

基于腔电光力系统增强罗兰 C 台间同步精度问题研究

陈超**, 吴德伟*, 杨春燕, 李响, 罗均文

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

摘要 罗兰 C 系统受到原子钟工艺和无线电信号测量精度限制, 难以实现台站间高精度时间同步。基于量子纠缠微波信号和腔电光力系统, 通过将微波量子信号转换到光频域进行符合探测, 可以得到更精准的罗兰 C 主副台的同步时差信息。经过理论分析和仿真, 得出腔中微波和光转换的条件, 以及腔内耗散对保真度的影响。通过控制腔的驱动场参数可实现最优相位灵敏度检测, 精度水平能达到皮秒量级。相较于原有同步方式, 无需使用昂贵原子时钟, 无需测量脉冲到达时间, 即能有效提高时间同步精度。

关键词 量子光学; 测时精度; 腔电光力系统; 台间同步

中图分类号 O431.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0827001

Research on Enhancing Synchronization Precision Between Roland C Stations Based on Cavity Electro-Opto-Mechanical System

Chen Chao**, Wu Dewei*, Yang Chunyan, Li Xiang, Luo Junwen

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

Abstract Being limited by the accuracy of the atomic clock process and radio signal measurement, it's difficult to achieve high-precision time synchronization between Roland C stations. Based on the quantum entangled microwave signal and cavity electro-opto-mechanical system, the more accurate synchronized time difference information of Roland C main and auxiliary stations can be obtained by converting the microwave quantum signal into the optical frequency domain for coincidence detection. Through theoretical analysis and simulation, the conditions of microwave and optical conversion in the cavity, as well as the effect of cavity dissipation on the fidelity are obtained. The optimal phase sensitivity detection can be realized by controlling the driving field parameters of the cavity, and the precision level can reach the picosecond level. Compared with the original synchronization method, this scheme can effectively improve the time measurement accuracy, without using expensive atomic clock and measuring the pulse arrival time.

Key words quantum optics; time measurement precision; cavity electro-opto-mechanical system; inter-station synchronization

OCIS codes 270.5570; 270.5585

1 引 言

罗兰 C 系统是一种陆基、低频、中远程、主动精密无线电导航系统, 信号作用距离远、抗干扰性能好, 其导航及监测台站在我国分布广泛, 是我国宝贵的信号资源。但是, 其主副台同步性能并不高, 脉冲到达时间误差受环境和电导率变化影响较大。目前, 将台站间放置的多个精确稳定的原子钟作为频标, 其较强的授时能力能够基本确保主副台信号相位时间同步^[1-2], 但原子钟受到工艺的影响, 其累积

误差为 $0.1 \mu\text{s}/\text{d}$ 。为解决台站间同步问题, 我国提出利用卫星系统共视比对的方法实现各链发射台信号与世界协调时间的精密时间同步, 并用铯原子钟控制发播频率, 采用此技术能将平均同步标准偏差控制在 50 ns 之内^[3]。由于受到经典无线电信号脉冲极限制约, 不易进一步提高同步精度。

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^[4-5]。基于量子力学、量子信息、光学理论相结合的量子时钟同步技术在信息传输的保密、安全和测量精度方面有巨大优势^[6], 并提

收稿日期: 2019-03-02; 修回日期: 2019-04-03; 录用日期: 2019-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(61573372, 61603413)

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

出多种量子时间同步协议^[7-9],其主要利用干涉仪测量纠缠光子二阶相干时间^[10-11]。而在电路量子电动力学系统中,以超导约瑟夫森结为基础构建的约瑟夫森参量放大器(JPA)是制备压缩态微波场实验中应用较多的器件^[12]。Menzel 团队利用 JPA 以及 Flurin 团队利用约瑟夫森混合器(JM)产生了空间分离的纠缠微波信号,并压缩了真空噪声,低于量子噪声极限 4.9 dB^[13]。基于 JPA 产生的正交相位、正交振幅信息的连续变量将量子纠缠微波作为一种新型的无线电信号,具有量子强关联和压缩等非经典特性,相对于光频纠缠信号具有更强的云雾穿透能力和抗大气衰减能力,因此其在空间中的远距离传播能力更有利于量子微波信号进行大尺度动态空间环境中的量子信息传输,甚至会对传统的通信、导航、雷达等领域产生颠覆性影响^[12]。

但是量子纠缠微波信号在传播过程中受自由空间传输的影响而发生衰减,到达接收方天线时能量已经非常弱,甚至远低于电路噪声。针对弱信号检测,主要通过提高接收端信噪比,采用压缩真空注入及相敏放大等量子增强技术来对纠缠微波信号进行最优量子接收和检测。随着基态冷却技术的突破以及纳米电机械、光学微腔的发展,利用腔电光力耦合系统(EOM)实现了对微小位移和力的高精度测量^[14],并在一些研究中体现出对弱微波信号的检测潜力。Fiore 等^[15]对光力谐振器中存储光信息进行了研究,通过将微波谐振腔耦合到机械模的法布里-珀罗(F-P)腔,证明微波场和光场的量子态与机械

振子能够进行双向态转换,其转换效率受本征腔损耗和光学膜失配的限制。Wang 等^[16]提出通过激发腔光力传感器中的机械暗膜来实现微波场和光场的高保真量子态转换^[14],通过严控工作温度和利用协同的转换器能有效抑制机械噪声对系统的影响。

本文提出一种基于腔电光力系统来增强微波量子态检测,进而提高罗兰 C 台间同步精度的方法。通过控制腔电光力系统的驱动场参数,可将纠缠微波信号转换为光信号,并在光频域符合成熟测量技术下,对输出的微小相位差灵敏度进行探测,得到时间同步信息。

2 同步框架与实现方案

2.1 台间同步框架建立

同步框架的构建主要是基于文献[17]进行改进,如图 1 所示。纠缠源利用 JPA 或者 JM 工作并在参量放大状态下生成量子纠缠微波,在低温下,具有良好低噪性能和非线性特性。在主台放置 JPA 来产生纠缠微波源,纠缠微波场通过主副台动态时延将时钟时间信息联系起来。在接收端,利用腔电光力系统对微波信号进行选频,只有当微波和腔电光力系统达到共振,才能进行相位共轭并上转换成光场,用来进行符合测量并分析量子相位最佳灵敏度。其优势为,在高品质的共振腔中,其光子和机械振子都能够与系统中原子和 LC 回路腔、晶体腔进行耦合,并在实验中实现对弱粒子量子行为的有效观测^[18]。

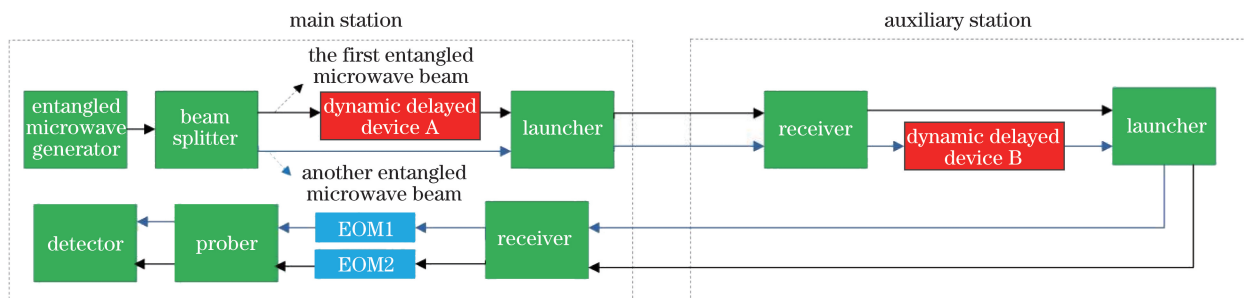


图 1 基于腔电光力系统的纠缠微波时钟同步结构图

Fig. 1 Entangled microwave clock synchronization device diagram on cavity electro-opto-mechanical system

为同步主副台时钟,需以一定速度 v 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。

纠缠光束进出延迟器时刻不同,造成光路时延 $\Delta\tau$,从而使光程变化 ΔS ,则检测器就能检测出两路纠缠光束的相位变化量。根据相位与光程差关系 $\Delta\phi = 2\pi\Delta S/\lambda = 2\pi v\Delta\tau/\lambda$ (λ 为光波长)可以多次测

量由 $\Delta\tau$ 引起的相位差 $\Delta\phi$,以最优相位灵敏度测得精准的同步时差信息,具体操作参考文献[17]。

2.2 腔电光力系统

腔电光力系统由机械振子、光腔和微波腔组成,光、电与机械谐振子相互作用的非线性产生了很多非经典的效应,使得此系统成为重要的量子器件^[19]。微波场和光场都受红蓝失谐光驱动,此时将

移动端的镜面看作简谐振子并将其作为传输媒介,在辐射场压力作用下,机械振子会产生轻微振动,引起微波腔电容和光腔腔长不同程度的变化,使得微波场、光场和机械振子形成线性混合,从而实现微波与光的有效转换^[20]。其系统理论模型如图 2 所示。

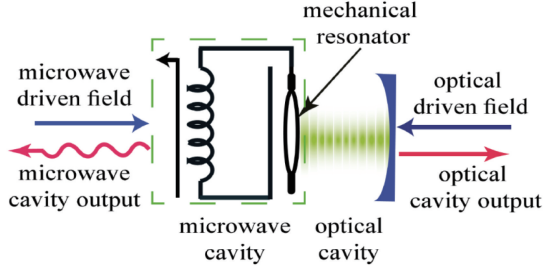


图 2 腔电光力学系统示意图

Fig. 2 Schematic of cavity electro-opto-mechanical system

在该腔电光力学系统中,使用不同频率信号的腔辅助抽运场进行驱动。左端用频率为 ω_w 的微波场进行驱动,右端用频率为 ω_o 的抽运光进行驱动,在微波和光频率驱动的下旋转表象下,光腔光子和微波腔光子通过辐射压力与机械声子模式相互作用,其相互作用可由哈密顿量表示为^[21]

$$\hat{H} = \hbar\omega_M \hat{b}^+ \hat{b} + \hbar \sum_{j=w,o} [\Delta_j + g_j (\hat{b}^+ + \hat{b})] \hat{a}_j^+ \hat{a}_j + i\hbar \sum_{j=w,o} E_j (\hat{a}_j^+ - \hat{a}_j), \quad (1)$$

式中: \hbar 为约化普朗克常量; ω_M 为频率; \hat{b}^+ 为机械谐振器的产生算符; \hat{b} 为机械谐振器湮没算符;下标 w 表示微波腔,下标 o 表示光腔; Δ_j 为谐振腔的失谐量; g_w, g_o 为机械谐振腔与微波腔、光腔的耦合率; \hat{a}_w^+ 为微波腔的产生算符; \hat{a}_w 为微波腔的湮没算符; \hat{a}_o^+ 为光腔的产生算符; \hat{a}_o 为光腔湮没算符; E_w, E_o 为微波腔、光腔中的电场幅值。因为当耦合率很小时,可以通过将腔膜扩展到其稳态振幅附近以使哈密顿量线性化。通过设置腔的失谐量满足 $\Delta_w = -\Delta_o = \omega_M$, 谐振器处于共振状态,红色边带驱动微波腔,而蓝色边带驱动光腔^[18], 就可以线性化哈密顿量^[20]:

$$\hat{H} = \hbar G_o (\hat{a}_o \hat{b} + \hat{b}^+ \hat{a}_o^+) + \hbar G_w (\hat{b} \hat{a}_w^+ + \hat{a}_w \hat{b}^+), \quad (2)$$

式中, $G_j = g_j \sqrt{N_j}$ ($j = w, o$) 为不同驱动场与机械振子的耦合率, $N_j = |E_j|^2 / (\kappa_j^2 + \Delta_j^2)$ 为腔膜的稳态场强度, κ_j 为耗散率。(2)式第 1 项表示参量下转换线性混合的相互作用,转换速率满足

$$V_o = |G_o|^2 / \kappa_o \geq r, \quad (3)$$

式中, $r = \gamma_M k_B T / (\hbar\omega_M)$ 为机械谐振器退相干率,

γ_M 为阻尼率, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为转换器温度。它使机械谐振器与光腔膜纠缠在一起。(2)式第 2 项满足

$$V_w = |G_w|^2 / \kappa_w \geq r, \quad (4)$$

描述的是机械谐振器与微波腔之间的激发态相干转换。

实验上,可对输出探测场的压缩噪声谱进行测量。首先,抽运通过 1.5 GHz 的声光调制器,然后将光束注入探测通道,调整外部控制变量修整场的频率失谐让驱动场和探测场以一定角度射入非线性晶体,以满足相位匹配条件^[22]。在这样的多能级原子系统中,注入相干四波混频信号可以得到相干的参数放大四波混频信号(PAFWM)。通过调整外部控制变量修整场的频率失谐来控制 and 调节四波混频程度,在不同的修整频率失谐量下,探测场产生的修整态可以调节交叉相位,调制产生克尔介质,以此来调节非线性相移^[23],产生的高阶 PAFWM 过程有助于增强非线性增益系数并显著增加强度差压缩程度。

通过实验装置可使得强度差压缩噪声从初始的 (-3.6 ± 0.4) dB 提高到 (-9.0 ± 0.4) dB^[22]。

2.3 光和微波模式的量子态转换

具有频率 ω_o 的光频模式与具有频率 ω_w 的微波模式交换能量可用海森堡-朗之万方程表示为^[24]

$$\frac{d}{dt} \hat{a}_o = i g_o \alpha^* \hat{a}_w - \frac{\gamma_o}{2} \hat{a}_o + \sqrt{\gamma_o} \hat{a}_{o,in}, \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \hat{a}_w = i g_w \alpha \hat{a}_o - \frac{\gamma_w}{2} \hat{a}_w + \sqrt{\gamma_w} \hat{a}_{w,in}, \quad (6)$$

式中: α^* 为腔的稳态振幅; $\hat{a}_{o,in}$ 和 $\hat{a}_{w,in}$ 为具有零均值的输入量子噪声算符; γ_o, γ_w 为阻尼率。图 3 中, $\hat{a}_{o,out}$ 和 $\hat{a}_{w,out}$ 为具有零均值的输出量子噪声算符, U 为电压, L 为电感,忽略光场的输入噪声和微波谐振器的输入噪声的情况下,在时间 t 上的光学模式和微波模式为

$$\hat{a}_o(t) = \exp(pt) [\cos(qt) \hat{a}_o(0) + i \sin(qt) \hat{a}_w(0)], \quad (7)$$

$$\hat{a}_w(t) = \exp(pt) [\cos(qt) \hat{a}_w(0) + i \sin(qt) \hat{a}_o(0)]. \quad (8)$$

为方便运算,令 $p = -\frac{1}{4}(\kappa_o + \kappa_w)$, $q =$

$\sqrt{G^2 - \frac{1}{16}(\kappa_o + \kappa_w)^2}$, 当 $t = \pi / (2q)$ 时,得到

$$\hat{a}_o[t = \pi / (2q)] = i \exp[\pi p / (2q)] \hat{a}_w(0), \quad (9)$$

$$\hat{a}_w[t = \pi / (2q)] = i \exp[\pi p / (2q)] \hat{a}_o(0). \quad (10)$$

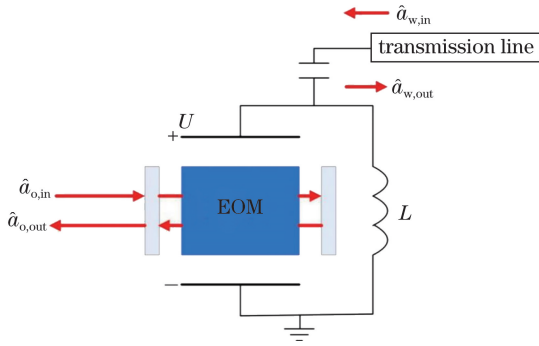


图 3 腔电光力谐振器耦合微波和光的系统框图

Fig. 3 Diagram of cavity electro-opto-mechanical modulator coupled microwave and optics

该系统可以实现光腔和微波腔的完全量子态转移过程,转移效率由有效耦合强度 $G(G = \sqrt{G_o^2 - G_w^2})$ 和耗散速率 κ_o, κ_w 同时决定,特别地,当 $\kappa_o = \kappa_w = 0$ 时,有

$$\hat{a}_o[t = \pi/(2G)] = i\hat{a}_w(0), \quad (11)$$

$$\hat{a}_w[t = \pi/(2G)] = i\hat{a}_o(0). \quad (12)$$

研究发现,微波腔和力学谐振子间的耦合与光腔和力学谐振子间的耦合是负相关的。如果只增大光腔和力学谐振子之间的耦合,必将导致微波腔和力学谐振子之间的耦合减小,最终不能实现光与微波之间的转换。并且温度的增加,会使转换器中噪声增加,导致力学谐振子的质量增加,这将使整个转换器组件之间纠缠减小^[25]。所以,电光量子态转换器中力学谐振子的质量要尽量小,转换器的环境温度不能过高,输入的光功率和微波功率同样不能过大,才能以较高效率实现转移过程。

3 微波测量方案的分析

3.1 微波与光量子态的相互转换过程

微波量子态的测量方案是调节微波和光波谐振腔的驱动失谐量,使之与机械振子频率共振,诱导分束器相互作用同时耦合微波腔和光腔,实现微波信号与光波信号之间的转换^[14]。已有相关实验和理论在该系统中实现绝热转移技术耦合微波和光频域信号^[26-28]。图 4 为出光腔和微波腔失谐量变化量 Δ_o, Δ_w 和正常模式输入、输出关系。

谱线图显示了不同频率 $\omega_j (j = o, w, M)$ 随着光和微波失谐量的变化。虚线代表光(photon a)、微波(microwave b)、声子(phonon c)模式没有耦合的情况。实线代表粒子模式 A、B、C 随光失谐量 Δ_o 的变化,机械振荡器的位置为同时改变微波共振和光学共振的共振频率。当处于机械共振, $\Delta_o = -\omega_M$

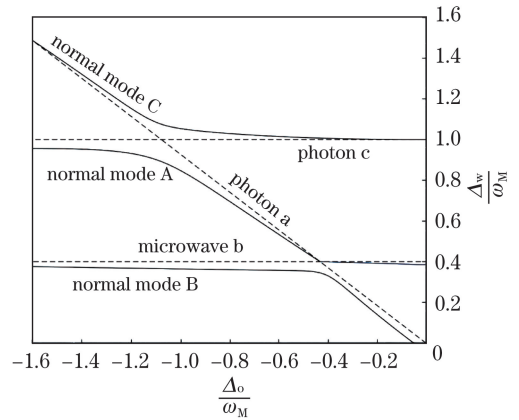


图 4 光和微波腔失谐量变化量 Δ_o, Δ_w 与正常模式关系
Fig. 4 Relationship between optics and microwave cavity detuning variations Δ_o, Δ_w and normal mode

时,光子通过光力相互作用吸收声子,使能量与共振频率相等,形成共振相互作用^[29];当光与微波之间共振即 $\Delta_o = \Delta_w$ 时,机械模式中电磁模式之间间接耦合产生临界交叉点。

当共振时, Δ_o 从左向右缓慢转换,模式 B 从微波激发态演化为类光激发态,同时模式 A 从类光激发态演化为微波激发态,而模式 C 始终保持声子激发态。通过适当地调节驱动失谐量,可以交换绝对频率不同但具有相同频率差的微波光子。为了保证绝热转换,转换时间 τ' 也必须满足一定要求^[28]: $\kappa_j \ll 1/\tau' \ll 4 |G_o G_w| / \omega_M$, 否则会使腔场损耗变得严重。实验上通过综合边带冷却技术和低温预冷技术来降低热机械振子和光子影响,即可显著提高混合腔中量子态的转换效率。

3.2 腔内耗散和热声子数对保真度的影响

在考虑腔耗散的情况下,在 t 时间内密度算符为

$$\frac{d}{dt}\hat{\rho}(t) = \frac{1}{i\hbar}[\hat{H}, \hat{\rho}(t)] + D\hat{\rho}(t), \quad (13)$$

$$D\hat{\rho}(t) = \gamma_M \bar{n}_{th} (2\hat{b}^+ \hat{\rho} \hat{b} - \hat{b} \hat{b}^+ \hat{\rho} - \hat{\rho} \hat{b} \hat{b}^+) + \kappa_o N_o (2\hat{a}_o^+ \hat{\rho} \hat{a}_o - \hat{a}_o \hat{a}_o^+ \hat{\rho} - \hat{\rho} \hat{a}_o \hat{a}_o^+) + \kappa_w N_w (2\hat{a}_w^+ \hat{\rho} \hat{a}_w - \hat{a}_w \hat{a}_w^+ \hat{\rho} - \hat{\rho} \hat{a}_w \hat{a}_w^+), \quad (14)$$

式中: D 为腔内耗散算符; $\hat{\rho}(t)$ 为系统 t 时间的密度算符; $\bar{n}_{th} = \{\exp[\hbar\omega_M/(k_B T)] - 1\}^{-1}$ 为平均热声子数。密度矩阵在时间演化下会对腔内量子特性产生影响。而保真度是量子态信息在传输过程中保持原来状态的程度,其定义为

$$F(\rho_1, \rho_2) = [\text{tr}(\rho_1^{\frac{1}{2}} \rho_2 \rho_1^{\frac{1}{2}})]^2, \quad (15)$$

式中, ρ_1, ρ_2 为初、末态腔与振子作用的密度算符。在一定时间内,系统的态函数能够很好地被密度算

符描述,对于高斯态,保真度可以通过 t 时刻的特征函数得到约化的协方差矩阵。

图 5 为在一定腔耗散率和温度的情况下,数值模拟腔内转换保真度 F 的变化曲线。

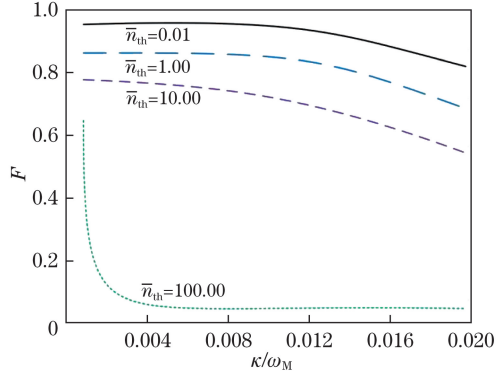


图 5 在不同热声子数的情况下转换保真度随腔耗散的曲线
Fig. 5 Curves of conversion of fidelity with cavity dissipation under different thermal phonons

随着腔内耗散的增加,热声子数很小时,由光子转换为微波态具有较高平稳的保真度,实曲线是在腔内处于基态冷却下, $\bar{n}_{\text{th}}=0.01$ 的理论曲线。但当 $\kappa \approx 0.01\omega_M$ 时,保真度缓慢下降,因为足够大的腔耗散速率会影响共振点位置,显著降低了量子态映射的保真度。平均热声子数对保真度转换也具有较大影响,可以看出在平均热声子数较大时($\bar{n}_{\text{th}}=100$),保真度下降很快。所以实验过程中须尽可能将机械振子冷却至低温,并且要相应控制体系低耗散系数 κ 在 $0.01\omega_M$ 以下,才能实现共振条件 $\Delta_j = \pm\omega_M$,保证高保真度量态转换,进而在探测中实现光频域的高准确度。

实验中采用稀释制冷机使得腔内机械振子冷却至 $T \approx 25 \text{ mK}$ ^[26],利用高热稳定性光学 F-P 腔实现对高精度光学腔温度的精确控制 ($\Delta T \approx \pm 4 \text{ mK}$)^[30],并且利用回音壁光学谐振器使精度提高两个数量级,这可以使该谐振器的光学精密性接近 10^6 ^[31]。

3.3 腔电光系统最佳相位灵敏度检测

图 6 为移动力学振子在不同相位和振幅下的驱动模型, L_0 为无驱动光时左右腔的长度。在没有外部驱动场输入时,力学振子处于中间平衡位置 ($x=0$, x 为振子位移量)。当探测场从系统左右两侧驱动该系统后,由光腔的输入、输出关系得出输出场与腔膜的关系^[32-33]:

$$E_{w,\text{out}} + E_w \exp(-ixt) = 2\kappa_w \langle \delta \hat{a}_w \rangle, \quad (16)$$

$$E_{o,\text{out}} + E_o \exp(i\phi) \exp(-ixt) = 2\kappa_o \langle \delta \hat{a}_o \rangle, \quad (17)$$

式中, $\delta \hat{a}_j$ 为微波或光湮灭算符的微小变量, $\langle \rangle$ 为均值符号, $E_{w,\text{out}}$ 、 $E_{o,\text{out}}$ 分别为输出光和微波振幅, ϕ 为左右两侧驱动场的相对相位。

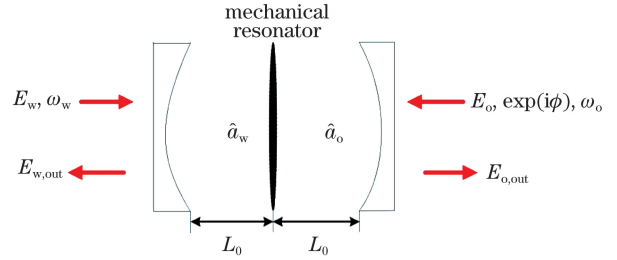


图 6 机械振子在不同相位驱动场移动模型

Fig. 6 Model of mechanical oscillator in different phase driving fields

两探测场从左右两侧驱动腔电光系统,其振幅分别定义为 $E_w = \sqrt{2\kappa_w P_w / \hbar \omega_w}$, $E_o = \sqrt{2\kappa_o P_o / \hbar \omega_o}$, P_j 为驱动场功率。

在输出 EOM 右端探测到 n 个光子时,探测 EOM 左端 m 个光子的概率,规定符合计数联合概率计算公式^[34]为

$$P(n, m | \phi) = \langle n, m | \hat{\rho}(\phi) | n, m \rangle = \frac{\exp(-N)}{n! m!} (N \sin^2 \phi)^n (N \cos^2 \phi)^m, \quad (18)$$

式中, $N = \alpha^2$ 为平均光子数。规定探测光场的正交分量 $E_T = 0$ 的测量结果标为“+”, $E_T \neq 0$ 的测量结果标为“-”。观测量算符表示为

$$\hat{\mu} = \sum_{i=\pm} \hat{\mu}_i \hat{E}_i = \mu_+ | \mu_+ \rangle \langle \mu_+ | + \mu_- | \mu_- \rangle \langle \mu_- |, \quad (19)$$

式中: $\hat{\mu}_i$ 为双输出量子态的厄米算符; \hat{E}_i 为双输出算符的正交本征态; μ_+ 、 μ_- 分别为双输出量子态的投影测量结果。

信号的方差为

$$(\Delta \hat{\mu})^2 = \langle \hat{\mu}^2 \rangle - \langle \hat{\mu} \rangle^2 = (\mu_+ - \mu_-)^2 P(+ | \phi) P(- | \phi), \quad (20)$$

式中, $P(\pm | \phi)$ 为相应概率密度函数。可得到相应输出信号为^[35]

$$\langle \hat{\mu}_+ | \phi \rangle = P(+ | \phi) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp(-N \sin^2 \phi / 2). \quad (21)$$

图 7 为通过控制驱动场的相对振幅 $l = E_w / E_o$ 来进行符合测量检测输出信号的相位灵敏度。实线为相对振幅理想时 ($l = 1.0$) 的相位灵敏度,虚线 ($l = 0.5$) 和点划线 ($l = 1.5$) 为光子在暗计数实验中依概率密度接收到的实际相位灵敏度。

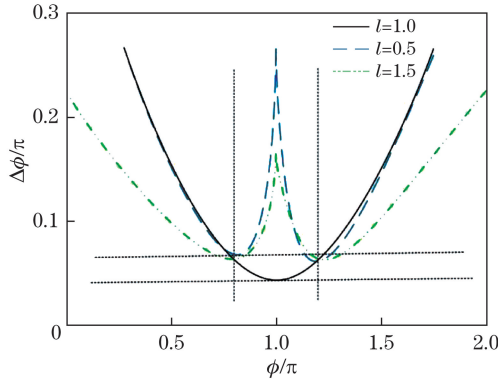


图 7 符合测量时相位灵敏度与驱动场振幅 l 关系曲线
Fig. 7 Phase sensitivity versus amplitude l of driving field when conducting coincidence measurements

垂直细虚线为符合计数能达到的最佳相位点的位置,水平细虚线为能达到的最佳相位灵敏度范围。可以看出,使探测场出现完美的透明窗口,即探测场的相对相位 $\phi = \pi$ 以及振幅之比恰好等于左右驱动场振幅时,输出端可检测到最佳相位灵敏度。实验发现随着驱动场振幅比值 l 的增大,光力诱导透明窗口的宽度增加,干涉条纹变宽。

实验中相位灵敏度在理论预测的最佳相位工作点处出现了发散行为,这些现象主要是由实验中的暗计数以及背景噪声导致的不完美可见度引起的^[36-37]。

考虑 $\phi = \pi$, 输出信号为

$$\langle \hat{\mu}_+(\phi) \rangle = P(+|\phi) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp(-N \sin^2 \phi / 2) \approx \exp(-N \phi^2 / 2). \quad (22)$$

利用误差传递公式,可以获得符合测量下在相位点 $\phi \approx \pi$ 处最优相位灵敏度为

$$\Delta \phi_{\min} = \langle \Delta \hat{\mu} \rangle \left/ \left| \frac{\partial \mu}{\partial \phi} \right| \right. = \frac{\left[\sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left(\frac{N}{2} \sin^2 \phi_{\min}\right) - 1 \right]^{\frac{1}{2}}}{|N \cos \phi_{\min}|^{\frac{1}{2}}} \approx \frac{\left(\sqrt{\frac{e\pi}{2}} - 1 \right)^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{N}} = 1.03 / \sqrt{N}, \quad (23)$$

式中, $\Delta \phi_{\min}$ 为最优相位灵敏度, ϕ_{\min} 为最优相位。

因为在 $\phi \rightarrow \pi$ 时,通过高分辨测量,得到的信号涨落很小,在该点斜率趋近于 0 时,使得 $\phi \approx \pi$ 的 $\Delta \phi$ 为一个极值,通过增大探测器量子效率可实现最优相位灵敏度为 $1.03 / \sqrt{N}$,当 N 足够大,并将腔内振子冷却使得耗散速率足够小时,解析得到的相

位灵敏度与数值计算得到的相位灵敏度一致。

综上,腔电光力系统的量子态转换率达到理论值时,通过腔内基态冷却计数使得体系耗散系数控制在 $\kappa \ll 0.01 \omega_M$,并控制左右侧输入场的幅度和相位特性以最优相位灵敏度 $0.04\pi \sim 0.07\pi$ 进行测量,代入 $\Delta \phi = 2\pi v \Delta \tau / \lambda$ 进行计算,同步精度可达皮秒量级,对罗兰 C 系统的台间同步较原有指标有明显改善。

4 结 论

提出对提高罗兰 C 台间同步精度的改进方案,通过腔电光力系统,调节谐振腔驱动失谐量可实现微波量子电路和光频光子间的量子信息交换。分析了对弱微波信号转换为光场进行量子态符合光子计数的条件,以及失谐量对其转换的影响,并对保真度随腔内耗散和热声子数的变化及相位灵敏度随输入场的相对幅度和相位特性的变化关系进行仿真。结果表明,控制腔内耗散在 $\kappa \ll 0.01 \omega_M$ 内,并在左右驱动场相对相位为 π 以及强度相等时测量,获得 $0.04\pi \sim 0.07\pi$ 的理论相位灵敏度,在此精度下能将同步精度提高到皮秒量级,较原有方案实现了更具潜力和更高精度的检测能力,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] Liu X T, Hu A P. Research on application extension of long wave navigation system[J]. Modern Navigation, 2013, 4(2): 116-119.
刘辛涛, 胡安平. 长波导航系统拓展应用研究[J]. 现代导航, 2013, 4(2): 116-119.
- [4] 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.
- [5] Giovannetti V, Lloyd S, MacCone L. Quantum-enhanced positioning and clock synchronization [J]. *Nature*, 2001, 412(6845): 417-419.
- [6] Song P S, Ma J, Ma Z, *et al.* Research and development status of quantum navigation technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 090003.
- 宋培帅, 马静, 马哲, 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.
- [7] Giovannetti V, Lloyd S, MacCone L, *et al.* Clock synchronization with dispersion cancellation[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(11): 117902.
- [8] Giovannetti V, Lloyd S, MacCone L, *et al.* Conveyor-belt clock synchronization[J]. *Physical Review A*, 2004, 70(4): 043808.
- [9] Valencia A, Scarcelli G, Shih Y. Distant clock synchronization using entangled photon pairs[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(13): 2655-2657.
- [10] 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.
- [11] Bahder T B, Golding W M. Clock synchronization based on second-order coherence of entangled photons [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 734: 395-398.
- [12] Wu D W, Li X, Yang C Y, *et al.* Progress of dual-path quantum entanglement microwave signals based on superconducting Josephson junction [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2017, 34(1): 1-8.
- 吴德伟, 李响, 杨春燕, 等. 基于超导约瑟夫森结的双路径量子纠缠微波信号研究进展[J]. *量子电子学报*, 2017, 34(1): 1-8.
- [13] 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.
- [14] Chen X, Liu X W, Zhang K Y, *et al.* Quantum measurement with cavity optomechanical systems [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(16): 164211.
- 陈雪, 刘晓威, 张可焯, 等. 腔光力学系统中的量子测量[J]. *物理学报*, 2015, 64(16): 164211.
- [15] Fiore V, Yang Y, Kuzyk M C, *et al.* Storing optical information as a mechanical excitation in a silica optomechanical resonator [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(13): 133601.
- [16] Wang Y D, Clerk A A. Using interference for high fidelity quantum state transfer in optomechanics [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(15): 153603.
- [17] Chen C, Wu D W, Yang C Y, *et al.* Method for improving Roland C inter-station synchronization precision using continuous-variable entanglement signals[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 042702.
- 陈超, 吴德伟, 杨春燕, 等. 利用连续变量纠缠信号提高罗兰 C 台间同步精度的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 042702.
- [18] Xie H. The quantum coherence control based on cavity optomechanical system [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2017: 47-59.
- 谢鸿. 基于腔光力系统的量子相干操控 [D]. 福州: 福建师范大学, 2017: 47-59.
- [19] Zhu X L. Theoretical research on some quantum optical phenomena in an optomechanical system assisted by microwave [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018: 12-25.
- 朱小霖. 微波腔光力系统中量子光学效应的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2018: 12-25.
- [20] Liu Y. Research on the generation of non-classical microwave states in cavity optomechanical systems [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2016: 62-87.
- 刘艳. 在腔光力系统中实现微波非经典态的研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2016: 62-87.
- [21] Barzanjeh S, Guha S, Weedbrook C, *et al.* Microwave quantum illumination [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(8): 080503.
- [22] Zhang D, Li C B, Zhang Z Y, *et al.* Enhanced intensity-difference squeezing via energy-level modulations in hot atomic media [J]. *Physical Review A*, 2017, 96(4): 043847.
- [23] Li C B, Jiang Z H, Zhang Y Q, *et al.* Controlled correlation and squeezing in $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ to yield correlated light beams [J]. *Physical Review Applied*, 2017, 7(1): 014023.
- [24] Huang S M. Quantum state transfer in cavity electro-optic modulators [J]. *Physical Review A*, 2015, 92(4): 043845.
- [25] Zhang P J. Investigation on the theory of quantum illumination with applications in radar target detection [D]. Chendu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017: 24-64.
- 张鹏举. 量子照明在雷达目标探测中的应用研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017: 24-64.
- [26] O'Connell A D, Hofheinz M, Ansmann M, *et al.* Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator [J]. *Nature*, 2010, 464(7289): 697-703.

- [27] Mari A, Eisert J. Gently modulating optomechanical systems[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(21): 213603.
- [28] Zhang K Y, Bariani F, Dong Y, *et al.* Proposal for an optomechanical microwave sensor at the subphoton level[J]. Physical Review Letters, 2015, 114(11): 113601.
- [29] Gu W J. Ground-state cooling of the mechanical oscillator and preparation of nonclassical states in cavity optomechanical systems[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2014: 32-42.
谷文举. 腔光力系统中振子的冷却及非经典态的制备[D]. 武汉: 华中师范大学, 2014: 32-42.
- [30] Wang X C, Li S K, Li G, *et al.* Optical Fabry-Pérot cavity system with high thermal stability and high finesse[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0112004.
王兴昌, 李少康, 李刚, 等. 高热稳定性高精度光学法布里-珀罗腔系统[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0112004.
- [31] Grudinin I S, Ilchenko V S, Maleki L. Ultrahigh optical Q factors of crystalline resonators in the linear regime[J]. Physical Review A, 2006, 74(6): 063806.
- [32] Yan X B, Cui C L, Gu K H, *et al.* Coherent perfect absorption, transmission, and synthesis in a double-cavity optomechanical system[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 4886-1895.
- [33] Yan X B. Studies on coherent control and potential applications of double-cavity optomechanical systems[D]. Changchun: Jilin University, 2014: 84-96.
严晓波. 双腔光力学系统的相干控制与潜在应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014: 84-96.
- [34] Feng X M, Jin G R, Yang W. Quantum interferometry with binary-outcome measurements in the presence of phase diffusion[J]. Physical Review A, 2014, 90(1): 013807.
- [35] Liu P, Feng X M, Jin G R. Quantum entanglement of an entangled coherent state: role of particle losses[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(3): 030310.
- [36] Feng X M. Phase measurements and numerical simulations based on quantum optical interferometry[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016: 59-68.
冯晓敏. 基于光量子干涉的相位测量及数值模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2016: 59-68.
- [37] Shao M M. Dual output quantum phase measurement[J]. China Science and Technology Information, 2018(9): 93-96.
邵蒙蒙. 双输出量子相位测量[J]. 中国科技信息, 2018(9): 93-96.