多平台防空体系中的协同机制研究

张杰勇[1] 姚佩阳[1] 滕培俊[2]
(空军工程大学电讯工程学院 西安 710077)[1] (中国人民解放军94865部队 杭州 310021)[2]

摘 要 多平台怎么进行协同,是多平台防空体系建设过程中面临的最为关键的问题之一。在介绍协同机制在多平台防空体系中的重要作用的基础上,归纳和描述了多平台防空体系中的各种不同的协同机制,并分析和比较了各种协同机制的性能和应用场合。最后,结合作战模式不同的发展阶段,讨论了基于目标分配的3种不同的协同机制。

关键词 指挥控制,多平台,协同防空,协同机制,目标分配
中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Research of Coordination Mechanism in Multi-platform Air Defense System

ZHANG Jie-yong[1] YAO Pei-yang[1] TENG Pei-jun[2]
(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)[1]
(Unit 94865 of the PLA, Hangzhou 310021, China)[2]

Abstract How to cooperate the actions among multi-platform is one of critical problems in the process of building multi-platform air defense system. In the basic of introducing the important state of the coordination mechanism in multi-platform air defense system, many different kinds of coordination mechanisms were concluded and specified, then the performance and application of these different kinds of coordination mechanisms were analyzed and compared. At last, combining with the different development phases of operation mode, the three different kinds of coordination mechanisms based on target allocation were discussed.

Keywords Command and control, Multi-platform, Cooperative anti-air, Coordination mechanism, Target allocation

1 引言

由于个体平台的资源有限性、平台之间行为的相互依赖性、整体时间约束等条件因素,多平台防空体系中各平台之间需要协同。没有协同,就泯灭了多平台组成体系给体系整体性能的提升带来的所有益处;没有协同,整个体系就迅速蜕化为一个无序的个体集合。因此,协同在多平台防空体系中具有中心地位。

在缺少协同的情况下,很多负面的影响就会出现。比如,同一个资源被两个平台同时使用,两者之间存在资源冲突,结果会造成体系全局解的退化。好的协同机制可以弱化体系能力和资源等方面的竞争,可以强化创建体系自主、自发的"非零和博弈"的双赢环境。在网络中心战的军事理论和技术不断发展的过程中,一个多平台体系要使各个体平台优势互补,最终达到整体最优,采用一种好的协同机制是非常必要的。因此,多平台防空体系中各平台之间怎样协同,即选择怎样的协同机制进行协同,是多平台防空体系建设过程中面临的最为关键的环节之一。

鉴于协同机制在多平台防空体系中的重要作用,本文开展了对多平台协同防空中协同机制的研究。

2 多平台防空体系中的协同机制

自然界和人类社会的很多领域都存在着协同,协同机制一般可分为3种类型[1]:基于协议(社会规则)的协同机制、基于通信的协同机制和基于学习的协同机制。

同样,协同存在于多平台防空体系。根据协同在多平台协同防空指挥控制流程中所处位置的不同,可将多平台协同防空体系中的协同机制分为两类[2]:基于个体作战方案的协同机制和基于目标分配的协同机制。

(1)基于个体作战方案的协同机制

其指挥控制流程如下。

Step1 探测、识别威胁目标。通过探测、分析战场空间态势,识别目标,并根据目标的威胁程度进行目标优先级排序。

Step2 制定个体作战方案。多平台防空体系中的各平台根据出现的目标情况制定个体的作战方案。

Step3 个体作战方案冲突检测与消解。分析个体作战方案之间的相互作用,减少个体作战方案彼此间的冲突,最后合并成一个整体的作战方案。

Step4 实施整体作战方案。

到稿日期:2010-10-25 返修日期:2010-12-13 本文受国家自然科学基金(71071157),空军工程大学电讯工程学院博士创新基金(200907)资助。

张杰勇(1983—),男,博士生,主要研究方向为指挥控制组织建模,E-mail:dumu3110728@126.com;姚佩阳(1960—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为指挥自动化;滕培俊(1984—),男,助理工程师,主要研究方向为嵌入式系统。

(2)基于目标分配的协同机制

其指挥控制流程如下。

Step1　探测、识别威胁目标。通过探测、分析战场空间态势,识别目标,并根据目标的威胁程度进行目标优先级排序。

Step2　目标分配。通过一些方法,将出现的每个目标分配给一定的平台。

Step3　制定个体作战方案。各平台根据分配给自己的目标,制定相应的作战方案。

Step4　合并个体作战方案。将所有个体作战方案结合,合并成一个整体的作战方案。

Step5　实施整体作战方案。

基于个体作战方案的协同机制中,协同主要发生在其指挥控制流程 Step3 中。这种协同机制有一个很大的缺点:由于个体作战方案之间存在一定的相互作用,规划之后的协同虽然可以消除个体作战方案之间的冲突,但是这个过程一般需要花费较长的时间。而多平台协同防空体系中,各平台之间的协同是基于双方对抗风险型的动态决策,具有很强的实时性要求,因此该协同机制并不能很好地应用于多平台防空体系。

而基于目标分配的协同机制中,协同主要发生在其指挥控制流程 Step2 中,通过目标分配来完成体系中各平台之间的协同。其与基于个体作战方案的协同机制相比,主要优势在于:对一部分目标制定作战方案比对全部目标制定作战方案要更简单,所以该协同机制减轻了每个平台的负担,减小了其制定作战方案的复杂性。同时,由于目标之间相互独立,因此合并个体作战方案不需要进行冲突的检测与消解,从而缩短了协同所需的时间。因此,在多平台协同防空体系中,大多采用基于目标分配的协同机制。下面将对基于目标分配的协同机制做详细描述。

3　基于目标分配的协同机制的分类及其性能比较

基于目标分配的协同机制是通过目标分配来完成各平台之间的协同。根据目标分配方法的不同,该协同机制又可分为基于责任区划分的协同机制、基于合同网协议的协同机制(集中式)和基于统一认知的分散式协同机制(自同步、自主协同)。

为了方便下文的描述,做出以下的假设。

假设 1　选择文献[3]中所描述的普通的武器-目标分配(Weapon Target Assignment,WTA)的情况为研究对象,来描述本文所研究的协同机制。假设每个平台(Pla)每次只能发射一枚导弹,并且一个目标(Tar)最多只能受一枚导弹攻击。

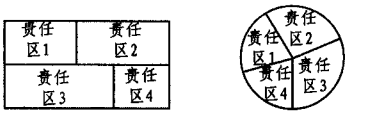
假设 2　假设整个多平台防空体系中参与协同的平台的数量为 N;在某一时刻 t,发现并识别敌方目标的数量为 M。

假设 3　假设在某一时刻 t,平台对目标的毁伤概率矩阵为矩阵 $MPS_{N\times M}$;平台 i 对所有目标的毁伤概率列表为向量 PS_i;$PS_{i,j}$ 为矩阵 $MPS_{N\times M}$ 的元素,表示平台 i 对目标 j 的毁伤概率。

3.1　基于责任区划分的协同机制

基于责任区划分的协同机制是一种典型的基于协议的协同机制。该协同机制中,目标出现之前,整个多平台防空体系中每个平台都被事先赋予一定的责任区,每个平台只需对其责任区中出现的目标制定相应作战方案。

责任区划分方法,一种是基于栅格的划分,另一种是基于扇形的划分,如图 1 所示。在多平台防空体系中,责任区的划分大多采用基于扇形的划分方法。以下就基于扇形的划分方法对该协同机制进行描述。



(a)基于栅格的划分方法　(b)基于扇形的划分方法

图 1　责任区的划分方法

基于责任区划分的协同机制中,最重要的环节就是责任区边界的确定。一旦责任区边界确定,多平台防空体系中各平台就明确了各自的责任区。责任区边界的确定和维持是一个动态的过程,假如整个多平台防空体系中的某个平台被摧毁,那么整个防御空间会根据现有的平台重新划分。

防御门限 PS_T 是该协同机制的一个重要概念。假如某个平台 Pla_i,在它的责任区内探测并识别了某一目标 Tar_j,且估计 Pla_i 对 Tar_j 的毁伤概率为 $PS_{i,j}$。如果存在 $PS_{i,j}<PS_T$,则 Pla_i 将向责任区相邻的两个平台 Pla_{i-1} 和 Pla_{i+1} 发出帮助请求;若 Pla_{i-1} 或 Pla_{i+1} 答应请求,则将目标分配给 Pla_{i-1} 或 Pla_{i+1};若 Pla_{i-1} 且 Pla_{i+1} 没有回应或拒绝请求,则 Pla_i 必须自行对该目标制定作战方案。具体流程如图 2 所示。

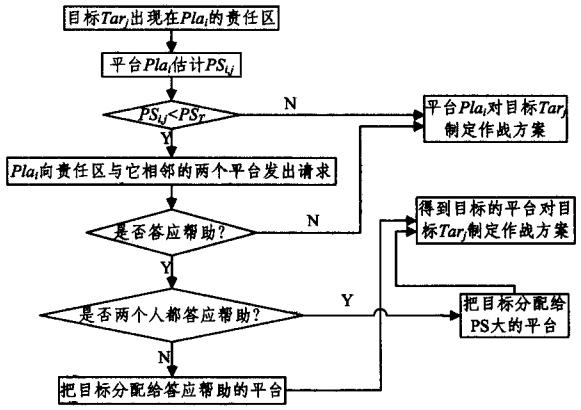


图 2　基于责任区划分的协同机制工作流程图

基于责任区划分的协同机制有一个明显的特点:几乎不需要通信。因此,在通信带宽非常小,或是通信几乎不能用的情况下,通过使用这种机制来协同具有明显的优势。

3.2　基于合同网协议的协同机制(集中式)

基于合同网协议的协同机制[4,5]是一种基于通信的协同机制。该机制中,整个多平台防空体系由一个具有中心地位的协同中心和其他参与协同的平台构成。协同中心相当于合同网协议中的招标者,而其他参与协同的平台相当于合同网协议中的投标者。由于有协同中心的存在,该协同机制是一种集中式的协同机制。

基于合同网协议的协同机制的工作流程如下。

Step1　协同中心的确定。在整个多平台防空体系中,选出一个平台作为协同中心。

Step2　目标的发现、识别及排序。通过探测、分析战场空间态势，识别目标，并根据目标的威胁程度进行优先级排序。

Step3　目标的招标。对目标按威胁程度的先后顺序依次进行招标。对于某一目标，协同中心会要求所有参加协同的平台向其发送它们关于该目标的 PS。

Step4　各参与协同的平台投标。参与协同的各平台向协同中心发送其关于该目标的 PS。

Step5　目标中标。协同中心会在所有参与协同的平台中，选择一个效果最佳的平台分配该目标，并通知该平台。

Step6　返回 Step3，直到所有的目标被分配完。

该协同机制的工作流程如图 3 所示。

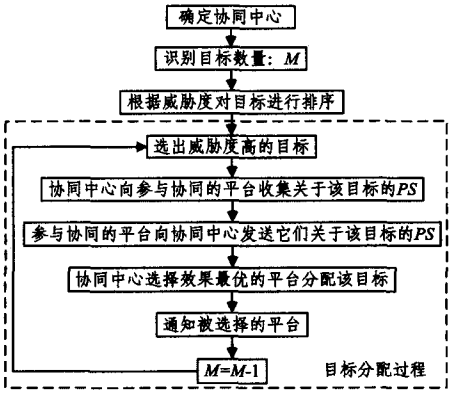


图 3　基于合同网的协同机制工作流程图

基于合同网协议的协同机制，对通信要求很高。假如通信不安全或者不稳定，会有很高的失败率。由于该方法一次只能分配一个目标，因此分配的结果比较精确，但分配会耗时较长。针对耗时较长这个缺点，学者们提出了扩展的合同网协同机制[6]，该机制的工作流程如下。

Step1　协同中心的确定。在整个多平台防空体系中，选出一个平台作为协同中心。

Step2　目标的发现、识别及排序。通过探测、分析战场空间态势，识别目标，并根据目标的威胁程度进行优先级排序。

Step3　选出一次要分配的目标。由本文的假设可得，整个多平台防空体系一次最多能分配 N 个目标，若 $M \leqslant N$，则所有的目标都在一次内进行分配；若 $M>N$，则选择优先级排序中前 N 个目标进行分配。

Step4　选定目标的招标。对于选定的目标，协同中心会向所有参加协同的平台发出请求，请求收集它们关于这些选定目标的 PS，而参与协同的平台收到请求后，会向协同中心发送它们关于这些选定目标的 PS。

Step5　协同中心分配选定目标。协同中心根据所有平台的 PS，利用最优化算法分配这些选定目标。

Step6　分发目标分配方案。协同中心将目标分配方案发送给各平台。

Step7　返回 Step3，直到所有的目标被分配完。

该协同机制的工作流程图如图 4 所示。

基于扩展合同网的协同机制与基于合同网的协同机制相比，其目标分配方法在牺牲了一定分配结果精确性代价的基础上，减少了协同的耗时。多平台防空体系对协同具有很高的实时性要求，因此适合采用该机制完成多平台之间的协同。

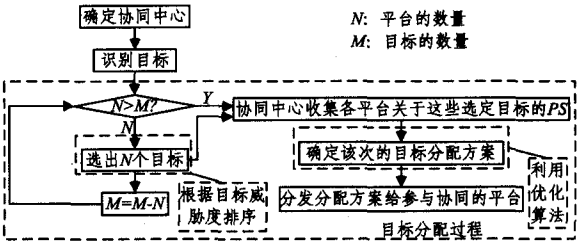


图 4　基于扩展合同网的协同机制工作流程图

但是，这两种协同机制有一个共同的缺点：一旦协同中心失效或者被摧毁，整个体系的协同过程将无法进行，从而使整个多平台防空体系的作战处于混乱之中。协同中心因为某种原因（通信系统被毁或者协同中心被毁）失效，协同过程必须在重新确定另一个协同中心之后才能重新进行，这样会浪费很宝贵的时间（因为战斗在进行中）。这种情况下，备份协同中心的方法可以缓解这一问题。

3.3　基于统一认知的分散式协同机制（自同步或自主协同）

基于统一认知的分散式协同机制也是一种基于通信的协同机制。这种协同机制也称为自同步[6]或自主协同，它是指在共享战场态势信息和作战使命的前提下，各平台自底向上组织并同步作战行动的能力。它克服了传统的自顶向下的以命令为导向的集中式同步方式中战斗力的损失问题，将作战从步进式转化为高速的连续性行为，被认为是加快作战节奏和提高反应速度的最终形态。美军针对自同步概念进行了很多理论研究和实验[7,8]，证实了自同步在提高交战速度、增强战斗力上的作用。在信息化战争中，自同步作战必将成为最主要的作战样式之一。

使用该协同机制，多平台防空体系必须满足以下几个前提条件[9]：

①多平台防空体系中所有平台必须全部参与协同；

②所有参与协同的各平台地位平等；

③多平台防空体系中各平台拥有公共作战态势图，包括己方、敌方以及环境信息等；

④多平台防空体系中各平台拥有公共的认知模型，包括共享的文化、条令、指挥员意图、交战规则以及流程等。在具体的作战过程中，各平台拥有公共的方法进行态势评估、目标优先级的计算以及目标的分配；

⑤信任感。参与协同的平台必须相信其他的平台能够在公共的认知模型和公共作战态势图的基础上采取恰当的行动。

该协同机制的工作流程如下。

Step1　目标的发现、识别及排序。通过探测、分析战场空间态势，识别目标，并根据目标的威胁程度进行优先级排序。

Step2　每个平台建立 MPS。根据出现的目标，各平台将对这些目标的 PS 在网络中广播，这样每一个平台都会得到一个相同的 MPS。

Step3　目标的分配。各平台根据 MPS 和目标的优先级顺序，用相同的最优化方法计算，得出一个目标分配方案（该

分配方案不需要发送给其他的平台，因为各平台会得出相同的分配方案），根据该分配方案，各平台对分配给各自的目标制定相应的作战方案。

该协同机制的工作流程图如图5所示。

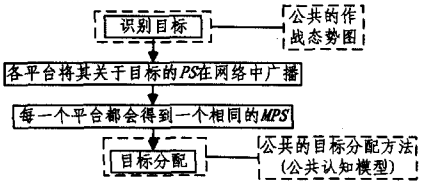


图5 基于统一认知的分散式协同机制工作流程图

基于统一认知的分散式协同机制由于没有协同中心的存在，因此具有很好的鲁棒性和稳定性。并且该协同机制加快了作战节奏和提高了反应速度，是协同机制发展的最终形态。但由于存在很多前提条件，该机制实现较为困难，并且在实现过程中各平台计算负担较大。

3.4 基于目标分配的协同机制的性能比较和分析

通过以上的描述和分析，对基于目标分配3种不同的协同机制进行了性能的比较，如表1所列。

表1 3种基于目标分配的协同机制的性能比较

性能	基于责任区划分协同机制	基于合同网协同机制		基于统一认知分散式协同机制
		一般合同网	扩展合同网	
协同机制	基于协议的协同机制	基于通信的协同机制		基于通信的协同机制
通信量	4PS	$N(2M-1)$	$M+N\%(M+1)+2(M-1)\cdot[\frac{N}{M}-1]$	$M(M-1)[\frac{N}{M}]$
通信重要性	不重要	重要		重要
节点计算量	小	协同中心计算量大，其余节点计算量小		大
是否有中心	无	有		无
实现的难易	容易	容易		难
鲁棒性	强	受随机攻击鲁棒性强，受蓄意攻击鲁棒性差		强

4 关于基于目标分配的3种协同机制的讨论

值得注意的是，在基于统一认知的分散式协同机制（自同步或自主协同）下产生的作战模式似乎转了一圈又回到了那个通信能力不论距离远近都非常有限、本地指挥官几乎是自主行动（基于责任区划分的协同机制）的年代。其实不然，这3种协同机制分别代表了协同模式不同的发展阶段。这是因为选择何种协同模式进行交战，主要与“交战速度”和“指挥控制速度”两个参数有关。

当“交战速度”与“指挥控制速度”之比较小时，整个作战体系会选择集中式的指挥方式，统一指挥，各平台易于协同作战；而当“交战速度”与“指挥控制速度”之比较高时，整个作战体系就会呈现出自组织特性。

在通信不发达的年代，指挥控制速度很低，因此各指挥员只能根据大的战略意图自行组织战斗（如基于责任区划分的协同机制）；随着通信技术的发展，指挥控制速度的提高，上级指挥员可以直接指挥多个下级部队，集中指挥，统一控制，因此由上至下的指挥控制方式又占据主导地位（基于合同网的协同机制）；随着各类高技术武器装备的出现，使“交战速度”大为提高，而同时战争系统的复杂性急剧增加，制约了集中式指挥速度的加快，因此系统又重新呈现出自组织的特征。但是这里的自组织与那个通信不发达年代的自组织不同，它的建立必须在统一的作战意图、大量通信形成统一态势（信息共享）和大量训练形成一致感知（默契，可以进一步发展为作战条令）的基础上，所形成的自主部队不是真正意义上的完全自主的部队，它们的行动受到通用作战态势图和作战使命的制约，从而能够与其他部队同步，做到“形散而神不散”。

结束语 多平台防空体系中各作战平台之间的协同问题，是研究和发展网络中心战理论的重点和难点问题，一直以来都在吸引人们深入研究。本文归纳和描述了多平台防空体系中各种不同的协同机制，为作战人员了解多平台防空体系中各平台间的协同提供了参考和借鉴。在实际的应用过程中，作战指挥员必须结合某一多平台防空体系的具体情况，在综合考虑使命任务和所处环境的情况下，选择使用某种协同机制或者某几种协同机制。

参 考 文 献

[1] Boutilier C. Planning, learning and coordination in multiagent decision processes[C]// Proceedings of Theory Aspects Rationality Knowledge. Dee Zeeuwse Stromen, The Netherlands, 1996: 195-201

[2] Beaumont P, Chaib-draa B. Multiagent coordination techniques for complex environment: the case of a fleet of combat ships[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2007, 37(3): 373-385

[3] Lee Z J, Su S F, Lee C Y. Efficiently solving general weapon-target assignment problem by genetic algorithms with greedy eugenics[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2003, 33(1): 113-121

[4] Smith R G. The contract net protocol, high-level communication and control in a distributed problem solver[J]. IEEE Transaction on Computing, 1980, 29(12): 1104-1113

[5] Smith R G, Davis R. Frameworks for Cooperation in Distributed Problem Solving[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1981, 11(1): 61-70

[6] Costanza C D. Self-synchronization, the Future Joint Force and the United States Army's Objective Force[R]. USA, Kansas: US Army Command and General Staff College Fort Leavenworth, 2003

[7] Tambe M. Teamwork in real-world, dynamic environments[C]// Proceedings of the International Conference on Multi-agent Systems (ICMAS). December 1996

[8] Tambe M. Implementing agent teams in dynamic multi-agent environments [C]// Proceedings of AAAI Fall Symposium on Plan Execution: Problem and Issues. 1994

[9] Alberts D S, Garstka J J, Stein F P. Network centric warfare: developing and leveraging information superiority[R]. USA: DoD C4ISR Cooperative Research Program, 1999