文章编号:1001-5078(2010)08-0851-04 ·红外技术·

IRST系统搜索扫描速率对探测距离的影响

李胜勇,朱强华,李晖宙
(海军工程大学电子工程学院,湖北 武汉 430033)

摘 要:在搜索状态下的探测距离是搜索跟踪系统的重要性能指标。从搜索状态下系统探测器能量积分的过程进行理论分析,得到了系统扫描速率与系统探测距离之间的关系,导出了扫描速率对IRST系统探测距离影响的关系方程。为IRST系统的综合评估和设计提供了一个重要的依据。

关键词:红外搜索跟踪;扫描速率;探测距离
中图分类号:TN911.73;TN21 **文献标识码:**A

Effect of scanning velocity of IRST on detection range

LI Sheng-yong, ZHU Qiang-hua, LI Hui-zhou
(Electronics Eng. College, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: For infrared search and track system (IRST), the operation range when the system works in the search mode is an critical specification. Based on the theoretical analysis about the mechanism of energy integration on the IR detector, an equation illustrating the relationship between the search range and the scan velocity is deduced. It offers a tool to design or evaluate the performance of an IRST.

Key words: infrared search and track; scanning velocity; detection range

1 引 言

高性能的红外搜索与跟踪系统(IRST)是尽早发现来袭目标,对抗导弹等攻击性武器的重要武器装备。探测概率、虚警率和作用距离是IRST系统的3大核心指标,而在探测概率和虚警率一定的情况下,作用距离对武器系统的可用性有举足轻重的地位[1-2]。

国内外对系统的探测距离作了大量的研究。主要是集中在被探测目标温度[3]以及探测目标与背景差异对探测距离的影响[4-7],探讨了红外搜索跟踪系统对点目标的作用距离方程。

而在实际的红外成像系统中,尤其在凝视焦平面器件广泛用于搜索、跟踪系统时,红外探测器在搜索扫描过程中,因为在积分时间段,物方相对的运动,会导致像在探测器焦平面上的相对运动,造成不良影响:一是图像模糊,二是系统作用距离降低。作用距离降低程度与像移的速率有关,而像移速率与搜索扫描速率相关,因此有必要得到系统扫描速率和IRST系统作用距离的关系。

本文考虑了系统扫描速率对作用距离的影响,通过理论分析,建立了合适的估算模型,导出了扫描速率对IRST系统作用距离影响的关系方程。

2 搜索状态红外系统作用距离公式推导

对于一个探测器元,目标、背景产生的信噪比为[8]:

基金项目:湖北省自然科学基金项目(No. 2008CDZ063);海军工程大学自然科学基金项目(No. HGDJJ0829)资助。

作者简介:李胜勇(1976-),硕士,主要从事光电对抗方面研究。E-mail:lsy929@163.com

收稿日期:2010-04-29;**修订日期:**2010-05-12

$$\frac{S}{N}=\frac{\Delta J}{\mathrm{NEJ}} \tag{1}$$

其中，S/N 为信噪比；ΔJ 为积分时间段内目标、背景能量差；NEJ 为探测器元的噪声等效能量。

因为，在系统测试时，都是静止状态下对目标进行测量，能量只是时间的函数，因此，为便于计算和研究，将上式等效为：

$$\frac{S}{N}=\frac{\Delta P}{\mathrm{NEP}} \tag{2}$$

式中，ΔP 为积分时间段内目标、背景功率差；NEP 为探测器元的噪声等效功率。

对于搜索扫描系统来说，在探测器积分时间段内，探测器面元上获得的目标、背景能量不仅仅只是时间的函数，还与目标与系统之间的角度关系有关。因此，采用式(2)，需要对 ΔP 进行修正，称为积分时间段内等效平均功率差 $\Delta P'$。

$$\Delta P'=P'_T-P'_B$$

其中，P'_T 为目标等效功率；P'_B 为背景等效功率；

假设作用距离为 R，目标面积为 A_T，系统瞬时视场为 α,β，系统搜索速率为 ω（先假设沿水平方向），探测器积分时间为 τ，则目标在积分时间内到探测器元的等效功率为：

$$P'_T=\frac{\int_0^{\tau}P(t)\,\mathrm{d}t}{\tau}$$

其中，$P(t)$ 为目标到探测器元功率的函数。

这里只讨论极限的情况，对于大目标的情况不予讨论。对于极限情况，只讨论目标成像小于等于一个像元的情况。

当目标刚好等于一个像元时（即 $A_T/R^2=\alpha\beta$），目标到探测器元功率函数为：

$$P(t)=\begin{cases}P_0\left(1-\dfrac{\omega t}{\alpha}\right) & \text{当 } \omega t\leqslant\alpha\\ 0 & \text{当 } \omega t>\alpha\end{cases}$$

当目标成像为亚像素时，（即 $A_T/R^2<\alpha\beta$），目标到探测器元的功率函数为：

$$P(t)_T=\begin{cases}\rho_T\alpha' & \text{当 } \omega t\leqslant\alpha-\dfrac{d}{R}\\ \rho_T(\alpha-\omega t) & \text{当 } \alpha-\dfrac{d}{R}<\omega t\leqslant\alpha\\ 0 & \text{当 } \omega t>\alpha\end{cases}$$

其中，d 为目标等效直径；α' 为目标在水平方向上的实际成像角度 $\alpha'=\dfrac{d}{R}$；ρ_T 为目标在像面上单位角度内的能量照度。

此时，背景在该元上的功率函数为：

$$P(t)_B=\begin{cases}\rho_B(\alpha-\alpha') & \text{当 } \omega t\leqslant\alpha-\dfrac{d}{R}\\ \rho_B(\omega t) & \text{当 } \alpha-\dfrac{d}{R}<\omega t\leqslant\alpha\\ \rho_B\times\alpha & \text{当 } \omega t>\alpha\end{cases}$$

2.1 目标刚好等于一个像元时的作用距离

当目标刚好等于一个像元时的等效功率为：

$$P'_T=\begin{cases}P_{T0}\left(1-\dfrac{1}{2}\dfrac{\omega\tau}{\alpha}\right) & \text{当 } \omega\tau\leqslant\alpha\\ \dfrac{P_{T0}}{\tau}\left(\dfrac{\alpha}{2\omega}\right) & \text{当 } \omega\tau>\alpha\end{cases}$$

背景在该元上产生的等效功率为：

$$P'_B=\begin{cases}P_{B0}\left(\dfrac{1}{2}\dfrac{\omega\tau}{\alpha}\right) & \text{当 } \omega\tau\leqslant\alpha\\ \dfrac{P_{B0}}{\tau}\left(\tau-\dfrac{\alpha}{2\omega}\right) & \text{当 } \omega\tau>\alpha\end{cases}$$

所以，等效功率差为：

$$\begin{aligned}\Delta P'&=P'_T+P'_B-P_{B0}\\&=\begin{cases}P_{T0}\left(1-\dfrac{1}{2}\dfrac{\omega\tau}{\alpha}\right)+P_{B0}\left(\dfrac{1}{2}\dfrac{\omega\tau}{\alpha}-1\right) & \text{当 } \omega\tau\leqslant\alpha\\ \dfrac{P_{T0}}{\tau}\left(\dfrac{\alpha}{2\omega}\right)-\dfrac{P_{B0}}{\tau}\left(\dfrac{\alpha}{2\omega}\right) & \text{当 } \omega\tau>\alpha\end{cases}\\&=\begin{cases}(P_{T0}-P_{B0})\left(1-\dfrac{1}{2}\dfrac{\omega\tau}{\alpha}\right) & \text{当 } \omega\tau\leqslant\alpha\\ \dfrac{P_{T0}-P_{B0}}{\tau}\left(\dfrac{\alpha}{2\omega}\right) & \text{当 } \omega\tau>\alpha\end{cases}\end{aligned}$$

带入作用距离公式：

$$R^2=\frac{\tau_\alpha\times(L_T-L_B)\times A_T\times\pi}{\alpha\times\beta\times\mathrm{NETD}\times\dfrac{\Delta M}{\Delta T}\times\left(\dfrac{S}{N}\right)_E}\times f^2$$

可得：

$$R'^2=\begin{cases}\left(1-\dfrac{1}{2}\dfrac{\omega\tau}{\alpha}\right)R^2 & \text{当 } \omega\tau\leqslant\alpha\\ \dfrac{\alpha}{2\omega\tau}R^2 & \text{当 } \omega\tau>\alpha\end{cases}$$

上式就是动态情况下，系统对成像为一个像元的目标的作用距离与静态情况下对成像为一个像元的目标的作用距离的关系。

2.2 目标成像为亚像素时的作用距离

当目标成像为亚像素时等效功率为：

$$P'_T=\begin{cases}\rho_T\alpha' & \text{当 } \omega\tau\leqslant\alpha-\dfrac{d}{R}\\ \dfrac{\rho_T}{\tau}\left(\alpha t-\dfrac{1}{2}\omega\tau^2-\dfrac{1}{2}\dfrac{(\alpha-\alpha')^2}{\omega}\right) & \text{当 } \alpha-\dfrac{d}{R}<\omega\tau\leqslant\alpha\\ \dfrac{\rho_T}{2\tau}\left[\dfrac{\alpha^2}{\omega}-\dfrac{(\alpha-\alpha')^2}{\omega}\right] & \text{当 } \omega\tau>\alpha\end{cases}$$

背景在该元上产生的等效功率为：

$$P'_B = \begin{cases} \rho_B(\alpha-\alpha') & \text{当 } \omega\tau \leqslant \alpha - \dfrac{d}{R} \\ \dfrac{\rho_B}{2\tau}\left(\omega\tau^2 + \dfrac{(\alpha-\alpha')^2}{\omega}\right) & \text{当 } \alpha - \dfrac{d}{R} < \omega\tau \leqslant \alpha \\ \dfrac{\rho_B}{\tau}\left[\alpha\tau + \dfrac{1}{2}\dfrac{(\alpha-\alpha')^2}{\omega} - \dfrac{1}{2}\dfrac{\alpha^2}{\omega}\right] & \text{当 } \omega\tau > \alpha \end{cases}$$

$$= \begin{cases} (\rho_T-\rho_B)\alpha' & \text{当 } \omega\tau \leqslant \alpha - \dfrac{d}{R} \\ (\rho_T-\rho_B)\left(\alpha - \dfrac{1}{2}\omega\tau - \dfrac{1}{2}\dfrac{(\alpha-\alpha')^2}{\omega\tau}\right) & \text{当 } \alpha - \dfrac{d}{R} < \omega\tau \leqslant \alpha \\ (\rho_T-\rho_B)\dfrac{\alpha'(\alpha-\alpha')}{\omega\tau} & \text{当 } \omega\tau > \alpha \end{cases}$$

则产生的等效功率差为：

$$\Delta P' = P'_T + P'_B - P_{B0}$$

其中，$P_{B0} = \rho_B \times \alpha$。

当 $\omega\tau \leqslant \alpha - \dfrac{d}{R}$ 时，$\Delta P' = \Delta P$，目标作用距离不受影响；

当 $\alpha - \dfrac{d}{R} < \omega\tau \leqslant \alpha$，时，作用距离比较复杂，暂不考虑；

当 $\omega\tau > \alpha$ 时，$\Delta P' = \Delta P \dfrac{(\alpha-\alpha')}{\omega\tau}$

带入作用距离公式：

$$R^4 = \frac{\tau_\alpha \times (L_T - L_B) \times A_T \times \pi \times A_T}{\alpha^2 \times \beta^2 \times \mathrm{NETD} \times \dfrac{\Delta M}{\Delta T} \times \left(\dfrac{S}{N}\right)_E} \times f^4$$

可得：$R'^4 = \dfrac{(\alpha-\alpha')}{\omega\tau} R^4$

上式是当 $\omega \geqslant \alpha/\tau$ 时，系统对于亚像素目标在动态情况下作用距离与静态下作用距离的关系。

3　仿真实验分析

3.1　目标刚好等于一个像元

当目标刚好等于一个像元时，假设当 $\omega = \alpha/\tau$ 时，$R' = \sqrt{2}R/2$。若系统瞬时视场为 0.08 mrad，中波积分时间 4 ms，当扫描速率为 1.146°/s 时，$R' = \sqrt{2}R/2$，即图中 A 点所示位置。在所给定的条件下，目标刚好等于一个像元时，系统实际作用距离随着扫描速率发生变化的趋势如图 1 所示。

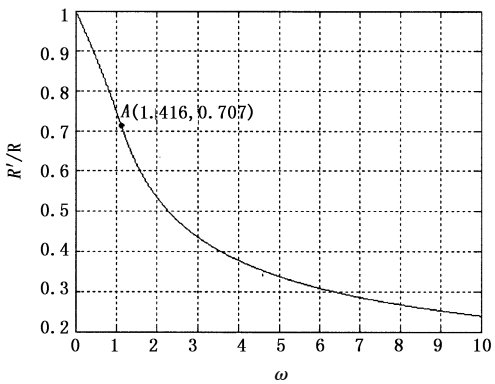

图 1　系统作用距离随扫描速率变化趋势

3.2　目标成像为亚像素

假设系统对于远距离亚像素成像目标作用距离作为系统的性能指标。假设红外系统瞬时视场为 0.08 mrad，对于 2.5m × 2.5 m 目标作用距离为 100 km，探测器积分时间为 4 ms，如果系统以 30°/s 的速度搜索，其实际作用距离计算可得 $R' = 0.40\ R$，即图中 B 点所示位置。则在给定的条件下，目标成像为亚像素时，系统作用距离随着扫描速率发生变化的趋势如图 2 所示。

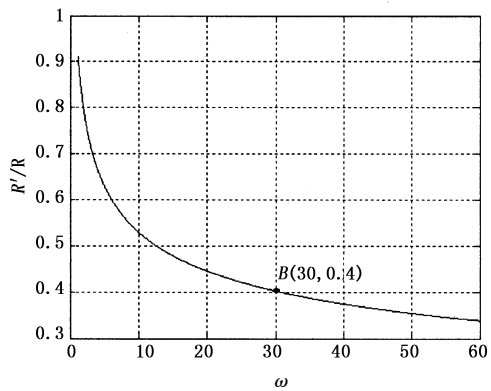

图 2　系统作用距离随扫描速率变化趋势

从以上两种情况分析可看出，系统扫描过程中，对于亚像素目标的作用距离影响小于刚好一个面元的目标。动态扫描情况下，随着搜索扫描速率的加大，系统作用距离将会迅速降低，因此，对于远距离探测系统来说，补偿搜索时的“像移”是必须的。

4　结　论

本文从探测能量的角度入手，从理论上分析了扫描状态下，目标尤其是小目标辐射红外能量在探测器上的积分情况，得到了系统扫描速率与系统探测距离之间的关系，导出了扫描速率对 IRST 系统探测距离影响的关系方程。经过理论与仿真实验分析：搜索状态下，系统的搜索扫描速度越快，系统探测距离越短。因此，在 IRST 系统设计时需要考虑搜索状态时如何进行补偿设计。

参考文献:

[1] Li Fan, Liu Shang-qian, Zhang Feng, et al. Operating distance estimate of IRST for infrared point target[J]. Infrared Technology, 2008, 30(9): 502 – 504. (in Chinese)
李凡,刘上乾,张峰,等. 点源目标的红外搜索与跟踪系统的作用距离估算[J]. 红外技术, 2008, 30(9): 502 – 504.

[2] Fan Xiang, Ren Biao, Deng Pan. Analysis on operating range of the staring infrared search and track system for cruise missile [J]. Laser & Infrared, 2009, 39 (5): 503 – 506. (in Chinese)
樊祥,任彪,邓潘. 凝视型红外搜索跟踪系统对巡航导弹作用距离分析[J]. 激光与红外, 2009, 39 (5): 503 – 506.

[3] Wu Han-ping. Operating distance equation for infrared point target detect system based on temperature characteristic of detectivity and background Influence[J]. Infrared Technology, 2007, 29(6): 341 – 344. (in Chinese)
吴晗平. 红外点目标探测系统作用距离方程理论研究 – 基于探测率温度特性与背景影响[J]. 红外技术, 2007, 29(6): 341 – 344.

[4] Xing Qiang-lin, Huang Hui-ming, Xiong Ren-sheng. Detect-ability analyzing of IR FPA tracking system[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(7): 893 – 896. (in Chinese)
邢强林,黄惠明,熊仁生. 红外成像探测系统作用距离分析方法研究[J]. 光子学报, 2004, 33(7): 893 – 896.

[5] Mu Da, Wang Jian-li, Chen Tao. Analysis for operating range of IR search & track system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 93 – 95. (in Chinese)
牟达,王建立,陈涛. 红外搜索跟踪系统作用距离的分析[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 93 – 95.

[6] Christer Wigren. A generic IRST detection performance model[C]//SPIE, 2000, 4030: 206 – 217.

[7] Zhang Xi, Sun Hua-yan. Performance analysis of laser active imaging detection system based on "cat-eye" effect[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(5): 405 – 407. (in Chinese)
张曦,孙华燕. 基于"猫眼"效应的激光主动成像探测系统性能分析[J]. 激光与红外, 2007, 37 (5): 405 – 407.

[8] Zhang Jian-qi, Fang Xiao-ping. Infrared physics[M]. Xi'an: Xi'an University Press, 2004.
张建奇,方小平. 红外物理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004.