

# 精跟踪中基于声光偏转器的本振光章动探测角度误差方法

贺红雨<sup>1,2</sup>, 孙建锋<sup>1\*</sup>, 侯培培<sup>1</sup>, 张波<sup>1,2</sup>, 许蒙蒙<sup>1,2</sup>, 劳陈哲<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光通信与探测技术重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 在自由空间相干光通信的精跟踪系统中,利用光纤章动或快反镜章动探测角度误差具有降低损耗、简化系统结构等优势,但这两种方法都需要引入机械运动部件。为此,提出了利用声光偏转器实现无机械扫描的信号光角度误差的提取方法,建立了提取角度误差的理论模型,分析了可能的误差来源,搭建了一套验证探测角度误差的系统,测量精度优于1/10信号光发散角,不会影响后续的相干解调。

**关键词** 光通信; 相干; 精跟踪; 章动; 角度误差; 声光偏转器

中图分类号 TN958

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1006001

## Angle Error Detection of Local Oscillator Nutation Based on Acousto-Optic Deflector in Fine Tracking System

He Hongyu<sup>1,2</sup>, Sun Jianfeng<sup>1\*</sup>, Hou Peipei<sup>1</sup>, Zhang Bo<sup>1,2</sup>, Xu Mengmeng<sup>1,2</sup>, Lao Chenzhe<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In optical free space coherent communication fine tracking system, the advantage of using fiber nutation or fast steering mirror nutation to detect angle error is reducing losses and simplifying system and so on. However, they both need mechanically moving parts. This paper proposes detection method of the angle error of signal beam without mechanical nutation by acousto-optic deflector. Theoretical model of signal angle error detection is built and the possible error source is analyzed. Meanwhile, the verifying setup is built, and the precision is better than 1/10 angle divergence of signal, which can not affect the heterodyne detection.

**Key words** optical communications; coherence; fine tracking; nutation; angle error detection; acousto-optic deflector

**OCIS codes** 060.2605; 120.1880; 040.2840

## 1 引言

自由空间光通信是未来组建天地一体化网络的关键技术,相干光通信由于具有高灵敏度、对可见光不敏感等特点而成为实现远距离通信链路的首选方式<sup>[1-4]</sup>。自由空间相干光通信中,在发射端对信号光进行相位调制,在接收端用一束相同频率的本地激光作为本振光与信号光混频来解调相位,要测量两

束混频光的跟踪误差,测量精度一般需小于1/10的波束宽度<sup>[5]</sup>。现有的空间通信系统采用粗、精跟踪的复合轴跟踪系统,利用粗跟踪单元作瞄准和粗对准,粗跟踪单元运动范围大、带宽低、精度有限;精跟踪单元用于补偿粗跟踪的残差,具有高精度、高带宽的特点,精跟踪是保障高速率通信的关键<sup>[6]</sup>。

角度误差探测是精跟踪中的难点,科学家们一直在探讨如何能更好地利用章动来探测角度误差。

收稿日期: 2018-01-29; 修回日期: 2018-04-03; 录用日期: 2018-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(61505233,61605226)

\* E-mail: sunjianfeng@163.com

1992年,Knibbe等<sup>[7]</sup>实现了利用电光晶体使信号光作章动来探测光斑聚焦位置的方法,其优点是带宽高、稳定性高,缺点是给信号光带来额外的插入损耗和波面的扰动,且电光晶体外加半波电压较高。1994年,Oleski等<sup>[8]</sup>提出利用声光偏转器(AOD)作为空间光通信的光束偏转装置,在2008年Nikulin等<sup>[9]</sup>也进行了相关的验证实验。2014年,Deng等<sup>[10]</sup>提出基于本振光章动跟踪方法,原理上和信号光章动完全相同。

本文利用声光晶体作为光束偏转器件,并将其放置于本振光支路中,具有无机械扫描、低电压、不引起信号光损耗的优点。

## 2 基本原理

当信号光和本振光的波面存在夹角时,外差效率会下降,光电流和探测到的信号同时也会下降。当本振光的光轴沿着圆锥作章动时,如果信号光在章动的中心,则探测器接收到的信号的包络是一个恒定的值;如果信号光偏离这个中心,则信号包络会周期性地变化,可以通过AOD控制信号和探测器信号来计算信号光的偏角<sup>[10-12]</sup>。图1为利用AOD使本振光作章动来探测角度误差的精跟踪系统,算法执行单元利用处理信号的包络和AOD控制信号得到角度误差,并反馈给快反镜(FSM)的控制单元,从而控制快反镜使信号光稳定在本振光章动的圆锥中心。

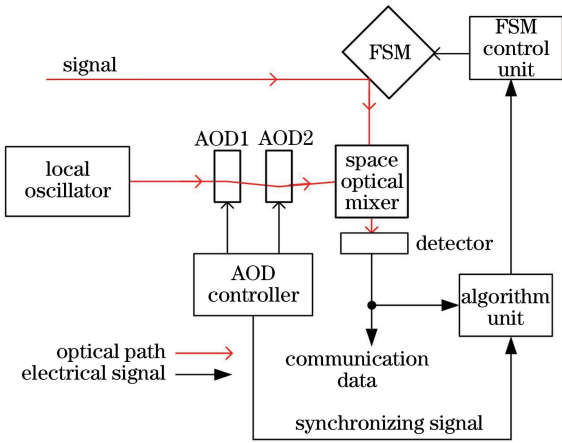


图1 基于AOD本振光章动的角度误差探测的精跟踪系统  
Fig. 1 Fine tracking system of angle error detection based on local oscillator nutation using AOD

### 2.1 存在角度失配的外差探测

在空间远距离条件下,本振光和信号光可以近似地认为是平面波。考虑探测器为圆形探测器,本振光和信号光的偏振方向相同的情况,则本振光和信号光的电场表达式可以表示为

$$E_s = P(r)A_s \exp[i(\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r} - 2\pi\nu_s t)], \quad (1)$$

$$E_{lo} = P(r)A_{lo} \exp[i(\mathbf{k}_{lo} \cdot \mathbf{r} - 2\pi\nu_{lo} t)], \quad (2)$$

式中: $P(r) = \begin{cases} 1, & r \leq r_0 \\ 0, & r > r_0 \end{cases}$ ,  $r_0$ 为探测器半径; $\mathbf{r}$ 为探测器上任意点到探测器中心的向量, $r$ 为 $\mathbf{r}$ 的模; $A_s$ 和 $A_{lo}$ 分别为本振光和信号光振幅; $\mathbf{k}_s$ 和 $\mathbf{k}_{lo}$ 分别为信号光和本振光波矢; $\nu_s$ 和 $\nu_{lo}$ 分别为信号光和本振光光频。

图2为当两束光以小夹角垂直入射探测器且在探测器表面发生干涉的示意图, $\theta$ 为本振光和信号光波矢夹角。两束光波叠加的干涉项可以表示为

$$I_{12} = 2A_{lo}A_s \cos[2\pi\Delta\nu t + (\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_{lo}) \cdot \mathbf{r}], \quad (3)$$

外差电流可以表示为<sup>[13]</sup>

$$i_h(t) = 2 \left( \frac{e c \epsilon_0}{h \nu} \right) \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \eta(r) A_s A_{lo} \times \cos[2\pi\Delta\nu t + (\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_{lo}) \cdot \mathbf{r}] r dr d\varphi, \quad (4)$$

式中: $e$ 为元电荷; $c$ 为光速; $\epsilon_0$ 为真空中的介电常数; $h$ 为普朗克常量; $\nu$ 为光频; $\Delta\nu = |\nu_s - \nu_{lo}|$ 为本振光和信号光的频率差; $\varphi$ 为方位角; $\eta(r)$ 为探测器的量子效率分布。考虑探测器量子效率均匀的情况,在小角度情况下, $(\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_{lo}) \cdot \mathbf{r} \approx kr\theta \cos\varphi$ ,其中 $k$ 为波数。对 $\varphi$ 求积分,则探测器的光电流可以表示为

$$i_h(t) = 2\pi\eta \left( \frac{e c \epsilon_0}{h \nu} \right) \cos(2\pi\Delta\nu t) \int_0^{r_0} A_s A_{lo} J_0(kr\theta) r dr, \quad (5)$$

式中: $J_0(\cdot)$ 为零阶贝塞尔函数。(5)式化简可得

$$i_h(t) = 2\pi\eta \left( \frac{e c \epsilon_0}{h \nu} \right) A_s A_{lo} \cos(2\pi\Delta\nu t) \frac{J_1(kr_0\theta)}{kr_0\theta}, \quad (6)$$

式中: $J_1(\cdot)$ 为1阶贝塞尔函数。定义外差效率参数

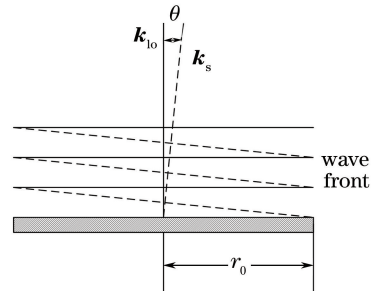


图2 本振光和信号光存在波面失配时在探测器表面的干涉原理

Fig. 2 Interference of oscillator beam and signal beam on the surface of detector when the two beams mismatch

$$\gamma(\theta) = \left[ \frac{2J_1(kr_0\theta)}{kr_0\theta} \right]^2, \quad (7)$$

电流信号的均方值可表示为

$$\langle i_{\text{in}}^2 \rangle = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi\eta e c \epsilon_0}{h\nu} \right)^2 A_s^2 A_o^2 \gamma(\theta). \quad (8)$$

外差效率仿真曲线如图 3 所示,可以看到外差效率随  $kr_0\theta$  单调递减,当  $kr_0\theta=1.614$  时外差效率下降到 0.5。

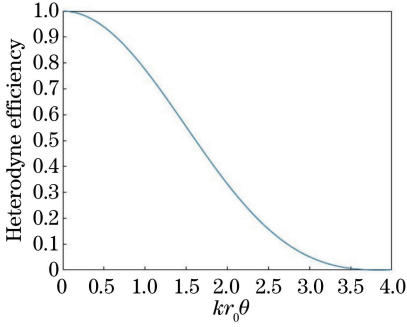


图 3 外差效率  $\gamma$  随  $kr_0\theta$  的变化曲线  
(信号光和本振光近似为是平面波)

Fig. 3 Heterodyne efficiency parameter  $\gamma$  as function of  $kr_0\theta$ .

Assuming that signal and local oscillator is plane wave

## 2.2 声光偏转器原理

AOD 基于声光光栅的布拉格效应,当超声波在声光晶体中传播时不同的区域被拉伸或者被压缩,介质的折射率被周期性地调制,故可以等效成移动的相位光栅。

如图 4 所示,由超声波产生的这种衍射效应可以用来改变光束的偏转角,从微观的角度看其实是光子和声子的相互作用。因此,衍射光束的光子的矢量满足动量定理<sup>[14]</sup>。衍射角可以表示为

$$\theta_B = \arcsin(\lambda f_c / 2nv), \quad (9)$$

式中: $\lambda$  为真空中光波长; $f_c$  超声波频率; $n$  为折射率; $v$  为超声波的传播速度。当超声波频率从  $f_c$  变

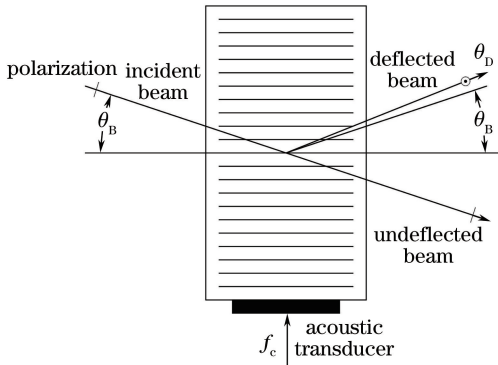


图 4 布拉格光栅的作用原理

Fig. 4 Operation principle of Bragg grating

成  $f_c + \Delta f$  时发生的角度变化为

$$\theta_D = \lambda \Delta f / nv - 2\theta_B. \quad (10)$$

当给 AOD 一定频率的信号时,通过(10)式可以计算出衍射角。当输入的频率发生变化时会使光束的波面发生弯曲<sup>[14]</sup>。在利用 AOD 使本振光章动时,为了减少 AOD 对波面的影响,可以采用点扫描的方式给 AOD 输入频率周期性跳变的信号,使本振光在空间上以对称的角度来回跳变。假设光束宽度为  $w$ ,当输入频率发生变化时,超声波穿过光束的时间  $T_{\text{set}}$  可以表示为

$$T_{\text{set}} = \frac{w}{v}. \quad (11)$$

当用 AOD 使本振光章动时,频率跳变的间隔最小为  $2T_{\text{set}}$ 。超声波的传播速度为 670 m/s,若光束的直径为 1 mm,则  $T_{\text{set}} = \frac{10^{-3} \text{ m}}{670 \text{ m/s}} = 1.493 \mu\text{s}$ 。

## 2.3 角度误差提取算法

水平/垂直偏转两个 AOD 实现了本振光章动。由于  $T_{\text{set}}$  限制了光束发生偏转的最短时间,为了使章动的频率远大于信号光角度抖动的频率<sup>[10]</sup>,且尽量减少光束偏转对波面的扰动,采用四点扫描的方式,即本振光会在空间上以对称的 4 个角度来回跳变,如图 5 所示。 $T$  为本振光扫描 4 个角度所需的时间, $\phi_0$  为本振光章动角度。由于章动的周期比信号光角度抖动的频率大很多,可以认为在一个周期内信号光的角度的几乎没有发生改变。 $\alpha(nT)$  和  $\beta(nT)$  分别为在某个周期内信号光在水平和垂直方向上的角度误差; $\phi(nT), \phi(nT+T/4), \phi(nT+T/2)$  和  $\phi(nT+3T/4)$  为在该周期的 0,  $T/4, T/2$  和  $3T/4$  时刻信号光和本振光的夹角。

下面利用  $nT$  和  $nT+T/2$  时刻的夹角关系计

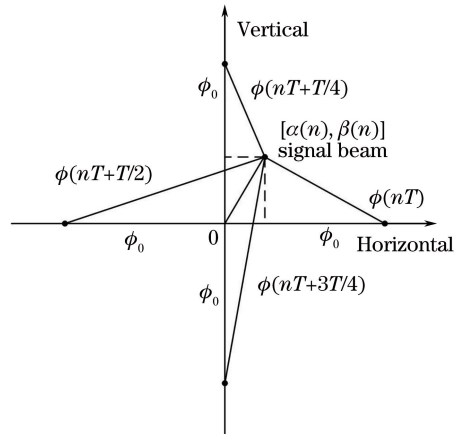


图 5 本振光和信号光角度关系的示意图

Fig. 5 Diagram of angle between local oscillator and signal

算水平方向的角度误差,在  $nT$  和  $nT + T/2$  时刻本振光和信号光的夹角写成

$$\phi(nT) = \sqrt{[\alpha(nT) - \phi_0]^2 + \beta^2(nT)}, \quad (12)$$

$$\phi(nT + T/2) = \sqrt{[\alpha(nT) + \phi_0]^2 + \beta^2(nT)}. \quad (13)$$

令  $\sigma(t) = kr_0\phi(t)$ , 将  $\ln\langle i_h^2(nT) \rangle$  在  $\sigma(nT) = 0$  处二阶展开,  $\langle i_h^2(nT) \rangle$  为探测器电流均方值, 将  $\langle i_h^2(nT) \rangle$  用(8)式表示可以得到

$$\begin{aligned} \ln\langle i_h^2(nT) \rangle &= 2\ln\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\pi\eta e c \epsilon_0}{h\nu}\right)^2 A_s^2 A_{lo}^2\right] + 2\ln\left\{\frac{2J_1[\sigma(nT)]}{\sigma(nT)}\right\}\Bigg|_{\sigma(nT)=0} + \\ &2\frac{d}{d[\sigma(nT)]}\ln\left\{\frac{2J_1[\sigma(nT)]}{\sigma(nT)}\right\}\Bigg|_{\sigma(nT)=0}\sigma(nT) + 2\frac{d}{d[\sigma(nT)]^2}\ln\left\{\frac{2J_1[\sigma(nT)]}{\sigma(nT)}\right\}\Bigg|_{\sigma(nT)=0}\frac{[\sigma(nT)]^2}{2} + o([\sigma(nT)]^2), \end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $o([\sigma(nT)]^2)$  为  $[\sigma(nT)]^2$  的高阶小量, 因此

$$\ln\langle i_h^2(nT) \rangle \approx -2[\sigma(nT)]^2 + 2\ln\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\pi\eta e c \epsilon_0}{h\nu}\right)^2 A_s^2 A_{lo}^2\right]. \quad (15)$$

同理将  $\ln\langle i_h^2(nT + T/2) \rangle$  展开可以得到

$$\ln\langle i_h^2(nT + T/2) \rangle \approx -2[\sigma(nT + T/2)]^2 + 2\ln\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\pi\eta e c \epsilon_0}{h\nu}\right)^2 A_s^2 A_{lo}^2\right], \quad (16)$$

将(15)式、(16)式相减, 并将(12)式、(13)式分别代入, 可以得到

$$\ln\left[\frac{\ln\langle i_h^2(nT) \rangle}{\ln\langle i_h^2(nT + T/2) \rangle}\right] \approx 2[\sigma(nT + T/2)]^2 - 2[\sigma(nT)]^2 = 4\phi_0 k^2 r_0^2 \alpha(nT), \quad (17)$$

$$\alpha(nT) \approx \frac{1}{4\phi_0 k^2 r_0^2} \ln\left[\frac{\ln\langle i_h^2(nT) \rangle}{\ln\langle i_h^2(nT + T/2) \rangle}\right]. \quad (18)$$

同理利用  $nT + T/4$  和  $nT + 3T/4$  的夹角关系可以计算垂直方向上的角度误差:

$$\beta(nT) \approx \frac{1}{4\phi_0 k^2 r_0^2} \ln\left[\frac{\ln\langle i_h^2(nT + T/4) \rangle}{\ln\langle i_h^2(nT + 3T/4) \rangle}\right]. \quad (19)$$

## 2.4 算法精度分析

为了验证算法进行相关仿真。假设归一化的章动的角度  $kr_0\phi_0 = 0.5$ 。将算法计算得到的水平和垂直的角度误差值转换成极坐标与实际值对比, 如图6所示, 图中章动角为  $kr_0\phi_0 = 0.5$ ;  $\varphi_t, \varphi_c, \varphi_e$  分别为方位角的理论值、计算值、计算误差;  $kr_0\theta_t, kr_0\theta_c, kr_0\theta_e$  分别为归一化角度误差的理论值、计算值、计算误差。从图6仿真结果可以看出, 信号光角度误差的方位的计算结果比较精确, 信号光角度误差的较小时, 角度误差大小的计算值和实际值基本吻合。跟踪闭环以后角度误差很小, 所以算法在实现闭环以后精度较高。角度误差的方位角的计算误差最大为  $\varphi_e = 5 \times 10^{-4}$  rad, 当  $kr_0\theta_t = 1$  时, 角度误差大小的计算误差  $kr_0\theta_e = 0.033$ 。

## 3 实验结果

实验中激光器发出的波长为 1550 nm 的激光被分成两路, 一路经过 AOD 作为本振光, 另一路

经过 1 MHz 移频器调制作作为信号光。实验系统中快反镜用于模拟信号光的角度误差, 两个 AOD 分别使光束发生水平和垂直方向上的偏转, 以实现本振光的章动。然后让两束光通过  $2 \times 4$  光学桥接器混频<sup>[15]</sup>, 其中一路耦合进探测器, 探测器前端加有小孔, 其直径为 1 mm。图7为系统光路图, 其中快反镜为 NEWPORT 的 FSM-300, 表1为其相关参数, AOD 为中国电子科技集团公司第二十六所研究所研制的 SGYF40-1550-1P-T 型无频移声光扫描器, 其扫描精度为 0.1%, 探测器采用的是 Thorlabs 的 PDB-210C, 准直器为 Thorlabs 的 F810APC-1550。

表1 FSM-300 参数

Table 1 Parameters of FSM-300

Parameter of FSM	Angular range from $\pm 10$ V / mrad	Resolution (RMS) / $\mu$ rad	Repeatability (RMS) / $\mu$ rad
Value	$\pm 26.2(\pm 1.5 \text{ } ^\circ\text{C})$	$\leq 1$	$\leq 3$

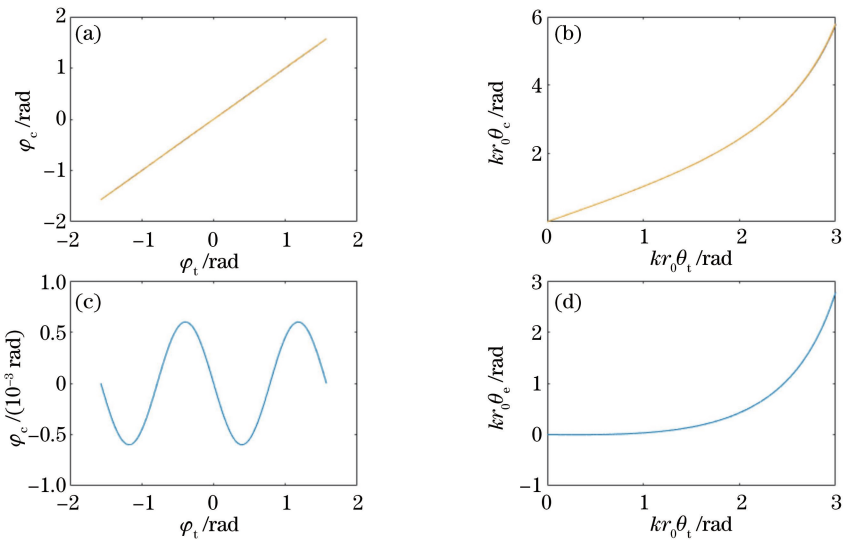


图 6 (a) 信号光角度误差的方位的计算值; (b) 信号光角度误差大小的计算值; (c) 信号光角度误差的方位的计算误差; (d) 信号光角度误差大小的计算误差

Fig. 6 (a) Calculation of azimuth of signal angle error; (b) calculation of quantity of signal angle error; (c) calculation error of azimuth of signal angle error; (d) calculation error of quantity of signal angle error

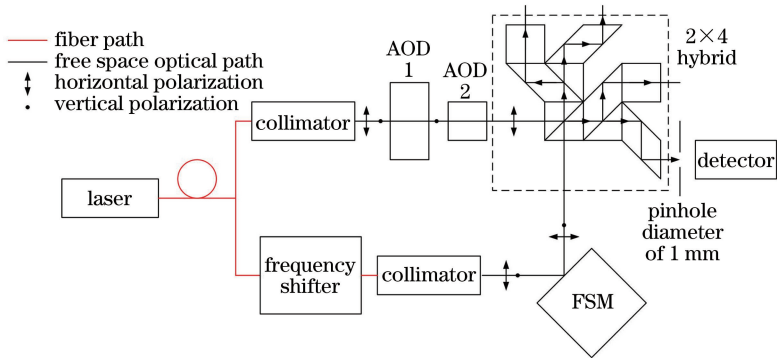


图 7 系统光路图

Fig. 7 Light path diagram of the system

### 3.1 外差效率曲线

让 AOD 的驱动信号的频率都固定在 40 MHz, 在 FSM 的  $x$  轴上施加电压为 10 Hz 的三角波。使本振光光轴保持不变, 而信号光在水平方向上扫描; 然后采集探测器信号, 提取包络, 计算归一化的外差效率与角度误差的关系, 并与上文中理论上的外差效率  $\gamma(\theta) = \left[ \frac{2J_1(kr_0\theta)}{kr_0\theta} \right]^2$  作对比。图 8 为归一化外差效率的实验值和理论值对比, 图 8(a) 为采集到的信号通过包络提取算法得到的探测器电压包络信号, 将该电压作归一化处理可以得到外差效率的变化; 图 8(b) 为快反镜控制信号, 图 8(a) 为同步采得探测器信号, 将探测器信号和快反镜的参数相乘可得到快反镜实时偏转的角度, 从而可以得到不同夹角下的外差效率; 从图 8(c) 中可以看到归一化的

外差效率测量值和理论值基本吻合, 因此上文中推导的算法在实际情况中可以使用。

### 3.2 角度误差

控制 AOD 的信号频率变化如图 9(a)、(b) 所示, 经过 AOD 后本振光会在水平和垂直轴的 4 个点循环跳变。利用 (10) 式可以计算出本振光章动的 4 个角度, 其分布如图 9(c) 所示, 章动的频率为 2 kHz, 实验中给快反镜的  $x$  轴加正弦信号, 信号频率为 10 Hz, 幅值为 100 mV; 然后采集 AOD 的控制信号和探测器的电压, 通过 (18)、(19) 式计算信号光的角速度变化。图 10(a) 为采集到的探测器的电压信号, 如果将该图的时间尺度放大可以看到探测器电压在每个周期包络会发生 4 次变化, 结合声光偏转器的驱动信号通过 (18)、(19) 式可以计算信号光的角速度; 图 10(b) 算法计算得到的误差和实际快反镜

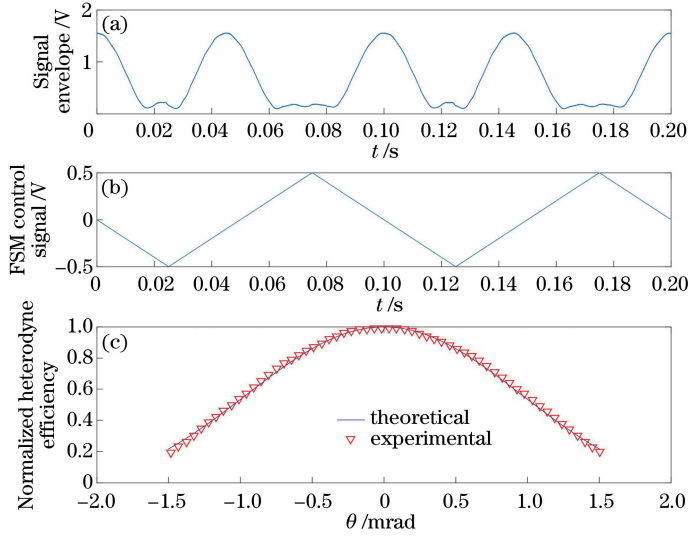


图 8 外差效率曲线测量。(a)探测器信号包络;(b)快反镜控制电压;(c)归一化的外差效率的实验值和理论值对比

Fig. 8 Measurement of heterodyne efficiency curve. (a) Envelope of detector voltage signal;

(b) control voltage of FSM; (c) comparison of theoretical and measured normalized heterodyne efficiency

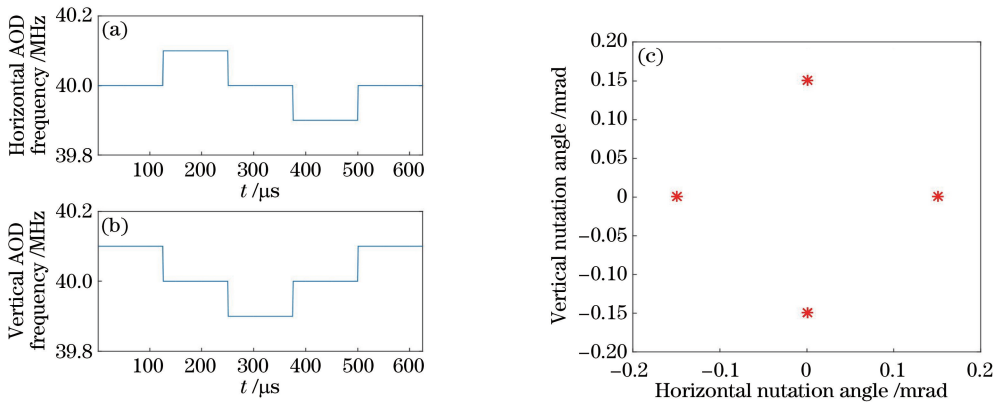


图 9 (a)水平方向上 AOD 驱动信号;(b)垂直方向上 AOD 驱动信号;(c)本振光的章动角度

Fig. 9 (a) Driven signal of horizontal AOD; (b) driven signal of vertical AOD; (c) nutation angle of local oscillator

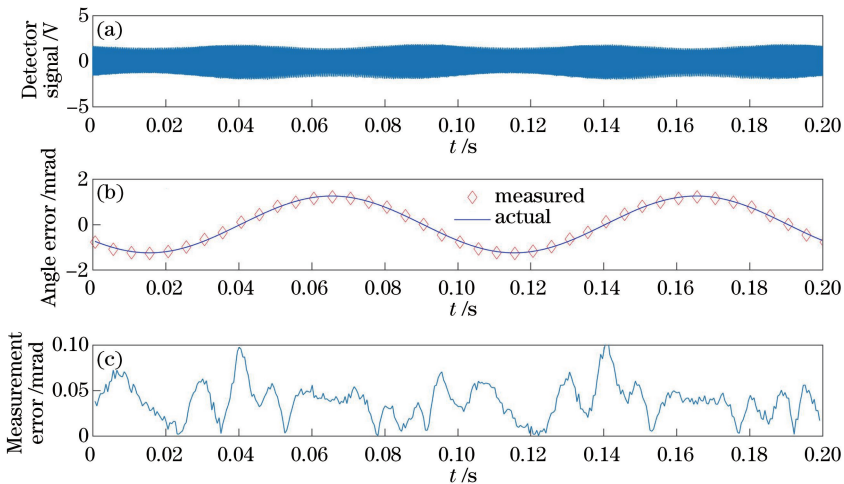


图 10 角度误差和实际误差对比。(a)探测器的电压信号;(b)水平方向测量值和实际值对比;(c)测量误差

Fig. 10 Comparison of measured angle error and actual error. (a) Voltage signal of detector;

(b) comparison of the measured and actual error of angle; (c) measurement error

产生的角度误差对比,计算结果和实际扰动吻合;图 10(c)为测量误差,可以看到在角度误差比较大时计算误差比较大,与算法仿真的结果符合,归一化信号光发散角为  $\Theta = \frac{1.22\lambda}{r_0} = 3.782 \text{ mrad}$ ,其中测量误差最大值为  $0.203 \text{ mrad} = 0.054\Theta$ ,测量误差的均方差为  $0.051 \text{ mrad} = 0.013\Theta$ 。

## 4 结 论

阐述了基于声光章动的精跟踪的角度误差测量系统的基本原理,建立了声光章动的模型,并推导了计算角度误差的算法。同时在实验室搭建了相应的验证系统,测量的外差效率变化规律和理论的外差效率一致,测量的角度误差和实际角度误差基本吻合,测量精度优于  $1/10$  信号光发散角,证明这种方法测量角度误差的是可行的,是可以运用到空间通信精跟踪系统中。

## 参 考 文 献

- [1] Chan V W S. Free-space optical communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4750-4762.
- [2] Bai S, Wang J Y, Zhang L, *et al.* Development progress and trends of space optical communications [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 070001.  
白帅, 王建宇, 张亮, 等. 空间光通信发展历程及趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 070001.
- [3] Xu N, Liu L R, Liu D A, *et al.* Technologies and recent progress of coherent optical communications in free space[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2007, 44(8): 44-51.  
许楠, 刘立人, 刘德安, 等. 自由空间相干光通信技术 & 发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(8): 44-51.
- [4] Xu Y X, Xu M M, Sun J F, *et al.* Integrated technology of communication and velocity measurement in satellite coherent optical communication [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 120603.  
许云祥, 许蒙蒙, 孙建锋, 等. 卫星相干光通信测速一体化技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 120603.
- [5] Swanson E A, Chan V W S. Heterodyne spatial tracking system for optical space-communication[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1986, 34(2): 118-126.
- [6] Dong R, Ai Y, Xiao Y J, *et al.* Design and communication experiment of fine tracking system for free space optic[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2718-2722.  
董冉, 艾勇, 肖永军, 等. 自由空间光通信精跟踪系统设计及其通信实验[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2718-2722.
- [7] Knibbe T E, Swanson E A, Roberge J K. Spatial tracking using an electrooptic nutator and a single-mode optical fiber [J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1635: 309-317.
- [8] Oleski P J, Dorrian K W, Busch T E. Nonmechanical laser-beam steering spoiling methods for inter satellite cross-links [J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2123: 336-347.
- [9] Nikulin V V, Khandekar R M, Sofka J. Agile acousto-optic tracking system for free-space optical communications[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(6): 064301.
- [10] Deng K, Wang B Z, Zhao G H, *et al.* Principle and performance analysis of coherent tracking sensor based on local oscillator beam nutation [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 23528-23538.
- [11] Swanson E A, Bondurant R S. Using fiber optics to simplify free-space lasercom systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1218: 70-82.
- [12] Gao J Q, Sun J F, Li J W, *et al.* Coupling method for making space light into single-mode fiber based on laser nutation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0801001.  
高建秋, 孙建锋, 李佳蔚, 等. 基于激光章动的空间光到单模光纤的耦合方法[J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0801001.
- [13] Cohen S C. Heterodyne detection: phase front alignment, beam spot size, and detector uniformity [J]. *Applied Optics*, 1975, 14(8): 1953-1959.
- [14] Nikulin V V, Bouzoubaa M, Skormin V A, *et al.* Modeling of an acousto-optic laser beam steering system intended for satellite communication [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(10): 2208-2214.
- [15] Wan L Y, Su S D, Liu L R, *et al.* Design of a new  $90^\circ 2 \times 4$  hybrid based on the birefringence and the electro-optic effect of crystal[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(9): 2358-2361.  
万玲玉, 苏世达, 刘立人, 等. 基于晶体双折射和电光效应设计的  $90^\circ 2 \times 4$  空间光桥接器[J]. *中国激光*, 2009, 36(9): 2358-2361.