

电缆激光多普勒在线计米系统研究

白金成,孙长库,王 鹏,耿 凯,李洪全,郝 健

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

摘 要: 为了满足电缆生产过程中长度在线测量的需要,设计了基于激光多普勒测速原理的电缆长度在线计米系统。阐述了激光多普勒测速基本原理,设计了一种结构紧凑的双光束双散射型光路。提出了基于有限长单位冲激响应(Finite Impulse Response, FIR)滤波器的滤波带自适应选择算法,有效地滤掉基底信号和部分噪声,减小了多普勒信号噪声的影响,改善了信噪比;利用能量重心校正技术进行频谱校正,减小了系统的测量误差。搭建了实验装置,进行了对比测量实验,实验结果表明:该系统能实时、准确的进行长度在线测量,相对误差小于 0.1%。

关键词: 激光多普勒测速; 双光束双散射; FIR; 滤波带的自适应选择; 能量重心校正
中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0706003

On-line meter calculating system of cable laser Doppler

Bai Jincheng, Sun Changku, Wang Peng, Geng Kai, Li Hongquan, Hao Jian

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to meet the needs of length on-line measurement in the process of cable production, a cable length on-line meter calculating system based on laser Doppler velocimetry was designed. The basic principle of laser Doppler velocity measurement was described, a compact double-beam double-scattering optical path was designed. A filter band adaptive selection algorithm based on finite impulse response (FIR) filter was proposed, which effectively filtered out the base signal and partial noise, reduced the influence of Doppler signal noise and improved the signal-to-noise ratio. The use of energy barycenter correction technology for spectral correction reduced the measurement error of the system. The experimental device was set up, and the contrast experiment was carried out. The experiment results show that the system could measure the length in real time and accurately, and the relative error is less than 0.1%.

Key words: laser Doppler velocimetry; double-beam double-scattering; FIR; adaptive selection of filter bands; energy barycenter correction

收稿日期:2018-02-05; 修订日期:2018-03-15

作者简介:白金成(1991-),男,硕士生,主要从事激光及光电检测方面的研究。Email:baijc@tju.edu.cn

导师简介:孙长库(1967-),男,教授,博士,主要从事激光及光电检测方面的研究。Email:sunck@tju.edu.cn

0 引言

随着现代工程技术的发展,电缆行业发展迅猛,电缆长度的测量装置也越来越受到专业制造厂商的重视。电缆生产长度的精确测量代表着一个企业的生产及工艺装备水平的高低,也是企业控制生产成本和质量的关键,因此高精度的电缆长度在线测量对电缆行业的发展具有重要的意义。

目前,国内的很多电缆生产厂家仍在沿用传统的接触式电缆长度测量方法,该方法由于轮子和电缆之间存在不可避免的打滑现象,以及不同的材料其表面摩擦系数不同等都会造成准确度较低、误差较大。相比于传统的测长方法,基于热压印字的原理,将色带上的涂料通过字块压印在电缆上的电缆长度测量方法误差较小,但是其对运行条件要求高,很难在普通生产线上做电缆计长使用;基于时域反射原理的测量方法可以实现电缆长度的精确测量,但又无法满足电缆的在线测量^[1];基于图像相位差法^[2]的测长方法利用快速捕获移动物体表面图像的方法,经图像分析处理获取位移信息,但是该方法要求被测物体的运行速度较慢,一定程度上限制了其使用。

为此文中根据激光多普勒测速原理,设计了一种非接触式的电缆长度在线计米系统。激光多普勒测速技术是一种非接触式的高精度的在线测量方法,其测量精度主要取决于多普勒信号的处理,但是由于多普勒信号夹杂着来自光路、光电元器件、光源等的噪声,加上外界环境因素干扰,信号的信噪比一般都比较低,并且随被测物体速度的变化而变化,速度越高信噪比越低,这给多普勒信号的处理带来了一定的困难^[3]。因此对于信号的噪声处理,改善信号的信噪比对多普勒信号的处理尤为重要^[4]。目前对于多普勒信号噪声处理的方法主要有固定带宽滤波器、小波变换、自适应滤波等,多普勒信号随速度的变化不断的变化,固定带宽的滤波器无法根据多普勒信号的范围准确的设置带宽^[5];基于小波变换的降噪方法^[6]中参数设置较复杂,往往需要凭借经验获得,因此使用这种方法具有一定的局限性;自适应滤波器结构复杂,滤波性能易受设置的参数和初始值影响^[7],自适应效果实现较困难。因此,文中提出

了一种基于有限长单位冲激响应 (Finite Impulse Response, FIR) 滤波器的滤波带的自适应选择算法,有效的减小噪声对多普勒信号处理的影响,提高信号的信噪比,并采用快速傅里叶变换(FFT)结合能量重心校正算法实现了运动电缆表面散射光的多普勒频移的准确测量。所设计的系统具有较高的测量准确度,经实验验证,该系统能够应用于电缆生产线上的在线测量。

1 激光多普勒计米系统

激光多普勒计米系统结构如图 1 所示。系统主要由激光器,一个分束立方体和反射镜,一个双胶合的接收透镜,以及光电探测器和信号处理电路等组成。激光器发出的一束光经分束立方体分成光强相等的两束光,其中一束光经反射镜改变传播方向后与另一束光相交在被测电缆表面,双胶合透镜接收运动电缆表面的散射光并汇聚在光电探测器表面,经信号处理后提取多普勒频移,进而得到电缆的瞬时速度,由此得到电缆的长度。

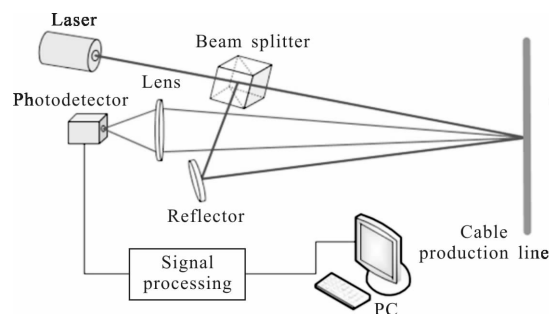


图 1 系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of system structure

根据激光多普勒效应,一束激光照在运动的物体上,运动物体散射光的频率相比于入射光会发生偏移,即多普勒频移。多普勒频移包含物体运动的速度信息,通过探测多普勒频移就可以测出运动物体的速度。根据外差检测原理,系统采用双光束-双散射的后向散射的光路,该光路是通过两束不同方向入射光的散射光在光电探测器上的拍频得到多普勒频移,如图 2 所示。

根据多普勒测速原理,光电探测器探测到的多普勒频移 f_d 与速度 v 的关系为:

$$f_d = 2 \frac{v \sin \phi}{\lambda} \quad (1)$$

当电缆垂直通过测量区域时, 电缆表面的散射光包含了电缆运动的速度信息。激光器的波长 λ 已知, 两束入射光的入射方向 2ϕ 事先确定, 因此只要知道多普勒频移便可由公式(1)测出电缆的运动速度:

$$v = \frac{\lambda f_d}{2 \sin \phi} \quad (2)$$

通过速度对时间的积分:

$$L = \int_0^t v dt \quad (3)$$

可以在线测量电缆的长度 L 。

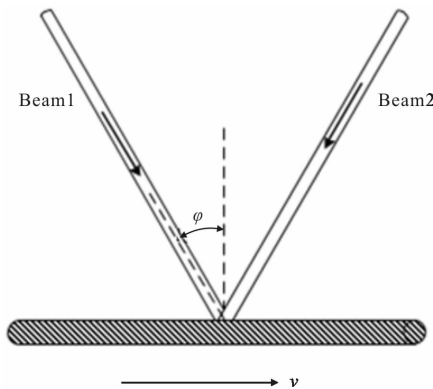


图 2 双光束双散射光路分析模型

Fig.2 Double-beam double-scattering light path analysis model

2 多普勒信号的处理

多普勒信号处理系统就是要准确、快速的获取多普勒频率, 系统选用 FFT 方法提取多普勒信号的频率。在测量过程中, 固定滤波带的滤波器来滤除噪声无法满足系统对滤波性能的要求, 因为随着速度的不断变化, 当滤波带宽设计过小时, 多普勒频率可能会跳出滤波带导致信号丢失; 当滤波带宽设计较大时, 基底信号就会进入滤波带, 不能完全被滤除, 从而很大程度的降低了信号的信噪比, 不能满足系统对滤波性能的要求^[8]。根据 FFT 后得到的信号频谱图, 通过判别频谱幅值最大点的位置得到多普勒频率。FFT 后得到的频率为 $f = k \frac{f_s}{N}$ (k 为谱线序号, $k = 0 \sim \frac{N}{2} - 1$), 然而由于栅栏效应, FFT 后频谱幅值最大点的位置往往对应于两条离散谱线之间, 由于时域截断也会产生能量泄漏, 两者都会使频率偏离真实

值, 进而使测量结果存在一定的误差, 精度降低^[9]。

为了实现高精度的测量, 将放大、高通滤波后的模拟信号经 AD 采样, 采样后的信号通过基于 FIR 滤波带自适应选择的滤波器进一步有效的滤除噪声, 提高信噪比, 对滤波后的信号进行快速傅里叶变换得到其频谱, 再引入频谱校正算法。系统选用简单易行、运算速度快、能有效改善提取频率的能量重心校正算法^[10]。信号处理流程如图 3 所示。

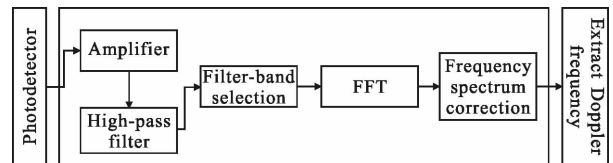


图 3 多普勒信号处理流程图

Fig.3 Flowchart of Doppler signal processing

2.1 滤波带的自适应选择

基于 FIR 滤波带的自适应选择就是根据多普勒频率的反馈及电缆速度的变化自动选择滤波器的通频带, 使其满足系统对滤波性能的要求, 具体的实现流程如图 4 所示。首先, 根据实际多普勒频率的带宽将滤波的通频带分成四段, 每一段分别由一个固定带宽的 FIR 滤波器组成; 然后计算出自适应滤波前及多普勒频率提取后的时间间隔 Δt , 根据电缆运行的最大加速度 a_{max} 算出在时间 Δt 内电缆运行速度变化的最大值 $a_{max} \Delta t$, 根据多普勒频率与速度之间的关系, 求出下一时刻多普勒频率变化的最大值 Δf_d , 根据公式(1)有:

$$\Delta f_d = 2 \frac{a_{max} \Delta t}{\lambda_0} \sin \phi \quad (4)$$

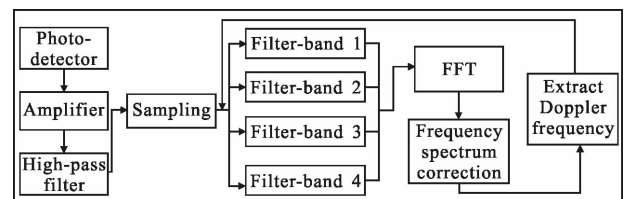


图 4 滤波带自适应选择的结构框图

Fig.4 Structure chart of adaptive selection of filter band

通过上一时刻反馈的多普勒频率值和多普勒频率变化的最大值, 判断下一时刻多普勒频率的范围, 自适应的选择下一时刻的滤波带。

2.2 能量重心校正算法

能量重心校正算法是利用窗函数的能量特性进行频谱校正。能量重心校正算法广泛适用于对称的窗函数，但是为了减小算法的运算量应尽量选择窗函数主瓣宽度较窄且旁瓣衰减速度很快的窗，这样可以利用主瓣内的谱线进行频率校正而忽略旁瓣的影响，根据对 Hanning 窗能量特性的分析，发现 Hanning 窗非常适合用于能量重心校正算法。根据 Hanning 窗的频谱振幅函数：

$$y(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \cdot \frac{1}{2(1-x^2)} \quad (5)$$

令功率谱函数 $G(x) = y^2(x)$ ，则有：

$$G(x) = \frac{\sin^2(\pi x)}{4\pi^2 x^2 (1-x^2)^2} \quad (6)$$

根据公式(6)，设信号功率谱为：

$$Y = A \frac{\sin^2(\pi(x-x_0))}{4\pi^2(x-x_0)^2 [1-(x-x_0)^2]^2} \quad (7)$$

式中： A 为分析信号的幅值。根据 Hanning 窗能量重心的特性有：

$$\sum_{i=-n}^n Y_i \cdot (x-x_0+i) = 0 \quad (8)$$

式中： Y_i 为功率谱内第 i 条谱线值。化简上式有：

$$\sum_{i=-n}^n Y_i \cdot (x+i) - \sum_{i=-n}^n Y_i \cdot x_0 = 0 \quad (9)$$

根据公式(9)就可求得主瓣中心的坐标 x_0 ：

$$x_0 = \frac{\sum_{i=-n}^n Y_i \cdot (x+i)}{\sum_{i=-n}^n Y_i} \quad (10)$$

设采样频率为 f_s ，采样点数为 n ， m 为主瓣内谱峰值的谱线号，根据公式(10)就能得到频率校正公式为：

$$x_0 = \frac{\sum_{i=-n}^n Y_{m+i} \cdot (m+i)}{\sum_{i=-n}^n Y_{m+i}} \cdot \frac{f_s}{N} \quad (11)$$

由校正公式可知， n 越大校正精度越高，但是同时也会增加计算量，根据研究表明，当 $n=1$ 时，频率的校正精度就已经较高。

3 实验结果及分析

为论证文中所设计系统的可行性及实用性，在实验室中进行了对比测量实验，选用英国 PROTON

公司生产的高精度非接触式 SL3060 测速测长仪进行对比实验，该产品测速范围 0.2~5 000 m/min，精度优于 0.05%。选用 100 W 的电机带动直径为 100 mm 厚度为 15 mm 的精密加工的圆盘产生待测的速度，电机转速可调范围 0~4 000 rpm。

文中设计的激光多普勒在线计米系统中激光器波长为 639 nm，功率为 30 mW，消偏振分束立方体的反射率和透射率均为 50%，光电探测器为雪崩光电二极管模块，频率探测范围为 0.004~100 MHz，双胶合接收透镜焦距为 50 mm。系统的测速范围 0.8~1 000 m/min，测量的基准距离为 300 mm；激光汇聚光斑直径为 3 mm，系统测量景深为 30 mm，可以有效解决电缆生产过程中小幅抖动带来的测量误差问题；系统的最大加速度为 300 m/s²。对比实验实物图如图 5 所示。

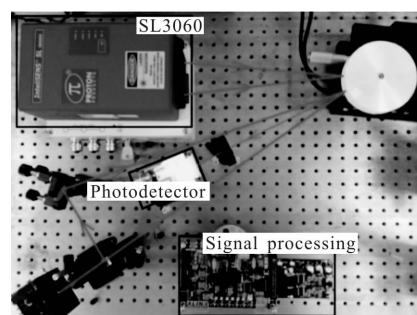


图 5 对比实验实物平台

Fig.5 Comparison of experimental physical platform

3.1 滤波带的自适应选择实验

分别用固定带宽的普通滤波器和基于 FIR 的滤波带自适应选择的滤波器对实际多普勒信号进行实验。将系统的采样频率设为 10 MHz，采样点数为 1 024，固定带宽的滤波器的带宽设置为 1~2.5 MHz。

控制电机以某一转速转动，此时 SL3060 测出转盘线速度为 418.994 m/min，所对应的频率为 2.265 MHz，以此作为系统测量的参考值。原始多普勒信号、固定带宽的滤波器及基于 FIR 滤波带自适应选择的滤波器的输出如图 6 所示。

通过调整电机转速，人为地改变多普勒频率值，使其跳出固定带宽的滤波器的滤波带，在不同频率下测试两种滤波器的输出，输出结果分别如图 7~9 所示。

由图 6~9 中原始信号及其频谱图可知，原始多普勒信号中含有基底信号且 FFT 后的频谱中无法准

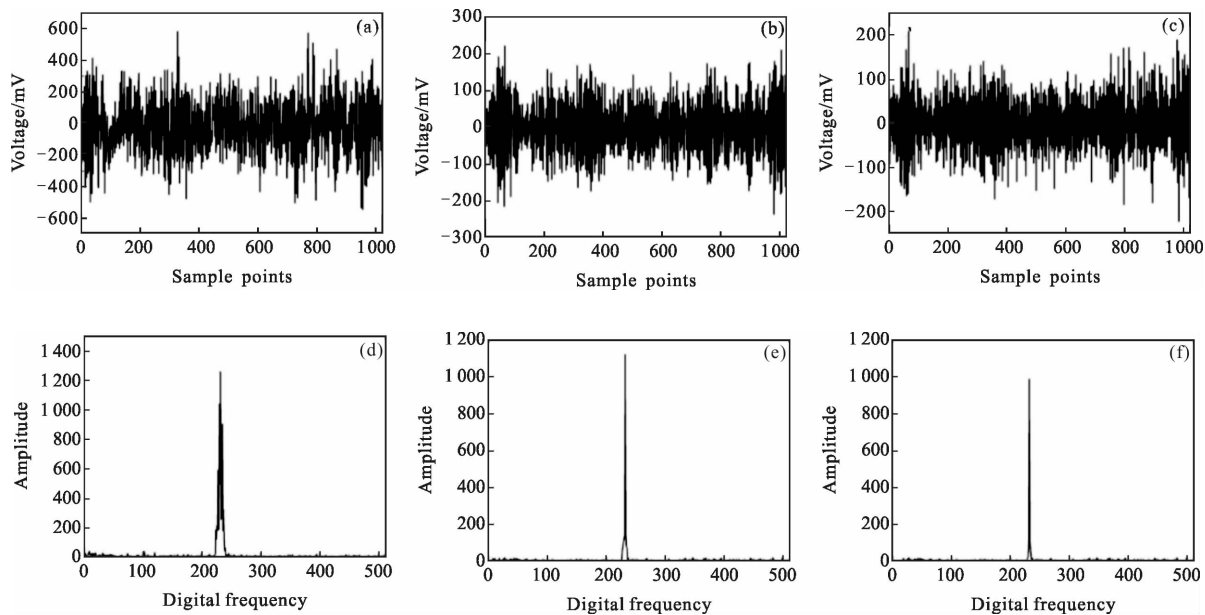


图 6 频率为 2.265 MHz 时的测量结果。(a)、(b)、(c)分别为原始多普勒信号、固定带宽滤波和滤波带自适应选择滤波后信号；(d)、(e)、(f)分别为对应上述信号的频谱图

Fig.6 Measurement results of 2.265 MHz frequency. (a), (b), (c) are the original Doppler signal, the fixed bandwidth filter and the filter band adaptive selection of the filtered signal; (d), (e), (f) are corresponding to the above signals spectrum

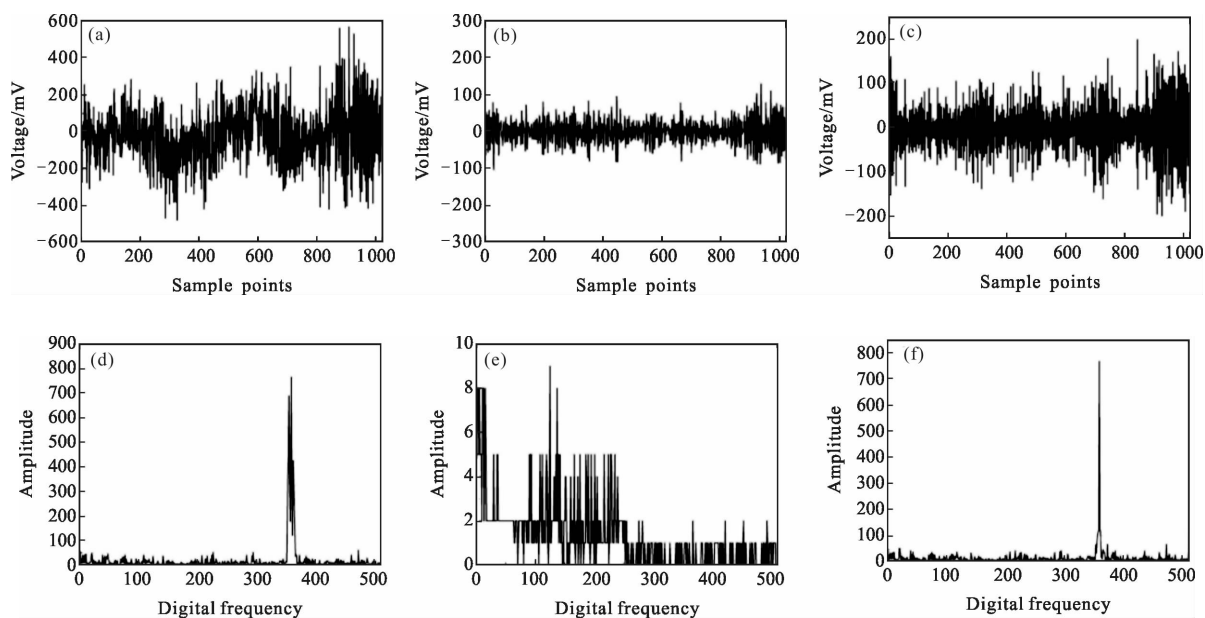


图 7 频率为 3.477 MHz 时的测量结果。(a)、(b)、(c)分别为原始多普勒信号、固定带宽滤波和滤波带自适应选择滤波后信号；(d)、(e)、(f)分别为对应上述信号的频谱图

Fig.7 Measurement results of 3.477 MHz frequency. (a), (b), (c) are the original Doppler signal, the fixed bandwidth filter and the filter band adaptive selection of the filtered signal; (d), (e), (f) are corresponding to the above signals spectrum

确得到多普勒频率。由图 6 可知,由于多普勒信号频率位于固定带宽的滤波器的通频带内,所以固定带宽的滤波器和基于 FIR 的滤波带自适应选择的滤波

器都能很好地滤掉基底信号,提高信噪比;由图 7~9 可知,虽然固定带宽的滤波器可以将基底信号滤除,但是其频谱图中已经无法找到多普勒频率项,因为

多普勒信号的频率已经跳出固定带宽的滤波器的通频带；但是基于 FIR 的滤波带自适应选择的滤波器却能很好地滤掉基底信号和部分噪声，FFT 后的频谱图中谱峰值对应的多普勒频率与参考值相比较准

确，其实现了多普勒频率的实时跟踪，解决了固定带宽滤波器存在的带宽设置的问题，在整个多普勒信号测量的范围内都能很好地滤除噪声，满足系统对信号噪声处理的要求。

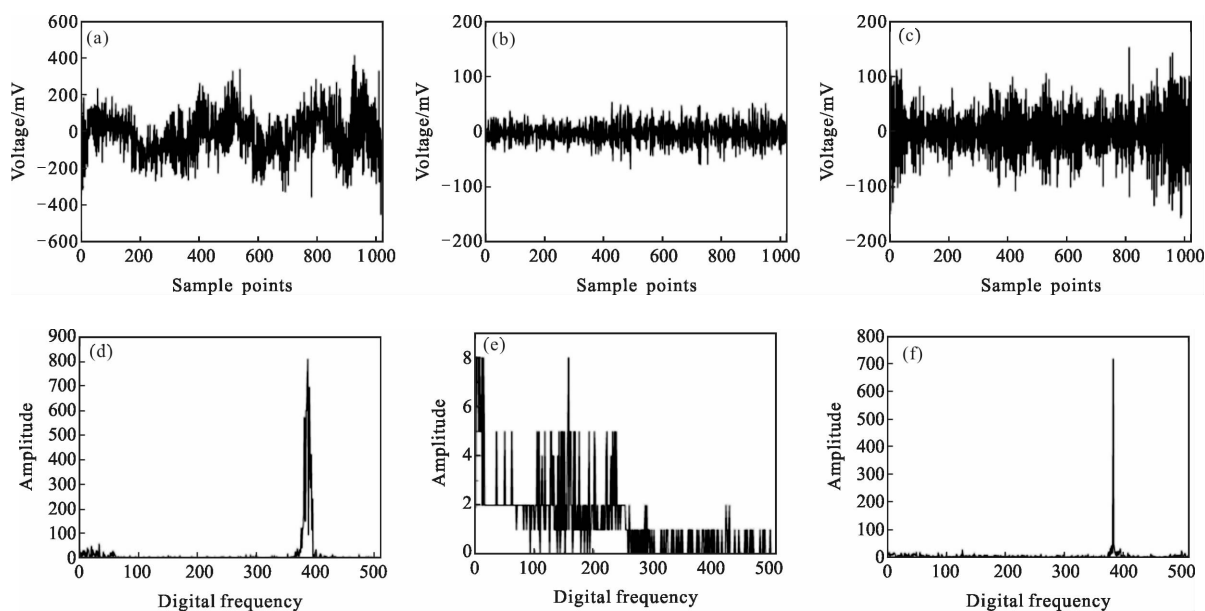


图 8 频率为 3.770 MHz 时的测量结果。(a)、(b)、(c)分别为原始多普勒信号、固定带宽滤波和滤波带自适应选择滤波后信号；(d)、(e)、(f)分别为对应上述信号的频谱图

Fig.8 Measurement results of 3.770 MHz frequency. (a), (b), (c) are the original Doppler signal, the fixed bandwidth filter and the filter band adaptive selection of the filtered signal; (d), (e), (f) are corresponding to the above signals spectrum

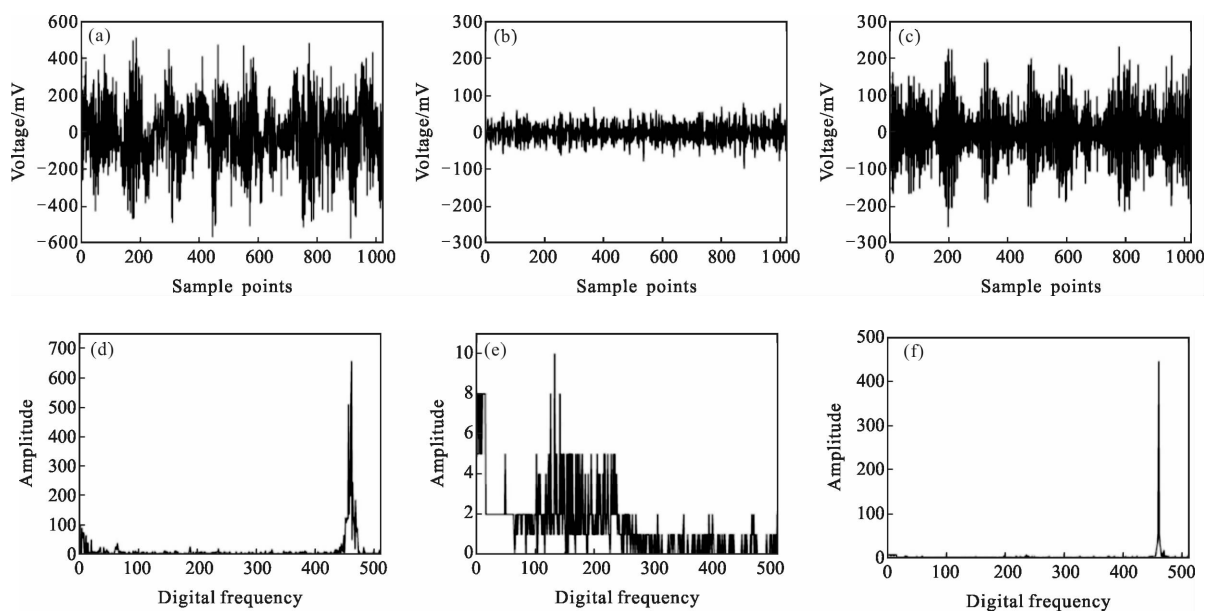


图 9 频率为 4.521 MHz 时的测量结果。(a)、(b)、(c)分别为原始多普勒信号、固定带宽滤波和滤波带自适应选择滤波后信号；(d)、(e)、(f)分别为对应上述信号的频谱图

Fig.9 Measurement results of 4.521 MHz frequency. (a), (b), (c) are the original Doppler signal, the fixed bandwidth filter and the filter band adaptive selection of the filtered signal; (d), (e), (f) are corresponding to the above signals spectrum

3.2 长度在线测量模拟试验

实际电缆运行速度在 30~600 m/min 的范围内,以 SL3060 的测量结果为参考值,分别将 30、300、600 m/min 速度下的多普勒信号经能量重心校正前

后的长度测量结果进行比较,如图 10 所示。由图 10 可知,频谱校正后的测量误差明显优于校正前的测量误差,校正后系统长度测量的相对误差小于 0.1%。

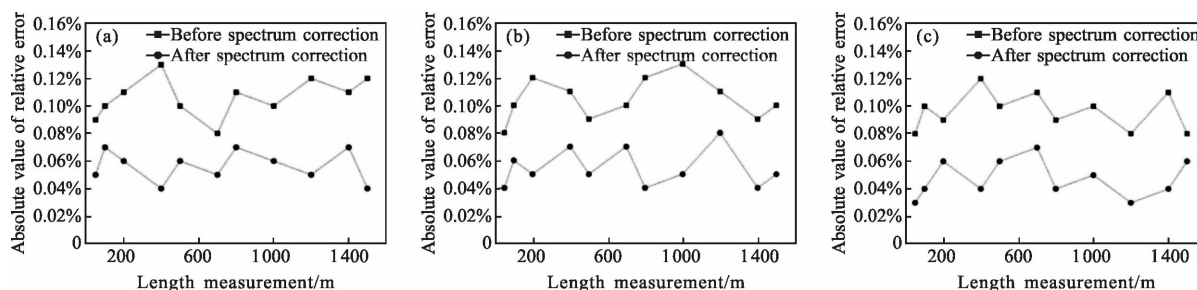


图 10 频谱校正前后的测量结果。(a)、(b)、(c)分别为速度为 30、300、600 m/min 时的测量结果

Fig.10 Measurement results before and after spectral correction. (a), (b), (c) are the results of measurement at speeds of 30, 300 and 600 m/min

为了验证激光多普勒计米系统的稳定性,在速度为 100 m/min 时对不同的长度进行多次重复测量实验,测量结果如表 1 所示。由表 1 可知,以 SL3060

测得值为参考值,电缆激光多普勒计米系统长度测量值的标准偏差小于 0.3 m,该系统具有较好的稳定性和可靠性。

表 1 长度的测量结果(单位:m)

Tab.1 Measuring results of length(Unit:m)

Reference	1	2	3	4	5	6	7	8	Average	S
100.666	100.576	100.675	100.704	100.641	100.599	100.678	100.726	100.698	100.662	0.053
500.654	500.565	500.657	500.652	500.964	500.774	500.871	501.023	500.968	500.809	0.172
1 000.655	1 000.901	1 000.435	1 001.156	1 001.012	1 000.462	1 000.943	1 000.694	1 000.685	1 000.786	0.260

4 结论

文中将基于激光多普勒测速原理的非接触式的长度在线测量方法应用于电缆长度测量,设计并研发了电缆激光多普勒在线计米系统。进行了对比测量实验,实验结果表明,基于 FIR 的滤波带自适应选择算法,能够有效地减小多普勒信号噪声的干扰,提高信噪比;FFT 结合能量重心校正技术,可以准确的提取多普勒频率,改善系统测量准确度;所设计的系统能够实现非接触式长度的在线精确测量,具有较好的稳定性,相对误差小于 0.1%,能够应用于电缆生产线上长度的在线测量。

参考文献:

[1] Duan M, Zhang X. The design and implementation for cable

length measuring based on precision delay chip [C]//Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), 2011: 1141-1144.
 [2] Wang Fengpeng, Zhao Chengguo, Liao Zhimeng, et al. Interference for length measurement based on video image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (6): 1133-1137. (in Chinese)
 王凤鹏, 赵成果, 廖志孟, 等. 采用视频图像的激光干涉测长技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1133-1137.
 [3] Nie Yanju, Meng Zhaokui, Hu Shuling, et al. Frequency domain adaptive threshold detection for laser Doppler velocimetry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (4): 0406002. (in Chinese)
 聂延举, 孟照魁, 胡姝玲, 等. 激光多普勒测速仪的频域自适应阈值检测[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0406002.
 [4] Zhou J, Long X. Signal processing of laser Doppler self-velocimeter [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42 (6):

- 1038–1043.
- [5] Lei S, Fang S, Xu L, et al. Signal processing system for seismic exploration based on laser doppler effect [C]// International Conference on Signal Processing, 2016.
- [6] Yan Shuai, Shang Jianhua, Liu Yuying, et al. Application of wavelet denoising for heterodyne laser Doppler vibrometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 29(8): 081203. (in Chinese)
燕帅, 尚建华, 刘玉英, 等. 小波消噪在外差式激光多普勒振动测量中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 29(8): 081203.
- [7] Liu Fan, Jin Shilong, Zhou Jian. Application of least mean square adaptive filter technology in laser Doppler velocimeter [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(3): 570–574. (in Chinese)
刘帆, 金世龙, 周健. 自适应滤波技术在激光多普勒测速仪中的应用[J]. *应用光学*, 2012, 33(3): 570–574.
- [8] Zhou Jian, Long Xingwu. Laser Doppler velocimetry for vehicle inertial navigation system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(5): 1316–1321. (in Chinese)
周健, 龙兴武. 用于车载自主惯导系统的激光多普勒测速仪[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1316–1321.
- [9] Liu Changwen, Han Jingna, Liu Jie, et al. Investigation on frequency correction methods and its application in digital spectrum LDA processor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(7): 642–646. (in Chinese)
刘昌文, 韩静娜, 刘杰, 等. 激光多普勒测速中的频谱校正及其应用[J]. *中国激光*, 2003, 30(7): 642–646.
- [10] Yu Xiao, Hong Guanglie, Ling Yuan, et al. Energy centrobaric correction method applied in velocity accuracy enhancement in Doppler laser radar system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 29(9): 091201. (in Chinese)
于啸, 洪光烈, 凌元, 等. 能量重心校正法在提高激光多普勒测速精度中的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 29(9): 091201.