大气衰减在半实物仿真中的研究与应用

赵西帅^{1,*},赵松庆^{1,2},吴根水^{1,2}

1. 中国空空导弹研究院,河南 洛阳 471009

2. 航空制导武器航空科技重点实验室,河南 洛阳 471009

摘 要: 红外半实物仿真目标特性与实际的接近程度直接影响试验的结果,目标辐射特性的变化不仅与距离有关系,更受 到大气环境的影响。本文基于以 MOS 电阻阵为核心的红外动态场景生成器的工作过程,对大气衰减的计算进行工程化的探讨, 研究了大气吸收与大气散射对目标特性变化的影响,在探讨大气吸收的影响时着重与水蒸气和二氧化碳的影响,通过查表 法来进行计算。在目标模拟中加入大气衰减环节,使目标特性的模拟更贴近于实际。

关键词:红外辐射;半实物仿真;大气衰减;大气透过率

中图分类号: TJ765.4 文献标识码: A DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.09.027

红外半实物仿真^[1]在红外型号的导弹研制中对制导控 制系统的算法起到验证的作用,可以降低武器系统研制成 本、缩短研制周期、提高效费比。目标特性在半实物仿真中 具有关键性的作用^[2],目标特性与实际靶试的符合程度越 高,对产品的仿真验证的结果可信度就越高。导弹导引头探 测到的红外目标特性会受到大气衰减的影响,大气透过率与 探测器、目标所处的环境有关系^[3]。

1 半实物仿真目标红外特性的实现

红外半实物仿真中采用的是基于 MOS 电阻阵的红外 动态场景生成器来对目标完成仿真。根据关于黑体辐射的 普朗克定律,决定黑体红外辐射的唯一因素是黑体本身的温 度。在驱动 MOS 电阻阵的时候通过驱动电压来实现不同 温度的控制。该系统中的输入输出如图 1 所示。



图 1 半实物仿真目标实现流程

Fig.1 Target implementation process in the hardware-in-theloop simulation

理想状态下,电阻阵等效为黑体辐射,因为不反射能 量,其辐射率与对辐射的吸收率均为1。在不同温度下不同 波段的辐射亮度可以用普朗克公式表示:

$$L_{\rm b}(T,\lambda) = 2\pi h c^2 \lambda^{-5} (e^{\frac{ch}{\lambda K_{\rm B} T_{\rm m}}} - 1)^{-1}$$
(1)

式中: $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$ 为普朗克常数; $K_{\text{B}}=1.38 \times 10^{-23}$ (W·s)/K为玻耳兹曼常数; $c=2.998 \times 10^{10} \text{ cm/s}$ 为光速; T_{m} 为热力学温度; λ 为波长。

导弹导引头探测器一般只对某一波段内的辐射敏感, 设其探测辐射波长范围为 λ_{min}~λ_{max},则该范围内的辐射总能 量 *L* 为:

$$L = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L_{\rm b} (T, \lambda) \, \mathrm{d}\lambda \tag{2}$$

图1中原始目标能量L经过大气衰减后得到衰减后的 目标能量L',大气衰减率受到环境的影响。导弹发射时及 飞行过程中与目标始终处于坐标的变换当中,其透射率的计 算应为倾斜路程的透射率计算。红外动态场景生成器是通 过一帧一帧图像来驱动电阻阵实现的,每一帧体现出导弹与 目标所处的位置及目标的辐射亮度变化。

2 大气透过率的计算

红外辐射通过大气所导致的衰减主要是因为大气分子 的吸收、散射以及云、雾、雨、雪等微粒的散射所造成的^[4]。 大气中的某些分子具有与红外光谱区相应的共振频率,因 而能对红外辐射产生吸收,包括水蒸气(H₂O)、二氧化碳 (CO₂)、臭氧(O₃)、一氧化二氮(N₂O)、甲烷(CH₄)等,其中

收稿日期:2018-06-20; 退修日期:2018-07-26; 录用日期:2018-09-02

^{*}通信作者.Tel.:0379-63384405 E-mail:344958762@qq.com

引用格式: Zhao Xishuai, Zhao Songqing, Wu Genshui. Research and application on atmosphere attenuation in the hardware-in-theloop simulation [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (09): 27-31. 赵西帅,赵松庆,吴根水. 大气衰减在半实物仿真中 的研究与应用 [J]. 航空科学技术, 2018, 29 (09): 27-31.

水蒸气和二氧化碳引起最大的吸收量。辐射在大气中传输时,除因分子的选择性吸收导致辐射能衰减外,辐射还会在 大气中受到气体分子密度的影响,微小微粒使辐射能改变方向,从而使传播方向的辐射能减弱,即散射。一般来说,散射 比分子吸收弱,随着波长增加散射衰减所占的地位逐渐减 少,但是在吸收很小的大气窗口波段,散射占据主要地位。

在实际大气中,尤其是在地表附件的几千米中,吸收与 散射同时存在,由大气吸收和散射导致的衰减都遵循比尔-郎伯定律。可知,大气透射率为:

$$\tau (\lambda) = \tau_{a} (\lambda) \tau_{s} (\lambda)$$
(3)

式中: $\tau_{a}(\lambda)$ 、 $\tau_{s}(\lambda)$ 分别为吸收与散射透过率。

2.1 大气吸收

在低空,水蒸气的吸收对红外辐射的衰减起主要作用, 在高空,水蒸气的吸收退居次要地位,二氧化碳的吸收更重 要。实际应用中的辐射线都是斜程传输的,路程上各点的高 度不同,随之压强、温度均不同,谱线的参数也在改变,在用 谱带模型计算时,需要知道谱线的参数,如线强,线宽、线距 等,同时还要知道这些参数随温度、压强的变化关系,这些参 数的获得并不容易,工程中常用的是利用红外和大气观测工 作者编制的大气透过率表格^[5],见表 1 和表 2。

表 1 大气中饱和水蒸气含量 / (g/m³)(节选) Table 1 Content of saturated vapor in the atmosphere/(g/m³) (extract)

温度 t/℃	0	1	2
10	9.33	9.94	10.57
20	17.22	18.14	19.22

表 2 海平面水平路程水蒸气光谱透过率(节选)

Table 2 Vapor spectral transmittance at the sea level water vapor (extract)

波长 λ/μm	可降水量 /mm		
	0.2	2	20
3.4	0.962	0.880	0.633
3.5	0.983	0.946	0.832

对于海平面上一段路程,水蒸气和二氧化碳对波长吸 收导致的平均透射率为 τ_a(λ):

$$\tau_{\rm a}(\lambda) = \tau_{\rm H2O}(\lambda)\tau_{\rm CO2}(\lambda)$$

首先计算水蒸气的透射率 τ_{H20} ,根据给定的气象条件, 如海平面水平路程长为 x,气温 t,相对湿度 RH,气象视程 V(在 0.61 μ m 处)。查表 1 得温度 t 的饱和水蒸气密度为 ρ_s , 绝对湿度为:

$$\rho_w = \rho_s RH$$
(5)

所以,全程的可凝结水的毫米数:

 $\omega = \rho_w x = \rho_s RHx \tag{6}$

根据可降水量查表 2 可得各波长对应的透射率 τ_{H2O}(λ)。 再计算二氧化碳的透射率 τ_{CO2}(λ),根据水平路程 x 可直 接查表得 τ_{CO2}(λ),见表 3。

表 3 海平面水平路程二氧化碳光谱透过率(节选) Table 3 Spectral transmittance of carbon dioxide at the sea level water vapor (extract)

波长 λ/µm	路程长度 /km		
	0.2	2	20
3.4	1	1	1
3.5	1	1	1

对于导引头探测波长范围
$$\lambda_{\min} \sim \lambda_{\max}$$
,平均透过率为:
 $\bar{\tau}_{a} = \frac{1}{\Delta \lambda} \left[\tau_{a}(\lambda_{0}) \frac{1}{2} d\lambda + \tau_{a}(\lambda_{1}) d\lambda + \dots + \tau_{a}(\lambda_{m-1}) d\lambda + \tau_{a}(\lambda_{m}) \frac{1}{2} d\lambda \right]$
(7)

式中: 带宽 $\Delta \lambda = \lambda_{max} \sim \lambda_{min}$; 光谱间隔为 d λ ; 分别为 $\lambda_0, \lambda_m, \lambda_{min}, \lambda_{max}$ 。

但是表 1、表 2 只适用于海平面的水平路程,在高空,由 于大气压强随着高度的增加而下降,大气的温度也下降。通 过同样路程时,吸收变小,大气透射率增加。温度对透射率 的影响较小可以忽略不计,只要考虑压强降低对透射率的影 响即可。可以引入修正^[6],在高度为 h 的水平路程上 x 所具 有的透射率等于长度为 x₀ 的等效海平面水平路程透射率:

$$x_0 = x \left(\frac{p}{p_0}\right)^k \tag{8}$$

式中:p为高度h处的大气压强, p_0 为海平面的大气压强,k为常数,对水蒸气是 0.5,对二氧化碳是 1.5。高度修正因子 $(p/p_0)^k$,可查表获得,见表 4。

表 4 高度修正因子 $(p/p_0)^k$ (节选)

Table 4 Factor of the altimetric compensation $(p/p_0)^k$ (extract)

百倍 <i>li</i> lum	高度修正因子 $(p/p_0)^k$		
同皮 加 КШ	水蒸气	二氧化碳	
4.57	0.739	0.404	
7.62	0.609	0.266	

由此可计算海拔高度 h 处的大气透过率。

2.2 大气散射

(4)

散射是由于媒质不均匀所致,散射的强弱与大气中散

射元的大小及辐射波长有密切的关系^[7]。当一束单色辐射 在不均匀媒质中传播 x 后,由于散射作用将使辐射衰减,其 衰减是按指数规律进行的,即:

$$P_{\lambda}(x) = P_{\lambda}(0) \exp[-\mu_{s}(\lambda) \cdot x]$$
(9)

式中: $P_{\lambda}(0)$ 和 $P_{\lambda}(x)$ 分别为散射前和经过距离x散射后的辐射光率, $\mu_{s}(\lambda)$ 为散射系数,可以看出,纯散射决定的介质的透射率^[7]为:

$$\tau_{s}(\lambda, x) = \frac{P_{\lambda}(x)}{P_{\lambda}(0)} = \exp[-\mu_{s}(\lambda) \cdot x]$$
(10)

透射率 $\tau_s(\lambda, x)$ 是波长与距离的函数,如果求出散射系数 $\mu_s(\lambda)$ 就可以求出给定大气路程的散射透射率。

但是想计算散射系数,必须知道大气中悬浮粒子的资料,这些资料不容易获得也不容易测量,工程上通常利用气象视距^[8]来处理散射问题。计算公式为:

$$\mu_{\rm s}(\lambda) = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q \tag{11}$$

$$\tau_{\rm s}(\lambda, x) = \exp\left[-\frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q x\right]$$
(12)

式中:V是气象视程(在实际观测中,如果把一个很亮的目标从 x=0 处移到距观测点 x=V 处时,对于波长为 λ_0 的亮度降到原亮度的 2%,则 V 就是气象视程,一般小于 16km), λ_0 为吸收近似为零的辐射波长, $\lambda_0=0.61\mu m$ 或 0.55 μm 。

2.3 斜程红外辐射的大气透过率计算

倾斜路程的透射率计算复杂,大气压强沿路程连续变 化,故吸收带的形状也连续变化,难以修正。可以进行近似 计算,将路程分成等间距n段,按每段的中点处进行修正,并 假设每段内的辐射水平行进,则整个斜路程的光谱透射率由 每一小段计算值相加得到,如图2所示。

根据导弹与目标的空间坐标可以计算出斜距 D,导弹 海拔 H,第一段分割中点海拔 (H+h/2),根据当时当地气象 条件依据本文以上计算可以求出第一段平均透射率 $\bar{\imath}_1$,同理 可以求出 $\bar{\imath}_1$, $\bar{\imath}_2$, …, $\bar{\imath}_n$,则 $\bar{\imath}=\bar{\imath}_1\bar{\imath}_2$ … $\bar{\imath}_n$ 。



图 2 斜程衰减计算示意图 Fig.2 Schematic diagram of the calculation of the slope attenuation

3 仿真分析

假设 A 地设降雨强度为 0,降雪强度为 0,空气温度为 5℃,相对湿度为 60%,大气能见度为 20km,海拔高度 1km, 水平距离 2km,可以计算出 A 地的红外辐射的大气透过率。 图 3 为该处 3~5μm 波段的大气透过率。



在与图 3相同的条件下根据 MODTRAN 软件可以得 到红外辐射的大气透过率,如图 4 所示。



图 4 利用 MODTRAN 得到的大气透过率 Fig.4 The atmospheric transmittance obtained by MODTRAN

对比可以看出,对于专业大气软件仿真结果而言,本文的快速大气模型精度较低,但是趋势走向相同,并且计算速度快,满足仿真软件的实时性要求,节省计算时间和成本,对于本项工程应用可以很好地满足要求。

根据以上计算得出波长范围 λ_{min}~λ_{max} 的大气平均透过 率,τ 则实际目标辐射能量经大气衰减后 L'=τL。半实物仿 真系统中红外动态景象模拟器^[9] 在加入大气衰减环节后与 实际目标的能量变化可更贴近实际情况。

综上,在半实物仿真中对大气透过率的应用参见如下 步骤:

(1)系统建模:包括水蒸气光谱透过率表和二氧化碳透 过率表和高度修正因子表,以备调用。 (2) 仿真条件的设置:包括导弹、目标飞行高度、飞行速度、起始坐标,以及所处的气象环境、目标的辐射特性。

(3) 按照步骤(1) 的条件设置计算目标辐射特性和飞行弹道,目标辐射特性计算中加入大气衰减,生成 MOS 电阻阵驱动播放文件。

(4) 驱动电阻阵实现红外目标的模拟。

以某车辆实拍的红外图像和加入大气衰减通过建模完成的仿真红外图像进行对比,如图5所示,可见,仿真还比较 逼真。



图 5 某车辆实拍红外图像 (左) 与仿真红外图像 (右) Fig.5 Real-shot infrared image of a vehicle (left) and simulated infrared image (right)

4 结论

通过大气衰减工程模型与专业的仿真软件进行对比, 结果相近,但是应用中速度快,可以满足实时性的需求,进 行建模得到的仿真模型也比较逼真,与实际图像接近,可 用于驱动以 MOS 电阻阵为核心的目标模拟器,但是限于 MOS 电阻阵目标模拟器的硬件分辨率特性,在仿真复杂 目标变化细节方面存在缺陷,在实际应用中产生的目标图 像与实拍图像还有很大差距^[10],需要通过提升硬件功能来 实现。

参考文献

- [1] 高辉,赵松庆,吴根水,等.基于电阻阵列的红外场景生成技术[J]. 航空学报, 2015, 36 (9): 2815-2827.
 Gao Hui, Zhao Songqing, Wu Genshui, et al. Infrared radiation scene generation technology based on resistor array[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36 (9): 2815-2827. (in Chinese)
- [2] 赵西帅,吴根水,赵松庆,等. 红外成像制导半实物仿真目标 图像生成技术 [J]. 测控技术, 2013 (7): 153-156.
 Zhao Xishuai, Wu Genshui, Zhao Songqing, et al. Target image generation technology in the infrared imaging guidence hardware-in-the-loop simulation [J]. Measurement & Control Technology, 2013 (7): 153-156. (in Chinese)

- [3] 黄莉,周方方,祁鸣,等.地面雷达目标红外辐射特性研究[J]. 航空兵器, 2015 (6): 63-69.
 Huang Li, Zhou Fangfang, Qi Ming, et al. Study on infrared radiation characteristics of ground-based radar target[J]. Aero Weaponry, 2015 (6): 63-69. (in Chinese)
- [4] 赵军,张建,杜翠兰.红外辐射大气透过率修正函数 [J].激光 与红外, 2006, 36 (9): 866-867.
 Zhao Jun, Zhang Jian, Du Cuilan. Revisable function of IR radiation atmospheric transmissivity[J]. Laser & Infrared, 2006, 36 (9): 866-867. (in Chinese)
- [5] 吴晗平. 红外辐射大气透过率的工程理论计算方法研究 [J]. 光学精密工程, 1998, 16 (4): 35-43.
 Wu Hanping. Research into theoretical calculation method on engineering of transmittance of infrared radiation through atmosphere[J]. Optics and Precision Engneering, 1998, 16 (4): 35-43. (in Chinese)
- [6] 张建奇,方小平. 红外物理 [M]. 西安: 电子科技大学出版社, 2004.

Zhang Jianqi, Fang Xiaoping. Infrared physics[M]. Xi' an: Journal of University of Electronic Science and Technology, 2004. (in Chinese)

- [7] 毛峡,胡海勇,黄康,等. 飞机红外辐射及大气透过率计算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35 (10): 1228-1231.
 Mao Xia, Hu Haiyong, Huang Kang, et al. Alculation method for airplane IR radiation and atmospheric transmittance[J].
 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35 (10): 1228-1231. (in Chinese)
- [8] 王青,端木京顺,甘旭升,等.考虑气象因素的飞机空战能力 评估模型[J].火力与指挥控制,2013(6):39-43.
 Wang Qing, Duanmu Jingshun, Gan Xusheng, et al. A evaluating model for fight plane air combat capability assessment of considering the weather condition[J]. Fire Control & Command Control, 2013(6):39-43. (in Chinese)
- [9] 赵松庆,吴根水,刘晓宁,等. 256×256 单元 MOS 微电阻阵列 动态场景生成装置 [J]. 航空兵器, 2015 (6): 40-45.
 Zhao Songqing, Wu Genshui, Liu Xiaoning, et al. 256×256 unit element MOS minute resistance array dynamic scene producing device[J]. Aero Weaponry, 2015 (6): 40-45. (in Chinese)
- [10] 唐善军,宋敏敏,王碧云,等.基于 MOS 电阻阵半实物仿真的 红外场景生成技术[J].系统仿真学报,2018(4):1319-1327.

Tang Shanjun, Song Minmin, Wang Biyun, et al. Infrared scene generation technology based on hardware-in-the-loop simulation of MOS resistance arrays[J]. Journal of System Simulation, 2018 (4): 1319–1327. (in Chinese)

作者简介 赵西帅(1985-) 男,硕士,工程师。主要研究方向:红外制 导控制系统半实物仿真。 Tel:0379-63384405 E-mail:344958762@qq.com

Research and Application on Atmosphere Attenuation in the Hardware in the Loop Simulation

Zhao Xishuai^{1,*}, Zhao Songqing^{1,2}, Wu Genshui^{1,2}

1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, Luoyang 471009, China

Abstract: The comparability between the virtual target in the loop simulation system of infrared could influence the result. The change of the target's infrared radiation not only had relationship with distance, it's affected by the atmospheric condition more. This paper discussed the engineering calculation of the atmosphere attenuation and the influence of atmospheric absorbency to the change of the target's infrared radiation according to the work of the MOS-Resistor-Array, also calculated the atmospheric transmittance according to lookup the tabulation especially the vapor and the carbon dioxide. It could make the virtual target close to the reality, when adding the atmospheric attenuation to the simulation of the target.

Key Words: infrared radiation; hardware in the loop simulation; atmospheric attenuation; atmospheric transmittance