

混沌信号相关法测量电介质传输线的断点及阻抗失配*

徐航 王安帮 韩晓红 马建议 王云才[†]

(太原理工大学, 光电工程研究所, 太原 030024)

(2010年8月23日收到; 2010年11月2日收到修改稿)

本文通过实验验证了一种基于宽带混沌信号测量电介质传输线的断点和阻抗失配的方法. 该方法利用光反馈半导体激光器产生的混沌信号作为探测信号, 通过相关法对传输线进行断点定位、阻抗失配测量以及在线检测. 实验结果表明, 断点的定位偏差小于 1%, 阻抗的测量值在额定范围内, 对于频率为 2 MHz 的矩形脉冲信号的干扰容限为 48 dB.

关键词: 混沌, 故障定位, 半导体激光器, 时域反射法

PACS: 05.45.Gg, 84.37.+q, 84.40.Az

1. 引言

随着现代社会电力和通信系统的迅速发展, 各种传输线在国家基础设施中所占的比重越来越大. 然而, 受到人为因素和自然灾害的影响, 传输线的各种损耗不可避免, 给国家和社会带来了严重的经济损失和安全隐患. 因此, 准确探测传输线的故障, 对保障通信和电力服务的及时恢复具有重要意义. 迄今已有多种传输线的故障检测技术被提出. 其中反射测量法^[1]因无需建立模型, 且回波信号强度较大, 测量方法快捷而成为首选技术. 反射测量法根据入射信号的不同可以分为: 时域反射法 (time-domain reflectometry, TDR)^[2,3]、频域反射法 (frequency-domain reflectometry, FDR)^[4]、扩频时域反射法 (spread-spectrum time-domain reflectometry, SSTDR)^[5,6] 和噪声域反射法 (noise-domain reflectometry, NDR)^[7]. 其中, TDR 是发射一个电压脉冲进入传输线, 通过测量入射信号和反射信号之间的延迟时间以及反射信号的极性来确定故障的位置和类型. FDR 是发射一个调频步进的正弦波进入传输线, 通过测量入射波和反射波之间的相移来

检测故障. TDR 和 FDR 虽能实现高精度的故障定位, 但由于二者发射的信号容易被传输线中的已有信号和噪声环境所淹没, 所以不适用于传输线的在线检测. 此后, 利用伪随机码的 SSTDR 和利用传输线噪声的 NDR 被相继提出用于解决这一问题. 这两种方法都是利用随机波形的相关特性实现高精度、抗干扰测量. 然而, 利用 SSTDR 实现高精度测量需要昂贵的高速伪随机码发生器且无模糊探测的范围受限于伪随机码的周期性. NDR 受限于传输线的噪声无法调节而只能被动检测.

研究发现, 半导体激光器在光反馈^[8,9]、光注入^[10]和光电反馈^[11]等外部扰动下, 可持续产生混沌振荡, 输出的混沌激光波形随机起伏, 频谱宽而平滑^[12-15]. 同时, 宽带、类噪声的混沌激光还具有“图钉”形模糊函数^[16], 可以作为理想的测距和雷达信号^[17-22]. 因此, 本文将混沌信号引入 TDR, 利用混沌信号的相关特性对传输线进行断点定位、阻抗失配测量以及在线检测, 并用光反馈半导体激光器产生的混沌信号验证了该方法的可行性.

2. 实验装置与原理

混沌信号相关法测量传输线断点和阻抗失配

* 国家自然科学基金 (批准号: 60777041), 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 60908014) 和山西省青年科学基金 (批准号: 2009021003) 资助的课题.

[†] 通讯联系人: E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

的实验装置如图 1 所示. 虚线框中的混沌光源由一个光反馈半导体激光器构成. 反馈光由一个反射率为 99% 的光纤反射镜 (FM) 提供, 反馈光的强度和偏振态分别由可调光衰减器 (VOA) 和偏振控制器 (PC) 调节和控制. 85:15 的耦合器 (OFC₁) 将 15% 的光作为反馈, 85% 的光作为输出. 光隔离器 (OI) 则用于阻止影响激光器混沌状态的额外光反馈. 经过 OI 输出的混沌激光被 95:5 的耦合器 (OFC₂) 分为两束. 通过两个相同的光电探测器 (PD), 两束混沌激光均被转换为混沌电信号. PD₂ 输出的低功率信号作为参考信号. PD₁ 输出的高功率信号通过一个 T 形连接器被分成两路相同的信号: 一路作为探测信号被注入到被测的传输线中, 另一路作为基底信号. 所有的信号最终都由数据采集卡 (DAC) 进行模数转换和存储, 再由计算机 (PC) 控制采集卡读取数据进行相关运算后显示结果.

由于混沌信号的相关曲线具有细锐的 δ 函数形式, 因此可以通过对参考信号和混合信号 (包含基底信号和反射的探测信号) 做相关处理来进行断点定位. 设参考信号, 基底信号和反射信号分别为 s_0 , s_1 和 s_2 . 其中, s_1 和 s_2 均是 s_0 的延迟复制, 对应的延迟时间分别为 τ_1 和 τ_2 . τ_1 和 τ_2 可以利用相关计算同时获得, 如下式:

$$[s_1(t) + s_2(t)] \otimes s_0(t) \approx \delta(t - \tau_1) + k\delta(t - \tau_2). \quad (1)$$

显然, $\tau = \tau_2 - \tau_1$ 是 s_2 相对于 s_1 的延迟时间, 即探测信号在 T 形连接器和断点之间往返一次的传播时间. 因此, 断点的位置为 $\nu\tau/2$, ν 是信号在传输线中的传播速度. (1) 式中的因子 k 表示由于传输线的衰减和阻抗失配处 (例如断点) 的反射而造成探测信号功率的减小. 因此, 阻抗失配同样可以通过相关曲线来测量.

实验中所用的半导体激光器 (LDM5S752) 由低噪声电流源 (Newport MODEL501) 进行驱动. 激光器的偏置电流为 33 mA (1.5 倍阈值电流), 工作温度由温度控制器 (ILX-Lightwave LDT-54102) 监控在 20 °C. 此时激光器输出的光功率为 1 mW, 中心波长为 1554 nm, 弛豫振荡频率为 2.7 GHz. PD (Conquer KG-PIN-02-01) 的转换效率和带宽分别为 1.6 V/mW 和 155 MHz. DAC (Clock DSO2902A-D2) 的带宽和采样率分别为 125 MHz 和 500 MSa/s.

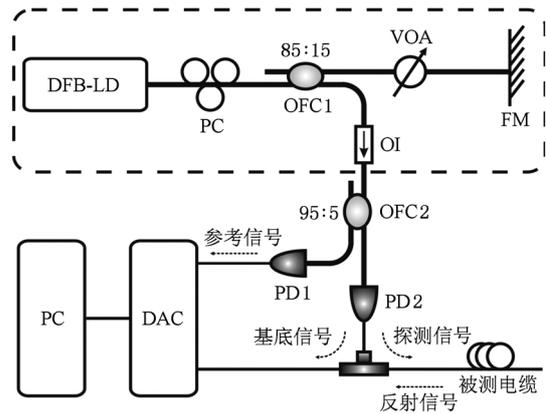


图 1 测量传输线断点和阻抗失配的实验装置

3. 混沌探测信号特性

当光反馈的强度和延迟分别为 -20 dB 和 30 ns 时, 激光器输出混沌信号. 混沌探测信号的时序图、功率谱、相位图和自相关曲线如图 2 所示. 时序图表明混沌信号的波形快速且不规则地变化; 受限于 DAC 的带宽, 功率谱显示混沌信号的带宽约为 125 MHz, 而实际产生的混沌信号带宽远远大于 125 MHz; 混沌信号的自相关曲线具有 δ 函数形式, 如图 2(d) 所示. 其半高全宽 (full width at half maximum, FWHM) 如图 2(d) 中的插图所示为 5 ns. 注意该值受限于 125 MHz 的采集带宽, FWHM 的理论值可以小于 0.1 ns.

4. 实验结果与分析

4.1. 断点定位

图 3 显示了 5 段不同长度的同轴电缆断点的测量结果, 各曲线依次表示长度为 11.1 m, 51.7 m, 93.7 m, 145.5 m 和 160.5 m 的被测电缆. 实验所用的被测电缆为 1 GHz 带宽、 $(50 \pm 2) \Omega$ 特性阻抗和 100 pF/m 电容的 URM43 型同轴电缆. 以表示断点位置为 11.1 m 的互相关曲线为例, 第一个最高的相关峰作为基准峰是由参考信号和基底信号相关而得, 表示测量的零点. 第二个最高的相关峰作为反射峰是由于信号在断点处发生反射而形成的, 其相对于基准峰的距离表示了断点的位置. 从图中可以看出随着被测电缆长度的增加, 断点处对应的相关峰值在逐渐降低, 至 160.5 m 处已无法分辨. 需要指

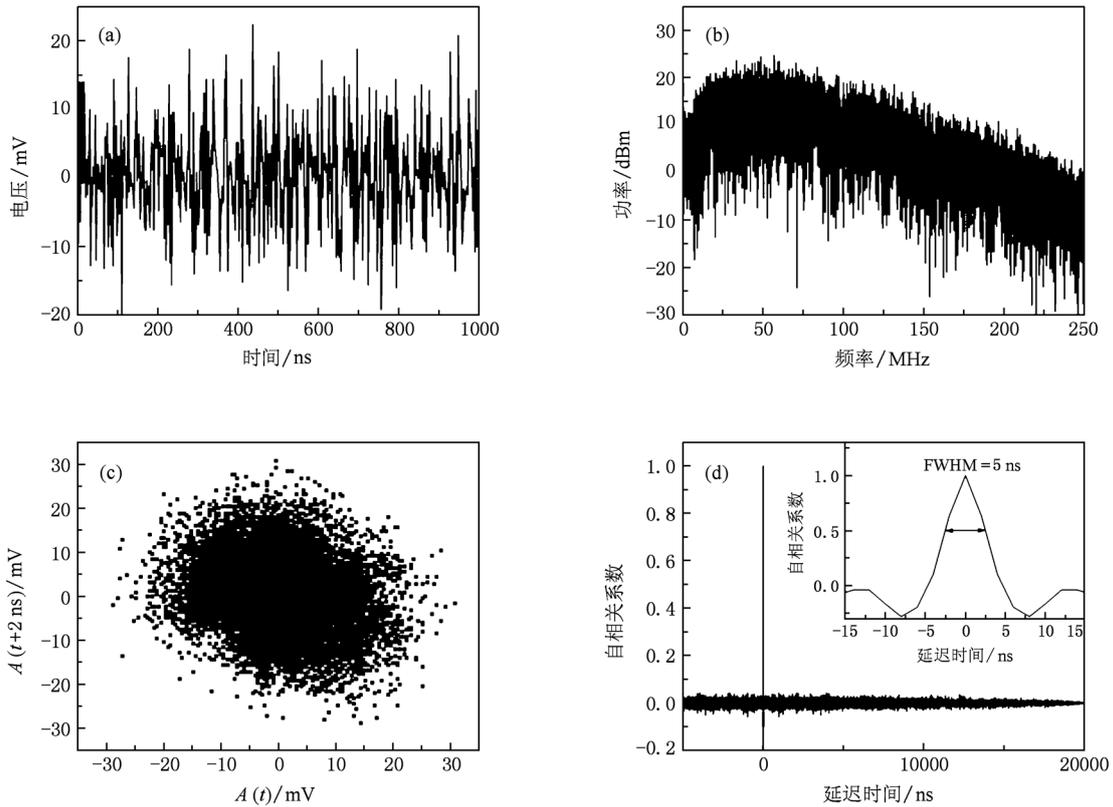


图2 实验用混沌探测信号 (a)时序图;(b)功率谱;(c)相位图;(d)自相关曲线

出的是:为了提高信噪比,测量结果是经过 100 次平均得到的且测量的相关长度是 10 μ s.

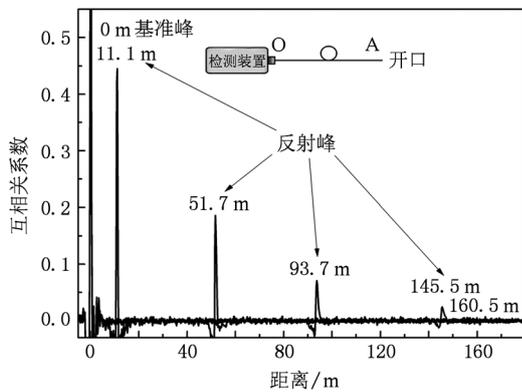


图3 不同长度的同轴电缆断点位置的检测

4.2. 阻抗失配测量

传输线中阻抗失配处的反射系数 Γ 由下式给出:

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

Z_0 是传输线的特性阻抗, Z_L 是阻抗失配处的特性阻

抗. 结合(2)式和混沌信号的相关特性不难发现,当混沌信号由低阻抗进入高阻抗时,相关曲线的反射峰为正值,反之则为负值,表明两种情况下反射的极性相反. 图4显示了对阻抗失配的位置和类型的测量结果. 传输线的布局如图4中的插图所示,包括 A, B, C 三个连接点和一个 50 Ω 的终端负载. 除 BC 段以外的其余被测传输线仍用 URM43 型同轴电缆. 对于长度为 L_m , 特性阻抗为 $R\Omega$ 的 BC 段被测传输线, 分别选用 10.6 m, (75 \pm 5) Ω 的同轴电缆 (SYV-75-5-1), 10.1 m, (100 \pm 15) Ω 的网线 (UTP5e) 以及 10.4 m, (150 \pm 15) Ω 的电话线 (HBVV-2). 从图中可以看出各情况下连接点 A, 阻抗失配点 B 和断点 C 的位置并且 B 处的峰值随阻抗失配量的增大而增大. 以 B 点为例来量化阻抗失配处的阻抗值. 如果 B 点开路如曲线 (d) 所示, 则 Z_L 为 ∞ , 由(2)式可知该处的反射系数为 1. 由于曲线 (d) 在 B 点的相关峰表示全反射, 将该处的峰值归一化, 则曲线 (a) — (c) 在 B 点的相关峰值表示实际的反射系数, 分别为 22.4%, 38.3% 和 49.8%. 因此, 各曲线 B 处对应的阻抗值分别为 78 Ω , 112 Ω 和 149 Ω , 均在额定范围内. 同理, 可以测的连接点

A 的反射系数和阻抗值分别为 6.4% 和 57Ω .

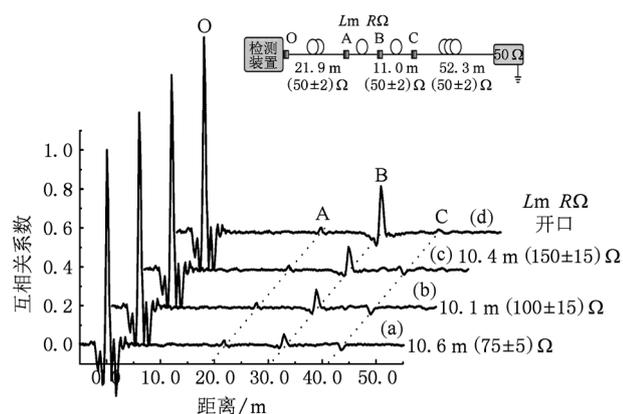


图4 传输线阻抗失配的位置和类型检测

4.3. 在线检测

为了分析在线检测断点的可行性,实验用频率为 2 MHz、占空比为 50% 的矩形脉冲信号作为被测电缆中的已有信号注入到 51.7 m 的同轴电缆 (URM43) 中并测量断点的位置. 图 5 (a) 显示了有效电压分别为 0.51 V, 1.56 V 和 5.21 V 的矩形脉冲信号作为被测电缆中已有信号的测量结果. 图中 51.7 m 处的反射峰清晰可见, 并且相关曲线上约 50 m 的周期与 2 MHz 的信号频率是一致的, 这表明曲

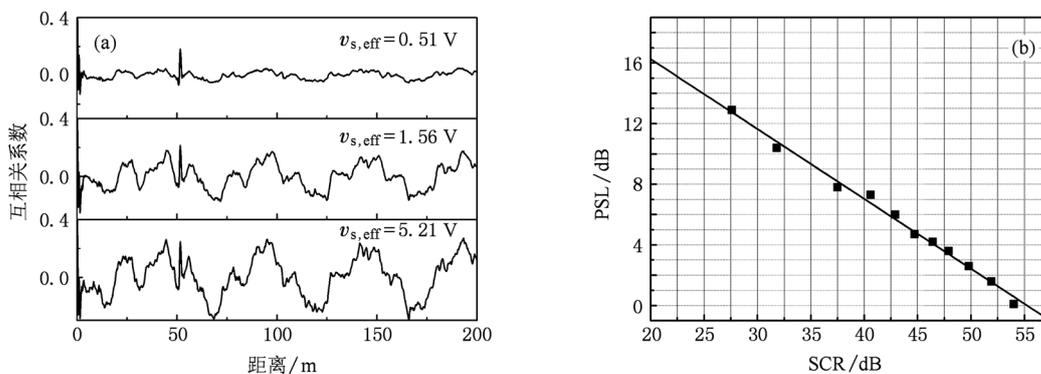


图5 (a) 频率为 2 MHz 的矩形脉冲信号作为已有信号的在线检测结果; (b) PSL 随 SCR 的变化情况

5. 讨 论

测量的空间分辨率取决于相关曲线反射峰的宽度. 依据 -3 dB 的标准, 空间分辨率为 $v \cdot \text{FWHM}/2$. 例如, 断点位于 11.1 m 处的空间分辨率如图 6 中的插图所示, 对于信号传播速度为 $0.66c$

线的轨迹是被矩形脉冲信号调制的, 且随着信号有效电压的增加, 调制深度也在增大. 如果一个同频率的正弦信号作为已有信号, 在相同的有效电压下对测量结果的影响要小于矩形脉冲信号, 这是因为矩形信号包含更多的频率成分.

如上所述, 被测电缆中的已有信号在阻抗失配处部分发生后向反射, 从而干扰检测. 同理, 混沌信号也是已有信号的噪声. 我们用已有信号和混沌信号的功率比 (SCR) 来衡量已有信号对混沌信号的干扰程度, 用旁瓣水平 (PSL) 来衡量测量的质量. 定义 SCR 为 $20 \log_{10}(v_{s,\text{eff}}/v_{c,\text{eff}})$, 其中 $v_{s,\text{eff}}$ 和 $v_{c,\text{eff}}$ 分别表示已有信号和混沌探测信号的有效电压. 根据平均功率的定义, 计算得到 $v_{c,\text{eff}}$ 约为 7.3 mV. 定义 PSL 为 $10 \log_{10}(C_1/C_2)$, 其中, C_1 是探测信号在断点处反射而形成的反射峰值, C_2 是反射峰附近旁瓣的最高峰值. 图 5 (b) 显示了已有信号为矩形脉冲信号的情况下, SCR 和 PSL 之间的关系. 从图中可以发现 PSL 随 SCR 的增大而线性减小. 值得注意的是当矩形脉冲信号的 SCR 增大到 48 dB 时, PSL 下降至 3 dB, 这就意味着我们可以利用功率非常低的混沌信号 (与已有信号相比较而言) 进行断点的在线检测, 其功率低于传输线的一般噪声容限. 由此可见, 混沌信号具有很强的抗干扰能力, 非常适用于传输线中断点的在线检测.

的被测电缆 (URM43) 而言, 其空间分辨率为 0.55 m. 需要注意的是该分辨率受限于 PD 和 DAC 的带宽. 我们先前的实验表明 500 MHz 带宽的混沌信号可以获得 0.6 ns 的 FWHM^[23], 相应的空间分辨率为 5.9 cm. 由于混沌信号的频带很宽, 分辨率实际上还受到电缆色散的影响. 如图 6 所示, 随着探测信号传播距离的增加, 空间分辨率逐渐增大. 然而当

距离超过 35 m 时,测量的相对不确定度小于 1%,并且随着距离的增加还会进一步减小.

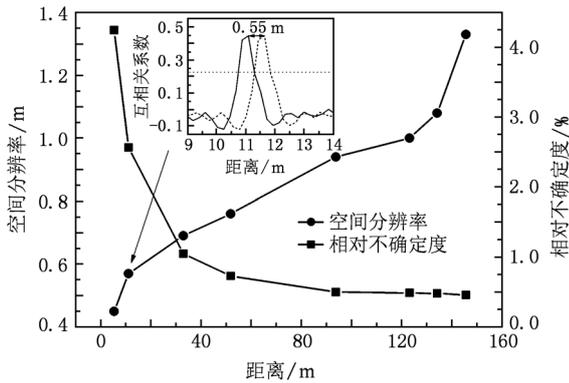


图6 空间分辨率、相对不确定度随探测信号传播距离的变化情况

与 TDR, FDR, SSTDR 以及 NDR 相比,混沌信号相关法具有以下优点:1)混沌信号的功率低于传输线的一般噪声容限且抗干扰能力强,非常适应于传输线的在线检测,消除了 TDR 和 FDR 不适于在线检测的弊端.2)利用激光器内部的动态特性产生混沌探测信号,结构简单且价格低廉,无需昂贵设备例如 SSTDR 中的高速伪随机码发生器.并且混沌信

号的无重复波形消除了 SSTDR 因伪随机码的周期性而产生的模糊测量.3)混沌信号相关法可以根据传输线中的已有信号来调节探测信号的频率范围和幅度,消除了 NDR 只能被动检测的局限性.然而,宽带混沌信号的固有特点并非都是优势.混沌信号的宽频带使得色散的影响在该方法中不可避免.受到色散的影响,空间分辨率会随着探测距离的增加发生恶化,同样的问题也出现在 SSTDR 和 NDR 中.因此,可以通过借鉴 SSTDR 和 NDR 中的后处理技术来加以改善.

6. 结 论

综上所述,本文利用混沌信号相关法对传输线进行断点定位、阻抗失配测量以及在线检测,并利用光反馈半导体激光器产生的混沌信号进行了实验验证.实验结果表明,利用该方法得到的断点定位偏差小于 1%,阻抗测量值在额定范围内,对于频率为 2 MHz 的矩形脉冲信号的干扰容限为 48 dB.该方法可以为传输线的故障检测提供一种高精度的在线检测方案.

[1] Furse C, Chung Y C, Lo C, Pendayala P 2006 *Smart Structures and Systems* **2** 25
 [2] Mackay N A M, Penstone S R 1974 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **23** 155
 [3] Jensen G A, Ernst S M U. S. *Patent* 5 586 054 [1996-11-17]
 [4] Furse C, Chung Y C, Dangol R, Nielsen M, Mabey G, Woodward R 2003 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **45** 306
 [5] Sharma C R, Furse C, Harrison R R 2007 *IEEE Sens. J.* **7** 43
 [6] Smith P, Furse C, Gunther J 2005 *IEEE Sens. J.* **5** 1469
 [7] Lo C, Furse C 2005 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **47** 97
 [8] Mørk J, Tromborg B, Mark J 1992 *IEEE J. Quantum Electron.* **28** 93
 [9] Kong L Q, Wang A B, Wang H H, Wang Y C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2266 (in Chinese) [孔令琴、王安帮、王海红、王云才 2008 物理学报 **57** 2266]
 [10] Simpson T B, Liu J M, Gavrielides A, Kovanis V, Alsing P M 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 3539
 [11] Tang S, Liu J M 2001 *IEEE J. Quantum Electron.* **37** 329
 [12] Uchida A, Heil T, Liu Y, Davis P, Aida T 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 1462
 [13] Zhang X J, Wang B J, Yang L Z, Wang A B, Guo D M, Wang Y C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3203 (in Chinese) [张秀娟、王

冰洁、杨玲珍、王安帮、郭东明、王云才 2009 物理学报 **58** 3203]
 [14] Liu S F, Xia G Q, Wu J G, Li L F, Wu Z M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1502 (in Chinese) [刘胜芳、夏光琼、吴加贵、李林福、吴正茂 2008 物理学报 **57** 1502]
 [15] Wang Y C, Zhang G W, Wang A B, Wang B J, Li Y L, Guo P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4372 (in Chinese) [王云才、张耕玮、王安帮、王冰洁、李艳丽、郭萍 2007 物理学报 **56** 4372]
 [16] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 1732
 [17] Myneni K, Barr T A, Reed B R, Pethel S D, Corron N J 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 1496
 [18] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 815
 [19] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **10** 991
 [20] Wang A B, Wang Y C 2007 *Proc. SPIE* **6279** 627970
 [21] Wang B J, Wang Y C, Kong L Q, Wang A B 2008 *Chin. Opt. Lett.* **6** 868
 [22] Gong T A, Wang Y C, Kong L Q, Li H Z, Wang A B 2009 *Chinese J. Lasers* **36** 2426 (in Chinese) [龚天安、王云才、孔令琴、李海忠、王安邦 2009 中国激光 **36** 2426]
 [23] Wang Y C, Wang B J, Wang A B 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1636

Measuring breakpoints and impedance mismatch for dielectric transmission lines by using correlation method of chaotic signals^{*}

Xu Hang Wang An-Bang Han Xiao-Hong Ma Jian-Yi Wang Yun-Cai[†]

(*Institute of Optoelectronic Engineering, Dept. of Physics & Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

(Received 23 August 2010; revised manuscript received 2 November 2010)

Abstract

We demonstrate experimentally a method to measure breakpoints and impedance mismatch for dielectric transmission lines by using broadband chaotic signals. Chaotic signal serving as a probe signal is obtained from the chaotic laser diode with optical feedback. Correlation method can realize breakpoint location, impedance estimation, and live test. Experimental results show that the location deviation is less than 1%, the impedance error is within the nominal rating, and interference margin is about 48 dB for 2 MHz square pulse signal on wire.

Keywords: chaos, fault location, semiconductor lasers, time domain reflectometry

PACS: 05.45.Gg, 84.37.+q, 84.40.Az

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60777041), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60908014), and the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 2009021003).

[†] Correspondence author. E-mail: wangyc@tyut.edu.cn