

利用腔电光力系统提高罗兰 C 授时能力研究

赵露涵, 杨春燕*, 魏天丽, 吴德伟, 刘勇飞, 任钊恒

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

摘要 罗兰 C 系统受原子钟以及经典无线电信号测量精度的影响, 难以为用户提供高精度授时。提出了一种基于杂化微波-光纠缠的罗兰 C 系统授时方案, 通过腔电光力转换器制备纠缠微波-光信号, 并利用纠缠信号的二阶相干函数得到信号传播时间, 根据授时时序关系修正用户本地钟时刻并完成授时。仿真分析了腔电光力转换器的参数对授时精度的影响。所提方案在理论上实现了对罗兰 C 系统授时精度的提高, 在抗压制干扰、欺骗干扰等方面都具有一定优势。

关键词 量子光学; 罗兰 C 授时系统; 腔电光力系统; 授时精度; 杂化微波-光纠缠信号

中图分类号 O431.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2227001

Improving Timing Ability of Loran C by Electro-Opto-Mechanical Converter System

Zhao Luhan, Yang Chunyan*, Wei Tianli, Wu Dewei, Liu Yongfei, Ren Zhaoheng

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

Abstract Due to the influences of atomic clock and classical radio signal measurement accuracy, Loran C system is difficult to provide high-precision timing for users. In this paper, a microwave-optical entangled timing scheme used in Loran C system is proposed. The entangled microwave-optical signal is firstly prepared by the electro-opto-mechanical converter, then the signal propagation time is obtained by the second-order coherence function of the entangled signal, and finally the local clock time for users is corrected based on the timing sequence relationship and the timing is realized. The influence of electro-opto-mechanical converter parameters on timing accuracy is simulated and analyzed. The proposed scheme theoretically improves the timing accuracy of Loran C system, and has certain advantages in resisting suppression interference and deception interference.

Key words quantum optics; Loran C timing system; cavity electro-opto-mechanical system; timing accuracy; hybrid microwave-optical entanglement signal

OCIS codes 270.5570; 270.5585

1 引言

位置和时间是科技进步、社会发展所需的最重要的基础性信息, 无论是在生活中还是在作战场景下, PNT(Positioning, Navigation and Timing)体系都有着重要的地位与作用^[1]。卫星导航作为最主要的无线电导航手段, 具有全时段、全覆盖、全方位以及高精度的优势, 但是卫星导航系统存在抗干扰能

力低, 在复杂的电磁环境下会出现故障或遭到破坏等缺陷。使用卫星作为唯一的导航手段是不可靠的, 为了建立完整的 PNT 体系, 需要信号功率大、覆盖范围广、不易受到干扰与破坏的陆基导航系统^[2]。

罗兰 C 系统是陆基低频无线电导航系统, 具有微波信号天然抗衰减能力与远距离传输能力, 是卫星导航系统重要的补充手段^[3]。授时是罗兰 C 系

收稿日期: 2021-04-14; 修回日期: 2021-05-23; 录用日期: 2021-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(62073338)

通信作者: *ycy220@163.com

统主要的功能之一,传统罗兰 C 系统是依靠原子钟来建立稳定的时频系统,而增强罗兰 C 时频系统则是通过增加卫星共视手段、卫星双向时间传递方式等手段,将本地时钟信号溯源至 UTC(Coordinated Universal Time)标准时间^[4-5],在一定程度上提高了定位授时精度。但是受经典无线电信号脉冲测量精度的制约以及无法突破信号发射功率等限制,利用罗兰 C 系统实现远距离高精度的授时仍存在一定困难。针对军民领域对时间基准信号的迫切需求,设计高精度、稳定可靠的罗兰 C 授时系统具有重要意义。

近年来,关于腔光机械系统的研究逐渐深入,它的优势是可以将微波与光波结合起来使用,其器件被称为电光机械转换器^[6-7]。Andrews 等^[8]利用腔电光力转换器在 4 K 的温度下实现了微波-光的双向转换能力,提供了一种制备微波非经典量子态的方法。Barzanjeh 等^[9]提出了基于双腔电光力转换器的量子照明方案,证明微波波段的信号比光波更适用于目标检测,这启发我们将这种微波-光纠缠信号用于导航器件中以获得更好的性能。陈超等^[10]利用纠缠微波信号提高了罗兰 C 系统的时间同步精度,在理论上将时间同步精度提升至 ps 级。

本文提出了一种基于杂化纠缠微波-光信号的授时方案,使用腔电光力转换器制备与探测杂化纠缠微波-光信号。使用三个腔电光力转换器,其中两个置于主台,分别用于发射和接收杂化微波,另一个置于用户端,用于探测微波信号的到达时间。最后利用两路光信号进行二阶关联检测以求出传播时间。根据罗兰 C 系统授时的时序关系进行准确授时,授时精度得到提高,系统具有一定的抗人为干扰的能力。

2 罗兰 C 授时系统的基本原理

目前,在某些特定区域或情况下,卫星导航系统可能会受到干扰和破坏,建立完整的 PNT 体系是十分必要的。罗兰 C 系统是 PNT 体系中的重要组成部分,它可以独立完成导航、定位和授时等任务。在卫星导航系统无法精确授时的情况下,罗兰 C 系统可以在一定范围内进行弥补与备份。

罗兰 C 时频系统主要包括罗兰 C 授时系统以及授时监测系统,其中授时系统主要包括主台、副台及用户系统,授时台通常为主台。以下对罗兰 C 系统的授时原理以及时序关系进行分析。

2.1 罗兰 C 授时系统的时序关系分析

图 1 所示为用户或副台利用授时台获取精确时间的时序关系图^[11-12],设定罗兰 C 系统的主台为授时台站。 t_0 为主台发射时刻(Time of transmitting, TOT)与授时基准时间的偏差,设定此时主台信号已受频率监测站实时调整,主台信号已准确调整为授时基准时间(UTC 秒时刻); τ 是罗兰 C 授时台发射的信号传输至副台或用户的时间,对于移动中的用户,该时间事先未知,而 τ 的测量精度直接影响整个系统的授时精度; t_L 为用户或副台的本地时间基准信号 T' 与用户接收机接收时刻 T_B 之间的时间间隔;将 $t_0 + \tau$ 传递至用户,用户就可以得到本地基准时间与授时基准时间的时钟差 Δt ,即

$$\Delta t = t_0 + \tau - t_L. \quad (1)$$

用户调整本地基准时间,使 Δt 为零,即可准确完成授时。

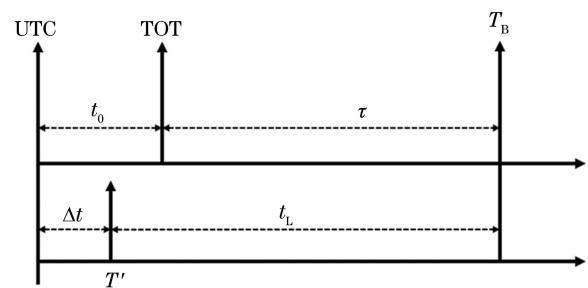


图 1 授时系统的时序关系图

Fig. 1 Time sequence diagram of timing system

2.2 罗兰 C 系统的授时原理

图 2 为增强罗兰 C 系统的授时组成原理框图,传统罗兰 C 系统的设备有原子钟、定时器以及发射机,新增设备主要有分频钟、溯源设备、编码形成设备、数据调制单元等。分频钟建立罗兰 C 授时台的本地时间。溯源设备主要用于获取 UTC 时间,以便将罗兰 C 授时台的本地时间溯源到 UTC 时间上。溯源手段可以采用卫星共视方式、卫星双向时间传递方式或其他溯源方式,图 2 中采用的是卫星共视比对方式。计数器测量授时台的本地时间与罗兰脉冲发射时刻的时间偏差。编码形成设备根据共视比对偏差、同步偏差和分频钟时间信息,形成罗兰授时信息,并送给数据调制单元。发射机根据数据调制单元的授时电文控制信号,产生罗兰 C 授时信号,通过发射天线向副台或用户发送。

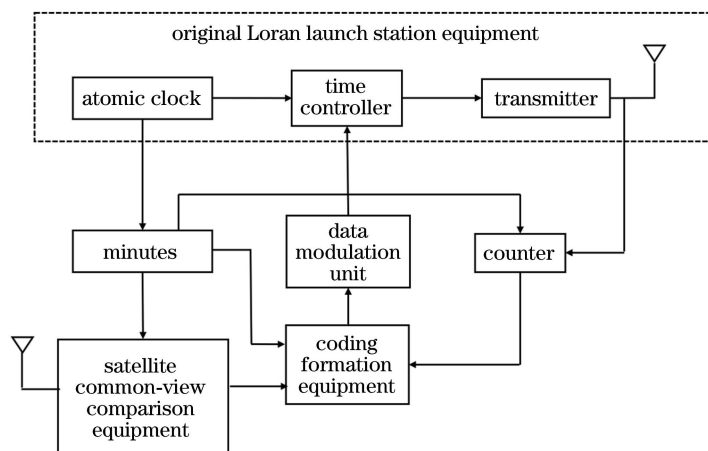


图 2 罗兰 C 系统的授时原理

Fig. 2 Timing principle of Loran C system

3 基于腔电光力系统的罗兰 C 系统的授时方案及分析

3.1 罗兰 C 系统的授时方案

罗兰 C 主副台的授时系统组成如图 3 所示,其中 \hat{C}_M 表示微波腔的腔模, \hat{C}_c 表示光腔的腔模, \hat{m} 表示机械振子模, \hat{O} 表示腔电光力转换器 A 输出的杂化纠缠光信号, \hat{O}_R 表示腔电光力转换器 B 输出的杂化纠缠光信号。分频钟根据铯原子频标输出的标准频率信号建立罗兰 C 发射台的本地时间基准,分频钟产生的信号需要同时传递至频率监测站进行基准信号的对准。溯源设备用于获取监测信号。时间比对单元将主台本地时间调整至 UTC 时间上。编码形成单元用来形成分频钟时间信息、溯源比对偏差以及发射同步偏差等信息。罗兰 C 系统授时起点定义在主台发射第一个脉冲组的时刻,但实际

发射的脉冲组与理论存在一些偏差,即发射同步偏差。定时器根据该同步偏差控制发射时间。主台通过定时器在 TOT 处将腔电光力转换器制备的杂化纠缠微波信号 \hat{M} (\hat{M} 为在自由空间中传输的微波信号) 发送至自由空间中,制备的杂化纠缠光信号保留在主台,副台或用户的腔电光力系统探测到 \hat{M} 后反射一部分纠缠微波信号 \hat{M}_R (\hat{M}_R 为携带量子信息的微波信号) 至主台,再将微波信号 \hat{M}_R 通过腔电光力转换器转换为光信号,将两路光信号进行符合关联检测,最后可得出主台至用户的微波信号传播时间为 τ 。计数器形成 $t_0 + \tau$ 的时间信息。发射机通过发射经典微波信号 \hat{M}_D , 将该时间信息传递至副台。用户授时系统的计数器测量计算本地基准时间与授时基准时间时钟差 Δt 。调节器调整 $\Delta t = 0$, 完成授时。

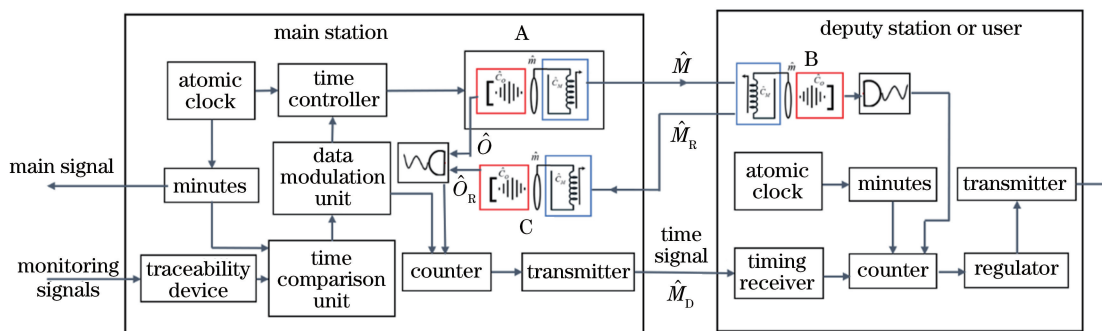


图 3 罗兰 C 授时方案示意图

Fig. 3 Block diagram of Loran C timing scheme

3.2 量子分束器模型

本文研究对象中的信号主要是在自由空间中传播,微波信号在自由空间中传输会受到空气对流活

动的影 响,精确完整地分析复杂天气对纠缠微波信号的影响存在困难,因此建立量子分束器模型进行分析的方法简洁有效并具有相对普适性。

将微波信号在自由空间中的传播损耗以及噪声的影响统一在分束器模型中,如图 4 所示。其中, \hat{C}_u 为噪声信号, \hat{M} 和 \hat{C}_u 为分束器模型的输入; \hat{M}_{loss} 为微波传输过程中吸收、散射损耗的部分信号, \hat{M}_R 和 \hat{M}_{loss} 为分束器的输出。设该分束器的透射系数为 η , 室温恒定为 T , 四束微波的振幅与相位分别为 $(\hat{M}_1, \phi_1), (\hat{C}_u, \phi_u), (\hat{M}_R, \phi_R), (\hat{M}_{\text{loss}}, \phi_{\text{loss}})$, 则有

$$\hat{M}_R = \sqrt{\eta} \hat{M}_1 \exp(i\phi_{1,R}) + \sqrt{1-\eta} \hat{C}_u \exp(i\phi_{u,R}), \quad (2)$$

$$\hat{M}_{\text{loss}} = \sqrt{1-\eta} \hat{M}_1 \exp(i\phi_{1,\text{loss}}) + \sqrt{\eta} \hat{C}_u \exp(i\phi_{u,\text{loss}}), \quad (3)$$

式中: $\phi_{1,R}$ 为 \hat{M}_R 的相位; $\phi_{u,R}$ 为 \hat{C}_u 的相位; $\phi_{1,\text{loss}}$ 为 \hat{M}_{loss} 的相位; $\phi_{u,\text{loss}}$ 为噪声信号在自由空间中传输后的相位。

需要满足的能量守恒条件为

$$|\hat{M}_1|^2 + |\hat{M}_{\text{loss}}|^2 = |\hat{M}_R|^2 + |\hat{C}_u|^2, \quad (4)$$

那么要求

$$\exp[i(\phi_{1,R} - \phi_{u,R})] + \exp[i(\phi_{1,\text{loss}} - \phi_{u,\text{loss}})] = 0, \quad (5)$$

因此

$$\hat{M}_R = \sqrt{\eta} \hat{M}_1 + \sqrt{1-\eta} \hat{C}_u, \quad (6)$$

$$\hat{M}_{\text{loss}} = \sqrt{1-\eta} \hat{M}_1 - \sqrt{\eta} \hat{C}_u. \quad (7)$$

方案中重点关注的是透射的微波信号 \hat{M}_R , 对已经散射到自由空间中的信号 \hat{M}_{loss} 不予关注。若自由空间温度设为 T_u , 那么噪声信号 \hat{C}_u 的平均光子数可以由普朗克定律得出:

$$\bar{n}_u = \frac{1}{\exp(\hbar\omega_M/k_B T_u) - 1}, \quad (8)$$

式中: k_B 为玻尔兹曼常数; \hbar 为普朗克常数; ω_M 为微波信号与噪声信号的频率。

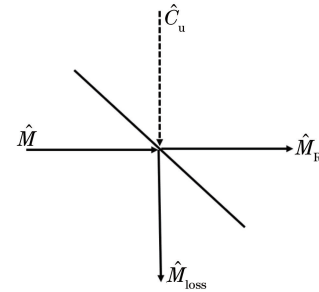


图 4 微波信号在自由空间中传输的分束器模型

Fig. 4 Beam splitter model of microwave signal transmission in free space

3.3 基于腔电光力转换器的杂化微波-光的制备与探测

腔电光力转换器是将一个微波腔模(频率为 ω_w , 衰减率为 κ_M)与一个光腔模(频率为 ω_o , 衰减率为 κ_o)通过一个机械振子(频率为 ω_m , 衰减率为 γ)耦合起来。左侧施加微波驱动场 $R_{d,M}$, 右侧施加光波驱动场 $R_{d,O}$, 发生相互作用后, 腔电光力转换器内部达到平衡状态, 光-声能量相互转换亦到达平衡。腔模可表示为稳态振幅以及腔内噪声: $\hat{C}_j = C_j + \delta\hat{C}_j, j = M, O$, 其中, \hat{C}_j 为腔模。稳态振幅为 $C_j = |E_j|^2 / (\kappa_j^2 + \Delta_j^2)$, 式中: E_j 为泵浦强度; κ_j 为耗散速率; Δ_j 为腔频率失谐量, $\Delta_j = \omega_j - \omega_{d,j}$, 其中, ω_j 为腔频率, $\omega_{d,j}$ 为驱动场频率。当腔频率失谐量满足 $\Delta_j = \omega_m$ 时, 腔模与机械振子模实现态转移, 当腔频率失谐量满足 $\Delta_j = -\omega_m$ 时, 腔模与机械振子模实现连续变量的双模压缩过程, 其中, ω_m 为机械振子频率。表 1 为腔电光力转换器的参数^[13], 其中 Q 为机械振子的品质因数。

表 1 腔电光力转换器中的参数表示

Table 1 Specifications of main parameters in cavity electro-opto-mechanical converter

Parameter	Microwave cavity	Mechanical oscillator	Optical cavity
Cavity/vibration mode	\hat{C}_M	\hat{m}	\hat{C}_O
Frequency of cavity/vibration mode	ω_M	ω_m	ω_o
Damping rate	$\kappa_M = 0.2\omega_m$	$\gamma = \frac{\omega_m}{Q}$	$\kappa_O = 0.1\omega_m$
Driving field frequency	$\omega_{d,M}$	-	$\omega_{d,O}$
Frequency detuning	Δ_M	-	Δ_O
Pump power	$P_M = 35 \text{ mW}$	-	$P_O = 5 \text{ mW}$

泵浦强度为

$$|E_j| = \sqrt{\frac{2P_j\kappa_j}{\hbar\omega_{d,j}}}, \quad (10)$$

式中: P_j 为泵浦场功率。单个光子的耦合速率为 g_j , $g_j = \frac{\omega_M}{l_j} \sqrt{\frac{\hbar}{2m\omega_M}}$, 其中, l_j 为腔体的有效长度, m 为机械振子质量。因此腔模与机械振子之间的整体耦合速率 G_j 为

$$G_j = g_j \sqrt{C_j} = g_j \sqrt{\frac{|E_j|^2}{\kappa_j^2 + \Delta_j^2}} = \frac{\omega_M}{l_j} \sqrt{\frac{P_j\kappa_j}{m\omega_M\omega_{d,j}(\kappa_j^2 + \Delta_j^2)}}. \quad (11)$$

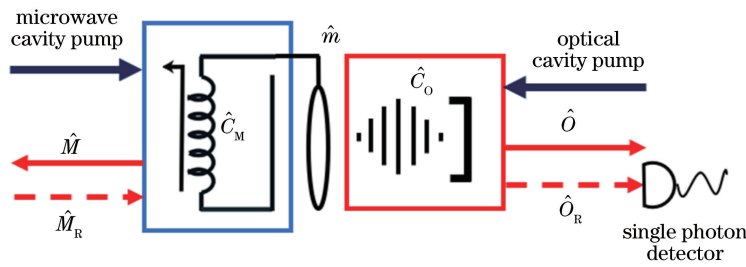


图 5 腔电光力系统的原理图

Fig. 5 Principle diagram of electro-opto-mechanical system

在微波腔和光腔的光电作用速率 G_j^2/κ_j 均大于机械振子退相干速率的条件下, 能量交换的过程才能实现, 腔模间的纠缠特性才能转移到微波 \hat{M} 和光波 \hat{O} 上, 进而系统输出的两者相互纠缠。根据量子-郎之万方程可得出纠缠微波-光的输出关系为

$$\hat{M} = A_M \delta\hat{C}_M - B \delta\hat{C}_O^\dagger - C_M \delta\hat{C}_m, \quad (13)$$

$$\hat{O} = B \delta\hat{C}_M^\dagger + A_O \delta\hat{C}_O - C_O \delta\hat{C}_m^\dagger, \quad (14)$$

式中: $\delta\hat{C}_j$ 为腔模内部的量子噪声; A_j 、 B 、 C_j 为与协同参数 $\Gamma_j = G_j^2/\kappa_j\gamma$ (γ 为机械振子的耗散速率) 有关的系数, 表达式^[15]为

$$A_M = \frac{1 - (\Gamma_M + \Gamma_O)}{1 + (\Gamma_M - \Gamma_O)}, \quad (15)$$

$$A_O = \frac{1 + (\Gamma_M + \Gamma_O)}{1 + (\Gamma_M - \Gamma_O)}, \quad (16)$$

$$B = \frac{2\sqrt{\Gamma_M\Gamma_O}}{1 + (\Gamma_M - \Gamma_O)}, \quad (17)$$

$$C_M = \frac{2i\sqrt{\Gamma_M}}{1 + (\Gamma_M - \Gamma_O)}, \quad (18)$$

$$C_O = \frac{2i\sqrt{\Gamma_O}}{1 + (\Gamma_M - \Gamma_O)}. \quad (19)$$

当两腔失谐量满足 $\Delta_O = \Delta_M = \omega_m$ 时, 微波腔与

当两腔失谐量满足 $\Delta_O = -\Delta_M = -\omega_m$ 时, 在两驱动场的作用下, 光模与机械振子模相互作用, 发生双模压缩, 形成纠缠, 再与微波腔相互作用, 完成态转移后, 产生两种输出形式, 如图 5 中实线所示, 完成杂化微波-光纠缠信号的制备^[14], 此时系统的哈密顿量表示为

$$H = \hbar G_O (\delta\hat{C}_O \hat{m}^\dagger + \delta\hat{C}_O^\dagger \hat{m}) + \hbar G_M (\delta\hat{C}_M \hat{m}^\dagger + \delta\hat{C}_M^\dagger \hat{m}), \quad (12)$$

式中: \hat{C}_O^\dagger 为光腔的产生算符; \hat{m}^\dagger 为机械振子的产生算符; \hat{C}_M^\dagger 为微波腔的产生算符。

光腔均处于量子态转移的模式, 微波光子入射到微波腔内形成腔模, 通过相互作用将能量转移给机械谐振腔, 再与光腔进行相互作用, 将能量转移到光子中, 形成稳定腔模, 从而完成对微波到光子的频段转移与探测, 如图 5 中虚线所示, 最终再对输出的光波进行单光子探测, 此时系统的哈密顿量可以表示为

$$H = \hbar G_M (\delta\hat{C}_M \hat{m}^\dagger + \hat{m} \delta\hat{C}_M^\dagger) + \hbar G_O (\delta\hat{C}_O \hat{m}^\dagger + \hat{m} \delta\hat{C}_O^\dagger), \quad (20)$$

输出的光波信号可表示为

$$\hat{O}_R = B\hat{M}_R^\dagger + A_O\delta\hat{C}_{OR} - C_O\delta\hat{C}_{mR}^\dagger, \quad (21)$$

式中: \hat{C}_{OR} 为腔电光力转换器 B 光腔中的热噪声光子; \hat{C}_{mR}^\dagger 为腔电光力转换器 B 机械振子中的热激发声子。

4 仿真分析

4.1 利用腔电光力系统解决授时问题的具体步骤

本小节主要以主台对用户系统授时为例, 描述腔电光力转换器在授时过程中的原理及主要作用。利用杂化纠缠微波-光信号进行授时的过程主要包括授时台以及用户两个部分。授时台通常为罗兰 C 系统的主台, 包括两个腔电光力转换器(A 和 C)、符

合探测终端以及天线等;用户这里设定为远距离用户或者飞行器,包括一个腔电光力转换器 B 以及单光子探测器等。其中,腔电光力转换器 A 处于杂化微波-光纠缠信号的制备模式,在这个模式下失谐量满足 $\Delta_o = -\Delta_M = -\omega_m$, B 与 C 的失谐量满足 $\Delta_o = \Delta_M = \omega_m$, 处于量子态转移模式,将微波信号转换为光信号再进行探测。方案具体步骤如下。

1) 在两泵浦场的驱动下, A 制备杂化微波-光纠缠信号,在 TOT 将微波信号 \hat{M} 通过天线发送至自由空间中,光信号 \hat{O} 保留在本地。发送信号时刻 TOT 与授时基准信号 UTC 秒时刻的时间间隔为 t_o 。

2) 微波信号 \hat{M} 在自由空间中传播,传播时间为 τ , B 探测到频率为 ω_m 的微波信号后接收一部分信号并将其转换为光信号,用户记录此时刻为 T_B ,此时与用户本地时间基准 T' 间的时间间隔为 t_L ,将 t_L 传递至计数器。与此同时反射另一部分信号 \hat{M}_R ,方案将被转换器 B 吸收的部分微波信号 \hat{M}_B 统一至分束器模型中,可表示为

$$\hat{M}_B = \sqrt{\eta_r} (\sqrt{\eta} \hat{M}_1 + \sqrt{1-\eta} \hat{C}_u), \quad (22)$$

式中: η_r 为 \hat{M}_B 占总散射信号的比值。

3) 主台的腔电光力转换器 C 将接收到的微波信号 \hat{M}_R 转换为光信号 \hat{O}_R ,对光信号 \hat{O}_R 与保留在本地的信号 \hat{O} 进行符合关联检测,可以得出双程传播时延 2τ ,进而得到单程传播时间 τ ,利用计数器计算 T_B 为

$$T_B = t_o + \tau. \quad (23)$$

4) 将 T_B 加载在经典微波信号 \hat{M}_D 上,再将 \hat{M}_D 传回用户得到结果。

5) 用户定时接收机收到微波信号 \hat{M}_D 后可立即得到 T_B ,那么用户本地基准时间与授时基准时间的时钟差为

$$\Delta t = T_B - t_L = t_o + \tau - t_L. \quad (24)$$

利用调节器调整本地时钟基准, $\Delta t = 0$,即完成授时工作。

在步骤 1) 中,设发射端的腔电光力转换器的工作温度为 T ,那么腔内各量子噪声的平均光子数可表示为

$$\begin{cases} \bar{n}_M = \frac{1}{\exp(\hbar\omega_M/k_B T) - 1} \\ \bar{n}_O = \frac{1}{\exp(\hbar\omega_O/k_B T) - 1} \\ \bar{n}_m = \frac{1}{\exp(\hbar\omega_m/k_B T) - 1} \end{cases}, \quad (25)$$

式中: \bar{n}_M 为微波腔腔模光子数; \bar{n}_O 为光波腔腔模光子数; \bar{n}_m 为机械振子腔的声子数。

主台发射端经过腔电光力转换器输出的微波信号与光信号的平均光子数可由腔内量子噪声的平均光子数表示为

$$\begin{cases} \bar{N}_M = \langle \hat{M}^\dagger \hat{M} \rangle = |A_M|^2 \bar{n}_{M,T} + |B|^2 (\bar{n}_{O,T} + 1) + |C_M|^2 \bar{n}_{m,T} \\ \bar{N}_O = \langle \hat{O}^\dagger \hat{O} \rangle = |B|^2 (\bar{n}_{M,T} + 1) + |A_O|^2 \bar{n}_{O,T} + |C_O|^2 (\bar{n}_{m,T} + 1) \end{cases}, \quad (26)$$

式中: \bar{N}_M 为腔电光力转换器 A 输出模式下的微波光子数; $\bar{n}_{M,T}$ 为 T 温度下微波腔的腔模光子数; $\bar{n}_{O,T}$ 为 T 温度下光波腔的腔模光子数; $\bar{n}_{m,T}$ 为 T 温度下机械振子腔的声子数; \bar{N}_O 为腔电光力转换器 A 输出模式下的光波光子数。

在步骤 2) 中,用户探测到微波信号后将其上转换为光信号,与主台探测返回微波信号不同的是,这里主要注重考虑微波信号探测过程中的能量变化而不是考虑量子态的转移,只要用户可以探测到在该微波信号频率下能量有所变化,就可以记录时刻 T_B 。而在步骤 3) 中,主台探测返回的信号在进行频段转移的过程中就需要考虑量子态的变化,进而与本地保留的光信号进行符合关联测量,得到传输时间 τ 。此过程中主台接收端接收到的微波信号与输出的光信号的平均光子数可表示为

$$\begin{cases} \bar{N}_{MR} = \langle \hat{M}_R^\dagger \hat{M}_R \rangle = \eta \bar{N}_M + (1-\eta) \bar{n}_u \\ \bar{N}_{OR} = \langle \hat{O}_R^\dagger \hat{O}_R \rangle = |B|^2 (\bar{N}_{MR} + 1) + |A_O|^2 \bar{n}_O + |C_O|^2 (\bar{n}_m + 1) \end{cases}, \quad (27)$$

式中: \bar{N}_{MR} 为主台接收到的微波光子数; \bar{n}_u 为噪声声子数; \bar{N}_{OR} 为腔电光力转换器 B 输出模式下的光波光子数。

通过对两路光信号进行符合关联检测,可以得到二阶相干函数为

$$g^{(2)}(2\tau) = \frac{\langle \hat{O}^\dagger \hat{O} \hat{O}_R^\dagger \hat{O}_R \rangle}{\langle \hat{O}^\dagger \hat{O} \rangle \langle \hat{O}_R^\dagger \hat{O}_R \rangle} = \frac{\langle \hat{n}_O \hat{n}_{OR} \rangle}{\bar{N}_O \bar{N}_{OR}}, \quad (28)$$

式中: \hat{n}_{OR} 为 \hat{O}_R 的光子数算符; $\langle \cdot \rangle$ 为取平均。

借鉴鬼成像理论, 可得纠缠信号之间的二阶关联特性也可表示为

$$g^{(2)}(2\tau) = 1 + \exp[-\delta^2(2\tau)^2]. \quad (29)$$

联立(28)式和(29)式, 求解自由空间中微波传播时延 τ , 进而求出 Δt , 完成授时工作。

4.2 授时方案的精度研究

在罗兰 C 授时系统中, 根据授时原理, 主台发射信号时间与 UTC 秒时刻的时间间隔 t_0 可准确测量, 用户接收微波信号时刻与本地时间基准间的时间间隔 t_L 也可以准确测量, 主台与用户在接收探测过程中存在系统固定时延, 但是两者腔电光力系统结构相同, 可相互抵消, 因此可视为不存

在系统时延, 对系统授时精度的影响可忽略不计。那么主要影响本方案授时精度的因素就是微波信号传输时延的测量误差 $\Delta\tau$ 。授时精度与信号频谱带宽关系为

$$\Delta\tau = \frac{1}{\delta}, \quad (30)$$

带宽 δ 与协同参数的关系为

$$\delta = \gamma(1 + \Gamma_M - \Gamma_O). \quad (31)$$

为了探究授时精度与协同参数的关系, 进行仿真, 结果如图 6 所示, 仿真中取腔电光力转换器的品质因数^[9,16] Q 为 30×10^3 , 机械振子的质量 m 为 10 ng。微波腔、机械振子及光波腔的频率分别为 $2\pi \times 10$ GHz、 $2\pi \times 1$ GHz、 $2\pi \times 10$ THz。

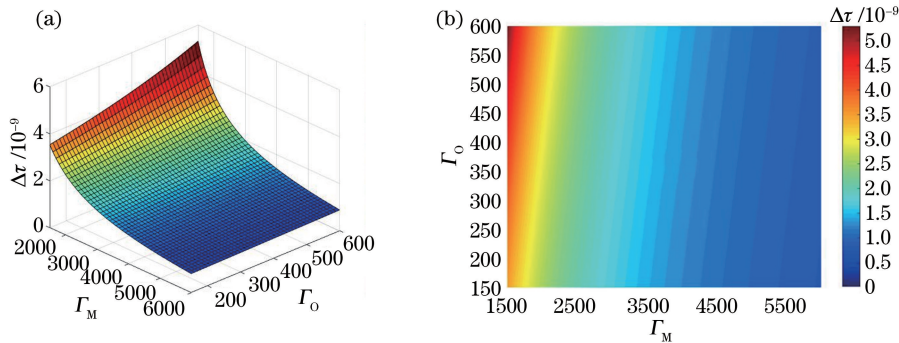


图 6 授时精度与协同参数的关系。(a)三维图;(b)投影图

Fig. 6 Relationship between timing accuracy and collaborative parameters. (a) 3D drawing; (b) projection drawing

由图 6 可以看出, 授时精度与协同参数的大小具有一定关系, 协同参数可以由公式 $\Gamma_j = G_j^2/\kappa_j\gamma$ 表示, 微波腔、机械振子的协同参数与两者之间的整体耦合速率呈正相关, 与两者衰减率的乘积呈负相关。当选取合适的协同参数时, 授时精度可以达到 5 ns 以内, 表明使用腔电光力系统进行授时的方案可以在一定程度上提升罗兰 C 系统的授时精度。在一定范围内, 当微波腔与机械振子的协同参数越大, 光波腔与机械振子的协同参数越小时, 授时精度就越高, 并且微波腔的协同参数对授时精度的影响越大。腔电光力系统能量转换过程持续进行的前提是满足 G_j^2/κ_j 大于退相干速率, 因此设置两协同参数时, 需要在满足该前提的情况下尽量使授时精度更高。

4.3 授时方案的抗干扰性能分析

在 PNT 体系下, 罗兰 C 系统与卫星导航系统在工作机制、工作频率和信号强度方面均具有一定的互补性, 可以减缓卫星系统失效对导航和授时的影响^[17], 但是为了保证其工作的稳定性和连续性, 仍需提高其抗干扰能力。本文利用杂化纠缠微波-

光纠缠信号来进行授时的方案在抗干扰方面具有一定的优势。

在进行罗兰 C 系统授时信号的监测和对用户进行授时的过程中, 微波信号是在自由空间中传输的, 敌方很可能对微波信号进行干扰。敌方截取微波信号, 构造与授时信号格式、特性相同的微波信号, 进而对接收方进行欺骗干扰, 使接收方得到错误结果, 并使授时发生严重错误。然而, 在本方案中, 自由空间中传输的微波信号与本地光信号有强烈的量子关联特性。由量子态不可克隆原理可知, 对任意一个未知的量子态进行完全相同的复制是不可实现的, 因此敌方不能复制出与本地光信号纠缠的完全一致的微波信号。即使同频率的微波信号传输至接收端腔电光力系统后, 经转换而成的光信号也无法与本地光信号发生纠缠, 因此欺骗干扰对本方案不起作用。

如果敌方不采用欺骗干扰, 而采用强信号压制的方式, 使得微波回波信号淹没在强烈的压制信号中, 压制信号与返回的微波信号具有同样的频率 ω_m , 信号形式为

$$f(t) = a(t)[\sin \omega_m t + \varphi(t)], \quad (32)$$

式中: $\varphi(t)$ 为噪声信号的相位; t 为时间; $a(t)$ 为噪声信号的振幅。设 $a(t)$ 的均值为 $1000\bar{n}_u$, 其中 \bar{n}_u 为噪声信号 \hat{C}_u 的平均光子数。图 7 所示是成功接收微波回波信号的探测情况及无微波回波信号的探测情况。

如图 7(a) 所示, 尽管干扰信号的功率较大, 但是当同时接收到回波信号和干扰信号时, 仍然可以

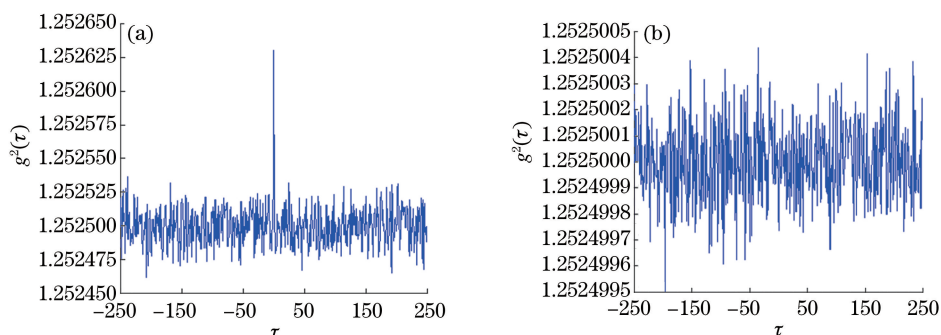


图 7 人为压制情况下的回波信号探测情况。(a) 成功接收微波信号; (b) 无微波信号

Fig. 7 Detection of echo signal under artificial suppression. (a) Successful detection with receiving microwave signals; (b) detection without receiving microwave signal

5 结 论

介绍了腔光电力转换器制备杂化纠缠微波-光信号的基本原理, 并提出了基于这种纠缠信号的罗兰 C 系统授时方案, 详细介绍了授时过程的基本步骤。为了探究所提方案的授时性能, 对方案中涉及到的参数进行了设定并进行了仿真分析。结果表明, 相较于传统罗兰 C 系统授时, 利用微波-光纠缠信号进行授时的精度更高, 授时精度在 5 ns 以内。基于量子纠缠微波-光信号的纠缠特性, 罗兰 C 授时系统在敌方欺骗干扰和强功率信号压制的情况下仍然可以进行有效授时。综上, 所提方案可以提高罗兰 C 系统的授时精度与抗干扰能力。

参 考 文 献

- [1] Wang D X, Guo R, Mao X, et al. Key technologies research of PNT system[J]. Digital Communication World, 2018(4): 1-3, 15.
王冬霞, 郭睿, 毛潇, 等. PNT 体系关键技术研究[J]. 数字通信世界, 2018(4): 1-3, 15.
- [2] Gao W M. Research status and progress on E-Loran system[J]. Information & Communications, 2019, 32(7): 166-170.
高万明. E 罗兰系统研究现状和进展[J]. 信息通信, 2019, 32(7): 166-170.

通过量子二阶相干函数测量出所需的峰值, 且量子纠缠特性的关联与经典关联的区分度较好。如图 7 (b) 所示, 当没有探测到纠缠微波信号时, 不出现具有区分度的峰值, 说明微波信号间仅为经典关联, 且关联性较差。方案主要依赖高度相关的纠缠特性, 接收端微波转换的光信号与本地保留的光信号具有量子二阶相干特性, 因此纠缠信号对高功率压制信号具有一定的抵抗能力。

- [3] Hu A P, Gong T. Research status and progress on the enhance Loran-C navigation technology [J]. Modern Navigation, 2016, 7(1): 74-78.
胡安平, 龚涛. 增强罗兰导航技术的研究现状和进展[J]. 现代导航, 2016, 7(1): 74-78.
- [4] 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.
- [5] Zhao D L. Study on time synchronization and time service with "Changhe 2" navigation system[D]. Xi'an: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2003: 34-47.
赵当丽. 长河二号导航系统时间同步及授时的研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院, 2003: 34-47.
- [6] Luo J W, Wu D W, Miao Q, et al. Research progress in non-classical microwave states preparation based on cavity optomechanical system [J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(5): 054203.
罗均文, 吴德伟, 苗强, 等. 腔光力系统制备微波非经典态研究进展[J]. 物理学报, 2020, 69(5): 054203.
- [7] 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.
- [8] Andrews R W, Peterson R W, Purdy T P, et al. Bidirectional and efficient conversion between microwave and optical light [J]. *Nature Physics*, 2014, 10(4):321-326.
- [9] Barzanjeh S, Guha S, Weedbrook C, et al. Microwave quantum illumination [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(8): 080503.
- [10] Chen C, Wu D W, Yang C Y, et al. Research on enhancing synchronization precision between Roland C stations based on cavity electro-opto-mechanical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39 (8): 0827001.
陈超, 吴德伟, 杨春燕, 等. 基于腔电光力系统增强罗兰 C 台间同步精度问题研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0827001.
- [11] Li F N, Liu S L. Research on timing technology of Roland C system [C]//The Chinese Society of Naval Architects and Marine Engineers, November 1, 2006, Yichang, China. Beijing: The Chinese Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2006.
李方能, 刘森林. 罗兰 C 系统授时技术研究 [C]//中国造船工程学会船舶通讯导航学术会议, 宜昌. 北京: 中国造船工程学会, 2006.
- [12] Teng Y J, Zhu H, Gong T. Analysis on timing accuracy of Loran-C system [J]. *Modern Navigation*, 2011(4): 276-282.
滕拥军, 朱晖, 龚涛. 罗兰 C 系统授时精度分析 [J]. *现代导航*, 2011(4): 276-282.
- [13] Liu H X. Nonlinear optical responses in two-mode optomechanics [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2014: 1-12.
刘洪香. 双模光机械系统中非线性光学效应的研究 [D]. 长春: 东北师范大学, 2014: 1-12.
- [14] Luo J W, Wu D W, Miao Q, et al. Microwave photon detection scheme based on hybrid cavity system [J]. *EPL (Europhysics Letters)*, 2020, 131 (1): 14001.
- [15] Luo J W, Wu D W, Miao Q, et al. Squeezing and entanglement features in parametrically enhanced cavity electro-opto-mechanical converter [J]. *Results in Physics*, 2020, 18: 103176.
- [16] Wang Y D, Clerk A A. Reservoir-engineered entanglement in optomechanical systems [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(25): 253601.
- [17] Du H. Analysis of anti-interference ability of Loran C in complex electromagnetic environment [J]. *Technology and Economic Guide*, 2017(26): 31.
杜鸿. 复杂电磁环境下罗兰 C 抗干扰能力分析 [J]. *科技经济导刊*, 2017(26): 31.