

陆基长波红外辐射测量技术研究

卜正明, 李满良

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 红外辐射特性是导弹突防性能评估的重要指标, 而红外辐射测量则是导弹预警和识别的主要手段, 红外辐射特性测量的研究具有较大的军事应用价值. 本文通过对目标的红外辐射特性及大气衰减的理论分析, 探讨了提高陆基长波红外辐射探测能力的技术途径.

关键词: 陆基测量; 长波红外辐射测量; 作用距离

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A

STUDY OF GROUND-BASED LW INFRARED RADIATION MEASUREMENT

BU Zheng-Ming, LI Man-Liang

(College of Mechanical Engineering and Automation, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract: The infrared radiation characteristic of the missile is an important parameter for evaluating the penetration ability of a missile. Measuring the infrared radiation characteristic is important for us to distinguish a warhead from multiple objects and warn. Studying the infrared radiation characteristic of target has military value. The infrared radiation characteristic of target and atmosphere transmissibility of infrared radiation were analysed, and the way of enhancing the detecting ability of the ground-based LW infrared radiation measuring equipment was discussed.

Key words: ground-based measurement; LW infrared radiation measuring; detecting-range

引言

在导弹防御系统中, 红外探测是导弹预警和识别的主要手段之一, 而在军事上比较有应用价值的波段是 8 ~ 14 μm 的大气窗口^[1], 因此, 早在上世纪六七十年代, 各发达国家就介入长波红外辐射特性测量方面的研究和运用. 研究如何提高高空目标长波红外辐射特性探测能力的技术途径, 具有理论和实践意义.

1 目标的红外辐射特性

根据红外热辐射理论, 凡是温度高于绝对零度的物体均辐射热. 若把高温热物体近似为黑体, 则按普朗克定律, 其黑体辐射的光谱分布为

$$M_{\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (1)$$

式中: $M_{\lambda}(T)$: 光谱辐射出射度 ($W \cdot m^{-2} \cdot (m^{-1})$),

λ : 波长 (μm),

C_1 : 第一热辐射常数, $C_1 = 3.7415 \times 10^8 (W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^4)$,

C_2 : 第二热辐射常数, $C_2 = 14387.9 (\mu m \cdot K)$.

根据式(1), 可由下式求出其在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内的黑体辐射出射度:

$$M_{\lambda_1-\lambda_2}(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda}(T) d\lambda (W \cdot m^{-2}). \quad (2)$$

目标在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内的总辐射通量 ϕ_{λ} 为

$$\phi = A \epsilon M_{\lambda_1-\lambda_2}. \quad (3)$$

式中: A 目标的有效辐射面积, ϵ 目标的辐射系数.

作为陆基红外探测设备, 其主要功能是对高空目标红外辐射特性进行测量, 目标距测量设备相对较远, 可等效为点目标. 则目标在指定波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内的辐照度 J 为

$$J = \phi / \pi. \quad (4)$$

由式(1) ~ 式(4)可求得目标有效辐射面积 $1 m^2$ 、温度为 200K ~ 400K、辐射系数为 1, 波长在 1 ~ 3 μm、3 ~ 5 μm 和 8 ~ 12 μm 光谱范围内的辐照度 J , 计

表1 目标随温度变化的辐强度(单位:W/sr)
Table 1 Radiation intensity of different temperature object(W/sr)

光谱范围(μm)	1~3	3~5	8~10.6
200	0.000 002	0.010 368	2.001 295
250	0.000 314	0.236 619	9.317 669
300	0.010 096	2.000 365	26.287 943
350	0.124 417	9.516 814	55.595 044
400	0.839 763	31.431 900	98.143 532

算结果见表1所列。

从表1可看出,对于低温目标,1~3μm波段的红外辐射非常微弱,难以用光电探测器进行探测;3~5μm波段的红外辐射,比1~3μm的辐射强得多,但目标温度不太高时,3~5μm波段的辐射仍比较弱,难以进行探测;8~12μm波段的辐射则要强得多,为3~5μm波段辐射的数十倍,较适合于探测。

2 红外辐射的大气衰减

红外辐射在大气中的衰减主要是大气的吸收和散射引起,其透过率与气象条件、观测天顶角、地理位置、季节等诸多因素有关^[2]。因此在计算大气透过率时采用如下计算条件:

- 1) 地点 中纬度沙漠地区
- 2) 时间 下午16h
- 3) 方向 正东
- 4) 波段 8~12μm, 3~5μm, 1~3μm
- 5) 天顶角(Za) 75°、60°、45°、30°、20°
- 6) 大气模式 中纬度秋季(其它模式差别不大)
- 7) 气溶胶模式 沙漠气溶胶
- 8) 计算中采用 1976年美国标准大气
- 9) 日期 365天中的第273天(秋季)
- 10) 频率间隔 20cm⁻¹。

根据以上条件,计算得到陆基观测时天空背景的光谱辐亮度如表2及图1所示。

由图1可知,对于3~5μm波段的陆基观测,天空背景的平均辐亮度与观测天顶角几乎没有关系。对于1~3μm和8~12μm波段,天空背景的平均辐亮度随着天顶角的增大而增大。

表2 天空背景的红外波段平均辐亮度(单位:W/cm²sr)
Table 2 Infrared waves average radiation intensity in sky surroundings(W/cm²sr)

项目	75°	60°	45°	30°	20°
1~3μm	4.43E-04	3.38E-04	2.93E-04	2.29E-04	1.81E-04
3~5μm	9.50E-05	9.22E-05	9.10E-05	9.00E-05	8.93E-05
8~12μm	2.31E-03	2.24E-03	2.22E-03	2.22E-03	2.22E-03

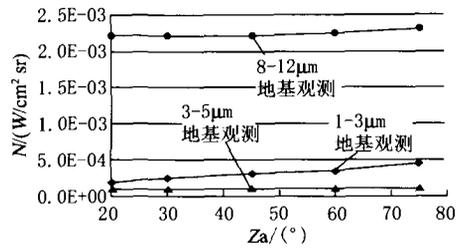


图1 天空背景的平均辐亮度
Fig.1 Infrared waves average radiation intensity in sky surroundings

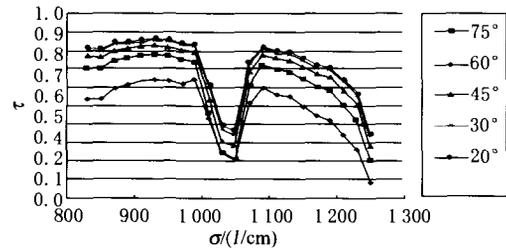


图2 8~12μm波段的大气光谱透过率(R:60km)
Fig.2 Atmosphere transmissibility of 8~12μm infrared radiation (Range:60km)

8~12μm波段的大气透过率曲线如图2所示。

3 作用距离计算

红外探测器的性能是红外系统作用距离的决定因素之一。陆基红外设备的短、中、长三波段红外探测器均可采用320×256像元或640×512像元的焦平面探测器件。为方便起见,后续计算中焦平面探测器采用如下技术参数:分辨率:320×256;像元尺寸:25μm×25μm;光敏面尺寸:8mm×6.4mm;积分时间:1μs~10ms/Typ. 2ms;NETD:35mk@25℃。

3.1 光学系统参数

对目标进行红外跟踪测量时,为了达到较大的探测能力,选定红外系统的口径为D=Φ700mm、取F数为4(F为光学系统的相对孔径,受限于探测器的冷屏角,F数不能小于2),则对于上述红外探测器,其单个像元对应的瞬时视场角为1.84°。

由于陆基红外设备的光学视场有限,当系统不能对目标实施稳定跟踪时,目标将在探测器上产生晃动。设其晃动角度为β,晃动频率为γ,则目标在探测器像元上的驻留时间由下式计算

$$t_{max} = \alpha\xi/\beta\gamma. \tag{5}$$

式中ξ是探测器的填充系数,取0.7。

对目标稳定跟踪时,目标在探测器上的驻留时间可以较长,可控积分时间可在驻留时间内设定。

另一方面,由于天空背景也有较强的红外辐射,

若探测器的积分时间太长,则会引起探测器饱和.在很大程度上,探测器的积分时间取决于背景的辐射强度.背景的辐射包括天空背景的辐射和光学系统作为辐射源产生的辐射.红外探测器的饱和电子数通常可达到 $35 \times 10^6 \sim 120 \times 10^6$ 个电子.

天空背景在探测器像元上产生的电荷数 n_1 与积分时间 t 的关系为

$$n_1 = \varepsilon_1 B_1 A_0 \tau_0 \Omega \eta t. \quad (6)$$

式中: ε_1 为大气的辐射系数, B_1 为天空背景的辐亮度, A_0 为光学系统有效口径, τ_0 为光学系统透过率, Ω 为探测器单个像元所对应的立体角, η 为量子效率(取 $\eta = 0.6$).

光学系统作为灰体辐射源在探测器像元上产生的电荷数 n_2 与积分时间 t 的关系为

$$n_2 = \frac{Q_0}{4F^2} A_d \tau_a \tau_0 \eta t. \quad (7)$$

式中: Q_0 为光学系统作为辐射源时产生的光子流量密度.常温下的光学系统 $T = 300\text{K}$,则 $Q_0 \approx 9.6 \times 10^{16}$ 光子/s cm^2 , A_d 为探测器像元的面积($A_d = 625 \times 10^{-8} \text{cm}^2$), τ_a 为光学系统透过率, F 为光学系统的相对孔径, η 为量子效率,取 $\eta = 0.6$.

背景在探测器像元上产生的电荷数 $n = n_1 + n_2$.积分时间应尽可能取得长些,并以探测器不饱和为原则.背景在探测器像元上每秒产生的电荷数见表3所列.假设探测器像元的满井电荷数为 35×10^6 时,计算得到探测器的最大积分时间如表4所列.

说明:在表3和表4计算中,对于 $1 \sim 3\mu\text{m}$ 和 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 波段,未考虑光学系统作为辐射源的影响.

由表4可以看出,对于 $8 \sim 12\mu\text{m}$ 波段的观测,探测器的积分时间小于 3ms.可取为 1ms,则系统的带宽 $\Delta f = 1/2t = 1/(2 \times 0.001) = 500\text{Hz}$.

表3 背景在探测器像元上每秒产生的电荷数表

Table 3 The number of charge per second of detector

项目	75°	60°	45°	30°	20°
1~3 μm	3.28E+08	2.50E+08	2.17E+08	1.70E+08	1.34E+08
3~5 μm	1.41E+08	1.37E+08	1.35E+08	1.33E+08	1.32E+08
8~12 μm	1.14E+10	1.11E+10	1.11E+10	1.11E+10	1.11E+10

表4 探测器的最大积分时间表

Table 4 The maximal integral time of detector

项目	75°	60°	45°	30°	20°
1~3 μm	1.07E-01	1.40E-01	1.61E-01	2.06E-01	2.61E-01
3~5 μm	2.49E-01	2.56E-01	2.60E-01	2.62E-01	2.65E-01
8~12 μm	3.07E-03	3.14E-03	3.16E-03	3.16E-03	3.16E-03

表5 长波红外作用距离表(km)

Table 5 The range of LW infrared(km)

Za(°)	75	60	45	30	20
τ	0.456 4	0.608 7	0.676 7	0.712 3	0.725 6
300K	115.1	133.0	140.2	143.8	145.2
350K	167.4	193.4	203.9	209.2	211.1
400K	222.5	256.9	270.9	277.9	280.5

3.2 作用距离的估算

探测距离与目标的辐强度、大气透过率、光学系统透过率、系统带宽、光学系统口径、信噪比和探测器像元的大小等有关.作用距离由下式计算:

$$R = \left[\frac{\pi \delta D_0^2 D^* J \tau_a \tau_0}{4(A_d \Delta f)^{1/2} \text{SNR}} \right]^{1/2}. \quad (8)$$

式中: δ 为信号峰值因子, D^* 为传感器探测率, J 为点源目标辐强度, τ_a 为大气透过率, τ_0 为光学系统透过率, A_d 为单个探测像元面积, Δf 为系统噪声等效带宽,SNR 为探测信噪比.

对于长波红外探测,取 $D^* = 2.5(10^{10} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1})$,光学系统透过率 0.5,目标辐射能均匀分布于 6 个像元,探测器填充系数 0.7,系统带宽 500Hz,信噪比为 6.则在地面用各种观测天顶角对目标进行探测时,可探测到的目标极限距离如表5所列.

4 结语

通过计算分析,陆基红外辐射测量设备的探测能力与目标的辐射强度、大气透过率、光学系统透过率、系统带宽、光学系统口径、信噪比、探测器像元的大小等参数有关.光学系统透过率、镜筒口径可以通过系统设计、制造得以提高.信噪比、探测器像元的大小等参数可通过器件选择得到改善.通过系统的合理配置,红外探测器的选用和信号处理方法的改善,利用陆基长波红外测量设备可以探测高空低温目标,从而达到提高陆基红外探测能力的目标.

REFERENCES

- [1] LU Yuan, LING Yong-Shun, WU Han-Ping, et al. Study on passive distance measurement of ground object by infrared radiation[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (路远, 凌永顺, 吴汉平, 等. 地面目标的红外被动测距研究. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(1): 77—80.
- [2] WEI He-Li, SONG Zheng-Fang. Calculating atmosphere transmissibility of infrared radiation[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (魏合理, 宋正方. 红外辐射大气透过率的计算. *红外与毫米波学报*), 1995, 14(2): 159—160.