

·光电工程系统技术·

地空红外探测距离推算方法探讨

康大勇, 成斌, 高俊光

(63891 部队, 河南 洛阳 471003)

摘要:由红外探测系统理想作用距离方程出发,详细分析了红外目标辐射强度、天空背景辐射强度、大气透过率等因素对地空红外探测距离的影响,给出了探测距离的推算公式。

关键词:红外探测设备;探测距离;辐射强度

中图分类号:TN215

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2009)01-0029-04

Differentiation Algorithm Method of Ground-Air Infrared Detection Range

KANG Da-yong, CHENG Bin, GAO Jun-Guang

(63891 Unit of Army, PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract:Based on the classic formulas for operating range of infrared detection system, the factors affecting ground-air infrared detection range, such as infrared object radiant intensity, background radiant intensity and atmosphere transmittance are analyzed. Expressions of differentiation algorithm for detection range are shown.

Key words:infrared detection equipment; detection range; radiant intensity

1 红外探测系统理想作用距离方程

文献[1]中提到红外探测系统理想作用距离方程为

$$R = [J \cdot \tau_a]^{1/2} \left[\frac{\pi}{2} D_0 (NA) \cdot \tau_0 \right]^{1/2} [D^*]^{1/2} \cdot \left[\frac{K}{(\omega \Delta f)^{1/2} \cdot \left(\frac{V_s}{V_n} \right)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中, R 为红外系统的作用距离; D_0 为光学系统入射孔径的直径; NA 为数值孔径; D^* 为红外探测器的比探测度; J 为目标辐射强度; τ_a 为大气透过率; τ_0 为传感器的透过率; K 为修正因子; ω 为系统的瞬时视场; Δf 是等效噪声带宽; V_s 为探测器上的信号电压; V_n 为探测器噪声电压的均方根值。需要指出的是大气透过率 τ_a 应是作用距离 R 的指数函数,而在式(1)中只采用了某些假定距离上大气透过率平均值,并且忽略了脉冲通过信号处理系统时的

损失等因素。

姜宏滨在文献[2]中用NETD对红外系统作用距离的普遍方程进行了详细表述。采用相同的原理可将红外系统的理想作用距离方程用NETD表述为

$$R^2 e^{\alpha R} = \frac{\pi J V_n}{(\text{NETD}) V_s \Omega X_T \xi} \quad (2)$$

式中, α 为大气衰减系数; $\tau_a = e^{-\alpha R}$; X_T 为微分辐射量。

$$X_T = \frac{C_2}{\lambda_2 T^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda T} d\lambda \quad (3)$$

式中, C_2 为第二辐射常数; $M_{\lambda T}$ 为光谱辐射通量密度。

2 距离推算考虑的主要因素

红外系统一般采用多元线阵探测器,通过光学或机械方法来扫描整个搜索视场。由红外系统的理

收稿日期:2008-12-26

作者简介:康大勇(1978-),男,辽宁锦州人,硕士,工程师,研究方向为电子工程。

想作用距离方程可知,作用距离主要受到包括红外目标辐射强度、大气透过率、红外探测器的比探测度、瞬时视场、等效噪声带宽、传感器的透过率等因素的影响.考虑到探测对象存在于天空背景之中,还应满足目标辐射与天空背景辐射在热图像上具有一定的对比度.

综上所述,讨论红外系统探测距离推算方法需要重点分析红外目标辐射强度、天空背景辐射强度、大气透过率和目标与背景之间的对比度等因素的影响.

2.1 红外目标辐射

飞机的3种主要红外辐射源为羽流、热空腔-羽流组合体和蒙皮.

羽流一直是喷气式发动机辐射特性研究的重点和难点.羽流是一种选择性很强的辐射体,在近、中红外波段内,它只是在 $2.7\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$ 为中心的2个不宽的波段内有较强的辐射.但是,就是在这2个波段内大气吸收也较为强烈^[3].羽流的计算方法有微观的谱带模型算法、小哈得逊法和解辐射传输方程法等^[4].北京航空航天大学的徐南荣教授提出解辐射传输方程法虽然计算量很大,但由于计算机技术的发展,目前解决此计算工作已经不是一个很难的问题了^[3].

飞机后半球辐射由热空腔辐射和羽流辐射组合辐射而形成的热空腔-羽流组合体,其辐射体基本在近、中红外波段内.热空腔的辐射线穿透羽流时会有很大的衰减.徐南荣教授首先提出了热空腔-羽流组合辐射的概念和数学模型^[5].组合辐射的光谱特征随观察线与羽流轴线夹角的变化而变化.夹角为 0° 时,基本为热空腔的辐射光谱,只是在 $2.7\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$ 2个波段内有吸收造成的低谷,夹角为 60° 时,可以明显看到羽流在 $2.7\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$ 波段的辐射,而热空腔辐射的比例已下降了.

由于气动加热,飞机的蒙皮温度将经受剧烈的变化,从而产生相当强的红外辐射,成为影响飞机红外特征的一个重要方面.飞机的蒙皮辐射在不同的波段具有不同的作用.例如一种装有喷气式发动机的旋翼直升机,其蒙皮辐射在全机辐射中所占比重在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 2个波段分别为12.36%和86.8%^[3].

可通过求驻点温度的方法求得蒙皮的辐射.驻点温度是贴近蒙皮表面的空气气流变为静止点的温度.计算公式为^[6]

$$T_s = T_0 \left[1 + r \left(\frac{\gamma - 1}{2} \right) M^2 \right] \quad (4)$$

式中, T_s 为驻点温度(K); T_0 为周围大气的温度; r 为温度恢复系数(层流为0.82,紊流为0.87); γ 为空气定压定容热容量之比(1.4); M 为飞机飞行速度与声速之比.

辐射亮度和辐射强度的波段值计算公式为

$$L_{\Delta\lambda} = \frac{\epsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda d\lambda \quad (5)$$

式中, ϵ 为蒙皮的发射率; M_λ 为黑体的光谱辐出度.

$$M_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/\lambda K_B T) - 1} \quad (6)$$

其中,普朗克常数 $h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s}$;光速 $c = 2.99 \times 10^8\ \text{m/s}$;玻耳兹曼常数 $K_B = 1.38 \times 10^{-23}\ \text{J/K}$.由蒙皮的驻点温度及蒙皮的发射率即可利用式(5)计算蒙皮的波段辐射亮度.

2.2 天空背景辐射

背景辐射是红外系统必然会接收到的辐射,背景辐射在探测器上形成的辐照度有时会比目标形成的辐照度高好几个数量级,且其变化复杂.地空红外系统的背景辐射主要来自天空背景.

天空背景可分为晴空和有云2种情况.在晴空条件下天空向下的辐射主要由2部分组成,即天空中的气体分子及气溶胶粒子对太阳的散射和大气分子的辐射;在有云的条件下,要考虑云对阳光的散射和云本身的辐射.

实验和理论计算表明,对阳光的散射和大气的辐射在光谱分布上是有差别的.对阳光的散射主要分布在波长小于 $3\ \mu\text{m}$ 的范围内;而大气辐射由于大气本身温度较低,其有效温度在 $200\sim 300\ \text{K}$ 内,因此在小于 $4\ \mu\text{m}$ 的波长范围内的辐射量很小.天空辐射可以认为是上述2种辐射的叠加.这种辐射在 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 波段内出现极小值,在 $3\ \mu\text{m}$ 以下的短波部分以散射为主,而在 $4\ \mu\text{m}$ 以上以大气辐射为主.

在地平方向,晴空大气分子辐射可近似地用一个 $T = 300\ \text{K}$ 的黑体辐射来代表.因而理想化的天空辐射可用阳光散射的天空亮度与大气辐射的亮度叠加而成.

由于和水平面构成的仰角增加时,光线路径减少,散射阳光的大气分子数也随之减少,散射的亮度也减少,所以散射的亮度随观测的仰角而变化.同时天空的散射亮度也随阳光的高低角而变.

对大气的辐射可以用理论计算的方法进行估算. 大气的温度、压力、密度通常随高度而变, 因此可将大气沿高度方向分成 n 层. 假定在每一层的大气是均匀的并且处于热平衡状态, 第 i 层的仰角为 θ 角方向的光谱辐射亮度为^[7]

$$L_{\lambda i}(\theta) = [1 - \tau_i(\lambda, \theta)] L_{\lambda, bb}(T_i) \quad (7)$$

式中, $L_{\lambda, bb}(T_i)$ 为温度是 T_i 的黑体的光谱辐射亮度. 这层大气向地面的辐射要穿透在它下面的 $(i - 1)$ 层大气, 经过 $(i - 1)$ 层大气的衰减, 到达地面时的光谱辐射亮度为

$$L_{\lambda i}(\theta) \prod_{j=1}^{i-1} \tau_j(\lambda, \theta) = [1 - \tau_i(\lambda, \theta)] \left[\prod_{j=1}^{i-1} \tau_j(\lambda, \theta) \right] L_{\lambda, bb}(T_i) \quad (8)$$

将各层大气对地面的辐射求和, 即可得到地面观测到的仰角为 θ 角方向的大气辐射造成的天空光谱辐射亮度

$$L_{\lambda}(\theta) = \sum_{i=1}^n \{ [1 - \tau_i(\lambda, \theta)] \left[\prod_{j=1}^{i-1} \tau_j(\lambda, \theta) \right] L_{\lambda, bb}(T_i) \} \quad (9)$$

已知各层大气的温度、压力、密度分布及透过率后, 就可求出大气辐射形成的天空辐射亮度的分布.

2.3 大气路径的辐射衰减

由辐射源发出的光辐射都需经过大气才能到达红外探测器并被其接收, 而大气的吸收和散射将使辐射在传输过程中受到衰减. 由于大气中存在多种微粒子, 如形成云、雾、雨等的复合粒子以及工矿企业向大气排放的其他悬浮微粒, 即气溶胶. 这些微粒子的限度主要在 $15 \mu\text{m}$ 以下且大小分布不均, 并散布于大气中. 由于其限度可与红外电磁波的波长相比拟, 对红外波段电磁波的散射、吸收影响极大. 大气衰减因素包括大气分子的吸收、散射和气溶胶的吸收、散射 4 个方面.

2.4 目标辐射与天空背景辐射的对比度

入射到红外探测器上的目标光谱辐射功率为^[8]

$$P_{\lambda} = \frac{J_{\lambda} \tau_{\alpha} A_0 K}{R^2} = \frac{J_{\lambda} e^{-\alpha R} A_0 K}{R^2} \quad (10)$$

式中, J_{λ} 为目标红外光谱辐射强度; τ_{α} 为大气透过率; α 为大气衰减系数; A_0 为光学系统接收面积; K 为光学系统透过率; R 为目标距离.

红外系统前端处理单元将探测器上的红外目标辐射转换成灰度值. 前端处理单元所采集的目标灰

度 C_M 与 P_{λ} 的关系可写成

$$C_M = \beta G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{\lambda} d\lambda \quad (11)$$

式中, β 为固定的系数; G 为增益.

由式(10)和式(11)可知, 前端处理单元所采集的目标灰度 C_M 与目标红外光谱辐射强度 J_{λ} 和目标距离 R 之间的关系为

$$C_M = \beta G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{\lambda} d\lambda = \beta G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{J_{\lambda} e^{-\alpha R} A_0 K}{R^2} d\lambda = \beta G A_0 K \frac{e^{-\alpha R}}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_{\lambda} d\lambda \quad (12)$$

前端处理单元所采集的天空背景灰度 C_B 为

$$C_B = \beta G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{A_0 K \Omega \tau_d}{C \tau_z} L_{\lambda}(\theta) d\lambda = \beta G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sum_{i=1}^n \{ [1 - \tau_i(\lambda, \theta)] \left[\prod_{j=1}^{i-1} \tau_j(\lambda, \theta) \right] L_{\lambda, bb}(T_i) \} d\lambda \quad (13)$$

目标辐射与天空背景辐射灰度图像的对比度为

$$N = \frac{C_M - C_B}{C_M + C_B} \quad (14)$$

若红外系统的检测阈值对比度为 N_0 , 则目标辐射与天空背景辐射灰度图像的对比度需满足 $N > N_0$ 才能被检测出来.

3 距离推算公式

若由已知某目标的探测距离 R_{G1} 推算其他目标的探测距离 R_{G2} , 通过以上距离推算考虑的主要因素分析, 可由式(5)、式(9)、式(14)分别计算出目标、天空背景的辐射强度 and 对比度, 在满足对比度 $N > N_0$ 的条件下, 按如下方法进行距离推导.

将红外系统的理想作用距离方程中与系统自身相关的因素用系数 ρ 来代替, 只保留目标辐射强度、大气透过率等因素的影响, 式(2)可简化为

$$R^2 e^{\alpha R} = \rho J \quad (15)$$

由此可得出红外系统的作用距离与目标辐射强度之间的关系曲线如图 1 所示. 从图 1 可以看出, 红外系统作用距离的大小受红外目标辐射强度的强弱影响变化是缓慢的, 当辐射强度超过一定数值后, 成倍地增加辐射强度也不会对作用距离产生太多影响.

由于自然界中存在着多种红外辐射源, 为避免产生虚警, 信息处理单元需对探测器得到的各种红外目标的灰度值进行信息处理. 通常将一段时间内的数据帧进行相关处理, 找出持续出现的运动角速

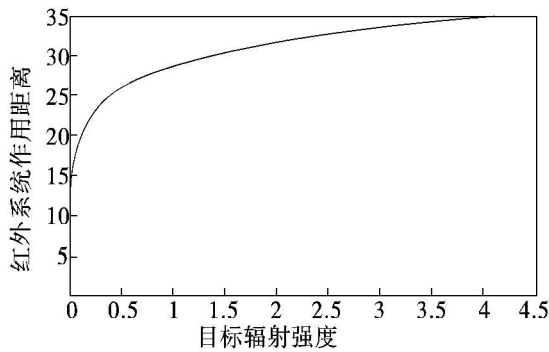


图 1 红外系统作用距离与目标辐射强度之间的关系曲线图

度不大的目标.若目标在固定的飞行高度 H 沿径向以飞行速度 V 匀速飞行,则探测距离应该是

$$R_G^2 = (\sqrt{R^2 - H^2} - V\tau_z n)^2 + H^2 \quad (16)$$

式中, n 为信息处理需要的搜索周期数(为了保证系统具有较远的作用距离,一般不会超过 3 个搜索周期).式(14)和式(15)就是红外探测距离的推算公式.

假设检测阈值对比度为 N_0 ,且已测目标和未测目标辐射与天空背景辐射灰度图像的对比度均满足 $N > N_0$,则可由已测目标的探测距离 R_{G1} 推算出未测目标的探测距离 R_{G2} .计算公式如下

$$R_1^2 = (\sqrt{R_{G1}^2 - H^2} + V\tau_z n)^2 + H^2 \quad (17)$$

$$R_2^2 e^{aR_2} = \rho J_2 = \frac{R_1^2 e^{aR_1}}{J_1} J_2 \quad (18)$$

$$R_{G2}^2 = (\sqrt{R_2^2 - H^2} - V\tau_z n)^2 + H^2 \quad (19)$$

首先由式(16)计算出对应于已测目标的作用距离 R_1 ,然后由式(4)计算出已测目标和未测目标的红外辐射强度,其次通过式(17)推算出未测目标的作用距离 R_2 ,最后再由式(18)计算出未测目标的探测距离 R_{G2} .

4 结束语

由红外系统的理想作用距离方程出发,重点分析了红外目标辐射强度、天空背景辐射强度、大气透光率和目标与背景的对比度对作用距离的影响,进而推导出了地空红外探测系统对目标的探测距离.

参考文献

- [1] 杨宜禾,岳敏,周维真.红外系统[M].2版.北京:国防工业出版社,1995.
- [2] 姜宏滨.用 NETD 表达的红外作用距离方程[J].光学与光电技术,2003(6):40-41.
- [3] 徐南荣,瞿荣贞.飞行器的红外特性[J].红外与激光工程,1999(2):8-14.
- [4] 陈炳峰,方亦浩,徐晓刚.飞机的红外辐射特征研究[J].航空兵器,2005(5):30-32.
- [5] 徐南荣,朱谷君.热空腔—喷气流的组合辐射[J].航空动力学报,1995(10):295-298.
- [6] 成斌,赵威,杨宝庆,等.光电对抗装备试验[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [7] 徐南荣.卞南华红外辐射与制导[M].北京:国防工业出版社,1997.
- [8] 姜宏滨.舰载红外警戒系统中的距离估算[J].红外与毫米波学报,1999(12):438-442.

(上接第 21 页)

过多次墙体漫反射和大气散射的照明均匀性相比仍然存在很大差距,在设计中可以采用复眼反射、透镜阵列和自由曲面反射等方法提高主动照明的均匀性,相关技术可参考文献[5-7].

参考文献

- [1] 田捷,杨鑫.生物特征识别技术与理论[M].北京:电子工业出版社,2005.
- [2] 包桂秋,林喜荣,苏晓生,等.基于人体生物特征的身份鉴别技术发展概况[J].清华大学学报(自然科学版),

2001,41(4/5):72-76.

- [3] 张敏贵,周德龙,潘泉,等.生物特征识别及研究现状[J].生物物理学报,2002,18(2):156-162.
- [4] 王智,杨简,金光.激光主动照明成像技术[J].长春理工大学学报,2004,27(4):101-104.
- [5] 丁毅,顾培夫.实现均匀照明的自由曲面反射器[J].光学学报,2007,27(3):540-544.
- [6] 沈默,李海峰,陆巍,等.用于 LED 照明的反射型复眼设计方法[J].光子学报,2006,35(1):93-95.
- [7] 匡丽娟,翟金会,阮玉,等.复眼透镜阵列应用于均匀照明系统的特性研究[J].光学与光电技术,2005,3(6):29-31.