Journal of Applied Acoustics

◇ 研究报告 ◇

超声波流速测量的多普勒频移提取方法研究*

曹新亮^{1†} 崔 巍²

(1 延安大学信息与通信工程研究所 延安 716000)(2 延安大学鲁迅艺术学院 延安 716000)

摘要为了提高超声波多普勒法测量复杂流体流量的精度,针对流体的超声回波频率的复杂性,本文研究多 普勒流速测量中的频偏提取方法。以傅里叶分析为理论基础,设计了硬件电路并获得代表回波平均频率的信 号,然后以该信号作为输入,以数字鉴频法获得回波多普勒频移。基于该方法设计了一种超声多普勒流量测量 系统,实验结果显示:油水混合流体流量的测量误差在 3% 以内,从而证实了此频偏提取方法的有效性。 关键词 超声波,多普勒效应,鉴频,频偏提取 中图分类号: O426.4, TN911.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2017)02-0148-07 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2017.02.009

An extracting method of ultrasonic Doppler shift for multiphase fluid flow measurement

 ${\rm CAO~Xinliang^1}\quad {\rm CUI~Wei^2}$

Institute of Information and Communication Engineering, Yan'an University, Yan'an 716000, China)
 Lu Xun School of Fine Arts, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

Abstract In order to improve the complex fluid flow measurement accuracy by ultrasonic Doppler method and to solve frequency complexity of the fluid ultrasound echoes, a mixed extraction algorithm for Doppler frequency difference value of echo is obtained. Based on the Fourier analysis theory, a hardware circuit is designed that is to obtain a signal representing the average frequency of the echo. And the significance of signal with this average is explained by Fourier transform algorithm. And then, the signal as an input to a digital frequency discriminator, the Doppler frequency shift is to get. Basis of the design method above, an ultrasonic Doppler flow measurement system is designed. Experimental results show that the measurement error of oil and water mixed fluid flow is less than 3%. Thus the validity of the frequency offset extraction method is confirmed.

Key words Ultrasonic, Doppler effect, Discriminator, Frequency offset extraction

²⁰¹⁶⁻⁰⁶⁻¹² 收稿; 2016-11-03 定稿

^{*}国家自然基金项目 (61661049), 陕西省科学研究基金项目 (2016GY-138)

作者简介:曹新亮(1970-),男,陕西富县人,博士,硕士研究生导师,研究方向:综合电子系统。

[†]通讯作者 E-mail: caoxinliang874@163.com

1 引言

在纯净流体流量非接触式测量中,时差法测量 精度(一般为1%左右)优于超声波多普勒法测量精 度(通常不足5%)。超声波多普勒法流量测量是以 超声波的多普勒效应为原理,通过检测两个传感器 探头的超声波频率差来得到流体的流速与流量。相 对于纯净单相流体的时差法流量测量技术,多普勒 法对含微小固体颗粒或气泡的悬浮液、粘稠液、稀 泥浆、原油等流量的测量有明显的适用性。但由于 散射粒子或气泡是随机存在的,流体传声性能在压 力、粘度、温度、密度及导电率等因素的影响下也有 明显差别。如果是测量传声性能差的流体,则在近 管壁的低流速区散射较强;而测量传声性能好的流 体在高流速区散射占优势,这就使得多普勒回波信 号频率将占据一定的频带宽度,频率成分具有复杂 性。超声回波信号频差的获取方法直接影响着测量 精度。因此,研究多普勒回波频移提取方法对提高 超声多普勒的测量精度有着重要的意义。

多普勒回波频移提取的数字鉴频法对输入的 响应速度快、反映流速的实时性强,但只能针对单 一频率的信号进行频偏提取;直接以DSP硬件为核 心的系统对复杂多普勒回波信号进行快速傅里叶 变换(FFT),便于获得多频率混合信号的频谱频差, 但需要进行复杂的FFT运算和通过适当的计算以 功率为权值从多频混合信号获得平均频率值,运算 量大、不利于增强流速信息实时性。

本文针对已开发的一种基于FPGA与DSP构 架的流量测量系统(如图1)总结所依据的算法。该 系统在FFT信号分析的基础上设计了滤波放大电 路、波形/电压变换电路,使之输出与波形相关的直 流电压,通过此电压控制压控振荡器产生一种平均 频率信号,结合数字鉴频法进行频偏提取,避免了 用DSP处理多频率混合流速信号所带来运算量大 的问题,在一定程度上提高了流速信息实时性。



图1 流量测量系统结构框图

Fig. 1 Flow measurement system block diagram

2 多普勒频移及其流速测量原理

多普勒效应的频率关系为

$$f_1 = \left(\frac{v \pm v_0}{v \mp v_s}\right) f,\tag{1}$$

其中, f₁为观察频率; f 为发射源在介质中的原始频 率; v 为波在该介质中的传播速度; v₀为观察者移动 速度, 若接近发射源则前方运算符号为+号, 反之 则为-号; v_s 为发射源移动速度, 若接近观察者则 前方运算符号为-号, 反之则为+号。 现以超声波束在流体中粒子上的散射为例(如 图2),寻找声波多普勒频移与流速之间的关系^[1]。 若波束以速度v传播时遇到以速度u沿输液管轴线 运动的散射颗粒,该粒子相对于超声波发射器则以 ucosα速度远离而去,所以,作用在粒子的超声波 频率因多普勒效应而低于发射频率f,因为固定在 管壁上的发射源静止不动,结合式(1)可得反映在 粒子上的超声波频率为

$$f' = \left(\frac{v - u\cos\alpha}{v}\right)f.$$
 (2)



图2 流体中的声波散射示意图

Fig. 2 Schematic of sound dispersion in flowing fluid

而后固体粒子又将超声波束散射给接收器,散 射粒子仍是以*u* cos α 的速度远离接收器,因而接收 器收到超声波的频率将再次降低,则接收到超声波 的频率为

$$f_1 = \left(\frac{v}{v+u\cos\alpha}\right)f' = \left(\frac{v-u\cos\alpha}{v+u\cos\alpha}\right)f, \quad (3)$$

于是,得到多普勒频移:

$$\Delta f = f - f_1 = \frac{2u\cos\alpha}{v + u\cos\alpha}f,\tag{4}$$

进一步得流速:

$$u = \frac{\Delta f v}{2f \cos \alpha - \Delta f \cos \alpha},\tag{5}$$

若管道流通截面积为A时,则体积流量:

$$Q = \frac{Av}{2f\cos\alpha - \Delta f\cos\alpha}\Delta f.$$
 (6)

这种方法适用于单一频率回波的场合,但实际 中多普勒回波并非单一,很难用简单的办法求得 f₁。

3 多频回波的平均多普勒频移

3.1 平稳多频回波的平均频率

超声波接收探头接收到的信号是多个多普勒 频移成分和一些不确定因素引起随机杂波的叠 加^[2-3],探测到的信号形式可表示为

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) + r(t)$$

= $a_0 \cos(\omega_0 t + \phi_0)$
+ $\sum_{i=1}^n a_i \cos[(\omega_1)_i t + \phi_i] + r(t),$ (7)

其中, a_i 为回波分量的幅值、(ω_1)_i为回波分量的角 频率、 ϕ_i 为回波分量的相位、 ω_0 为发射信号的角频 率、 $s_1(t)$ 整体项为经管壁和衬里等非运动介质耦合 到接收探头的信号、r(t)为外界干扰及流态变化不 确定性的随机杂波。 由于管道各区域流速的差异以及换能器的影响,反射波不是单一波,而是不同距离、区域上反射 波的集合,频谱的中心、谱峰高低与位置具有一定 的随机性,所以采用功率谱求多普勒反射波的平均 频率^[4]:

$$\bar{f}_1 = \frac{\int_0^\infty f_1 \cdot p(f_1) \mathrm{d}f_1}{\int_0^\infty p(f_1) \mathrm{d}f_1},$$
(8)

其中, $p(f_1)$ 为功率谱、 f_1 为回波的平均频率。

3.2 平稳回波功率谱离散化处理及其平均频 率表达

为了便于数字技术实现需要对式(8)离散化。 其中,

$$p(\omega) = \int_0^\infty \left[\lim_{T \to \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) x(x+\tau) dt \right]$$
$$\times e^{-j\omega\tau} d\tau.$$
(9)

根据傅立叶变换的性质,将自相关函数中*x*(*t*) 变换到频域,得

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega\tau} dT.$$
 (10)

在一定的时域区间进行采样,将模拟信号变 为数字信号(序列),然后进行离散时间傅里叶变换 (DTFT)^[5]得

$$X(K) = \sum_{n}^{N-1} x(n) e^{-jK2\pi n/N}.$$
 (11)

由式(10)、式(11)得

$$p(K) = |X(K)|^2 / N,$$
 (12)

$$f_1 = \frac{\sum_{K=0}^{N-1} \frac{K f_1(K)}{N} p(K)}{\sum_{K=0}^{N-1} p(K)}.$$
 (13)

3.3 平均频率信号的产生

超声波发射探头输出信号频率设定为40 kHz, 接收探头得到相对微弱且含有多普勒频移和干扰 杂波的信号,其频率仍在40 kHz左右,为了取得平 均频率信号采用如图1虚线框内的电路来实现,具 体电路如图3。



图3 平均频率信号产生电路原理图

Fig. 3 Schematics of average frequency signal generating circuit

其中,滤波与放大部分以CX20106A核心(其 内部电路如图3(a),适应频率为38 kHz~42 kHz), 是为滤除振动谐波等干扰杂波、放大微弱回波而设 置的。该电路把不规则的波形变化为占空比有别的 矩形波。

波形/电压变换部分由LM331组成,如图3(b), 输出电压与输入信号波形和频率相关,它将根据回 波频率分量幅度大小把波形转变为0~10 V之间的 直流电压,此电压用于控制VCO。

由AD654结合外围电路组成带温度补偿的 VCO,如图3(c),它受控输出单一频率信号,此单一 频率信号通过放大电路增益调节使之具有平均频 率属性。其输出频率为

$$f_{\rm o} = \frac{V_{\rm o2}}{10(R_{11} + R_{12})C_V},\tag{14}$$

其中, C_V 代表变容二极管NTE618和两个0.01 μ F 电容共同决定的定时电容值,温敏电阻 R_t 与 R_{14} 为 变容二极管的偏置电阻,它们各自大小变化能够影 响输出频率。 调试时,以三角波为对象,其傅里叶展开形式为

$$s(t) = \frac{A}{2} + \frac{4A}{\pi^2} \Big(\cos 2\pi f t + \frac{1}{3^2} \cos 6\pi f t \\ + \frac{1}{5^2} \cos 10\pi f t + \cdots \Big) \\ = \frac{A}{2} + \frac{4A}{\pi^2} \Big(\cos 2\pi f_1 t + \frac{1}{3^2} \cos 2\pi f_3 t \\ + \frac{1}{5^2} \cos 2\pi f_5 t + \cdots \Big).$$
(15)

为了便于原理性说明,在常温下(20°C通过调 节*R*₁₄,使VCO输出信号频率按各谐波幅度加权平 均进行输出。只考虑傅里叶展开式前5项,应满足:

$$f_{\rm o} = \frac{\sum_{n=1}^{5} \left[\frac{4A}{(2n-1)^2 \pi^2} \right]^2 f_{(2n-1)}}{\sum_{n=1}^{5} \left[\frac{4A}{(2n-1)^2 \pi^2} \right]^2}.$$
 (16)

由于温敏电阻 R_t 紧贴管道壁,流体温度变化使 温敏电阻 R_t 微小改变,因此,测量系统具有一定的 温度补偿功能。

4 多普勒回波频移的数字鉴频法提取

数字鉴频法首先通过数字鉴相器得到相差信息,再由相差微分获取多普勒回波频移。其中,数字鉴相器由FPGA硬件电路实现、相差微分由DSP中软件算法实现。数字鉴频法的原理如图4所示。

图4中,*S*(*t*) 是VCO输出信号,在频率为*f_S*的 开关信号作用下采样回波后进行A/D变换,再以数 控振荡器 (DCO)产生正交本振信号,与量化的回波 数字信号进行混频,经由数字低通滤波器 (DLPF) 获得下边频,并作降采样处理,这样便实现了数字信 号的正交检波,从而得到相互正交的两个零中频信 号*S_I*、*S_Q*,最后通过鉴相 (DPD) 和微分环节获取差 频⁶。

假设超声波回波模拟信号为

$$S(t) = \cos(\omega_0 + \Delta\omega)t, \qquad (17)$$

$$S_n = \cos(\omega_0 + \Delta\omega)nT_s, \tag{18}$$

式(18)中, $\Delta \omega$ 是回波频率与超声波发射角频率之差; T_s 为采样间隔。DCO产生信号为

$$S_{0n} = \exp(-j\omega_0 nT_s). \tag{19}$$

经过数字式混频、下变频滤波和降采样抽取之 后,差频信号为

$$S_{In} = \downarrow R \{ \text{DLPF} [S_n R_e (S_{0n})] \}$$

= $\frac{1}{2} \cos (\Delta \omega_n T_{\text{sout}}),$ (20)

$$S_{Qn} = \downarrow R \{ \text{DLPF} [S_n I_m (S_{0n})] \}$$

= $\frac{1}{2} \sin (\Delta \omega_n T_{\text{sout}}).$ (21)

其中, $\downarrow R$ 为R倍抽取的降采样抽取率、 T_{sout} 是输出 差频信号的抽取时间间隔, $T_{\text{sout}} = T_s R$ 。



图 4 多普勒回波频移的数字鉴别原理图

Fig. 4 Echo-screen digital identification schematics of Doppler shift

因此,瞬时相位为^[7]

$$\theta_n = \arctan\left(\frac{S_{Qn}}{S_{In}}\right).$$
(22)

瞬时相位 θ_n 与经过D倍的 T_{sout} 之相位 θ_{n-D} 的差值为

$$\Delta \theta = \theta_n - \theta_{n-D},\tag{23}$$

可近似认为此相位差与相位数据间的时间间隔之 比为相位关于时间的微分,此微分值就是频率的偏 移值,即:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\theta(\mathrm{rad})}{\Delta t}$$
$$= \frac{1}{2\pi} \cdot K \cdot \frac{\Delta\theta}{DT_{\mathrm{sout}}}$$
$$= \frac{1}{2\pi} \cdot K \cdot \frac{\Delta\theta}{D} \cdot f_{\mathrm{sout}}, \qquad (24)$$

式 (24) 中, K为相位斜率, 它由鉴相输出的相位码 位数 N 决定, 二者之间满足关系: $K = 2\pi/2^N$, 单 位为rad/LSB。它反映了最小相位码代表弧度角; 相位码 $\Delta\theta$ 为有符号整数。于是,鉴频器的频率分 辨率为

$$\Delta f_{\min} = \frac{1}{2^N} \cdot \frac{1}{D} \cdot f_{\text{sout}}.$$
 (25)

可见,利用数字鉴相器和微分器将相差转变为 频差输出,频偏的提取精度与相位码的分辨率相关。

5 实验与讨论

5.1 实验与结果

实际用超声波进行流量测试时,其多普勒回波 信号的频率具有复杂性,产生的频移量可能来自不 同位置、运动方向和速度各不相同粒子的散射,采 用功率谱求多普勒频移散射波的平均频率实质上 是求流体平均速度。直接的FFT频偏DSP算法实 质是回波与发射波频谱位置的差值,其精度与带宽、 分辨率相关,在应用时需根据回波的带宽选择分辨 率、在精度与实时性之间合理折中。

系统最先采用直接DSP方法,即以DSP芯片 为核心用纯粹的软件先进行FFT、再按谱幅度加权 求平均频率、最后减去载波频率获得差频。

为了验证这种直接DSP方法所设计系统的性能,采用时差法流量测量计(TDS-100F,精度1%) 为标准仪表,以内径为70 mm铸铁圆管、原油污水 为流体介质进行了满管流量测量实验,所得数据如 表1。

表1 基于 FFT 的 DSP 软件算法的测量数据 Table 1 Measurement data based on software FFT algorithm in DSP

测量 序号	标准流量 (m ³ /h)	实测流量 (m ³ /h)	相对误差 (%)
1	26.08	23.78	8.88
2	26.48	23.84	9.93
3	32.25	30.59	5.15
4	37.34	40.46	-8.20
5	48.62	46.15	5.08

= 0	甘工汨ムナ汁的测具粉+	Ē
त र ∠	本丁混合力法的测单数1	沽

 Table 2 Measurement data based on com

 bined method

测量 序号	标准流量 (m ³ /h)	实测流量 (m ³ /h)	相对误差 (%)
1	24.08	24.69	2.53
2	25.52	26.12	2.35
3	34.25	33.76	1.43
4	35.34	36.01	1.9
5	44.1	44.56	1.04
6	45.96	46.32	0.78
7	53.67	53.12	1.02
8	58.82	59.51	1.17

由表1可见, 该方法测量的相对误差在 5%~10%之间变化,测量值与标准值之差有正有负。

然后,系统用硬件电路获得复杂回波多普勒频移的平均频率,实现了多频率回波到单一频率回波的折算,再将具有平均频率性质的回波作为数字鉴相器输入信号*S*(*t*),通过数字鉴频法输出差频,再依据式(6)由DSP计算出流体流量。

这种方法是以硬件电路的增加换取软件运行

时间,增强了系统的实时性,有利于提高测量精度。 在相同实验条件与环境下,测量结果如表2。

由表2可见,该测量系统获得数据的相对误差 在3%以内,但测量值均大于标准值,预示系统可能 存在一定的系统误差,可以通过校准消除。

5.2 误差来源分析

上述两种方法测量精度不同的原因主要来源 于两个方面:

(1) 实时性表明显示数据是否为当前流速计算 的流量。对于流速随机变化的流体,每次短时测量 结果存在差异,测量的实时性关系到即时流速的准 确性,从而影响测量精度。DSP计算速度慢于"硬件 提取信号+数字鉴频"输出的速度,这是导致精度 差异存在的原因之一。

(2) 在超声多普勒法流量测量系统中,测量精 度取决定于所获得频偏的准确性,而频偏准确性又 取决于代表平均速度的回波之平均频率。DSP的 FFT 算法对偶然因素造成的干扰非常敏感,即使选 用速度更快的DSP 来计算,实时性虽然得到改善但 也会在某些频点上会出现强干扰谱,从而影响到平 均频率;而用硬件提取平均频率信号,在滤波与波 形/电压变换环节中对强干扰进行滤除、至少可以 将干扰在回波的一个周期内进行平均处理,能够降 低对干扰的敏感度,使之对平均频率影响减弱。所 以,两种方法最终获得的频偏对干扰敏感程度是导 致精度差异另一个原因。

需要说明的是: 就方法而言, 获得了代表平均 频偏的直流电压可以用 ADC 直接获得频偏, 似乎 并不需要"VCO+ADC+数字鉴频"这样复杂的过 程, 然而, 流速测量与温度相关, VCO输出频率也与 温度相关, 所以, 为了方便温度补偿, 引入含 VCO 这 样较为复杂的电路结构。

6 结论

本研究介绍了两种超声波多普勒频移提取的 基本算法——直接DSP的FFT算法和"基于硬件 生成平均频率信号与数字鉴频相结合"的混合方 法。用直接DSP的FFT算法设计的流量测量系 统因受实时性和不确定性干扰的影响而精度在 5%~10%之间变化;而基于FFT分析的硬件获得多 普勒混杂回波的平均频率信号,并以此信号作为输 入、利用数字鉴频法提取多普勒频率偏移值。在此基础上研发了超声波流速检测系统,并对原油污水进行了满管流量测量实验,这种混合频率偏移值提取算法获得复杂流体满管流量的测量精度在3%以内,从而说明混合法对提高复杂流体满管流量测量精度的有效性。

参考文献

- 张占团,李志宾. LCZ803DF 系列数字式多普勒超声流量计的研究与应用 [J]. 选煤技术, 2009, (6): 66-68.
 ZHANG Zhantuan, LI Zhibin. Research and application of LCZ803DF series digital doppler ultrasonic flowmeter[J]. Coal Preparation Technology, 2009, (6): 66-68.
- [2] 伍昕,刘岩,何耀,等.选带细化超声流量计试验分析 [J]. 仪 表技术与传感器, 2006, (6): 17-18.
 WU Xin, LIU Yan, HE Yao, et al. Application of ZOOM-FFT technology in ultrasonic flow measurement[J]. Instrument Technique and Sensor, 2006, (6): 17-18.
- [3] 黄雄飞,苑秉成,陈喜.宽带多普勒声纳信号频谱特性分析[J].
 应用声学,2009,28(4):278-282.

HUANG Xiongfei, YUAN Bingcheng, CHEN Xi. Spectrum characteristics of signal in broad-band Doppler sonar[J]. Applied Acoustics, 2009, 28(4): 278–282.

- [4] 邱立存,王汝琳.采用频谱分析技术的多普勒超声波流量计的研究 [J]. 微计算机信息, 2006, 22(13): 181–182.
 QIU Licun, WANG Rulin. Research of ultrasonic doppler flowmeter with spectrum analysis technique[J]. Microcomputer Information, 2006, 22(13): 181–182.
- [5] 李文臣,王雪松,王国玉. Radon-Wigner 变换法加速目标多 普勒回波提取 [J]. 无线电工程, 2009, 39(7): 11–13.
 LI Wenchen, WANG Xuesong, WANG Guoyu. Doppler echo extraction of accelerated target based on Radon-Wigner transform[J]. Radio Engineering, 2009, 39(7): 11–13.
- [6] 梁士龙. 数字鉴频器的原理与应用 [J]. 制导与引信, 2003, 24(1): 9-12, 32.

LIANG Shilong. The principle and application of digital frequency discriminator[J]. Guidance & Fuze, 2003, 24(1): 9–12, 32.

[7] 李刚,周梅,何峰,等.基于数字锁相相关计算结构的优化算法 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 744-748.
LI Gang, ZHOU Mei, HE Feng, et al. An optimization algorithm based on computation structure of correlation in digital lock-in detection[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(3): 744-748.