

红外焦平面凝视热成像系统评估方法研究

吴小平 周起勃 邬敏鸣 匡定波

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要: 研究了红外焦平面凝视热成像系统的评估方法和评估 *MRTD* 数学模型, 并在所建立的评估实验室中对数学模型的可行性进行了验证.

关键词: 红外焦平面, 凝视热成像, 评估模型.

引言

由于凝视式红外焦平面 (S-IRFPA) 具有能高速实时成像, 单元光积分时间长, 无需复杂的光机扫描装置和传输信息量大等优点, 世界各国越来越重视焦平面的研究与应用. 几年来, 我们开展了有关凝视热成像系统的研究工作, 并对凝视热成像系统的性能评估方法及评估数学模型进行了研究与探索. 根据凝视热成像系统的特点, 建立了相适应的评估数学模型, 编制了一套系统设计与评估软件, 并在实验中对该模型及软件进行了正确性与实用性检验.

1 评估方法与评估数学模型的建立

近年来, Mooney^[1]、Thevdt^[2]、Deraniak^[3] 和 Leo^[4]对凝视式红外焦平面热成像系统的评价提出了一些建议和模型. 文献 [1] 证明了用信噪比进行评估的好处, 但没有考虑到其它因素的影响; 文献 [2] 建立了一个计算机模型, 考虑了焦平面的敏感性、空间运动和传递函数 (*MTF*) 的影响, 但未考虑占空比及人眼效应等因素; 文献 [3] 认为不能用一个评估因子来全面评估凝视系统, 建议采用占空比、空间分辨率、*MTF*、量子效应和光积分时间 (或帧频) 等 5 个因子来评估凝视系统. 文献 [4] 对原始的美国夜视实验室静态性能模型 (NVL 模型)^[5]进行改进, 重新定义了电子噪声等效带宽 Δf_n , 但仍沿用了扫描系统的噪声等效温差 *NETD* 表达式, 因而仍不能客观全面地对凝视系统进行设计指导和性能评估.

我们提议采用一种既直观又全面的评估方法, 并采用单一的评估因子来评估凝视系统, 该评估因子必须是一个既能反映凝视系统空间性能又能评价凝视系统温度性能的参数, 考

本文 1993 年 1 月 14 日收到, 修改稿 1993 年 5 月 3 日收到.

考虑到 D^* 和 $NETD$ 等参数只适合于光机扫描系统的评价, 而最小可分辨温差 $MRTD$ 能将凝视系统的空间分辨率与温度分辨率密切联系起来, 为此, 我们建立了一个新的凝视系统的 $MRTD$ 数学模型, 该模型综合考虑了光敏占空比、 MTF 、信噪比、光积分时间和器件响应非均匀性等参数的影响, 因此, 该模型能全面直观地描述凝视系统的性能, 可指导凝视系统的参数设计与性能评估.

我们以 PtSi 肖特基势垒焦平面系统为例来建立 $MRTD$ 评估模型. PtSi 肖特基势垒器件的响应为

$$R(\lambda) = C_e \left(1 - \frac{\varphi_{ms}\lambda}{1.24}\right)^2, \quad (1)$$

式 (1) 中 C_e 为量子效应系数, φ_{ms} 为势垒高度.

目标 ΔT 温度变化引起的信号电流变化量为

$$\begin{aligned} \Delta i_s &= \eta_{FP} \cdot A_{FP} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda \cdot \Delta E(\lambda) d\lambda \\ &= \left[\frac{\eta_{FP} A_{FP}}{4F^2} \cdot \frac{C_1 C_2 C_e}{T_0^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(1 - \frac{\varphi_{ms}\lambda}{1.24}\right)^2 \cdot \frac{e^{-C_2/\lambda T_0}}{\lambda^5} d\lambda \right] \cdot \Delta T; \end{aligned} \quad (2)$$

式 (2) 中 η_{FP} , A_{FP} 分别为焦平面光敏占空比和单元总面积, F 为光学系统 F 数, T_0 为背景温度, C_1 , C_2 分别为第一、第二黑体辐射常数.

从式 (2) 可见, 对于给定系统、给定波段和一定的环境温度, 中括号中的量值为—常量, 记为 K , 则

$$\Delta i_s = K \cdot \Delta T. \quad (3)$$

由式 (3) 可见, 信号电流变化量同目标温度变化量成线性正比关系. 凝视系统的主要电子噪声源为: 器件背景噪声电流 I_B , 非均匀性引起的固定图形噪声 I_F , 暗电流噪声 I_D 和处理电路、滤波电路带来的噪声 I_p 等.

定义凝视系统电子噪声等效带宽 $\Delta f_n = \frac{1}{2\tau} = \frac{F_R}{2}$, 其中 τ 为单元光积分时间, F_R 为帧频, 则背景噪声电流为:

$$I_B^2 = \frac{q \cdot \eta_{FP} \cdot A_{FP} \cdot F_R \cdot C_1 \cdot C_e}{2F^2 \cdot \eta_c} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(1 - \frac{\varphi_{ms}\lambda}{1.24}\right)^2 \cdot \frac{e^{-C_2/\lambda T_0}}{\lambda^5} d\lambda, \quad (4)$$

式 (4) 中 η_c 为冷屏系数.

固定图形噪声电流 I_F 为

$$I_F^2 = M \cdot I_B^2; \quad (5)$$

式 (5) 中 M 为固定图形噪声调制因子, 它表征了器件非均匀性误差的大小.

暗电流噪声 I_D 为

$$I_D^2 = 2q \cdot \eta_{FP} \cdot A_{FP} \cdot \Delta f_n \cdot J_D. \quad (6)$$

PtSi 肖特基势垒器的暗电流强度 J_D 为

$$J_D = A_R \cdot T_{FP}^2 \cdot e^{-\frac{q\phi_{ms}}{kT_{FP}}}, \quad (7)$$

式(7)中 A_R 为硅的 Richardson 常数, T_{FP} 为焦平面环境温度, k 为 Boltzmann 常数.

式(7)中 J_D 对 T_{FP} 极为敏感, 当 $T_{FP}=77\text{K}$ 时, J_D 为一最小值点, 故一般采用液氮来冷却硅化铂焦平面的工作环境.

除以上三种主要噪声外, 凝视系统还存在处理电路带来的噪声 I_p 以及其它额外噪声 I_E , 所以凝视系统总噪声可近似综合为

$$I_N = (I_B^2 + I_F^2 + I_D^2 + I_p^2 + I_E^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

根据信噪比的定义可得 SNR 表达式为:

$$SNR = \frac{I_s}{I_N} = \frac{K \cdot \Delta T}{(I_B^2 + I_F^2 + I_D^2 + I_p^2 + I_E^2)^{\frac{1}{2}}}, \quad (9)$$

令 $SNR=1$, 求得系统噪声等效温差 $NETD$ 为

$$NETD = \frac{1}{K} (I_B^2 + I_F^2 + I_D^2 + I_p^2 + I_E^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

从式(10)及上述各式可知, 该 $NETD$ 表达式中既考虑了焦平面元数、响应率、占空比、制冷状况、量子效应探测面积等参数的影响, 又考虑了光学系统参数、帧频和电子带宽的影响, 同时还考虑了非均匀性误差引起的固定图形噪声和暗电流噪声, 因此它较全面地反映了凝视系统的响应信号和噪声.

在应用扫描系统原始模型推导凝视系统 $MRTD$ 模型时, 除了要引入新 $NETD$ 表达式外, 其它一些参数, 如扫描速度和电子噪声等效带宽也需重新等效或再定义. 将扫描速度等效为

$$V = N \cdot F_R, \quad (11)$$

式(11)中 V 为凝视系统等效扫描速度, N 为焦平面元数. 上面已将凝视系统电子噪声等效带宽定义为

$$\Delta f_n = \frac{F_R}{2}. \quad (12)$$

扫描效率在凝视系统中等于 1, 扫描瞬时视场等于焦平面单元视场大小, 可推导出凝视系统 $MRTD$ 的表达式为 (推导过程见附录)

$$MRTD(f_x) = \frac{\pi^2}{4\sqrt{14}} \cdot \frac{SNR}{MTF(f_x)} \cdot NETD \cdot f_x \cdot \left(\frac{\Delta y \cdot N}{F_R \cdot \tau_E} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (4f_x^2 (\Delta y)^2 + 1)^{-\frac{1}{4}}; \quad (13)$$

式 (13) 中 SNR 为人眼分辨目标所需信噪比, f_x 为目标空间频率, τ_E 为人眼光积分时间, Δy 为单元探测视场, $NETD$ 为式 (10) 表示的噪声等效温度差值.

2 实验与结果

根据所建评估数学模型, 我们编制了一套有关凝视系统参数设计和性能评估的计算机软件包, 它能帮助我们对系统主要参数进行选择 and 性能预测. 同时我们在实验室中对评估模型和计算软件进行了实验验证. 实验装置示意图如图 1 所示.

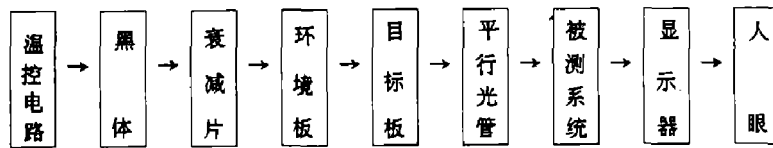


图 1 实验装置示意框图
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental equipment

图 2 中表示了被测系统的 $MRTD$ 的实际测量曲线和模型理论计算曲线, 并同 Kennedy 模型计算值进行了比较. 由图 2 可见, 我们的模型计算值更接近实测值, 尤其是在高空间频率段, 该模型值更客观地反映了实测值及其趋势. 证明了本模型对指导凝视系统的设计和进行性能评估具有一定的实用价值.

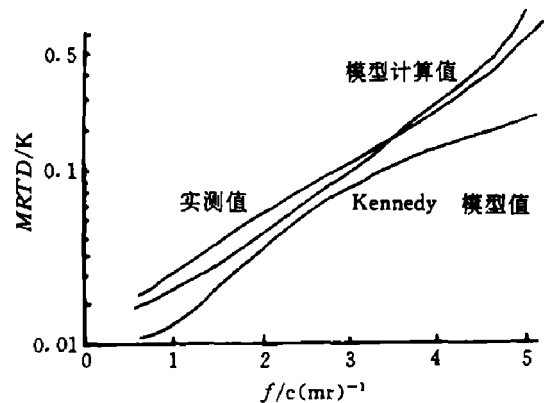


图 2 实验结果与模型计算值比较
Fig. 2 Comparison of experimental results and modeling calculation

附录

文献 (5) 中 NVL 模型为

$$MRTD(f_x) = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{SNR}{MTF(f_x)} \cdot \frac{NETD}{L \int_{-\infty}^{\infty} H_L^2 H_D^2 df_y} \left[\frac{\Delta y v}{\Delta f_n F_{RTE}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} H_E^2 H_D^2 H_W^2 H_L^2 H_d^2 df_x df_y \right]^{\frac{1}{2}}, \tag{A1}$$

式 (A1) 中

$$NETD = \frac{4F^2(\Delta f_n)^{\frac{1}{2}}}{\pi(N A_d)^{\frac{1}{2}} \cdot \tau_a \cdot \tau_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D_{\lambda}^* \cdot W'_{\lambda} d\lambda}$$

将凝视系统的 $NETD$ 表达式, v 值和 Δf_n 值代入式 (A1) 并对该表达式进行相应修改和简化, 并令

$$\begin{aligned} q_y &= L \int_{-\infty}^{\infty} H_L^2 H_D^2 df_y, \\ P_x &= 2W \int_0^{\infty} H_E^2 H_d^2 H_W^2 df_x, \\ P_y &= L \int_{-\infty}^{\infty} H_L^2 H_D^2 H_d^2 df_y; \end{aligned}$$

式中 L 、 W 分别代表目标长度和宽度对系统的角度毫弧度值, $L = \frac{7}{2f_x}$, $W = \frac{1}{2f_x}$, 则

$$MRTD(f_x) = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{SNR}{MTF(f_x)} \cdot \frac{NETD}{q_y} \left(\frac{\Delta y v}{F_R \cdot \tau_E \cdot \Delta f_n} \cdot \frac{2}{7} f_x^2 \cdot P_x P_y \right)^{\frac{1}{2}},$$

即

$$MRTD(f_x) = \frac{\pi^2}{4\sqrt{14}} \cdot \frac{SNR \cdot NETD \cdot f_x}{MTF(f_x) \cdot q_y} \left(\frac{\Delta y \cdot N}{F_R \cdot \tau_E} \cdot P_x \cdot P_y \right)^{\frac{1}{2}}.$$

在凝视系统中, 扫描效率等于 1, 因此 Δy 值就是焦平面 y 方向的瞬时视场值.

因为目标图形长度相对系统响应是很长的, 即匹配滤波传递函数同响应函数相比很窄, 所以长度方向的量值 P_y 和 q_y 可近似等于 1. 而 P_x 的近似式可推导出为

$$P_x = [4f_x^2 \cdot (\Delta x)^2 + 1]^{-\frac{1}{2}},$$

即可得文中式 (13) 凝视系统静态 $MRTD$ 表达式.

参考文献

- 1 Mooney *et al.* *Optical Engineering*, 1987;26:223~227
- 2 Thevdt *et al.* *Proceedings of SPIE*, 1987;819:250~261
- 3 Deraniak *et al.* *Optical Radiation Detectors*, New York: Wiley, 1984
- 4 leo O Vroombout. *Proceedings of SPIE*, 1990,1309:17~26
- 5 Ratch JA *et al.* *Report ADA011212*, 1975

STUDIES ON EVALUATING METHODS FOR STARING THERMAL IMAGING SYSTEMS USING IR FOCAL PLANE

WU XIAOPING, ZHOU QIBO, WU MINMING, KUANG DINGBO

*(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences
Shanghai 200083, China)*

Abstract: The evaluating method and *MRTD* mathematics model for staring thermal imaging systems with IR focal plane were studied, and the model was proved by experiments in the laboratory.

Key words: IR focal plane, staring thermal imaging, evaluating model.