

文章编号: 2095-4980(2022)03-0267-06

面向目标搜索的异类多传感器协同指示引导

童俊¹, 刘旭蓉², 唐宇²

(1. 中国人民解放军 63961 部队, 北京 100012; 2. 航天系统部, 北京 100094)

摘要: 针对地面防空武器系统中多传感器资源管理问题, 研究了面向目标搜索的主动被动传感器协同指示引导问题。推导了三维异地配置下被动传感器对主动传感器的指示引导模型, 根据被动传感器对目标的作用范围讨论了指示引导范围, 结合传感器量测过程中的量测误差和传感器的站址误差建立了指示引导误差模型, 在此基础上计算了被动传感器对主动传感器成功指示引导的概率。仿真结果验证了本文模型的正确性与可行性。

关键词: 多传感器管理; 目标搜索; 异类传感器; 异地配置; 指示引导

中图分类号: TN95; TP391

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020122

Inhomogeneous sensors coordination direction and cueing approaches of target search

TONG Jun¹, LIU Xurong², TANG Yu²

(1. 63961 Troop of PLA, Beijing 100012, China; 2. The Department of Aerospace System, Beijing 100094, China)

Abstract: A method on inhomogeneous sensors coordination direction and cueing is studied for multi-sensor management in C⁴ISR systems. Firstly, direction and cueing models are derived from azimuth and pitch. Then, direction and cueing areas are discussed based on passive sensor effect range. The direction and cueing errors models are built based on measurement errors and position errors. The direction and cueing probability are computed at last. The simulation results validate the correctness and feasibility of proposed model.

Keywords: multi-sensor management; target searching; inhomogeneous sensors; different sites; direction and cueing

在多传感器管理中异类多传感器管理是重要的研究内容之一, 主要包括异类多传感器的协同目标跟踪研究与协同指示引导研究。其中, 目标跟踪的研究较为常见且成熟^[1-8]; 协同指示引导的研究则较少。

异类多传感器的协同指示引导主要是指在目标搜索阶段利用被动传感器对主动传感器进行指示引导。在防空指挥、控制、通信、计算、情报及侦察监视系统(Command, Control, Communication, Computer, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance, C⁴ISR)中, 当被动传感器搜索到目标时, 利用测得的目标信息对主动传感器进行指示引导, 使其在被动传感器指示的方向上进行目标搜索, 避免主动传感器在较大范围内搜索目标, 从而减少搜索时间, 提高多传感器系统对空域监视的快速反应能力; 同时也有助于控制主动传感器有源辐射, 提高系统的隐蔽性和抗毁性。

文献[9]研究了同地配置下电子支援措施(Electronic Support Measure, ESM)对二维(2D)雷达的引导性能, 得出了成功引导概率的计算公式。文献[10]研究和设计了同地配置下红外搜索跟踪系统对雷达的引导。文献[11]研究了异地配置下 ESM 对 2D 雷达的引导搜索方法。文献[12]研究和设计了异地配置下红外探测与跟踪(Infrared Search and Tracking, IRST)对雷达的引导。文献[13]给出了 ESM 对机载雷达和红外对机载雷达的引导方式。文献[14]研究了多目标情况下的 IRST 和雷达的指示交接问题。

本文对三维异地配置下的异类多传感器的指示引导进行了研究, 得出了相应的指示引导模型、指示引导范围、指示引导误差和指示引导概率, 并进行了相应的仿真与分析。

收稿日期: 2020-03-24; 修回日期: 2020-07-30

1 主被动传感器指示引导模型

1.1 三维指示引导模型

异地配置情况下，单部被动传感器对单部主动传感器的指示引导，是指被动传感器发现目标后，提供给主动传感器目标的方位和俯仰角信息，主动传感器根据被动传感器自身的作用范围及其提供指示引导信息，计算出目标相对于主动传感器所处的方位与高低范围，并将视域范围迅速指向该范围进行搜索和精确快速定位，使得目标在方位与俯仰上处于主动传感器的视域范围内。假设被动传感器 S_1 和主动传感器 S_2 位于同一平面内，其布局见图 1，不失一般性，设 S_1 和 S_2 位置坐标分别为 $(x_1, y_1, 0)$ 和 $(x_2, y_2, 0)$ 。目标 T 在平面 xoy 上的投影为 T' ，某时刻 S_1 测得目标方位角和高低角分别为 γ_1 和 ε_1 ， S_1 的作用范围介于 $|S_1 T_{\min}|$ 与 $|S_1 T_{\max}|$ 之间。设 γ_2 和 ε_2 是目标相对于 S_2 的方位角与高低角， $\gamma_1, \gamma_2 \in [0, 2\pi)$ ， $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \in [0, \pi/2]$ 。可得指示引导范围为：

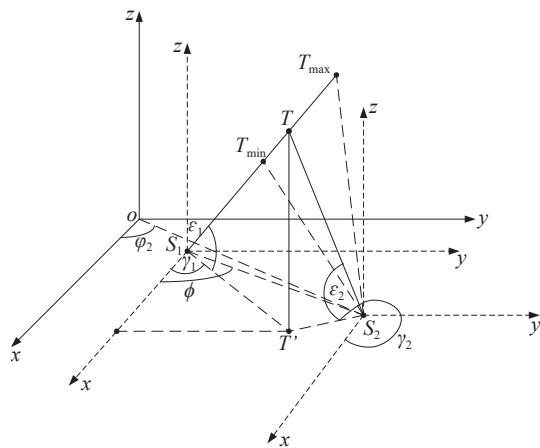


Fig.1 Sketch of guiding in 3-dimension
图 1 三维指示引导示意图

$$\gamma_2 \in \begin{cases} \left[k\pi + \arctan\left(\frac{r_{1\max} \cos \varepsilon_1 \sin \gamma_1 + y_1 - y_2}{r_{1\max} \cos \varepsilon_1 \cos \gamma_1 + x_1 - x_2}\right), k\pi + \arctan\left(\frac{r_{1\min} \cos \varepsilon_1 \sin \gamma_1 + y_1 - y_2}{r_{1\min} \cos \varepsilon_1 \cos \gamma_1 + x_1 - x_2}\right) \right], & \gamma_1 \in [0, \phi) \cup (\pi + \phi, 2\pi) \\ \left[k\pi + \arctan\left(\frac{r_{1\min} \cos \varepsilon_1 \sin \gamma_1 + y_1 - y_2}{r_{1\min} \cos \varepsilon_1 \cos \gamma_1 + x_1 - x_2}\right), k\pi + \arctan\left(\frac{r_{1\max} \cos \varepsilon_1 \sin \gamma_1 + y_1 - y_2}{r_{1\max} \cos \varepsilon_1 \cos \gamma_1 + x_1 - x_2}\right) \right], & \gamma_1 \in [\phi, \phi + \pi] \end{cases} \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 \in \begin{cases} \left[\arctan\left(\frac{r_{1\min} \sin \varepsilon_1}{\sqrt{(x_2 - r_{1\min} \cos \varepsilon_1 \cos \gamma_1)^2 + (y_2 - r_{1\min} \cos \varepsilon_1 \sin \gamma_1)^2}}\right), \arctan\left(\frac{r_{1\max} \sin \varepsilon_1}{\sqrt{(x_2 - r_{1\max} \cos \varepsilon_1 \cos \gamma_1)^2 + (y_2 - r_{1\max} \cos \varepsilon_1 \sin \gamma_1)^2}}\right) \right], \\ \cos(\gamma_1 - \phi_2) \leq \frac{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}}{r_1 \cos \varepsilon_1} \\ \left[\arctan\left(\frac{r_{1\max} \sin \varepsilon_1}{\sqrt{(x_2 - r_{1\max} \cos \varepsilon_1 \cos \gamma_1)^2 + (y_2 - r_{1\max} \cos \varepsilon_1 \sin \gamma_1)^2}}\right), \arctan\left(\frac{r_{1\min} \sin \varepsilon_1}{\sqrt{(x_2 - r_{1\min} \cos \varepsilon_1 \cos \gamma_1)^2 + (y_2 - r_{1\min} \cos \varepsilon_1 \sin \gamma_1)^2}}\right) \right], \\ \cos(\gamma_1 - \phi_2) > \frac{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}}{r_1 \cos \varepsilon_1} \end{cases} \quad (2)$$

式中： r_1 为传感器 S_1 与目标 T 之间的距离，即 $r_1 = |S_1 T|$ ； ϕ 为传感器 S_2 相对 S_1 的方位角，即 $\tan \phi = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}$ ； $\phi_2 =$

$\frac{y_2}{x_2}$ ； $k = 1, 2, 3, \dots$ 。

1.2 三维指示引导误差

假设传感器 S_1 和 S_2 在 x 轴与 y 轴方向上的站址误差均是相互独立的零均值高斯分布 (S_1 和 S_2 在同一平面上)。 S_1 的站址误差标准差分别为 σ_{x_1} 和 σ_{y_1} ； S_2 的站址误差标准差分别为 σ_{x_2} 和 σ_{y_2} 。同时假设 S_1 测量方位角和高低角的标准差分别为 σ_{γ_1} 和 σ_{ε_1} ，且服从零均值的高斯分布，并与各站址误差相互独立。则有：

$$\sigma_{\gamma_2}^2 = \left(\frac{\partial g_{\gamma}}{\partial \gamma_1}\right) \sigma_{\gamma_1}^2 + \left(\frac{\partial g_{\gamma}}{\partial \varepsilon_1}\right) \sigma_{\varepsilon_1}^2 + \left(\frac{\partial g_{\gamma}}{\partial x_1}\right) \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial g_{\gamma}}{\partial y_1}\right) \sigma_{y_1}^2 + \left(\frac{\partial g_{\gamma}}{\partial x_2}\right) \sigma_{x_2}^2 + \left(\frac{\partial g_{\gamma}}{\partial y_2}\right) \sigma_{y_2}^2 \quad (3)$$

$$\sigma_{\varepsilon_2}^2 = \left(\frac{\partial g_{\varepsilon}}{\partial \gamma_1}\right)^2 \sigma_{\gamma_1}^2 + \left(\frac{\partial g_{\varepsilon}}{\partial \varepsilon_1}\right)^2 \sigma_{\varepsilon_1}^2 + \left(\frac{\partial g_{\varepsilon}}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \left(\frac{\partial g_{\varepsilon}}{\partial y_2}\right)^2 \sigma_{y_2}^2 \quad (4)$$

1.3 三维指示引导概率

对于某一指示引导方位角 γ_2 和高低角 ε_2 以及对应的指示引导方差 $\sigma_{\gamma_2}^2$ 和 $\sigma_{\varepsilon_2}^2$ ，在高斯分布的情况下，利用主动传感器发射方位宽度为 Ω 、高低宽度为 Ψ 的电磁波波束，可计算出目标落入主动传感器 S_2 视域范围 $\Omega \times \Psi$ 内的概率，即指示引导概率。目标落入 S_2 发射的电磁波束 $\Omega \times \Psi$ 视域范围内的概率，即指示引导概率：

$$P(\gamma_2, \varepsilon_2) = P(\gamma_2)P(\varepsilon_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\gamma_2}\sigma_{\varepsilon_2}} \int_{\gamma_2 - \frac{\Omega}{2}}^{\gamma_2 + \frac{\Omega}{2}} \int_{\varepsilon_2 - \frac{\Psi}{2}}^{\varepsilon_2 + \frac{\Psi}{2}} \exp\left(-\frac{(\gamma - \gamma_2)^2}{2\sigma_{\gamma_2}^2}\right) \exp\left(-\frac{(\varepsilon - \varepsilon_2)^2}{2\sigma_{\varepsilon_2}^2}\right) d\gamma d\varepsilon \quad (5)$$

结合指示引导范围，得出传感器 S_1 对于传感器 S_2 的平均指示引导概率为：

$$\bar{P} = \frac{1}{\gamma_{2\max} - \gamma_{2\min}} \times \frac{1}{\varepsilon_{2\max} - \varepsilon_{2\min}} \int_{\varepsilon_{2\min}}^{\varepsilon_{2\max}} \int_{\gamma_{2\min}}^{\gamma_{2\max}} P(\gamma_2, \varepsilon_2) d\gamma_2 d\varepsilon_2 \quad (6)$$

2 仿真实验与分析

设传感器 S_1 的位置坐标为 (200 m, 300 m, 0)，其对目标的作用距离为 $r_1 \in [1\ 000\ \text{m}, 100\ 000\ \text{m}]$ ； S_2 的位置为 (500 m, 100 m, 0)。

2.1 不考虑指示引导误差下的指示引导范围

在不考虑各种误差影响情况下 S_2 指示引导方位、高低范围与 S_1 作用距离间的关系见图 2。与二维情况相似，当目标距离越大， S_2 的值与 S_1 越接近。

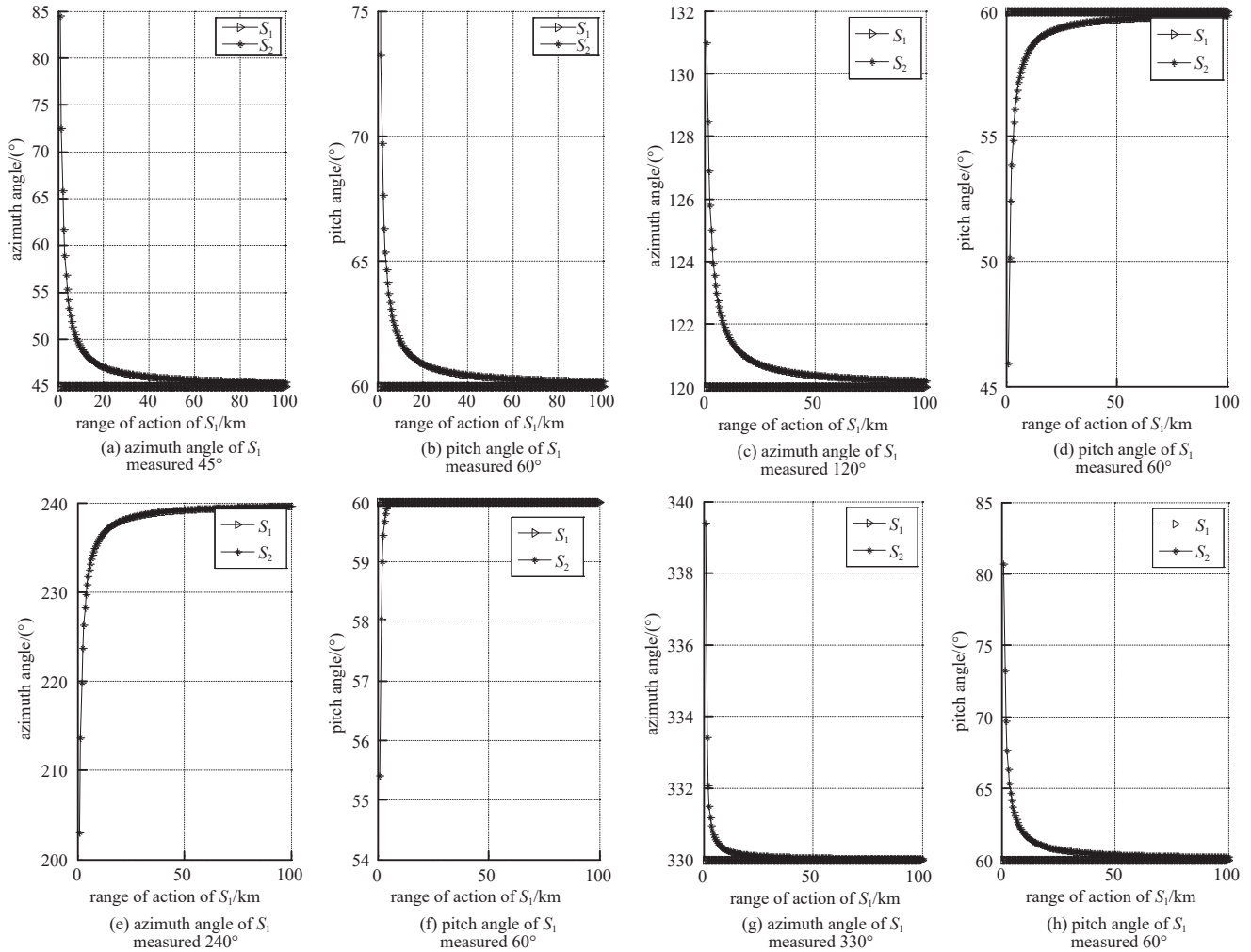


Fig.2 Sketch of guiding range in 3-dimension

图 2 三维指示引导范围示意图

2.2 指示引导误差

若 S_1 的站址误差标准差分别为 $\sigma_{x_1} = \sigma_{y_1} = 50\text{ m}$, S_2 的站址误差标准差分别为 $\sigma_{x_2} = \sigma_{y_2} = 40\text{ m}$ 。某时刻 S_1 测得目标方位角 $\gamma_1 = 45^\circ$, 高低角 $\varepsilon_1 = 60^\circ$, 图 3(a) 与图 3(b) 分别为 S_1 测量标准差 $\sigma_{\gamma_1} = 1^\circ, \sigma_{\varepsilon_1} = 2^\circ$ 与 $\sigma_{\gamma_1} = 2^\circ, \sigma_{\varepsilon_1} = 3^\circ$ 时的 S_2 指示引导标准差与 S_1 作用目标距离间的关系, 各误差相互独立且服从零均值高斯分布。从图中可看出, 随着目标距离增大, S_2 指示引导标准差逐渐趋近于 S_1 的方位角测量标准差。

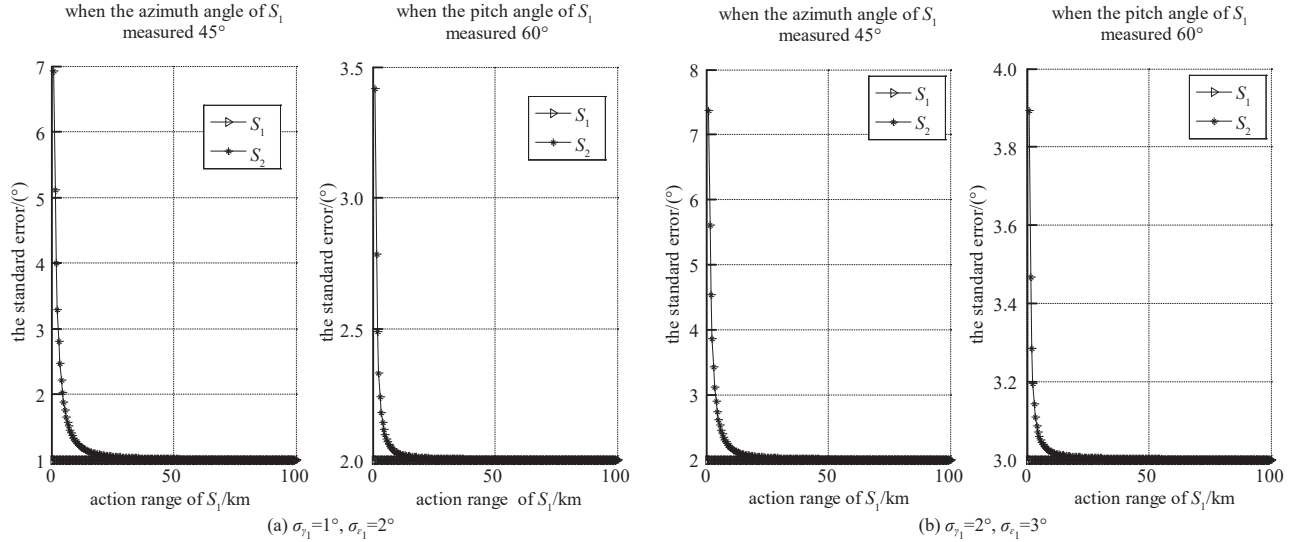


Fig.3 Relationships between the standard error and the action range of S_1

图3 指示引导误差与被动传感器作用距离关系

2.3 考虑指示引导误差下的指示引导范围

在前面的基础上, 仿真条件不变, 某时刻当 S_1 测得目标方位角 $\gamma_1 = 45^\circ$, 高低角 $\varepsilon_1 = 60^\circ$ 时, 且方位角测量标准差分别为 $\sigma_{\gamma_1} = 1^\circ, \sigma_{\varepsilon_1} = 2^\circ$ 与 $\sigma_{\gamma_1} = 2^\circ, \sigma_{\varepsilon_1} = 3^\circ$ 时, 进行 100 次 Monte Carlo 仿真的指示引导范围见图 4, 图 5 为当 $\gamma_1 = 120^\circ$, 高低角 $\varepsilon_1 = 60^\circ$ 时的仿真结果。

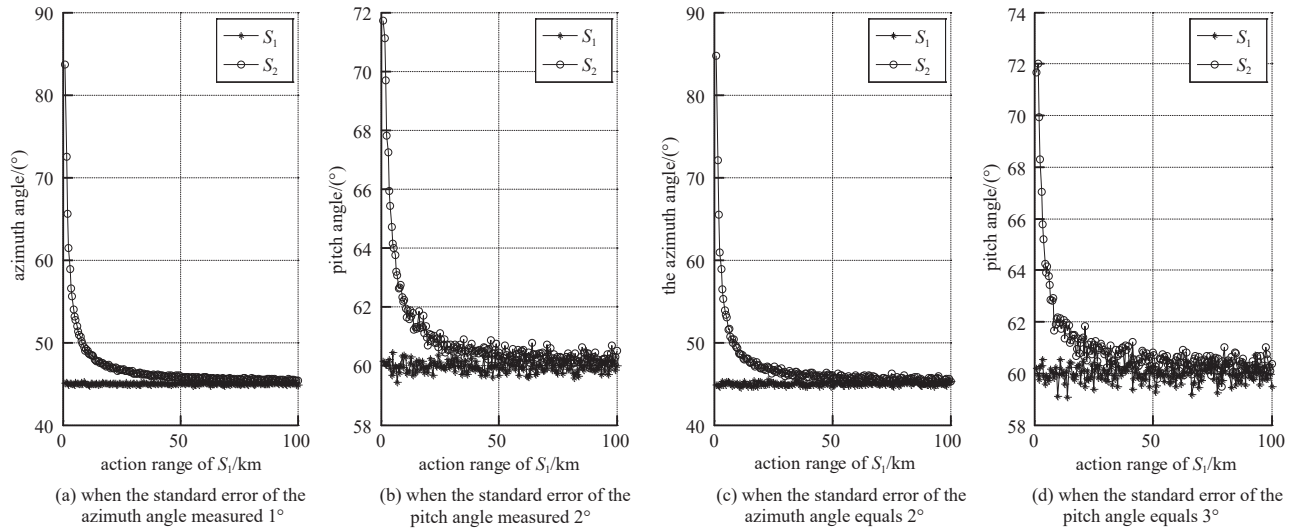


Fig.4 Guiding range under different errors($\gamma_1 = 45^\circ, \varepsilon_1 = 60^\circ$)

图4 $\gamma_1 = 45^\circ, \varepsilon_1 = 60^\circ$ 不同误差下指示引导范围

2.4 指示引导概率

若主动传感器 S_2 的电磁波波束方位宽度 $\Omega = 3^\circ$, 高低宽度 $\Psi = 2^\circ$, 某一时刻当 S_1 测得目标方位角 $\gamma_1 = 45^\circ$, 高低角 $\varepsilon_1 = 60^\circ$, 其他条件不变, 则指示引导概率与传感器 S_1 的作用目标距离之间关系见图 6。与二维情况相同, 目标距离越大, 指示引导误差越小, 导致指示引导概率增大。同时方位高低上的测角精确度对指示引导概率影响较大。

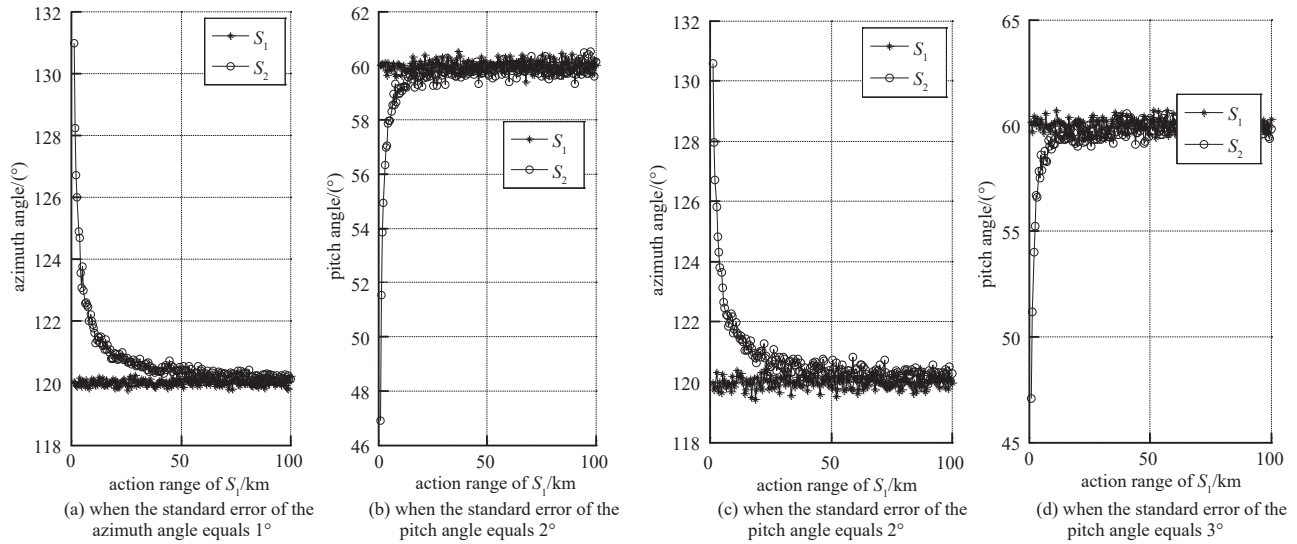


Fig.5 Guiding range under different errors($\gamma_1=120^\circ, \epsilon_1=60^\circ$)

图 5 $\gamma_1=120^\circ, \epsilon_1=60^\circ$ 不同误差下指示引导范围

结合指示引导范围，传感器 S_1 对于传感器 S_2 的平均指示引导概率与 S_1 测角标准差间关系见图 7。同样 S_1 的测角精确度越差，平均空域指示引导概率越低。因此在指示引导过程中 S_1 的测角精确度起着至关重要的作用。

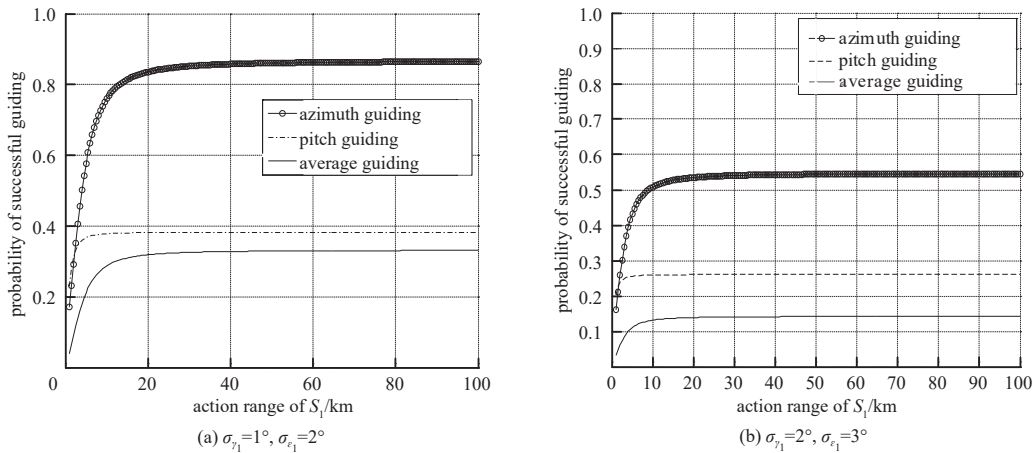


Fig.6 Relationships between guiding probability and passive-sensor range of action

图 6 指示引导概率与被动传感器作用距离关系

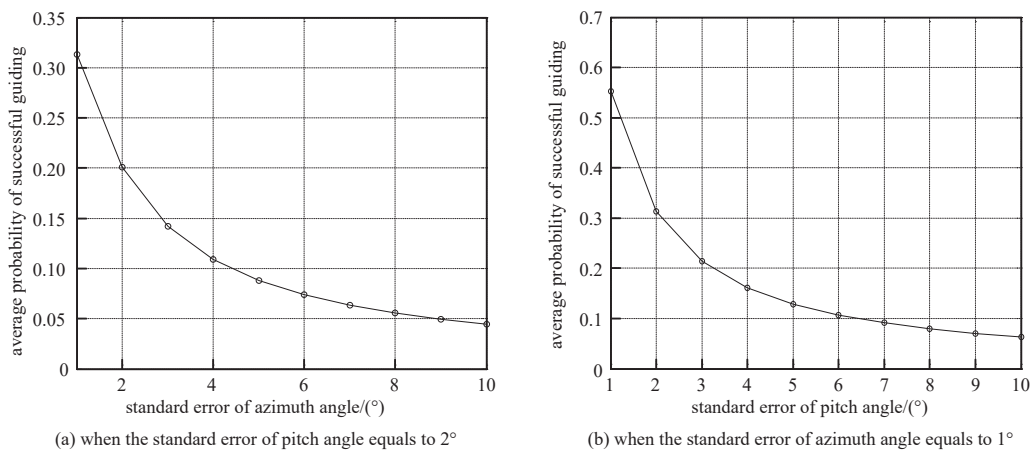


Fig.7 Relationship between the average probability of successful guiding and the standard error of angle measured by S_1

图 7 平均空域指示引导概率与 S_1 测角精确度关系

3 结论

用被动传感器对主动传感器进行指示引导是异类多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。本文以防空指挥控制系统中的异地配置的异类多传感器协同指示引导为研究背景,分别在二维平面和三维空间中推导了指示引导的模型,分析了指示引导的范围和指示引导的误差,在此基础上得出了成功指示引导的概率,对研究和设计异地配置下的异类多传感器系统具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 孙伟,赵心悦,张玉玺,等. 基于扩展集员滤波与信息几何的机动目标跟踪[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(5):786-790. (SUN Wei,ZHAO Xinyue,ZHANG Yuxi,et al. Maneuvering target tracking with the extended set-membership filter and information geometry[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(5):786-790.)
- [2] 赵一倩,朱红鹏,孙璐,等. 基于 GM-PHD 的多目标跟踪算法仿真及影响因素[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(3):382-387. (ZHAO Yiqian,ZHU Hongpeng,SUN Lu,et al. Simulation of multi-target tracking based on the GM-PHD filter and influence factors analysis[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(3):382-387.)
- [3] 张明,李波,刘学全,等. 云计算下基于贝叶斯网络的多传感器目标识别[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(5):740-744. (ZHANG Ming,LI Bo,LIU Xuequan,et al. Multi-sensor target recognition based on Bayesian classifier in cloud computing environment[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(5):740-744.)
- [4] LI Guchong,LI Suqi,YI Wei,et al. A suboptimal multi-sensor management based on Cauchy-Schwarz divergence for multi-target tracking[C]// 2018 International Conference on Information Fusion. Cambridge,UK:IEEE, 2018:862-869.
- [5] NG G W,NG K H,WONG L T. Sensor management-control and cue[C]// Proceedings of the Third International Conference on Information Fusion. Paris,France:IEEE, 2000,2:Web1/16-Web1/21.
- [6] 夏永红,匡华星,姚远,等. 基于 Kalman 滤波的雷达目标跟踪时间计算方法[J]. 雷达与对抗, 2018,38(2):14-18. (XIA Yonghong,KUANG Huaxing,YAO Yuan,et al. A method of calculating radar target tracking duration based on Kalman filter[J]. Radar and Antagonism, 2018,38(2):14-18.)
- [7] 于雷,黄俊,庞春雨,等. 机载雷达红外传感器集中式融合与管理[J]. 电光与控制, 2009,16(12):5-8. (YU Lei,HUANG Jun,PANG Chunyu,et al. Research on centralized fusion and management for airborne radar and infrared sensor[J]. Electronics Optics & Control, 2009,16(12):5-8.)
- [8] 黄俊,于雷,李骞,等. 基于 IEPF 序贯融合的多传感器管理方法[J]. 火力指挥与控制, 2010,35(8):71-74. (HUANG Jun,YU Lei,LI Qian,et al. Research on multi-sensor management in sequential fusion based on iterative extended Kalman particle filter[J]. Fire Control& Command Control, 2010,35(8):71-74.)
- [9] 王国宏,毛士艺. ESM 对 2D 雷达引导性能分析[J]. 航空学报, 2002,23(4):298-301. (WANG Guohong,MAO Shiyi. Performance analysis of an ESM guiding a 2D radar[J]. ACTA AERONAUTICA ET ASRONAUTICA SINICA, 2002,23(4):298-301.)
- [10] 王国宏,何友,毛士艺.IRST 对 3D 雷达引导性能分析[J]. 电子学报, 2002,30(12):1737-1740. (WANG Guohong,HE You,MAO Shiyi. Performance analysis of using anIRST sensor cueing a 3D radar[J]. ACTA ELECTRONIC SINICA, 2002,30(12):1737-1740.)
- [11] 彭锐晖,王树宗,吕永胜,等. 异地配置下 ESM 对 2D 雷达的引导分析[J]. 现代雷达, 2009,31(1):13-17. (PENG Ruihui,WANG Shuzong,LYU Yongsheng,et al. Analysis of ESM cueing 2D radar located at different sites[J]. Modern Radar, 2009,31(1):13-17.)
- [12] 吕永胜,王树宗,彭锐晖,等. 异地配置下IRST 对 3D 雷达的引导分析[J]. 红外与激光工程, 2008,37(5):911-915. (LYU Yongsheng,WANG Shuzong,PENG Ruihui,et al. Analysis ofIRST cueing to 3D radar at different sites[J]. Infrared an Laser Engineering, 2008,37(5):911-915.)
- [13] 何友,王国宏,关欣. 信息融合理论及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2010. (HE You,WANG Guohong,GUAN Xin. Information fusion theory and application[M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2010.)
- [14] 张华睿,杨宏文,郁文贤. 多目标情况下IRST 和雷达的指示交接问题[J]. 电子与信息学报, 2011,33(5):1101-1106. (ZHANG Huarui,YANG Hongwen,YU Wenxian. The handoff method ofIRST and radar under multi-target scenario[J]. Journal of Electronic & Information Technology, 2011,33(5):1101-1106.)

作者简介:

童俊(1984-),男,南京市人,工程师,博士,研究方向为目标探测与跟踪.email:tongjun_lgdx@126.com.

刘旭蓉(1981-),女,兰州市人,高级工程师,博士,研究方向为航天战略研究.

唐宇(1989-),女,南京市人,工程师,硕士,研究方向为飞行器总体设计.