

# 基于频率纠缠双光子和级联 Hong-Ou-Mandel 干涉的量子陀螺仪理论研究\*

翟艺伟<sup>†</sup> 潘展鹏 薛胜春

(陕西科技大学电气与控制工程学院, 西安 710021)

(2025 年 1 月 16 日收到; 2025 年 2 月 20 日收到修改稿)

高时延分辨率的 Hong-Ou-Mandel(HOM) 干涉仪一直是量子精密测量领域的研究热点, 将其应用到量子陀螺仪中可以实现突破经典理论极限的角速度测量. 本文提出了基于频率纠缠双光子和级联 HOM 干涉仪的量子陀螺仪方案. 利用信号光和闲置光之间由于旋转存在的 Sagnac 效应, 将三轴角速度分别引入到级联 HOM 干涉仪中的对应测量臂, 利用级联 HOM 干涉图谱中凹陷位置与多个独立时延差之间的对应关系, 结合干涉可见度与量子 Fisher 信息理论, 得到 3 个独立时延差 ( $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ ) 的最大量子 Fisher 信息分别为 (2, 0.1, 0.006). 通过引入测量不确定度, 得出时延值测量精度可以突破散粒噪声极限, 并结合时延差与旋转角速度的关系, 可实现三轴角速度的测量, 且测量精度可以超越经典光学陀螺仪, 方案可为后续量子陀螺仪在全球导航传感领域的进一步应用提供理论支持.

**关键词:** 级联 Hong-Ou-Mandel 干涉, 频率纠缠双光子, 量子陀螺仪

**PACS:** 85.35.Ds, 06.30.Gv, 03.67.Mn

**DOI:** 10.7498/aps.74.20250077

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250077

## 1 引言

随着光电子技术的飞速发展, 基于 Sagnac 效应的光学陀螺仪因其测量精度高、动态范围广且结构简单等优势自提出来就被广泛应用于导航定位系统中<sup>[1-6]</sup>. 然而, 传统光学陀螺仪具有安全性、稳定性以及最终能够达到的测量精度等方面的问题, 限制了其在全球卫星及空间站导航定位系统中的进一步应用. 因此, 亟待发展高性能的光学陀螺仪, 为导航定位系统中目标空间载体的姿态测量奠定坚实的基础. 根据量子力学理论, 在理想的光子数压缩和频率一致纠缠状态下, 测量脉冲信号传播时延的精度将突破经典光源的散粒噪声极限, 达到量

子力学的海森伯极限<sup>[7-9]</sup>. 频率纠缠光源具有不受引力环境影响的关联特性<sup>[10]</sup>以及非局域色散消除特性<sup>[11,12]</sup>, 将其作为量子陀螺仪的输入光源, 不仅能够提高旋转角速度的测量精度, 而且更适用于深空探测的量子导航定位系统<sup>[13-15]</sup>. 基于此, 以纠缠光源作为光学陀螺仪的输入光源, 并结合光学干涉仪对输出信号进行探测, 可以实现高精度的旋转角速度测量, 对量子陀螺仪在空间定位和导航传感领域的发展应用具有重大意义.

Sagnac 效应是指当两束光在同一闭合环路里相向传输, 在输出端会产生一个与闭合环路旋转角速度正相关的时延信号, 通过测量该时延信号, 可以实现旋转角速度的测量<sup>[16]</sup>. 基于频率纠缠双光子的 Hong-Ou-Mandel (HOM) 干涉仪作为一种超

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12205178) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: zhaiyiwei@sust.edu.cn

高分辨率和低探测噪声的时延测量方案,自提出以来就被广泛应用在量子精密测量、量子层析干涉及量子通信等领域<sup>[17-24]</sup>.利用Sagnac效应可以将旋转角速度引起的时延差引入到HOM干涉仪的测量臂,通过时延差的测量实现角速度的测量.对于标准HOM干涉仪,干涉图谱凹陷(符合计数率最低处)与干涉仪两臂之间的时延差存在唯一对应关系,因此,利用标准HOM干涉图谱仅能估计出单个时延参数,具有一定的局限性,无法满足多参量测量系统的应用需求.基于此,级联HOM干涉仪被提出,通过在标准HOM干涉仪中级联多个50:50分束器,实现HOM干涉图谱凹陷的扩展,且多个凹陷与干涉仪测量臂中多个时延差参数存在对应关系,可以同时估计出多个独立时延参数的值<sup>[25]</sup>.三轴旋转角速度测量作为陀螺仪的核心需求,其测量方式和测量精度直接影响着空间载体姿态信息的准确性.因此,将具有高时延分辨率和多时延参数标定特征的级联HOM干涉仪作为量子陀螺仪的探测方案,可以实现三轴旋转速度的高精度测量.

基于上述研究背景,本文提出了基于频率纠缠双光子和级联HOM干涉仪的量子陀螺仪.首先,构建级联HOM干涉仪,分析干涉图谱的特征参数干涉可见度和干涉半高全宽;其次,根据量子Fisher信息和Cramer-Rao bound理论,对多个独立时延参数的测量精度进行讨论;最后,依据角速度与时延参数的对应关系,实现三轴角速度的高精度测量.

## 2 理论模型

图1(a)所示为频率纠缠双光子源的制备过程,中心波长为788 nm、带宽为3 nm的飞秒脉冲激光经过一个半波片调节其偏振状态,之后入射到长度为2 mm的非线性PPKTP晶体,相互作用满足扩展相位匹配条件,通过自发参量下转换过程制备出偏振正交的频率一致纠缠双光子,输入到偏振分束器中将信号光s和闲置光i分开.同时,利用分色镜(DM)滤除剩余的泵浦光.图1(b)是具有三轴旋转角速度的空间目标,利用Sagnac效应将角速度转换成信号光s和闲置光i到达级联HOM干涉仪中不同50:50分束器(50:50 BS)处的时延差.图1(c)是基于频率纠缠双光子的三级级联HOM干涉装置.标准HOM干涉仪后再级联两个50:50 BS,信号光s和闲置光i经过3个50:50 BS后进入到单光子探测器D1和D2,输出信号利用直接符合测量装置进行二阶量子干涉测量.利用级联HOM干涉仪测量三轴角速度的工作原理如下:频率纠缠双光子的信号光s在级联HOM干涉仪的上测量臂中传输,经过3个50:50 BS后到达D1,由于Sagnac效应的存在,旋转角速度( $\Omega_x$ ,  $\Omega_y$ ,  $\Omega_z$ )分别被转换成测量臂中的时延差( $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ );闲置光i在级联HOM干涉仪的下参考臂中传输,经过3个50:50 BS后到达D2,其中在第1个50:50 BS前的参考臂设置一个可调时延装置,用以扫描上测量臂和下参考臂之间的时延差,从而实现信号光s和闲置光i之间的二阶量子干涉符合测量.

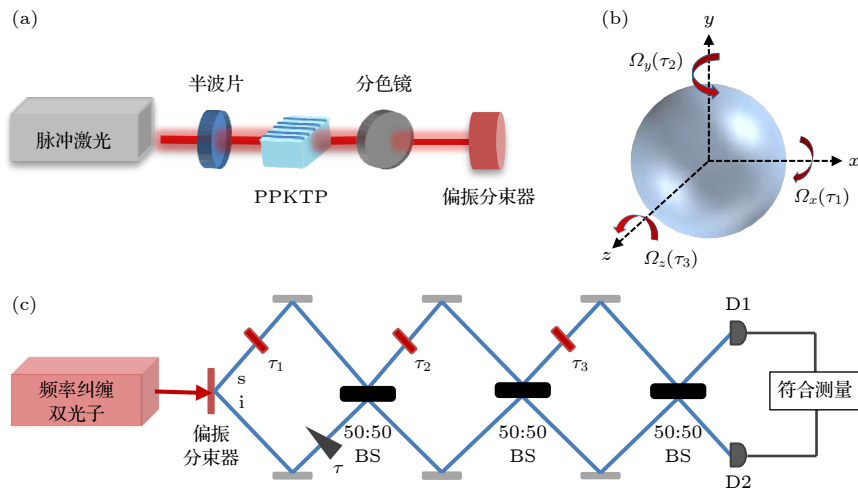


图1 (a) 频率纠缠双光子源; (b) 旋转空间目标; (c) 基于频率纠缠双光子的级联HOM干涉仪原理框图

Fig. 1. (a) Frequency entangled biphoton source; (b) rotation space target; (c) diagram of cascaded HOM interferometer based on frequency entangled biphoton.

标准 HOM 干涉仪中, 信号光  $s$  和闲置光  $i$  分别在测量臂和参考臂中传输, 入射第 1 个 50:50 BS 上进行二阶量子干涉, 利用符合测量装置测得标准 HOM 干涉图谱. 根据 Sagnac 效应理论, 信号光  $s$  和闲置光  $i$  沿着同一光纤环路相向运动, 由于旋转使得它们传输一周的时间不同从而产生一个与角速度成正比的时延差, 可以写为<sup>[26]</sup>

$$\tau_1 = \frac{k4\pi r^2}{c^2} \Omega_x = k\Omega_x, \quad (1)$$

其中,  $r$  是光纤环路的半径,  $k$  是光纤环路的匝数,  $c$  是光速,  $\Omega_x$  是  $x$  轴的旋转角速度.

当光纤环路静止时 (此时  $\tau_1 = 0$ ), 信号光  $s$  和闲置光  $i$  同时到达 50:50 BS, 此时扫描  $\tau$ , 得到一个标准 HOM 干涉图谱, 频率纠缠双光子符合计数率最小值与传输路径中时延差零值之间存在唯一对应关系, 也就是一个凹陷. 当光纤环路存在旋转角速度  $\Omega_x$  时, 信号光  $s$  和闲置光  $i$  之间由于旋转导致的 Sagnac 效应使得测量臂中引入一个时延差  $\tau_1 \neq 0$ , 此时再次扫描  $\tau$ , 得到的标准 HOM 干涉图谱中的凹陷发生了偏移, 根据 Mandel 干涉, 此时频率纠缠双光子的符合计数率可以表达为

$$P_{\text{HOM}}(\tau) \propto \int \frac{d\omega_s}{2\pi} \int \frac{d\omega_i}{2\pi} \{ |A(\omega_s, \omega_i)|^2 - A(\omega_s, \omega_i) \times A(\omega_i, \omega_s) \cos[(\omega_s - \omega_i)(\tau - k\Omega_x)] \}, \quad (2)$$

其中,  $A(\omega_s, \omega_i)$  和  $A(\omega_i, \omega_s)$  是纠缠双光子的频谱函数. 通过测量标准 HOM 干涉图谱凹陷的时延偏移值, 则可得到角速度  $\Omega_x$ .

级联 HOM 干涉仪中, 信号光  $s$  和闲置光  $i$  分别在测量臂和参考臂中传输, 经过两个 50:50 BS 后入射第 3 个 50:50 BS 上进行二阶量子干涉. 当光纤环路存在三轴角速度 ( $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ ) 时, 信号光  $s$  和闲置光  $i$  经过不同的 50:50 BS, 由于旋转导致的 Sagnac 效应将三轴角速度引起的时延差 ( $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ ) 分别引入到相应的测量臂中, 通过扫描  $\tau$ , 得到级联 HOM 干涉图谱, 此时频率纠缠双光子的符合计数率可以表达为<sup>[27]</sup>

$$P_{t\text{-HOM}}(\tau) \propto \int \frac{d\omega_s}{2\pi} \int \frac{d\omega_i}{2\pi} \left( |A(\omega_s, \omega_i)|^2 - \frac{1}{8} A(\omega_s, \omega_i) A(\omega_i, \omega_s) \times \cos[(\omega_s - \omega_i)(\tau - k\Omega_x)] \cos[(\omega_s - \omega_i)k\Omega_y] \times \{-2 - \cos[(\omega_s - \omega_i)k\Omega_z]\} \right). \quad (3)$$

扫描可调时延装置  $\tau$ , 得到级联 HOM 干涉图谱, 其中存在 3 组对称凹陷, 且与三轴角速度成对应关系, 通过分别测量凹陷位置处的时延值, 就可以得到三轴角速度.

量子度量学中, 量子 Fisher 信息通过分析估计参数中所包含信息的大小给定了量子测量精度极限. 量子 Fisher 信息越大, 则参数测量精度越高<sup>[28,29]</sup>. 因此, 为了分析 HOM 干涉仪中时延差的测量精度极限, 定义时延参数的量子 Fisher 信息为<sup>[17]</sup>

$$F = \frac{1}{\sigma^2} \frac{2\alpha^2 \tau^2 e^{-2\tau^2/\sigma^2}}{(1 - \alpha e^{-\tau^2/\sigma^2})^2} - \frac{1}{2} (1 - \alpha e^{-\tau^2/\sigma^2})^2, \quad (4)$$

其中,  $\alpha$  和  $\sigma$  分别是 HOM 干涉图谱凹陷的可见度和半高全宽,  $\gamma$  是光子损耗率.

根据 Cramer-Rao bound 和最大似然估计理论可知, 时延值  $\tau$  的测量极限估计值可表示为<sup>[30,31]</sup>

$$\text{Var}(\tilde{\tau}) \geq \frac{1}{NF}, \quad (5)$$

其中,  $\tilde{\tau}$  表示时延值  $\tau$  的估计量,  $N$  是实验重复测量的次数. 因此, 当  $N$  无穷大时, 时延值测量偏差为 0.  $F$  值越大, 则时延值  $\tau$  所能达到的测量精度越高.

假设时延值不确定度可以表示为

$$\xi = \frac{\Delta \tilde{\tau}_{\min}}{\Delta \tau_{\text{SNL}}}, \quad (6)$$

当  $\xi < 1$  时, 证明时延值测量精度可超越散粒噪声极限 (shot-noise limit, SNL), 即可实现角速度的高精度测量.

### 3 结果及分析

根据 (2) 式和 (3) 式, 得出标准 HOM 干涉仪和级联 HOM 干涉仪的二阶量子干涉图谱, 如图 2 所示. 图 2(a) 是标准 HOM 干涉图谱, 存在一个凹陷, 干涉可见度  $\alpha$  为 1, 干涉半高全宽  $\sigma$  为 0.3 ps. 图 2(b) 中, 通过假定  $\tau_2 = 5$  ps 和  $\tau_3 = 10$  ps, 得到级联 HOM 干涉仪的二阶量子干涉图谱, 可以看出存在 3 组对称凹陷, 其对应的时延值分别为 ( $\pm(\tau_3 + \tau_2)$ ,  $\pm\tau_2$ ,  $\pm(\tau_3 - \tau_2)$ ), 相应的干涉可见度  $\alpha$  分别为 (0.06, 0.25, 0.06), 干涉半高全宽  $\sigma$  保持不变, 都为 0.3 ps. 同时, 对称凹陷中间点时延值对应的是第 1 个 50:50 BS 两臂平衡时的时延差,

也就是时延值  $\tau_1$ . 因此, 基于级联 HOM 干涉仪的二阶量子干涉图谱, 可以实现 3 个独立时延差 ( $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ ) 的测量. 同时, 基于相位测量方法的光学陀螺仪方案中由于相位包裹问题的存在, 动态测量范围受限于光源波长的一半, 而基于 HOM 干涉时延测量方法的量子陀螺仪方案可以避免相位包裹问题, 动态测量范围取决于 HOM 干涉半高全宽的一半, 在相同光源条件下, 动态测量范围可提高约 1000 倍.

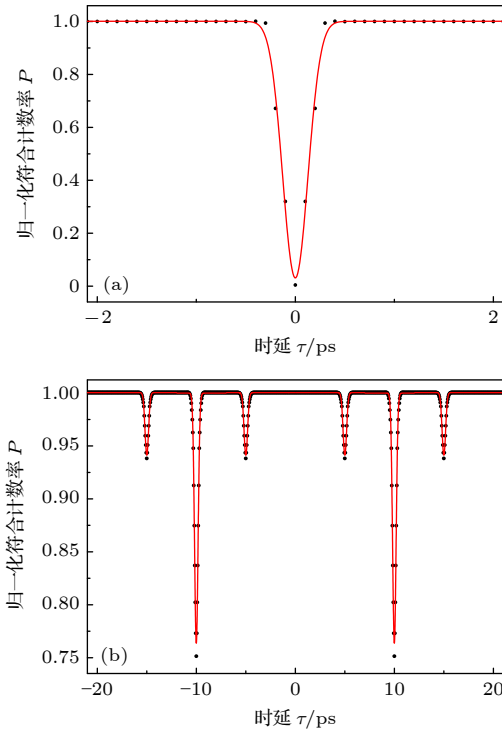


图 2 (a) 频率纠缠双光子的标准 HOM 干涉图谱; (b) 级联 HOM 干涉图谱  
Fig. 2. (a) Standard HOM interferogram of frequency entangled biphoton; (b) the cascaded HOM interferogram.

根据 (4) 式, 当干涉半高全宽  $\sigma = 0.3 \text{ ps}$ , 光子损耗率  $\gamma = 0$  时, 可以得到不同干涉可见度  $\alpha$  下量子 Fisher 信息  $F$  随时延  $\tau$  的变化, 如图 3 所示. 可以看出, 干涉可见度  $\alpha = 1$  时, 时延差  $\tau_1$  的最大量子 Fisher 信息  $F$  接近于 2; 干涉可见度  $\alpha = 0.25$  时, 时延差  $\tau_2$  的最大量子 Fisher 信息  $F$  为 0.1; 干涉可见度  $\alpha = 0.06$  时, 时延差  $\tau_3$  的最大量子 Fisher 信息  $F$  为 0.006. 由于 HOM 干涉可见度的降低导致时延值的量子 Fisher 信息较小, 后续可以通过使用不同的纠缠光源作为量子陀螺仪的输入, 比如高纠缠态以及多模态等 [32,33], 进一步增加量子 Fisher 信息, 从而获得更高的时延值测量精度.

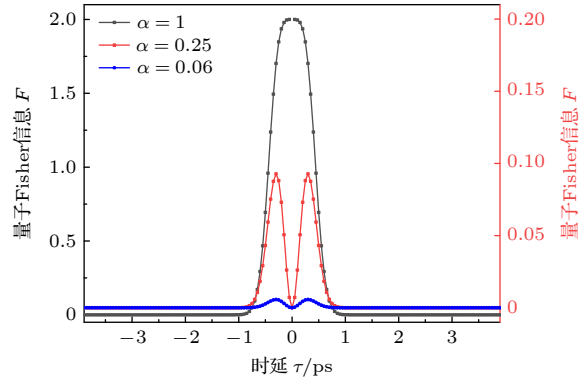


图 3  $\sigma = 0.3 \text{ ps}$  时, 不同干涉可见度  $\alpha$  值下  $F$  随  $\tau$  的变化  
Fig. 3. Variation of quantum Fisher information  $F$  with time delay  $\tau$  in different interference visibility  $\alpha$  at  $\sigma = 0.3 \text{ ps}$ .

为便于直观比较, 根据 (6) 式, 假设是单次测量 ( $N = 1$ ), 对基于级联 HOM 干涉的时延测量方案与经典方案理论极限作比较, 如图 4 所示. 当 HOM 干涉可见度  $\alpha$  为 1 时, 参数  $\xi$  最小值为 0.707, 则时延差  $\tau_1$  的测量精度在  $0.9 \text{ ps}$  测量范围内超越散粒噪声极限 SNL. 当 HOM 干涉可见度  $\alpha$  为 0.25 和 0.06 时, 参数  $\xi$  最小值分别为 3.2 和 13.19, 此时时延差  $\tau_2$  和时延差  $\tau_3$  未能超越散粒噪声极限, 之后可以通过改变输入光源特性增加时延值的量子 Fisher 信息值来提高测量精度极限.

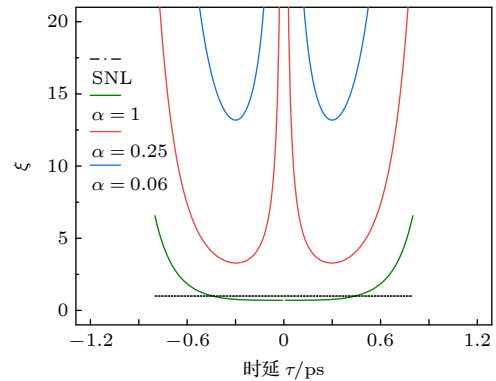


图 4 不确定度  $\xi$  随时延  $\tau$  的变化  
Fig. 4. Variation of uncertainty  $\xi$  with time delay  $\tau$ .

基于频率纠缠双光子和级联 HOM 干涉的量子陀螺仪, 可以通过单个干涉仪实现三轴角速度的高精度测量, 降低整体测量系统的复杂性并优化其集成度, 且具有较宽的动态测量范围. 虽然目前方案的整体测量精度仍未超越经典测量极限, 但是在后续的研究中, 将通过优化输入态纠缠特性和改进光学干涉仪结构等方法进一步提高三轴角速度的测量精度, 可以提高空间载体信息的准确性, 为导

航传感系统提供一定的支持.

## 4 结 论

本文利用级联 HOM 干涉仪的高时延分辨率和多时延测量特征, 提出了三轴角速度测量的量子陀螺仪方案. 以频率纠缠双光子作为级联 HOM 干涉仪的输入光源, 利用 Sagnac 效应将三轴角速度存在所产生的时延差引入到干涉仪相应的测量臂, 分析级联 HOM 干涉图谱中多组对称凹陷的干涉可见度和干涉半高全宽, 并结合量子 Fisher 信息, 得到 3 个独立时延差  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  和  $\tau_3$  的最大量子 Fisher 信息值. 利用量子 Fisher 信息随时延的变化, 分析 3 个独立时延差的不确定度, 证明测量精度可以超越散粒噪声极限. 同时, 根据时延差与角速度的关系, 可以验证基于频率纠缠双光子和级联 HOM 干涉的量子陀螺仪方案可行性, 为量子传感导航和量子精密测量的进一步发展提供理论基础.

## 参考文献

- [1] Toland J R E, Search C P 2013 *Appl. Phys. B* **114** 333
- [2] Aghaie K Z, Digonnet M J F 2015 *J. Opt. Soc. Am. B* **32** 339
- [3] Chen K, Chen S X, Wu D W, Yang C Y, Wu H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 054203 (in Chinese) [陈坤, 陈树新, 吴德伟, 杨春燕, 吴昊 2016 物理学报 **65** 054203]
- [4] Lefèvre H C 2014 *C. R. Physique* **15** 851
- [5] Sultana J 2014 *Gen. Relat. Gravit.* **46** 1710
- [6] Courtney T L, Park S D, Hill R J, Cho B, Jonas D M 2014 *Opt. Lett.* **39** 513
- [7] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L 2001 *Nature* **412** 417
- [8] Dowling J P 2008 *Contemp. Phys.* **49** 125
- [9] Kura N, Ueda M 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 010507
- [10] Fink M, Rodriguez-Aramendia A, Handsteiner J, Ziarkash A, Steinlechner F, Scheidl T, Fuentes I, Pienaar J, Ralph T C, Ursin R 2016 *Nat. Commun.* **8** 15304
- [11] O'Donnell K A 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 063601
- [12] Baek S Y, Cho Y W, Kim Y H 2009 *Opt. Express* **17** 19241
- [13] Kolkiran A, Agarwal G S 2007 *Opt. Express* **15** 6798
- [14] Fink M, Steinlechner F, Handsteiner J, Dowling J P, Scheidl T, Ursin R 2019 *New J. Phys.* **21** 053010
- [15] Silvestri R, Yu H C, Stromeberg T, Hilweg C, Peterson R W, Walther P 2024 *Sci. Adv.* **10** 0215
- [16] Scully M O, Zubairy M S 1997 *Quantum Optics* (Cambridge University Press) pp271–290
- [17] Lyons A, Knee G C, Bolduc E, Thomas R, Leach J, Gauger E M, Faccio D 2018 *Sci. Adv.* **4** 9416
- [18] Chen Y Y, Fink M, Steinlechner F, Torres J P, Ursin R 2019 *npj Quantum Inform.* **5** 43
- [19] Valencia A, Scarcelli G, Shih Y H 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 2655
- [20] Xu Y K, Sun S H, Zeng Y Y, Yang J G, Sheng W D, Liu W T 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 214207 (in Chinese) [徐耀坤, 孙仕海, 曾瑶源, 杨俊刚, 盛卫东, 刘伟涛 2023 物理学报 **72** 214207]
- [21] Luo Y Z, Ma L J, Sun M S, Wu S R, Qiu L H, Wang H, Wang Q 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 240302 (in Chinese) [罗一振, 马洛嘉, 孙铭烁, 吴思睿, 邱丽华, 王禾, 王琴 2024 物理学报 **73** 240302]
- [22] Liu R, Kong L J, Wang Z X, Si Y, Qi W R, Huang S Y, Tu C H, Li Y N, Wang H T 2018 *Chin. Phys. Lett.* **35** 090303
- [23] Ma L J, Sun M S, Zhang C H, Ding H J, Zhou X Y, Li J, Wang Q 2025 *Chin. Phys. B* **34** 010301
- [24] Gao W L, Xu L P, Zhang H, Yan B, Li P X, Hu G T 2023 *Chin. Phys. B* **32** 050304
- [25] Yang Y, Xu L P, Giovannetti V 2019 *Phys. Rev. A* **100** 063810
- [26] Post E J 1967 *Rev. Mod. Phys.* **39** 475
- [27] Zhai Y W, Dong R F, Quan R A, Xiang X, Liu T, Zhang S G 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 120302 (in Chinese) [翟艺伟, 董瑞芳, 权润爱, 项晓, 刘涛, 张首刚 2021 物理学报 **70** 120302]
- [28] Braunstein S L, Caves C M 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 3439
- [29] Ren Z H, Li Y, Li Y N, Li W D 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 040601 (in Chinese) [任志红, 李岩, 李艳娜, 李卫东 2019 物理学报 **68** 040601]
- [30] Zwierz M, Pérez-Delgado C A, Kok P 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 180402
- [31] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 010401
- [32] Guo Y, Yang Z X, Zeng Z Q, Ding C L, Shimizu R, Jin R B 2023 *Opt. Express* **31** 32849
- [33] Kok P, Dunningham J, Ralph J F 2017 *Phys. Rev. A* **95** 012326

# Theoretical research on quantum gyroscope based on frequency entangled biphoton and cascaded Hong-Ou-Mandel interference<sup>\*</sup>

ZHAI Yiwei<sup>†</sup> PAN Zhanpeng XUE Shengchun

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

( Received 16 January 2025; revised manuscript received 20 February 2025 )

## Abstract

The optical gyroscope for measuring the attitude information of spatial carriers, has emerged as a research hotspot in inertial navigation system. Real-time measurement of rotation angular velocity is crucial for obtaining accurate attitude information. However, the measurement accuracy of traditional optical gyroscope is limited by the short noise limit (SNL), which restricts its further applications. Existing research indicates that the quantum technology is needed to address the measurement limitations of traditional optical gyroscopes. A triaxial rotation angular velocity measurement scheme based on frequency entangled biphoton and cascaded Hong-Ou-Mandel (HOM) interference is proposed in this study. By using the Sagnac effect induced by the rotation between signal and idler photons, the triaxial angular velocity is introduced into the corresponding measurement arm of a cascaded HOM interferometer. The cascaded HOM interferogram is obtained using a coincidence measurement device, and the relationship between the symmetric dip position and the three independent time delay difference is analyzed. The characteristic parameters of HOM interferogram, including a half-height full width (FWHM) of 0.3 ps and visibilities of 1, 0.25 and 0.06, respectively, are obtained. According to quantum Fisher information theory, the maximum quantum Fisher information values of the three independent time delay differences ( $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ ) are calculated to be 1, 0.1, and 0.006, respectively. Furthermore, by incorporating measurement uncertainty, it is demonstrated that the accuracy of the time delay measurement can exceed the SNL. Combined with the relationship between time delay and angular velocity, the results show that the angular velocity measurement accuracy exceeds that of classical optical gyroscopes. Therefore, this scheme provides a theoretical foundation for further applying quantum gyroscopes to global navigation sensing and precision measurement systems.

**Keywords:** cascaded Hong-Ou-Mandel interference, frequency entangled biphoton, quantum gyroscope

**PACS:** 85.35.Ds, 06.30.Gv, 03.67.Mn

**DOI:** [10.7498/aps.74.20250077](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250077)

**CSTR:** [32037.14.aps.74.20250077](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250077)

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12205178).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zhaiyiwei@sust.edu.cn](mailto:zhaiyiwei@sust.edu.cn)

## 基于频率纠缠双光子和级联Hong-Ou-Mandel干涉的量子陀螺仪理论研究

翟艺伟 潘展鹏 薛胜春

### Theoretical research on quantum gyroscope based on frequency entangled biphoton and cascaded Hong-Ou-Mandel interference

ZHAI Yiwei PAN Zhanpeng XUE Shengchun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 098501 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250077

CSTR: 32037.14.aps.74.20250077

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250077>

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

基于SSA-BP网络模型的Hong-Ou-Mandel干涉时延测量研究及其在量子陀螺仪中的应用

SSA-BP network model based Hong-Ou-Mandel interference delay measurement and its application in quantum gyroscope

物理学报. 2023, 72(13): 138503 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230283>

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

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

物理学报. 2021, 70(12): 120302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210071>

强聚焦泵浦产生纠缠光子的Hong-Ou-Mandel干涉

Hong-Ou-Mandel interference of entangled photons generated under pump-tight-focusing condition

物理学报. 2022, 71(5): 054201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211783>

基于双光子干涉的量子全息理论框架

General theory of quantum holography based on two-photon Interference

物理学报. 2023, 72(21): 214207 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231242>

基于监控标记单光子源的量子密钥分发协议

Source monitoring quantum key distribution protocol based on heralded single photon source

物理学报. 2024, 73(24): 240302 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241269>

795 nm高温高功率垂直腔面发射激光器及原子陀螺仪应用

795-nm high-temperature and high-power operating vertical-cavity surface-emitting laser and application in atomic gyroscope

物理学报. 2022, 71(13): 134204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212422>