

改进型相干光检测系统的设计

陈 楚, 黄春晖

(福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350002)

摘 要:为实现光信号幅度与相位的同时检测,设计了一种新型的零差相干检测系统,包括光路实现方案的设计和接收端数据处理程序的实现。实验中利用 LabVIEW 环境编程实现对光路方案的模拟仿真、接收端数据处理程序的实现及对两个部分进行验证。所设计的零差相干检测系统,可用于连续变量量子密钥分配系统的数据接收。

关键词:零差;相干光检测;幅度;相位;LabVIEW

中图分类号:TN929.12

文献标识码:A

Improved Version of Coherent Light Detection System Design

CHEN Chu, HUANG Chun-hui

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: In order to achieve the detection of amplitude and phase of the optical signal at the same time, a new homodyne coherent detection system was designed, including the scheme of optical align design and the realization of receiver data processing. Considering the current widely use of virtual instrument LabVIEW programming software, the experiment uses LabVIEW programming environment to achieve the simulation of the scheme of optical align, the realization of receiver data processing, and the test for the two part. This system can be used for data reception in continuous variables quantum key distribution system.

Key words: homodyne detection; coherent detection of light; amplitude; phase; LabVIEW

1 引 言

在光通信方面,相干光通信是发展多种调制模式(调幅、调频、调相),进一步拓展通信容量,提高通信质量的潜在技术。在一些非通信技术领域,如光纤传感、信号分析及测量等方面,光相干探测技术也有很好的应用^[1-2]。

文献[3]、[4]介绍了相干检测的基本原理。文献[4]介绍了相干检测在不同技术领域的应用。在相干检测原理的基础上,有一系列的相干光通信实验系统相继完成^[5-6]。

相干光检测的一个应用是用于连续变量量子密钥分配的数据接收。2003年, Grosshans 等人在实验室里实现了连续变量的量子密钥分配,其第一代实验装置中^[7-8],调节本振光的相位为 0 时,测得相干态光场的 p 分量;调节本振光的相位为 $\pi/2$ 时,测得相干态光场的 x 分量;通过调节压电陶瓷的位移来调节本振光的相位。当改变测量对象时,就需要重新调节一次压电陶瓷。但是由于压电陶瓷的迟滞、非线性的影响,对压电陶瓷的调节无法一步到

位,调节速度严重受限,因而成了影响量子密钥分配速度的一个因素。

本系统基于相干检测的基本原理,设计了一种新型的零差相干检测系统,通过对幅度和相位的同时检测,再由光电采集测得数据计算幅度和相位,并进一步计算相干态光场的 x 和 p 分量。这种方式避免了频繁调节压电陶瓷带来的时间上的损耗,提高了量子密钥传输的速率。同时,利用高效灵活的虚拟仪器设计环境 LabVIEW,编程实现接收端采集后的数据处理,计算发送端调制信号的幅度与相位。

2 光路设计与分析

2.1 光路实现

检测系统的光路实现方案如图 1 所示。

光路图说明:

光耦合器有两个输入端口(端口 1 和端口 2),

基金项目:福建省自然科学基金项目(No. Z0512003)资助。

作者简介:陈 楚(1984-),在读硕士,主要研究方向为电路与系统。E-mail: chch2007@fzu.edu.cn

收稿日期:2007-12-11

两个输出端口(端口 3 和端口 4)。系统组建时从端口 1 输入信号光,控制为垂直偏振;端口 2 输入本振光,控制为平行偏振。信号光和本振光在分光镜上分别发生反射和透射(透射率和反射率各 50%),其中从端口 1 输入信号光的透射光和端口 2 输入本振光的反射光叠加后从端口 3 输出,信号光的反射光和本振光的透射光叠加后从端口 4 输出。

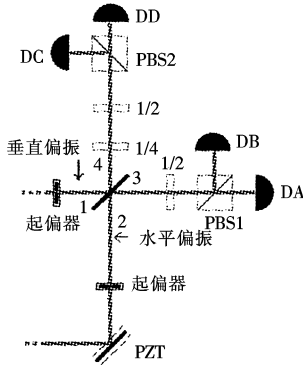


图 1 相干光检测光路方案

2.2 原理分析

考虑到本系统使用的是零差相干检测,信号光与本振光频率相同,设为 ω 。从端口 3 输出的光场可以写成:

$$\overline{E_{O3}} = A_{L3} e^{i(\omega t + \varphi_{L3})} \overline{\alpha_x} + A_{S3} e^{i(\omega t + \varphi_{S3})} \overline{\alpha_y}$$

式中, A_{L3} 和 φ_{L3} 分别为从端口 3 输出的部分本振光的幅度和相位, A_{S3} 和 φ_{S3} 分别为从端口 3 输出的部分信号光载波的幅度和相位。

半波片快轴与水平方向夹角 $3\pi/8$ 。经过半波片偏转,信号光和本振光的偏振方向均为与垂直方向成 45° 夹角。此时输出光场转变为:

$$\begin{aligned} \overline{E_{O3}} = & \left[A_{L3} \cos\left(\frac{3\pi}{4}\right) e^{i(\omega t + \varphi_{S3})} + A_{S3} \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) e^{i(\omega t + \varphi_{S3})} \right] \overline{\alpha_x} + \\ & \left[A_{L3} \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) e^{i(\omega t + \varphi_{S3})} + A_{S3} \cos\left(-\frac{\pi}{4}\right) e^{i(\omega t + \varphi_{S3})} \right] \overline{\alpha_y} \end{aligned} \quad (1)$$

经过偏振分束镜(PBS1)后,按照偏振方向的不同把入射光分成两束(A 和 B)。

透射光 A 为垂直偏振光,在其偏振方向的光场方程为:

$$\begin{aligned} E_A = \overline{E_{O3}} \cdot \overline{\alpha_y} \\ = A_{L3} \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) e^{i(\omega t + \varphi_{L3})} + A_{S3} \cos\left(-\frac{\pi}{4}\right) e^{i(\omega t + \varphi_{S3})} \end{aligned} \quad (2)$$

反射光 B 为平行偏振光,在其偏振方向的光场方程为:

$$\begin{aligned} E_B = \overline{E_{O3}} \cdot \overline{\alpha_x} \\ = A_{L3} \cos\left(\frac{3\pi}{4}\right) e^{i(\omega t + \varphi_{L3})} + A_{S3} \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) e^{i(\omega t + \varphi_{S3})} \end{aligned} \quad (3)$$

DA 和 DB 为光探测器。探测器输出的电流 I_o 与光功率 $|E|^2$ 成正比,即 $I_o = K \times |E|^2$,其中, K 为一常数。光路中探测器 A 检测出的光电流:

$$\begin{aligned} I_{OA} = K \times |E_A|^2 \\ = K \times \left| A_{L3} \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) e^{i(\omega t + \varphi_{L3})} + A_{S3} \cos\left(-\frac{\pi}{4}\right) e^{i(\omega t + \varphi_{S3})} \right|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

经计算得:

$$I_{OA} = K \times \left[\frac{1}{2} A_{L3}^2 + \frac{1}{2} A_{S3}^2 + A_{L3} A_{S3} \cos(\varphi_{S3} - \varphi_{L3}) \right] \quad (5)$$

经同样计算得探测器 B 检测出的光电流:

$$I_{OB} = K \times \left[\frac{1}{2} A_{L3}^2 + \frac{1}{2} A_{S3}^2 - A_{L3} A_{S3} \cos(\varphi_{S3} - \varphi_{L3}) \right] \quad (6)$$

对探测器 A 和 B 检测出的光电流进行差分,取出其中的差模部分。由以上二式,得差模电流:

$$\begin{aligned} I_{O3} = I_{OA} - I_{OB} \\ = 2 \times K \times A_{L3} A_{S3} \cos(\varphi_{S3} - \varphi_{L3}) \end{aligned} \quad (7)$$

端口 4 的分析与端口 3 类似。从端口 4 输出的光场可以写成:

$$\overline{E_{O4}} = A_{L4} e^{i(\omega t + \varphi_{L4})} \overline{\alpha_x} + A_{S4} e^{i(\omega t + \varphi_{S4})} \overline{\alpha_y}$$

式中, A_{L4} 和 φ_{L4} 分别为从端口 4 输出的部分本振光的幅度和相位, A_{S4} 和 φ_{S4} 分别为从端口 4 输出的部分信号光载波的幅度和相位。

经过 $1/4$ 波片后,对信号光进行 $1/4$ 周期即 $\pi/2$ 的相位延迟,此时输出光场转变为:

$$\overline{E_{O4}} = A_{L4} e^{i(\omega t + \varphi_{L4})} \overline{\alpha_x} + A_{S4} e^{i(\omega t + \varphi_{S4} - \frac{\pi}{2})} \overline{\alpha_y}$$

再经过半波片偏转,并经过偏振分束镜(PBS2),按照偏振方向的不同把入射光分成两束(C 和 D),同样对两束光分别用探测器(DC 和 DD)探测。

经过与端口 3 同样的分析过程,端口 4 输出的差模电流:

$$\begin{aligned} I_{O4} = I_{OC} - I_{OD} \\ = 2 \times K \times A_{L4} A_{S4} \cos\left(\varphi_{S4} - \varphi_{L4} - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

相干检测光耦合器为半反半透玻片,因此 $A_{L3} = A_{L4}$, $A_{S3} = A_{S4}$ 。 $\varphi_{S4} - \varphi_{L4} = \varphi_{S3} - \varphi_{L3} + \pi$ 。

3 接收端数据处理

3.1 基本原理

上一节设计的光路方案实现了零差相干解调,再经高速光电检测及数据采集,可检测出差分电流 I_{O3} 和 I_{O4} 。为得到信号发送端幅度和相位调制的调制信号,还需要根据所测量的差分电流 I_{O3} 和 I_{O4} ,经过一系列数据处理过程求得。计算过程分析如下:

通过调节本振光路的压电陶瓷控制器,可实现当信号光未经调制时,混频器输出端口 3 信号光的参考相位与本振光相同。设调制的相位为 $\varphi =$

$\varphi_{S3} - \varphi_{I3} = \varphi_{S4} - \varphi_{I3} - \pi$, 调制的幅度为 $A_S = 2 \times A_{S3} = 2 \times A_{S4}$, 则式(7)和式(8)可转化为:

$$I_{O3} = 4 \times K \times A_L A_S \times \cos\varphi \quad (9)$$

$$I_{O4} = 4 \times K \times A_L A_S \times \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (10)$$

实验中 K 可通过实验测得, A_L 已知, 因此根据式(9)和式(10), 可计算出 A_S 和 φ 。

3.2 算法设计

考虑到目前 LabVIEW 软件应用的广泛性, 实验中利用 LabVIEW 环境编程实现该算法。计算 A_S 和 φ 的流程图如图 2 所示。

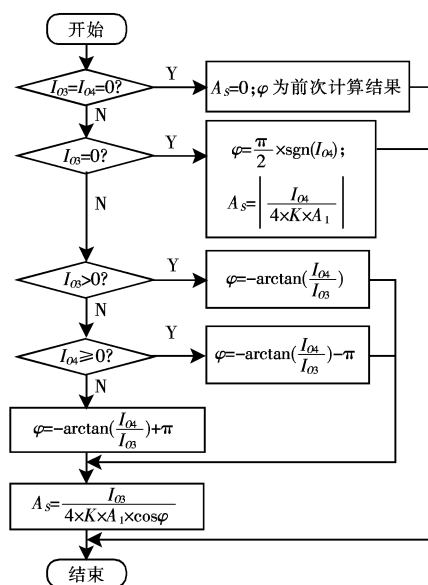


图2 数据处理程序流程图

由于三角函数的特殊性, 在计算过程中需要根据多种情况分别处理, 因此流程图中就有多次分支。

4 结果

用 LabVIEW 编程对实验中的光路设计和数据处理进行仿真。其中在对光路方案的仿真中, 采用仿真信号 VI 可方便地实现对信号光载波的生成和调制、本振光载波生成的仿真, 并利用复数实现向量运算; 数据处理为一独立子程序, 即子 VI, 供仿真程序和以后其他程序调用。

仿真程序有两个输入端和两个输出端。其中输入端的信号分别用于进行幅度调制和相位调制; 输出端为经过零差检测解调与数据处理后所得的幅度与相位波形。

图 3 为正在仿真过程中的输入幅度调制信号与输出解调处理后的幅度信号的波形显示, 输入幅度调制信号为一锯齿波。图 4 为仿真过程输入相位调制信号与输出解调处理后相位信号的波形显示, 输

入相位调制信号为一正弦波。从图中可看出, 输入信号与解调结果基本吻合。

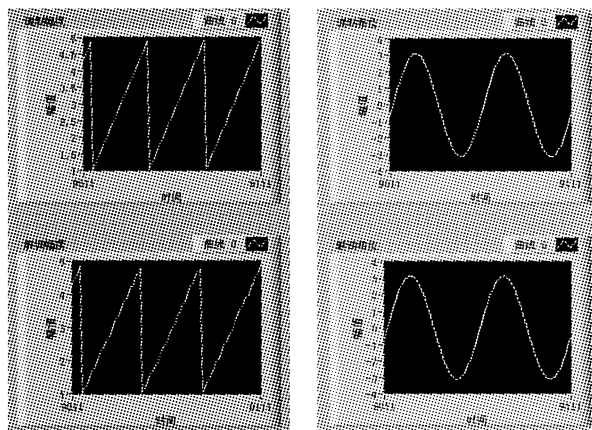


图3 幅度调制与解调结果波形 图4 相位调制与解调结果波形

5 小结

本文实现了一种新型零差相干检测系统的光路方案设计、接收端数据处理程序的实现及对以上两个部分的验证。该方案理论上可实现相干光通信幅度与相位的同时调制与解调, 应用于量子密钥传输中, 避免了频繁调节压电陶瓷带来的时间损耗, 可望在实际应用中进一步提高量子密钥传输速率。

参考文献:

- [1] 么周石, 胡渝. 星间相干光通信技术的发展历程与趋势[J]. 光通信技术, 2005, (8): 44-46.
- [2] 肖石林, 曾庆济. 光相干探测的应用技术研究[J]. 光通信技术, 2003, (11): 28-31.
- [3] 杨祥林. 光纤通信系统[M]. 北京, 国防工业出版社, 2000.
- [4] 贺敏. 相干光通信系统的数学建模与仿真技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
- [5] 何震川, 蒋丽娟, 肖石林, 等. 相干光纤电视传输系统[J]. 光通信技术, 1989, 13(3): 15-17.
- [6] 肖石林, 何震川, 蒋丽娟, 等. 光外差中频高度稳定可调的相干光纤传输系统[C]. 第五届全国光纤通信学术交流会论文集, 1991: 416-418.
- [7] Grosshans F, Van Assche G, Wenger J. Quantum key distribution using gaussian modulated coherent states[J]. Nature, 2003, 421(6920): 238-241.
- [8] 陈进建, 韩正甫, 等. 连续变量量子密码术[J]. 物理, 2006, 35(9): 785-790.
- [9] F J Jime'neza, J De Frutos. Virtual instrument for measurement, processing data, and visualization of vibration patterns of piezoelectric devices[J]. Computer Standards & Interfaces, 2005, 27: 653-663.
- [10] 杨乐平, 李海涛, 赵勇, 等. LabVIEW 高级程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [11] LabVIEW Measurements Manual[M]. National Instruments Corporation, 2003, 4.