

doi: 10.3788/gzxb20164501.0104002

临近空间高空气球地基探测能力分析

荆楠^{1,2}, 李创¹, 潘越^{1,2}, 钟培峰^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 基于探测系统背景辐射特性及高空气球辐射特性, 建立了探测系统辐射接收模型. 考虑大气传输、光学系统成像、探测器及其采样对辐射的影响, 精确计算了高空气球辐射及背景辐射在探测器焦平面阵列上产生的信号电子数, 推导出用于高空气球探测的信噪比. 利用 Modtran 软件仿真计算了自身辐射、镜背景辐射、漫背景辐射亮度, 分析了复杂大气条件下的气球辐射特性, 及高空气球镜反射率、漫反射率与积分时间对探测系统信噪比的影响. 结果表明: 采用光谱滤波技术, 在晴朗无云天气下, 可见光近红外(0.6~2.4)探测器适合高空气球探测; 在复杂大气条件下, 长波红外(8~12)探测器适合高空气球探测; 在积分时间为 0.25s, 镜反射率为 0.32, 漫反射率为 0.68 时, 或积分时间为 1s, 镜反射率 0.43, 漫反射率 0.57 时, 探测系统对高空气球探测能力最强.

关键词: 大气光学; 建模; 信噪比; 高空气球; 临近空间

中图分类号: O432.2; P171.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)01-0104002-8

Analysis of Ground-based Detection Ability of High Altitude Balloon in Near Space

JING Nan^{1,2}, LI Chuang¹, PAN Yue^{1,2}, ZHONG Pei-feng^{1,2}

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: Radiance model of detection system was built based on background radiation and radiation of high altitude balloon. The radiometric signal electrons in focal plane array produced by high altitude balloon in near space and background radiation were calculated precisely by considering the effects of atmosphere transmission, optical system imaging, detector and detector sampling. Then signal-to-noise ratio was deduced for high altitude balloon in near space. An atmospheric modeling tool, Modtran, was used to model radiance of self-emission, specular background reflection and diffuse background reflection. Radiation characteristic of balloon in complex atmospheric and the influence on optic-electronic equipment's SNR of specular reflectivity, diffuse reflectivity and integration time were analyzed. The research results indicate that the Visible-Near Infrared Ray(VIS-NIR) (0.6~2.4) detector can be used to detect balloon in sunshine and the Long Wave Infrared Ray(LWIR) (8~12) detector can be used to detect balloon in complex atmospheric. With the integral time of 0.25s, the specular reflectivity of 0.32 and the diffuse reflectivity of 0.68, or the integral time of 1s, the specular reflectivity of 0.43 and the diffuse reflectivity of 0.57, detection of high altitude balloon can easily been achieved.

Key words: Atmospheric optics; Modeling; Signal-to-noise ratio; High altitude balloon; Near space

OCIS Codes: 040.1880; 120.5700; 120.5240; 040.5160; 040.3060

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 2013AA7031020A)资助

第一作者: 荆楠(1990-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为临近空间光学探测. Email: jingnan@opt. cn

导师(通讯作者): 李创(1970-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为空间光学技术. Email: lichuang@opt. ac. cn

收稿日期: 2015-09-02; 录用日期: 2015-10-23

0 引言

近年来,随着科技的发展,临近空间的战略价值逐渐得到重视,各国竞相发展临近空间飞行器.常见的临近空间飞行器有高超声速飞行器、平流层飞艇、高空气球等.高空气球具有成本低,实施灵活、飞行高度高、准备周期短等其它飞行器所不具备的优点^[1],已被应用于气象探测、天文观测、商业通信等多个领域^[2].

目前,对于空间目标光电探测的研究较多,张颖等分析了空间目标姿态变化、入射光方向、系统有效孔径以及曝光时间等关键因素对光电成像系统探测能力的影响^[3-4];杨帆等基于空间目标红外辐射特性,对空间目标地基光电探测的信噪比进行了分析^[5];付强等分析了光谱遥感成像仪的信噪比^[6];乔健等对光电成像系统清晰成像的条件进行了归纳^[7];谭碧涛等提出了基于调制传递函数的光电成像系统探测性能综合评估方法^[8];赵世湖等结合调制传递函数和信噪比提出光学遥感成像质量评价方法^[9];孙成明等利用 TracePro 软件对空间目标可见光近红外散射特性进行了仿真^[10].这些研究一般将空间目标看作是朗伯辐射体,以目标总体反射率来分析计算探测系统的信噪比,不需要考虑空间目标镜反射率以及漫反射率对系统信噪比的影响,而较少对高空气球等半透明空间目标探测进行研究^[11].半透明目标辐射信号较弱,经过大气,光学系统及探测器后,在探测器焦平面上产生的电子数较少,需要分别考虑半透明目标镜反射率和漫反射率对目标辐射信号的影响,精确计算半透明目标在焦平面阵列上所产生的目标电子数,确定探测系统信噪比,分析半透明目标的可探测性.

基于此,本文分析探测系统背景辐射特性和气球辐射特性,建立适用于临近空间 20~40 km 高度范围的探测系统接收辐射模型.针对目前空间目标探测模型,引入调制传递函数,综合考虑大气湍流、大气混浊介质、光学系统非理想成像、探测器像元尺寸以及采样作用对目标辐射信号的影响,精确计算辐射在探测器焦平面阵列上产生的信号电子数,推导出用于高空气球地基探测的信噪比.并利用 Modtran 和 Matlab 软件仿真计算自身辐射、镜背景辐射、漫背景辐射亮度,考虑了对流层复杂天气条件下高空气球的辐射特性,分析了高空气球镜反射率、漫反射率以及探测器积分时间对系统信噪比的影响.

1 探测系统接收辐射计算

1.1 背景辐射特性

地基探测系统对高空气球进行探测时,影响探测最主要的背景是大气云层,而云层中影响程度最大的是卷积云.从图 1 可以看出,探测系统接收到的背景辐

射包括地球辐射、太阳辐射、地球反射太阳辐射、云层辐射以及路径辐射.路径辐射主要是探测系统和气球之间的大气辐射.

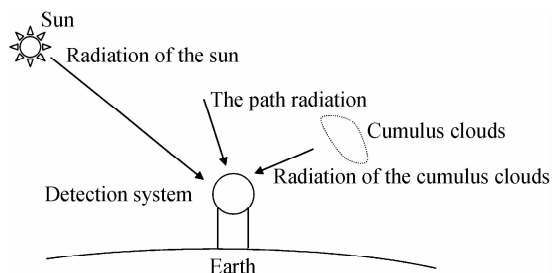


图 1 探测系统背景辐射特性

Fig. 1 The background radiation characteristic of the detection system

积云的高度位于 0.066 km 到 3 km 之间,由公式 $T=228.2-6.5H(0\leq H\leq 11\text{ km})$ ^[12] 计算可得积云温度为 275K(取平均高度为 2 km),利用 Modtran 计算标准条件下的积云及路径辐射在探测系统入瞳处的亮度 $L_{\text{cum}}(\lambda)$ 、 $L_{\text{pat}}(\lambda)$.

太阳作为黑体的光谱辐出度为

$$M_{\text{sun}}(\lambda) = \frac{c_1 (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1}}{\lambda^5} \quad (1)$$

在探测系统入瞳处产生的光谱照度为

$$E_{\text{sun}}(\lambda) = \frac{R_s^2 M_{\text{sun}}(\lambda)}{2R_{s-e}^2} \quad (2)$$

式中, λ 为波长, $T=5900\text{ K}$ 为太阳的辐射温度, c_1 为第一黑体辐射常数, $c_1=3.7148\times 10^8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}}$, c_2 为第二黑体辐射常数, $c_2=14388\text{ m} \cdot \text{k}$, R_s 是太阳平均半径, $R_s=6.9599\times 10^5\text{ km}$, R_{s-e} 是平均日地距离, $R_{s-e}=1.49597892\times 10^8\text{ km}$.

背景辐射在探测系统入瞳处产生的光谱总照度为

$$E_{\text{bac}}(\lambda) = E_{\text{sun}}(\lambda) + \frac{L_{\text{cum}}(\lambda)A_{\text{aper}}}{R_{c-e}^2} + \frac{L_{\text{pat}}(\lambda)A_{\text{aper}}}{R_{\text{pat}}^2} \quad (3)$$

式中, R_{c-e} 为积云所处高度,假设路径辐射均匀,则路径长度 $R_{\text{pat}}=0.5R_{b-e}$.

1.2 高空气球辐射特性

根据高空气球半透明结构,其在探测器入瞳处产生的照度主要由自身辐射、镜背景辐射、漫背景辐射照度三方面组成.

1.2.1 高空气球自身辐射

高空气球处于平流层中,其表面单位面积向大气中辐射损失的能流密度为

$$Q_{\text{self}} = \epsilon\sigma T^4 \quad (4)$$

式中, T 为气球表面温度, ϵ 为气球表面发射率, σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数.

高空气球在大气中漂浮时,其表面与大气进行对流换热.气球表面单位面积的热流密度 Q_1 为

$$Q_1 = h_r(T_{\text{atm}} - T) \quad (5)$$

式中,大气温度 T_{atm} 为

$$T_{\text{atm}} = \begin{cases} 288.2 - 6.5H & 0 \leq H \leq 11 \text{ km} \\ 216.7 & 11 \leq H \leq 20 \text{ km} \\ 196.7 + H & 20 \leq H \leq 32 \text{ km} \end{cases} \quad (6)$$

热交换系数 h_r 在强迫对流情况下为

$$h_r = 0.7331 |T - T_{\text{atm}}| + 1.9V + 1.8 \quad (7)$$

其中, V 为气球相对大气运动速度。

对于高空气球来说,其内部没有辐射源,且处于稳态导热情况下,导热微分方程简化为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

采用第三类边界条件,给定周围大气温度 T_{atm} 及热交换系数 h_r ,可以由式(9)计算出气球表面温度 T

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = Q_1 + Q_2 - Q_{\text{self}} \quad (9)$$

式中, k 为导热系数, Q_1 为气球表面单位面积的热流密度, Q_2 为气球表面单位面积接收的天空背景辐射热能。

对于临近空间高空气球,气球壁很薄,假设其内外温度一致,表面发射率为 0.33,计算出的气球温度随漂浮时间分布如图 2。从图 2 计算结果可以看出:气球上升到最高处进行漂浮运动时,温度为 229K,经过 12h 后增加到 241K,然后降低到 229K,气球温度变化范围

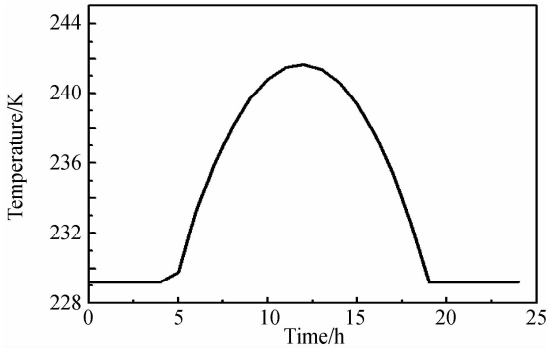


图 2 高空气球温度随时间变化曲线图

Fig. 2 The temperature of high altitude balloon versus time

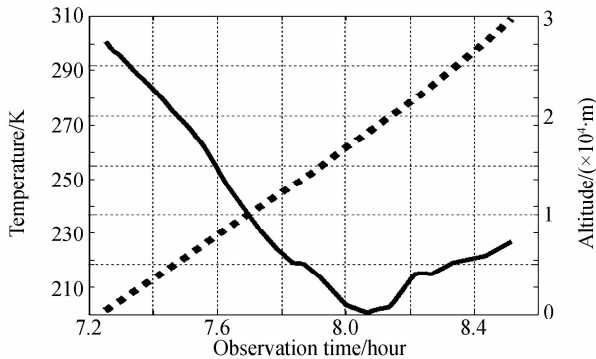


图 3 高空气球高度与温度随观测时间分布图

Fig. 3 The altitude and temperature of high altitude balloon versus observation time

为 229~241K。本课题组于 2014 年 9 月 14 日和 16 日在敦煌对高空气球进行外场观测,图 3 为得到的高空气球温度及高度随观测时间分布图。从图 3 实际测量结果可以看出气球温度处于 220~230K 之间,最终折中选取 225K 为气球自身温度。

因此计算高空气球自身辐射时,将其温度等效为 225K。根据普朗克辐射公式,高空气球的光谱辐出度为

$$M_{\text{bal}}(\lambda) = \epsilon \frac{c_1 (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1}}{\lambda^5} \quad (10)$$

在地面上产生的光谱照度为

$$E_{\text{bal}}(\lambda) = \frac{R_b^2 M_{\text{bal}}(\lambda)}{R_{b-e}^2} \quad (11)$$

式中 $R_b = 6 \text{ m}$ 为高空气球平均半径。

1.2.2 高空气球漫背景辐射

高空气球漫背景辐射是对天空背景辐射在其上产生辐射的漫反射,天空背景辐射空间近似为球空间,天空背景在高空气球上产生的辐射返回到球空间。一般情况下探测系统只接收到来自半球空间的漫背景辐射,将半球空间分为五部分,对应的角度为 22.5° 、 67.5° 、 112.5° 、 157.5° ,如图 4。这五部分在高空气球上产生的亮度分别对应着 Modtran 软件在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 观测天顶角时计算的辐射亮度,每部分在高空气球上产生的亮度分别为 $L_{e,1}(\lambda)$ 、 $L_{e,2}(\lambda)$ 、 $L_{e,3}(\lambda)$ 、 $L_{e,4}(\lambda)$ 、 $L_{e,5}(\lambda)$,各自对应的立体角为 0.23sr 、 1.11sr 、 0.46sr 、 1.11sr 、 0.23sr 。每部分在气球上产生的照度为此部分的光谱亮度值与其对应的立体角之积,最终五部分照度值相加可得半球空间背景辐射在气球上产生的光谱照度为

$$E_{e,\text{back}}(\lambda) = 0.23L_{e,1}(\lambda) + 1.11L_{e,2}(\lambda) + 0.46L_{e,3}(\lambda) + 1.11L_{e,4}(\lambda) + 0.23L_{e,5}(\lambda) \quad (12)$$

在理想情况下,每部分光谱亮度值 $L_{e,\#}(\lambda)$ 相同时,半球空间天空背景产生的辐射照度为

$$E_{e,\text{back}}(\lambda) = 0.23L_{e,\#}(\lambda) + 1.11L_{e,\#}(\lambda) + 0.46L_{e,\#}(\lambda) + 1.11L_{e,\#}(\lambda) + 0.23L_{e,\#}(\lambda) = \pi L_{e,\#}(\lambda) \quad (13)$$

则 $L_{e,\#}(\lambda) = E_{e,\text{back}}(\lambda) / \pi$ 。将气球等效为理想朗伯体,其在半球空间产生均匀亮度为 $L_e(\lambda) = E_{e,\text{back}}(\lambda) / \pi$ 。即每部分光谱亮度值 $L_{e,\#}(\lambda)$ 与理想朗伯体在半球空间产生的均匀亮度值 $L_e(\lambda)$ 相同,验证了式(13)的正确性。

高空气球漫背景辐射在探测系统入瞳处产生的光谱照度为

$$E_{\text{diff}}(\lambda) = \frac{\rho_{\text{diff}}(\lambda) E_{e,\text{back}}(\lambda) A_{\text{aper}} \sin \theta_{\text{obs}}}{\pi R_{b-e}^2} \quad (14)$$

式中, $\rho_{\text{diff}}(\lambda)$ 为高空气球漫反射率, A_{aper} 为探测器入瞳面积。

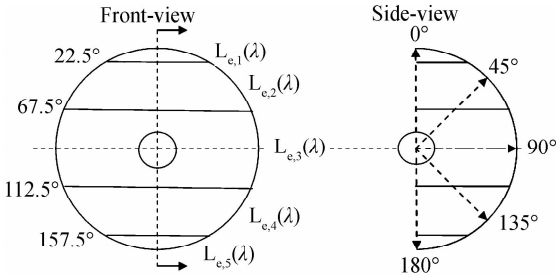


图4 半球空间划分方法

Fig. 4 The partition of hemispherical space

1.2.3 高空气球镜背景辐射

高空气球镜背景辐射与高空气球和探测系统之间的几何位置有关,如图5.当入射角为 θ_{inci} 时,无限远到高空气球之间的镜背景辐射经过高空气球反射之后,在与观测天顶角 θ_{obs} 互余角度下反射到探测系统.这种几何观测条件下,镜背景辐射入射角、镜反射角和观测天顶角大小互余.无限远到高空气球的光谱亮度为 $L_{e,spec}(\lambda)$,则 $\rho_{spec}(\lambda)L_{e,spec}(\lambda)$ 为镜背景辐射亮度.

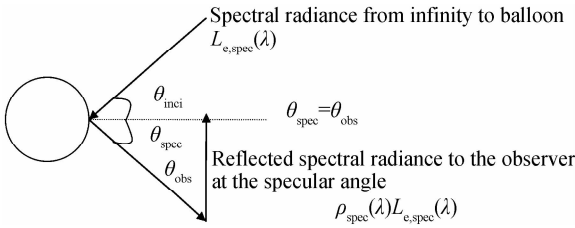


图5 镜背景辐射几何关系图

Fig. 5 Geometry defining of specular background reflection

高空气球镜背景辐射在探测系统入瞳处产生的光谱照度为

$$E_{spec}(\lambda) = \frac{\rho_{spec}(\lambda)L_{e,spec}(\lambda)A_{aper}}{R_{p-e}^2} \cos\theta_{spec} \sin\theta_{obs} \quad (15)$$

式中, $\rho_{spec}(\lambda)$ 为高空气球镜反射率.

综合考虑高空气球自身辐射、漫背景辐射、镜背景辐射因素,到达探测系统入瞳处的高空气球光谱照度为

$$E_{tot}(\lambda) = E_{bal}(\lambda) + E_{diff}(\lambda) + E_{spec}(\lambda) \quad (16)$$

2 高空气球辐射传输模型

高空气球辐射在传输过程中,会受到大气湍流、混浊介质、光学系统非理想成像、探测器像元尺寸以及采样作用的影响.例如光学系统本质的衍射受限作用使得目标在像平面的像模糊,使用线性系统的调制传递函数描述光学系统对理想像的模糊作用.

调制传递函数是探测系统对信号输入的幅值响应,描述不同因素对辐射信号的影响,包括大气湍流、混浊介质、光学系统非理想成像、探测器像元以及探测器采样作用.当整个探测系统幅值响应具有线性不变性时,系统对辐射的总体响应可表示成一个调制传递函数,它是各个影响因素调制传递函数的乘积^[13].

2.1 大气调制传递函数

高空气球辐射在大气中传输时,大气湍流及混浊介质调制传递函数分别描述湍流及混浊介质对辐射的影响.湍流和混浊介质影响探测系统成像的物理效果和机制不同.湍流介质的光传播效应是决定介质传递函数的物理机制,引起高空气球辐射光相位、到达角以及光强的起伏,导致图像模糊,具有较为显著的随时间变化特点.

大气湍流调制传递函数为

$$MTF_{tur} = \exp[-3.44(Df/r_0)^{5/3}] \quad (17)$$

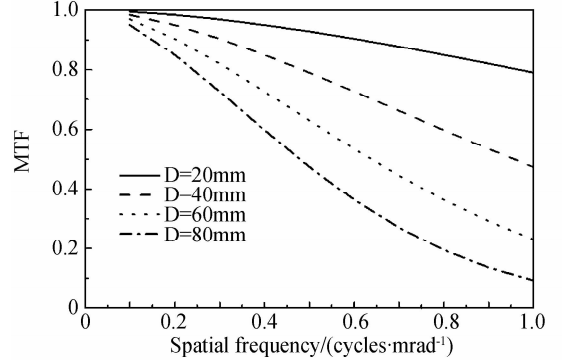


图6 大气湍流调制传递函数随空间频率和系统口径变化曲线

Fig. 6 The atmospheric turbulence MTF versus spatial frequency and system aperture

从图6可以看出,大气湍流调制传递函数随着系统口径和空间频率的增大而减小.大气相干直径 r_0 是光线在大气传输过程中保持相干的有效口径,其大小决定了光学系统分辨率的极限.

混浊介质的光散射效应是决定混浊介质传递函数的物理机制,混浊介质引起的杂散光导致气球图像与天空背景对比度的降低随时间不变.

大气混浊介质调制传递函数为

$$MTF_{tud} = \begin{cases} \exp(-k_{abs} - k_{scat}f/f_c) & f \ll f_c \\ \exp(-k_{abs} - k_{scat}) & f \gg f_c \end{cases} \quad (18)$$

式中, k_{abs} 为吸收光学厚度, k_{scat} 为散射光学厚度, $f_c = a/\lambda$ 为空间截止频率, a 为散射粒子特征半径, λ 为光波长.则大气调制传递函数为

$$MTF_{atm} = MTF_{tur} \cdot MTF_{tud} \quad (19)$$

2.2 光学系统调制传递函数

光学传递函数真实完整地描述光学系统对入射光幅值和相位响应,即

$$OTF(f_x, f_y) = MTF_{opt}(f_x, f_y) \cdot \exp[-i \cdot PTF(f_x, f_y)] \quad (20)$$

式中, $PTF(f_x, f_y)$ 为相位调制传递函数, f_x, f_y 为空间频率,由于光学系统为衍射受限系统,忽略相位作用.光学系统调制传递函数为点扩散函数傅里叶变换的模,而点扩散函数为入瞳函数傅里叶变换的平方,则非标准光学系统调制传递函数为^[14]

$$\text{MTF}_{\text{opt-un}}(f_{x,\text{img}}, f_{y,\text{img}}) = \left| \mathcal{FF} \left\{ \left| \mathcal{FF} \{ P(x_{\text{ap}}, y_{\text{ap}}) \} \right|^2 \right\} \right| \quad (21)$$

标准光学系统调制传递函数为

$$\text{MTF}_{\text{opt}}(f_{x,\text{img}}, f_{y,\text{img}}) = \frac{\text{MTF}_{\text{opt-un}}(f_{x,\text{img}}, f_{y,\text{img}})}{\text{MTF}_{\text{opt-un}}(0,0)} \quad (22)$$

2.3 探测器调制传递函数

高空气球入射辐射到达探测器像元时,像元在探测器瞬时视场内不能区分两个不同光源,需要对入射辐射进行空间均匀分配.探测器调制传递函数由像元平方口径傅里叶变换得出,即

$$\text{MTF}_{\text{det}} = \left| \frac{\sin(\pi f_x x_{\text{aper}})}{\pi f_x x_{\text{aper}}} \right| \cdot \left| \frac{\sin(\pi f_y x_{\text{aper}})}{\pi f_y x_{\text{aper}}} \right| \quad (23)$$

2.4 探测器采样调制传递函数

探测器采样调制传递函数表示探测器焦平面阵列对入射辐射的采样作用,测量入射辐射照度值依赖探测器对入射照度采样方法.探测系统为线性系统,则探测器采样调制传递函数和探测器调制传递函数类似,即

$$\text{MTF}_{\text{samp}} = \left| \frac{\sin(\pi f_x x_{\text{samp}})}{\pi f_x x_{\text{samp}}} \right| \cdot \left| \frac{\sin(\pi f_y x_{\text{samp}})}{\pi f_y x_{\text{samp}}} \right| \quad (24)$$

探测系统具有线性不变性,系统调制传递函数为

$$\text{MTF}_{\text{sys}} = \text{MTF}_{\text{atm}} \cdot \text{MTF}_{\text{opt}} \cdot \text{MTF}_{\text{det}} \cdot \text{MTF}_{\text{samp}} \quad (25)$$

高空气球辐射和背景辐射在探测系统入瞳处照度二维形式分别为 $E_{\text{tot}}(x, y, \lambda)$ 、 $E_{\text{bac}}(x, y, \lambda)$,经过光学系统、探测器、以及采样作用之后照度分别为

$$E_{\text{img}}^{\text{tot}}(x, y, \lambda) = \mathcal{F}^{-1} \mathcal{F} \{ \text{MTF}_{\text{sys}}(f_x, f_y) \times \mathcal{FF} \{ E_{\text{tot}}(x, y, \lambda) \} \} \quad (26)$$

$$E_{\text{img}}^{\text{bac}}(x, y, \lambda) = \mathcal{F}^{-1} \mathcal{F} \{ \text{MTF}_{\text{sys}}(f_x, f_y) \times \mathcal{FF} \{ E_{\text{bac}}(x, y, \lambda) \} \} \quad (27)$$

3 探测系统 SNR 计算

高空气球入射辐射到达探测器焦平面阵列之后,像元 $[x, y]$ 产生的信号电子数为^[15]

$$s = \frac{A_{\text{det}}(1-\epsilon)t_{\text{int}}}{(1+4f\#^2)hc} \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} \tau_{\text{atm}}(\lambda) \tau_{\text{opt}}(\lambda) E_{\text{img}}^{\text{tot}}(\lambda) \eta(\lambda) \lambda d\lambda \quad (28)$$

式中, A_{det} 为探测器焦平面阵列面积, ϵ 为光学系统遮拦

比, t_{int} 为积分时间, $f\#$ 为光学系统光圈数, λ/hc 为单光子能量, $\tau_{\text{atm}}(\lambda)$ 为高空气球到探测器大气透过率, $\tau_{\text{opt}}(\lambda)$ 为光学系统透过率, $\eta(\lambda)$ 为探测器的量子效率.

光电探测系统的噪声主要有信号光散粒噪声 \sqrt{S} 、背景光散粒噪声 $\sqrt{N_{\text{bac}}}$ 、以及暗电流噪声、 $1/f$ 噪声、热噪声等其他噪声^[16].

背景光散粒噪声产生的光电子数为

$$N_{\text{bac}} = \frac{A_{\text{det}}(1-\epsilon)t_{\text{int}}}{(1+4f\#^2)hc} \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} \tau_{\text{atm}}(\lambda) \tau_{\text{opt}}(\lambda) E_{\text{img}}^{\text{bac}}(\lambda) \eta(\lambda) \lambda d\lambda \quad (29)$$

探测系统总噪声是各项噪声的均方和根,即

$$N_{\text{tot}} = \sqrt{S + N_{\text{bac}} + N_{\text{other}}^2} \quad (30)$$

信噪比为

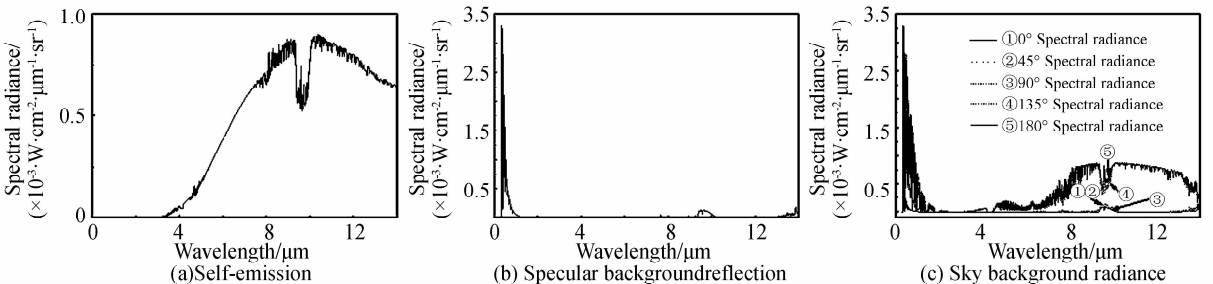
$$\text{SNR} = \frac{S}{N_{\text{tot}}} = \frac{S}{\sqrt{S + N_{\text{bac}} + N_{\text{other}}^2}} \quad (31)$$

由式(28)、(29)、(31)可知,探测系统的信噪比主要与高空气球镜反射率、漫反射率以及探测波段、光学系统的通光口径、透过率、探测器的量子效率、噪声以及积分时间等因素有关.

4 探测系统信噪比分析

4.1 高空气球辐射照度

高空气球辐射照度由自身辐射、镜背景辐射、漫背景辐射照度三部分组成.气球参数条件:温度 225K,直径 12 m,经度 95.45°,纬度 40.28°,高度 30.1 km,方位角 76.5°,仰角 15.4°,斜距 116 km.利用 Modtran 和 Matlab 软件仿真计算晴朗无云标准大气条件下,温度为 225K 时的高空气球自身辐射光谱亮度如图 7(a);当气球镜反射率 $\rho_{\text{spec}} = 0.2$ 时,镜背景辐射光谱亮度如图 7(b);气球所处半球空间五部分所产生的光谱亮度如图 7(c);天空背景辐射在气球表面产生的光谱照度为五部分光谱亮度与之对应立体角乘积和,当气球漫反射率 $\rho_{\text{diff}} = 0.2$ 时,光谱照度为如图 7(d);综合考虑自身辐射、镜背景辐射、漫背景辐射三部分产生的照度,气球在探测系统入瞳处产生的光谱照度如图 7(e).



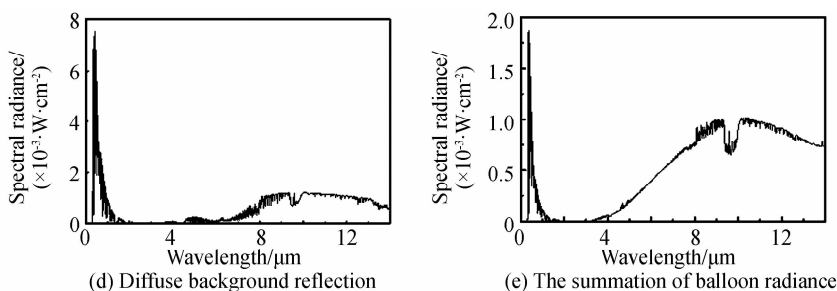


图 7 高空气球不同成分辐射

Fig. 7 The different parts radiance of balloon

4.2 复杂天气条件下高空气球辐射特性分析

利用 Modtran 和 Matlab 软件仿真计算不同气象条件下的气球辐射特性, 图 8 (a) 为对流层 (Tropospheric-VIS=50 km) 标准条件下, 气象视距 (Surface Meteorological Range, VIS) 为 5 km 及 23 km 的气球辐射对比图. 从图 8(a) 中可以看出, 在 VIS 为 5 km 时, 气球辐射在可见光近红外波段 (0.24 ~

2.4 μm) 骤然降低, 在长波红外波段 (8 ~ 12 μm) 辐射略高于 VIS 为 23 km 的辐射. 这是因为气象视距降低时, 大气中气溶胶粒子对流雾对太阳光的散射以及吸收效应比较严重, 使得气球接收的辐射降低; 而在长波红外波段, 由于气溶胶粒子的大量存在, 使得大气长波红外辐射特性增强, 因此增加了气球的长波红外辐射特性.

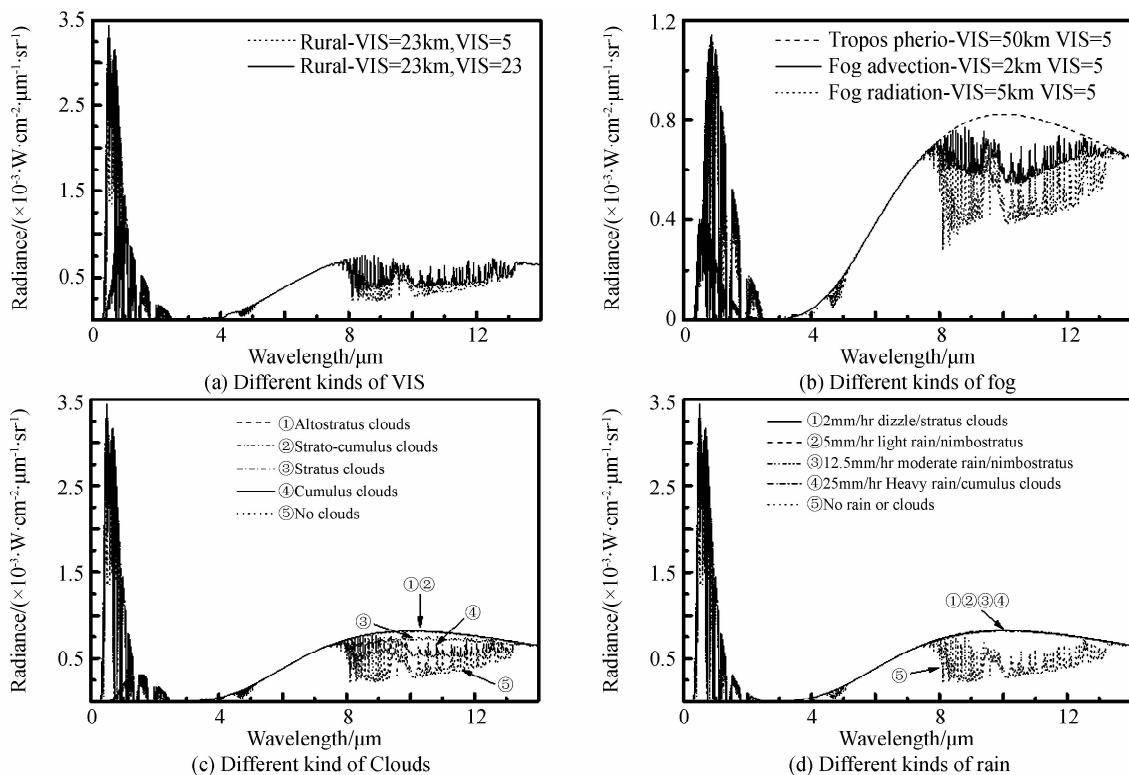


图 8 复杂大气条件下的气球辐射特性

Fig. 8 Radiation characteristic of balloon in complex atmospheric

图 8(b) 为对流层 (Tropospheric-VIS=50 km)、对流雾 (Fog advection-VIS=2 km)、辐射雾 (Fog radiation-VIS=5 km) 标准条件下, 气象视距 VIS 为 5 km 的气球辐射对比图. 从图 8(b) 中可以看出, 在存在对流雾以及辐射雾的情况下, 气球辐射在可见光近红外波段迅速减小, 在辐射雾条件下更是减小到零; 在长波红外波段, 气球辐射在对流雾大气条件下最大, 在辐射雾条件下次之, 在对流层标准大气条件下最小. 这是

因为出现雾时, 可见光近红外波段的太阳辐射被雾吸收衰减, 而平流雾较辐射雾对太阳辐射吸收衰减程度更大; 在长波红外阶段, 由于雾的存在, 使得平流雾及辐射雾的自身长波红外辐射中增加了气球的长波红外辐射, 由于平流雾对太阳辐射吸收衰减程度较大, 因此其自身长波红外辐射也较大, 使得气球长波红外辐射在平流雾情况下最大.

图 8(c) 为不同云层: 无云、积云 (Cumulus clouds)、

高层云(Altostratus clouds)、层云(Stratus clouds)、层积云(Strato-cumulus clouds)等标准条件下的气球辐射特性对比图^[17]。从图 8(c)中可以看出,标准条件下云层的出现使得可见光近红外波段的太阳直接辐射衰减为零;而在长波红外波段,气球辐射在无云情况下辐射最低,高层云次之,其余三种云层对气球辐射影响相同,变化不大。Modtran 软件默认高层云处于 2.4 km 到 3 km 之间,高度范围相对别的云层最小,因此其自身长波红外辐射最低,对气球在长波红外波段的辐射影响相对最小。图 8(d)为不同降雨类型:细雨(2 mm/hr drizzle)、小雨(5 mm/hr light rain)、中雨(12.5 mm/hr moderate rain)、大雨(25 mm/hr heavy rain)等标准条件下的气球辐射特性对比图。从图 8(d)中可以看出,在标准条件下降雨类型不同时,可见光近红外波段的太阳直接辐射为零;在长波红外辐射阶段,降雨使得气球辐射增加,不同降雨对气球辐射影响相同。

从图 8 中看出,采用光谱滤波技术,在晴朗无云天气下,气球辐射在可见光近红外波段比较大,使用可见光近红外探测器探测气球比较有利;在有雾云雨等复杂天气条件下,气球辐射在长波红外波段比较大,使用长波红外探测器探测气球比较有利。

4.3 高空气球探测能力分析

计算探测系统信噪比时,探测系统典型参数条件为^[18-21]:光学系统的通光口径 $D=72$ cm,通光面积 $A_{\text{aper}}=0.004\text{m}^2$,光圈数 $f\#=10$,中心遮拦比 $\epsilon=0$,平均光学透过率 $\tau_{\text{opt}}=30\%$,平均量子效率 $\eta=0.6$,光子噪声产生的电子数 $N_{\text{photon}}^2=892e^-$,约翰逊噪声产生的电子数 $N_{\text{johanson}}^2=3e^-$,暗电流噪声产生的电子数 $N_{\text{dark}}^2=3e^-$,转变效率噪声产生的电子数 $N_{\text{transfer}}^2=64e^-$,肥零噪声产生的电子数 $N_{\text{Fatzero}}^2=20e^-$,放大器噪声产生的电子数 $N_{\text{preamp}}^2=53e^-$ 。

通过 Modtran 软件仿真计算 30 km 高空到地面的大气透过率,如图 9。

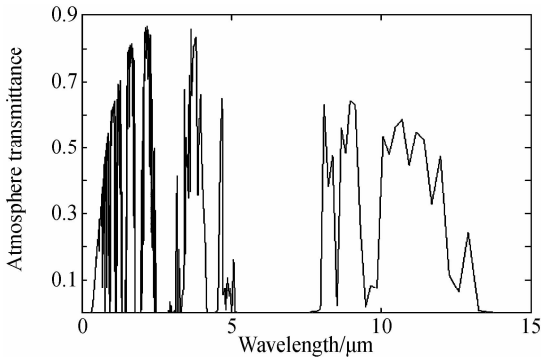


图 9 大气透过率变化曲线

Fig. 9 The atmosphere transmittance versus wavelength

探测系统信噪比计算结果如图 10。在图 10(a)中,积分时间为 0.25s,气球辐射产生的照度为 $E_{\text{self}}=6.1$

$\times 10^{-3}\text{W/m}^2$ 。信噪比总体上随着镜反射率和漫反射率增大而增大,在 $\rho_{\text{spec}}=0, \rho_{\text{diff}}=1; \rho_{\text{spec}}=1, \rho_{\text{diff}}=0$ 时,漫背景辐射和镜背景辐射分别单独对入瞳照度产生影响。与镜背景辐射单独作用时相比,信噪比在漫背景辐射单独作用时较大,与理论计算两者大小($E_{\text{diff}}=1.6 \times 10^{-5}\text{W/m}^2 > E_{\text{spec}}=1.09 \times 10^{-5}\text{W/m}^2$)的情况相同,因此信噪比随漫反射率较镜反射率增大得更为显著。在镜反射率 $\rho_{\text{spec}}=0.32$,漫反射率 $\rho_{\text{diff}}=0.68$ 时,信噪比达到最大 31,此时探测系统对高空气球探测能力最强,说明此时高空气球更容易探测。在图 10(b)中,积分时间为 1s,由于积分时间的延长,入瞳照度和对入瞳照度贡献较大的漫背景辐射同时迅速增加,同等条件下图 10(b)比图 10(a)的信噪比大,且信噪比随漫反射率变化曲线坡度较为陡峭,随镜反射率变化曲线坡度则较为缓慢,进一步证明漫背景辐射在入瞳照度中贡献较大。信噪比在镜反射率 $\rho_{\text{spec}}=0.43$,漫反射率 $\rho_{\text{diff}}=0.57$ 时达到最大 122,说明此时探测系统对高空气球的探测能力最强。此外由于信噪比是通过探测系统最优条件下的噪声计算所得,因此计算结果比较高。

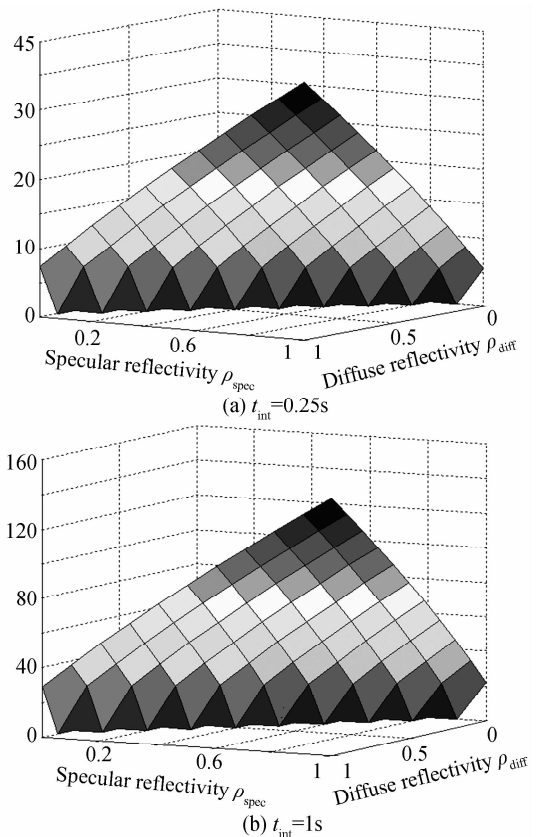


图 10 不同积分时间的信噪比

Fig. 10 The SNR of different integration time

5 结论

本文建立了适用于临近空间 20~40 km 高度范围的探测系统辐射接收模型,计算出高空气球辐射及背

景辐射在探测器焦平面阵列上产生的信号电子数,推导出用于高空气球探测的信噪比,仿真计算并分析了复杂大气条件下的气球辐射特性及标准晴朗无云大气条件下高空气球镜反射率、漫反射率与探测器积分时间对系统信噪比的影响。结果表明:在晴朗无云天气下,可见光近红外(0.6~2.4)探测器适合高空气球探测;在复杂大气条件下,长波红外(8~12)探测器适合高空气球探测;在积分时间0.25s,镜反射率0.32,漫反射率0.68时,或积分时间1s,镜反射率0.43,漫反射率0.57时,探测系统对高空气球探测能力最强。

参考文献

- [1] SMITH J. Advancement in NASA balloon research and Development[J]. *Advances in Space Research*, 1996, **17**(9): 37-44.
- [2] FAIRBROTHERD, PIERCE D. NASA balloon program status [C]. AIAA, 2009, **2800**: 1-5.
- [3] ZHANG Ying, NIU Yan-xiong, YANG Lu, *et al.* Analysis and study on detection capability of satellite photoelectric imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(1): 0111004.
张颖,牛燕雄,杨露,等.星载光电成像系统探测能力分析与研究[J]. *光学学报*, 2014, **34**(1): 0111004.
- [4] YANG Lu, NIU Yan-xiong, LU Jian-ming, *et al.* Influence of attitude variation on the detection ability of satellite photoelectric imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(12): 1223002.
杨露,牛燕雄,吕建明,等.姿态变化对星载光电成像系统探测能力的影响[J]. *光学学报*, 2014, **34**(12): 1223002.
- [5] YANG Fan, XUAN Yi-min, HAN Yu-ge. Analysis of SNR for ground-based infrared detection of space object [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(11): 2880-2885.
杨帆,宣益民,韩玉阁.空间目标红外地基探测的信噪比分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(11): 2880-2885.
- [6] FU Qiang, XIANG Li-bin, JING Juan-juan. System signal-to-noise ratio analysis based on imaging chain model in multispectral remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0211001.
付强,相里斌,景娟娟.基于多光谱遥感成像链模型的系统信噪比分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0211001.
- [7] QIAO Jian. Analysis on detection ability of shipborne optoelectronic equipment[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(10): 2521-2526.
乔健.舰载光电成像系统探测能力分析[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(10): 2521-2526.
- [8] TAN Bi-tao, CHEN Hong-bin, WANG Qun-shu, *et al.* Evaluation on detecting ability of electro-optical systems to space target [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, **26**(1): 011013.
谭碧涛,陈洪斌,王群书,等.光电系统对空间目标探测能力综合评估方法[J]. *强激光与粒子束*, 2014, **26**(1): 011013.
- [9] ZHAO Shi-hu, TANG Xin-ming, YIN Dan, *et al.* Spatial frequency based remote sensing radiative response modeling and its geometry correlation research [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, **50**(5): 895-903.
赵世湖,唐新明,尹丹,等.基于连续空间频率的遥感成像辐射响应模型及其几何相关性研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014, **50**(5): 895-903.
- [10] SUN Cheng-ming, ZHAO Fei, ZHANG Ze. Modeling and simulation space object optical scattering characteristics using TracePro [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(11): 1122003.
孙成明,赵飞,张泽.基于TracePro的空间目标光学散射特性建模与仿真[J]. *光子学报*, 2014, **43**(11): 1122003.
- [11] JING Nan, LI Chuang, ZHOU Nan. Research on optical scattering characteristics of high altitude balloon in near space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(4): 0429001.
荆楠,李创,周楠.临近空间高空气球光学散射特性研究[J]. *光学学报*, 2015, **35**(4): 0429001.
- [12] XIA Xin-Lin, LI De-Fu, SUN Chuang, *et al.* Transient thermal behavior of stratospheric balloons at float conditions [J]. *Advances in Space Research*, 2010, **46**(6): 1184 - 1190.
- [13] FIETE R, PAULB. Modeling the optical transfer function in the imaging chain [J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(8): 083103.
- [14] KANG Ji-qiang, HAO Qun, CHENG Xue-min. Measurement and comparison of one- and two-dimensional modulation transfer function of optical imaging systems based on the random target method [J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(10): 104105.
- [15] FIETE R, TANTALOT. Comparison of SNR image quality metrics for remote sensing systems [J]. *Optical Engineering*, 2001, **40**(4): 574-585.
- [16] WANG De-jiang, ZHANG Tao, KUANG Hai-peng. Relationship between the charge-coupled device signal-to-noise ratio and dynamic range with respect to the analog gain [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(29): 7103-7114.
- [17] CAO Ya-nan, WEI He-li, XU Qing-shan, *et al.* Simulation of atmospheric radiative properties at IR bands under water clouds based on MODIS data [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6): 0601001.
曹亚楠,魏合理,徐青山,等.利用MODIS资料模拟计算水云大气红外辐射特性[J]. *光子学报*, 2014, **43**(6): 0601001.
- [18] OZGURY, OZGUR S, FETHI T, *et al.* SNR analysis of a spaceborne hyperspectral imager [C]. IEEE, 2013, 601-606.
- [19] SILVEIRA P, NARAYAN SWAMY R. Signal-to-noise analysis of task-based imaging systems with defocus [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(13): 2924-2934.
- [20] WANG Hong-yuan, ZHANG Wei, DONG Aotuo. Modeling and validation of photometric characteristics of space targets oriented to space-based observation [J]. *Apply Optics*, 2012, **51**(32): 7810-7819.
- [21] LU Bai, WU Zhen-sen, CAO Yun-hua, *et al.* Spectral scattering characteristics of space target in near-UV to visible bands [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(7): 8515-8524.