

空间光通信中低信噪比条件下的光束位置检测

李庆^{1,2,3,4},徐少雄^{1,3,4},彭真明²,黄永梅^{1,3,4*}

(1.中国科学院光电技术研究所,成都 610209; 2.电子科技大学信息与通信工程学院,成都 611731;

3.中国科学院光束控制重点实验室,成都 610209; 4.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:空间光通信中,需要通信双方检测入射光轴偏差以保证通信链路畅通。但光学天线控制系统使用的信标光经长距离传输后损耗过大,受背景光和暗电流噪声强烈干扰,系统中的四象限探测器(QD)对光斑位置检测精度下降。为解决这一问题,根据QD工作特性和噪声特性,提出了一种基于幅度调制和循环互相关运算的检测方法。该方法在QD输出信噪比(SNR)过低的情况下,可精确测量QD各象限输出的电流幅度,并以此计算出准确的光斑位置。实验结果表明:当QD的输出SNR为-14.58 dB时,该方法的绝对误差小于0.012 mm,证明了该方法的有效性。

关键词:空间光通信;光学天线控制系统;四象限探测器;循环互相关

中图分类号: TN914 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)02-0006-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.02.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Light spot position detection in space optical communication with low SNR

LI Qing^{1,2,3,4}, XU Shaoxiong^{1,3,4}, PENG Zhenming², HUANG Yongmei^{1,3,4*}

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; 2. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 3. Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In space optical communication, both communication terminals need to detect the deviation of the incident optical axis to ensure that the communication link is unblocked. However, the beacon light used by the optical antenna control system has a large loss after long-distance transmission, and is strongly disturbed by background light and dark current noise. So, the accuracy of spot detection of the four-quadrant detector (QD) is reduced. To solve this problem, according to QD operating characteristics and noise characteristics, a new method based on amplitude modulation and cyclic cross-correlation is proposed. Under the condition of low output signal to noise ratio (SNR) of QD, this method can accurately measure the photocurrent amplitude of each quadrant of QD and calculate the accurate spot position. Experiments results show that, when the output SNR of QD is -14.58 dB, the absolute error of this method is less than 0.012 mm, the effectiveness of the method is proved.

Key words: space optical communication; optical antenna control system; quadrant detector; cyclic cross-correlation

0 引言

自由空间光通信(FSO)兼容了无线通信和光纤通信的优点,得到越来越广泛的应用。这种通信方式通过激光束承载数据,实现点对点传输。通信过程中,需要通信双方互相保持瞄准和跟踪状态以维持通信链路畅通。所以,光学天线控制是FSO系统中的一项关

键技术,其主要功能是检测信标光射入角度偏差,以此发布跟踪和指向指令。入射光位置偏差检测的精度很大程度上决定了FSO系统的性能^[1]。

四象限探测器(QD)具有分辨率高、响应速度快等优点,广泛应用于高精度的位置测量和跟踪,但受热噪声和背景光噪声影响也较大^[2],特别是在空间光通信中,信标光经远距离信道衰减,QD对光斑位置的检测精度受到严重影响。为提高QD检测精度,张辉等人建立了QD检测的误差模型,并分析了引起误差的主要因素^[3];Jiabing W等人使用布罗兹曼函数对QD的输出位置曲线进行线性拟合^[4],但该方法仅针对QD的非线性进行修正,在QD输出信噪比较低的情况下无法保证检测精度。针对低信噪比时的光束位置检测问题,WANG Guanghui等人利用方波对光束进行二进制

收稿日期:2019-08-19.

基金项目:国家自然科学基金(批准号:U1738204)资助。

作者简介:李庆(1980-),男,电子科技大学信息与通信工程学院和中国科学院光电技术研究所联合培养的博士研究生,信号与信息处理专业,主要研究领域为空间光通信中微弱信标光处理技术,具体为光束位置检测技术。参与了星地光通信某型号光学天线控制系统的设计。

*通信作者:黄永梅(E-mail: huangym@ioe.ac.cn)。



振幅键控调制,并在接收端对探测器输出信号进行累加,以此检测光束位置^[9],但该方法对收发双方同步性要求很高。

为抑制背景光和暗电流噪声,增强局部频点上的信噪比,提高光斑位置检测精度,本文根据 QD 的工作特点,提出一种基于幅度调制和循环互相关算法的光束位置检测方法。

1 QD 工作特性分析

FSO 系统中光通信终端之间的常用捕获和跟踪方法是使用一个带有象限探测器的望远镜控制子系统,望远镜控制子系统工作原理如图 1 所示。

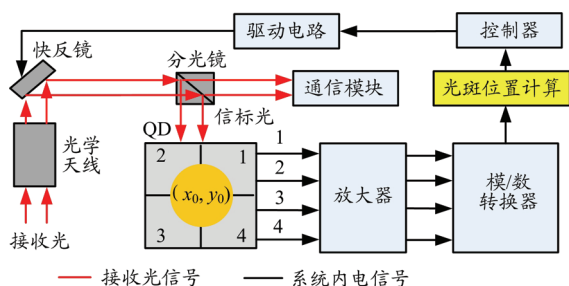


图 1 望远镜控制系统

图 1 中,QD 由 4 个相同的 PN 结光电二极管组成,当光束照射到 QD 上时,每一个象限都可独立输出光电流,每道电流的幅度分别对应光束照射到该象限中的能量强度。因此,按 4 个象限输出光电流幅度的比例关系,可以估计出光束中心相对于 QD 中心的位置。当一簇高斯光束的质心位置为 $[x_0, y_0]$ 时,可用无量纲归一化偏差 Δ_x 和 Δ_y 分别表示光斑在 X 轴和 Y 轴方向上的偏移量,其表达式为^[9]:

$$\begin{cases} \Delta_x = \frac{(I_1 + I_4) - (I_2 + I_3)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \\ \Delta_y = \frac{(I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \end{cases} \quad (1)$$

其中, I_1 、 I_2 、 I_3 和 I_4 分别为 QD 中 4 个象限输出的光电流,其幅度值对应光束在 4 个象限上的能量分布大小。

文献[3]详细介绍了高斯光斑在 QD 上的归一化偏差解算过程,并分析了影响检测精度的主要因素,最终给出了基于 QD 的位置检测精度的近似数学模型。

以 X 轴为例,QD 的检测随机偏差可用方差 $\sigma_{\Delta_x}^2$ 表示:

$$\sigma_{\Delta_x}^2 = \frac{1 + \text{erf}^2\left(\frac{\sqrt{2} \cdot x_0}{\omega}\right)}{SN_{\text{qd}}} \quad (2)$$

其中, $\text{erf}^2(\cdot)$ 表示误差函数, ω 为光斑半径, SN_{qd} 为 QD 的输出信噪比。从式(2)中可以看出:QD 的位置检测

精度与高斯光斑半径、光斑质心位置和信噪比有关。现有的提高 QD 检测精度的方法都是通过查表法或拟合合法对 QD 的非线性进行修正,这些方法在信噪比过低的情况下无法运行。所以,本文提出了一种基于幅度调制和循环互相关算法的新方法,通过提高局部频点上的信噪比来提高 QD 检测精度。

2 低信噪比条件下提高 QD 位置检测精度

本文提出的方法分为 2 个步骤:首先,在发射端使用一个余弦信号对信标光进行幅度调制,这样接收端中 QD 输出的光电流会包含相同频率的余弦信号;然后,在接收端生成一个同频的余弦信号与 QD 输出的光电流进行循环互相关运算,将计算结果的幅度值除以匹配电阻值后代入式(1),即可计算出光斑位置。

2.1 信标光的调制

信标光信号经幅度调制后,接收端 QD 输出的对应光电流可记为:

$$I_{\text{beam}} = \frac{\eta \cdot a^2}{2} [1 + 2d(t)] \quad (3)$$

其中, η 为光电转换效率; a 为光场强度; $d(t)$ 为调制信号。由式(3)可知,幅度调制后的信标光信号对应的输出光电流包含了 $d(t)$ 的信息。若 $d(t)$ 是一个窄带信号,则可将信标光信号的能量集中在一个频点上,提高频点上的局部信噪比。典型的窄带信号为正弦(余弦)信号,则可令 $d(t) = \cos(w_1 t)$, w_1 为调制信号频率。

2.2 弱信标光信号的互相关检测

通过 2.1 节的分析,可以把 QD 输出的信号改写为电压形式,记为:

$$s(t) = x(t) + n(t) = K A \cos(w_1 t + \varphi_1) + n(t) \quad (4)$$

其中, K 为 QD 到模/数转换器之间的信号通道总增益; $A = \eta \cdot a^2 / 2$ 为信号幅度; φ_1 为信号相位; $x(t)$ 为信标光对应的信号, $n(t)$ 为噪声。信标光信号经远距离信道传输后,会被大幅度衰减,严重的情况下,信标光所对应的光电流会被噪声淹没,用传统的直接检测方法难以提取信标光所对应的光电流信号。

根据式(4),经过幅度调制的信标光信号通过 QD 检测后,其输出信号 $x(t)$ 带有已知频率 w_1 。可由接收端产生一个具有同样频率的参考信号 $y(t) = \cos(w_1 t)$,它与 $x(t)$ 之间具有良好的时间相关特性,而与噪声 $n(t)$ 不具备时间相关特性。所以使用互相关运算,可以在时域上对 $x(t)$ 的幅度进行累积而不会对噪声幅度进行累积,这样可以提高 $x(t)$ 的信噪比。 $x(t)$ 和 $y(t)$ 间的互相关运算表示为:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{KA}{2T} \int_0^T \cos[w_1(2t+\tau) + \varphi_1] dt + \frac{KA}{2} \cos(w_1\tau + \varphi_1) \quad (5)$$

其中, τ 为相关运算中的时延变量。当积分时间 $T \rightarrow \infty$ 时, 式(5)中极限运算结果为 0。由于背景光和暗电流噪声都可视为白噪声, 所以 $y(t)$ 与 $n(t)$ 相互独立, 故经互相关运算后, 噪声被抑制^[7]。 $y(t)$ 与 $n(t)$ 的相关运算结果 $R_{ny}(\tau)$ 可以被看作是一个新的噪声 $n_2(t)$ 。令互相关运算中时延变量 $\tau=t$, 则互相关运算最终结果 $R(\tau)$ 可记为一个新的带噪余弦信号 $r(t)$, 其表达式为:

$$R(\tau) = r(t) = \frac{KA}{2} \cos(w_1 t + \varphi_1) + n_2(t) \quad (6)$$

从式(6)可以看出, 通过互相关运算可以有效地抑制噪声, 较为精确地估计幅度值 A , 以此计算出信标光在 QD 上的光斑质心位置。

2.3 循环互相关运算

重新考察式(5), 式中极限运算结果等于 0 的条件是 $T \rightarrow \infty$, 即采样数据须是无限长。但在实际应用中, 采样数据都是截断的, 采样后的常规互相关运算表示为:

$$r(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N s(n)y(n+m) \quad (7)$$

其中, n 是信号离散后的序列变量, m 是离散相关运算中的时延变量, 截断后的采样点数为 N 。随着运算的进行, 每次乘加运算后, 参考信号序列 $y(n)$ 都会向右移动一位, 其最右端的数据会被移出序列, 而其最左端的数据位则补 0。这样, 参与运算的有效数据点在不断减少, 实际参与运算的有效数据点只有 $N-|m|$ 位。因此, 当输入如图 2(a)所示的低信噪比信号时, 随着运算的进行, 普通互相关运算结果的幅值会逐步衰减, 其结果如图 2(b)中黄线所示。这样的结果无法对幅度值进行精确的估计。

本文用循环移位的方法, 构造一组无限长的采样数据, 使得对每个时延 m , 参与预算的有效数据都为 N

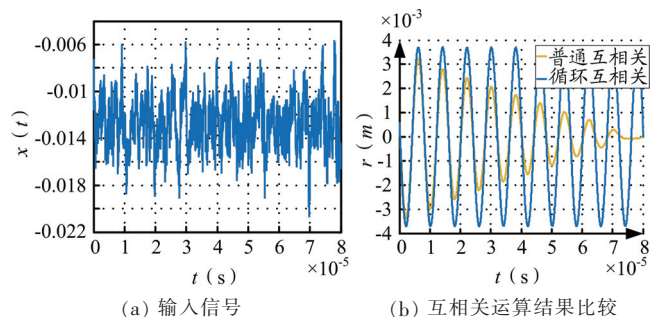


图2 输入信号和两种互相关运算比较

点^[8]。即把每次运算时从 $y(n)$ 最右端移出的数据位从该序列的最左端移入。当采样时间为信号周期整数倍时, 循环互相关运算的结果如图 2(b)中蓝线所示。该运算的实质是对同一频点的同一部分采样信号重复进行相关运算, 并将结果求平均。本方法可有效抑制已知频点上的噪声干扰, 提高对 QD 输出的光电流幅度值 A 的估计精度, 从而提高对信标光位置的检测精度。

3 采用循环互相关的光斑位置检测技术

本文介绍的基于 QD 和循环互相关的光束位置检测方法可以由图 3 所示的系统实现。QD 的 4 个象限分别输出 4 路光电流, 转换为电压信号后, 经放大和滤波处理, 送入模/数转换器转换为数字信号, 再由现场可编程逻辑门阵列(FPGA)芯片完成互相关运算并检测运算结果的幅值。接收端的参考余弦信号 $y(n)$ 由 FPGA 直接生成。

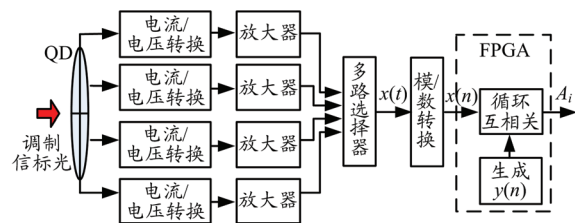


图3 光斑位置检测系统

由式(6)的计算结果可知, 循环互相关运算后输出的结果是一个低噪声的, 频率也为 w_1 的余弦信号 $r(m)$, 此时只需要检测 $r(m)$ 的多个峰值幅度 A_{ij} , 即:

$$A_{\text{beam}}^{(j)} = \frac{2}{\eta K} \cdot \frac{1}{H} \sum_{i=1}^H A_{ij} (j=1, 2, 3, 4) \quad (8)$$

根据式(8)求得第 j 个象限上信标光对应的 QD 输出幅度值, H 为检测次数。将 $A_{\text{beam}}^{(j)}$ 除以前向通道的匹配电阻值后代入式(1), 即可得信标光斑在 QD 靶面上的位置。

4 实验结果

本文搭建了基于 QD 的光斑位置检测实验台, QD 被安放在一个三维位移台上, 调节位移台即可使光斑在 QD 靶面上相对移动, 实验平台如图 4 所示。实验系统使用波长为 1550 nm 的可调

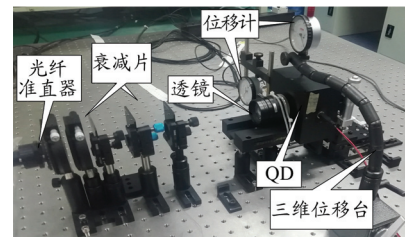


图4 光斑位置检测实验平台

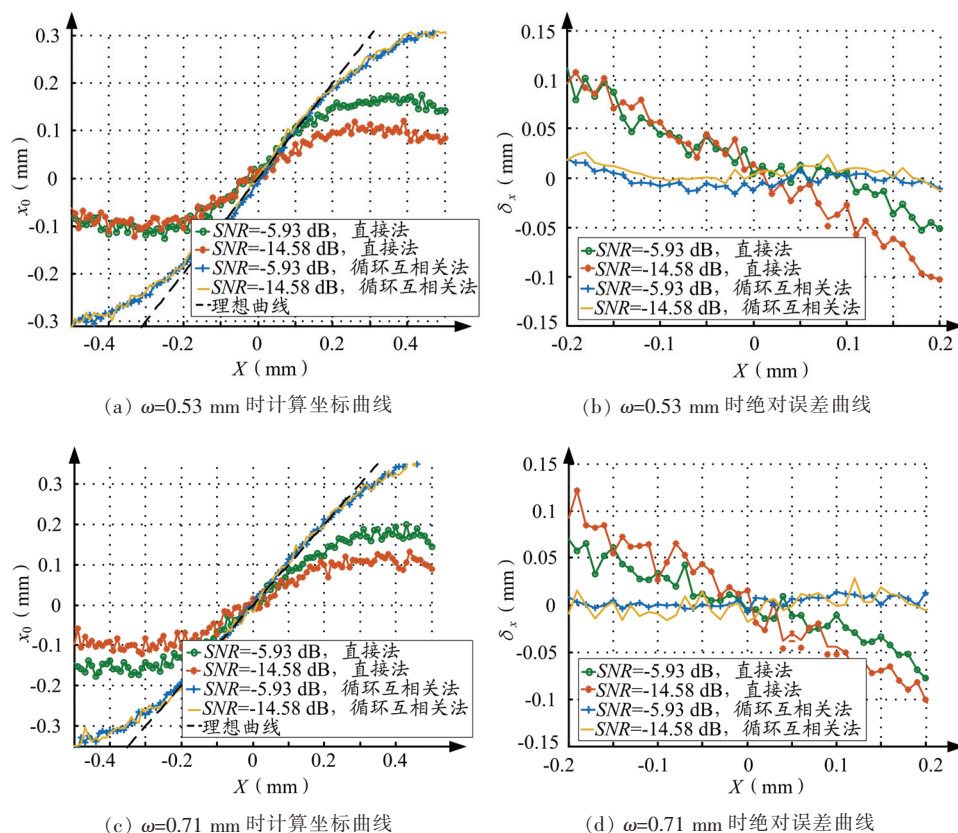


图5 计算坐标曲线和误差曲线

制激光源,调制信号频率为 125 kHz。模/数转换器参考电压为 ± 1 V,输出数据宽度为 16 bit,采样频率为 100 MHz,采样点数为 8000 点。实验使用的 QD 靶面直径为 1 mm,沟道宽 0.01 mm。

在不同光斑半径(ω 为 0.53 mm 或 0.71 mm)和输出信噪比(-5.93 dB 或 -14.58 dB)条件下,实验使用 2 种方法检测光斑位置:一种方法是本文所提幅度调制加循环互相关检测法;另一种是传统的直接检测法,使用非调制激光,直接多次检测光电流幅度值,求平均后计算光斑位置。以 X 轴为例,2 种方法得到的计算坐标曲线(其中 X 为理想值, x_0 是经过相关运算算法处理后的检测值)和绝对误差 δ_x 如图 5 所示。

图 5 中,随着 QD 输出信噪比降低,特别是噪声完全将信号淹没时,本文所提方法仍然能够较准确地检测光斑位置信息,其计算的 X 坐标在 $[-0.2, 0.2]$ 区间内保持良好的线性度,绝对误差被控制在 0.012 mm 内。相反,直接检测方法所测量的 X 轴位置坐标线性度迅速下降,其绝对误差值急剧增加。

5 结束语

本文针对信标光经长距离传输后损耗过大,且受

背景光和暗电流噪声强烈干扰,而使光束位置检测精度下降的问题,提出了一种提高光束位置检测精度的方法。该方法在发射端使用余弦信号对信标光进行幅度调制,并在接收端进行循环互相关运算抑制噪声,增强了局部频点上的信噪比,可在信噪比极低的情况下检测信标光的光束位置。实验中,利用数字信号处理方法建立检测系统,验证了循环互相关方法用于基于 QD 的光束位置检测的有效性。当 QD 输出信噪比为 -14.58 dB 时,本文所介绍的检测方法绝对误差小于 0.012 mm。该方法所需数据量少,运算量低,对信号同步性要求不高,特别适用于空间光通信的光束位置实时检测。

参考文献:

- [1] KHALIGHI M A, UYSAL M. Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4): 2231–2258.
- [2] ZHAO X, TONG S F, LIU Y Q, et al. Application research on four-quadrant detector in space laser communication system [J]. Journal of Optoelectronics. Laser, 2010, 20(1): 46–49.
- [3] 张辉,陈云善,耿天文,等. 四象限探测器位置检测精度的主要影响因素研究[J]. 中国激光, 2015(12): 306–314.
- [4] WU J, CHEN Y, GAO S, et al. Improved measurement accuracy of spot position on an InGaAs quadrant detector[J]. Applied Optics, 2015, 54(27): 8049–8054.
- [5] WANG Guanghui, PING Shun, XU Guoliang, et al. Position detection improvement of position sensitive detector (PSD) by using analog and digital signal processing [C]// International Conference on Information, Communications & Signal Processing 2007 (ICICS 2007), December 10–13, Singapore: IEEE, 2007.
- [6] HU Z, SONG Z, TONG S, et al. Modeling of Fine Tracking Sensor for Free Space Laser Communication Systems[C]// Symposium on Photonics & Optoelectronics 2009 (SOPO 2009), August 14–16, Wu Han, China. Wu Han: IEEE, 2009.
- [7] SHMALIY Y S. Probability distributions of the envelope and phase, and their derivatives in time of the sum of a non-stationary sine signal and narrow-band Gaussian noise [J]. Journal of the Franklin Institute, 1999, 336(6): 1013–1022.
- [8] SHERLOCK B G, KAKAD Y P. Windowed discrete cosine and sine transforms for shifting data[J]. Signal Processing, 2001, 81(7): 1465–1478.