



# 地面反射太阳光对 CCD 探测系统影响的研究

张雷<sup>1,2</sup>, 安源<sup>1,2</sup>, 孙小伟<sup>1,2</sup>, 金光<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 对地面反射太阳光对远距离 CCD 探测系统的影响机理和太阳光的发散特性进行了研究, 推导了目标物体在 CCD 探测系统入瞳面上照度的计算公式, 建立了地面反射太阳光对远距离 CCD 探测系统影响的数学模型, 并利用 matlab 软件对该数学模型进行仿真。通过分析, 从理论上证明地面反射太阳光对 CCD 探测系统的影响是十分显著的。

**关键词:** 太阳光; CCD 探测系统; 照度

**中图分类号:** TN386.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5868(2006)05-0645-04

## Influence of Sun's Rays Reflected from Ground on CCD Detecting Systems

ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, AN Yuan<sup>1,2</sup>, SUN Xiao-wei<sup>1,2</sup>, JIN Guang<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, CHN;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, CHN)

**Abstract:** Sun's rays reflected from the ground can influence satellite-borne photoelectric detecting systems. The influence mechanism of sun's rays on CCD detecting systems and the divergence of sun's rays have been studied. The illumination calculation formula of the object at the section of entrance pupil has been derived. A mathematical model of the influence that effected on the CCD detecting systems by the rays has been built up and simulated. In theory the influence of sun's rays reflected from the ground on CCD detecting systems has been confirmed.

**Key words:** sun's rays; CCD detecting systems; illumination

## 1 引言

电荷耦合器件 (CCD) 等固体传感器的出现和迅速发展是光电子成像领域的一个突破, 这一技术已经逐渐成熟, 并越来越多地应用于宇航、测量、识别、侦察等领域。CCD 探测系统受目标外物体影响方面的研究, 对国防和航天技术的发展具有深远的意义。目前, 国内外在这方面开展了一系列研究, 但都主要集中在大气湍流、空间污染和主动的激光辐照等对 CCD 的影响方面。此外大多研究是针对未加光学成像系统情况下的 CCD 本身, 这与 CCD 的实际工作条件有很大的差异, 尤其是工作在空间的高精度 CCD 探测系统。本文介绍了地面反射太阳光对远距离 CCD 探测系统的影响原理, 建立了地面上的

镜面反射太阳光对 CCD 成像系统影响的数学模型。

## 2 地面反射太阳光对 CCD 探测系统的影响机理

CCD 探测器的每个像元可等效为一个电容, CCD 工作的主要基础是非平衡状态, 在此状态下, 当光照射到光敏器件上时, 激发出的电子空穴对进入势阱中, 势阱可用来储存信号电荷, 也可以用来使信号电荷从一个势阱转移到相邻的另一个势阱中去。CCD 的饱和主要原因是由于 CCD 势阱深度有限, 不能无限制容纳电荷所致。

地面上物体的反射率与太阳高度角、地面状况、颜色、粗糙度、不同的植被和土壤性质等因素有关。雪面是强烈的反射体, 清洁、紧密的新雪面反射率最

大可达 95%，水面的反射率与太阳光线的入射角有很大关系，入射角愈大(太阳高度角愈小)，水面的反射率就愈大。裸地的反射率最小，植物的覆盖可使反射率减小。另外土壤表面的反射率随土壤湿度的增大而减小。当目标物体为反射率较低的物体时，反射率高的物体可能造成强烈的地面反射杂光，即地面反射太阳光。

地面反射太阳光对 CCD 探测系统的影响主要表现为由于进入杂光和出现饱和串音两方面。地面上的目标物体一般为漫反射体，但是如果目标周围出现对太阳光反射率很高的物体，就会出现比目标景物亮度大数倍的地面反射太阳光。若地面上反射的太阳光入射到成像系统的入瞳面上，并有一部分进入光学系统，就会影响目标的成像质量，如图 1 所示。当入射杂光达到一定的能量密度时，就会超出光电探测器的线性工作范围，产生记忆、饱和、信号浑浊等一系列非线性光学效应，此时的能量密度即为 CCD 探测器的饱和阈值  $\omega_{th}$ 。对 CCD 来说，其积分时间  $t_0$  由电子快门根据入射光亮度可以变化，但由于技术原因，它总有一个下限  $t_{min}$ ，由此可以得到使 CCD 保持正常工作的功率密度上限为

$$\rho_{th} = \omega_{th}/t_{min} \quad (1)$$

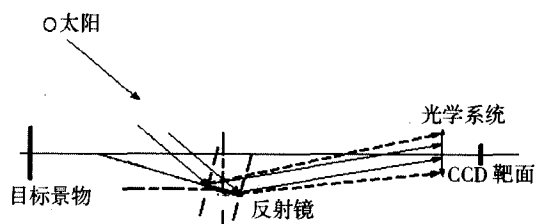


图 1 地面反射太阳光对 CCD 探测系统影响的原理图

### 3 地面目标物体在 CCD 成像系统入瞳处的照度计算

由普朗克黑体辐射公式，黑体辐射的单色辐出度为

$$M(\lambda, T_0) = 10^{12} (c_1/\lambda^5) [\exp(c_2/\lambda T_0) - 1]^{-1} \quad (2)$$

式中， $\lambda$  为波长 ( $\mu\text{m}$ )， $T_0$  为黑体的温度 (K)， $c_1 = 3.742 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \mu\text{m}^2$  为第一辐射常数， $c_2 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$  为第二辐射常数，单色辐出度  $M(\lambda, T_0)$  的单位为  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ 。通常太阳辐射可以认为是温度为 5900 K 的黑体辐射， $E_s$  为分谱辐照度， $\lambda$  为波长，其单色辐出度由式(1)确定。

则在  $\lambda_1$  至  $\lambda_2$  波长范围内太阳的辐出度  $M$  和总辐射通量  $\phi$  分别为

$$M = c_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda^{-5} [\exp(c_2/\lambda T_0) - 1]^{-1} d\lambda \quad (3)$$

$$\phi = 4\pi R_s^2 M \quad (4)$$

式中， $T_0 = 5900 \text{ K}$ ，太阳半径  $R_s = 6.9599 \times 10^8 \text{ m}$ ，辐出度  $M$  的单位为  $\text{W}/\mu\text{m}^2$ 。

假设太阳所发出的总辐射通量在空间方向上的分布是均匀的，那么根据距离平方反比定律，在  $\lambda_1$  至  $\lambda_2$  波长范围内太阳在地球上目标物体处的照度：

$$E_s = 10^{12} R_s^2 c_1 D^{-2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda^{-5} [\exp(c_2/\lambda T_0) - 1]^{-1} d\lambda \quad (5)$$

式中， $D$  为日地的实际距离， $E_s$  照度的单位为  $\text{W}/\text{m}^2$ 。目标物体  $dS$  上接收到太阳辐射通量为

$$d\phi = E_s \cos \alpha dS \quad (6)$$

式中， $\alpha$  为太阳-目标物体连线与物体表面  $dS$  面元法线的夹角 (rad)。

则物体表面  $dS$  发出的辐射通量为

$$d\phi' = \sigma \cdot d\phi \quad (7)$$

式中， $\sigma$  为目标物体的漫反射率。

设  $\beta$  为 CCD 探测系统与目标物体的连线与物体表面  $dS$  面元法线的夹角 (rad)，则在  $\lambda_1$  至  $\lambda_2$  波长范围内目标物体在 CCD 探测系统入瞳处所产生的照度为

$$E_m = (\pi L^2)^{-1} \sigma^m E_s \int_S \cos \alpha \cos \beta dS \quad (8)$$

式中， $E_s$  由式(5)确定， $L$  为 CCD 探测系统到目标物体的距离， $\tau$  为在可见光范围内 ( $0.38 \sim 0.76 \mu\text{m}$ ) 与波长无关的垂直大气透过率， $m$  为大气质量数，表示光学厚度在倾斜方向与铅直方向之比。

### 4 地面反射太阳光对 CCD 探测系统影响的数学模型

#### 4.1 太阳光及其发散角

太阳光是由太阳内部持续进行着氢聚合成氦的核聚变反应产生的，它的能量主要分布在紫外光、可见光和红外光波段。太阳常数即距离太阳在地球与太阳的平均距离上，单位面积上的光能量功率，其数值为  $K = 1353 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

由于太阳与地球的半径和体积的差异，到达地球上的光并不是严格的平行光，其发散角为  $\pm 16'$ ，太阳光发散角的产生原因如图 2 所示。因此地面上

的镜面反射光也是以±16'发散的。

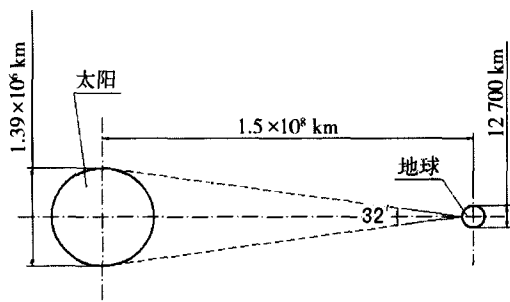


图2 太阳光的发散角

### 4.2 镜面反射太阳光对 CCD 探测系统的影响空间范围的求解

设高反射率物体是半径为  $r$  的平面，其单位法矢为  $\mathbf{m}(m_1, m_2, m_3)$ ，太阳光光线的单位矢量为  $\mathbf{s}(s_1, s_2, s_3)$ ，光学系统的主轴方向矢量为  $\mathbf{l}$ 。以物体的中心为原点，以  $\mathbf{l}$  为坐标  $y$  方向，竖直向上为  $z$  坐标方向，如图 3 建立坐标系，光学入瞳面方程位于  $y=L$ 。

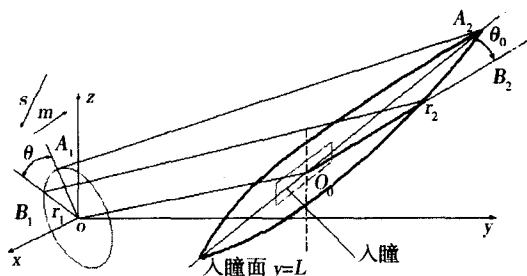


图3 入瞳截面上的光功率密度分布模型

通常情况下  $\mathbf{m}, \mathbf{s}$  为已知矢量，故取边界上任一点并设为  $A_1(x(\theta) y(\theta) z(\theta))$ ，由坐标变换：

$$\begin{pmatrix} x(\theta) \\ y(\theta) \\ z(\theta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \cos \theta \\ r_1 \sin \theta \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中， $\beta = \arcsin(m_1 / \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2})$ ， $\gamma = \arcsin(m_2 / \sqrt{m_2^2 + m_3^2})$ 。以±16'发散角出射光线的外边界法矢设为  $\mathbf{c}(c_1, c_2, c_3)$ ，由边界条件可知  $\mathbf{c}$  是  $\theta$  的函数，即  $\mathbf{c}(c_1(\theta), c_2(\theta), c_3(\theta))$ ，则外边界出射直线方程为

$$\frac{x_0 - x(\theta)}{c_1(\theta)} = \frac{y_0 - y(\theta)}{c_2(\theta)} = \frac{z_0 - z(\theta)}{c_3(\theta)} \quad (10)$$

则外边界光线在  $(y=L)$  处的边界轨迹方程为

$$\begin{cases} x_0(\theta) = \frac{(L - y(\theta))c_1(\theta)}{c_2(\theta)} + x(\theta) \\ z_0(\theta) = \frac{(L - y(\theta))c_3(\theta)}{c_2(\theta)} + z(\theta) \end{cases} \quad (11)$$

该轨迹即为镜面反射太阳光对距离为  $L$  的 CCD 探测系统空间影响范围。

### 4.3 地面反射太阳光在入瞳面上的照度求解

发出地面反射光物体表面发光度为

$$R' = \sigma' E_s \quad (12)$$

式中， $\sigma'$  为发出地面反射光物体的反射率。太阳光经物体反射后以±16'发散，设 CCD 探测系统的入瞳中心在面  $y=L$  上一点  $(x_0, y_0, z_0)$ ，则在入瞳面上的地面反射太阳光照度为

$$E'_m = R' \tau^m \cos \gamma \cdot S_0 / S = E'_s \sigma' \tau^m \cos \gamma \cdot S_0 / S \quad (13)$$

其中， $S_0 = \pi r^2$  为反射物体面积， $S = \pi(\sqrt{(x_0^2 + z_0^2)} \cdot \text{tg}16' + r)^2$ ， $E'_s$  为高反射率物体处太阳光的照度， $\sigma'$  为物体反射率， $\tau^m$  与式(8)中的相同，入射光线与入瞳面的夹角为  $\gamma = \arccos|\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}|$ 。

## 5 模型仿真分析与讨论

### 5.1 仿真分析

设太阳光线  $\mathbf{s} = (0, -0.5736, -0.8192)$ ，镜面法矢量  $\mathbf{m} = (0, 0.707, 0.707)$ ， $E'_s = 628.7 \text{ W/m}^2$ ，发出地面反射光物体的反射率  $\sigma' = 90\%$ ，大气透过率  $\tau^m = 0.7$ ，图 4~6 给出利用 matlab 仿真计算的结果。

由图可知太阳光经高反射率物体反射后呈±16'发散状态，光斑随距离的增大而增大，其影响范围也很大，半径达到几千米。如果 CCD 探测系统在光斑的范围内，其成像就会受到一定的干扰。在距离  $L = 300 \text{ km}$  时，其在入瞳处的照度随高反射率物体的增大而逐渐增大，当  $r = 0.05 \text{ km}$  时，为  $0.264 \text{ W/m}^2$ 。但当  $r$  达到  $0.5 \text{ km}$  时，其照度达到  $16.21 \text{ W/m}^2$ 。

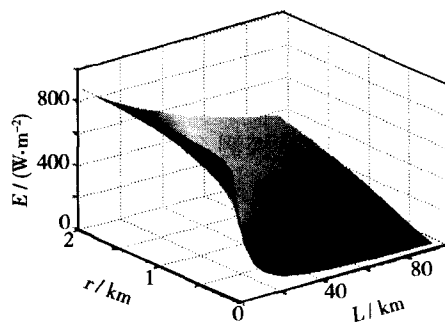
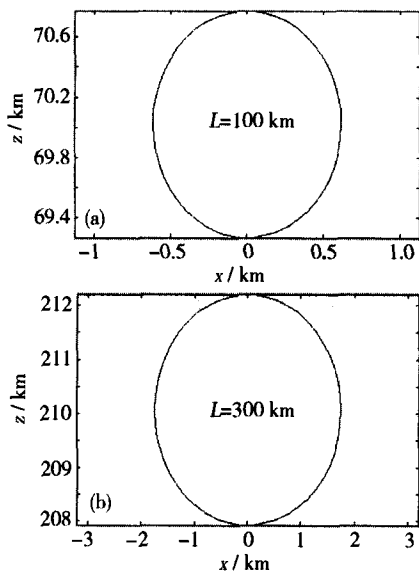
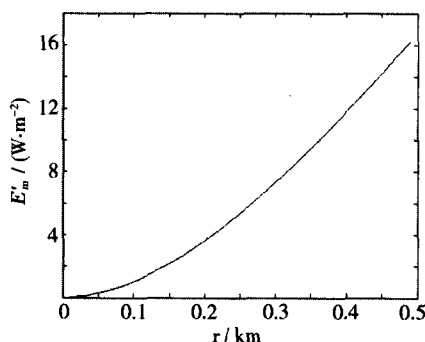


图4 不同半径  $r$  和作用距离  $L$  下的入瞳光照度  $E$

图5  $L=100$  km 和  $L=300$  km 时的不同影响空间范围图6  $L=300$  km 时高反射率物体半径与入瞳光照度的关系

## 5.2 讨论

### 5.2.1 干扰分析

设目标物体某一面为一平面,其大小为  $10 \times 10$  m,与 CCD 探测系统距离也取 300 km,大气透过率  $\tau^m=0.7$ ,太阳光照度  $E_s=628.7$  W/m<sup>2</sup>,漫反射率  $\sigma=0.3$ , $\alpha=45^\circ$ , $\beta=3^\circ$ ,代入公式(9)计算得  $E_m=3.229 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>。而一般 CCD 探测系统的遮光罩消杂光比为  $10^{-7}$ ,当  $r=0.05$  km 时,则进入光学系统的地面反射太阳光照度为  $E'_m=2.64 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>。由此可见,此时进入 CCD 探测系统的目标光线与杂光在同一个数量级上,杂光对 CCD 探测系统的影响显著。

### 5.2.2 饱和分析

星载可见光 CCD 探测系统一般分辨率较高,对光也比较敏感,其饱和阈值也很低。以 DALSA 公

司的型号为 CT-E4-4 096 W 的 CCD 为例,由公式(2)可得 CCD 饱和的功率密度为  $\rho_{th}=2 227.68$  W/m<sup>2</sup>。而一般空间光学系统由入瞳孔径与像面上的光学增益为几百,甚至上千,所以只要到达入瞳面上的照度达到单位面积上几十瓦就有可能使 CCD 出现饱和串音,由图可知  $r$  达到 0.5 km 时,其照度达到 16.21 W/m<sup>2</sup>,若此时光学系统的入瞳正好被地面反射光照射,就可能使 CCD 饱和,使探测系统出现暂时的失效。

## 6 结论

在本文的理论研究和推导中,得到了目标物体在 CCD 探测系统入瞳处的照度计算公式和地面反射太阳光对 CCD 探测系统影响的模型,并取得了仿真分析结果,为地面反射太阳光对 CCD 探测系统的影响方面的研究提供了数据资料和理论依据。通过分析表明,地面反射太阳光对 CCD 探测系统的影响在数值上是十分显著的,如果其强度达到一定值还有可能造成 CCD 探测系统产生光饱和和“串音”现象,使其不能正常工作。

### 参考文献:

- [1] 王之江. 光学技术手册[K]. 北京:机械工业出版社, 1987.
- [2] 曾雄文,陆启生,赵伊君. CCD 的光电特性研究[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(1): 47-51.
- [3] 王世勇,付有余,郭劲. 激光辐照面阵 CCD 探测器系统局部的干扰效应[J]. 半导体光电, 2002, 23(2): 106-108.
- [4] 牛燕雄,张鹏,姚建铨,等. 强激光对星载光电探测系统的干扰与破坏研究[J]. 光子学报, 2004, 33(7): 793-796.
- [5] 卢卫,李展. 星敏感器遮光罩的优化设计[J]. 导弹与航天运载技术, 2002,(3): 47-50.

### 作者简介:

张雷(1982-),男,博士研究生,主要从事光机结构设计与分析方面的研究。

E-mail: zhangleisong19@sohu.com