

基于单光子脉冲时间随机性的光量子随机源

鄢秋荣^{1,2} 赵宝升¹ 刘永安¹ 盛立志^{1,2}

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 提出了一种基于单光子脉冲时间随机性的光量子随机源。利用衰减成单光子态的光强恒定光源和一个单光子探测器产生单光子随机脉冲, 通过连续比较单光子随机脉冲序列中相邻两个脉冲的时间间隔来提取随机位。通过设计高速响应的微通道板单光子探测器和基于现场可编程门阵列(FPGA)的随机位提取电路, 获得了超过 10 M bit/s 的随机位产生速率。通过采用恒比定时和对计数时钟倍频的方法提高时间间隔的测量精度, 从而减小随机位序列的相关系数。当光量子随机源的随机位产生速率在 10 k bit/s 以下时, 所获得的二进制随机位序列的相关系数小于 0.001。运用随机性测试程序 ENT 和 DIEHARD 对所获的随机位序列进行测试, 测试结果表明序列的随机性非常好且不需要后续处理, 完全满足真随机数的标准。

关键词 量子光学; 光量子随机源; 单光子探测; 微通道板; 随机数检测

中图分类号 O431.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0327001

Optical Quantum Random Number Generator Based on the Time Randomness of Single-Photon Pulse

Yan Qiurong^{1,2} Zhao Baosheng¹ Liu Yong'an¹ Sheng Lizhi^{1,2}

(¹ State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract An optical quantum random number generator based on the time randomness of single-photon pulse is proposed. A constant-intensity light source attenuating into single-photon state and a single photon detector are used to generate single-photon random pulses. The random bits are extracted by continuously comparing the time intervals between two adjacent pulses in the single-photon random pulses sequence. A random number generation rate of more than 10 M bit/s is obtained by designing high-speed single-photon detector based on micro-channel plate and field programmable gate array (FPGA) based random bit extraction circuit. In order to reduce the correlation coefficient of random bit sequence, measurement accuracy of the time interval is improved by using a constant fraction discriminator and a frequency-multiplied counting clock. Correlation coefficient of the random bit sequence is less than 0.001, when the random bit generation rate is less than 10 k bit/s. The random bit sequences are tested by random number test program ENT and DIEHARD. The test results show that random bit sequences have good randomness, do not require post-processing and fully meet the standards of true random numbers.

Key words quantum optics; optical quantum random number generator; single-photon detection; micro-channel plate; randomness test

OCIS codes 270.5568; 270.5290; 040.5250; 040.5570

1 引言

随机数在信息安全、加密技术、统计分析和数值

模拟等方面有着重要的应用。随机数的产生方法主要有两种: 1) 通过一套确定的算法和选择一些被叫

收稿日期: 2011-09-13; 收到修改稿日期: 2011-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(61007017)资助课题。

作者简介: 鄢秋荣(1982—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事单光子成像方面的研究。E-mail: yanqiurong@opt.ac.cn

导师简介: 赵宝升(1959—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电子领域方面的研究。E-mail: bszhao123@opt.ac.cn

做“种子”的起始参数来产生的随机数。这种方式产生的随机数完全由算法和种子决定,因此所产生的随机数不是真正随机数,又叫伪随机数。虽然伪随机数具有非常高的产生速率,但应用范围受到限制。如量子保密通信中,为防止编码信息被窃听者破解,需要不可预测的真随机数。2)从非决定性的物理过程中来提取随机位,如电阻中的约翰逊噪声^[1]、激光的相位噪声^[2]等,一般认为这些利用非决定性物理过程产生的随机数为真随机数,但不同程度地存在随机数产生速率低、系统复杂或偏差大需要后处理等缺点。近年来,利用光量子过程中内在随机性产生随机数的光量子随机源成为研究热点。多数文献报道的光量子随机源利用光子通过光学分束器的空间随机性来产生随机数^[3~6]。如通过透射率和反射率各为 50% 的光学分束器将入射光子分成两路^[7],或通过偏振分束器将 45° 偏振的线偏振光子分成垂直偏振和水平偏振两路^[8],然后利用两个探测器分别接收两路的光子。由于一个光子只能随机地走一条路径,从而产生随机数。由于光子经过两条不同的路径,两个单光子探测器的探测效率存在差异以及无法实现精确的 50:50 的分束,随机数中“1”和“0”出现的概率将出现偏差。廖静等^[7]利用 Huffman 编码的方法对获得的随机位序列进行后处理改善偏差。Ma 等^[9]利用下参量转换后的纠缠光子对经过 50% 的光学分束器来产生随机数,解决两个单光子探测器量子效率不同导致的偏差。部分文献报道的光量子随机源利用极微弱光中光子通过一个单光子探测器的时间随机性来产生随机位。如利用相邻单光子脉冲时间间隔大小的随机性来产生随机位^[10,11],或利用等时间间隔内单光子脉冲数奇偶性来产生的随机位^[12],或利用高重复频率激光脉冲周期内探测到的光子数来产生随机位^[13,14]。无论是利用光子到达的空间随机性还是时间随机性,光量子随机源都是利用探测器输出的单光子脉冲来产

生随机位,因此随机位的产生速率主要受单光子探测器响应速度和随机位提取速度的限制。目前文献报道的光量子随机源多采用死时间为 50~1000 ns,工作在盖革模式的雪崩光电二极管(APD)为单光子探测器。Furst 等^[11]利用死时间为几个纳秒的光电倍增管(PMT)获得了 50 M bit/s 随机位产生速率。

提出了一种基于单光子脉冲时间随机性的光量子随机源。利用衰减成单光子态的光强恒定光源和一个微通道板(MCP)单光子探测器产生单光子随机脉冲,通过连续测量和比较单光子随机脉冲序列中相邻两个脉冲的时间间隔来产生随机位。通过设计高速响应的微通道板单光子探测器和基于现场可编程门阵列(FPGA)的随机位提取电路来提高随机位的产生速率,通过采用恒比定时和对计数时钟倍频的方法提高时间间隔的测量精度,减小随机位序列的相关系数。

2 原理及实现

提出的光量子随机源的原理为:利用衰减成单光子态的光强恒定光源和一个快速的单光子探测器来产生单光子随机脉冲,通过连续比较单光子随机脉冲序列中相邻两个脉冲的时间间隔($t_1, t_2, t_3, \dots, t_n, t_{n+1}, \dots$)来产生随机位,如果 $t_n > t_{n+1}$,则产生随机位“1”,如果 $t_n < t_{n+1}$ 则产生随机位“0”。光强恒定光场中,光电子发射服从泊松分布,产生的单光子脉冲在时间上是随机的,相邻两个脉冲的时间间隔也是随机且相互独立,因此产生的随机位是“1”还是“0”是随机的。由于对称性, $t_n > t_{n+1}$ 和 $t_n < t_{n+1}$ 概率相等,随机位的输出“1”和“0”的概率也相等。通过连续比较相邻的时间间隔,每个单光子事件能产生 1 个随机位。所设计的基于单光子脉冲时间随机性的量子随机源如图 1 所示,由单光子随机脉冲源、基于 FPGA 的随机位的提取电路、晶振时钟、USB2.0 接口和计算机组成。单光子随机脉冲源产生高精

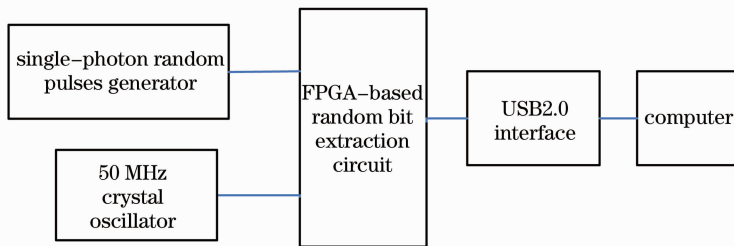


图 1 基于单光子脉冲时间随机性光量子随机源的结构示意图

Fig. 1 Sketch of optical quantum random number generator based on the time randomness of single-photon pulse

度和高计数率的单光子到达定时脉冲信号，基于FPGA的随机位提取电路接收单光子到达定时脉冲信号和时钟信号后，进行随机位的提取并将提取的随机位通过USB2.0接口送至计算机。

2.1 单光子随机脉冲源

单光子随机脉冲源如图2所示，由单光子源、单光子探测器、前置放大器和恒比定时器(CFD)组成。用汞灯、多块衰减片、253.7 nm 滤光片和光阑搭建成紫外辐射单光子源。通过衰减片的数量和光阑来调节入射光子流强度，保证探测器工作在光子计数模式和不同的计数率下。为获得高速的随机数产生率，采用自主研发的高时间分辨MCP单光子探测器代替死时间为50~100 ns的雪崩光电二极管(APD)。MCP单光子探测器^[15~18]由MgF₂输入窗、CsI光电阴极、级联MCP和阳极组成。入射的光子穿过入射窗，到达光电阴极。光电阴极以一定的量子效率发射光电子。光电子经过级联的微通道板10⁵~10⁷倍增后，形成电荷云团。电荷云团经过电场加速后，被阳极收集后，输出电流脉冲。MCP的倍增通道非常短，与具有多个打拿极的PMT相比，阴极与

阳极间的距离更小，因此渡越时间弥散也更低，死时间可以低至百皮秒量级。因此具有非常高的随机数产生速率。缺点是MCP探测器属于电真空器件，量子效率主要取决CsI光电阴极，比较低，在253.7 nm波段约为20%，而雪崩光电二极管量子效率可达80%。因此平均每个光子产生的随机位的效率比雪崩光电二极管低。但随机数的产生速率主要取决于探测器输出的脉冲速率，而探测器输出的脉冲速率主要取决于探测器的死时间。因此可用通过提高探测器输入的光强来提高随机数的产生速率。为保证探测器输出离散脉冲序列中绝大多数为单光子脉冲，单光子源应弱到这样一个状态，即在探测器的死时间内，MCP输入面产生两个以上光电子发射的概率非常小，忽略少量的多光子堆积脉冲和噪声脉冲，每个脉冲可以认为代表探测到一个光子。为减小探测器的响应时间，从而提高随机数的产生速率，探测器的阳极采用厚度和宽度专门设计的延迟线阳极^[19]，以减小探测器MCP输出面与阳极间电容对探测器响应时间的影响。图3(a)为探测器输出的单光子脉

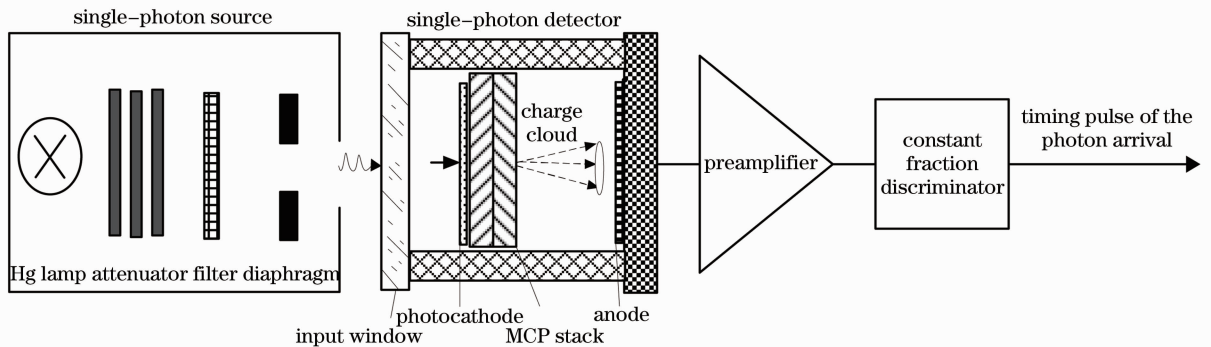


图2 单光子脉冲随机源的结构示意图

Fig. 2 Sketch of single-photon random pulses generator

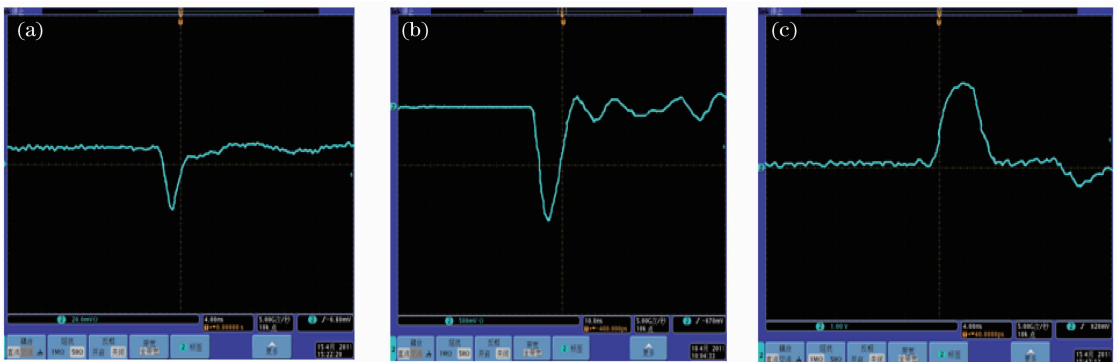


图3 (a)探测器输出信号；(b)前置放大器输出信号；(c)CFD输出信号

Fig. 3 (a) Signal output from the detector; (b) signal output from the preamplifier; (c) signal output from the CFD

冲信号,脉冲半高宽为 2 ns。为对探测器的输出信号进行放大而不明显降低时间分辨,前置放大器采用高速的电流灵敏前置放大器,如图 3(b)所示,前置放大器输出信号的半高宽为 5 ns。为减小探测器输出电子脉冲幅度抖动引起的定时误差,从而提高时间间隔测量的精度,采用 CFD 代替阈值鉴别器来提取光子到达定时信号。CFD 选择在与脉冲幅度比值恒定处作为定时点,具有皮秒级的定时精度。从图 3(c)中可以看出 CFD 的输出信号半高宽为 4 ns。因此整个单光子脉冲随机源的死时间为 5 ns。

2.2 基于 FPGA 的随机位提取电路

基于 FPGA 的随机位提取电路的原理如图 4 所示,包括倍频器,时序控制器、32 位的计数器,4096 bit×32 bit 的先进先出(FIFO)存储器、寄存器 1、寄存器 2、比较器、移位寄存器及 USB2.0 通信控制模块。电路工作的时序如图 5 所示,由 CFD 输出的单光子到达定时信号和外部时钟信号,输入 FPGA 随机位提取电路。FPGA 内部的计数器对倍频后的外部时钟信号进行计数,时序控制器在收到一个单光子定时脉冲上升沿时,把计数器中当前的计数值存入 FIFO 存储器中,并同时计数器进行复位为零,重新开始对倍频后的时钟信号上升沿计数,直到下一个单光子定时脉冲到达。计数值是相邻两个单光子到达定时信号间隔内倍频后时钟信号的周期数,代表了相邻两个单光子脉冲的时间间隔,

计数时钟频率越高,时间间隔测量的精度就越高。相邻两个单光子定时脉冲的时间间隔($t_1, t_2, t_3, \dots, t_n, t_{n+1}, \dots$)被连续存入 FIFO 存储器后,在时序控制器的控制下,寄存器 1 和寄存器 2 分别读取 t_{n+1} 和 t_n 。比较器比较寄存器 1 和寄存器 2 中的值,若寄存器 1 中的值大于寄存器 2 的值,则比较器输出“1”,并给出输出有效信号。若寄存器 1 中的值小于寄存器 2 的值,比较器输出“0”,并给出输出有效信号。通过时钟计数的方法把相邻单光子到达定时信号间的时间间隔离散为整数表示,由于精度的限制,存在所测的相邻时间间隔相等的情况,为了保证所产生随机位的“1”和“0”的概率相等,在设计中,若寄存器 1 中的值等于寄存器 2 中的值时比较器输出无效信号,不产生随机位,只有在比较器输出有效时,比较器输出的“1”和“0”才进入移位寄存器进行串并转换,然后通过 USB2.0 传送到计算机。为了对相邻两个单光子到达定时信号间的时间间隔数据进行分析,在比较完后,寄存器 2 中的值 t_n 也通过 USB2.0 的接口输出到计算机。基于 FPGA 的随机位提取电路采用 Xilinx 公司的 FPGA 芯片用内部的数字时钟管理模块(DCM)来实现倍频,将 50 MHz 的外部晶振时钟信号 4 倍频为 200 MHz 的时钟,主要有两个作用:1)提高光子到达时间间隔测量的时间精度。通过对 200 MHz 的时钟进行计数,时间间隔的测量精度可达 5 ns,可减小由于光子到达时间间隔离散为整数导致所产生随机位的相关性和减小所测相邻

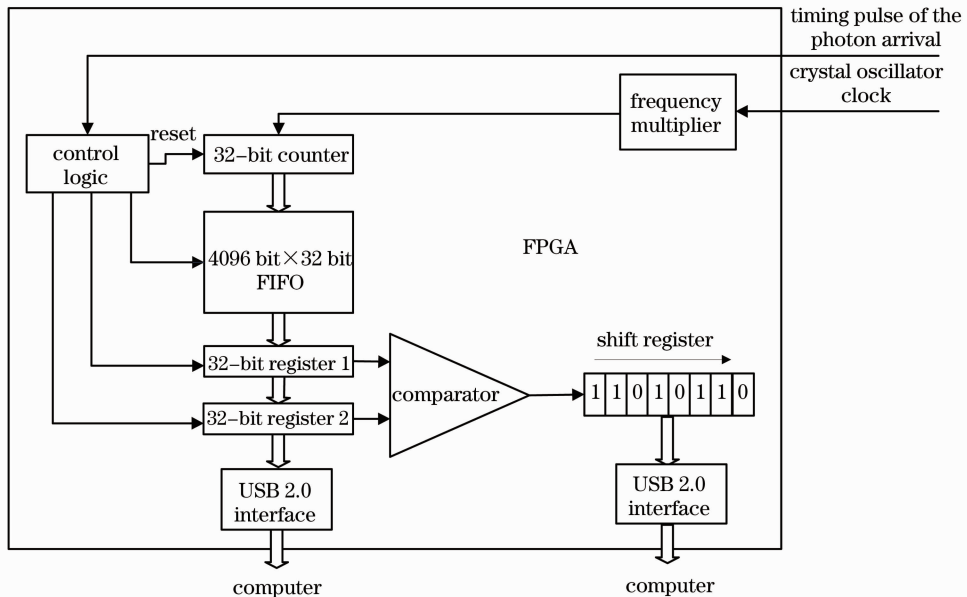


图 4 基于 FPGA 的随机位提取电路的原理图

Fig. 4 Sketch of FPGA-based random bit extraction circuit

光子到达时间间隔相等的概率,从而提高了随机位产生的效率。2)高频的时钟作为 FPGA 内部的工作时钟,可提高数据处理速度。由于随机位提取电路由 FPGA 实现,单光子脉冲时间间隔的测量,时

间间隔大小的比较和随机位的输出可工作在并行方式,处理一个光子事件只需要 4 个时钟周期,因此基于 FPGA 的随机位提取电路的死时间为 20 ns。

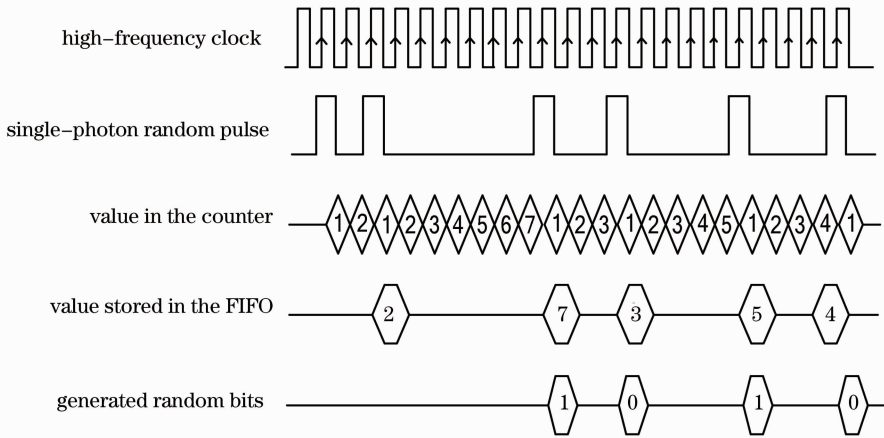


图 5 基于 FPGA 的随机位提取电路的工作时序图

Fig. 5 Timing diagram of FPGA-based random bit extraction circuit

3 结果与讨论

由于光电子发射是泊松过程,各时刻产生的光电子是相互独立的,在一个光电子发射后的时间间隔 t 内,再探测到 n 个光电子发射的几率分布 $P(n, t)$ 为^[20]

$$P(n, t) = \frac{W^n}{n!} e^{-W}, \quad (1)$$

式中 $W = \eta kt$ 为时间间隔 t 内产生的平均光电子数, η 为光电转换的量子效率, k 为单位时间内的光子数,实验中采集 2 万个单光子事件,平均计数率为 12.5111 count/s。通过对 1 s 内探测到的光子事件数进行统计,统计结果如图 6 所示服从泊松分布,验证了(1)式。

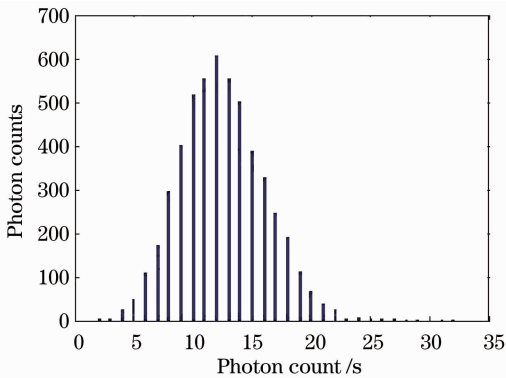


图 6 1 s 内探测到光子数的统计分布图

Fig. 6 Statistical distribution of photon counts in 1 s

根据(1)式,相邻两个光电子发射的时间间隔概率密度分布可以表示为

$$P(t) = \eta k \exp(-\eta kt), \quad (2)$$

在平均计数率为 1.1482 k count/s 时,通过对测量出的相邻单光子脉冲的时间间隔数据进行统计,其分布如图 7 所示为指数分布,与(2)式吻合,验证了单光子脉冲随机源中光电子发射的泊松过程及其随机性。

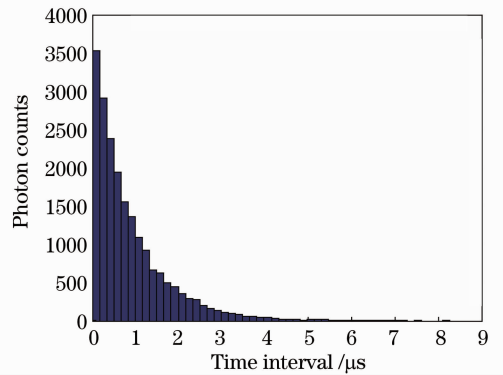


图 7 相邻单光子脉冲的时间间隔统计分布图

Fig. 7 Statistical distribution of the time interval of two adjacent single-photon pulses

根据(2)式,相邻光电子发射时间间隔小于死时间 t_d 的概率可以表示为

$$P(t_d) = \int_0^{t_d} \eta k \exp(-\eta kt) dt = 1 - \exp(-\eta kt_d), \quad (3)$$

由于所设计光量子随机源中单光子随机脉冲源的死时间为 5 ns, 基于 FPGA 的随机位提取电路的死时间 t_d 为 20 ns, 因此整个光量子随机源的死时间由基于 FPGA 的随机位提取电路决定, 因此根据每个单光子脉冲能产生 1 个随机位, 理论上随机位的产生速率可达到 50 M bit/s。实验中调节入射光子流强度, 使光量子随机源以不同的速率产生随机位, 获得的最大随机位产生速率超过 10 M bit/s。根据 (3) 式, 所设计光量子随机源工作的平均计数率越高, 相邻光电子发射时间间隔小于死时间的概率越大。例如所设计光量子随机源工作在平均计数率为 10 M count/s 时, 两个光子事件时间间隔小于死时间 20 ns 的概率为 0.1813。由于相邻光电子发射时间间隔小于死时间时, 不能产生随机位, 因此光量子随机源随机位产生速率越高, 但随机位产生的效率越低。实验结果还表明平均计数率越高, 所获得的随机位序列的相关系数越大, 这主要是由于平均计数率越高时, 相邻两单光子脉冲的平均时间间隔就越

小, 时间间隔的测量相对低计数率时更不精确。基于 FPGA 的随机位提取电路的时间测量精度为 5 ns, 当光量子随机源的随机位产生速率在 10 k bit/s 以下时, 所获得的二进制随机位序列的相关系数小于 0.001。

为了检测光量子随机源产生二进制随机位序列的随机性, 采用当今国际上标准的随机数检测程序 ENT^[21] 和 DIEHARD^[22]。其中 ENT 检验为国际上通用的随机数检测程序, 利用 ENT 可计算出随机数熵 (Entropy), χ^2 检测 (Chi square test), 算术平均值 (Arithmetic mean), Monte Carlo 方法求 π , 序列相关系数 (Serial correlation coefficient)。图 8 是在平均随机位产生速率为 11.482 k bit/s 下获得的位长为 953216 的一个随机序列的 ENT 测试结果, 该序列熵值为 1.000000 /bit, 数学平均值为 0.4999, 序列相关系数为 0.000976, 因此产生的序列是一个随机性非常好的随机序列。

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\random>ent -c -b suiiji3.dat
Value Char Occurrences Fraction
  0      476748    0.500147
  1      476468    0.499853

Total:      953216    1.000000

Entropy = 1.000000 bits per bit.

Optimum compression would reduce the size
of this 953216 bit file by 0 percent.

Chi square distribution for 953216 samples is 0.08, and randomly
would exceed this value 77.43 percent of the times.

Arithmetic mean value of data bits is 0.4999 (0.5 = random).
Monte Carlo value for Pi is 3.143438412 (error 9.32 percent).
Serial correlation coefficient is -0.000976 (totally uncorrelated = 0.0).

C:\random>

```

图 8 随机位序列的 ENT 测试结果

Fig. 8 ENT test results of a random bit sequence

DIEHARD 是一个被认为较严格的随机性测试软件包, 包括 15 项测试, 这 15 项测试将输出 20 个 P 值, 根据软件包的说明, 对于所有项的测试, 如果产生的 p 值在 0.01~0.99 之间, 则认为该序列具有非常好的随机性。利用 DIEHARD 对在平均随机

位产生速率为 11.3884 k bit/s 下获得长为 91573433 的随机数列的进行测试, 结果如图 9 所示, 20 个 p 值均在 0.01~0.99 区间中, 表明序列通过了所有项的随机性测试。

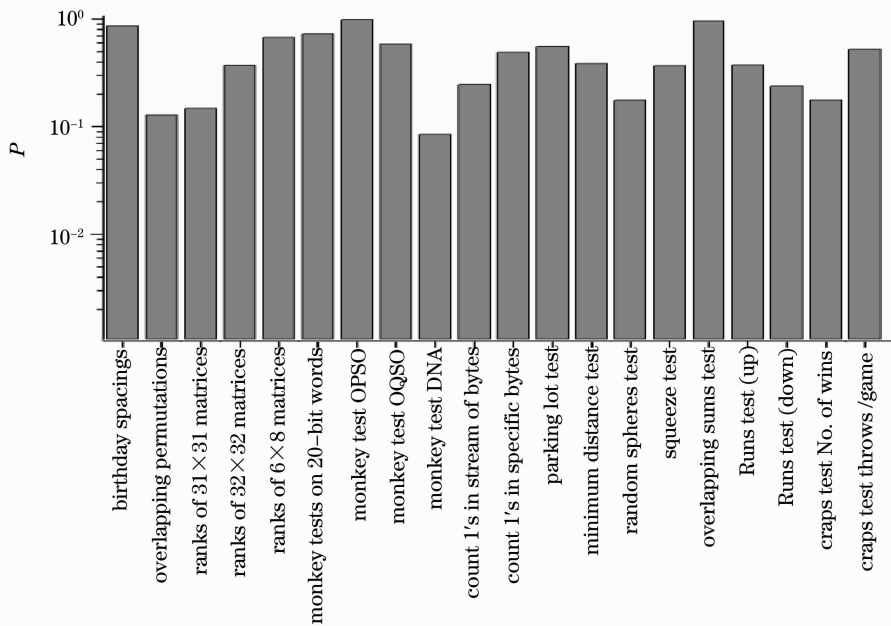


图9 随机位序列的 DIEHARD 测试结果

Fig. 9 DIEHARD test results of a random bit sequence

4 结 论

设计了一种基于单光子脉冲时间随机性的光量子随机源。利用衰减成单光子态的光强恒定光源和一个单光子探测器产生单光子随机脉冲,通过连续比较单光子随机脉冲序列中相邻两个脉冲的时间间隔来产生随机位。通过设计高速响应的微通道板单光子探测器和基于 FPGA 的随机位提取电路来提高随机位的产生速率,获得了超过 10 M bit/s 的随机位产生速率。通过采用恒比定时和对计数时钟倍频的方法提高时间间隔的测量精度,减小二进制随机位序列的相关系数。当光量子随机源的随机位产生速率在 10 k bit/s 以下时,所获得的二进制随机位序列的相关系数小于 0.001。运用国际通用随机性测试软件 ENT 和 DIEHARD 对所获的二进制随机序列进行测试,测试结果表明序列的随机性非常好且不需要后续处理,完全满足真随机数的标准。

参 考 文 献

- 1 C. Petrie, J. Connelly. A noise-based ic random number generator for applications in cryptography[J]. *IEEE Circuits-I*, 2000, **47**(5): 615~621
- 2 I. Reidler, Y. Aviad, M. Rosenbluh *et al.*. Ultrahigh-speed random number generation based on a chaotic semiconductor laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **103**(2): 024102
- 3 T. Jennewein, U. Achleitner, G. Weihs *et al.*. A fast and compact quantum random number generator [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71**(4): 1675~1680
- 4 A. Stefanov, N. Gisin, O. Guinnard *et al.*. Optical quantum random number generator[J]. *J. Mod. Opt.*, 2000, **47**(4):

595~598

- 5 K. Svozil. Three criteria for quantum random number generators based on beam splitters[J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **79**(5): 054306
- 6 O. Kwon, Y. W. Cho, Y. H. Kim. Quantum random number generator using photon-number path entanglement [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(9): 1774~1778
- 7 Liao Jing, Liang Chuang, Wei Yajun *et al.*. True random number generator based on photon beamsplitter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(3): 476~472
- 廖静, 梁创, 魏亚军等. 基于光量子的真随机源[J]. *物理学报*, 2001, **50**(3): 467~472
- 8 Feng Mingming, Qin Xiaolin, Zhou Chunyuan *et al.*. Quantum random number generator based on polarization[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(1): 72~76
- 冯明明, 秦小林, 周春源等. 偏振光子随机源[J]. *物理学报*, 2003, **52**(1): 72~76
- 9 H. Q. Ma, S. M. Wang, D. Zhang *et al.*. A random number generator based on quantum entangled photon pairs[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(10): 1961~1964
- 10 Michael A. Wayne, Paul G. Kwiat. Low-bias high-speed quantum random number generator via shaped optical pulses[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(9): 9351~9357
- 11 M. Stipčevića, B. Medved. Quantum random number generator based on photonic emission in semiconductors [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, **78**(4): 045104
- 12 M. Fürst, H. Weier, S. Nauerth *et al.*. High speed optical quantum random number generation [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(12): 13029~13037
- 13 W. Wei, H. Guo. Bias-free true random-number generator [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(12): 1876~1878
- 14 M. Ren, E. Wu, Y. Liang *et al.*. Quantum random-number generator based on a photon-number-resolving detector [J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **83**(12): 023820
- 15 Zhu Xiangping, Zhao Baosheng, Liu Yongan *et al.*. Experimental study on 30.4 nm extreme ultraviolet imaging detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1925~1929
- 朱香平, 赵宝升, 刘永安等. 30.4 nm 极紫外成像探测器的实验研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1925~1929

- 16 Zhao Feifei, Zhao Baosheng, Zhang Xinghua *et al.*. Properties of germanium thin film and its application in photon counting imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3236~3240
赵菲菲, 赵宝升, 张兴华 等. Ge 薄膜特性及其在光子计数成像系统中的应用[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 3236~3240
- 17 Cao Genrui, Yu Xin, Hu Xinqi. Photon counting image acquisition technique and its applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(2): 167~172
曹根瑞, 俞 信, 胡新奇. 光子计数成像技术及其应用[J]. 光学学报, 1996, **16**(2): 167~172
- 18 Zhao Feifei, Zhao Baosheng, Sai Xiaofeng *et al.*. Influence of annealing on performances of Ge film and photon counting image system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(4): 361~364
- 19 A. Czasch, J. Milnes, N. Hay *et al.*. Position- and time-sensitive single photon detector with delay-line readout [J]. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A*, 2007, **580**(2): 1066~1070
- 20 L. Mande. Sub-Poissonian photon statistics in resonance fluorescence[J]. *Opt. Lett.*, 1979, **4**(7): 205~207
- 21 J. Walker. A Pseudorandom Number Sequence Test Program. <http://www.fourmilab.ch/random>, 2008
- 22 G. Marsaglia, Windows Software. <http://stat.fsu.edu/pub/diehard>, 1995

栏目编辑: 李文喆