飞行体的海空背景反射与辐射计算

徐南荣　　雷建长
(北京航空航天大学 宇航学院)

摘　要　研究了对近海飞行体的红外特性有重要影响的海空背景辐射的反射特性. 讨论了波浪面起伏随机规律,随机起伏对海面自身辐射及对阳光反射的影响,推演了此种随机起伏波浪面的自身辐射及反射的阳光在观测点形成的辐照度的计算方法. 给出的算例结果表明,海空背景对飞行体的红外特性尤其对其前半球的红外特性有重要的意义.

关键词　飞行器; 红外辐射; 红外背景; 海空背景; 红外计算
分类号　O 434.3; TN 21

在计算研究近海飞行体的红外辐射场,尤其在计算飞行体前半球的红外辐射场时,飞行体对海空红外背景的反射具有重要的意义. 飞行体反射的海空背景包括海面的自身辐射、阳光的一、二次反射、辐射传输路径上的大气辐射、云团辐射等. 本文就前两种主要背景的计算方法进行讨论.

1　海面自身辐射

1.1　观测点辐照度与海面自身辐射亮度的关系

图 1 所示为观测点、飞行体及海面的相对关系图. 图中 n_m、n_a 分别为观测面与飞行体上有限面元 A 的法线.

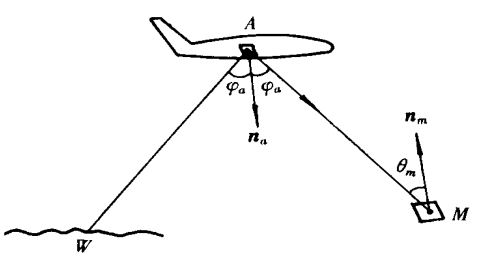


图 1　观测点、飞行体、海面相对关系示意图

按照在非参与性介质中辐射亮度不变性原理,在飞行体表面 A 处的反射光谱辐射亮度 $L'_{\lambda,a}$ 为

$$L'_{\lambda,a} = L_{\lambda,w} \cdot \tau_{wa} \cdot \rho_a(\phi_a) \qquad (1)$$

式中　$L_{\lambda,w}$ 为海面 W 点处在 WA 方向的光谱辐射亮度. W 点为海面上入射到飞行体有限面元 A 处的入射线 WA 与通过观测点 M 的反射线 AM 满足入、反射角相等关系的点. 图 1 中 n_a 为微面元 A 的法线. $\rho_a(\phi_a)$ 为相同点处反射角为 ϕ_a 方向的反射率. τ_{wa} 为路径 WA 的大气透过率.

由(1)式及辐射照度与辐射亮度的关系,微面元 A 相对距离较远的观测点 M 可以看成点辐射源. 因而,飞行体表面的微面元 A 反射的海面自身辐射在观测点处形成的辐照度为

$$\Delta H_1 = (\Delta F_a \cdot L_{\lambda,w} \cdot \tau_{wa} \cdot \tau_{am} \cdot \rho_a(\phi_a) \cdot \cos\phi_a \cdot \cos\theta_m) / R_{am}^2 \qquad (2)$$

式中　τ_{am} 为中径 AM 的大气透过率. R_{am} 为路径 AM 的程长. ΔF_a 为飞行体表面的微面元 A 的面积.

若由观测仪器的视场与飞行体表相围成的表面分割成的微面元数为 N,则海面自身辐射经飞行体表面反射后在观测点处形成的辐照度为

$$H_1 = \sum_{i=1}^{N} \Delta H_i \qquad (3)$$

1.2　海浪波小面的方向

在(1)或(2)式的计算中,需知海面的光谱辐射亮度 $L_{\lambda,w}$. 但海面是由波浪面形成的,若海流的某个波小面的方向(用其法线 n_w 表示)不同,经在图 1 中的 WA 方向的辐射也就不同.

设在波小面的 W 点处分别取 x 和 y 轴表示侧风和逆风方向. 现用波小面的斜率参数 s_x、s_y 来描述波小面的法向单位矢量 n_w(见图 2).

$$n_w = n_{wx}i + n_{wy}j + n_{wz}k \qquad (4)$$

$$\left.\begin{aligned} s_x &= -n_{wx}/n_{wz} \\ s_y &= -n_{wy}/n_{wz} \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

由于波浪起伏的随机性,某个波小面的法线矢量 n_w 或描述它的 s_x、s_y 也具有随机性. Cox 和

收稿日期: 1996-08-14　第一作者　男　60 岁　教授　100083　北京

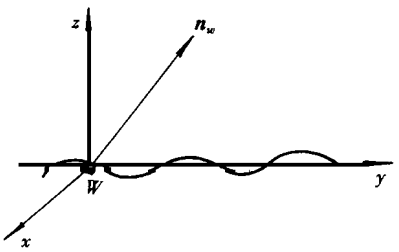


图 2 波浪面的方向

Munk[1,2]从海面的闪光测量结果推导出 s_x、s_y 服从高斯分布,其概率密度函数为

$$p(s_x, s_y) = \frac{1}{2\pi s_x s_y}\exp\left[-\left(\frac{s_x^2}{\sigma_x^2}+\frac{s_y^2}{\sigma_y^2}\right)\Big/2\right] \quad (6)$$

式中 σ_x、σ_y 与 s_x、s_y 的标准差,它们是与风速相关的函数:

$$\sigma^2 = 0.003 + 5.12\times10^{-5}u$$

$$\sigma^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$$

式中 u ——风速(cm/s).

波浪面的方向随机性不仅影响在研究方向的辐射量,而且产生对辐射的遮挡问题. 在入射角小于 π/2 时,未被遮挡的系数 h 为[2]

$$\left.\begin{aligned} h &= 2\{1+\mathrm{erf}(V)+(V\sqrt{\pi})^{-1}\exp(-V^2)\}^{-1}\\ V &= (\sigma_x^2+\sigma_y^2)\,\mathrm{tg}\phi \end{aligned}\right\}$$

式中 ϕ 为反射线的高低角,erf 为误差函数.

1.3 海面的反射率

由于辐射进入海水后的很薄一层内就被吸收,故可近似有

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \rho_\lambda \quad (8)$$

式中 ε_λ 为海水光谱发射率,ρ_λ 为海水光谱反射率.

若入射到海水表面的入射角为 ψ_i,反射角为 ψ_r,折射角为 ψ_t,由菲涅耳公式可得反射波浪在平行和垂直于入射平面的振幅反射系数 r_p、r_s 为[3]

$$r_p = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} = \frac{n_2\cos\psi_t - n_1\cos\psi_i}{n_2\cos\psi_t + n_1\cos\psi_i} \quad (9)$$

$$r_s = \frac{E_{rs}}{E_{is}} = \frac{n_1\cos\psi_i - n_2\cos\psi_t}{n_1\cos\psi_i + n_2\cos\psi_t} \quad (10)$$

(9)、(10)式中 n_1、n_2 分别为空气和海水的折射率. 由于海水对红外辐射的吸收明显,故需要用复数折射率,即

$$n_2 = n_2' + \mathrm{i}\,n_2''$$

由振幅反射系数可求得功率反射率 ρ_p、ρ_s 为

$$\left.\begin{aligned} \rho_p &= |r_p|^2\\ \rho_s &= |r_s|^2 \end{aligned}\right\} \quad (11)$$

由(9)~(11)式可以看出,反射率 ρ_p、ρ_s 均是入射角的函数,故可写成 $\rho_p(\psi_i)$、$\rho_s(\psi_i)$.

对无偏振的入射光,

$$\rho(\psi_i) = (1/2)[\rho_p(\psi_i) + \rho_s(\psi_i)] \quad (12)$$

若入射光的电矢量 E_i 与入射面的夹角为 α,则

$$\rho(\psi_i) = \rho_p(\psi_i)\cos^2\alpha + \rho_s(\psi_i)\sin^2\alpha \quad (13)$$

在计算 $\rho(\psi_i)$ 后,根据(8)式就可计算出相应的 $\varepsilon_\lambda(\psi_i)$. 飞行体表面的反射率也可用此法计算.

1.4 飞行体对波浪面辐射的反射

考虑到海面的波浪效应,(1)式中的 $L_{\lambda,w}$ 应为

$$L_{\lambda,w} = \int_0^{\infty}\int_0^{\infty}\frac{M_{\lambda,b}}{\pi}\cdot\varepsilon_\lambda(\psi_i)\cdot p(s_x, s_y)\,\mathrm{d}s_x\mathrm{d}s_y \cdot h \quad (13)$$

式中 $p(s_x, s_y)$ 为(6)式表达的概率密度函数,$M_{\lambda,b}$ 为海面温度的黑体光谱辐射出射度. 将(13)式代入(1)式,并利用(2)、(3)式就可得到飞行体对海面自身辐射的反射在观测点形成的辐照度.

2 飞行体对阳光的一次、二次反射

阳光对观测仪器的影响除了直接进入它的视场内以外,更多的情况是通过飞行体表面的一次反射和通过海面反射到飞行体表面再反射至观测仪视场内的二次反射.

2.1 辐射几何学问题

设观测点 M,飞行体表面某微面元 A,波浪小面 W 及太阳 S 的相对关系如图 3 所示.

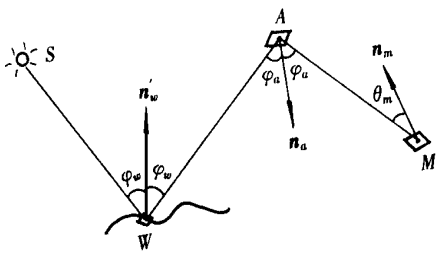


图 3 辐射几何学关系

为了确定海面自身辐射中的传输路径及阳光二次反射能否进入观测系统的视场,均需要首先确定海面上 W 点的位置及直线 WA 的方向.

设 M 点坐标已知为 $M(x_m, y_m, z_m)$,其单位法向矢量为 n_m,A 点坐标已知为 $A(x_a, y_a, z_a)$,其单位法向矢量为 n_a,因而直线 MA 的参数方程

为

$$\left.\begin{aligned} x &= x_m + (x_a - x_m)t \\ y &= y_m + (y_a - y_m)t \\ z &= z_m + (z_a - z_m)t \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

直线 MA 的单位矢量为

$$\mathrm{MA} = \frac{1}{\sqrt{(x_a - x_m)^2 + (y_a - y_m)^2 + (z_a - z_m)^2}} \cdot [(x_a - x_m)\mathrm{i}, (y_a - y_m)\mathrm{j}, (z_a - z_m)\mathrm{k}]$$

由此可求出

$$\theta_m = \arccos(\mathrm{n}_m \cdot \mathrm{MA}) \tag{15}$$

$$\phi_a = \arccos[\mathrm{n}_a \cdot (-\mathrm{MA})] \tag{16}$$

根据入射角等于反射角及 MA、ϕ_a 已知的条件,就可由下式求出矢量 AW:

$$\mathrm{AW} - \mathrm{MA} = 2\cos\phi_a \cdot \mathrm{n}_a \tag{17}$$

$$\mathrm{AW} = 2\cos\phi_a \cdot \mathrm{n}_a + \mathrm{MA} \tag{18}$$

设 W 点的坐标为 $(x_w, y_w, 0)$,则 WA 方向的单位矢量为

$$\mathrm{WA}' = [(x_a - x_w)^2 + (y_a - y_w)^2 + z_a^2]^{-1/2} \cdot [(x_a - x_w)\mathrm{i}, (y_a - y_w)\mathrm{j}, z_a\mathrm{k}] \tag{19}$$

若设

$$\mathrm{WA}' = w_x\mathrm{i} + w_y\mathrm{j} + w_z\mathrm{k} \tag{20}$$

则

$$x_w = x_a - (w_x/w_z)z_a \tag{21}$$

$$y_w = y_a - (w_y/w_z)z_a \tag{22}$$

2.2　飞行体对阳光的一次反射

问题的关键在于如何判断图 3 所示的入射到飞行体表面的射线 WA 是否在太阳与 A 点所成的圆锥内.

设太阳的中心坐标为 x_s, y_s, z_s,太阳半径为 R,设 WA 线的方向矢量 $\mathrm{WA} = w_x\mathrm{i} + w_y\mathrm{j} + w_z\mathrm{k}$,若

$$w_x^2 + w_y^2 + Aw_xw_z + Bw_yw_z - Cw_z^2 \le 0 \tag{23}$$

$$\left.\begin{aligned} A &= -2x_s/z_s \\ B &= -2y_s/z_s \\ C &= \frac{x_s^2 + y_s^2 - R^2}{z_s^2} \end{aligned}\right\} \tag{24}$$

则入射线 WA 在太阳锥内,否则不在锥内. 若 (23) 式成立,经飞行体表面反射后的阳光辐射亮度 $L\lambda'_{,s}$ 可表示为

$$L\lambda'_{,s} = L_{\lambda,s} \cdot \rho_a(\phi_a) \tag{25}$$

上式中 $L_{\lambda,s}$ 为阳光直射至飞行体表面时的辐射亮度. 由此一次反射在观测点形成的辐照度计算,可参照 (2)、(3) 式进行.

2.3　飞行体对阳光的二次反射

现用高低角 θ_s 和方位角 ϕ_s 表示太阳的方向 (见图 4).

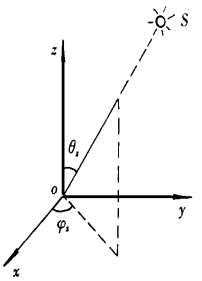


图 4　太阳方位角

确定太阳的方向矢量 m 为

$$\mathrm{m} = \begin{matrix} \sin\theta_s\cos\phi_s \\ \sin\theta_s\sin\phi_s \\ \cos\theta_s \end{matrix} \tag{27}$$

波小面 W 的法向矢量 n_w' 为

$$\mathrm{n}_w' = \mathrm{m} + \mathrm{WA}' = n_{wx}'\mathrm{i} + n_{wy}'\mathrm{j} + n_{wz}'\mathrm{k} \tag{28}$$

n_w' 的斜率参数 s_{x_0}, s_{y_0} 为

$$\left.\begin{aligned} s_{x_0} &= -n_{wx}'/n_{wz}' \\ s_{y_0} &= -n_{wy}'/n_{wz}' \end{aligned}\right\} \tag{29}$$

在波小面 W 处的阳光光线入射角 ϕ_w 为

$$\phi_w = \arccos\left\{\frac{1}{2}\sqrt{n_{wx}^2 + n_{wy}^2 + n_{wz}^2}\right\} \tag{30}$$

确波小面 W 的单位法向矢量 n_w' 为

$$\mathrm{n}_w' = \frac{1}{2\cos\phi_w}(\mathrm{m} + \mathrm{WA}') \tag{31}$$

太阳半径 R 与地球和太阳的距离 L 构成的半锥角 $\alpha = \arctan(R/L)$,由于 α 很小,$\alpha \approx \tan\alpha$. 即有

$$\left.\begin{aligned} s_{xl} &= s_{x_0} - \alpha \\ s_{xh} &= s_{x_0} + \alpha \\ s_{yl} &= s_{y_0} - \alpha \\ s_{yh} &= s_{y_0} + \alpha \end{aligned}\right\} \tag{32}$$

s_{xl}、s_{xh}、s_{yl}、s_{yh} 分别表示能将太阳光反射到观测装置视场内的波小面法线矢量参数的上下限. 由此,经二次反射后的太阳光在观测点形成的光谱辐射亮度为

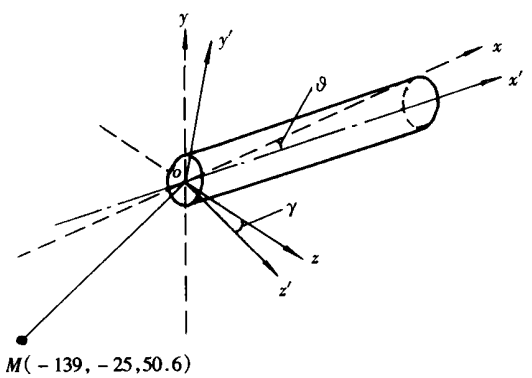
$$L_{\lambda,s} = \left[\int_{s_{xl}}^{s_{xh}}\int_{s_{yl}}^{s_{yh}} \rho_w(\phi_w) \cdot L_{\lambda,s} \cdot \tau_{wa} \cdot \rho_a(\phi_a) \cdot p(s_x, s_y)\,\mathrm{d}s_x\mathrm{d}s_y\right] \cdot h \tag{33}$$

式中 $L_{\lambda,s}$ 为阳光到达海面的辐射亮度. 再参照 (2)、(3) 式就可计算出二次反射的阳光在观测

点形成的辐照度.

3 算 例

一飞行体在离海平面高度为 30 m 作水平飞行. 飞行体简化为一半径 0.7 m,长 12 m 的圆筒与一面积为 36 m^2 的平板的组合体. 设圆柱前端面的圆心为坐标原点(见图 5),观测点的坐标为(-139,-25,50.6) m,大气和海水条件为:大气温度 30 ℃,大气相对湿度 60 %,视距 10 km,海水温度 16 ℃,风向为东北风,风速 10 m/s. 圆筒对称轴与海面风速的夹角为 30°,飞行体所处的地球经纬为东经 120°,北纬 40°. 太阳方向参数:日期为 5 月 20 日,时间为 13∶30.



ϑ——圆柱相对海平面的俯仰角;γ——圆柱基准面的滚转角

图 5 观测点与圆筒的相对坐标

计算结果为,由圆筒表面反射的海空背景辐射在 2.0～4.8 μm 波段内在观测点形成的辐照度 $H_c = 0.514 \times 10^{-3}$ W·m^{-2},而由平板反射而形成的辐射度 $H_p = 0.181 \times 10^{-3}$ W·m^{-2}.

作者另一项研究[4]对与本例飞行体面积类似的某歼击机的喷气流在非加力状态下的红外辐射场的计算表明,在与本例中相同的观测点的相对坐标上形成的辐照度为 $H_{plu} = 0.358 \times 10^{-3}$ W·m^{-2}. 由上对比可见,近海飞行体对海空背景的辐射反射在其前半球有着重要的意义.

当然也应提到,即使没有飞行体的反射,以海空为背景的红外探测系统仍会探测到相当值的海空辐射,本文将不在此讨论.

4 结 论

1) 本文讨论了近海飞行体反射的海空背景辐射,它对近海飞行体的红外特性,特别是前半球的红外特性计算中有重要意义.

2) 本文在波浪面方向随机分布规律的已有研究基础上,推演了随机起伏的波小面的自身辐射与对太阳的反射的方程. 结合飞行体表面的有限面元描述的方法,就可对飞行体反射的海空背景辐射进行有效的计算.

3) 传输路径上的大气辐射、云团辐射等已有文献[5]等可参考,本文不再讨论.

参 考 文 献

1 Cox C, Munk W. Statistics of the seasurface derived from sun glitter. J Marine Res, 1954, 13(2): 198～227

2 Van Haersma Buma Jr. Infrared sea background radiation. PHL, 1975. 33

3 赵凯华,钟锡华. 光学. 上册. 北京:北京大学出版社,1984

4 徐南荣. 喷气流红外辐射场的数值计算. 航空学报, 1995, 16(6): 647～653

5 Ra Rocca A J, Robert E T. Atmospheric transmittance and radiance: Methods and Calculation. AD-AO17459, 1975

Computation of Near Sea Flight Vehicle Reflection from Sea and Sky Background Radiation

Xu Nanrong Lei Jianchang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, School of Astronautics)

Abstract The reflective characteristics of sea and sky background radiation, which have important effect on the infrared signature from flight vehicle above sea, are studied in the paper. The statistical distribution of wave facet directions is discussed, the effects of randomly riging and falling sea wave on the sea surface radiation and on the sun light reflection are also discussed. Calculation methods of irradiance from sea surface radiation and reflected sun light on observation point are derived in the paper. Finally a computation example is given, which shows the sea and sky background radiation has important effect on infrared characteristic especially in the front area of a flight vehicle.

Key words flight vehicle; infrared radiation; infrared background; sea and sky background; infrared computation