

利用连续变量纠缠信号提高罗兰 C 台间同步精度的方法

陈超*, 吴德伟**, 杨春燕***, 李响, 朱浩男

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

摘要 基于不同位置的动态光路延迟装置和位于罗兰 C 主台的纠缠源信号, 通过主台非平衡 M-Z(马赫-曾德尔)干涉仪检测不同路径纠缠光场的相位差信息, 得到罗兰 C 主、副台的同步时差信息。理论和仿真分析结果表明, 在相位差为 0.5π 时, 能得到最佳时差信息, 精度能达到数十皮秒级别。相较于原有的主从同步或自由同步等方式, 此方案不需要测量脉冲到达时间, 而且能够突破量子噪声极限, 有效提高了测时精度。

关键词 量子光学; 罗兰 C; 台间同步; 连续变量源信号; 测时精度

中图分类号 O431.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.042702

Method for Improving Roland C Inter-Station Synchronization Precision Using Continuous-Variable Entanglement Signals

Chen Chao*, Wu Dewei**, Yang Chunyan***, Li Xiang, Zhu Haonan

Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China

Abstract Based on the dynamic optical path delay device with different positions and the entangled source signals at Roland C main station as well as the phase difference information of entangled light fields with different paths detected by the main station unbalanced M-Z (Mach-Zehnder) interferometer, the synchronization time difference information of Roland C main and auxiliary stations is obtained. The theoretical and simulation results show that the optimal time difference information with a precision of tens of picoseconds is obtained when the phase difference is 0.5π . Compare with the original master-slave synchronization, free synchronization and others, the proposed scheme does not need to measure the pulse arrival time. Moreover it can break through the quantum noise limit and effectively improve the time measurement accuracy.

Key words quantum optics; Roland C; inter-station synchronization; continuous-variable entanglement signal; time measurement precision

OCIS codes 270.5570; 270.6570

1 引言

罗兰 C 系统作为陆基低频长波无线电导航系统, 信号作用距离远、不易受到干扰、完好性高, 其导航及监测台站在我国分布广泛, 是我国宝贵的导航系统和信号资源。但是, 其主副台同步功能并不完善, 台站间时延值及基线测量经常受环境的影响而发生变化, 导致同步性能较差。基于军民领域对精密可靠的时间频率信息的迫切需求, 对现有的罗兰

C 系统进行改造, 将发射台时间同步到世界协调时 (UTC), 依赖多个原子频标, 使主副台同步。台站间需要将多个精确稳定的原子频标作为时频基准, 其较强的授时能力和监测站的监测功能可以基本确保主副台信号相位时间同步^[1-2], 但受现有工艺的影响, 原子钟累积误差为 $0.1 \mu\text{s}/\text{d}$, 而且设备较为复杂。针对信号同步问题, 我国提出利用北斗卫星系统、长波授时台 (BPL) 信号或全球定位系统 (GPS) 共视比对的方法将各台链发射台信号与 UTC 时间

收稿日期: 2018-07-26; 修回日期: 2018-08-14; 录用日期: 2018-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(61573372, 61603413)

* E-mail: 1553660157@qq.com; ** E-mail: wudewei74609@126.com; *** E-mail: ycy220@163.com

实现精密时间同步,并用铯原子钟控制发播频率。通过改造罗兰 C 长波导航系统,性能得到一定提升,每个台站具备了与 UTC 时间同步的能力,采用卫星比对技术使平均同步标准偏差可以控制在 50 ns 之内。由于误差受到传统无线电信号脉冲测量精度的制约,不易进一步提高远程台间同步精度。

21 世纪初美国加州理工大学的科学家们提出了量子时间同步的概念^[3-4]。基于量子力学、量子信息和光学理论相结合的量子时钟同步技术在信息传输的保密、安全和测量精度上有巨大优势^[5]。目前,国际上基于量子特性的时钟同步协议处于热点研究阶段,并不断涌现出多种时钟同步技术理论方案^[6-8]。现有量子时钟同步大都基于 HOM(Hong-Ou-Mandel)干涉仪的纠缠光子二阶相干时间同步协议^[9-10],纠缠光子对分别传递给 A 和 B,调节延时装置使得纠缠光子对分别到达 HOM 干涉仪的时间一致,记录接收光子时间,利用光子在传输中的时间关联函数就可以计算两地的时间差。这种协议的同步精度主要取决于光学延迟的控制精度和 HOM 干涉仪的二阶量子干涉的测量精度(理论上小于 100 fs),理论上在远距离时钟同步中具有一定的应用前景^[11]。但是光学延迟装置不易控制 HOM 两臂平衡,由于纠缠光子是通过激光抽运非线性光学晶体的自发参量下转换方式(SPDC)生成,其生成效率较低,用单光子探测器探测时效率不足。

相比纠缠光子对,连续变量纠缠信号的生成效率及探测效率更优,有利于降低实验难度。连续变量纠缠信号具有压缩态非经典光场,能够在时间同步过程中,使同步精度突破量子噪声极限。在实验中,通常使用高纯度双模压缩态光场经过非简并光学参量振荡器(NPO)制备连续变量纠缠光场^[12]。在主台用 M-Z(马赫-曾德尔)非平衡干涉仪探测技术测量连续变量纠缠光信号的相位差,可以得到时间同步信息。仿真了两路信号在不同的压缩度时,探测效率与相位微小变化以及相位的不确定度与相位的关系,以及分析了同步更新率对测量精度的影响。

2 连续变量纠缠同步方案设计

罗兰 C 系统基于双曲线导航定位方式,在工作区某点接收同一台链的主副台发射信号,利用信号的到达时间差来获得距离差,进而得到以两个台为焦点的一条双曲线。接收主台与另一个副台信号可得另一条双曲线,两条双曲线焦点就为目标位置。一条台链中,所有副台在发射时间上都必须与主台同步,目的是保证有稳定双曲线格网。现在主要靠原子频标和监控站来保持。为了消除多值性,通常副台信号发射时间与主台信号发射时间有固定的时间延迟,且需保证工作区的任意一点的主台信号总是先于副台信号到达。图 1 为传统罗兰 C 台站同步系统图。

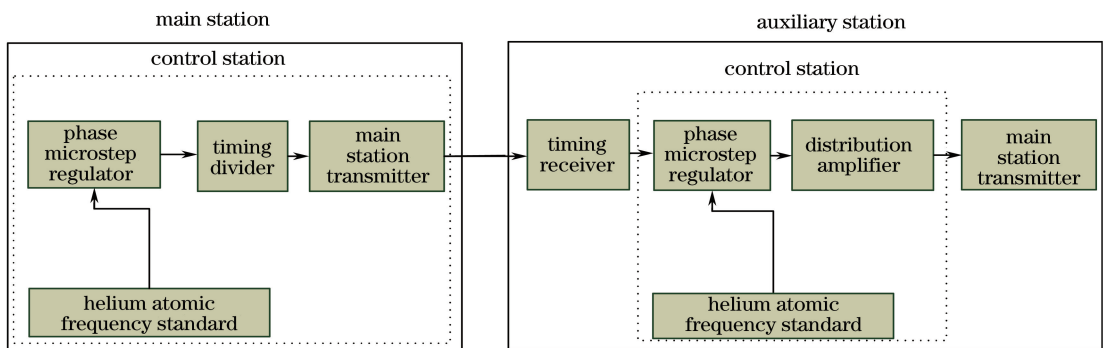


图 1 罗兰 C 台站同步系统方框图

Fig. 1 Block diagram of Roland C station synchronization

2.1 基于纠缠源台间时钟同步流程

现有罗兰 C 系统台站因故障导致发播信号中断时,重新恢复信号不方便,且铯原子频标存在频率突变问题,每天有积累误差,从而使得同步误差不断增加。因此利用连续变量纠缠信号对时钟同步系统装置进行改进,如图 2 所示。

图 2 中在主台放置一个 EPR(Einstein-Podolsky-Rosen)纠缠光束产生源,通过 50:50 分

束器(BS)进入不同光路,主台发射纠缠信号经延迟器传播到副台,并经延时回路和发射装置返回到主台接收,用探测器记录光子数,用检测器中的 M-Z 干涉仪对两路纠缠信号进行最小相位差测量。纠缠源产生器中,其纠缠源保真度取决于压缩态光场的压缩度和纯度,一般可以通过降低光学损耗和减小相位抖动,并在光路中插入模式清洁剂提高相位锁定的稳定性来提高压缩度,

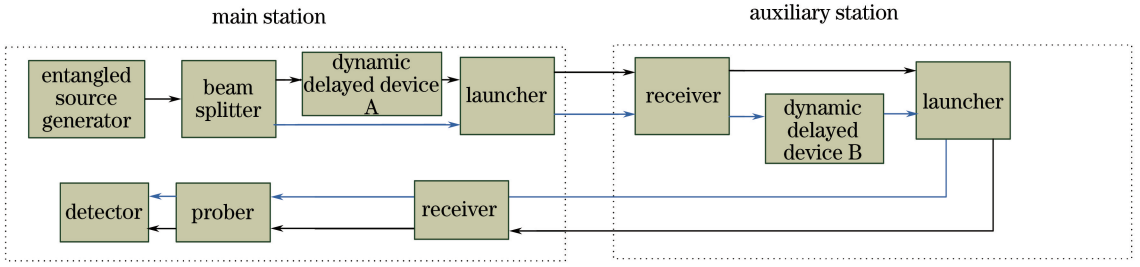


图 2 纠缠光时钟同步系统装置图

Fig. 2 Schematic of entangled optical signal clock synchronization device

而纯的压缩态通常采用增大腔的逃逸效率和降低抽运功率的办法来获得^[13]。优化这些参数,可以减小 NOPO 注入场的噪声对输出纠缠光场的影响。同时,减小注入场的噪声,选取相位压缩的抽运场、噪声关联的信号场和闲置场作为注入信号,可以进一步提高 NOPO 输出光场的纠缠程度^[14]。

2.2 台间同步模型建立

为同步主副台时钟,可移动延迟器中的反射镜来调整光路时延,从而将主副台的时钟信息与时延联系起来。主副台中不同光路分布在两个不同延迟器,上路光束从左到右到达延迟器 A 的时刻记为 t_{A1} ,光路从主台延迟器 A 出来的时刻记为 t_{A2} ;下路光束到达副台延迟器 B 的时刻记为 t_{B1} ,从延迟器 B 出来的时刻记为 t_{B2} 。可知有如下关系:

$$\Delta t_A = t_{A2} - t_{A1}, \quad (1)$$

$$\Delta t_B = t_{B2} - t_{B1}. \quad (2)$$

若 A、B 时钟源无漂移,则引入的时延造成的路径差对检测相位差无影响;而若是主副台时钟存在时钟误差,即

$$\Delta \tau = \Delta t_A - \Delta t_B, \quad (3)$$

则会引入光程距离的变化 ΔS ,检测器就能检测出两路纠缠光束相位的变化量。若要将主副台时钟进行多次连续校时,就要在不同时钟下改变动态延迟器路径,记录经过延迟器后不同的距离变化量,即动态延迟器,如图 3 所示。

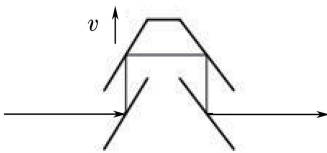


图 3 动态延迟装置

Fig. 3 Dynamic delay device

当 A、B 钟面时刻分别为 t_A 、 t_B 时,纠缠光从分束器发出,延迟器 1 和 2 同时以恒定速度 v 运动,可

知纠缠光进出延迟器后,在不同时刻增加的路径长分别为 S_A 和 S'_A :

$$S_A = v(t_{A2} - t_{A1}), \quad (4)$$

$$S'_A = v(t_{B2} - t_{B1}). \quad (5)$$

由(4)、(5)式可得,根据光程变化量,可计算出由延迟器的镜面运动所引起的光程差为

$$\Delta S = S_A - S'_A = v(\Delta t_A - \Delta t_B) = v\Delta \tau. \quad (6)$$

用 M-Z 干涉仪可以测量两路纠缠光束的相位差信息,根据相位和光程差关系 $\Delta \varphi = 2\pi \Delta S / \lambda$ (λ 为光波长)可以多次测量由时钟误差引起的相位差值 $\Delta \varphi$,从而能够得到主副台之间的时间差。

2.3 台间光路相位差检测

台间光路相位差检测器装置使用 M-Z 干涉仪,如图 4 所示,图中 a、b、a'、b'、c、d 分别表示输出端口。由探测可知,输出口光强与干涉仪不同路径的相位差有关: $I_{out} = I_{in} \cos^2(\varphi/2)$, I_{in} 为输入端口的光强, φ 为输入光与两干涉臂的相位差,通过输出口光强可以得到信号场相位差。

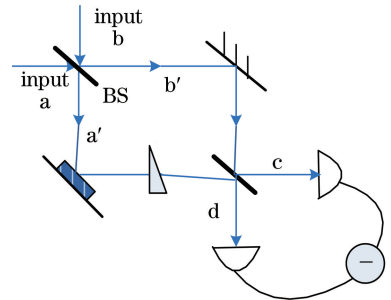


图 4 M-Z 干涉仪测量相位示意图

Fig. 4 Schematic of phase measurement by M-Z interferometer

干涉仪输入端注入相干场和压缩场,分别用湮灭算符 \hat{a} 和 \hat{b} 表示,内部场用算符 \hat{a}' 和 \hat{b}' 表示,输出场用算符 \hat{c} 和 \hat{d} 表示。那么 M-Z 干涉仪输入输出关系可表示为

$$\begin{cases} \hat{a}' = \frac{1}{\sqrt{2}} [\hat{a} + \hat{b} \exp(i\theta)] \\ \hat{b}' = \frac{1}{\sqrt{2}} [\hat{a} - \hat{b} \exp(i\theta)] \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \hat{c} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{\hat{a}' + \hat{b}' \exp[i(\varphi_0 + \Delta\varphi)]\} \\ \hat{d} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{\hat{a}' - \hat{b}' \exp[i(\varphi_0 + \Delta\varphi)]\} \end{cases}, \quad (8)$$

式中: θ 为两路输入场在第一个分束器的相位差; φ_0 为干涉仪初始相位差。令初始相位 $\varphi_0 = \pi/2$, $\Delta\varphi$ 为待测相位的微小变化, 则干涉仪两端输出的光电流差信号的光子数差算符为

$$\begin{aligned} \hat{n}_- = & \hat{c}^\dagger \hat{c} - \hat{d}^\dagger \hat{d} = \hat{a}'^\dagger \hat{b}' \exp[i(\varphi_0 + \Delta\varphi)] + \\ & \hat{b}'^\dagger \hat{a}' \exp[-i(\varphi_0 + \Delta\varphi)] = \\ & (\hat{a}'^\dagger \hat{b}' + \hat{b}'^\dagger \hat{a}') \sin \Delta\varphi + i(\hat{a}'^\dagger \hat{b}' - \hat{b}'^\dagger \hat{a}') \cos \Delta\varphi = \\ & (\hat{a}^\dagger \hat{a} - \hat{b}^\dagger \hat{b}) \Delta\varphi - i[\hat{a}^\dagger \hat{b} \exp(i\theta) - \hat{b}^\dagger \hat{a} \exp(-i\theta)], \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\Delta\varphi \approx 0$, $\sin \Delta\varphi \approx \Delta\varphi$; \hat{c}^\dagger 、 \hat{d}^\dagger 分别为两束输出光的产生算符; 第一项为待测微小相位信息, 第二项为压缩真空态引入的噪声起伏; 输入光 \hat{b} 的平均光子数不为 0, $\langle b^\dagger b \rangle = \sinh^2 r$, r 为压缩度。因此, 光子数差算符的均值表示为

$$\langle \hat{n}_- \rangle = (|\alpha|^2 - \sinh^2 r) \Delta\varphi, \quad (10)$$

式中: $N = |\alpha|^2$ 为输入相干光 \hat{a} 平均光子数。

光子数差算符的量子噪声起伏为^[15]

$$\begin{aligned} \langle \Delta \hat{n}_-^2 \rangle = & |\alpha|^2 \langle [\hat{X}_b(\pi/2 - \theta)]^2 \rangle + \langle b^\dagger b \rangle = \\ & |\alpha|^2 \exp(-2r) + \sinh^2 r, \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $\hat{X}_b(\pi/2 - \theta)$ 为正交压缩算符, 压缩方向为 $(\pi/2 - \theta)$ 。同样, 可以测得最小可测量精度为

$$\Delta\varphi = \frac{[|\alpha|^2 \exp(-2r) + \sinh^2 r]^{\frac{1}{2}}}{(|\alpha|^2 - \sinh^2 r)}. \quad (12)$$

由于平均光子数远大于压缩态光子数, $|\alpha|^2 \gg \sinh^2 r$, 最小可测量的相位精度趋于 $\Delta\varphi \approx 1/[\sqrt{N} \exp(r)]$ 。

文献[16]给出最优化的相位测量精度与接收平均光子数和压缩度有关, 并利用压缩光得到了 3 dB 的信噪比增强。实验小组利用一个逃逸效率为 96.2% 的非简并光学参量放大器, 在抽运功率为 40 mW 时, 获得了纯度为 0.993 的双模压缩态光场^[13]。在探测过程中, 压缩光的压缩度模式匹配效

率不仅与两束光的干涉效率有关, 还与测量正交分量的微小相位偏移相关, 需尽量保证抽运光与光学参量放大器 (OPA) 基模的模式匹配效率接近 100%^[17]。

3 连续变量纠缠光系统的分析及仿真

3.1 压缩度对干涉仪探测效率的影响

在用 M-Z 干涉仪探测光场时, 测量结果与纠缠光场和注入本地振荡光的干涉程度有关, 若采用不同压缩度光场, 探测时间精度会随着压缩度变化而变化^[18]。微小时间平移量可表示为

$$\Delta u_r = \frac{u_0}{2\sqrt{N}} \sqrt{\exp(-2r) + \tan^2 \Delta\varphi \exp(2r)}, \quad (13)$$

式中: $u_0 = 1/\sqrt{\omega_0^2 + \Delta\omega^2}$ 为初始模式的时间平移量; ω_0 为信号场的载频; $\Delta\omega$ 为测量脉冲谱宽度。选取信号场正交相位和振幅噪声分量: $[\Delta \hat{X}_a^2 = \exp(-2r)]$ 与 $[\Delta \hat{X}_b^2 = \exp(2r)]$, 初始相位 $\varphi_0 = \pi/2$, 则探测效率为

$$\eta = \frac{\Delta u_{\text{snl}}}{\Delta u_r} = \frac{1}{\sqrt{\exp(-2r) + \tan^2 \Delta\varphi \exp(2r)}}. \quad (14)$$

在相干态下, 可测的标准量子噪声极限 $\Delta u_{\text{snl}} = 1/(2\sqrt{N}\sqrt{\omega_0^2 + \Delta\omega^2})$, 此时, 探测效率是将最小探测时间归一化到标准量子噪声极限上。可见, 相位微小变化对时间测量精度和探测效率皆有影响。

图 5 比较了不同压缩度下 η 随不同 $\Delta\varphi$ 的变化。 $\Delta\varphi$ 不为零的情形下, 正交相位和振幅噪声分量对探测结果有不同的影响, 此时探测效率随着图中压缩因子取值不同而变化, 并不是 r 越大, 探测效率越大, 而是在特定的 r 下会取到最优值。3 条曲线都随 $\Delta\varphi$ 的增大而下降, 但下降快慢不同, r 越大, 探测效率随相

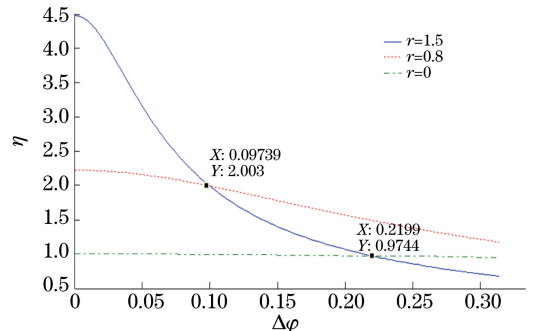


图 5 不同信号场压缩度 r 下探测效率的变化趋势
Fig. 5 Detection efficiency versus signal field compression r

位微小变化越敏感。可见,当 $\Delta\varphi > 0.098$ 时,采用 $r = 0.8$ 的压缩光进行探测, $\Delta\varphi < 0.098$ 时,采用 $r = 1.5$ 的压缩光探测得较好。并且, $\Delta\varphi > 0.219$ 时, $r = 1.5$ 的压缩光还会使探测效率低于经典光,这是因为反压缩噪声分量对探测效率的影响较大。所以用 M-Z 干涉仪进行信号场测量时,要将两路场的相位微小变化量控制在很小的范围内。

3.2 待测相位无偏差测量仿真

实验中,可以通过测量输出端口 c 和 d 的光子数差 \hat{N}_c 和 \hat{N}_d 的平均值来进行待测相位值的估计。经过一定次数的独立测量并研究矩估计方法可知,一阶矩即算符的平均值可表示为

$$\langle \hat{n}_- \rangle = \langle \hat{N}_c - \hat{N}_d \rangle = \bar{n} \cos \theta, \quad (15)$$

与相位差一一对应,可以得到相位估计不确定度为^[19-20]

$$\Delta\theta_{\text{est}} = \frac{1}{\sqrt{p\bar{n}} \sin \theta}. \quad (16)$$

利用干涉仪得到相位估计值为

$$\theta = \arccos\left(\frac{A_p}{\bar{n}}\right), \quad (17)$$

无偏差函数可表示为一个高斯分布的概率函数,即

$$P(\theta_{\text{est}} | \theta) = \sqrt{\frac{p\bar{n}}{2\pi}} \exp\left[-\frac{p\bar{n}(\theta_{\text{est}} - \theta)^2 \sin^2 \theta}{2}\right] \sin \theta, \quad (18)$$

式中: $A_p = \sum_{k=1}^p (\hat{N}_c^k - \hat{N}_d^k) / p$ ($k = 1, 2, \dots, p$) 为测量值的平均值, p 为测量次数,当 $p \rightarrow +\infty$,则 $A_p \rightarrow \langle \hat{n}_- \rangle$;若输出均值与相位差有单调函数关系 $\langle \hat{n}_- \rangle = f(\theta)$,即可得到待测相位; $\Delta\theta_{\text{est}}$ 为标准差正态分布; \bar{n} 为输入端平均光子数。

图 6 仿真了在 p 次独立测量下的相位估计值的不确定度随着输入相位的变化关系。从图中可以看到无偏差的范围,在 $0.4\pi \sim 0.6\pi$ 统计的结果与无偏差方程一致。黑色曲线为理论曲线,其他曲线为不同 p 值的模拟结果。

可以得知,对次数仿真越多,分布函数越接近极小值,即为待测相位。当相位取值为 0 和 π 时,有较大误差。因为在该区域存在非线性函数 $f^{-1}(A_p)$ 的影响,则该函数用泰勒公式展开,可知它在 ± 1 处展开时为发散的;在 0 处,即 $\theta = 0.5\pi$ 时,函数可线性化,可得到最佳估计。

3.3 同步更新率对测量精度影响

同步更新率是指主副台时钟每次同步时所经历

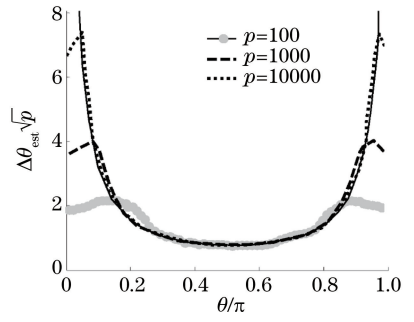


图 6 相位估计值不确定度随待测相位的变化曲线
Fig. 6 Uncertainty of phase estimation value versus phase to be measured

的时间,它与光路探测器中的测量时间有关,即光路探测器的测量时间越短,则主副台时钟的更新速率就越快。在实际探测中,受一定噪声的影响,探测器对纠缠光子的有效计数率为

$$M' = M - m, \quad (19)$$

式中: M 为探测器理想计数率; m 为噪声计数率。由纠缠光分布特性,探测器探测到的均方根误差为^[21]

$$\delta = \sqrt{Mt_0 + mt_0} = \sqrt{M't_0 + 2mt_0}, \quad (20)$$

式中: t_0 为测量总时间。则信噪比为

$$R_{\text{SN}} = \frac{Mt_0 - mt_0}{\sqrt{M't_0 + 2mt_0}} = \frac{M't_0}{\sqrt{M't_0 + 2mt_0}}, \quad (21)$$

总时间 t_0 为

$$t_0 = \frac{R_{\text{SN}}^2}{M'^2} (M' + 2m). \quad (22)$$

所探测的量子相位噪声信号非常低,而 R_{SN} 很低时,测量精度不高,因此要增加总测量时间和探测次数来获得更多的压缩光子数目,以提高信噪比。为保证测量相位在最小估计区间的精度, R_{SN} 应大于 1,假设噪声计数率为 1000 count/s, R_{SN} 为 5 dB,总测量时间大约为 10 ms,则有效计数率为

$$M' \approx 500 \text{ count/s}. \quad (23)$$

综合以上仿真数据,探测器的计数率能够达到理论值时,若主台和副台的初始时钟差是 10 ns,光路调节装置中,镜子以 500 m/s 的速度移动,则该同步系统的同步精度就为

$$\Delta\tau = \frac{\lambda}{2\pi v} \Delta\varphi = \frac{\lambda}{2\pi v} \frac{1}{\sqrt{p\bar{n}} \sin\left[\arccos\left(\frac{A_p}{\bar{n}}\right)\right]} \approx 60 \text{ ps}. \quad (24)$$

罗兰 C 目前的同步精度可控制在 100 ns 以内,信号可利用率在 96% 以上,而在此方案中,可以在

主台增发一路纠缠信号实现对主副台同步误差精度的修正,使得台间同步精度较现有指标得到明显的改善,为接下来导航定位提供精确位置。

4 结 论

提出了一种利用连续变量纠缠信号提高罗兰 C 台间同步精度的方案,基于 M-Z 非平衡干涉仪对主台发射的纠缠信号相位差信息进行数值模拟。针对不同相位的微小变化,选取不同压缩度以提高探测效率,得到纠缠相位变化与精度关系。理论推导出探测相位与待测相位的估计精度,仿真结果表明:在相位变化为 0.5π 时待测相位可得到最佳估计,增加探测时间与次数可提高信噪比,同时计算可知该方案的理论同步精度可达数十皮秒级别。相比于现有主从同步方案,此方案优点在于不使用高精度原子频标,不需要测量脉冲到达时间,测量精度更高,且信号本身保密性好,设备简单,操作方便,为量子技术的应用发展和量子定位方法提供了新思路。

参 考 文 献

- [1] Wang J, Yan J H, Li C Z. Foreign situation of enhanced Loran and analyses of the modernization reconstruction of domestic Loran-C system [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2009, 29(3): 79-82.
汪捷, 严建华, 李川章. 国际 eLoran 发展现状与我国罗兰 C 现代化的技术分析 [J]. *海洋测绘*, 2009, 29(3): 79-82.
- [2] Yan J H, Niu H F, Zhao L X. Measurement analysis of factors influencing Loran C positioning and timing accuracy [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2014, 34(4): 69-72.
严建华, 牛会丰, 赵立霞. 影响罗兰 C 系统定位定时精度因素的实测分析 [J]. *海洋测绘*, 2014, 34(4): 69-72.
- [3] Giovannetti V, Lloyd S, MacCone L. Quantum cryptographic ranging [J]. *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*, 2002, 4(4): S413-S414.
- [4] Giovannetti V, Lloyd S, MacCone L. Quantum-enhanced positioning and clock synchronization [J]. *Nature*, 2001, 412(6845): 417-419.
- [5] Song P S, Ma J, Zhang S Y, *et al.* Research and development status of quantum navigation technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 090003.

- 宋培帅, 马静, 张淑媛, 等. 量子定位导航技术研究与发展现状 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 090003.
- [6] Giovannetti V, Lloyd S, MacCone L, *et al.* Clock synchronization with dispersion cancellation [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(11): 117902.
- [7] Giovannetti V, Lloyd S, MacCone L, *et al.* Conveyor-belt clock synchronization [J]. *Physical Review A*, 2004, 70(4): 043808.
- [8] Valencia A, Scarcelli G, Shih Y. Distant clock synchronization using entangled photon pairs [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(13): 2655-2657.
- [9] Hong C K, Ou Z Y, Mandel L. Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 59(18): 2044-2046.
- [10] Bahder T B, Golding W M. Clock synchronization based on second-order quantum coherence of entangled photons [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 734(1): 395-398.
- [11] Hou F Y, Quan R A, Tai Z Y, *et al.* Review of progress in quantum synchronization protocols research [J]. *Journal of Time and Frequency*, 2014, 37(2): 65-73.
侯飞雁, 权润爱, 邵朝阳, 等. 量子时间同步协议研究进展回顾 [J]. *时间频率学报*, 2014, 37(2): 65-73.
- [12] Su X L, Zhao Y P, Hao S H, *et al.* Experimental preparation of eight-partite cluster state for photonic qumodes [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(24): 5178-5180.
- [13] Li Q, Deng X W, Zhang Q, *et al.* Experimental preparation of a pure two-mode squeezed state [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0427001.
李强, 邓晓玮, 张强, 等. 实验制备纯的双模压缩态 [J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0427001.
- [14] Chen H, Tan A H. The influence of noise from injection fields of the optical parametric oscillator on the quantum entanglement characteristics of the output fields [J]. *Journal of Quantum Optics*, 2018, 24(2): 147-155.
陈浩, 谭爱红. 注入场噪声对非简并光学参量振荡器输出场量子纠缠特性的影响研究 [J]. *量子光学学报*, 2018, 24(2): 147-155.
- [15] Sun H X, Liu K, Zhang J X, *et al.* Quantum precision measurement based on squeezed light [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(23): 234210.
孙恒信, 刘奎, 张俊香, 等. 基于压缩光的量子精密

- 测量[J]. 物理学报, 2015, 64(23): 234210..
- [16] Vahlbruch H, Mehmet M, Chelkowski S, *et al.* Observation of squeezed light with 10-dB quantum-noise reduction[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(3): 033602.
- [17] Zhang W H, Yang W H, Shi S P, *et al.* Mode matching in preparation of squeezed field with high compressibility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1112001.
张文慧, 杨文海, 史少平, 等. 高压缩度压缩态光场制备中的模式匹配[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1112001.
- [18] Jin X L, Su J, Zheng Y H. Influence of the non-ideal balanced homodyne detection on the measured squeezing degree[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1027001.
- 靳晓丽, 苏静, 郑耀辉. 非理想平衡零拍探测系统对实测压缩度的影响[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1027001.
- [19] Peres A. Separability criterion for density matrices[J]. Physical Review Letters, 1996, 77(8): 1413-1415.
- [20] Eberle T, Steinlechner S, Bauchrowitz J, *et al.* Quantum enhancement of the zero-area Sagnac interferometer topology for gravitational wave detection[J]. Physical Review Letters, 2010, 104(25): 251102.
- [21] Zhu J. Study on positioning key technologies with quantum correlation [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012: 21-33.
朱俊. 量子关联定位关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012: 21-33.