

# 多波段光学探测系统的探测概率研究

朱彬<sup>1</sup>, 胡玮<sup>2</sup>, 邓科<sup>2</sup>, 幺周石<sup>2</sup>

(1. 成都大学信息网络中心 成都 610106; 2. 电子科技大学空天科学技术研究院 成都 610054)

**【摘要】**针对光学联合探测子系统探测概率的不同特点, 提出一种新的系统工作模式, 使系统的最终探测概率有较大提高。当子系统的探测概率均比较低时, 直接对子系统的探测数据进行融合, 可以获得较高探测概率; 当各子系统探测概率相差较大时, 可先对探测数据进行选择, 然后再进行数据融合, 这样可以在总探测概率减小不大的情况下, 使虚警概率明显降低。

**关键词** 数据融合; 探测概率; 联合探测; 隐身目标  
**中图分类号** O43 **文献标识码** A

## Research on Detection Probabilities of Multi-Band Optical Detection Systems

ZHU Bin<sup>1</sup>, HU Wei<sup>2</sup>, DENG Ke<sup>2</sup>, and YAO Zhou-shi<sup>2</sup>

(1. Center of Information & Network, Chengdu University Chengdu 610106;

2. Institute of Astronautics & Aeronautics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** A new operation model for joint optical multi-band detection systems is provided corresponding to the different characters of the detection probabilities of subsystems. It leads to a higher over-all detection probability. The joint optical detection system is able to operate under different models when detection probabilities of subsystems are low and when there is big difference among the probabilities. The joint optical detection system directly conducts data fusing under the former condition. And information from the subsystems is chosen before entering the fusion center under the latter condition. In this way, the false-alarm probability of a joint optical detection system reduces obviously comparing with direct data fusion.

**Key words** data fusion; detection probability; joint detection; stealthy target

随着各种隐身技术的应用, 机动目标的可探测性不断降低。依靠单一探测手段、单一探测波长的探测方式已无法满足对隐身目标的高概率探测需求。因此, 将雷达、红外、激光以及可见光相结合的联合探测方式逐渐成为探测隐身目标的重要发展方向<sup>[1-2]</sup>。联合探测手段可以实现对隐身目标高概率的探测, 在很大程度上弥补了单一探测手段的不足<sup>[3]</sup>。

### 1 光学联合探测原理

将主动和被动两种探测手段结合<sup>[4]</sup>, 采用多个光学波段对远距离目标进行探测, 能够保证系统的全天候工作。将两种探测方式的优势相结合, 可获得更多的有用信息, 有利于对可探测性小的隐身目标进行信息提取, 从而能够进一步对目标进行判断, 提高隐身目标的探测概率。目前可以应用的光学波段有主动探测的0.532  $\mu\text{m}$ 、1.06  $\mu\text{m}$ 、10.6  $\mu\text{m}$ , 被

动探测的3~5  $\mu\text{m}$ 、8~12  $\mu\text{m}$ 等几个波段<sup>[5-7]</sup>。本文主要考虑由可见光、激光和红外3个波段组成的联合探测系统。由于3个波段受大气的衰减、湍流和背景光的影响不同, 将使3个子系统的探测概率出现明显的差异。

分布式探测级融合是直接的多传感器分布式探测系统中对各子系统数据的判决结果进行的数据融合<sup>[8-9]</sup>。光学联合探测系统中, 每个传感器对所获得的探测数据先进行预处理, 然后在某一中心汇总和融合这些信息, 产生全局探测判决。

### 2 光学联合探测的总探测概率

针对三波段联合探测系统, 做出如下假设:

$$\begin{cases} d_i = 1 & \text{判定“目标存在”} \\ d_i = 2 & \text{判定“目标不存在”} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $i=1,2,3$ 表示系统的3个传感器。此时,检测中心的输入向量  $\mathbf{D} = \{d_1, d_2, d_3\}$ 可能出现8种组合。

若系统在恒定的虚警概率  $P_{f_0}$  下进行联合探测,即:

$$P_{f_0} \leq a \tag{2}$$

式中  $a$ 为总虚警概率要求值。联合探测系统的总探测概率为:

$$P_{D_0} = \max P_{d_i}(\varepsilon) \tag{3}$$

式中  $P_{d_i}(\cdot)$ 为第*i*个子系统的探测概率;  $\varepsilon$ 为随机判决因子,  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ 。

采用Neyman-Pearson准则对以下4种假设情况进行分析<sup>[10]</sup>,其中  $P_{f_i}$ 为子系统的虚警概率。

假设1:  $P_{f_1} = P_{f_2} = P_{f_3} = 10^{-6}$ ,  $P_{d_1} = P_{d_2} = P_{d_3} = 0.9$ ;

假设2:  $P_{f_1} = P_{f_2} = P_{f_3} = 10^{-6}$ ,  $P_{d_1} = P_{d_2} = P_{d_3} = 0.75$ ;

假设3:  $P_{f_1} = P_{f_2} = P_{f_3} = 10^{-6}$ ,  $P_{d_1} = 0.9$ ,  $P_{d_2} = 0.7$ ,  $P_{d_3} = 0.5$ ;

假设4:  $P_{f_1} = P_{f_2} = P_{f_3} = 10^{-6}$ ,  $P_{d_1} = 0.9$ ,  $P_{d_2} = 0.7$ ,  $P_{d_3} = 0.3$ 。

可以得到总虚警概率为  $10^{-6}$  时,系统在上述各种情况下的总探测概率如表1所示。

表1 恒定虚警概率下的总探测概率

		假设1	假设2	假设3	假设4
$P_{f_0}$	$P_{D_0}$	$P_{D_0}$	$P_{D_0}$	$P_{D_0}$	$P_{D_0}$
$10^{-6}$	0.972 0	0.843 7	0.815 0	0.753 0	

从表1可以看出,在保证系统总虚警概率不变的情况下,当进入融合中心的3个子系统的检测概率相差不大(假设1、2)时,可以保证总探测概率大于各子系统的探测概率;但是当3个子系统的探测概率相差比较大(假设3、4)时,则出现了总的探测概率小于某一子系统的检测概率的情况。因此,当各子系统的探测概率相差较大时,采用此直接数据融合算法无法实现高概率的探测,必须采用其他数据融合算法。

秩  $K$  融合方法的原理是:有  $N$  个传感器,假定其中至少  $K$  ( $1 \leq K \leq N$ ) 个传感器判定目标存在,则检测中心就判定目标存在。融合中心的检测概率和虚警概率可表示为  $N$  个独立事件的联合概率:

$$\begin{cases} P_{D_0} = \sum_{\mathbf{D}} R(\mathbf{D}) \prod_{S_0} (1 - P_{d_i}) \prod_{S_1} P_{d_i} \\ P_{f_0} = \sum_{\mathbf{D}} R(\mathbf{D}) \prod_{S_0} (1 - P_{f_i}) \prod_{S_1} P_{f_i} \end{cases} \tag{4}$$

式中  $S_1$ 为判定目标存在的子系统组;  $S_0$ 为判定目标不存在的子系统组;  $R(\mathbf{D})$ 是检测中心的判定规则,即秩  $K$  规则为:

$$R(\mathbf{D}) = \begin{cases} 1 & (\text{目标存在}) & \text{如果 } \sum_i^N d_i \geq K \\ 0 & (\text{目标不存在}) & \text{如果 } \sum_i^N d_i < K \end{cases} \tag{5}$$

在秩  $K$  规则下,总的探测概率和虚警概率为:

$$\begin{cases} P_{D_0} = \sum_{i=K}^N \left\{ \left[ \sum_{j=0}^{i-K} (-1)^j C_i^j \right] \left[ \sum_{W(N,i)} \left( \prod_m P_{d_m} \right) \right] \right\} \\ P_{f_0} = \sum_{i=K}^N \left\{ \left[ \sum_{j=0}^{i-K} (-1)^j C_i^j \right] \left[ \sum_{W(N,i)} \left( \prod_m P_{f_m} \right) \right] \right\} \end{cases} \tag{6}$$

式中  $\sum_{W(N,i)} \left( \prod_m P_{d_m} \right)$  和  $\sum_{W(N,i)} \left( \prod_m P_{f_m} \right)$  分别是  $N$  个

传感器中  $m$  个传感器探测概率的各种可能乘积之和以及虚警概率的各种可能乘积之和。此时,对前面4种假设情况采用秩  $K$  规则进行分析,分析结果如表2所示。

表2 采用秩  $K$  融合算法的总探测概率

$K$	$P_{f_0}$	假设1	假设2	假设3	假设4
		$P_{D_0}$	$P_{D_0}$	$P_{D_0}$	$P_{D_0}$
1	$3.0 \times 10^{-6}$	0.999 0	0.984 4	0.985 0	0.979 0
2	$3.0 \times 10^{-12}$	0.972 0	0.843 8	0.800 0	0.732 0
3	$3.0 \times 10^{-18}$	0.729 0	0.421 9	0.315 0	0.189 0

对于光学联合探测系统,当  $K=1$  时,可以在各种情况下实行高概率的探测。特别在3个探测子系统的探测概率相差较大的情况下,系统的总探测概率仍然远大于单一子系统的探测概率。如子系统探测概率分别为0.9、0.7、0.3时,依然可以获得0.979 0的总探测概率。同时也可以看出,在系统的总探测概率增加的情况下,总虚警概率相对单一子系统也增加了3倍。

当  $K=2$  或  $3$  时,系统的总虚警概率较单一子系统有明显的下降,但此时总的探测概率随着3子系统探测概率的差别的增大而迅速降低。如3个子系统的检测概率分别为0.9、0.7、0.3时,可将总虚警概率降低到  $10^{-12}$  和  $10^{-18}$ ,但此时获得的总探测概率分别仅为0.732 0和0.189 0。

进一步分析可知,3个子系统对整个系统的总探测概率的贡献不成线性关系。图1所示为3个子系统探测概率相同时,系统总探测概率的变化曲线。图2所示为3个子系统中两个子系统的比较高,而第3个子系统的探测概率从低到高变化时的总探测概率曲线。

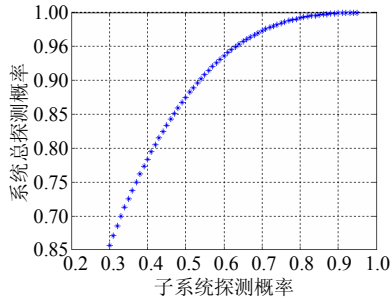


图1 3子系统探测概率相同时的总探测概率曲线

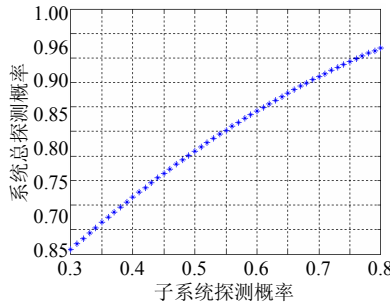


图2 系统总探测概率与子系统的探测概率的关系曲线

由图1可知, 在3个子系统的探测概率均比较低时, 总检测概率明显随子系统探测概率的增加而提高; 当3个子系统的探测概率都比较高时, 系统总探测概率的增加不明显。在两个子系统的探测概率比较高时, 第3个子系统探测概率的提高对总探测概率的改善不明显。

因此, 为实现对可探测性小的隐身目标的有效探测, 光学联合探测系统可以采用秩 $K$ 融合算法, 并选取 $K=1$ 。

为使系统具有较高总探测概率, 光学联合探测系统可以采用不同的工作模式。

- (1) 在3个子系统的探测概率均比较低的情况下, 直接对3个子系统的判决进行融合。
- (2) 当3个子系统的探测概率相差比较大时, 在探测数据进入融合中心前对3个子系统的信息进行筛选, 仅将探测概率较高的两个子系统的数据送入融合中心, 采用秩 $K$ 算法对数据进行融合(取 $K=1$ ), 可将系统的总虚警概率降低。

对联合探测系统工作在上述两种模式下的总探测概率进行仿真, 仿真结果如图3所示, 分析结果如表3所示。这里将子系统的探测概率看为一个时变高斯随机过程,  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  和  $\mu_3$  为探测概率的均值。

由图3可知, 随着3个探测子系统的探测概率差值的增大, 两条曲线逐渐靠拢, 两种模式下的系统总探测概率值趋于相同。两种模式下系统总探测概率的差从0.032 9减小到0.006 2, 此时总虚警概率减小三分之一。与直接进行融合相比: 采用秩 $K$ 算法对数

据进行融合的工作模式可在总探测概率减小不大的情况下, 将总虚警概率明显降低。

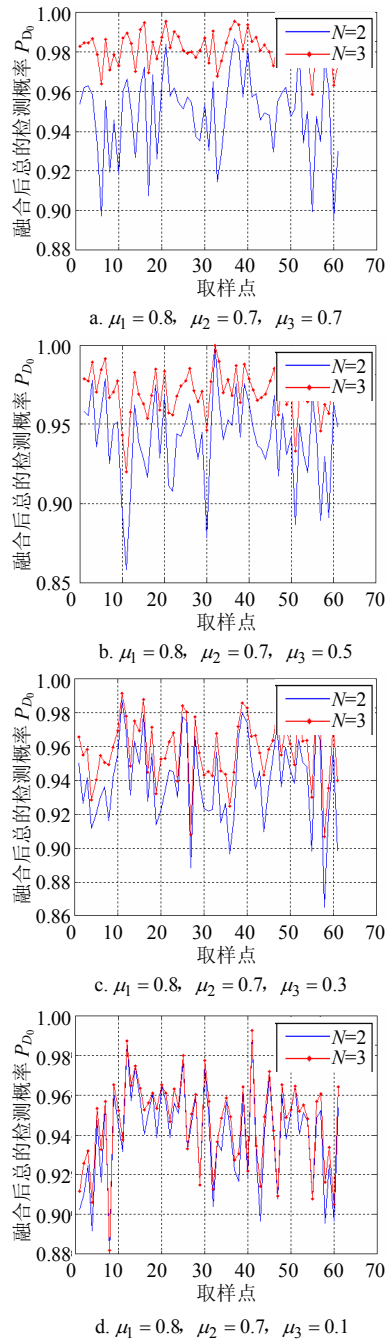


图3 不同假设下的总探测概率仿真曲线

图4为3个子系统的探测概率均比较高的时候的仿真结果。在这两种情况下, 直接融合后的探测概率分别为0.994 6和0.987 8; 选择融合时, 总探测概率分别为0.981 4和0.969 9。此时, 仅在总的探测概率分别降低0.013 2和0.017 9的情况下, 将虚警概率降低了三分之一。

可以看出选择融合方法依然适用于各子系统的探测概率均比较高的情况。

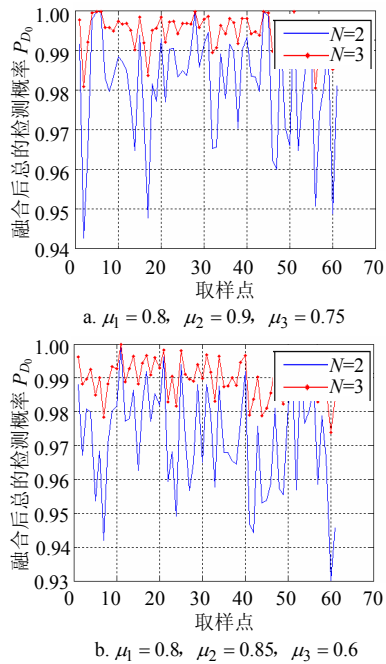


图4 子系统探测概率较高时的总检测概率仿真曲线

### 3 结束语

采用多波段光学联合探测, 可以实现对隐身目标的有效探测。在仅采用三波段的情况下, 若使系统的总虚警概率恒定, 在3个子系统的探测概率相差较大时, 则系统的总探测概率小于单一探测系统的探测概率。为使系统具有较高总探测概率, 光学联合探测系统可以采用不同的工作模式: 在3个子系统的探测概率均比较小的时候采用直接进行融合; 当子系统探测概率相差比较大时, 先比较然后采用秩 $K$ 融合算法进行融合, 可以在总探测概率减小不大的情况下, 使虚警概率明显降低, 实现对目标的有效探测。

### 参 考 文 献

- [1] YVES D V, SIMARD J R. CAMUS: An infrared visible and millimeter-wave radar integration system[C]//Infrared Technology and Application XXIV. San Diego: Proc of SPIE, 1998: 696-675.
- [2] VITALY B V, DENNIS V B. Acousto-optic processing of images in ultraviolet, visible and infrared regions of spectrum[C]//Acousto-Optics and Photoacoustics. Warsaw Poland: Proc of SPIE, 2005: 59530G1-59530G11.
- [3] CHORIER P, Tribolet P, DESTEFANIS G. From visible to infrared, a new detector approach[C]//Infrared Technology and Applications XXXII. Orlando: Proc of SPIE, 2006: 1-12.
- [4] 慕金龙, 王 骐, 李 琦, 等. 长波红外主被动复合成像中目标检测仿真研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 634-638.
- [5] JASON A M, STEPHEN D S. Automated testing of ultraviolet, visible, and infrared sensors using shared optics[C]//Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVIII. Orlando: Proc of SPIE, 2007: 1-14.
- [6] WANG Qian, LU Wei, WANG Chun-hui, et al. HWIL test facility of infrared imaging laser radar using direct signal injection[C]//Infrared Components and Their Applications. Beijing, China: Proc of SPIE, 2005: 463-473.
- [7] MÜNZBERGA M M, BREITERA R, CABANSKIA W, et al. Multi spectral IR detection modules and applications[C]//Infrared Technology and Applications XXXII. Orlando, USA: Proc of SPIE, 2006: 620612-1-620612-12.
- [8] 谭贤四, 武 文, 王 红, 等. 区域雷达网分布式检测性能改善方法[J]. 火力与指挥控制, 2001, 26(4): 50-58.
- [9] 吴昌英, 韦 高, 许家栋. 雷达组网目标检测性能的概率分析[J]. 现代雷达, 2007, 29(6): 54-56.
- [10] 王国玉, 马剑武, 刘佳琪. 雷达网络分布式检测性能的仿真研究[J]. 飞航导弹, 1998, 20(1): 45-50.

编 辑 熊思亮