



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

翟艺伟 李旺

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

Zhai Yi-Wei Li Wang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 138503 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230283

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230283>

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

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>

基于置换群的多粒子环上量子行走的反馈搜索算法

Feedback search algorithm for multi-particle quantum walks over a ring based on permutation groups

物理学报. 2022, 71(3): 030201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211000>

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>

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>

基于线性与非线性干涉仪的量子精密测量研究进展

Research progress in quantum precision measurements based on linear and nonlinear interferometers

物理学报. 2022, 71(13): 130701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220425>

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*

翟艺伟[†] 李旺

(陕西科技大学电气与控制工程学院, 西安 710021)

(2023 年 2 月 27 日收到; 2023 年 4 月 19 日收到修改稿)

作为航空航天导航系统的重要器件, 高灵敏度的光学陀螺仪一直是国内外科研工作者的研究重点. 经典光学陀螺仪因真空零点波动使其灵敏度受到散粒噪声极限的制约, 无法满足日益发展的量子导航需求. 本文提出了基于频率纠缠源及 Hong-Ou-Mandel (HOM) 干涉的量子陀螺仪方案, 利用 SSA-BP 神经网络模型模拟不同的泵浦光和非线性晶体参数, 以预测 HOM 干涉图谱的特性参量干涉可见度及干涉宽度. 结合量子 Fisher 信息理论, 获得时延差的最大量子 Fisher 信息可达 1.999, 计算得出时延差的不确定度与散粒噪声极限的最小比值为 0.707, 并依据量子陀螺仪时延差与旋转角速度的关系, 验证出旋转角速度的测量灵敏度较经典光学陀螺仪提高了 2 个数量级. 证明上述方案可以实现超越散粒噪声极限的测量灵敏度, 能为后续量子陀螺仪的实验验证提供理论支持.

关键词: Hong-Ou-Mandel 干涉, 时延测量, 量子陀螺仪, 麻雀搜索算法

PACS: 85.35.Ds, 06.30.Gv, 87.85.dq

DOI: 10.7498/aps.72.20230283

1 引言

以 Sagnac 效应为核心的光学陀螺仪自提出以来就被广泛应用在导航惯导系统, 是基础科研、空间技术和国防建设的重要技术支撑. Sagnac 效应是指当两束光在同一环路里相向传输, 在输出端会产生一个与环路旋转速度正相关的时延差或相位差信号^[1]. 因此, 实现 Sagnac 效应输出测量精度是提高光学陀螺仪性能的重要途径. 经典光学陀螺仪以激光光源作为 Sagnac 效应的输入光源, 在理论上其输出灵敏度会受限于散粒噪声极限, 限制了其进一步应用^[2]. 随着量子信息技术的快速发展, 利用量子光源及量子探测方案实现高性能光学陀螺仪得到了国内外科研工作者的广泛研究^[3-7], 验证了量子陀螺仪灵敏度可突破散粒噪声极限甚至达

到海森伯极限^[8-15], 对导航系统发展具有重大意义.

基于频率纠缠光源的 Hong-Ou-Mandel (HOM) 干涉过程是一种高时延分辨率、低探测噪声及可扩展性强的时延测量方案, 将其作为 Sagnac 效应的探测方案, 能够进行高精度的时延测量, 从而实现高灵敏度的旋转角速度测量. 最小旋转角速度的探测极限取决于时延差的测量精度极限, 通过量子 Fisher 信息及 Cramer-Rao bound 理论可知, 时延差的估计精度依赖于量子 Fisher 信息, 而 HOM 干涉图谱的两个特性参数干涉可见度 α 和干涉宽度 σ 决定了量子 Fisher 信息的大小, 从而最终决定时延差的测量精度极限. 因此, 高效调控上述两个特性参数获得最大量子 Fisher 信息是实现高精度时延差测量的关键. 然而, 通过基于频率纠缠光源的 HOM 干涉实验获得上述两个特性参数耗时较长、效率低下, 并不能满足提取大量 α 与 σ 值的要

* 国家自然科学基金 (批准号: 12205178) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zhaiyiwei@sust.edu.cn

求. 基于此, 构建高精度、高效率的数据预测模型是解决上述问题最基本的手段.

近年来, 随着神经网络技术的发展, 将其应用在量子信息及量子精密测量^[16,17]等领域得到了科研人员广泛的关注. 麻雀搜索算法优化 BP (SSA-BP) 神经网络是一种按照误差逆向传播算法的多层前馈神经网络, 研究表明, 相较于传统的 BP 网络, SSA-BP 将 SSA 与 BP 网络相结合, 优化了 BP 网络的权值与阈值, 增强了传统 BP 网络的预测精度^[18,19]. 因此, 利用 SSA-BP 网络预测 α 与 σ 值是解决上述难题可行的一种方式.

基于上述研究背景, 本文提出利用 SSA-BP 模型模拟基于频率纠缠源及 HOM 干涉实验并获得高灵敏度的量子陀螺仪的方案. 首先, 构建非线性晶体长度、泵浦光带宽与 α 和 σ 之间的高精度 SSA-BP 网络. 其次, 运用高精度 SSA-BP 模型预测大量 α 与 σ 值并结合时延差 τ 的变化研究量子 Fisher 信息. 最后, 运用所得量子 Fisher 信息及 Cramer-Rao bound 理论, 选择合理的特性参数使时延测量精度超过散粒噪声极限, 从而进一步提高量子陀螺仪的灵敏度.

2 理论基础

图 1 是基于频率纠缠光源与 HOM 干涉的量子陀螺仪原理框图, 其工作原理如下. 飞秒脉冲泵浦光源经过非线性周期极化磷酸氧钛钾 (periodically poled KTP, PPKTP) 晶体, 在满足扩展相位匹配条件 (extended phase matching condition, EPM)^[20] 下, 通过自发参量下转换过程制备频率纠缠光源, 偏振正交的信号光 s 和闲置光 i 通过半透半反镜分开, 并分别耦合到 Sagnac 光纤环中相向传输, 最终光源输出到 HOM 干涉仪进行 HOM 干涉过程.

当 Sagnac 光纤环静止时, 信号光 s 与闲置光 i 同时到达 HOM 干涉仪, 得到纠缠光源符合计数率随时延差 τ 的变化图像, 即 HOM 干涉图谱. 根据 HOM 图谱可得到特性参数 α 和 σ , 由 Mandel 公式可知, 基于 HOM 干涉的频率纠缠光源符合计数率定义为^[21,22]

$$P(\tau) \propto \iint d\omega_s d\omega_i \{ |A(\omega_s, \omega_i)|^2 - |A(\omega_s, \omega_i)A(\omega_i, \omega_s)| \cos [(\omega_s - \omega_i) \tau] \}, \quad (1)$$

式中, $A(\omega_s, \omega_i)$ 与 $A(\omega_i, \omega_s)$ 是联合频谱振幅函数, ω_s 和 ω_i 分别是信号光和闲置光的频率. 当时延差 $\tau = 0$ 时, 得到最小的符合计数率 $P(\tau) = N_1$, 随着时延差 τ 值逐渐偏离平衡点, 纠缠光源的符合计数率逐渐增大, 当超出纠缠光源的相干长度后, 符合计数率不再增加且 $P(\tau) = N_2$, 此时的 HOM 干涉图谱见图 2.

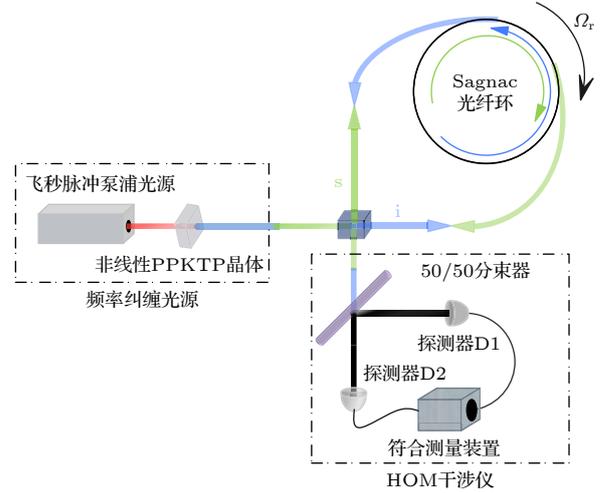


图 1 基于频率纠缠光源与 HOM 干涉的量子陀螺仪原理框图

Fig. 1. Principle block diagram of quantum gyroscope based on frequency entangled light source and HOM interference.

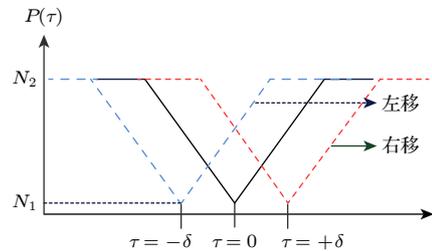


图 2 HOM 干涉图谱

Fig. 2. HOM interferogram.

若 Sagnac 光纤环存在旋转角速度 Ω_r , 信号光 s 与闲置光 i 到达 HOM 干涉仪的时间便不同, 由此产生的时延差 τ 信息便转变成了 HOM 干涉图谱凹陷位置的时延偏置信号, 当时延差偏置信号的偏置量为 δ 时, 将纠缠光源符合计数率定义为

$$P(\tau) \propto \iint d\omega_s d\omega_i \{ |A(\omega_s, \omega_i)|^2 - |A(\omega_s, \omega_i)A(\omega_i, \omega_s)| \times \cos [(\omega_s - \omega_i) (\tau \pm \delta)] \}. \quad (2)$$

由 (2) 式可知, 当存在时延偏置量 δ 时, $\tau = \mp \delta$

可使 $P(\tau)$ 得到最小值 N_1 . 同时, 设定时延差 $\tau = \tau_s - \tau_i$, τ_s 和 τ_i 分别为信号光 s 和闲置光 i 在 Sagnac 光纤环旋转一周所需的时间. 当 Sagnac 光纤环顺时针旋转时, $\tau > 0$; 反之, Sagnac 光纤环逆时针旋转时, $\tau < 0$. 结合 (2) 式可知, Sagnac 光纤环逆时针旋转时产生时延差 $\tau = -\delta$ 使 $P(\tau)$ 得到最小值 N_1 , 此时的 HOM 干涉图谱左移, Sagnac 光纤环顺时针旋转时产生时延差 $\tau = +\delta$ 使 $P(\tau)$ 得到最小值 N_1 , HOM 干涉图谱右移. 因此, 通过时延差 τ 的正负以及 HOM 干涉图谱的左右偏移状况可以判断出 Sagnac 光纤环的旋转方向.

综合上述理论, 在光学陀螺仪的研究中, 灵敏度的探测极限是获得能测量到的最小旋转角速度, 这是衡量光学陀螺仪性能的重要指标. 根据 Sagnac 原理, 当 Sagnac 光纤环以旋转角速度 Ω_r 旋转时, 所探测到的时延差 τ 值与 Ω_r 之间的关系为^[23]

$$\tau = \frac{4\pi R^2 K \Omega_r}{c^2}, \quad (3)$$

其中, c 为频率纠缠光源在光纤环中的传播速度, R 为 Sagnac 光纤环的半径, K 为光纤环的匝数. 由 (3) 式可知, 在 R 和 K 已知且保持不变的情况下, 通过测量时延差 τ 值就可以直接得到旋转角速度 Ω_r , 旋转角速度 Ω_r 的灵敏度取决于时延差 τ 的测量精度.

在量子度量学中, 量子 Fisher 信息^[24–26] 是用来度量含参变量中所包含的参数信息量的多少, 量子 Fisher 信息越大, 其蕴含该参数的信息量就越多. 当纠缠光源的损耗率为 0 时 (理想状况下), 基于 HOM 干涉测量实验的量子 Fisher 信息定义为^[27]

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

式中, F 为从特定实验中提取的关于 τ 的信息量, 其表征度量时延差 τ 值信息量的大小. HOM 干涉可见度 α , 干涉宽度 σ 及 τ 值共同影响 F 的取值, $\tau = 0$ 是 F 未定义的一个点. 与此同时, 根据 Cramer-Rao bound 理论^[28–30], F 决定着对时延差 τ 值精度估计的下限, 时延差 τ 的测量精度极限估计值表示为

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

其中, $\hat{\tau}$ 表示对 τ 的估计值, $\text{Var}(\hat{\tau})$ 表示对 τ 值估

计的方差. 时延测量不确定度^[31] 的极限估计范围为 $\Delta(\hat{\tau}) \geq 1/\sqrt{NF}$, 时延测量不确定度的最小值 $\Delta(\hat{\tau})_{\min} = 1/\sqrt{NF}$, N 为实验测量的次数. 由 (5) 式可知, F 值决定 τ 值估计的方差下界及不确定度下界, F 越大, 时延测量精度越高. 此外, 由于 F 的大小与 N 无关, 可由 Cramer-Rao bound 理论得到测量的散粒噪声极限^[32,33]:

$$\tau_{\text{SNL}} = \frac{1}{\sqrt{N}}. \quad (6)$$

随后, 为了在相同 N 的条件下分析时延测量精度的变化状况, 设:

$$\xi = \frac{\Delta(\hat{\tau})_{\min}}{\tau_{\text{SNL}}}. \quad (7)$$

ξ 值越小, 时延测量精度越高, 当 $\xi < 1$ 时, 证明此时的 F 使时延测量精度可超越散粒噪声极限.

基于以上理论分析, 为了提高量子陀螺仪的灵敏度. 本文需要具体完成以下三步: 1) 构建非线性晶体长度、泵浦光带宽与 α 和 σ 之间的 SSA-BP 模型, 检验其预测 α 和 σ 值的性能. 2) 利用 SSA-BP 网络预测大量的 α 和 σ 值, 并结合 τ 值研究与 F 的关系, 寻找 F 的最大值. 3) 通过 Cramer-Rao bound 理论分析 ξ 的变化图像, 使时延差 τ 的测量精度超过散粒噪声极限, 提高量子陀螺仪的灵敏度.

3 SSA-BP 网络模型建立

在对 HOM 特性参数 α 和 σ 的研究中, 泵浦光源带宽 W 和非线性晶体长度 L 是影响其大小的重要参数. 本文设定泵浦光的中心波长为 792 nm, 非线性 PPKTP 晶体的极化周期为 46.146 μm , 使其晶体温度保持在 25 $^\circ\text{C}$, 满足自发参量下转换过程的 EPM 条件, 产生了中心波长为 1584 nm 的频率纠缠光源, 在此条件下, 通过改变 W 和 L 得到 HOM 特性参数 α 和 σ . L 的大小影响着自发参量下转换效率, 当 L 较短时, 自发参量下转换过程的转换效率较低, 纠缠光子的产生率有限, 而 L 太长会导致参量下转换产生的光子不再具有频率纠缠特性^[20], 基于上述状况, 设定合理的 L 实验取值范围为 5—40 mm. 另一方面, W 的取值范围会影响到频率纠缠光源纠缠度的大小, 甚至会导致双光子态不再是频率纠缠光源^[34–36], 于是定义其实验取值范围为 4—80 nm. 基于以上实验参数设定, 通过图 1 的实验过程改变 W 和 L 获取 α 和 σ .

然而, 由于上述实验难度较高、实验流程复杂, 且获取 HOM 特性参数效率低下, 在短时间内很难提取大量 α 与 σ 值从而研究其与 F 的关系. 基于此, 提出建立 SSA-BP 网络用以预测 HOM 特性参数, 以此提高获取 α 与 σ 值的效率. 用于训练 SSA-BP 网络的训练数据来自于上述图 1 的实验过程. SSA-BP 网络建立步骤如下.

1) 对训练输入数据、输出数据归一化.

2) 确定 SSA-BP 神经网络的结构. 本文 SSA-BP 网络模型要构建 L 和 W 与 σ 和 α 之间的关系, 输入层神经元 $m = 2$, 输出层神经元 $n = 2$. 据 Kolmogorov 定理可知, 隐含层神经元个数的预估公式为 $p = 2m + 1$, 所以网络的拓扑结构设计为 2-5-2, 如图 3 所示.

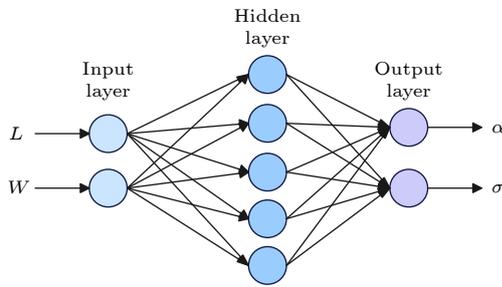


图 3 SSA-BP 神经网络拓扑结构
Fig. 3. SSA-BP neural network topology.

3) 定义 SSA 参数. 确定 SSA 的最大迭代数 (max-gen) 为 20, 种群 (sizepop) 数为 10. 确定 SSA 算法中发现者的比例占麻雀总数的 20%, 其余为加入者. 定义安全值 $ST = 0.8$, 并设置麻雀中预警值和预警者数量.

4) 定义种群中的每个麻雀个体为 SSA-BP 神经网络中的权值与阈值, 并定义适应度函数.

5) 依据 SSA 算法更新规则 [18], 对麻雀进行位置更新, 寻找最佳适应度.

6) 得到 SSA 寻优过后 BP 网络的权值和阈值, 并利用最优参数及训练数据训练 SSA-BP 网络, 检验网络预测 σ 和 α 的精度.

基于以上步骤, 采用基于频率纠缠光源的 HOM 干涉实验所得的 10^4 组数据训练 SSA-BP 网络, 另取 100 组数据作为验证数据集分析神经网络模型的性能. 为了突出 SSA-BP 网络优异的预测能力, 设置相同的训练数据集、验证数据集和实验参数, 将其与传统的 BP 网络、GA-BP 网络 (遗传算法优化 BP 网络) 及 PSO-BP 网络 (粒子群算法优化 BP) 进行对比. 对于不同算法专属的特性参数, 按照原始算法的参数大小设定. 利用以上 4 种网络分别对验证数据集的 α 和 σ 值各预测 20 次, 求出各网络的预测平均值, 定义 E 为预测平均值与实验值差的绝对值, 不同 BP 网络预测 100 组验证数据集误差 E 的变化见图 4. 根据上述 4 种网络所预测的 20 次的 α 和 σ 值, 计算相同次数的平均绝对误差 (MAE)、均方误差 (MSE) 和平均绝对百分比误差 (MAPE), 并作其平均值用于衡量不同 BP 网络的预测性能. 此外, 统计相同次数建模时间的平均值 T 用于衡量网络的建模速度, 上述各项指标数据见表 1.

由图 4(a), (b) 可知, SSA-BP 的 E 值几乎在 100 组数据集上均为最小值, 即使在个别数据点处发生

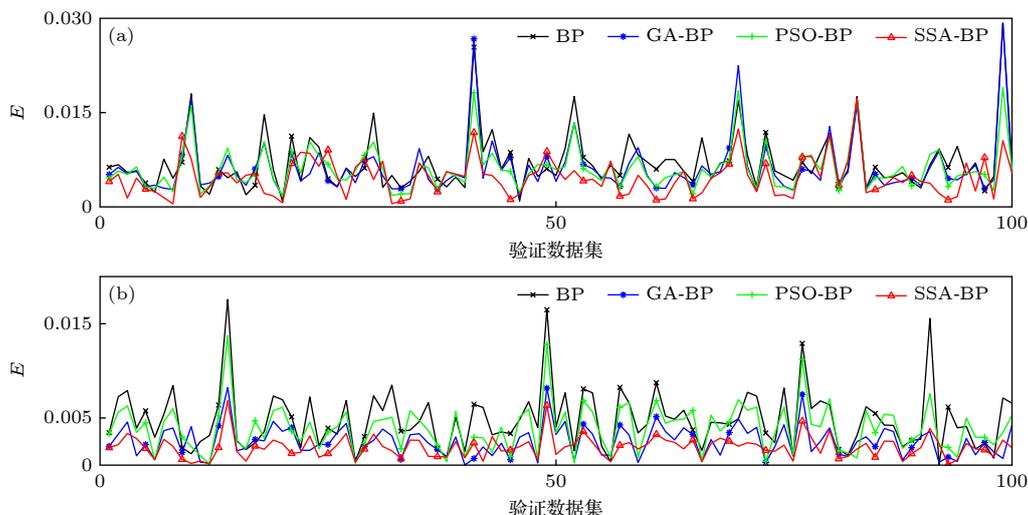


图 4 不同 BP 网络预测数据集性能对比图 (a) α 值; (b) σ 值
Fig. 4. Performance comparison chart of different BP network prediction data sets: (a) α values; (b) σ values.

表 1 不同 BP 网络预测 σ 与 α 的性能表
Table 1. Performance table of different BP networks for predicting σ and α .

神经网络类型	T/S	预测 σ /ps			预测 α		
		MSE/ 10^{-6}	MAE/ 10^{-3}	MAPE/ 10^{-4}	MSE/ 10^{-5}	MAE/ 10^{-3}	MAPE/ 10^{-2}
BP	1.3	33.6	5	20	9.0	7	1.3
GA-BP	38.9	9.22	3	8.1	7.5	6	1.2
PSO-BP	158.1	21.7	4	10	7.0	6.1	1.18
SSA-BP	60.4	5.01	2	7.25	3.5	5	1.0

突变, 导致其 E 值不为最小值, 也并不影响其整体预测性能最优. 结合表 1 数据, 虽然 SSA-BP 网络的平均建模时间 T 较 BP, GA-BP 网络长, 但其预测 σ 和 α 值的 MSE, MAE 和 MAPE 的平均值均为最小, 再次验证了 SSA-BP 整体预测性能最优的结论. 基于此, 利用 SSA-BP 模型代替基于频率纠缠光源的 HOM 干涉实验来获取 σ 和 α 值是合理可行的.

4 结论分析

通过对 SSA-BP 网络的训练及检验, 得到了预测 σ 与 α 值的高精度 SSA-BP 网络. 在取值范围内改变 W 和 L , 利用 SSA-BP 网络预测 σ 与 α , 研究参数间的关系见图 5. 由图 5(a), (b) 可知, 泵浦光带宽 W 与非线性晶体长度 L 的大小均反比于 α , 要想获得更大的 α , W 应尽可能的窄, L 应尽可能的短. 而 W 几乎不会影响 σ , L 正比于 σ . 研究 F 的变化规律见图 6.

由图 6(a), (b) 可知, α 与 σ 均影响着 F 随 τ 的变化. 当 σ 一定时, 随着 α 增大, F 随 τ 变化曲线的两个峰会渐进合并, $\alpha = 1$ 时两峰完全合并, 此时, F 随 τ 的变化曲线为高斯型, 曲线的半高宽随 σ 的增大而增大. 基于 F 随 τ 的变化曲线可知, 当纠缠光源的损耗率为 0 时, 理论上调控 $\alpha = 1$, $\sigma \rightarrow \infty$, 并使 $\tau \rightarrow 0$ 即可得到 F 的最大值, 其最大值趋近 2. 但是, 当利用 SSA-BP 网络预测 α 与 σ 时, $\sigma \rightarrow \infty$ 的情况并不会实现. 最后, 当应用 SSA-BP 网络预测 10^5 组 σ 与 α , 每组数据取 2001 个 τ 值采样点计算 F 时, 寻优得到 $\sigma = 5.9$ ps, $\alpha = 1$ 且 $\tau = \pm 0.01$ ps 时, F 最大且最大值为 1.999.

基于对 F 的研究结果, 分析参数 ξ 的变化规律见图 7. 图 7 中 SNL 表示 τ_{SNL} 与自身的比值, ξ 的最小值点代表不同条件下的最高时延测量精度. α 主要影响 ξ 的大小, 当 HOM 干涉可见度趋于完美

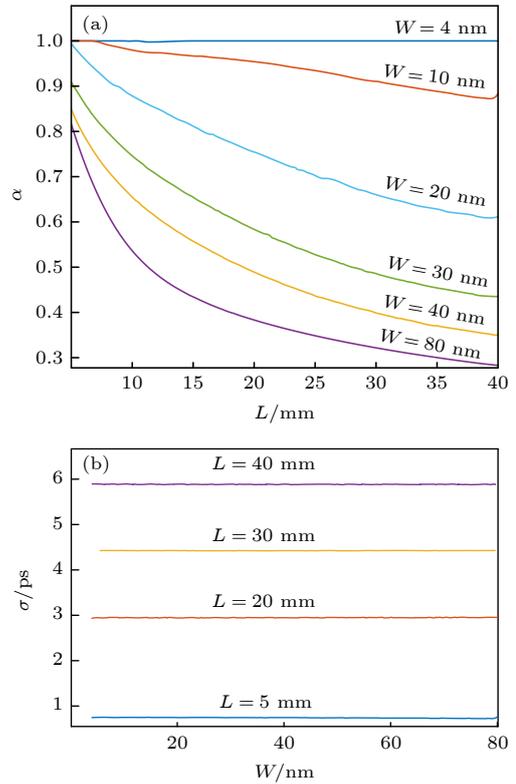


图 5 (a) 在不同的 W 值下, α 随 L 的变化图; (b) 在不同的 L 值下, σ 随 W 的变化图
Fig. 5. (a) α as a function of L at different W ; (b) σ as a function of W at different L .

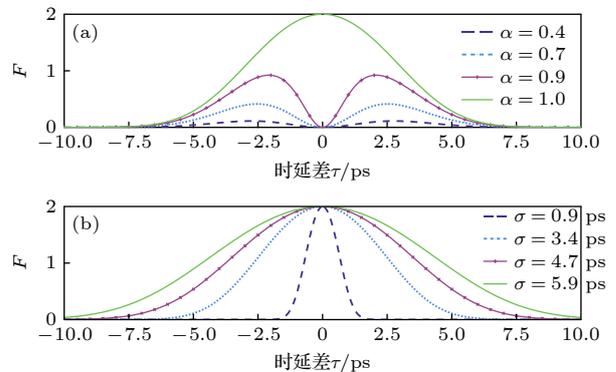


图 6 (a) $\sigma = 4$ ps, F 随 τ 的变化图; (b) $\alpha = 1$, F 随 τ 的变化图
Fig. 6. (a) F as a function of delay τ at $\sigma = 4$ ps; (b) F as a function of delay τ at $\alpha = 1$.

的可见性时 ($\alpha = 1$), σ 越大, 时延测量精度超过 SNL 的 τ 值范围越广. 图 7(b) 为在不同 α 和 σ 的条件下, 时延测量精度最高点的变化图. 由图可知, $\xi \geq 1$ 时对时延差的估计均在 ps 量级, 时延差的最小估计量 $\hat{\tau}$ 约为 ± 2 ps, 此时的时延测量精度受限于 SNL, 利用 Cramer-Rao bound 理论对时延差可准确估计的范围为 $|\tau| \geq 2$ ps. 而当 $\alpha = 1, \sigma = 5.9$ ps 时, ξ 得到全局最小值为 0.707, 其时延测量精度超越 SNL, 此时 $\hat{\tau}$ 的最小估计量为 ± 0.01 ps, 利用 Cramer-Rao bound 理论对时延差的准确估计范围可达 $|\tau| \geq 0.01$ ps. 对比上述结论, 时延差 τ 值的估计范围提高了 2 个数量级. 结合 (3) 式, 在 R 和 K 已知且保持不变的情况下, 量子陀螺仪旋转角速度 Ω_r 的灵敏度较经典光学陀螺仪提高了 2 个数量级. 此外, 通过上述 HOM 干涉图谱的偏移情况, 也就是时延差 τ 的正负可判断出 Sagnac 光纤环的旋转方向.

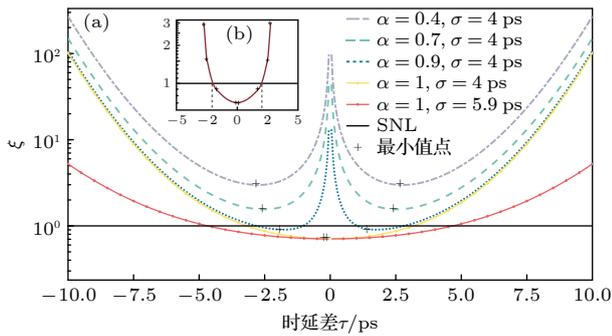


图 7 (a) 参数 ξ 随 τ 值的变化; (b) ξ 最小值的变化图像
Fig. 7. (a) Parameter ξ as a function of delay τ ; (b) minimum value change image of ξ .

最后, 对 SSA-BP 网络预测的 10^5 组 σ 与 α 寻优得出结论: 当 $W = 4.1$ nm, $L = 39.9$ mm 作为 SSA-BP 神经网络输入数据, 预测得到 $\alpha = 1, \sigma = 5.9$ ps 时, F 最大值为 1.999, 参数最小值 ξ 为 0.707, 此时的最小时延差估计量 $\hat{\tau} = \pm 0.01$ ps, 量子陀螺仪旋转角速度 Ω_r 的测量灵敏度较经典光学陀螺仪提高了 2 个数量级, 实现了超越散粒噪声极限的灵敏度.

5 总结

由于基于频率纠缠光源的 HOM 干涉实验获取 σ 和 α 难度较高、效率低下, 本文构建了高精度 SSA-BP 网络用于模拟以上实验过程获取 HOM 特性参

数, 并综合时延差 τ 值研究对量子 Fisher 信息的影响, 寻优得到了量子 Fisher 信息的最大值为 1.999. 随后, 利用量子 Fisher 信息值的变化, 得到了使参数 $\xi < 1$ 的范围, 使时延测量精度超过了散粒噪声极限, 时延差 τ 值的估计范围提高了 2 个数量级, 量子陀螺仪旋转角速度 Ω_r 的测量灵敏度较经典光学陀螺仪提高了 2 个数量级. 证明了基于频率纠缠光源及 HOM 干涉的量子陀螺仪可实现超越散粒噪声极限的灵敏度, 并为后期演示实验的验证提供理论支持.

参考文献

- [1] Scully M O, Zubairy M S 1997 *Quantum Optics* (Cambridge: Cambridge University Press) pp271–281, 442–454
- [2] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L 2011 *Nat. Photonics* **5** 222
- [3] Kolkiran A, Agarwal G S 2007 *Opt. Express* **15** 6798
- [4] 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]
- [5] Fink M, Steinlechner F, Handsteiner J, Dowling J P, Scheidl T, Ursin R 2019 *New J. Phys.* **21** 053010
- [6] Bertocchi G, Alibart O, Ostrowsky D B, Tanzilli S, Baldi P 2006 *J. Phys. B* **39** 1011
- [7] Yang Y, Xu L, Giovannetti V 2019 *Sci. Rep.* **9** 10821
- [8] Napolitano M, Koschorreck M, Dubost B, Behhood N, Sewell R J, Mitchell M W 2011 *Nature* **471** 486
- [9] Flammia S T, Caves C M, Geremia J M, Boixo S 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 90401
- [10] Caves C M 1981 *Phys. Rev. D* **23** 1693
- [11] Barnett S M, Fabre C, Maitre A 2003 *Eur. Phys. J. D* **22** 513
- [12] Dowling J P 2008 *Contemp. Phys.* **49** 125
- [13] Jiang L, Lukin M D, Rey A M 2007 *Phys. Rev. A* **76** 53617
- [14] Lee C, Huang J, Deng H, et al. 2012 *Front. Phys.* **7** 109
- [15] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L 2001 *Nature* **412** 417
- [16] Zhang Y, Zhang Y B, Chen L 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 168701 (in Chinese) [张瑶, 张云波, 陈立 2021 物理学报 **70** 168701]
- [17] Lang L Y, Lu J L, Yu N N, Xi S X, Wang X G, Zhang L, Jiao X X 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 244204 (in Chinese) [郎利影, 陆佳磊, 于娜娜, 席思星, 王雪光, 张雷, 焦小雪 2020 物理学报 **69** 244204]
- [18] Xue J, Shen B 2020 *Syst. Sci. Control Eng.* **8** 22
- [19] Meng C X, Wu D, Lei Y 2022 *J. Geodesy and Geodynamics* **42** 125 (in Chinese) [孟彩霞, 吴迪, 雷雨 2022 大地测量与地球动力学 **42** 125]
- [20] Maccone L, Shapiro J H, Wong F N C, Giovannetti V 2002 *Phys. Rev. A* **66** 43813
- [21] Maccone L, Shapiro J H, Wong F N C, Giovannetti V 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 183602
- [22] 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]
- [23] Zheng Y, Yao A, Wang R 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 143901
- [24] Royfrieded B 1998 *Physics from Fisher Information* (Cambridge: Cambridge University Press) pp22–62
- [25] 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]

- [26] Niu M L, Wang Y M, Li Z J 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 090601 (in Chinese) [牛明丽, 王月明, 李志坚 2022 物理学报 **71** 090601]
- [27] Lyons A, Kneec G C, Bolduc E, Roger T, Leach J, Gauger E M, Faccio D 2018 *Sci. Adv.* **4** 9416
- [28] Fisher R A 1925 *Proc. Camb. Phil. Soc.* **22** 700
- [29] Holevo A S 2001 *Statistical Structure of Quantum Theory* (Berlin, Heidelberg: Springer) pp45–70
- [30] Paris M G A 2009 arxiv: 0804.2981v3 [quant-ph]
- [31] Pérez-Delgado C A, Kok P, Zwiernik M 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 180402
- [32] Yuan C H, Zhang K Y, Zhang W P 2014 *Sci. Sin. Informat.* **44** 345 (in Chinese) [袁春华, 张可烨, 张卫平 2014 中国科学: 信息科学 **44** 345]
- [33] Lloyd S, Maccone L, Giovannetti V 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 10401
- [34] Efremov M A, Kazakov, A E, Chan K W, Law C K, Eberly J H, Fedorov M V 2004 *Phys. Rev. A* **69** 52117
- [35] Volkov P A, Fedorov M V, Mikhailova Y M 2008 *Phys. Rev. A* **78** 62327
- [36] Fedorov M V, Efremov M A, Volkov P A, Eberly J H 2006 *J. Phys. B* **39** S467

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

Zhai Yi-Wei[†] Li Wang

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

(Received 27 February 2023; revised manuscript received 19 April 2023)

Abstract

High sensitivity optical gyroscopes, as an important component of aerospace navigation system, have become a research hotspot. The sensitivity of the classical optical gyroscope is restricted by the shot-noise-limit owing to the vacuum zero energy fluctuation. Therefore, the classical optical gyroscope cannot meet the growing demand of navigation, sensing and communication. In this work, a measurement scheme of quantum gyroscope based on frequency entangled source and Hong-Ou-Mandel (HOM) interference is proposed. In order to realize high-precision delay measurement, the interference visibility and width of HOM interferogram are regulated by changing the bandwidth of pump laser and the length of nonlinear crystal. However, traditional experimental regulation method is inefficient and time consuming. On the basis of the above scheme, a delay measurement scheme of HOM interference based on SSA-BP network is established. The SSA-BP network is used to simulate different bandwidths of pump laser and the lengths of nonlinear crystal to predict the interference visibility and width of HOM interferogram. The verification results show that the mean square error (MSE), the mean absolute error (MAE) and the mean absolute percentage error (MAPE) predicted by SSA-BP network are smallest. Based on the above SSA-BP network model, the interference visibility and width of HOM interferogram are $\alpha = 1$ and $\sigma = 5.9$ ps respectively. Combined with quantum Fisher information, the maximum value of F is obtained to be 1.999. Meanwhile, according to the Cramer-Rao bound theory, the minimum ratio of the uncertainty of the delay to the shot-noise-limit can reach 0.707, indicating that the precision of delay measurement is increased by 2 orders of magnitude. According to the relationship between delay and rotational angular velocity, the measurement sensitivity of the rotational angular velocity is improved by 2 orders of magnitude compared with that of the classical optical gyroscope. These results prove that the above quantum gyroscope scheme can realize the measurement sensitivity of rotational angular velocity beyond the shot-noise-limit. Therefore, the SSA-BP network model can provide theoretical support for the subsequent experimental verification of quantum gyroscopes based on HOM interference delay measurement, and is the technical basis for the development of quantum navigation, quantum sensing and quantum communication.

Keywords: Hong-Ou-Mandel interference, time delay measurement, quantum gyroscope, sparrow search algorithm

PACS: 85.35.Ds, 06.30.Gv, 87.85.dq

DOI: 10.7498/aps.72.20230283

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12205178).

† Corresponding author. E-mail: zhaiyiwei@sust.edu.cn