

基于任务驱动的传感器指示交接研究

赵建恒, 许蕴山, 肖冰松, 罗文涛, 杨涛

(空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要: 针对传感器指示交接技术中指示对象难以确定的问题, 根据指示交接的实际过程, 研究了基于任务驱动的传感器指示交接, 详细阐述了指示交接任务的产生和执行, 包括对任务进行数学描述和分类、分解; 提出了基于协作任务优先级英式拍卖协议的协作/协调机制, 完成了不同协作任务竞争相同传感器资源出现冲突时的冲突消解, 解决了多传感器指示交接中“指示谁”的问题; 实例分析表明, 该方法合理、有效, 为对指示交接的深入研究奠定了基础。

关键词: 传感器指示交接; 任务驱动; 传感器协作; 协作/协调机制; 综合效用

Research on Sensor Indication and Handover Based on Task Driven

Zhao Jianheng, Xu Yunshan, Xiao Bingsong, Luo Wentao, Yang Tao

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Aiming at the problem that the indication object is difficult to determine in the sensor indication and handover, on the basis of the actual process of indication and handover, the course of indication and handover is researched based on task driven, and it is detailedly expounded that how tasks were produced and carried out, including description and classification of tasks. A cooperation and coordination mechanism is put forward by using English auction protocol with the priority of cooperative task, it can achieve the conflict resolution when different cooperative tasks compete for the same sensor resource and solve the problem of “who should be cued” in the sensor indication and handover. Finally, the simulation result verifies the rationality and effectiveness of the proposed method, and what have been done in this paper lay the foundation of research on the indication and handover.

Keywords: sensor indication and handover; task driven; sensor cooperation; cooperation and coordination mechanism; comprehensive utility

0 引言

在预警机平台上配置有多种异类传感器, 包括相控阵雷达(AESA)、红外搜索跟踪系统(IRST)、电子支援测量(ESM)、通信情报支援(CSM)等^[1], 存在多个传感器间指示和目标交接以完成协同探测的军事需求。传感器指示交接是传感器管理的一个重要组成部分^[2-3], 对其研究可以丰富传感器管理的内容, 完善传感器管理的功能, 已经逐步成为传感器管理的重要部分。所谓传感器“指示”就是利用来自于一种传感器的检测信息去引导另一种传感器来对准同一个目标或事件。当传感器A向传感器B移交监测目标, 或者传感器A引导传感器B进行不同的参数测量时, 就出现了“交接”。当满足交接条件时, 指示其他传感器提前在目标来袭空域搜索, 缩短截获目标的时间, 保证尽可能连续跟踪以及交接平滑。

国内外关于传感器指示交接技术的研究还相对较少。文献[4]针对同地配置下雷达/红外复合制导系统, 推导了雷达对红外进行角度成功指示概率的解析表达并分析相关规律。文献[5-7]研究了同地配置下ESM对2D雷达以及IRST对3D雷达的指示引导概率的解析表达, 分析成功指示概率的性质。文献[8]研究分析了同地配置下一维测向和二维测向ESM对

3D雷达成功指示引导的概率。文献[9-10]研究了异地配置下ESM对2D雷达以及IRST对3D雷达的指示引导, 推导了指示引导方程, 分析了指示引导误差。这些文献都针对特定的异类传感器, 对其指示引导概率进行解析表达, 分析成功引导概率的性质, 未从实战出发, 考虑多传感器多目标的情况。从预警探测作战方面考虑指示交接过程, 存在多种异类传感器协同探测的需求, 需充分考虑选择哪个传感器进行指示交接, 而多传感器间“指示谁”的问题未见研究。

传感器之间的指示就是根据当前的信息, 为完成系统所要执行的任务而与其他传感器协作以获取更多目标信息或执行其他操作(目标交接)的过程。由此可见, 任务的产生和执行驱动着指示交接的完成, 并贯穿于指示交接的全过程。本文首先研究基于任务驱动的传感器指示交接过程; 其次利用协作任务优先级英式拍卖协议研究任务驱动的传感器指示交接的协作、协调机制, 解决“指示谁”的问题。

1 基于任务驱动的传感器指示交接过程

在复杂实时动态环境下, 由于存在时间和资源约束, 需要解决传感器在有限时间、有限资源情况下的资源分配、冲突消解以及任务调度等问题。

基于任务驱动的传感器指示交接过程描述了该过程中任务怎样产生和执行, 如图1所示。

首先, 平台融合中心根据首先发现目标的传感器获得的目标信息确定任务列表, 并将其分成两种: 一种是平台/全局融合中心分配的某个传感器能独立完成的任务 $Ts_i (i = 1, 2, \dots,$

收稿日期: 2014-02-10; 修回日期: 2014-03-13。

基金项目: 空军工程大学工程学院科研创新基金(XS1101011)。

作者简介: 赵建恒(1990-), 男, 陕西铜川人, 硕士生, 主要从事雷达信号与信息处理方向的研究。

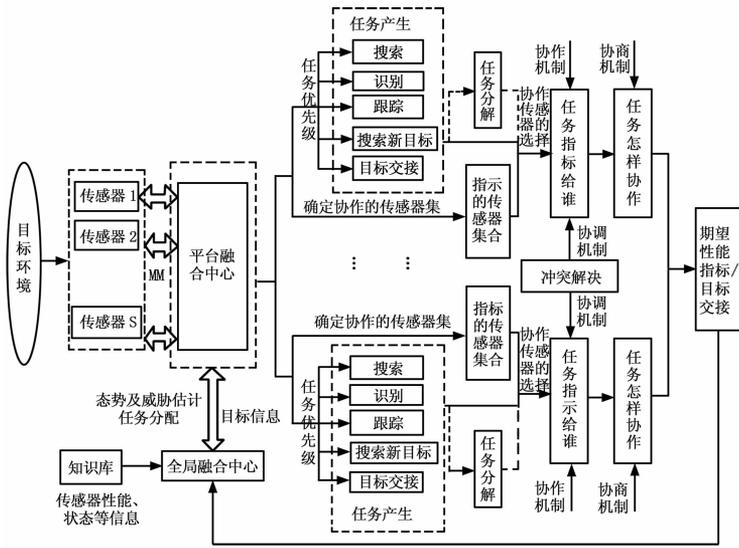


图 1 基于任务驱动的传感器指示交接过程示意图

n_1)，同时找出可以单独完成该任务的传感器集合 $S_{T_i^j}$ ；另一种是需多传感器协作执行的任务或按照一定的原则分解后需由其他传感器执行的子任务 $T_{C_i^j}(i = 1, 2, \dots, n_2)$ ，同时为其确定一个能够执行这些任务的传感器集合 $S_{T_i^j}$ 。

其次，需要协作完成任务的传感器给 $S_{T_i^j}$ 中的传感器发送指示信息（包含任务或分解后的任务及相关信息），接收指示信息的传感器预测协作执行任务的效益，随后，发送指示信息的传感器根据某种协作、协调机制确定需要和 $S_{T_i^j}$ 中的哪些传感器进行协作，即解决任务指示给谁的问题，随即协作的传感器进行响应，其他传感器则不响应。

再次，发送指示信息和响应指示信息的传感器依据某种协商机制就任务在他们之间怎样执行进行协商，即根据自己原有任务的情况进行协作任务的安排调度，以解决任务怎样协作执行的问题，随即控制传感器的模式、工作参数、任务安排，进行任务的执行。

最后，各参与协作任务传感器把获取的传感器报告发给融合中心进行融合，计算其是否满足任务要求的性能指标以及目标是否需要交接，不满足时，继续产生任务和协作的传感器集合再进行任务的协商、协作，该过程是一个循环的指示过程，直到下列条件之一满足时不再进行指示协作：①达到任务时限要求；②任务达到要求的性能指标；③没有可以协作的传感器资源；④目标任务完成的性能不再提高。

2 任务描述分类及分解

2.1 任务描述

融合中心的任务可用以下特征进行描述：

{任务类型，优先级^[11]，目标 ID，时间范围（截止时间），性能要求}

1) 任务类型：

(1) 对某个空域的监视搜索任务：分配传感器搜索指定的空域以探测新目标。

(2) 对已探测到的目标进行更高性能的探测、识别、跟踪任务：当对目标的探测、识别、跟踪性能达不到要求时，指示

其他传感器协作，以获取更好的性能。

(3) 对目标的交接任务：即一个传感器接管另一个传感器的目标。当满足交接条件时，指示其他传感器提前在目标来袭空域搜索，缩短截获目标的时间，保证尽可能连续跟踪以及交接平滑。

2) 优先级：反映了综合考虑全局系统之后所确定的完成任务的迫切程度，是进行协作传感器选择以及传感器执行任务顺序的依据。

3) 目标 ID/空域范围：指定了对哪个目标或空域执行相应的任务。

4) 时间范围/截止时间：每项任务都有其时间范围，若超出规定时间，则要求的任务将失去意义。

5) 性能要求：规定了任务完成的目标，如探测概率、正确识别率、跟踪精度等。

以上要求组成了一个任务的描述，例如任务 {探测目标，优先级 1，目标 2，当前时刻后的 5 s，探测概率大于 95%} 就是对优先级为 1 的目标 2 的探测概率达到 95% 以上，时间截止到当前时刻后的 5 s。

2.2 任务分类

根据在任务描述中关于任务类型的特征，可将任务分为以下 5 种：①空域监视；②目标探测；③目标识别；④目标跟踪；⑤目标接管。

根据目标任务是否需要协作可分为以下两种。

(1) 独立传感器任务：不需要或不能指示其他传感器协作执行的任务，包括只需某个传感器执行就可达到性能要求的任务，和只能被某个传感器而不能被其他传感器执行的目标任务。

对于只需某个传感器就可以完成的任务，平台/全局融合中心给能够完成该任务的传感器集合 $S_{T_i^j}$ 发送请求命令（或指示信息）Request. Order ($T_{S_i^j}, S_{T_i^j}, P(T_{S_i^j}), O(T_{S_i^j})$) 来执行任务 $T_{S_i^j}$ ，任务的优先级为 $P(T_{S_i^j})$ ，要求的性能指标为 $O(T_{S_i^j})$ ，然后，根据某种原则、策略（如综合效用最大的原则）选择相应的传感器执行该任务。

对于只能被某一个传感器执行的任务，平台/全局融合中心给该传感器发送请求命令 Request. Order ($T_{S_i^j}, S_{T_i^j}, P(T_{S_i^j}), O(T_{S_i^j})$) 来执行任务 $T_{S_i^j}$ ，该传感器会尽最大可能完成该任务。如果不能完成，传感器发送相应的传感器报告，告知融合中心完成该任务的情况。

(2) 协作传感器任务：需要指示其他传感器执行，如在多个传感器交叠探测范围内的进一步探测、识别或跟踪任务。

对于需要指示其他传感器协作的任务，平台/全局融合中心给能执行该任务的传感器集合中的传感器发送请求命令 Request. Order ($T_{C_i^j}, S_{T_i^j}, P(T_{C_i^j}), O(T_{C_i^j})$)。然后，根据某种原则确定协作任务和传感器集合 $S_{T_i^j}$ 中的哪些传感器进行协作，以及解决当不同的协作传感器任务出现资源冲突时的冲突消解，即传感器指示交接中的协作、协调机制。

2.3 任务分解

根据传感器之间的协作，对不同类型的任务按照如下策略进行分解：

(1) 对某空域的搜索、监视任务，可把其整个搜索空域依

据传感器可提供的性能分解成搜索、监视不同单个空域的子任务, 通过同时指示多个传感器分别搜索、监视各自的空域来完成整个空域任务。

(2) 对目标的识别任务, 根据识别目标属性、类型、型号所需的特征, 把任务分解为不同传感器分别获取相应特征的子任务。当一个协作传感器可以提供多个目标的识别特征时, 把利用该传感器获取目标相应的识别特征视为一个子任务, 然后指示多个传感器分别执行相应的子任务, 协作完成目标的识别。

(3) 对目标的跟踪任务, 根据当前信息中没有的跟踪状态向量和可以提供比当前目标信息精度更高的传感器进行分解, 从而得到还需要协作进行跟踪的传感器, 通过同时指示多个传感器分别执行相应的子任务来协作完成目标的跟踪。

如果任务按照以上策略分解, 则分解后比不分解时更容易确定执行每个子任务的候选传感器, 同时可以减少从候选传感器中选择协作传感器的难度, 因为分解后针对每个子任务能够协作的候选传感器数目会变少。同时, 分解后的每个子任务对应一个协作的传感器集合, 其中对于所有子任务的执行可同时分布进行, 这样任务分解后可以减少整个任务执行时协作的次数, 提高完成任务的效率。

3 基于协作任务优先级英式拍卖的协作/协调机制

任务驱动传感器指示交接过程中协作、协调机制研究的主要内容和和哪些传感器进行协作以及协作时传感器资源冲突的消解方法, 以解决任务指示给谁的问题。当某个任务需要协作执行时, 先把该任务按前述方法分解为子任务, 再根据执行相应子任务的综合效用和约束条件选择协作传感器。

传统的英式拍卖是一种应用最普遍的拍卖方式。在拍卖中, 卖方宣布拍卖品的起叫价, 投标者以此价为限, 由低至高竞相报价, 直到无人提出更高的价格时, 拍卖品即归报价最高的投标者所有^[12]。把其应用于传感器指示交接中协作任务的协作传感器选择时, 首先令需要协作执行任务的传感器为拍卖方, 记为 S_a , 协作传感器集合中的传感器为投标方, 记为 S_b , 然后每个 S_a 对其多个协作任务在多个 S_b 中拍卖, 选择协作传感器时, 还需考虑当选择的 S_b 相同且该 S_b 由于某种原因只能执行一个协作任务时的冲突, 而带有协作任务优先级的英式拍卖协议正是为解决这一问题而提出的。

拍卖方和投标方进行拍卖和投标时之间的协议可以用有限状态图表示, 如图 2 和图 3 所示。

拍卖方 S_a 和投标方 S_b 同时使用基于协作任务优先级英式拍卖协议完成协作任务传感器的选择。流程如下: S_a 将需要协作的任务广播给 S_b 并宣布拍卖开始, S_b 接收到消息后, 根据自身状态和相关信息评估执行协作任务的综合效用, S_b 给 S_a 一次发送协作任务的一个标的, S_a 对协作任务所有标的按照综合效用最大原则进行处理, 若某 S_b 没能中标, 则撤标, 同时它判断是否还有综合效用更大的标的, 即能否进行加价投标, 然后该 S_b 将新的标的发送给 S_a 再次进行标的处理, 最后选择综合效用最大的 S_b (协作传感器) 作为中标方, 以上就是指示交接中的协作机制, 以完成协作传感器的选择。

对于同一拍卖方不同的协作任务以及不同拍卖方的协作任

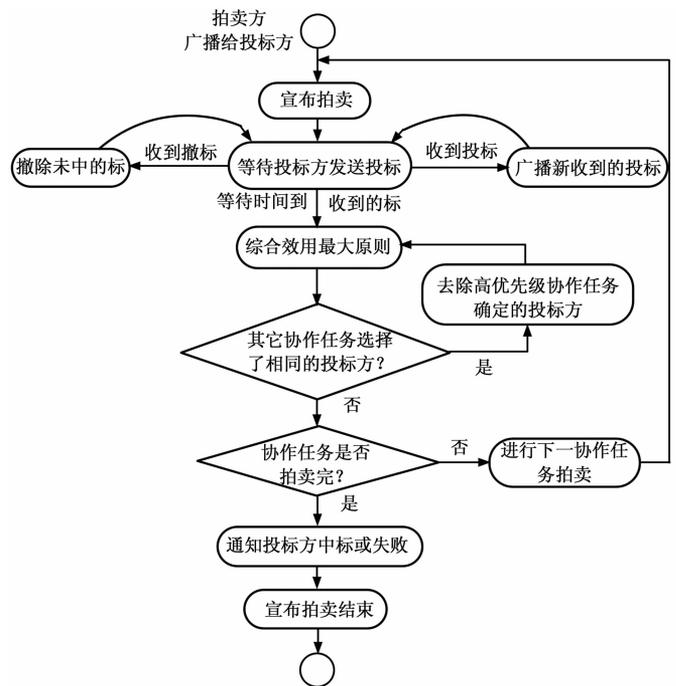


图 2 拍卖方有限状态图

务进行拍卖, 若按上述流程出现了多个投标方竞争多个协作任务需进行投标方选择时, 拍卖方可按照协作任务优先级从高到低的顺序, 依据最大效用原则进行选择, 这样高优先级的任务先得到分配。具体流程如下:

- (1) 将协作任务按优先级排序;
- (2) 优先级最高的任务依据综合效用最大原则选择投标方;
- (3) 若某投标方执行的任务数已达上限, 则该投标方对其他协作任务进行撤标处理;
- (4) 优先级次之的任务在剩余的投标方中选择;
- (5) 依此类推, 直到把需要协作的任务分配完或不再有可用的投标方;
- (6) 若某协作任务由于资源冲突没能分配到投标方, 则需要等待高优先级的协作任务结束并释放其占用的投标方, 才能进行选择。

以上就是任务驱动传感器指示交接过程中的协调机制, 以解决协作传感器资源的冲突。

4 协作/协调机制中的综合效用计算模型

协作/协调机制中的综合效用由完成任务所获取的效益和代价组成。效益指增加协作传感器后能提高的性能, 其中协作传感器对协作任务可能有多个执行方式, 从而产生多个效益。代价包括此传感器执行协作任务所需的能量、时间消耗以及因此而中断正在执行任务的损失。

综上所述, 对于需要协作的任务 $Tc_i, i = 1, 2, \dots, N$, 能够执行此任务的传感器集合 S_{Tc_i} 中的传感器执行任务所获取的综合效用为 E_i (E_i 为集合中不同传感器 i 执行协作任务 Tc_i 的综合效用), 根据综合效用最大的原则选择协作的传感器, 即

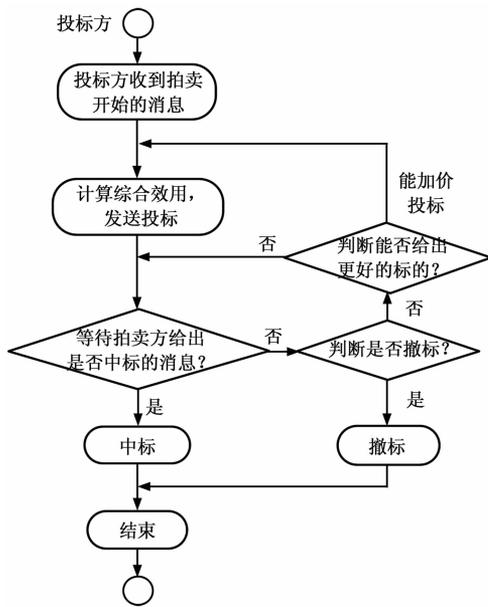


图 3 投标方有限状态图

$$Max_{i \in S_{Tc_i^t}} E_i = P_{i_0}^{initiator} (\eta B_{ij} - (\alpha C_{ij}^{energy} + \beta C_{ij}^{time})) \quad (1)$$

式中， $P_{i_0}^{initiator}$ 为发起协作的传感器 i_0 对能够执行协作任务的传感器集合 $S_{Tc_i^t}$ 中的传感器 i 成功指示的概率； B_{ij} 为传感器 i 执行协作任务 Tc_i^t 所产生的效益； C_{ij}^{energy} 为传感器 i 执行协作任务 Tc_i^t 的能量消耗； C_{ij}^{time} 为时间消耗； η, α, β 分别为传感器执行协作任务产生的效益、能量消耗以及时间消耗的权重值。

5 应用实例分析

假设初始确定的可执行协作任务 $Tc_1^t, Tc_2^t, Tc_3^t, Tc_4^t$ 的传感器集合分别为 $S_{Tc_1^t} = \{S_1, S_2, S_3\}; S_{Tc_2^t} = \{S_2, S_3, S_4\}; S_{Tc_3^t} = \{S_1, S_3, S_4, S_5\}; S_{Tc_4^t} = \{S_3, S_4, S_5\}$ 。协作任务的优先级排序为 $Tc_1^t > Tc_2^t > Tc_3^t > Tc_4^t$ ，且每个传感器可执行一个协作任务，集合中的传感器对协作任务的综合效用如表 1 所示。

表 1 协作任务执行的综合效用

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
Tc_1^t	10	5	7	—	—
Tc_2^t	—	7	8	9	—
Tc_3^t	10	—	8	11	6
Tc_4^t	—	—	8	8	7

根据以上流程，对于拍卖方 Tc_1^t ，可确定投标方 $S_{Tc_1^t}$ 中的 S_1 中标，即 S_1 执行 Tc_1^t ；同理 S_4 执行 Tc_2^t ，若 S_4 执行 Tc_3^t ，由于和 Tc_2^t 确定的协作传感器相同，且 Tc_3^t 的优先级小于 Tc_2^t 的优先级，故 S_4 执行 Tc_2^t ；则去除传感器 S_4 ，根据最大效用原则 Tc_3^t 只能选择 S_1 ，这时 S_1 已经分配给了 Tc_1^t ，依次类推，则 Tc_3^t 只能由 S_3 来协作执行；因 S_3 协作执行 Tc_3^t ，故 Tc_4^t 只能分配给 S_4 协作执行，又因为 S_4 已经分配给了 Tc_2^t ，

所以只能由 S_5 来协作执行。所以各传感器执行协作任务的结果为 $Tc_1^t \rightarrow S_1, Tc_2^t \rightarrow S_4, Tc_3^t \rightarrow S_3, Tc_4^t \rightarrow S_5$ 。需说明的是如果某协作任务由于资源冲突没能分配传感器，则需要等待高优先级的协作任务执行完后释放其占用的传感器。

6 结论

本文依据传感器指示交接的本质，分析了基于任务驱动的传感器指示交接过程，研究了过程中的协作、协调机制并进行了实例分析，解决了传感器“指示谁”的问题。需进一步研究的内容主要有 3 点：

(1) 传感器指示交接中涉及到指示与交接的时机的问题，下一步有必要对指示交接的触发条件作明确定义，通过对触发条件的合理设置、量化和标准化，使得传感器在需要指示其它传感器（组合）和交接目标时自动完成，实现基于作战任务的传感器指示交接智能化。

(2) 对于不同的传感器组合之间的指示和交接情况，会有不同的指示与交接参数，就需要对这些参数的数据率、数据类型、参数归属等问题深入分析以确定传什么参数，因此开展研究针对所有可能的交接传感器之间有差异性的目标指示与交接算法是今后需解决的关键问题之一。

(3) 在实际战场中，常存在多机间的协同作战，因此在今后的研究中，应增加对数据链所传递信息的考虑。

参考文献：

- [1] 陆军, 酆能敬, 曹晨, 等. 预警机系统导论 (第二版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [2] 何友, 关欣, 王国宏. 多传感器信息融合研究进展与展望 [J]. 宇航学报, 2005, 26 (4): 524-529.
- [3] Ng G W, Ng K H, Wong L T. Sensor management—control and cue [A]. The 3rd international conference on information fusion [C], Singapore, July 10-13, 2000.
- [4] 孙殿星, 王学伟, 周晓东, 等. 雷达/红外复合制导系统雷达对红外引导评估 [J]. 舰船电子工程, 2010, 30 (4): 33-35.
- [5] 王国宏. 分布式检测、跟踪及异类传感器数据关联与引导研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2002.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 王建国, 刘国朝. 舰载雷达与 ESM 协同探测方法研究 [J]. 舰船电子对抗, 2007, 30 (6): 11-15.
- [9] 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): 13-16.
- [10] 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.
- [11] 陈升来. 机载传感器管理中的目标优先级评估方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (12): 3292-3294.
- [12] 胡晶晶, 曹元大, 胡军. 基于英式拍卖协商协议的多智能体任务分配 [J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12 (5): 795-799.