

微弱信号锁相检测的电路研究

杨 行¹, 杨 嵩², 刘 艺¹

(1. 电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054; 2. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

摘 要: 在利用红外光谱技术进行工业检测的系统中, 有用信息通常是淹没在强噪声背景中的微弱信号, 因此可采用微弱信号检测技术中的锁相放大器来实现有用信号的提取。该文阐述了微弱信号检测的基本原理, 比较了不同参考波形的优劣。设计运用 AD630 作为相关乘法器的锁相放大器, 实现了在强噪声环境中有效地提取信号。测试结果表明, 该电路结构简单, 线性度高, 信噪比得到改善可达 62 dB。

关键词: 锁相放大器; AD630; 微弱信号; 光谱检测

中图分类号: TN911

文献标识码: A

Research on Weak Signal Detecting Circuit with Lock-in Amplifier

YANG Hang¹, YANG Song², LIU Yi¹

(1. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: In near infrared spectroscopy for detection of industry systems, the useful information weak signal is often submerged in strong background noise. The lock-in amplifier could be used by weak signal detection technology to achieve the extraction of useful signal. Weak signal detection theory was described, and the outputs of the different reference signals were compared. A lock-in amplifier was designed using the AD630 as associated multiplier to extract the useful information in strong background noise. The test results indicated that the circuit structure was simple with high linearity of outputs, and the SNRI value was 62 dB.

Key words: lock-in amplifier; AD630; weak signal; spectrum detection

0 引言

在微弱信号检测^[1]中, 信号常深埋在强噪声中, 这样强干扰的背景环境给检测带来了很大误差, 并降低了系统的动态范围。锁相放大^[2]是利用待检信号和参考信号的互相关检测原理, 从强噪声中提取信号的一种应用, 它不但抑制噪声, 而且可实现同相检波。锁相放大器的基本结构^[3]包括信道、参考信道、相敏检波器、低通滤波器等。相敏检波器为其中关键器件, 实现有用信号与参考信号的相关运算。

1 锁相放大理论

锁相放大器采用互相关分析方法^[4], 互相关函数反应两个不同的函数 $x(t)$, $y(t)$ 在不同时刻 t_1 , t_2 的相关程度。假设 $x(t) = s(t) + n(t)$ 为含有噪声的周期有用信号, $r(t)$ 为参考信号, 将两者进行互相关分析可得

$$R(\tau) = R_{sr}(\tau) + R_{nr}(\tau) \quad (1)$$

式中: $R(\tau)$ 为 $x(t)$ 与 $r(t)$ 的相关函数; $R_{sr}(\tau)$ 为 $s(t)$ 与 $r(t)$ 的相关函数; $R_{nr}(\tau)$ 为 $n(t)$ 与 $r(t)$ 的相关函数。噪声与任何信号都相互独立, 式中 $R_{nr}(\tau) = 0$ 。当参考信号与有用信号同频时两者相关, 此时 $R_{sr}(\tau) \neq 0$, 可以帮助我们从噪声中检测出有用信号。下面讨论当参考信号为不同波形时的输出结果。

1.1 $r(t)$ 为正弦波

$$x(t) = V_s \cos(\omega_1 t + \theta_1) \quad (2)$$

$$r(t) = V_r \cos(\omega_2 t + \theta_2) \quad (3)$$

$$U(t) = \frac{1}{2} V_s V_r [\cos(\omega_1 + \omega_2)t + (\theta_1 + \theta_2)] +$$

$$\frac{1}{2} V_s V_r [\cos(\omega_1 - \omega_2)t + (\theta_1 - \theta_2)] \quad (4)$$

经低通滤波器后, 第一项和频信号被滤掉,

收稿日期: 2014-07-30

作者简介: 杨行(1990-), 女, 山东青岛人, 硕士生, 主要从事光通信与光信息传输处理的研究。E-mail: yanghang9023@163.com

$U(t) = \frac{1}{2} V_s V_r \cos(\Delta\omega t + \Delta\theta)$, $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$, $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ 。当 $\Delta\omega \neq 0$ 且小于低通滤波器的带宽, 则有与输入信号成正比的交流信号输出; 当 $\Delta\omega = 0$ 得到直流输出, 输出幅值与输入信号、输入信号和参考信号的相位差皆成正比; 当 $\Delta\omega = 0, \Delta\theta = 0$ 输出最大。

输入动态范围是评价该电路从噪声中检测信号能力的性能指标, 当正弦波作为参考时, 直流附近带宽内的噪声对输出有贡献, 互相关器动态范围小, 且存在非线性误差, 因此常用占空比为 50% 的方波作为参考。

1.2 $r(t)$ 为方波

$x(t) = V_s \cos(\omega_0 t + \Delta\theta)$ 是幅度为 $\pm V_r$ 、周期为 T 的偶函数, 将其展开成傅里叶级数:

$$r(t) = \frac{4V_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos[(2n-1)\omega_0 t] \quad (5)$$

$$U(t) = \frac{4V_s V_r}{\pi} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos[(2n-2)\omega_0 t - \Delta\theta] + \frac{4V_s V_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos(2n\omega_0 t + \Delta\theta) \quad (6)$$

当方波作为参考时, 与方波奇次谐波频率相等的输入信号会产生一个直流输出, 输出大小与谐波次数成反比, 常采用基波频率作为输入信号频率。若在噪声环境下, 只有在参考信号基波和高次谐波频率周围很窄的带宽内, 噪声信号才会产生直流输出。噪声的高次谐波响应会使输出信噪比降低, 等效噪声带宽变大, 为减少这个影响可在相关器前加带通滤波器滤除高次谐波部分。

1.3 $r(t)$ 为三角波

三角波和方波的傅里叶级数都是基波的奇次谐波, 不同于方波的谐波系数是 $1/n$, 三角波的谐波系数是 $1/n^2$, 所以三角波所得结果与方波的性质一样。在实际应用中, 方波比三角波更易获得, 故不常采用此方式。

1.4 信噪比的改善

$x(t) = s(t) + n(t)$ 为含有噪声的正弦波, $r(t) = s(t)$ 为方波, 前文提到为减少含噪声的信号与方波相乘产生的谐波分量, 在相关器前加一带通滤波器, 故可将方波看成正弦波处理。输入信号中的噪声信号 $n(t)$ 的功率谱密度为 N_0 , 带宽为 B_0 , 则输入信噪比

$$SNR_I = \frac{\overline{s^2(t)}}{(N_0 B_0)} \quad (7)$$

参考信号 $r(t) = s(t)$, 低通滤波器带宽为 B_e , 输出信噪比为

$$SNR_o = \frac{\overline{s^2(t)} \cos^2(\Delta\theta)}{(N_0 B_e)} \quad (8)$$

当有用信号与参考信号之间的相位差 $\cos(\Delta\theta) = 0$ 时, 得到最大输出信噪比

$$SNR_o = \frac{\overline{s^2(t)}}{(N_0 B_e)} \quad (9)$$

最终得到信噪比的改善为

$$\frac{SNR_o}{SNR_I} = \frac{B_0}{B_e} \quad (10)$$

互相关器信噪比增大的唯一办法是增大时间常数, 减小低通滤波器的带宽, 但时间常数越大, 响应速度越慢, 故需找一个合适的低通滤波器参数。

2 实际电路

AD630 是一款高精度平衡器, 其信号处理应用包括^[5-6]平衡调制和解调、同步检波、相位检测、正交检测、相敏检测、锁定放大及方波乘法, 片上应用电阻网络提供 ± 1 和 ± 2 的闭环增益。AD630 用于精确的信号处理和仪器应用中, 有很宽的动态范围。当用于锁相放大配置中的同步解调使用, 能从 100 dB 干扰噪声中恢复小信号^[7], 最优的操作是 1 kHz, 但在频率达到几百千赫兹的电路中仍有用。具体电路如图 1 所示。使用了 B 通道, 它内部集成了差分输入的前置放大器, 开关和集成输出组合放大器, 该电路增益为 -1。锁相放大器输入的参考信号必须为严格的交流信号, 所以要在参考信号接入前加一隔直电容滤除直流成分。得到的 AD630 输出信号结果如图 2 所示。

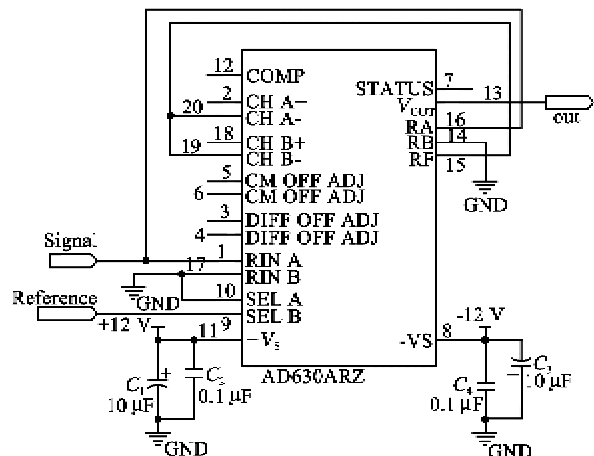


图 1 AD630 电路

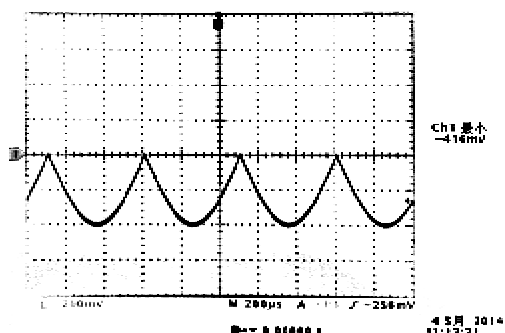


图2 AD630 输出信号

信噪比改善情况与低通滤波器的设计密切相关^[8],一阶RC低通滤波器,等效噪声带宽为 $1/(4RC)$;二阶RC低通滤波器,等效噪声带宽为 $1/(8RC)$ 。可见阶数越高,时间常数越大,信噪比改善效果越好。图3为一个由AD8051构成的二阶有源低通滤波器,其传递函数为

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 + R^2 C^2}} \quad (11)$$

等效噪声带宽为

$$\Delta f = 1/(4RC) = 50(\text{Hz}) \quad (12)$$

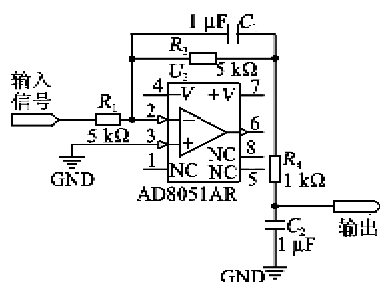


图3 低通滤波器电路

白噪声由33250A任意波形发生器产生,带宽80 MHz,其噪声电压和噪声带宽平方根成正比,故该电路信噪比的改善为输入噪声带宽与输出噪声带宽比的平方根, $\Delta f_{\text{输入}} = 80 \text{ MHz}$, $\Delta f_{\text{输出}} = 50 \text{ Hz}$,则信噪比的改善为62 dB。

3 测试结果分析

为了测试该锁相放大器的性能,本文使用33220A、33250A任意波形发生器和衰减器来产生所需的待检信号、参考信号及均方根为1 V的白噪声。

表1是待检信号为频率1 kHz、峰-峰值不同的方波,参考信号为频率1 kHz、峰-峰值0.8 V的不同波形时的测试结果。由表可见,方波的输出幅值最大,其次为正弦波,三角波最小。当输入信号峰-峰值 $>2.5 \text{ V}$ 时,锁相放大器渐渐进入饱和区。当

输入信号为频率100 kHz、峰-峰值 $<2.5 \text{ V}$ 的方波,参考信号为频率100 kHz、峰-峰值 $=0.8 \text{ V}$ 的方波,经过锁相放大后的输出结果是线性的,线性拟合度为0.999 95,可实现快速检测。

表1 参考信号为不同波形时输出结果

待检信号 峰-峰值/V	正弦波 输出结果/mV	方波 输出结果/mV	三角波 输出结果/mV
0.4	-0.178	-0.26	-0.138
0.8	-0.355	-0.52	-0.278
1.2	-0.53	-0.784	-0.416
1.6	-0.71	-1.05	-0.558
2.0	-0.88	-1.30	-0.694
2.4	-1.06	-1.57	-0.832
2.8	-1.21	-1.75	-0.970
3.2	-1.36	-1.85	-1.100
3.6	-1.44	-1.94	-1.200
4.0	-1.52	-2.09	-1.240

表2为待检信号为频率100 kHz、峰-峰值1 mV并加入不同强度的噪声的方波,参考信号为频率100 kHz、峰-峰值0.8 V的方波时的测试结果。当噪声幅值大于待检信号100倍(40 dB),可从干扰噪声中恢复小信号。在实际应用中,待检信号不能保证绝对交流,给定一个幅值为800 mV的待检信号,当其基线变高100 mV、200 mV、300 mV、400 mV时,输出结果都为520 mV,可见当待检信号包含直流成份时,该成分可被很好地滤掉。

表2 输入不同幅值噪声时的输出结果

噪声峰-峰值/mV	输出结果/mV
13.228	-0.55
23.520	-0.55
41.840	-0.55
74.400	-0.55
105.060	-0.55
132.280	-0.45
235.200	-0.38
418.400	-0.20
744.000	0.48

4 结束语

锁相放大器可在强噪声环境下提取出与参考信号同步的微弱待检信号,得到相应的直流信号。通过以上测试可发现,该电路可在40 dB的干扰中有效地提取小信号,输出结果随输入信号幅值线性变化,动态范围宽,可达68 dB。该锁相放大器无法滤除白噪声中与参考信号同频的分量,会产生误差,因

此尽量选取低噪声器件,降低电路本身的固有噪声,且要屏蔽电磁辐射和采用良好的接地方以减少其他干扰。

参考文献:

- [1] 高晋占.微弱信号检测[M].2版.北京:清华大学出版社,2011.
- [2] 孙志斌,陈佳圭.锁相放大器的新进展[J].物理,2006,35(10):879-884.
SUN Zhibin, CHEN Jiagui. Advance of lock-in amplifier[J]. Physics, 2006,35(10):879-884.
- [3] 苏鑫,罗文广,马超,等.一种双相位锁相放大电路设计[J].电子科技,2012,25(3):75-81.
SU Xin, LUO Wenguang, MA Chao, et al. A design method for the DUAL phase lock-in amplifier[J]. Electronic Science and Technology,2012,25(3):75-81.
- [4] 徐晗,卢启鹏,朴仁官.基于锁相放大的近红外光谱信号提取电路研究[J].微计算机信息(嵌入式与SOC),2009,25(8/2):233-235.

(上接第528页)

参考文献:

- [1] 杨国哲,刘峰,王野牧.微细电火花三维成型加工系统的研制[J].机床与液压,2008,36(2):8-10.
YANG Guozhe, LIU Feng, WANG Yemu. Research on a three-dimensional micro-EDM system [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008,36(2):8-10.
- [2] LI Yong, TONG Hao, CUI Jing, et al. Servo scanning EDM for 3D micro structures[C]//Sanya, China: Proceedings of International Conference on Integration and Commercialization of Micro and Nano Systems, 2007: 1369-1374.
- [3] 贾宝贤,赵万生,王振龙,等.微细电火花机床及其关键技术研究[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(3):402-405.
JIA Baoxian, ZHAO Wansheng, WANG Zhenlong, et al. Research on micro-EDM machine tool and its key technologies[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006,38(3):402-405.
- [4] 王振龙,赵万生.微制造系统中的微细电火花加工技术[J].制造技术与机床,2003(9):23-27.

XU Han, LU Qipeng, PIAO Renguan. Research of near-infrared spectrum detecting circuit with LIA[J]. Microcomputer Information, 2009,25(8/2):233-235.

- [5] 朱晓莉,厉霞.基于AD630的双相锁相放大器设计[J].机电工程技术,2012,41(6):19-23.
ZHU Xiaoli, LI Xia. The design of dual-phase lock-in amplifier based on AD630[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2012,41(6):19-23.
- [6] 康跃腾,胡晓娅,汪秉文.基于锁相放大原理的微弱信号检测电路[J].电子设计工程,2013,21(6):162-164.
KANG Yueteng, HU Xiaoya, WANG Bingwen. Weak signal detection circuit based on lock-in amplifier[J]. Electronic Design Engineering, 2013,21(6):162-164.
- [7] 蒋鹏,赵国忠.TDS用锁相放大器电路设计[J].电子测量技术,2012,35(4):24-28.
JIANG Peng, ZHAO Guozhong. Design of lock-in amplifier circuit for TDS [J]. Electronic Measurement Technology, 2012,35(4):24-28.
- [8] 远坂俊昭.锁相环(PLL)电路设计与应用[M].北京:科学出版社,2006.

WANG Zhenlong, ZHAO Wansheng. Micro EDM machining technology in micro manufacturing system[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2003(9):23-27.

- [5] 杨国哲,韩博,林海波.超声波电机在三维微细电火花加工中的应用[J].机械设计与制造,2009,(8):79-81.
YANG Guozhe, HAN Bo, LIN Haibo. Research on the use of the ultrasonic motor in the three-dimensional micro-EDM system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009,(08):79-81.
- [6] 徐伟,陈吉红.微细电火花加工实现条件的研究[J].机床与液压,2007,35(4):88-91.
XU Wei, CHEN Jihong. Study on actualizing condition of micro electrical discharge machining [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2007,35(4):88-91.
- [7] 林海波,杨国哲.微细电火花三维成型加工控制系统的研究[J].制造技术与机床,2009(11):13-15.
LIN Haibo, YANG Guozhe. Research on three-dimensional micro-EDM processing control system[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2009(11):13-15.