

并利用背景杂波修正的探测准则,模拟计算了 3 种典型运动情况,不同等级杂波的系统鉴别(探测、识别和辨别)性能. 模拟结果显示运动效应和背景杂波都是系统评估不可忽视的因素.

1 红外成像系统静态性能模型

在红外成像系统中,最小可分辨温差 (MRTD) 是综合评价系统温度分辨力和空间分辨力的重要参数,它不仅包括了系统特性,也包含了观察者的主观因素. 静态性能模型正是以红外成像系统综合性能参量 MRTD 数学模型为基础,把系统调制传递函数 (MTF) 和噪声等效温差 (NETD) 联系起来,综合考虑系统各因素对系统性能的影响. 利用 MRTD 曲线和约翰逊准则,并考虑到大气的衰减,把场景的目标特征和系统的性能参量 MRTD 联系起来,就可以预测到不同分辨等级对应的系统作用距离和探测概率. MRTD 为角空间频率 f 的函数,其理论表达式^[4]为

$$MRTD = \frac{MRTD_0}{(\varepsilon/\tau)} \cdot \exp(\beta_{sys}f). \tag{1}$$

式(1)中 $MRTD_0$ 为角频率为 0 时极限最小可分辨温差. β_{sys} 为系统的传递系数, ε 为目标的纵横比.

2 运动对性能影响的分析

红外成像系统成像过程通常存在 3 种运动形式:线性运动,正弦波运动和随机运动. 线性运动来源于目标运动(相对于成像系统)或探测器的图像运动:正弦运动主要来源于不平衡的扫描镜、飞机和车辆上的马达或涡轮的震动;随机运动主要来源于积分时间内图像的随机漂移. 这些运动通常模糊目标的细节,使图像的空间分辨率降低. 为了描述运动对图像分辨率的影响,本文采用运动效应引起的调制传递函数,定量地分析其对图像的模糊,并对这 3 种运动分别讨论,探讨其对 MRTD 的影响.

线性、正弦和随机 3 种运动引起的运动传递函数可表示为:

$$MTF_{motion} = MTF_{linear} MTF_{sinusoidal} MTF_{random}. \tag{2}$$

其中 MTF_{linear} , $MTF_{sinusoidal}$, MTF_{random} 分别为线性、正弦和随机 3 种运动的传递函数. 下面我们利用近似方程对每一个运动的大小进行量化. 由于调制传递函数 (MTF) 为对比度的调制,而光学传递函数 (OTF) 包含对比度调制传递和相位调制传递,我们可以用 OTF 来讨论.

2.1 线性运动

线性运动来源于目标和探测器平台的相对运动. 由于探测器积分时间很小,加速度对分辨率的影响比较小,因此,本文仅考虑匀速运动的情况. 假设目标或背景相对于成像系统视线垂直方向的速度为 v (平行于视线的运动很小,暂不考虑),目标与传感器的距离为 d . 则在探测器的积分时间 t_1 内,运动的角距离为 $a_1 = \frac{v \cdot t_1}{d}$,从而场景中的一条线将成像为矩形条带,即运动引起的点扩散函数为矩形函数,其傅立叶变换为辛格类型传递函数.

$$OTF_{linear}(f) = \text{sinc}(\pi a_1 f). \tag{3}$$

其中 f 为角空间频率,探测器的积分时间取决于探测器的类型:对于凝视型探测器,积分时间 $t_1 = \frac{1}{F_R I_F}$,上式中 F_R 为帧率, I_F 为探测器的隔行因子;对于扫描性探测器,积分时间 $t_1 = \tau_D$, τ_D 为探测器的时间常数.

线性运动只影响运动方向上的 OTF. 图 1 显示了不同归一化因子的线性运动引起的 OTF 曲线,实验室假设目标不运动,即 a_1 假设为 0. 由图 1 可以看出:当线性运动角距离小于探测器张角 (DAS) 的 20% 时,OTF 曲线衰减趋势不太明显. 随着线性运动速度的增大,OTF 逐渐变成负值,负的 OTF 表示发生了相位反转,将严重影响着系统的空间分辨率.

线性运动对整个系统传递函数的影响如图 2 所示,从图 2 可以看出:积分时间内,线性运动的角距离相对于 $DAS < 20\%$ 时,其对系统空间分辨率影响不大. 当线性运动角距离相对于 $DAS > 20\%$ 时,将严重恶化系统的性能.

2.2 正弦运动

红外成像系统的正弦运动效应主要来自不平衡的抛描镜运动、飞机和车辆马达或涡轮的震动,固定

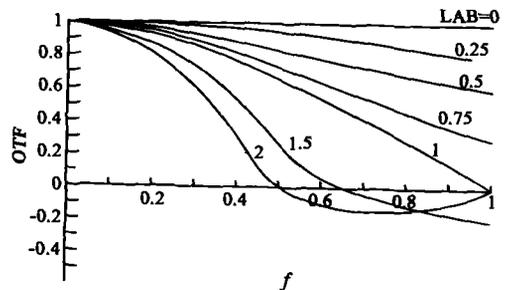


图 1 不同线性运动的归一化因子 (a_1/DAS) 对应的运动 OTF_{linear} 曲线

Fig.1 OTF_{linear} curve corresponding to different normalized (a_1/DAS)

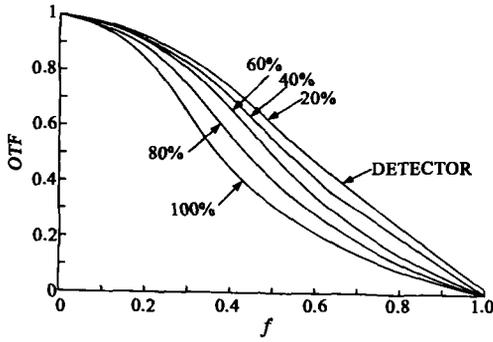


图2 不同线性运动归一化因子(a_1/DAS)对应的系统 OTF 曲线
 Fig.2 System OTF curve corresponding to different normalized (a_1/DAS)

平台结构本身谐振运动. 描述正弦运动效应对图像的模糊,通常采用正弦运动的空间调制传递函数. 一般来说,正弦运动分为高频和低频运动. 高频震动的周期比曝光时间要短,在曝光时间内,有多个震动周期,震动幅度是影响图像效果的主要因素,可近似地用一帧图像计算 MTF. 对于低频运动,低频震动的周期比曝光时间要长. 震动频率将是影响图像效果的主要因素,每帧图像的 MTF 是在变化的,是一个随机过程,我们将在以后的论文中详细讨论. 在此文中主要考虑高频震动的情况,震动幅度对成像系统性能的影响.

正弦运动一般表示为:

$$\theta = a_1 \sin(\omega t). \tag{4}$$

其中, a_1 为振幅, ω 为角频率.

那么高频正弦运动 OTF 函数可表示为:

$$OTF_{\sin \text{ usoidal}}(f) = J_0(2a_1 \pi f). \tag{5}$$

其中 $J_0(x)$ 为零阶 Bessel 函数. 对于 $x \leq 3$, $J_0(x)$ 可由下述五项近似表示:

$$J_0(x) \approx 1 - \frac{x^2}{4} + \frac{x^4}{64} - \frac{x^6}{2048} + \frac{x^8}{147456}. \tag{6}$$

正弦运动只影响运动方向上的 OTF. 图 3 描述了对应不同正弦运动幅度归一化因子($2a_1/DAS$)的 OTF 曲线,实验室中 a_1 假设为 0. 由图 3 可以看出:当峰间运动幅度小于 DAS 的 20% 时,正弦运动 OTF 曲线变化缓慢,而当峰间运动幅度大于 DAS 的 20% 时,OTF 曲线将快速的衰减,即严重影响着系统的空间分辨率.

2.3 随机运动

随机运动主要来源于积分时间内图像随机运动的漂移,也就是图像的抖动,由中心极限定理可知

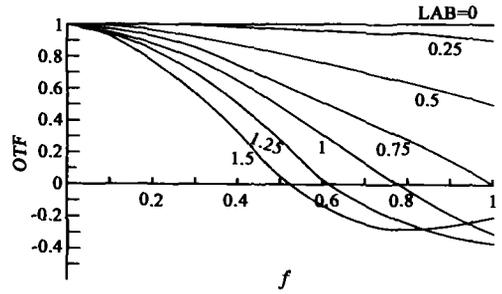


图3 不同正弦运动归一化因子($2a_1/DAS$)对应的 OTF_{sin usoidal} 曲线
 Fig.3 OTF_{sin usoidal} curve corresponding to different normalized ($2a_1/DAS$)

Gaussian OTF 能够描述多种随机运动的漂移.

$$OTF_{\text{random}}(f) = e^{-2(\pi\sigma_r f)^2}. \tag{7}$$

其中 σ_r 为随机均方根漂移,单位为 mrad. 图 3 给出了不同归一化随机漂移因子的随机运动 OTF 曲线,横坐标为归一化空间频率,实验室中假设 σ_r 为 0,由图 4 可以看出:当随机漂移的均方根的值小于 DAS 的 10% 时,随机运动 OTF 曲线下降趋势平缓,即对系统空间分辨率的影响很小,而当归一化因子大于 10% 时,随机运动 OTF 曲线快速递降,即严重影响系统的空间分辨率. OTF_{random} 通常为正值,因此这里不会出现相位反转.

3 动态性能模型

为了准确描述运动对系统性能的影响,我们引入运动传递函数模块对静态性能模型做修正,图像运动将改变系统的消光系数 β_{sys} 为新的消光系数 β_{sys}^* 为新的消光系数 $\beta_{\text{sys}}^{* [7]}$,既然 MRTD 与 β_{sys}^* 指数相关,则考虑了运动效应后,MRTD 与新的 β_{sys}^* 相关.

$$MRTD = \frac{MRTD_0}{(\varepsilon/7)} \cdot \exp(\beta_{\text{sys}}^* f). \tag{8}$$

式(8)中

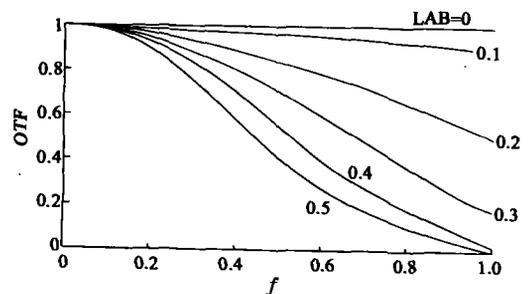


图4 不同随机运动归一化因子(σ_r/DAS)对应的系统 OTF 曲线
 Fig.2 System OTF curve corresponding to different normalized (σ_r/DAS)

$$\beta_{\text{sys}}^* = \beta_{\text{sys}} + \frac{1}{v} \ln \left(\frac{1}{MTF_m(f)} \right), \quad f < f_{r, \max} \quad (9)$$

MRTD 曲线给出了任意空间频率热成像系统能分辨的目标与背景间的最小温差. 从上述方程可以看出 MRTD 与运动传递函数成反比, 随着 MTF 的减小, MRTD 增加, 图像的质量变坏. 图像的运动增加了 β_{sys}^* , 进而增加了 MRTD, 从而使系统的探测概率减少.

4 背景杂波对探测准则的修正

背景杂波是背景辐射的一种起伏分布, 随着背景杂波的增加, 目标的辨别能力减小, 目标的虚警率将增加. Schieder 和 Weathersby 广义地把杂波按信号杂波比 (SCR) 分为 3 个区域^[5]: SCR > 10, 为低等级杂波; 1 < SCR < 10, 为中等等级杂波; SCR < 1, 为高杂波. 背景杂波的特征是红外成像系统性能评估的一个重要部分. 为了预测红外成像系统的外场性能, 设计者将不得不估计背景杂波, 以确定系统工作于哪一个区域. 在以往的红外成像系统静态性能模型中, 一般认为目标是均匀的, 没有考虑杂波对性能的影响, 所以这类模型是粗糙的. 为了修正杂波的影响, 通常采用 2 种方法: 一是利用杂波功率谱密度模型来定量描述背景杂波通过系统后产生的干扰, 也就是在性能评估中对目标特征重新定义或修正, 现在采用 2 种杂波模型——高斯马尔可夫杂波统计模型和巴特沃斯杂波模型表征背景杂波^[6]; 二是在各种典型的背景杂波环境中, 对特定军事目标进行观察试验, 获取各种杂波环境中对应的探测准则, 即对约翰逊准则进行修正. 国外许多试验显示杂波仅影响着目标的探测^[7], 杂波环境中目标的探测准则分为 3 类: 低等级杂波对应的 $N_{50} = 0.75$, 中等等级杂波对应的 $N_{50} = 1$, 高等级杂波对应的 $N_{50} = 3$. 探测准则的修正和目标特征的重新定义是等效的. 在我们的修正模型中, 采用了背景杂波对探测准则的修正.

5 鉴别性能的计算步骤

鉴别性能的计算步骤为:

(1) 确定目标的临界尺寸, 作用距离, 固有温差, 考虑到的大气的衰减为作用距离的函数, 由 Beer 定律计算表观温差:

$$\Delta T_{\text{apparent}} = \Delta T_{\text{inherent}} \exp(-\beta_{\text{atm}} \cdot R). \quad (10)$$

(2) 利用表观温差 $\Delta T_{\text{apparent}}$ 和 MRTD 确定表观温差对应的最大可分辨角空间频率 f .

(3) 利用目标临界尺寸对应的张角, 获取横跨

目标临界尺寸对应的最大可分辨周期数

$$N = f \frac{s}{R}. \quad (11)$$

(4) 利用杂波修正过的探测准则确定的目标传递概率函数 TTPF, 计算得到成像系统对目标的鉴别 (探测、识别、辨别) 概率.

6 仿真计算结果

运动效应及背景杂波引起的鉴别性能仿真实例: 系统及环境参数如表 1, 表 2 所示.

表 1 外场环境参数

Table 1 Field environment parameters

| 背景温度 (K) | 目标温度 (K) | 目标宽度 (m) | 目标高度 (m) | 大气消光系数 (/km) |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|
| 285 | 291 | 2.3 | 2.7 | 0.05 |

表 2 典型 FLIR 成像系统参数 (8 ~ 12 μm)^[8]

Table 2 Typical FLIR imaging system parameters

| MRTD (°C) | β_{sys} (mrad/cys) |
|-----------|---------------------------------|
| 0.0254 | 0.996 |

此模型因考虑了背景杂波对探测准则的修正, 所以探测准则对应的周期数目: 0.75, 1, 3 (低, 中, 高等级杂波探测)、4.6 (识别)、6.4 (辨认).

(1) 当运动距离小于探测器张角 20% 时, 下列运动参数对应的探测、识别、辨认概率 (影响较小) (如表 3 所示). 线性运动角速度 $v = 5 \text{ mrad/s}$; 探测器积分时间 $t_i = 0.0313 \text{ s}$; 正弦运动幅度 $a = 0.05 \text{ mrad}$; 随机转移因子 $d_i = 0.05 \text{ mrad}$.

(2) 当运动距离大于探测器张角的 20% 时, 下列参数对应的探测、识别、辨认概率 (影响较大) (如表 4 所示). 线性运动角速度 $v = 10 \text{ mrad/s}$; 探测器积分时间 $t_i = 0.0313 \text{ s}$; 正弦运动幅 $a = 0.13 \text{ mrad}$; 随机转移因子 $dr = 0.1 \text{ mrad}$.

7 结论

根据模拟数据结果分析可知, 运动效应的加入, 某种程度上影响了系统的鉴别概率, 它们随运动的增加而减小. 当线性运动和正弦运动的幅度小于探测器张角 (DAS) 的 20%, 随机运动的幅度小于探测器张角的 10% 时, 运动对系统外场性能 (探测和识别概率) 的影响较小 (如表 3 所示); 当线性运动和正弦运动的幅度大于探测器张角 (DAS) 的 20%, 随机运动的幅度大于 10% 时, 运动对系统外场性能参数 (概率和作用距离) 的影响比较明显 (如表 4 所示

表 3 上述运动参数下鉴别性能计算结果

Table 3 Discrimination performance result calculated for above motion parameters

| 运动形式 | 探测概率 | | | 识别概率 | 辨认概率 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 低杂波 | 中杂波 | 高杂波 | | |
| 没有运动 | 0.9999 | 0.9879 | 0.7309 | 0.4899 | 0.1810 |
| 线性运动 | 0.9999 | 0.9828 | 0.6849 | 0.4414 | 0.1572 |
| 正弦运动 | 0.9999 | 0.9850 | 0.7038 | 0.4608 | 0.1665 |
| 随机运动 | 0.9999 | 0.9818 | 0.6774 | 0.4340 | 0.1538 |
| 线性和正弦运动 | 0.9999 | 0.9786 | 0.6546 | 0.4118 | 0.1437 |
| 正弦和随机运动 | 0.9999 | 0.9774 | 0.6466 | 0.4043 | 0.1404 |
| 线性和随机运动 | 0.9999 | 0.9740 | 0.6252 | 0.3848 | 0.1319 |
| 3种运动都存在 | 0.9998 | 0.9678 | 0.5913 | 0.3553 | 0.1195 |

表 4 上述运动参数下鉴别性能计算结果

Table 4 Discrimination performance result calculated for above motion parameters

| 运动形式 | 探测概率 | | | 识别概率 | 辨认概率 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 低杂波 | 中杂波 | 高杂波 | | |
| 线性运动 | 0.9989 | 0.9178 | 0.4275 | 0.2327 | 0.0734 |
| 正弦运动 | 0.9970 | 0.8638 | 0.3340 | 0.1737 | 0.0535 |
| 随机运动 | 0.9994 | 0.9375 | 0.4776 | 0.2672 | 0.0856 |
| 线性和正弦运动 | 0.8695 | 0.3420 | 0.0649 | 0.0310 | 0.0092 |
| 正弦和随机运动 | 0.9243 | 0.4727 | 0.0906 | 0.0435 | 0.0129 |
| 线性和随机运动 | 0.9727 | 0.6174 | 0.1511 | 0.0736 | 0.0220 |
| 3种运动都存在 | 0.8432 | 0.3045 | 0.0512 | 0.0213 | 0.0075 |

)。另外,我们从仿真结果也可以看出:多种形式的运动共存时,要比单一的运动对系统的影响大;不同等级的背景杂波环境下,系统的探测概率是不同的,高杂波严重影响着系统的探测性能,由此分析可以看出仿真结果与理论分析相符。

REFERENCES

- [1] Scoff L, Agostino J D. NVEOD FLIR92 thermal imaging systems performance model[J]. In: *Proc. SPIE, Infrared Imaging System: Design, Analysis, Modeling and Testing*, 1992, **1689**: 194—203
- [2] Driggers R G, Vollmerhausen R, Edwards T. The target identification performance of infrared imager models as a function of blur and sampling[J]. In: *Proc. SPIE, Infrared Imaging System: Design, Analysis, Modeling and Testing*, 1999, **3701**: 26—34
- [3] Wittenstein W. Thermal range model TRM3[J]. In: *Proc. SPIE, Infrared Imaging System: Design, Analysis, Modeling and Testing*, 1998, **3436**: 413—424
- [4] Hikert J M, Bowen M, Wang J. Specification for imaging stabilization system in tactical infrared system [J]. In: *Proc. SPIE, Infrared Imaging System: Design, Analysis, Modeling and Testing*, 1991, **1498**: 24—38
- [5] Schmieder D E, Weathersby M R. Detection performance in clutter with variable resolution[J]. *IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems*, 1983, **AES-19**(4): 622—630
- [6] McGlynn John D, Sofianos Dino J. Parametric model-based characterization of IR clutter[J]. In: *Proc. SPIE, Infrared Imaging System: Design, Analysis, Modeling and Testing*, 1995, **2470**: 236—244
- [7] Piet Bijl, Valetton Mathieu J. TOD predicts target acquisition performance for staring and scanning thermal imagers[J]. In: *Proc. SPIE, Infrared Imaging System: Dystem; Design, Analysis, Modeling and Testing*, 2000, **4030**: 96—103
- [8] Hadar O, Rotman S R, Kopeika N S. Target acquisition probability for image motion and vibration[J]. In: *Proc. SPIE, Infrared Imaging System: Design, Analysis, Modeling and Testing*, 1994, **2224**: 108—119