



纠缠光子对的级联Hong–Ou–Mandel干涉研究及其在多时延参数测量中的应用

翟艺伟 董瑞芳 权润爱 项晓 刘涛 张首刚

**Cascaded Hong–Ou–Mandel interference of entangled photon pairs and its application in multiple delay parameters measurement**

Zhai Yi-Wei Dong Rui-Fang Quan Run-Ai Xiang Xiao Liu Tao Zhang Shou-Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 120302 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210071

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210071>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

两个独立全光纤多通道光子纠缠源的Hong–Ou–Mandel干涉

Hong–Ou–Mandel interference between two independent all–fiber multiplexed photon sources

物理学报. 2017, 66(12): 120302 <https://doi.org/10.7498/aps.66.120302>

宣布式单光子源宣布效率的宣布测量基相关性

Relevance of the heralded efficiency of the heralded single–photon source to the heralded basis

物理学报. 2019, 68(23): 234202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190532>

基于II类周期极化铌酸锂波导的通信波段小型化频率纠缠源产生及其量子特性测量

Generation and quantum characterization of miniaturized frequency entangled source in telecommunication band based on type-II periodically poled lithium niobate waveguide

物理学报. 2018, 67(14): 144204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180329>

光子增加双模压缩真空态在 Mach–曾德尔干涉仪相位测量中的应用

Application of photon–added two–mode squeezed vacuum states to phase estimation based on Mach–Zehnder interferometer

物理学报. 2020, 69(12): 124202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200179>

探测器对量子增强 Mach–曾德尔干涉仪相位测量灵敏度的影响

Effect of detection efficiency on phase sensitivity in quantum–enhanced Mach–Zehnder interferometer

物理学报. 2018, 67(23): 234202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181193>

基于量子增强型光纤 Mach–曾德尔干涉仪的低频信号测量

Measurement of low–frequency signal based on quantum–enhanced fiber Mach–Zehnder interferometer

物理学报. 2018, 67(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181335>

# 纠缠光子对的级联 Hong-Ou-Mandel 干涉研究 及其在多时延参数测量中的应用\*

翟艺伟<sup>1)2)</sup> 董瑞芳<sup>2)3)†</sup> 权润爱<sup>2)</sup> 项晓<sup>2)3)</sup> 刘涛<sup>2)3)</sup> 张首刚<sup>2)3)‡</sup>

1) (陕西科技大学电气与控制工程学院, 西安 710021)

2) (中国科学院国家授时中心, 时间频率基准重点实验室, 西安 710600)

3) (中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

(2021 年 1 月 11 日收到; 2021 年 2 月 2 日收到修改稿)

基于纠缠光子对的 Hong-Ou-Mandel (HOM) 干涉仪在量子精密测量等领域有着重要应用. 本文提出了利用一个级联 HOM 干涉仪实现多个独立时延参数的同时测量方案. 通过理论分析得出纠缠光子对对经过多个 50:50 分束器级联传输后, 其 HOM 二阶量子干涉图谱中凹陷位置与各级传输路径间独立时延参数的对应关系, 因此可通过记录各个凹陷位置的时延值实现多个独立时延参数的同时测量. 在此基础上搭建了基于频率一致纠缠光子对的二级级联 HOM 干涉测量装置, 通过实验上得到的具有两个对称凹陷的二阶量子干涉图谱, 实现了两级传输路径间两个独立时延参数  $\tau_1$  和  $\tau_2$  的同时测量, 并分别获得了 109 fs 和 98 fs 的测量精度. 上述研究结果为 HOM 干涉仪在多参量量子精密测量系统中的扩展应用奠定基础.

**关键词:** Hong-Ou-Mandel 干涉仪, 纠缠光子对, 多时延参数, 同时测量

**PACS:** 03.67.Mn, 85.35.Ds, 42.50.Dv

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210071

## 1 引言

Hong-Ou-Mandel (HOM) 干涉仪<sup>[1,2]</sup>自提出以来, 就被广泛应用在量子精密测量、量子相干层析以及量子通信等领域中<sup>[3–11]</sup>. 基于 HOM 干涉仪的时延测量主要是探测光子对的时间关联特性, 且具有更宽的测量范围. 利用纠缠光子对作为 HOM 干涉仪的输入光源, 可以使时延测量精度突破散粒噪声极限达到海森伯极限, 同时纠缠特性能够有效地抵御传输路径介质的色散效应<sup>[12–16]</sup>. 因此, 基于纠

缠光子对的 HOM 干涉仪作为一种高测量精度、抗干扰且结构简单的时延测量装置, 在量子精密测量和量子定位系统中具有重要地位.

在标准 HOM 干涉仪中, 纠缠光子对分别经过不同的传输路径入射到 50:50 分束器, 当干涉仪的两路传输路径平衡时, 在 50:50 分束器的输出端口通过符合测量装置记录纠缠光子对的二阶量子干涉图谱, 观察得到纠缠光子对符合计数率最小值与传输路径中时延参数零值之间存在唯一对应关系, 表现为二阶量子干涉图谱中存在一个凹陷, 其宽度和干涉可见度是与纠缠光子对的相干时间和不可

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12033007, 61875205, 61801458, 91836301)、中国科学院前沿科学重点研究项目 (批准号: QYZDB-SW-SLH007)、中国科学院战略性先导科技专项 C 类项目 (批准号: XDC07020200)、中国科学院“西部青年学者”项目 (批准号: XAB2019B17, XAB2019B15)、广东省重点研发项目 (批准号: 2018B030325001) 和中国科学院重点项目 (批准号: ZDRW-KT-2019-1-0103) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dongruifang@ntsc.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: szhang@ntsc.ac.cn

分性相关<sup>[1,2]</sup>. 迄今为止, 基于 HOM 干涉仪的量子精密时延测量方法, 已经受到了国内外学者的广泛关注. Branning 等<sup>[17]</sup>和 Dauler 等<sup>[18]</sup>利用正交偏振光子对的 HOM 干涉效应测量偏振模色散, 获得了亚飞秒量级的时延测量精度. 进一步地, Lyons 等<sup>[19]</sup>通过统计学理论, 将 HOM 干涉仪的时延测量精度提升到了阿秒量级, 并将其应用到生物细胞和材料样品检测领域. 上述研究验证了 HOM 干涉仪的超高时延测量精度并扩展了其应用领域.

随着量子精密测量系统的进一步发展, 基于标准 HOM 干涉仪的单个时延测量方案已经无法满足多参量系统的应用需求. 为了实现多个独立时延参数的测量, 基于两个 50:50 分束器的 Mach-Zehnder (MZ) 干涉模型<sup>[20,21]</sup>和基于多个 50:50 分束器及消色差波片级联的二阶量子干涉模型<sup>[22]</sup>相继被提出. 然而, 基于 HOM 干涉仪后级联多个 50:50 分束器的纠缠光子对二阶量子干涉研究, 即级联 HOM 干涉效应及其应用实验研究暂未见报道.

本文对基于 HOM 干涉仪级联多级 50:50 分束器实现的多个时延参数测量方案进行了研究, 理论分析了标准 HOM 干涉仪后分别级联一个和两个 50:50 分束器时所获得的二级级联 HOM 干涉仪和三级级联 HOM 干涉仪的二阶量子干涉图谱中各个凹陷位置与传输路径中独立时延参数间的多点对应关系; 进一步在实验上基于频率一致纠缠光子对和符合测量, 分析了二级级联 HOM 干涉仪的二阶量子干涉图谱, 并实现了两个独立时延参数的同时测量.

## 2 理论模型

基于频率纠缠光源的多级级联 HOM 干涉仪装置如图 1 所示, 级联 HOM 干涉仪由 HOM 干涉仪后级联  $n$  个 50:50 分束器 (BS1, BS2, ..., BS $n$ ) 组成. 偏振相互正交的频率纠缠光子对经过偏振分束器分开, 信号光  $s$  和闲置光  $i$  (其湮灭算符分别

为  $\hat{a}_s(\omega)$  和  $\hat{a}_i(\omega)$ ) 先后经过 HOM 干涉仪和级联的  $n$  个 50:50 分束器后, 到达单光子探测器 D1 和 D2 前的湮灭算符可以表示为  $\hat{a}_{s_n}(\omega)$  和  $\hat{a}_{i_n}(\omega)$ . 假定各级传输路径中存在的独立时延参数分别记为  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ , 第  $k$  ( $k \in n$ ) 个 50:50 分束器前后双光子的传输矩阵可表示为  $M_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{i\omega\tau_{k+1}} & 1 \\ e^{i\omega\tau_{k+1}} & -1 \end{pmatrix}$ , 当  $n \geq 1$ , 到达单光子探测器 D1 和 D2 前的湮灭算符  $\hat{a}_{s_n}(\omega)$  和  $\hat{a}_{i_n}(\omega)$  可以表示为<sup>[20,21]</sup>

$$\begin{pmatrix} \hat{a}_{s_n}(\omega) \\ \hat{a}_{i_n}(\omega) \end{pmatrix} = M_n \cdots M_1 \times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{i\omega(\tau-\tau_1)} & 1 \\ e^{i\omega(\tau-\tau_1)} & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{a}_s(\omega) \\ \hat{a}_i(\omega) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

随可调时延  $\tau$  变化的纠缠光子对符合计数率  $P(\tau)$  可以写为<sup>[23]</sup>

$$P(\tau) \propto \int \frac{d\omega_1}{2\pi} \int \frac{d\omega_2}{2\pi} |\langle 0 | \hat{a}_{s_n}(\omega_1) \hat{a}_{i_n}(\omega_2) | \psi \rangle|^2, \quad (2)$$

其中  $|\psi\rangle = \int \frac{d\omega_s}{2\pi} \int \frac{d\omega_i}{2\pi} A(\omega_s, \omega_i) \hat{a}_s^\dagger(\omega_s) \hat{a}_i^\dagger(\omega_i) |0\rangle$  表征纠缠光子对的态函数,  $A(\omega_s, \omega_i)$  是纠缠光子对的频谱函数.

当  $n = 1$  时, 信号光  $s$  和闲置光  $i$  分别经过一个可调时延  $\tau$  和未知独立时延参数  $\tau_1$  后入射到 50:50 分束器 (BS1) 进行二阶量子干涉, 此时为标准 HOM 干涉仪 (HOM interferometer, HOMI), 其纠缠光子对符合计数率可以写为

$$\begin{aligned} P_{\text{HOMI}}(\tau) &\propto \int \frac{d\omega_s}{2\pi} \int \frac{d\omega_i}{2\pi} |\langle 0 | \hat{a}_{s_1}(\omega_s) \hat{a}_{i_1}(\omega_i) | \psi \rangle|^2 \\ &\propto \int \frac{d\omega_s}{2\pi} \int \frac{d\omega_i}{2\pi} |A(\omega_s, \omega_i)|^2 - A(\omega_s, \omega_i) \\ &\quad \times A(\omega_i, \omega_s) \cos[(\omega_s - \omega_i)(\tau - \tau_1)]. \end{aligned} \quad (3)$$

当  $n = 2$  时, 信号光  $s$  和闲置光  $i$  经过级联了两个 50:50 分束器 (BS2) 的 HOM 干涉仪后进行二阶量子干涉, 期间经过可调时延  $\tau$  和未知独立时延参数  $\tau_1$  和  $\tau_2$ , 将  $n = 2$  代入 (1) 式得出  $\hat{a}_{s_2}(\omega_s)$  和

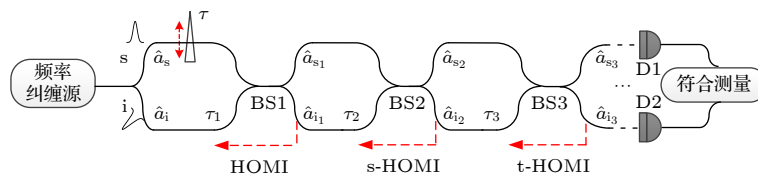


图 1 基于频率纠缠光源的多级级联 HOM 干涉仪的原理框图

Fig. 1. Schematic of multi-cascaded HOM interferometer based on frequency entangled source.

$\hat{a}_{i_2}(\omega_i)$ , 并代入 (2) 式中, 则经过二级级联 HOM 干涉仪 (second-cascaded HOMI, s-HOMI) 后的纠缠光子对符合计数率可以写为

$$P_{s\text{-HOMI}}(\tau) \propto \int \frac{d\omega_s}{2\pi} \int \frac{d\omega_i}{2\pi} |A(\omega_s, \omega_i)|^2 - \frac{1}{4} A(\omega_s, \omega_i) A(\omega_i, \omega_s) \times \{\cos[(\omega_s - \omega_i)(\tau - \tau_1)] \cos[(\omega_s - \omega_i)\tau_2]\}. \quad (4)$$

当  $n = 3$  时, 信号光  $s$  和闲置光  $i$  经过级联了 3 个 50:50 分束器 (BS2 和 BS3) 的 HOM 干涉仪后进行二阶量子干涉, 期间经过可调时延  $\tau$  和未知独立时延参数  $\tau_1, \tau_2$  和  $\tau_3$ , 将  $n = 3$  代入 (1) 式得出  $\hat{a}_{s_3}(\omega_s)$  和  $\hat{a}_{i_3}(\omega_i)$ , 并代入 (2) 式中, 则经过三级级联 HOM 干涉仪 (third-cascaded HOMI, t-HOMI) 后的纠缠光子对符合计数率可以写为

$$P_{t\text{-HOMI}}(\tau) \propto \int \frac{d\omega_s}{2\pi} \int \frac{d\omega_i}{2\pi} |A(\omega_s, \omega_i)|^2 - \frac{1}{8} A(\omega_s, \omega_i) A(\omega_i, \omega_s) \times \{\cos[(\omega_s - \omega_i)(\tau - \tau_1)] \cos[(\omega_s - \omega_i)\tau_3] \times \{-2 - \cos[(\omega_s - \omega_i)\tau_2]\}\}. \quad (5)$$

根据上述得到的纠缠光子对符合计数率公式, 通过扫描传输路径中的可调时延  $\tau$ , 可以得到随可调时延  $\tau$  变化的纠缠光子对的符合计数率, 也就是多级级联 HOM 干涉仪的二阶量子干涉图谱, 见图 2. 其中, 理论模拟中采用的纠缠光子对参数是实验中制备的频率一致纠缠光子对参数<sup>[24]</sup>, 因其不是完全不可分的频率一致纠缠态, 因此对应的 HOM 干涉可见度不是理想情况下的“1”, 为 0.67. 图 2(a) 是根据 (3) 式扫描  $\tau$  得到的标准 HOM 干涉仪的二阶量子干涉图谱, 当纠缠光子对符合计数率最低时, 表示 HOM 干涉仪的两路传输路径平衡, 也就是说  $\tau = \tau_1$  时, 二阶量子干涉图谱中存在一个凹陷, 此凹陷位置处的时延值对应的是标准 HOM 干涉仪中的未知时延参数  $\tau_1$ . 因此, 利用标准 HOM 干涉仪可以进行单个独立时延参数  $\tau_1$  的量子测量. 图 2(b) 是根据 (4) 式, 通过假定  $\tau_2 = 5$  ps, 扫描  $\tau$  得到的二级级联 HOM 干涉仪的二阶量子干涉图谱, 可以看到存在两个对称的凹陷, 其位置对应的时延值分别是  $\tau_2$  和  $-\tau_2$ . 同时, 两个对称凹陷位置的中间点时延值对应的是时延参数  $\tau_1$ . 因此, 基于一个二级级联 HOM 干涉仪, 就可以实现两个独立时延参数 ( $\tau_1, \tau_2$ ) 的同时测量. 图 2(c) 是根据 (5) 式, 通过假定  $\tau_2 = 7$  ps 和  $\tau_3 = 10$  ps, 扫

描  $\tau$  得到的三级级联 HOM 干涉仪的二阶量子干涉图谱, 可以看到存在 6 个对称的凹陷, 其位置对应的时延值分别是  $\pm\tau_3, \pm(\tau_3 - \tau_2), \pm(\tau_3 + \tau_2)$ , 同时, 对称的凹陷中间点时延值对应的也是时延参数  $\tau_1$ . 因此, 基于三级级联 HOM 干涉仪的二阶量子干涉图谱, 就可实现 3 个独立时延参数 ( $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ ) 的同时测量.

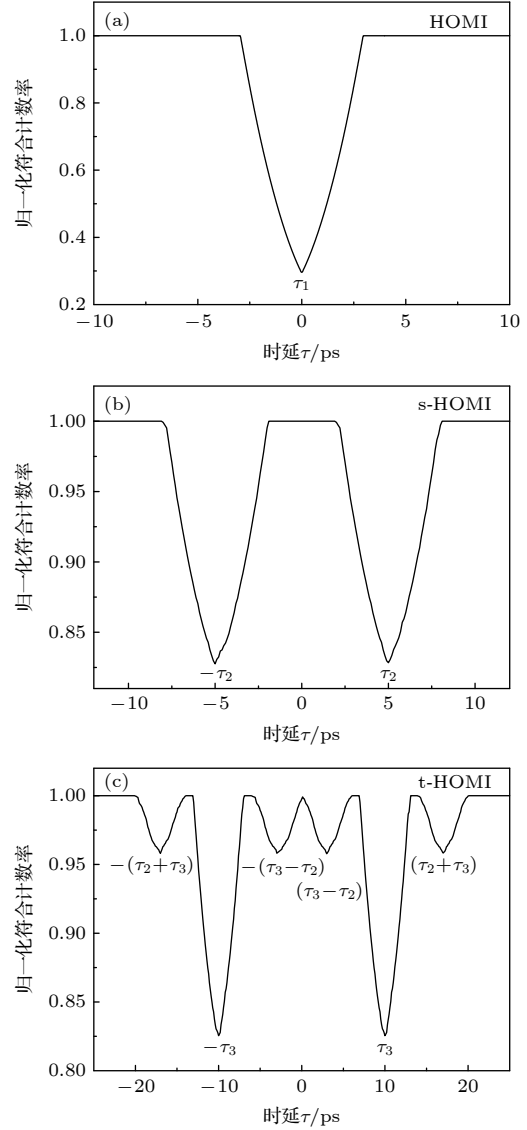


图 2 基于频率纠缠光子对的多级级联 HOM 干涉仪的二阶量子干涉图谱 (a) 标准 HOM 干涉仪; (b) 二级级联 HOM 干涉仪; (c) 三级级联 HOM 干涉仪

Fig. 2. The second-order quantum interferograms of multi-cascaded HOM interferometer based on frequency entangled photon pairs: (a) HOM interferometer; (b) the second-cascaded HOM interferometer; (c) the third-cascaded HOM interferometer.

以此类推, 当信号光  $s$  和闲置光  $i$  经过  $n$  个 50:50 分束器, 构成  $n$  级级联 HOM 干涉仪, 通过

扫描时延  $\tau$  得到的二阶量子干涉图谱中存在的凹陷对应的时延位置与传输路径中多个独立时延参数  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n$  有关, 通过测量多个凹陷位置处的时延值, 就可以间接得到多个独立时延参数, 从而实现基于一个 HOM 干涉仪对多个独立时延参数的同时测量. 对于  $n \geq 3$  的更多级级联 HOM 二阶量子干涉理论模型, 由于数学推导具有一定的复杂性, 本文未进一步给出, 但可以借助于纠缠光子对的干涉费曼图 (见附录 A), 更方便有效地分析二阶量子干涉图谱中的各个凹陷与多个独立时延参数之间存在的多点对应关系, 从而实现多个时延参数的同时测量.

### 3 实验装置

为了验证频率纠缠光子对的级联 HOM 干涉仪理论模型, 本文搭建了频率一致纠缠光子对的二级级联 HOM 干涉仪实验装置, 如图 3 所示. 超短飞秒脉冲 (中心波长为 791 nm, 3 dB 带宽为 24 nm) 激光抽运 PPKTP 晶体, 在满足扩展相位匹配条件下, 通过自发参量下转换过程产生频率一致纠缠光子对, 其中信号光  $s$  和闲置光  $i$  的偏振相互正交. 纠缠光子对经过透镜 (聚焦光斑) 及滤波片 (过滤剩余抽运光) 输入到单模光纤中, 利用光纤偏振分束器 (FPBS) 将信号光  $s$  和闲置光  $i$  分开. 信号光  $s$  经过  $t_1$  路径, 闲置光  $i$  经过  $t_2$  路径, 到达光纤分束器 1 (FBS1), 输出光子再分别经过路径  $t_3$  和  $t_4$  到达光纤分束器 2 (FBS2) 中, 之后通过超导纳米线单光子探测器 D1 和 D2 (探测效率  $\sim 50\%$ , 时间抖动  $\sim 70$  ps) 对单光子进行探测, 产生的干涉信号送入到符合测量装置 (TCSPC) 中, 进行纠缠光子对的符合测量. 在实验中, 为了对传输路径中的时延值进行粗略控制, 引入一个手动可调光学延迟线 ODL, 其路径时延长度可达 600 ps, 且低插入损耗. 为了对传输路径时延值进行精准控制, 引入一个电动可调光学延迟线 MDL, 用来实现时延  $\tau$  的扫描, 由带集成编码器的直流电机驱动, 可与计算机通信, 并利用计算机的 LabView 程序进行实时控制, 其时延扫描范围为 10—560 ps, 分辨率小于 1 fs. 通过程序控制自动扫描 MDL 的时延值  $\tau$ , 得到级联 HOM 干涉仪中纠缠光子对符合计数率随时延值  $\tau$  变化的二阶量子干涉图谱.

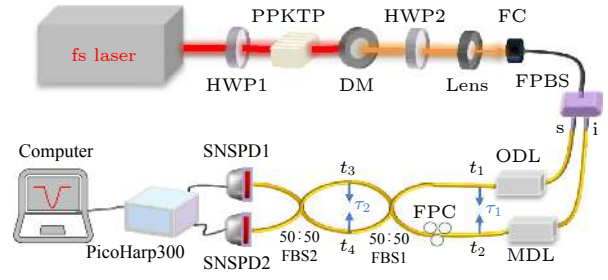


图 3 基于频率纠缠光子对的二级级联 HOM 干涉仪实验装置图 (HWP, 半波片; PPKTP, 周期极化磷酸氧钛钾晶体; DM, 分光镜; Lens, 透镜组; FC, 光纤耦合器; FPBS, 光纤偏振分束器; 50:50 FBS, 50:50 光纤分束器; FPC, 光纤偏振控制器; MDL, 电动可调光学延迟线; ODL, 手动可调光学延迟线; SNSPD, 超导纳米线单光子探测器)

Fig. 3. Experimental setup of the second-cascaded HOM interferometer based on frequency entangled photon pairs. HWP, half-wave plate; PPKTP, periodically poled KTP; DM, dichroic mirror; Lens, a set of lenses; FC, fiber connection; FPBS, fiber-based polarization beam splitter; 50:50 FBS, 50:50 fiber beam splitter; FPC, fiber polarization controller; MDL, motorized delay line; ODL, optical delay line; SNSPD, super-conductor nanowire single photon detector.

### 4 实验结果及分析

基于上述频率一致纠缠光子对和符合测量实验系统, 对标准 HOM 干涉仪和二级级联 HOM 干涉仪的二阶量子干涉图谱进行了测量. 扫描  $\tau$  得到标准 HOM 干涉仪的二阶量子干涉图谱, 如图 4(a) 所示, 实验测量的是纠缠光子对符合计数率随时延  $\tau$  的变化曲线, 与理论模拟符合良好, 在时延值 175 ps 处存在一个凹陷, 此时该时延值对应的就是传输路径  $t_1$  和  $t_2$  的时延差  $\tau_1$ . 在此基础上级联第二级 50:50 分束器后得到二级级联 HOM 干涉仪, 扫描  $\tau$  得到二级级联 HOM 干涉仪的二阶量子干涉图谱, 如图 4(b) 所示, 可以看到图谱中存在两个凹陷, 根据对应的时延值, 可以得出传输路径  $t_3$  和  $t_4$  的时延差  $\tau_2 = 5.02$  ps, 同时, 两个对称凹陷中心位置的时延值也是传输路径  $t_1$  和  $t_2$  的时延差  $\tau_1 = 175.14$  ps, 实验结果与理论模拟符合良好. 因此, 基于二级级联 HOM 干涉仪的二阶量子干涉图谱, 可以同时测量两个独立时延参数  $\tau_1$  和  $\tau_2$ .

图 5 进一步给出了基于二级级联 HOM 干涉仪对独立时延参数  $\tau_1$  和  $\tau_2$  多次测量后得到的测量精度, 可以看到, 时延参数测量精度随着平均测量时间呈下降趋势, 在平均测量时间达到 3000 s 时, 时延参数  $\tau_1$  和  $\tau_2$  的测量精度分别达到 109 fs 和

98 fs. 图 6 是测量过程中实时监测实验室环境温度与时延参数测量值的波动对比图,可以看出,时延参数测量值的移动趋势与实验室环境温度的变化趋势一致,实验室中环境温度的变化是由于实验室

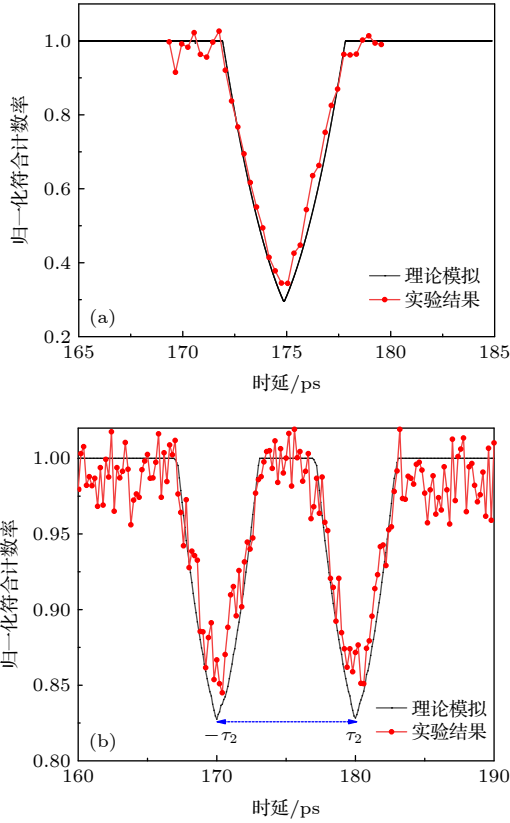


图 4 频率一致纠缠光子对的二阶量子干涉图谱实验结果 (a) 标准 HOM 干涉仪; (b) 二级级联 HOM 干涉仪  
Fig. 4. Experimental results of second-order quantum interferograms based on frequency entangled photon pairs: (a) HOM interferometer; (b) the second-cascaded HOM interferometer.

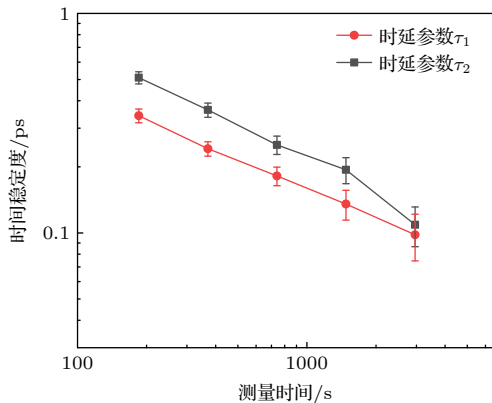


图 5 基于二级级联 HOM 干涉仪的两个独立时延参数  $\tau_1$  和  $\tau_2$  的测量精度  
Fig. 5. Measurement accuracy of delay  $\tau_1$  and  $\tau_2$  based on the second-cascaded HOMI.

空调的调频周期决定,其变化周期近似为 33 min,与时延测量值的变化周期基本一致,说明了环境温度的变化会影响时延参数的测量精度。

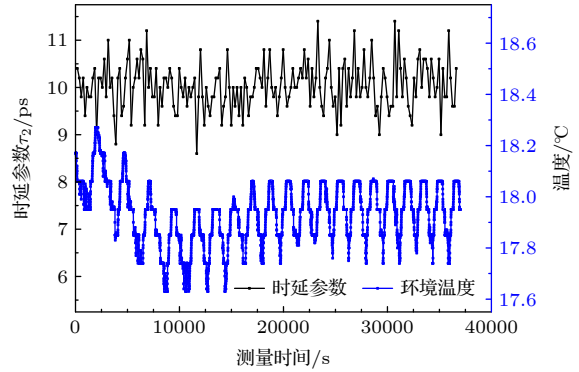


图 6 时延参数  $\tau_2$  的测量值与环境温度及测量时间的变化关系  
Fig. 6. Delay movements  $\tau_2$  and the temperature variations versus the measuring time.

## 5 结论

本文提出了一种基于一个多级级联 HOM 干涉仪实现多个独立时延参数的同时测量方案. 以频率纠缠光子对作为标准 HOM 干涉仪的输入光源,通过在标准 HOM 干涉仪后级联多个 50:50 分束器,将基于 HOM 干涉仪的单个时延参数测量方案扩展为多个时延参数的同时测量方案,通过记录频率纠缠光子对多级干涉后的二阶量子干涉图谱中凹陷位置处的时延值,就可以同时得到不同传输路径中的多个独立时延参数. 实验上搭建了基于频率一致纠缠光子对的二级 HOM 干涉仪,结合单光子探测器和符合测量装置实现了两个独立时延参数的同时测量,测量精度分别达到 109 fs 和 98 fs,与理论模拟结果符合良好. 上述研究结果为 HOM 干涉仪在量子精密测量等领域的拓展应用奠定了坚实的基础.

## 附录A 纠缠光子对的干涉费曼图

对于纠缠光子对的多级级联 HOM 干涉仪的理论分析,当级联 50:50 分束器的个数越多,纠缠光子对符合计数率的计算推导越复杂,此时,可以借助纠缠光子对干涉的费曼图进行分析,如图 A1 所示. 图 A1(a)–(c) 分别对应的是标准 HOM 干涉仪、二级级联 HOM 干涉仪和三级级联 HOM 干涉仪的纠缠光子对干涉费曼图,信号光  $s$  和闲置光  $i$  经过不同的传输路径,在不同的时间到达 50:50 分束器上进行

二阶量子干涉,产生的干涉相消现象出现在不同的时延位置,且与传输路径中的多个独立时延参数存在着对应关系,可以看到,利用费曼图进行二阶量子干涉图谱中凹陷位置的分析,与上述理论计算和实验测量结果符合良好.因此,

在之后  $n \geq 3$  的更多级级联 HOM 二阶量子干涉理论模型分析中,就可以根据费曼图更快速地得出多级级联 HOM 干涉仪的凹陷位置与传输路径中独立时延参数的关系,从而进一步实现更多独立时延参数的同时测量.

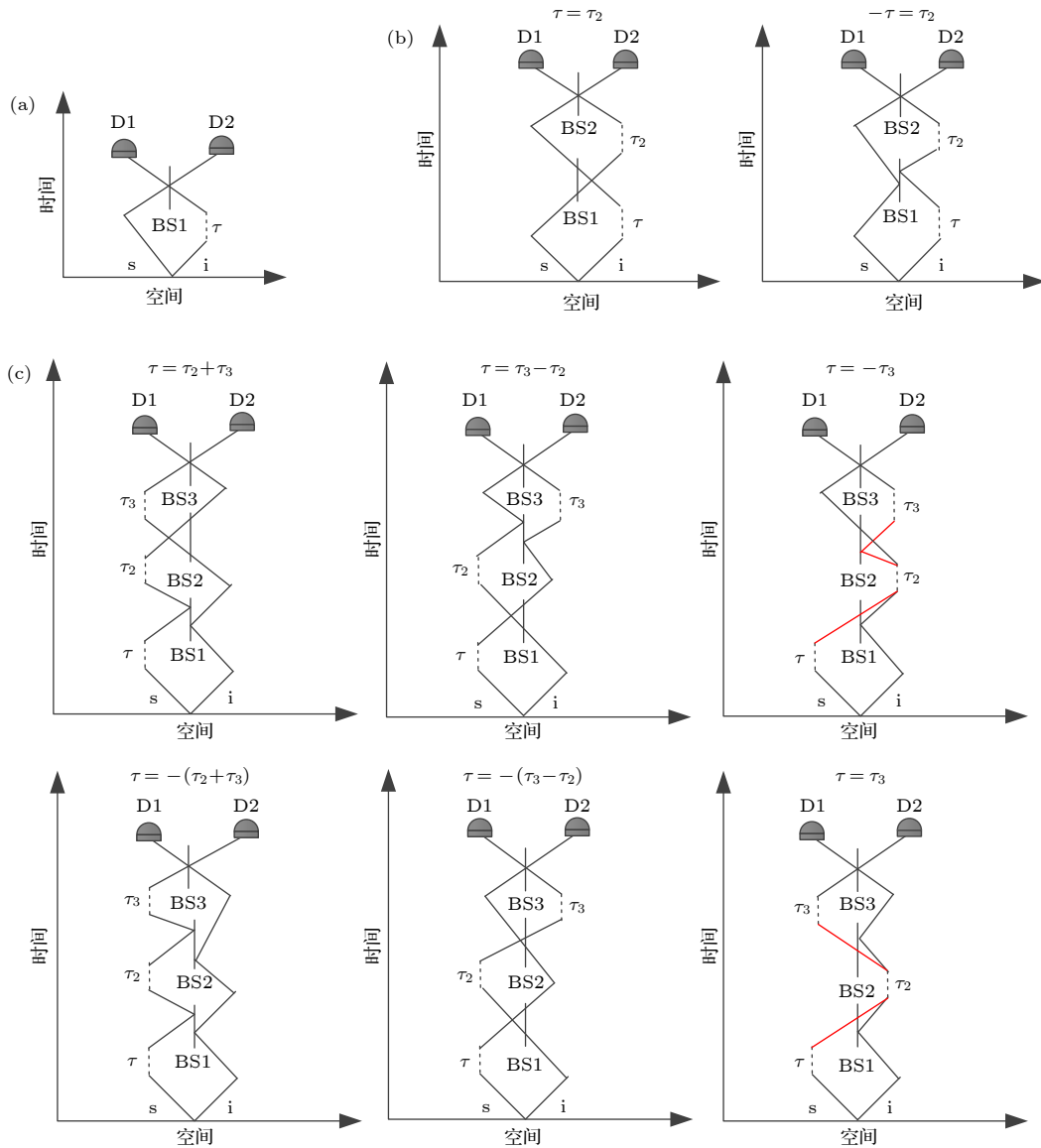


图 A1 纠缠光子对的干涉费曼图 (a) 标准 HOM 干涉仪; (b) 二级级联 HOM 干涉仪; (c) 三级级联 HOM 干涉仪

Fig. A1. The Feynman-like diagrams of entangled photon pairs: (a) HOM interferometer; (b) the second-cascaded HOM interferometer; (c) the third-cascaded HOM interferometer.

### 参考文献

- [1] Hong C K, Ou Z Y, Mandel L 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 2044
- [2] Ou Z Y, Hong C K, Mandel L 1987 *Opt. Commun.* **63** 118
- [3] Nagata T, Okamoto R, O'Brien J L, Sasaki K, Takeuchi S 2007 *Science* **316** 726
- [4] Pan J W, Chen Z B, Lu C Y, Weinfurter H, Zeilinger A, Zukowski M 2012 *Rev. Mod. Phys.* **84** 777
- [5] Carrasco S, Torres J P, Toener L 2004 *Opt. Lett.* **29** 20
- [6] Quan R A, Zhai Y W, Wang M M, Hou F Y, Wang S F, Xiang X, Liu T, Zhang S G, Dong R F 2016 *Sci. Rep.* **6** 30453
- [7] Ma X S, Zotter S, Kofler J, Ursin R, Jennewein T, Brukner C, Zeilinger A 2012 *Nat. Phys.* **8** 6
- [8] Quan R A, Dong R F, Zhai Y W, Hou F Y, Xiang X, Zhou H, Lü C L, Wang Z, You L X, Liu T, Zhang S G 2019 *Opt. Lett.* **44** 3
- [9] Schwarz L, van Enk S J 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 180501
- [10] Jozsa R, Abrams D S, Dowling J P, Williams C P 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2010
- [11] Li Y H, Xu Z H, Wang S, Xu L X, Zhou Z Y, Shi B S 2017 *Acta Phys. Sin.* **68** 120302 (in Chinese) [李银海, 许昭怀, 王双,

- 许立新, 周志远, 史保森 2017 物理学报 **68** 120302]
- [12] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L 2001 *Nature* **412** 417
- [13] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L, Wong F N C 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 117902
- [14] Baek S Y, Cho Y W, Kim Y H 2009 *Opt. Express* **17** 19241
- [15] Grice W P, Walmsley I A 1997 *Phys. Rev. A* **56** 1627
- [16] Kaltenbaek R, Blauensteiner B, Żukowski M, Aspelmeyer M, Zeilinger A 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 240502
- [17] Branning D, Migdall A L, Sergienko A V 2000 *Phys. Rev. A* **62** 063808
- [18] Dauler E, Jaeger G, Muller A, Migdall A 1999 *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **104** 1
- [19] Lyons A, Knee G C, Bolduc E, Roger T, Leach J, Gauger E M, Faccio D 2018 *Sci. Adv.* **4** 5
- [20] Zhai Y W, Dong R F, Li B H, Quan R A, Wang M M, Hou F Y, Liu T, Zhang S G 2017 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **50** 125502
- [21] Yang Y, Xu L P, Giovannetti V 2019 *Sci. Rep.* **9** 1
- [22] Yang Y, Xu L P, Giovannetti V 2019 *Phys. Rev. A* **100** 063810
- [23] Giovannetti V, Maccone L, Shapiro J H, Wong F N C 2002 *Phys. Rev. A* **66** 043813
- [24] Quan R A, Wang M M, Hou F Y, Tai Z Y, Dong R F 2015 *Appl. Phys. B* **118** 431

# Cascaded Hong-Ou-Mandel interference of entangled photon pairs and its application in multiple delay parameters measurement\*

Zhai Yi-Wei<sup>1)2)</sup> Dong Rui-Fang<sup>2)3)†</sup> Quan Run-Ai<sup>2)</sup> Xiang Xiao<sup>2)3)</sup>  
Liu Tao<sup>2)3)</sup> Zhang Shou-Gang<sup>2)3)‡</sup>

1) (*School of Electrical and Control Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China*)

2) (*Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China*)

3) (*School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 11 January 2021; revised manuscript received 2 February 2021 )

## Abstract

The Hong-Ou-Mandel (HOM) interferometer using entangled photon source possesses important applications in quantum precision measurement and relevant areas. In this paper, a simultaneous measurement scheme of multiple independent delay parameters based on a cascaded HOM interferometer is proposed. The cascaded HOM interferometer is composed of  $n$  concatenated 50:50 beam splitters and independent delay parameters  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ . The numbers  $n = 1, 2$  and  $3$  refer to the standard HOM interferometer, the second-cascaded HOM interferometer, and the third-cascaded HOM interferometer, respectively. Through the theoretical study of the cascaded HOM interference effect based on frequency entangled photon pairs, it can be concluded that there is a corresponding relationship between the dip position and the independent delay parameter in the second-order quantum interferogram. In the standard HOM interferometer, there is a dip in the second-order quantum interferogram, which can realize the measurement of delay parameter  $\tau_1$ . In the second-cascaded HOM interferometer, there are two symmetrical dips in the second-order quantum interferogram, which can realize the simultaneous measurement of two independent delay parameters  $\tau_1$  and  $\tau_2$ . By analogy, in the third-cascaded HOM interferometer, there are six symmetrical dips in the second-order quantum interferogram, which can realize the simultaneous measurement of three independent delay parameters  $\tau_1, \tau_2$  and  $\tau_3$ . Therefore, multiple independent delay parameters can be measured simultaneously based on a cascaded HOM interferometer.

In the experiment, the second-cascaded HOM interferometer based on frequency entangled photon source is built. The second-order quantum interferogram of the second-cascaded HOM interferometer is obtained by the coincidence measurement device. Two independent delay parameters  $\tau_1$  and  $\tau_2$  are measured simultaneously by recording the positions of two symmetrical dips, which are in good agreement with the theoretical results. At an averaging time of 3000 s, the measurement accuracy of two delay parameters  $\tau_1$  and  $\tau_2$  can reach 109 and 98 fs, respectively. These results lay a foundation for extending the applications of HOM interferometer in multi-parameter quantum systems.

**Keywords:** Hong-Ou-Mandel interferometer, entangled photon pairs, multiple delay parameters, simultaneous measurement

**PACS:** 03.67.Mn, 85.35.Ds, 42.50.Dv

**DOI:** [10.7498/aps.70.20210071](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210071)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12033007, 61875205, 61801458, 91836301), the Key Research Program of Frontier Sciences, Chinese Academy of Sciences (Grant No. QYZDB-SW-SLH007), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDC07020200), the "Western Young Scholar" Project of CAS (Grant Nos. XAB2019B17, XAB2019B15), the Key R&D Program of Guangdong Province, China (Grant No. 2018B030325001), and the Chinese Academy of Sciences Key Project (Grant No. ZDRW-KT-2019-1-0103).

† Corresponding author. E-mail: [dongruifang@ntsc.ac.cn](mailto:dongruifang@ntsc.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [szhang@ntsc.ac.cn](mailto:szhang@ntsc.ac.cn)