

红外探测系统参数关系及实际应用

许中胜

(华中光电技术研究所 武汉 430074)

摘要 随着大量红外探测系统的使用,系统中各参数间的相互关系及其优化设计就摆到我们的议事日程。如何建立基本的红外探测方程参数间的数学模型及其公式,对跟踪探测能力具有极为重要的影响。本文重点讨论红外系统中灵敏度、信噪比和作用距离的关系检测方法和实际应用研究的结果,并给出最新的公式。

关键词 红外探测系统 参数关系公式 实际应用

中图分类号 TN215 **文献标识码** A

1 引言

红外探测系统的探测距离与探测的信噪比有着直接的关系,系统信噪比对已知探测灵敏度和提取能力直接决定系统作用距离,系统各参数的相互关系公式对于系统论证设计,评审工作有很重要的意义,特别是红外系统探测能力的预测,现有的公式存在偏差,因此我们有必要经过推导验证并建立更准确实用的关系公式。

2 基本关系公式的建立

我们可以由基本探测方程、基本定义导出如下关系式:

$$R = \left(\frac{J_{\Delta\lambda} \cdot \tau_u}{NEFD \cdot S_n R} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$NEFD = NETD \left\{ \frac{\alpha \cdot \beta \cdot \tau_{\Delta\lambda} \frac{C_2}{\lambda_b \cdot T_B^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda}(T_B) d\lambda}{K_B \cdot \pi} \right\} \quad (2)$$

式中: $J_{\Delta\lambda}$ —— 目标波段能量, W/sr ;

$\tau_{\Delta\lambda}$ —— 大气透过率, 0.8~ 0.9;

$NEFD$ —— 噪声等效通量密度, W/cm^2 ;

$NETD$ —— 噪声等效温差, K ;

α, β —— 角分辨率, rad ;

C_2 —— 第二辐射系数, $1.4388 \times 10^{-2} mK$;

λ —— 平均波长;

T_B —— 温度, K ;

K_B —— 弥散斑收集效率 0.4;

$$J_{\Delta\lambda} = A_t \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon \cdot w(\lambda T_t) d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_b w(\lambda T_b) d\lambda \right] \quad (3)$$

式中: A_t —— 目标面积, cm^2 ;

$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon w(\lambda T_t) d\lambda$ —— 目标光谱辐射通量密度, W/cm^2 ;

$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_b w(\lambda T_b) d\lambda$ —— 背景光谱辐射通量密度, W/cm^2 ;

对已知 D^* 值、 A_d 、 \mathcal{L} 值的系统, 把(3)、(2)代入(1)中转化出:

$$R = \left\{ \frac{A_0 \tau_a \tau_d^* A_t}{SnR \sqrt{A_d \mathcal{L}}} \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_t w(\lambda T_t) d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_b w(\lambda T_b) d\lambda \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中: A_0 —— 光学口径面积, cm^2 ;

A_d —— 单元探测器面积, cm^2 ;

D^* —— 探测度, $cmHz^{1/2}/W$;

τ_0 —— 光学效率;

τ_e —— 能量转换因子, 0.75;

\mathcal{L} —— 系统噪声带宽, Hz 。

对已知 $NETD$ 的系统, 按点目标计算, 可以导出:

$$R = \left[\frac{J_{\Delta\lambda} \cdot \tau_d}{NETD \cdot K_{\Delta\lambda} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot SnR} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$K_{\Delta\lambda} = \frac{\tau_{\Delta\lambda}}{\pi K_B} \cdot \frac{C_2}{\lambda \cdot T_B^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda}(T_B) d\lambda \quad (6)$$

可以计算出:

$$K_{3-5} = 6.29 \times 10^{-6} W/cm^2 Hz/K$$

$$K_{8-12} = 5.67 \times 10^{-5} W/cm^2 Hz/K$$

$$\text{对于 } \frac{A_t}{R^2} \geq \frac{A_d}{f^2} \text{ 时, 取 } K_n = \frac{A_t / R^2}{A_d / f^2} \quad (7)$$

则有:

$$R = \left[\frac{\pi(D^2/f) \cdot D^* \cdot J_{\Delta\lambda} \cdot \tau_0 \cdot \tau_a}{2(W \Delta f)^{\frac{1}{2}} \cdot S_n R \cdot K_n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$R = \left[\frac{J_{\Delta\lambda} \cdot \tau_a}{K_{\lambda} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot NETD \cdot S_n R \cdot K_n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中: $W = A_d/f^2 = \alpha \cdot \beta$ (10)

$$\Delta f = \frac{1}{2\tau_d} \sim \frac{\pi}{4\tau_d} \text{ 取 } \frac{\pi}{4\tau_d} \quad (11)$$

$$\tau_d = \frac{n}{\text{行频} \times \text{像元/行}} = n\tau_{d0} \quad (12)$$

n —— 并扫像元数(TDI 扫积型);

D —— 接收口径, cm^2 ;

f —— 焦距, cm^2 ;

τ_{d0} —— 探测器驻留时间, s_0 .

将(10)、(11)、(12)代入(8)中有:

$$R = \left[\frac{\pi \cdot (D^2/f) \cdot D^* \cdot J_{\Delta\lambda} \cdot \tau_0 \tau_a}{\left(\frac{\pi W}{n\tau_{d0}}\right)^{\frac{1}{2}} S_n R \cdot K_n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

由式(13)可知, D^* 、 n 、 D 、 f 、 w 和提取能力 $S_n R$ 直接决定了作用距离 R , 提高 D^* 和 n 值, 减少 W 和 $S_n R$ 值是提高探测能力的最有效措施。信噪比由下式确定:

$$\begin{aligned} S_n R_0 &= S_n R_t + S_n R_d = \frac{V_T}{V_n} + \sqrt{2 \ln \frac{1}{1-P_d}} \\ &= \sqrt{2 \ln \frac{1}{P_f}} + \sqrt{2 \ln \frac{1}{1-P_d}} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: P_f —— 虚警概率;

P_d —— 捕获概率;

V_T —— 阈值电平, V;

V_n —— 噪声均方根电平, V;

$S_n R$ —— 要求的提取信噪比。

3 实际应用和结论

实际上, $S_n R$ 是 R 和 K_n 的函数即

$S_n R_0(R) = S_n R_0 \cdot f(K_n) \cdot f(K_n)$,
 $f(K_n)$ 的数值范围在 1 ~ 4 之间, 由于
 $f(K_n)$ 函数较复杂这里不再深入研究。

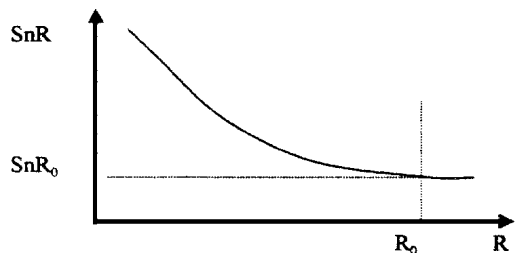


Fig. 1 The relation between $S_n R$ and R

由(5)式和(8)式导出实际的信噪比关系式:

$$SnR = \frac{J_{\Delta\lambda} \cdot \tau_a}{K_n \cdot NEFD \cdot K_{\Delta\lambda} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot R^{2f}(K_n)} \quad (15)$$

取 $\tau_a = e^{-aR}$

$$\text{设: } SnR_0 = \frac{J_{\Delta\lambda} \cdot e^{-aR}}{K_n \cdot NEFD \cdot K_{\Delta\lambda} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot R_0^{2f}(K_{n0})}$$

则: R_0 为最大作用距离。

SnR 是 R 的函数, 关系曲线如图 1 所示。

$$\begin{aligned} SnR &= \frac{K_n(R_0) \cdot R_0^2}{K_n(R) \cdot R^2} \cdot \frac{e^{-aR}}{e^{-aR_0}} \cdot SnR_0 \\ &= e^{a(R_0 - R)} \cdot SnR \end{aligned} \quad (16)$$

求导得出:

$$\Delta SnR = -a \cdot e^{a(R_0 - R)} \cdot \Delta R \cdot SnR_0 \quad (17)$$

取 $a = 0.12$, $SnR_0 = 10$, $\Delta R = 300\text{m}$, 则有如下结果:

$$\begin{pmatrix} R \\ \Delta SnR \\ SnR \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10\text{km} & 9\text{km} & 8\text{km} & 7\text{km} & 6\text{km} & 5\text{km} & 4\text{km} & 3\text{km} & 2\text{km} & 1\text{km} \\ 0.37 & 0.406 & 0.457 & 0.515 & 0.581 & 0.651 & 0.740 & 0.834 & 0.940 & 1.06 \\ 10 & 11.27 & 12.71 & 14.33 & 16.16 & 18.22 & 20.54 & 23.16 & 26.12 & 29.45 \end{pmatrix}$$

SnR 随 R 的变化规律, 可以用于目标的识别、威胁判断以至距离估算, 在应用中具有极为重要的作用。

由于预定系统的弥散性、不均匀性、不稳定性和外部环境变化、背景干扰等因素, 实际系统具有突变性、不均匀性。近距离均匀性会相对较好。

实际应用中, $J_{\Delta\lambda}$ 是 λ 和 T 的函数, 如式(3)所示。 τ 也不是常数, 是 λ 的函数。因此有:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_0(\lambda) \cdot J_{\Delta\lambda}(X) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A_t [\xi \tau_0(\lambda) W(\lambda T_t) - \xi_b \tau_0(\lambda) W(X T_b)] d\lambda \quad (18)$$

由式(17)可知, 我们可以通过设计和调整最佳的 $\tau_0(\lambda)$ 函数, 来获得与 $W(X T_b)$ 的函数差异最大的值(即最大探测对比度), 为此我们必须研究目标特性及其变化规律, 研究环境特性及其变化规律。由于这些函数规律的极端复杂性以及投入过高, 导致目前得不到充分的研究和使用, 而目标与环境特性的相互关系函数研究对于提高探测能力将具有实质性的重要意义。

现代红外设备使用频率越来越高, 越来越广泛, 而且越来越先进。我们应当确实搞好研制试验工作, 特别是有关性能参数的相互关系和仿真研究。本文根据试验研究的结果提出了一些重要的理论计算公式、数学模型和分析方法, 并举例进行计算, 可供有关工程设计参考和使用。

参 考 文 献

- 1 Andresen Bjorn F, Itzhak Ben Darvid, Shlomo Glazer, et al. Surface basedIRST: A selection process for sensor parameter values. Proc SPIE, 1997, 3061: 712720

- 2 许中胜. 光电跟踪仪规范. GJB20075-92, 上海, 1992
- 3 (苏) 克里克苏克 JI3 主编. 红外技术原理. 北京: 国防工业出版社, 1986
- 4 陈光余. 红外成像导引头作用距离估算. 红外与激光技术, 1995, 24(1): 61
- 5 Marine Atmospheric Effects on Electro-optical Systems Performance, Opt Eng 1991, 30(11): 1804-1820

Infrared detection system parameter relation formula and practical application

XU Zhong-Sheng

(*Hua Zhong Institute of Electro-Optical Technology, Wuhan 430074*)

Abstract

With a large infrared detection system applied, parameter in system mutuality and optimal design run over to our order of the day. How does establish basic infrared detection equation and system parameter relation mathematical model, which assume important affect in detect ability and track ability. Text emphases on discussing sensitivity, signal to noise ratio and decisive range parameter relation in infrared system and result on practical application and sets up the minute relation formula.

key word: Infrared detection system, Parameter relation formula, Practical application

许中胜 男, 37 岁, 现主管光电跟踪设备研制工作。已在国内学术刊物发表论文十余篇。曾获科技进步二等奖, 优秀论文一等奖。