

# 存在时延的分布式无人机编队控制方法

王 品, 姚佩阳

(空军工程大学 信息与导航学院, 西安 710077)

**摘要:** 多无人机协同是未来无人机应用的重要方式, 多无人机编队作为多无人机协同的重要技术和研究热点也已引起越来越多关注, 分布式无人机相较于集中式具有灵活性好、鲁棒性强, 对通信及计算性能要求低等优点; 针对无人机的非线性动力学模型, 在有向固定拓扑的条件下, 运用高阶一致性理论解决无人机系统的分布式编队问题; 基于 Lyapunov 稳定性原理, 利用线性矩阵不等式 (LMI), 分别得出在具有时变时延导数信息及无导数信息情况下的稳定性充分条件; 最后, 仿真验证了这种编队控制方法的有效性; 研究结果表明, 利用文章所提出的方法控制无人机编队飞行, 在满足稳定性的前提下, 无人机系统能够形成稳定的编队, 并达到预期速度。

**关键词:** 无人机; 高阶一致性; 时变时延; 线性矩阵不等式

## Method of Distributed UAVs Formation with Time-delay

Wang Pin, Yao Peiyang

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** For unmanned aerial vehicle, (UAV) nonlinear kinetic model, the paper utilized the high-order consensus theory to solve the distributed UAVs' formation problem with fixed directed topology. Based on Lyapunov stability principle, by solving linear matrix inequality (LMI), sufficient conditions of stability is obtained as well as time delay with and without derivative information. At last, The simulation example is used to verify the effectiveness of the control method. The results of the research show that when the stability condition is satisfied, the UAVs' formation control method the paper proposed could guide the multi-UAVs system asymptotically to converge to the desired velocity and shape the desired formation.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; high-order consensus; time-varying delay; linear matrix inequality

## 0 引言

20 世纪 90 年代的海湾战争中, 美军大量使用无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 执行军事任务。无人机在海湾战争中的成功运用, 引起各国广泛关注。无人机相较于有人机具有隐身性好, 自主性强, 成本低廉, 可执行危险性任务等优点<sup>[1]</sup>。为拓展无人机应用领域, 提高无人机完成任务的效率以及任务执行的冗余性, 实现多无人机协同编队变得至关重要。因此, 对于多无人机的编队控制成为无人机系统的热点研究领域之一<sup>[2]</sup>。

早期无人机编队控制主要采用集中式<sup>[3]</sup>的方法, 主要特点是每架无人机均与编队中所有无人机进行速度、位置等信息的交互。这种控制策略效果最好, 但对通信要求较高, 且计算量大、算法复杂各自状态达到一致, 最终形成稳定编队。是一种分布式的无人机控制策略, 具有所需信息量小, 鲁棒性强, 自组织等特性。当前对于基于一致性的编队研究主要假设多自主体运动特性为较为简单的一阶积分模型或者二阶积分模型<sup>[4-7]</sup>, 控制量为速度或者加速度, 为更贴近实际系统, 本文针对三阶系统进行协同编队研究。大多数基于一致性理论的编队问题研究都假设通信传输过程中无通信时延, 然而, 在实际应用中,

由于网络拥塞、传输速度、通信距离等因素的限制, 通信时延不可避免。因此, 考虑时延对系统的影响具有重要理论价值和工程意义。

本篇对于通信拓扑结构为有向固定拓扑, 同时具有时变时延的无人机系统, 通过设计高阶一致性算法来解决无人机协同编队问题。同时, 基于 Lyapunov 理论, 运用线性矩阵不等式 (linear matrix inequality, LMI) 的方法, 分别在具有时延导数信息和无时延导数信息的情况下, 得出系统达到稳定的充分条件。最后, 仿真验证了模型和算法的有效性。

## 1 无人机动力学模型

本文只考虑在二维平面内的无人机协同编队问题, 所有无人机假设飞行在某一固定高度, 即  $\dot{z}_i = 0$ ,  $z_i$  为第  $i$  架无人机飞行高度, 为避免碰撞, 每架无人机应处于不同高度, 即  $z_1 \neq z_2 \neq \dots \neq z_n$ 。第  $i$  架无人机的动力学模型如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \\ \dot{v}_i \\ \dot{\omega}_i \\ \dot{F}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_i \cos \theta_i \\ v_i \sin \theta_i \\ \omega_i \\ \frac{F_i}{m_i} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{J_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_i \\ \alpha_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $[x_i \ y_i \ \theta_i \ v_i \ \omega_i \ F_i]^T$  为状态向量;  $[\tau_i \ \alpha_i]^T$  为控制输入;  $(x_i, y_i)$  为第  $i$  架无人机在笛卡尔坐标系中的位置;  $\theta_i = \frac{\dot{y}_i}{x_i}$  为航向角, 在笛卡尔坐标系中,  $x$  轴正方向角度为 0, 沿逆时针方向旋转为正方向;  $\omega_i$  为第  $i$  架无人机角速度;  $J_i$

收稿日期:2016-01-21; 修回日期:2016-04-18。

基金项目:国家自然科学基金(61273048)。

作者简介:王 品(1992-), 男, 山东莱阳人, 硕士研究生, 主要从事有人/无人机协同、多智能体系统一致性方向的研究。

姚佩阳(1960-), 男, 陕西西安人, 硕士, 教授, 主要从事指挥控制组织设计及运用方向的研究。

为惯性矩； $\tau_i$  为惯性扭矩； $F_i$  为作用力； $m_i$  为质量； $\alpha_i$  为作用力的变化率。

令  $\xi_i(t) = [x_i, y_i]^T \in R^{2 \times 1}$ ,  $u_i = [u_{xi}, u_{yi}]^T \in R^{2 \times 1}$ , 对式 (1) 中的  $\dot{x}_i, \dot{y}_i$  继续求二阶导, 将  $\dot{\theta}_i, \dot{v}_i, \dot{\omega}_i, F_i$  带入, 可将第  $i$  架无人机的动力学模型转化成三次积分形式:  $\xi_i^{(3)} = u_i$ , 式中,  $\xi_i$  为第  $i$  架无人机的在笛卡尔坐标系中的位置;  $u_i$  为虚拟控制输入。 $u_i$  与  $[\tau_i \quad \alpha_i]^T$  之间具有如下转化关系:

$$\begin{cases} \alpha_i = m_i \sin \theta_i \mu_{yi} + m_i \cos \theta_i \mu_{xi} + m_i v_i \omega_i^2 \\ \tau_i = \frac{J_i}{v_i} \left( \cos \theta_i \mu_{yi} - \sin \theta_i \mu_{xi} - \frac{F_i \omega_i}{m_i} - \frac{F_i}{m_i} \right) \end{cases} \quad (2)$$

## 2 预备知识介绍

用  $\tau(t)$  表示无人机间的时变时延, 本文分别对如下具有时延导数信息以及无时延导数信息的时变时延加以考虑:

$$\textcircled{1} 0 \leq \tau(t) \leq T, 0 \leq \dot{\tau}(t) \leq d \leq 1 \quad \textcircled{2} 0 \leq \tau(t) \leq T \quad (3)$$

用有向图  $G = (V, E, A)$  表示无人机之间的拓扑结构。其中,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  为有向图的顶点集, 有向图的边  $e_{ij} = (v_i, v_j) \in E$  表示第  $i$  架无人机能够向第  $j$  架无人机传递信息。 $A = [a_{ij}]$  为有向图的邻接矩阵, 当  $i = j$  时,  $a_{ij} = 0, i \neq j$  时, 若  $e_{ij} \in E$ , 则  $a_{ij} = 1$ , 否则  $a_{ij} = 0$ 。若  $e_{ij} \subseteq E$  则称第  $i$  架无人机为第  $j$  架无人机的邻居, 节点  $i$  的邻居集用  $N_i$  表示。有向图的拉普拉斯矩阵定义为  $L = [l_{ij}] (i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$

, 其中,  $l_{ii} = \sum_{j=1, i \neq j}^n a_{ij}, l_{ij} = -a_{ij}, i \neq j$ 。本文中考虑无人机系统具有有向固定的拓扑结构。

## 3 基于高阶一致性理论的无人机控制协议设计

第  $i$  架无人机的状态空间描述为:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_i(t) = \xi_i^{(1)}(t) \\ \dot{\xi}_i^{(1)}(t) = \xi_i^{(2)}(t) \\ \dot{\xi}_i^{(2)}(t) = u_i(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\xi_i(t)$  为第  $i$  架无人机位置,  $\xi_i^{(1)}(t)$  表示第  $i$  架无人机速度,  $\xi_i^{(2)}(t)$  表示第  $i$  架无人机加速度。

根据文献 [8], 具有时变时延的高阶一致性协议设计为:

$$\begin{aligned} u_i(t) = & \sum_{v_j \in N_i(t)} k_1 [\xi_j(t - \tau(t)) - \xi_0(t - \tau(t)) - \Delta_j] - \\ & [\xi_i(t - \tau(t)) - \xi_0(t - \tau(t)) - \Delta_i] + \sum_{v_j \in N_i(t)} k_2 [\xi_j^{(1)}(t - \\ & \tau(t)) - \xi_i^{(1)}(t - \tau(t)) + \xi_*] + k_3 \xi_i^{(2)}(t - \tau(t)) + k_4 h_i \\ & [\xi_i^{(1)}(t - \tau(t)) - \xi_*] \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $k_1, k_2, k_3, k_4$  均为正常数;  $h_i = 0$  或  $1, h_i = 1$  时, 表示第  $i$  架无人机可获取预期速度信息, 否则, 则不能获取; 若  $\xi_0(t)$  为编队形心位置;  $\Delta_i$  为第  $i$  架无人机相对于形心的距离;  $\xi_*$  为预期速度。

为方便说明问题, 以四机编队为例。如图 1 所示,  $O_e$  为编队形心;  $O$  代表笛卡尔坐标系的原点; 第  $i$  架、第  $j$  架无人机及编队形心  $O_e$  的坐标分别为:  $\xi_i(t), \xi_j(t), \xi_0(t)$ 。 $\Delta_i(t), \Delta_j(t)$  分别为第  $i$  架、第  $j$  架无人机与  $O_e$  的距离。

令  $\bar{\xi}_i(t) = \xi_i(t) - \xi_0(t) - \Delta_i, \bar{\xi}_i^{(1)}(t) = \xi_i^{(1)}(t) - \xi_*, \bar{\xi}_i^{(2)}(t) = \xi_i^{(2)}(t)$ , 所以, 协议 (5) 可转化为:

$$u_i(t) = \sum_{v_j \in N_i(t)} k_1 [\bar{\xi}_j(t - \tau(t)) - \bar{\xi}_i(t - \tau(t))] +$$

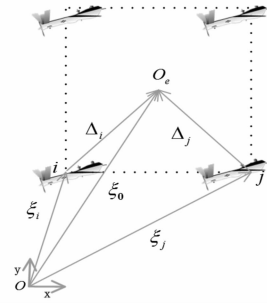


图 1 编队位置图

$$\begin{aligned} & \sum_{v_j \in N_i(t)} k_2 [\bar{\xi}_j^{(1)}(t - \tau(t)) - \bar{\xi}_i^{(1)}(t - \tau(t))] + \\ & k_3 \bar{\xi}_i^{(2)}(t - \tau(t)) + k_4 h_i \bar{\xi}_i^{(1)}(t - \tau(t)) \end{aligned} \quad (6)$$

如令:  $\epsilon(t) = [\bar{\xi}_1(t), \bar{\xi}_2(t), \dots, \bar{\xi}_n(t), \bar{\xi}_1^{(1)}(t), \bar{\xi}_2^{(1)}(t), \dots, \bar{\xi}_n^{(1)}(t), \bar{\xi}_1^{(2)}(t), \bar{\xi}_2^{(2)}(t), \dots, \bar{\xi}_n^{(2)}(t)]^T$ , 则系统可转化为:

$$\dot{\epsilon}(t) = A\epsilon(t) + B\epsilon(t - \tau(t)) \quad (7)$$

$$\text{其中, } A = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -k_1 L & -k_2 L + k_4 H & k_3 I \end{bmatrix}.$$

若  $\lim_{t \rightarrow \infty} \epsilon(t) = 0$ , 则  $\lim_{t \rightarrow \infty} [\xi_i(t) - \xi_0(t) - \Delta_i] = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} [\xi_i^{(1)}(t) - \xi_*] = 0$ , 即  $\lim_{t \rightarrow \infty} [\xi_i(t) - \xi_0(t)] = \Delta_i, \lim_{t \rightarrow \infty} \xi_i^{(1)}(t) = \xi_*$ 。也就是说, 无人机系统最终能形成预期编队并且按照预期的速度前进。

## 4 基于高阶一致性理论的无人机编队稳定性分析

首先, 给出得到本文结论所需要引理。

引理 1: 对于任意可微向量  $\epsilon(t)$ , 及合适维数对称矩阵  $W > 0$ , 下列不等式成立:

$$T^{-1} [\epsilon(t) - \epsilon(t - \tau(t))]^T W [\epsilon(t) - \epsilon(t - \tau(t))] \leq$$

$$\int_{t-\tau(t)}^t \dot{\epsilon}^T(s) W \dot{\epsilon}(s) ds \quad t \geq 0$$

其中, 时延  $\tau(t)$  满足式 (3) 中的两种情况①或情况②。

定理 1: 假设  $\tau(t)$  满足式 (3) 中情况①, 对于任意  $d$ , 存在合适的  $T$ , 使系统达到一致, 且最大时延  $T$  可通过求解以下线性矩阵不等式获得:

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Omega_{11} & \Omega_{12} \\ * & \Omega_{22} \end{bmatrix} < 0 \quad (8)$$

$$\Omega_{11} = [2PA + Q + TA^T RA - T^{-1}R]$$

$$\Omega_{12} = [PB + TA^T RB + T^{-1}R]$$

$$\Omega_{22} = [(d-1)Q + TB^T RB - T^{-1}R]$$

其中:  $P = P^T > 0, Q = Q^T > 0, R = R^T > 0$  分别为合适维数矩阵。

证明:

基于 Lyapunov 理论, 采用如下泛函:

$$V(t) = \epsilon^T(t) P \epsilon(t) + \int_{t-\tau(t)}^t \epsilon^T(s) Q \epsilon(s) ds +$$

$$\int_{t-T}^t (s - t + T) \dot{\epsilon}^T(s) R \dot{\epsilon}(s) ds \quad (9)$$

则根据牛顿—莱布尼茨公式可得:

$$\dot{V}(t) = 2\epsilon^T(t)P\dot{\epsilon}(s) + \xi^T(t)Q\epsilon(t) - (1 - \dot{\tau}(t))\epsilon^T(t - \tau(t))Q\epsilon(t - \tau(t)) + T\dot{\epsilon}^T(t)R\dot{\epsilon}(t) - \int_{t-\tau(t)}^t \dot{\epsilon}^T(s)R\dot{\epsilon}(s)ds \quad (10)$$

由引理 1 可得:

$$\dot{V}(t) \leq 2\epsilon^T(t)P\dot{\epsilon}(s) + \epsilon^T(t)Q\epsilon(t) - (1 - d)\epsilon^T(t - \tau(t))Q\epsilon(t - \tau(t)) + T\dot{\epsilon}^T(t)R\dot{\epsilon}(t) - T^{-1}[\epsilon(t) - \epsilon(t - \tau(t))]^TR[\epsilon(t) - \epsilon(t - \tau(t))] \quad (11)$$

将式 (7) 带入可得:

$$\dot{V}(t) \leq 2\epsilon^T(t)PA\epsilon(t) + \epsilon^T(t)Q\epsilon(t) - (1 - d)\epsilon^T(t - \tau(t))Q\epsilon(t - \tau(t)) + T[A\epsilon(t) + B\epsilon(t - \tau(t))]^TR[A\epsilon(t) + B\epsilon(t - \tau(t))] - T^{-1}[\epsilon(t) - \epsilon(t - \tau(t))]^TR[\epsilon(t) - \epsilon(t - \tau(t))] + 2\epsilon^T(t)PB\epsilon(t - \tau(t)) \quad (12)$$

定义  $y(t) = [\epsilon^T(t), \epsilon^T(t - \tau(t))]$ , 可得:

$$\dot{V}(t) \leq y^T(t)\Omega y(t)$$

则  $\dot{V}(t) \leq 0$  成立的充分条件为式 (8) 成立。因此, 定理 1 得证。

当时延导数信息未知时, 选用如下泛函:

$$V(t) = \epsilon^T(t)P\epsilon(t) + \int_{t-T}^t (s - t + T)\epsilon^T(s)R\dot{\epsilon}(s)ds$$

类似于定理 1 的推导过程, 可得如下推论:

推论 1: 当时延满足式 (3) 条件②时, 存在合适的  $T$  使系统达到稳定, 所允许最大时延  $T$  可通过求解以下线性矩阵不等式获得:

$$\begin{bmatrix} 2PA + TA^T RA - T^{-1}R & PB + TA^T RB + T^{-1}R \\ * & TB^T RB - T^{-1}R \end{bmatrix} < 0$$

其中,  $P = P^T > 0, R = R^T > 0$  分别为合适维数矩阵。

5 仿真验证

为证明所提协议及模型的正确性, 本节给出计算机仿真。为验证模型及算法的有效性, 本节在小型局域网环境内构建仿真环境, 以五台配置为 2.53 GHz 主频、4 G 内存的计算机模拟五架无人机平台。

假设多无人机系统共有五架无人机, 无人机间有向固定通信拓扑结构如图 2 所示。

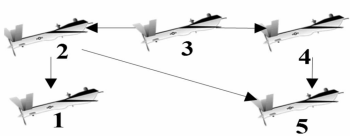


图 2 无人机机间有向通信拓扑结构

五架无人机的初始位置、速度、航迹角如表 1 所示, 取无人机质量为 10 kg, 惯性矩为 0.2 kg · m<sup>2</sup>。

表 1 无人机初始状态			
无人机编号	初始位置 (m)	初始速度 (m/s)	初始航迹角 (°)
1	(10,590)	93	74
2	(8,610)	98	51
3	(6,700)	83	39
4	(10,630)	80	23
5	(9,550)	75	12

五架无人机所期望队形如图 3, 期望速度为 50 m/s, 期望航迹角为 45 度。

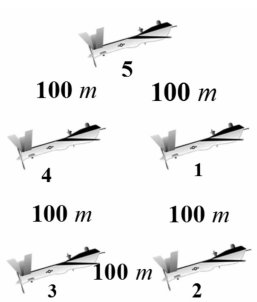


图 3 无人机期望编队

取  $k_1 = 2, k_2 = 2, k_3 = 2.5, k_4 = 4, H$  矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

。根据定理 1, 当时延导数  $d=0.5$  时, 调用

LMI 工具箱可求得允许最大时延  $T = 0.175$  s。根据推论 1, 当无导数信息时, 所允许最大时延  $T = 0.17$  s。令时变时延  $\tau(t) = 0.15 \sin(2t)$ , 则无人机系统位置、速度以及航迹角变化如图 4、5、6 所示, 图 7 显示的是 20 s 时五架无人机的位置。

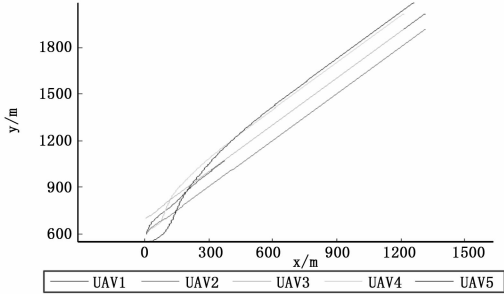


图 4 无人机位置变化曲线图

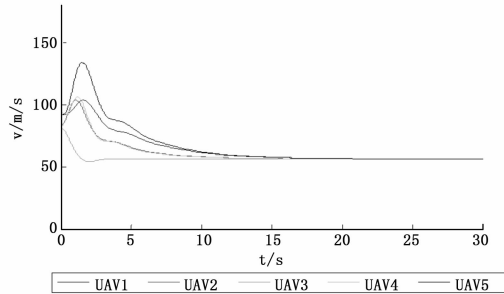


图 5 无人机速度变化曲线图

由图中可见, 利用本文所提模型及分布式编队控制方法, 在时变时延满足稳定条件的情况下, 五架无人机的速度及航迹角最终收敛并且能达到预定值, 无人机最终能够形成预定编队。

6 结束语

本篇利用高阶一致性理论解决了无人机的分布式编队问题, 与传统的集中式主从编队控制方法相比, 该策略只需无人 (下转第 187 页)

485 采用 MAX485 芯片, 与 MAX232 不同, MAX485 需要通过控制切换发送使能和接收使能端进行数据的发送和接收, 为了与其他 3 路串口通信的统一, 利用硬件方式来实现自动收发转换的 RS-485 接口电路, 通过 74HC14 芯片可以判断收发状态从而控制发送使能和接收使能端, 达到自动收发的目的, 如图 11 所示。

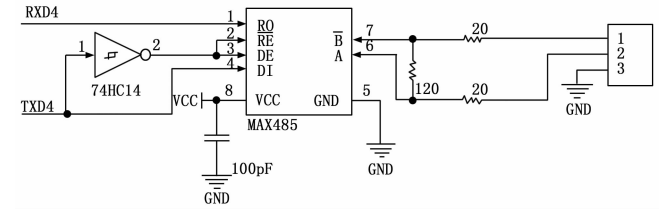


图 11 自动收发转换的 RS-485 接口电路

### 5 结论

淬灭电路部分使用主动淬灭的方式对雪崩二极管完成淬灭与快速恢复过程, 减少死区时间, 提高探测精度, 提升 APD 寿命; 光子计数电路部分, 采用主从机互相通信的方式, 主机

~~~~~

(上接第 183 页)

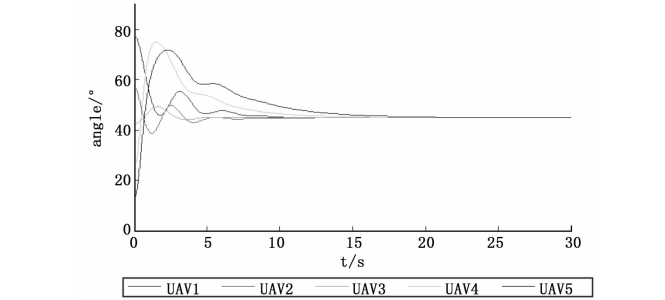


图 6 无人机航迹角变化曲线图

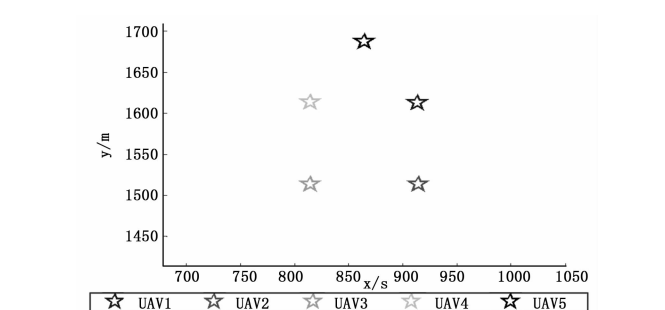


图 7  $t = 20\text{ s}$  时无人机位置

机之间具有部分通信联络, 无人机根据邻居无人机的速度位置信息进行计算即可达到协同编队的目的。具有结构简单, 所需信息量小等优点。

### 参考文献:

[1] 沈林成, 牛铁峰, 朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.  
[2] 黄长强, 翁兴伟, 王 勇, 等. 多无人机协同作战技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.  
[3] Giuliotti F, Pollini L, Innocenti M. Autonomous formation flight [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2000, 20 (6): 34-44.

用于控制与管理从机, 从机负责完成计数和设置阈值电压的功能, 对每个 APD 分别控制, 提高线列 APD 的探测效率, 增加了精确度, 减少错误计数。

### 参考文献:

[1] 冯小溪, 张栋存, 康小麓. APD 单光子探测器的抑制技术 [J]. 中国科技信息, 2015, Z2: 29-31.  
[2] 权菊香, 张东升, 丁良恩. Si-APD 单光子探测器的全主动抑制技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2006 (5): 43-46.  
[3] 寇松峰, 陈 钱, 顾国华, 等. 基于 APD 阵列的单光子计数成像研究 [J]. 半导体光电, 2008 (6): 968-972.  
[4] 张雪皎, 万钧力. 单光子探测器器件的发展与应用 [J]. 激光杂志, 2007 (5): 13-15.  
[5] 彭孝东, 周金运, 廖常俊, 等. 雪崩抑制技术在 SPADs 中的应用 [J]. 光子技术, 2004 (2): 66-70.  
[6] 林和志, 黄联芬. 零延时 RS-485 接口电路的设计与应用 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2005 (11): 31-33.  
[7] 袁 俊, 吴广国, 张国青, 等. SPAD 单光子探测器 SPICE 电路模型的建立与仿真研究 [J]. 核电子学与探测技术, 2009 (1): 62-68.  
[4] Jadbabaie A, Lin J, Morse A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules [J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 2003, 48 (6): 988-1001.  
[5] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time - delays [J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 2004, 49 (9): 1520-1533.  
[6] Ren Wei. Consensus strategies for cooperative control of vehicle formation [J]. IEL Control Theory & Applications, 2007, 1 (2): 505-512.  
[7] Hong Y, Hu J, Gao L. Tracking control for multi-agent consensus with an active leader and variable topology [J]. Automatica, 2006, 42 (7): 1177-1182.  
[8] Dong X W, Yu B C, Shi Z Y. Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles: theories and applications [J]. IEEE Trans. on Control Systems Technology, 2014, 23 (1): 340-348.  
[9] Morbidi F, Freeman R A, Lynch K M. Estimation and control of UAV swarms for distributed monitoring tasks [A]. Proc. of the American Control Conference [C]. 2011: 1069-1075.  
[10] Kuriki Y, Namerikawa T. Consensus-based cooperative control for geometric configuration of UAVs flying in formation [A]. ICE Annual Conference [C]. Nagoya, Japan, 2013: 1237-1242.  
[11] Qin J H, Gao H J, Zheng W X. Second-order consensus for multi-agent systems with switching topology and communication delay [J]. Systems&Control Letters, 2011, 60 (6): 390-397.  
[12] Richert D, Cortes J. Optimal leader allocation in UAV formation pairs ensuring cooperation [J]. Automatica, 2013, 49 (2013): 3189-3198.  
[13] 符小卫, 崔洪杰, 高晓光. 多无人机集结问题分布式求解方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37 (8): 1797-1802.  
[14] Jiang F C, Wang L. Consensus in leaderless networks of high-order-integrator agents [A]. Proceeding of American Control Conference [C]. Missouri, 2009: 4458-4463.  
[15] 秦梓荷, 林 壮, 李 平, 等. 存在饱和输入量的前驱动船舶编队控制 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2015, 43 (8): 75-78.