

## 快速傅里叶变换在喇曼光谱信号噪声平滑中的应用\*

陈天江<sup>1,2</sup>, 王亚丽<sup>1,2</sup>, 普小云<sup>1</sup>

(1. 云南大学 物理系, 云南 昆明 650091;

2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 通过快速傅里叶变换(FFT)处理水的普通喇曼散射光谱信号, 实现对其干扰噪声的抑制, 获得信噪比较高的喇曼光谱. 结果表明, 通过快速傅里叶变换, 获得弱信号源的目标信号和噪声信号的频谱, 针对实验获得的弱信号喇曼光谱进行低通滤波和门限滤波, 可以分别将具有高频和较低振幅的噪声信号去除, 从而实现噪声平滑并获得高信噪比的喇曼光谱.

**关键词:** 快速傅里叶变换; 弱信号; 噪声平滑; 喇曼光谱

**中图分类号:** O 433.5; O 438.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-7971(2005)06-0509-05

光电探测系统是光信号的转换、传输及处理的系统. 系统的各个部分在工作时总会受到一些无用信号的干扰, 产生影响目标信号的噪声. 噪声来源主要包括光学噪声、探测器噪声、电学噪声和荧光屏颗粒噪声等. 对于光谱信号, 采集到的光谱数字信号由 2 个部分组成, 一是检测器对所分析的样品产生的响应信号; 二是整个系统所带来的噪声信号. 系统噪声污染了与样品有关的真实信号, 给光谱峰的检测判别及进一步的数据处理带来了不利因素. 所以, 有必要先对光谱信号进行数字滤波, 以获得更真实的光谱信息, 提高检测灵敏度. 对此, 前人应用多种滤波方法, 如最小二乘法<sup>[1]</sup>、相关分析技术<sup>[2]</sup>、卡尔曼滤波<sup>[3,4]</sup>等已做了大量研究. 目前最为通用和有效的信号滤波处理方法是快速傅里叶变换方法.

纯水是一种较弱的喇曼散射介质, 需要专用的喇曼散射光谱仪器才能获得高信噪比的喇曼光谱. 我们以增强型的 CCD 探头为探测器, 结合普通的光单色仪, 在 YAG 激光器 532 nm 激光线的激励下获得低信噪比的纯水的喇曼光谱. 信噪比较差的喇曼光谱经过 FFT 变换后, 在频谱空间分别实施低通滤波和门限滤波处理, 用 FFT 的逆变换将

滤除噪声后的频谱信号转换为光谱信号, 最终获得信噪比较高的纯水的喇曼光谱. 本文报道了如上工作的方法和结果.

1 傅里叶变换理论<sup>[5,6]</sup>

傅里叶变换的基本表达式为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk}, \quad (k = 0, 1, \dots, N-1) \quad (1)$$

$$W_N^{nk} = \exp\left[-\frac{2\pi jkn}{N}\right]. \quad (2)$$

式(1)中的  $x(n)$  ( $n = 0, 1, \dots, N-1$ ) 是列长为  $N$  的输入序列, 即实验采集到的时域上的切片数据;  $X(k)$  ( $k = 0, 1, \dots, N-1$ ) 是列长为  $N$  的输出序列, 即经过傅里叶变换后的频域上的数据.

对数字化后的光谱信号而言,  $x(n)$  是一组离散的实数信号; 而  $X(k)$  分为实部  $x(\nu)$  和虚部  $y(\nu)$  2 部分.  $x(\nu)$  和  $y(\nu)$  又可组成振幅谱  $A(\nu)$  和相位谱  $P(\nu)$ :

$$A(\nu) = \sqrt{x^2(\nu) + y^2(\nu)}, \quad (3)$$

$$P(\nu) = \arctan \frac{y(\nu)}{x(\nu)}. \quad (4)$$

通过对式(3)和式(4)性能的考察, 发现  $A(\nu)$

\* 收稿日期: 2005-07-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10174060, 10564005); 云南省自然科学基金资助项目(2003A009R).

作者简介: 陈天江, 男, 硕士, 主要从事微型球腔中消逝场增益耦合的实验研究.

通讯作者: 普小云, 男, 教授.

和  $P(\nu)$  中既含有目标信号的信息, 也含有噪声的信息, 如果二者所在的区域不同, 则可以通过傅里叶变换分析出噪声信息, 将之从捕获的信号中去除, 从而达到噪声平滑的目的, 获得高信噪比的目标信号。

数字信号的傅里叶变换, 通常采用离散傅里叶变换(DFT) 方法。DFT 存在的不足是计算量太大, 很难进行实时处理。计算一个  $N$  点的 DFT, 一般需要  $N^2$  次复数乘法和  $N(N-1)$  次复数加法运算。因此, 当  $N$  较大或要求对信号进行实时处理时, 往往难以实现所需的运算速度。1965 年, J. W. Cooley 和 J. W. Tukey 发现了 DFT 的一种快速算法, 经其他学者进一步改进, 很快形成了一套高效运算方法, 这就是现在通用的快速傅里叶变换, 简称 FFT(The Fast Fourier Transform)。

快速傅里叶变换的实质是利用式(1) 中的权函数  $W_N^{nk}$  的对称性和周期性, 把  $N$  点 DFT 进行一系列分解和组合, 使整个 DFT 的计算过程变成一系列叠代运算过程, 使 DFT 的运算量大大简化, 为 DFT 及数字信号的实时处理和应用创造了良好的条件。在此基础上, 数字信号、图像处理的技术也得到突飞猛进的发展。然而, 将 FFT 方法应用于滤出受噪声调制的弱喇曼光谱的噪声还鲜见报道。

## 2 信号处理<sup>[7~9]</sup>

纯水普通喇曼散射的信号很弱, 我们在 532 nm 脉冲激光泵浦液滴的条件下获得其散射光谱。由于样品信号极其微弱, 在将 CCD(美国 Roper 公司产品) 的增益调至最大时, 获得如图 1 所示的纯水的喇曼光谱。光谱的信噪比值用如下方式估算:

设  $x(\lambda, n)$  为含噪声图像,  $y(\lambda, n)$  为消除噪声后的图像, 图像的均方根误差为

$$\eta = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x(\lambda, n) - y(\lambda, n))^2}{N}}, \quad (5)$$

信噪比定义为除噪声后的信号与均方根误差之比

$$SNR = \frac{[\sum_{n=1}^N y(\lambda, n)] / N}{\eta}. \quad (6)$$

计算出 642.86 ~ 643.62 nm 光谱区的信噪比为  $SNR \approx 17$ 。

辐射体内的光子数按能量的分布符合玻色-爱因斯坦统计分布。由于统计分布具有平均的意

义, 光子数按能量的分布在某个平均值上下有一定的起伏, 从而引起辐射体辐射的光子速率或辐射功率的起伏。因此, 响应于辐射光子速率的探测器输出信号也会产生起伏。这一起伏给光辐射的探测过程带来噪声, 称为光子噪声。光子噪声的频谱特征是一系列高频的尖峰脉冲, 符合如图 1 所示的噪声特点。用中低分辨率的光谱仪获得的纯水的喇曼光谱, 其光谱的强度变化率较为平缓, 因而, 可以从受光子噪声污染的弱信号喇曼光谱中剔除噪声, 获取高信噪比的喇曼光谱。

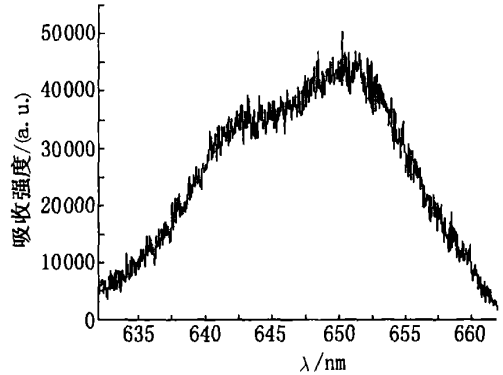


图 1 多通道光谱分析仪采集的含有噪声的纯水普通喇曼散射信号

Fig.1 Spontaneous raman spectrum with noise detected by an OMA

采用 ORIGIN7.0 软件(美国 Originlab 公司生产)提供的快速傅里叶变换程序, 我们对受噪声调制的弱信号喇曼光谱进行变换得到其频谱图。采用 2 种方法进行信号滤波处理, 用低通滤波方式, 计算出截止频率, 将高于截止频率的噪声信号去除; 使用门限滤波方式, 计算出噪声幅度门限, 将低于改幅度门限值的噪声信号去除。将剔除噪声后的喇曼光谱的频谱信号, 用快速傅里叶逆变换程序转换为高信噪比的喇曼光谱。

**2.1 低通滤波** 对图 1 信号进行傅里叶变换得到其 FFT 频谱如图 2 所示。

频谱图分为 2 个图层, 上方为相位谱, 下方为幅度谱。

截止频率由式(7)确定<sup>[7,9]</sup>

$$F_c = 10 \times \frac{1}{T}, \quad (7)$$

其中,  $T$  为时域长度。我们采集的信号图像时域为波长, 求得的截止频率为  $F_c = 0.25845$  Hz。

经低通滤波处理, 在频谱图中将频率高于截止频率的成分去除, 获得的频谱用 FFT 的逆变换返回得到的纯水的喇曼光谱如图 3 所示, 计算出 642.86~ 643.62 nm 光谱区的信噪比为  $SNR \approx 643$ 。很明显, 与图 1 相比, 光谱的信噪比有了极大的改善。

2.2 门限滤波 对图 2 幅度谱纵轴取对数得图 4。

噪声幅度门限值低于  $2 \times 10^5$ , 经门限滤波处理, 在频谱图中将幅度谱低于该门限值的频率成分去除, 获得的频谱用 FFT 的逆变换返回得到门限滤波曲线如图 5 所示。

计算出 642.86~ 643.62 nm 光谱区的信噪比为  $SNR \approx 484$ 。与图 1 相比, 光谱的信噪比有了极大的改善。

2.3 微腔 SRS 模式滤波 微腔受激喇曼散射 (SRS) 模式谱是通过散射光的采集得到, 需要在较高的增益条件下才能得到具有较高信噪比的光谱模式信号, 但由于增益放大, 噪声信号不可忽视, 因此我们采用 FFT 方式对信号进行处理。

对如图 6(a) 所示的水的微腔 SRS 模式谱进行 FFT 滤波后处理后, 我们得到如图 6(b, c) 所示的信号谱。对比处理前后的谱图, SRS 光谱的信噪比得到显著改善。

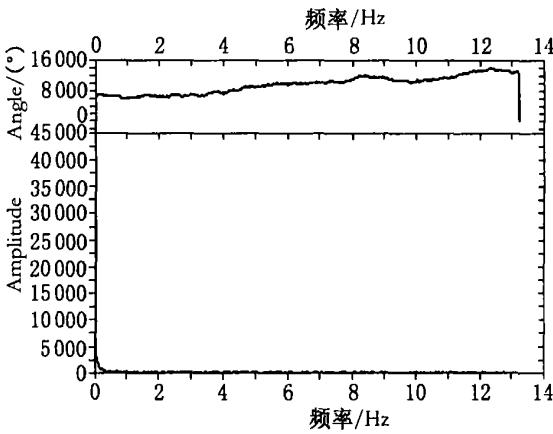


图 2 傅里叶变换后的频谱图

Fig. 2 Frequency spectrum transformed by FFT

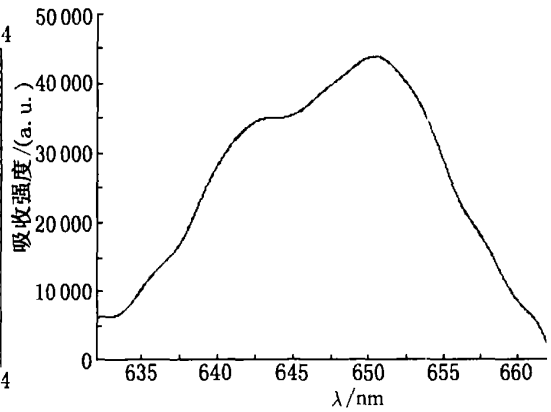


图 3 低通滤波方式处理后的图形

Fig. 3 The image obtained by low pass filter

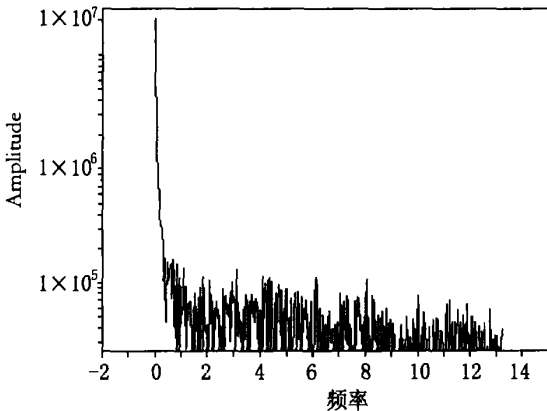


图 4 纵轴取对数后的幅度谱

Fig. 4 Amplitude spectrum obtained by showing y-axis with log

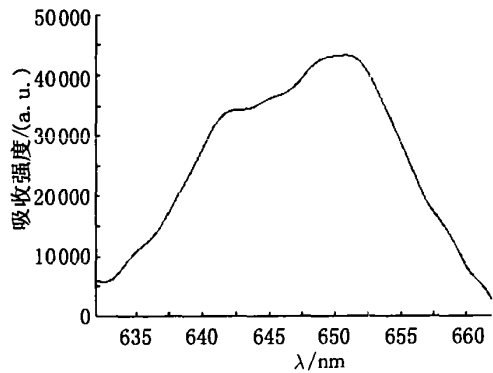
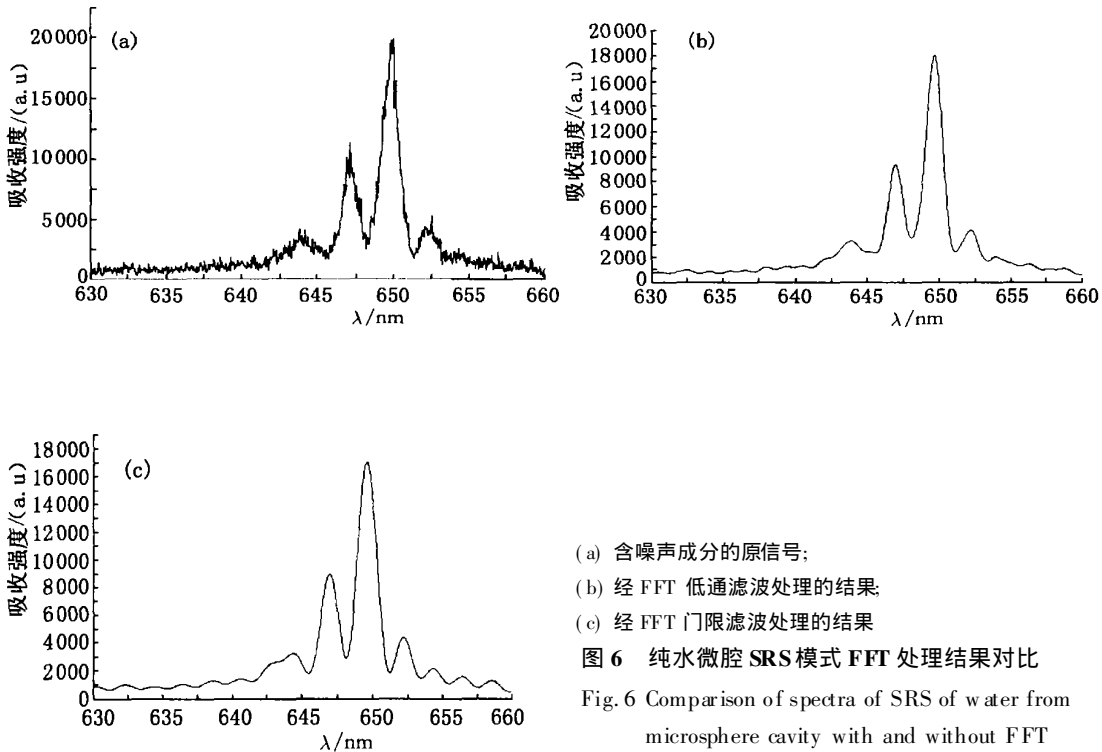


图 5 门限滤波方式处理后的图形

Fig. 5 The image obtained by threshold filter



(a) 含噪声成分的原信号;  
 (b) 经 FFT 低通滤波处理的结果;  
 (c) 经 FFT 门限滤波处理的结果

图 6 纯水微腔 SRS 模式 FFT 处理结果对比

Fig. 6 Comparison of spectra of SRS of water from microsphere cavity with and without FFT

### 3 结 论

在光谱信号受到光子噪声调制的条件下,如果光谱信号的变化频率低于高频光子噪声的变化频率,则可以通过快速傅里叶变换,获得目标信号和噪声信号的频谱,进行低通滤波和门限滤波后,分别将具有高频和不同振幅的噪声信号去除,实现对弱光谱信号干扰噪声的抑制,从而得到高信噪比的光谱信号.在弱光信号探测中,这种信号处理技术显得愈发重要.

### 参考文献:

[1] SAVITZKY A, GOLAY M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures [J]. Anal Chem, 1964, 26: 1 627—1 635.

[2] 戴朝政, 向在筠, 卢佩章, 等. 应用相关分析技术检测噪声中的微弱色谱信号[J]. 色谱, 1991, 5: 292—298.  
 [3] 夏启军. 渐消卡尔曼滤波器的最佳自适应算法及其应用[J]. 自动化学报, 1990, 10: 210—216.  
 [4] 吴平, 谭永基, 楼曼藤. 卡尔曼滤波在高效液相色谱中的应用[J]. 色谱, 1991, 3: 166—169.  
 [5] CASTLEMAN K R. 数字图像处理[M]. 朱志刚等译. 北京: 电子工业出版社, 1998.  
 [6] 付丽琴, 桂志国, 王黎明. 数字信号处理原理及实现[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.  
 [7] 林理忠, 夏英齐. 光学多道分析仪的原理与应用[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1993.  
 [8] 叶嘉雄, 常大定. 光电系统与信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 1997.  
 [9] 叶卫平, 方安平. 科技绘图及数据分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

# The application of fast Fourier transform in the noise smoothing of weak Raman spectrum

CHEN Tianjiang<sup>1,2</sup>, WANG Yali<sup>1,2</sup>, PU Xiaoyun<sup>1</sup>

(1. Department of Physics, Yunnan University, Kunming 650091, China;

2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** By using the method of fast Fourier transform (FFT), spontaneous Raman signal of water is handled, and the Raman spectra with high signal to noise ratio (SNR) has been obtained by reducing noises. Low pass and threshold filters have been used to handle the numerical data of Raman signal. The former wipes off the noise component if its frequency is higher than frequency of cut-off (FC), and the latter wipes off the noise component if its amplitude is lower than that of noise with maximal amplitude, the noise is reduced and the Raman spectrum with high SNR can be obtained.

**Key words:** FFT; weak signal; noise smoothing; Raman spectrum

\* \* \* \* \*

## 纪念国际物理年, 纪念彭桓武先生 90 华诞

2004 年 6 月 10 日联合国大会决议, 2005 年为“国际物理年”, 人类认识到物理学对于探索自然的本质和推动技术的进步, 物理教育对于人类和个人发展都非常重要. 2005 年是阿尔伯特·爱因斯坦为现代物理学奠定基础、作出开创性科学发现的 100 周年, 1905 年是一个奇迹年 (annus mirabilis). 这一年中, 25 岁的爱因斯坦在瑞士伯尔尼对物理学 3 个领域中作出了 4 项历史性贡献: ① 提出光量子论, 推动波粒二象性, 推动量子论的完整发展; ② 开创布朗运动理论, 解决了原子存在性争论; ③ 创造相对论, 开创时空观念的新时代; ④ 建立质能等当性, 预示核能时代来临. 这 4 项成就完全集中在 1 年且都具有划时代意义, 这是人类科学文化史上最罕见的奇迹. 在物理学历史上, 只有 24 岁的艾萨克·牛顿在 1665~1666 年离开剑桥三一学院去宁静的家乡伍尔索普躲避瘟疫之年完成二项式定理、流数微积分、月球轨道的引力、圆运动的离心力、归纳平方反比引力等一系列为开创古典力学和分析数学新时代的奇迹年可相似媲美. 对爱因斯坦奇迹年, 各个国家都展开纪念庆祝活动. 德国政府决定命名 2005 年为“爱因斯坦年”. 我国科教文组织在全国展开纪念活动, 推动认识物理学对人类进步的重要性.

同时, 结合我国的物理学实际情况, 2005 年 6 月在北京纪念我国物理学大师、原子弹首席理论科学家彭桓武先生 90 华诞寿辰. 彭桓武院士早年曾两度 (1937、1948 年) 在云南大学物理系执教, 中国

科学院理论物理所特邀请云南大学出席这个隆重的庆祝会, 校长陈世波副校长、数理学院院长张力和我代表云南大学出席庆典. 出席这个大会的院士就有 80 多人, 会上陈副校长代表云大感谢彭桓武院士对云南大学的深切厚爱, 特别朗诵了彭老在云大建校 70 周年时深情填词, 寄调《如梦令》, 祝贺云大:

三七, 四八年度, 执教两番来去.  
战乱认家乡, 胜利屡曾回顾.  
多祛, 多祛, 母校育才功著.

彭先生在这首词中简洁地勾勒了从抗战初期和抗战胜利之后他两次在云南大学任教的难忘岁月, 高度概括了他与云南大学的深情厚谊. 这些难忘岁月和深情厚谊已应中科院理论物理所之约写成短文《彭桓武先生与云南大学》, 初步表达了这段历史的一部分概略. 彭桓武先生对云大物理学的发展倾注了巨大心血, 使云大物理学科在学界声名鹊起. 彭先生一直视云大为母校, 认彩云之南为故乡, 在半个世纪内, 大约 10 年 1 次, 不辞长途劳累, 4 次访问云南大学. 彭先生给予我们的纯真友谊和深切关爱, 正如陈世波副校长代表学校在 6 月祝寿辞中所说: “云南大学要深深感谢先生的厚爱, 千秋铭记”. 我们应铭记的不止是先生的科学上的隽永大智, 更有先生心中的纯真大爱.

梅老愈芬芳清冽, 松寿更苍劲挺拔. 恰此 90 华诞之时, 衷心祝福我们的彭先生健康长寿!

(云南大学物理系 彭守礼)