

基于混合卷积窗六谱线插值的多普勒信号处理

赵晨曦, 张 达

(青岛科技大学自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266000)

摘要:激光多普勒测速系统信号处理的过程中,通常采用快速傅里叶变换提取多普勒频移进而计算出被测物体运动速度,由于频谱泄露和栅栏效应的影响,会导致测量精度降低。本文提出了一种四项 Nuttall 窗和五项 Rife-Vincent 窗的混合卷积窗函数结合改进的六谱线插值算法来降低频谱泄露和栅栏效应所带来的影响,从而提高激光多普勒信号处理精度。搭建了双光束后向散射差动式激光多普勒测速平台,通过仿真和实测得出在加入了 $R_{SN} = -10$ dB 的高斯白噪声的情况下使用该混合卷积窗所测量的最小相对误差为 0.0027%,而分别使用两个单一的窗函数测量的最小相对误差分别为 0.0103% 和 0.0461%。从而验证了本方法的有效性。

关键词:快速傅里叶变换;频谱泄露;栅栏效应;混合卷积窗;六谱线插值

中图分类号:TN249;TP391.41 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.05.011

Doppler signal processing based on mixed convolutional window six spectral lines

ZHAO Chen-xi, ZHANG Da

(College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266000, China)

Abstract: In the process of signal processing in the laser Doppler velocity measurement system, the fast Fourier transform is usually used to extract the Doppler frequency shift and calculate the motion speed of the measured object. Due to the influence of spectrum leakage and barrier effect, the measurement accuracy can be reduced. In this paper, a hybrid convolution window function with a four-term Nuttall window and a five-term Rife Vincent window combined with an improved six spectral line interpolation algorithm is proposed to reduce the effects of spectrum leakage and barrier effects, so as to improve the accuracy of laser Doppler signal processing. A dual-beam backscattering differential laser Doppler velocimetry platform is built, and the minimum relative error measured with this hybrid convolution window with the addition of Gaussian white noise with $R_{SN} = -10$ dB is 0.0027% by simulation and real measurements, whereas the minimum relative errors measured using the two single window functions are 0.0103% and 0.0461%, respectively. Thus, the effectiveness of this method is verified.

Keywords: fast Fourier transform; spectrum leakage; fence effect; mixed convolutional window; hexagram interpolation

1 引言

激光多普勒测速(LDV)具有非接触光学测量、无校准、无漂移、明确的方向响应、高分辨率、多分量双向测量等优点。目前主要应用在流体测速管道内气体速度、血管中血流流速、军用导航、车载导航系统等方面^[1-3]。最常见的多普勒信号处理方法是快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),然而FFT过程会造成频谱泄露。如果直接用FFT得到的

峰值谱线对应的频率作为多普勒频移,则存在精度较低的问题^[4-5]。为了削弱频谱泄漏、栅栏效应带来的运算误差影响,需要对FFT进行改进。对时域多普勒信号加窗函数^[6-12]可以较好减少频谱泄露带来的影响,对离散频谱进行插值可以较好地削弱栅栏效应。随着对测量精度要求的提高,加入单一的窗函数已经无法满足测量精度的需要,为了实现更高的测量精度,就加入Rife-Vincent自卷积窗、基

于 Hamming 窗函数和 Nuttall 窗函数的混合卷积窗等来更好地抑制频谱泄露。为了进一步提高实验精度,窗函数的旁瓣特性是否良好成为了窗函数选择的重中之重。在加窗的过程中,随着卷积次数的增加测量精度也会随之增加,但是计算量也会增大^[9],所以卷积的次数一般在4次之内。因此,本文选取旁瓣性能较好的四项 Nuttall 窗和五项 Rife-Vincent 窗构造一种新型混合卷积窗。六谱线插值算法不仅考虑到了谱线的对称性,还考虑了目标频点附近频谱中包含的谱线信息。

2 窗函数的选择

常用的窗函数有汉宁窗、海明窗、平顶窗、Blackman Harris 窗、Nuttall 窗、Rife-Vincent 窗等。四项 Nuttall 窗和五项 Rife-Vincent 窗的旁瓣特性如图 1。

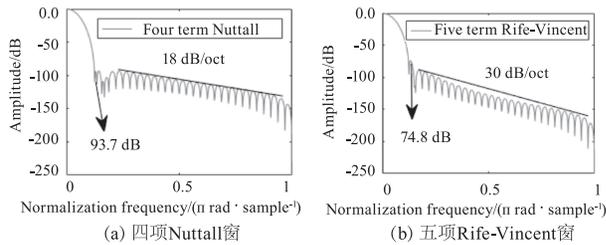


图 1 四项 Nuttall 窗及五项 Rife-Vincent 窗的旁瓣特性图

Fig. 1 Side lobe performance of four Nuttall and five Rife-Vincent window

表 1 几种余弦组合窗的主瓣宽度和旁瓣特性
Tab. 1 Main lobe width and side lobe characteristics of several cosine composite windows

Window function	Sidelobe peak level/dB	Sidelobe attenuation velocity/(dB · oct ⁻¹)
Four Nuttall	-93.7	18
FourRife-Vincent(I)	-62.6	18
FiveRife-Vincent(I)	-74.8	30

由图 1 可知,四项 Nuttall 窗具有相对低的峰值旁瓣电平和较高的旁瓣衰减率。由表 1 可知,五项 Rife-Vincent 窗不仅拥有较大的主瓣宽度,而且在兼顾了较低的旁瓣峰值电平的前提下还拥有较快的旁瓣衰减速度。所以选择四项 Nuttall 窗和五项 Rife-Vincent 窗构建混合卷积窗。

四项 Nuttall 窗频域表达式为:

$$W_{\text{Nuttall}} = 0.3563248 - 0.472595 \cos\left(\frac{2\pi m}{M}\right) + 0.139521 \cos\left(\frac{4\pi m}{M}\right) - 0.012681 \cos\left(\frac{6\pi m}{M}\right) \quad (1)$$

五项 Rife-Vincent 窗频域表达式:

$$W_{\text{Rife-Vincent}} = 1 - 1.43596 \cos\left(\frac{2\pi m}{M}\right) + 0.49754 \cos\left(\frac{4\pi m}{M}\right) - 0.06158 \cos\left(\frac{6\pi m}{M}\right) + 0.00826 \cos\left(\frac{8\pi m}{M}\right) \quad (2)$$

四项 Nuttall 窗和五项 Rife-Vincent 窗的混合卷积窗的幅频特性如图 2 所示,与图 1 相比,该混合卷积窗具有更低的旁瓣电平(-169.878 dB)和更快的旁瓣衰减率(143.22 dB/oct),且具有更好的旁瓣特性,因此该混合卷积窗适合做进一步的信号处理。

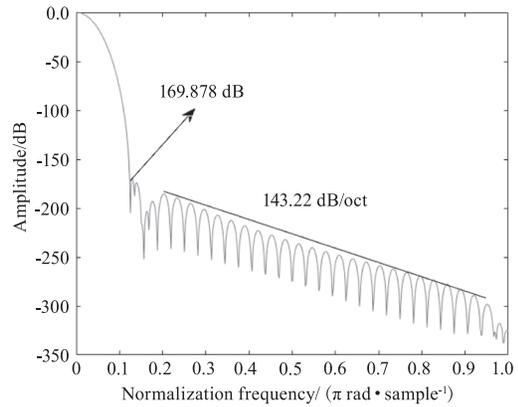


图 2 四项 Nuttall 和五项 Rife-Vincent 的混合卷积窗

Fig. 2 Mixed convolution window of four Nuttall and five Rife-Vincent

3 六谱线插值算法

插值算法中有单峰谱线插值算法、双峰谱线插值算法、三谱线插值算法和四谱线^[11]插值算法。单峰谱线插值算法虽然计算比较简单,但是精度比较低;双峰谱线插值算法是利用了峰值谱线频点附近相邻的两条谱线,但对峰值谱线附近泄露谱线的信息利用的不充分;三谱线插值虽然提高了对泄露谱线的利用率,但是忽略了峰值频点左右对称谱线所蕴含的信息量^[12-13]。六谱线插值算法既考虑到了谱线的对称性,又考虑了目标频点附近频谱中包含的谱线信息。

当对信号的非同步采样或非整周期数据进行截断时,由于栅栏效应的存在, k 一般不是整数,峰值频点左右的 6 条谱线的频率呈现递增关系。给这 6 条谱线的幅值分别加权为 3、4、5、5、4、3。

设:

$$\beta = \frac{(3y_1 + 4y_2 + 5y_3) - (5y_4 + 4y_5 + 3y_6)}{3y_1 + 4y_2 + 5y_3 + 5y_4 + 4y_5 + 3y_6} \quad (3)$$

记 $\alpha = k - k_3 - 0.5 (-0.5 \leq \alpha \leq 0.5)$, 令:

$$R = 5 | W[2\pi(-\alpha + 0.5)/N] | + 4 | W[2\pi(-\alpha + 0.5)/N] | + 3 | W[2\pi(-\alpha + 0.5)/N] | \quad (4)$$

$$S = 5 | W[2\pi(-\alpha - 0.5)/N] | + 4 | W[2\pi(-\alpha - 0.5)/N] | + 3 | W[2\pi(-\alpha - 0.5)/N] |$$

$$(-\alpha - 0.5)/N \mid + 3 \mid W[2\pi(-\alpha - 0.5)/N] \mid \quad (5)$$

由上式可得:

$$\beta = \frac{R+S}{R-S} \quad (6)$$

将 $k = -\alpha \pm 0.5$ 、 $k = -\alpha \pm 1.5$ 、 $k = -\alpha \pm 2.5$ 代入上式,在 $[-0.5, 0.5]$ 之间取不同的 α 的值从而得到 β 的值。根据公式 $\alpha = f^{-1}(\beta)$ 可得 α 确定之后的频率 f :

$$f = k \cdot \Delta f = (\alpha + k_3 + 0.5) \Delta f \quad (7)$$

对六谱线进行加权平均,得到的修正幅值公式为:

$$A_0 = 2(3y_1 + 4y_2 + 5y_3 + 5y_4 + 4y_5 + 3y_6)g(\alpha) \quad (8)$$

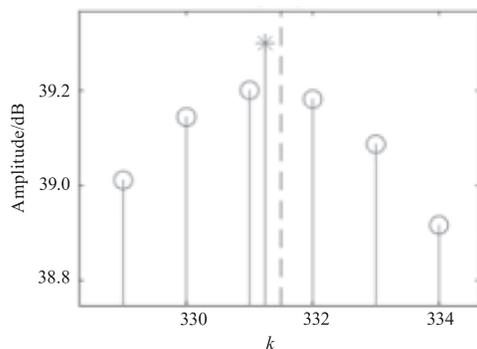
四项 Nuttall 窗和五项 Rife-Vincent 窗的混合卷积窗的插值系数 α 七次拟合多项式为:

$$\alpha = -2.2753246\beta - 0.9521485\beta^3 - 0.3578791\beta^5 - 0.0915424\beta^7 \quad (9)$$

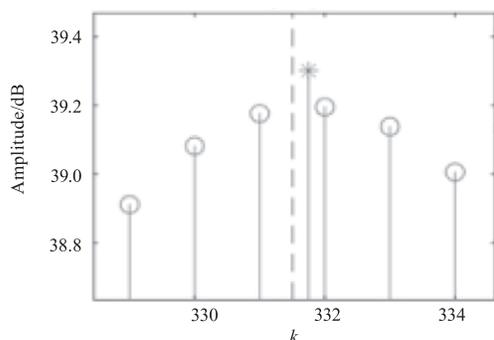
四项 Nuttall 窗和五项 Rife-Vincent 窗的混合卷积窗的幅值系数 V 七次拟合多项式为:

$$V = 0.6254315 + 1.5931315\alpha^2 + 9.8351526\alpha^4 + 25.0154614\alpha^6 \quad (10)$$

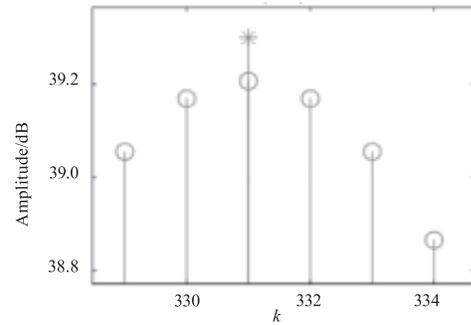
为满足信号处理的高精度要求,采用六谱线插值算法。在采样的过程中采用的是异步采样,从而产生栅栏效应,使得实际测量信号频率与采样频率点难以重合。有待测频率在幅值最大谱线右侧、待测频率在幅值最大谱线左侧、待测频率对应谱线、待测频率在两谱线正中间这4种情况,如图3所示。



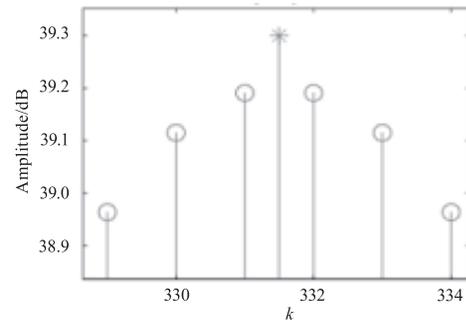
(a) 待测频率在最大谱线左侧



(b) 待测频率在最大谱线右侧



(c) 待测频率在最大谱线上



(d) 待测频率在两谱线中间

图3 频谱线

Fig. 3 Spectral lines

当待测频率分别在幅值最大谱线左侧时、待测频率在 k_3 谱线上时、待测频率在 k_4 谱线上时、待测频率在两谱线正中间时,时频率和幅值的修正公式分别为:

$$\begin{cases} f_{k_R} = (k_4 - a - 0.25)f_s/N \\ \arg = \text{angle}(X(k_4)) + 0.75\pi + a\pi \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} f_{k_R} = (k_3 + a)f_s/N \\ \arg = \text{angle}(X(k_4)) + 0.5\pi - a\pi \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} f_{k_R} = (k_4 - a)f_s/N \\ \arg = \text{angle}(X(k_4)) + 0.5\pi + a\pi \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} f_{k_R} = 0.5(k_3 + k_4)f_s/N \\ \arg = 0.5[\text{angle}(X(k_3)) + \text{angle}(X(k_4))] + 0.5\pi \end{cases} \quad (14)$$

4 仿真实验

4.1 模拟激光多普勒信号的处理

为了验证四项 Nuttall 窗和五项 Rife-Vincent 窗的混合卷积窗的六谱线插值的有效性和精度,对模拟的激光多普勒信号进行插值六谱线插值处理,理想的激光多普勒信号序列的波形见图4。

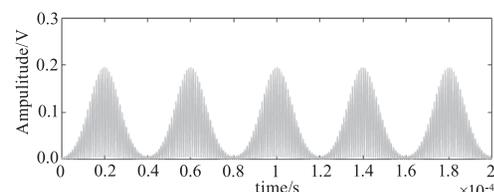


图4 理想的激光多普勒信号序列的波形

Fig. 4 Waveform of an ideal laser Doppler signal sequence

对四项 Nuttall 窗、五项 Rife-Vincent 窗、四项 Nuttall 窗和五项 Rife-Vincent 窗的混合卷积窗进行六谱线插值处理把这 3 种不同方法简称为 method1、method2、method3,并用这 3 种方法对激光多普勒理想信号进行频率检测。

分别在低频和高频范围内,对 20 组异步采样信号进行三种方法的频率检测处理。采样率为 5 MHz,FFT 点数为 1024,每个频点计算十次。频率测量的绝对误差见表 2、表 3,相对误差如图 5 所示。

表 2 低频范围内频率检测的精度

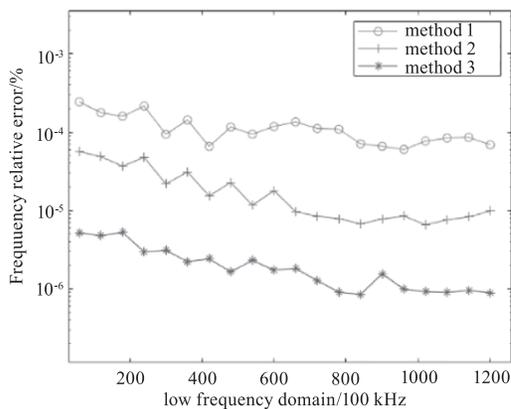
Tab. 2 Precision of frequency detection in low frequency range

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frequency/kHz	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
Method 1	0.141	0.202	0.291	0.521	0.274	0.542	0.268	0.565	0.514	0.742
Method 2	0.0341	0.0575	0.0668	0.1151	0.0660	0.1130	0.0651	0.1105	0.0660	0.1081
Method 3	0.00308	0.00580	0.00962	0.00784	0.00924	0.00814	0.01082	0.00774	0.01241	0.01062
编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Frequency/kHz	660	720	780	840	900	960	1020	1080	1140	1200
Method 1	0.884	0.862	0.843	0.580	0.593	0.586	0.642	0.689	0.753	0.641
Method 2	0.0649	0.0672	0.0662	0.0542	0.0771	0.0862	0.0584	0.0694	0.0713	0.0806
Method 3	0.01274	0.00934	0.00726	0.00725	0.01411	0.00768	0.00753	0.00724	0.00768	0.00736

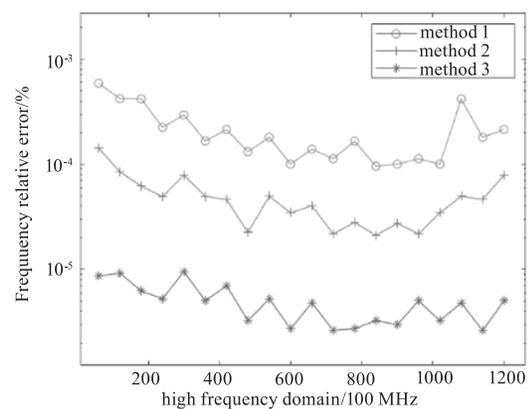
表 3 高频范围内频率检测的精度

Tab. 3 Precision of frequency detection in high frequency range

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frequency/GHz	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
Method1	352.451	501.895	750.605	537.600	884.430	597.694	898.654	630.234	973.952	602.841
Method2	85.654	101.894	111.923	118.159	236.547	178.982	194.654	108.687	268.091	208.086
Method3	5.452	11.462	11.952	12.265	28.621	18.324	29.495	15.795	28.671	16.591
编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Frequency/GHz	660	720	780	840	900	960	1020	1080	1140	1200
Method1	917.610	811.984	1289.650	805.892	902.982	630.365	973.893	917.671	632.517	748.478
Method2	266.415	157.351	219.964	177.354	247.716	147.654	146.982	131.650	95.562	77.153
Method3	31.979	19.067	21.461	27.584	27.963	27.927	18.660	24.818	19.980	26.781



(a) 低频范围



(b) 高频范围

图 5 高低频范围内频率检测的相对误差对比

Fig. 5 Relative error comparison of frequency detection in low and high frequency range

由图5可知,在低频和高频范围内,四项 Nuttall 窗和五项 Rife-Vincent 窗的混合卷积窗的相对误差要低于四项 Nuttall 窗和五项 Rife-Vincent 窗的效果。

在实际测量中,激光多普勒信号往往会混有噪声,为了更加精准的模拟激光多普勒信号,加入 $R_{SN} = -10$ dB 的高斯白噪声后,在低频范围和高频范

围内分别用 method1、method2、method3 进行处理。

分别在低频和高频范围内,对 20 组异步采样信号进行三种方法的处理。采样率为 5 MHz,FFT 点为 1024,每个频点计算十次。频率测量的绝对误差分别见表 4 和表 5,相对误差的算术平均值分别如图 6 所示。

表 4 加入 $R_{SN} = -10$ dB 的高斯白噪声后低频范围内绝对误差

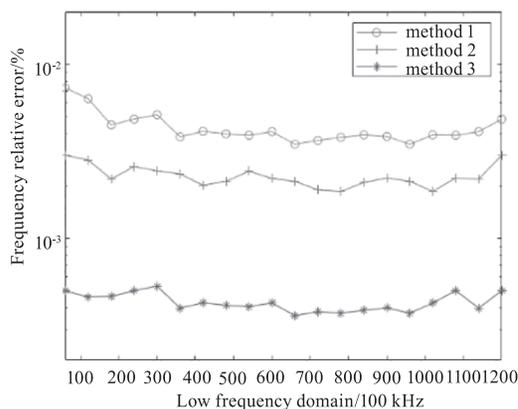
Tab. 4 Absolute error in low frequency range after adding Gaussian white noise with $R_{SN} = -10$ dB

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frequency/kHz	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
method 1	4.650	6.982	8.641	12.641	15.943	15.520	17.180	18.891	21.394	23.862
method2	1.752	3.617	3.985	5.816	6.931	8.106	8.865	10.105	12.384	12.976
method3	0.365	0.532	0.827	1.238	1.618	1.423	1.861	2.034	2.160	2.601
编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Frequency/kHz	660	720	780	840	900	960	1020	1080	1140	1200
method 1	22.677	25.744	28.641	31.962	33.420	35.713	36.915	38.621	40.417	41.509
method2	14.053	14.528	14.216	17.418	19.579	20.877	22.163	23.762	24.816	26.004
method3	2.363	2.682	2.860	3.192	3.630	3.962	4.538	4.694	5.281	5.611

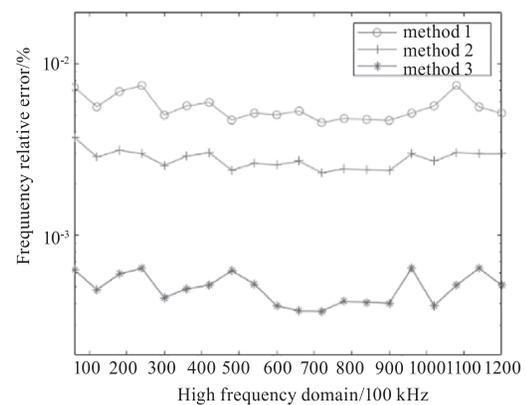
表 5 加入 $R_{SN} = -10$ dB 的高斯白噪声后高频范围内绝对误差

Tab. 5 Absolute error in high Frequency range after adding Gaussian white noise with $R_{SN} = -10$ dB

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frequency/MHz	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
method 1	4.105	6.394	11.941	16.920	14.743	18.562	23.452	22.651	27.864	30.621
method2	2.162	3.584	5.174	6.935	8.361	10.066	12.865	12.368	13.998	15.080
method3	0.316	0.756	1.132	1.491	1.943	2.065	2.562	3.056	2.982	2.432
编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Frequency/MHz	660	720	780	840	900	960	1020	1080	1140	1200
method 1	34.357	35.561	36.500	38.608	41.513	43.535	44.953	47.056	49.020	51.109
method2	17.475	18.623	18.991	20.654	21.651	23.195	24.618	25.812	25.167	27.651
method3	3.564	3.961	3.515	3.670	3.742	4.065	3.832	4.255	4.920	4.761



(a) 低频范围



(b) 高频范围

图 6 加入 $R_{SN} = -10$ dB 的高斯白噪声后低频及高频范围内相对误差对比

Fig. 6 Relative error comparison of frequency detection in low and high frequency rang white noise with $R_{SN} = -10$ dB

通过图 6 可知,无论在低频还是高频范围内,method 3 的相对误差要比 method 1 和 method 2 小一个数量级,所以在加入噪音的情况下,采用四项 Nuttall 窗和五项 Rife-Vincent 窗的混合卷积窗六谱线插值算法的效果要优于四项 Nuttall 窗六谱线插值算法和五项 Rife-Vincent 窗六谱线插值算法。

4.2 激光多普勒信号处理

在激光多普勒信号处理过程中采用双光束-双散射光路,速度 v 的表达式为:

$$v = \frac{\lambda}{2\sin\theta} f_D \tag{15}$$

式中, f_D 为多普勒频移; θ 为两条入射光夹角的 1/2; λ 为激光波长。

在实验室搭建的激光多普勒信号装置如图 9 所示,通过 He-Ne 激光器发出的激光束经过分光棱镜按照 50 : 50 的分光后经过反射形成两条平行光,两条平行光经过凸透镜在转动的圆盘上汇聚成一点,在圆

盘上便形成了激光多普勒效应,来自圆盘表面的散射光被凸透镜收集后反射在探测器上。其中 He-Ne 激光器的光源功率为 0.8 mW,激光波长为 632.8 nm,两个人射光线的夹角为 40°,即 θ 为 20°^[14-15]。

使用图 7 的实验装置,获取 20 组激光多普勒频率,速度根据公式可以获得,采样频率为 10 MHz,FFT 点数为 1024。实测信号的绝对误差如表 6 所示,速度的相对误差对比如图 8 所示。

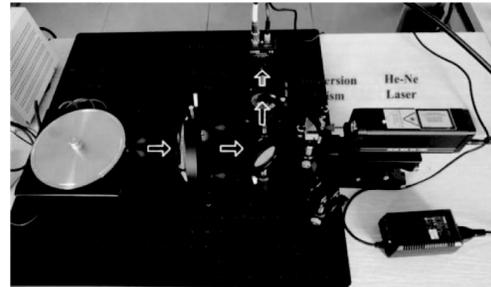


图 7 激光多普勒实验装置

Fig. 7 Laser Doppler experimental device

表 6 实测信号的绝对误差

Tab. 6 Absolute error of measured signal

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Speed	0.5415	0.5898	0.6377	0.7056	0.7683	0.8675	0.9369	0.9897	1.0425	1.0832
method1	1.513×10^{-4}	1.826×10^{-4}	2.190×10^{-4}	2.707×10^{-4}	3.095×10^{-4}	3.665×10^{-4}	3.188×10^{-4}	3.368×10^{-4}	2.962×10^{-4}	2.754×10^{-4}
method2	8.154×10^{-5}	9.615×10^{-5}	9.816×10^{-5}	9.962×10^{-4}	1.041×10^{-4}	1.198×10^{-4}	1.294×10^{-4}	1.389×10^{-4}	1.265×10^{-4}	1.215×10^{-4}
method3	1.756×10^{-5}	1.932×10^{-5}	1.984×10^{-5}	1.996×10^{-5}	2.182×10^{-5}	2.561×10^{-5}	2.705×10^{-5}	2.860×10^{-5}	3.570×10^{-5}	3.602×10^{-5}
编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Speed	1.1238	1.1605	1.1972	1.2492	1.2971	1.3486	1.3865	1.4386	1.4962	1.5628
method1	2.831×10^{-4}	2.963×10^{-4}	2.490×10^{-4}	2.365×10^{-4}	2.541×10^{-4}	2.687×10^{-4}	2.880×10^{-4}	3.192×10^{-4}	3.462×10^{-4}	3.685×10^{-4}
method2	1.168×10^{-4}	1.435×10^{-4}	1.481×10^{-4}	1.575×10^{-4}	1.756×10^{-4}	1.856×10^{-4}	1.985×10^{-4}	2.384×10^{-4}	2.600×10^{-4}	2.970×10^{-4}
method3	4.354×10^{-5}	4.611×10^{-5}	4.723×10^{-5}	4.762×10^{-5}	4.814×10^{-5}	4.895×10^{-5}	4.935×10^{-5}	5.023×10^{-5}	5.091×10^{-5}	5.164×10^{-5}

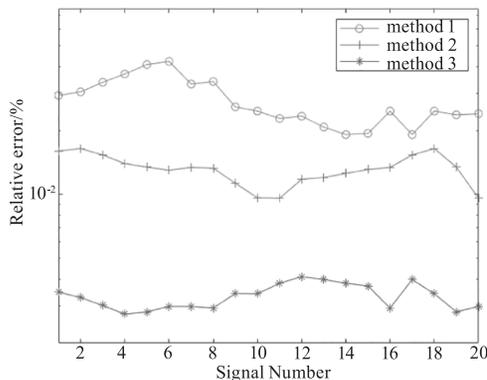


图 8 速度的相对误差对比

Fig. 8 Comparison of relative errors of speed

通过图 8 可知,3 种方法对实测信号都有效,但是采用四项 Nuttall 窗六谱线插值算法和五项 Rife-Vincent 窗六谱线插值算法的精度较低,而采用四项 Nuttall 窗和五项 Rife-Vincent 窗的混合卷积窗六谱

线插值算法的精度相对较高,通过运算,激光多普勒信号的精度已经达到较好的状态。

5 结论

为了减少激光多普勒信号在快速傅里叶变换中造成的频谱泄露^[7-8],加入四项 Nuttall 窗六谱线插值算法和五项 Rife-Vincent 窗;由于栅栏效应,使得实际测量信号频率与采样频率点难以重合,通过对 6 谱线进行加权的方法推出了该混合卷积窗的插值系数和幅值系数,对待测频率在幅值最大谱线右侧、待测频率在幅值最大谱线左侧、待测频率对应谱线、待测频率在两谱线正中间这 4 种情况分别推出了频率和幅值的修正公式。经过仿真校验,该方法的相对误差大约在 0.0027% ~ 0.0034% 之间,检测精度较好。通过实验表明,基于四项 Nuttall 窗和五项 Rife-Vincent 窗的混合卷积窗的改进六谱线插值法在激光多普勒信号处理方面具有较好的性能。

参考文献:

- [1] Sun Shenjun, Zhang Da. Research on laser doppler signal processing method based on Nuttall window triple-line interpolation[J]. Optical Technology, 2017, 43(4): 345 - 351. (in Chinese)
孙圣军, 张达. 基于 Nuttall 窗三谱线插值的激光多普勒信号处理方法研究[J]. 光学技术, 2017, 43(4): 345 - 351.
- [2] Zhao Hongbo. Research on velocity signal detection and frequency resolution algorithm based on doppler effect [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2019: 40 - 50. (in Chinese)
赵洪博. 基于多普勒效应的速度信号探测与频率解算算法研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019: 40 - 50.
- [3] Hua Min, Chen Jianyun. A high-precision hex-line interpolation FFT harmonic and inter-harmonic analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 4 - 8. (in Chinese)
华敏, 陈剑云. 一种高精度六谱线插值 FFT 谐波与间谐波分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 4 - 8.
- [4] Chen Qian, Wang Weiqing, Wang Haiyun, et al. Combined optimization algorithm for harmonic detection based on hybrid convolution window quad - line interpolation and improved all - phase[J]. Chinese Journal of Electric Power Systems and Automation, 2020, 32(8): 3 - 6. (in Chinese)
陈倩, 王维庆, 王海云, 等. 基于混合卷积窗四谱线插值和改进全相位的谐波检测组合优化算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(8): 3 - 6.
- [5] Li X, Liu Q, Wang K, et al. Multimodel anomaly identification and control in wet limestone-gypsum flue gas desulfurization system[J]. Complexity, 2020, (Oct): 1 - 17.
- [6] Guo Y, Xu Z, Zheng C, et al. Modeling and optimization of wet flue gas desulfurization system based on a hybrid modeling method[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2019, 69(5): 565 - 575.
- [7] Nie Xiaoming. Research on laser velocity measurement technology for vehicle autonomous navigation system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014: 3 - 5. (in Chinese)
聂晓明. 用于车载自主导航系统激光测速技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014: 3 - 5.
- [8] Liu Ranglei. Research on signal analysis and processing in laser doppler velocimetry[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2018: 28 - 31. (in Chinese)
- 刘让雷. 激光多普勒测速中信号的分析与处理研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2018: 28 - 31.
- [9] Tao Shun, Guo Ao, Zhao Lei, et al. An inter harmonic detection method based on six term fastest sidelobe attenuation velocity window and six spectral line interpolation algorithm[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2019, 40(6): 3 - 4. (in Chinese)
陶顺, 郭傲, 赵蕾, 等. 基于六项最快旁瓣衰减速度窗和六谱线插值算法的谐波间谐波检测方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(6): 3 - 4.
- [10] Wang Baoshuai, Xiao Xia. A high precision multispectral line interpolation algorithm for harmonic analysis[J]. Chinese Journal of Electrotechnical Technology, 2018, 33(3): 525 - 533. (in Chinese)
王保帅, 肖霞. 一种用于谐波分析的高精度多谱线插值算法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 525 - 533.
- [11] Li Demin, He Yigang. Harmonic analysis of power system based on Nuttall window four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 64 - 71. (in Chinese)
李得民, 何怡刚. 基于 Nuttall 窗四谱线插值 FFT 的电力谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 64 - 71.
- [12] Zhang Junmin, Liu Kaipei, Wang Li, et al. Harmonic analysis method based on interpolated FFT with multiplicative window function[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 2 - 3. (in Chinese)
张俊敏, 刘开培, 汪立, 等. 基于乘法窗函数的插值 FFT 的谐波分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 2 - 3.
- [13] Liu Dongmei, Yang Zhongliang, Yang Yigang, et al. FFT power harmonic analysis based on Rife-Vincent self-convolution window triple spectral line interpolation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(9): 1344 - 1351. (in Chinese)
刘冬梅, 杨重良, 何怡刚, 等. 基于 Rife-Vincent 自卷积窗三谱线插值 FFT 电力谐波分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(9): 1344 - 1351.
- [14] Hu H P, Zhang L M, Yan H C, et al. Denoising and baseline drift removal method of MEMS hydrophone signal based on VMD and wavelet threshold processing[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, (7): 2169 - 3536.
- [15] Huang D, Cui Sh, Li X Q. Wavelet packet analysis of blasting vibration signal of mountain tunnel[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 117: 72 - 80.