

文章编号:1001-9014(2006)02-0150-03

海空背景凝视红外成像系统作用距离研究

王卫华, 牛照东, 陈曾平

(国防科技大学 ATR 国防科技重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对凝视红外成像探测系统作用距离计算问题,在分析传统作用距离模型的基础上,提出基于图像目标信噪比检测依据的新距离计算模型.该计算模型全面考虑了目标与背景的对比度以及红外图像空间起伏噪声特性,给出了复杂背景限制下红外凝视成像探测系统作用距离计算公式.海空背景下舰载红外凝视成像系统探测距离计算实例表明该计算模型相对于原有计算模型能够更准确解决复杂背景情况下红外成像系统作用距离的估算问题.

关键词:凝视红外成像系统;作用距离;信噪比;背景起伏

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

RESEARCH ON THE OPERATING RANGE OF STARING IR IMAGING SYSTEM IN SEA-SKY BACKGROUND

WANG Wei-Hua, NIU Zhao-Dong, CHEN Zeng-Ping

(ATR Lab of National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For the operating range calculation of staring IR imaging system, traditional operating range model was analyzed and a new model was proposed based on the target image's SNR detection criterion. The contrast of target and background and the IR image's clutter character were considered in this model, and the calculating formula of the operating range restricted by the complex background was derived. The experiment result of the ship-borne staring IR imaging system shows that the new model can be more accurately to calculate the operating range of IR imaging system in complex background.

Key words: staring IR imaging system; operating range; SNR; background clutter

引言

舰载红外成像探测系统通过探测目标与背景的热辐射图像探测识别目标,具有智能化高、被动隐蔽、抗干扰能力强、跟踪精度高等优点,相对于雷达探测,红外成像系统在对于远距离舰船目标、超低空飞行器及掠海攻击导弹的检测方面更具有其独特的优势,已成为目前各国竞相研究的重点.

对于红外成像探测系统来说,作用距离是一项关键的战术技术指标.自从红外探测系统问世起,国内外众多学者和研究人员对其各项技术参数进行了广泛而深入的研究,提出了其作用距离模型.但传统的红外探测系统作用距离模型是建立在信噪比检测基础上的点源探测模型,随着红外探测器技术的不断发展,对于目前的凝视成像探测器来说,制约其探测距离更重要的因素是目标与背景的对比度以及背景的起伏特性.因此应用原作用距离模型分析目前

成像探测系统时,理论计算值与实际测量值之间有较大误差.本文在分析传统系统作用距离模型的基础上,特别的提出对于凝视成像探测系统除了目标与背景的对比度外,图像空间噪声更是制约探测距离的重要因素,在此基础上分析了图像空间噪声来源,提出了适用于目前凝视红外成像探测系统的新作用距离模型,并针对海空背景下舰载凝视红外成像探测系统,给出了具体计算公式及结果.

1 传统作用距离分析

红外探测系统的作用距离与目标辐射到探测器上的辐射功率、探测器的响应特性及背景辐射等因素有关.远距离情况下探测器的瞬时视场均大于目标相对于探测器的立体角,即红外系统的瞬时视场内除了目标辐射外还有背景的辐射.下面我们基于无背景情况下探测器信噪比导出背景限制下探测系统的作用距离^[1].

不考虑背景时,设目标的辐射亮度为 L_t , 辐射面积为 A_t , 光学系统的入瞳面积为 A_0 , 目标与探测器距离为 R , 则目标在对应探测器入瞳面积 A_0 所张的立体角 ω' 范围内辐射出的光谱辐射功率 $P_{t,\lambda}$ 为

$$P_{t,\lambda} = \frac{L_{t,\lambda} A_t A_0}{R^2} \quad (1)$$

设在探测器波段范围内传播路径上大气平均透过率为 τ_a , 光学系统平均透过率为 τ_0 , 则在 $d\lambda$ 波长范围内入射到探测器上的辐射功率为

$$dP = P_{t,\lambda} \tau_a \tau_0 d\lambda \quad (2)$$

由探测器单色辐射探测率 $D^*(\lambda)$ 表达式可得, 探测器在像面辐照度为 $H_\lambda d\lambda$ 下输出信噪比为

$$d\left(\frac{V_S}{V_N}\right) = D^*(\lambda) (A_d \Delta f)^{-1/2} A_d H_\lambda d\lambda \quad (3)$$

式(3)中 A_d 为探测器面积, Δf 为探测器噪声等效带宽, $H_\lambda d\lambda$ 为入射功率在探测器像面单位面积上辐照度, 则 $A_d H_\lambda d\lambda$ 为入射到探测器上的辐射功率增量

dP , 令 $d^*(\lambda) = \frac{D^*(\lambda)}{D_{\max}^*}$ 代入式(3)并积分可得不考虑背景的情况下探测器输出信噪比为

$$\frac{V_S}{V_N} = \frac{D_{\max}^* A_t A_0 \tau_a \tau_0}{R^2 (A_d \Delta f)^{1/2}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{t,\lambda} d(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

在均匀背景作用下, 红外探测器响应的是目标与背景辐射共同作用的结果. 当背景中有目标存在时入射到探测器上的辐射功率相对于仅存在背景时入射的辐射功率的增量为

$$dP_{ib} = (P_{t,\lambda} - P_{b,\lambda}) \tau_a \tau_0 d\lambda \quad (5)$$

同理可以推出在考虑背景情况下, 当目标存在时相对于仅存在背景探测器信噪比增量为

$$\frac{V_S}{V_N} = \frac{D_{\max}^* A_t A_0 \tau_a \tau_0}{R^2 (A_d \Delta f)^{1/2}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (L_{t,\lambda} - L_{b,\lambda}) d(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

对于信号检测者来说, 由目标的检测概率与虚警概率要求可以推出目标检测的最小信噪比. 另外, 传播路径上大气平均透过率为 τ_a . 也是与距离有关的变量, 在传播路径均匀的情况下(水平观测时满足此条件), τ_a 与距离 R 函数关系^[2] 近似为: $\tau_a = \beta \exp(-\alpha R)$. 从而得到系统的最大作用距离关系式

$$R^2 \exp(\alpha R) = \frac{D_{\max}^* A_t A_0 \tau_0}{\beta (A_d \Delta f)^{1/2} (V_S/V_N) \min} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (L_{t,\lambda} - L_{b,\lambda}) d(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

解上述超越方程即得传播路径均匀情况下系统作用距离. 在传播路径不均匀情况下, 大气透过率与

距离的函数关系复杂, 通常可先计算不同距离对应的大气透过率, 然后计算此距离对应的信噪比, 并根据信噪比是否满足要求来分析系统的作用距离.

2 凝视成像探测系统作用距离分析

凝视成像探测系统提供给信号检测者的是目标与背景的热辐射图像. 对于图像目标检测来说, 目标相对于背景的灰度奇异性特征是目标检测的基本依据. 邢强林等提出利用目标与背景入射到探测器靶面上调制对比度为依据分析成像探测系统作用距离^[3], 而王刚等则建立了目标与背景辐射的表现对比度模型^[4], 根据系统最小可分辨对比度确定作用距离. 我们分析实际的目标与背景红外图像可知, 制约凝视成像探测系统探测距离的主要因素除了目标与背景辐射强度对比度及探测器响应特性外, 背景的起伏特性更是制约探测距离的重要因素, 尤其对于起伏的海面背景^[5] 或多云的天空背景时, 远距离的目标往往淹没在背景的起伏中.

根据图像处理目标检测信噪比的概念, 通常弱目标信噪比定义为: $SNR = |s - u| / \sigma$, 其中 s 为目标平均灰度, u 为背景平均灰度, σ 为背景灰度的标准方差. 在信噪比的定义中, $|s - u|$ 体现了目标与背景的灰度对比度, σ 则反映了图像空间噪声. 我们基于上述图像目标检测的信噪比模型^[6] 提出了一种更接近实际模型的红外成像探测系统作用距离分析方法.

目标辐射参数同式(1)中定义, 目标入射到探测器焦平面阵列上的的光谱辐射功率为

$$P_{t,\lambda} = \frac{L_{t,\lambda} A_t A_0 \tau_a \tau_0}{R^2} \quad (8)$$

不考虑目标像弥散的影响, 目标在探测器焦平面阵列上的的光谱辐照度为

$$H_{t,\lambda} = \frac{\pi L_{t,\lambda} \tau_a \tau_0}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \quad (9)$$

对于海空背景远距离舰船检测来说, 由于海面大气与海水等热交换的影响, 通常存在一个海天交界过渡带, 远距离的目标位于位于这个过渡带中, 此时背景考虑为此过渡带. 同理可得, 背景入射探测器焦平面阵列上的的光谱辐照度为

$$H_{b,\lambda} = \frac{\pi L_{b,\lambda} \tau_0}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \quad (10)$$

海天交界过渡带光谱辐射亮度 $L_{b,\lambda}$ 在较多文献中有详细研究, 也可以通过实际背景测量数据推算得出. 我们注意到, 背景入射光谱辐照度 $H_{b,\lambda}$ 相对于目标入射光谱辐照度 $H_{t,\lambda}$ 少了传播路径上大气平均

透过率因子 τ_a , 通常测量海天交界过渡带光谱辐射亮度时已经将大气衰减的影响归为其中, 因此不单独再计算大气衰减对过渡带背景影响。

红外成像系统图像空间噪声 σ^2 主要来源于三部分^[7]: 第一部分来源于探测器, 包括探测器噪声、光子噪声、电路噪声、A/D 转换噪声、电荷转移读出噪声等。第二部分来源于焦平面阵列非均匀性校正残余噪声, 第三部分则来源于背景空间辐射起伏噪声。在理想均匀背景情况下, 背景空间起伏噪声可忽略, 并且不考虑阵列非均匀性校正残余噪声时, 红外成像系统图像空间噪声仅为探测器噪声, 则输出图像信噪比与式(1)中点源探测系统在背景限制下输出的信噪比增量相同。但通常背景辐射均存在不同程度的起伏, 焦平面阵列非均匀性校正残余噪声也不可忽略, 并且随着目前探测器制造工艺的不断提高, 这两部分的噪声已成为红外成像系统图像空间噪声的主要来源, 并且在实际距离计算中, 背景辐射的起伏通常由实际背景测得, 来源于探测器的噪声与及阵列非均匀性校正残余噪声也包含于实测的背景起伏中。设由实际背景测得的背景图像均值为 u , 起伏标准方差可归一为 $k \times u$, k 为背景起伏系数, 则图像信噪比为

$$SNR = \frac{|s - u|}{\sigma} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (L_{i,\lambda} \tau_a - L_{b,\lambda}) d\lambda}{k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{b,\lambda} d\lambda} \quad (11)$$

在传播路径均匀的情况下(水平观测时满足此条件), τ_a 与距离 R 函数关系近似为: $\tau_a = \beta \exp(-\alpha R)$ 。由目标可检测最小信噪比可得系统的最大作用距离关系式

$$R = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\beta \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{i,\lambda} d\lambda}{(1 + k \cdot SNR_{\min}) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{b,\lambda} d\lambda} \quad (12)$$

在传播路径不均匀情况下, 通常可先计算不同距离对应的大气透过率, 然后计算此距离对应的信噪比, 并根据信噪比是否满足要求来分析系统的作用距离。

3 实验与总结

以某舰载凝视红外成像探测系统为实例来验证算法。目标取远距离的舰船, 大小为 $100\text{m} \times 8\text{m}$, 目标平均温度 300K , 设目标发射率为 0.8 , 背景为海空背景, 背景辐射亮度计算采用实际测量值, 探测器波段范围 $8 \sim 9.6\mu\text{m}$, 焦距 50mm , 镜头 F 数为 $F/2$, 镜头红外透过率 0.8 , 焦平面阵列为 320×240 , 单个像元大

小为 $25\mu\text{m}$, 探测器噪声等效温差 (NETD) 25mK 。由探测器 NETD 值可推出探测器 D^* 。对于水平观测路径, 可近似大气平均透过率 $\tau_a = \exp(-\alpha R)$, α, β 值可由 LowTran7 计算不同距离下的衰减值后曲线拟和得到。设目标最小可检测信噪比为 2 , 采用传统的点源探测系统的作用距离计算方法计算得作用距离 $R = 63.7\text{km}$ 。但通过实测海天背景图像统计得背景图像起伏系数 $k \approx 10\%$, 这大部分来源于海天背景的起伏以及焦平面非均匀性校正残余噪声, 采用新的计算模型计算得作用距离 $R = 32.5\text{km}$ 。这与实际测量探测距离 25km 值相对比较吻合。

本文在分析传统红外系统作用距离模型基础上, 提出对于凝视成像探测系统, 除了目标与背景的对比如度外, 图像空间噪声更是制约成像探测系统探测距离的重要因素, 分析了图像空间噪声来源, 提出了适用于目前凝视红外成像探测系统的新作用距离模型, 并针对实际海空背景下舰载凝视红外成像探测系统给出了具体计算公式及结果。计算结果表明, 该作用距离计算模型相对于原有计算模型能够有效适应海空等复杂背景情况下凝视红外成像探测系统作用距离的估算。

REFERENCES

- [1] XU Nan-Rong, BIAN Nan-Hua. *Infrared Radiation and Guidance* [M]. Beijing: National Industry Press (徐南荣, 卞南华. 红外辐射与制导. 北京: 国防工业出版社), 1997: 334—340.
- [2] 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.
- [3] XINAG Qiang-Lin, HUANG Hui-Ming, XIONG Ren-Sheng, et al. Detect-ability analyzing of IR FPA tracking system [J]. *Acta Photonica Sinica* (邢强林, 黄慧明, 熊仁生, 等. 红外成像探测系统作用距离分析方法研究. 光子学报), 2004, 33(7): 893—896.
- [4] WANG Gang, YU Bing-Xi. Approach to estimate infrared point-target detection range against sky background based on contrast [J]. *Optics and Precision Engineering* (王刚, 禹秉熙. 基于对比度的空中红外点目标探测距离估计方法. 光学精密工程), 2002, 10(3): 276—280.
- [5] Stein C L, Karin W B. Characteristic of shipborne targets in warm coastal environments in mid- and long-wave IR [J]. *SPIE*, 1997, 3219: 52—64.
- [6] Ekstrand B. Approach to estimation of infrared point target range [J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39(20): 3495—3503
- [7] WU Jun-Hui, GAO Zhu-Xiang, WANG Tao, et al. A kind of test and evaluation way about IR imaging system [J]. *Infrared Technology* (吴军辉, 郜竹香, 王涛, 等. 一种红外成像系统作用距离试验评估方法. 红外技术), 2002, 24(6): 44—46.