

# 基于 CMOS 的量子通信精跟踪系统设计与检验

张 亮 王建宇 贾建军 林俊仰

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要** 分析了量子通信中精跟踪系统的构成要素, 由于量子通信中信标光的脉冲特性, 提出以高帧频 CMOS 作为精跟踪探测器, 其经一体化设计帧频达到 2.5 kHz, 并以压电陶瓷快速反射镜作为精跟踪执行机构。采用离散化设计及根轨迹方法分析了控制参数取值及系统传递函数。对实验系统进行了实验室及外场 32 km 车载平台测试, 在实验室静态条件下系统跟踪精度优于  $\pm 1 \mu\text{rad}$ , 外场动态情况下跟踪精度优于  $\pm 8 \mu\text{rad}$ , 采用频谱分析方法验证了精跟踪系统干扰抑制带宽大于 100 Hz。

**关键词** 光学设计; 量子通信; 精跟踪系统; 高帧频 CMOS; 离散化设计; 车载平台

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0205008

## Design and Performance of Fine Tracking System Based on CMOS for Quantum Communication

Zhang Liang Wang Jianyu Jia Jianjun Lin Junyang

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Shanghai 200083, China)

**Abstract** The component of fine tracking system for quantum communication is analyzed. The high frame CMOS detector is suit for fine tracking sensor because of the pulse beacon light and the frame rate up to 2.5 kHz by integrative design method. The piezo fast steering mirror is used for fine mechanism. The fine track control loop is analyzed by discrete design and root locus method, with the result of control parameters and system transfer function. The laboratory and outfield 32 km vehicle platform experimental tests are implemented. The accuracy is within  $\pm 1 \mu\text{rad}$  in the static state and  $\pm 8 \mu\text{rad}$  when the platform is moving. By frequency analysis, the disturbance rejection bandwidth is up to 100 Hz.

**Key words** optical design; quantum communications; fine tracking system; high frame rate CMOS; discrete design; vehicle platform

**OCIS codes** 060.0060; 120.0120; 270.0270

## 1 引 言

量子通信是以光子的量子态作为信息载体的非经典光通信, 发射端以单光子源作为信源, 接收端从接收到的单个光子偏振态中提取通信信息, 能够提供一种绝对安全的保密通信方式(量子密钥分发)。在星地量子通信系统中, 为了满足远距离通信的需求, 星上量子光的发散角仅几十微弧度, 光束对准精度要求小于  $\pm 10 \mu\text{rad}$ <sup>[1]</sup>。另外, 卫星通信端机处于

运动及振动平台下, 因此为了建立稳定的量子链路, 必须采用捕获、跟踪和瞄准(ATP)系统。ATP 系统通常采用粗跟踪环嵌套精跟踪环的复合轴形式<sup>[2]</sup>, 精跟踪系统的精度是 ATP 系统的最终精度。目前, 国内针对量子通信的精跟踪系统大多以静态工作为主, 运动平台的量子通信系统对精跟踪的带宽性能有更高的要求。本文基于自行研制的高帧频 CMOS 探测器实现了大于 100 Hz 的干扰抑制带

收稿日期: 2010-07-19; 收到修改稿日期: 2010-10-21

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KGCX1-YW-16)资助课题。

作者简介: 张 亮(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事光束精瞄等方面的研究。E-mail: planet0820@163.com

导师简介: 王建宇(1959—), 男, 博士, 研究员, 主要从事物理电子学、量子通信系统技术等方面的研究。

E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn(通信联系人)

宽,并进行了实验室及外场车载试验性能测试。

## 2 精跟踪系统构成要素分析

精跟踪系统位于望远镜后光路中(图 1),由快速反射镜(FSM)、精跟踪探测器、精跟踪数字控制器、数模转换模块(DAC)及驱动电路构成。量子光非常微弱,ATP 系统需要辅助的信标光来跟踪瞄准。粗跟踪系统将对方信标光引入精跟踪探测器视场,由精跟踪系统进行进一步的跟踪。精跟踪系统最重要的两个部件是光探测器与快速反射镜。

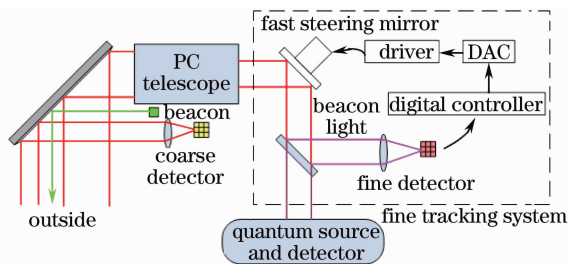


图 1 精跟踪系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of fine tracking system

### 2.1 精跟踪探测器

在激光通信精跟踪系统中广泛采用四象限探测器(4QD),4QD 为模拟输出,带宽很高,但存在死区,且受光斑模式影响较大<sup>[3]</sup>。CMOS 探测器为面阵器件,受光斑模式影响较小,并易于可视化输出。另外量子通信中,为了防止信标光对单光子量子计数产生影响,采用 10 kHz 的脉冲光作为信标光源。此时,4QD 的脉冲式输出需要经过复杂展宽保持处理才能用于采样闭环。而 CMOS 探测器是积分器件,在其帧频小于脉冲光频率时基本不受影响。为了减小延时,设计了基于现场可编程门阵列(FPGA)的集探测器驱动、图像预处理及信标光位置计算一体化的 CMOS 探测器单元,图像处理和提取几乎同时完成(图 2)。为了有效抑制星载平台振动,探测器帧频需大于 2 kHz<sup>[4]</sup>,采用 Cypress

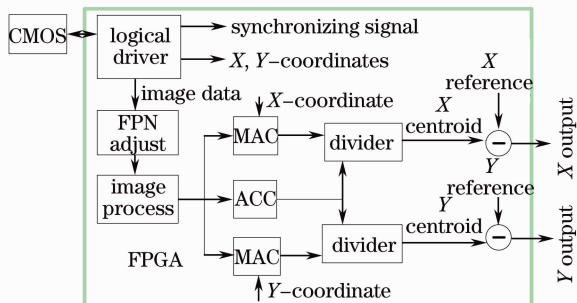


图 2 精跟踪 CMOS 探测器控制电路结构

Fig. 2 Circuit diagram of CMOS fine tracking detector

LUPA300 CMOS 图像传感器,在保证探测分辨率和探测视场时,设定读出窗口为 128 pixel × 128 pixel,此时最高帧频可达 2.5 kHz。

### 2.2 精跟踪执行机构

精跟踪执行机构为快速反射镜,最常采用的有音圈电机驱动和压电陶瓷驱动两种。音圈电机行程大,结构谐振频率一般为几十赫兹,而压电陶瓷驱动行程小,谐振频率高达上千赫兹。考虑到系统为轻便移动型,粗跟踪的跟踪残差小且频带高,采用压电陶瓷驱动结构,驱动电压范围 0~100 V,最大摆角范围为 10 mrad,谐振频率 1.5 kHz,以柔性机构作为传动环节,执行分辨率优于 1 μrad。

## 3 基于 CMOS 的精跟踪控制环路离散化设计分析

图 3 为精跟踪环控制框图,环路中的干扰主要为粗跟踪低频残差与外界高频扰动,因此系统以抗扰性为主。精跟踪系统为数据采样控制系统,由于采样频率(即 CMOS 帧频)2.5 kHz 仅为控制带宽(要求大于 200 Hz)的 10 倍左右,必须采用离散化设计方法,分析系统的离散传递函数<sup>[5]</sup>。

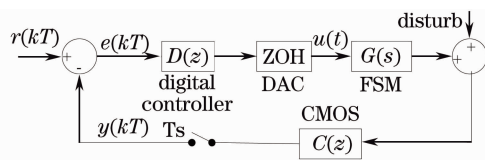


图 3 精跟踪环控制框图

Fig. 3 Control block of fine tracking loop

数字控制器采用比例积分微分(PID)控制算法,  $K_p, K_i, K_d$  分别为比例、积分及微分系数,其离散传递函数为

$$D(z) = K_p + K_i \frac{z}{z-1} + K_d \frac{z-1}{z} \quad (1)$$

被控对象 FSM 等效为二阶惯性系统<sup>[6]</sup>,谐振频率 1.5 kHz,阻尼系数取 0.7,其连续传递函数为

$$G(s) = \frac{9420 \times 9420}{s^2 + 2 \times 0.7 \times 9420s + 9420 \times 9420} \quad (2)$$

被控对象前的 DAC 为零阶保持器(ZOH),它们的组合离散传递函数<sup>[4]</sup>为

$$G(z) = (1 - z^{-1})Z \left[ \frac{G(s)}{s} \right] = \frac{1.03z + 0.1}{z^2 + 0.129z + 0.0051} \quad (3)$$

CMOS 探测器等效为一阶延时系统

$$C(z) = z^{-1} \quad (4)$$

系统离散设计的要点是  $K_p, K_i, K_d$  的参数取值。根据齐格勒-尼柯尔斯法则<sup>[7]</sup>，一般取  $K_d = 0.25K_i$ ，并另  $K_i = pK_p$ ，则系统传递函数的特征方程为

$$1 + D(z)G(z)C(z) = 1 + K_p \left( 1 + p \frac{z}{z-1} + \frac{1}{4} p \frac{z-1}{z} \right) = \frac{1.03z + 0.1}{z^3 + 0.129z^2 + 0.0051} = 0. \quad (5)$$

图 4 为  $p$  值不同时(5)式的离散根轨迹曲线，由于对称性仅做出虚轴上半部。图中沿箭头方向依次为  $p=1, 2, 4, 8$  时的根轨迹曲线，当  $p=2$  时，系统具备频率及阻尼综合最佳的根值点(下方箭头所示)，该点对应的 PID 参数为  $K_p = 0.15, K_i = p \times K_p = 0.3, K_d = K_i/4 = 0.075$ 。

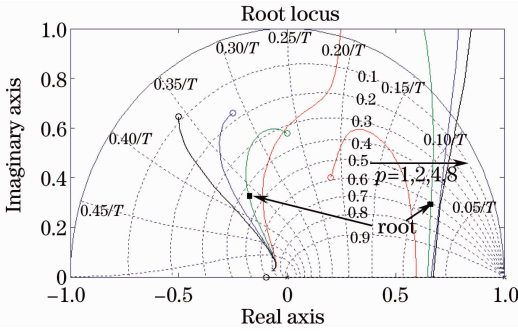


图 4 系统不同  $p$  值的根轨迹

Fig. 4 System root locus with different  $p$  values

系统的闭环传递函数  $CL(z)$  及干扰抑制函数  $R(z)$  分别为

$$CL(z) = \frac{D(z)G(z)C(z)}{1 + D(z)G(z)C(z)}, \quad (6)$$

$$R(z) = \frac{-1}{1 + D(z)G(z)C(z)}. \quad (7)$$

按上述的参数取值做出系统的闭环及干扰抑制波特图(图 5)，可知系统的闭环带宽大于 200 Hz，干扰抑制带宽大于 100 Hz。

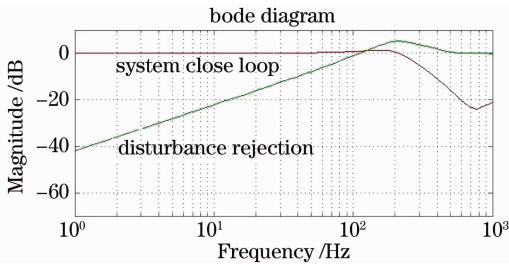


图 5 闭环及干扰抑制幅频曲线

Fig. 5 Close loop and disturbance rejection in the frequency domain

实际参数取值：根据根轨迹法计算的控制参数由于元件模型的不精确性并不是最佳的，实际设计中需要在此基础上进行微调。图 6 为不同控制参数

下的系统干扰抑制效果。对系统施加 12 Hz 正弦干扰，干扰角度峰值对应 10.2 个探测器像素，当采用理论分析的参数  $K_p = 0.15, K_i = 0.3, K_d = 0.075$  时干扰被抑制到 1.2 pixel；进行控制参数的微调，首先调节  $K_p$ ，然后微调  $K_i$  和  $K_d$ ，最终当  $K_p = 0.13, K_i = 0.44, K_d = 0.1$  时干扰被抑制到 1.0 pixel，干扰抑制带宽提高了 20%。

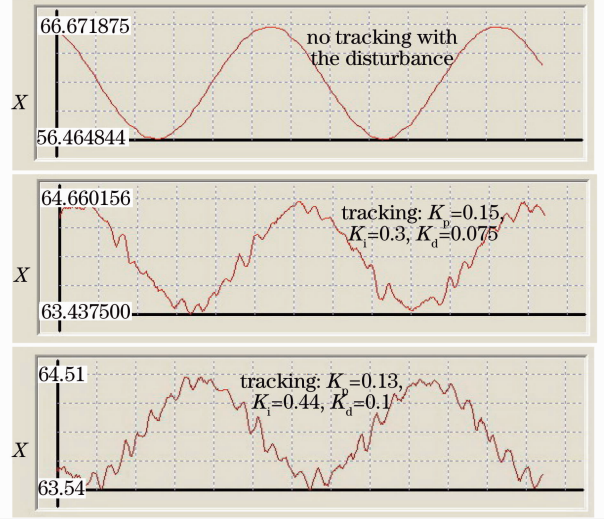


图 6 不同控制参数的干扰抑制效果

Fig. 6 Disturbance rejection results with different control parameters

## 4 系统性能检验

针对量子通信 ATP 系统性能进行了实验室测试。对精跟踪探测器进行了标定，其分辨率优于 0.1 pixel，即  $0.4 \mu\text{rad}$  (瞬时视场为  $4 \mu\text{rad}$ )，因此探测器的光斑质心可作为评判跟踪精度的依据。静态情况下，精跟踪误差标准差小于  $1 \mu\text{rad}$  [图 7(b)]。图 7(a)为精跟踪系统样机实物，为了便于研究瞄准效果，用一可见光激光器代替了图 1 中的量子源。

为了进一步测试系统在远距离大气湍流及动态情况下的跟踪性能，在青海湖进行了 32 km 车载跟踪实验，实验中同时采集了粗跟踪探测器和精跟踪探测器的质心数据。图 8(a)为粗跟踪二维跟踪误差，标准差为  $35 \sim 40 \mu\text{rad}$ ；图 8(b)为精跟踪跟踪误差，标准差降低为  $6 \sim 7 \mu\text{rad}$ 。

为了分析系统的扰动抑制特性，对车载敏感方向的粗精误差数据进行了快速傅里叶变换(FFT)频谱分析，如图 9 所示。由于粗跟踪频率较低，其 FFT 频段较小。表 1 为针对图 9 中典型的 3 个峰值进行的分析对比，根据表中的频率抑制比乘积可以推断系统的干扰抑制带宽大于 100 Hz。

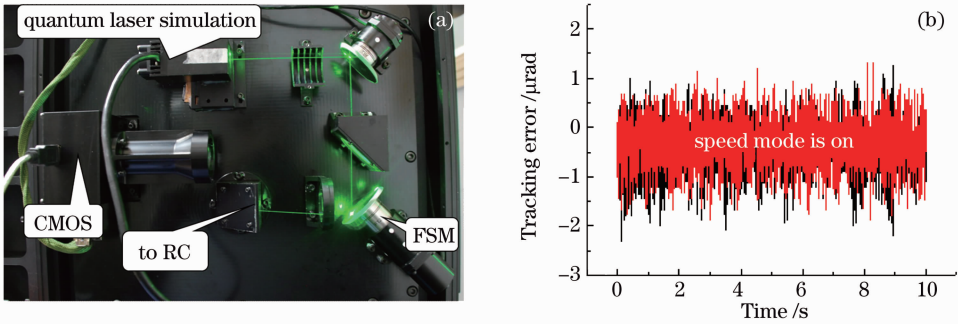


图 7 (a)精跟踪系统样机实物,(b)静态跟踪误差

Fig. 7 (a) Picture of fine tracking system, (b) tracking error in static state

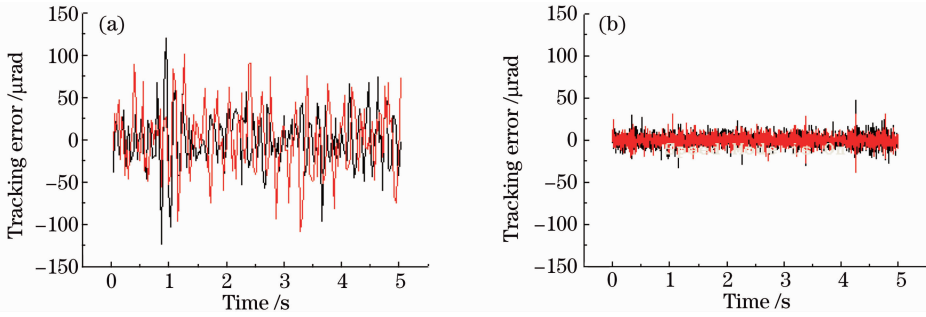


图 8 (a)车载粗跟踪跟踪误差,(b)车载精跟踪跟踪误差

Fig. 8 (a) Tracking error of coarse loop on vehicle, (b) tracking error of fine loop on vehicle

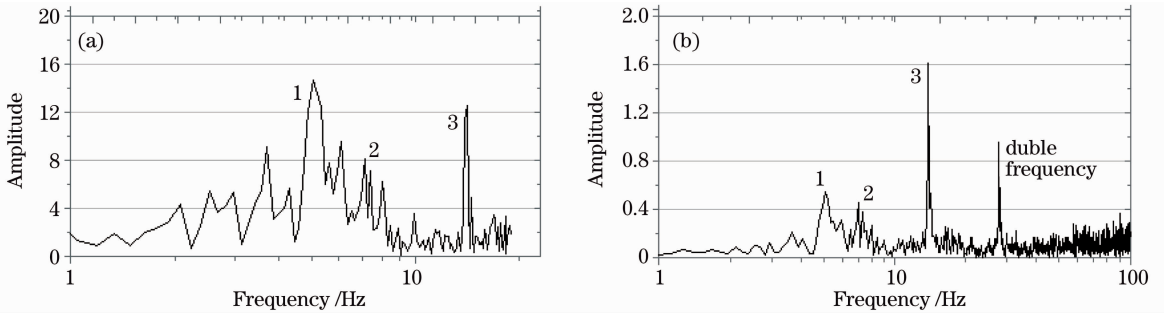


图 9 (a)粗跟踪误差 FFT 分析,(b)精跟踪误差 FFT 分析

Fig. 9 (a) FFT analysis of coarse loop error, (b) FFT analysis of fine loop error

表 1 误差 FFT 曲线峰值对比

Table 1 Contrast of FFT wave peak value

	No. 1	No. 2	No. 3
Frequency /Hz	5	7.1	14.2
Value of Fig. 9(a)	14.4	8	12.3
Value of Fig. 9(b)	0.54	0.45	1.5
Rejection ratio	26.7:1	17.8:1	8.2:1
Frequency multiply rejection ratio	133	126	116

200 Hz,并经实验室及外场实验检验,系统分辨率优于  $0.4 \mu\text{rad}$ ,干扰抑制带宽大于 100 Hz,表明该系统在跟踪精度及带宽上满足量子通信需求。

### 参 考 文 献

- 1 J. G. Rarity, P. R. Tapster. Ground to satellite secure key exchange using quantum cryptography[J]. *New J. Phys.*, 2002, **4**: 82.1~82.21
- 2 Liu Liren. Laser communications in space I. optical link and terminal technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 2~3  
刘立人. 卫星激光通信 I. 链路和终端技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 2~3
- 3 Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin *et al.*. Study four-quadrant detector in the free space laser communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2030~2034  
韩成, 白宝兴, 杨华民等. 自由空间激光通信四象限探测器性能研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2030~2034
- 4 D. Russell, H. Ansari. LaserCom pointing acquisition and

## 5 结 论

高帧频一体化设计的 CMOS 传感器具有数据处理延时小、速度快的特点。以此为探测器的量子通信精跟踪系统经离散化设计分析其跟踪带宽大于

- tracking control using a CCD-based tracker[C]. *SPIE*, 1994, **2123**: 294~302
- 5 G. F. Franklin, J. D. Powell. Feedback Control of Dynamic Systems[M]. Li Zhonghua, Zhang Yunong Transl.. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2007. 456~481
- G. F. Franklin, J. D. Powell. 自动控制原理与设计[M]. 李中华, 张雨浓 译. 北京: 人民邮电出版社, 2007. 456~481
- 6 Shao Bing. Research on Key Technology of Fine Pointing Micro-Positioning System for Laser Intersatellite Communication Terminal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. 64~71
- 邵 兵. 激光星间通信终端精瞄微定位系统关键技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006. 64~71
- 7 K. Ogata. Modern Control Engineering (Fourth Edition)[M]. Lu Boying, Yu Haixun Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. 633~636
- K. Ogata. 现代控制工程(第四版)[M]. 卢伯英, 于海勋 译. 北京: 电子工业出版社, 2007. 633~636