

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2018.03.007

多导弹系统协同攻击机动目标分布式制导律

毛昱天, 杨明, 张锐

(中国兵器工业导航与控制技术研究所, 北京 100089)

摘要: 基于增强型比例导引律和分布式网络同步理论, 设计了一类攻击机动目标的多导弹系统分布式协同制导律。该制导律由各导弹本地制导律和分布式协同导引策略两部分组成; 本地制导律为增强型比例导引律, 进一步利用代数图论和非线性系统一致性理论, 得到基于邻接个体信息交互的分布式协同制导律, 实现多导弹对目标的同时协同攻击; 该分布式协同制导律仅需视距内各相邻导弹间互相传输各自的状态信息, 算法具有较低的通信代价和较好的可扩展性。最后给出了相关数值仿真算例, 仿真结果验证了算法的有效性。

关键词: 多导弹系统; 机动目标; 协同制导; 分布式一致性

中图分类号: V241.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2018)03-0041-06

Distributed Cooperative Guidance Law for Multi-missile Systems Attacking Maneuvering Target

MAO Yu-tian, YANG Ming, ZHANG Rui

(Chinese Ordnance Navigation and Control Technology Research Institute, Beijing 100089, China)

Abstract: A set of distributed cooperative guidance law of multi-missile systems for maneuvering target attacking is developed on the basis of the augmented proportional guidance and synchronization theory of distributed networks. The proposed guidance law is based on local guidance law combined with distributed cooperative guidance strategy. The local guidance law is derived from augmented proportional guidance law. Furthermore, the distributed cooperative guidance law which could steer all missiles to intercept the maneuvering target simultaneously is synthesized via the algebraic graph theory and consensus principles of nonlinear systems. The designed cooperative guidance law relies on only local interaction with neighboring states within line-of-sight range and exhibits low communication cost as well as good scalability. Finally, related numerical simulations are performed to verify the effectiveness of the proposed guidance law.

Key words: Multi-missile systems; Maneuvering target; Cooperative guidance; Distributed consensus

0 引言

随着现代信息化和网络化技术的飞速发展, 多枚导弹通过信息交互与共享实现功能互补, 打破作

战过程中各导弹之间没有任何联系与合作的传统思想的局限, 可有效提高系统综合作战效能和突防能力, 完成单枚导弹很难完成的任务。多枚导弹之间通过数据链的方式实现信息共享进而实现协同

收稿日期: 2017-06-26; 修订日期: 2017-09-21

基金项目: “十三五”陆军预先研究课题(30107020603)

作者简介: 毛昱天(1984-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事制导武器系统总体及制导控制方面的研究。

E-mail: yutianmao@163.com

攻击,可显著提高对敌方目标的拦截概率,增强多导弹系统的攻击能力,更加符合未来作战发展的趋势,具有十分重要的实际意义。实现多导弹高效协同作战的前提是设计合适的协同制导律。特别地,针对机动运动目标的有效攻击对多导弹协同制导律的性能提出了更高要求。

文献[1]和文献[2]讨论了多导弹协同制导律的约束条件和各类导引律的方法和特点。文献[3]提出了一种攻击时间可控的多导弹时间协同制导律,该制导律是在比例制导律的基础上附加攻击时间的误差反馈,需要事先指定攻击时间,然后各枚导弹单独采用该制导律进行制导以完成对目标的同时攻击。文献[4]研究了多枚导弹协同拦截一个机动目标的问题,通过设计多导弹系统综合代价函数进而得到考虑末端相对攻击角度约束的最优协同制导律,但该方法在应用时需要在攻击前根据参与攻击的导弹数量等全局约束信息进行制导律设计并将相关参数注入到导弹中,因此制导律改变较困难,算法耗时较多。文献[5]针对固定目标采用网络同步原理和领弹-被领弹通信模式设计了异构网络化分布式协同制导律。文献[6]基于分布式协同制导方法,分别设计了分散化协同制导律和分布式协同制导律,实现多导弹协同攻击。文献[7]研究了固定拓扑和切换拓扑两种情况下同时存在通信时延和拓扑结构不确定的多导弹协同齐射攻击问题。文献[8]在各导弹之间不存在信息交互的情况下设计的多导弹协同制导律。文献[9]研究了在以通信拓扑结构形式来表示导弹之间的信息交互下,提出攻击机动目标的协同制导律。文献[10]基于动态面控制理论和干扰观测器技术研究了制导与控制一体化的多导弹协同打击目标问题,该方法制导过程中各导弹之间没有动态的信息交互,不能实现真正意义上的导弹协同。文献[11]基于滑模控制方法提出了带有攻击时间控制的制导律。文献[12]提出了一种基于虚拟领弹的带有时间限制的多导弹协同制导的方法,是将攻击时间同时达到问题转化为各枚导弹与虚拟领弹的弹目相对距离和前置角的跟踪问题,从而使各枚被领弹都按照虚拟领弹的指定攻击时间同时攻击目标,实现多导弹时间协同导引。

综上所述,国内外学者研究成果主要集中在采用集中式/半集中式协同导引策略和攻击固定目标的多导弹协同制导问题,针对多导弹系统存在分布式信息交

互并协同攻击机动目标的问题研究较为有限。为此,本文针对攻击机动目标的多导弹系统分布式协同制导问题,基于增强型比例导引、代数图论、分布式网络同步原理和非线性系统受控一致性理论,提出一种基于邻接个体局部信息交互的多导弹分布式协同制导方法。该方法由单个导弹攻击机动目标的本地导引律和邻接导弹间协同导引律两部分组成,可实现所有导弹对给定机动目标的同时攻击,具有通信量小、动态重构性和可扩展性好等优点。

1 多导弹协同制导模型

考虑由 N 枚导弹组成的多导弹系统,对各导弹进行自然编号依次为 $M_1 \sim M_N$ 。基于代数图论的相关概念^[13],定义多导弹系统通信拓扑结构 $G = (V, E, A)$,其中有限非空节点集合 $V = \{1, 2, \dots, N\}$ 为图 G 的节点集,代表多导弹系统中各导弹本身; $E \subseteq V \times V$ 是图 G 的边集, E 中所包含的各条边记为 $e_{ij} = (i, j)$;进一步定义 $N_i \triangleq \{j \mid (i, j) \in E\}$, $i, j = 1, \dots, N$,表示在图 G 中与导弹 i 具有通信连接关系的所有导弹的集合;定义非负矩阵 $A \triangleq [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 是图 G 的邻接矩阵, A 中元素 $a_{ij} > 0$, $\forall j \in N_i$ 。定义加权拉普拉斯矩阵 (Weighted Laplacian) $L_\kappa = [l_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 如下:

$$\begin{cases} l_{ij} = -\mu_{ij}a_{ij}, & i \neq j \\ l_{ii} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \mu_{ij}a_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

其中, μ_{ij} 为导弹 i 与导弹 j 的通信加权值。

为简化导弹和目标的运动,假设导弹和目标均为平面内的几何质点,讨论单个导弹制导律时导弹和目标速度大小为常值,得到导弹 i 与目标的相对运动方程组如下:

$$\begin{cases} \dot{\gamma}_t = \frac{a_t}{V_t} \\ \dot{\gamma}_{mi} = \frac{a_{mi}}{V_{mi}} \\ \dot{\gamma}_i = V_t \cos \theta_{ti} - V_{mi} \cos \theta_{mi} \\ r_i \dot{\sigma}_i = V_t \sin \theta_{ti} - V_{mi} \cos \theta_{mi} \end{cases} \quad (2)$$

其中, γ_t 和 γ_{mi} 分别为目标 T 和导弹 M_i 的弹道倾角; V_t 和 V_{mi} 分别为目标 T 和导弹 M_i 的速度; a_t 和 a_{mi} 分别为目标 T 和导弹 M_i 的加速度,假设目标法向加速度已知且为常值; r_i 为导弹 M_i 与目标的相对距离; σ_i 为 M_i 的视线角。 θ_{ti} 、 θ_{mi} 定义如下:

$$\begin{cases} \theta_{ti} = \gamma_t - \sigma_i \\ \theta_{mi} = \gamma_{mi} - \sigma_i \end{cases} \quad (3)$$

图 1 所示为多导弹协同攻击机动目标的示意图, M_i 代表导弹 i , T 代表目标。

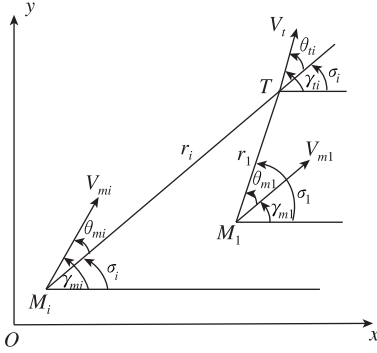


图 1 多导弹系统协同攻击机动目标示意图

Fig. 1 Schematic of multi-missile cooperative systems attacking maneuvering target

2 导弹本地制导律

针对机动目标,为导弹 M_i 设计增强型比例导引律作为其本地制导律,在该导引律下的导弹 M_i 的法向加速度为

$$A_i = \left(1 + \frac{N_i}{\cos\theta_{mi}}\right) V_{mi} \dot{\sigma}_i + \frac{a_t \cos\theta_{ti}}{\cos\theta_{mi}} \quad (4)$$

其中, N_i 为导弹 M_i 的比例导引系数,增强型比例导引律在打击机动目标时相对于传统比例导引律具有所需导引系数小、性能更优等优势,更适用于攻击移动目标。 N_i 的选择需满足如下不等式约束条件^[14]

$$N_i > \frac{V_t}{V_{mi}} + \frac{a_{\max} r_i}{\hat{\beta}_i V_{mi}^2} \quad (5)$$

其中, $\hat{\beta}_i \in (0, 1 - V_t/V_{mi})$ 为一常值, a_{\max} 为目标加速度的最大值。 N_i 满足上述不等式,可使导弹在合适大小的时间下截获目标。因此本文对每枚导弹的本地导引律均采用该增强型比例导引律,比例导引系数 N_i 均取为 3。

在选取增强型比例导引律的对于条件下,并结合式(2)和式(4),导弹 M_i 与目标 T 的运动方程组如下:

$$\begin{cases} \dot{\gamma}_i = V_t \cos\theta_{ti} - V_{mi} \cos\theta_{mi} \\ \dot{\theta}_{mi} = \dot{\gamma}_{mi} - \dot{\sigma}_i = \frac{a_{mi}}{V_{mi}} - \dot{\sigma}_i \\ = \frac{\left(1 + \frac{N_i}{\cos\theta_{mi}}\right) V_{mi} \dot{\sigma}_i + \frac{a_t \cos\theta_{ti}}{\cos\theta_{mi}}}{V_{mi}} - \dot{\sigma}_i \\ = \frac{N_i}{\cos\theta_{mi}} \left(\frac{V_t \sin\theta_{ti} - V_{mi} \sin\theta_{mi}}{r_i} \right) + \frac{a_t \cos\theta_{ti}}{V_{mi} \cos\theta_{mi}} \end{cases} \quad (6)$$

由于目标加速度为已知常值,上述运动方程组右端存在变量 θ_{ti} , 由式(3)可得

$$\begin{aligned} \theta_{ti} &= \gamma_t - \sigma_i = \gamma_t - (\gamma_{mi} - \theta_{mi}) \\ &= \frac{a_t}{V_t} t + \theta_{mi} - \int \frac{a_{mi}}{V_{mi}} dt \\ &= \frac{a_t}{V_t} t + \theta_{mi} - \int \left[\left(1 + \frac{N_i}{\cos\theta_{mi}}\right) \dot{\sigma}_i + \frac{a_t \cos\theta_{ti}}{V_{mi} \cos\theta_{mi}} \right] dt \end{aligned} \quad (7)$$

可见, θ_{ti} 能表示成 $\theta_{ti} = g(r_i, \theta_{mi}, t)$, 即 θ_{ti} 是 r_i, θ_{mi}, t 这 3 个变量的函数。

取状态变量为 $x_i = [r_i, \theta_{mi}]^T$, 则式(6)可表示为如下非线性状态方程式

$$\dot{x}_i = f_i(x_i, t) \quad (8)$$

进一步由式(2)和式(7), 可得

$$\begin{aligned} \theta_{ti} &= \frac{a_t}{V_t} t + \theta_{mi} + \left(1 + \frac{N_i}{\cos\theta_{mi}}\right) \left(\frac{a_t}{V_t} t - \theta_{ti}\right) + \frac{a_t \cos\theta_{ti}}{V_{mi} \cos\theta_{mi}} t \\ \left(\frac{N_i}{\cos\theta_{mi}} + 2\right) \theta_{ti} &= \left(\frac{N_i}{\cos\theta_{mi}} + 2\right) \frac{a_t}{V_t} t + \frac{a_t \cos\theta_{ti}}{V_{mi} \cos\theta_{mi}} t + \theta_{mi} \\ \theta_{ti} &= \left[\frac{a_t}{V_t} + \frac{a_t \cos\theta_{ti}}{V_{mi} \cos\theta_{mi} (N_i/\cos\theta_{mi} + 2)} \right] t + \\ &\quad \frac{\theta_{mi}}{(N_i/\cos\theta_{mi} + 2)} \end{aligned} \quad (9)$$

3 分布式协同制导律

3.1 分布式协同制导律设计

为实现所有导弹对于机动目标实现同时协同攻击,在式(4)的基础上,设计分布式协同制导律,各导弹相对于目标的状态(弹目视线距离和导弹速度矢量前置角)趋于一致。为此,基于代数图论和分布式动态网络一致性原理和^[14-16],给出如下引理。

引理 1 针对如下系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= f(x_i, t) + \sum_{j \in N_i} k_{ij} (x_j - x_i), \\ i &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (10)$$

其中, N_i 代表与导弹 M_i 存在通信交互关系的导弹集合,邻接导弹间耦合权重 $k_{ji} = k_{ij} > 0, \forall j \in N_i$ 。为

$$\lambda_{\min}(\mathbf{L}_k) > \max_{i=1}^N \lambda_{\max}(\mathbf{J}_i) \quad (11)$$

则系统中所有导弹能够实现状态渐近同步

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_i(t) = x^*(t), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

其中, \mathbf{L}_k 为系统加权 Laplace 矩阵; $\lambda_{\min}(\cdot)$ 和 $\lambda_{\max}(\cdot)$ 代表矩阵的最小和最大特征值, $\mathbf{J}_i = \partial f(x_i, t)/\partial x_i$ 为雅克比矩阵 $\partial f(x, t)/\partial x$ 中的元素。

引理 1 给出了网络化多导弹分布式协同制导系

统实现状态收敛的充分条件,同时也规定了能够实现系统协调一致性所对应的通信拓扑类型和系统模型。

针对式(6)所描述的系统,设计多导弹协同制导律如下:

$$\begin{aligned} \dot{r}_i &= (V_t \cos\theta_{ti} - V_{mi} \cos\theta_{mi}) + \sum_{j \in N_i} \xi_{ij} a_{ij} (r_j - r_i) \\ \dot{\theta}_{mi} &= \frac{N_i}{\cos\theta_{mi}} \left(\frac{V_t \sin\theta_{ti} - V_{mi} \sin\theta_{mi}}{r_i} \right) + \frac{a_t \cos\theta_{ti}}{V_{mi} \cos\theta_{mi}} + \\ &\quad \sum_{j \in N_i} \eta_{ij} a_{ij} (\theta_{mj} - \theta_{mi}) \end{aligned} \quad (13)$$

进一步定义 μ_{ij} 和 k_{ij} 如下:

$$\mu_{ij} = \begin{bmatrix} \xi_{ij} & 0 \\ 0 & \eta_{ij} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$k_{ij} = \mu_{ij} a_{ij} \quad (15)$$

其中, μ_{ij} 和 k_{ij} 均为正实数,且满足 μ_{ij} 正定。 k_{ij} 反映了多导弹系统之间的状态耦合程度和通信链路的权值大小。式(13)可以表示为式(10)的形式。

3.2 分布式协同制导律实现

在多导弹协同制导过程中,各导弹制导律是以增强型比例导引为基础,同时叠加分布式协同制导律以实现多弹对目标的协同攻击。协同制导律将同时改变各导弹的飞行速度和法向加速度。因此,与传统增强型比例导引律情况不同:协同导引条件下各导弹为了实现对机动目标的分布式协同攻击,各枚导弹需要根据自身和其邻接导弹的状态信息改变飞行速度的大小和方向。

注意到各导弹控制量可分解为沿速度矢量切向和法向的加速度指令,因此将分布式协同制导律沿导弹速度法向和切向分解。首先由视线方向速度获得导弹的实际速度,进而获得导弹的切向加速度,然后由视线方向角改变的方程获得导弹的法向加速度分量,进而得到可实现的多导弹系统分布协同制导律。具体分解方法如下。

由弹目视线方向的速度

$$\begin{aligned} \dot{r}_i &= (V_t \cos\theta_{ti} - V_{mi} \cos\theta_{mi}) + \sum_{j \in N_i} \xi_{ij} a_{ij} (r_j - r_i) \\ &= V_t \cos\theta_{ti} - V_{mia} \cos\theta_{mi} \end{aligned} \quad (16)$$

其中, V_{mi}^a 为各导弹当前实际速度大小,由式(15)可得

$$\begin{aligned} V_{mi}^a &= \frac{V_t \cos\theta_{ti} - \sum_{j \in N_i} \xi_{ij} a_{ij} (r_j - r_i)}{\cos\theta_{mi}} \\ &= V_{mi} - \frac{\sum_{j \in N_i} \xi_{ij} a_{ij} (r_j - r_i)}{\cos\theta_{mi}} \end{aligned} \quad (17)$$

因此,导弹 M_i 切向加速度为

$$\begin{aligned} a_i^t &= \\ &= \frac{d \left(\frac{\sum_{j \in N_i} \xi_{ij} a_{ij} (r_j - r_i)}{\cos\theta_{mi}} \right)}{dt} = - \frac{d \left(\frac{\sum_{j \in N_i} \xi_{ij} a_{ij} (r_j - r_i)}{\cos\theta_{mi}} \right)}{dt} = \\ &= - \frac{\sum_{j \in N_i} \xi_{ij} a_{ij} (\dot{r}_j - \dot{r}_i)}{\cos\theta_{mi}} - \frac{\sum_{j \in N_i} \xi_{ij} a_{ij} (r_j - r_i)}{\cos^2\theta_{mi}} (\sin\theta_{mi} \dot{\theta}_{mi}) \end{aligned} \quad (18)$$

导弹 M_i 法向加速度为

$$\begin{aligned} a_i^n &= V_{mi}^a \dot{\gamma}_{mi} = V_{mia} (\dot{\theta}_{mi} + \dot{\sigma}_i) \\ &= V_{mi}^a \left(\frac{N_i}{\cos\theta_{mi}} + 1 \right) \frac{(V_t \cos\theta_{ti} - V_{mi} \cos\theta_{mi})}{r_i} + \\ &\quad V_{mi}^a \left[\frac{a_t \cos\theta_{ti}}{V_{mi} \cos\theta_{mi}} + \sum_{j \in N_i} \eta_{ij} a_{ij} (\theta_{mj} - \theta_{mi}) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

4 数值仿真

数值仿真中考虑由4枚导弹 $M_i, i=1,2,3,4$ 所组成的多导弹系统对机动目标的同时协同攻击问题。多导弹网络通信拓扑结构如图2所示。目标初始位置在(40000,10000)(单位为m,下同),以速度1000m/s和法向加速度10m/s²作机动飞行,仿真步长为0.1s。

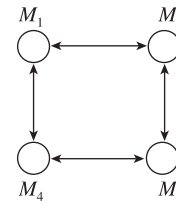


图2 多导弹系统通信拓扑

Fig. 2 Communication topology of multi-missile systems

各导弹的初始位置、初始速度、初始速度前置角和比例导引系数如表1所示。

表1 各导弹初始状态

Tab. 1 The initial state of all missiles

导弹	初始位置 /m	初始速度 /(m/s)	初始速度 方位角/(°)	比例导引系数
M_1	(0,10000)	3000	-8.5	3
M_2	(0,9000)	2000	-8	3
M_3	(1000,8000)	2500	7	3
M_4	(500,11000)	3500	10	3

进一步,为满足引理1条件,选取各导弹间通信连接权重如下:进一步为满足分布式协同制导收敛条件,选择通信耦合加权矩阵为:

$$\begin{aligned} \mu_{12} = \mu_{21} &= \begin{bmatrix} 20 & 0 \\ 0 & 30 \end{bmatrix}, \mu_{23} = \mu_{32} = \begin{bmatrix} 30 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix} \\ \mu_{34} = \mu_{43} &= \begin{bmatrix} 20 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix}, \mu_{14} = \mu_{41} = \begin{bmatrix} 30 & 0 \\ 0 & 30 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

图 3 所示为系统的飞行轨迹曲线图,黑色实线代表目标点运动轨迹,其他彩色曲线为各导弹的运动轨迹。图 4 所示为各导弹对运动目标的弹目距离随时间的变化曲线,从中可以看出,各导弹对目标的视距同时渐近收敛,代表其可实现对目标的同时攻击。图 5 所示为各导弹的速度方位角随时间的变化规律,可见所有导弹速度方位最终可实现渐近趋同。图 6 所示为各导弹协同制导指令随时间的变化规律。

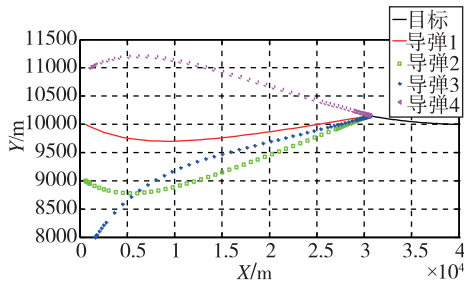


图 3 协同导引下各导弹飞行轨迹

Fig. 3 Trajectories of all missiles with cooperative guidance law

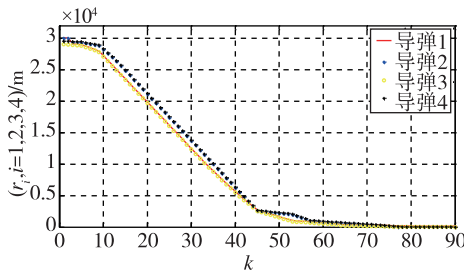


图 4 协同导引控制下各导弹弹目视距

Fig. 4 Line of sight ranges of all missiles with cooperative guidance law

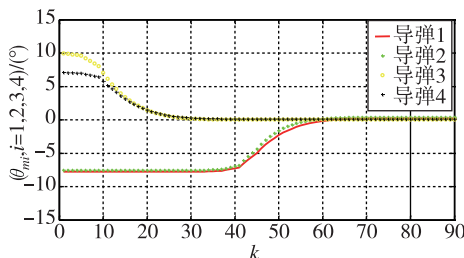


图 5 协同导引控制下各导弹速度方位角

Fig. 5 Orientations of all missiles with cooperative guidance law

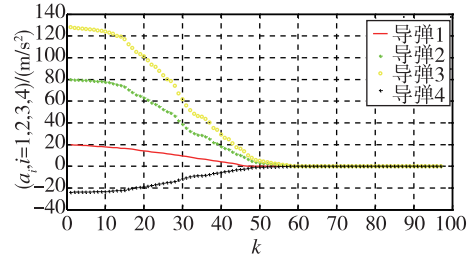


图 6 各导弹协同制导指令

Fig. 6 Guidance laws of all missiles

进一步,在相同的条件下(具体见表 1)将各导弹在纯增强型比例导引(无协同导引律)以及分布式协同导引下的飞行时间进行对比仿真,具体结果如表 2 所示。

表 2 各导弹飞行时间

Tab. 2 The flight time of all missiles

导弹	纯增强型比例导引/s	分布式协同导引/s
M_1	88.2	88.6
M_2	94.8	88.6
M_3	93.2	88.6
M_4	86.3	88.6

在纯增强比例导引律作用下,无法实现各导弹对给定目标的同时攻击,前后到达时间差最大可达到约 7s;而在分布式协同比例导引律作用下可以实现多导弹对目标的同时协同攻击,这是由于协同导引律中对各导弹的速度大小和方向分别进行了分布式协同的结果。

进一步在相同的初始条件下,将各导弹进行独立制导攻击与分布式协同制导攻击条件下对应的飞行时间作对比,具体结果如表 3 所示。

表 3 各导弹飞行时间

Tab. 3 The flight time of all missiles

导弹	独立攻击导引/s	分布式协同导引/s
M_1	85.2	88.6
M_2	90.8	88.6
M_3	92.2	88.6
M_4	95.3	88.6

综合上述仿真结果,相较于各导弹对目标分别进行独立攻击的制导律和纯增强型比例导引律,基于最近邻通信交互机制下的分布式协同制导控制

律可以实现系统对机动目标的分布式同时协同攻击,有效地验证了分布式协同制导算法的有效性和优越性。

5 结论

本文研究了一类针对攻击机动目标多导弹系统协同分布式协同制导律设计问题,将增强型比例导引律、分布式网络同步理论与非线性系统协调一致性控制律有机结合,提出了完全分布化的多导弹分布式协同制导律设计方法,实现了所有导弹对机动目标的同时攻击,且无需估计导弹剩余飞行时间。该制导律仅需相邻导弹之间传输各自的可测状态信息,具有典型的局部通信和分布式计算的特点,且制导律形式简单、通信量少,便于工程实现,能够在提高多导弹系统截获目标概率的同时降低对弹载计算机和弹载探测设备的要求,从而有效降低成本。未来将在此基础上进一步研究各导弹在性能约束下的分布式协同制导律,并给出保证攻击导弹系统实现渐近收敛的状态约束边界条件。

参考文献

- [1] 王建青,李帆,赵建辉,等. 多导弹协同制导律综述[J]. 飞行力学, 2011, 29(4):6-10.
- [2] 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, 10(2): 1-7.
- [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] Shaferman V, Shima T. Cooperative optimal guidance laws for imposing a relative intercept angle[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. 2012:12-18.
- [5] 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.
- [6] Shiyu Z, Rui Z. Cooperative guidance for multimissile salvo attack [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21(6): 533-539.
- [7] 王青,后德龙,李君,等. 存在时延和拓扑不确定的多弹分散化协同制导时间一致性分析[J]. 兵工学报, 2014, 35(7):982-989.
- [8] 周锐,孙雪娇,吴江,等. 多导弹分布式协同制导与反步滑模控制方法[J]. 控制与决策, 2014(9):1617-1622.
- [9] Zhang P, Liu H H T, Li X, et al. Fault tolerance of cooperative interception using multiple flight vehicles [J]. Journal of the Franklin Institute, 2013, 350(9): 2373-2395.
- [10] Wang X, Zheng Y, Lin H. Integrated guidance and control law for cooperative attack of multiple missiles [J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 42(3):1-11.
- [11] Kumar S R, Ghose D. Sliding mode control based guidance law with impact time constraints[C]// American Control Conference (ACC). IEEE, 2013: 5760-5765.
- [12] 邹丽,丁全心,周锐. 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.
- [13] 邹丽,孔繁峨,周锐,等. 多导弹分布式自适应协同制导方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(1):128-132.
- [14] Slotine J E, Wang W. A study of synchronization and group cooperation using partial contraction theory [C]// Block Island Workshop on Cooperative Control, 2004:1-9.
- [15] Godsil C, Royle G F. Algebraic graph theory [M]. New York: Springer Verlag, 2001.
- [16] Horn R A, Johnson C R. Matrix analysis [M]. London: Cambridge University Press, 1985.