

## 地基分布孔径红外系统的作用距离模型

朱 斌, 樊 祥, 程正东

(脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 安徽 合肥 230037)

**摘 要:** 分布孔径红外系统(DAIRS)是目前军事强国在红外搜索跟踪系统领域的重点发展方向。作用距离是 DAIRS 最重要的参数指标之一,其大小由系统参数、目标和背景特性等决定。针对 DAIRS 的成像与信息处理特点,对系统的作用距离进行了研究,建立了 DAIRS 作用距离模型,分析了目标方位、探测器积分时间和瞬时视场等因素对 DAIRS 与传统扫描型系统作用距离的影响。该模型对 DAIRS 的设计具有一定的参考意义。

**关键词:** 分布孔径红外系统; 作用距离模型; 地基; 红外搜索跟踪

**中图分类号:** TN216    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)11-2871-05

## Mathematical model of operating range for ground-based distributed aperture infrared system

Zhu Bin, Fan Xiang, Cheng Zhengdong

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology(Electronic Engineering Institute), Hefei 230037, China)

**Abstract:** Distributed Aperture Infrared System (DAIRS) is the trend of infrared search and track system of military powers. Operation range is one of the most important parameters of DAIRS, which is decided by system parameters, features of target and background, etc. The operation range based on the characteristics of imaging and information processing of DAIRS was studied in this paper. A mathematical model of operating range for ground-based DAIRS was established, and the influences of target orientation, detector integration time, and instantaneous field of view(IFOV) on operation range of DAIRS and traditional scanning imaging infrared system were analyzed. The mathematical model is helpful to the design of DAIRS.

**Key words:** DAIRS; model of operating range; ground-based; infrared search and track

收稿日期: 2013-03-19; 修订日期: 2013-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(61307025); 安徽省自然科学基金(1308085QF122)

作者简介: 朱斌(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事红外图像处理方面的研究。Email: zhubinee@163.com

### 0 引言

红外搜索跟踪(IRST)系统隐蔽性好、跟踪测向精度高,能探测到较远距离的点目标和扩展源目标,在现代战争中发挥着极其重要的作用。随着红外焦平面阵列探测器技术与高速大容量信息处理技术的发展,美国 Northrop Grumman 公司最先针对战斗机提出了分布孔径红外系统(DAIRS)的概念<sup>[1]</sup>。近年来,DAIRS 因其多功能、高像质、低功耗、低成本、使用方式灵活等特点已成为各军事强国在 IRST 系统领域的重点发展方向<sup>[1-2]</sup>。

作用距离是 IRST 系统的核心指标之一,即系统能有效探测目标的最远距离。目前,对 IRST 系统作用距离的研究主要集中在扫描型与常规凝视型系统方面<sup>[3-8]</sup>。DAIRS 是一种新型凝视红外系统,专门针对其特点进行的研究较少,如参考文献[4-5]的凝视型系统作用距离模型均未考虑目标方位的影响。文中在对 DAIRS 的工作方式进行分析的基础上,综合考虑了目标方位和背景对作用距离的影响。通过建立的模型,分析并比较了目标方位、积分时间、瞬时视场对扫描型系统和 DAIRS 作用距离的影响。建立 DAIRS 的作用距离模型对分析、设计此类系统具有重要的现实意义。

### 1 传统作用距离模型分析

IRST 系统主要包括光学系统、传感器和信息处理器三个部分。光学系统用于接收红外辐射并成像;传感器的核心部件是红外探测器,用于探测目标的红外辐射;信息处理器则负责对目标信息进行处理。传统的 IRST 系统作用距离方程综合考虑了目标辐射与系统因素的影响,其表达式为<sup>[9]</sup>:

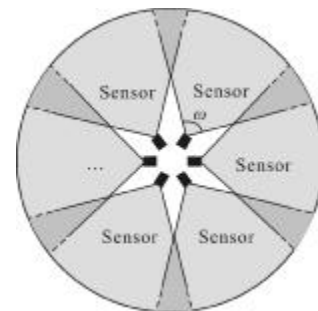
$$R = \left[ \frac{D^2(I_{\Delta\lambda} \cdot \tau_a(R))(\pi D_o(NA) \tau_o)}{2(\omega \cdot \Delta f)^{1/2} SNR_{sys}} \right] \quad (1)$$

式中: $I_{\Delta\lambda}$  为被测目标在  $\Delta\lambda$  波段内的辐射强度; $\tau_a(R)$  为  $\Delta\lambda$  波段内的大气平均透过率; $D_o$  为光学系统的有效通光孔径; $(NA)$  为光学系统的数值孔径; $\tau_o$  为光学系统在  $\Delta\lambda$  波段内的平均透过率; $D^2$  为红外探测器的归一化比探测率; $\omega$  为光学系统的瞬时视场; $\Delta f$  为系统的等效噪声带宽; $SNR_{sys}$  为系统可检测的最低信噪比。

### 2 DAIRS 作用距离模型

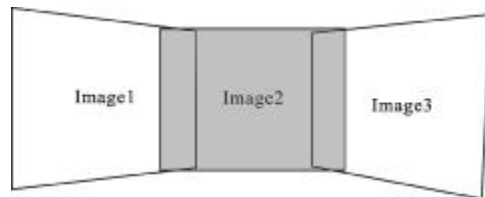
#### 2.1 DAIRS 探测模式分析

DAIRS 视场分布与局部视场拼接示意图如图 1 所示。DAIRS 单个传感器视场角为  $\omega$ ,系统采用一组由  $N$  个精心布置在载体上的传感器阵列通过视场拼接实现全方位、全空间敏感,并采用各种先进的信号处理算法实现空中目标远距离搜索跟踪、导弹威胁逼近告警、态势告警等多种功能。



(a) DAIRS 视场分布示意图

(a) Diagram of distribution of FOV of DAIRS



(b) 图像拼接示意图

(b) Diagram of image registration

图 1 DAIRS 分布孔径示意图

Fig.1 Diagram of distributed aperture of DAIRS

如图 2 所示,以地基 DAIRS 探测空中目标为例。 $R$  为目标与探测器的距离; $\omega$  为单个孔径传感器视场角; $A_t$  为目标在与探测器连线方向上的投影面积; $\theta_i$  为传感器  $i$  的法线方向  $n_i$  与传感器  $i$ -目标连线的夹角; $\varphi$  为目标高度角, $h$  为目标高度,则  $h=R\cos\varphi$ ;设  $\Omega$  为目标对探测系统所张立体角,则  $\Omega=A_t/R^2$ 。

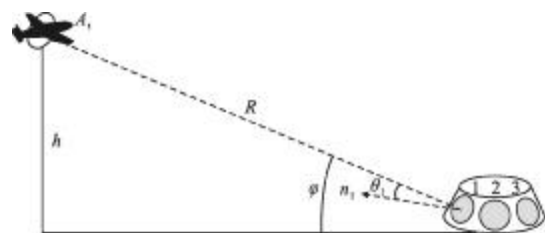


图 2 DAIRS 探测空中目标示意图

Fig.2 Diagram of DAIRS detect aerial target

## 2.2 DAIRS 作用距离模型

### 2.2.1 单个像元接收的功率

当目标位于单个探测器视场中时, 假设  $L_t$  为目标辐射亮度,  $L_b$  为背景辐射亮度,  $A_b$  为距离  $R$  处能进入光学系统单个像元视场的背景面积,  $A_{dx}$  为探测器单个像元的面积。

如图 3 所示, 背景为正对探测器辐射, 则由辐射亮度的定义可知背景辐射到探测器表面的功率为:

$$P_b = A_b L_b (A_o/R^2) \tau_a(R) \tau_o + P_p = A_{dx} (R/f)^2 L_b (A_o/R^2) \tau_a(R) \tau_o + P_p \quad (2)$$

式中:  $A_o$  为光学系统有效入射孔径面积;  $\tau_a(R)$  为波段内平均大气透过率;  $\tau_o$  为波段内光学系统平均透过率;  $f$  为光学系统焦距;  $P_p$  为路径辐射功率。

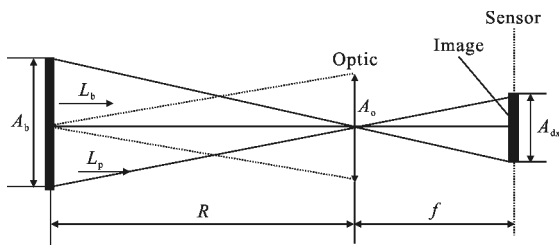


图 3 背景辐射成像示意图

Fig.3 Diagram of background radiation imaging

如图 4 所示, 目标为离轴时, 其在探测器表面的辐射功率为:

$$P_t = A_t L_t (A_o \cos \theta / R^2) \tau_a(R) \tau_o + P_p \quad (3)$$

式中:  $\theta$  为目标-探测器连线与探测器法线方向的夹角。

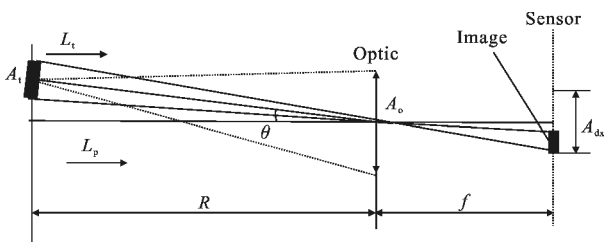


图 4 目标辐射成像示意图

Fig.4 Diagram of target radiation imaging

实际目标成像尺寸计算应考虑理论成像尺寸和弥散两个因素。使用长焦光学系统时, 目标弥散像斑为多个像素, 而使用中短焦光学系统时, 目标的弥散像斑可能仍然小于一个像素<sup>[5]</sup>。DAIRS 为满足大视场, 多采用中短焦光学系统, 其远距离目标理论成像尺寸小于单个像元尺寸, 因此对点目标, 可忽略理论成像尺寸, 主要由像弥散决定。

某个像元中只要接收到目标辐射即视为目标像元。而由于目标的成像尺寸通常要小于像元尺寸, 因此目标像元接收到的能量由目标辐射、部分背景辐射与路径辐射构成。假设因弥散和短时随机误差等原因致使目标在  $N_t$  个像元上成像, 则单个目标像元接收到的能量被近似均分到  $N_t$  个像元, 而背景辐射的面积为单个像元对应的背景面积与目标投影面积之差, 则目标像元接收到的能量为:

$$P_{tx} = P_t / N_t + P_b' + P_p = [A_t L_t \cos \theta / N_t + (A_{dx} (R/f)^2 - A_t) L_b] \times (A_o/R^2) \tau_a(R) \tau_o + P_p \quad (4)$$

目标像元与背景像元辐射功率之差为:

$$\Delta P = P_{tx} - P_b = A_t A_o \tau_a(R) \tau_o (L_t \cos \theta / N_t - L_b) / R^2 \quad (5)$$

### 2.2.2 探测器响应度

探测器的波段响应度  $R(\lambda)$  表示探测器在波长  $\lambda$  处, 输入单位辐射功率产生的输出电压。它和焦平面的灵敏度、像元面积、噪声等效带宽有关。经过非均匀校正的焦平面探测器各个像元的响应度可认为相等。

$$R(\lambda) = V_N D^*(\lambda) / (\Delta f \cdot A_d)^{1/2} \quad (6)$$

式中:  $D^*(\lambda)$  为光谱比探测率;  $\Delta f$  为等效噪声带宽, 对于凝视型探测器  $\Delta f = 1/(2t_{int})$ ,  $t_{int}$  为探测器的积分时间<sup>[5]</sup>;  $A_d$  为探测器面积。则:

$$R(\lambda) = V_N D^*(\lambda) / (A_d / 2t_{int})^{1/2} \quad (7)$$

若使用波段平均响应率  $R$ , 则目标像元在波段内的输出电压为:

$$V_{St} = P_{tx} \cdot R \quad (8)$$

背景像元波段内的输出电压为:

$$V_{Sb} = P_b \cdot R \quad (9)$$

### 2.2.3 最小可检测信噪比

探测器输出的最小可检测信噪比为目标像元与背景像元输出电压之差  $V_s$  恰好大于系统噪声引起的电压  $V_N$  时的信噪比:

$$SNR_{sys} = \frac{V_s}{V_N} = \frac{V_{St} - V_{Sb}}{V_N} = \frac{\Delta P \cdot R}{V_N} = \Delta P D^* / (A_d / 2t_{int})^{1/2} \quad (10)$$

### 2.2.4 作用距离公式

将公式(5)代入公式(10)后整理得:

$$R = \sqrt{\frac{A_t (L_t \cos \theta / N_t - L_b) \tau_a(R) A_o \tau_o D^*}{SNR_{sys} (A_d / 2t_{int})^{1/2}}} \quad (11)$$

若将探测器面积  $A_d$  转换成系统的瞬时视场, 则有  $A_d = \omega f^2$ ,  $f$  为系统焦距; 光学系统的数值孔径  $(NA) = D_o / 2f$ , 则光学系统的有效入射孔径面积  $A_o = \pi D_o (NA) f / 2$ ; 此外, 在计算中根据不同的系统特点加上不同的修正因子  $\xi$ , 作用距离可以表示成另一种形式

$$R = [A_i(L_i \cos \theta / N_i - L_b) \tau_a(R)]^{1/2} \cdot (D^*)^{1/2} \cdot \left[ \frac{\pi}{2} D_o(NA) \tau_o \right]^{1/2} \cdot \left[ \frac{\xi}{(\omega/2t_{int})^{1/2} SNR_{sys}} \right]^{1/2} \quad (12)$$

在 DAIRS 作用距离模型公式(12)中:

第一项主要为目标辐射和大气透过率的影响。其中,  $A_i$  为目标对系统的投影面积;  $L_i$  与  $L_b$  分别为目标和背景在所选波段内的辐射亮度;  $\tau_a(R)$  为目标到红外系统的传播距离上大气的平均光谱透过率。此外,  $N_i$  为目标在焦平面上所占像元数。

第二项为光学系统的影响。其中,  $D_o$  为光学系统的有效通光孔径;  $\tau_o$  为光学系统的数值孔径; 为光学系统在所选波段内的平均光谱透过率。

第三项为探测器性能的影响。  $D^*$  为所选波段内敏感元件的波段比探测率。

第四项为系统特性和信号处理的影响。其中,  $\omega$  为单孔径光学系统的瞬时视场;  $t_{int}$  为探测器积分时间;  $SNR_{sys}$  为系统最低可检测信噪比;  $\xi$  为修正因子或称为信号提取因子, 表示脉冲信号通过系统后发生的能量衰减, 对于输出采用数字信号的红外成像系统, 因为信号传输、处理过程中不存在衰减,  $\xi$  可取 1。

### 2.3 求解 DAIRS 作用距离方程

作用距离方程公式(12)中, 波段平均大气透过率  $\tau_a(R)$  是一个与作用距离、大气环境等相关的量。在解方程时, 可通过夹逼得到作用距离  $R$ 。具体方法为, 将其他已知条件代入公式(12)后得  $K$ , 则

$$R = K \cdot [\tau_a(R)]^{1/2} \quad (13)$$

使用专门计算大气透过率的软件如 ART、LOWTRAN7 等精确计算出某一大气条件下, 不同作用距离时的  $\tau_a(R_1')$ ,  $\tau_a(R_2')$ ,  $\dots$ ,  $\tau_a(R_i')$ , 再分别将其代入公式(13)得  $R_i = K \cdot [\tau_a(R_i')]^{1/2}$ , 当某组大气透过率满足  $R_i = R_i'$  时,  $R_i$  即为系统估算的作用距离。

## 3 DAIRS 作用距离影响因素分析

DAIRS 采用大面阵焦平面探测器凝视成像, 而传统扫描型系统采用线列探测器扫描成像。两类系统在成像方式、瞬时视场、探测器性能与成像质量等方面有明显区别, 而这几个因素都将影响系统的作用距离。由公式(1)和(12)可知, 影响两类系统作用距离的主要因素有目标方位、探测器积分时间、瞬时视场等。

### 3.1 目标方位

传统扫描型 IRST 系统通过对水平空域的快速旋转扫描得到水平  $360^\circ$  视场的画面, 调整好搜索俯仰角的前提下, 无论目标位于系统的哪个方位, 其红外辐射都可近似为垂直入射。因此, 扫描型 IRST 系统的作用距离与目标的方位角无关。DAIRS 各探测器均为凝视型成像, 从图 1 和公式(12)可以看出, 目标与探测器焦平面的夹角  $\alpha$  的余弦将影响系统的作用距离: 当垂直探测器入射时,  $\theta=0$ ,  $\cos \theta=1$ ; 当目标辐射非垂直入射时,  $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ,  $0 < \cos \theta < 1$ ,  $R$  将有所下降。

### 3.2 探测器积分时间

扫描型系统扫描一周的帧周期为  $T_f$ , 系统在单位时间内扫过画面的帧数称为帧频  $f_p=1/T_f$ 。积分时间或驻留时间是指一个探测器扫过一个空间单元所经历的时间。当扫描速度为常数, 单元探测器的驻留时间为:

$$t_d = \eta \frac{\alpha \beta T_f}{AB} \quad (14)$$

式中:  $\alpha$  和  $\beta$  分别是水平和垂直方向的瞬时视场;  $A$  和  $B$  分别是水平和垂直方向的总视场;  $\eta$  是扫描效率。

在  $n$  元探测器并联扫描情况下, 驻留时间为  $t_d' = nt_d$ , 目前采用长波制冷探测器的扫描型系统驻留时间在微秒量级, 而对于凝视型红外成像系统来说, 积分时间  $t_{int}$  通常为几毫秒。由公式(1)、(12)可知  $R \propto (t_{int})^{1/4}$ , 积分时间长, 系统作用距离越远。但积分时间过长, 会引起图像畸变。变积分时间可减小图像畸变现象, 但实现起来比较复杂, 可以对读出电路进行改进设计, 如将帧频提高就可以收到一定的效果。当然帧频提高了积分时间必然减小, 探测器接收的能量就会减少, 需要设计大相对孔径的光学系统来增加接收的辐射能量。

### 3.3 瞬时视场

系统的瞬时视场  $\omega = \alpha \beta = ab/f^2$ , 其中  $a$ 、 $b$  为探测器长宽尺寸。DAIRS 的单孔径瞬时视场与扫描型系统有显著不同, 从公式(12)可以看出  $R \propto (\omega)^{-1/4}$ 。

对采用  $288 \times 4$  像元探测器的典型扫描型系统, 已知  $a_1 \times b_1 = 8.1 \times 0.38 \text{ mm}^2$ <sup>[10]</sup>, 若焦距为  $f_1 = 80 \text{ mm}$ , 则其瞬时视场约为  $0.27^\circ \times 5.78^\circ$ 。

DAIRS 系统由  $N$  个探测器拼接实现  $360^\circ$  全景成像, 单孔径的瞬时视场  $\omega = \alpha_2 \times \beta_2$ , 则  $N \geq 360/\alpha_2$ 。因成本和计算量因素, 不能过大, 所以瞬时视场  $\omega$  不

能过小;而如果  $\omega$  过大则作用距离会有所下降。因此,需要综合考虑成本与作用距离因素。若 DAIRS 采用 6 个  $1\ 024 \times 1\ 024$  像元探测器,尺寸约为  $a_2 \times b_2 = 25 \times 25\ \text{mm}^2$ ,则  $\alpha_2 \geq 60^\circ$ ,焦距  $f_2 = a_2 / \alpha_2 \leq 24\ \text{mm}$ 。可见,DAIRS 的单孔径瞬时视场  $\omega$  远大于扫描型系统,这将影响其作用距离。

#### 4 结 论

文中在综合考虑目标和背景的辐射的条件下建立了地基 DAIRS 作用距离模型,分析了目标方位、探测器积分时间和瞬时视场等因素对扫描型系统与 DAIRS 作用距离的影响。其中,目标方位角对扫描型系统没有影响,而对 DAIRS 却有着直接影响。利用该模型可进行系统方案论证,对分析设计 DAIRS 有一定的参考意义。

#### 参考文献:

- [1] William F O'Neil. Processing requirements for the first electro-optic system of the twenty-first century [C]//IEEE, 1997: 7803-4150-3.
- [2] Zhang Yuan. DAIRS and its new development [J]. Science and Technology Consulting Herald, 2007(14): 18. (in Chinese)  
张渊. 分布孔径红外系统及其新进展 [J]. 科技咨询导报, 2007(14): 18.
- [3] Zhang Le, Liang Dongming, Yao Mei, et al. Equivalent calculation of operating range ofIRST [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 26-30. (in Chinese)  
张乐, 梁冬明, 姚梅, 等. 红外搜索跟踪系统作用距离等效折算[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 26-30.
- [4] Wang Bingxue, Lv Qiheng, Chen Changbin, et al. A mathematical model for operating range of a staring IR search and tarck system [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(7): 8-11. (in Chinese)  
王兵学, 旅启衡, 陈昌彬, 等. 凝视型红外搜索跟踪系统的作用距离模型[J]. 光电工程, 2004, 31(7): 8-11.
- [5] Wang Weihua, Niu Zhaodong, Chen Zengping. Research on the operating range of staring IR imaging system in sea-sky background[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2006, 25(2): 150-152. (in Chinese)  
王卫华, 牛照东, 陈曾平. 海空背景凝视红外成像系统作用距离研究[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(2): 150-152.
- [6] Wei Gang, Yang Kuntao. Discussion on operating range of shipborne infrared search-and-track system [C]//SPIE, 2006, 6150: 61501V.
- [7] Qian Weixian, Chen Qian, Gu Guohua. Distance equation of infrared focal plane array rotation search system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2078-2084. (in Chinese)  
钱惟贤, 陈钱, 顾国华. 红外面阵旋转搜索系统作用距离方程[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2078-2084.
- [8] Chen Qianrong, Yang Miaomiao, Wang Min, et al. Equivalent calculation of operating distance for IR warning-reconnaissance system in different weather conditions [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3161-3166. (in Chinese)  
陈前荣, 杨淼淼, 王敏, 等. 红外侦察告警系统在不同气象条件下作用距离等效推算[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3161-3166.
- [9] He Zhaocai. Opto-Electric Measurement [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 238-242. (in Chinese)  
何照才. 光电测量 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 238-242.
- [10] Wang Qun. Testing of  $288 \times 4$  long wavelength infrared detector [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(4): 86-88. (in Chinese)  
王群.  $288 \times 4$  长波线阵红外探测器的测试 [J]. 光学与光电技术, 2008, 6(4): 86-88.