

一种微弱光电信号调制解调电路设计研究

湛东¹ 何林² 陈树春¹ 温强³

(1. 中国电子科技集团公司第二十九研究所 成都 610036; 2. 上海航天电子有限公司 上海 201800;

3. 哈尔滨工程大学 哈尔滨 150000)

摘要: 本文针对微弱光电信号或弱信噪比条件下的光电信号检测及数据采集,设计了一种基于自相关检测原理的调制解调电路,旨在用于传感器的光电强度调节及低信噪比信号检测。该电路利用自相关特性较明显的伪随机码与光纤传感器对被检测微弱信号进行调制解调,通过检测输出光强度达到检测微弱信号的目的。同时,对该电路方案进行了强噪声条件下的检测性能仿真研究,仿真结果表明,该电路方案能够有效地实现弱信噪比条件下的光电信号检测及数据采集。

关键词: 弱信噪比;自相关检测;光强度调制;强噪声条件;数据采集

中图分类号: TP206+.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1040

Design of modulation/demodulation circuit based on the weak photoelectric signal

Chen Dong¹ He Lin² Chen Shuchun¹ Wen Qiang³

(1. The 29th Research Institute of CETC, Chengdu 610036, China; 2. Shanghai Aerospace Electronics Company Ltd., Shanghai 201800, China; 3. Harbin Engineering University, Harbin 150000, China)

Abstract: In allusion to the photoelectric signal detection or data acquisition under the condition of the weak photoelectric signal or weak signal to noise ratio, the modulation/demodulation circuit based on the autocorrelation detection principle is proposed. It is aimed at the photoelectric intensity adjustment of the modulation sensor and the detection of weak signal. The circuit uses pseudo random code and optical fibre sensor to modulate the weak signal and detects the weak signal according to the output light intensity. Meanwhile, the numerical simulation for the sensing circuit with strong noise is carried out. According to the simulation results, photoelectric signal detection and data acquisition based on the weak signal to noise ratio conditions are realized effectively.

Keywords: weak signal to noise ratio; relevant detection; light intensity modulation; strong noise condition; data acquisition

1 引言

“弱信号”不仅幅度小,又常被噪声所淹没。有效的微弱信号检测技术能够抑制噪声,并提高信噪比,其关键技术是给被检测信号叠加某种特征,利用信号相关性和噪声随机性的特点,通过相关运算,抑制噪声,提取信号特征,实现信号检测。微弱信号检测广泛应用于物理学,天文学,能源学等许多领域中,是许多工程应用中较为有效的测量手段^[1]。

光纤传感器具有多种优良性能,使得它应用在很多领域。由于目前常用的光探测器都只能响应光的强度,无法直接响应频率、波长、相位和偏振调制,所以被检测信号都

要通过某种调制技术转换成强度信号,才能为光探测器所响应,实现检测。因此,本文针对光纤传感器输出的经过光强度调制的微弱信号,在存在噪声干扰的情况下,设计电路进行调理,以达到检测微弱信号的目的。

2 理论基础

2.1 噪声来源

在常见的电路中,主要存在3种噪声源:热噪声(电阻或导体内部大量的电子做不规则的热运动使电阻的两端仍然会呈现出起伏变化的电压)、散弹噪声(半导体器件中的载流子不规则运动所产生)、 $\frac{1}{f}$ 噪声(两种导体不理想的接

触所引起的,又叫过剩噪声)。本文讨论中利用高斯分布的噪声来模拟这 3 种噪声综合作用的结果,作为背景噪声。

2.2 相关检测原理

早在 1961 年,Weinreb 的文章描述了利用自相关法从随机噪声中提取周期信号^[2-4]。此后,人们开展了大量研究工作,目前该技术已经得到广泛的应用。

确定性信号在不同的时刻取值一般具有很强的相关性,而噪声具有随机性的特点,在不同时刻的相关性比较弱,相关检测技术利用这一特点就可以把信号和噪声区分开来^[5]。相关检测包括自相关法和互相关法,自相关法通过自相关函数度量同一个随机过程前后的相关性;而互相关法利用互相关函数来度量两个随机过程间的相关性^[6]。

自相关函数表示随机变量 $f(t)$ 与延时了时间间隔为 τ 的同一变量的相关性。若 t 为时间自变量,则其满足关系式:

$$R(t) = \lim_T \frac{1}{T} \int_0^{-T} f(t) f(t - \tau) dt \quad (1)$$

式(1)表现了自相关检测的原理,其原理图如图 1 所示。

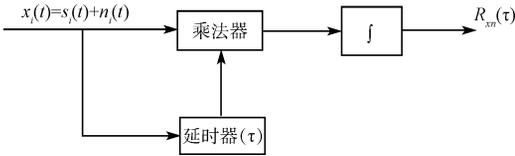


图 1 自相关检测原理框图

假设混有噪声的信号为:

$$x_i(t) = s_i(t) + n_i(t) \quad (2)$$

信号 $x_i(t)$ 输入到相关接收机后,被分成两路,一路经过延迟设备,使它延迟一段时间 τ ,经过延迟的 $x_i(t - \tau)$ 和未经延迟的 $x_i(t)$ 被送到相乘电路,随后对乘积进行积分,取平均值就得到以 τ 为参数的相关函数,即得自相关输出为:

$$R_{ex} = \lim_T \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t) x_i(t - \tau) dt = R_{ss}(\tau) + R_{nn}(\tau) + R_{sn}(\tau) + R_{ns}(\tau) \quad (3)$$

式中: R_{ss} 、 R_{nn} 表示 $s(t)$ 与 $n(t)$ 的自相关函数; R_{sn} 、 R_{ns} 表示 $n(t)$ 与 $s(t)$ 的互相关函数,根据相关函数的性质,可知

噪声与信号是互不相关的,且噪声的平均值为零,有 $R_{sn}(\tau) = R_{ns}(\tau) = 0$,则 $R_{ex}(\tau) = R_{ss}(\tau) + R_{nn}(\tau)$ 。随着 τ 的增大, $R_{nn}(\tau) \rightarrow 0$,则对足够大的 τ ,有 $R_{ex}(\tau) = R_{ss}(\tau)$,这样就得到包含着信号 $s(t)$ 的自相关函数 $R_{ex}(\tau)$ 。

2.3 伪随机码发生器

伪随机编码是一种具有类似于带限白噪声统计特性的一种码制,能够重复产生,具有良好的非周期自相关特征,当序列长度 p 远大于 1 时,自相关函数的主旁瓣比趋近于 \sqrt{p} ,自相关函数趋近于冲激函数^[7-8]。近年来,伪随机序列编码技术在自动控制、计算机、声学、光学测量、数字式跟踪和测距系统,以及数字网络系统的故障分析检测都得到广泛的应用。

二元 m 序列是一种典型的伪随机序列,具有极好的非周期自相关特性,属于狭义伪随机码,易于产生和复制^[9-10]。

本文研究中采用 m 序列来调制信号,拟采用 3 个不同周期的 m 序列:

- 1) 7 码段 周期为 7 对应的本原多项式为 $x^3 + x + 1$;
- 2) 15 码段 周期为 15 对应的本原多项式为 $x^5 + x^3 + x + 1$;
- 3) 31 码段 周期为 31 对应的本原多项式为 $x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$ 。

调制方案为:当编码为 1 时,信号源发出 $x(t) = \sin(2000 * \pi * t)$ 的信号;当编码为 0 时,信号源发出 $x(t) = \cos(2000 * \pi * t)$ 的信号。

3 电路设计方案

基于自相关检测原理的调制解调电路设计框图如图 2 所示,伪随机编码信号 $R(t)$,经电光调制器调制后,得到具备伪随机特性的电光调制光信号,之后经过传感区对被检测信号进行强度调制,得到强调调制光信号,再经光电转换成为电信号,最后与信号 $R(t)$ 做相关运算,运算结果通过放大、滤波、积分等手段后,通过测量输出光强度的值,实现对被检测微弱信号的检测,实际应用中,由电光调制、强调调制及光电转换等造成的延迟量相对于调制信号周期可忽略,“相关”功能模块中包含了延迟模块,延迟参数根据应用边界以保证所要求的信号检测概率选取。

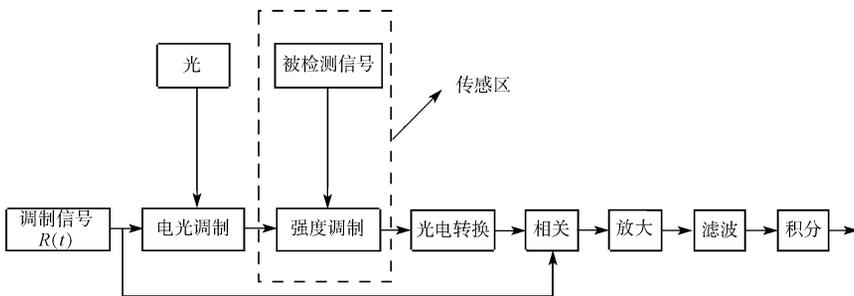


图 2 电路设计框图

4 仿真过程

根据上述调制解调电路设计原理,设计仿真电路,利

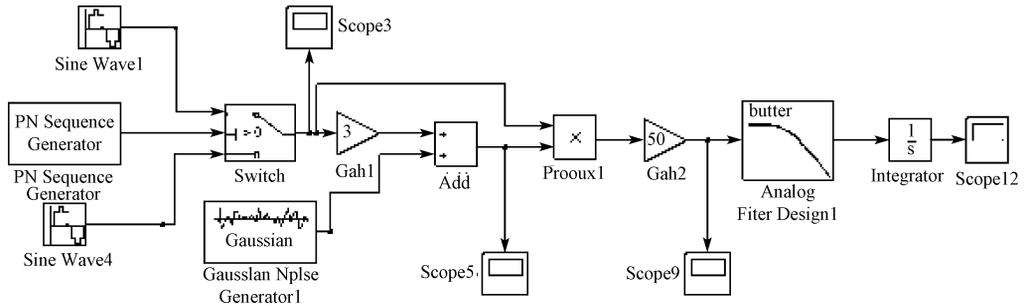


图 3 仿真电路图

用 Simulink 软件对该电路对微弱信号的检测性能进行仿真。仿真电路如图 3 所示。
在仿真过程中, Gain1 表示的值 K 为所需要检测的微弱量,这里设定为 3,两个信号发生器产生频率为 1 kHz,幅度为 10 的正、余弦波信号,通过伪随机码发生器(PN Sequence Geberator)调制,通过 Gain1 后加入高斯分布的噪声,之后作自相关、放大、低通滤波、积分,从而测量出 K 的值。仿真的过程分为 3 部分:

- 1) 没有加入噪声时检测 K 值;
- 2) 在固定码长的伪随机序列下,加入同一统计特性的高斯分布噪声,不同时刻检测 K 值;
- 3) 在不同码长的伪随机序列下,改变高斯噪声的方差,检测 K 值,共仿真 3 个不同长度的码段。

5 仿真结果

仿真过程中,各模块输出信号波形如图 4~图 7 所示。

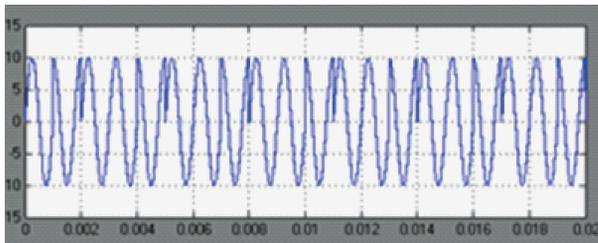


图 4 Switch 模块输出端的波形图

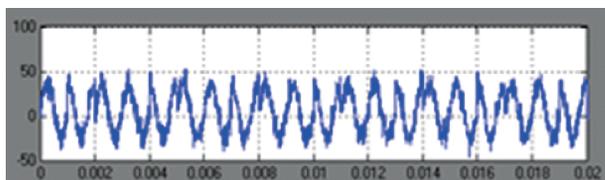


图 5 加入噪声后的波形图

假设微弱信号经过传感器,被放大 K (这里设置为 3 倍) 倍,则经过伪随机编码所调制出的信号是由 $K * 10 * \sin(2000 * \pi * t)$ (当伪随机码为 1 时) 和

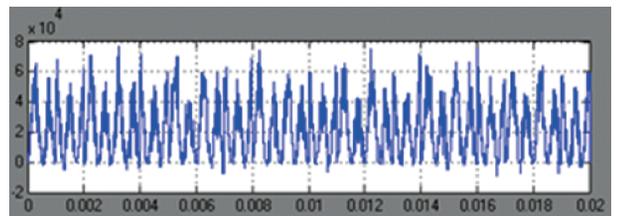


图 6 乘法器(Product1 模块)的输出波形

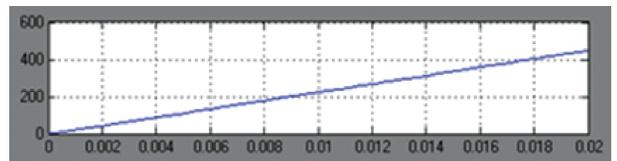


图 7 积分器的输出波形

$K * 10 * \cos(2000 * \pi * t)$ (当伪随机码为 0 时) 所组成的信号。

假设所加入的噪声为 $n(t)$,则到达乘法器时两路信号进行如下运算:

$$[k * 10 * \sin(2000\pi t)] * [k * 10 * \sin(2000\pi t) + n(t)] = 1/2 * k^2 * 10^2 - 1/2 * k^2 * 10^2 \cos(4000\pi t) + n(t) * 10k \sin(2000\pi t) \quad (4)$$

$$[k * 10 * \cos(2000\pi t)] * [k * 10 * \sin(2000\pi t) + n(t)] = 1/2 * k^2 * 10^2 + 1/2 * k^2 * 10^2 * \cos(4000\pi t) + n(t) * 10k \cos(2000\pi t) \quad (5)$$

式(4)和式(5)中的第一项均为直流成分,依照所设定的取值及后端的 50 倍放大可得出为 $\frac{1}{2} * 10^2 * 3^2 * 50 = 22500$,第二项均为被测信号的二倍频信号,经过后端的低通滤波器将其滤除;第三项均为噪声与信号相乘,由于信号与噪声完全不相关,经过后端的积分器后,输出结果为零,因此最终输出结果为一直流信号的积分,如图 6 所示。

当不加入噪声时,7 码段下 K 值测量结果如表 1 所示。

表 1 无噪声条件下 K 值测量结果

噪声	噪声(0,0)							
时间 ($\times 10^{-3}$)	0	1	2	3	4	5	6	7
积分值	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5
K 的值	—	3	3	3	3	3	3	3

同一统计特性噪声情况下,不同时刻 K 值的检测结果,以 7 码段为例,设定高斯分布的噪声平均值为 5,方差为 50,相应的噪声模块输出结果如图 8、图 9 所示。设置不同的初始种子,以模拟不同时刻噪声的情况,选取了 20 个不同的点,对每一个码片作定积分,对积分结果进行归一化,由公式 $K = \sqrt{\frac{m}{2.5}}$ 计算得到 K 值,其中 m 表示积分值。以各时间点为横坐标,各点 K 值的平均值为纵坐标,得到 K 值测量结果如图 10 所示。

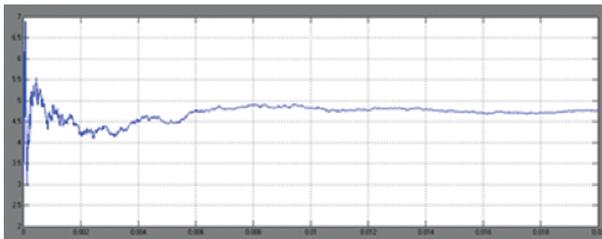


图 8 噪声(5,50)的平均值曲线图

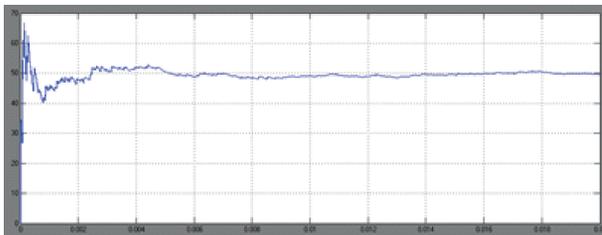


图 9 噪声(5,50)的方差曲线图

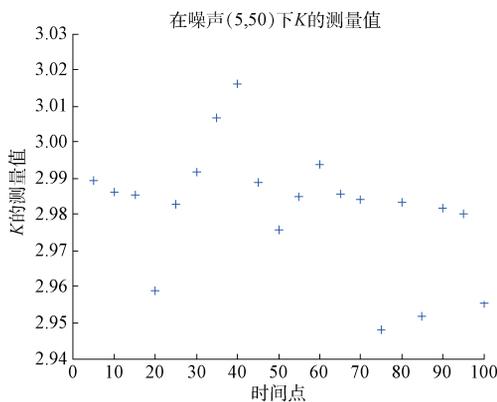


图 10 同噪声条件下不同时刻 K 值测量结果散点图

仿真过程中改变加入的高斯分布噪声的方差,模拟不同噪声条件下,K 值测量结果。噪声参数分别取:(5,5)、(5,10)、(5,15)、(5,20)、(5,25)、(5,30)、(5,35)、(5,40)、(4,45)、(5,50)、(5,55)、(5,60)、(5,65)、(5,70)、(5,75)、(5,80)、(5,85)、(5,90)、(5,95)、(5,100),以噪声的方差为横坐标,K 值的平均值为纵坐标,再改变伪随机编码的长度,本仿真中分别取编码长度为 7、15、31,得到 K 值测量结果如图 11 所示。

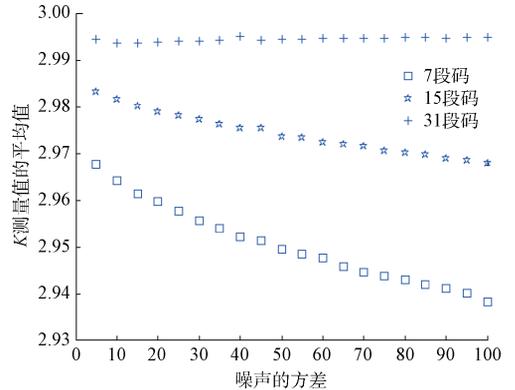


图 11 不同噪声及编码长度下 K 值测量结果

本研究过程中,用 K 值来表示微弱信号某一时刻幅度值,随时间连续变化的 K 值构成了需要检测的微弱信号。K 值的变化反映了某一影响因子对于微弱信号的影响。

在上述仿真过程中检测了 3 种情况下的 K 值:当信号中没有加入噪声时,检测出的 K 值为 3,与预先设定的值相同,说明在没有噪声影响的情况下该调制解调电路可以准确检测出微弱信号;当信号中加入一种高斯分布的噪声时,在不同时刻检测,K 值均接近于设定值 3,且其波动幅度的很小;当信号加入不同的噪声时,由该电路检测得出的 K 值都接近于设定值 3,且当伪随机编码码段越长时,检测得出的 K 值误差越小。

5 结 论

本文基于相关检测原理、伪随机编码、信号放大、滤波等手段,设计了一种微弱光电信号调制解调电路,利用 Simulink 软件对该电路的检测性能进行仿真,仿真结果表明,该电路方案在信噪比为 0.03 的情况下,依然能够准确检测出所需信号,其精度可达千分之五,验证了其对于弱信噪比信号检测的可行性,该方案具有稳定性高、适应性强、误差小、可靠性高等特点,可应用于对微弱光电信号或弱信噪比光电信号的检测及数据采集系统中。

参考文献

[1] 聂娅琴. 基于锁相放大器的微弱信号检测研究[D]. 湖南:中南大学,2014:17-18.