

# 激光时频传递中高精度事件计时器性能分析方法

薛 涵<sup>1,2</sup>, 张子昂<sup>1,2\*</sup>, 付靖祺<sup>1</sup>, 刁凌天<sup>1</sup>, 穆力纬<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站, 吉林 长春 130117;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 自由空间激光时频传递是未来空间高精度时频传递的重要技术发展方向。高精度的事件计时器是实现自由空间激光时频传递的关键核心设备, 提出了组合确定性因素和随机因素的性能评估模型, 通过测量精密频率源的时序数据得到不同事件计时器基于最小二乘的频率准确度、频率漂移率, 表征频率稳定度的时域方差包括 Allan 方差、Modified Allan 方差、Time 方差和 Hadamard 方差, 依据幂律谱模型分离出事件计时器测量数据的随机游走噪声、调频白噪声、调频闪烁噪声、调相白噪声和调相闪烁噪声五种随机噪声。对比分析了性能处于同一量级的两种典型高精度事件计时器 A033 和 GT668 的性能差异, 在频率测量准确度上, A033 事件计时器优于  $7 \times 10^{-12}$ , 而 GT668 事件计时器优于  $3.1 \times 10^{-12}$ , 频率漂移率 A033 为  $2.096 \times 10^{-15}$ , 而 GT668 则是  $-1.071 \times 10^{-15}$ , 短期 (1 d) 稳定性 Allan 标准差由  $7 \times 10^{-12}$  变化到  $4 \times 10^{-12}$ ; GT668 在随机游走噪声曲线走势上更为稳定, 调频闪烁噪声和调频白噪声没有明显差异。实验表明, 通过文中性能分析方法可以对高精度事件计时器性能进行评估分析, 对其准确性和可靠性进行判定, 为高精度事件计时器的使用提供分析依据。

**关键词:** 激光时频传递; 事件计时器; 时域方差; 幂律谱噪声

**中图分类号:** P128.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220913

## 0 引言

基于激光的空间高精度激光时频传递具有很大的潜力, 是未来空间高精度时频传递的重要技术发展方向, 有高重复率、高精度、高速化的发展趋势<sup>[1-5]</sup>。由于激光具有波长短、频率高、系统误差少等优点, 现有研究表明空间激光时频传递技术达到 50 ps 的时间同步精度, 比微波技术高一两个量级<sup>[6]</sup>, 技术上有望达到标准量子极限 ( $10^{-21} \sim 10^{-24}$  s)<sup>[7]</sup>。同时, 空间激光时频传递技术覆盖范围广、传输距离远, 结合激光通信技术可实现大容量、高信道吞吐率、强抗干扰能力和高保密性<sup>[8]</sup>。

自由空间的激光时频传递在逐步发展, 2014 年, 美国月球勘测轨道飞行器 (Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO) 的任务时间传递精度为 1 ns<sup>[9]</sup>; 2015 年底, 美国一研究组通过空间光学链路, 将距离为 4 km 的两个

腔稳定激光器间的时间同步精度提高到 4 fs/min, 50 fs/h<sup>[10]</sup>; 2016 年底, 法国蔚蓝海岸天文台和中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站实现了洲际间时间比对实验, 达到 1 ns 的水平<sup>[11]</sup>。

目前, 激光时频传递主要以卫星激光测距 (SLR) 技术为基础, 通过测量激光脉冲往返的飞行时间来实现距离测量和时刻测量<sup>[12]</sup>。因此, 测量脉冲往返的时间间隔精度直接决定了激光测距的精度。传统的时间间隔计数方法已无法满足高精度、高重复率激光测距的要求, 事件计时方法的测量精度已达到皮秒量级、测量速率高达 10 kHz, 测时分辨率达 1 ps, 不仅可满足空间激光时频传递的测量要求, 而且已成为高重复率激光测距技术中必需的测量技术<sup>[13]</sup>。我国对于事件计时的研究起步较晚, 对事件计时器的研究有助于发展精密激光时频传递。

收稿日期: 2022-12-30; 修订日期: 2023-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12173059, 11673082, 11103047); 吉林省自然科学基金项目 (20220101157JC)

作者简介: 薛涵, 女, 博士生, 主要从事卫星激光测距技术与应用方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 张子昂, 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事高精度时频传递及应用方面的研究。

文中设计了针对事件计时器测量性能的指标评估模型,基于高精度精密频率源的测量结果分析不同事件计时器的性能。实验分别采用 GT668 事件计时器 (GT668 Time Interval Analyzer) 以及 A033 事件计时器 (Event Timer A033-ET), 基于同一精密频率源氦原子钟, 对输入信号和延迟后输入信号的时间间隔进行了测量, 通过对比氦原子钟测量数据的频率准确度、频率漂移率、频率稳定度时域方差等指标, 得到事件计时器之间的性能差异, 并通过幂律谱模型分析影响事件计时器性能差异的噪声来源, 为更高精度、更远距离空间激光时频传递中事件计时器性能的评估提供参考依据。

## 1 事件计时器性能评估方法

性能分析主要用于定期或不定期地计算性能指标和评估整体性能。通过直接测量高精度频率源氦原子钟, 对测量结果差异性采用时域方差和幂律谱噪声分析方法, 获得事件计时器的关键性能指标。文中提出了组合确定性因素和随机因素的性能评估模型, 确定性因素包括频率准确度和频率漂移率, 随机因素包括频率稳定性 (时域方差) 和幂律谱噪声等指标, 可以很好地反映事件计时器在实测中的性能表现, 获得事件计时器关键性能指标。

### 1.1 频率准确度和频率漂移率

频率准确度是指被测输入相对于参考输入的准确度。一般采用时差法, 利用通道间的相位时间差, 通过计算相位变化率得到频率准确度<sup>[14]</sup>:

$$y_i = \frac{x(t_1 + v) - x(t_1)}{v} \quad (1)$$

式中:  $x$  为时间 (相位) 数据;  $v$  为数据采样间隔;  $y_i$  为  $t_i$  时的频率数据。

频率漂移率为描述频率变化特征的一个参数, 在测量过程中, 事件计时器输出频率值随测量时间增加而呈现单调变化趋势, 这种变化称为频率漂移率, 利用时差法得到<sup>[14]</sup>:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta T_i - \Delta \bar{T})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} \quad (2)$$

式中:  $N$  为采样个数;  $K$  为漂移率;  $T_i$  为第  $i$  时刻测得的时间差;  $\Delta \bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$ ;  $t_i$  为测量时序;  $\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta t_i$ 。

### 1.2 时域方差

笔者得到的是取样时间为 1 d 的频率稳定度的估计, 需要对测量数据进行稳定度估计以得到尽可能真实、可信的时域方差估计。国际电信标准机构给出了以下表征时间和频率稳定性的时域方差量<sup>[15-16]</sup>, Allan 方差、Modified Allan 方差、Time 方差及 Hadamard 方差等。

Allan 方差,  $\sigma_y^2(\tau)$ , AVAR 给出了一种表征频率源频率稳定度的收敛方法, 它的定义式如下<sup>[17]</sup>:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_i)^2 \quad (3)$$

式中:  $\tau$  为取样时间;  $M$  为频率取样数。按照相位时间数据, Allan 方差的估计式如下,  $N=M+1$ 。

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2)\tau^2} \cdot \sum_{i=1}^{N-2} [x(i+2) - 2x(i+1) + x(i)]^2 \quad (4)$$

Modified Allan 方差,  $Mod \sigma_y^2(\tau)$ , MVAR, 结果通常表示为平方根, 通过下式表达<sup>[17]</sup>:

$$Mod \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^4(M-3m+2)} \cdot \sum_{j=1}^{M-3m+2} \left\{ \sum_{i=j}^{j+m-1} \left[ \sum_{k=i}^{i+m-1} (y_{k+m} - y_k) \right] \right\}^2 \quad (5)$$

式中:  $m$  为平均因子;  $\tau_0$  为基本测量间隔, 在相位数据方面, Modified Allan 方差是从一组  $N = M + 1$  时间测量中估计的:

$$Mod \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^2(N-3m+1)\tau^2} \cdot \sum_{j=1}^{M-2m} \left[ \sum_{i=j}^{j+m-1} (x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i) \right]^2 \quad (6)$$

Time 方差 (TVAR) 是基于 Modified Allan 方差的时间稳定性度量。它被定义为<sup>[17]</sup>:

$$\sigma_x^2(\tau) = \frac{\tau^2}{3} \cdot Mod \sigma_y^2(\tau) \quad (7)$$

Hadamard 方差通常表示为其平方根、Hadamard 偏差、HDEV 或  $H\sigma_y(\tau)$ , 对于频率数据, Hadamard 方差定义为<sup>[17]</sup>:

$$\sigma_H^2(\tau) = \frac{1}{6(M-2)} \cdot \sum_{i=1}^{M-2} (y_{i+2} - 2y_{i+1} + y_i)^2 \quad (8)$$

式中:  $y(i)$  为平均时间  $t$  处的  $M$  个分数频率值中的第  $i$  个。

对于相位数据, Hadamard 方差定义为:

$$\sigma_H^2(\tau) = \frac{1}{6(N-3)} \sum_{i=1}^{N-3} (x_{i+3} - 3x_{i+2} + 3x_{i+1} - x_i)^2 \quad (9)$$

式中:  $x(i)$  为平均时间  $t$  处  $N=M+1$  个相位值中的第  $i$  个。

Allan 方差是频率稳定性最常用的指标, 低 Allan 方差意味着在该测量周期内的良好稳定性, Modified Allan 方差在平均相位的基础上, 具有区分白相位噪声和闪烁相位噪声的优点, Time 方差可以很好地衡量时间分配系统的噪声, Hadamard 方差最主要的优点是对线性频率漂移的不灵敏性, 从而能够对随机游走噪声进行区分。

### 1.3 幂律谱噪声

幂律谱噪声模型通常包括五种独立噪声过程 ( $\alpha=-2, -1, 0, 1, 2$ ), 依次为频率随机游走噪声、调频闪烁噪声、调频白噪声、调相闪烁噪声和调相白噪声, 它们呈线性叠加关系<sup>[18]</sup>:

$$S_y(f) = h_{-2}f^{-2} + h_{-1}f^{-1} + h_0 + h_1f + h_2f^2 \quad (10)$$

由于相位时间是频率的积分, 因此两者的幂律谱符合以下关系:

$$S_x(f) = \frac{1}{(2\pi f)^2} S_y(f) \quad (11)$$

将公式 (11) 代入公式 (10) 可得到相位时间的幂律谱为:

$$S_x(f) = \frac{1}{(2\pi f)^2} \cdot (h_{-2}f^{-2} + h_{-1}f^{-1} + h_0 + h_1f + h_2f^2) = \frac{1}{(2\pi)^2} \sum_{\beta=-2}^2 h_{\beta} f^{\beta-2} \quad (12)$$

这些噪声过程的产生机制描述如下<sup>[19]</sup>:

1) 频率随机游走噪声 (Random Walk FM,  $\alpha=-2$ ): 与物理环境有关。

2) 调频闪烁噪声 (Flicker FM,  $\alpha=-1$ ): 一般认为, 与一个主动型频率源的物理谐振装置、电子元件的涉及或选择以及环境属性有关。

3) 调频白噪声 (White FM,  $\alpha=0$ ): 在被动型的频率

标准中比较常见, 铯和铷频标通常都有调频白噪声的特性。

4) 调相闪烁噪声 (Flicker PM,  $\alpha=1$ ): 与频率源的物理谐振部分有关, 附加一些电子线路的噪声。

5) 调相白噪声 (White PM,  $\alpha=2$ ): 是一种宽带相位噪声, 与调相闪烁噪声产生的机制有些相似。

当描述观测噪声时仅需上述公式中的几项, 每一项主要占据频率范围其中的一段, 其对应的频域斜率特性如图 1 所示。

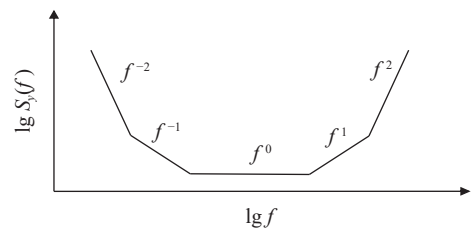


图 1 幂律谱密度下噪声过程所对应的斜率特性

Fig.1 Corresponding slope characteristics of noise processes under power-law spectral density

将鉴别后的五种噪声类型与上述产生机制相对应后, 可分别得出各噪声类型对频率源稳定度的影响, 例如, RW-FM 与物理环境有关, F-PM 和 W-PM 与频率源的物理谐振有关。

## 2 测量方法

### 2.1 测量方案

为验证文中提出的事件计时器性能的评估方法, 考虑对稳定度更高的氢原子频率源产生的 1 PPS 信号进行计时测量, 排除信中号源扰动对测量结果的影响。再通过相对稳定的固定延迟测量, 评估事件计时器时间间隔的测量性能。同时采用两台高精度事件计时器对事件计时器评估方法进行对比验证, 实验框图见图 2。选用的精密频率源被动型氢原子钟 VCH-1008(VREMYA-CH) 出厂报告中相对频率准确度为  $\pm 3 \times 10^{-13}$ , 1 d 频率稳定度  $\leq 4 \times 10^{-15}$ , 日频率漂移率为  $\pm 2 \times 10^{-15}$ , 氢钟技术指标高于事件计时器的测量精度。

原子钟输出 10 MHz 信号和 1 PPS 信号, 采用 TIMETECH 的频率分配器将 10 MHz 信号分成两路信号分别作为 GT668 事件计时器和 A033 事件计时器的时间基准参考信号; 采用 TIMETECH 的脉冲分配单元将 1 PPS 信号分成三路, 其中两路分别作为

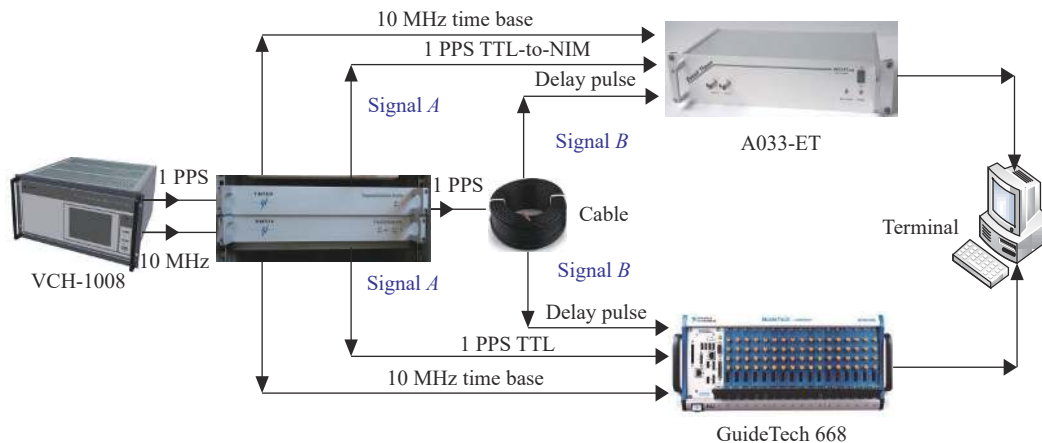


图 2 测量方案示意图

Fig.2 Schematic diagram of the measurement scheme

GT668 事件计时器和 A033 事件计时器 A 通道的输入信号,另一路信号连接 50 m 电缆作为延迟信号,再分成两路信号后分别作为两事件计时器 B 通道的输入信号,最终通过电脑终端分别测量事件计时器 A 通道和 B 通道的时间间隔,即固定延迟。其中 A033 事件计时器需将 TTL 信号转为 NIM 信号输入,其余选择等长低损耗电缆进行连接,使得这两路信号从功率分配放大器到测量系统的衰减量和时延尽量一致。

实验中固定延迟通过低损耗电缆 (型号: Times LMR@-300) 实现,控制环境温度在 21 °C 左右,降低电缆相位延迟扰动,所有设备提前进行充分预热,同时也减少环境温度对测量设备的影响。由于事件计时器 A033 中存在死区时间,即每一单一事件的测量阶段持续 50 ns,电缆的延迟时间大于死区时间。实验中选用 50 m 低损耗同轴电缆的固定延迟约为 200 ns。事件计时器 GT668 中,输入通道之间相互独立互不干扰,没有死区时间问题。在测量方案中,测量误差主要来自时钟源误差、事件计时器测量误差和信号传输延迟波动误差。实验中采用高精度时钟参考源,并且让两台事件计时器的输入信号尽量保持一致,使用长度、材质、接口等规格一致的低损耗电缆,减少信号传输路径中产生的延时误差波动,减少各通道相噪对事件计时测量的影响,从而简化测量模型,提高测量精度,实现直接对事件计时器性能进行分析。

## 2.2 GT668 与 A033 对比

由表 1 可以看出,在单次测量分辨率上,GT668 略优于 A033,并提高了四倍的测量速率,同时 GT668 输入脉宽的灵敏性更高,脉冲宽度的选择范围更大,

没有通道间相互干扰和死区时间的影响。此外,GT668 基于连续计数的时间戳计时技术,增加了动态同步读取事件和时间的能力。

表 1 A033 与 GT668 规格对比

Tab.1 Specification comparison of A033 and GT668

Specifications	GT668 TIA	A033-ET
Single-shot RMS resolution/ps	0.9	1-1.5
Maximum measurement rate (million events per second)	4	1
Pulse width/ns	>0.15	5-40 (channel-to-channel crosstalk)
Dead time/ns		50+

其中, A033 事件计时器是采用基于内插倒数计数的时间测量原理,事件计时器会产生额外的脉冲 (分数脉冲),其持续时间为分数时间加上一个时间周期,已将它们进行时间-电压 ( $T/V$ ) 转换 (图 3)。在分数时间  $T_a$  和  $T_b$  期间,恒流电路对电容器充电,充电电压值代表分数脉冲的持续时间,并用高分辨率模数转换器将充电电压信号转换成数字值,如图 3 所示。

GT668 事件计时器是采用基于连续计数的事件计时测量原理,输入信号进入测量通道后,事件计数器开始对信号波形的周期数也就是事件进行时序连续计数,当采样逻辑触发采样时,时间计数器和事件计数器同时将采样点对应的事件数和时间序列显示出来,经过处理器在数字逻辑里执行计算频率和相位的公式,如图 4 所示。基于连续计数时间戳的事件计时器增加了动态同步读取事件、时间和插值器计数器的能力<sup>[20]</sup>,从而实现“零死区”测量。

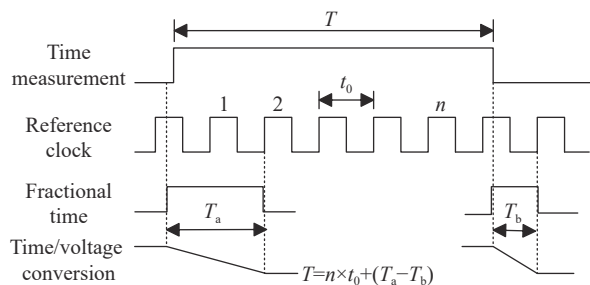


图 3 基于时间/电压转换的测量原理

Fig.3 Measurement principle based on time/voltage conversion

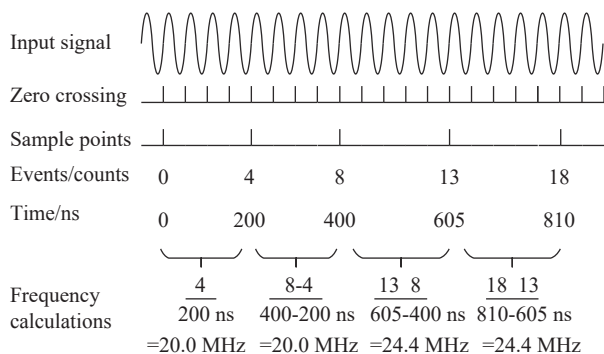


图 4 基于连续计数的事件计时器频率相位计算示意图

Fig.4 Schematic diagram of event timer frequency and phase calculation based on continuous counting

### 3 实验结果及分析

该次测量所得到的最终测量数据是氢钟与氢钟经过 30 m 连接电缆后的固定延迟数据,即相位数据见图 5(a),由于相位数据有频跳、存在粗差且不易有效探测,为了更好地对比 GT668 事件计时器与 A033 事件计时器之间的性能差异,在特定情况下将测量数据通过一次微分转化为频率数据,示例见图 5(b),再进行稳定性分析。

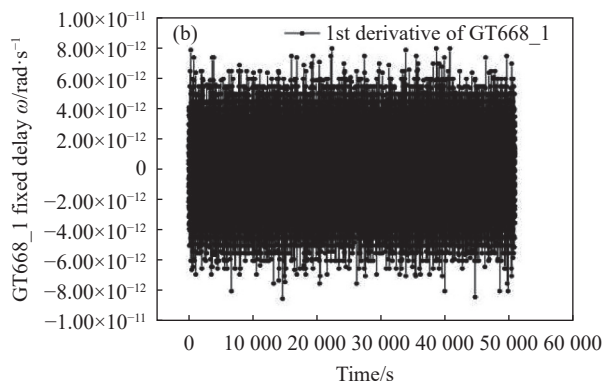
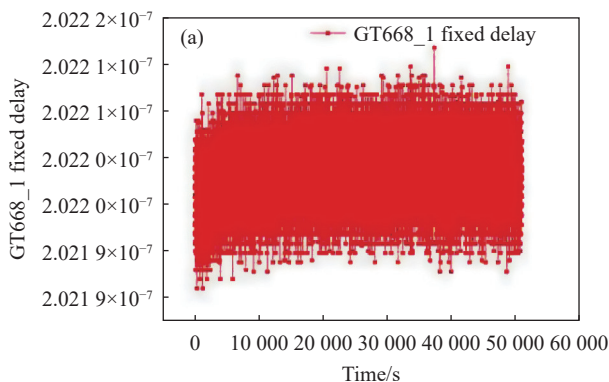


图 5 GT668 测量钟差相位、频率数据。(a) 相位数据; (b) 频率数据 (其中图 (a) 纵轴表示固定延迟 (单位: s), 图 (b) 纵轴表示瞬时相位对时间的微分即频率数据 (单位: rad/s))

Fig.5 GT668 measures the clock difference phase data and frequency data. (a) Phase data; (b) Frequency data (The vertical axis of Figure (a) indicates the fixed delay (unit: s), and The vertical axis of Figure (b) depicts the frequency data (unit: rad/s), which is the derivative of the instantaneous phase to time)

#### 3.1 固定延迟统计结果及分析

根据设计实验获得两种事件计时器 1 d 时间内连续的固定延迟时序数据,通过简单的统计分析可以看出(表 2),在同等量级的固定延迟均方根值基础上,均值 SE、标准差和极值差反映了一组数据的离散程度,GT668 相比于 A033 事件计时器离散程度更小。

表 2 A033 与 GT668 数据统计结果

Tab.2 Statistical results of A033 and GT668

Statistical value	A033	GT668_1	GT668_2
Root mean square/ $\times 10^{-7}$	1.944 39	2.021 98	2.022 01
Mean value SE/ $\times 10^{-14}$	3.655 72	1.349 35	2.606 17
Standard deviation/ $\times 10^{-12}$	6.074 11	3.047 27	4.202 32
Extreme difference/ps	46	26	29

#### 3.2 频率测量准确度及漂移率测量结果及分析

采用基于事件计时原理的 A033 事件计时器和 GT668 事件计时器连续采集 1 d 内氢钟与 30 m 光纤电缆的固定延迟时序数据,通过上述分析方法获得频率测量准确度和频率漂移率的累积秒数据,并对最终值和累积秒内的频率测量准确度以及 1 d 内的频率漂移率进行统计,获得如下结果。

如表 3 所示,从频率测量准确度可以看出, A033

表 3 频率准确度及漂移率结果对比

Tab.3 Comparison of frequency accuracy and drift rate results

Event timer		Frequency accuracy/ $\times 10^{-12}$		Frequency drift rate/ $\times 10^{-15}$
A033	Final value	-2.075	1 day	2.096
	RMS value	6.073		
GT668	Final value	0.947	1 day	-1.071
	RMS value	3.100		

事件计时器的测量结果优于 $7 \times 10^{-12}$ , 而 GT668 事件计时器的测量结果优于 $3.1 \times 10^{-12}$ , GT668 事件计时器第二次测量也是优于 $4.2 \times 10^{-12}$ ; 从频率漂移率上可看出, 在 1 d 内, A033 事件计时器漂移率为 $2.096 \times 10^{-15}$  量级, 而 GT668 事件计时器的频率漂移率则是 $-1.071 \times 10^{-15}$ 。同时, 由图 6 可看出, 无论从频率准确度还是频率漂移率上来对比, A033 事件计时器与 GT668 事件计时器在该性能指标上处于同一量级, GT668 性能相对较好。

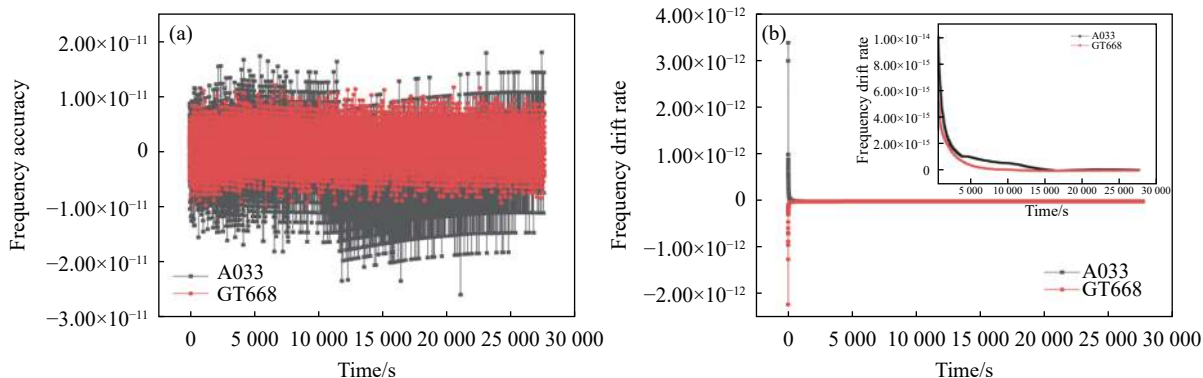


图 6 A033 与 GT668 的频率准确度和频率漂移率对比图。(a) 频率准确度; (b) 频率漂移率

Fig.6 Comparison of frequency accuracy and frequency drift rate between A033 and GT668. (a) Frequency accuracy; (b) Frequency drift rate

### 3.3 频率稳定度 (时域方差) 和幂律谱噪声结果及分析

通过上述分析方法获得表达频率稳定度的 Allan 标准差、Modified Allan 标准差、Time 标准差和 Hadamard 标准差的累积秒数据, 如表 4 所示。由表 4 可以看出, 所得 Allan 标准差、Modified Allan 标准差、Time 标准差、Hadamard 标准差等数值都位于 $1 \times 10^{-12}$  的量级, 但 GT668 事件计时器相比于 A033 事件计时器在

四种时域标准差数值上都有不同程度的减小且趋势明显, 表明 GT668 事件计时器在稳定度上优于 A033 事件计时器。

同时, 如图 7 所示, 可以看出 A033 事件计时器与 GT668 事件计时器在短期 ( $1 \times 10^4$  s) 内稳定度曲线变化趋势相似; 在 Allan 方差曲线和 Hadamard 方差曲线中, A033 事件计时器稳定度曲线始终高于 GT668 事件计时器的稳定度曲线; 在 Time 方差曲线中, 略有起伏, 但整体来看, GT668 事件计时器的稳定度仍然高于 A033 事件计时器的稳定度; 在 Modified Allan 方差曲线中, 短期 ( $1 \sim 10^{1.5}$  s) 内曲线主要受调相白噪声影响, 在中期 ( $10^{1.5} \sim 10^{3.5}$  s) 内曲线主要受调频白噪声影响, 而在长期 ( $\geq 10^{3.5}$  s) 后曲线受调频闪烁噪声影响, 曲线走势相似, 数值上 A033 事件计时器与 GT668 事件计时器存在差异; 如图 8 所示, 将幂律谱噪声中的五种噪声分离对比可以看出, A033 事件计时器的 RW-FM 随着时间推移有一个明显的线性化趋势, GT668 事件计时器则是相对平稳, 表明在同样的物理

表 4 A033 与 GT668 稳定性结果数值比对 ( $\times 10^{-12}$ )

Tab.4 Numerical comparison of stability results between A033 and GT668 ( $\times 10^{-12}$ )

Time domain deviation	A033	GT668_1	GT668_2
Allan deviation	7.260	4.108	4.570
Modified Allan deviation	8.908	4.977	5.771
Time deviation	5.143	2.874	3.331
Hadamard deviation	9.403	5.203	6.225

环境中,事件计时器内部机械振动可能对噪声产生影响。在 $10^4$  s 和天稳区内 A033 事件计时器时域方差曲线明显高于 GT668 事件计时器的方差曲线,从而证

明短时间(天稳)内,GT668 事件计时器相对于 A033 事件计时器具有更好的稳定性,长期的指标有待进一步测量与分析。

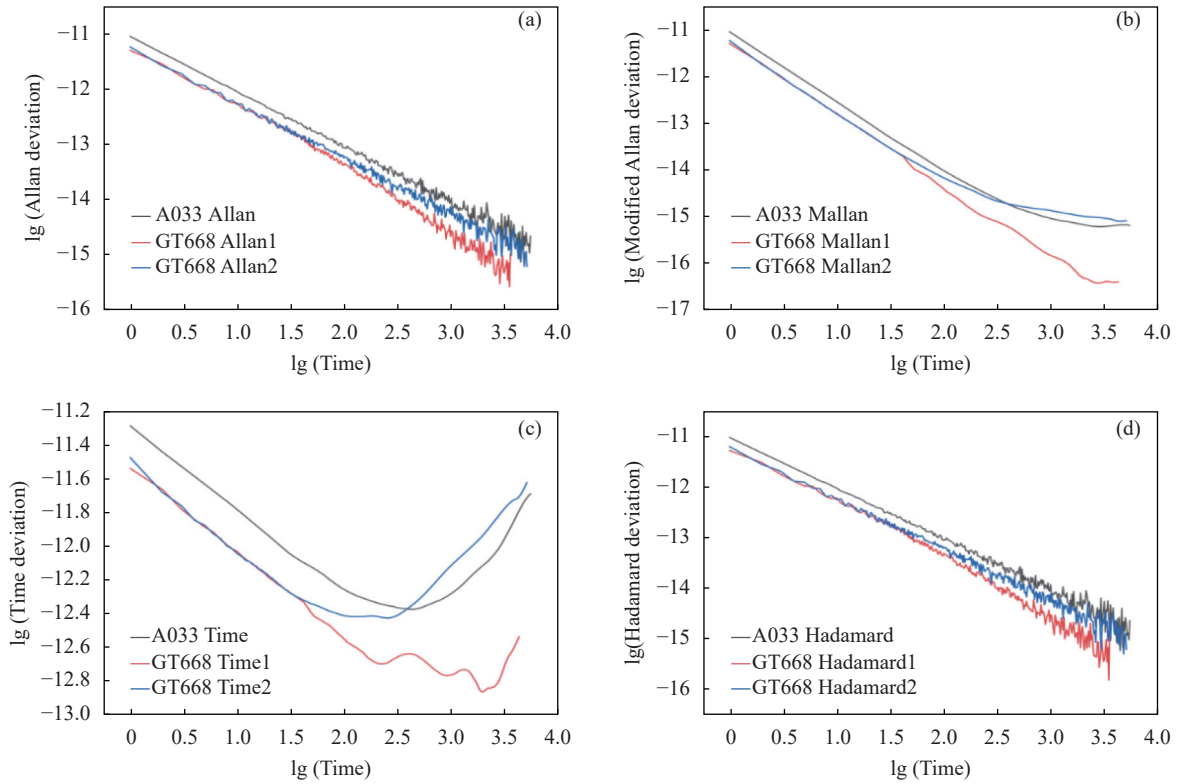
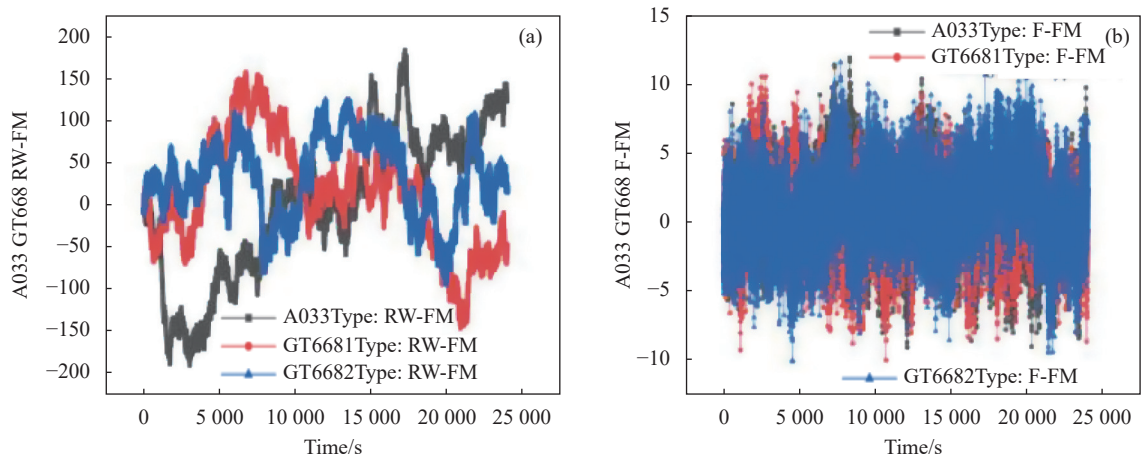


图 7 A033 与 GT668 时域方差对比图。(a) Allan 曲线图; (b) Modified Allan 曲线图; (c) Time 曲线图; (d) Hadamard 曲线图(纵坐标表示的是对方差的对数值,横坐标表示对应时间的对数值)

Fig.7 Comparison of time domain variance between A033 and GT668. (a) Allan curve graph; (b) Modified Allan curve graph; (c) Time curve graph; (d) Hadamard curve graph (The horizontal axis shows the logarithmic value of the corresponding time, while the vertical axis shows the logarithmic value of the associated variance)



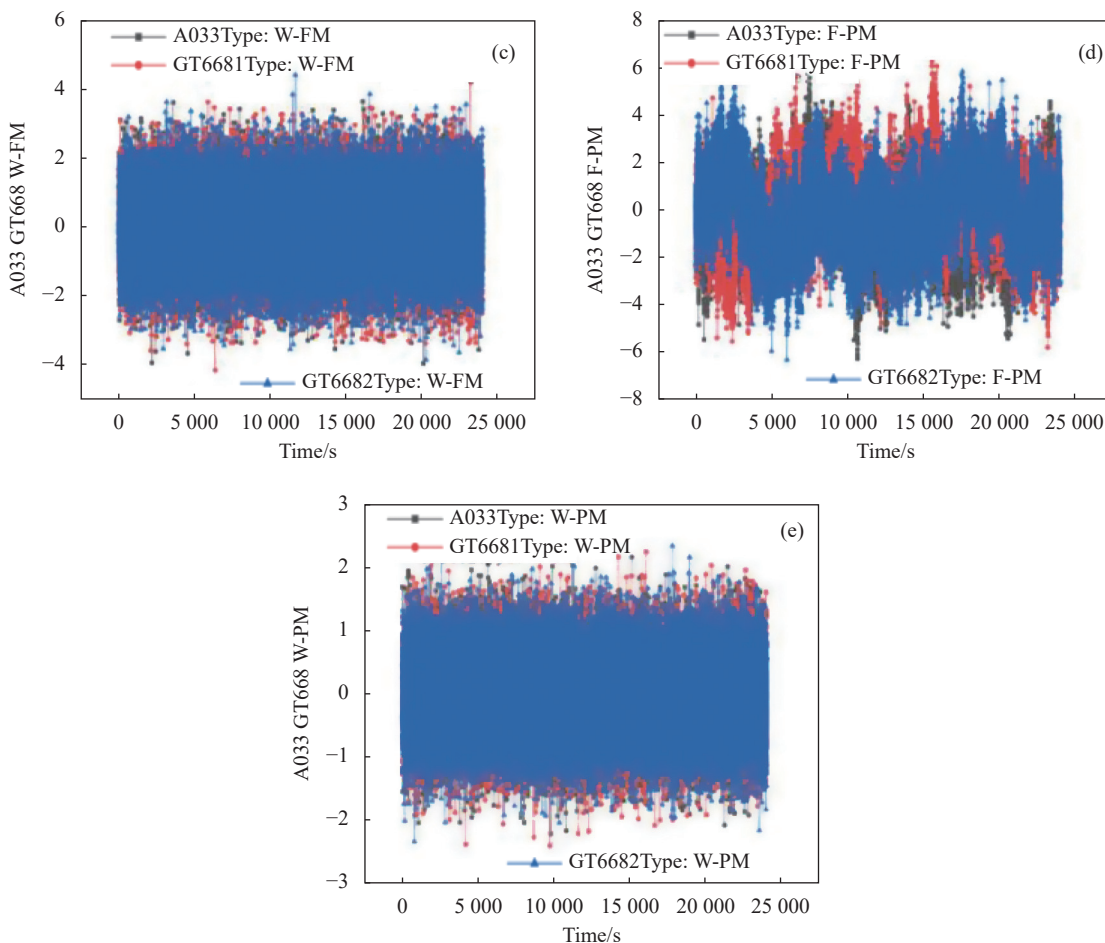


图 8 A033 与 GT668 五种幂律谱噪声的对比图

Fig.8 Five power law spectral noises comparison between A033 and GT668

### 4 结 论

根据文中提出的性能评估分析方法,从确定性因素频率准确度和频率漂移率以及随机因素离散程度、频率稳定度、幂律谱噪声的角度对皮秒事件计时器的性能进行评估。设计实验通过测量同一氢原子钟和 30 m 连接电缆的固定延迟,对激光时间链路所使用的受死区时间限制的 A033 事件计时器和基于连续计数时间戳的 GT668 事件计时器进行性能评估。结果表明, A033 事件计时器在频率准确度和频率漂移率上相比 GT668 事件计时器处于同一量级, GT668 性能表现较好;在频率稳定度上,不管基于哪种时域方差和幂律谱噪声, GT668 相较 A033 都具有更稳定的性能表现。

在时频传递中,时间间隔测量系统的准确性对系统时间具有决定性作用,也将体现整个系统性能的优

劣。为此,对事件计时器的性能评估是很有必要的,由文中可知, GT668 事件计时器的性能在短期 (1 d) 内优于 A033 事件计时器,可以满足自由空间激光时频传递的测量要求,从而为提升激光测距系统传输距离提供可能性。但仍需对事件计时器的长期稳定性进行性能评估,开展深入研究,对性能评估所受影响进行分析,为下一步研究工作打下基础。

### 参考文献:

[1] Zheng Yunqiang, Liu Huan, Meng Jiacheng, et al. Development status, trend and key technologies of air-based laser communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(6): 20210475. (in Chinese)

[2] Kirchner G, Koidl F, Iqbal F. Pushing Graz SLR from 2 kHz to 10 kHz repetition rate[C]//Proceedings of the 17th International Workshop on Laser Ranging, ILRS, 2011(5): 16-20.

[3] Peiyuan W, Tangyong G, Hao G, et al. Key technologies



- implementation of high-repetition-rate satellite laser ranging [J]. *Geodesy Geodyn*, 2013, 4(1): 51-54.
- [4] Wu Zhibo, Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, et al. The preliminary results of SLR with 10 kHz laser system at Shanghai Station[C]//Proceedings of the 18th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2013: 13-Po52.
- [5] Samain E, Guillemot P, Exertier P, et al. Time transfer by laser link-T2 L2: current status of the validation program[C]//EFTF 2010-24th European Frequency and Time Forum, 2010, Noordwijk, Netherlands, 2010: 1-8.
- [6] Wu Z B. Research on high repetition rate satellite laser ranging[D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [7] Lamine B, Fabre C, Treppe N. Quantum improvement of time transfer between remote clocks [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(12): 23601.
- [8] Li Rui, Lin Baojun, Liu Yingchun, et al. Review on laser intersatellite link: current status, trends, and prospects [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 20220393. (in Chinese)
- [9] Bauer S, Hussmann H, Oberst J, et al. Analysis of one-way laser ranging data to LRO, time transfer and clock characterization [J]. *Icarus: International Journal of Solar System Studies*, 2017, 283: 38-54.
- [10] Deschenes J D, Sinclair L C, Giorgetta F R, et al. Synchronization of optical oscillators over a free-space link at the femtosecond level[C]//CLEO: Optical Society of America, 2015: JTh5C.
- [11] Samain E, Rovera G D, Torre J M, et al. Time transfer by laser link (T2L2) in noncommon view between Europe and China [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2018, 65(6): 927-933.
- [12] Dong Ruifang, Liu Tao, Zhang Shougang. High Precision Time and Frequency Transmission and Ranging Technology Based on Laser[M]. Beijing: Science Press, 2021: 107-110. (in Chinese)
- [13] Qin Si, Wu Zhibo, Zhang Haifeng, et al. High precise event timer and its application to satellite laser ranging [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(4): 419-423. (in Chinese)
- [14] Jia Xiaoli, Zeng Tian, Ruan Rengui, et al. Atomic clock performance assessment of BeiDou-3 basic system with the noise analysis of orbit determination and time synchronization [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(24): 2895.
- [15] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector(ITU-T). Definitions and terminology for synchronization networks[DB/OL]. (1996-08-01)[2022-12-30]. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.810-199608-I/en>.
- [16] European Telecommunications Standards Institute(ETSI). Generic requirements for synchronization networks[DB/OL]. [2022-12-30]. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/300400\\_300499/3004620301/01.01.01\\_60/en\\_3004620301v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300400_300499/3004620301/01.01.01_60/en_3004620301v010101p.pdf).
- [17] 李孝辉, 杨旭海, 刘娅. 时间频率信号的精密测量[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 17-18.
- [18] Rutman J, Walls F L. Characterization of frequency stability in precision frequency sources [J]. *Proceeding of the IEEE*, 1991, 79(7): 952-960.
- [19] Howe D A, Allan D W, Barnes J A. Properties of signal sources and measurement methods[C]//Proceeding 35th Annual Frequency Control Symposium, 1981, 5: 669-716.
- [20] Coombs C F. Electronic Instrument Handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 1999: 19.16-19.18.

## Performance analysis method of high-precision event timer in laser time-frequency transmission

Xue Han<sup>1,2</sup>, Zhang Ziang<sup>1,2\*</sup>, Fu Jingqi<sup>1</sup>, Diao Lingtian<sup>1</sup>, Mu Liwei<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Observatory of National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130117, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

### Abstract:

**Objective** Free-space laser time-frequency transmission technology has the advantages of high capacity, extensive coverage, long transmission distance, and high confidentiality. Its accuracy is expected to reach the standard quantum limit, making it an important technical development direction for space high-precision time-frequency transmission in the future. The precision of laser range directly affects the accuracy of laser time-

frequency transmission, which is determined by the accuracy of measuring the pulse round-trip time interval. Compared with traditional time interval counting method, the measurement accuracy of event timing method has reached ps level, and it has become an essential measurement technology in high-repetition-rate laser ranging technology. In this research, an index evaluation model for the measurement performance of the event timer was established in order to provide a reference for the assessment of event timer in free-space laser time-frequency transmission with greater precision and longer distance.

**Methods** The performance assessment model for event timers presented in this work mixes deterministic and random elements. Frequency stability (time-domain variance) and power-law spectral noise are random parameters, and frequency accuracy and frequency drift rate are deterministic ones. Time series from accurate frequency sources can be measured to obtain a number of indicators that describe the effectiveness of the event timer, such as those based on the minimum double-dimensional frequency accuracy and frequency drift rates, as well as time-domain differences that describe the stability of frequencies, such as Allan variance, Modified Allan variance, Time variance and Hadamard variance. The power law spectrum model contains five random noises, including random walk noise, frequency-modulated white noise, frequency-modulated flicker noise, phase-modulated white noise and phase-modulated flicker noise, which can be separated from the event timer measurement data. The measurement method was created using the performance assessment model (Fig.2), which contrasts the performance of two common, high-precision event timers (A033 and GT668) that are on the same accuracy level.

**Results and Discussions** The high-precision event timers A033 and GT668 are being evaluated for their measurement performance using the specified event timer performance assessment model. The dispersion degree of the GT668 was lower than that of the A033 (Tab.2). The frequency measurement accuracy of the event timer A033 was superior to  $7 \times 10^{-12}$  (Fig.6); The event timer GT668 was superior to  $3.1 \times 10^{-12}$ . Compared to frequency drift rate, the frequency drift rate indicators of A033 was  $2.096 \times 10^{-15}$ , and frequency drift rate of the GT668 was  $-1.071 \times 10^{-15}$ . The short-term stability Allan standard deviation (1 d) increased from  $7 \times 10^{-12}$  to  $4 \times 10^{-12}$  (Tab.4). There is no discernible difference between FM scintillation noise and FM white noise, and GT668 is more steady in the trend of the random walk noise curve (Fig.8). The performance of high-precision event clocks may be assessed and studied using the performance evaluation model, and the variations between various event timers on the same performance index can be observed.

**Conclusions** The performance of the picosecond event timer was assessed from the perspectives of deterministic factors and random factors, according to the designed performance evaluation method, and the key performance indicators such as frequency accuracy, frequency drift rate, dispersion degree, frequency stability (time domain variance), and power law spectrum noise were obtained. The experiments validated the event timer assessment method by measuring the event timing of the fixed latency of the passive hydrogen maser VCH-1008 (VREMYA-CH) using the event timers A033 and GT668. The experiment demonstrated that the performance of a high-precision event timer was able to be assessed and analyzed by the evaluation model presented in this paper, ascertain its accuracy and dependability, and provide an analytical foundation for its applications.

**Key words:** laser time-frequency transmission; event timer; time-domain variance; power-law spectrum noise

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (12173059, 11673082, 11103047); Natural Science Foundation of Jilin Province (20220101157JC)