

文章编号: 0258-7025(2008)02-0173-05

空间 CCD 凝视成像跟踪系统的作用距离分析

董吉辉^{1,2} 胡企铨¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 在充分考虑了空间背景光辐射特性以及漫反射目标对相干光和自然光的不同反射特性的基础上, 利用信号检测的统计学方法, 导出了空间电荷耦合器件(CCD)凝视成像跟踪系统分别在激光照明主动跟踪模式和太阳光照明被动跟踪模式下的作用距离表达式。结果表明, 空间 CCD 凝视成像跟踪系统在脉冲能量为 1 mJ 的激光照明主动跟踪模式下可对 1 m² 空间漫反射目标实现 10 km 量级范围内的跟踪; 而利用太阳光照明的被动跟踪模式下的跟踪距离可达几百千米。

关键词 成像系统; 光电跟踪; 凝视成像跟踪; 主动跟踪; 被动跟踪; 散斑效应

中图分类号 TN 958.98 **文献标识码** A

Analysis of Working Distance of CCD Gaze Imaging Tracking System in Space

Dong Jihui^{1,2} Hu Qiquan¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Based on analysis of background radiations characteristic in space and the different reflection characteristic of diffuse target to the coherent light and natural light, through using statistical signal detection theory, the formula of working distance of space-borne charge coupled device (CCD) gaze imaging tracking system under laser illuminating active tracking mode and sun illuminating passive tracking mode are studied, respectively. The result indicates that the space-borne CCD gaze imaging tracking system can track 1 m² diffuse target in 10 km distance under 1 mJ pulse energy laser active tracking mode, and the working distance of sunlight passive tracking mode is as high as hundreds kilometers.

Key words imaging systems; photoelectric tracking; gaze imaging tracking; active tracking; passive tracking; speckle effect

1 引 言

在宇宙飞船的空间交会、星间通信、空间碎片的探测监视等空间任务中, 目标跟踪是其中的一项关键技术。由于光电跟踪系统比微波跟踪系统的空间分辨率高, 已经成为一种不可或缺的精密跟踪手段。按信号光源的不同, 光电跟踪系统可分为主动跟踪模式和被动跟踪模式; 而按照所利用的目标信息不同, 光电跟踪系统又可以分为点跟踪模式和成像跟踪模式。凝视成像跟踪系统具有简单的系统结构、高的跟踪精度, 且能进行目标识别, 已成为光电

跟踪技术的热点。电荷耦合器件(CCD)因其量子效率高、动态范围大、定位精度高而广泛应用于凝视成像跟踪系统。本文将在充分考虑空间背景光辐射特性以及漫反射目标对相干光和自然光不同的反射特性的基础上, 推导出空间 CCD 凝视成像跟踪系统分别在激光照明主动跟踪模式和阳光照明被动跟踪模式下的最大可跟踪距离。

2 空间背景光辐射的分析

空间 CCD 成像跟踪系统的背景光辐射包括太

收稿日期: 2007-04-05; 收到修改稿日期: 2007-08-20

作者简介: 董吉辉(1974—), 男, 安徽人, 博士研究生, 主要从事光电探测及光电跟踪方面的研究工作。

E-mail: j. h. dong@163. com

导师简介: 胡企铨(1942—), 男, 江苏人, 研究员, 博士生导师, 目前研究方向为高功率全固态激光器技术和激光雷达技术。

E-mail: qqhu@mail. shnc. ac. cn

阳光、地球大气外层和月亮反射光、地球热辐射以及各种星体发射的光能^[1]。由于各种星体均可视为理想黑体,根据玻尔兹曼黑体辐射公式分析可知,CCD跟踪系统所需要考虑的背景光主要是经目标反射后进入探测系统的太阳光。照射到目标上的太阳光包括两部分:1) 太阳的直射;2) 太阳光经地球-大气系统的反射,这部分约为直射能量的30%。根据太阳常数可以估计出目标处的等效太阳辐照度约为 1760 W/m^2 。在采取主动式的激光跟踪模式时,通过计算可知,目标处的等效太阳辐射度要比激光信号强得多,故此时需要在跟踪系统接收天线处进行滤光处理。从等效的观点来看,可将探测系统处的滤光片移置于目标表面,经计算可得目标处经滤光后的背景光辐照度与滤光片带宽的关系如图1所示。

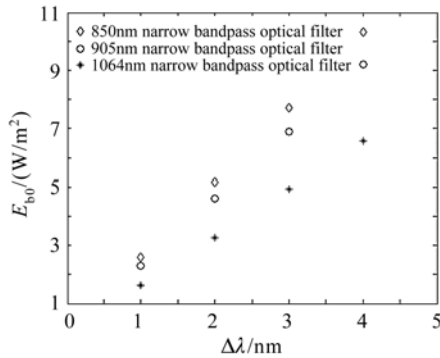


图1 滤光后目标处的背景光辐照度

Fig. 1 Background irradiation on object after optical filtering

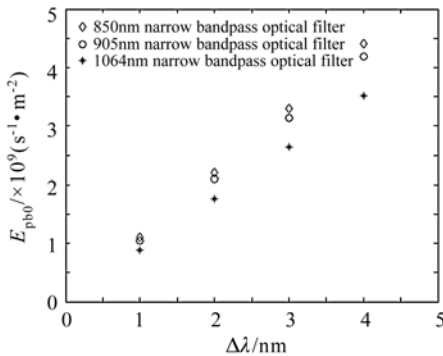


图2 滤光后目标处的背景光子辐照度

Fig. 2 Background photon irradiation on object after optical filtering

由于滤光片的通带较窄,可以近似地以滤光片的中心峰值波长(应等于信号激光的中心波长)代替背景光的波长,从而由背景光的辐照度 E_{b0} 可知相应的光子辐照度 E_{pb0} 可表示为

$$E_{pb0} = \frac{E_{b0}}{h\nu} = \frac{E_{b0} \lambda}{hc}, \quad (1)$$

式中 λ 为滤光片的中心波长, h 为普朗克常数, c 为真空中的光速。由图1可得目标处滤光后的背景光子辐照度如图2所示。

由图2可见,滤光片的中心波长越长,对背景光的抑制效果就越好,这样可选用长波长的激光器,如半导体抽运的全固态红外激光器,以增加CCD表面处信号光相对背景光的比重,从而提高探测系统的信噪比。

为方便起见,将目标视为一个朗伯漫反射体,令其表面反射系数为 ρ ,表面积为 A_0 ,CCD跟踪系统接收天线处的背景光的光子辐照度 E_{pb} 可表示为

$$E_{pb} = \frac{E_{pb0} \sigma}{4\pi R^2} \eta_f = \frac{E_{pb0} \rho A_0}{2\pi R^2} \eta_f \quad (2)$$

式中 R 表示空间目标与CCD跟踪系统之间的距离, η_f 表示CCD跟踪系统接收系统的光学传输系数。由(2)式可见,CCD跟踪系统接收天线处的背景光子辐照度正比于空间目标的面积,与空间目标的距离的平方成反比。若令 $\rho = 0.1$, $\eta_f = 0.7$,并取滤光片的中心波长 $\lambda_0 = 1064 \text{ nm}$,半峰全宽 $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$,根据图2可知对应的 $E_{pb0} = 8.8 \times 10^{18} / (\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。从而根据(2)式可得接收天线处的背景光子辐照度与空间目标的大小及距离的一组数量关系如图3所示。

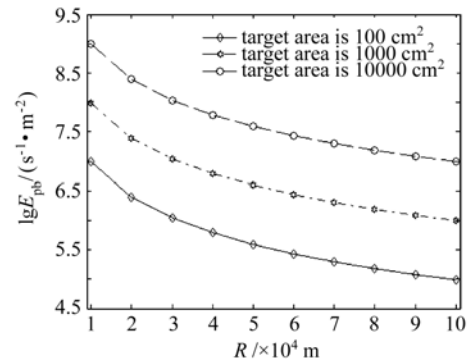


图3 激光雷达接收天线处背景光子的辐照度

Fig. 3 Background photon irradiation on lidar receiver

3 主动模式下 CCD 跟踪系统的作用距离分析

由跟踪系统发射一束激光照射目标的主动跟踪模式,不仅具有抗干扰性(环境的适应性)强的特点,且在跟踪的同时可以得到目标的距离信息,故有着广泛的应用。

由于信号与噪声都具有随机性,对目标的探测跟踪必须用概率统计方法来进行处理。一般是在给

定的虚警概率的前提下,求出判决门限;然后根据判决门限和给定的探测概率,求出最小可探测光电子数,最终求出最小可探测的发射激光脉冲能量和跟踪距离的关系。

3.1 判决门限的确定

所谓虚警概率,指的是当目标没有出现时,由于噪声的影响而使 CCD 跟踪系统做出有目标出现的错误判决的概率

$$P_{FA} = \sum_{k=N_t}^{\infty} P_n(k), \quad (3)$$

式中 N_t 为判决门限值, $P_n(k)$ 为噪声的统计分布律。系统的噪声由外部噪声(即接收机视场内的背景辐射)和内部噪声(主要是指 CCD 的暗电流和读出噪声)两部分组成,服从泊松分布

$$P_n(k) = \frac{(N_n)^k}{k!} \exp(-N_n), \quad (4)$$

式中 N_n 为在计数间隔内的平均噪声电子数。对单脉冲激光跟踪系统而言,计数间隔即为激光的脉冲宽度。若令入射在接收天线的背景光子辐照度为 E_{pb} , CCD 的暗电流为 I_d , 读出噪声为 N_{read} , 则 N_n 可表示为

$$N_n = \eta E_{pb} A_R \tau + I_d \tau / q + N_{read}, \quad (5)$$

式中 η 为 CCD 的量子效率, A_R 为跟踪系统接收天线的面积, q 为电子电量, τ 为激光脉宽。取接收天线面积为 0.03 m^2 , 激光脉宽为 10 ns , 并选取 Sarnoff CCD180-512-SFT^[2] 作为探测器, 它在 1064 nm 处的量子效率约为 12% , 暗电流为 0.5 nA/cm^2 , 读出噪声为 $50e^-$ 。根据像素的尺寸 ($18 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$) 和数量 (512×512) 可以得到整个 CCD 的面积为 0.85 cm^2 , 从而可得总的暗电流为 0.425 nA 。结合(2)和(5)式即可得到单脉冲内的噪声电子数, 计算结果表明背景辐射的影响很小, 可以忽略不计; 噪声电子由 CCD 的暗电流和读出噪声组成, 共计 $77e^-$ 。

将(4)和(5)式代入到(3)式中, 即可根据设定的虚警概率求得计数门限值。根据所取的各项典型值, 并设虚警概率为 10^{-3} , 即可求得 CCD 的计数门限值 $N_t = 105e^-$ 。

3.2 最小可探测信号光电子数的确定

当目标出现时, 发射激光经过目标的反射到达 CCD 产生光电子, 探测系统的电子流由信号光电子和噪声电子两部分组成。噪声电子服从泊松分布, 但由于漫反射目标对激光将产生散斑效应, 信号光电子 $P_s(k)$ 将服从负二项式分布^[3]

$$P_s(k) = \frac{\Gamma(k+M)}{\Gamma(k+1)\Gamma(M)} \left(1 + \frac{M}{N_s}\right)^{-k} \left(1 + \frac{N_s}{M}\right)^{-M}, \quad (6)$$

而信号光电子与噪声电子之和的概率分布律 $P_{s+n}(k)$ 为

$$P_{s+n}(k) = \left[\frac{M}{M+N_s}\right]^M \frac{\exp(-N_n)}{(M-1)!} \times \sum_{j=0}^k \frac{(k+M-j-1)!}{j!(k-j)!} (N_n)^j \left[\frac{N_s}{N_s+N_n}\right]^{k-j}, \quad (7)$$

式中 N_s 为平均信号光电子数; M 为 CCD 跟踪系统接收天线孔径内所包含的相互独立的相关元(即激光散斑)的个数, 可进行近似计算^[4]

$$M \cong 1 + \frac{A_R A_o}{\lambda^2 R^2}, \quad (8)$$

式中各参量含义如 2 节所述。当 $A_R = 0.03 \text{ m}^2$, $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 时, 可由(8)式算得 M 数与目标的大小及距离的一组数值关系如图 4 所示。

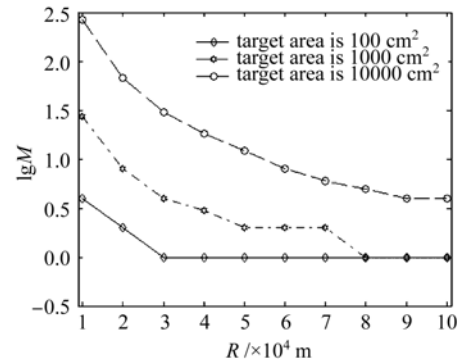


图 4 激光雷达接收孔径内的 M 数

Fig. 4 M number in the receiver of lidar

将(7)式代入捕获概率 P_D 的表达式

$$P_D = \sum_{k=N_t}^{\infty} P_{s+n}(k), \quad (9)$$

即可根据给定的捕获概率(假设 $P_D = 0.9$) 和已经求得的判决门限求出最小可探测光电子数 N_s , 如图 5 所示。

由图 4 和图 5 可知, 随着目标面积的增大, 或者距离的减小, CCD 跟踪系统接收孔径内的激光散斑数都会增大; 而随着 M 数的增大, 可探测的最少信号光电子数将减少。也就是说, M 数越大, CCD 跟踪系统的探测性能越好。

3.3 最小可探测发射激光脉冲能量的确定

经推导可得最小发射激光能量与最小可探测光电子数之间的关系, 可表示为

$$E_t = \frac{\pi^2 \theta_t^2 R^4 h c \tau}{2 \rho A_o A_R \eta_s \eta_r \eta \lambda} N_s, \quad (10)$$

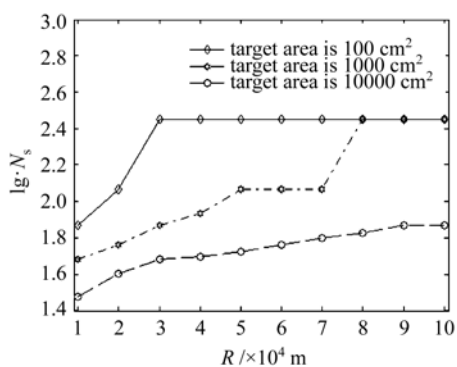


图 5 主动跟踪模式下 CCD 最小可探测光电子数

Fig. 5 Minimal detectable photoelectron of CCD under active tracking mode

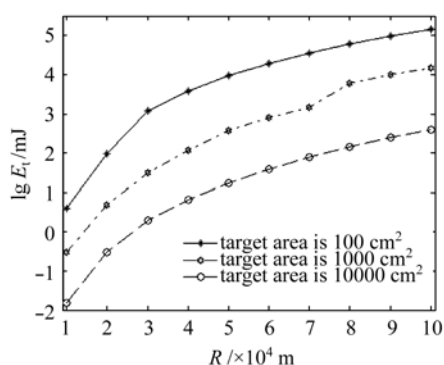


图 6 主动跟踪模式下 CCD 最小可探测激光能量

Fig. 6 CCD minimal detectable laser energy under active tracking mode

式中 θ_i 为发射光束的平面发散角, η_s 为 CCD 跟踪系统发射光学系统的透过系数。当单独利用激光-CCD 跟踪系统来对目标进行凝视成像跟踪时,激光的发散角应不小于系统的跟踪视场。假设 $\theta_i = 100 \text{ mrad}$, $\eta_s = 0.7$, 其他参数不变, 则可依据(10)式得到 CCD 的最小发射激光能量与目标的大小及距离间的一组数值关系如图 6 所示。由图 6 可知, 当发射的激光脉冲能量为 1 mJ 时, CCD 在主动跟踪模式下对大小为 1 m^2 的漫反射目标的跟踪距离可达 26 km。

4 被动模式下 CCD 跟踪系统的作用距离分析

通过收集来自于目标本身的热辐射或反射的自然光来实现对目标跟踪的被动跟踪系统具有很好的隐蔽性, 因而也有着广阔的应用。

根据对空间辐射的分析可知, 太阳是一个很好的辐射源, 在跟踪距离超过千米量级时, 要比主动跟踪系统自身所配置的激光对目标的照度强得多, 且

CCD 在可见光波段的量子效率远大于 1064 nm 处的值, 故而有希望利用太阳光来实现对目标的远距离跟踪。

4.1 判决门限的确定

由于此时的太阳辐射是需要加以利用的辐射光源, 所以也就没有了主动跟踪模式时的噪声背景辐射, CCD 的探测噪声由读出噪声和暗电流两部分组成。根据 3.1 节可知, 由于在主动跟踪模式下的太阳背景辐射经过窄带滤光片后对 CCD 的影响可以忽略不计, 所以 CCD 在被动跟踪模式下的判决门限值 N_t 也等于 $105e^-$ 。

4.2 最小可探测信号光电子数的确定

在被动跟踪模式下, 信号光是目标对太阳辐射的反射光, 由于太阳光不具有激光的强相干性, 从而也就没有了主动探测模式下的散斑效应, 信号光电子将与噪声电子一样服从泊松分布, 由泊松分布的可加性可知信号加噪声也服从泊松分布。根据已经求出的探测门限和给定的探测概率即可求得最小可探测光电子数为 $N_s = 38e^-$ 。

4.3 可跟踪距离的确定

目标信号光(即目标反射的太阳光)在 CCD 表面处的辐照度可表示为

$$E_r = \int_0^{\infty} E_r(\lambda) d\lambda, \quad (11)$$

其中光谱辐照度 $E_r(\lambda)$ 满足

$$\int_0^{\infty} E_r(\lambda) \eta(\lambda) \lambda d\lambda = \frac{N_s hc}{A_R t}, \quad (12)$$

式中 $\eta(\lambda)$ 为 CCD 的量子效率; t 为 CCD 的积分成像时间(在满足帧频大小的前提下, 积分成像的时间是可以调节的)。

定义归一化光谱辐照度 $E_{0r}(\lambda) = E_r(\lambda) / E_r$, 它表示每个波长的辐照度占总辐照度的份额^[5], 代入(11)和(12)式可得

$$E_r = \frac{N_s hc}{A_R t \int_0^{\infty} E_{0r}(\lambda) \eta(\lambda) \lambda d\lambda}, \quad (13)$$

在(13)式中代入图 7^[6]所示的 CCD 的量子(QE)效率和归一化的太阳光谱辐照度, 并取 $A_R = 0.03 \text{ m}^2$, $t = 0.0001 \text{ s}$, 可求得 CCD 表面处的目标信号光辐照度近似等于 $E_r = 1.835 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ 。

根据空间漫反射目标对辐射的传输特性可以推导出被动跟踪时的最大可跟踪距离为

$$R = \sqrt{\frac{E_t \eta_r \rho A_o A_R}{2\pi E_r S_o}}, \quad (14)$$

式中 S_o 为 CCD 成像区的面积, E_t 为目标表面处的辐照度。根据(4)式可得到 CCD 被动跟踪对不同大

小目标的最大可跟踪距离如图 8 所示。可见在利用太阳光的辐射进行目标的被动跟踪时,对 1 m^2 的漫反射目标, CCD 的可跟踪距离可达 3000 km。

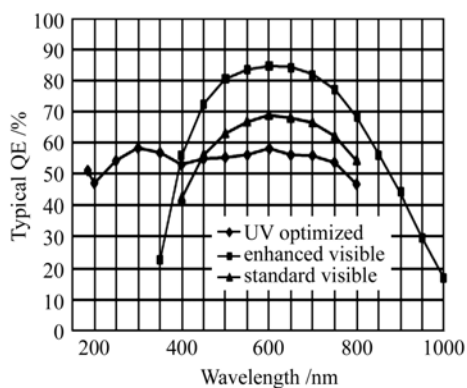


图 7 Sarnoff CCD 的量子效率图

Fig. 7 Quantum efficiency of Sarnoff CCD

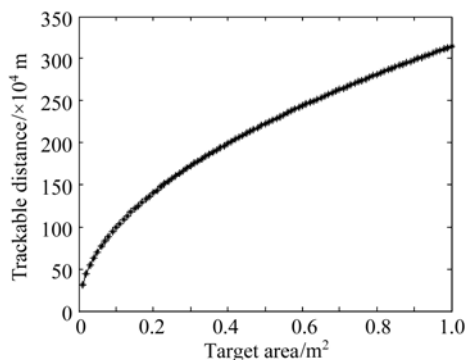


图 8 被动跟踪模式下 CCD 的可跟踪距离

Fig. 8 CCD detectable range under passive tracking mode

5 结 论

在充分考虑了空间背景光辐射特性, CCD 本身的噪声特点以及漫反射目标对激光和自然光的不同反射特性的基础上, 分别探讨了空间 CCD 凝视跟踪系统在主动跟踪和被动跟踪模式下对空间漫反射目标的跟踪能力。结果表明, 在现有的光电器件技术水平上, 对平方米量级的空间漫反射目标而言, 激光照明主动 CCD 凝视成像跟踪系统的作用距离可达几十千米; 而利用太阳辐射的被动 CCD 凝视成像跟踪系统的跟踪距离可以达到几千千米。被动跟踪系

统的作用距离远, 跟踪视场大, 但不能得到目标的距离信息; 主动跟踪系统的优缺点正好相反, 这就可以利用被动跟踪系统进行目标引导, 将目标定位在一个很狭小的视场内, 再利用窄光束主动跟踪系统对目标进行跟踪, 即既可提高跟踪系统的作用距离, 又可得到目标的距离信息。另外, 通过低温措施或采用背景照明 CCD (BCCD)、像增强器 CCD (ICCD)、电子轰击 CCD (EBCCD)、电子倍增 CCD (EMCCD) 等各种微光成像 CCD 以增大 CCD 的比探测率^[7~9], 可以进一步提高 CCD 凝视成像跟踪系统的作用距离。

参 考 文 献

- 1 Hang Xinzhi, Jiao Shiju. Space Optical Remote Sensing Radiometry[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1994. 27~32
韩心志, 焦世举. 航天光学遥感辐射度学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1994. 27~32
- 2 CCD180-512-SFT Sensor data sheet. http://www.sarnoffimaging.com/products_services/
- 3 J. W. Goodman. Some effects of target-induced scintillation on optical radar performance[J]. *Proc. IEEE*, 1965, **53**(11):1688~1700
- 4 Douglas G. Youmans, George A. Hart. Numerical evaluation of the "M" parameter for direct detection ladar[C]. *SPIE*, 1998, **3380**(10):176~187
- 5 Wu Zongfan, Liu Meilin. Infrared and Low-Light Technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 40~42
吴宗凡, 柳美琳. 红外与微光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 40~42
- 6 http://www.tegascience.co.jp/products/snf/pdf/BICCD_chart.pdf
- 7 Xu Xiuzhen, Li Zitian, Xue Lijun. Analysis and processing of CCD noise [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(4): 343~347
许秀贞, 李自田, 薛利军. CCD 噪声分析及处理技术[J]. 红外与激光工程, 2004, **33**(4):343~347
- 8 Zuo Fang, Liu Guangrong, Gao Zhiyun *et al.*. Performance analysis of low light level image sensors: BCCD, ICCD, EBCCD [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2002, **22**(1): 109~112
左 昉, 刘广荣, 高雅允 等. 用于微光成像的 BCCD, ICCD, EBCCD 性能分析[J]. 北京理工大学学报, 2002, **22**(1):109~112
- 9 Cheng Kaifu. Development trend of low light level imaging devices [J]. *Electronic Component & Device Applications*, 2004, **6**(10):7~10
程开富. 微光摄像器件的发展趋势[J]. 电子元器件应用, 2004, **6**(10):7~10