

文章编号: 0258-7025(2010)08-2020-05

# 基于混沌激光的传输线断点测量

韩国华 王云才\*

(太原理工大学理学院物理与光电工程系, 山西 太原 030024)

**摘要** 提出一种利用宽带混沌信号检测传输线断点故障的方法, 并利用混沌半导体激光器进行了实验验证。该方法利用激光器的非线性产生宽带混沌激光, 并光电转换为宽带混沌电信号; 将混沌信号分为两路分别作为参考信号和探测信号, 通过相关法对比参考信号确定探测信号的回波延时、定位断点。断点定位精度和分辨率取决于回波延时的分辨率。实验结果表明, 利用普通的半导体激光器即可实现 7.5 cm 的分辨率。

**关键词** 光通信; 断点测量; 半导体激光器; 混沌; 同轴电缆; 时域反射测量

中图分类号 TN 249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103708.2020

## Faults Location for Transmission Lines by Using Chaotic Laser Signal

Han Guohua Wang Yuncai

(Department of Physics and Optoelectronics, College of Science, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

**Abstract** This paper proposes a method of faults location for transmission lines by using broadband chaotic signals, which is experimentally demonstrated with a chaotic semiconductor laser. Chaotic signal is obtained by converting the chaotic light from the chaotic laser diode, and divided into two signals, one serving as probe signal and the other serving as reference signal. Faults are located by correlating the echo of probe signal with the reference one. The spatial resolution is determined by the time resolution of correlation curve. Experimental results show that 7.5 cm resolution can be readily achieved by common laser diode.

**Key words** optical communications; faults location; semiconductor lasers; chaos; coaxial cable; time domain reflectometry

### 1 引 言

电力和通信系统的飞速发展, 催生庞大的传输线路及网络, 并使其成为国家和社会的基础设施。传输线不可避免地遭受到自然灾害等引起的损坏, 导致严重的经济损失和安全隐患。因此, 准确探测传输电缆故障点的位置, 将有力地保障通信和电力服务及时恢复, 具有重要意义。迄今已有多种电缆断点测量技术<sup>[1~6]</sup>被相继提出, 主要可分为三种: 基于断点激发的高频瞬态信号探测<sup>[1]</sup>、基于传输线模型的阻抗评估<sup>[2,3]</sup>和基于时域反射原理的行波法<sup>[4,5]</sup>。脉冲时域反射法<sup>[4]</sup>发射一个激励脉冲进入被测传输线, 在诸如断点等阻抗失配处发生反射产生回波, 通过对比激励脉冲发射和回波达到发射端

的时间差计算断点的位置。这种方法无需建立模型, 并且回波信号强度较大, 有利于快捷测量而成为首选技术。然而, 受限于电脉冲宽度, 其定位精度低, 即使在全球定位系统(GPS)和小波分析等技术辅助下<sup>[5]</sup>, 定位误差理论上接近测量距离的 2%。宽带的扩频信号有益于提高定位精度<sup>[6]</sup>, 但基于电子线路产生扩频信号需要价格昂贵的伪随机码发生器, 一方面仍受电子瓶颈之困扰, 另一方面, 伪随机码的周期性可能会引入虚警和误判。

研究发现, 半导体激光器在外部光扰动下, 可容易地产生带宽达数吉赫兹甚至数十吉赫兹的混沌激光<sup>[7~9]</sup>。激光器的混沌同步赋予了这种宽带、类噪声的混沌激光在保密通信中的潜能<sup>[10,11]</sup>, 同时, 混

收稿日期: 2010-02-03; 收到修改稿日期: 2010-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(60777041, 60908014)和山西省青年自然科学基金(2009021003)资助课题。

作者简介: 韩国华(1969—), 女, 工程师, 主要从事激光技术方面的研究。E-mail: hgh5239@163.com

\* 通信联系人。E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

混沌激光信号还具有“图钉”型模糊函数<sup>[12]</sup>,是理想的测距和雷达信号<sup>[13~18]</sup>。此外,半导体激光器尺寸小,易于集成和操作。因此,本文鉴于扩频信号的时域反射测量技术,将混沌激光引入传输线断点检测,提出基于混沌激光的传输线断点定位方法,并用半导体激光器和同轴电缆进行实验验证,初步获得了与距离无关的 7.5 cm 空间分辨率。

## 2 实验装置及原理

图 1 为利用混沌激光检测电缆断点的实验装置图。图中方框部分为混沌激光源:半导体激光器出射光经透镜准直后由偏振分束器(PBS)分为两路,其中一路被平面反射镜反射后返回激光器内形成光

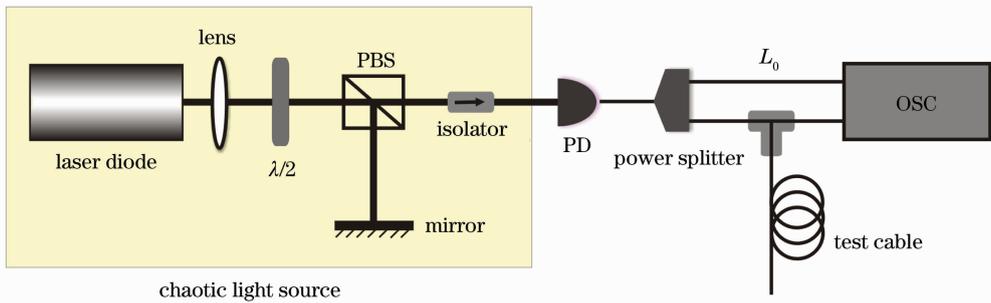


图 1 测量同轴电缆断点的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for breakpoint measurement of coaxial cable

实验所用的激光器为单纵模半导体激光器(Sharp LT024MD0),其阈值电流  $I_{th}$  为 56.0 mA,斜率效率为 0.68 mW/mA,输出中心波长为 778 nm,偏振比为 120:1 的线偏振光。对波长 778 nm 的激光,半波片与偏振分束器的透射率为 87%,反射镜的反射率为 85%。探测器(Newport 818BB21)的带宽约 1 GHz,响应度为 0.4 A/W,噪声等效功率为 1.5 pW/Hz<sup>1/2</sup>。实时示波器(Tektronix TDS3052)的带宽和采样速率分别为 500 MHz 和 5 GS/s。待测电缆为带宽约 30 GHz 的同轴电缆(EC-SUHNER141),其传播速度标定值为 0.706c( $c=3 \times 10^8$  m/s 为真空中的光速),阻抗  $(50 \pm 2) \Omega$ ,电容 92 pF/m,衰减系数随频率增大而增大,例如对 50 MHz 和 500 MHz 的传输信号典型衰减系数分别为 0.08 dB/m 和 0.27 dB/m。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 半导体激光器产生混沌

光反馈半导体激光器是个非线性系统,对某一反馈腔长,通过调节反馈强度和偏置电流可使激光器处于混沌振荡状态。对实验所用半导体激光器,先期实验和理论研究<sup>[19]</sup>表明,在数十厘米的长腔反

反馈,通过调节偏振片可以控制反馈光的强度,从而产生混沌激光。产生的混沌激光通过分束器的另一路输出进入光电探测器(PD)转换为电混沌信号。光隔离器的作用是阻止额外的光反馈影响激光器的混沌状态。电混沌信号经过微波功率分配器分成两路,分别通过探测通道和长度已知为  $L_0$  的参考通道后输入实时示波器(OSC)。被测电缆通过 T 型连接器接入探测通道,因此,断点处的反射信号也通过 T 型连接器进入示波器被记录。通过计算示波器记录的参考信号和探测信号波形的相关函数,获得回波信号和参考信号的相对时间延迟  $\tau$ ,进而测定断点距离 T 型连接器为  $v\tau/2$ ,其中  $v$  为信号在电缆中的传播速度。

馈下,激光器会随偏置电流增加经历低频起伏进入混沌,且偏置电流约  $(1.1 \sim 1.5)I_{th}$  是混沌的产生区域。本实验中半导体激光器工作温度固定为 25 °C,选择外部参数为偏置电流  $1.34I_{th}$ ,反馈强度和腔长分别为 -12.65 dB 和 22.50 cm,使激光器的状态近似处于混沌产生区域的中心。产生的混沌激光平均光功率为 8.3 dBm,示波器记录其波形如图 2(a)所示,根据 GP 算法<sup>[20]</sup>和小数据量算法<sup>[21]</sup>计算其最大李亚普诺夫指数和关联维数分别为  $5.69 \text{ ns}^{-1}$  和 2.32,表明为混沌状态。显然,混沌激光具有类随机的波形,并且具有较大的幅度,如图 2(a)波形平均幅值约为均值的 0.66 倍;由示波器的傅里叶变换功能测量得到此混沌信号的功率谱如图 2(b)所示。可见混沌激光功率谱的宽度已经达到示波器 500 MHz 带宽,表明此混沌信号实际带宽应大于 500 MHz。因此,半导体激光器产生的混沌信号具有宽带、大幅度的特点,有利于电缆断点的探测。图 2(c),(d)分别为图 2(a)中混沌波形的相图和自相关曲线。混沌波形是确定系统的内随机输出,具有随机信号的相关性和取决于系统及其参数的唯一性,这一特性使得混沌信号具有很强的抗干扰能力。

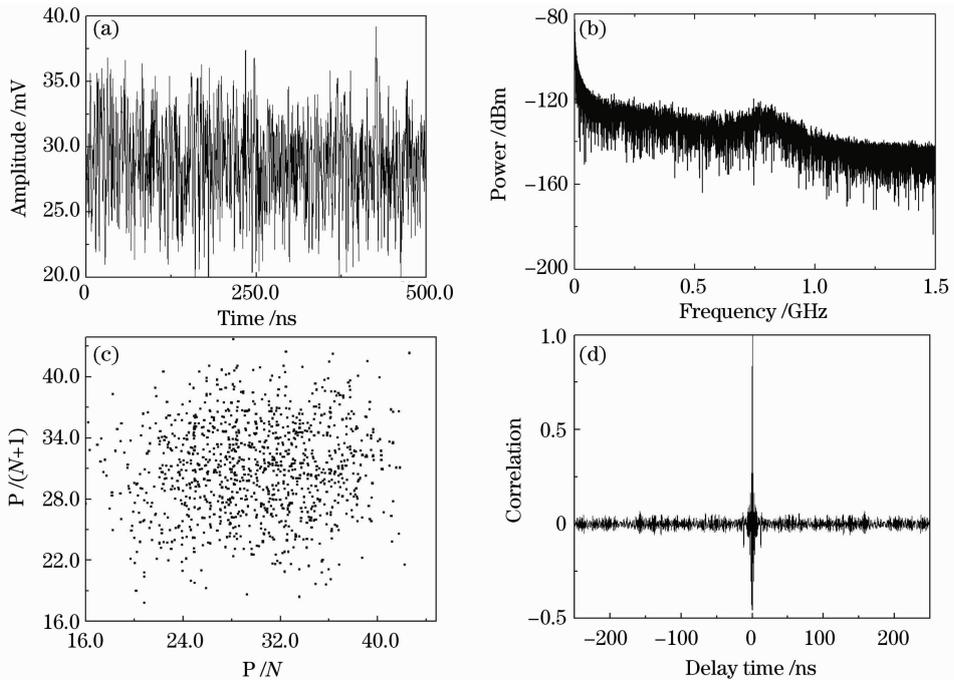


图 2 混沌半导体激光器产生的混沌信号。(a)时序波形;(b)功率谱;(c)相图;(d)自相关曲线  
Fig. 2 Chaotic signal emitted from chaotic laser diode. (a) temporal waveform; (b) power spectrum;  
(c) phase portrait; (d) autocorrelation curve

### 3.2 实验测量结果

以图 2 所示混沌信号作为测量信号进行实验验证。混沌激光经光隔离器后由光电探测器转换为电混沌信号,其平均功率约为  $-5.4$  dBm(负载电缆阻抗为  $50 \Omega$ ),经  $3$  dB 功率分配器后进入探测通道的信号功率为  $-8.4$  dBm。首先进行定标,即测定未接入被测电缆时探测通道和参考通道的信号程差。测得参考信号与探测信号的相关曲线如图 3 中实线所示,图中最大峰值位于  $t_0 = 1.6$  ns,表明在未接入电缆的情况下,实验装置中探测通道的信号路程比参考通道延迟  $\nu t_0$ ,因此,将  $t_0 = 1.6$  ns 标定为测量的零点。然后将某一长度的被测电缆接入探测通路中,分别记录探测信号和参考信号,并进行互相关运算,根据标定的零点即可获得信号在被测电缆中传播的时间。图 3 中虚线为一段  $1.60$  m 的待测电缆对应的互相关曲线,其峰值位于  $t_R = 17.0$  ns。因此,探测信号在此段电缆中的往返时间为  $\tau = t_R - t_0 = 15.4$  ns,由待测电缆的传播速度标定值  $0.706c$  可计算得到电缆断点到探测点距离为  $1.64$  m,绝对偏差  $4$  cm,为实际长度的  $2.5\%$ 。

图 4 显示了标定之后的 4 段长度分别为  $5.7$ ,  $17.2$ ,  $28.9$  和  $40.3$  m 的同轴电缆的测量结果。随着距离的增加,相关曲线峰值降低,进而导致信噪比逐渐降低,直至无法探测。其原因在于:1)电缆的损

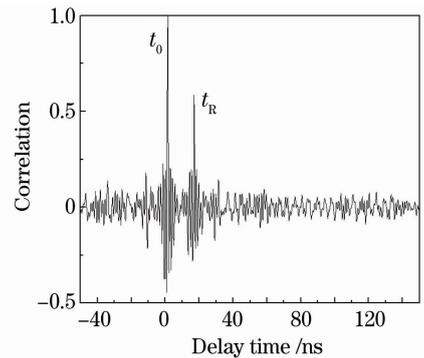


图 3 测量同轴电缆断点时的定标及  $1.60$  m 断点结果  
Fig. 3 Experimental calibration of zero point and location of a breakpoint at distance of  $1.60$  m

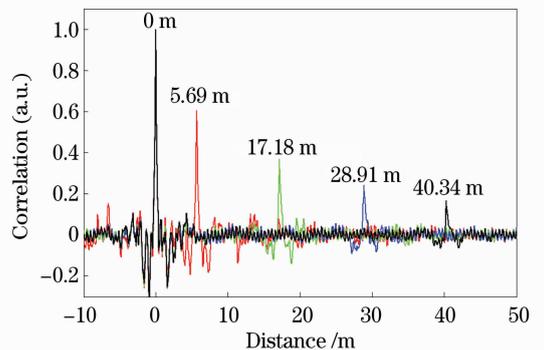


图 4 长度不同时同轴电缆的测量结果  
Fig. 4 Experimental detection of the endpoints of coaxial cables at different lengths

耗导致返回探测端的探测信号幅度随着距离而下降,从而致使相关曲线的峰度下降;2)实验中探测信号并非传统时域反射法中的脉冲信号而是连续发射的,导致随断点距离的增大,回波信号与参考信号的相关长度减小。需指出,后者的影响可采用一段固定长度的混沌信号扫描电缆、保持相关长度而消除。若以 500 MHz 处电缆损耗 0.27 dB/m 预计,40.3 m 距离的双程损耗为 21.8 dB,其返回信号的功率约为 -30.2 dBm。因此,示波器的灵敏度限制了目前实验装置的探测距离。若对探测信号增加 30 dB 放大,即可实现单程测量范围 100 m。

断点定位的精度或分辨率取决于相关曲线主峰的宽度。如图 5 所示,混沌激光信号相关曲线的半峰全宽(FWHM)为 0.7 ns。若依瑞利判据,则分辨率等于相关曲线的半峰全宽,相距 0.8 ns 的两个相关曲线可以清晰分辨。对于传播速度为 0.706c 的测试电缆,断点测量的空间分辨率为 7.5 cm,而绝对误差亦不超过空间分辨率。

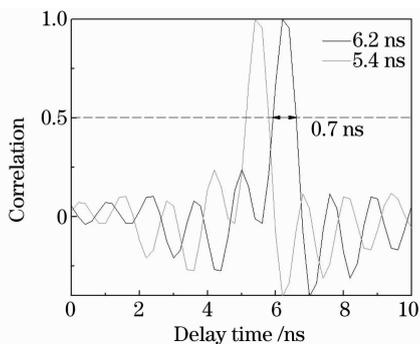


图 5 混沌相关法测量的 0.7 ns 时间分辨率

Fig. 5 Time resolution of 0.7 ns of chaos-correlation measurement

混沌波形的自相关函数与其功率谱函数是一对傅里叶变换对,故相关曲线的 FWHM 理论上唯一取决于混沌信号带宽。由此可知:1)实验所获 7.5 cm 分辨率是受限于示波器 500 MHz 带宽,而混沌半导体激光器带宽通常可达数吉赫兹,因此,空间分辨率仍可提高;2)尽管不同频率信号的传播特性有异,但相关探测法保证空间分辨率几乎不受影响,如图 4 所示,不同距离处断点的分辨率几乎无变化。因此,基于混沌激光的断点检测方法可实现分辨率为几个厘米的高精度测量,并且随距离增加相对不确定度越低(例如,对 40 m 处断点测量的误差仅为 0.19%)。

## 4 结 论

提出一种基于混沌半导体激光器的同轴电缆断点检测方法,并利用光反馈半导体激光器作为信号源进行实验验证。实验结果表明,利用普通的半导体激光器即可实现 7.5 cm 空间分辨率,且与断点距离无关。此方法突出优点在于通过半导体激光器可很容易获得宽带、大幅度混沌信号,获得高分辨率,并且空间分辨率与测量距离无关。该方法可以为传输线故障提供一种高精度检测方案。

## 参 考 文 献

- 1 Z. Q. Bo, G. Weller, M. A. Redfern. Accurate fault location technique for distribution system using fault-generated high-frequency transient voltage signals [J]. *IEE Proc. Gener. Transm. D.*, 1999, **146**(1): 73~79
- 2 R. Das, M. S. Sachdev, T. S. Sidhu. A fault locator for radial subtransmission and distribution lines [C]. *Proc. IEEE PES SM*, 2000, **1**: 443~448
- 3 M. M. Saha, F. Provoost, E. Rosolowski. Fault location method for MV cable network [C]. *IEE Conf. Developments in Power System Protection*, 2001, 323~326
- 4 L. P. V. Biesen, J. Renneboog, A. R. F. Barel. High accuracy location of faults on electrical lines using digital signal processing [J]. *IEEE T. Instrum. Meas.*, 1990, **39**(1): 175~179
- 5 W. Zhao, Y. H. Song, W. R. Chen. Improved GPS travelling wave fault locator for power cables by using wavelet analysis [J]. *Int. J. Elec. Power & Energy System*, 2001, **23**(5): 403~411
- 6 P. Smith, C. Furse, J. Gunther. Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location [J]. *IEEE Sens. J.*, 2005, **5**(6): 1469~1478
- 7 A. B. Wang, Y. C. Wang, J. F. Wang. Route to broadband chaos in a chaotic laser diode subject to optical injection [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1144~1146
- 8 Y. Takiguchi, K. Ohayagi, J. Ohtsubo. Bandwidth-enhanced chaos synchronization in strongly injection-locked semiconductor lasers with optical feedback [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(5): 319~321
- 9 A. B. Wang, Y. C. Wang, H. C. He. Enhancing the bandwidth of the optical chaotic signal generated by semiconductor laser with optical feedback [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(19): 1633~1635
- 10 A. Argyris, D. Syvridis, L. Larger *et al.*. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links [J]. *Nature*, 2005, **438**(7066): 343~346
- 11 Zhang Weili, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Chaos synchronization in polarization selective mutually coupled semiconductor lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 55~60
- 张伟利, 潘 伟, 罗 斌 等. 偏振选择互注入半导体激光器的混沌同步 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 55~60
- 12 F. Y. Lin, J. M. Liu. Ambiguity functions of laser-based chaotic radar [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(12): 1732~1738
- 13 K. Myneni, S. D. Pethel, N. J. Corron *et al.*. High-precision ranging using a chaotic laser pulse train [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(11): 1496~1498
- 14 F. Y. Lin, J. M. Liu. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(6): 815~820

- 15 F. Y. Lin, J. M. Liu. Chaotic lidar[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2004, **10**(5): 991~997
- 16 A. B. Wang, Y. C. Wang. Range finding with chaotic laser train generated from laser diode with optical feedback[C]. *SPIE*, 2007, **6279**: 627970
- 17 B. J. Wang, Y. C. Wang, L. Q. Kong *et al.*. Multi-target real-time ranging with the chaotic laser radar[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(11): 868~870
- 18 Gong Tian'an, Wang Yuncai, Kong Linqin *et al.*. Chaotic lidar for automotive collision warning system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2426~2430  
龚天安,王云才,孔令琴等. 面向汽车防撞的混沌激光雷达[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2426~2430
- 19 Kong Linqin, Wang Anbang, Wang Haihong *et al.*. Dynamics of semiconductor laser with optical feedback: Evolution from low-frequency fluctuation to chaos[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(4): 2266~2272  
孔令琴,王安帮,王海红等. 光反馈半导体激光器产生低频起伏与高维混沌信号及其演化过程[J]. *物理学报*, 2008, **57**(4): 2266~2272
- 20 P. Grassberger, I. Procaccia. Measuring the strangeness of strange attractors[J]. *Physica D*, 1983, **9**(1-2): 189~208
- 21 H. S. Kim, R. Eykholt, J. D. Salas. Nonlinear dynamics, delay times, and embedding windows [J]. *Physica D*, 1999, **127**(1-2): 48~60