

海战场环境下超音速反舰导弹红外辐射特性研究

徐吉辉¹, 孙媛¹, 于飞²

(1. 海军航空工程学院 科研部, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院 指挥系, 山东 烟台 264001)

摘要: 超音速反舰导弹的红外辐射特性研究对海战攻守双方都具有重要的参考价值。对海洋战场环境红外辐射特性进行了深入分析, 引入了累积因子, 在考虑了粒子的多次散射效应的基础上建立了仿真环境的辐射计算模型, 重点对云层的辐射进行了计算, 并通过仿真, 验证了模型的可行性。建立了导弹蒙皮与尾焰的红外辐射特性和辐射面积的计算模型, 对导弹的红外辐射亮度和辐射强度进行了仿真计算。最后对仿真结果进行对比分析, 结果表明该算法能够有效地应用于粒子系统的辐射计算, 可供后期生成红外图像序列使用。

关键词: 红外辐射特性; 超音速反舰导弹; 粒子系统; 累积因子

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1761-06

Infrared radiation characteristics of supersonic anti-ship missiles in sea battlefield environment

Xu Jihui¹, Sun Yuan¹, Yu Fei²

(1. Scientific Research Department of Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China;

2. Conducting Department of Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China)

Abstract: The supersonic anti-ship missile infrared radiation characteristic research has the important reference value to naval battle offense and defense both sides. Provided an in-depth analysis of the infrared radiation characteristics in sea battlefield environment, introduced cumulative factor, the environment radiation computation model was established in view of the multiple scattering effects of particle, Focus on cloud radiation calculations, the model feasibility had been confirmed by simulation. Established the computation model of the IR radiation characteristics and radiating area of missile skin and plume, carried on the simulation computation to the missile infrared radiation brightness and the radiation intensity. Finally, by comparison and analysis of the simulation results, the result indicates that this algorithm can be applied in the radiation calculation of particle system effectively, can be used for generation infrared image sequences.

Key words: infrared radiation characteristics; supersonic anti-ship missiles; particle systems; cumulative factor

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2013-11-25

基金项目: 国防“十二五”预研项目(4010801030301)

作者简介: 徐吉辉(1963-), 男, 副研究员, 主要从事飞行器作战仿真方面的研究工作。Email: wu_jongb@126.com

0 引言

随着各国超音速乃至高超音速反舰导弹武器系统的快速发展,舰船反导拦截系统迫切需要对其进行追踪与防御。而作为近程防御探测设备,红外探测设备需要为拦截系统提供目标指示。由于导弹超音速飞行需要更大的推力,尾部产生的热量也明显大于亚音速导弹,因此对超音速目标的探测和识别与亚音速目标相比区别较大。

舰艇上的舰炮等拦截系统主要是为亚音速导弹设计的,当面对超音速导弹来袭时,反导能力不得而知,所以对超音速和高超音速反舰导弹的红外辐射进行研究迫在眉睫。

文中主要研究海战场环境和导弹的红外辐射特性。根据海洋路径上的大气的辐射,结合粒子系统的辐射特性,计算了天空环境下海洋背景的辐射;改进了超音速反舰导弹尾焰辐射计算模型,建立了导弹蒙皮和尾焰的红外辐射特性模型。

1 战场环境的红外辐射特性

战场环境的辐射主要指的是海洋辐射。

1.1 天空环境下海洋背景的辐射计算

天空环境下海洋背景的辐射为向海洋垂直或斜程的路径上的大气辐射,主要包括云、大气分子、气溶胶本身的红外辐射和对太阳入射辐射的散射辐射,其中云的红外辐射包括云自身的热辐射和云对太阳光等辐射的反射辐射,如图 1 所示。

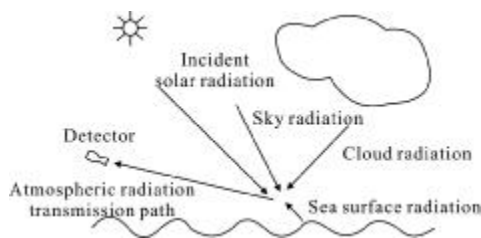


图 1 辐射传输示意图

Fig.1 Sketch map of radiation transmission

白天,海洋红外辐射组合了散射的辐射和大气的热辐射,波长小于 $3\ \mu\text{m}$ 的辐射以散射的太阳光为主,波长大于 $5\ \mu\text{m}$ 时主要为大气热辐射。太阳散射在白天影响较大,主要集中在波长小于 $3\ \mu\text{m}$ 的波段内。天空背景的海洋辐射亮度受海面上风速的变化

影响显著,风速越大,海表面的起伏越大,海面光滑度变小,反射率减小,因而使得海面对太阳入射辐射的散射辐射降低,若风速减小,则以上情况相反。

夜晚,因为散射的太阳光不复存在,此时海洋红外辐射主要是大气的热辐射,当波长大于 $4\ \mu\text{m}$ 波段时,大气的热辐射始终存在。因为海面大气环境中含有丰富的水蒸气,因此在 $6.27\ \mu\text{m}$ 处有较强辐射。

红外探测器所接收的海洋辐射为:

$$L_{\text{sea}} = (L_a + L_{\text{sun}} + L_{\text{cloud}}) \cdot \tau_{\text{path}} + L_{\text{path}}$$

式中: τ_{path} 、 L_{path} 分别为海洋与红外探测器之间的大气透过率和路径辐射; L_a 为海洋自身的热辐射; L_{sun} 为散射的太阳辐射; L_{cloud} 为散射的云辐射。

对于海洋自身的热辐射 L_a ,通常采用灰体近似的方法来计算。海洋的辐射亮度计算公式为: $L_a = \varepsilon_a L_b(T_{\text{sea}})$ 。

其中, ε_a 是海洋的发射率,即把海洋看作是一个灰体。 $L_b(T_{\text{sea}})$ 是与海洋表面温度相同的黑体辐射亮度; T_{sea} 为海洋表面温度, $L_b(T_{\text{sea}})$ 可根据普朗克公式计算。

当探测器和太阳在海洋的同一边时,太阳可以看作一个点源并且辐射计算如下:

$$L_{\text{sun}} = \varepsilon_a \rho_a \frac{E_{\text{sun}}}{\pi} \cos \vartheta$$

式中: E_{sun} 可以由 LOWTRAN 计算而得,其中包含海洋和大气的辐照度; ρ_a 为海洋表面的反射率; ϑ 为太阳辐射传输方向与海洋表面法向的夹角。

云的红外辐射包括直接热辐射、天空辐射的散射。计算海面对云的反射也可由朗伯体公式导出,有:

$$L_{\text{cloud}} = \varepsilon_a \rho_a \frac{E_{\text{cloud}}}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \theta \right)$$

式中: E_{cloud} 为云对海面的辐照度,可根据下式计算:

$$E_{\text{cloud}} = \pi \varepsilon_{\text{cloud}} \tau_{\text{cloud}} L(s, \theta, \varphi)$$

式中: $L(s, \theta, \varphi)$ 为云的多重散射。其中: τ_{cloud} 为云底到海面的辐射传输透过率,可由 LOWTRAN 计算得到; $\varepsilon_{\text{cloud}}$ 是云的发射率。

1.2 云层辐射亮度的计算

对于云的多次散射,利用单次散射加上多次散射的贡献来计算。

为了估计多次散射的贡献,定义一个累积因子 $B(s)$,用来估计来自 z 高度的多次散射辐射对单次散射辐射的比率,考虑在 z 高度从云层顶部和底部透射出去而没有再次散射的光线所占份额 f_e 。

$$f_e = \frac{\int_{4\pi} J_{ss}(z, \varphi') e^{\beta'} d\varphi'}{\int_{4\pi} J_{ss}(z, \varphi') d\varphi'}$$

式中: $J_{ss} = \frac{\omega_0}{4\pi} I_0 P(\theta) e^{\beta}$; I_0 为入射辐射强度。

份额 f_e 逃逸出去而没有进一步的相互作用,则份额 $f_r = 1 - f_e$ 或者被吸收或者被散射。因为 ω_0 给出了散射对消光的比率,份额 $\omega_0 f_r$ 表示经过二次散射而没有被吸收的光线, $\omega_0 f_e$ 表示逃逸出云层的光线。同理,经过次散射后逃逸出云层的光线是 $(\omega_0 f_r)^{n-1} f_e$, 将这些贡献累加,则得到累积因子:

$$B(s) = \sum_{n=1}^{\infty} f_e (\omega_0 f_r)^{n-1} = \frac{f_e}{1 - f_r \omega_0} = \frac{f_e}{1 - (1 - f_e) \omega_0}$$

可以利用累积因子对多次散射光的数量进行估计,使用 Mie 散射的相位函数计算前向积分:

$$g = \frac{1}{2} \int_0^{\pi} p(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta$$

g 为前向散射所占比例,其余 $(1-g)$ 部分为各向同性散射,这样就可以计算云层的辐射。单次散射与多次散射辐射的总和:

$$L(s, \theta, \varphi) = L_{ss}(s, \theta, \varphi) + L_{ms}(s, \theta, \varphi)$$

其中,

$$L_{ss}(s, \theta, \varphi) = \frac{k_{ext} \omega_0}{4\pi} \int_0^s \int_{4\pi} L_{ss}(s', \theta', \varphi') p(\varphi, \varphi') e^{\beta'} d\varphi' e^{\beta} ds'$$

$$L_{ms}(s, \theta, \varphi) = \frac{k_{ext} \omega_0}{4\pi} \int_0^s \int_{4\pi} K L_{ss}(s', \theta', \varphi') e^{\beta'} d\varphi' e^{\beta} ds'$$

上式中, $K = (\frac{B(s)}{f_e} - 1)(1-g)$; $(\frac{B(s)}{f_e} - 1)$ 项中减去的部分用来从多次散射中扣除单次散射, $(1-g)$ 用来将未计算的前向散射辐射部分加入,其中各向同性散射的相位函数值为 1。

1.3 云层发射率的计算

云层的红外发射率计算公式如下^[1]:

$$\varepsilon_{cloud} =$$

$$1 - \exp\left[-\int_{z_{bot}}^{z_{top}} \{ [1 - \varpi_w(z)] k_{ext,w}(z) + [1 - \varpi_i(z)] k_{ext,i}(z) \} dz\right]$$

此处, z_{bot} 是云底的高度, z_{top} 是云顶的高度, ϖ_w 和

ϖ_i 是水滴和冰晶的单次散射反照率, $k_{ext,w}(z)$ 和 $k_{ext,i}(z)$ 是水滴和冰晶的消光系数。

$$k_{ext} = \int_{r_{min}}^{r_{max}} C_{ext}(\chi, m) n(r) dr = \pi \int_{r_{min}}^{r_{max}} Q_{ext} n(r) r^2 dr$$

$$\varpi = \frac{C_{sca}}{C_{ext}} = \frac{Q_{ext} - Q_{sca}}{Q_{ext}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} [(2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2)]}{\sum_{n=1}^{\infty} [(2n+1)(\text{Re}(a_n + b_n))]} \quad (1)$$

式中: Re 为取复数实部, a_n 、 b_n 分别为复函数,计算公式如下:

$$a_n = \frac{\Psi_n'(m\chi) \Psi_n(\chi) - m \Psi_n(m\chi) \Psi_n'(\chi)}{\Psi_n'(m\chi) \xi_n(\chi) - m \Psi_n(m\chi) \xi_n'(\chi)}$$

$$b_n = \frac{m \Psi_n'(m\chi) \Psi_n(\chi) - \Psi_n(m\chi) \Psi_n'(\chi)}{m \Psi_n'(m\chi) \xi_n(\chi) - \Psi_n(m\chi) \xi_n'(\chi)}$$

式中: $\chi = 2\pi r/\lambda$ (r 为粒子半径; λ 为波长) 为尺度参数; $m = n - ik$ 为复折射率(粒子光学常数); 上式符号上带一撇表示对自变量求导数。

$$\xi_n = \Psi_n - i\eta_n$$

Ψ_n 及 η_n 为 Ricatti 贝塞耳函数, 分别与第一类 Bessel 函数 J_n 及 Hankel 函数 H_n 相关, 即:

$$\Psi_n(z) = \left(\frac{\pi z}{2}\right)^{1/2} J_{n+1/2}(z), \eta_n(z) = \left(\frac{\pi z}{2}\right)^{1/2} H_{n+1/2}(z)$$

满足递推关系, 有:

$$\Psi_{n+1} = \frac{2n+1}{z} \Psi_n(z) - \Psi_{n-1}(z), \Psi_{-1} = \text{cos}z, \Psi_0 = \text{sin}z$$

$$\eta_{n+1} = \frac{2n+1}{z} \eta_n(z) - \eta_{n-1}(z), \eta_{-1} = \text{sin}z, \eta_0 = \text{cos}z$$

Mie 散射系数的精确计算是相当繁杂的,但在某些情况下没有必要使用精确的结果,可以采用若干简化的公式,使得计算量大大减少。这里采用 Deirmendjian 近似算法^[2]:

$$Q_{ext} = 2 - 4 \exp(-a \tan b) \left[\frac{\text{cos}b}{a} \sin(a-b) - \left(\frac{\text{cos}b}{a}\right)^2 \cos(a-2b) \right] + 4 \left(\frac{\text{cos}b}{a}\right)^2 \cos(2b) \quad (2)$$

$$Q_{abs} = 1 + \frac{\exp(-4\chi k)}{2\chi k} + \frac{\exp(-4\chi k) - 1}{8\chi^2 k} \quad (3)$$

式中: $a = 2\chi(n-1)$; $b = \arctan\left(\frac{k}{n-1}\right)$ 。

将式公(2)与(3)代入公式(1),即得单次照射反照率的表达式。引入修正因子 C , 令 $Q_x' = (1+C)Q_x$, Q_x 可为 Q_{sca} 或 Q_{ext} 。情况不同, C 的取值也不同^[3]。

2 超音速反舰导弹本体辐射特性

2.1 蒙皮辐射特性

从蒙皮观测到的能量为 $\varepsilon(\lambda) \cdot R_{BB}(\lambda)$ ($\varepsilon(\lambda)$ 为发射率)。不透明表面的有向发射率 $\varepsilon_d(\lambda)$ 可以通过有向反射率 $\rho_d(\lambda)$ 来获得。

$$\text{全辐亮度计算: } L_{\Delta\lambda} = \frac{1}{\pi} \sigma T^4;$$

$$\text{全辐射强度计算: } I = L \Delta A \cos \theta.$$

2.2 尾焰辐射特性

冲压发动机的燃料在热压力下分解, 释放出氢和烯烃。因此, 在尾喷焰流中主要的燃烧产物是 H_2O 、 CO_2 和 C 粒子; H_2O 和 CO_2 是典型的选择性辐射体, 辐射光谱分布呈带状特征, 其红外辐射集中在 $2.4 \sim 3.1 \mu m$ 和 $4.3 \sim 4.5 \mu m$ 两个谱段内。在这两个谱段可将其看做灰体。对于 $8 \sim 12 \mu m$ 波段下尾喷焰的红外辐射强度, 可利用普朗克公式分别计算各红外发射组份 H_2O 、 CO_2 和 C 粒子的红外辐射, 来计算尾喷焰的红外辐射强度。

在 $8 \sim 12 \mu m$ 波段时, 与尾喷焰轴垂直的方向成 θ 角处的辐射强度为

$$I_p'(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\varepsilon_p}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_b(\lambda, T) d\lambda \cdot S \cdot \cos \theta \quad (4)$$

式中: ε_p 为尾焰的光谱发射系数。根据参考文献[4]中的经验数据: 该尾焰在 $8 \sim 12 \mu m$ 波段时取平均值 $\varepsilon_p = 0.46$ 。

2.3 超音速导弹辐射面积计算

通常假设导弹的蒙皮为圆柱体, 忽略侧翼和尾翼等影响, 如图 2 所示。

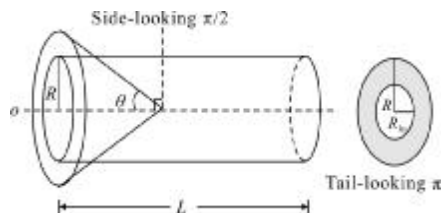


图 2 导弹蒙皮模型

Fig.2 Missile fuselage model

由图 2 可知, 在不同视角下, 导弹蒙皮的投影面积计算公式为:

$$A_s = \begin{cases} \pi R^2 \cos \theta + 2RL \sin \theta & \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ 2RL \sin \theta + \pi(R^2 - R_{hs}^2) |\cos \theta| & \frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi \end{cases} \quad (5)$$

式中: R 为弹体半径; L 为弹体长度; R_{hs} 为尾喷管的半径; θ 为视角, 当迎头探测时为 0° 。

通常也将尾喷管视为灰体辐射源, 同样可以根据普朗克定理计算出其辐射强度 I_{hs} , 导弹的结构使得尾喷管辐射只能从后半球区域观察到。不同视角时, 尾喷管的投影面积为:

$$A_{hs} = \begin{cases} 0 & \theta \leq \pi/2 \\ \pi R_{hs}^2 |\cos \theta| & \pi/2 < \theta \leq \pi \end{cases} \quad (6)$$

为了简化计算, 假设导弹尾焰由 3 个规则立体组成, 代表了导弹尾焰的三个段, 其简化计算模型如图 3 所示。

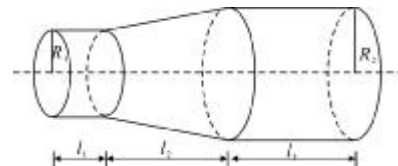


图 3 尾焰简化计算模型

Fig.3 Simplified plume calculation model

3 仿真结果

选取波长为 $4 \mu m$, 此时水滴粒子的复折射率为 $1.351 - 0.0046i$, 冰晶粒子的复折射率为 $1.327 - 0.0124i$ 。

图 4 可以看出水滴粒子和冰晶粒子的散射特性相似, 仅仅是复折射率不同。因为此时粒子的尺度数小, 所以单次散射特性与瑞利散射相似^[4]。

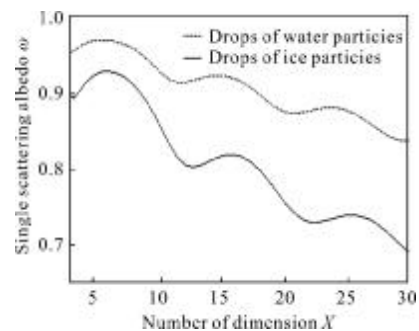


图 4 粒子的散射截面与尺度数的关系

Fig.4 Relation between scattering albedo of droplet and size parameter

计算积云和层云的辐射特性参数, 结果见表 1。

表 1 常见云型的辐射特性参数

Tab.1 Infrared parameter of typical clouds

Cloud class	Cumulus clouds	Stratus cloud
Cloud base height/km	0.7	0.3
Cloud top height/km	3.0	1.0
Average particle size/ μm	4-11	2-10
Experimental extinction coefficient/ km^{-1}	17.138	16.207
Extinction coefficient/ km^{-1}	17.483	16.797
Experimental emissivity	0.762	0.308
Emissivity	0.721	0.314

总体的误差在 10%以内,由各地区的云滴半径差异引起。

进行 Matlab 仿真计算,假设初始条件为:导弹弹体直径为 0.414 m,弹体长为 4.0 m,尾焰初始段的长度为 2.67 m,过渡段的长度为 7.1 m,基本段的长度为 10 m,尾焰初始段的宽度为 0.5 m,尾焰基本段的宽度为 2 m。仿真 3~5 μm 波段和 8~12 μm 波段各个组成部分及总的导弹的红外辐射亮度。表 2 内仿真对象的红外辐射亮度单位是 $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。

表 2 导弹双波段红外辐射亮度表

Tab.2 Infrared radiant brightness in dual band

Band/ μm	Totality	Skin	Nozzel	Tail flame initial period	Tail flame transition section	Tail flame basic segment
3-5	0.321 9	0.008 8	0.224 3	0.056 1	0.032 6	0.000 3
8-12	0.085 7	0.010 9	0.050 5	0.013 1	0.010 1	0.001 1

从表 2 中可以看出,蒙皮的红外辐射亮度在总辐射亮度中所占的比重很小,双波段情况下分别是 2.73%和 12.72%,仅尾焰初始段的比重就已经占到了 17.43%和 15.29%。就不同波段红外辐射亮度的对比度而言,3~5 μm 波段要高于 8~12 μm 波段,与实际情况相符^[5]。

根据公式(4),计算 3~5 μm 波段和 8~12 μm 波段各个组成部分及总的导弹的红外辐射强度。仿真结果如图 5、图 6 所示。

图 5、图 6 中图(a)~(f)分别表示导弹的总体、蒙皮、尾喷管、尾焰初始段、尾焰过渡段、尾焰基本段

的红外辐射强度。由图 5、图 6 可以看出,对于 3~5 μm 波段,红外辐射主要由尾焰产生,特别是由尾焰过渡段产生的红外辐射尤为强烈,而尾喷管的红外辐射只有当观察角度大于 90°时才能观察到;对于 8~12 μm 波段,蒙皮辐射占总辐射的比例较 3~5 μm 波段明显增加,甚至超过了尾焰过渡段的辐射。因此,在前向和侧向探测时,可以采用双波段;后向探测可主要利用 3~5 μm 波段来探测尾喷管和尾焰的红外辐射,此外,文中模型的计算结果与文献结论相符^[6-7],且可计算全视角范围的红外辐射强度,具有一定的普遍性。

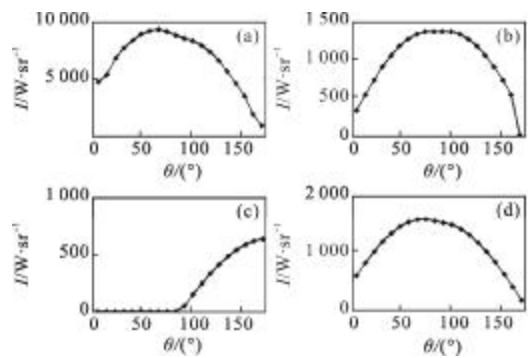


图 5 导弹 3~5 μm 波段红外辐射

Fig.5 Missile infrared radiation in 3-5 μm band

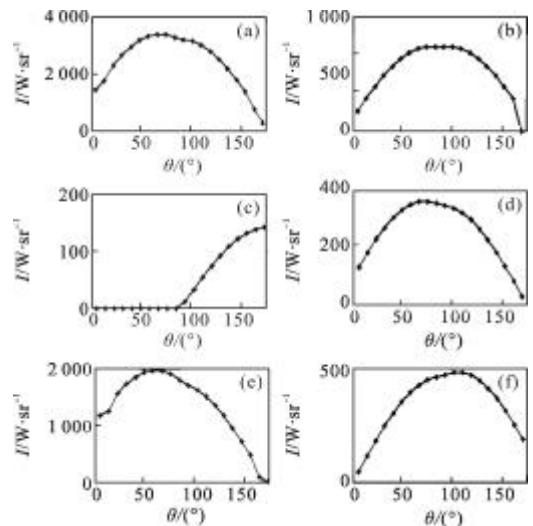


图 6 导弹 8~12 μm 波段红外辐射

Fig.6 Missile infrared radiation in 8-12 μm band

为更具体地观察各部分红外辐射的比例情况,仿真正侧向双波段各部分红外辐射强度比例图,如图 7 所示,由该图可以直观地看出正侧向 8~12 μm 波段探测时,蒙皮辐射占总辐射的比例较大。

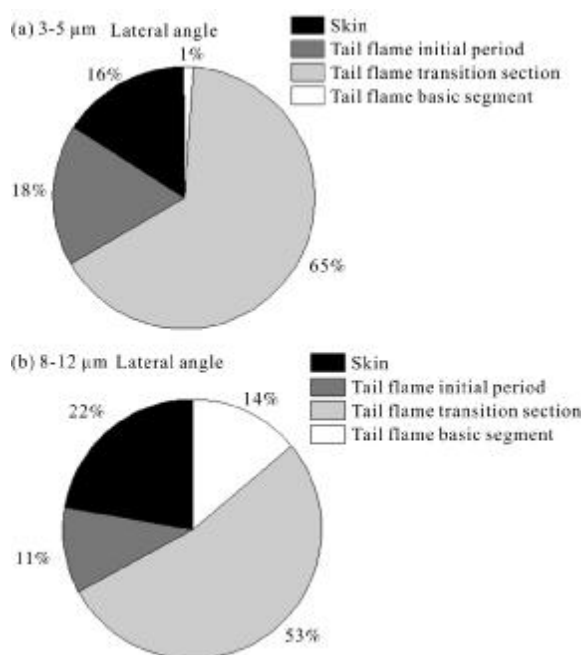


图 7 双波段导弹红外辐射强度比例图

Fig.7 Missile infrared radiant intensity ratio diagram in dual band

4 结论

文中首先研究了战场环境的红外辐射特性,介绍了整个背景当中的辐射情况。重点对云层辐射进行计算,采用累积因子法,先计算单次散射,然后定义一个累积因子,计算多次散射。最后详细分析了超音速导弹的红外辐射特征,建立了导弹红外辐射强

度和辐射面积计算模型,并进行了仿真验证。为后续生成超音速反舰导弹攻击航路的红外图像序列提供了研究基础。

参考文献:

- [1] Yuan Guibin, Dai Jingmin. Study of missile plume and cloud background infrared radiation characteristics [D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2007. (in Chinese)
- [2] Van Be Hulst. Light Scattering By Small Particles [M]. New York: Wiley Press, 1957: 119-130.
- [3] Cheng Yubao, Yang Xiwei. Mie scattering factor computational method and application [J]. Application of Photoelectric Technology, 2005, 20(5): 12-14. (in Chinese)
- [4] Wang Baorui, Xin Lingyan. Scattering and attenuation characteristics of the cone -spherical particles toward polarization radar waves [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1996, 19(4): 387-392. (in Chinese)
- [5] Chang Benkang, Cai Yi. Infrared Imaging Arrays and Systems[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [6] Fei Jindong, Wang Niufu, Ma Yifei. Ways of infrared imaging technology for anti -cruise missile [J]. Aerospace Electronic Warfare, 1999(4): 1-5. (in Chinese)
- [7] Bai Weixiong, Wu Fawen. Cruise missile infrared radiation characteristic research [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2003, 4 (6): 26-29. (in Chinese)