

基于临近空间探测的 TBM 红外辐射特性研究

孙 鹏¹, 杨建军¹, 赵保军², 王鹏虎³, 李志龙⁴

(1. 空军工程大学科研部, 陕西西安, 710051; 2. 空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051;
3. 93704 部队, 北京, 101100; 4. 94746 部队, 江西南昌, 330000)

摘要 为了解决中段反导作战对 TBM 的远距离探测识别问题, 提出了基于临近空间平台协同雷达对目标进行远距离探测的作战思想。对临近空间大气的特点以及临近空间大气对红外辐射传输的衰减作用进行了定性分析, 在综合考虑临近空间平台部署高度, 地球曲率以及大气红外辐射传输特性的基础上, 构建了临近空间大气透过率计算模型, 在此基础上, 建立了基于临近空间探测的 TBM 红外辐射特性模型, 最后, 利用 MATLAB 对所建立的大气透过率模型及红外辐射特性模型进行了计算仿真。仿真结果验证了临近空间大气透过率计算模型的有效性, 同时表明: 基于特定高度的临近空间平台对 TBM 具有很强的远程红外探测能力。

关键词 临近空间; 大气透过率; 红外特性

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.01.008

中图分类号 TN23 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)01-0035-05

Study of IR Characteristics of TBM Based on Near Space Detection

SUN Peng¹, YANG Jian-jun¹, ZHAO Bao-jun², WANG Peng-hu³, LI Zhi-long⁴

(1. Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
3. Unit 93704, Beijing 101100, China; 4. Unit 94746, Nanchang 330000, China)

Abstract: In order to solve the problem of long range detection and discrimination of the anti-tactical ballistic missile (TBM), this paper proposes an operational concept that the targets will be detected based on the coordination the near space platform with radar. The Characteristics of the near space and the attenuation of IR transmission by space atmosphere are analyzed qualitatively. Taking the platform altitude, telluric curvature, atmosphere IR transmission characteristic and so on into account, the near space atmospheric transmittance model of IR transfer is set up. On the basis of above, the IR model of Midcourse TBM Based on Near Space Detection is designed. Finally, the model is simulated mathematically with MATLAB. The simulation results verify the effectiveness of near space atmospheric transmittance model and simultaneously indicate that the IR detecting ability of the TBM is very strong for the near space platform in given altitude.

Key words: near space; atmospheric transmittance; IR characteristics

临近空间平台依靠其独特的部署位置, 具有卫星和雷达无法比拟的优点, 决定了其在反导探测、目

收稿日期: 2012-02-15

作者简介: 孙 鹏(1984—), 男, 陕西商洛人, 讲师, 博士, 主要从事武器装备发展论证研究。

E-mail: sunpeng9078@163.com

标识方面具有重要的军事应用价值^[1-2]。在临近空间平台安装红外传感器,利用红外凝视成像技术向上对中段飞行的弹道目标进行探测,避开了大气红外辐射信号的主要吸收层,大气光学衰减和气象影响大大降低,红外传感器的作用距离大大提高^[3],因此可以作为弹道目标的补充探测手段,协同地基雷达完成对中段弹道目标的有效识别。本文正是基于这一背景对临近空间大气的红外辐射传输特性和中段目标的辐射特性展开研究。

1 临近空间大气对红外辐射的传输衰减

红外辐射的传输衰减主要是因为大气分子的吸收、散射,以及云、雾、雨、雪等微粒的散射作用造成的^[4-5]。临近空间大气独特的环境特点造成红外辐射在临近空间的传输衰减作用同在低层稠密大气层(地表和航空领域)的传输衰减差异较大。

1.1 临近空间大气的吸收作用

通常在大气中,水表现为气体状态时就是水蒸气。水蒸气在低层大气中含量较高,是对红外辐射传输影响较大的一种大气组分。水的固态和液态对红外辐射的传输主要有散射作用,而气态的水蒸气,它的分子对红外辐射有强烈的选择性吸收作用。从水蒸气的分布区域来看,几乎所有的水蒸气都分布在对流层以下,因此,水的吸收对红外辐射在临近空间的传输衰减作用近似可以忽略。

二氧化碳是大气中的固定组分,一直到 50 km 左右的高度,二氧化碳的浓度基本保持不变,二氧化碳是 3 种最重要的红外吸收分子中唯一一种在大气中近似均匀混合的气体。和水蒸汽比较,二氧化碳含量随高度的减少要比水蒸气慢得多,随着高度的增加,二氧化碳对红外辐射的吸收虽然减少,但不如水蒸气吸收减少那么显著。因此,在对流层以下的低层大气中,水蒸气的吸收作用对红外辐射的衰减起主要作用,而在 50 km 以下的临近空间大气,水蒸气的吸收可以忽略,二氧化碳的吸收作用却相对明显。

大气吸收太阳光中紫外辐射,既能成为臭氧的形成条件,又能成为臭氧的破坏条件。氧气对于波长小于 $0.20\ \mu\text{m}$ 的辐射具有强烈的吸收能力,同时还能吸收 $0.24\ \mu\text{m}$ 附近的辐射。臭氧一方面在形成,另一方面又在分解。臭氧含量大致从 5~10 km 高度起随高度的分布慢慢增加,以后增加较快,在 10~30 km 处含量达到最大值。再往上,浓度又重新减少,到 40~50 km 时。由此可见,臭氧分布区域的不同导致不同高度的临近空间大气,红外辐射

传输衰减差异较大。50 km 高度以上的临近空间大气,臭氧的吸收衰减近似可以忽略。

1.2 临近空间大气的散射作用

除因分子的选择性吸收导致红外辐射能量传输衰减外,大气中遇到气体分子密度的起伏及微小微粒,也能使红外辐射的传输改变方向,从而造成红外传输方向上的能量衰减,这就是散射。

由于大气中气溶胶的分布随高度呈指数递减,在近地面大气中气溶胶的浓度约为 $10^2 \sim 10^3$ 个/ m^3 ,到对流层上部,气溶胶浓度已减少至约 0.01 个,云雨等剧烈的气象变化也均发生在大气对流层以下,因此散射作用对红外辐射在临近空间大气的传输衰减也可以近似忽略^[6]。

综上所述,如果将红外传感器部署在高度为 20~50 km 之间的临近空间平台探测目标的红外辐射信号,需要考虑二氧化碳和臭氧对红外辐射传输的吸收衰减作用,水蒸气的吸收作用以及大气的散射作用可以忽略不计。如果将红外传感器部署在高度为 50 km 以上的临近空间平台对目标进行探测,则二氧化碳、水蒸气、臭氧的吸收作用以及大气的散射作用可以全部忽略不计。

2 临近空间大气透过率的计算

为了定量分析临近空间大气对目标红外辐射传输的衰减效果,需要计算临近空间大气的透过率。本文采用分段法计算斜程传输的大气透过率^[7]。

假设临近空间红外探测平台部署在距离地面 20~50 km 的大气平流层。图 1 为临近空间平台和 TBM 之间的红外辐射传输路径示意图。

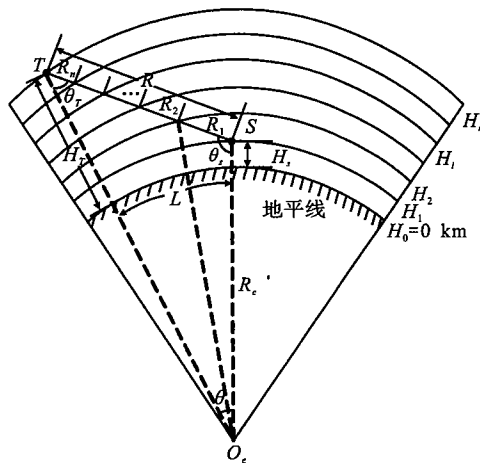


图 1 单斜程传输路径示意图

Fig. 1 Sketch map of single inclined rule

受地球曲率的影响,临近空间平台与目标之间的斜程传输有 2 种情形:一是当 2 点中的 1 点为 2 点间线段与地球球心的最近距离点时,此斜程传输

为单斜程传输模式,如图 1 中 TS 所示;二是当 2 点连线段与地球球心的最近距离处于此线段上时,此斜程传输为双斜程传输模式。为简化分析,可将双斜程模式下红外辐射的传输路径划分为 2 段单斜程,先对各段单斜程的大气透过率进行计算,然后将 2 段单斜程传输的大气透过率相乘,即可得到双斜程传输模式下的大气透过率。

图 1 中: T 代表中段飞行的 TBM 目标, S 代表临近空间红外成像探测系统, O_e 为地球球心, H_T 、 H_S 分别为目标和临近空间平台的高度, R_e 为地球半径; θ_T 、 θ_S 和 θ 分别为 TSO_e 各顶点对应的夹角,其值可根据余弦定理计算; R 为 TS 连线的距离; L 为 TS 连线对应的地面投影距离。本文假设同层大气的气象条件完全相同;所有层处于热平衡状态。将 TS 连线的高程等分为 n 等分, H_1, H_2, \dots, H_n 分别为各等分的中点高度, h_1, h_2, \dots, h_m 分别为 TS 连线上各节点的高度, R_1, R_2, \dots, R_n 分别为与高度层对应的子斜程长度。则有:

$$H_i = H_T - H_S/n(i-0.5) + H_S, i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$h_i = H_S + H_T - H_S/ni, i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$R_1 = (R_e + H_S) \cos \theta_S + \sqrt{(R_e + h_1)^2 - (R_e + H_S)^2 \sin^2 \theta_S} \quad (3)$$

$$R_i = \sqrt{(R_e + h_i)^2 - (R_e + H_S)^2 \sin^2 \theta_S} - \sqrt{(R_e + h_{i-1})^2 - (R_e + H_S)^2 \sin^2 \theta_S} \quad (4)$$

令 μ_0 为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段地平面大气衰减系数, k_{H_2O} 为该波段每千米水蒸汽的吸收系数, k_{CO_2} 为该波段每千米二氧化碳的吸收系数, k_{O_3} 为该波段每千米臭氧的吸收系数, σ 为该波段每千米大气的散射系数,其值可查表获得,则:

$$\mu_0 = k_{H_2O} + k_{CO_2} + k_{O_3} + \sigma \quad (5)$$

H_i 高度层的大气压强为:

$$P_i = P_0 e^{-\frac{H_i}{l}} = P_0 e^{-\left(\frac{H_i}{l}\right)} \quad (6)$$

式中: P_0 为地平面大气压强; l 为标高,标高与绝对温度成正比,与大气中平均分子量和重力加速度成反比,一般取值在 6~8.35 左右。由前面的分析可知,从高度为 20 km 以上的临近空间平台以宇宙空间为背景对目标进行探测时,红外辐射的传输可以忽略水蒸汽的吸收作用和大气散射作用,只需考虑二氧化碳和臭氧的吸收衰减。因此, H_i 高度层的大气衰减系数为:

$$\mu_i = \mu_0 (P_i/P_0)^\beta = (k_{CO_2} + k_{O_3}) (P_i/P_0)^\beta \quad (7)$$

式中 β 为常数,一般取 1.5。于是红外辐射在第 i 层斜程传输的大气透过率为:

$$\tau_i = e^{-\mu_i R_i} \quad (8)$$

则 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段 T 、 S 间的斜程探测大气透过率可以表示为:

$$\tau_{TS} = e^{-\mu_1 R_1} e^{-\mu_2 R_2} \dots e^{-\mu_n R_n} \quad (9)$$

3 基于临近空间探测的中段 TBM 红外辐射特性

TBM 助推段结束后,进入中段飞行的弹头受外热环境的影响,能接收到的辐射主要有以下 6 个部分:太阳直接辐射加热、地表反射太阳辐射加热、地球—大气辐射加热、表面反射红外波段内的太阳直接辐射、表面反射地表反射太阳辐射以及表面反射地球—大气辐射^[8-9]。目标对地球反射的太阳红外波段辐射和其它单元表面红外辐射的反射可被忽略。太阳直接辐射是目标在空间运行时的可见光的主要来源,同时地表对太阳的反射对空间目标建模的影响不可忽略,但地球—大气自身的辐射在可见光波段非常小,可忽略不计。

由于太阳辐射、地球对太阳辐射的反照和地球的热辐射,弹体进入辐射平衡过程即:

$$Q_e + Q_i = Q_r \quad (10)$$

式中: Q_e 为单位时间目标自外部吸收的能量,包括:太阳辐射、地球的反照和地球的热辐射; Q_i 为单位时间目标内部产生的能量; Q_r 为单位时间目标向外辐射的能量;对于中段的 TBM,可假设弹头是 Q_i 的无源球形目标。

那么,目标在光照区(白天)球形目标的热平衡方程为:

$$S \left[aE_1 + \left(1 + \frac{H}{R_e} \right)^{-2} (aE_2 \cos \theta + \epsilon E_3) \right] = 4S\epsilon\sigma T^4 + mc \frac{dT}{dt} \quad (11)$$

式中: S 为球形目标的圆面积(cm^2); E_1 为太阳常数^[4]; E_2 为地球反照常数; E_3 为地球热辐射常数; a 为目标表面材料的太阳光反射率; ϵ 为目标表面材料在温度 T 下的发射率; H 为目标离地面的高度(km); R_e 为地球半径(km); θ 为太阳方向同目标至地心连线的夹角($^\circ$); m 为目标质量; c 为目标表面材料比热; dT/dt 为目标表面温度的时间变化率。

在计算时,由于弹头和诱饵到太阳的距离达到上亿千米,太阳方向同目标至地心连线的夹角 θ 基本保持不变,取 $\theta=0^\circ$ 。即: $\cos \theta=1$;目标离地面的实时高度 H 可通过椭圆弹道给出。弹体的球型质量 $m=4S\rho\sigma$, σ 为球型弹体表面材料的厚度, ρ 为表面材料的密度,这样中段球型弹体在白天的热平衡方程为:

$$aE_1 + (1 + H/R_e)^{-2} (aE_2 + \epsilon E_3) = 4\epsilon\sigma T^4 + 4\rho c dT/dt \quad (12)$$

TBM 在中段总的红外辐射包括本身辐射和反射辐射 2 部分。

3.1 本身辐射

在获得目标温度数值后,由普朗克黑体辐射定律可计算目标本身红外辐射强度,在 $\lambda_1 \sim \lambda_2 \mu\text{m}$ 波段的红外辐射强度 I_s 为:

$$I_s = \frac{\epsilon A}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} d\lambda \quad (13)$$

式中: A 为目标的红外辐射面积(cm^2); λ_1, λ_2 为给定红外波段的下、上限; ϵ 为弹体表面的光谱发射率; C_1 为第一常数; C_2 为第二常数。

3.2 反射辐射

弹体表面的反射部分主要包括来自太阳和太空背景辐射的反射辐射。弹体表面反射辐射 I_f 的计算表达式为:

$$I_f = \rho(q_1 + q_2) \quad (14)$$

式中: ρ 为弹体表面红外波段范围的反射率; q_1 为弹体表面接收的太阳辐射能量; q_2 为弹体表面接收的太空背景辐射能量。

TBM在中段飞行过程中,相对临近空间平台这一观测点总的辐射强度为:

$$I_{sf} = \tau_{TS}(I_s + I_f) \quad (15)$$

4 仿真计算

假设观测点位于临近空间平台,平台飞行高度为30 km,红外传感器的工作波段为 $6 \sim 16 \mu\text{m}$,TBM射程为3 500 km,TBM飞行高度由椭圆弹道实时给出,飞行中存在阳光照射和阴影交替。设定目标的基本参数:弹头底部直径1 000 mm,高度1 500 mm,顶部球壳外径60 mm;壳体采用双层材料,外部为厚度15 mm,导热系数 $0.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的隔热材料,表面吸收率0.17,发射率0.5,密度 $900 \text{ kg}/\text{m}^3$,比热 $1 950 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;内层为厚10 mm的铝合金材料,导热系数 $240 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,密度 $2 500 \text{ kg}/\text{m}^3$,比热 $860 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,内表面吸收率0.4,发射率0.04;内部热源辐射热流为 $200 \text{ W}/\text{m}^2$;弹头进动角为 10° ,进动频率2 Hz,初始温度300 K在 $6 \sim 16 \mu\text{m}$ 波段,考虑临近空间大气传输衰减前后目标的红外辐射强度仿真结果(单斜程传输模式下)见图2。

从上图可以看出,光照状态下,未考虑临近空间大气的传输衰减时TBM弹头最小红外辐射强度为 $24.45 \text{ W}/\text{sr}$,考虑临近空间大气的传输衰减影响后,其红外辐射强度下降为 $20.08 \text{ W}/\text{sr}$,阴影状态下,未考虑临近空间大气的传输衰减时,TBM弹头最小红外辐射强度为 $20.35 \text{ W}/\text{sr}$,考虑临近空间大气的传输衰减影响后,其红外辐射强度下降为 $14.91 \text{ W}/\text{sr}$,无论在光照还是阴影状态下,临近空间大气对TBM红外辐射的传输均有一定的衰减作用。为对比分析临近空间大气和低层稠密大气在红

外辐射传输性能上的差异,假设将另一部相同性能参数的红外传感器安装在飞行高度为9 km高的空中预警机上,则考虑低层稠密大气传输衰减前后目标的红外辐射强度仿真结果(单斜程传输模式下)见图3。

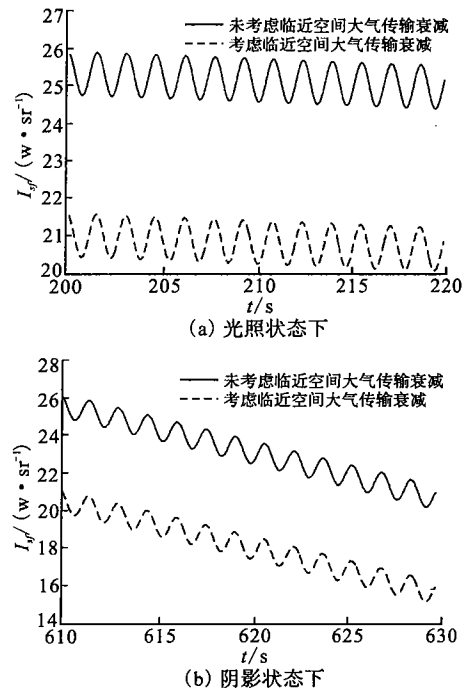


图2 考虑临近空间大气传输衰减前后目标的红外辐射强度

Fig. 2 IR intensity of TBM considering near space atmospheric attenuation

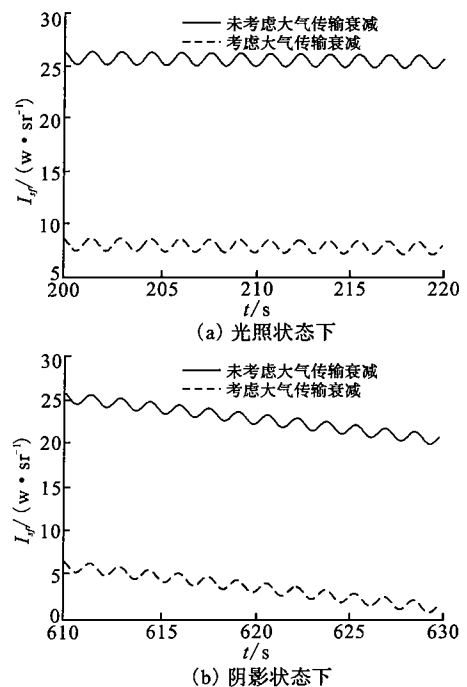


图3 考虑低层稠密大气传输衰减前后目标的红外辐射强度

Fig. 3 IR intensity of TBM considering lower dense atmospheric attenuation

由图 3 可知:光照状态下,考虑低层稠密大气的单斜程传输衰减影响后 TBM 弹头最大红外辐射强度下降为 8.56 W/sr,阴影状态下,考虑低层稠密大气的单斜程传输衰减影响后 TBM 弹头最大红外辐射强度下降为 7.09 W/sr。低层稠密大气对 TBM 红外辐射的传输衰减较大。对比图 2 还可以看出,临近空间大气对目标红外辐射传输有一定的衰减,但相对低层稠密大气领域,其衰减作用已经大大降低。

5 结语

利用临近空间平台的高度优势,对中段飞行的 TBM 进行红外探测,大气衰减和气象影响大大降低,可以获得近似太空的大气透过率。本文通过仿真研究了基于临近空间探测的中段 TBM 红外辐射特性,为后续进行临近空间反 TBM 作战应用研究提供了理论参考。

参考文献(References):

- [1] 田晓飞,马丽华. 临近空间平台的光电对抗研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版. 2011,12(3): 8-10.
TIAN Xiaofei, MA Lihua. Study of photoelectricity resist on near space platform[J]. Journal of air force engineering university; natural science edition, 2011, 12(3):8-10. (in Chinese)
- [2] Vogt W C. Performance capability of a damaged lighter-than-air vehicle operating in the near space regime[D]. Ohio: Air force institute of technology graduate school of engineering and management, 2009.
- [3] Tidrow M Z, Dyer W R. Infrared sensors for ballistic missile defense[J]. Infrared physics & technology, 2001, 42(2): 333-336.
- [4] 张建奇,方小平. 红外物理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004.
ZHANG Jianqi, FANG Xiaoping. Infrared physics [M]. Xi'an: Xidian university press, 2004. (in Chinese)
- [5] 叶玉堂,刘爽. 红外与微光技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2010.
YE Yutang, LIU Shuang. Infrared and low light level technology[M]. Beijing: National defense industry press, 2010. (in Chinese)
- [6] 孙鹏. 临近空间红外探测平台前置反导作战需求研究[D]. 西安:空军工程大学, 2012.
SUN Peng. Research on the operational requirement for head anti-TBM by infrared detection platform in the near-space[D]. Xi'an: Air force engineering university, 2012. (in Chinese)
- [7] 张孝霖. 论红外系统距离方程中大气透过率对距离的影响[J]. 激光与红外, 2006, 36(3): 168-170.
ZHANG Xiaolin. On the atmospheric transmittance in the range equation of IR system and the correct solution of range[J]. Laser and infrared, 2006, 36(3): 168-170. (in Chinese)
- [8] 张骏,杨华,凌永顺. 弹道导弹中段弹头表面温度场分布理论分析[J]. 红外与激光工程, 2005(6): 583-584.
ZHANG Jun, YANG Hua, LING Yongshun. Theoretical analysis temperature field on the surface of ballistic missile warhead in midcourse[J]. Laser and infrared, 2005(6): 583-584. (in Chinese)
- [9] Crow Dennis R, Coker Charles F. Real-time IR scene generation of aircraft targets[J]. SPIE, 1997, 3084: 192-198.

(编辑:田新华)