

多无人机协同任务规划

无人机 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 是一种具备自主飞行和独立执行任务能力的新型作战平台, 不仅能够执行军事侦察、监视、搜索、目标指向等非攻击性任务, 而且还能够执行对地攻击和目标轰炸等作战任务。随着无人机技术的快速发展, 越来越多的无人机将应用在未来战场。

某无人机作战部队现配属有 P01~P07 等 7 个无人机基地, 各基地均配备一定数量的 FY 系列无人机 (各基地具体坐标、配备的无人机类型及数量见附件 1, 位置示意图见附件 2)。其中 FY-1 型无人机主要担任目标侦察和目标指示, FY-2 型无人机主要担任通信中继, FY-3 型无人机用于对地攻击。FY-1 型无人机的巡航飞行速度为 200km/h, 最长巡航时间为 10h, 巡航飞行高度为 1500m; FY-2 型、FY-3 型无人机的巡航飞行速度为 300km/h, 最长巡航时间为 8h, 巡航飞行高度为 5000m。受燃料限制, 无人机在飞行过程中尽可能减少转弯、爬升、俯冲等机动动作, 一般来说, 机动时消耗的燃料是巡航的 2~4 倍。最小转弯半径 70m。

FY-1 型无人机可加载 S-1、S-2、S-3 三种载荷。其中载荷 S-1 系成像传感器, 采用广域搜索模式对目标进行成像, 传感器的成像带宽为 2km (附件 3 对成像传感器工作原理提供了一个非常简洁的说明, 对性能参数进行了一些限定, 若干简化亦有助于本赛题的讨论); 载荷 S-2 系光学传感器, 为达到一定的目标识别精度, 对地面目标拍照时要求距目标的距离不超过 7.5km, 可瞬时完成拍照任务; 载荷 S-3 系目标指示器, 为制导炸弹提供目标指示时要求距被攻击目标的距离不超过 15km。由于各种技术条件的限制, 该系列无人机每次只能加载 S-1、S-2、S-3 三种载荷中的一种。为保证侦察效果, 对每一个目标需安排 S-1、S-2 两种不同载荷各自至少侦察一次, 两种不同载荷对同一目标的侦察间隔时间不超过 4 小时。

为保证执行侦察任务的无人机与地面控制中心的联系, 需安排专门的 FY-2 型无人机担任通信中继任务, 通信中继无人机与执行侦察任务的无人机的通信距离限定在 50km 范围内。通信中继无人机正常工作状态下可随时保持与地面控制中心的通信。

FY-3 型无人机可携带 6 枚 D-1 或 D-2 两种型号的炸弹。其中 D-1 炸弹系某种类型的“灵巧”炸弹, 采用抛投方式对地攻击, 即投放后炸弹以飞机投弹时的速

度作抛物运动，当炸弹接近目标后，可主动寻的攻击待打击的目标，因此炸弹落点位于目标中心 100m 范围内可视为有效击中目标。D-2 型炸弹在激光制导模式下对地面目标进行攻击，其飞行速度为 200m/s，飞行方向总是指向目标。攻击同一目标的 D-2 型炸弹在整个飞行过程中需一架 FY-1 型无人机加载载荷 S-3 进行全程引导，直到命中目标。由于某些技术上的限制，携带 D-2 型炸弹的无人机在投掷炸弹时要求距目标 10km~30km，并且要求各制导炸弹的发射点到目标点连线的大地投影不交叉（以保证弹道不交叉）。为达到一定的毁伤效果，对每个目标（包括雷达站和远程搜索雷达）需成功投掷 10 枚 D-1 型炸弹，而对同一目标投掷 2 枚 D-2 型炸弹即可达到相同的毁伤效果。

多架该型无人机在同时执行任务时可按照一定的编队飞行，但空中飞行时两机相距要求 200m 以上。由于基地后勤技术保障的限制，同一基地的两架无人机起飞时间间隔和降落回收的时间间隔要求在 3 分钟以上。无人机执行完任务后需返回原基地。

根据任务要求，需完成侦察和打击的目标有 A01~A10 等 10 个目标群，每个目标群包含数量不等的地面目标，每个目标群均配属有雷达站（目标以及各目标群配属雷达的位置示意图见附件 2，具体坐标参数见附件 4），各目标群配属雷达对 FY 型无人机的有效探测距离为 70km。

请你们团队结合实际建立模型，研究下列问题：

（1）一旦有侦察无人机进入防御方某一目标群配属雷达探测范围，防御方 10 个目标群的配属雷达均开机对空警戒和搜索目标，并会采取相应对策，包括发射导弹对无人机进行摧毁等，因此侦察无人机滞留防御方雷达探测范围内时间越长，被其摧毁的可能性就越大。现需为 FY-1 型无人机完成 10 个目标群（共 68 个目标）的侦察任务拟制最佳的路线和无人机调度策略（包括每架无人机起飞基地、加载的载荷、起飞时间、航迹和侦察的目标），以保证侦察无人机滞留防御方雷达有效探测范围内的时间总和最小。

（2）FY-1 型无人机对目标进行侦察时，须将侦察信息实时通过 FY-2 型无人机传回地面控制中心。鉴于 50km 通信距离的限制，需安排多架 FY-2 型无人机升空，以保证空中飞行的侦察无人机随时与 FY-2 型无人机的通信。FY-2 型无人机可同时与多架在其有效通信范围的侦察无人机通信并转发信息。为完成问题（1）的侦察任务，至少安排多少架次的 FY-2 型通信中继无人机。

（3）所有 FY-1 型无人机现已完成侦察任务并返回基地，均可加载载荷 S-3

用于为制导炸弹提供目标指示。现要求在 7 个小时内（从第一架攻击无人机进入防御方雷达探测范围内起，到轰炸完最后一个目标止）完成对 10 个目标群所有 68 个地面目标的火力打击任务，如何进行任务规划以保证攻击方的无人机滞留防御方雷达有效探测范围内的时间总和最小？请给出具体的无人机任务规划结果（包括每架无人机飞行路线、FY-3 型无人机携带炸弹的具体清单和攻击的目标清单）。

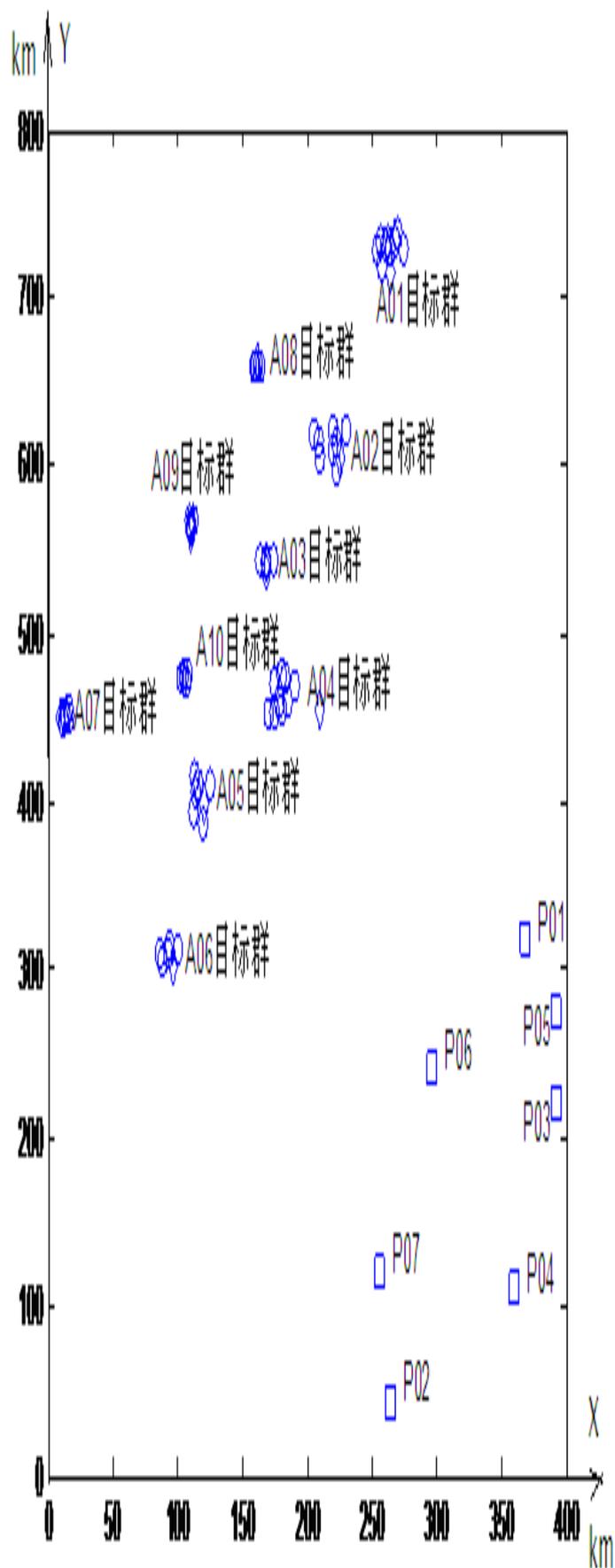
（4）由相关信息渠道获知在 A02、A05、A09 周边可能还配置有三部远程搜索雷达，该雷达对 FY 型无人机的有效作用距离是 200km。这三部雷达的工作模式是相继开机工作，即只有首先开机的雷达遭到攻击后才开启第二部雷达，同样只有第二部雷达被攻击后才开启第三部雷达。远程搜索雷达一旦开机工作，攻击方无人机群即可获知信号并锁定目标，而后安排距其最近的无人机对其摧毁。请基于防御方部署远程搜索雷达的情形重新考虑问题（3）。

（5）请对求解模型的算法的复杂度进行分析；并讨论如何有效地提高算法的效率，以增强任务规划的时效性。基于你们小组构建的数学模型和对模型解算的结果，讨论哪些技术参数的提高将显著提升无人机的作战能力？

附件 1 无人机基地的相关信息

基地名称	(X, Y) 坐标 (单位: km)	FY-1 配属量 (单位: 架)	FY-2 配属量 (单位: 架)	FY-3 配属量 (单位: 架)
基地 P01	(368, 319)	2	1	13
基地 P02	(264, 44)	0	1	15
基地 P03	(392, 220)	2	1	13
基地 P04	(360, 110)	0	1	15
基地 P05	(392, 275)	2	1	13
基地 P06	(296, 242)	0	1	15
基地 P07	(256, 121)	2	1	13

附件 2 目标群、无人机基地位置示意图



附件 3 成像传感器的工作原理及性能参数

实际中，UAV 载荷成像传感器对目标进行侦察时会根据目标的不同特点采用不同的扫描方式。为简化问题，如图 1 所示，本赛题中成像传感器统一采用广域搜索模式对目标进行成像，即目标落入传感器成像带宽内即可。在二维平面上看，传感器的成像带宽限定为 2km 是指 AB 两点的距离为 2km。一般限定成像传感器在无人机的一侧成像，图 1 呈现的是在无人机右侧成像（也可在左侧成像）。本赛题限定无人机加载 S-1 型载荷后，起飞前已完成设备调试，即固定在无人机的某一侧成像，飞行中不再调整。

一般来说，成像传感器对目标进行侦察需要一定的时间来收集需要的信息，所以要求侧向距离 OA 需大于一定的阈值，同时也有一个最大作用距离的限制，即示意图中的 OB 需小于一定的阈值。为简化问题，本赛题统一限定要求为 $OA > 2\text{km}$ 、 $OB < 8\text{km}$ 。当成像传感器采用广域搜索模式对目标进行成像时，为保证成像效果，一般要求载机作匀速直线运动。

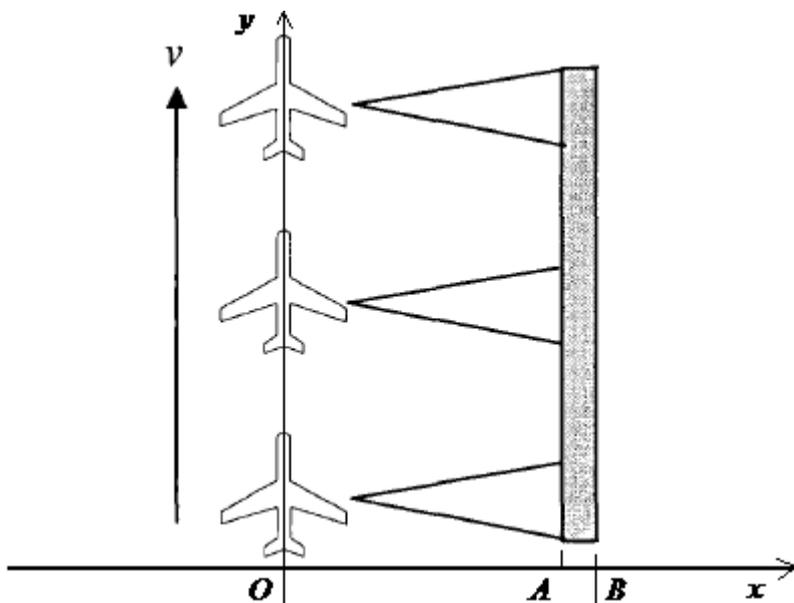


图 1 成像传感器工作原理及相关性能参数示意图

附件 4 目标的相关信息

点位名称	(X, Y) 坐标 (单位: km)	备注	点位名称	(X, Y) 坐标 (单位: km)	备注
目标群 A01			目标群 A05		
目标 A0101	(264, 715)	雷达站	目标 A0501	(120, 400)	雷达站
目标 A0102	(258, 719)		目标 A0502	(119, 388)	
目标 A0103	(274, 728)		目标 A0503	(112, 394)	
目标 A0104	(264, 728)		目标 A0504	(125, 410)	
目标 A0105	(254, 728)		目标 A0505	(114, 405)	
目标 A0106	(257, 733)		目标 A0506	(116, 410)	
目标 A0107	(260, 731)		目标 A0507	(113, 416)	
目标 A0108	(262, 733)				
目标 A0109	(268, 733)		目标群 A06		
目标 A0110	(270, 739)		目标 A0601	(96, 304)	雷达站
			目标 A0602	(88, 305)	
目标群 A02			目标 A0603	(100, 312)	
目标 A0201	(225, 605)	雷达站	目标 A0604	(93, 311)	
目标 A0202	(223, 598)		目标 A0605	(86, 310)	
目标 A0203	(210, 605)		目标 A0606	(94, 315)	
目标 A0204	(220, 610)				
目标 A0205	(223, 615)				
目标 A0206	(209, 615)		目标群 A07		
目标 A0207	(230, 620)		目标 A0701	(10, 451)	雷达站
目标 A0208	(220, 622)		目标 A0702	(11, 449)	
目标 A0209	(205, 618)		目标 A0703	(13, 450)	
			目标 A0704	(16, 450)	
目标群 A03			目标 A0705	(12, 453)	
目标 A0301	(168, 538)	雷达站	目标 A0706	(15, 455)	
目标 A0302	(168, 542)				
目标 A0303	(164, 544)		目标群 A08		

目标 A0304	(168, 545)		目标 A0801	(162, 660)	雷达站
目标 A0305	(174, 544)		目标 A0802	(161, 659)	
			目标 A0803	(159, 659)	
目标群 A04			目标 A0804	(160, 657)	
目标 A0401	(210, 455)	雷达站	目标 A0805	(164, 658)	
目标 A0402	(180, 455)				
目标 A0403	(175, 452)		目标群 A09		
目标 A0404	(170, 453)		目标 A0901	(110, 561)	雷达站
目标 A0405	(185, 460)		目标 A0902	(110, 563)	
目标 A0406	(178, 460)		目标 A0903	(110, 565)	
目标 A0407	(190, 470)		目标 A0904	(109, 567)	
目标 A0408	(183, 473)		目标 A0905	(112, 568)	
目标 A0409	(175, 472)				
目标 A0410	(180, 476)		目标群 A10		
			目标 A1001	(105, 473)	雷达站
			目标 A1002	(106, 471)	
			目标 A1003	(103, 473)	
			目标 A1004	(107, 475)	
			目标 A1005	(104, 477)	

附件 5 无人机任务规划概述

多无人机协同作战中的任务规划从功能上可大致划分为系统资源分配、任务分配、航线规划、轨迹优化、武器投放规划等。资源分配将多无人机系统要执行的总体任务分解为一系列可由无人机单机/编队完成的基本任务，进而根据系统资源的总体情况提出执行各个基本任务的资源需求，并给出任务执行的大体时间窗口。任务分配根据系统内各无人机平台的载荷挂载情况与任务能力，确定各无人机平台要执行或参与的一个或多个基本任务并且给出具体执行时间。航线规划根据战场中敌方威胁情况规划和协调系统中各无人机的航线，引导无人机平台在指定时间到达指定任务区域并避免各无人机平台/编队在空间上的冲突。轨迹优化在航线规划的基础上，进一步对无人机的飞行航线进行平滑和优化，从而得到无人机平台飞行控制系统能够有效跟踪的飞行轨迹。武器投放规划综合考虑无人机平台飞行高度、速度及其携带弹药的性能等因素，计算攻击方向、武器投放区域，进而确定无人机平台的投弹机动动作与武器投放时机，控制无人机平台对目标实施打击，提高武器的命中率。