

# 超声Doppler血流信号瞬时频率的研究

汪源源 王威琪

(复旦大学电子工程系 上海·200433)

本文介绍了利用超声Doppler血流信号瞬时频率估计其平均频率的方法,通过计算机模拟实验和物理流速校刻实验,对比了频谱法、时间域法和瞬时频率法估计超声Doppler血流信号平均频率的精度,指出了瞬时频率法的优点和局限性。

## Research of instantaneous frequency for Doppler ultrasound flow signals

Wang Yuanyuan Wang Weiqi

(Department of electronic engineering Fudan University)

The method to estimate the mean frequency of Doppler ultrasound flow signals with instantaneous frequency is described in this paper. The estimation accuracy of spectrum method, time-domain method and instantaneous frequency method are compared by computer simulation experiments and physical velocity experiments. The virtue and limitation of instantaneous frequency method are also pointed out.

### 1 引言

超声Doppler技术自本世纪60年代出现以来,已成为医学临床的一种重要诊断方法。超声Doppler信息的输出形式通常有音频Doppler声、(单值)曲线、声谱图和(结合B型超声)成像等。音频Doppler声虽属最原始的形式,但对超声探头是否对准检测部位可起监视作用;声谱图则可实时显示血流速度的分布和变化情况;曲线法以平均频率或最大频率的形式提供整体、客观的信息,使用便利,对硬件设备的要求也不高,是超声

Doppler 技术的一个重要方面。

超声Doppler信号平均频率的估计有许多种方法,如过零检测法、频谱分析法、时域法等等,我们也曾用计算机模拟和血流校刻装置对它们的估计精度作了初步的研究<sup>[1][2]</sup>。为了进一步研究平均频率的估计方法,本文先介绍超声Doppler信号的瞬时频率及利用它估计信号平均频率的方法,然后通过计算机模拟、血流校刻装置的实验,分析利用瞬时频率估计超声Doppler血流信号平均频率的精度问题。

---

收稿日期: 93-7-5; 修回日期: 93-8-11

## 2 超声 Doppler 血流信号的瞬时频率

超声 Doppler 血流信号是窄带信号，可以记成：

$$e(t) = A(t)\cos(\omega_0 t + \theta(t)) \\ = R \cdot \left[ \tilde{A}(t)e^{j\omega_0 t} \right] \quad (1)$$

其中  $\omega_0$  是超声发射的角频率，而  $\tilde{A}(t)$  为：

$$\tilde{A}(t) = A(t)e^{j\theta(t)} = I(t) + jQ(t) \quad (2)$$

因此超声 Doppler 血流信号的瞬时相位可写成：

$$\theta(t) = \text{arctg} \left[ \frac{Q(t)}{I(t)} \right] \quad (3)$$

那么  $\theta(t)$  的微分就是信号相位的变化率，即信号的瞬时角频率。因此信号的瞬时频率为：

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \\ = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left[ \text{arctg} \frac{Q(t)}{I(t)} \right] \\ = \frac{I(t)\dot{Q}(t) - Q(t)\dot{I}(t)}{2\pi[I^2(t) + Q^2(t)]} \quad (4)$$

由于超声 Doppler 血流信号在短时间  $t$  ( $t \in [0, T]$ ) 可以被当作是准广义平稳的随机信号<sup>[3]</sup> (时间  $T$  通常取 10ms)。设采样频率为  $f_s$ ，那么 10ms 内  $I(t)$  和  $Q(t)$  分别有  $N$  ( $N = f_s \cdot T$ ) 点，则超声 Doppler 血流信号在这段时间内的平均频率为：

$$\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f(i) \\ = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{I(i)\dot{Q}(i) - Q(i)\dot{I}(i)}{2\pi[I^2(i) + Q^2(i)]} \quad (5)$$

这就是利用瞬时频率法估计超声 Doppler 血流信号平均频率的公式。(5) 式还可以化为差分形式：

$$\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f(i) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{I(i-1)Q(i) - I(i)Q(i-1)}{2\pi[I^2(i) + Q^2(i)]} \cdot f_s \quad (6)$$

## 3 计算机模拟实验及结果

由于超声 Doppler 血流信号在短时间  $T$  内是准广义平稳的随机信号，假设其最大频偏为  $f_{max}$ ，则计算机合成的 Doppler 信号可以写成<sup>[3]</sup>：

$$x(t) \approx \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m t + \phi_m) \quad (7)$$

其中， $f_m = (m - \frac{1}{2})\Delta f$ ， $a_m = \sqrt{2S(f_m)\Delta f y_m}$ ，

$\Delta f = f_{max}/M$ ， $S(f_m)$  为信号的功率谱密度， $y_m$ 、 $\phi_m$  为随机变量， $M$  的选取应满足条件：

$M \gg T \cdot f_{max}$ 。按照这种模型，当我们已知血管中血流速度剖面  $V(r)$

$$= V_{max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^p \right] \quad (R \text{ 为血管半径})$$

的参数  $P$ ，就可先求出 Doppler 信号的功率谱密度  $S(f)$ ，从而在计算机上模拟出相应的超声 Doppler 血流信号<sup>[4]</sup>。

这样模拟产生的超声 Doppler 血流信号  $x(t)$  可被看作是 (2) 式中的  $I(t)$ ，那么  $Q(t)$  为：

$$Q(t) = \sum_{m=1}^M a_m \sin(2\pi f_m t + \phi_m) \quad (8)$$

于是， $I(t)$  和  $Q(t)$  的微分分别为：

$$\begin{aligned} \dot{I}(t) &= -2\pi \sum_{m=1}^M a_m f_m \sin(2\pi f_m t + \phi_m) \\ \dot{Q}(t) &= 2\pi \sum_{m=1}^M a_m f_m \cos(2\pi f_m t + \phi_m) \end{aligned} \quad (9)$$

利用(5)式和(6)式,分别可以得出连续方式和离散方式下利用瞬时频率估计出的信号的平均频率值。

我们还求出这段时间内,两种方式下所得的瞬时频率(分别利用(4)式和它的差分形式)振幅的频度分布图。为作比较,同时计算利用频谱分析法(FFT)得到的信号 $I(t) + jQ(t)$ 的功率谱密度,把它与两种方式下所得的瞬时频率振幅的频度分布图加以对照。

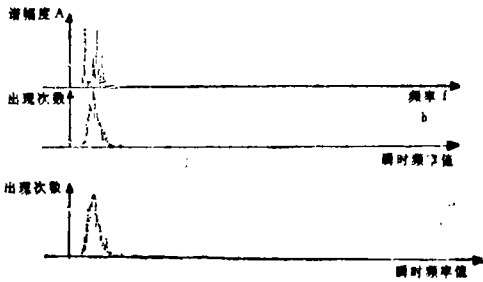


图1 模拟Doppler信号功率谱和瞬时频率振幅频度分布图

图1 a、b、c 分别为对速度剖面参数 $p=2$ ,  $V_{max}=80\text{cm/s}$ 时的模拟Doppler血流信号求得的功率谱密度和连续、离散两种方式下求出的瞬时频率的振幅频度分布图。

可见,利用FFT所得的超声Doppler血流信号的功率谱密度曲线起伏比较大,而两种方法所得的瞬时频率振幅的频度分布图比较光滑,而且基本上为血流信号功率谱密度的包络线,只在大于 $f_{max}$ 的频段上略有误差。瞬时频率振幅的频度分布图和信号的功率谱密度间的关系尚待进一步的研究,但至少已说明:在精度要求不高但又需实时计算信号的功率谱密度时,可以用瞬时频率振幅的频度分布图代替FFT计算信号的功率谱密度,因为前者的计算量相对要少得多。

为了比较瞬时频率所得信号的平均频率的精度,我们用频谱法得出信号的平均频率,并把它作为标准。超声Doppler血流信号平均频率为:

$$\bar{f} = \frac{\int fS(f)df}{\int S(f)df} \quad (10)$$

同时,我们也将时间域法估计的超声Doppler血流信号的平均频率<sup>[5]</sup>列出来作为比较。利用时间域法估计超声Doppler血流信号平均频率的连续形式和离散形式分别为:

$$\bar{f} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \dot{I}(i) \dot{Q}(i) - \sum_{i=0}^{N-1} \dot{I}(i) Q(i)}{\sum_{i=0}^{N-1} [I^2(i) + Q^2(i)]} \quad (11)$$

$$\bar{f} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sum_{i=0}^{N-1} Q(i) I(i-1) - \sum_{i=0}^{N-1} I(i) Q(i-1)}{\sum_{i=0}^{N-1} [I^2(i) + Q^2(i)]} \cdot f_s \quad (12)$$

表1分别为这几种方法分析 $f_s=50\text{kHz}$ ,  $f_{max}=7.8\text{kHz}$ 不同速度剖面参数 $p$ 的模拟Doppler信号平均频率的结果。

可见,利用(5)式和(11)式估计的平均

频率值和频谱法所得的平均频率精度大致相同,但利用(6)式和(12)式估计的平均频率,其误差随 $p$ 增大而增大。这是因为 $p$ 增大,模拟Doppler血流信号中的高频成分加重,低

表 1 不同速度剖面参数下模拟Dopper信号的平均频率

速度剖面参数 P	(10)式得	(5)式		(6式)		(11)式		(12)式	
	$\bar{f}$ (kHz)	$\bar{f}$ (kHz)	误差(%)	$\bar{f}$ (kHz)	误差(%)	$\bar{f}$ (kHz)	误差(%)	$\bar{f}$ (kHz)	误差(%)
2	3.970	4.0570	2.20	3.743	- 5.7	3.976	0.15	3.659	-7.83
3	4.750	4.7515	0.04	4.306	- 9.3	4.757	0.15	4.302	-9.42
4	5.208	5.0000	-3.99	4.573	-12.2	5.214	0.12	4.671	-10.3
10	6.070	5.9896	-0.10	4.992	-17.7	6.074	0.07	5.351	-11.9
100	6.540	6.476	-1.56	5.455	-16.6	6.654	0.04	5.713	-12.6

频成分减轻，而高频部分频率越靠近采样频率 $f_s$ ，那么利用差分方式代替微分方式而引入的误差也必然越大。

为作进一步模拟实验的比较，我们将 $f_{max}$ 从0.649kHz变化到23.376kHz，保持速度剖面参数 $p=2$ 不变，表2为各种方法下所得的模拟Dopper信号平均频率的结果。

可见各种情况下，利用(5)式和(11)式

所得的平均频率的精度都是比较高的，这就说明利用(5)式(即瞬时频率估计法)得到信号的平均频率是可行的。但是利用(6)式和(12)式所得的平均频率误差随 $f_{max}$ 的增大从很小变至很大，这说明当 $f_{max}$ 变大时，用差分形式代替微分形式存在一定的误差。因此在利用(6)式和(12)式求信号的平均频率时，应该保证： $f_{max}/f_s$ 比较小，如小于0.1。

表 2 不同 $f_{max}$ 下模拟Dopper信号的平均频率

$f_{max}$	$f_{max}/f_s$	(10)式得	(5)式		(6)式		(11)式		(12)式	
		$\bar{f}$ (kHz)	$\bar{f}$ (kHz)	%	$\bar{f}$ (kHz)	%	$\bar{f}$ (kHz)	%	$\bar{f}$ (kHz)	%
0.649	0.013	0.4586	0.4432	-3.2	0.4437	-3.25	0.4407	-3.9	0.4411	-3.8
1.299	0.026	0.6904	0.7040	1.0	0.7022	1.00	0.6689	-3.1	0.6672	-3.4
1.948	0.039	1.084	1.1380	4.0	1.1355	4.00	1.0738	-0.9	1.068	-1.5
2.598	0.052	1.435	1.4627	3.0	1.4588	3.00	1.430	-0.3	1.418	-1.1
5.195	0.104	2.591	2.649	1.0	2.6702	3.05	2.579	-0.5	2.488	-4.0
10.39	0.208	5.384	5.4268	0.8	4.7699	-11.4	5.386	0.02	4.650	-13.6
15.58	0.312	7.732	7.708	-0.3	5.667	-26.7	7.719	-0.16	5.520	-28.6
23.38	0.468	11.02	11.14	-4.1	5.371	-53.8	11.61	-0.11	5.289	-54.5

#### 4 血流校刻装置的实验及其结果

我们采用流速校刻装置进行实验，其装置如图2所示。

在塑料管中流动的是一种仿血液，当泵

声学技术

以恒定的速度旋转时，液体也以一定的流速在管道中流动。通过度量单位时间流到量杯中的液体体积和塑料管的管径 $d$ ，可以根据

流量 $Q = \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 \bar{V}$ ，得出平均流速 $\bar{V}$ 。

$= \frac{Q}{\pi \left( \frac{d}{2} \right)^2}$ 。由于 $f_d = \frac{2f_0 \cos \theta}{c} \bar{V}$ ，因

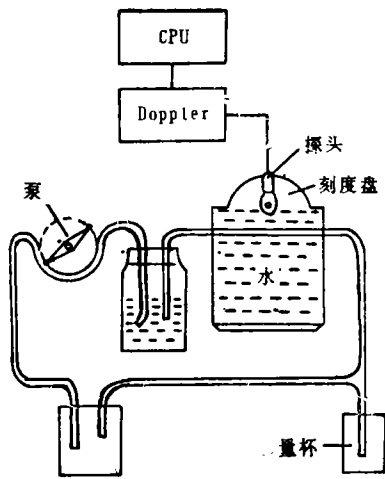


图2 血流校刻装置实验示意图

A/D采集仿血流的Doppler信号，可以通过FFT计算信号的功率谱密度 $S(f)$ ，根据(10)式可得出频谱法估计的平均频率。

由于采样到的Doppler信号可以被看作是 $I(t)$ ，为了得到与其正交的信号 $Q(t)$ ，我们采用希尔伯特变换，或以如下步骤：①对已计算的 $I(t)$ 的频谱 $F(\omega)$ 进行处理，当 $\omega > 0$ 时，令 $F_1(\omega) = 2F(\omega)$ ；当 $\omega < 0$ 时，令 $F_1(\omega) = 0$ 。②对 $F_1(\omega)$ 求反FFT，求出 $I(t) + jQ(t)$ 。当我们得出 $Q(t)$ 以后，便可利用(6)式和(12)式得出两种方法下估计的信号的平均频率。表3是采样频率分别为25.6 kHz和10 kHz时的情况（表中“/”表示实验中未对信号采样）。

此可以得出信号的平均频率值。CPU控制

表3 两种采样频率超声Doppler信号平均频率结果

物理得 $\bar{f}$ (kHz)	(10)式		$f_s = 25.6 \text{ kHz}$				$f_s = 10 \text{ kHz}$			
	$\bar{f}$ (kHz)	误差%	(6)式		(12)式		(6)式		(12)式	
			$\bar{f}$ (kHz)	%	$\bar{f}$ (kHz)	%	$\bar{f}$ (kHz)	%	$\bar{f}$ (kHz)	%
0.34	0.3404	0.1	0.3172	-6.7	0.3178	-6.5	0.3179	-6.5	0.3130	-7.9
0.56	0.5681	1.4	0.5299	-5.4	0.5318	-5.0	/	/	/	/
0.48	0.4823	0.5	/	/	/	/	0.4683	-2.4	0.4687	-2.4
0.89	0.9362	2.0	/	/	/	/	0.8394	-5.7	0.8349	-6.2
0.93	0.9074	0.7	0.9219	-0.8	0.9079	-2.4	/	/	/	/
1.48	1.4963	1.1	1.3853	-6.4	1.4099	-4.7	/	/	/	/
1.52	1.5460	1.7	/	/	/	/	1.1761	-22.6	1.1887	-21.8
1.84	1.8803	2.2	1.7524	-4.8	1.7507	-4.9	1.2176	-33.8	1.2398	-32.6
2.56	2.5820	0.9	2.2355	-12.7	2.2539	-12.0	1.0036	-60.8	0.9989	-61.0

可见，当流速比较低时，瞬时频率法得出平均频率精度较高；而当流速比较高时，尤其可与采样频率 $f_s$ 可比拟时，误差比较大。这就进一步说明以差分形式代替微分形式引入的误差。因此，利用瞬时频率离散公式求信号的平均频率有一定的限制。

因此，利用瞬时频率法求超声 Doppler 血流信号的平均频率，计算量少，但也有限制：当信号最高频率远小于采样频率时，精

度较高，否则精度并不理想。另外，在精度要求不太高的场合下，利用瞬时频率的振幅频度分布图还可以进行信号频谱的分析，因为这样的计算量少，可满足实时分析的需要。我们已进行了初步的实验工作，但理论上的严格论证有待进一步的研究。

### 参考文献

1. 汪源源等. 超声 Doppler 血流信号平均频率

## 13th ISNA 在挪威举行

第十三届国际非线性声学会议(简称13th ISNA)于1993年6月28日至7月2日在挪威的卑尔根市(Bergen)举行,这次会议的组织工作由卑尔根大学物理系承担。参加这次会议的学者来自14个国家和地区共128人。会上共宣读了论文108篇,其中特邀报告5篇,内容包括有热粘滞介质中的声传播,冲击波,参量阵,非线性参量、聚焦声束及在医学

中应用,声空化,固体中的波,声流与辐射压力,色散介质中的波、孤子和混沌等方面。会议期间与会代表受到卑尔根市政府的接见。经非线性声学国际顾问委员会讨论,定于1996年将在中国南京举行第十四届国际非线性声学会议(14th ISNA)。

南京大学声学研究所  
龚秀芬

## 全国水声学学术会议在宜昌召开

由中国声学学会水声学分会等6个学会(网)联合举办的1993年全国水声学学术会议于1993年11月13日至17日在湖北省宜昌市召开。已收到水声物理、水声工程、信号处理、噪声、换能器及声系统等各方面的论文共168篇。会议将组织神经网络技术在水声中的应用、船舶噪声、声基阵和海洋观测技术等四个专题讨论会,邀请有关专家报告各该领域中的最新进展并组织与会代表进行讨论。可以预言这次会议将是我国水声界在市场经济的大潮中检阅硕果,展望前景的一次盛会,我们预祝大会圆满成功。

本刊讯

## 第六届全国噪声振动控制工程学术会议在合肥召开

第六届全国噪声振动控制工程学术会议于1993年10月18日至22日在合肥工业大学召开,这次会议是由中国声学学会环境声学分会等五家学会联合组织召开的,来自全国各地的近百名代表出席了这次学术会议,会上共交流了67篇论文报告,显示了我国近三年来在噪声与振动控制技术科研设计方面的新成果、新进展和新水平。中国科学院学部委员、著名声学专家马大猷教授也亲自到会,并结合'93比利时国际噪声控制工程学术会议作了“国外噪声振动控制技术新进展”的大会特邀报告,受到全体代表的欢迎。

会议期间还召开了噪声与振动控制新仪器、新产品、新材料的信息发布会及展示活动,20多家公司、企业参加了交流活动,引起与会代表的很大兴趣,表明了我国噪声振动控制设备及测试分析仪器无论在品种、规模还是质量方面都上了一个新的台阶,取得了长足的进步。

这次学术会议在合肥工业大学的大力支持下开得圆满成功,预定在1996年召开第七届学术会议

(章奎生)

时间域估计的计算机模拟. 复旦大学学报(自然科学版), 1993, 32(2):181~186.

2. 汪源源等. 超声Doppler血流信号平均频率估计和实验分析. 中国医疗器械杂志, 1992, 16(5): 271~274.

3. Mo L, et al. "Speckle" in continuous wave Doppler ultrasound spectra; a simu-

lation study. IEEE trans. on ultrasonic, 1986, 33(6):747~752.

4. 汪源源等. 超声多普勒信号的计算机模拟. 复旦大学学报(自然科学版), 1992, 31(4):461~467.

5. 王威琪. 超声Doppler平均频率估计. 中国医疗器械杂志, 1988, 12(1):1~5.