

# 一种微弱光信号相关检测方法的硬件实现

李炳新, 祖海娇

(燕山大学 信息学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 利用伪随机序列的良好随机性可以测量淹没在噪声和干扰中的微弱光信号, 这是一种相关检测方法。在阐明测量原理的基础上, 设计了采用该方法的测量系统, 采用 FPGA 实现 FFT 算法从而完成测量所必需的信号相关处理。实验结果表明, 完全由硬件实现的测量系统可以近于实时地完成微弱光信号的测量。

**关键词:** 微弱光信号; 伪随机序列; 相关; FPGA

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)12-0030-04

## A weak optical signal detection method related to hardware implementation

LI Bing Xin, ZU Hai Jiao

(College of Information, Yanshan University, Qinhuang 066004, China)

**Abstract:** The use of pseudo-random sequence of good randomness can be measured submerged in the noise and interference in the weak optical signal, which is a correlation detection method. In this paper, to clarify the basis of measurement principle, measurement system using this method is designed, in which FFT algorithm implemented by FPGA is used to complete the measurement of the signals necessary for processing. Experimental results show that the fully implemented by hardware measurement system can be completed near-real-time measurement of weak optical signals.

**Key words:** weak optical signal; pseudo-random sequence; correlation; FPGA

光纤通信技术是信息领域十分引人瞩目的课题, 微弱信号检测是光通信领域中不可缺少的环节。微弱光信号检测是利用光电信息技术、电子学、物理学、信息论、计算机等各种知识的综合技术, 它是在认识噪声与光信号的物理特性和相关性的基础上, 把被噪声淹没的有用信号提取出来的一种技术。目前常用的微弱信号检测方法有频域信号的相干检测、时域信号的积累平均、离散信号的计数技术、并行检测方法等<sup>[1]</sup>。伪随机序列是一种具有良好随机性的二进制序列, 其许多特性都与白噪声接近, 且能够由确定的方法产生, 伪随机序列在许多领域都得到了应用<sup>[2,3]</sup>。利用伪随机序列的良好随机性可以测量淹没在噪声和干扰中的微弱光信号。测量系统的输入光信号用伪随机序列调制, 调制的光信号注入测量系统, 输出光信号经过光电探测器后与调制所用伪随机序列进行相关运算。其相关函数的峰值正比于输入信号强度, 且有很高的信噪比, 因此可以检测到混在噪声与干扰中的微弱光信号, 提高测量的准确性和精度。

### ↑ 测量系统组成

微弱光信号检测的硬件电路主要由三部分组成: 信号的产生与调制、信号的接收、信号的相关处理。

伪随机序列相关检测原理如图 1 所示。由 FPGA 产生伪随机序列  $p(t)$ , 用它调制光源, 调制的光信号经过测量系统后到达接收端, 光电转换后得到的光输出信号为  $x(t)$ , 若测量过程仅影响输入光信号的强度, 则  $x(t) =$

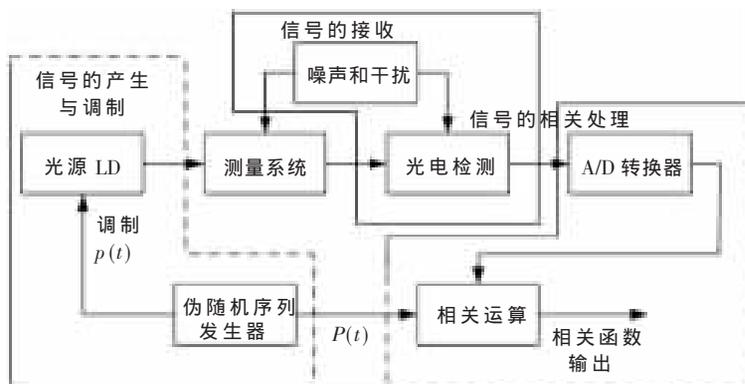


图 1 伪随机序列相关检测原理框图

硬件纵横

Hardware Technique

$ap(t)+n(t)$ ,其中  $a$  为输出信号幅度,  $n(t)$  为噪声和干扰。 $x(t)$  同发送端的伪随机序列  $p(t)$  进行相关运算,互相关函数为:

$$R_{xp}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)p(t-\tau)dt = aR_{pp}(\tau) + R_{np}(\tau) \quad (1)$$

式中:  $R_{pp} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p(t)p(t-\tau)dt$  是伪随机序列的自相关函数,  $R_{np} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T n(t)p(t-\tau)dt$  是伪随机序列与噪声、干扰的互相关函数。由于  $R_{pp}(\tau) = \delta(\tau)$ , 其中  $\delta(\tau)$  是脉冲函数, 而伪随机序列与噪声、干扰不相关, 故有  $R_{np}(\tau) = 0$ 。从而互相关函数。

$$R_{xp}(\tau) = a\delta(\tau) \quad (2)$$

式(2)表明只要测量互相关函数值就可以检测到混在噪声中的微弱信号的强度。

设两个长为  $N$  的实离散时间序列  $x(n)$  与  $y(n)$  的互相关函数定义为:

$$r_{xy}(\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n-\tau)y(n) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n+\tau)$$

则可以证明,  $r_{xy}(\tau)$  的离散傅里叶变换为:

$$R_{xy}(k) = X^*(k)Y(k) \quad 0 \leq k \leq N-1$$

其中,  $X(k) = \text{DFT}[x(n)], Y(k) = \text{DFT}[y(n)], R_{xy}(k) = \text{DFT}[r_{xy}(\tau)]$

证: 将  $x(n)、y(n)$  的逆离散傅里叶变换代入互相关函数定义式:

$$\begin{aligned} r_{xy}(\tau) &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n+\tau) \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} \left[ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{j\frac{2\pi}{N}kn} \right] \left[ \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} Y(l)e^{j\frac{2\pi}{N}l(n+\tau)} \right] \end{aligned}$$

因  $x(n)$  是实序列, 所以:  $x(n) = x^*(n)$ , 得:

$$\begin{aligned} r_{xy}(\tau) &= \sum_{n=0}^{N-1} \left[ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X^*(k)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \right] \left[ \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} Y(l)e^{j\frac{2\pi}{N}l(n+\tau)} \right] \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} X^*(k)Y(l)e^{j\frac{2\pi}{N}l\tau} \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{N}n(l+k)} \right] \end{aligned}$$

$$\text{因 } \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{N}n(l+k)} = \begin{cases} 1 & l=k \\ 0 & l \neq k \end{cases}$$

$$\text{得 } r_{xy}(\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n+\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X^*(k)Y(k)e^{j\frac{2\pi}{N}k\tau}$$

当  $x(n)=y(n)$  时, 得到  $x(n)$  的自相关函数为:

$$r_{xx}(\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x(n+\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2 e^{j\frac{2\pi}{N}k\tau}$$

上面的推导表明, 相关函数的计算可利用傅里叶变换实现。

2 系统硬件设计

2.1 信号的产生与调制

图 2 为半导体激光器的驱动电路, 也就是半导体激光器的调制电路采用直接调制, 电路为双端信号反相输

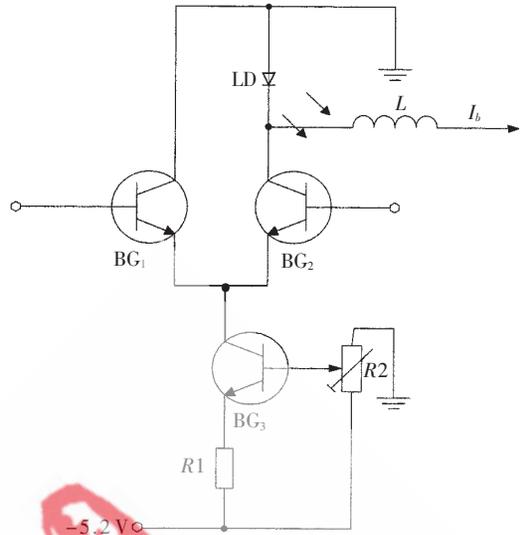


图 2 驱动电路

入, Q1 与 Q2 的基极所加的信号大小相等、相位相反, 这样可以提高电路的开关速率, 还有这种电路的温度稳定性、抗电源干扰的性能都比较好。

系统所用 LD 光源在 25℃ 时 LD 主要参数为: 工作电流 35 mA~45 mA, 工作电压 2.3 V~2.6 V, 输出功率 10 mW, 型号为 HLD650010N5T

2.2 信号的接收

光信号的接收<sup>[4]</sup>电路主要由光电二极管、前置放大电路、主放大电路等组成。图 3 是完整的微弱信号光电检测电路。

光电二极管选择了 PIN 光电二极管, 因为 PIN 频带宽, 输出电流小(数微安)。PIN 将接收的光信号变成与之成比例的微弱电流信号, 通过运算放大器和与 PIN 串联的电阻组成的放大器转换成电压信号。选择 MAX420 运算放大器作为前置放大电路的运放。它具有典型输入失调电压为 1 μV, 输入偏置电流为 10 pA。

2.3 信号的相关处理部分

信号的相关处理主要由 Cyclone2 系列 EP2C35F484C8C8 芯片和 A/D 转换芯片 ADC0809 完成。硬件实现 FFT<sup>[5-7]</sup>算法的方法主要有: DSP(通用数字信号处理器); FFT 专用芯片; FPGA。DSP 具有纯软件实现的灵活性, 适用于流程复杂的算法, 但如果在 DSP 中完成 FFT 运算, 不仅要占用大量 DSP 的运算时间, 使整个数据吞吐率降低, 也无法发挥 DSP 软件实现的灵活性。因此, FFT 运算应由 FPGA 完成。采用专用的 FFT 处理芯片, 虽然速度能达到要求, 但其可扩展性差。FPGA 具有硬件结构可重构的特点。适合于算法结构固定、运算量大的前端数字信号处理。

2.3.1 FFT 处理器总体设计

基-2 FFT 模块设计主要由六部分组成: 碟形运算单元、地址产生单元、时序控制单元、存储单元、时钟单元和计数器, 如图 4 所示。

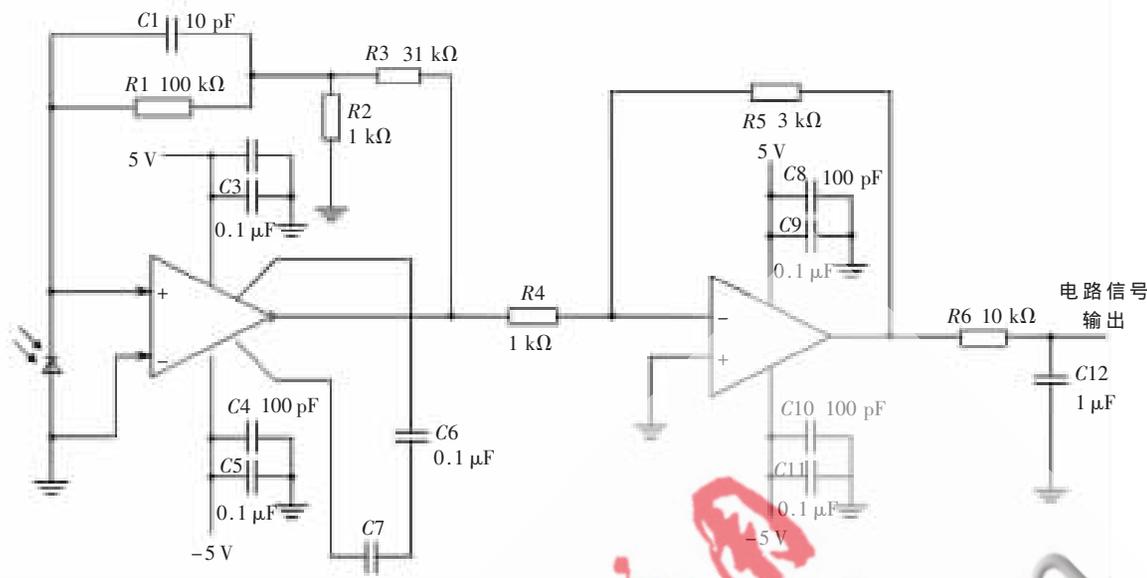


图3 光电检测部分

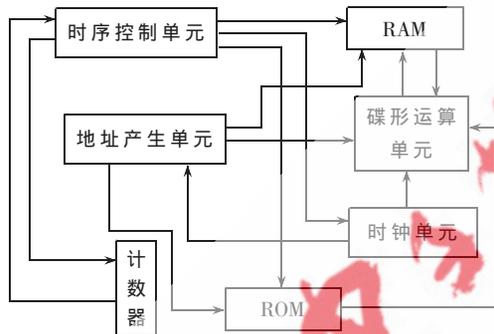


图4 FFT处理器结构框图

### 2.3.2 各模块的功能概述

(1) 碟形运算单元: 碟形运算单元是 FFT 处理器的核心部分, 采用 DIT 方式完成基-2 碟形运算。

(2) 地址产生单元: 控制产生 4 组地址, 原始数据存入 RAM 的地址、旋转因子 ROM 的地址、中间结果的 RAM 地址和每个 RAM 的数据依次读出的地址。

(3) 时序控制单元: 控制单元是整个系统的控制核心, 各个功能模块之间的地址、数据传递均通过控制单元协调工作, 控制整个 FFT 系统的工作流程。其实现过程是在一个总体时钟下按照预先制定的顺序对不同模块的时钟端发出脉冲指令。基本工作时钟通过参考各模块工作最大延迟时间而设定。

(4) 存储单元: 主要用来存储输入数据, 中间结果 (RAM), 预置旋转因子 (ROM), 以及最后的计算结果 (RAM)。

(5) 时钟单元: 产生在 FFT 处理器中要用到的各种时钟。

(6) 计数器: 用来计算碟形运算单元中级数和碟形运算的次数。

## 3 实验

信号源由 FPGA 产生的伪随机序列调制 LD 得到,

《微型机与应用》2010 年第 12 期

伪随机比特序列由生成多项式得到。产生 650 nm 的光信号。实验采用波长为 650 nm, 功率为 10 mW 半导体激光管, 调制频率为 732 Hz。利用信号的发散特性, 可以通过调节光源和探测器的距离来调节输入到光探测器的光信号的大小, 检测不同情况下的信号输入。为了验证设计的可行性, 设计了如下的实验, 使用 FPGA 产生 m 序列, 序列周期为 2047, 用这个序列调制 LD 光源, 输出光源注入光纤, 在光纤末端使用光电探测器接收光信号, 放大后接 A/D 转换器变成数字信号, 用 LabVIEW 对数字信号进行实时采集并存储到计算机中, 同样 m 序列也被存储到计算机中, 然后把这两种信号进行互相关运算, 其互相关函数峰值就是混在噪声中的微弱光信号的强度, 从实验中可以得出输出信号信噪比可以提高 40 dB 左右。在进行相关运算时一定要注意输入的信号放大倍数不要太大, 在 0~5 V 之间, 避免信号失真。通过 LabVIEW 采集后的数据是以 txt 格式存储。图 5(a) 是 m 序列, 图 5(b) 是光纤输出信号, 图 5(c) 是其相关函数, 图 5(d) 是由相关函数峰值得到的输出信号时域波形, 信噪比得到显著提高。

本文通过对基于伪随机序列微弱光信号检测硬件系统各组成部分的介绍, 提出了微弱光信号检测的硬件电路设计方案, 并最终用硬件电路实现了该设计方案。通过实验测试验证, 所设计的硬件利用伪随机序列的相关特性, 在较强的噪声背景下可以有效地检测到淹没在噪声和干扰中的微弱光信号。

### 参考文献

- [1] 吴杰. 光电信号检测[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990: 141, 67-68, 127, 141.
- [2] 孙淑琴, 林君, 罗军. 伪随机序列发射电路设计与实验[J]. 国外电子测量技术, 2004, 23(3).
- [3] 肖国镇, 梁传甲, 王育民, 伪随机序列及其应用[M].

欢迎网上投稿 [www.pcachina.com](http://www.pcachina.com) 33

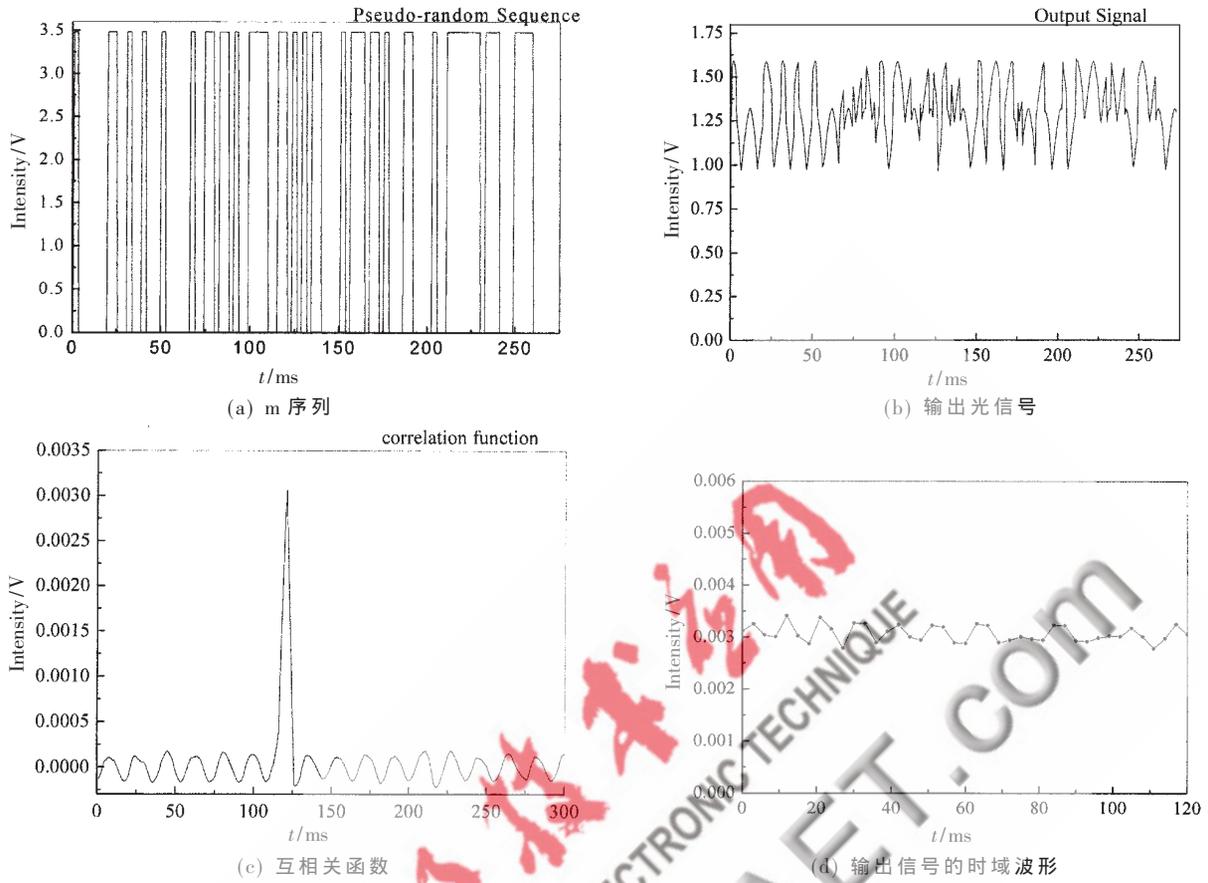


图5 实验结果

北京:国防工业出版社,1985,249:81-83.

现[J].微电子学,2008,38(3):342-348.

[4] 肖洪梅,苏心智,陈长庚,吴健,微弱激光脉冲信号的相关检测实验[J].激光技术,2004,28(3):234-236.

(收稿日期:2009-09-27)

[5] (美)A. V. 奥本海姆, R. W. 谢费著.离散时间信号处理[J].黄建国,刘树棠,译.北京:科学出版社,1998:485-514.

[6] 曾学明,徐龙祥,刘正坝.磁悬浮轴承同步数据采集与实时处理系统[J].数据采集与处理,2002,17(4):472-474.

[7] 淮永进,屈晓声.具有蝶型单元的FFT在FPGA上的实

#### 作者简介:

李炳新,男,1968年生,硕士研究生导师,主要研究方向:光纤通信,聚合物光纤。

祖海娇,女,1983年生,在读硕士研究生,主要研究方向:微弱光信号的检测系统。