

多导弹编队齐射攻击分散化协同制导方法

邹丽¹, 周锐^{1,*}, 赵世钰¹, 丁全心²

1. 北京航空航天大学 控制一体化技术国家级科技重点实验室, 北京 100191

2. 洛阳电光设备研究所 火力控制技术国防科技重点实验室, 河南 洛阳 471009

摘要: 针对多导弹编队齐射攻击在时间上的协同要求, 将攻击时间可控制导律(ITCG)与一致性分散化协调算法相结合, 提出一种多导弹编队齐射攻击的分散化协同制导方法。编队内各导弹采用相邻局部通信, 编队之间则通过各编队通信拓扑生成树的根节点进行通信。设计了导弹编队内和编队间的分散化协调策略, 实现多导弹编队齐射攻击的分散化协调。推导了攻击时间最优的集中式多导弹协同制导律, 并将其与分散化协调策略相结合, 设计了多导弹编队齐射攻击的分散化协同制导律。最后, 通过仿真表明了该方法的有效性。

关键词: 导弹; 协同制导; 多导弹编队; 分散化协同; 分布式通信; 齐射攻击

中图分类号: V448.234; TJ765.3 **文献标识码:** A

随着导弹防御系统的日益完善, 导弹的突防和打击能力也越来越受到挑战。采取多导弹协同攻击可有效提高导弹的突防能力和打击效果。现代信息化、网络化技术的不断发展也为多导弹协同打击的实现创造了条件。

文献[1]和文献[2]探讨了多导弹协同作战的一些概念和战术问题。文献[3]提出了一种攻击时间可控制导律(ITCG), 并将其应用于反舰导弹的齐射攻击。但该制导律需预先人工指定攻击时间来实现协同攻击, 不能实现导弹之间的自动协同。文献[4]在共享导弹之间剩余飞行时间和飞行距离的基础上进一步设计了寻的导弹的协同制导律。文献[5]将导弹剩余飞行时间作为协调变量, 提出了分别基于集中和分散协调策略的多导弹协同制导方法, 实现了攻击时间的自动协调。文献[6]提出了一种基于领弹和被领弹策略的多

导弹时间协同制导律, 采用时标分离和动态逆控制设计了被领弹的制导控制指令, 而领弹则采用经典的比例导引律。该方法本质上是一种集中式结构, 所有被领弹与领弹之间必须进行通信。文献[7]基于非线性受控一致性原理, 在比例导引基础上叠加协同控制分量, 设计了一种具有领弹-被领弹结构的多导弹分布式协同制导律, 仅需相邻导弹之间局部通信。

实际中重要目标往往具有多层防御系统, 或者多个目标之间具有相互支持和协同作用, 需要多个导弹编队进行协同攻击。在打击目标以前需要先摧毁雷达制导的地空拦截弹(Surface-Air-Missile, SAM)。为提高打击效果和突防概率, 可以采用两个导弹编队分别对雷达、拦截导弹和目标进行分时协同打击, 而且不同导弹编队之间存在时间上的先后协同。

收稿日期: 2010-05-27; 修退日期: 2010-06-18; 录用日期: 2010-07-23; 网络出版时间: 2010-11-11 09:14

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20101111.0914.024.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20101111.0914.024

基金项目: 国家自然科学基金(60975073); 总装预研基金(9140A010109HK0120); 火力控制技术国防科技重点实验室基金; 航空科学基金(2008ZC13011)

* 通讯作者。Tel.: 010-82339232 E-mail: zhr@buaa.edu.cn

引用格式: 邹丽, 周锐, 赵世钰, 等. 多导弹编队齐射攻击分散化协同制导方法 [J]. 航空学报, 2011, 32(2): 281-290. Zou Li, Zhou Rui, Zhao Shiyu, et al. Decentralized cooperative guidance for multiple missile groups in salvo attack [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(2): 281-290.

多导弹编队协同制导是根据协同作战任务需要将导弹群组成多个导弹编队,对具有时间、空间或功能相互协同的多个区域目标进行打击的协同制导策略。目前对于多导弹协同制导问题的研究大都仅限于单个导弹编队的情况,对多导弹编队的研究主要集中在目标和火力分配方面^[8],而对多导弹编队的协同制导策略研究还非常有限。

受无人机编队制导控制的启发^[9-10],本文针对一类多目标/多导弹编队齐射协同目标攻击问题,在前期有关导弹单编队协同制导律研究的基础上,基于分布式局部通信和分散化协调策略,研究多导弹编队齐射攻击的分散化协同制导律设计方法。

1 飞行时间可控和最优的协同制导律

1.1 飞行时间可控的导弹制导律

时间上的协同是导弹武器系统协同作战的重要因素,文献[3]介绍了一种时间可控的导弹制导律。

考虑二维攻击平面,如图1所示, x 、 y 、 σ 和 a 分别为导弹的横、纵位置坐标、速度方向角以及法向加速度, σ_0 为导弹初始速度方向角, r_{go} 为导弹至目标的剩余飞行距离。导弹起始于 (x_0, y_0) ,目标位于 (x_t, y_t) ,导弹速率 v 保持不变,导弹运动规律为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \sigma \\ \dot{y} &= v \sin \sigma \\ \dot{\sigma} &= a/v \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

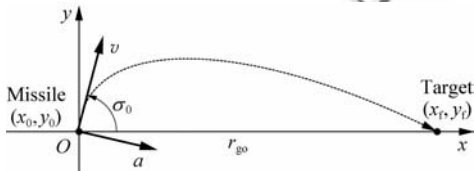


图1 导弹运动几何关系

Fig. 1 Kinematics of missiles

将系统式(1)线性化后应用最优控制理论求解,可得ITCG为^[3]

$$a = a_p - \frac{60v^5}{a_p r_{go}^3} (\bar{T}_{go} - \hat{T}_{go}) \quad (2)$$

式中: $a_p = \eta v \dot{\lambda}$ 为纯比例导引(PNG)律给出的

控制量,其中 η 为导航比, λ 为视线角; \bar{T}_{go} 为指定的期望剩余飞行时间; \hat{T}_{go} 为基于PNG预估的剩余飞行时间,其表达式为

$$\hat{T}_{go} = \left(1 + \frac{\sigma^2}{10}\right) r_{go}/v$$

ITCG在实际应用中存在以下主要问题:

(1) 该制导律必须事先人工指定期望剩余飞行时间,且其有效范围并没有给出,指定的期望剩余飞行时间过大或过小都可能导致制导律的失效。

(2) 给定不同的期望飞行时间,整个制导系统的性能是不同的。那么,什么样的期望剩余飞行时间可以保证导弹制导系统性能的最优性呢?

(3) 对于多导弹协同制导问题,虽然可以通过对所有导弹指定相同的期望剩余飞行时间实现协同攻击,但问题是如何基于某种协调机制实现自动协同并确定共同的最优飞行时间。

1.2 多导弹协同攻击最优期望飞行时间

设有 n 枚导弹参与协同攻击(同时到达),则有

$$\bar{T}_{go,i} = \bar{T}_{go} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中: $\bar{T}_{go,i}$ 为第 i 枚导弹的指定期望剩余飞行时间。

选择各枚导弹制导律为式(2)所示的ITCG,以第 i 枚导弹为例,即

$$a_i = a_{p,i} - \lambda_i (\bar{T}_{go} - \hat{T}_{go,i}) \quad (3)$$

式中: $\hat{T}_{go,i}$ 为第 i 枚导弹的PNG预估剩余飞行时间; λ_i 的表达式为

$$\lambda_i = 60v_i^5 / (a_{p,i} r_{go,i}^3) \quad (4)$$

选择 n 枚导弹的控制能量之和为如下代价函数:

$$J = \sum_{i=1}^n a_i^2 \quad (5)$$

实现所有导弹协同攻击的最优期望剩余飞行时间为

$$\bar{T}_{go}^* = \arg \min_{\bar{T}_{go}} J \quad (6)$$

联立式(3)~式(6),解得最优期望剩余飞行时间为^[5]

$$\bar{T}_{go}^* = \sum_{i=1}^n w_i \hat{T}_{go,i} / \sum_{i=1}^n w_i \quad (7)$$

式中: w_i 为加权系数,且

$$w_i = [v_i^5 / (a_{p,i} r_{go,i}^3)]^2 \quad (8)$$

如果所有导弹都以式(7)给出的时间作为期望的剩余飞行时间,则所有导弹将同时到达目标,并且总的能量消耗最小。确定最优期望剩余飞行时间需要一个计算中心(例如指挥中心或领弹等),在每个采样时刻内接收所有导弹相关信息,对代价函数进行在线优化,得到最优期望剩余飞行时间,并广播通信到所有导弹,进而得到一种具有集中式结构的飞行时间可控和最优的协同制导律,原理如图2所示。

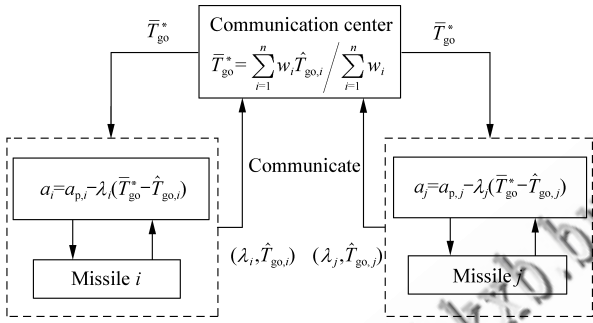


图2 飞行时间最优的集中式协同制导

Fig.2 Centralized cooperative guidance with optimal flight time

但该方法的计算量和通信量都很大,不利于在线和分布式实现,可扩展性也较差。因此,如何基于分布式局部通信设计分散化的多导弹协同制导律,尤其是具有多个导弹编队的分散化协同制导律,在实际应用中具有重要意义,而基于分布式局部通信的分散化协调策略是关键。

2 基于协调变量的分散化协调策略

2.1 单协调变量及分散化协调策略

考虑 n 个节点构成的分布式网络(编队),假设 $\theta_i(t) (i=1,2,\dots,n)$ 为 t 时刻第 i 个节点状态或待协调信息,即协调变量^[11-12],如果满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\theta_i(t) - \theta_j(t)\| = 0, \forall \theta_i(0), \theta_j(0), i, j \in n$$

则称节点 i 和节点 j 对信息 θ 协调一致。

协调变量 θ_i 的一致性分散化协调策略为^[9-10]

$$\dot{\theta}_i(t) = -\frac{1}{\gamma_i} \sum_{j \in N_i} g_{ij} (\theta_i(t) - \theta_j(t)) \quad (9)$$

式中: $\gamma_i > 0$ 为加权系数,即通信拓扑图中边的权重; N_i 为与第 i 个节点具有通信连接的所有节点集合; g_{ij} 表示通信拓扑的连接关系,其表达式为

$$g_{ij} = \begin{cases} 1 & (j \in N_i) \\ 0 & (j \notin N_i) \end{cases}$$

定理 1^[11-12] 在固定通信拓扑下,当且仅当 n 个节点构成的分布式有向通信拓扑图含有有向生成树时,式(9)所示的一致性分散化协调策略全局渐近收敛或一致性可达。并且,如果有向通信拓扑图也是无向图,那么 $\theta_i(t)$ 将收敛到 γ_i 的加权平均,即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \theta_i(t) = \sum_{k=1}^n \gamma_k \theta_k(0) / \sum_{k=1}^n \gamma_k, \forall i \in n \quad (10)$$

节点之间分散信息协调过程本质上是一个动态系统,其分散协调一致性可达条件和收敛速度与通信拓扑、通信延迟、通信噪声等都有关系。

2.2 多协调变量及分散化协调策略

考虑由 n_A 个节点组成的编队 A 和由 n_B 个节点组成的编队 B 的集结问题,假设 $\theta_i^A(t)$ 和 $\theta_j^B(t)$ 分别为编队 A 和编队 B 内部的协调变量(例如到达时间),则编队内部协调变量收敛时,有

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \theta_i^A = \theta_A^* & (i = 1, 2, \dots, n_A) \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \theta_j^B = \theta_B^* & (j = 1, 2, \dots, n_B) \end{cases}$$

式中: θ_A^* 和 θ_B^* 分别为编队 A 和编队 B 内部各节点协调一致的同时到达时间。对于分时相继到达问题,编队之间协调变量满足如下时间上的约束关系:

$$\theta_B^* = \theta_A^* + \Delta_{AB}$$

这意味着编队 A 和编队 B 到达时间相差 Δ_{AB} 。

编队内部和编队之间的通信拓扑如图3所示。编队 A 和编队 B 的内部以及编队之间的多协调变量 $\theta_i^A(t)$ 和 $\theta_j^B(t)$ 的分散化协调策略可由单协调变量(单编队)协调算法推广得到^[13-15]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\theta}_i^A(t) &= -\frac{1}{r_i^A} \sum_{j \in N_i^A} g_{ij}^A (\theta_i^A(t) - \theta_j^A(t)) + b_i^A u_i^A(t) \\ \dot{\theta}_i^B(t) &= -\frac{1}{r_i^B} \sum_{j \in N_i^B} g_{ij}^B (\theta_i^B(t) - \theta_j^B(t)) + b_i^B u_i^B(t) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: N_i^A 和 N_i^B 分别为编队 A 和编队 B 内部与第 i 个节点具有通信连接的所有节点集合; g_{ij}^A 和 g_{ij}^B 分别为编队 A 和编队 B 通信拓扑的邻接矩阵

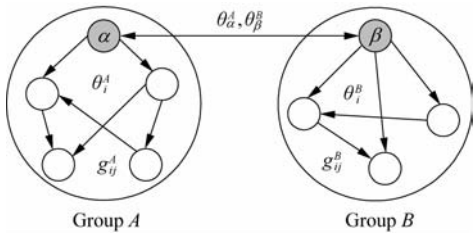


图3 编队内和编队间的通信拓扑结构

Fig. 3 Decentralized coordination between vehicles within a group and between groups

元素; b_i^A 和 b_i^B 分别为编队 A 和编队 B 中第 i 个节点是否为根节点的标识。

在此用 α 和 β 分别表示编队 A 和编队 B 内部通信拓扑生成树 (Spanning Tree) 的根节点 (Root Node), 也称为受控节点; 令 θ_α^A 和 θ_β^B 分别为 α 和 β 的协调变量; 令 u_α^A 和 u_β^B 为通过受控节点对网络施加的外部控制量, 仅直接作用于根节点以实现编队间的协调一致。则

$$b_i^A = \begin{cases} 1 & (i = \alpha) \\ 0 & (i \neq \alpha) \end{cases}, \quad b_i^B = \begin{cases} 1 & (i = \beta) \\ 0 & (i \neq \beta) \end{cases}$$

因此, 式(11)也称为多协调变量的受控一致性算法。编队 A 和编队 B 之间的通信通过根节点 α 和 β 之间的通信实现。

对比式(9)和式(11)可以看出: 对于多编队分散协调情况, 各编队内除根节点以外所有节点的分散化协调策略与单编队(单协调变量)各节点分散化协调策略完全一样, 只是在根节点受到编队之间协同约束或受控量的影响, 并通过编队内通信拓扑和协调策略间接影响到其他所有节点。

通过受控根节点选择不同受控量, 可以实现编队间不同的协同任务, 即

$$\begin{cases} u_\alpha^A(t) = f_\alpha(\theta_\alpha^A(t), \theta_\beta^B(t)) \\ u_\beta^B(t) = f_\beta(\theta_\alpha^A(t), \theta_\beta^B(t)) \end{cases}$$

式中: $f_\alpha(\cdot)$ 和 $f_\beta(\cdot)$ 分别为满足编队间协同任务要求的受控根节点 α 和 β 的控制量函数。对于编队 A 和编队 B 的相继时间 Δ_{AB} 到达问题, 有

$$\begin{cases} u_\alpha^A(t) = (\theta_\alpha^A(t) - \theta_\beta^B(t)) - \Delta_{AB} \\ u_\beta^B(t) = -(\theta_\alpha^A(t) - \theta_\beta^B(t)) + \Delta_{AB} \end{cases}$$

需要说明的是, 实施式(11)所示的多编队受控一致性协调策略的前提是满足可控性条件。将式(11)写成状态空间的形式:

$$\dot{\mathbf{X}} = -\mathbf{L}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{U} \quad (12)$$

式中: \mathbf{X} 为各节点协调变量的向量表示; \mathbf{L} 为通信拓扑的加权拉普拉斯矩阵; \mathbf{D} 为控制矩阵, 表示受控节点的情况; \mathbf{U} 为受控节点的控制量。在固定通信拓扑下, 状态方程式(12)是一个线性系统, 其可控性特性可以利用成熟的线性系统状态空间方法进行分析。

下面给出多编队受控一致性分散化协调收敛条件的另一种形式。

定理 2^[13] 在固定通信拓扑下, 若编队 A 内部 n_A 个节点和编队 B 内部 n_B 个节点各自构成的分布式有向通信拓扑图分别存在有向生成树, 且编队 A 和编队 B 之间通过生成树的根节点 α 和 β 通信, 则编队 A 和编队 B 内部以及编队之间的一致性分散化协调全局渐近收敛或一致性可达。

根据定理 2, 编队内部协调是通过各自的通信拓扑 g_{ij}^A 和 g_{ij}^B 实现, 分别收敛于根节点 α 和 β 的最终值, 即

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \theta_i^A(t) = \theta_\alpha^A & (i = 1, 2, \dots, n_A) \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \theta_j^B(t) = \theta_\beta^B & (j = 1, 2, \dots, n_B) \end{cases}$$

编队之间的协调通过通信拓扑生成树的根节点 α 和 β 之间数据链交换各自协调变量 θ_α^A 和 θ_β^B 实现, 从而最终实现编队之间的一致性协调。

多编队多协调变量的一致性分散化协调策略及收敛性条件为基于最小通信量的多节点分散化协同及分布式通信拓扑的设计提供了依据, 也为多导弹编队的分散化协同制导律设计提供了理论依据。

值得指出的是: 上述两个编队(两个协调变量)的分散化协调策略及收敛性条件完全适用于多编队(多协调变量)的情况。

3 导弹单编队分散化协同制导律

考虑 n 个导弹组成的编队, 如前所述, 采用集中式方式确定导弹最优的剩余飞行时间在实际应用中具有很大的局限性。为此, 采用基于分布式局部通信的一致性分散化协调策略实现对导弹之间期望剩余飞行时间的分散化协调, 并尽可能保持集中式协调的最优性。

将各导弹期望剩余飞行时间 $\bar{T}_{go,i}$ 作为协调变量, 并定义协调变量 ξ_i , 则有

$$\xi_i = \bar{T}_{go,i} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

根据式(9)得到剩余飞行时间的分散化协调策略为

$$\dot{\xi}_i = -\frac{1}{\gamma_i} \sum_{j \in N_i} g_{ij} (\xi_i - \xi_j) \quad (13)$$

为了尽可能提高分散化协调结果的最优性,对照集中协调结果的最优剩余飞行时间(如式(7)和式(8)所示),得到最优的加权系数为

$$\gamma_i = \omega_i = (v_i^5 / a_{p,i} r_{go,i}^3)^2 \quad (14)$$

根据分散化协调的收敛性条件,只要导弹编队通信拓扑存在生成树,式(13)将全局渐进收敛,即所有导弹的期望剩余飞行时间将收敛于 γ_i 的加权平均,实现分散化的协调一致,并接近于最优飞行时间。即

$$\left. \begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \xi_i &= \lim_{t \rightarrow \infty} \xi_j, \forall i, j \in n \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \bar{T}_{go,i} &= \lim_{t \rightarrow \infty} \bar{T}_{go,j} \approx \bar{T}_{go}^* \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

选取导弹期望的剩余飞行时间为协调变量,由式(3)和式(13)构成一种基于分布式相邻局部通信的分散化导弹单编队协同制导方法。在通信拓扑满足收敛性条件的情况下,期望剩余飞行时间的分散化协调结果最终收敛到式(7)所示的最优结果。该制导原理如图4所示,各导弹通过分布式相邻局部通信,基于分散化协调策略确定该时刻所期望的剩余飞行时间,由式(3)得到飞行时间可控的制导律,可以满足式(15)的收敛关系,实现多导弹的齐射协同攻击。

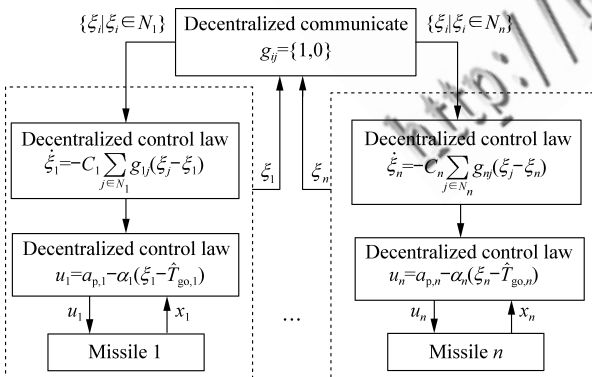


图4 多导弹单编队分散协同制导系统原理

Fig. 4 Decentralized cooperative guidance of a missile group

4 多导弹编队分散化协同制导律

参考图5所示的协同打击任务想定,考虑两个

导弹编队A和B,编队A由 n_A 个导弹组成,编队B由 n_B 个导弹组成。要求编队A先于编队B把雷达和拦截弹摧毁,之后由编队B对目标进行打击。

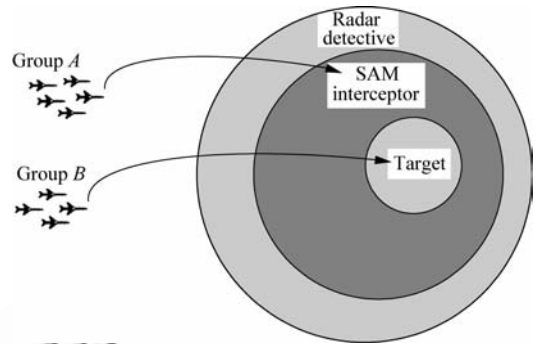


图5 多导弹编队协同目标攻击示意图

Fig. 5 Multiple missile groups attacking different targets

根据多协调变量的分散化协调过程和协调机制,设计多编队导弹齐射攻击分散化协同制导律,原理如图6所示。编队内协调过程除根节点以外基本与单编队协同制导的协调策略一样,而编队之间的协同主要基于通信拓扑根节点之间的通信产生对根节点的受控量来实现。

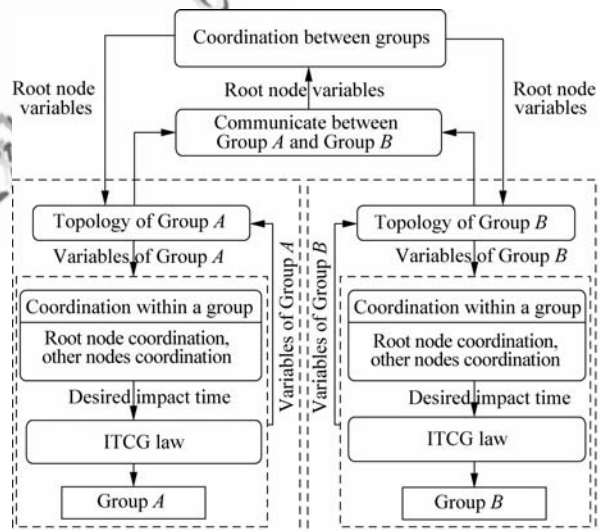


图6 多导弹编队分散协同制导原理

Fig. 6 Decentralized cooperative guidance of multiple missile groups

将各导弹编队期望剩余飞行时间作为协调变量,即

$$\left\{ \begin{aligned} \xi_i^A &= \bar{T}_{go,i}^A \quad (i = 1, 2, \dots, n_A) \\ \xi_i^B &= \bar{T}_{go,i}^B \quad (i = 1, 2, \dots, n_B) \end{aligned} \right.$$

通过编队内和编队间分散化协调策略实现各编队期望剩余飞行时间的一致性:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \xi_i^A = \xi_A^* & (i = 1, 2, \dots, n_A) \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \xi_j^B = \xi_B^* & (j = 1, 2, \dots, n_B) \end{cases}$$

并满足编队间相继到达的时间协同要求:

$$\xi_B^* = \xi_A^* + \Delta_{AB}$$

这意味着编队 A 和编队 B 分别在 ξ_A^* 和 ξ_B^* 时刻攻击 SAM 拦截区和目标,且两个编队攻击时间相差 Δ_{AB} 。

设导弹 α 和导弹 β 分别表示编队 A 和编队 B 内部通信拓扑生成树的根节点,由式(11)得到导弹 α 和导弹 β 的分散化协调策略为

$$\begin{cases} \dot{\xi}_\alpha^A = -\frac{1}{\gamma_\alpha^A} \sum_{j \in N_\alpha^A} g_{\alpha j}^A (\xi_\alpha^A - \xi_j^A) + b_\alpha^A u_\alpha^A \\ \dot{\xi}_\beta^B = -\frac{1}{\gamma_\beta^B} \sum_{j \in N_\beta^B} g_{\beta j}^B (\xi_\beta^B - \xi_j^B) + b_\beta^B u_\beta^B \end{cases} \quad (16)$$

式中: u_α^A 和 u_β^B 的表达式分别为

$$\begin{cases} u_\alpha^A = (\xi_\alpha^A - \xi_\beta^B) - \Delta_{AB} \\ u_\beta^B = -(\xi_\alpha^A - \xi_\beta^B) + \Delta_{AB} \end{cases}$$

由式(13)得到编队 A 和编队 B 中除根节点 α 和 β 以外的所有导弹的分散化协调策略为

$$\begin{cases} \dot{\xi}_i^A = -\frac{1}{\gamma_i^A} \sum_{j \in N_i^A} g_{ij}^A (\xi_i^A - \xi_j^A), \forall i \in n_A, i \neq \alpha \\ \dot{\xi}_i^B = -\frac{1}{\gamma_i^B} \sum_{j \in N_i^B} g_{ij}^B (\xi_i^B - \xi_j^B), \forall i \in n_B, i \neq \beta \end{cases} \quad (17)$$

式中: γ_i^A 和 γ_i^B 为基于最优飞行时间确定的加权系数,其表达式如式(14)所示。

根据式(3)得到编队 A 和编队 B 各导弹的分散化时间受控制律为

$$\begin{cases} a_i^A = a_{p,i}^A - \lambda_i^A (\xi_i^A - \hat{T}_{go,i}^A), \forall i \in n_A \\ a_i^B = a_{p,i}^B - \lambda_i^B (\xi_i^B - \hat{T}_{go,i}^B), \forall i \in n_B \end{cases} \quad (18)$$

通过设计合适的通信拓扑,可以实现所有导弹编队同时发射,且不同导弹编队按照给定的时间相继到达指定目标。根据根节点不同受控量的设计,可以实现编队间不同的协同任务。

5 仿真结果与分析

5.1 想定 1

考虑两个导弹编队 G_1 (导弹 M_1, M_2 和 M_3) 和 G_2 (导弹 M_4 和 M_5) 分别对目标 T_A 和 T_B 的齐射攻击分散化协同制导问题。所有导弹同时发射,但要求编队 G_2 到达目标 T_B 的时间滞后于编队 G_1 到达目标 T_A 的时间,且到达间隔时间 $\Delta_{AB} = 5$ s。编队内和编队间的通信拓扑如图 7 所示,编队组内的通信拓扑是带有根节点的强连通图,编队间的通信则通过根节点实现。

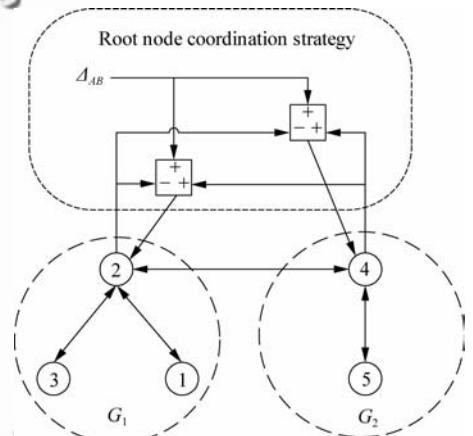


图 7 两个导弹编队通信拓扑及根节点(想定 1)

Fig. 7 Communication topology and root nodes of two missile groups (Scenario 1)

导弹的初始位置 O_M 、目标的初始位置 O_T 以及速度方向角 σ 如表 1 所示,各导弹速度均为 300 m/s。初始条件选取原则是使各导弹比例导引时间各有差异,但又必须在各导弹可达时间范围内,以验证本文方法的有效性。

表 1 数值仿真初始参数(想定 1)

Table 1 Initial parameters of numerical simulation (Scenario 1)

Missile group	Missile	O_M/m	O_T/m	$\sigma/(\circ)$
G_1	M_1	(-5 894, -5 785)	(0, 0)	25.5
	M_2	(-4 249, -8 072)	(0, 0)	33.0
	M_3	(4 829, -8 693)	(0, 0)	16.0
G_2	M_4	(9 397, -6 920)	(0, 2 000)	-20.0
	M_5	(8 426, -8 871)	(0, 2 000)	-20.0

导弹编队通信拓扑根节点采用式(16)所示的分散协调策略,而根节点以外的导弹采用式(17)所示的分散协调策略。在协调基础上,采用式(3)所示的时间受控制律。

仿真结果如图8~图10和表2所示,由此可见:各导弹在比例引导下飞行时间 T_p 各不相同,但在分散化协同制导作用下,编队 G_1 协同攻击目标 T_A 的时间 $T_z^1=32.36\text{ s}$,编队 G_2 协同攻击目标 T_B 的时间 $T_z^2=37.33\text{ s}$,且满足 $\Delta_{AB}=5\text{ s}$,满足了编队内和编队间的时间协同要求。

图9是5个导弹的剩余飞行时间(协调变量)一致性收敛过程,由图可见剩余飞行时间收敛结果达到预期效果。由于在仿真过程中编队 G_1 在 32.36 s 首先攻击了目标,之后编队 G_2 与编队 G_1 的通信断开, G_2 根据自身编队内分散协调策略继续协同飞行,最后在 37.33 s 协同攻击目标 T_B ,两个编队攻击时间差满足 $\Delta_{AB}=5\text{ s}$ 的要求。

图10是分散协调算法中各导弹对应的加权

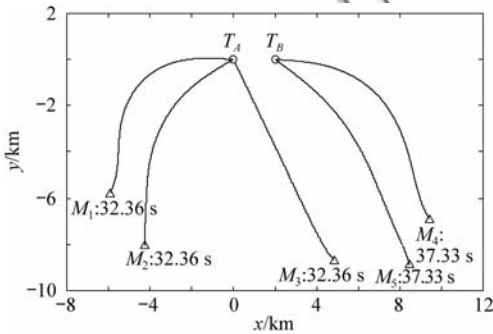


图8 两个导弹编队的运动轨迹(想定1)

Fig. 8 Trajectories of two missile groups(Scenario 1)

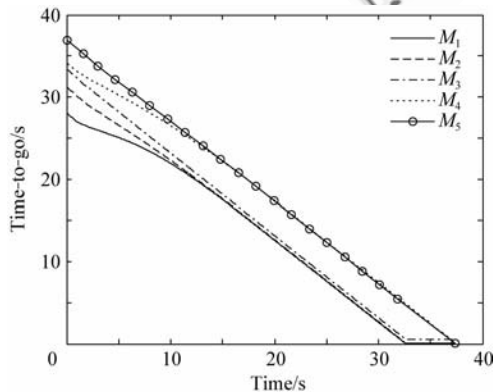


图9 导弹剩余飞行时间估计(想定1)

Fig. 9 Estimation of time-to-go of missiles (Scenario 1)

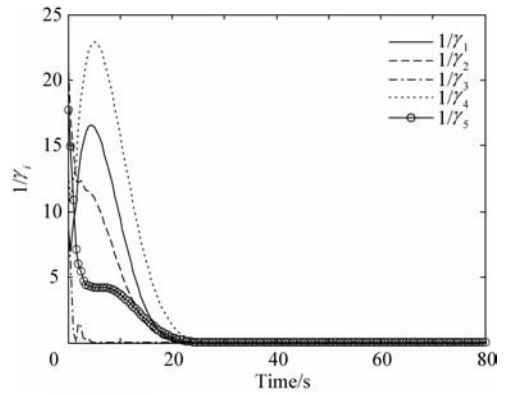


图10 协调系数 $1/\gamma_i$ 的变化规律(想定1)

Fig. 10 Coefficient of coordination strategy $1/\gamma_i$ (Scenario 1)

表2 数值仿真结果(想定1)

Table 2 Results of numerical simulation (Scenario 1)

Missile group	Missile	T_p/s	T_z/s
G_1	M_1	27.53	32.36
	M_2	30.27	32.36
	M_3	33.14	32.36
G_2	M_4	33.76	37.33
	M_5	36.51	37.33

系数 $1/\gamma_i(i=1\sim 5)$ 的自适应变化规律。在协调的初始时刻加权系数较大,提高了协调收敛速度,而在接近收敛时加权系数则较小。

5.2 想定2

考虑7个导弹组成的两个编队: G_1 (导弹 M_1 、 M_2 和 M_3)和 G_2 (导弹 M_4 、 M_5 、 M_6 和 M_7),编队 G_2 攻击目标 T_B 的时间滞后于编队 G_1 攻击目标 T_A 的时间,且到达间隔时间 $\Delta_{AB}=5\text{ s}$ 。两个编队的通信拓扑如图11所示,初始条件如表3所示。

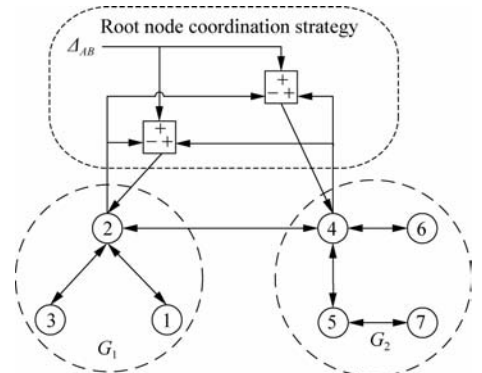


图11 两个导弹编队通信拓扑及根节点(想定2)

Fig. 11 Communication topology and root nodes of two missile groups(Scenario 2)

表 3 数值仿真初始参数(想定 2)

Table 3 Initial parameters of numerical simulation (Scenario 2)

Missile group	Missile	O_M/m	O_T/m	$\sigma/(\circ)$	$v/(m \cdot s^{-1})$
G_1	M_1	(-5 894, -5 785)	(0, 0)	25	300
	M_2	(-4 249, -8 072)	(0, 0)	30	300
	M_3	(-2 800, -8 993)	(0, 0)	10	305
G_2	M_4	(2 000, -8 920)	(0, 2 000)	20	280
	M_5	(3 826, -8 971)	(0, 2 000)	-10	260
	M_6	(5 426, -7 571)	(0, 2 000)	-20	270
	M_7	(8 426, -3 871)	(0, 2 000)	-30	270

仿真结果如表 4 所示:比例导引下各导弹飞行时间 T_p 各不相同;而协同导引下,编队 G_1 在 30.43 s 协同攻击目标 T_A ,在间隔 4.86 s 之后,编队 G_2 在 35.29 s 协同攻击目标 T_B 。图 12 为两个导弹编队的飞行轨迹,图 13 为各导弹剩余飞行时间变化规律,图 14 为分散协调策略中加权系数 $1/\gamma_i (i=1\sim 7)$ 的变化规律。

表 4 数值仿真结果(想定 2)

Table 4 Results of numerical simulation (Scenario 2)

Missile group	Missile	T_p/s	T_z/s
G_1	M_1	27.53	30.43
	M_2	30.27	30.43
	M_3	30.88	30.43
G_2	M_4	31.86	35.29
	M_5	35.21	35.29
	M_6	30.78	35.29
	M_7	27.79	35.29

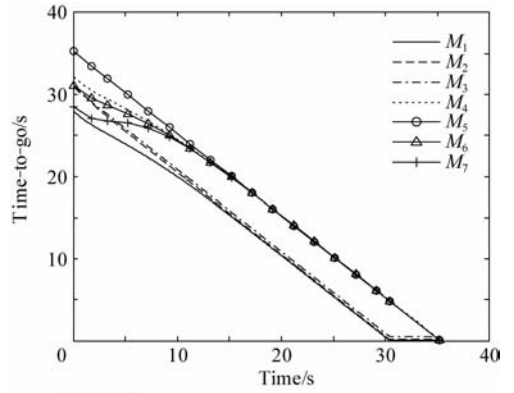


图 13 导弹剩余飞行时间估计(想定 2)

Fig. 13 Estimation of time-to-go of missiles (Scenario 2)

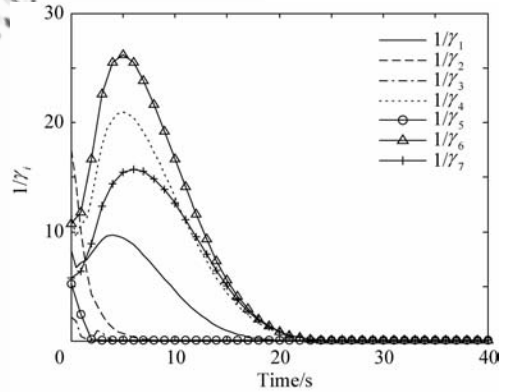


图 14 协调系数 $1/\gamma_i$ 的变化规律(想定 2)

Fig. 14 Coefficient of coordination strategy $1/\gamma_i$ (Scenario 2)

从仿真结果可以看出,本文提出的多导弹编队分散化协同制导律很好地实现了多导弹编队在给定时间协同打击不同目标。

6 结论

在控制能量最优的约束条件下,确定了集中式协同制导下的导弹期望飞行,又结合单协调变量的思想,实现了分散化的协同制导律设计。进一步地将攻击时间可控的制导律与多协调变量的分散化一致性算法相结合,提出了完全分散化的导弹编队协同制导律设计方法,实现了多导弹编队齐射协同目标攻击。

通过推导最优的期望飞行时间得到了分散化协调算法的加权系数,使得分散化协调算法的结果在一定程度上保持了集中式协调算法的最优性。结合时间可控制导律,实现了多导弹编队分散化协同制导。该方法形式简单,计算量和通信

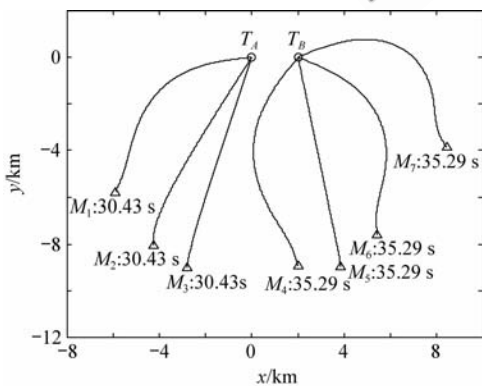


图 12 两个导弹编队的运动轨迹(想定 2)

Fig. 12 Trajectories of two missile groups (Scenario 2)

量较少,具有较好的可扩展性和易实现性,可直接应用于多个导弹编队的协同制导问题。

参 考 文 献

- [1] 张克,刘永才,关世义. 体系作战条件下飞航导弹突防与协同攻击问题研究[J]. 战术导弹技术, 2005(2): 1-7. Zhang Ke, Liu Yongcai, Guan Shiyi. An investigation into the issues of penetration and cooperative engagement for aerodynamic missile under the condition of systems countermeasures[J]. Tactical Missile Technology, 2005(2): 1-7. (in Chinese)
- [2] Wu J H, Ma P B, Ji J. Research on cooperative control method of saturation attack[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. 2007: 1409-1413.
- [3] Jeon I S, Lee J I, Tahk M J. Impact-time-control guidance law for anti-ship missiles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(2): 260-266.
- [4] Jeon I S, Lee J I, Tahk M J. Homing guidance law for cooperative attack of multiple missiles[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2010, 33(1): 275-280.
- [5] Zhao S Y, Zhou R. Cooperative guidance for multimissile salvo attack[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21(6): 533-539.
- [6] 张友安, 马国欣, 王兴平. 多导弹时间协同制导: 一种领弹-被领弹策略[J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1109-1118. Zhang You'an, Ma Guoxin, Wang Xingping. Time-cooperative guidance for multi-missiles: a leader-follower strategy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(6): 1109-1118. (in Chinese)
- [7] 邹丽, 周锐, 丁全心. 异构多导弹网络化分布式协同制导方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(12): 1432-1435. Zou Li, Zhou Rui, Ding Quanxin. Distributed cooperative guidance for multiple heterogeneous networked missiles[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(12): 1432-1435. (in Chinese)
- [8] Yang F, Dong C Y, Wang Q. Multi-target decision making of saturation attack for anti-ship missile weapon-target assignment[C]// International Workshop on Intelligent Systems and Applications. 2009: 963-966.
- [9] Lafferiere G, Williams A, Caughman J, et al. Decentralized control of vehicle formations[J]. Systems and Control Letters, 2005, 54(9): 899-910.
- [10] Ryoo C K, Kim Y H, Tahk M J. Optimal UAV formation guidance laws with timing constraint[J]. International Journal of Systems Science, 2006, 37(6): 415-427.
- [11] Ren W, Beard R W, Atkins E M. Information consensus in multivehicle cooperative control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2007, 27(2): 71-82.
- [12] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [13] Moore K L, Lucarelli D. Decentralized adaptive scheduling using consensus variables[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2006, 17(10): 921-940.
- [14] Godsil C, Royle G. Algebraic graph theory[M]. New York: Springer-Verlag, 2001.
- [15] Moore K, Lucarelli D. Lecture notes in economics and mathematical systems-consensus variable approach to decentralized adaptive scheduling[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2007.

作者简介:

邹丽(1987—) 女, 硕士研究生。主要研究方向: 多飞行器协同制导与控制。

Tel: 010-82338672

E-mail: woaiama1987@163.com

周锐(1968—) 男, 博士, 教授。主要研究方向: 飞行器制导与控制。

Tel: 010-82339232

E-mail: zhr@buaa.edu.cn

赵世钰(1984—) 男, 博士研究生。主要研究方向: 多飞行器协同控制与制导。

Tel: 010-82338672

E-mail: zsybeijing@gmail.com

丁全心(1962—) 男, 博士, 研究员, 总师。主要研究方向: 航空火力控制技术。

Tel: 0379-63327021

E-mail: dingqx@vip.sina.com

Decentralized Cooperative Guidance for Multiple Missile Groups in Salvo Attack

ZOU Li¹, ZHOU Rui^{1,*}, ZHAO Shiyu¹, DING Quanxin²

1. National Key Laboratory of Science and Technology on Holistic Control, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China

2. Key Laboratory of National Defense Science and Technology on Fire Control Technology, Luoyang Electro-optical Equipment Research Institute, Luoyang 471009, China

Abstract: A decentralized cooperative guidance law for multiple missile groups in salvo attack is proposed by integrating the impact-time-control guidance (ITCG) with decentralized consensus algorithms. The missiles within a group communicate by means of the nearest-neighbor topology, while communication between groups is implemented through the root nodes of the group topology spanning tree. The decentralized coordinated strategies among different missiles and groups are provided for the cooperative guidance of multiple missile groups in salvo attack. A centralized optimal impact-time-control guidance law for multiple missiles is developed. The decentralized cooperative guidance law for multiple missile groups in salvo attack is designed based on the centralized optimal impact-time-control guidance law and the decentralized coordinated strategies. Finally the effectiveness of the proposed method is demonstrated by simulation.

Key words: missiles; cooperative guidance; multiple missile groups; decentralized cooperation; distributed communication; salvo attack

Received: 2010-05-27; **Revised:** 2010-06-18; **Accepted:** 2010-07-23; **Published online:** 2010-11-11 09:14

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20101111.0914.024.html **DOI:** CNKI:11-1929/V.20101111.0914.024

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (60975073); Pre-research Fund of General Armament Department (9140A01010109HK0120); Key Laboratory Fund of National Defense Science and Technology on Fire Control Technology; Aeronautical Science Foundation of China (2008ZC13011)

* **Corresponding author.** Tel.: 010-82339232 E-mail: zhr@buaa.edu.cn