信号之间几乎不具有相关性,因此,可实现多个电缆分支的同时检测而不相互干扰。

### 4 实验结果

不同波长的光噪声信号通过 T 形连接器可同时注入到电缆束的不同分支中,用于检测不同电缆分支上的故障。故障类型包括断路、短路和阻抗失配等。各类故障均会引起电缆的阻抗失配,阻抗失配处的反射系数  $\rho$  可以表示为:

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2)$$

式中  $Z_0$  和  $Z_L$  分别为电缆和阻抗失配处的特性阻抗。如果阻抗失配处处于断路状态,由于  $Z_L$  趋于无穷大,由(2)式可知该处的反射系数为 1,相关峰为正值;反之,如果阻抗失配处处于短路状态,  $Z_L$  为 0,反射系数为

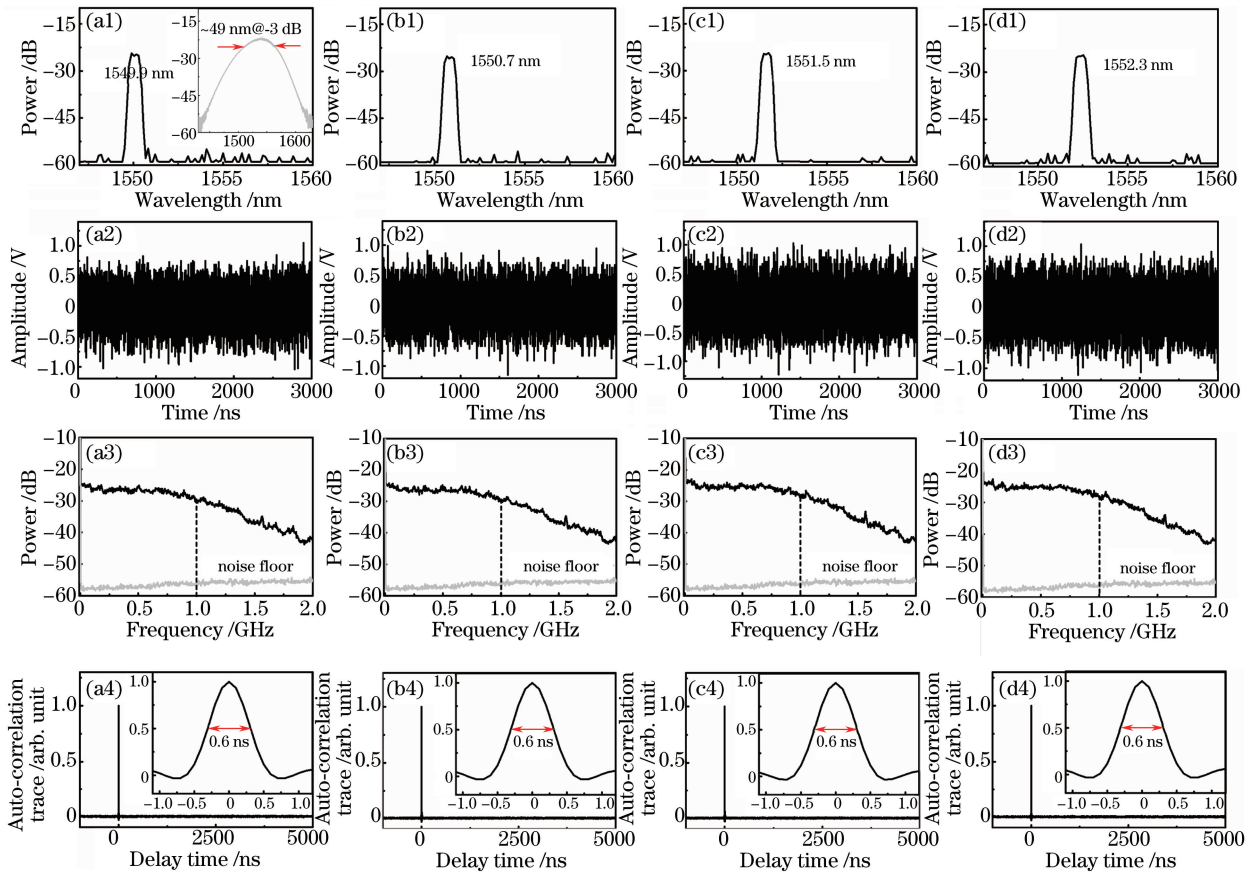


图2 实验获得不同波长光噪声信号的特性。(a1)、(b1)、(c1)、(d1)光学光谱,(a1)的插图是-3 dB线宽;(a2)、(b2)、(c2)、(d2)时序;(a3)、(b3)、(c3)、(d3)功率谱;(a4)、(b4)、(c4)、(d4)自相关曲线,插图是半峰全宽

Fig. 2 Experimentally obtained properties of the optical noise signals with different wavelengths.

(a1), (b1), (c1), (d1) Optical spectra, the inset of (a1) is -3 dB line width; (a2), (b2), (c2), (d2) time series; (a3), (b3), (c3), (d3) power spectra; (a4), (b4), (c4), (d4) auto-correlation curves, the inset is FWHM

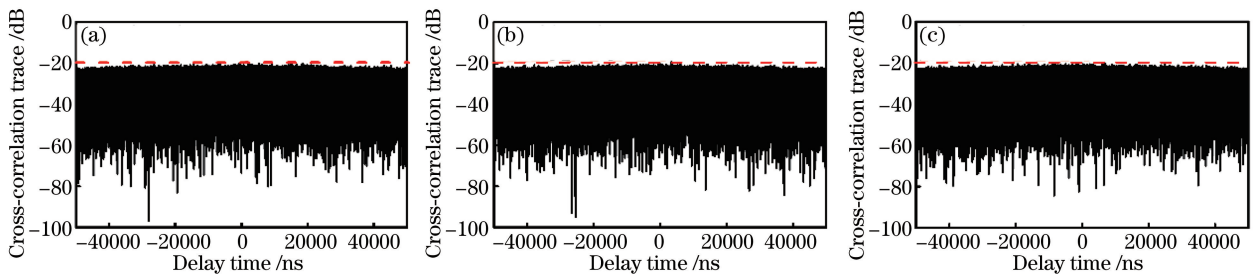


图3 不同波长的光噪声信号之间互相关函数。(a)  $\lambda_1 \sim \lambda_2$ ; (b)  $\lambda_2 \sim \lambda_3$ ; (c)  $\lambda_3 \sim \lambda_4$

Fig. 3 Cross-correlation function among optical noise signals with different wavelengths.

(a)  $\lambda_1 \sim \lambda_2$ ; (b)  $\lambda_2 \sim \lambda_3$ ; (c)  $\lambda_3 \sim \lambda_4$

-1, 相关峰为负值。实验中所用的被测电缆束由多根 URM43 型同轴电缆组成,其最大传输频率和特性阻抗分别为 1 GHz 和  $(50 \pm 2) \Omega$ 。

图4为利用中心波长不同的噪声信号同时检测不同分支上电缆故障的检测结果。图4(a)为利用中心波长为 1549.9 nm 噪声信号检测 50.13 m 处断路故障的实验结果。0 处的相关峰作为测量的基准峰,表示测量的零点。第二个最高的相关峰相对于基准峰的距离表示断路故障的位置。此外,右侧的两个小峰是由断路故障的第二次和第三次的反射谐波所引起的。图4(b)中,在待测电缆 50.13 m 处设置了一个短路故障,并用中心波长为 1550.7 nm 的噪声信号作为该支路的探测信号。从图4(b)中可以看出 50.13 m 处相关峰值为负值,表明该处发生了短路故障。图4(c)为利用中心波长为 1551.5 nm 的噪声信号对阻抗失配故障

进行检测的结果。待测电缆上的阻抗失配故障包括一个同轴电缆接插头(BNC)连接点和一个阻抗可调谐的终端负载,终端负载的阻抗值分别被设置为 150,100,75,25,0  $\Omega$ (短路)。由于断路状态下的相关峰表示全反射,将该处的峰值归一化,则其余曲线在阻抗失配处的相关峰值表示实际的反射系数,分别为 50.7%,34.0%,21.2%,−35.1%,因此,根据(2)式各曲线阻抗失配处对应的阻抗值分别为  $153 \pm 6, 102 \pm 5, 77 \pm 3, (24 \pm 3) \Omega$ 。同理,可以测得 BNC 连接点的反射系数和阻抗值分别为 2.2%和  $(52 \pm 2) \Omega$ 。图 4(d)采用 1552.3 nm 中心波长的噪声信号对不同距离断路故障进行检测,以 7 盘 URM43 型同轴电缆为待测对象,每一盘电缆线的标准长度为 100 m。如图 4(d)所示,随着断路点距离的增加,相关峰高度逐渐降低,相关峰的 FWHM 逐渐展宽,这是因为电磁波在电缆线传播过程中会发生衰减和色散;对于单个电缆支路,当噪声探测信号的功率为−9.1 dBm 时,最远探测距离约为 720 m。

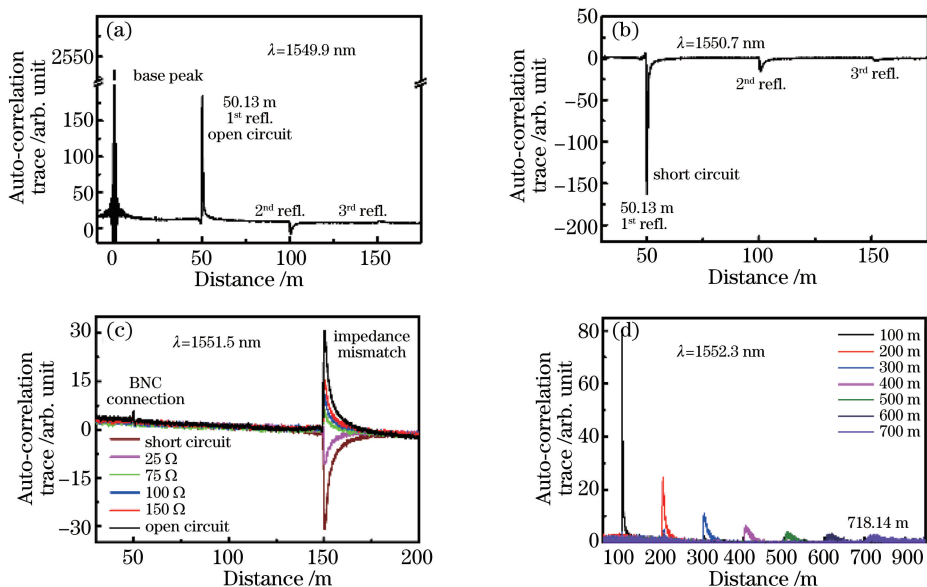


图 4 不同支路上电缆故障的检测结果。(a)断路;(b)短路;(c)阻抗失配;(d)不同距离断路故障

Fig. 4 Detection results of cable faults on different cable branches. (a) Open circuit; (b) short circuit; (c) impedance mismatch; (d) open circuit faults at different distances

实验中采用相对误差来衡量测量精度,相对误差  $E_r$  表示为:

$$E_r = \frac{|x - a|}{a} \times 100\%, \quad (3)$$

式中  $x$  代表电缆线长度的实际测量值; $a$  代表电缆线的标准长度,约定其为被测电缆的标称值(每一盘电缆线的长度为 100 m)。对不同长度电缆线进行多次测量,并对不同长度下的相对误差结果进行多项式拟合,结果如图 5 所示。在 50 m 的测量范围内,相对误差在 0.7%附近,随着测量长度的增加,相对误差逐渐增加,在 700 m 的测量范围内,相对误差局限在 2.6%的范围内。

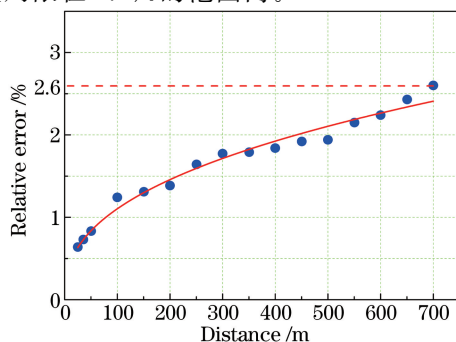


图 5 相对误差随测量距离的变化

Fig. 5 Relative error changes with measurement distance

此外,还进行实验证明了该方法可用于电缆故障的在线检测。实验以 2 MHz 的正弦信号作为在线传输信号,对电缆 50 m 处的断路故障进行在线检测。定义  $R_{SCR}$  为在线传输信号和噪声探测信号之间的功率比,用于衡量探测信号对在线信号的干扰程度; $R_{PSL}$  为相关峰和旁瓣的比值,用于衡量在线信号对故障定位结果的影响。图 6(a)、(b) 是  $R_{SCR}$  分别为 19.61 dB 和 26.4 dB 时,50 m 处断路故障的检测结果。当  $R_{SCR}$  为 19.61 dB 时, $R_{PSL}$  为 7.42 dB,此时,50 m 处断路故障对应的相关峰清晰可见。当  $R_{SCR}$  增加至 26.4 dB 时, $R_{PSL}$  降至 -0.7 dB,相关峰已经被周期性的旁瓣所掩盖,旁瓣周期与 2 MHz 的正弦信号频率一致。图 6(c) 表明  $R_{PSL}$  随着  $R_{SCR}$  增加呈线性下降的趋势,当  $R_{PSL}$  下降至 0 dB 时(此时可认为是能从相关曲线的背景噪声中清晰识别出故障处反射峰的临界条件), $R_{SCR}$  为 25.9 dB。实验结果表明:该方法可以利用功率非常低的噪声信号(与在线传输信号相比,小于 -20 dB)进行电缆故障的在线检测,其功率低于电缆的一般噪声容限。此外,还采用了背景相减的方法<sup>[19]</sup>,即从相关定位的结果中把在线传输信号的自相关曲线减去,用于进一步抑制由在线传输信号引起的周期性旁瓣,提高测量的信噪比。

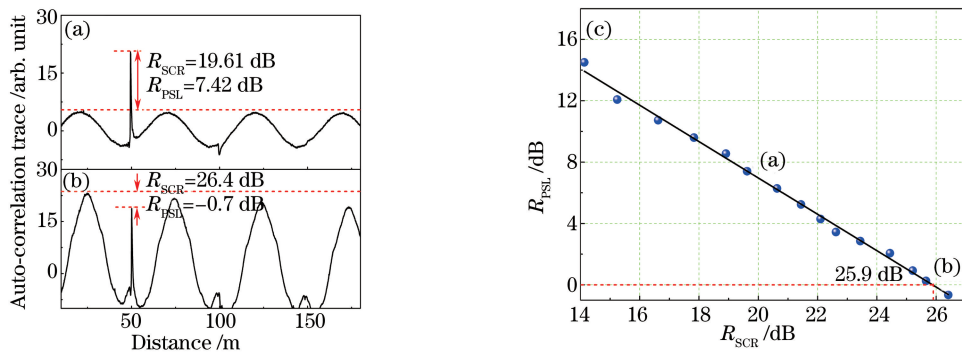


图 6 当  $R_{SCR}$  分别为(a) 19.61 dB 和(b) 26.4 dB 时,频率为 2 MHz 正弦信号作为在线传输信号的检测结果;  
(c)  $R_{PSL}$  随  $R_{SCR}$  的变化趋势

Fig. 6 Experimental live test for a 2 MHz sinusoidal signal on cable when  $R_{SCR}$  is (a) 19.61 dB and  
(b) 26.4 dB, respectively; (c)  $R_{PSL}$  as a function of  $R_{SCR}$

## 5 实验结果讨论

噪声探测信号相关峰的宽度决定了测量的空间分辨率。根据 -3 dB 标准,自相关曲线的 FWHM 决定了时间分辨率,则空间分辨率为  $v \cdot T_{FWHM}/2$ 。从图 2(a4)可知,噪声探测信号的  $T_{FWHM}$  为 0.6 ns,设探测信号在待测电缆中传输的速度  $v = 0.66c$  ( $c = 3.0 \times 10^8$  m/s),则初始空间分辨率为 6 cm。但是由于噪声探测信号在电缆线传播过程中会发生衰减和色散,相关峰随探测距离的增加而展宽,空间分辨率逐渐增大,实验结果如图 7 所示。在 20 m 的测量范围内,空间分辨率低于 10 cm。当测量距离为 50 m 时,空间分辨率增加至 48 cm。但同样的问题也存在于 TDR 和 SSTDR 等测量方法中,可以借鉴 SSTDR 中的曲线拟合技术<sup>[10-11]</sup>来进一步提高空间分辨率。

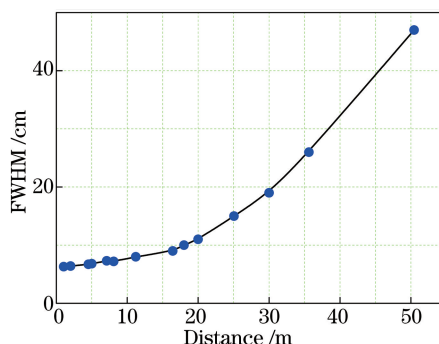


图 7 相关峰 FWHM 随测量距离的变化

Fig. 7 FWHM of the correlation peak as function of the measurement distance

为了证明多路电缆同时检测需要采用不具有相关性的噪声信号,设计了以下对比实验。在相邻的两根电缆上设置了串扰故障,即两根电缆铜芯相连而屏蔽层没有连接。图8中的插图显示两种实验装置:一种采用中心波长分别为 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 的两种噪声信号,分别注入到两根待测电缆中,检测串扰位置;另一种把中心波长为 $\lambda_1$ 的噪声信号通过功分器分为两路,注入到两根待测电缆中。从图8(a1)、(b1)中,可以发现不同中心波长的噪声信号能够有效地检测出串扰故障的位置(11.15 m和17.88 m),并且无相互干扰;如图8(a2)、(b2)所示,如果同一波长的两噪声信号作为探测信号,在两根电缆线长度和的一半处会出现“鬼峰”,从而会引起误判。这是因为当探测信号遇到串扰故障时,大部分能量被反射,小部分能量通过串扰点传输到另一根电缆上。由于不同中心波长的噪声信号不具有相关性,所以不同波长的噪声信号相混合,也不会影响测量结果。相反,同一波长的噪声信号将引入一个新的延迟时间,即探测信号在两个故障电缆中传输的总时间,从而导致“鬼峰”的出现。

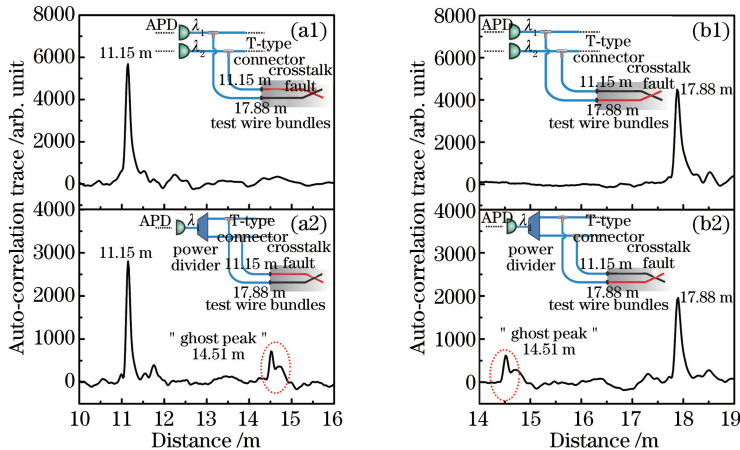


图8 分别利用(a1)、(b1)中心波长不同和(a2)、(b2)中心波长相同的两路噪声信号检测相邻两电缆上串扰故障的实验结果  
Fig. 8 Detection results of a crosstalk fault on the adjacent two cables using two noise signals with (a1), (b1) different center wavelengths and (a2), (b2) the same center wavelength, respectively

## 6 结 论

提出了一种面向电缆束和多芯电缆故障检测的多通道噪声时域反射的测量方法。该方法采用多路滤波后得到的 ASE 信号作为不同电缆支路的探测信号,结合相关检测技术,可同时实现多个电缆支路上的故障检测且无相互干扰。实验结果表明,该方法不仅可以同时诊断多根电缆的故障位置和类型(断路、短路和阻抗失配故障等),而且彼此之间无相互干扰。此外,该方法还可以实现厘米量级的空间分辨率和电缆故障的在线检测。提出的方法可以为电缆束和多芯电缆的故障检测提供一种高效率、高精度的在线检测的新思路。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Rui. Design of center communication cable fault detector[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2011: 1-4.  
王 瑞. 通信电缆故障探测仪的设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2011: 1-4.
- [2] Furse C, Haupt R. Down to the wire: aircraft wiring[J]. IEEE Spectrum, 2001, 38(2): 34-39.
- [3] Li Jingxia, Xu Hang, Ma Fuchang. Measuring wire faults using electronic chaotic signal[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2013, 44(3): 341-343.  
李静霞, 徐 航, 马福昌. 基于混沌电路的电介质传输线故障检测[J]. 太原理工大学学报, 2013, 44(3): 341-343.
- [4] Paulter N G. An assessment on the accuracy of time-domain reflectometry for measuring the characteristic impedance of transmission lines[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(5): 1381-1388.
- [5] Yu Junhui, Dong Yonggui. Counting method for time-of-light measurement and its application in cable fault test[J]. Instrument Technique and Sensor, 2014(3): 101-103.

- 于俊慧, 董永贵. 飞行时间的计数式测量及其在电缆故障检测中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2014(3): 101-103.
- [6] Tsai P, Lo C, Chung Y C, *et al.* Mixed-signal reflectometer for location of faults on aging wiring[J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5(6): 1479-1482.
- [7] Naik S, Furse C M, Farhang-Boroujeny B. Multicarrier reflectometry[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(3): 812-818.
- [8] Yan S, Wu S, Wen B. Application of time-frequency domain reflectometry for detection and localization of a fault on a coaxial cable[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(6): 2493-2500.
- [9] Song E, Shin Y J, Stone P E, *et al.* Detection and location of multiple wiring faults via time-frequency-domain reflectometry[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(1): 131-138.
- [10] Smith P, Furse C, Gunther J. Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location[J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5(6): 1469-1478.
- [11] Furse C, Smith P, Lo C, *et al.* Spread spectrum sensors for critical fault location on live wire networks[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2005, 12(3): 257-267.
- [12] Xu H, Wang B J, Li J X, *et al.* Location of wire faults using chaotic signal generated by an improved colpitts oscillator [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2014, 24(4): 1450053.
- [13] Xu H, Li J X, Liu L, *et al.* Chaos time-domain reflectometry for fault location on live wires[J]. Journal of Applied Analysis and Computation, 2015, 5(2): 243-250.
- [14] Zhang J G, Xu H, Wang B J, *et al.* Wiring fault detection with Boolean-chaos time-domain reflectometry [J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 80(1-2): 553-559.
- [15] Li J X, Wang Y C, Ma F C. Experimental demonstration of 1.5 GHz chaos generation using an improved colpitts oscillator[J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 72(3): 575-580.
- [16] Wang Guochao, Yan Shuhua, Yang Jun, *et al.* Theoretical modeling analysis for precise space ranging based on cross-correlation of femtosecond optical frequency comb[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0412002.  
王国超, 颜树华, 杨 俊, 等. 基于飞秒光梳互相关的空间精密测距理论模型分析[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0412002.
- [17] Gao Yangyang, Zhou Weining, Lei Lili, *et al.* Research on polarization characteristic of SLD start-up used in fiber optic gyroscope and its effect[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 112302.  
高洋洋, 周卫宁, 雷莉莉, 等. 光纤陀螺用超辐射发光二极管启动偏振特性及其影响研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 112302.
- [18] Lin Hong, He Wuguang, Li Weizhong, *et al.* High power wide spectrum infrared laser source for atmospheric CO<sub>2</sub> concentration measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 081401.  
林 宏, 何武光, 李卫中, 等. 用于大气 CO<sub>2</sub> 浓度探测的高功率宽谱红外激光源[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 081401.
- [19] Garmatyuk D S, Narayanan R M. ECCM capabilities of an ultrawideband bandlimited random noise imaging radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2002, 38(4): 1243-1255.