利用单极性编码脉冲的海底光缆护套层故障探测方法

殷杰1,2,徐伟弘1,张旭苹1

(1. 南京大学 光通信工程研究中心,江苏 南京 210093;

2. 南京化工职业技术学院 自动控制系,江苏 南京 210048)

摘 要:海底光缆的使用环境中存在随机扰动因素,故使用传统单脉冲电磁脉冲时域反射法进行护 套层故障探测会受到大量随机噪声的干扰,探测波形难以辨识,故障探测效果较差。为改善探测效果, 根据海底光缆护套层结构特性将其等效为带有随机扰动偏差的有耗非均匀传输线模型进行分析,提 出了使用单极性编码脉冲作为探测信号的海底光缆护套层故障探测方案。通过理论分析和实验研 究,证明与单脉冲探测方案相比,该方案可以在不降低空间分辨率的前提下有效降低测试系统噪声, 获得较好的探测效果,满足海底光缆护套层故障探测要求。

关键词:故障探测; 光缆护套; 随机噪声; 脉冲编码; 增益 中图分类号:TN98 文献标志码:A 文章编号:1007-2276(2013)02-0470-06

Method of fault-detecting of submarine optic fiber cable sheath based on unipolar pulse-coding

Yin Jie^{1,2}, Xu Weihong¹, Zhang Xuping¹

(1. Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Department of Automatic Control, Nanjing College of Chemical Technology, Nanjing 210048, China)

Abstract: Random perturbations exist in the working environment of submarine optic fiber cable, so using traditional single-pulse TDR to detect the fault of submarine optic fiber cable sheath can not get ideal waveform due to the interference of random noise, and fault detecting effect is unsatisfactory. To solve this problem, an equivalent circuit model of submarine optic fiber cable sheath was proposed based on the structural characteristics of submarine optic fiber cable sheath, which is equal to a lossy-nonuniform transmission line with random perturbations. And a fault-detecting method was put forward, which adopted unipolar coding pulse as detecting signal. Through theoretical analysis and experimental studies, this program can effectively reduce the nosie of system without reducing the spatial resolution and improve the system gain compared with single-pulse TDR. So the detecting result can be improved, and meet the requirements of submarine optic fiber cable sheath fault-detecting engineering.

Key words: fault-detecting; optical fiber cable sheath; random noise; pulse coding; gain

收稿日期:2012-06-18; 修订日期:2012-07-18

基金项目:国家自然科学基金(60644001)

作者简介: 殷杰(1983-), 男, 讲师, 硕士生, 主要从事电子信息技术方面的研究。Email: 123632471@qq.com

导师简介:徐伟弘(1962-),男,副教授,主要从事光纤传感技术、信号处理、嵌入式系统方面的研究。Email:xwh315@163.com

0 引 言

各类海底光缆已经广泛地应用于跨洋通信和海 岛通信中。由于复杂的海洋环境和频繁的渔业活动, 海底光缆常常受到损坏。常见的损坏类型有两种:光 纤单元损坏和护套层损坏。护套层损坏若不能及时 被发现和修复,将会导致光纤单元的损坏,致使光通 信中断,从而造成重大经济损失¹¹。因此,在海底光 缆护套层出现故障时如能对故障进行检测和定位, 就可以避免更大的损失。

目前,光缆内部光纤单元的故障检测定位可以 通过光时域反射技术,布里渊光时域反射技术等加 以实现^[2-4]。常用的光缆护套层故障检测方法有:绝 缘电阻检测法和音探法^[5]。这两种方法都可以探测光 缆金属护套层故障,但两者都有各自的缺点:绝缘电 阻检测法无法对故障点进行定位,音探法需要工作 人员使用探头沿光缆布设路径进行检测,难以在海 底光缆上使用。参考文献[6]曾使用单脉冲电磁波时 域反射法对海底光缆护套层进行故障定位,但是由 于严重的随机噪声,检测波形图上的故障点反射信 号较难识别,需要由经验丰富的工程人员判读,这在 一定程度上限制了该方法的推广应用。为了克服这 些缺点,文中提出了一种基于单极性编码脉冲的改 进型电磁脉冲时域反射法,并开展了相应的理论和 实验研究。

1 理论分析

1.1 海底光缆结构

常用某型海底光缆剖面结构如图1所示,光纤被 包围在中心钢管之中,绝缘聚乙烯起着绝缘作用,加



Fig.1 Structure of submarine fiber optic cable

强钢丝用于提升光缆的机械强度,导电铜管负责给中继设备供电,绝缘外披层的作用是隔绝海水,防止金属结构受到腐蚀^{II}。中心钢管与导电铜管构成了双线导波结构,可以满足 TEM 波的传输条件^{III}。由于 TEM 波可以在海底光缆护套层结构中传输,故可以使用电磁脉冲时域反射法对海底光缆护套层的故障进行定位^{III}。

1.2 海底光缆传输线模型

由于海底光缆的工作环境存在诸多随机扰动因 素,例如:海底洋流、海底地形变化、大型鱼类的啃咬 等,这些随机外界扰动会对海底光缆的结构参数带 来随机微小变动,结构上的变动又直接反映为传输 线相关参数的随机偏差,该偏差必然会给探测系统 带来相应的随机噪声。随机偏差的海底光缆护套层 传输线模型如图2所示。





Fig.2 Equivalent circuit model of submarine optical fiber cable sheath

其中:R₁'(z)=R₁(z)+X_{R₁}(z);R₂'(z)=R₂(z)+X_{R₂}(z); L₁'(z)=L₁(z)+X_L(z);L₂'(z)=L₂(z)+X_{L₂}(z);G'(z)=G(z)+X_G(z); C'(z)=C(z)+X_c(z);R₁,R₂,L₁,L₂,G(z),C(z)是理想情 形下,护套层等效传输线一次分布参数^[7]。X_{R₁}(z),X_{R₂}(z), X_{L₁}(z),X_{L₂}(z),X_G(z),X_c(z)是外界环境随机扰动带来 的编差;u(z,t)是t时刻,距离输入端z处的信号电压 值;i(z,t)是t时刻,距离输入端z处的信号电流值。图3 为编码脉冲探测方案原理图。对图 3 使用基尔霍夫电 流电压定律可得出如下方程;

$$\begin{aligned} &\frac{\partial u(z,t)}{\partial z} = (R_1'(Z) + R_2'(Z))i(z,t) + (L_1'(Z) + L_2'(Z))\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} \\ &- \frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = G'(z)u(z,t) + C'(z)\frac{\partial u(z,t)}{\partial z} \end{aligned} \tag{1}$$

式中:A,B为边界条件所确定的常数。





若不考虑外界环境因素带来的随机扰动,海缆 的传输线方程为:

式中:常数 A'、B'为无外界随机扰动条件下所确定 的边界条件。

定义

$$e = u(z) - u'(z)$$
 (5)

(4)

则 e 即为随机扰动给测量带来的系统随机噪声,可 见 e 为距离 z 的函数,会随距离增长而累积。若可以 降低这部分噪声,可以提升系统信噪比,优化系统探 测效果。针对上述分析的随机噪声 e,考虑使用脉冲 编码的方式来降低它。

1.3 脉冲编码原理分析

光缆护套层探测系统可视为一线性系统、设探 测系统的系统传递函数为C(t),探测脉冲P(t)在系 统中的响应为 S(t),则有:

$$S(t) = C(t) * P(t)$$
 (6)

设宽度为 τ 的单探测脉冲 $P_0(t)$ 在系统中的响应 为 S₀(t), 根据一定的累加求平均的算法对探测脉冲 进行编码处理,得到 n 个编码脉冲,依次为 $P_1(t)$, $P_2(t)$, …, P_n(t)。将这些脉冲输入探测系统, 得到系统的时 域响应 $S_1(t), S_2(t), \dots, S_n(t), 这些脉冲在探测过程中$ 引入的随机噪声为 e₁(t), e₂(t), …, e_n(t)。然后, 根据响 应的解码规则对系统响应进行解码,最后可以得到 等效的单次脉冲响应 S'(t)^[9]。

设 N×N 个脉冲构成一个方阵, 第i行脉冲序列 可表示为:

$$P_{i}(t) = \sum_{j=0}^{n-1} m_{ij} P(t-j\tau)$$
(7)

式中: m_{ii} 为矩阵 I_1 的第 i 行、第 j 列元素, m_{ii} =1,0。若 $m_{ii}=1$,第i行、第i列元素引入的随机噪声可表示为: $e_i(t-j\tau)_{\circ}$

其对应的系统响应可表示为:

$$S_{i}(t) = C(t) * P_{i}(t) = \sum_{j=0}^{n-1} \{C(t) * [m_{ij}P(t-j\tau)]\} = \sum_{j=0}^{n-1} m_{ij}S(t-j\tau)(8)$$

对信号进行还原处理后,其等效信号估计值可 表示为[10].

$$S'(t) = S(t) + \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} [m_{ij}'e_i(t-j\tau)]$$
(9)

式中: m_{i} '为矩阵 I_{1}^{-1} 的第 i 行、第 j 列元素。 该估计值噪声功率为:

$$\mathsf{E}\left\{\left(\frac{1}{\mathsf{N}}\sum_{i=0}^{\mathsf{N}-1}\sum_{j=0}^{\mathsf{N}-1}\left[\mathsf{m}_{ij}'\mathsf{e}_{i}(\mathsf{t}-\mathsf{j}\tau)\right]\right)^{2}\right\}=\frac{\sigma^{2}}{\mathsf{N}^{2}}\sum_{i=0}^{\mathsf{N}-1}\sum_{j=0}^{\mathsf{N}-1}\left(\mathsf{m}_{ij}'\right)^{2} (10)$$

式中: σ^2 为噪声 $e_i(t-j\tau)$ 的方差。 系统直接做 N 次平均得到的信号为:

$$S(t) + \frac{\sigma^2}{N}$$
(11)

所以采用编码脉冲的探测系统其编码增益为:

$$GAIN = \sqrt{\frac{\frac{\sigma^2}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (m_{ij}')^2}{\frac{\sigma^2}{N}}} = \sqrt{\frac{N}{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (m_{ij}')^2}}$$
(12)

可见当 $\sum_{i=0}^{N} \sum_{j=0}^{N} (m_{ij})^2 > N$ 时,可以在不降低探测系 统空间分辨率的前提下提升信噪比,从而优化探测

系统性能。

创建一个 N 阶 Simplex 矩阵 ¹¹¹,其逆矩阵元素 的平方和为 4/(N+1)2[12],根据公式(12)得到 Simplex 矩阵编码增益为:

$$G_{s} = \frac{N+1}{2\sqrt{N}}$$
(13)

由公式(13)可见,编码增益近似正比于√N。

2 仿真与实验

2.1 仿 真

利用 Matlab 建立一根长度为 10 km 的带有随机 扰动噪声的海底光缆护套层模型,在 6 km 处设置护 套层断点,分别使用幅值相等的单脉冲信号,7 阶、15 阶、31 阶、63 阶 Simplex 矩阵编码脉冲作为探测信号, 得到的海缆沿长度分布的响应曲线如图 4~图 8 所示。



Fig.4 Single pulse response



图 5 7 阶 simplex 矩阵响应





图 6 15 阶 simplex 矩阵响应

Fig.6 Fifteen order simplex response



图 7 31 阶 simplex 矩阵响应

Fig.7 Thirty-one order simplex response



Fig.8 Sixty-three order simplex response

对比图 4 与图 5~图 8 可发现,与单脉冲响应相 比,编码脉冲噪声更小,响应曲线的抖动明显降低, 同时可以看出,矩阵的阶数越高,降噪效果越明显。 但是在实际测量中,更高的矩阵阶数意味着更多的 测量时间和更复杂的信号处理算法,且矩阵阶数达 到 31 阶时,故障点反射信号已经能够清楚识别。所 以,为了兼顾波形的辨识度和测量的实时性,选用 31 阶编码脉冲作为实际探测脉冲。

2.2 脉冲编码实验

海底光缆金属护套故障探测实验系统示意图 如图 9 所示,该系统主要由脉冲信号发生器、调理电 路、数据采集系统、上位计算机构成。信号发生器将



图 9 光缆护套故障探测系统示意图 Fig.9 Schematic diagram of fiber optical cable sheath fault-detecting system

编码脉冲信号以矩阵行向量为单位,依次将每行脉 冲发射至待测海底光缆的护套层中;调理电路与数 据采集系统将波形数据采集下来;某一行的脉冲信 号数据采集完成后,信号发生器发射下一行脉冲信 号;所有脉冲信号采集完成后,上位机对数据进行解 码运算,还原出反射的信号波形。

使用系统对一根在距离测量点 100 m 处有护套 层断裂故障的光缆进行测试,首先将幅值为 5 V、脉 宽为 100 ns 的单脉冲信号输入待测海底光缆,然后 将幅值、脉宽相同的 31 阶 SIMPLEX 编码脉冲输入 待测海底光缆,根据公式(13),可知 31 阶 SIMPLEX 编码脉冲增益理论值为 2.87,即 9.15 dB。经上文介 绍的编解码运算处理后,得到的单脉冲与编码脉冲 探测效果对比波形如图 10 所示。



图 10 单脉冲与 31 阶 Simplex 编码脉冲探测效果波形比较 Fig.10 Single pulse response compared with 31 order simplex response

由图 10 可见,经过编码处理后,100 m 处的断点 反射信号并未增强,但是通过对比时域上的噪声信 号峰值功率,可发现经编码处理后,噪声信号峰值功 率比单脉冲测量时,降低了大约 9 个 dB,即信噪比 提升了约 9 dB,与理论计算结果吻合。所以,在海底 光缆护套层故障探测中,采用脉冲编码探测法可以 有效地降低外界扰动带来的随机噪声,从而提升探 测波形的识别度。

3 结 论

综上所述,由于海底光缆使用环境中存在的随 机扰动带来的随机噪声干扰,使得用单脉冲电磁脉 冲时域反射法测试海底光缆护套层故障的测试效果 较差。改用单极性编码电磁脉冲时域反射法探测可 以在不降低系统空间分辨率的前提下有效地降低随 机噪声,提升探测效果。在研究过程中发现,海底光 缆金属护套层有类似于模拟带通滤波器的特性,文 中所使用的探测脉冲为方波信号,具有很宽的频谱 特性,探测信号传输过程中大部分的频率成分都被 过滤,致使接收到的回波信号很微弱。若采用调制技 术,将带通频率调制在方波脉冲信号上,或者直接选 取带通频率范围内的正弦脉冲作为探测信号,探测 效果会得到进一步提升。

参考文献:

- [1] Yin Jie, Xu Weihong, Wang Shun, et al. Research in faults detection technology of protecting sheath of submarine optical fiber cable [C]//2TH National Symposium of Submarine Optical Fiber Technology, 2009: 105-107. (in Chinese) 股杰,徐伟弘,王顺,等. 海底光缆护套层故障探测技术 [C]//第二届全国海底光缆通信技术研讨会论文集, 2009: 105-107.
- Xu Weihong, Li Xinhua, Zhang Xuping, et al. Design of remote monitoring system of under-sea cable strain status[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2007, 30 (5): 1963 – 1966. (in Chinese)

徐伟弘,李新华,张旭苹,等.海底光缆应变的远程传感系统设计[J].电子器件,2007,30(5):1963-1966.

- [3] Li Renlu, Guo Jinjin, Yang Yuanhong. The research and development of distributed optical fiber sensing technology based on brillouin scattering [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S5): 30-36. (in Chinese) 李仁禄,郭锦锦,杨远洪. 基于布里渊散射的分布式光纤传 感技术的研究及进展 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S5): 30-36.
- [4] Wang Shaobo, Li Kang, Kong Fanmin, et al. Denoising analysis of OTDR data based on wavelet transform [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(4): 398-400. (in Chinese) 王韶波, 李康, 孔繁敏, 等. 基于小波变换的光时域反射仪 数据去嗓分析[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(4): 398-400.
- [5] Wang Shun, Li Xiang, Xu Weihong. Insulating fault monitoring for the submarine communication optical cable [J]. Optoelectronic Technology, 2006, 26(4): 239-242. (in Chinese) 王顺, 李响, 徐伟弘. 光纤外护套绝缘故障的监测 [J]. 光电子 技术, 2006, 26(4): 239-242.
- [6] Junichi Kojima, Shigetaka Matsumoto, Kenichi Asakawa. Fault point localization of power feeding lines in optical submarine

cables[J]. Oceans, 2008, 2008: 1-4.

- [7] Yang kegui. New feature of modern submarine optical fiber cable [J]. Optical Communication Technology, 2005, 29(1): 62-64. (in Chinese)
 杨可贵. 现代海底光缆新特点 [J]. 光通信技术, 2005, 29(1): 62-64.
- [8] Bhag Singh Guru, Huseyin R Hiziroglu. Electromagnetic Field Theory Fundamentals [M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 290-296.
- [9] Liang Hao, Li Wenhai, Linze Nicolas, et al. High-resolution

DPP-BOTDA over 50 km LEAF using return-to-zero coded pulses[J]. Optics Letters, 2010, 35(10): 1503-1505.

- [10] Jones M D. Using simplex codes to improve OTDR sensitivity[J]. Photonics Technology, 1993, 5(7): 822-824.
- [11] Pratt W K, Kane J, Andrews H C. Hadamard transform image coding[J]. IEEE, 1969, 57(1): 58-68.
- [12] Soto M A, Bolognini G, Pasquale F D. Analysis of optical pulse coding in spontaneous Brillouin-based distributed temperature sensors [J]. Optics Express, 2008, 16(23): 19097 -19111.

下期预览

时变最优的增强型比例导引及其脱靶量解析研究

王辉^{1,2},林德福²,祁载康²,张 頔²

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191; 2. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

摘 要:以time-to-go为基础建立时变的目标罚函数,根据最优控制理论,推导了对常值机动目标时变最优的增强型比例导引律;对权函数指数的分析结果表明,增强型比例导引有效导航比与权函数的指数一一对 应。对增强型比例导引有效导航比的工程取值范围给出了合理的理论解释。将制导动力学简化为一阶滞后, 并将导引头初始瞄准误差、目标常值机动引入到制导系统中,根据伴随法的数学思想,研究了增强型比例导 引制导系统在初始瞄准误差、目标常值机动作用下的脱靶量解析解,最后通过伴随系统的数学仿真对解析解 的正确性进行了验证。