

文章编号: 1672-8785(2015)05-0001-07

低轨红外探测卫星对大气层内高动态目标的探测能力研究

田 博 谢 放 范春懿 陈素芳 李萌萌

(空间物理重点实验室, 北京 100076)

摘 要: 对大气背景进行了分析, 并经计算得到了不同俯仰角下的大气辐射强度和大气透过率; 通过分析大气层内高动态目标的辐射原理, 给出了高温气体影响下的目标红外特性的计算模型, 并给出了不同波段的目标红外辐射强度的计算结果; 根据计算公式得到了信杂比和探测距离, 并对其进行了分析, 最后得出了探测能力有限的结论。

关键词: 红外; 天基探测; 高动态目标; 信杂比; 探测距离

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.05.001

Study of Detection Capability of Low Orbit Infrared Detection Satellite to High Dynamic Target in Atmosphere

TIAN Bo, XIE Fang, FAN Chun-yi, CHEN Su-fang, Li Meng-meng

(Science and Technology on Space Physics Laboratory, Beijing 100076, China)

Abstract: The atmospheric background is analyzed and the atmospheric radiation intensity and transmittance at different pitch angles are calculated. By analyzing the radiation principle of a high dynamic target in atmosphere, both the calculation model of the infrared characteristics of the target affected by high temperature gas and the calculation result of the infrared radiation intensity of the target in different wavebands are given. The Signal to Clutter Ratio (SCR) and detection range are calculated by formulas and are analyzed. Finally, the conclusion that the detecting ability is limited is reached.

Key words: infrared; space-based detection; high dynamic target; SCR; detection range

0 引言

红外探测系统通过探测目标与背景的红外辐射来识别目标, 具有智能化程度高、只需被动接收辐射以及抗干扰能力强等优点。目前, 红外探测是天基探测采取的主要方式, 其载荷主要搭载在低轨卫星和高轨卫星上。高轨卫星在地球同步轨道或者更高的椭圆轨道上运行, 因此其地面分辨率较低。由于大气层内的高动态目标的飞行高度低, 而且红外特性受大气影响较

大, 不宜采用高轨卫星对其进行探测。与高轨卫星相比, 低轨卫星的运行轨道较低, 地面分辨率更高, 对高动态目标的探测效果更好, 因此选择对低轨红外探测卫星的探测能力进行分析。单颗低轨红外探测卫星的探测能力主要受探测信杂比和探测距离两个因素的影响。

由于云、极光、太阳光反射等环境因素对探测的影响十分复杂, 且呈现出概率分布的特点, 因此本文在忽略上述环境因素的条件下, 分析了低轨红外探测卫星对典型的大气层内高动态目

收稿日期: 2015-03-26

作者简介: 田博(1989-), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要从事飞行器设计研究。E-mail: tianb_0131@163.com

标的探测过程,并在典型场景中对大气背景、目标辐射、信杂比和探测距离进行了计算,最后得出了低轨红外探测卫星对大气层内高动态目标探测能力的初步结论。

1 背景和目标的红外辐射特性

红外探测实质上就是探测器在视场范围内接收探测波段上的红外辐射的过程。目标的红外辐射经过大气传输后与大气背景辐射一起进入到探测器的视场中,从而得到该时刻的红外探测结果。下面分别介绍各个部分辐射的情况。

1.1 背景辐射特性

本文采用通用大气辐射传输 (Combined Atmosphere Radiative Transfer, CART) 软件计算相关的大气参数。用该软件计算得到的数据具有较高的精度^[1]。

根据 CART 软件计算得到,地面向上辐射的 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段 (波数为 $2000 \sim 5000 \text{ cm}^{-1}$) 的光谱辐射亮度见图 1。

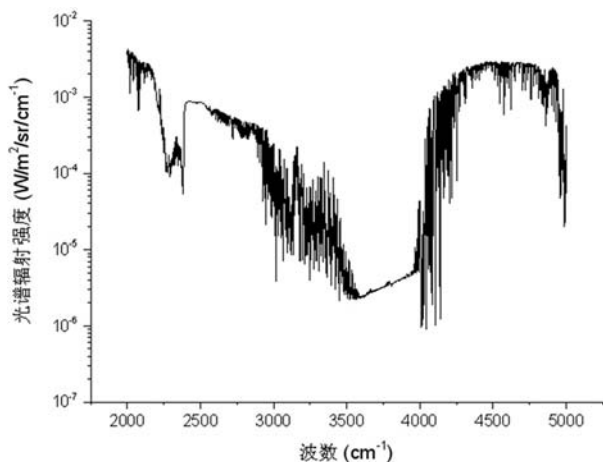


图 1 地面向上辐射的 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段 (波数为 $2000 \sim 5000 \text{ cm}^{-1}$) 的光谱辐射亮度

从图 1 中可以看出,地球/大气辐射在 $4.3 \mu\text{m}$ (波数为 2400 cm^{-1}) 附近与 $2.7 \mu\text{m}$ (波数为 3500 cm^{-1}) 附近存在两个辐射低谷,这是由于二氧化碳 (CO_2) 和水 (H_2O) 分子在该波段吸收效果较强所导致的。因此,探测器在这两个波段得到的背景辐射较弱,可以有效降低背景杂波的影响,从而有利于目标检测。同时,目前的红外探测器具备双色探测能力,即可使用多谱段对目标进行

探测。而且,大气辐射具有光谱选择性,所以对于波长相近的不同探测谱段,大气的传输和辐射会表现出较大的差异。基于上述分析,本文选择 $4.21 \sim 4.36 \mu\text{m}$ 波段、 $4.2 \sim 4.45 \mu\text{m}$ 波段、 $2.6 \sim 2.8 \mu\text{m}$ 波段和 $2.7 \sim 2.95 \mu\text{m}$ 波段作为探测波段进行分析和计算,并比较不同波段的探测性能。

对于不同高度和探测角度下的背景辐射强度,本文采用 CART 软件进行计算以获得数据。当探测器指向地球时,经计算得到 $2.7 \sim 2.95 \mu\text{m}$ 波段的背景辐射均值为 $1.9 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, $4.2 \sim 4.45 \mu\text{m}$ 波段的背景辐射均值为 $2.19 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。当探测器指向地球边缘、临边切线高度为 $10 \sim 50 \text{ km}$ 时,经计算得到 $2.7 \sim 2.95 \mu\text{m}$ 波段的背景辐射范围为 $(1.42 \sim 14.2) \times 10^{-5} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,均值为 $4.69 \times 10^{-5} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$; $4.2 \sim 4.45 \mu\text{m}$ 波段的背景辐射范围为 $(1.17 \sim 2.52) \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,均值为 $2.06 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。

1.2 目标红外特性

1.2.1 本体辐射特性

采用普朗克黑体辐射公式对本体红外辐射进行计算^[2],即单位面积的黑体在单位波长间隔内向周围空间发射的辐射功率与波长及温度的关系。该定律是描述物体红外辐射过程的基础,其数学表达式为

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

式中, $M_{b\lambda}$ 为黑体的光谱辐射出射度; c_1 为第一辐射常数, $c_1 = 3.7418 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; c_2 为第二辐射常数, $c_2 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

目标光谱辐射强度是温度的函数,其定义为在一定方向上,单位投影面积内的光谱辐射总和;计算公式为

$$I_\lambda = L_\lambda A_r \quad (\text{W}/(\text{sr} \cdot \mu\text{m})) \quad (2)$$

式中, A_r 为目标的面积。

假设目标的光谱发射率为 ϵ_λ , 由于各个方向上辐亮度相等的发射表面的辐射强度按余弦变化,可用朗伯源的模型计算光谱辐射亮度 L_λ :

$$L_{\lambda} = \frac{\varepsilon_{\lambda} M_{\lambda}}{\pi} \text{ (W/(m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m))} \quad (3)$$

式中, M_{λ} 为目标光谱辐射出射度。

辐射源在某方向上的单位立体角内所发射的辐射能通量可用辐射强度来描述:

$$I = \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \frac{\Delta\phi}{\Delta\Omega} = \int I_{\lambda} d\lambda \text{ (W/sr)} \quad (4)$$

则飞行器本体的各个微元的红外辐射强度为

$$I_{i, \lambda_1 \sim \lambda_2} = L_{i, \lambda_1 \sim \lambda_2} A_i = \frac{\varepsilon_{\lambda} M_{i, \lambda_1 \sim \lambda_2}}{\pi} A_i = \frac{A_i}{\pi} \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} M_{i, b\lambda} d\lambda = \frac{A_i}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\varepsilon_{\lambda} c_1}{\lambda^5} \left(e^{c_2/\lambda T_i} - 1 \right)^{-1} d\lambda \quad (5)$$

式中, A_i 为微元的等效辐射面积; λ_2 和 λ_1 分别为探测波段的上下限。

1.2.2 目标的高温气体辐射特性

由于飞行高度、速度、姿态以及相应的大气物理环境不同, 高速目标附近的气体温度、组分和热力学状态也不同, 与之相伴的光辐射过程呈现出以下特点: 辐射机制非常复杂, 既可能包括各种电子跃迁效应, 也可能包括化学反应发光辐射; 多种组分参与发射和吸收过程, 既包括氮、氧两种元素的化学反应所生成的组分, 也包括空气中原有的组分如 CO_2 、 H_2O 等; 不同组分的红外光谱辐射强度和光谱发射率随波长变化剧烈 (见图 2 ~ 图 4) [3]。

因此, 为计算高温气体对辐射的作用, 我们主要选取吸收系数和发射系数作为气体辐射特性参数对其进行描述。红外辐射传输公式如下:

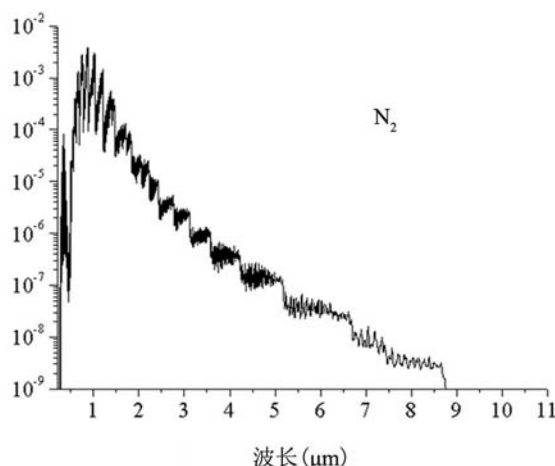
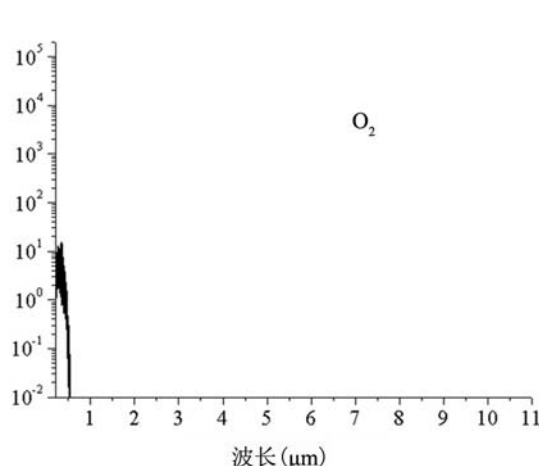


图 2 $T=4000 \text{ K}$ 时, O_2 和 N_2 分子在平衡态下的红外光谱辐射强度 ($\text{W}/(\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$)

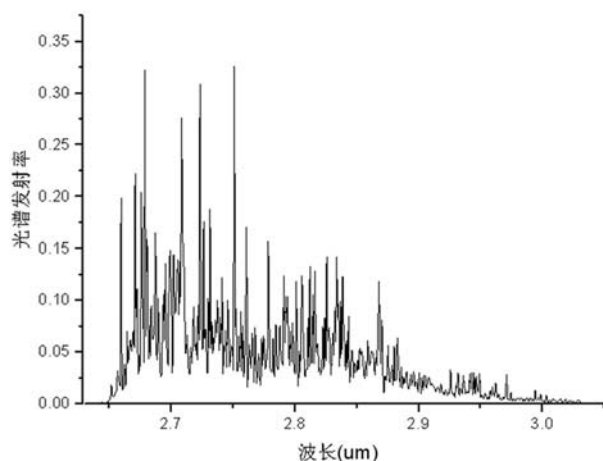


图 3 $T=1200 \text{ K}$ 时, CO_2 的 $2.7 \mu\text{m}$ 谱带发射率

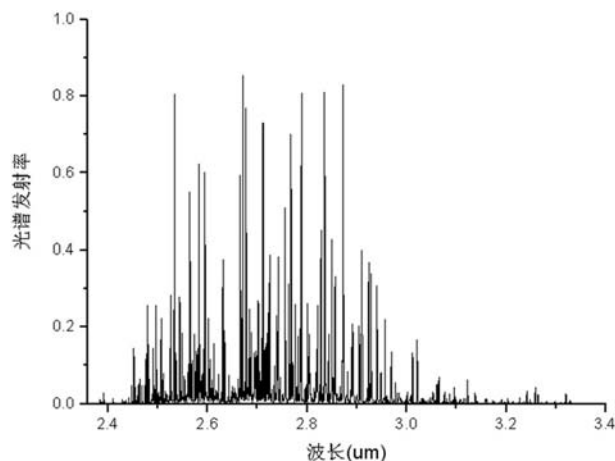


图 4 $T=1000 \text{ K}$ 时, H_2O 的 $2.7 \mu\text{m}$ 谱带发射率

$$I_{i+1} = I_i \cdot (1 - \Delta l \cdot c_{absb}) + \Delta l \cdot c_{emis} \quad (6)$$

式中, I_i 为第 i 层高温气体的辐射强度; Δl 为该层气体的厚度; c_{absb} 和 c_{emis} 分别为该层气体的吸收系数和发射系数, 其具体数值与高温气体中的粒子种类、密度和温度有关。

计算本体红外辐射穿过高温气体得到的辐射强度即得到受高温气体影响的目标红外辐射强度。经过上述步骤, 以在目标的正上方对其进行探测为例, 由计算得到目标在 $2.7 \sim 2.95 \mu\text{m}$ 波段的红外辐射强度约为 $1800 \sim 2100 \text{ W/sr}$, 在 $2.6 \sim 2.8 \mu\text{m}$ 波段的红外辐射强度约为 $1600 \sim 1800 \text{ W/sr}$, 在 $4.21 \sim 4.36 \mu\text{m}$ 波段的红外辐射强度约为 $400 \sim 600 \text{ W/sr}$, 在 $4.2 \sim 4.45 \mu\text{m}$ 波段的红外辐射强度约为 $700 \sim 1000 \text{ W/sr}$ 。由于目标与卫星之间的距离远远大于目标尺寸, 对于星载探测器来说可将目标视为点目标。

1.3 大气透过率分析

在大气层内, CO_2 和 H_2O 组分会对目标辐射产生吸收作用。这种作用是影响探测器对目标进行探测的重要因素。本文将目标在不同高度下 (某波段) 向上辐射的平均透过率定义为该高度的大气透过率。以 $2.7 \sim 2.95 \mu\text{m}$ 波段和 $4.2 \sim 4.45 \mu\text{m}$ 波段为例, 通过 CART 软件计算可得到它们在不同高度下的大气透过率 (见图 5 和图 6)。从图中可以看出, 目标高度越低, 大气对谱

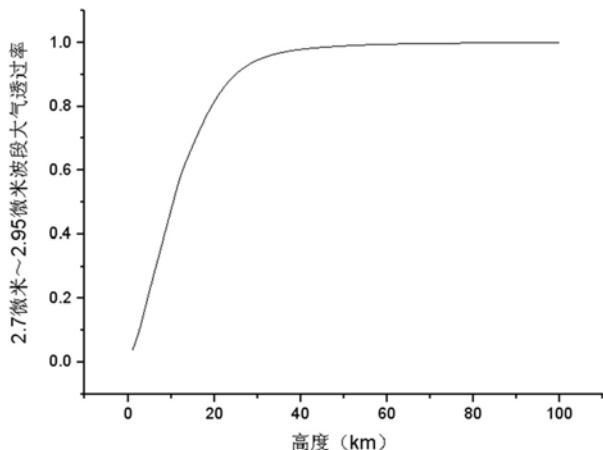


图 5 $2.7 \sim 2.95 \mu\text{m}$ 波段的大气透过率曲线

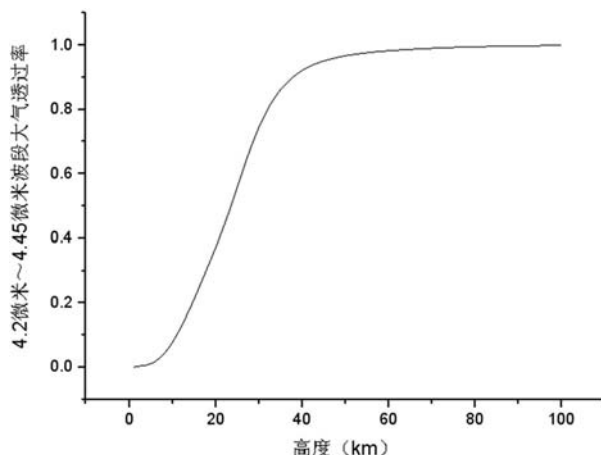


图 6 $4.2 \sim 4.45 \mu\text{m}$ 波段的大气透过率曲线

段内红外辐射的吸收效果越强。这也意味着低高度目标的辐射信号可能会被背景噪声淹没, 导致探测系统无法探测到目标。

2 探测信杂比分析

低轨红外探测卫星的扫描探测系统可以实现地平线到地平线的覆盖夹角, 则探测系统的视场角可按反三角函数公式计算:

$$\theta_s = 2 \arcsin \left(\frac{a'_e}{a_e + h_s} \right) \quad (7)$$

低轨红外探测卫星的轨道高度约为 1600 km , 地球等效半径 a'_e 取 6408 km , 可得视场角约为 106° , 即卫星对目标探测的最大俯仰角为 53° 。因此在分析探测性能的过程中, 以 53° 俯仰角为上限, 以 0° 俯仰角为下限, 对不同高度、不同俯仰角下的信杂比进行计算。

目前先进的红外探测器可以探测多个波段的红外辐射, 并可使用制冷剂来确保其探测效果不受探测器本身温度的影响。根据红外探测器的发展情况, 设探测器扫描系统的空间分辨力 α 为 $90 \mu\text{rad}$, 光学系统的透过率 τ_0 为 0.7 。

根据相关参数, 得到红外探测器成像面接收到的背景噪声的辐射照度 E_N 的计算公式为

$$E_N = G \tau_0 I_N \alpha^2 \quad (8)$$

式中, I_N 为单位面积上的地球背景辐射强度 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$); α 为空间分辨力; G 为光学系统的增益; τ_0 为光学系统的透过率; E_N 为红外探测器成像面接收到的背景噪声的辐射照度。

根据相关参数, 同样可以得到红外探测器接收到的目标辐射照度 E_s 的计算公式:

$$E_s = \frac{G\tau_0 I_M \tau_a}{R^2} \quad (9)$$

式中, I_M 为飞行器的红外辐射强度 (W/sr); τ_0 为光学系统的透过率; τ_a 为大气透过率; R 为传输距离 (m); G 为光学系统的增益; E_s 为红外探测器接收到的目标辐射照度。

因此, 探测系统的信杂比计算公式为

$$S/N = \frac{E_s}{E_N} = \frac{I_M \tau_a}{I_N \alpha^2 R^2} \quad (10)$$

根据上述参数, 结合 CART 软件计算得到地球背景辐射强度数据和不同探测俯仰角下的目标辐射强度数据, 并将其代入探测信杂比公式进行计算。将相对信杂比定义为各个波段的

探测信杂比与所有波段中信杂比的最大值之间的比值, 其结果见图 7 ~ 图 14。其中, 与 4.2 ~ 4.45 μm 波段相比, 4.21 ~ 4.36 μm 波段的探测能力较弱; 与 2.7 ~ 2.95 μm 波段相比, 2.6 ~ 2.8 μm 波段的探测能力较强。

根据上述数据可以分析得出, 高度相同时, 俯仰角越大, 信杂比越低; 俯仰角相同时, 高度越高, 信杂比越高, 因为俯仰角越大, 探测距离越长, 会导致辐射在大气中传输得更远, 从而使得大气透过率降低; 根据相应公式计算, 相比于低俯仰角将得到较低的信杂比。同时, 随着俯仰角的增加, 接收目标红外辐射的方向也从正上方变为侧向, 因此目标辐射也会减小。与 4.3 μm 波段相比, 2.7 μm 波段由于背景噪声较低, 目标辐射强度较高, 因此可以得到比 4.3 μm 波段更

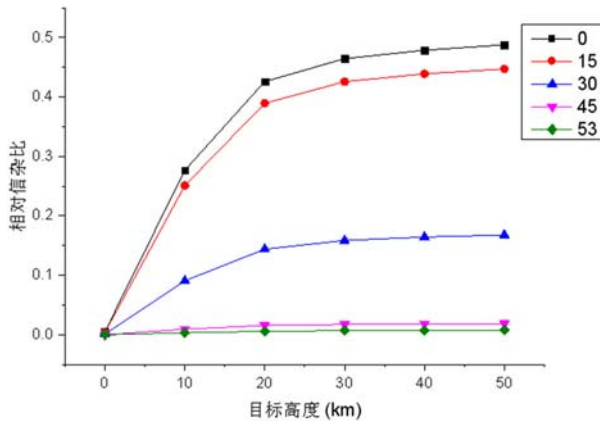


图 7 2.7 ~ 2.95 μm 波段 (各俯仰角) 的相对信杂比曲线

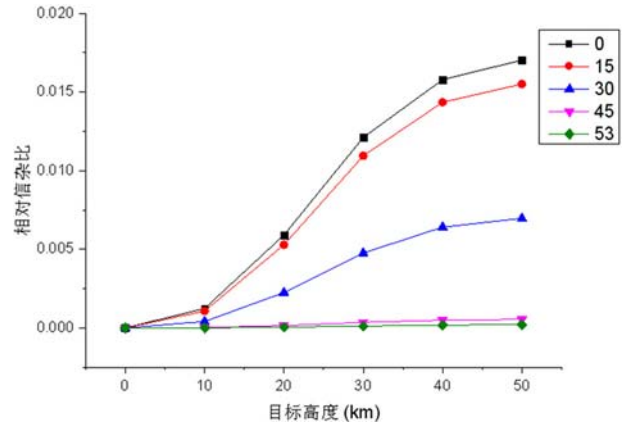


图 8 4.2 ~ 4.45 μm 波段 (各俯仰角) 的相对信杂比曲线

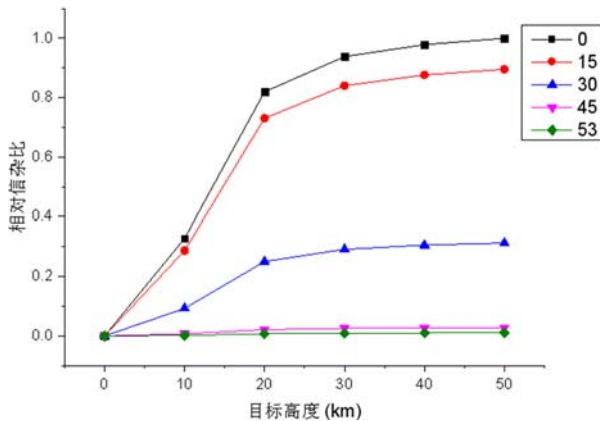


图 9 2.6 ~ 2.8 μm 波段 (各俯仰角) 的相对信杂比曲线

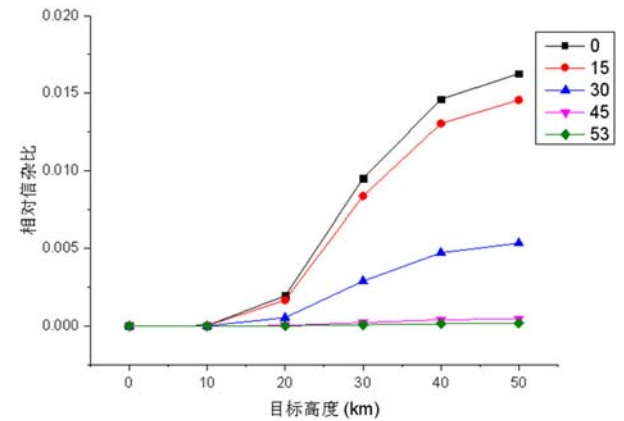


图 10 4.21 ~ 4.36 μm 波段 (各俯仰角) 的相对信杂比曲线

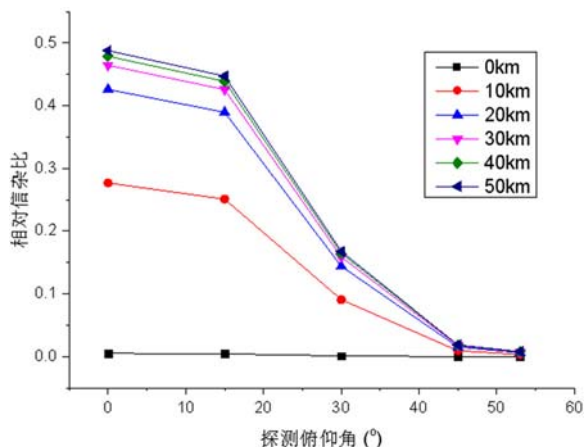


图 11 2.7 ~ 2.95 μm 波段 (各高度) 的相对信杂比曲线

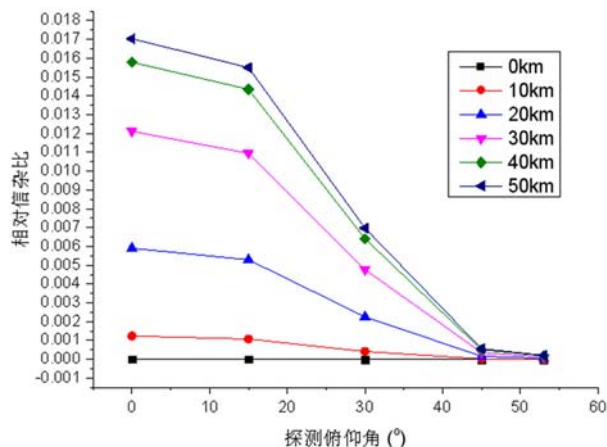


图 12 4.2 ~ 4.45 μm 波段 (各高度) 的相对信杂比曲线

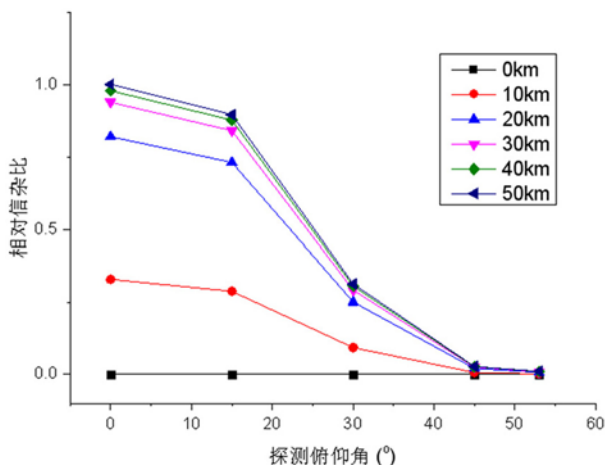


图 13 2.6 ~ 2.8 μm 波段 (各高度) 的相对信杂比曲线

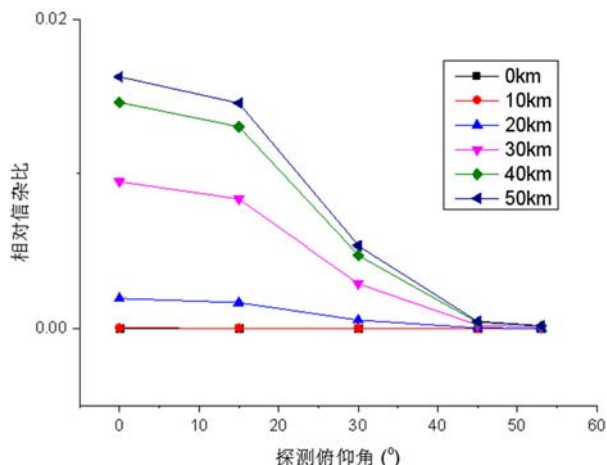


图 14 4.21 ~ 4.36 μm 波段 (各高度) 的相对信杂比曲线

高的信杂比。而在 2.7 μm 波段, 从 2.6 ~ 2.8 μm 波段得到的信杂比比 2.7 ~ 2.95 μm 波段的更高, 说明红外探测具有光谱选择性, 即波长相近的不同波段所得到的结果也会有较大差异。

在目标高度从零开始逐渐增大的过程中, 信杂比呈现出增速由快变慢的趋势, 这是因为随着高度的增加, 相对于探测距离的变化, 主要是大气透过率的变化率会由大变小。在目标高度固定, 探测俯仰角从零开始逐渐增加的过程中, 信杂比的降速越来越快, 因为随着探测俯仰角的增加, 目标到探测器的距离的增速会越来越快。

同时, 如果目标飞离地球背景而进入临边背景, 切线高度大于 150 km 以上的大气十分稀

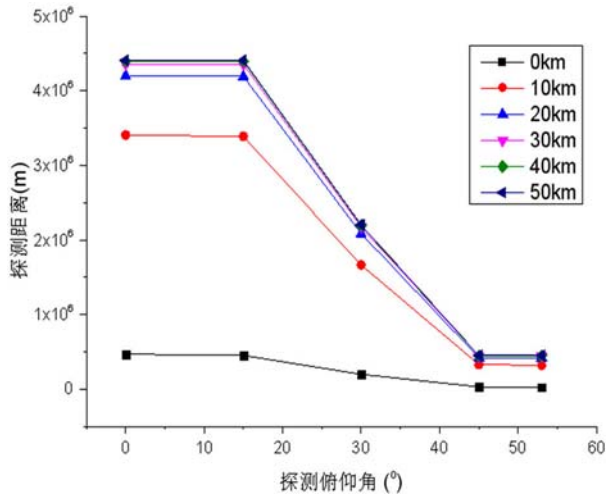
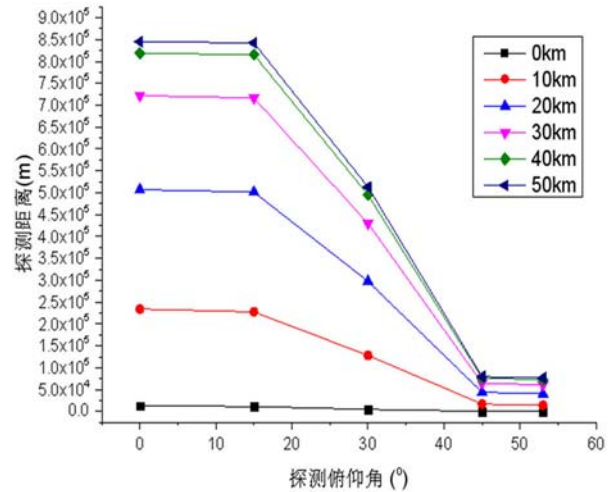
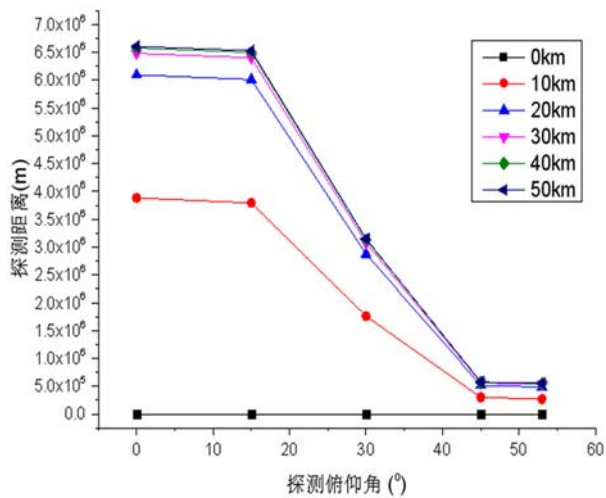
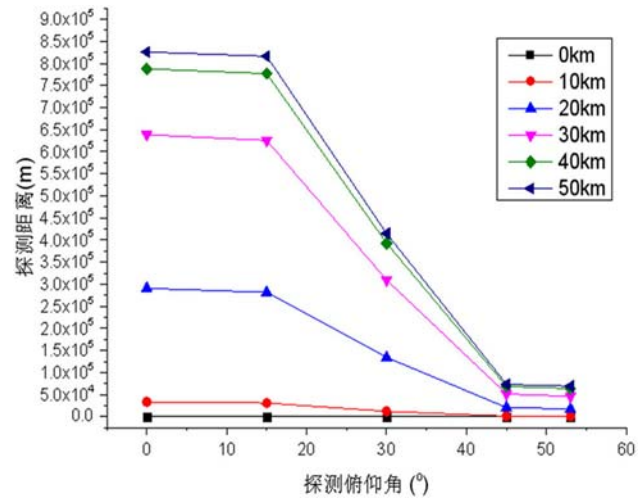
薄, 背景辐射接近于零, 此时的探测信杂比将会比地球背景上更高。

3 低轨红外探测卫星的探测距离分析

星载红外探测器的探测距离是指在探测所需最低信杂比的要求下, 探测器与目标的距离。

为满足探测需求, 对于不同的探测器, 目标信杂比一般要求在 3 ~ 8 的范围内; 信杂比越高, 探测效果越好。根据相关探测理论可知, 探测距离与目标辐射、背景杂波辐射、大气透过率以及探测器的空间分辨力有关。我们可推导出特定信杂比下不同高度、不同探测角度的探测距离的计算公式:

$$R = \sqrt{\frac{I_M \tau_a}{I_N \alpha^2 (S/N)}} \quad (11)$$

图 15 2.7 ~ 2.95 μm 波段的探测距离曲线图 16 4.2 ~ 4.45 μm 波段的探测距离曲线图 17 2.6 ~ 2.8 μm 波段的探测距离曲线图 18 4.21 ~ 4.36 μm 波段的探测距离曲线

式中, I_N 为某俯仰角下单位面积内的地球背景辐射强度 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$); α 为空间分辨率; I_M 为对应俯仰角下飞行器的红外辐射强度 (W/sr); τ_a 为大气透过率; S/N 为最低信杂比; R 为探测距离 (m)。探测距离的计算结果见图 15 ~ 图 18。

从图中可以看出, 在满足探测需求的条件下, 当目标高度小于 10 km 时, 各波段的探测距离均在 500 km 以下, 远小于目标与卫星之间的距离, 说明此时无法对目标进行有效探测。同时, 随着探测俯仰角的增加, 探测距离呈现出明显的减小趋势, 因为随着探测俯仰角的增大, 目标辐射强度会呈逐渐降低的趋势。在 2.7 μm 波段中探测效果较好的 2.6 ~ 2.8 μm 波段, 当目

标高度处于 30 ~ 50 km、卫星的探测俯仰角大于 36° 时, 其探测距离小于目标与卫星的几何距离, 无法满足探测需求, 此时的探测距离在 2150 km 左右。在 4.3 μm 波段, 探测距离均小于目标与卫星的几何距离, 说明卫星在此波段无法对目标进行有效探测。

4 结束语

在忽略环境因素影响的条件下, 本文通过分析目标和背景的红外辐射, 计算目标的红外辐射强度, 并估计探测器的信杂比需求, 得到了

(下转第 15 页)