

# IRST 对 3D 雷达引导性能分析

王国宏<sup>1,2</sup>, 何 友<sup>2</sup>, 毛士艺<sup>3</sup>

(1. 南京电子技术研究所, 江苏南京 210013; 2. 海军航空工程学院电子工程系, 山东烟台 264001; 3. 北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

**摘 要:** 对于由红外和雷达组成的多传感器系统, 分析和推导了用红外对 3D 雷达成功引导概率的解析表示式, 给出了该成功引导概率随一些特征参数变化的七个规律, 在多种情况下进行了成功引导概率的数值计算, 验证了成功引导概率的性质, 从而对研究和设计同地配置的红外对雷达引导系统具有一定的参考价值。

**关键词:** 雷达; 红外; 引导; 传感器管理; 性能分析

**中图分类号:** V556.6; TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 12-1737-04

## Performance Analysis of Using an IRST Sensor Cueing a 3D Radar

WANG Guo-Hong<sup>1,2</sup>, HE You<sup>2</sup>, MAO Shi-Yi<sup>3</sup>

(1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu 210013, China;

2. Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai, Shandong 264001, China;

3. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The analytical expression of the successful probability of using an IRST sensor cueing a 3D radar is derived for a co-located radar-IRST system. With the analytical expression, the successful cueing probability can be easily obtained. The relations between the successful cueing probability and the parameters are also given. Numerical calculation of the successful cueing probability is conducted for several cases and the results verify the relations of the successful cueing probability with the parameters. Discussions are also made. The conclusions presented in this paper are useful in designing co-located radar-IRST cueing systems.

**Key words:** radar; IRST; cueing; sensor management; performance analysis

### 1 引言

对于由雷达和红外组成的异类多传感器系统, 为了减少电磁辐射时间, 使系统降低对敌方干扰的脆弱性, 提高系统可靠性, 可利用红外传感器(主要是 IRST)对主动雷达进行指示或引导, 即首先由 IRST 对目标进行搜索, 并对发现的目标进行识别, 确定需要跟踪的目标, 一旦确定了目标之后, 就引导或指示雷达迅速跟踪目标。以往对于这种由雷达和 IRST 组成的异类传感器系统的研究, 主要涉及如何进行数据关联和状态估计<sup>[1-4]</sup>, 但对于用 IRST 引导雷达的性能分析则很少见到。文献[5-8]对传感器的引导问题进行了研究, 其中, 文献[5]提出了计算被动传感器对雷达成功引导概率的思想, 但没有给出便于计算的解析公式; 文献[6]给出了用模糊逻辑进行传感器引导、控制的方法, 文献[7]基于信息论的观点研究了引导中的信息增益, 文献[8]研究了基于决策的控制引导。

本文研究 IRST 与 3D 雷达处于同一平台时用 IRST 引导 3D 雷达的性能, 主要内容安排如下, 第二节推导 IRST 对 3D 雷达成功引导的概率, 第三节对成功引导概率的性质进行了讨论, 第四节在多种情况下对成功引导概率进行了计算, 并对

结果进行了讨论, 第五节介绍 IRST 对 3D 雷达进行引导时 3D 雷达的搜索模式, 最后是本文结论。

### 2 IRST 对 3D 雷达成功引导概率的推导与求解

当用 IRST 对 3D 雷达进行引导时, 通常 IRST 有大的视域 (FOV), 而 3D 雷达有较小的视域。图 1 给出了一个 IRST 对 3D 雷达进行引导的示意图, 其中,  $FOVa1$  和  $FOVe1$  分别是 IRST 的方位和俯仰视域范围,  $FOVa2$  和  $FOVe2$  分别是 3D 雷达的方位和俯仰视域范围,  $\hat{a}$  和  $\hat{e}$  分别是由 IRST 传感器得到的目标方位角和俯仰角估计值。所谓 IRST 对 3D 雷达的引导, 即是指当 IRST 得到有关目标的方位角估计  $\hat{a}$  和俯仰角估计  $\hat{e}$  并指示给 3D 雷达后, 3D 雷达的视域范围迅速转向 IRST 的指示范围, 且使 3D 雷达的视域中心指向 IRST 提供的目标方位估计  $\hat{a}$  和俯仰角估计  $\hat{e}$ 。

令  $a_1$  和  $e_1$  分别表示 IRST 对 3D 雷达引导结束时目标的方位和俯仰真值,  $Q_a$  表示目标的真方位在 3D 雷达方位视域范围内的事件,  $Q_e$  表示目标的真俯仰在 3D 雷达俯仰视域范围内的事件, 则 IRST 对 3D 雷达的成功引导性能即指事件  $Q$  发生的概率, 记为  $P_{cue}$ , 为

收稿日期: 2001-06-04; 修回日期: 2002-03-28

基金项目: 国防预研基金 (No. 102010301.41307050503)

$$P_{cue} = Pr(Q) = Pr(Q_a)Pr(Q_e) \quad (1)$$

其中

$$Pr(Q_a) = Pr\left\{-\frac{FOVa2}{2} \leq a_1 - \hat{a} \leq \frac{FOVa2}{2}\right\} \quad (2)$$

$$Pr(Q_e) = Pr\left\{-\frac{FOVe2}{2} \leq e_1 - \hat{e} \leq \frac{FOVe2}{2}\right\} \quad (3)$$

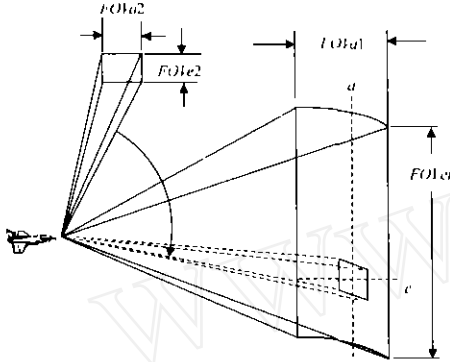


图1 IRST对3D雷达引导示意图

假定IRST传感器的方位估计误差和俯仰角估计误差均是服从高斯分布的,即令 $a$ 和 $e$ 分别表示在IRST测量时刻的目标真方位值和真俯仰值, $\sigma_a$ 和 $\sigma_e$ 分别是方位角估计 $\hat{a}$ 和俯仰角估计 $\hat{e}$ 的误差标准差,则有

$$\hat{a} \sim N(a, \sigma_a^2) \quad \text{和} \quad \hat{e} \sim N(e, \sigma_e^2)$$

假定在IRST对3D雷达引导期间由于目标在方位和俯仰方向上可能的运动而引起的最大方位角偏差和最大俯仰角偏差分别为 $S_{ma}$ 和 $S_{me}$ 。由于目标的实际运动是未知的,因而由目标运动而引起的实际方位角偏差可认为是在 $[a - S_{ma}, a + S_{ma}]$ 区间均匀分布的随机变量<sup>[5]</sup>,由目标运动而引起的实际俯仰角偏差可认为是在 $[e - S_{me}, e + S_{me}]$ 区间均匀分布的随机变量,即

$$a_1 \sim U[a - S_{ma}, a + S_{ma}] \quad (4)$$

$$e_1 \sim U[e - S_{me}, e + S_{me}] \quad (5)$$

若令 $\Phi(\cdot)$ 表示标准正态分布的累积概率分布函数,则在上述假设条件下,有

$$\begin{aligned} Pr(Q_a) &= Pr\left\{-\frac{FOVa2}{2} \leq a_1 - \hat{a} \leq \frac{FOVa2}{2}\right\} \\ &= E\left\{Pr\left\{a_1 - \frac{FOVa2}{2} \leq \hat{a} \leq a_1 + \frac{FOVa2}{2} \mid a_1\right\}\right\} \\ &= E\left\{\Phi\left(\frac{a_1 - a + \frac{FOVa2}{2}}{\sigma_a}\right) - \Phi\left(\frac{a_1 - a - \frac{FOVa2}{2}}{\sigma_a}\right)\right\} \\ &= \int_{a-S_{ma}}^{a+S_{ma}} \left\{\Phi\left(\frac{a_1 - a + \frac{FOVa2}{2}}{\sigma_a}\right) - \Phi\left(\frac{a_1 - a - \frac{FOVa2}{2}}{\sigma_a}\right)\right\} \frac{1}{2S_{ma}} da_1 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $E\{\cdot\}$ 表示求统计平均。若令 $y = a_1 - a$ ,并利用 $\Phi(x) + \Phi(-x) = 1$ 的关系进行化简可得

$$Pr(Q_a) = \frac{1}{2S_{ma}} \int_{-S_{ma}}^{S_{ma}} Pa(y) dy \quad (7)$$

其中, $Pa(y)$ 被定义为

$$Pa(y) = \Phi\left(\frac{FOVa2 + 2y}{2\sigma_a}\right) + \Phi\left(\frac{FOVa2 - 2y}{2\sigma_a}\right) - 1 \quad (8)$$

由于 $Pa(y)$ 为偶函数,故可得到

$$Pr(Q_a) = \frac{1}{S_{ma}} \int_0^{S_{ma}} Pa(y) dy \quad (9)$$

同理可得

$$Pr(Q_e) = \frac{1}{S_{me}} \int_0^{S_{me}} Pe(y) dy \quad (10)$$

其中

$$Pe(y) = \Phi\left(\frac{FOVe2 + 2y}{2\sigma_e}\right) + \Phi\left(\frac{FOVe2 - 2y}{2\sigma_e}\right) - 1 \quad (11)$$

于是可得

$$P_{cue} = \left(\frac{1}{S_{ma}} \int_0^{S_{ma}} Pa(y) dy\right) \left(\frac{1}{S_{me}} \int_0^{S_{me}} Pe(y) dy\right) \quad (12)$$

从上述推导 $Pr(Q_a)$ 的过程中可以看出

$$\begin{aligned} Pa(y) &= Pa(a_1 - a) \\ &= Pr\left\{a_1 - \frac{FOVa2}{2} \leq \hat{a} \leq a_1 + \frac{FOVa2}{2} \mid a_1\right\} \end{aligned}$$

可见, $Pa(y)$ 是在已知 $a_1$ 条件下的条件概率,从而可知, $P_{cue}$ 反映的是统计意义上的平均成功引导概率。

在求成功引导概率时,为了避免求解二重积分,采用按连分式展开的方法求解 $\Phi(\cdot)$ ,即

$$\Phi(x) \approx \begin{cases} 0.5 + \phi(x)x / \{1 - x^2 / \{3 + 2x^2 / \{5 - \dots \\ + (-1)^n nx^2 / (2n+1) \} \dots\} \}, & 0 \leq x \leq 3 \\ 1 - \phi(x) / \{x + 1 / \{x + 2 / \{x + 3 / \{x + \dots \\ + n/x \} \dots\} \} \}, & x > 3 \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)$ 。当取 $n=28$ 时,按式(13)求解 $\Phi(x)$ 可得到 $10^{-12}$ 的精度。当 $x < 0$ 时,可先按式(13)计算 $\Phi(-x)$ ,然后再按 $\Phi(x) = 1 - \Phi(-x)$ 求解。

### 3 平均成功引导概率 $P_{cue}$ 的性质

关于平均成功引导概率 $P_{cue}$ ,本文不加证明地给出如下几个性质:

**性质1**  $P_{cue} > Pa(S_{ma})Pe(S_{me})$ 。

**性质2** 在其它参数不变的条件下, $P_{cue}$ 随 $S_{ma}$ 的增加而单调减小。

**性质3** 在其它参数不变的条件下, $P_{cue}$ 随 $\sigma_a$ 的增加而单调减小。

**性质4** 在其它参数不变的条件下, $P_{cue}$ 随 $FOVa2$ 的增加而单调增加。

**性质5** 在其它参数不变的条件下, $P_{cue}$ 随 $S_{me}$ 的增加而单调减小。

**性质6** 在其它参数不变的条件下, $P_{cue}$ 随 $\sigma_e$ 的增加而单调减小。

**性质7** 在其它参数不变的条件下, $P_{cue}$ 随 $FOVe2$ 的增加而单调增加。

#### 4 计算举例与讨论

在多种情况下依据式(12)对引导成功概率进行了计算,得到的结果如图2至图5所示.图2和图3给出了成功引导概率  $P_{cue}$  与 IRST 方位估计标准差  $\sigma_a$  的关系曲线,其中,在图2中,  $FOVa2$  与  $S_{ma}$  满足  $FOVa2 \geq 2S_{ma}$ ,而在图3中则满足  $FOVa2 \leq 2S_{ma}$ .比较图2和图3可以看出,除验证了  $P_{cue}$  均随 IRST 方位角估计标准差  $\sigma_a$  的增加而单调减小的性质外,还发现在  $FOVa2 < 2S_{ma}$  时,成功引导概率比较小.因此应尽量避免  $FOVa2 < 2S_{ma}$  情况的出现,以保证有较高的成功引导概率.

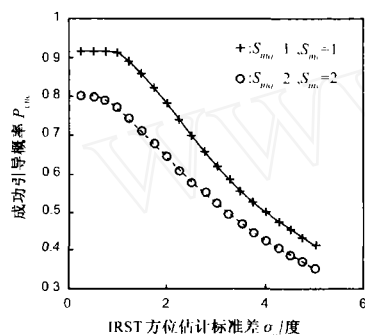


图2  $FOVa2 = 6^\circ$ ,  $FOVe2 = 4^\circ$ ,  $\sigma_r = 1^\circ$  时针对不同的  $S_{ma}$  和  $S_{me}$ ,  $P_{cue}$  与  $\sigma_a$  的关系

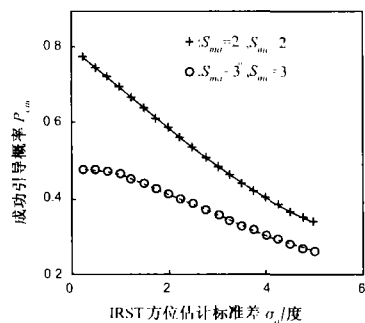


图3  $FOVa2 = 6^\circ$ ,  $FOVe2 = 4^\circ$ ,  $\sigma_r = 1^\circ$  时针对不同的  $S_{ma}$  和  $S_{me}$ ,  $P_{cue}$  与  $\sigma_a$  的关系

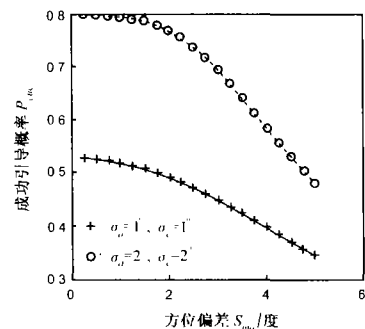


图4  $FOVa2 = 6^\circ$ ,  $FOVe2 = 4^\circ$ ,  $S_{me} = 2^\circ$  时针对不同的  $\sigma_a$  和  $\sigma_e$ ,  $P_{cue}$  与  $S_{ma}$  的关系

图4给出了成功引导概率  $P_{cue}$  与最大方位角偏差  $S_{ma}$  的关系曲线,由图可见,  $P_{cue}$  在各种情况下随  $S_{ma}$  的增加也单调减小,从而验证了性质2.

图5给出了成功引导概率  $P_{cue}$  与 3D 雷达视域  $FOVa2$  的关系曲线,由图可见,  $P_{cue}$  在各种情况下随  $FOVa2$  的增加而单调增加,从而验证了性质4.因此,在保持一定的性能要求前提下,尽量提高雷达的视域范围也是提高 IRST 对雷达成功引导性能的重要措施之一.

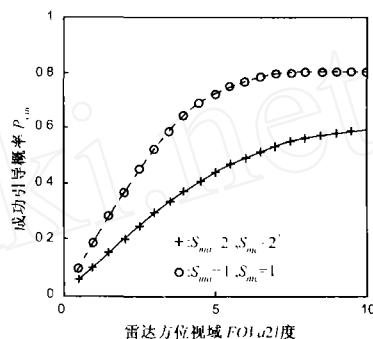


图5  $FOVe2 = 4^\circ$ ,  $S_{ma} = 2^\circ$ ,  $S_{me} = 2^\circ$  时针对不同的  $\sigma_a$  和  $\sigma_r$ ,  $P_{cue}$  与  $FOVa2$  的关系

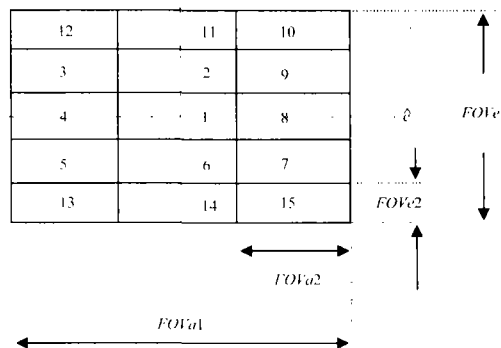


图6 IRST 对 3D 雷达引导时 3D 雷达搜索模式

由式(12)知,由于方位和俯仰对成功引导概率的影响具有对称性,因而对于成功引导概率随俯仰特征参数变化的情况,本文没有进行仿真.

#### 5 3D 雷达的搜索方法

从对成功引导概率  $P_{cue}$  贡献最大的原则出发,可以得到 IRST 对 3D 雷达引导时 3D 雷达的一种搜索方法如图6所示,即在用 IRST 对 3D 雷达进行引导时,雷达的方位视域中心应首先对准  $\hat{a}$ ,俯仰视域中心对准  $\hat{e}$ ,然后按图6所示的动态搜索模式进行搜索,其中的数字表示在 IRST 视域范围内雷达视域的搜索次序.

#### 6 结论

用 IRST 对雷达进行指示或引导,是 IRST 和雷达异类传感器系统中的重要工作方式之一,具有重要的实际应用价值.对于由 IRST 和 3D 雷达组成的多传感器系统,本文分析和推导了用 IRST 对 3D 雷达进行成功引导的概率解析表示式,研究了 IRST 对 3D 雷达成功引导概率随最大方位和俯仰角偏差、IRST 方位和俯仰估计标准差以及雷达视域等特征参数的

变化规律,给出了七个性质,在多种情况下进行了成功引导概率的数值计算,对成功引导概率随特征参数的变化规律进行了验证,从而对研究和设计同地配置的IRST对雷达引导系统具有一定的参考价值.为了进一步提高引导性能,除利用角度信息外,综合利用其它信息是未来的一个研究方向.

**致谢:**作者衷心感谢黄培康教授、蔡庆宇研究员所给予的指导.

#### 参考文献:

- [1] R K Saha. Track-to-track fusion with dissimilar sensors[J]. IEEE Transactions. on Aerospace And Electronic Systems, 1996, AES-32: 1021 - 1029.
- [2] 何友,王国宏,陆大铨,彭应宁.多传感器信息融合及应用[M]. 北京,电子工业出版社,2000.
- [3] Ningzhou Cui, Weixin Xie, Xiongnan Yu, Yuanliang Ma. Multisensor distributed extended Kalman filtering algorithm and its application to radar/IR target tracking[J]. SPIE, 1997, 3086: 323 - 330.
- [4] 周锐,申功勋,房建成,祝世平.多传感器融合目标跟踪[J]. 航空学报, 1998, 19(5): 536 - 540.
- [5] Thomas G H. Sensor cueing performance analysis[J]. IEEE, 1984.
- [6] G W Ng, K H Ng, L T Wong. Sensor management-control and cue. Fusion 2000.
- [7] Kenneth J H. A measure of the information gain attributable to cueing[J]. IEEE Trans on System Man and Cybernetics, 1991, 21(2): 434 - 442.
- [8] Gee L A, Abidi M A. Multisensor Fusion for decision-based control cues[J]. SPIE, 2000, 4052: 249 - 257.

#### 作者简介:



**王国宏** 男,1963年10月生于山西晋城,现为南京电子技术研究所博士后科研工作站博士后,海军航空工程学院雷达教研室主任、教授、博士生导师,中国电子学会高级会员,主要研究方向:多传感器信息融合、雷达信号和数据处理、模式识别等.

**何友** 男,1956年10月生于吉林磐石,教授,博士生导师,分别于1982年和1988年获武汉海军工程学院学士和硕士学位,1991.10 - 1992.11在西德不伦瑞克工业大学作访问学者,1997年6月在清华大学获博士学位,主要研究领域有:雷达自适应检测方法、多传感器信息融合、多目标跟踪、模式识别、火炮射表编制及其数据处理等.

**毛士艺** 男,1935年生于浙江,1958年毕业于北京航空航天大学电子工程系,1985 - 1986年赴美国纽约理工学院进修,现为北京航空航天大学教授、博士生导师、中国电子学会会士,主要研究方向为合成孔径雷达、信号建模与谱估计、滤波与多目标跟踪、数据融合、目标分类、制导等.