

光纤振动信号的二维二级检测算法

曲洪权 任学丛* 毕福昆 刘大年 张常年

北方工业大学电子信息工程学院, 北京 100144

摘要 在光纤振动信号检测系统中,使用相位敏感光时域反射技术,可检测长距离的光纤振动信号,但反射回的光信号都有大量的振动杂波和噪声,导致振动检测信号的虚警率较高。提出采用单元平均恒虚警(CA-CFAR)和有序统计恒虚警(OS-CFAR)二级检测算法,保持虚警率稳定,既提高了运算速度,也改善了参考单元中存在多个目标的检测性能,并提出利用蒙特卡罗方法确定二级检测的门限系数,最后通过蒙特卡罗仿真及现场实验验证,对算法进行了性能分析,验证了算法的可行性以及有效性。

关键词 信号处理; 振动信号检测; 二级检测; 蒙特卡罗

中图分类号 TN914

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1006004

Two-Level Detection Algorithm of Two-Dimensional for Vibration Signals Detected by Optical Fiber

Qu Hongquan Ren Xuecong Bi Fukun Liu Danian Zhang Changnian

College of Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China

Abstract In the detection system, the long distance optical fiber vibration can be detected by phase-sensitive optical time domain reflect technique. However, the reflected signals include clutters and noises, which leads to a high false alarm rate. A two-level detection algorithm, which can maintain constant false alarm rate, is proposed, including cell average constant false alarm rate (CA-CFAR) and ordered statistics constant false alarm rate (OS-CFAR) which work in serial ways, and the detection speed of CA-CFAR and the performance of OS-CFAR are conserved, respectively. Monte Carlo simulation is applied to determine the threshold of two-level detection. Finally, Monte Carlo simulation and the experiment on the scene are applied to analyze the performance of the algorithm, which proves the feasibility and effectiveness.

Key word signal processing; vibration signals detection; two-level detection; Monte Carlo

OCIS codes 060.4510; 350.4600; 000.5490

1 引言

在光纤入侵检测领域,目前普遍使用的是分布式光纤传感技术,而在众多的分布式光纤传感技术中,光时域反射计(OTDR)技术由于测量灵敏度不高、实时性较差因而实际应用受到极大的限制;偏振敏感时域反射计(P-OTDR)技术由于难以克服测量精度低、传感距离短的缺陷,作为一种相对测量技术,性能有待提高;基于非线性效应的布里渊光时域反射计(B-OTDR)^[1]、拉曼光时域反射计(R-OTDR)、拉曼光频域反射计(R-OFDR)等技术,由于测量距离较短、响应速度慢、技术复杂及成本偏高等问题,实际应用也受到极大的限制;迈克耳孙、马赫-曾德尔^[2]等干涉仪技术由于系统信号处理复杂、信噪比(SNR)较低、易受多种外界因素影响、测量距离有限,在实际应用中也受到很大的限制。近年来,超窄带大功率光源技术的出现,使得相位敏感光时域反射计(Φ -OTDR)技术得以实现,该技术探测灵敏度相比传统 OTDR 大大提高^[3],系统信号处理简单、测

收稿日期: 2015-04-16; 收到修改稿日期: 2015-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(61571014)

作者简介: 曲洪权(1973—),男,博士,教授,主要从事光纤振动信号处理、CFAR 检测方面的研究。E-mail: qhqphd@163.com

*通信联系人。E-mail: 2013311020122@mail.ncut.edu.cn

量速度反应快、定位准确、测量距离较长、信噪比高、成本较低等优点使其有可能成为大范围分布式监测技术的最佳选择之一,然而该体制的局限性在于其异常灵敏^[4],导致反射回的信号带有大量振动杂波和噪声,使振动检测信号的虚警率较高。

采用恒虚警(CFAR)检测算法,设置合适的虚警概率,可有效解决检测信号虚警率高的问题。单元平均恒虚警(CA-CFAR)^[5]在均匀噪声背景中检测性能良好,但在对检测单元进行目标检测的同时在参考滑窗中还出现其他的目标(称为干扰目标)时,CA-CFAR的检测阈值(CA_CFAR_TH)就会上升,CA-CFAR对主目标的检测性能会严重下降^[6-8]。有序统计恒虚警(OS-CFAR)方法^[9]在均匀杂波背景中与CA-CFAR相比有一定的检测损失,而在多目标环境中,OS具有明显的优势^[10],但排序导致处理时间过长,不利于工程中对实时性的要求。

本文提出的算法,针对CA-CFAR在多目标检测性能的下降以及OS-CFAR排序时间过长的问题进行了二级检测,在第1级检测中采用CFAR检测中的CA-CFAR,由于CA-CFAR算法的采用不涉及排序等操作,算法的效率较高,同时采用二维列窗进一步提高CA-CFAR的检测速度,进入第2级检测的输入数据量减少,对检测结果进行第2级OS-CFAR检测。通过二级检测,运算速度比OS提高了将近3倍,也改善了参考单元中存在多个目标的检测性能,最后通过蒙特卡罗仿真及现场测试对算法进行了性能分析,从而验证了算法的可行性以及有效性。

2 二维列窗结构

实际光纤采集到的信号是在距离和时间二个维度同时存在,因此,采用距离和时间的二维恒虚警方法来处理实际信号检测,利用待检单元附近二维空间上的单元作为参考单元获得背景的包络估计更有效。文献[11]提出了二维的恒虚警参考窗结构,图1为距离-时间二维恒虚警检测参考单元选取方式,它显示了2种可能的参考单元选取方式。

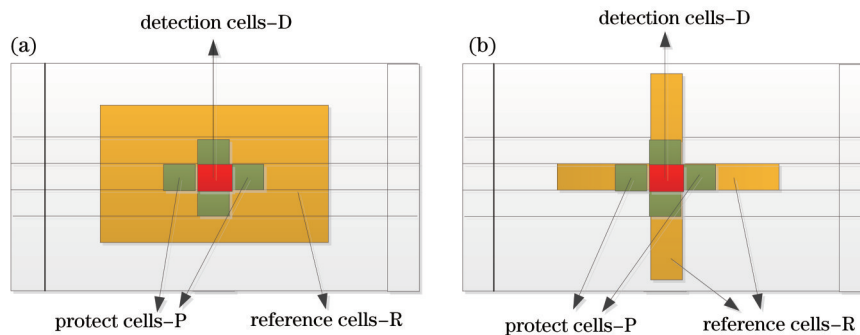


图1 二维滑窗结构。(a)矩形窗;(b)十字形窗

Fig.1 Structures of two-dimension slip window. (a) Rectangular window; (b) cross window

图1中,D为检测单元,R为参考单元。在距离维如果为了防止其他目标的干扰,也可以在待检单元周围加保护单位P。

在图1(a)中,参考单元分布在被测单元的四周,形成一个矩形。这是从一维CA-CFAR滑窗检测发展而来的,将一维滑窗扩展成二维窗结构。由于引入了大量与检测单元无关的参考单元,导致检测性能下降。

在图1(b)中参考窗不直接从二维平面取,而只利用和检测单元处于同一距离单元和处于同一时间单元的这些单元作为参考单元,即参考窗为十字形结构。分别在不同维上进行独立的一维检测,只有同时在距离和时间维都超过各自的判决门限,才被判定为目标。

以上2种方法在实际应用中都有一定的效果,由于都要对所有数据进行遍历检测,运算量太大,无法满足工程应用中对实时性的要求。工程中为了便于处理,可以选择一个折中的方法——二维列窗检测方法。

进行二维检测时,待检测单元距离维上左右各 b 个单元及相应时间维上所有的单元不参与噪声估计,待检测单元距离维上左右各 c 个单元及相应时间维上所有的单元作为参考单元进行噪声估计,二维列窗具有如图2所示的结构。

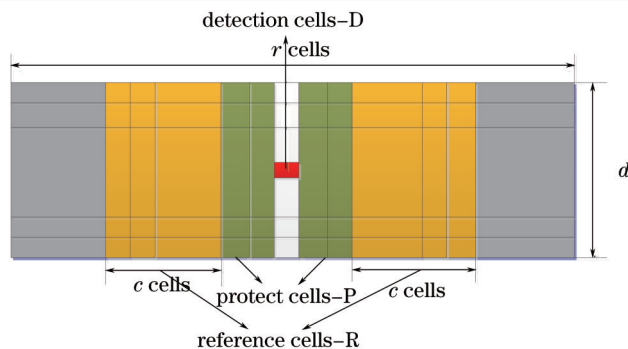


图2 二维列窗结构

Fig.2 Structure of two-dimension column window

在进行检测时由于与检测单元相邻的 b 个距离单元的杂波与检测单元的相关性很大,所以在进行检测时要把检测单元相邻的 b 个单元设置为“保护单元”,作为检测单元和计算参考单元之间的间隔,不参加对杂波统计特性的估计。在该二维列窗中,对于同样距离的参考单元,与其对应的不同时间维的通道采用相同的检测门限,即对每一列都与该列对应的同一个门限进行比较。

假设检测单元为第 m 行第 n 列,矩阵 H 在距离维上共有 r 个单元,时间维上共有 d 个单元,其中, $1 \leq m \leq d, 1 \leq n \leq r$,对于矩阵两侧的检测单元,除了在检测单元周围选取 $2b$ 个保护单元外,参考单元按照就近原则选取 $2c$ 个,设 A_n 为矩阵第 j 列元素的门限, C_n 为门限的系数, B_n 为参考单元的均值,则: $A_n = C_n B_n$ 。

具体参考单元的均值 B_n 计算公式如下:

- 1) 当 $1 \leq n \leq b+1$ 时,选取第 $n+b+1$ 列到第 $n+b+2c$ 列作为参考单元:

$$B_n = \frac{1}{2cd} \left[\sum_{i=1}^d \sum_{j=n+b+1}^{n+b+2c} H(i,j) \right]. \quad (1)$$

- 2) 当 $b+2 \leq n \leq c+b+1$, 选取第 1 列到第 $n-b-1$ 列及第 $n+b+1$ 列到第 $2b+1+2c$ 作为参考单元:

$$B_n = \frac{1}{2cd} \left[\sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^{n-b-1} H(i,j) + \sum_{i=1}^d \sum_{j=n+b+1}^{2b+1+2c} H(i,j) \right]. \quad (2)$$

- 3) 当 $c+b+2 \leq n \leq r-b-c$, 选取第 $n-b-c$ 列到第 $n-b-1$ 列及第 $n+b+1$ 列到第 $n+b+c$ 作为参考单元:

$$B_n = \frac{1}{2cd} \left[\sum_{i=1}^d \sum_{j=n-b-c}^{n-b-1} H(i,j) + \sum_{i=1}^d \sum_{j=n+b+1}^{n+b+c} H(i,j) \right]. \quad (3)$$

- 4) 当 $r-b-c+1 \leq n \leq r-b-1$, 选取第 $r-2b-2c$ 列到第 $n-b-1$ 列及第 $n+b+1$ 列到第 r 作为参考单元:

$$B_n = \frac{1}{2cd} \left[\sum_{i=1}^d \sum_{j=r-2b-2c}^{n-b-1} H(i,j) + \sum_{i=1}^d \sum_{j=n+b+1}^r H(i,j) \right]. \quad (4)$$

- 5) 当 $r-b \leq n \leq r$, 选取第 $n-b-2c$ 列到第 $n-b-1$ 列作为参考单元:

$$B_n = \frac{1}{2cd} \left[\sum_{i=1}^d \sum_{j=n-b-2c}^{n-b-1} H(i,j) \right]. \quad (5)$$

(1)~(5)式中, B_n 为矩阵 H 第 n 列元素的门限(即第 n 个距离单元处, d 个不同时间维的检测门限); C_n 为门限系数,通过给定的虚警概率以及门限系数自适应调整过程得到; $H(i,j)$ 为被检测矩阵; c 为计算参考单元的大小; b 为保护单元大小; d 为时间单元; r 为距离单元。

根据系统实际情况,在无人公路上,若汽车行驶速度为 72 km/h,即为 20 m/s,而每个单元的宽度为 20 m,在汽车以 20 m/s 的速度行驶时,有可能从其中一个单元跨越到另一个单元,考虑到测量误差,最后选取检测单元左右两侧各 2 个单元作为保护单元,即 $b=2$,不参与噪声估计。另外,选取待检测单元左右各 20 个单元作为参考单元进行噪声估计,即 $c=20$ 。在该光纤预警系统中,距离单元的长度 r 为 3584,每个单元代表 20 m,时间单元为 64,每个单元代表 16 ms。

3 二级检测原理

通过对 Φ -OTDR 光纤振动系统采集到的振动信号分析,发现将2路噪声信号进行平方和处理后服从指数分布。图3为经处理后的10000个点的概率密度函数(PDF),其中,图3(a)为无振动时采集到的噪声概率密度函数,图3(b)为有振动时采集到的振动信号概率密度分布。

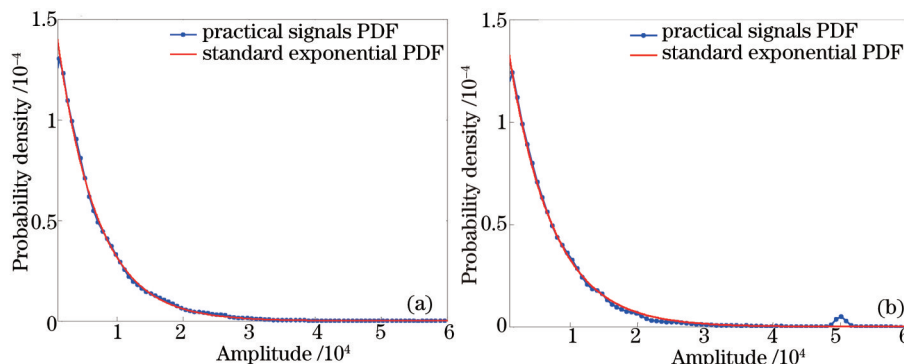


图3 光纤振动信号的概率密度函数

Fig.3 PDF of vibration signals for optical fiber

在CA-CFAR检测器中,背景杂波功率水平的估计由 N 个参考单元采样的均值得到。OS-CFAR将参考采样进行由小到大的排序,选取第 k 个值作为杂波功率水平估计。

检测流程如图4所示。

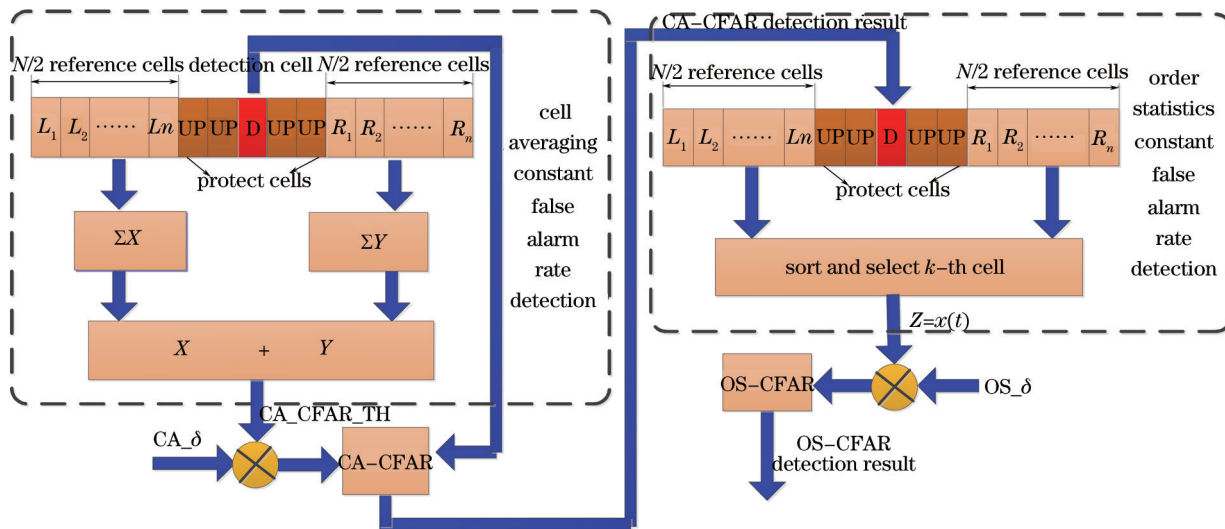


图4 二级检测原理图

Fig.4 Diagram of two-level detection

对于CA-CFAR,根据文献[12]可知,

$$\delta = P_{fa}^{-\frac{1}{N}} - 1, \quad (6)$$

式中, P_{fa} 为虚警概率, N 为选取的参考单元数目, δ 为标称化因子, 门限系数的值为 NT 。在进行CA-CFAR检测时, 利用二维列窗, 参考单元数 $N=2c \times d$ 即参考单元长度 $2c$ 与时间维长度 d 的乘积, 一级检测门限系数为

$$u_1 = 2cd \times \left(P_{fa}^{-\frac{1}{2cd}} - 1 \right). \quad (7)$$

对于OS-CFAR检测, 根据文献[9]可知, OS-CFAR检测器在均匀杂波背景中的虚警概率为

$$P_{fa} = \binom{N}{k} \frac{k!(u_2 + N - k)}{(u_2 + N)!} = \binom{N}{k} \frac{\Gamma(k+1)\Gamma(u_2 + N + 1 - k)}{\Gamma(u_2 + N + 1)}, \quad (8)$$

式中, k 为排序后选取作为参考单元数的位置, 即排序后取第 k 个数作为杂波功率水平估计。给定 P_{fa} , N , k

的值,即可求得 OS-CFAR 的门限系数 u_2 。

由于使用二级检测,只有既能通过 CA-CFAR 检测门限,又能通过 OS 检测门限的点才能被检测出,因此该方法导致虚警率比设定的虚警率低。由于解析方法难于实现,采用蒙特卡罗仿真方法,通过 CA 的门限系数 u_1 以及 OS 的门限系数 u_2 前面分别乘以系数 a_1, a_2 的方法,达到设定的虚警率。本文中,对同一个数据文件分别进行 CA-CFAR 检测、OS-CFAR 检测以及 CA-OS-CFAR 检测,取虚警时间 $T_{fa} = 5 \text{ min}$, 虚警概率与虚警时间的关系为

$$P_{fa} = \frac{\tau}{T_{fa}} \quad (9)$$

该系统脉冲宽度 $\tau = 16 \text{ ms}$, 则设定虚警率为 $P_{fa} = 16/(5 \times 60 \times 1000) = 5.33 \times 10^{-5}$, 在进行系数 a_1, a_2 值的选择时,进行 10000 次蒙特卡罗实验,当 $a_1 = 0.9, a_2 = 0.9$ 时,得到虚警率如表 1 所示。

表 1 均匀噪声背景中 3 种 CFAR 的虚警率

Table 1 P_{fa} comparison for three kinds of CFARs in homogeneous environments

CFAR	P_{fa}
CA	5.3526×10^{-5}
OS	5.3105×10^{-5}
CA-OS	5.3259×10^{-5}

此时 CA-OS 的虚警概率与设定值最为接近,因此 2 个系数均选择 0.9。

4 实验验证及分析

由于 OS-CFAR 是目前在信号检测领域中应用最为典型的算法之一,因此,将本文提出的 CA-OS 算法与 OS 进行比较,对 CA-OS 的性能进行分析与验证。

4.1 算法效率分析

本文中,CA-CFAR 一级检测利用二维滑窗大大提高了运算速度,首先对大量的数据进行 CA-CFAR 检测,然后将过 CA-CFAR 门限的数据再进行二级检测,即 OS-CFAR 检测,此时数据量已大大减少,并且能过滤掉干扰杂波的干扰,既提高了运算速度,又保留了 OS 在多目标中的检测性能。如表 2 所示,对同一组数据分别进行 OS-CFAR 与 CA-OS 检测所用时间的比较,列出了不同参考单元下的检测时间,可见 CA-OS 相比于 OS 检测速度大大提高。

表 2 2 种 CFAR 检测算法执行时间对比(单位:秒)

Table 2 Execution time comparison for two kinds of CFAR detection algorithms (Unit:s)

CFAR	N				
	10	20	30	40	50
CA-OS	4.54096	4.40214	4.42973	4.50570	4.47693
OS	11.89789	11.59918	11.68295	11.95363	11.84965

表 2 中可以看出,参考单元数目不同时,相比 OS-CFAR,CA-OS 检测速度均提高了 2 倍多,该串行算法相比文献[11,13-14]中 CA-OS 组合类的算法的检测速度更快。

4.2 算法性能验证及分析

本节通过蒙特卡罗仿真方法对 CA-OS 的性能进行分析,并进行了现场测试,验证了算法的可行性及有效性。

4.2.1 仿真实验及分析

利用蒙特卡罗仿真方法分析二级 CA-OS-CFAR 的检测性能,并与 OS-CFAR 的检测性能进行比较。参考单元长度为 $N=40$, $P_{fa} = 5.33 \times 10^{-5}$, 对于 OS 以及 CA-OS,序列 $k=30$ 。图 5 给出了 40 个参考单元内只有单目标的情况下 OS-CFAR 以及 CA-OS-CFAR 的检测概率。

图 5 所示,在参考单元中只有单目标的情况下,与 OS-CFAR 相比,CA-OS-CFAR 方法的检测性能明显优于 OS-CFAR 检测。

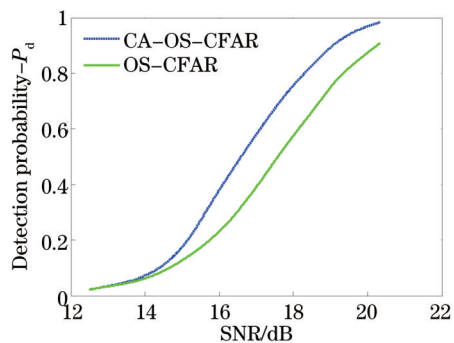


图5 不同SNRs下OS-CFAR与CA-OS-CFAR检测概率

Fig.5 Detection probability comparison of OS-CFAR, CA-OS-CFAR in different SNRs

4.2.2 实测数据验证及分析

选取大港油田管道并行的津岐公路段进行了现场测试,公路位置对应沿途光纤15~40 km处,在21 km位置处进行敲击,采集到振动数据。图6给出了上位机界面显示的实时敲击振动情况。

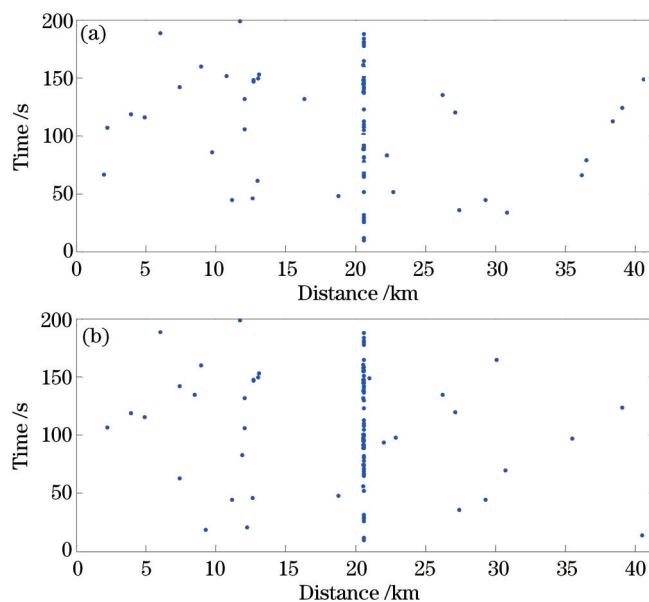


图6 现场敲击二维显示界面。(a) OS-CFAR; (b) CA-OS-CFAR

Fig.6 Two-dimensional display interface of human knock on the scene. (a) OS-CFAR; (b) CA-OS-CFAR

通过控制虚警率,得到现场实验中的检测性能。图7为人工敲击时,津岐公路段虚警率与检测概率的曲线图。

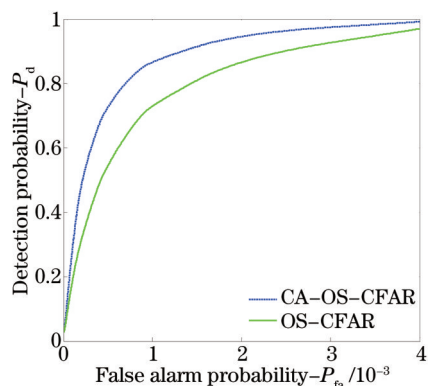


图7 人工敲击津岐公路段虚警率与检测概率的曲线图

Fig.7 Relationship of P_{fa} and P_d for human knock on the Jinqi highway

由上述现场敲击实验可以看出,同样虚警概率下,CA-OS的检测性能明显优于OS,能够准确地检测出敲击振动。

5 结 论

针对采用 Φ -OTDR技术的光纤振动系统采集到的信号进行研究,运用CFAR检测技术降低通过 Φ -OTDR技术采集到的检测信号的虚警率。对于CA-CFAR在多目标检测性能下降以及OS-CFAR排序时间过长的问题,在第1级检测中采用CFAR检测中的CA-CFAR,并通过二维列窗提高CA-CFAR的检测速度,进而对检测结果进行第2级OS-CFAR检测。在检测门限系数选择时采用了蒙特卡罗仿真方法进行确定,当实际虚警率与预设虚警率接近时,选择对应的系数。通过二级检测,不同参考单元数目下,相比OS-CFAR,检测速度均提高了2倍多。最后通过蒙特卡罗仿真及现场实验验证,对算法进行了性能分析,从而验证了算法的可行性以及有效性。该方案二级检测门限系数的关系,通过蒙特卡罗仿真确定,理论尚不完善,后续工作中还要继续研究二级检测门限系数的关系,推导出关系式,从而可进行定量分析。

参 考 文 献

- 1 Yang Wei, Yang Yuanhong. Digital envelope detection technique for Brillouin optical time-domain reflectometry based on generalized harmonic wavelet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0506004.
杨 巍, 杨远洪. 基于广义谐波小波变换的布里渊光时域反射计的数字包络解调技术[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0506004.
- 2 An Yang, Feng Hao, Zhang Jingchuan, *et al.*. Phase sensitive optical time domain reflectometer based on two-beam interference[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706005.
安 阳, 封 皓, 张景川, 等. 基于双光束干涉的相位敏感光时域反射计[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706005.
- 3 Liu Jianxia. Research progress of distributed optical fiber sensing and monitoring technology based on Φ -OTDR[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080021.
刘建霞. Φ -OTDR分布式光纤传感监测技术的研究进展[J]. 激光与光电子进展, 2013, 50(8): 080021.
- 4 Yang Jiang, Zhao Jian, Yang Chunni, *et al.*. All-fiber perimeter security system based on Michelson interferometer and pattern recognition[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1105005.
杨 江, 赵 健, 杨春妮, 等. 基于迈克耳孙干涉和模式识别的全光纤周界安防系统[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105005.
- 5 Finn H M, Johnson R S. Adaptive detection mode with threshold control as a function of spatially sampled clutter level estimates[J]. RCA Review, 1968, 29(3): 414-464.
- 6 Weiss M. Analysis of some modified cell-averaging CFAR processors in multiple-target situations[J]. IEEE Transaction on AES, 1982, 18(1): 102-114.
- 7 Richard J T, Dillard G M. Adaptive detection algorithms for multiple target situations[J]. IEEE Transaction on AES, 1977, 13(4): 338-343.
- 8 Ritcey J A. Performance analysis of the censored mean-level detector[J]. IEEE Transaction on AES, 1986, 22(4): 443-454.
- 9 Rohling H. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations[J]. IEEE Transaction on AES, 1983, 19(3): 608-621.
- 10 Gandhi P P, Kassam S A. Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background[J]. IEEE Transaction on AES, 1988, 24(4): 427-445.
- 11 He You, Guan Jian, Rohling H. Two new CFAR detectors based on greatest of and smallest of selection[J]. Systems Engineering and Electronics, 1995, 17(7): 6-16
- 12 P P Gandhi, S A Kassam. Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background[J]. IEEE Transactions on AES, 1988, 24(4): 427-445.
- 13 He You, Guan Jian, Peng Yingning. A new CFAR detector based on order statistic and cell averaging[C]. CIE 1996 International Radar Conference, Beijing, 1996: 106-108.
- 14 He You, Guan Jian. A new CFAR detector with greatest of selection[C]. IEEE 1995 International Conference on Radar, Alexandria, 1995: 589-591.

栏目编辑: 王晓琰