

基于非局域热平衡模式的临近空间目标背景临边对比度模型

刘栋^{1,2}, 戴聪明^{1*}, 唐超礼^{1,2}, 武鹏飞¹, 刘铮³, 毛宏霞³, 魏合理^{1,2}

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学研究生院 科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

3. 北京环境特性研究所 光学辐射重点实验室, 北京 100854)

摘要: 对临近空间目标的空基/星载红外探测中的目标背景临边对比度问题进行物理建模, 详细阐述对比度的定义和模型中的高层大气辐射问题. 利用适于模拟高层大气辐射的非局域热平衡模式, 结合探测器噪声假定, 计算理想黑体目标的临边对比度并分析高层大气辐射特性对对比度的影响. 模拟结果表明, 在评估目标探测可行性时必须考虑探测器噪声的影响; 在高层大气临边路径下水汽波段比大气窗区的可探测性更好, 而目标本征辐射与大气临边吸收和背景辐射间的关系导致了对比度复杂的变化特征.

关键词: 大气光学; 红外辐射; 非局域热平衡; 临近空间; 临边对比度

中图分类号: O432.1; P351.3 **文献标识码:** A

Model of near-space limb contrast based on non-local thermodynamics equilibrium model

LIU Dong^{1,2}, DAI Cong-Ming^{1*}, TANG Chao-Li^{1,2}, WU Peng-Fei¹,
LIU Zheng³, MAO Hong-Xia³, WEI He-Li^{1,2}

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. Science and Technology on Optical radiation Laboratory, Beijing Institute of Environmental Feature, Beijing 100854, China)

Abstract: A physical model was established for studying near-space limb radiance contrast when the target is detected by space-borne infrared surveillance system. The definition of limb contrast and radiation issues of upper atmosphere of the model was described in detail. The target's limb contrasts were simulated and analyzed to show upper atmospheric radiation properties' effects to the target visibility based on non-local thermodynamics equilibrium atmospheric model and assumed detector's noise. The results indicate that the detector's noise must be considered for evaluating surveillance feasibility correctly. The contrast at the traditional waveband of the strong absorption by water vapor is better than the often-used 'atmospheric windows' for the upper atmospheric limb detection. The complicated contrast characteristics result from the relationship among target inherent radiation, atmospheric absorption and background radiation.

Key words: atmospheric optics, infrared radiation, non-local thermodynamics equilibrium, near-space, limb contrast

PACS: 42. 68. Ay, 92. 60. Ta

引言

探测器端视在的目标背景对比度是空间目标光学探测的基本依据,只有探测器接收到的目标辐亮度和背景辐亮度间存在可检测出的差异,才能进一步讨论多目标区分、识别及捕获、跟踪等^[1].

对于无显著短波辐射(紫外-可见光-近红外波段)的目标,红外波段探测是主要的手段.而对于临近空间(一般指 30 km 以上的中高层空间)中的目标,鉴于大气十分稀薄,且以分子大气为主,气溶胶和云可以忽略,其背景辐射相比于低层稠密大气在绝大多数波段都小得多,因此处于大气层外的探测器通过临边探测的方式更有可能探测到目标.这其中大气既是红外背景辐射最主要的构成,也是导致目标本征辐射衰减的介质.但高层大气往往会由于分子热碰撞频次的显著降低和复杂的物理化学过程偏离局域热平衡辐射状态.这就需要建立基于非局域热平衡大气辐射的模型模拟分析临边路径下目标与背景的辐亮度对比,评估探测可行性,为相关工程提供可靠的参考.对于这类耗资巨大的空基/星载红外工程,尤其需要充分的模拟研究做技术支撑.

美国空军研究实验室 AFRL (Air Force Research Laboratory) 从 20 世纪 70 年代开始就持续发射探空火箭和卫星,开展临近空间红外辐射测量和实验^[1-5].通过大量红外辐射数据的分析,逐步建立并完善了高层非局域热平衡大气红外辐射传输模式^[6-7],为高层空间目标探测等应用的研究提供了物理基础.已有学者对地基和卫星对地探测的目标背景对比度问题进行过探讨^[8-10],但是未见利用考虑非局域热平衡的大气辐射传输模式仿真目标背景辐射特征并给临边红外探测系统设计提供支持的研究报导.

描述临近空间目标在临边路径下红外波段的目标背景辐亮度对比度模型,引入探测器噪声,使模型更加符合实际应用需求.以非局域热平衡辐射模式为核心,模拟计算简化的一维大气模型下理想目标的对比度,分析高层大气临边路径的辐射特性对目标背景对比度的影响,并说明探测器噪声对模拟结果和探测可行性预测的作用.

1 临近空间目标背景临边对比度模型

1.1 对比度的定义

如图 1 所示,临边路径贯穿整个大气,存在一个

高度最低的点,即此路径的切点.图中假设的任意不包含目标的大气路径 1 与大气层顶交点的位置分别为 s_1 和 s_2 ;包含目标的大气路径 2 与大气层顶交点的位置分别为 s_3 和 s_4 ,目标所在的位置为 s_0 .不同的高层大气模型会将大气层顶设定在不同的高度,对于地球大气的红外背景辐射研究,300 km 高度是足够的上限^[6].

参考经典的对比度定义方法^[10-11],并考虑因探测器测量噪声引起的等效辐亮度,图 1 中的目标背景临边对比度可以定义为:

$$C = \frac{|(I_T + \Delta_T) - (I_B + \Delta_B)|}{I_B + \Delta_B}, \quad (1)$$

其中 $I_B + \Delta_B$ 代表视线路径 1 在探测器中的响应辐亮度, $I_T + \Delta_T$ 代表视线路径 2 在探测器中的响应辐亮度. I_B 是路径 1 的总背景辐亮度,包含 s_1 - s_2 间大气背景辐射和外空间背景辐射(太阳辐射和其他星际辐射)经过路径 1 大气衰减后的成分; I_T 是路径 2 的总辐亮度,包含 s_0 - s_4 间大气背景辐射和目标本征辐射经过 s_0 - s_4 间大气衰减后的成分; $\Delta_{T,B}$ 分别是探测器测量目标和背景时噪声的等效辐亮度.

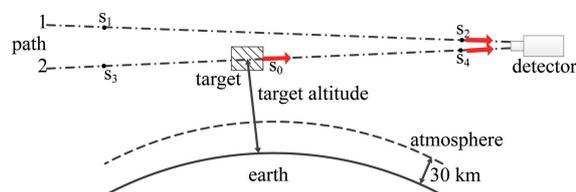


图 1 临近空间目标背景临边辐亮度对比示意图

Fig. 1 The diagram of limb radiance contrast between near-space target and background

在红外波段,探测器光学系统自身发射的辐射和光学系统的随机震动是主要噪声源,因此整体冷却探测器和提升光学系统减震效果是必要的降噪手段^[12].临边测量时,低层地气系统发射的上行红外辐射照明探测器望远镜,散射进入探测视场的辐射对于长期工作的高灵敏传感器是另一个不可忽略的噪声源,称为 NRER (Non-Rejected Earth Radiance);已有的研究表明, NRER 在 30 km 以上几乎不随视线切点高度的改变而改变^[12].因此,这里所指的测量噪声既包括缓变项,即光学系统自身发射辐射和 NRER,在一次扫描过程中可以认为是常量;也包括随机扰动项,即光学系统的随机震动.在处理对比度中的噪声时,本文认为 $\Delta_{T,B}$ 是多次采样统计平均后的噪声等效辐亮度,这样 $\Delta_T = \Delta_B = \Delta$ 是一个合理的

假设,式(1)中的对比度就简化为:

$$C = \frac{|I_T - I_B|}{I_B + \Delta_B} \quad (2)$$

根据式(2),当 $I_T = I_B$ 时 $C = 0$,代表目标像元与背景像元亮度完全无差别,噪声在此定义中的作用只是提供一个固有的测量亮度.对噪声处理方式的不同会导致对比度定义的差异,式(2)代表的处理方式可以保持对比度值与无噪声理想情况相似的物理意义,有利于其在不同探测器中的应用.

需要强调的是, Δ 对于有效的目标背景亮度对比模拟是必须考虑的因素,忽略噪声的理想计算在弱谱带不能获得有实际参考价值的结果,有时还会给出错误的预测.

针对探测器通道波段范围 $v_1 - v_2$,利用辐射传输模式计算的临边路径大气背景辐亮度和透过率,就可以模拟具有特定本征辐射的目标的对比度 C .当 C 大于探测器可识别的对比度阈值 ε 时,目标才能从背景中被提取出来. ε 是一个十分复杂的参量,与探测器的类型、波段、背景辐射强度等级和检测算法等众多因素有关,对于特定的探测器可以在实验室标准环境下进行检测评估以确定其可识别的对比度阈值.

1.2 临边辐射模型

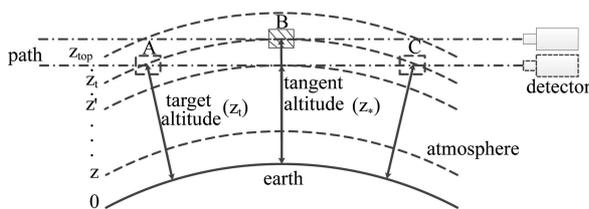


图2 一维大气模型下的临边探测示意图
Fig. 2 The diagram of one-dimension atmospheric limb probe

在数值模拟中,通常先采取一维球面大气模型分析临边辐射,如图2所示,大气参数(包括温度、气压和各种大气成分浓度等)只在径向的高度坐标上变化.这样只需要大气参数的垂直廓线分布就可以充分了解临边路径上的大气辐射性质,模拟分析得到极大地简化.

若探测器视线的切点高度为 z_* ,由于切点两侧是完全对称的,临边背景辐亮度 I_B 可以推导获得:

$$I_B = \int_{v_1}^{v_2} I_v(z_{top}) \exp[-2\tau_v(z_*, z_{top})] \varphi(v) dv + \int_{v_1}^{v_2} \int_{z_*}^{z_{top}} J_v(z) \exp[-\tau_v(z_*, z) - \tau_v(z_*, z_{top})] k_v(z) \rho(z) \varphi(v) dz dv +$$

$$\int_{v_1}^{v_2} \int_{z_*}^{z_{top}} J_v(z) \exp[-\tau_v(z, z_{top})] k_v(z) \rho(z) \varphi(v) dz dv \quad (3)$$

其中 z_{top} 是大气层顶的高度, $J_v(z_{top})$ 表示大气层顶处入射临边视线的外空间辐亮度, $J_v(z)$ 表示高度 z 处大气的源函数, $k_v(z)$ 是 z 处大气的消光系数.对于临近空间,云和气溶胶粒子十分稀少,可以看作稀薄的分子大气,因此建立辐射传输模式时,在大于 $2 \mu\text{m}$ 的红外波段,高层大气的源函数就认为是特定辐射分子的发射辐射源函数,消光系数也就等同于分子的吸收系数^[13]. $\rho(z)$ 为该分子的数密度. $\varphi(v)$ 是探测器相对谱响应函数. $\tau_v(z, z')$ 是 z 和 z' 两个高度层间临边路径的光学厚度:

$$\tau_v(z, z') = \int_z^{z'} \frac{k_v(z'') \rho(z'')}{\mu(z'')} dz'' \quad (4)$$

式中 $\mu(z'') = \cos[\theta(z'')]$, $\theta(z'')$ 为路径在 z'' 处与当地天顶方向的夹角, $0 \leq \theta \leq \pi/2$.与平面模型下 θ 保持常数不同,在球面模型下 θ 与路径微元的高度有关.

可以看出,式(3)中的第一项就是外空间辐射经过临边路径衰减后的成分,第二项是切点左侧一半路径大气发射辐射到达探测器的成分,第三项则是右侧一半路径大气发射辐射到达探测器的成分.

假设目标处于 z_t 高度上,根据图2,沿探测器临边视线方向上,满足 $z_* \leq z_t$ 的目标可能出现在切点位置的两侧,分别是图2中的位置A和位置C.本文将目标和探测器位于切点的两侧,即目标-探测器之间包含视线切点的路径(目标在位置A)称为长路径;目标和探测器位于切点位置的同一侧,即目标和探测器之间不包含切点的路径(目标在位置C)称为短路径.随着探测器视线的升高,位置A和位置C逐渐向切点靠拢; $z_* = z_t$ 时,合并到切点位置B.对于长路径,可以推导探测器接收到的 I_T 为:

$$I_T = \int_{v_1}^{v_2} I_v(z_t) \exp[-\tau_v(z_*, z_{top}) - \tau_v(z_*, z_t)] \varphi(v) dv + \int_{v_1}^{v_2} \int_{z_*}^{z_t} J_v(z) \exp[-\tau_v(z_*, z) - \tau_v(z_*, z_{top})] k_v(z) \rho(z) \varphi(v) dz dv + \int_{v_1}^{v_2} \int_{z_*}^{z_{top}} J_v(z) \exp[-\tau_v(z, z_{top})] k_v(z) \rho(z) \varphi(v) dz dv \quad (5)$$

对于短路径,探测器接收到的 I_T 则为:

$$I_T = \int_{v_1}^{v_2} I_v(z_t) \exp[-\tau_v(z_t, z_{top})] \varphi(v) dv + \int_{v_1}^{v_2} \int_{z_t}^{z_{top}} J_v(z) \exp[-\tau_v(z, z_{top})] k_v(z) \rho(z) \varphi(v) dz dv \quad (6)$$

式(6)中, $I_v(z_t)$ 代表目标的本征辐亮度.很明显,短路径的 I_T 相比于长路径会包含更少的大气背景辐

射和更多来自目标的辐射。

由于分子吸收谱的杂乱特性,对式(3)、(5)、(6)在频域上积分时通常需要数值方法进行求解,这是辐射传输模式最耗时的计算部分,积分上下限 ν_1 - ν_2 的宽度则不能小于数值模式所能计算的最高光谱分辨率。

实际的高层大气由于潮汐、重力波、太阳明暗界限照明等过程,长程的临边路径可能不严格满足一维大气假设。可以通过在路径上设置多个独立的一维大气区域精细地处理这类大气非均匀性问题,而不用采取严格的多维大气模型。这种分析方法对于只考虑吸收过程的辐射传输问题是合适的^[6]。

1.3 非局域热平衡

大气密度会随高度的增加迅速地衰减,临近空间的大气相比近地面低层空间已经十分稀薄,这导致分子间的热碰撞频次显著降低,同时太阳紫外辐射和高能粒子沉降也诱导很多大气分子发生高效地化学/光化学反应。这些因素使得辐射分子的能级数密度分布在特定的高度以上开始逐渐偏离热平衡状态的玻尔兹曼分布,此时大气的热力学状态称为非局域热平衡状态(non-LTE, non-local thermodynamics equilibrium)。

对于 non-LTE 辐射传输计算,式(3-6)中的源函数不再使用简单的普朗克函数表示,吸收系数的计算也需要对分子光谱数据库的数据,如 HITRAN (High Resolution Transmission) 数据库^[14]中的线强度做 non-LTE 订正。图 3 简要地展示出 non-LTE 模式和 LTE 模式计算流程的差异。Non-LTE 模式需要先根据影响分子能级分布的动力学-化学机制建立的方程组解出能级分布,再计算路径上的吸收系数和源函数,才能进入辐射传输积分计算。在红外波段,分子吸收系数、源函数与能级数密度分布的严格关系式为^[15]:

$$k_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} \frac{n_1}{\rho} B_{12} q_{r,a} \left[1 - \frac{n_2}{n_1} \frac{g_1}{g_2} \exp\left(-\frac{h(\nu - \nu_0)}{kT}\right) \right] \quad (7)$$

$$J_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left[\frac{n_1}{n_2} \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{h(\nu - \nu_0)}{kT}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (8)$$

n_1 为分子下振动能级数密度, n_2 为分子上振动能级数密度, g_1 和 g_2 分别为它们的能级简并度, B_{12} 是分子由下振动能级跃迁到上振动能级的总爱因斯坦吸收系数, $q_{r,a}$ 是考虑转动能级分布和谱线展宽的归一化函数; h 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数, c 为真空中光速, ν 为频率, T 是分子所在位置的动力学温度, ρ 是分子总数密度。

对于红外波段临边背景辐亮度的模拟,同等的大气条件采用 non-LTE 模式和 LTE 模式计算的结果可以相差几个数量级。文献[16]详细地展示了高层大气主要红外辐射带临边辐亮度的 non-LTE/LTE 模拟对比差异。因此在临边对比度的仿真分析中, non-LTE 是必须考虑的因素,否则可能给出错误的结果。

2 模拟示例与分析

2.1 模拟说明

采用一维大气作为大气的平均状态,模拟包含目标的临边视线与同切点高度上的临边大气背景间的辐亮度的对比度。为方便分析高层大气辐射性质对目标可探测性的影响,假定目标是充满探测器单个像元视场的面目标,对于不充满视场的点目标的情况将在以后讨论。使用战略高高度辐亮度代码 SHARC (Strategic High-Altitude Radiance Code) 中的非局域热平衡模式模拟路径上的大气背景辐亮度和透过率^[6,13]。利用 SAG (SHARC/SAMM Atmosphere Generator) 生成的典型中纬度夏季白天高层大气温度、成分浓度廓线和太阳天顶角作为模拟的输入参数^[17]。

在简化数值模拟的前提下,本文参考了高层大气临边背景辐射测量载荷 MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) 的实测噪声等效辐亮度谱^[18],分段设定噪声等效辐亮度谱 Δ_ν : 小于 1 000 cm^{-1} 时选取 120 K 的黑体谱作为噪声谱, 1 000

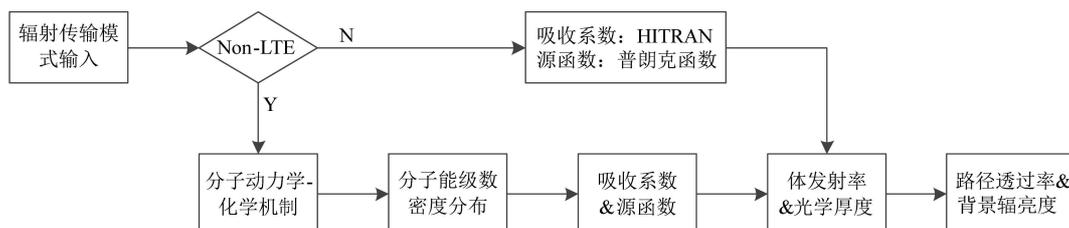


图 3 辐射传输模式计算流程图

Fig. 3 The calculation flow chart of the radiative transfer model

$\sim 2\,000\text{ cm}^{-1}$ 间选取 150 K 的黑体谱,大于 $2\,000\text{ cm}^{-1}$ 时选取 200 K 的黑体谱,宽波段的噪声 Δ 假定是 Δ_v 对波段的积分.在实际应用中,可以输入具体探测器的实测噪声谱进行更符合真实情况的模拟.

2.2 模拟结果

2.2.1 对比度谱的分析

假设目标本征辐射为黑体辐射,并假定目标处于临边视线的切点高度上,即图 2 中的 B 位置,计算了 $500 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ ($2.5 \sim 20\ \mu\text{m}$) 范围内分辨率为 1 cm^{-1} 的对比度.图 4 和 5 展示了切点高度分别为 30 km 和 50 km 时的视在目标、背景和噪声辐亮度谱以及考虑探测器噪声的目标背景对比度谱.图 4(a) 给出切点高度为 30 km 的临边背景辐亮度谱 I_{Bv} (background spectrum),具有 300 K 黑体辐射的目标透过临边大气的辐亮度谱 I_{Tv} (target spectrum),以及噪声谱 (noise);图 4(b) 给出对应的对比度谱.

从图中直观地看出,由于大气红外背景辐射的杂乱谱分布特点,在每个波数上计算的对比度也随波数剧烈变化.考虑噪声后,很多处于噪声以下的弱谱带的对比度实际近似等于目标辐亮度与噪声等效辐亮度的比值,在这些谱带上不考虑噪声的理想对比度可以比实际值高出几个数量级,这充分说明了在弱背景情况下,探测器噪声是决定对比度的不可忽略因素.而对比度明显降低的情况则主要出现在目标辐射与背景辐射接近的强吸收带,如 CO_2 $15\ \mu\text{m}$ 、 $4.3\ \mu\text{m}$ 带和 O_3 $9.6\ \mu\text{m}$ 带.

图 5 给出了临边视线切点高度为 50 km,其他模拟条件不变的情况下的结果.可以看到,临边透过率更高而背景辐射更弱,更多的波段被淹没在噪声以下.因此对比度整体比 30 km 时更高,同样的目标在更高的高度上临边可视性更好.

从图 4、5 也可以看出,由于 30 km 以上的高层大气缺乏水汽,众多水汽吸收带,如 $6.3\ \mu\text{m}$ 带,对比度并不比其他波段有明显降低,这与包含水汽强烈吸收的低层大气有明显的差异;反而是传统的 $3 \sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12\ \mu\text{m}$ “大气窗区”由于 CO_2 和 O_3 的长程路径吸收作用存在对比度显著降低的谱带.

2.2.2 “大气窗区”的分析

传统的红外系统通常采用中波 $3 \sim 5\ \mu\text{m}$ ($2\,000 \sim 3\,333\text{ cm}^{-1}$) 和长波 $8 \sim 12\ \mu\text{m}$ ($833 \sim 1\,250\text{ cm}^{-1}$) “大气窗区”波段,本文分别计算了这两个“大气窗区”宽通道的对比度.宽波段探测器光谱响应往往随波长有显著的变化,本文在模拟计算时采用实际测量的探测器相对光谱响应分布,使临边对比度模

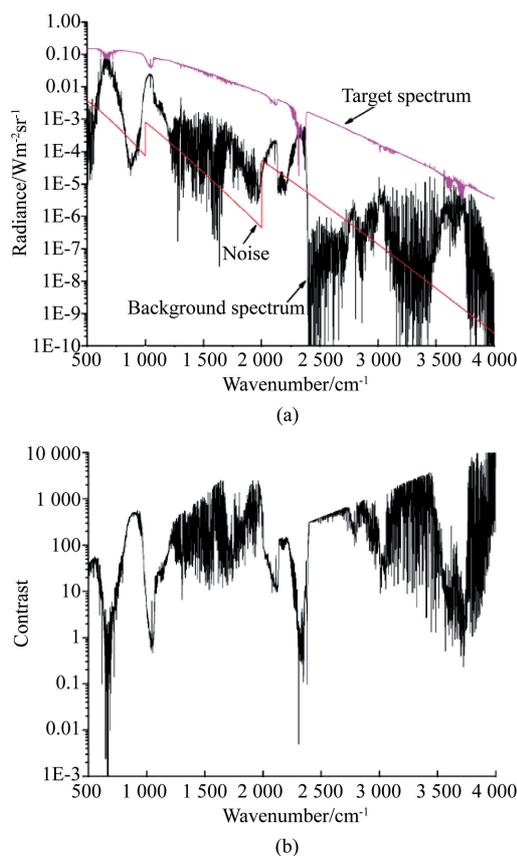


图 4 切点高度在 30 km 的临边视线背景与切点处目标的辐亮度谱和对比度谱

Fig. 4 Radiance spectra of limb background and target at the tangent point and their contrast when the tangent altitude is 30 km

拟更接近实际.图 6 是实际采用的中波和长波宽带探测器的相对光谱响应分布,探测器在可响应波段范围外直接截止,对于截止的波段认为响应值为 0.而通道噪声则假定为上述选取的噪声谱经过通道过滤后在对应波段的积分值.

如第二部分所述,目标刚好处于探测视线 (LOS, Light Of Sight) 的切点位置是十分特殊的情况.对于处在一定高度的目标,存在长路径和短路径两种目标-探测器几何位置关系.图 7 展示出 $3 \sim 5\ \mu\text{m}$ 通道,目标高度设定在 100 km 处时对比度随视线切点高度变化的廓线.7(a) ~ 7(c) 给出目标本征辐射为 100 K、200 K、300 K 的黑体辐射的情况,分别说明弱目标、中等目标和强目标的对比度特征,每种情况都计算了长、短路径两种位置关系对应的对比度值.

所称弱目标为本征辐亮度远低于大气背景辐亮度的目标,比如在此设定为 100 K 黑体辐射的目标,此时探测器接收到的辐亮度 I_T 由目标-探测器间的

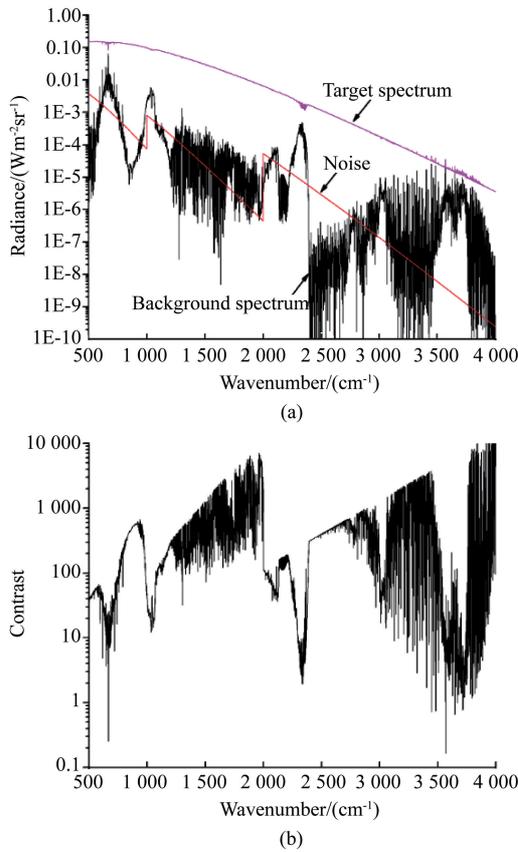


图 5 切点高度在 50 km 的临边视线背景与切点处目标的辐亮度谱和对比度谱
 Fig. 5 Radiance spectra of limb background and target at the tangent point and their contrast when the tangent altitude is 50 km

大气辐射主导. 由于 3 ~ 5 μm 波段包含 CO₂ 4.3 μm 强吸收带, 长路径时 I_T 与 I_B 相近, 对比度接近于零; 短路径时目标遮挡绝大多数大气辐射, I_T 远小于 I_B , 对比度在 1 附近, 但因为噪声的存在而小于 1; 两种路径的对比度随视线切点的升高逐渐靠拢, 在切点高度 100 km 处重合, 如 7(a) 所示. 而所称的强目标为本征辐亮度远高于大气背景辐亮度的目标, 比如在此设定为 300 K 黑体辐射的目标. 此时目标本征辐射占据主导地位, 长短路径的对比度只在较低切点高度上由于路径透过率的差异产生明显不同, 随高度的增加, 背景辐射减弱, 对比度迅速增加, 如 7(c) 所示.

对于中等目标, 目标本征辐射可与大气背景辐射相比拟, 而使得目标辐射 I_T 可以与特定切点高度的大气背景辐射 I_B 相等, 并弱于更低切点高度的背景辐射, 强于更高切点高度的背景辐射, 比如在此设定为 200 K 黑体辐射的目标. 如 7(b) 所示, 短路径 I_T 在切点高度增加的过程中, 从小于 I_B 逐渐增大到

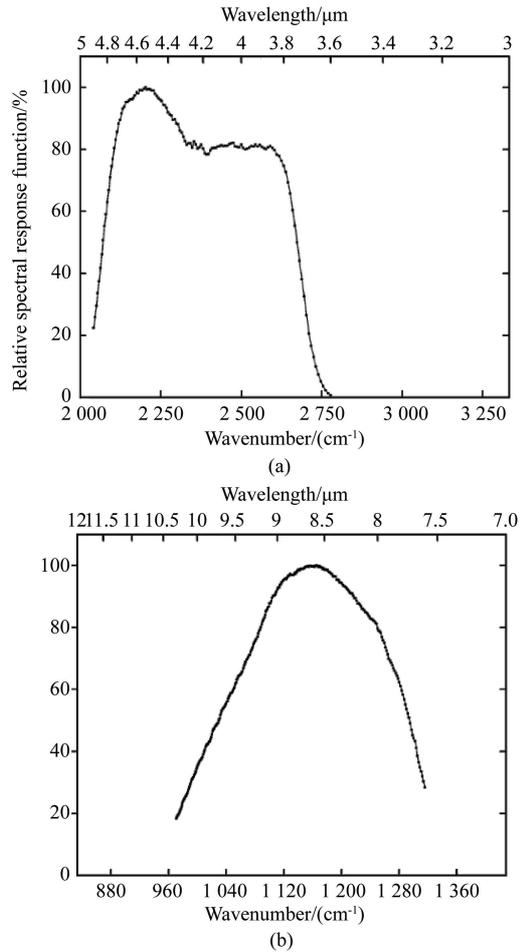


图 6 中波和长波红外探测器的相对光谱响应分布
 Fig. 6 The relative spectral response for mid-wave-band and long-waveband detectors

等于 I_B , 再到大于 I_B , 因此对比度随高度增加先减小 (暗目标增亮), 到特定高度层接近零 (目标与背景融合), 然后再增加 (目标突出于背景).

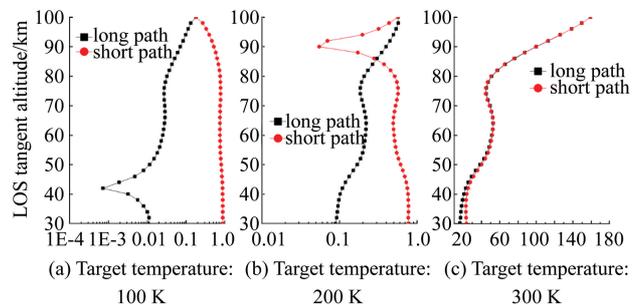


图 7 目标高度在 100 km 处的 3 ~ 5 μm 通道的对比度
 Fig. 7 The contrast of 3 ~ 5 μm band radiance when target altitude is 100 km

图 8 进一步展示出视线切点高度固定在 50 km 的探测器分别观测长路径和短路径的 100 km 高度处的目标, 对比度随目标温度变化的曲线. 可以看

出,弱目标的长短路径对比度分为明显的两层;在 150 ~ 250 K 间的目标符合中等目标特征,由于目标-背景融合,长、短路径分别出现对比度骤降至最低值的现象;随目标温度的增加,对比度迅速增大,长短路径的对比度也接近相等。

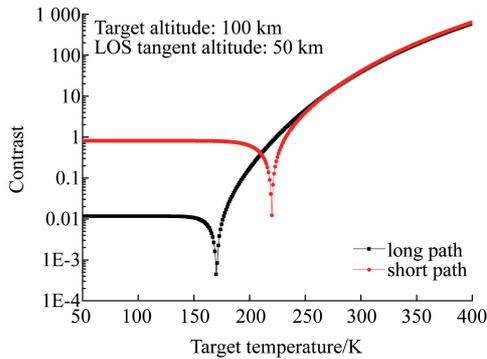


图 8 固定的探测器—目标位置关系时不同温度的目标在 3 ~ 5 μm 通道的对比度
Fig. 8 The contrast of 3 ~ 5 μm band radiance of target with different temperature when probe LOS and target have a firm location relation

对于 8 ~ 12 μm 通道,采用与 3 ~ 5 μm 通道相同的模拟条件. 图 9 (a) ~ (d) 分别给出目标温度 50 K、100 K、200 K、300 K 四种情况的目标背景对比度廓线. O_3 9.6 μm 带的吸收和发射辐射主导了 8 ~ 12 μm 波段的辐射特性,由于 O_3 密度在平流层以上随高度快速减小,随切点高度的增加,60 km 以上的临边背景辐射开始低于模拟所假定的噪声. 噪声显著地影响了设定为 50 K 黑体辐射的弱目标和设定为 100 K 黑体辐射的中等目标在 60 km 以上的对比度,使它们的长短路径对比度都远小于 1,如 9 (a) 和 9 (b) 所示. 同时设定为 200 K 以上黑体辐射的强目标也会由于背景辐射远低于噪声而使得对比度逐渐趋于恒值,如 9 (c) (d) 所示.

图 10 同样给出 8 ~ 12 μm 波段目标温度-对比度变化关系,与 3 ~ 5 μm 波段的情况相比,长短路径的转折点温度都更低. 实际上,越弱的背景辐射对应着越低的转折点温度,超过转折点温度后,目标背景对比度迅速增大.

在以上模拟中,参照 MIPAS 设定了较大的噪声等效辐亮度值,从模拟结果可以看出,目标辐射和背景辐射都出现远低于噪声的情况. 若要探测更低的背景辐射和目标辐射,就需要更低的探测器噪声,典型的代表是采用极低温制冷剂进行降噪的 CIRRI-1A (Cryogenic InfraRed Radiance Instrumentation for Shuttle-1A) 和 SPIRIT III (cryogenic SPatial InfraRed

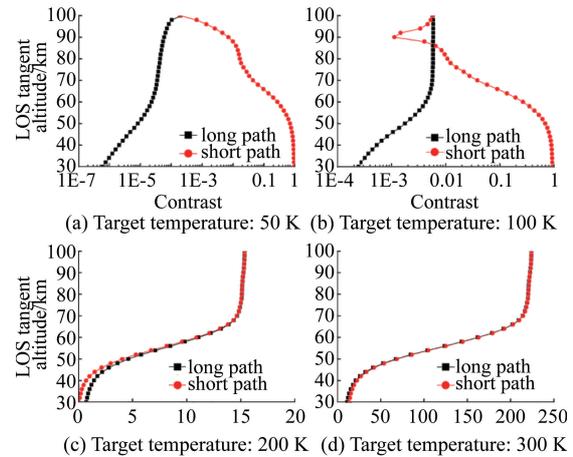


图 9 目标高度在 100 km 处的 8 ~ 12 μm 通道的对比度
Fig. 9 The contrast of 8 ~ 12 μm band radiance when target altitude is 100 km

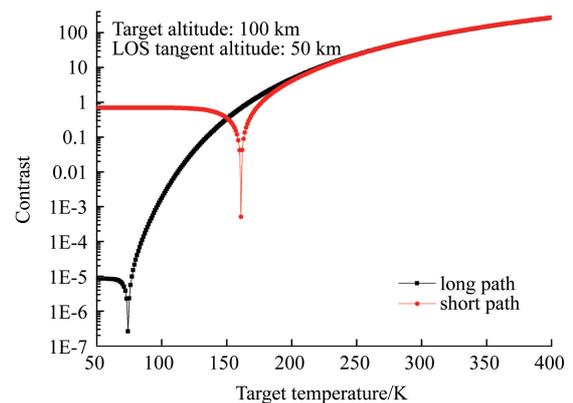


图 10 固定的探测器-目标位置关系时不同温度的黑体目标在 8 ~ 12 μm 通道的对比度
Fig. 10 The contrast of 8 ~ 12 μm band radiance of black-body target with different temperature when probe LOS and target have a firm location relation

Imaging Telescope III), 它们可以探测 150 km 以上的大气临边背景辐射,甚至是星际背景辐射,缺点就是受到冷却剂挥发的影响使其有效在轨寿命远低于机械制冷式探测器^[5,19].

2.3 讨论

模拟了不同情况下的对比度,模拟误差主要由输入参数的不确定度和辐射传输模式算法引起的不确定度决定. 从大气辐射的角度看,本模型主要的不确定源有两个部分,一部分是所采用的 SAG 经验模式生成的高层大气参数^[17],它决定着精细的临边背景辐射结构能否被模拟呈现,这是更进一步探究低对比度目标可识别性的基础;另一部分是 SHARC 辐射传输模式,它的快速吸收算法会引起大气背景辐亮度计算约 $\pm 10\%$ 的误差^[6].

综合起来,在给定输入参数的情况下,临边对比度的模拟计算误差在 $\pm 10\%$ 左右。

3 总结

详细描述了基于非局域热平衡模式的临近空间目标背景临边辐亮度对比模型,并根据一维大气模型和理想目标的假设以及设定的噪声等效辐亮度谱,分析了高层大气辐射特性对对比度的影响。分析展示出弱谱带的对比度模拟中探测器噪声的重要性,尤其是目标辐射与背景辐射都远低于噪声时,即使目标-背景间的理想对比度很高,探测器视在的对比度依然远小于 1,因此忽略噪声很可能会获得错误的探测可行性预测结果。另外,在临边探测高层大气中的目标时,水汽吸收波段相比于传统的“大气窗区”可能更有优势。对 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 宽波段的分析表明了长短路径对对比度变化的影响,弱、中等、强目标也显示出明显不同的对比度变化特征,并非目标辐射越弱探测可行性越差。长路径的弱目标对比度极低,难以探测;短路径的弱目标却由于遮挡大气背景,在视场中形成暗区域,反而更易被发现。强目标明显强于周围背景,在视场中形成亮区域,容易被探测。而中等目标由于可以与大气背景相比拟,随高度呈现复杂的变化特征,需要结合具体条件确定其可探测性。

基于本文的分析,以 SHARC 中的非局域热平衡模式和 SAG 大气经验参数模式为核心模块,可以输入目标本征辐射参数,并匹配典型探测器视场参数的二维大气辐射图像模拟生成器正在发展中。它不仅可以更直接地应用于探测端检测算法的模拟检验,给空间目标探测直观的指导,而且可以进一步讨论基于高层大气辐射传输模式的图像修正和目标还原的可能性。

References

- [1] Picard R H, Dewan E M, Winick J R, et al. Optical/Infrared Signatures for Space-Based Remote Sensing [R]. Air Force Research Lab Hanscom Afb Ma Space Vehicles Directorate, 2007.
- [2] Price S D. History of Space-Based Infrared Astronomy and the Air Force Infrared Celestial Backgrounds Program [R]. Air Force Research Lab Hanscom Afb Ma Space Vehicles Directorate, 2008.
- [3] Stair Jr A T, Ulwick J C, Baker K D, et al. Rocketborne observations of atmospheric infrared emissions in the auroral region [M]. Atmospheres of Earth and the Planets. Springer Netherlands, 1975: 335 - 346.
- [4] Stair A T, Sharma R D, Nadile R M, et al. Observations of limb radiance with cryogenic spectral infrared rocket experiment [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, **90** (A10): 9763 - 9775.
- [5] Paxton L J, Meng C I, Anderson D E, et al. MSX-A multi-use space experiment [J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1996, **17**(1):19.
- [6] Sundberg R L, Duff J W, Gruninger J H, et al. SHARC, a Model for Calculating Atmospheric Infrared Radiation Under Non - Equilibrium Conditions [J]. *The upper mesosphere and lower thermosphere: A review of experiment and theory*, 1995: 287 - 295.
- [7] Dothe H, Duff J W, Gruninger J H, et al. Auroral radiance modeling with SAMM2 [C]//SPIE Europe Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2009: 747509 - 747509 - 7.
- [8] He X, Xu X. Contrast analysis of space-based Earth observation infrared system [C]//SPIE Security + Defence. International Society for Optics and Photonics, 2014: 92490F - 92490F - 11.
- [9] WANG Yi, FAN Wei, RAO Rui-zhong. The analysis of the target-background contrast under a typical atmospheric condition [J]. *Laser&Infrared*, (王毅, 范伟, 饶瑞中. 典型大气条件下的目标-背景对比度的计算分析. *激光与红外*) 2004, **34**(5):375 - 378.
- [10] YE Qing, SUN Xiao-quan, SHAO Li. Analysis of optimum detective wavebands for infrared early-warning satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, (叶庆, 孙晓泉, 邵立. 红外预警卫星最佳探测波段分析. *红外与激光工程*) 2010, **39**(3):389 - 393.
- [11] Horvath H. Atmospheric visibility [J]. *Atmospheric Environment*, 1981, **15**(10-11): 1785 - 1796.
- [12] Stair A T. MSX design parameters driven by targets and backgrounds [J]. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 1996, **17**(1):11.
- [13] Gruninger J H, Sundberg R L, Acharya P K, et al. User's Manual For SHARC-4 The Strategic High-Altitude Radiance Code [R]. Phillips Lab Hanscom Afb Ma, 1997.
- [14] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, **130**: 4 - 50.
- [15] López-Puertas M, Taylor F W. *Non-LTE radiative transfer in the atmosphere* [M]. World Scientific, 2001.
- [16] TAN Peng-fei, HAN Yu-ge, XUAN Yi-min. Analysis of the Non-Local Thermodynamic Equilibrium Effect on Infrared Limb Radiances in the Upper Atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, (谭鹏飞, 韩玉阁, 宣益民. 高层非局地热力平衡大气对红外临边辐射的影响分析. *光学学报*) 2014, **34**(10):1 - 7.
- [17] Shroll R M, Adler-Golden S, Duff J W, et al. User's Manual for SAG-2 SHARC/SAMM Atmosphere Generator [R]. Spectral Sciences Inc Burlington Ma, 2003.
- [18] Fischer H, Birk M, Blom C, et al. MIPAS: an instrument for atmospheric and climate research [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(8):2151 - 2188.
- [19] Bartschi B Y, Steed A J, Blakeley J G, et al. Cryogenic infrared radiance instrumentation for shuttle (CIRRIS-1A) instrumentation and flight performance [C]//San Diego 92. International Society for Optics and Photonics, 1993: 64 - 74.