光电倍增管时间测量误差补偿方法研究*

王翀[1)] 党文斌[1)]† 朱炳利[2)] 杨凯[2)3)] 杨嘉皓[1)] 韩江浩[1)]

1)（西安邮电大学，电子工程学院，西安 710121）

2)（中国科学院西安光学精密机械研究所，中国科学院超快诊断技术重点实验室，西安 710119）

3) (中国科学院大学，北京 100049)

摘 要

目前广泛使用的基于微通道板的光电倍增管，其时间分辨率受到光电子信号在各部分渡越时间限制，为光电子信号的时间信息测量带来一定程度的影响。对影响光电倍增管时间分辨率的各参数进行了分析，针对信号在阳极上的时间测量误差进行了具体研究，确定了由光电子信号在阳极位置上的差异是造成信号时间测量误差的重要因素，提出了一种简单且行之有效的误差补偿方法。采用延迟线阳极获取光电子信号的位置信息，将位置信息转化为该位置传输至电极端口的时间信息，通过这一时间信息对光电子信号的时间测量误差进行弥补。实验结果表明，该误差补偿方法能够有效提升光电子信号的时间测量精度，为提高基于微通道板的光电倍增管时间分辨率提供解决思路和理论依据。

关键词：光电倍增管，测量误差，时间分辨率，延迟线阳极

PACS：29.40.Gx

基金:国家自然科学基金(批准号：61805199)和陕西省自然科学基金(批准号：2020JM-578)资助的课题.

†党文斌.E-mail:Dang_wb@163.com

王翀.E-mail:cw72@xupt.edu.cn

录用稿件，非最终出版稿

1 引 言

随着社会的不断进步，随着激光、荧光探针标记和成像技术不断发展，衍生出多个学科，如荧光寿命成像[1]、荧光相关谱以及单光子荧光光谱等。时间相关单光子计数(time-correlated single photo counting, TCSPC)技术的探测灵敏度很高[2-4]，且具有皮秒量级的分辨率，已成为荧光寿命成像和单分子荧光光谱相关工作的主要技术手段。目前，测量技术愈加成熟，而 TCSPC 技术也发展迅速，获得了很多优秀成果，单就其信号采集时间来说，相较于早期阶段就缩短了近 100 倍。

TCSPC 系统主要由单光子探测器、恒比鉴别器(constant-fraction discriminator, CFD)、时间数字模块(time-to-digital conversion, TDC)以及存储器等部分组成。时

间分辨率是其主要指标之一，其总体时间分辨率分别由探测器、CFD、以及 TDC 各自的时间分辨率共同决定[5,6]。CFD 和 TDC 的时间分辨率在 TCSPC 系统中已经达到非常高的精度。然而，探测器时间分辨率的影响因素较多，虽然已达到皮秒量级，仍有提升的空间。

2.1 影响 TCSPC 系统时间分辨的因素

在时间相关单光子计数系统研究工作中，时间分辨是一个需要重点考虑的因素，其精度的提升会给后续单光子计数带来便利。TCSPC 系统的主要装置一般包括探测器(多使用 PMT)[7-9]、恒比鉴别器(CFD)，时间数字转换器(TDC)以及存储器，其系统结构如图 1 所示。探测器重复输出光信号产生单光子脉冲；CFD 采用恒定比例触发信号的方式消除探测器输出脉冲的幅度抖动，从而避免脉冲高度所引起的定时抖动；TDC 将光电信号转变为数字信号，对光电子的飞行时间进行测量。TDC 的输出作为测量数据存储器的地址，随着写入地址存储单元数据量的增加，就建立起了随时间变化的光子分布。

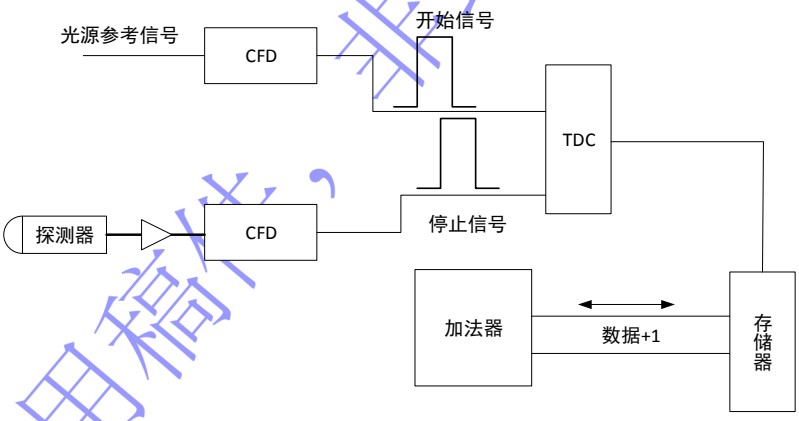


图 1 TCSPC 系统装置

Figure.1 TCSPC system device

在光电探测器中，阴极具有反射式阴极和透射式阴极两种结构，反射式阴极结构的阴极是直接镀制在微通道板的输入面，光信号激发的光电子直接进入 MCP 中倍增输出[10-12]，因而探测器的极限时间分辨率受到微通道板渡越时间弥散的制约。

时间分辨率是系统能够分辨的最小时间间隔，根据电子学理论，影响 TCSPC 系统时间分辨率的因素取决于物理时间分辨率 T_{phy} 和技术时间分辨率 T_{tec}，因而系统的整体时间分辨率可以表示为公式 1。

$$T_{resolve}=\sqrt{T_{phy}^{2}+T_{tec}^{2}} \tag{1}$$

其中，物理时间分辨率 T_{phy} 可以表明电子经由系统各部分后，渡越时间弥散的整体效果，而渡越时间弥散主要由不可避免的电子空间电荷效应引起。技术

录用稿件，非最终出版稿

时间分辨率T_{tec}代表外在因素对系统时间分辨率的影响[13]。

对于时间相关单光子计数系统，根据系统各部分组成原理，其物理时间分辨率可表示为公式 2。

$$T_{phy_TCSPC}=\sqrt{\Delta t_{DETEC}^{2}+\Delta t_{CFD}^{2}+\Delta t_{TDC}^{2}} \tag{2}$$

其中T_{phy_TCSPC}代表 TCSPC 系统的物理时间分辨率，Δt_{DETEC}代表探测器时间分辨率，Δt_{CFD}代表恒比鉴别器的时间分辨率，Δt_{TDC}代表时间测量模块的时间分辨率。伴随着技术的发展，CFD 和 TDC 的时间分辨率已达到非常高的精度，影响系统整体时间分辨率精度的最主要因素就只有探测器了。

2.2 位置引起时间测量误差

光电子信号在 MCP-PMT 中的渡越过程如图 2 所示，信号由阴极向 MCP 传输，当光电信号进入到 MCP 之后，光电子在外电场作用下加速的同时并进行倍增，探测器时间分辨率同样受到微通道板渡越时间弥散制约。光电子结束在微通道板内的倍增过程，向探测器阳极传输，阳极接收到光电子信号的瞬间即为光电子到达时间。目前所涉及到的这一过程的相关研究指出，电子渡越时间弥散为 60ps 左右[14-16]。除了上部分的电子渡越时间，还有光电子信号在阳极上传输至电极位置的渡越时间，这一时间同样是影响 MCP-PMT 时间分辨率的不可忽略的因素。

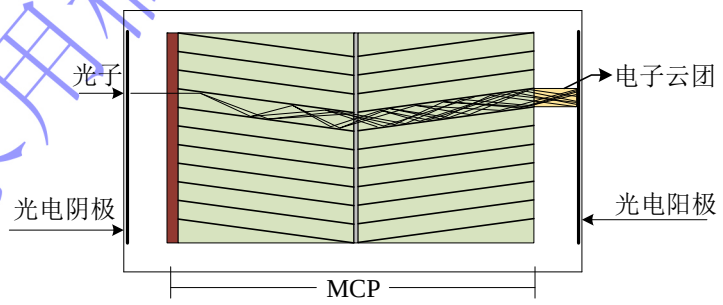


图 2 光电子在 MCP-PMT 中渡越示意图

Figure.2 Schematic diagram of photoelectron transition in MCP-PMT

光电子信号到达阳极的时刻，被视为信号到达时间，事实上，这一时刻往往有所滞后，因为光电子信号到达阳极之后，仍需要从到达位置向电极进行传输，这段过程造成了测量到达时间比实际到达时间滞后。一个明显的问题是当前后两束时间间隔较小，并且撞击在阳极不同位置上的光电子信号，第一束电子信号到达阳极的位置距离电极较远，第二束电子信号靠近电极并且传输至电极处所需要的时间小于两束电子信号的时间间隔时，后端电子学将会首先采集到第二束电子信号，这一情况与实际并不相符。

录用稿件，非最终出版稿

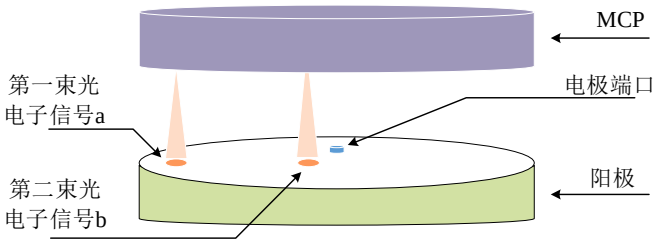


图 3 阳极接收光电子信号示意图

Figure.3 Schematic diagram of anode receiving photoelectron signal

假设阳极采用Φ25 规格的结构，如图 3 所示，当第一束光电子信号 a 撞击在阳极的边缘，时间间隔为 5ps 的第二束光电子信号 b 撞击在非常靠近中心位置的电极端口位置时，由公式 3 可计算出信号在传输线上的传输速度,式中，ε_r 表示材料的相对介电常数，μ_r 表示材料的相对磁导率。

$$v=\frac{2.99\times10^{8}}{\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}}m/s \tag{3}$$

进而计算出从阳极边缘传输至电极端口位置的时间约为 41.8ps，由此可见，传输时间是远大于两束光电子信号的时间间隔。后端电子学会首先接收到更靠近电极端口的第二束光电子信号，这将会给 MCP-PMT 的时间分辨率带来不良影响。像这样由位置引起的时间测量误差是一个不可忽视的问题。

3.1 消除时间测量误差方案

为了能够准确计算出光电子信号在阳极的到达时间，需要消除由位置带来的时间测量误差，相比于其他位敏阳极，延迟线阳极利用信号的时间信息进行位置计算，读出电子学不需要添加额外的时间测量通道。另外，信号是在传输线上进行传输，计算值相对其他阳极较为精确，因此，延迟线阳极是比较理想的选择。

首先可根据延迟线阳极的位置分辨原理，精确计算出每一个光电子信号在阳极的二维位置，再根据延迟线阳极的设计结构计算出该位置到电极端口的传输距离 s，延迟线阳极接收光电子信号简化示意图如图 4 所示。

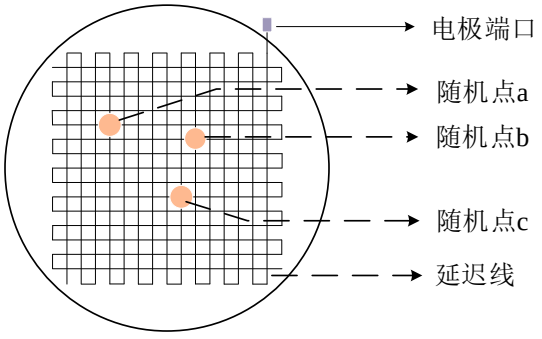


图 4 延迟线阳极接收信号示意图

Figure.4 Schematic diagram of the signal received by the anode of the delay line

录用稿件，非最终出版稿

假设 3 个随机信号打在阳极上，紧随着向电极端口进行传输，经测试所得到的到达时间为t_1，结合公式 3 便可以得到从光电子信号到达阳极的位置传输至电极端口的传输时间t_2，实际到达时间t由公式 4 得到。

$$t = t_1 - t_2 \tag{4}$$

3.2 延迟线阳极位置分辨方法

位置分辨原理如图 5(a)所示，延迟线两端是两个电信号探测装置，当阴极探测到光电子之后，经 MCP 通道倍增形成电子云团，电子云团在外电场的加速作用下被延迟线阳极收集在某一位置 X_0 上，X_0 为距离端口 A_1 点的距离，此时电信号通过延迟线向两端进行传输，根据端口对信号探测到的时间，便可以确定光电子撞击在延迟线上的位置。

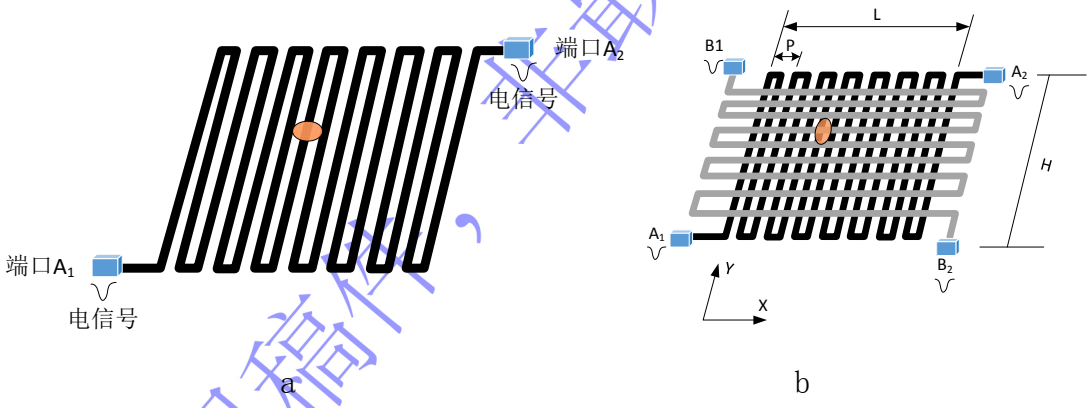


图 5 (a)延迟线收集到光电子 (b)二维延迟线位置分辨图示

Figure.5 (a) Photoelectrons collected by delay line (b) Position-resolved illustration of a 2D delay line

为了能够在二维位置上准确确定光电子 X-Y 方向上的点，将两条延迟线相互正交放置但不相交。如图 5(b)所示，其下层为 Y 方向延迟线，上层为 X 方向延迟线。假设延迟线上的信号传输速度为 v，则

$$v = c / \sqrt{\varepsilon_r} \tag{5}$$

其中ε_r为介电常数[17,18]。

信号在 X 方向的等效传输速度为

$$v_{eff} = \frac{f}{2} \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \frac{P}{P+2H} \tag{6}$$

其中 P 为蛇形延迟线一个弯折周期，L 为延迟线 X 方向的长度，X_0为电子云团在延迟线阳极的位置(A_1端为起始零点)，f 为相邻线间耦合修正系数，H 为

录用稿件，非最终出版稿

延迟线 Y 方向长度。假设信号在 X 方向传输到延迟线 A_1 和 A_2 两端的时间分别为 t_{x1}、t_{x2}，那么信号的传输时间差为

$$\Delta t = t_{x2} - t_{x1} = \frac{(L - X_0)}{v_{eff}} - \frac{X_0}{v_{eff}} \tag{7}$$

同理可得光子入射在 Y 方向的空间位置，进而获得光电子在二维延迟线的二维坐标。光电信号在任一组延迟线上传输的时间之和是一个常数 T，与电子脉冲束打在延迟线上的位置无关，如公式 8 所示。这给出了判断一个时间事件真伪的独特依据，进而筛选出噪声信号。

$$T = v_{eff}(t_1 + t_2) \tag{8}$$

t_1 为电信号在 X 方向上向 A_1 端传输的时间，t_2 为电信号在 X 方向上向 A_2 端传输的时间。这一特性可以排除系统噪声的影响。

4 时间分辨优化方案实验验证

实验中使用 X-Y 二维位置灵敏探测器，采用双层蛇形延迟线阳极结构，延迟线分为两组，上层延迟线类似于微带线结构，下层延迟线类似于带状线结构，延迟线之间的间距为 0.35mm，两组延迟线形成平面之间的距离为 1mm，其实物图如图 6(a)所示[19]。延迟线阳极探测器示意图如图 6(b)所示。

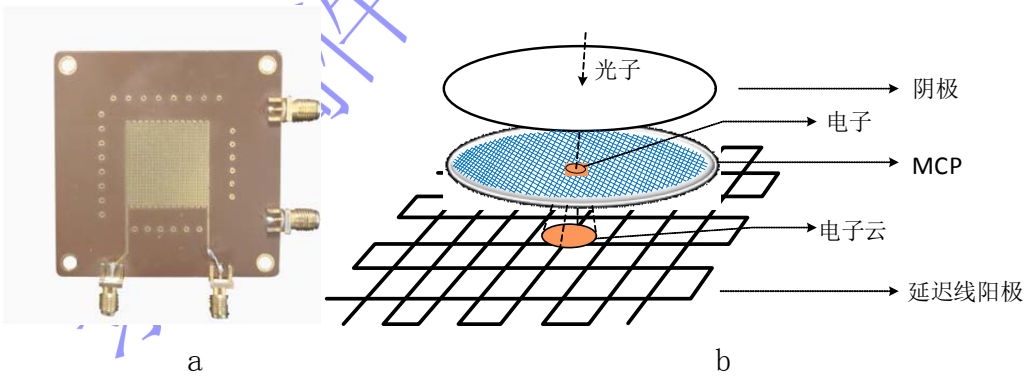


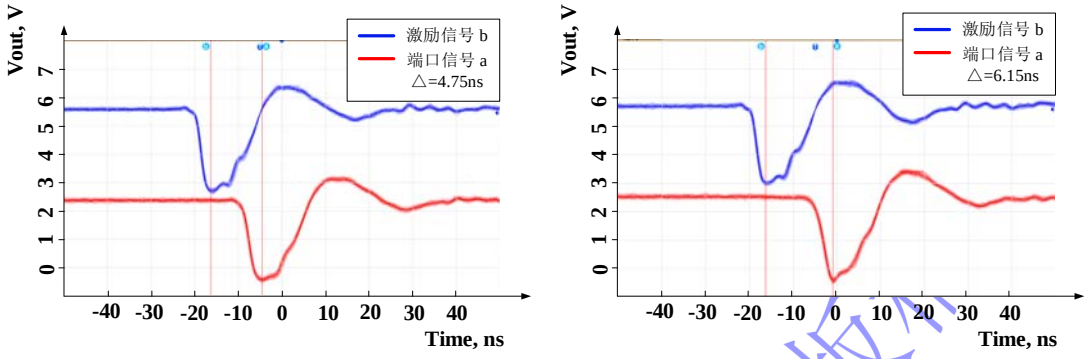
图 6 (a)延迟线阳极实物图 (b)延迟线阳极探测器示意图

Figure.6 (a)Real picture of delay line anode (b) Schematic diagram of the delay line anode detector

(1)延迟线阳极端到端信号测试

利用基于普通四层 PCB 工艺制作的延迟线阳极，分别进行上层 X 方向和下层 Y 方向端到端的延迟信号测试，该结构的延迟线阳极具有制作简单、低成本和高探测率等优点。

分别在二维延迟线的两个端口进行脉冲信号驱动，同时利用数字荧光示波器在另一端口的输出信号进行探测，结果如图 7 所示。



a b

图 7(a)为上层延迟线端到端测试，(b)为下层延迟线端到端测试

Figure.7 (a) is the end-to-end test of the upper delay line, and (b) is the end-to-end test of the lower delay line

表 1. 端到端延时测试结果

Table 1. End-to-end latency test results

	端到端延迟/ns	平均幅值/mv	衰减
X 方向	4.75	286	42.8%
Y 方向	6.15	336	32.8%

表 1 为端到端测试情况，结果表明，上层 X 方向的延迟线端到端延时为 4.75ns，幅值平均值为 286mv 端到端衰减为 42.8%，下层 Y 方向的延迟线端到端延时为 6.15ns，幅值平均值为 336mv，端到端衰减为 32.8%，其中传输线以及 SMA 转换接头的传输衰减为 4%，X 方向和 Y 方向延迟差异是由于该延迟线阳极结构中传输线特性导致。

(2)位置引起的误差补偿测试

利用多通道同步延迟控制器模拟探测器将光电信号发射至延迟线阳极，在阳极上层延迟线任意一位置进行脉冲驱动，设置幅值为 3.5V。随机在阳极 8 个位置 a、b、c、d、e、f、g、h 点驱动脉冲,由延迟线阳极设计结构计算得出距离端口路径长度为 s，各随机点的 s 值如表 2 所示。

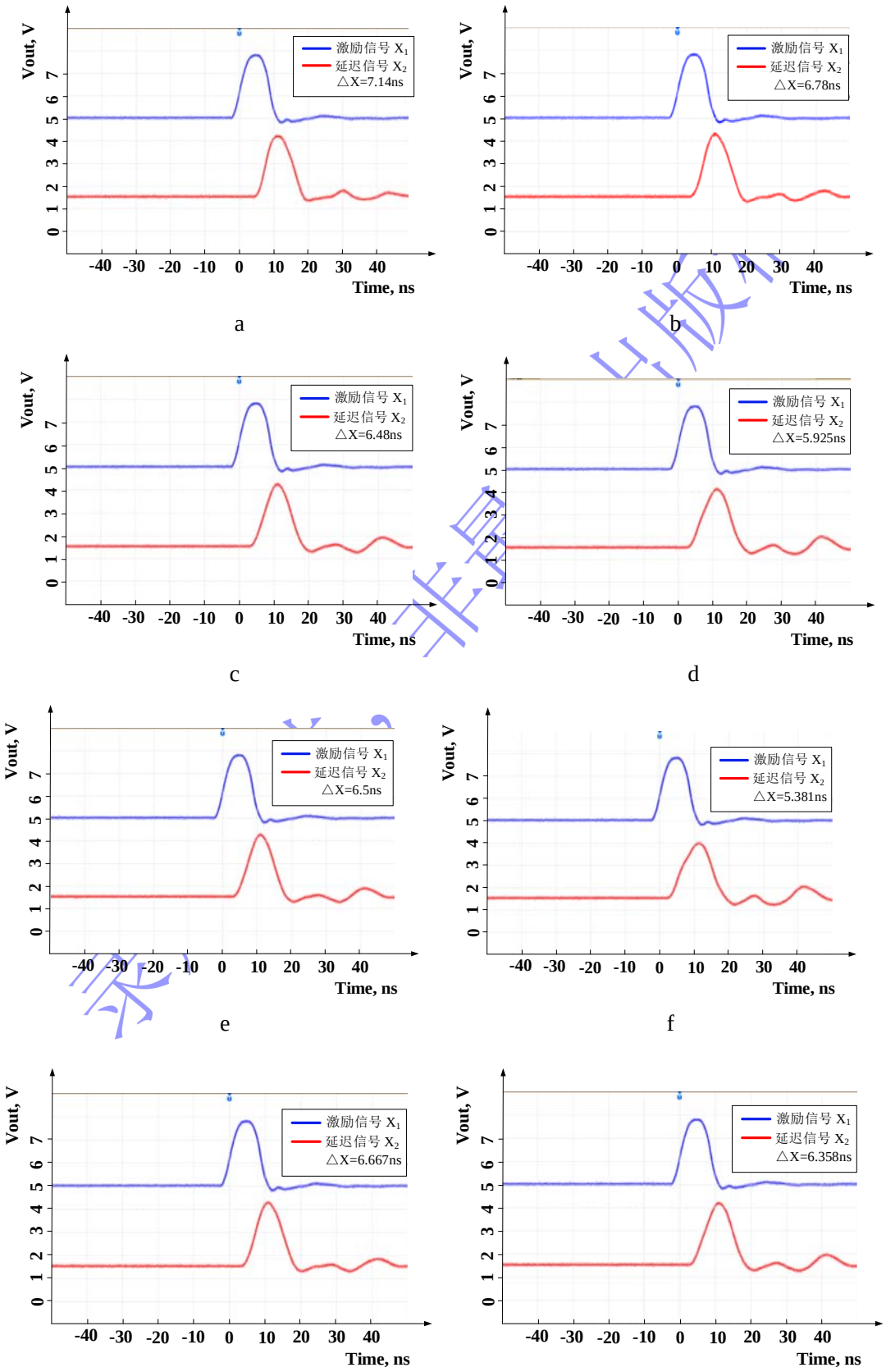
表 2. 各随机点的 s 值

Table 2. The s value of each random point

随机点	a	b	c	d	e	f	g	h
s 值 /mm	653.9	527.4	434.7	352.7	473.8	308.5	480.6	427.1

测试情况如图 8 所示，测试结果如表 3 所示。

录用稿件，非最终出版稿



2

图 8 (a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)、(g)、(h)分别为各点的信号脉冲

Figure.8 (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h) are the signal pulses at each point respectively

表 3.时间测量误差补偿结果

Table 3. Time Measurement Error Compensation Results

随机位置点	到达时间测试值/ns	到达时间实际值/ns
a	7.14	4.956
b	6.78	5.019
c	6.48	5.029
d	5.925	4.747
e	6.5	4.918
f	5.381	4.351
g	6.667	5.062
h	6.358	4.932

通过表 3 可以看到，经过多次实验验证，在测量光电子信号传输至阳极时的到达时间，将位置造成的时间测量误差进行弥补，相比于各电信号的原始时间测量，所得到的实际到达时间更短。

基于 MCP-PMT 的单光子探测器时间分辨率与探测器构造本身具有非常密切的关系，MCP 足够小的物理维度是满足皮秒时间分辨的必要条件，其孔径越小，分辨精度越高，同时，脉冲波形和信号动态以及探测器本身的噪声也是影响时间分辨的重要因素[20]，这对研究人员在探测器构造以及信号处理方面提出更高的要求。然而，时间分辨率的瓶颈也取决于前端电子学和阳极结构。通过本研究验证，由光电子信号在阳极位置上的差异同样会造成信号的时间测量上的误差，这无疑给时间分辨引起误差。通过采用延迟线阳极对时间测量误差进行弥补，为提升探测器时间分辨提供了良好的思路以及理论依据。

5 结论

基于 MCP-PMT 的延迟线阳极探测器具有高精度位置分辨和时间分辨的优点，本文分析了影响探测器时间分辨率的因素，并针对由光电子信号在阳极位置的不同而造成的时间测量误差进行了具体研究，提出一种简单且行之有效的弥补时间测量误差的方法，并进行多次的实验测试验证。结果表明，对位置造成的时间测量误差进行补偿，将会使信号在阳极上到达时间测量更加精确，进一步为提高单光子探测器的时间分辨率提供可靠的依据。

录用稿件，非最终出版稿

参考文献

[1] Gao F, Li F H, Li J, Yi Q, Chen C 2014 *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*. **47** 518 (in Chinese) [高峰，李峰辉，李娇，易茜，陈琛 2014 天津大学学报(自然科学与工程技术版) **47** 518]

[2] Hirvonen L M, Becker W, Milnes J, Conneely T, Smietana S, Marois A L, Jagutzki O, Suhling K 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 00

[3] Wang J, Xu B, Ye Z C, Lu W Q, Zheng J Y, Xia S B, Gao L M 2006 *Physics Experimentation.* **26** 44 (in Chinese) [王俊，徐波，叶志成，陆文强，郑建亚，夏顺保，高立模 2006 物理实验 **26** 44]

[4] Stevens M J, Hadfield R H, Schwall R E, Nam S W, Mirin R P 2006 *SPIE Optics East.* **6372** 229

[5] Rech I, Gulinatti A, Crotti M, Cammi C, Maccagnani P, Ghioni M 2011 *J MOD OPTIC.* **58** 233

[6] Michalet X, Siegmund O H W, Vallerga J V, Jelinsky P, Millaud J E, Weiss S 2006 *Proc SPIE Int Soc Opt Eng.* **6092** 141

[7] He Q, Liu J, Wei L F 2022 *Journal of Guangxi Normal University(Nat.Sci).***00** 01 (in Chinese) [贺青，刘剑，韦联福 2022 广西师范大学学报(自然科学版) **00** 01]

[8] Cheng B T, Dai Q, Xie X M, Xu Q, Zhang S, Song H Z 2022 *Laser Technology* **00** 01 (in Chinese) [程碑彤，代千，谢修敏，徐强，张杉，宋海智 2022 激光技术 **00** 01]

[9] Zhang X J, Wan J L 2007 *Laser Journal* **28** 13 (in Chinese) [张雪皎，万钧力 2007 激光杂志 **28** 13]

[10] Lei F P 2019 Research on key technologies of single-photon imaging based on position-sensitive anode *Ph.D. Dissertatio* (Beijing: Chinese Academy of Sciences University) (in Chinese) [雷帆朴 2019 博士学位论文 (北京：中国科学院大学)]

[11] Yan Q R 2012 Research on time-correlated single photon counting technology based on MCP position-sensitive anode detector *Ph.D. Dissertatio* (Beijing: Chinese Academy of Sciences University) (in Chinese) [鄢秋荣 2012 博士学位论文 (北京：中国科学院大学)]

[12] Jagutzki O, Lapington J S, Worth L B C, Spillman U, Mergel V, Schmidt-Böcking H 2002 *NUCL INSTRUM METH A* **477** 256

[13] Gou Y S 2017 Research on time domain modulation high time resolution framing imaging technology *Ph.D. Dissertatio* (Beijing: Chinese Academy of Sciences University) (in Chinese) [缑永胜 2017 博士学位论文 (北京：中国科学院大学)]

[14] Yang W Z 2010 Research on dynamic spatiotemporal characteristics of MCP-gated soft X-ray picosecond framing camera for ICF and new multi-time-resolved diagnostic technology *Ph.D. Dissertatio* (Beijing: Chinese Academy of Sciences University) (in Chinese)

录用稿件，非最终出版稿

[杨文正 2010 博士学位论文 (北京：中国科学院大学)]

[15] Cai H Z, Liu J Y, Niu L H, Liao H, Zhou J L 2009 *High Power Laser and Particle Beams.* **21** 1542 (in Chinese) [蔡厚智，刘进元，牛丽红，廖华，周军兰 2009 强激光与粒子束 **21** 1542]

[16] Cai H Z, Liu J Y, Niu L H, Liao H, Zhou J L 2008 *Journal of Applied Optics.* **29** 895 (in Chinese) [蔡厚智，刘进元，牛丽红，廖华，周军兰 2008 应用光学 **29** 895]

[17] Jagutzki O, Mergel V, Ullmann-Pfleger K, Spielberger L, Schmidt-Boecking H W 1998 *Proc. SPIE* **3438** 322

[18] Jagutzki O, Barnstedt J, Spillmann U, Spielberger L, Mergel V, Ullmann-Pfleger K, Grewing M, Schmidt-Boecking H W 1999 *International Society for Optics and Photonics* **3764** 61

[19] Lei F P, Bai Y L, Zhu B L, Bai X H, Qin J J, Xu P, Hou X 2017 *SPECTROSC SPECT ANAL.* **37** 2989 (in Chinese) [雷帆朴，白永林，朱炳利，白晓红，秦君军，徐鹏，侯洵 2017 光谱学与光谱分析 **37** 2989]

[20] Pan J S 2021 *Laser & Optoelectronics Progress.* **58** 80 (in Chinese) [潘京生 2021 激光与光电子学进展 **58** 80]

录用稿件，非最终出版稿

Research on Error Compensation Method of Photomultiplier Tube Time Measurement*

Wang Chong[1)] Dang Wen-Bin[1) †] Zhu Bing-Li[2)] Yang Kai[2)3)] Yang Jia-Hao[1)] Han Jiang-Hao[1)]

1)（School of Electronic Engineering,Xi`an University of Posts & Telecommunications ,Xi`an 710121）

2) (Chinese Academy of Sciences, Xi'an Institute of Optoelectronic Precision Machinery, Key Laboratory of Ultra-Rapid Diagnostic Technology, Xi`an 710119)

3) (Chinese Academy of Sciences University, Beijing 100049)

Abstract

In order to improve the temporal resolution of photomultiplier tubes, our research group has conducted in-depth research on photomultiplier tubes based on microchannel plates that are widely used at present. The time resolution of photomultiplier tube based on microchannel plate is limited

by the transit time of photoelectric signal in each part, including the transit time of photoelectric signal in the transmission process of photocathode to microchannel plate, the transit time of photoelectric signal in microchannel plate time, the transit time of the photoelectric signal from the microchannel plate to the detector anode, and the transit time of the photoelectric signal on the anode to the electrode port. The transit time of the whole process has a certain degree of influence on the time information measurement of the optoelectronic signal. In this study, various parameters affecting the time resolution of the photomultiplier tube were analyzed, and it was found that the different positions of the photoelectron signal on the anode would bring errors to the measurement of the arrival time of the signal at the anode, and the photoelectric signal was transmitted to the electrode port at the impact point of the anode The time spent will cause the signal measurement time to lag behind the real time, which indirectly affects the time resolution of the system. Therefore, a specific study was carried out on the time measurement error of the signal on the anode, and it was determined that the difference of the photoelectron signal on the anode position was an important factor causing the signal time measurement error, and a simple and effective error compensation method was proposed. In the research process, the delay line anode is used, and the ^{2} positional resolution principle of the photoelectric signal is used to obtain the position information of the

录用稿件，非最终出版稿

photoelectron signal on the anode, and the position information is converted into the time information transmitted from the position to the electrode port. The theoretical value of the transit time on the anode is offset, eliminating unnecessary time in the time-of-arrival measurement of the photoelectron signal. The time measurement error of the optoelectronic signal is compensated by this time information. The experimental results show that the error compensation method can effectively improve the time measurement accuracy of optoelectronic signals, and provide solutions and theoretical basis for improving the time resolution of photomultiplier tubes based on microchannel plates.

Keywords: Photomultiplier tube, Measurement error, Time resolution, Delay line anode

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61805199),and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province (Grant No. 2020JM-578) .

录用稿件，非最终出版稿