

激光与光电子学进展

基于微波-光波纠缠信号增强卫星授时精度的研究

刘勇飞, 杨春燕*, 赵露涵, 魏天丽, 吴德伟, 任钊恒

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

摘要 卫星授时技术受经典无线电信号测量精度限制, 授时精度仅能够达到纳秒量级。本文提出一种基于微波-光波纠缠信号的卫星授时方案, 通过腔电光力转换器将微波信号的远距离传输优势与光波信号单光子探测优势有效结合, 并利用相共轭处理器解算相位差大小, 从而计算出精确的时差信息。经过理论分析和仿真, 证明了即使量子信号在低纠缠程度情况下, 所提方案可将卫星授时精度提高至皮秒量级。

关键词 量子光学; 卫星授时; 腔电光力转换器; 微波-光波纠缠信号; 授时精度

中图分类号 O431.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221003

Improving Satellite Time Service Accuracy Based on Microwave-Optical Wave Entangled Signals

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

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

Abstract The satellite time service technology is limited by the measurement accuracy of the classical radio signal, and the time service accuracy can only reach the ns level. In this paper, a satellite time service scheme based on microwave-optical wave-entangled signals is proposed. The advantages of long-distance transmission of microwave signals and single-photon detection of optical wave signals are effectively combined using a cavity electro-opto-mechanical converter. The phase difference is calculated using a phase-conjugating processor to obtain accurate time-difference information. Through theoretical analysis and simulations, it is demonstrated that even if the quantum signal is in low entanglement, the proposed scheme can improve the satellite time service accuracy to the ps level.

Key words quantum optics; satellite time service; cavity electro-opto-mechanical converter; microwave-optical wave entangled signal; time service accuracy

1 引言

信息化时代下, 高精度的时间信息在基础研究和工程技术领域发挥着举足轻重的作用。全球卫星导航系统(GNSS)^[1-5]是一种天基、远程无线电导航系统, 具有高精度、全天候和全球区域无缝覆盖的特点, 是国家综合定位、导航和定时(PNT)体系中的“基石”。目前, 卫星授时主要有卫星单向授时法、卫星共视法、载波相位法和卫星双向时间频率传递技术, 中国科学院国家授时中心利用通信卫星提出了我国自主、世界首例转发式卫星授时技术^[6]。

卫星授时^[7]由于受经典测量的散粒噪声极限的限制, 授时精度仅能够达到纳秒量级, 且卫星导航系统具有天然的脆弱性, 在复杂的电磁环境中可能导致授时

服务的失效或精度降低。21世纪初美国加州理工大学的研究人员提出了量子时间同步的概念^[8], 时间同步精度可达到皮秒量级。随着量子时间同步理论研究的进一步深入, 量子时间同步协议还可以与量子保密通信相结合, 实现了具有保密功能的量子时间同步, 能够有效对付窃密者的偷听行为^[9]。

在现有的量子时钟同步方案^[10-12]中, 量子纠缠光信号是主要的信号载体, 纠缠光信号的制备和探测技术也较为成熟。但是, 对于信号的传播而言, 微波信号与光波相比具有更长的波长, 在自由空间进行传输时, 不易被空间中悬浮的微粒所吸收, 具备更强的透过性和更低的传输损耗^[13]。近年来随着对腔电光力转换器(EOM)^[14-15]的深入研究, 发现其不仅可以高效地制备杂化的微波-光波纠缠信号, 还可以实

收稿日期: 2022-03-04; 修回日期: 2022-03-17; 录用日期: 2022-03-29; 网络首发日期: 2022-04-09

通信作者: *ycy220@163.com

现微波与光波之间的频段转移和态转换, EOM 的运用将光波信号单光子探测优势与微波信号在自由空间远距离传输优势相结合, 实现了远距离、高精度的时间同步。

为获取更高准确度的星地时差信息, 提高卫星授时精度, 本文提出一种基于杂化微波-光波纠缠信号的卫星授时方案, 用户端通过 EOM 制备微波-光波纠缠信号并实现微波到光波的频段转移和态转换, 而后在光频段单光子探测成熟的测量技术下, 利用相共轭处理器对输出的微小相位差进行解算, 得到用户端的时钟差信息, 最后结合导航电文信息并通过相位微步调节器修改本地时钟漂移参数, 实现与标准时间的同步。

2 基于微波-光波纠缠信号的卫星授时方案

2.1 卫星授时方案及时序关系分析

基于微波-光波纠缠信号的卫星授时方案框架如图 1 所示, 卫星端包括 EOM、信息处理设备、卫星钟和发射机, 用户端包含定时接收机、信息处理设备、用户钟、相位微步调节器、相共轭处理器、量子存储器和两个 EOM。其中, EOM3 仅用来判断微波信号 \hat{M} 已到达卫星。

首先, 用户端在 t_u 时刻通过 EOM1 制备杂化的微

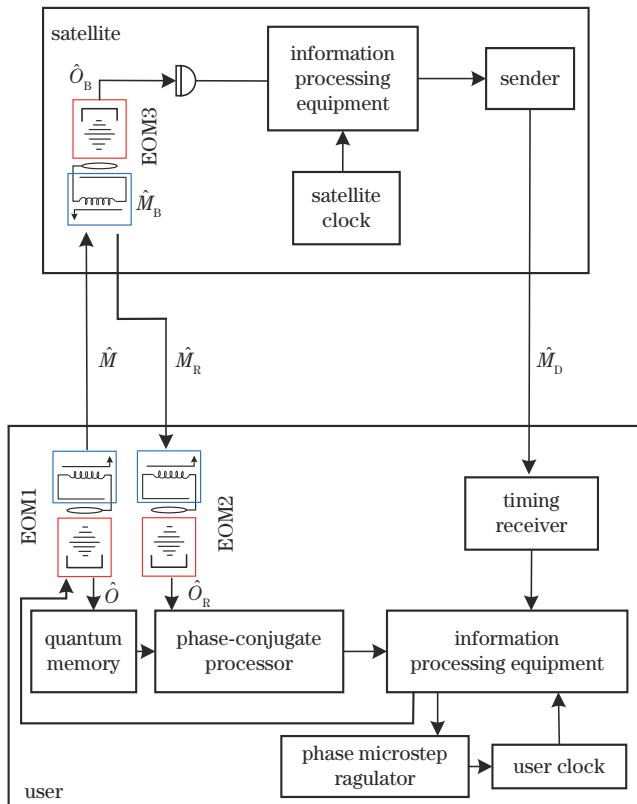


图 1 卫星授时方案框架图

Fig. 1 Schematic diagram of satellite time service scheme

波-光波纠缠信号, 其中微波信号 \hat{M} 通过天线发射至自由空间, 光信号 \hat{O} 则保存在本地的量子存储器中; 而后, 卫星端处 EOM3 对频率为 ω_M 的微波信号进行探测。当 \hat{M} 到达卫星时, 一部分微波信号被天线接收 (即 \hat{M}_B), 一部分微波信号 (即 \hat{M}_R) 被反射回用户端, 同时 EOM3 将 \hat{M}_B 上转换成光波信号 \hat{O}_B 并由单光子探测器进行探测, 可以得到一振幅较大的响应脉冲, 由信息处理设备记录此时卫星钟面时刻 T_B , 通过可编程逻辑门阵列将该时间信息加载到经典微波信号 \hat{M}_D 上, 而后通过发射机将时间信息 T_B 发送给用户端; 最后, 用户端通过接收机接收到经典微波信号 \hat{M}_D 和卫星反射回的微波信号 \hat{M}_R , 并通过 EOM2 将微波信号 \hat{M}_R 上转换为光信号 \hat{O}_R 。将本地保留的光信号 \hat{O} 与上转换得到的光信号 \hat{O}_R 输入相共轭处理器进行联合检测, 输出减法器结果 $\langle \hat{N}_y \rangle$, 通过减法器输出可以精确求出两路信号的相位差, 继而准确测量微波回波信号到达时间 T_A 。

结合基于微波-光波纠缠信号的卫星授时方案的基本原理, 对其时序关系进行分析如图 2 所示。

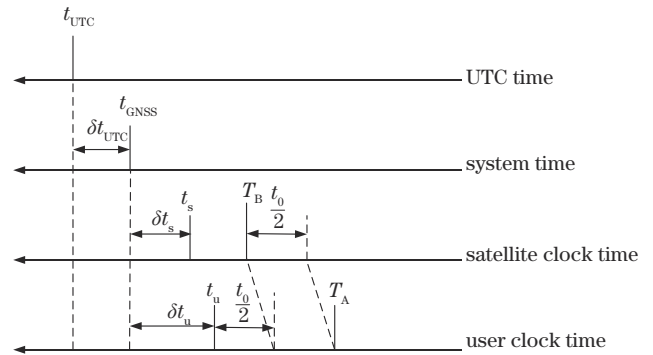


图 2 授时方案时序图

Fig. 2 Time sequence diagram of time service scheme

图 2 中, t_{UTC} 表示标准时间 UTC (k), t_{GNSS} 为 GNSS 的系统时间, t_s 是卫星钟面时刻, t_u 表示用户端钟面时刻, $\delta t_{UTC} = t_{GNSS} - t_{UTC}$ 为 GNSS 时相对于世界协调时的偏移量, $\delta t_s = t_s - t_{GNSS}$ 是卫星钟相对于系统时间的钟差, $\delta t_u = t_u - t_{GNSS}$ 为用户钟相对于系统时间的钟差, 其中 δt_s 、 δt_{UTC} 的值可以通过导航电文中的模型参数计算获得。

由卫星授时方案及时序关系图, 可得

$$T_A - t_u = t_0, \quad (1)$$

$$T_A - t_0/2 - T_B = \delta t_u - \delta t_s, \quad (2)$$

$$\delta t_u = (T_A + t_u)/2 - T_B + \delta t_s, \quad (3)$$

$$\delta t = \delta t_u + \delta t_{UTC}, \quad (4)$$

式中: t_0 为微波信号在自由空间传播时间; δt 为用户端时钟与标准时间的偏差, 若 $\delta t_u = \delta t_s$, 则表明用户钟与卫星钟之间不存在时钟偏差, 用户仅需要根据导航电文解算信息对本地时钟进行修正 $\delta t = \delta t_s + \delta t_{UTC}$ 完成与标准时间的同步; 反之则存在时钟偏差, 用户端经信

息处理设备完成对导航电文及 δt_0 的解算,最后通过相位微步调节器修改本地时钟漂移参数,完成与标准时间的同步。

2.2 腔电光力学系统

EOM 是一种同时连接超导微波电路腔和光学法布里-珀罗 (F-P) 腔的双腔光力学系统,两腔分别工作在微波频段和光波频段,其理论模型如图 3 所示。

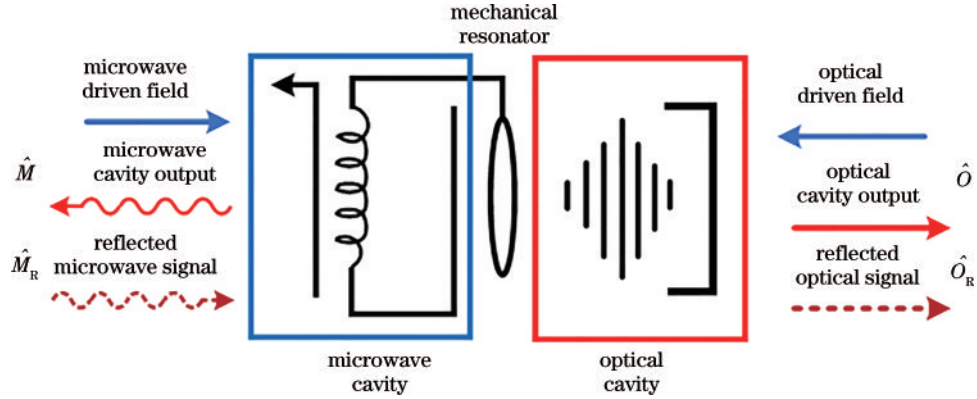


图 3 EOM 示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cavity electro-opto-mechanical (EOM) converter

典型的 EOM 主要由微波腔、光腔和机械振子三部分组成^[16],其中机械振子既是 F-P 腔的可移动腔镜,又是微波谐振腔振荡电路中电容的一部分。通过该特殊结构使得微波腔谐振、光波腔谐振均与机械振子谐振相互作用,实现了微波光子、光波光子与机械声子相耦合。

2.2.1 杂化微波-光波纠缠信号的制备

EOM 通过一个机械振子(生成算符 \hat{m} , 频率 ω_m , 耗散速率 γ)将微波腔模(生成算符 \hat{a}_M , 频率 ω_M , 耗散速率 κ_M)与光腔模(生成算符 \hat{a}_O , 频率 ω_O , 耗散速率 κ_O)耦合起来。假设单个光子与单个声子间的耦合系数为 g_j , 则腔模与机械振子之间的耦合率为 $G_j = g_j \sqrt{N_j}$, 其中, N_j 表示腔模的稳态场强度(远远大于 1), 其值为泵浦引入的平均腔光子数目。腔模的量子涨落可以用 $\hat{c}_j = \hat{a}_j - \sqrt{N_j}$ 表示, 腔模频率与对应腔的驱动场频率之差为腔频率失谐, 即 $\Delta_j = \omega_j - \omega_{d,j}$ 其中 $\omega_{d,j}$ 为驱动场频率, $j = O, M$ 。腔频率失谐量决定着腔模的微波光子、光波光子与机械声子之间的相互作用类型, 当 $\Delta_j = -\omega_m$ 时, 腔内发生的是参量下转换型相互作用, 使得腔模与机械谐振模之间产生双模压缩过程, 从而产生纠缠; 当 $\Delta_j = \omega_m$ 时, 腔内发生的是分束器模型变换, 实现了腔模与机械谐振模之间的态转移。

当腔频率失谐量满足 $\Delta_O = -\Delta_M = -\omega_m$ 且机械振子处于快速振荡时, 光腔模与机械谐振模之间受双模压缩而产生纠缠, 微波腔模与机械谐振模因受分束器模型相互作用发生态转移, 此时系统在相互作用绘景下, 自由哈密顿量^[17]可以表示为

$$\hat{H} = \hbar G_O (\hat{c}_O \hat{m} + \hat{m}^\dagger \hat{c}_O^\dagger) + \hbar G_M (\hat{c}_M \hat{m} + \hat{m}^\dagger \hat{c}_M^\dagger). \quad (5)$$

只有满足两腔的光-力作用速率均大于机械振子的退相干速率时(即 $\frac{G_O^2}{\kappa_O} > R_d$, $\frac{G_M^2}{\kappa_M} > R_d$, 其中 $R_d =$

$\gamma \bar{n}_m^T, \bar{n}_m^T$ 为量子噪声的平均光子数), 两腔的纠缠特性被转移到输出模式 \hat{O}, \hat{M} 上, 从而产生了杂化微波-光波纠缠信号。输出模式可用量子朗之万方程表示为

$$\dot{\hat{M}} = A_M \hat{c}_{M,\text{in}} - B \hat{c}_{O,\text{in}}^\dagger - C_M \hat{m}_{\text{int}}, \quad (6)$$

$$\dot{\hat{O}} = B \hat{c}_{M,\text{in}}^\dagger + A_O \hat{c}_{O,\text{in}} - C_O \hat{m}_{\text{int}}^\dagger, \quad (7)$$

式中: $\hat{c}_{j,\text{in}}$ 为腔内量子噪声算符; \hat{m}_{int} 为机械振子谐振对应的量子噪声算符; A_j, B, C_j 为系数, 其值由协同参数^[18] $\Gamma_j = G_j^2 / \kappa_j \gamma$ 决定, 表达式为

$$A_M = \frac{1 - (\Gamma_M + \Gamma_O)}{1 + (\Gamma_M - \Gamma_O)}, \quad (8)$$

$$A_O = \frac{1 + (\Gamma_M + \Gamma_O)}{1 + (\Gamma_M - \Gamma_O)}, \quad (9)$$

$$B = \frac{2\sqrt{\Gamma_M \Gamma_O}}{1 + (\Gamma_M - \Gamma_O)}, \quad (10)$$

$$C_M = \frac{2i\sqrt{\Gamma_M}}{1 + (\Gamma_M - \Gamma_O)}, \quad (11)$$

$$C_O = \frac{2i\sqrt{\Gamma_O}}{1 + (\Gamma_M - \Gamma_O)}. \quad (12)$$

输出模式的联合高斯态可由二阶矩均值表示为

$$\bar{N}_M = \langle \hat{M}^\dagger \hat{M} \rangle = |A_M|^2 \bar{n}_M^T + |B|^2 (\bar{n}_O^T + 1) + |C_M|^2 \bar{n}_m^T, \quad (13)$$

$$\bar{N}_O = \langle \hat{O}^\dagger \hat{O} \rangle = |B|^2 (\bar{n}_M^T + 1) + |A_O|^2 \bar{n}_O^T + |C_O|^2 (\bar{n}_m^T + 1), \quad (14)$$

$$\langle \hat{M} \hat{O} \rangle = A_M B (\bar{n}_M^T + 1) + B A_O \bar{n}_O^T + C_M C_O (\bar{n}_m^T + 1), \quad (15)$$

式中, \bar{N}_M, \bar{N}_O 为两输出模式的平均光子数, 量子噪声的平均光子数可以由普朗克定律得到

$$\bar{n}_j^T = \left[e^{\frac{\hbar \omega_j}{\kappa_B T_{\text{EOM}}}} - 1 \right]^{-1}, \quad \text{其中 } \kappa_B \text{ 是玻尔兹曼常数, } T_{\text{EOM}} \text{ 为}$$

EOM 的工作温度。当输出模式的联合高斯态为经典态时,其二阶矩满足:

$$\langle |MO^*| \rangle \leq \langle |M| \rangle \langle |O^*| \rangle = \sqrt{N_M} \sqrt{N_O}. \quad (16)$$

反之,输出模式下的联合高斯态为量子态,且其杂

化二阶矩比值($\epsilon = \frac{\langle |\hat{M}\hat{O}\rangle|}{\sqrt{N_M} \sqrt{N_O}} > 1$)越大时,输出微波

与光波的纠缠程度越高。

2.2.2 微波-光波的频段转移和态转换

上文中 EOM1 制备了杂化微波-光波纠缠信号(图 3 中实线所示),光信号保留在本地,微波信号经卫星反射后被用户端接收到 \hat{M}_R , 经 EOM2 进行相共轭和参量上转换,以光波信号 \hat{O}_R 输出(图 3 中虚线所示)。

当腔频率失谐量满足 $\Delta_o = \Delta_M = \omega_m$ 且机械振子处于快速振荡时,两腔中发生的均为分束器模型变换,入射的微波光子经两次光-声相互作用转换成光波光子输出,此时系统在相互作用绘景下,自由哈密顿量可表示为

$$\hat{H} = \hbar G_M (\hat{c}_M \hat{m}^\dagger + \hat{m} \hat{c}_M^\dagger) + \hbar G_O (\hat{c}_o \hat{m}^\dagger + \hat{m} \hat{c}_o^\dagger). \quad (17)$$

同理,只有同时满足 $G_M^2/\kappa_M > R_d, G_O^2/\kappa_O > R_d$ 条件时, EOM 才会实现跨频段能量相干转移,当能量相干转移效率足够高时,可以同时实现量子态转换^[19],其过程可抽象为图 4 所示。

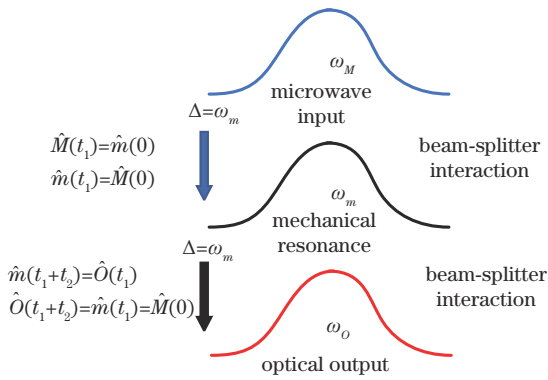


图 4 跨频段相干能量转移及态转换的过程

Fig. 4 Process of coherent energy transfer and state conversion across frequency bands

图 4 中, $\hat{M}(0)$ 为输入微波回波信号的初始状态, $\hat{m}(0)$ 为机械谐振模的初始状态, t_1, t_2 分别为微波腔和光腔内的相互作用时间。第一步中,微波回波信号进入微波腔后经历反斯托克斯过程,微波光子吸收机械声子后成为微波腔模光子,通过这一过程,使得微波光子能量转移到了机械声子中,当能量相干转移的效率足够高时,可以同时实现量子态转换;同样地,第二步中机械谐振模和输出光信号也发生着类似的转换过程,机械谐振模和输出光信号的量子态也随着相干能量转移发生转换。因此,微波信号经 EOM 可以实现

到光波信号的跨频段相干能量转移和态转换。

2.3 分束器模型

微波信号在自由空间进行传播时由于大气环境的多样性与易变性,很难得到一个精确又相对普适的传输模型,但如果对大气环境进行一定程度的理想化约束,并针对微波信号的量子特性进行分析,可以将自由空间传输中微波损耗与遭受噪声简化成一个分束器模型^[20],如图 5 所示。

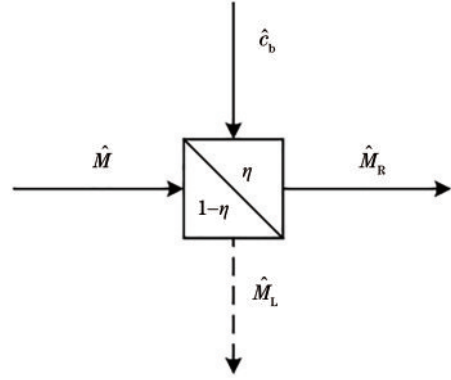


图 5 分束器模型

Fig. 5 Beam-splitter model

图 5 中, \hat{M} 为用户端向外发射的微波信号, \hat{c}_b 为温度为 T_B 的背景噪声算符,其平均光子数可由普朗克定律计算得到; \hat{M}_L 为微波传输过程中因大气吸收、散射而产生的损耗; \hat{M}_R 为用户端接收到的微波回波信号, $0 < \eta \leq 1$ 为模型的透射率,根据能量守恒定律可得:

$$|\hat{M}|^2 + |\hat{c}_b|^2 = |\hat{M}_L|^2 + |\hat{M}_R|^2, \quad (18)$$

由此,可以写出分束器输入-输出关系式:

$$\hat{M}_R = \sqrt{\eta} \hat{M} + \sqrt{1-\eta} \hat{c}_b, \quad (19)$$

$$\hat{M}_L = \sqrt{1-\eta} \hat{M} - \sqrt{\eta} \hat{c}_b. \quad (20)$$

2.4 相共轭处理器与高精度时差测量

如图 6 所示,用户端接收到微波回波信号 \hat{M}_R 经 EOM2 经相共轭和上转换,以光信号输出,记接收端输出的光波信号为 \hat{O}_R ,则有

$$\hat{O}_R = B\hat{M}_R^\dagger + A_o\hat{c}_{OR,in} - C_o\hat{m}_{int,R}^\dagger, \quad (21)$$

式中, $\hat{c}_{OR,in}$ 和 $\hat{m}_{int,R}^\dagger$ 分别为接收端的腔内量子噪声算符和机械振子谐振对应的量子噪声算符。此时,发射端

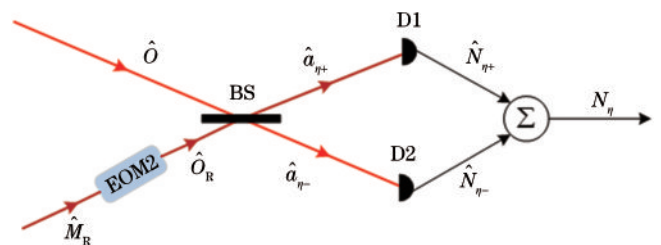


图 6 相共轭处理器原理图

Fig. 6 Schematic diagram of phase-conjugating processor

制备的微波-光波纠缠信号的纠缠特性已经转移至发射端和接收端输出的两束光波信号上,且与 \hat{O}_R 之间的杂化二阶矩比值 ϵ_R 为

$$\bar{N}_{MR} = \langle \hat{M}_R^\dagger \hat{M}_R \rangle = \eta \bar{N}_M + (1 - \eta) \bar{n}_b^{T_b}, \quad (22)$$

$$\bar{N}_{OR} = \langle \hat{O}_R^\dagger \hat{O}_R \rangle = |B|^2 (\bar{N}_{MR} + 1) + |A_o|^2 \bar{n}_o^T + |C_o|^2 (\bar{n}_m^T + 1), \quad (23)$$

$$\langle \hat{O}_R^\dagger \hat{O} \rangle = \sqrt{\eta} B \langle \hat{M} \hat{O} \rangle + |A_o|^2 \bar{n}_o^T + |C_o|^2 (\bar{n}_m^T + 1), \quad (24)$$

$$\epsilon_R = \frac{|\langle \hat{O}_R^\dagger \hat{O} \rangle|}{\sqrt{\bar{N}_{OR} \bar{N}_O}} \epsilon_R = \frac{|\langle \hat{O}_R^\dagger \hat{O} \rangle|}{\sqrt{\bar{N}_{OR} \bar{N}_O}}, \quad (25)$$

式中: \bar{N}_{MR} 、 \bar{N}_{OR} 为 EOM2 输入输出模式的平均光子数; $\bar{n}_b^{T_b}$ 为温度为 T_b 的背景噪声的平均光子数。接收端输出光信号 \hat{O}_R 与本地保留光信号 \hat{O} 共同输入 50:50 分束器 (BS), 基于量子分束器的传输函数矩阵, 则探测器 1 和探测器 2 前的湮没算符 $\hat{a}_{\eta+}$ 、 $\hat{a}_{\eta-}$ 可表示为

$$\hat{a}_{\eta+} = (\hat{O}_R + \hat{O}) / \sqrt{2}, \quad (26)$$

$$\hat{a}_{\eta-} = (\hat{O}_R - \hat{O}) / \sqrt{2}. \quad (27)$$

探测器 1 和探测器 2 分别对两束光信号进行光子计数, 其输出光子数算符为

$$\hat{N}_{\eta+} = \hat{a}_{\eta+}^\dagger \hat{a}_{\eta+}, \quad (28)$$

$$\hat{N}_{\eta-} = \hat{a}_{\eta-}^\dagger \hat{a}_{\eta-}, \quad (29)$$

式中, $\hat{a}_{\eta+}$ 、 $\hat{a}_{\eta-}$ 为产生算符, 两个单光子计数器结果输入至减法器中计算 $\hat{N}_\eta = \hat{N}_{\eta+} - \hat{N}_{\eta-}$ 。若用户端注入到光纤存储器中光信号与微波信号在自由空间中传输

相同的距离, 则减法器输出最大值 $\langle \hat{N}_\eta \rangle \propto \sqrt{\eta} \langle \hat{M} \hat{O} \rangle$; 若两信号传播距离不同但距离差小于一个微波波长时, 将微波回波信号引入相位表示:

$$\hat{M}_R = \sqrt{\eta} \hat{M} e^{i\varphi} + \sqrt{1 - \eta} \hat{c}_b, \quad (30)$$

式中: φ 为微波回波信号与本地光信号相位差; i 为虚数单位; e 为自然底数。此时减法器输出 $\langle \hat{N}_\eta \rangle \propto \sqrt{\eta} \sin \varphi \langle \hat{M} \hat{O} \rangle$, 则相位量测误差 $\Delta \varphi$ 可通过误差传递函数计算得到:

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta N_\eta}{|d \langle N_\eta \rangle / d \varphi|}, \quad (31)$$

式中 ΔN_η 为 $\langle N_\eta \rangle$ 的方差, $d \langle N_\eta \rangle / d \varphi$ 为 $\langle N_\eta \rangle$ 对 φ 求导。因此通过减法器输出可以精确求出两路信号的相位差, 继而准确测量微波回波信号到达时间 T_A , 根据式 (3) 就可以解算出用户接收机钟差 δt_u , 钟差测量精度 $\Delta t_u = \frac{\Delta \varphi}{2 \omega_M}$ 。

3 系统性能分析

对于本文提出的卫星授时方案, 主要基于杂化微波-光波纠缠的量子信号增强卫星授时精度, 对系统性能分析首先考虑量子纠缠信号的制备情况以及经大气传输后的纠缠程度保持情况, 而后针对评价系统性能的重要指标, 即授时精度进行具体的研究和仿真分析。为对系统性能进行定量分析, 首先对 EOM 进行合理的参数设置^[18], 如表 1 所示。

表 1 EOM 中参数表示

Table 1 Parameter representation in EOM converter

	Microwave cavity	Mechanical resonator	Optical cavity
Frequency	$\omega_M / 2\pi = 10 \text{ GHz}$	$\omega_m / 2\pi = 10 \text{ MHz}$	$\lambda_o = 1064 \text{ nm}$
Pump power	$P_M = 35 \text{ mW}$	—	$P_o = 5 \text{ mW}$
Coupling rate	$g_M / 2\pi = 0.327 \text{ Hz}$	—	$g_o / 2\pi = 115.512 \text{ Hz}$
Damping rate	$\kappa_M = 0.2 \omega_m$	$\gamma = \omega_m / Q$	$\kappa_o = 0.1 \omega_m$
Detuning of frequency	$\Delta_M = \omega_m$	—	$\Delta_o = -\omega_m$ (EOM1) $\Delta_o = \omega_m$ (EOM2) $\Delta_o = \omega_m$ (EOM3)

表中, λ_o 为泵浦光的波长, 机械振子的品质因数 $Q = 30 \times 10^3$, EOM 工作温度 $T_{\text{EOM}} = 30 \text{ mK}$, 大气传输背景温度 $T_b = 293 \text{ K}$ 。

3.1 量子纠缠信号制备及纠缠度保持情况

量子信号的纠缠程度可以用杂化二阶矩比值 ϵ 来衡量, 当 $\epsilon \leq 1$ 时, 两信号之间不存在纠缠, 为经典关联; 当 $\epsilon > 1$ 时, 二者为纠缠信号, 且 ϵ 值越大, 关联程度越强。在上述所设的参数背景下, 进一步仿真分析协同参数对于杂化纠缠程度的影响, 其关系如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 在协同参数 Γ_M 、 Γ_o 张成的空间内, $\epsilon > 1$ 在绝大部分区域均成立, 根据 Routh-Hurwitz

条件可知, 在上述空间中, 系统稳定区域与不稳定区域的界限恰好与杂化二阶矩门限值 $\epsilon = 1$ 相重合, 这就表明用户端利用 EOM 能够有效地制备出杂化微波-光波纠缠信号的情况下, 系统都是稳定的。为了更加直观地分析微波-光波纠缠信号的制备情况, 绘制发射端两输出信号的归一化时域波形图, 如图 8 所示。

通过观察图 8 中微波信号与光波信号的振幅与相位可知, 二者之间的振幅呈正关联关系, 相位之间呈反关联关系, 所以微波信号与光波信号的归一化时域波形为反关联, 这也与纠缠信号制备中双模压缩特性相对应。

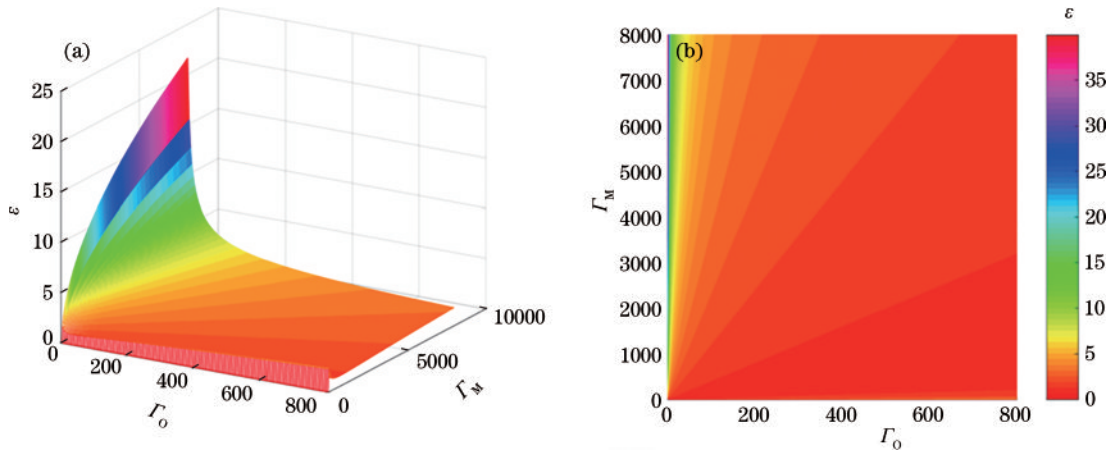


图 7 杂化纠缠程度 ϵ 与协同参数之间的关系。(a) 三维图; (b) 投影图

Fig. 7 Relationship between degree of hybrid entanglement ϵ and cooperativity parameters. (a) 3D graphic; (b) projection drawing

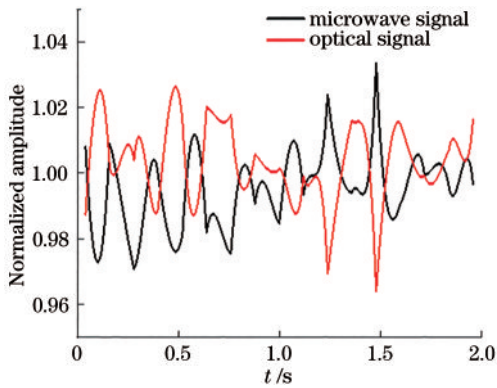


图 8 \hat{M} 和 \hat{O} 的归一化时域波形图

Fig. 8 Normalized time-domain waveform of \hat{M} and \hat{O}

其次,分析微波-光波信号纠缠程度保持情况,在接收端处微波信号经 EOM2 转换为光波信号。此时,微波-光波纠缠信号之间的关联特性已经转移到了两束光波信号之间,同样地,用杂化二阶矩比值 ϵ_R 衡量 \hat{O} 与 \hat{O}_R 之间的纠缠程度,协同参数与 ϵ_R 的关系如图 9 所示。

由图 9 可以看出,在协同参数 Γ_M 、 Γ_O 张成的空间中, $\epsilon_R > 1$ 在大部分情况下都成立,这也就表明微波信号经过大气传输、频段转移和量子态转换后,微波-光波纠缠信号的关联特性成功转移到了 \hat{O} 与 \hat{O}_R 之间。两束光波信号间纠缠程度的降低是由于大气传输损耗和微波-光波转换过程中的损耗造成的,结合上文中提到的微波信号大气传输的量子分束器模型,针对不同传输效率对纠缠保持度影响进行仿真分析,如图 10 所示,设 $\Gamma_M = 5181.95$, $\Gamma_O = 668.43$ ^[18]。

由图 10 可以看出,在 EOM 协同参数一定的情况下,随着传输效率提高,两束光波信号纠缠程度也逐渐增高。图中曲线的变化趋势又表明,两束光波信号在大部分情况下纠缠程度均较低,只有在高传输效率下,两路信号的纠缠特性才能得到较好的保持。但在现实大气传输过程中,由于各种损耗和噪声的影响,微波信号传输效率往往比较低,对应的两束光波信号的纠缠度就相对较低。那么就需要在量子信号低纠缠度条件下,对本文所提卫星授时方案的系统性能指标进行分析研究。

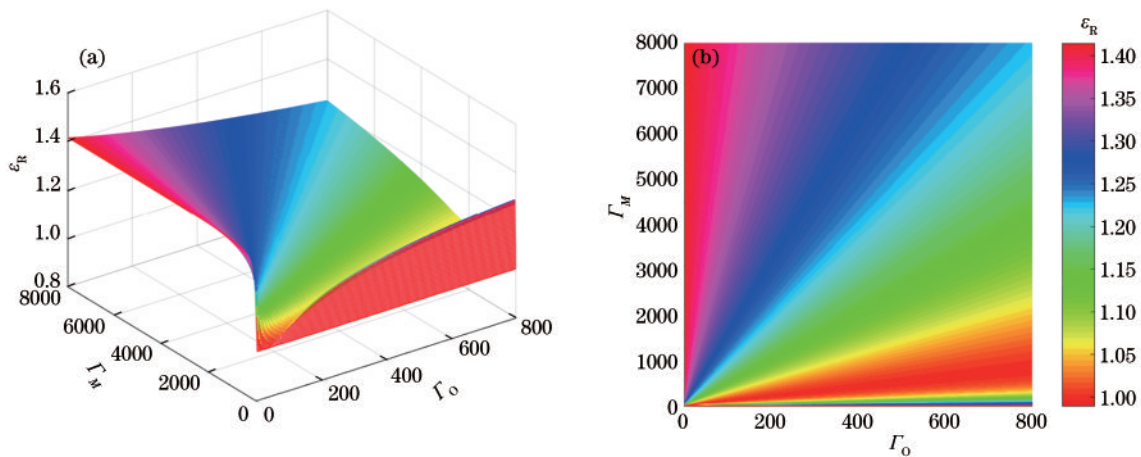


图 9 ϵ_R 与协同参数之间的关系。(a) 三维图; (b) 投影图

Fig. 9 Relationship between degree of ϵ_R and cooperativity parameters. (a) 3D graphic; (b) projection drawing

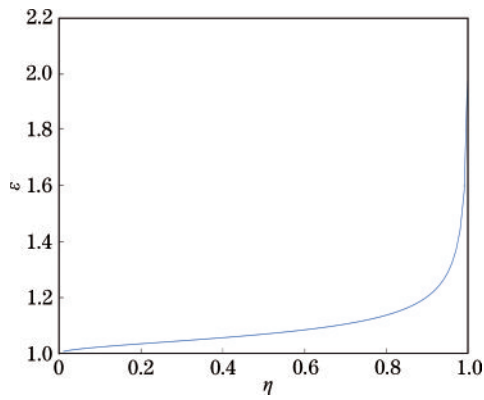


图 10 纠缠保持度与传输效率的关系

Fig. 10 Relationship between entanglement retention and transmission efficiency

3.2 授时精度的影响研究

假设单光子探测器 1 和 2 的计数率均为 50 MHz, 暗计数在 $10 \text{ cps}^{[21-22]}$ 以下, 一次测量采样数据量 $N=100000$, 在上述参数的设置下, 仿真分析传输效率对卫星授时精度的影响, 如图 11 所示。

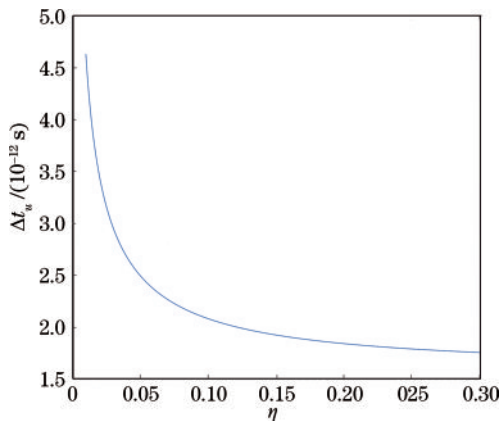


图 11 传输效率与授时精度的关系

Fig. 11 Relationship between transmission efficiency and time service accuracy

由图 11 中可以看出, 在低传输效率条件下 (即低纠缠程度情况下), 本文提出的基于微波-光波纠缠信号的卫星授时方案, 授时精度仍可以达到皮秒量级。随着传输效率的提高, 量子信号间的纠缠程度增高, 依靠量子纠缠特性实现的卫星授时精度也越高。当传输效率 $\eta=0.1$ 时, 卫星授时精度 $\Delta t_u=2.082 \text{ ps}$ 。当传输效率一定时, 考虑一次测量采样量对卫星授时精度的影响, 设 $\eta=0.1$, 仿真分析不同采样量对授时精度的影响, 如图 12 所示。

从图 12 中可以看出, 随着一次测量采样数据量的增大, 用户在进行钟差解算中有效信息量增多, 从而提升了卫星授时精度。当一次测量采样数据量 $N=10^6$ 时, 卫星授时精度 $\Delta t_u=0.6585 \text{ ps}$ 。但是, 一次测量采样数据量的增大对应着采样时间延长, 这也直接影响着用户的时钟同步速率。在应用中, 用户端可根据现

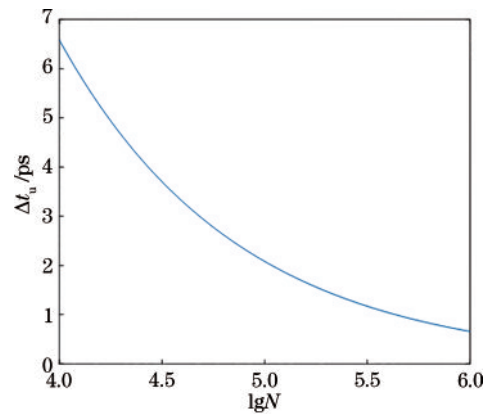


图 12 一次测量采样量与授时精度的关系

Fig. 12 Relationship between once measurement sample volume and time service accuracy

实需求选择合适的一次测量采样数据量, 来平衡授时精度与时钟同步更新率之间的关系。

4 结 论

介绍了由 EOM 制备微波-光波纠缠信号的基本原理, 提出了一种利用该纠缠信号增强卫星授时精度的方案, 并详细分析了方案中信号制备、传播、探测和相位差解算与时钟同步的具体过程。为了定量论证所提方案, 对方案中涉及的参数进行设置并仿真, 结果证明了用户端能够有效制备出杂化微波-光波纠缠信号, 且经传输和微波-光波转换后纠缠特性仍可得以保持。在此基础上, 详细讨论了传输效率和一次测量采样数据量对授时精度的影响。结果表明, 即使在量子信号低纠缠程度情况下, 所提方案的授时精度仍然可以达到皮秒量级。

参 考 文 献

- [1] Ceruzzi P E. Satellite navigation and the military-civilian dilemma: the geopolitics of GPS and its rivals[M]// Geppert A C T, Brandau D, Siebeneichner T. Militarizing outer space. Palgrave studies in the history of science and technology. London: Palgrave Macmillan UK, 2020: 343-367.
- [2] Kumar A, Kumar S, Lal P, et al. Introduction to GPS/GNSS technology[M]//Petropoulos G P, Srivastava P K. GPS and GNSS technology in geosciences. Amsterdam: Elsevier, 2021: 3-20.
- [3] Satoshi K, Yasuhiko K, Takeyasu S, Quasi-zenith satellite system[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd., 2015.
- [4] 宁津生, 姚宜斌, 张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报, 2013, 1(1): 3-8.
Ning J S, Yao Y B, Zhang X H. Review of the development of global satellite navigation system[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2013, 1(1): 3-8.
- [5] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的发展及其应用[C]//中国科学院第十六次院士大会第三届学部学术年会论文集.

- 北京: 中国地球物理学会, 2012: 280-286.
- Yang Y X. The development and application of Beidou satellite navigation system[C]//Academic Annual Meeting of the Chinese Academy of Sciences. Chinese Geophysical Society. Beijing: Chinese Geophysical Society, 2012: 280-286.
- [6] 纪兵, 钟斌, 边少锋. 转发式卫星导航定位系统性能分析[J]. 海洋测绘, 2016, 36(3): 44-47.
- Ji B, Zhong B, Bian S F. Positioning performance analysis of the transponding satellite navigation system[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2016, 36(3): 44-47.
- [7] 杨旭海, 李孝辉, 华宇, 等. 卫星授时与时间传递技术进展[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(4): 1-10.
- Yang X H, Li X H, Hua Y, et al. Technical progress of satellite time service and time transfer[J]. Navigation Positioning and Timing, 2021, 8(4): 1-10.
- [8] 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.
- 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.
- [9] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Quantum cryptographic ranging[J]. Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics, 2002, 4(4): S413-S414.
- [10] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L, et al. Clock synchronization with dispersion cancellation[J]. Physical Review Letters, 2001, 87(11): 117902.
- [11] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L, et al. Conveyor-belt clock synchronization[J]. Physical Review A, 2004, 70(4): 043808.
- [12] Valencia A, Scarcelli G, Shih Y. Distant clock synchronization using entangled photon pairs[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(13): 2655-2657.
- [13] 孔繁荣. 微波在亚波长等离子体层中传输特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- Kong F R. Studies on microwave propagation characteristics in subwavelength plasma layers[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [14] Singh V, Bosman S J, Schneider B H, et al. Optomechanical coupling between a multilayer graphene mechanical resonator and a superconducting microwave cavity[J]. Nature Nanotechnology, 2014, 9(10): 820-824.
- [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] 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.
- 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.
- [17] Luo J W, Wu D W, Miao Q, et al. Navigation ranging scheme based on microwave-optical entanglement prepared by electro-opto-mechanical converters[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(2): 1-15.
- [18] Barzanjeh S, Guha S, Weedbrook C, et al. Microwave quantum illumination[J]. Physical Review Letters, 2015, 114(8): 080503.
- [19] 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.
- [20] Meystre P, Sargent M. Elements of quantum optics[M]. 3rd ed. Berlin: Springer, 1999.
- [21] 张蜡宝, 康琳, 陈健, 等. 超导纳米线单光子探测器[J]. 物理学报, 2011, 60(3): 796-802.
- Zhang L B, Kang L, Chen J, et al. Fabrication of superconducting nanowire single-photon detector[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(3): 796-802.
- [22] 张文英, 胡鹏, 肖游, 等. 高效、偏振不敏感超导纳米线单光子探测器[J]. 物理学报, 2021, 70(18): 20210486.
- Zhang W Y, Hu P, Xiao Y, et al. High-efficiency polarization-insensitive superconducting nanowire single photon detector[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(18): 20210486.