

# 用于 FTS 干涉图信号处理的多阶带通滤波器研究

李志刚, 韩文辉, 杨凤和, 王淑荣

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 滤波技术的应用是傅里叶变换光谱仪对于光源光谱再现的关键, 利用连续时间滤波器  $M_{ax}274$  设计了 Chebyshev 带通滤波器, 结合实际研制的 16 阶带通滤波器性能与设计指标符合较好。限制了傅里叶变换光谱仪测量频宽, 有效克服了光谱仪光谱测量中汞灯光源交流信号的影响。

**关键词:** 傅里叶变换光谱仪; 高阶有源滤波器; 二阶节; Chebyshev 带通滤波器

中图分类号: O438 文献标识码: A

## 1 引言

傅里叶变换光谱技术的发展是建立在光学、机械、电子学和计算机技术综合发展的基础之上的, 傅里叶变换光谱仪(FTS)是多项技术高级融合的产物。由于光谱测量的高精度要求使得对各项技术都提出了巨大的挑战, 也可以说是各个相关技术的提高带动了傅里叶变换光谱技术的进一步发展。傅里叶变换光谱仪是通过光学和机械手段获得光源各个波长随光程差改变所形成的干涉图, 探测器接收后由电子学系统对干涉图信号进行处理后, 计算机采集并记录下离散的干涉图数据, 再由计算机软件对数据进行切趾、位相校正及 FFT 处理, 最终得到光源的光谱信息<sup>[1]</sup>。由于干涉图是待测波长干涉信号和不同种类外界干扰噪声的综合作用结果, 因此计算处理后会造成本光谱图中实测信号与噪声信号真伪难辨。滤除噪声及无用信号、净化有效电信号使滤波技术在 FTS 电子学信号处理系统的应用显得尤为重要。我们在短波段傅里叶变换光谱仪原理样机的研制中, 使用了紫外线谱丰度较高的低压汞灯做为待测光源。该汞灯由镇流器供电, 所以光强输出是频率为 100Hz 的交流光信号。探测器接收后, 得到的待测干涉图电信号加载于交流信号之上, 严重影响了真实信号的采集。本文根据 FTS 的测量光谱宽度, 利用 MAX274 集成块设计了 16 阶

Chebyshev 带通滤波器, 可以有效地抑制 100Hz 交流信号及带外无用信号和噪声的干扰。

## 2 傅里叶变换光谱仪干涉图信号测量频宽

FTS 干涉图信号的频宽是由光源光谱宽度、探测器光谱响应宽度、外界噪声干扰频带、光学元件的应用光谱范围及动镜运动速度等因素共同决定的。我们获得的离散干涉图数据是经过电子学系统处理后的测量干涉图信号, 滤波器的带宽可以最终限定干涉图信号的测量频带宽度, 从而达到保留有效信号、滤除无用信号和带外噪声干扰的作用。

谱仪中对应每一波长为  $\lambda$  的谱元, 利用余弦函数  $\cos(2\pi f \cdot t)$  编码时, 时间频率  $f_{\lambda}$  由下式给出<sup>[2]</sup>:

$$f_{\lambda} = \frac{2 \cdot U}{\lambda}$$

式中  $U$  是傅里叶变换光谱仪动镜的平移速率。考虑我们设计的谱仪动镜扫描速率范围 (5mm/min - 10mm/min) 和待测光谱波长范围 (150nm - 600nm), 由上式可以确定 FTS 干涉图信号测量频宽为最低频率  $f_{\min} = 277.8\text{Hz}$ , 最高频率  $f_{\max} = 2.222\text{kHz}$ 。因此带通滤波器的设计通带宽度应为  $f_{\min} \sim f_{\max}$ 。

### 3 Chebyshev 高阶有源带通滤波器

在低频范围内,对滤波器特性诸如带内平坦度、带外衰减、过渡带宽度等参数有较高要求时,往往采用高阶有源滤波器。通常的有源滤波器是由运算放大器及 R、C 电路组合而成,因使用元件较多,使得设计与参数调整较困难,杂散电容及运放本身的频响对滤波器的整体特性亦会造成较大影响。我们曾使用 OP07 运放器与 RC 电路制作了二阶 Butterworth 有源滤波器,滤波效果不佳,

没有滤除汞灯携带的 100Hz 交流信号。美国 MAXIM 公司开发的 8 阶连续时间有源滤波器 MAX274 将 4 个二阶节合而为一,最高中心设计频率可达 150kHz。MAX274 四放大器二阶节单元结构如图 1 所示,该滤波器不需要外置电容,每个单元二阶节的中心频率  $F_0$ 、Q 值、放大倍数均可由其外接电阻  $R_1 \sim R_4$  的设计来确定<sup>[3]</sup>。集成化后的二阶节较之由运放和 R、C 电路组成的二阶节有外接元件少、参数调节方便、不受运放频响影响以及受杂散电容干扰小等优点。

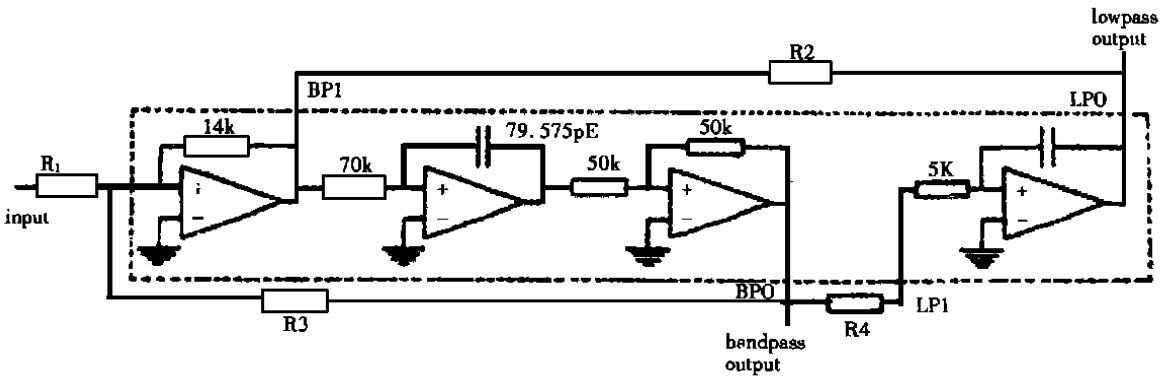


Fig. 1 Single 2nd-order filter section of Max274

高阶有源滤波器类型有 Butterworth、Bessel、Chebyshev 和椭圆函数型等<sup>[4]</sup>,对于相同设计指标,Chebyshev 和椭圆函数型滤波器所需二阶节数少于前两种类型的滤波器。由于

MAX274 不支持椭圆函数型滤波器结构,因此我们选择设计了高阶 Chebyshev 带通滤波器结构。应用 MAXIM 集成滤波器辅助设计程序<sup>[3]</sup>,我们初步设计的带通滤波器参数如下:

Table 1 The design parameters of Max274 bandpass filter

Type	$A_{max}$	$A_{min}$	$F_c$	$F_{bw}^-$	$F_{bw}^+$	$F_{sw}^-$	$F_{sw}^+$
Bandpass	150mdB	70dB	786.607Hz	275Hz	2.25kHz	128Hz	4.834kHz

表 1 中  $A_{max}$  表示通带最大衰减;  $A_{min}$  表示阻带最小衰减;  $F_c$  表示中心频率;  $F_{bw}^-$  表示通带最低频率;  $F_{bw}^+$  表示通带最高频率;  $F_{sw}^-$  表示阻带

最低频率;  $F_{sw}^+$  表示阻带最高频率。表 2 给出了 16 阶 Chebyshev 带通滤波器中 8 个二阶节的外接电阻值。

Table 2 The primary resistors values designed by the software of Maxim integrated products filter. ( $\Omega$ )

Resistor	The different 2nd order sections of Chebyshev bandpass filter							
	Section1	Section2	Section3	Section4	Section5	Section6	Section7	Section8
$R_1$	575.859k	592.838k	642.207k	739.451k	430.374k	159.883k	88.46k	67.66k
$R_2$	7.418M	6.582M	5.096M	3.333M	1.94M	1.269M	982.149M	871.528M
$R_3$	16.381M	4.658M	2.027M	931.189k	541.974k	504.711k	695.029k	1.925M
$R_4$	7.413M	6.577M	5.091M	3.328M	1.935M	1.264M	977.149k	866.528k

理想条件下,根据以上参数设计的带通滤波器随不同频率的增益曲线如图 2 所示,通带内曲

线平滑且过渡带很陡,在 100Hz 频率处增益小于 -100dB,可以满足设计使用的要求。

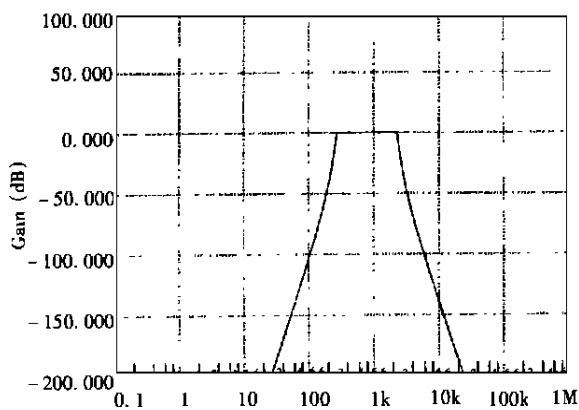


Fig. 2 High order Chebyshev bandpass filter gain response curve under typical operation

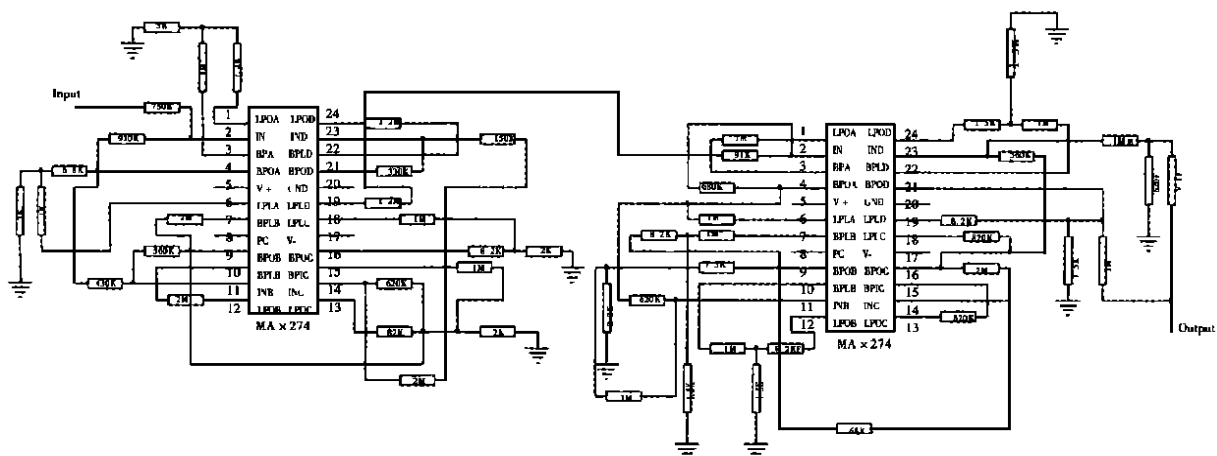


Fig. 3 Operation circuit of Chebyshev bandpass filter

电路中,  $F_c$  脚接地,  $V_+$ 、 $V_-$  端分别接+ 5V、- 5V 直流电压。为便于电路调试, 电路排版中, 对应于图 1 中的  $R_1$  均采用精密可调电位器。由于二阶节的串联顺序会直接影响滤波器的动态范围,

为保证带通滤波器可实现较大的动态范围, 连接时应将各二阶节按  $Q$  值大小由低至高的顺序排列<sup>[4]</sup>。表 3 给出了电路中各二阶节  $Q$  值的排列顺序。

Table 3 The arrangement of  $Q$  of Chebyshev bandpass filter

$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$	$Q_8$
1.361	1.389	1.957	2.121	3.392	3.470	12.158	12.279

图 4 是采用实际电阻值参数带通滤波器的模拟频率增益曲线图, 由图可见由于电阻值的改变通带范围内产生了较小的波动, 低频处最为明显。但整体看来, 与图 2 的差别不大, 对应于 100Hz 频率的衰减仍大于 100dB。在保证通带宽度的同时, 可以有效地降低 100Hz 汞灯交流信号的干扰。我们对电路进行了实验测试, 电路性能与图 4 基本一致, 满足了 FTS 应用的需要。

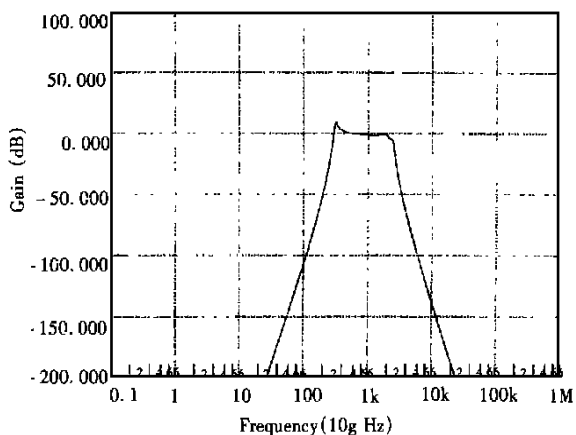


Fig. 4 The gain response curve of 16-order Chebyshev bandpass filter by using actual resistors

## 4 结 束 语

本文采用连续时间集成滤波器  $M_{ax}274$  设计并制作了 16 阶 Chebyshev 带通滤波器, 其结构简单, 易于设计, 避免了传统高阶滤波器电子元件多、不宜调节的困难。根据傅立叶变换光谱仪测量光谱宽度的要求, 选用现有阻值接近的电阻替代理想设计的电阻, 达到了谱仪应用的需要, 并且有效地降低了汞灯 100Hz 交流信号的影响及带外无用信号和噪声的干扰。但由于高阶滤波器滤波节数多, 不可避免地带来高噪声, 这对于弱信号的

测量极为不利。模拟滤波器在通带范围内还会产生一定的相移, 尽管可以使用相位校正的方法来弥补, 但对于傅里叶变换光谱测量仍将产生影响。使用数字滤波方法则可以精确地设计出接近理想情况的带通滤波器, 即滤波的同时, 保持相移为零。数字信号处理(DSP) 芯片性能的不断改进, 使得 DSP 技术应用越来越广泛。作者认为将数字信号处理器用于傅里叶变换光谱仪干涉图信号实时处理会进一步提高谱仪测量的精度。随着研究的不断深入, 我们将对此方面的工作另文阐述。

致谢: 感谢 MAXIM 公司提供了  $M_{ax}274$  集成块。

### 参考文献:

- [1] Bell R J. Introductory Fourier Transform Spectroscopy[M]. New York: Academic, 1972.
- [2] 李志刚等. 软 X 射线-真空紫外傅里叶变换光谱仪及其光谱分辨率[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(5): 84- 90.
- [3] 吴凯, 舒曦辉.  $M_{AX}274/275$  连续时间有源滤波器及应用[J]. 电子技术应用, 1997(7): 51- 52.
- [4] 李远文等编. 有源滤波器设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1986.

## Multistage bandpass filter used for interferogram signal processing of Fourier transform spectrometer

LI Zhi-gang, HAN Wen-hui, YANG Feng-he, WANG Shu-tong

(The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)

**Abstract:** The application of filter technology is the key to the reproduction of measuring spectrum of light source by means of Fourier Transform Spectrometer. Chebyshev bandpass filter was designed by the use of second order sections existing in continuous time active filter  $M_{ax}274$  and standard resistors. A good agreement was found between the performance of actual 16 order bandpass filter and the result of primary design. This kind of bandpass filter can be used to limit the measuring frequency width according to practical requirement. It can also availably reduce the influence of AC electrical signal coming from mercury lamp source with AC power source in the course of measuring and signal processing of Fourier transform spectrometer.

**Key words:** Fourier transform spectrometer; high-order active filter; second order section; Chebyshev bandpass filter

作者简介: 李志刚(1972- ), 男, 吉林长春市人。1996年3月毕业于长春光学精密机械学院应用理学院, 获光学专业理学硕士学位。现在中国科学院长春光机所应用光学国家重点实验室攻读博士学位, 主要从事短波段光谱技术和信号处理技术的研究。