

利用时-空变换的调制光栅对人体 多普勒血流信号进行频谱分析*

应萱同 陈惠芬 赵焕卿 贾玉润
(复旦大学物理系)

叶 国 凡
(复旦大学电子工程系)

提 要

本文报道了一种利用时-空变换振幅调制型光栅对人体多普勒血流信号进行频谱分析的方法。实验结果与理论分析相符合。本方法具有快速、多通道平行处理、大容量、设备紧凑的优点。

一、引 言

多普勒超声血流仪^[1]是一种非接触式测量人体血管中血流特性的仪器。超声解调后获得的多普勒血流信号是一个时间信号,其频率与血流速度成正比。利用光学傅里叶变换方法可以完成时间信号的频谱分析,它具有如下优点:1)具有平行输入、输出傅里叶频谱分析的能力;2)可能获得实时显示的频谱分析结果;3)信息容量大;4)设备简单、紧凑。因此,利用光学傅里叶变换方法进行时间信号的频谱分析是一种十分吸引人的方法。关键的问题是如何把时间信号无畸变地变换成光学空间信号,即如何获得一种时-空线性变换元件。

通常采用 CRT 栅极辉度调制法^[2]或计算机绘图面积调制法来进行此种时-空线性变换,但制作手续复杂,空间分辨率低,灰阶小,分析结果不够精确。

我们利用激光扫描系统^[3~4],根据接收到的人体血流信号,直接在全息照相底片上曝光,在很短的时间内,即可获得一种高分辨率、多灰阶、大容量的时-空线性变换振幅调制型光栅,制作手续简单。

二、原理及实验装置

设有一时间信号函数 $f(t)$, 时间采样间隔是 Δt , 我们欲把 $f(t)$ 通过时-空变换调制光栅线性地变换成空间信号函数 $f(x)$, 空间采样间隔是 Δx , 则两函数之间的坐标变换关系为:

$$x = t \Delta x / \Delta t. \quad (1)$$

收稿日期: 1983年11月10日; 收到修改稿日期: 1984年2月20日

* 本文曾在'83国际激光会议(中国,广州)上宣读。

频率转换关系为:

$$f_t = p \Delta x / \Delta t = x_f \Delta x / \lambda f \Delta t, \quad (2)$$

式中 p 为空间频率, $p = x_f / \lambda f$, λ 为光学频谱分析系统中使用的光源波长, f 为傅里叶变换透镜的焦距, x_f 为频率平面上坐标。

通过事先存储在一微型计算机内的变换程序, 即可将一系列分离采样之 $f(t)$ 值, 变换成相应的曝光数据 T 值, 然后通过激光扫描系统, 在全息底片上扫描曝光。经过事先确定的严格控制的显影-定影手续, 以保持 γ 为一定值^[4], 便可在底片上获得一空间信号, 其振幅透过率函数为 $t_A(x)$, 信号 $t_A(x)$ 即是时间信号 $f(t)$ 的线性变换。

在一维多通道的时-空变换调制光栅的情况下, 令振幅透过率函数为 $g(x, y)$, 如图 1 所示:

$$g(x, y) = g(x)h(y) = \sum_{n=1}^N g'(x)h(y), \quad (3)$$

其中:

$$g'(x) = \text{rect}(x/w)g\{x + [w(2n-1)/2]\}, \quad (4)$$

$$h(y) = \text{rect}(y/l). \quad (5)$$

w 、 l 分别为时-空变换调制光栅的宽度和长度, N 为通道数。经过一维傅里叶变换的柱面透镜, 在后焦面上的振幅分布^[5]为:

$$Q(p, y) = K \sum_{n=1}^N \sin cwp \otimes G(p)h(y)\exp[j\phi(p)], \quad (6)$$

其中

$$\phi(p) = \pi p w (2n-1) \quad (7)$$

为相移因子, K 为一常数因子, \otimes 为卷积符号。当 $w \gg \Delta d / \Delta t f_{\min}$ 时, (f_{\min} 为带宽时间函数的最低频率)。 $\sin cwp$ 函数过渡为 $\delta(p)$ 函数。此时, $Q(p, y)$ 过渡为如下形式:

$$Q(p, y) \Rightarrow K \sum_{n=1}^N \delta(p) \otimes G(p)h(y)\exp[j\phi(p)] = K \sum_{n=1}^N G(p)h(y)\exp[j\phi(p)]. \quad (8)$$

在频谱平面测得的功率谱, 即光强分布函数为:

$$I(p, y) = K^2 |Q(p, y)|^2 = K^2 \sum_{n=1}^N |G(p)|^2 \cdot h^2(y). \quad (9)$$

由此可见: 若我们把时-空变换调制光栅插入到一维多通道频谱分析系统的输入平面, 在输出平面上, 得到的正是原时间信号在各相应通道内的功率谱。

作为实例, 计算一系列矩形脉冲的频谱分布, 对应于 (3) 式, 此时有:

$$g(x) = g'(x) = \text{rect}(x/w) \cdot [\text{comb}(x/b) \otimes \text{rect}(x/a)], \quad (10)$$

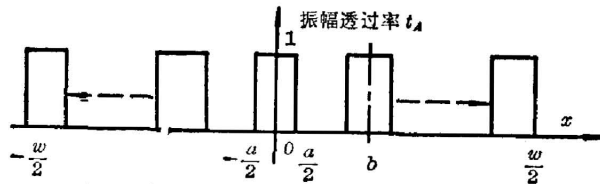


图 2 矩孔光栅示意图

Fig. 2 The schematic diagram of a rectangular grating

如图 2 所示。我们称之为矩孔光栅。上式中: b 为 comb 函数的采样间距, $b = 0.307 \text{ mm}$ 。 a 为矩孔函数的宽度, $a = 0.154 \text{ mm}$ 。 w 为矩孔函数列的长度, 即光栅宽度, $w = 2.46 \text{ mm}$ 。经

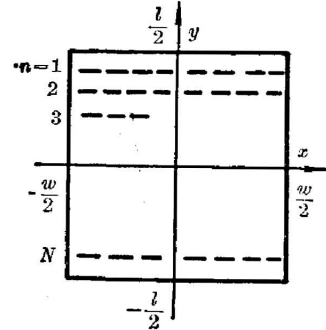


图 1 一维多通道时-空变换振幅调制光栅

Fig. 1 One dimension multi-channel time-spatial converting

过一维傅里叶变换, 因为 $w \gg \Delta d / \Delta t \cdot f_{\min}$, 根据公式(6)~(9), 其功率谱函数

$$I(p, y) = K^2 |G(p)|^2 h^2(y) = K^2 |\text{comb}(pb) \cdot \text{sinc}(pa)|^2 h^2(y) \\ = K^2 \left| \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{sinc}(na/b) \right|^2 h^2(y). \quad (11)$$

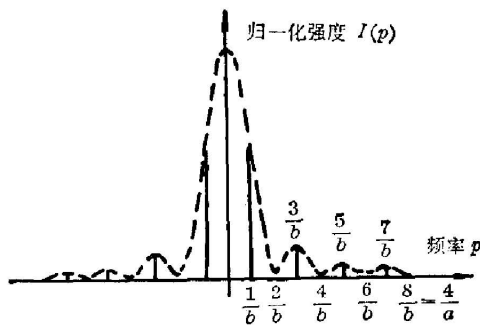


图3 矩孔光栅频谱图

Fig. 3 The spectrum of a rectangular grating

此即为 Ronchi 光栅的衍射光强分布, 如图3所示。它取一系列分立值, 计算结果列于表3。

图4是利用光学傅里叶变换方法进行人体多普勒血流信号的频谱分析系统的逻辑框图。

人体的多普勒血流信号, 在心动周期0.8s的时间内, 由一双向多普勒血流仪探测, 经过A/D变换, 数字化的血流信号输入到MIC-80微型计算机的内存空间, 该机监控一个激光扫描系统, 直接在全息照相底板上绘出一片振幅调制型的时-空变换光栅。将该光栅插入到一光学傅里叶变换系统的输入平面, 在其输出平面上就可以得到人体血流的总谱图及精细谱结构。图5是激光扫描系统的示意图。

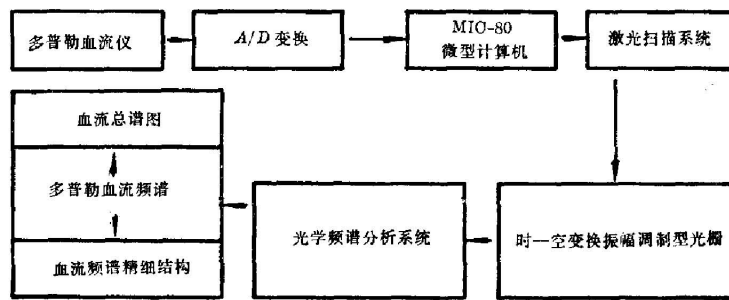


图4 系统框图

Fig. 4 The block diagram

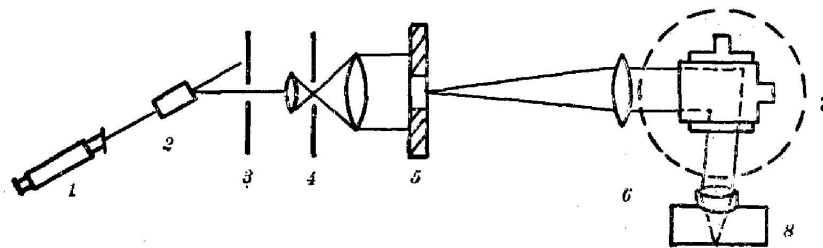


图5 激光扫描系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the laser beam scanner

He-Ne 激光器1的光束经针孔滤波器4滤波, 扩束后, 照明一个矩形物孔5。经过透镜6和照相机8的镜头, 在照相机的象平面上形成缩小的象, 该象就作为时-空变换光栅的采样元。MIC-80根据接收到的血流信号控制声光开关2, 使光束通过光阑3, 在各相应的采样元上进行底片振幅透过率调制。而整幅光栅是借助于两维转镜7在计算机监控下绘制的。最后, 在照相机的象平面上就可以获得一幅时-空变换调制光栅, 其性能如表1所示。

表 1 时-空变换调制光栅性能表

Table 1 Character of time-spatial modulated grating

空间分辨率	灰 级	空间带宽积*	尺 寸	制作时间
10/mm	256	256×256	2.5×10 mm ²	5 min

* 光栅的空间带宽积最高可达 1000×1000, 最大尺寸可达 15×15 mm, 相应的制作时间也需按平方律增长。

图 6 是一光学傅里叶频谱分析系统示意图。He-Ne 激光器 1 作为系统的光源, 2 是针孔滤波器, 5 是傅里叶变换透镜, 它的频率测量精度可达 0.15%。把时-空变换光栅 4 即 $q(x, y)$ 插入到该系统之输入平面 3 处, 在输出平面 6 处就可以获得人体血流信号的总谱图 $I(p, y)$ 。如果我们对其中某一通道频谱的精细结构感兴趣, 可以通过光纤 7 的扫描, 用光电倍增管 8 将谱信号接收, 然后通过绘图仪 9 绘制谱的精细结构曲线。

本系统的性能如表 2 所示。

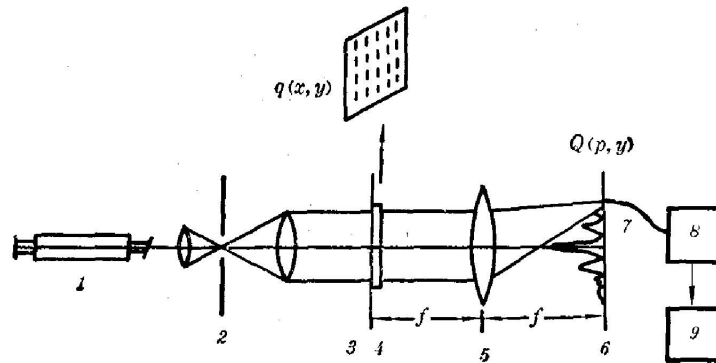


图 6 光学频谱分析系统

Fig. 6 Optical spectrum analysis system

表 2 本系统的性能表

Table 2 The capabilities of system

时 间 域		时 间 频 率 域		时 → 空 变 换 →	空 间 域		空 间 频 率 域	
采样率	12500/秒	带宽 (Hz)	200~6250		采样率	10 ⁵ /m	带 宽 (lines/mm)	0.8~25
每 通 道 采样间隔	20.48 ms	分辨率 (Hz)	15		每 通 道 采样间隔	2.56 mm	分 辨 率 (lines/mm)	0.06
采样周期	N × 20.48 ms	通道数	N ≤ 256		平 行 输 入 数据总数	N × 256	通 道 数	N ≤ 256
						功率谱动态 测量范围	10 ⁴ ~10 ⁵	

三、实验结果

在前文中, 我们已对矩孔光栅的频谱作过理论计算, 对该函数, 我们用本系统作了一维单通道频谱分析, 以验证系统的可靠性。实验实测数据与理论计算值均列于表 3, 两者符合

表 3 矩孔光栅的频谱

Table 3 The spectrum of the rectangular grating

频 谱 级 次	1	3	5	7
频率实测值 f (Hz)	395.1	1190.0	1990.4	2805.6
理论计算频率值 f_t (Hz)	398.9	1183.0	1994.9	2792.1
频率误差 $\Delta f = f_t - f$ (Hz)	3.8	-7.0	4.5	-13.5
归一化的强度实测值 I	1	0.10	0.03	0.01
归一化的理论计算强度值 I_t	1	0.11	0.04	0.02
强度误差 $\Delta I = I_t - I$		0.01	0.01	0.01

良好。

图 7 是用光电倍增管实测的矩孔光栅频谱图。

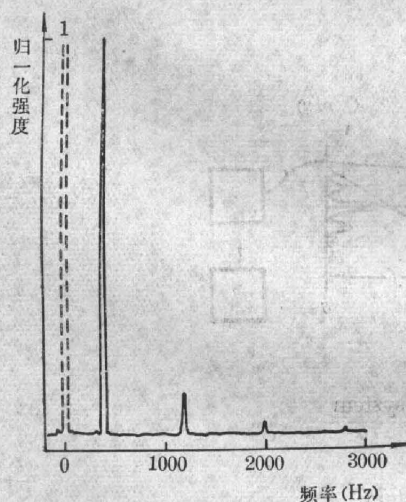


图 7 矩孔光栅的频谱

Fig. 7 Spectrum diagram of a rectangular grating

在进行人体多普勒血流信号的频谱分析时, 由于条件限制, 我们用一块二维傅里叶变换透镜来代替一维傅里叶变换柱面透镜, 每个通道的频谱分析都是借助于输入和输出平面上的狭缝光阑逐个通道独立完成的, 因此, 通道数 N 受到一定的限制, 我们取 $N=8$ 。

图 8 是一个一维八通道时-空变换调制光栅, 其上记录着一个正常人的心动周期前期的多普勒血流信号。图 9 是与图 8 多普勒血流信号相应的八通道总谱图。纵坐标为频率坐标, 定标可参考图 10。横坐标为通道坐标。从图 9 中可以看出每一通道内的功率谱的频率-强度分布是不同的。由此可以推知, 在不同的采样通道时间间隔内, 血流的综合平均速度是不同的。另外, 从总谱图中还可以看到一最高频率也即最高血流速度的包络线, 这个信息对于研究人体血管内血流的动力学特性是很有意义的。

对上述八通道总谱图中第八通道的血流频谱用一光电倍增管接收功率谱信号, 通过绘图仪直接绘制出它的精细结构曲线, 如图 10 所示。通过它可以求出具有不同流速的血流相对成分。



图 8 一维八通道时-空变换调制光栅

Fig. 8 One dimension 8 channels time-spatial modulated grating

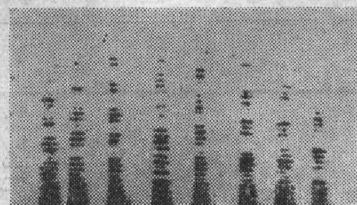


图 9 人体血流的八通道总谱图

Fig. 9 The 8 channels spectrogram of human blood flow

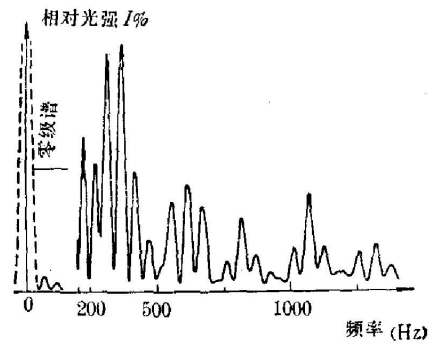


图 10 第八通道血流频谱的精细结构

Fig. 10 The fine spectrum structure curve of the blood flow signals in 8th channel

四、结 论

综上所述,我们已建立一套计算机-光学混合信息处理系统。本系统可用于时间或空间信号的频谱分析工作。利用本系统可以很方便地获得高分辨率、多灰阶、大容量的时-空变换元件。实验结果表明,用本系统测得的频谱分布与理论计算值是一致的。利用本系统,我们在人体多普勒血流信号的频谱分析方面作了一些初步的工作,获得了一幅正常人体多普勒血流的一维八通道总谱图,并对其中的某一通道绘出了相应的频谱精细结构曲线。

参 考 文 献

- [1] 叶国凡,王威琪;《医疗机械》,1982, 6, No. 1 (Jan), 8.
- [2] James O. Lin, et al.; *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1978, **BME-25**, No. 3 (May), 243.
- [3] S. H. Lee, J. R. Leger; *Opt. Engineering*, 1979, **18**, No. 5 (May), 513.
- [4] 应壹同等;《光学学报》,1982, **2**, No. 4 (Jul), 315.
- [5] J. W. Goodman;《傅里叶光学导论》,(科学出版社, 1976), 96.

Spectrum analysis of human blood flow Doppler signals with a time-spatial converter*

YING XUANTONG GHEN HUIFENG ZHAO HUANQING JIA YURUN

(Department of Physics Fudan University Shanghai)

YE GUOFEN

(Department of Electronic Engineering Fudan University Shanghai)

(Received 10 November 1983; revised 20 February 1984)

Abstract

A method for spectrum analysis of human blood flow Doppler signals with an amplitude modulated grating as a time-spatial converter is reported. The experimental results are consistent with the theoretical analysis. This method possesses the advantages of fast multichannel parallel processing and large capacity. The facilities are simple and compact.

* This paper was presented at '83 ICL (Guangzhou, China).