

基于 LabVIEW 的三光子符合计数实时 3D 显示系统

田亚玲*, 李创社, 陈海霞, 张彦鹏

西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049

摘要 单光子计数技术是量子光学领域中非常重要的一种技术, 已被广泛应用于双光子符合探测及关联调控实验。通过一张单光子计数卡和一台路由器, 利用双光子符合探测原理, 采用分时复用的方法, 构建了三光子符合测量的硬件系统, 并基于 LabVIEW 实现了三光子符合计数系统的软件控制。该系统可以实现双光子符合计数和三光子符合计数、实时显示与存储。该系统对六波混频过程产生的 3 束光进行三光子符合探测, 获得了较好的实验结果。该系统可应用于量子通信研究领域的经典光源, 也可应用于非线性过程产生的具有时间-频率量子关联特性的其他非经典光源。

关键词 量子光学; 单光子探测; 三光子; 符合计数; LabVIEW 程序

中图分类号 O434; O562.4; TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1204003

Real-Time 3D Display of Three-Photon Coincidence Counting Using LabVIEW Program

Tian Yaling*, Li Chuangshe, Chen Haixia, Zhang Yanpeng

School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract Single-photon counting is a vital technique in the field of quantum optics. It is widely used in two-photon coincidence detection and correlation control. In this study, we employ a single-photon-counting card and a router to construct a three-photon coincidence system by using two-photon coincidence and time-division multiplexing. The software control is based on LabVIEW program. The system performs coincidence detection for two or three photons, provides real-time displays, and stores the results. We obtain good results when using the system to detect three beams of light generated via the six-wave mixing process. The system can be applied to classical light sources in the field of quantum communication and to other non-classical light sources with time-frequency quantum correlations produced via nonlinear processes.

Key words quantum optics; single-photon detection; three photons; coincidence counting; LabVIEW program

OCIS codes 030.5260; 040.5570; 270.5290

1 引言

量子成像又称双光子关联成像、强度关联成像或鬼成像, 是基于双光子符合探测恢复物体空间信息的一种新型成像技术, 不同于常规成像技术, 它能够躲避云、雾和烟等气象条件的干扰, 获得更清晰的图像。量子成像技术中, 可利用量子纠缠光源^[1]、激光光源^[2]、赝热光源^[3]、X 射线^[4-5]等成像光源进行成像, 还可用有质量的粒子实现鬼成像^[6]。采用何种光源实现鬼成像已成为研究的一个热点问题。无

论是日光光源、激光光源还是纠缠光源, 需考虑的关键因素是鬼成像光源中存在的粒子相关性。量子光学中的相关性检测通常以光子计数和光子统计结果进行判定, 通常使用符合探测的方式进行纠缠光子对判定和单光子干涉实验等^[7-10]。自发参量下转换过程可以产生窄带、长相干时间且具有时间-频率量子关联的 3 束光源^[11]。本文研究的三光子符合计数实时 3D 显示系统, 目的在于利用符合探测的方式研究六波混频过程产生的 3 束光源的时间-频率量子关联特性, 从而进一步探索其空间性质对光学

收稿日期: 2018-05-11; 修回日期: 2018-07-22; 录用日期: 2018-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(11474228)、陕西省自然科学基金(2015JQ6233)

* E-mail: mahua@mail.xjtu.edu.cn

成像和信息处理的影响。

2 基本原理

2.1 双光子符合探测原理

时间相关光子符合计数是一种单光子探测中广泛使用的技术,因其可实现微弱信号测量与检测而在量子通信与量子光学等领域得到广泛应用。典型双光子符合算法,由两个独立的单光子探测器接收单光子信号,符合计数模块利用时间-幅度转换器(TAC)将两单光子脉冲信号的时间间隔转换为电压信号。若该信号在某个符合时间周期内,认为两光子脉冲属于符合事件,输出为 1,记录两脉冲间的延迟时间;其

他情况输出为 0,不记录脉冲延迟时间。通过多周期的循环记录,将有时间关联的事件选择出来。

双光子符合计数工作原理如图 1 所示。两束单光子脉冲信号先后进入两个恒定比定时器(CFD),单光子脉冲信号前沿超过设定值时,触发 CFD 作为 TAC 的启停(start-stop)脉冲,TAC 收到 start 脉冲后,开始利用恒定电流对电容充电,直至收到 stop 脉冲时停止充电,这样电容电压与两单光子脉冲的时间差成比例。将 TAC 输出放大后进行数模转换(ADC),结果以宏时间(macro time)和两脉冲信号的时间间隔的微时间(micro time)等固有形式输出,交由用户主机完成数据处理。

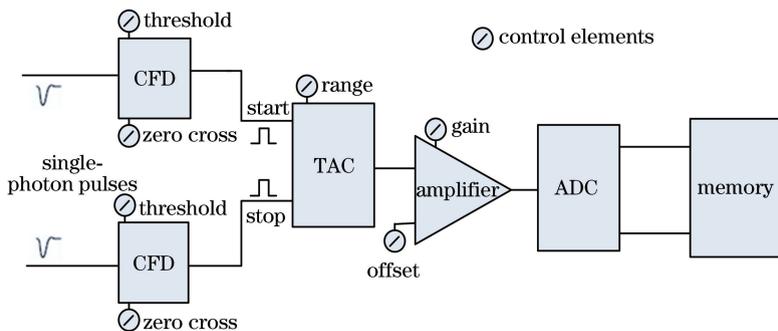


图 1 双光子符合计数工作原理

Fig. 1 Principle of two-photon coincidence counting

2.2 三光子符合探测系统构成

根据双光子符合计数原理,避免了时钟不同步的问题,用路由器、延迟器、功分器以及功合器等对信号进行延时处理后,接入单光子计数卡,通过分时复用的方法,分两步进行双光子符合探测,由计算机软件对所获得的双光子符合数据进行分析,获取三光子符合数据。

三光子符合测量系统示意图如图 2 所示,3 个单光子信号同时到达对应的光纤耦合单光子探测器 (SPCM-AQRH-14-FC, Excelitas Technologies 公司),单光子探测器迅速将单光子信号转换为标准单

光子脉冲输出。探测器 1 的输出被分成两路并对其中一路进行延时处理成为 1b 信号,与未延时的 1a 信号进行功率合成后接入单光子计数卡的 SYNC 端。探测器 3 的输出也进行相同延时成为信号 3,与探测器 2 的输出分别接入路由器的两个输入端。路由器输出和单光子计数卡 (SPC-130EM, Becker&Hickls 公司)的 CFD 端相连。当 3 束光在符合周期内到达单光子探测器时,系统先对未延时的光子对 2 和 1a 进行符合判断,经过计数卡死区恢复时间后,再进行延迟光子对 3 和 1b 进行符合判断,即一个计数卡通过分时复用的方式实现两次双

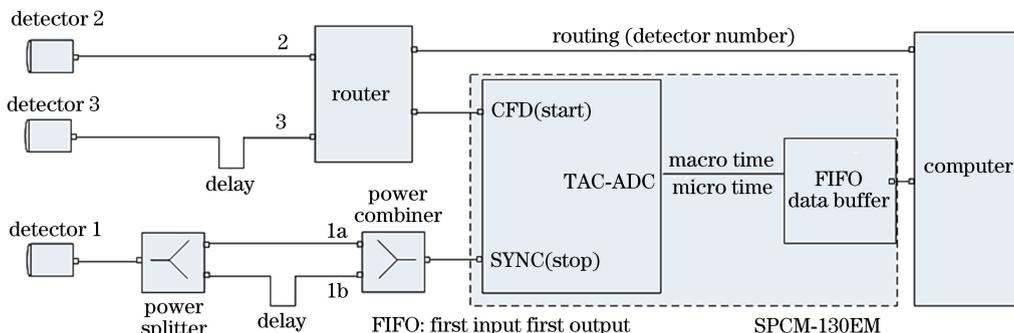


图 2 三光子符合计数系统示意图

Fig. 2 Schematic of three-photon coincidence counting system

光子符合计数。计算机程序实时将第二次符合实验时间减去延迟时间后,与第一次符合时间进行比较,在符合周期内则进行一次三光子符合输出,经过长时间测量判断获得三光子的符合计数 3D 分布,通过三光子符合计数的输出及波形来判断单光子探测器接收到的 3 个光子之间是否存在非经典的时间-频率关联特性。

该系统对六波混频过程产生的 3 束光进行了符合探测,六波混频过程中,3 台半导体激光器输出的 3 束光共同作用于热原子介质,经过自发参量六波混频过程,在满足相位匹配和能量守恒条件时,在六波混频相位匹配的方向上同时产生波数与频率关联的 3 个光子,即需要探测的三光子光源。为消除背景噪声的影响,首先保证六波混频过程及符合计数系统均处于较理想的暗室环境中,使新产生的 3 束信号光和入射光之间形成一定的夹角以滤除部分背景噪声,然后用干涉滤波

片和宽自由光谱区窄带宽的法布里-珀罗标准具进行滤波处理,再用空间分离的光抽运抑制非关联共振荧光噪声后,耦合到处于六波混频相位匹配方向上的 3 个单光子探测器表面,最后可通过设置计数卡参数适当提高输入门限电平,以抑制噪声干扰。必要时,延迟信号通道和非延迟信号通道中间至少空出一个路由器通道,以防止路由器信号之间的串扰。

2.3 三光子符合实时 3D 显示软件开发

LabVIEW 和 Visual C++ 等编程语言相比,具有简单易用的特点。单光子计数卡 (SPCM-130EM) 动态链接库文件给出了接口编程所需的众多 LabVIEW 标准子 VI。在理解计数卡工作机理的基础上,结合实验数据需求,利用 LabVIEW 环境实现了三光子符合计数系统的软件控制,完成了三光子符合输出的实时 3D 显示。三光子符合测量软件实现过程如图 3 所示。

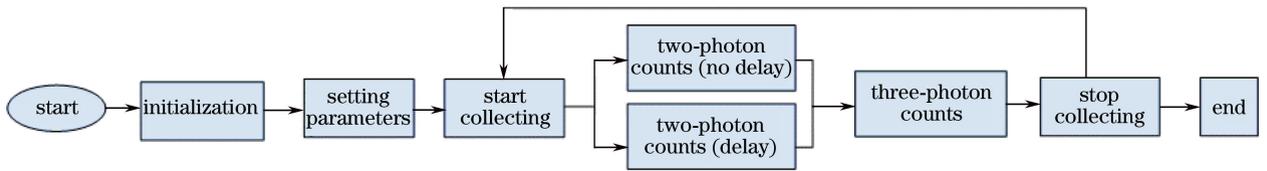


图 3 三光子符合计数软件实现过程图

Fig. 3 Implementation process of three-photon coincidence counting software

使用初始化子 VI (SPCM_initialize.vi) 设置单光子计数卡工作在 FIFO 模式,根据实验条件及需求用 SPCM_set_parameter.vi 和 SPCM_get_parameter.vi 子 VI 完成各种实验参数的设置。用采集计数子 VI (SPCM_start_measurement.vi) 启动符合计数动作,使用数据获取子 VI (SPCM_read_fifo.vi) 将符合输出数据存储在单光子计数卡 FIFO 内存中。SPCM-130EM 计数卡 FIFO 内存数据格

式如表 1 所示,其中 MT 为 12 位内部时钟 (macrotime),ROUT 为 4 位路由信息,ADC 为光子对时间延迟信息经时间幅度转换后的模数转换量,第 4 字节中高四位表示单光子计数卡内存溢出或数据无效。软件随时监测单光子计数卡内存的占用情况,根据计数条件判断是否需停止计数 (SPCM_stop_measurement.vi),符合数据采集过程如图 4 所示。

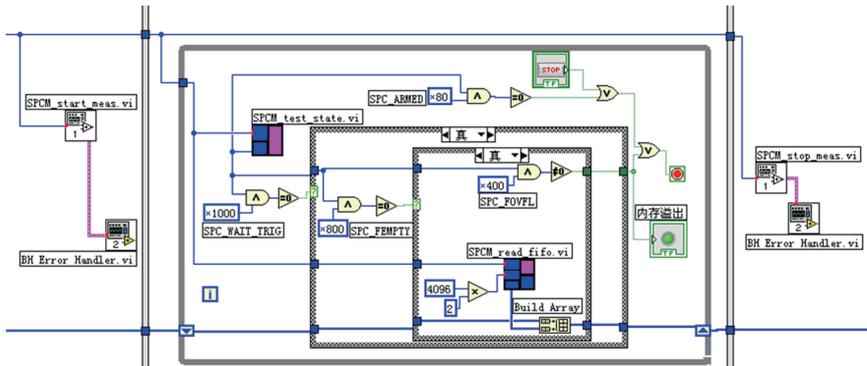


图 4 符合计数的数据采集过程

Fig. 4 Data acquisition process of coincidence counting

表 1 SPCM-130EM 计数卡 FIFO 内存数据格式
Table 1 Data format in FIFO memory of SPCM-130EM

Byte	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
Byte0	MT[7]	MT[6]	MT[5]	MT[4]	MT[3]	MT[2]	MT[1]	MT[0]
Byte1	ROUT[3]	ROUT[2]	ROUT[1]	ROUT[0]	MT[11]	MT[10]	MT[9]	MT[8]
Byte2	ADC[7]	ADC[6]	ADC[5]	ADC[4]	ADC[3]	ADC[2]	ADC[1]	ADC[0]
Byte3	INVALID	MTOV	GAP	MARK	ADC[11]	ADC[10]	ADC[9]	ADC[8]

根据表 1 数据格式,结合通道增益和计数时间范围等参数值,将单光子计数卡 FIFO 内存中的光子对流数据转换为实验时间数据,即将光子对的实验宏时间、微时间、路由器通道信息、溢出标记等分别提取出来,数据提取过程如图 5 所示。

将提取出的有效光子对数据按照路由通道信息分类,得到延时和未经延时的两类双光子符合数据。

将延时光子对符合输出的宏时间减去因延迟量引起的内部宏时间,和未延时的光子对宏时间进行比较,相同则认为获得了一次三光子符合数据。以此类推,从众多的双光子数据中筛选出满足三光子符合条件的数据,即为三光子符合数据,显示并存储延迟和未延迟的双光子符合以及三光子符合数据,其中三光子符合数据的筛选过程如图 6 所示。

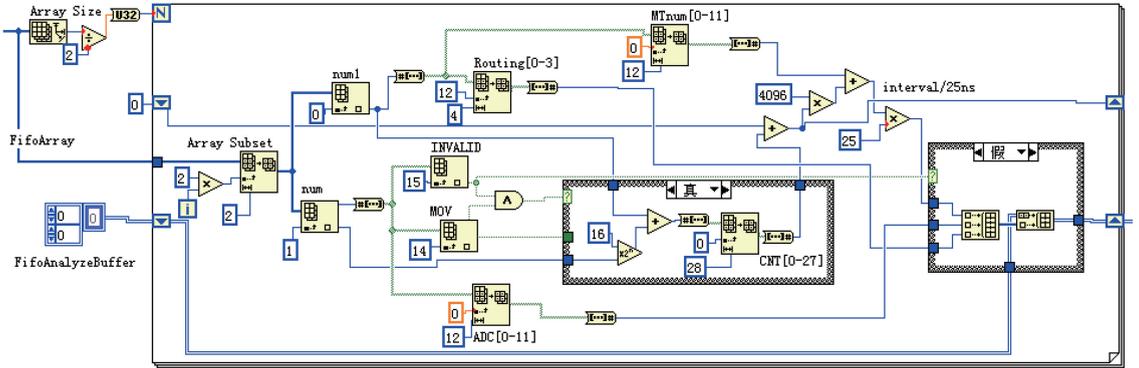


图 5 光子对符合计数的数据提取

Fig. 5 Data acquisition for two-photon coincidence counting

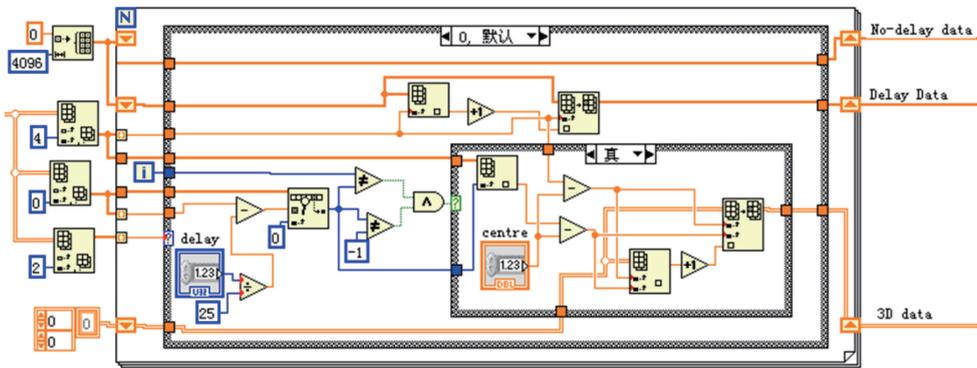


图 6 三光子符合计数的数据筛选

Fig. 6 Data filtering for three-photon coincidence counting

三光子符合数据的实时 3D 显示效果受到单光子计数卡采集时间参数和单光子频率的影响。计数卡的采集时间范围为 0.0001~100000 s,若设置为 1 s,则读取 1 s 范围内计数卡收集到的所有双光子符合数据,单光子源产生的单光子频率越高,1 s 内的双光子符合数据量越大。当采集时间设置较长或

单光子频率过高时,三光子筛选时会因数据量过大致使筛选时间长且实时更新速率降低。故在参数设置时,需根据单光子频率进行优化设置。这里采集时间设置为 0.001 s,同时对获得的双光子符合数据进行计数,每 1000 个数据进行一次三光子符合数据筛选,约 1 s 刷新一次符合结果。

3 实验结果

在系统软件调试初期,用数字延时脉冲发生器(DG645,Stanford公司)输出不同延迟的四路等幅窄脉冲代替真实的单光子和路由器,用数字示波器(HDO4034,Lecroy公司)监测采集卡接收端的多路脉冲,完成系统软硬件调试。该系统对六波混频过程同时产生的3束光源进行符合探测,延迟时间设置为150 ns,持续计数150 min,软件

效果图如图7所示。图中左侧为三光子符合计数实时3D显示效果,横坐标 t_1-t_2 和 t_1-t_3 分别表示 S_1 和 S_2 光子对、 S_1 和 S_3 光子对之间的时间延迟,纵坐标count表示三光子符合计数结果;右上图为未延迟的光子对 S_1 、 S_2 符合计数情况;右下图为经过150 ns延迟后 S_1 、 S_3 光子对的符合计数结果。实验结果表明,六波混频过程新产生的3束光源中,存在具有时间-频率量子关联特性的三光子。

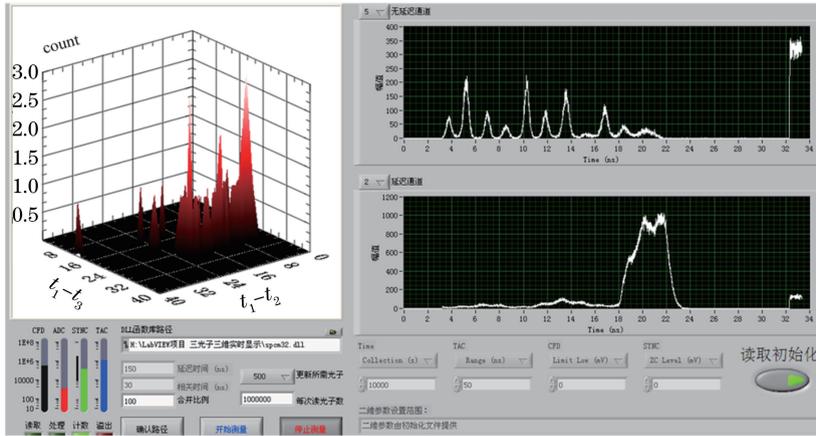


图7 软件效果图

Fig. 7 Diagram of software output

4 结 论

根据双光子符合计数原理,用一张单光子计数卡,搭建了三光子符合测量的硬件系统,并利用LabVIEW环境完成了该系统的软件控制。该系统对六波混频过程产生的3束光源进行符合探测,获得了双光子和三光子符合数据的存储与显示。结果表明六波混频过程产生的3束光源具有时间-频率相关的量子特性。后续的研究工作中,将进一步更新软件控制以及三光子判断及提取方式,使符合计数的实时效果得以大幅提升。该系统及其方法有望为量子通信研究领域关于时间-频率量子关联特性的测量提供可行性参考。

参 考 文 献

[1] Strelakov D V, Sergienko A V, Klyshko D N, *et al.* Observation of two-photon “ghost” interference and diffraction[J]. Physical Review Letters, 1995, 74 (18): 3600-3603.
 [2] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. “Two-photon” coincidence imaging with a classical source [J]. Physical Review Letters, 2002, 89(11): 113601.
 [3] Ferri F, Magatti D, Gatti A, *et al.* High-resolution ghost image and ghost diffraction experiments with

thermal light[J]. Physical Review Letters, 2005, 94 (18): 183602.
 [4] Pelliccia D, Rack A, Scheel M, *et al.* Experimental X-ray ghost imaging [J]. Physical Review Letters, 2016, 117(11): 113902.
 [5] Cheng J, Han S S. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(9): 093903.
 [6] Khakimov R I, Henson B M, Shin D K, *et al.* Ghost imaging with atoms[J]. Nature, 2016, 540(7631): 100-103.
 [7] Shapiro J H, Boyd R W. The physics of ghost imaging[J]. Quantum Information Processing, 2012, 11(4): 949-993.
 [8] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W, *et al.* Quantum and classical coincidence imaging [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(3): 033601.
 [9] Branning D, Bhandari S, Beck M. Low-cost coincidence-counting electronics for undergraduate quantum optics [J]. American Journal of Physics, 2009, 77(7): 667-670.
 [10] Becker W. Advanced time-correlated single photon counting techniques [M]. German: Springer Science & Business Media, 2005: 1-59.
 [11] Hamel D R, Shalm L K, Hübel H, *et al.* Direct generation of three-photon polarization entanglement [J]. Nature Photonics, 2014, 8(10): 801-807.