多导弹分布式自适应协同制导方法

邹 丽

(北京航空航天大学 飞行器控制一体化技术重点实验室, 北京 100191)

孔繁峨

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

周 锐 吴 江

(北京航空航天大学 飞行器控制一体化技术重点实验室, 北京 100191)

摘 要:针对多导弹的齐射攻击问题,提出了一种具有异构"领弹-被领弹"的分布式自适应协同制导方法.该方法在局部通信和传统比例导引基础上,基于分布式网络同步原理设计了领弹和被领弹的分布式协同制导律.领弹的分布协同制导基于固定系数的比例导引律,而被领弹的分布协同制导则基于自适应可变系数的比例导引律,并设计了被领弹比例导引系数的分布式自适应调节规律.给出了5枚导弹协同目标攻击的仿真结果,验证了该自适应分布式协同制导算法的有效性.

关 键 词: 导弹; 协同制导; 局部通信; 分布式自适应

中图分类号: TJ 765.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)01-0128-05

Distributed adaptive cooperative guidance for multi-missile salvo attack

Zou Li

(Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Kong Fane

(Key Laboratory of National Defense on Fire Control Technology, Luoyang Institute of Electro-optical Equipment, Luoyang 471009, China)

Zhou Rui Wu Jiang

(Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A distributed adaptive cooperative guidance law for multi-missiles with heterogeneous leader-follower was proposed to implement salvo cooperative attacks. On the basis of local communication and traditional proportional guidance law, a distributed cooperative guidance law for multiple heterogeneous missiles with leader-follower was developed using the principles of synchronization in coupled dynamic networks. The distributed cooperative guidance of the leader missile was based on the proportional navigation guidance law with constant navigation coefficient, while the distributed cooperative guidance of the follower missile was based on the proportional guidance law with adaptive variable navigation coefficient. The effectiveness of the proposed distributed adaptive cooperative guidance law was demonstrated by the simulation results of five missiles salvo attacks.

Key words: missile; cooperative guidance; nearest-neighbor communication; distributed adaptation

收稿日期: 2010-08-25; **网络出版时间**: 2011-12-27 10:32; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111227.1032.005

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111227.1032.005.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60975073,61175109); 航空科学基金资助项目(2010ZC51028,2011ZC13001); 火力控制技术国防科技重点实验室基金资助项目(9140C4602041003)

作者简介: 邹 丽(1987 -),女,江西南昌人,硕士生,woaibama1987@163.com.

多导弹协同可有效提高综合作战效能和突防能力,完成单枚导弹不能完成的任务,如实现战术隐身、增强电子对抗能力和对运动目标的识别搜捕能力等[1-3]. 目前关于导弹协同制导问题研究还非常有限. 文献[1]提出了一种攻击时间可控的导弹制导律(ITCG, Impact-Time-Control Guidance),但该方法必须通过人工指定攻击时间来实现协同,不能实现自主协同. 文献[2-3]通过将导弹剩余飞行时间作为协调变量,提出了基于集中式和分散式协调策略的多导弹协同制导方法,该方法可应用于具有领弹形式的协同制导,但需采用集中式协调策略. 文献[4]提出了一种基于虚拟领弹且时间可控的多导弹协同制导方法,将具有飞行时间约束的制导问题被转化为非线性跟踪控制问题. 文献[5]基于领弹-被领弹策略,提出了一种不依赖于导引时间估计的协同制导律. 这些方法都有一个共同的特点:即所有被领弹都必须与领弹进行通信,本质上是一种集中式控制结构,通信鲁棒性和可扩展性较差,也不利于导弹战术隐身与静默攻击.

本文基于分布式相邻局部通信和异构网络的分布式同步方法,设计了多导弹分布式自适应协同制导律.

1　协同制导模型

领弹 M_0 及被领弹 $M_i(i=1,2,\cdots,n)$ 与目标的相对运动关系参见文献[6]中的图 2.

假设目标静止不动,得到 M_0 和 M_i 相对目标的导引关系如下:

$$\begin{aligned} \dot{r}_0 &= -V_0\cos\eta_0 \quad \dot{r}_i = -V_i\cos\eta_i \\ r_0\dot{q}_0 &= V_0\sin\eta_0 \quad r_i\dot{q}_i = V_i\sin\eta_i \\ q_0 &= \sigma_0 + \eta_0 \quad q_i = \sigma_i + \eta_i \\ \dot{\sigma}_0 &= \frac{a_0}{V_0} \quad \dot{\sigma}_i = \frac{a_i}{V_i} \end{aligned}$$

其中,V_0,V_i 分别为 M_0,M_i 的飞行速度;r_0,r_i 分别为 M_0,M_i 与目标的距离;q_0,q_i 分别为 M_0,M_i 与目标的视线角;σ_0,σ_i 分别为 M_0,M_i 的速度角;η_0,η_i 分别为 M_0,M_i 的前置角;a_i 为 M_i 法向加速度指令,采用经典比例导引:

$$\begin{aligned} a_0 &= N_0V_0\dot{q}_0 \\ a_i &= N_iV_i\dot{q}_i \end{aligned}$$

其中,N_0 为 M_0 比例导引系数,设为常值;N_i 为 M_i 的比例导引系数,这里选定为 M_i 协同需要自适应调节的参数. 由以上各式变换可得 M_0 和 M_i 在比例导引下的闭环制导系统模型[5]

$$\left.\begin{aligned} \dot{r}_0 &= -V_0\cos\eta_0 \\ \dot{r}_i &= -V_i\cos\eta_i \\ \dot{\eta}_0 &= (1-N_0)V_0\frac{\sin\eta_0}{r_0} \\ \dot{\eta}_i &= (1-N_i)V_i\frac{\sin\eta_i}{r_i} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

M_0 和 M_i 均采用“比例导引 + 分布协同导引”的制导策略. 据此可以得到 M_0 和 M_i 的协同制导系统模型为

$$\left.\begin{aligned} \dot{r}_0 &= -V_0\cos\eta_0 + a_{01} \\ \dot{\eta}_0 &= (1-N_0)V_0\frac{\sin\eta_0}{r_0} + a_{02} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

$$\left.\begin{aligned} \dot{r}_i &= -V_i\cos\eta_i + a_{i1} \\ \dot{\eta}_i &= (1-N_i)V_i\frac{\sin\eta_i}{r_i} + a_{i2} \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

其中,a_{01},a_{02} 和 a_{i1},a_{i2} 分别为 M_0 和 M_i 在比例导引基础上叠加的分布式协同控制分量,分别对导弹速度和方位进行在线调整,以实现协同.

对于多弹协同齐射攻击而言,若在攻击目标后期能保证 $r_i=r_0$,$\eta_i=\eta_0$ 或 $r_i=r_0$,$\eta_i=-\eta_0$,则领弹和所有被领弹将同时到达目标,实现对目标的协同攻击[5]. 下面将具体介绍协同制导律的设计过程,使得 $r_i=r_0$,$\eta_i=\eta_0$.

2　网络化分布式自适应协同制导

2.1　分布式自适应协同制导律

假设导弹之间都采用双向的分布式相邻局部通信,原理如图 1 所示. M_0 虽实现分布式协同,但其比例导引系数固定;而 M_i 则为了提高协同效率,除了实现分布式协同外,还需要基于分布式通信对其比例导引系数进行在线的分布式自适应调节,以实现导弹的协同制导.

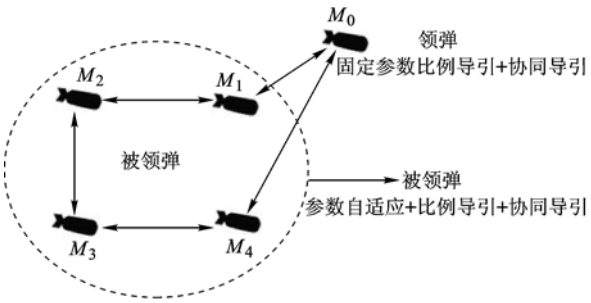

图 1　导弹分布式通信网络与参数自适应

参考图 1 所示的协同控制结构,整个网络的通信拓扑结构可分成 2 个部分:被领弹与被领弹之间的通信拓扑,领弹与被领弹之间的通信拓扑,具体参见文献[6].

根据式(2)和式(3),定义导弹状态向量 $\boldsymbol{x}=[r \quad \eta]^{\mathrm{T}}$,则 M_0 和 $M_i, i=1,2,\cdots,n$ 的状态向量可表示为

$$\boldsymbol{x}_0=[r_0 \quad \eta_0]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{x}_i=[r_i \quad \eta_i]^{\mathrm{T}} \quad i=1,2,\cdots,n$$

若将比例导引系数选为分布式协同的自适应可调参数,结合式(2)和式(3),可得比例导引下的 M_0 和 M_i 闭环制导系统模型为

$$f(\boldsymbol{x}_0,N_0,t)=\begin{bmatrix} -V_0\cos\eta_0 \\ (1-N_0)V_0\dfrac{\sin\eta_0}{r_0}\end{bmatrix} \tag{4}$$

$$f(\boldsymbol{x}_i,N_i,t)=\begin{bmatrix} -V_i\cos\eta_i \\ (1-N_i)V_i\dfrac{\sin\eta_i}{r_i}\end{bmatrix} \tag{5}$$

定义 M_0 和 M_i 的分布式协同控制分量为

$$\boldsymbol{u}_0=[a_{01} \quad a_{02}]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{u}_i=[a_{i1} \quad a_{i2}]^{\mathrm{T}} \quad i=1,2,\cdots,n$$

则式(2)和式(3) 可表示成如下的规范化的领弹-被领弹闭环制导系统模型:

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}_0&=f(\boldsymbol{x}_0,N_0,t)+\boldsymbol{u}_0\\ \dot{\boldsymbol{x}}_i&=f(\boldsymbol{x}_i,N_i,t)+\boldsymbol{u}_i \quad i=1,2,\cdots,n\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

其中,$\boldsymbol{x}_0$ 和 $\boldsymbol{x}_i$ 分别为 M_0 和 M_i 的闭环制导系统状态;$f(\cdot)$ 为制导系统模型,可以是非线性的;$\boldsymbol{u}_0$ 和 $\boldsymbol{u}_i$ 为 M_0 和 M_i 的分布式协同制导分量. 基于式(6)可设计分布式协同制导分量及参数自适应调节规律,使领弹和被领弹状态尽快趋近一致.

分布式自适应协同制导律的设计可以分为2个部分:分布协同策略及参数自适应调节机制.

基于动态网络系统的同步原理[7-8]设计分布协同策略,选择 M_0 分布式协同制导分量为

$$\boldsymbol{u}_0=\sum_{i\in\Omega_0}\boldsymbol{\gamma}_{0i}\beta_{0i}(\boldsymbol{x}_i-\boldsymbol{x}_0) \tag{7}$$

选择 M_i 的分布式协同制导分量为

$$\boldsymbol{u}_i=\sum_{j\in\Omega_i}\boldsymbol{\mu}_{ji}\alpha_{ji}(\boldsymbol{x}_j-\boldsymbol{x}_i)+\boldsymbol{\gamma}_{0i}\beta_{0i}(\boldsymbol{x}_0-\boldsymbol{x}_i) \tag{8}$$

此时 M_i 的闭环制导系统模型变为

$$\dot{\boldsymbol{x}}_i=f(\boldsymbol{x}_i,N_i,t)+\sum_{j\in\Omega_i}\boldsymbol{\mu}_{ji}\alpha_{ji}(\boldsymbol{x}_j-\boldsymbol{x}_i)+\boldsymbol{\gamma}_{0i}\beta_{0i}(\boldsymbol{x}_0-\boldsymbol{x}_i)$$

定义 $\boldsymbol{\mu}_{ij}=\begin{bmatrix}\rho_{ij} & \delta_{ij}\\ \delta_{ij} & \varphi_{ij}\end{bmatrix}$ $\boldsymbol{\gamma}_{0i}=\begin{bmatrix}\rho_{0i} & \delta_{0i}\\ \delta_{0i} & \varphi_{0i}\end{bmatrix}$

其中,$\rho_{ij},\delta_{ij},\varphi_{ij}$ 和 $\rho_{0i},\delta_{0i},\varphi_{0i}$ 均为正实数,且满足 $\boldsymbol{\mu}_{ij}$ 和 $\boldsymbol{\gamma}_{0i}$ 正定. 由式(2)、式(3)、式(6)和式(7)可得 M_0 闭环制导系统状态模型的展开形式为

$$\dot{r}_0=-V_0\cos\eta_0+\sum_{i\in\Omega_0}[\beta_{0i}\rho_{0i}(r_0-r_i)+\beta_{0i}\delta_{0i}(\eta_0-\eta_i)]$$

$$\dot{\eta}_0=(1-N_0)V_0\frac{\sin\eta_0}{r_0}+\sum_{i\in\Omega_0}[\beta_{0i}\delta_{0i}(r_0-r_i)+\beta_{0i}\varphi_{0i}(\eta_0-\eta_i)] \tag{9}$$

M_i 闭环制导系统状态模型展开形式为

$$\dot{r}_i=-V_i\cos\eta_i+\beta_{0i}\rho_{0i}(r_0-r_i)+\beta_{0i}\delta_{0i}(\eta_0-\eta_i)+\sum_{j\in\Omega_i}[\alpha_{ji}\rho_{ij}(r_j-r_i)+\alpha_{ji}\delta_{ij}(\eta_j-\eta_i)]$$

$$\dot{\eta}_i=(1-N_i)V_i\frac{\sin\eta_i}{r_i}+\beta_{0i}\delta_{0i}(r_0-r_i)+\beta_{0i}\varphi_{0i}(\eta_0-\eta_i)+\sum_{j\in\Omega_i}[\alpha_{ji}\delta_{ij}(r_j-r_i)+\alpha_{ji}\varphi_{ij}(\eta_j-\eta_i)] \tag{10}$$

选择 M_i 比例导引系数 $N_i(t)$ 的分布式自适应调整规律:

$$\dot{N}_i(t)=\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_i,t)\sum_{j\in\Omega_i}\boldsymbol{\mu}_{ij}\alpha_{ji}(\boldsymbol{x}_j-\boldsymbol{x}_i) \tag{11}$$

其中,$\boldsymbol{P}_i$ 为正定对称的常数矩阵;$\boldsymbol{\omega}(\boldsymbol{x}_i,t)$ 满足:

$$f(\boldsymbol{x}_i,N_i,t)=f(\boldsymbol{x}_i,N_0,t)+\boldsymbol{\omega}(\boldsymbol{x}_i,t)(N_i-N_0) \tag{12}$$

将式(4)和式(5)代入式(12)中解算可得

$$\boldsymbol{\omega}(\boldsymbol{x}_i,t)=\begin{bmatrix}0\\ -V_i\dfrac{\sin\eta_i}{r_i}\end{bmatrix} \tag{13}$$

将式(13)代入式(11),得到 M_i 可调比例导引系数的分布式自适应调节规律为

$$\dot{N}_i(t)=\boldsymbol{P}_i\left(-V_i\frac{\sin\eta_i}{r_i}\right)\cdot\sum_{j\in\Omega_i}[\alpha_{ji}\delta_{ij}(r_j-r_i)+\alpha_{ji}\varphi_{ij}(\eta_j-\eta_i)] \tag{14}$$

2.2 自适应分布式协同制导收敛条件

设导弹网络通信拓扑为 G,G 的关联矩阵和拉普拉斯矩阵分别为 $\boldsymbol{D}$ 和 $\boldsymbol{L}$[9],$\boldsymbol{L}_{\mathrm{f}}$ 为被领弹通信拓扑 G_{f} 的加权拉普拉斯矩阵. 定义对称矩阵为[8]

$$\boldsymbol{L}_{k\Lambda}=\boldsymbol{D}(\boldsymbol{I}_{\boldsymbol{\mu}_{ij}}\boldsymbol{I}_{\boldsymbol{\Lambda}_{ij}})\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_{ij}=\int_0^1\frac{\partial f}{\partial\boldsymbol{x}}[\boldsymbol{x}_j+\chi(\boldsymbol{x}_i-\boldsymbol{x}_j),N_0,t]\mathrm{d}\chi$$

其中,$\boldsymbol{I}_{\boldsymbol{\mu}_{ij}}$ 和 $\boldsymbol{I}_{\boldsymbol{\Lambda}_{ij}}$ 分别为对角处 $\boldsymbol{\mu}_{ij}$ 和 $\boldsymbol{\Lambda}_{ij}$ 的块对角矩阵. 定义 $(\boldsymbol{\mu\Lambda})_{ijs}$ 为 $\boldsymbol{\mu}_{ij}\boldsymbol{\Lambda}_{ij}$ 的对称部分.

根据异构网络分布式同步的收敛性条件,若导弹制导系统模型 $f(\cdot)$ 和通信拓扑满足条件[7-8]:

$$\frac{\lambda_{m+1}^2(\boldsymbol{L}_{\mathrm{f}})}{\lambda_n(\boldsymbol{L})}>\max_k\lambda_{\max}(\boldsymbol{\mu\Lambda})_{ijs} \tag{15}$$

其中,$\lambda(\cdot)$ 为矩阵特征值,则所有 $M_i(i=1,2,\cdots,n)$ 状态收敛于 M_0 状态,即

$$\lim_{t\to\infty}\boldsymbol{x}_i(t)=\boldsymbol{x}_0(t) \quad i=1,2,\cdots,n$$

式(15)是多导弹网络化自适应分布式协同制导系统收敛的充分条件,也反映了何种通信拓扑及系统模型可以实现非线性的分布式一致性协调.

3　仿真结果与分析

考虑如图 1 所示的通信拓扑结构,领弹 M_0 只与 4 枚被领弹中的 M_1 和 M_4 进行通信,被领弹之间采用相邻局部通信. 假定目标静止,导弹初始速度为 $V=300$ m/s,领弹固定比例导引系数 $N_0=3$;被领弹比例导引系数按照式(10)和式(14)进行自适应在线调节,初值 $N_i(0)=3$,选择常数 $P_i=1(i=1,2,3,4)$.

根据多弹分布式自适应协同制导收敛条件,选择通信加权系数为

$$\boldsymbol{\gamma}_{01}=\begin{bmatrix}0.1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\gamma}_{04}=\begin{bmatrix}0.1 & 0\\ 0 & 1.1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\mu}_{13}=\boldsymbol{\mu}_{31}=\begin{bmatrix}0.1 & 0\\ 0 & 0.9\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\mu}_{12}=\boldsymbol{\mu}_{21}=\begin{bmatrix}0.1 & 0\\ 0 & 1.3\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\mu}_{24}=\boldsymbol{\mu}_{42}=\begin{bmatrix}0.12 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\mu}_{34}=\boldsymbol{\mu}_{43}=\begin{bmatrix}0.11 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}$$

仿真结果如表 1 所示,可以看出, 5 枚导弹在非协同比例导引飞行的时间各不相同,前后到达目标的时间相差最大可达 9 s 左右. 非协同比例导引导弹飞行轨迹如图 2 所示,分别对应了纯比例导引下各导弹飞行时间 t_p. 分布式自适应协同制导下的各导弹轨迹如图 3 所示,各导弹在协同导引下同时击中目标,协同攻击时间 t_c 为 32.64 s,达到齐射协同攻击的预期目标.

表 1　导弹初始参数及仿真结果

导弹	初始位置/m	η/(°)	t_p/s	t_c/s
M_0	(−6894, −5785)	−30	30.84	32.64
M_1	(−3294, −8972)	−25	32.42	32.64
M_2	(9397, −3420)	20	33.75	32.64
M_3	(3329, −8693)	−35	32.23	32.64
M_4	(8426, −7071)	45	39.05	32.64

弹目相对距离及导弹前置角协同收敛曲线如图 4 和图 5 所示,协同收敛速度很快,这是由于各导弹从速度大小和方向以及比例导引系数等不同方面同时进行了分布式自适应和协同的结果,如图 6 ~ 图 9 所示. 当然,这需要保证导弹过载及其它控制量在工程允许的范围之内.

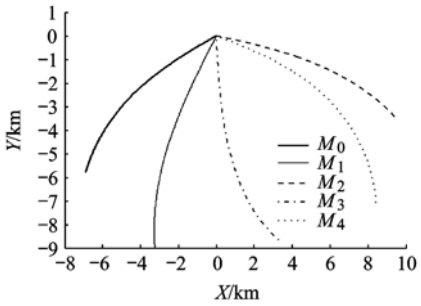

图 2　非协同纯比例导引下的导弹轨迹

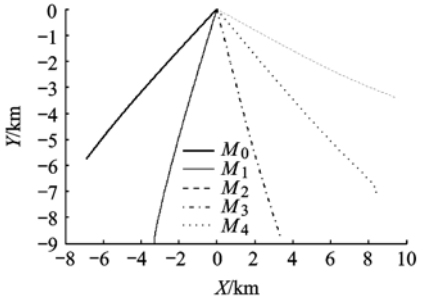

图 3　分布式自适应协同制导下的导弹轨迹

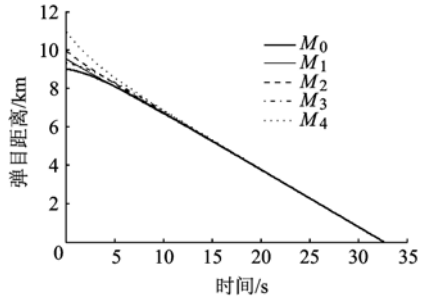

图 4　导弹与目标相对距离

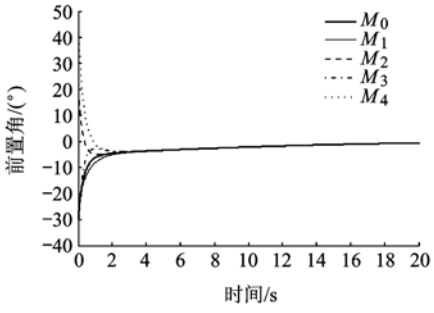

图 5　导弹前置角

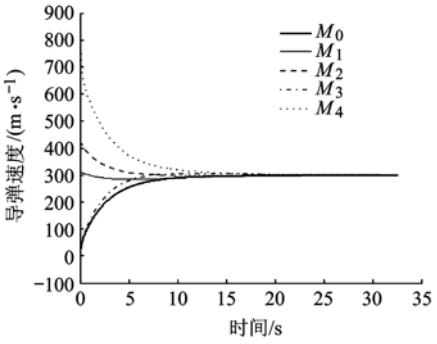

图 6　各导弹速度变化曲线

从图9可知,各被领弹的比例导引系数 N_i ($i=1,2,3,4$)主要调节过程发生在飞行初始阶段,随后很快收敛,中后期阶段的协同则主要依靠速度大小和方向的分布式协同来实现.

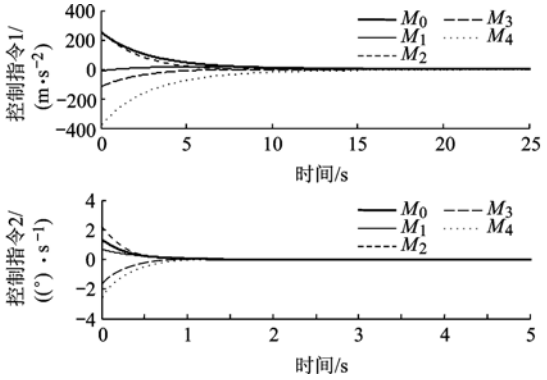

图7 导弹协同制导指令

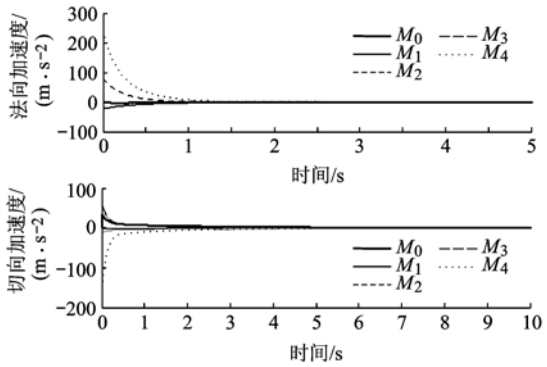

图8 各导弹法向和切向加速度

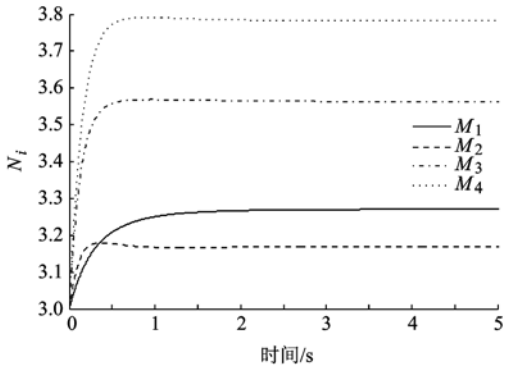

图9 被领弹自适应导引系数

4 结 论

在局部通信和传统比例导引基础上,设计了领弹和被领弹自适应分布式协同制导律. 领弹基于固定系数的比例导引律,而被领弹则基于自适应时变系数的比例导引律. 该协同制导律具有分布式局部通信、分布式协同和分布式参数自适应等特点,无需估计导弹剩余飞行时间. 导弹协同所需通信量少,只需在相邻导弹之间传输少量的状态信息,且协同制导律形式简单,便于工程实现,可扩展性较好. 该制导律由于同时具有分布式协同和分布式参数自适应机制,具有较好的收敛性和自适应性.

参考文献(References)

[1] 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

[2] 赵世钰,周锐. 基于协调变量的多导弹协同制导[J]. 航空学报,2008,29(6):1605 – 1611
Zhao Shiyu, Zhou Rui. Multi-missile cooperative guidance using coordination variables[J]. Acta Aeronautica et Astronautics Sinica, 2008, 29(6): 1605 – 1611(in Chinese)

[3] Zhao Shiyu, Zhou Rui. Cooperative guidance for multimissile salvo attack[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21(6): 533 – 539

[4] Zhao Shiyu, Zhou Rui, Wei Chen. Design of time-constrained guidance laws via virtual leader approach[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23: 103 – 108

[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
Zhang Youan, 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)

[6] 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
Zou Li, Ding Quanxin, Zhou Rui. Distributed cooperative guidance for multiple heterogeneous networked missiles[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(12): 1432 – 1435(in Chinese)

[7] Wang Wei, Jean-Jacques E S. Adaptive synchronization in coupled dynamic networks[DB/OL]. New York: Cornell University Library, 2004 [2011-08-25]. http://arxiv.org/abs/nlin/0403030

[8] Wang Wei, Jean-Jacques E S. A theoretical study of different leader roles network[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 51(7): 1156 – 1161

[9] Godsil C, Royle G. Algebraic graph theory[M]. New York: Springer-Verlag, 2001

[10] Kumar V, Leonard N, Morse A S. Cooperative control[M]. New York: Springer-Verlag, 2003

[11] Fax J A, Murray R M. Information flow and cooperative control of vehicle formations[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(9): 1465 – 1476

(编 辑:刘登敏)