



也谈无人机协同作战

■ 文 / 谭勇 谢志航 范怡

由于单架无人机能力有限,因此一些国家提出了“蜂群”概念,就是让多架无人机协同作战,这样,多架无人机组成的编队就能够充分利用彼此的资源而发挥出整体的作战能力,其效能显然要大于各自为战的无人机。2004年,美国波音公司利用X-45无人机首次进行了双机编队飞行;2012年,美国利用“全球鹰”无人机成功进行了无人机空中加油试验,标志着无人机在编队飞行及协同方面取得了突破性进展。不过从目前来看,各国在无人机与无人机编队协同方面的技术还不够成熟,在编队队形、航迹规划、信息交换等方面还有许多难关需要攻克,距离实用化还需时日。

在这种情况下,各国首先发展的是有人机和无人机的协同作战能力。

当前,无人机系统的正常运行依赖于与地面控制站之间的可靠、高效通信,但这种传统的模式无法在无人机与各

个作战平台之间建立起快速的信息传递、精确的攻击及较短的决策周期,同时,指挥控制范围受到地域地形限制,且信号情报极易被侦收和干扰,因此,很大程度上限制了无人机系统的作战效能发挥。

为了克服上述不足,在未来战争中,有人机与无人机及其他无人支援飞机联合编队作战将成为一种全新的并且是主要的作战模式。在联合作战中,无人机直接接受有人机平台的指挥控制,实施联合目标确定、协同指挥控制、一体化作战、快速打击决策及动态评估,从而实现“传感器-控制器-射手”的一体化作战模式。

根据美国近年来发布的无人机发展路线图预测,预计在2015~2020年间,美国的无人机系统可能达到与有人机协同作战的水平。因此,在不久的将来,无人机与有人机联合编队作战很可能成为一种新颖的作战模式。

有人/无人机协同作战概念与特点

所谓有人/无人机协同作战,可以是1架有人机指挥1架无人机,也可以是1架有人机同时指挥多架无人机,其中有人机具有远距探测能力,处于敌方打击火力圈外,而无人机不具有远距探测能力,但隐身性能好并携带有制导武器,可作为攻击机。无人机处于有人机的监视空域,在数据链信息的支持下,无人机和有人机通过密切协同来完成信息获取、战术决策、指挥引导、武器发射和武器制导等火控过程以达成作战任务。有人机和无人机进行联合编队实施协同作战,可由地面指挥中心或预警机通过联合战术信息分发系统实现对联合编队的指挥控制与引导。由有人机完成信息的综合处理、战场态势的感知、联合编队的战术决策与任务管理,由无人机完成对空/对地的



近年来，美军使用多种有人机型与无人机开展协同作战研究，取得大量成果

最终打击，从而实现体系对抗系统与有人 / 无人机联合编队之间的战场信息共享、可用资源的统一调度及作战任务的综合管理。

可以看出，有人 / 无人机协同实际上相当于把察打无人机的控制站搬到了空中，由飞行员近距离直接指挥无人机，减少了指令反应的延迟时间。有人机可以利用飞行员的智慧来处理复杂的战场信息，并且迅速对目标进行识别，同时还可以为无人机提供必要的空中掩护。无人机则利用自己的隐身能力，在有人机的指挥下对敌方重要目标进行攻击，而有人机可以保持在敌方防御系统作用距离之外，从而提高战场生存能力。即使无人机被击落，其损失也要小得多。由于有人机与无人机距离近，也不需要使用卫星数据链，因此降低了战区卫星通信系统的压力，同时也提高了网络的安全性。据报道，美国的 RQ-170 隐身无人侦察机就是因为卫星数据链出现问题而被伊朗方面俘获的。

另外还有一个问题也不容忽视，那就是有人机与无人机之间的协同，最终下达武器发射命令的决定权掌握在

有人机的飞行员手里，这避免了一个敏感的伦理问题——是否能让一个机器决定杀人，毕竟这个问题在现阶段可能还让人无法接受。

有人 / 无人机协同作战主要具有以下特点：

- 有人 / 无人机联合编队作为体系对抗系统的一个节点，受预警机或地面指挥中心的统一指挥控制，包括整体作战计划制定、远距占位引导等，同时共享整个战场的态势信息。

- 有人 / 无人机联合编队飞机之间在信息、资源、攻击计划等多方面实现协同。有人作战飞机对所获取的信息进行综合处理，完成战场态势的感知，同时根据作战任务与作战计划、战场态势、系统可用资源等多种因素，进行协同攻击的任务规划，实现对联合攻击系统的任务管理，并将任务规划的结果以指令形式发送至无人作战飞机。

- 无人作战飞机在有人机的指挥控制下，完成攻击目标的瞄准计算、武器发射条件判断、武器发射前的装定参数计算、武器的发射控制及发射后的制导等，实现对空 / 对地目标的最终打

击。

通常，一个基本的有人 / 无人机协同作战系统包括：1 架有人作战飞机；2 ~ 4 架无人作战飞机；无人作战飞机通讯数据链路系统。此外，还需要预警机、地面指挥控制中心、卫星等其他作战单元所组成的空天地一体化作战系统的支持。

国外主要研究进展

目前，美英等无人机发展水平较高的国家均在加紧有人 / 无人机协同作战应用研究，探索无人机与各类作战平台的集成方法。

早在 2004 年，波音公司和麻省理工学院的研究人员就合作开展了有人机指挥控制无人机执行作战任务的相关研究，并成功地进行了飞行试验。该项目采用的无人机是洛·马公司的 T-33 飞机（改装无人作战飞机的航空电子系统），有人作战飞机则使用了 1 架 F-15E 战斗机。有人机和无人机之间采用 Link-16 数据链进行指令数据的传输，并采用自然语言理解模块来进行语音



有人 / 无人机协同防御的最大优势在于提高了威胁告警能力

指令的处理和解析。

波音公司的另外一项重要研究计划是“空中有人 / 无人系统技术”(AMUST), 该计划于 2006 年 2 月成功试验了由 1 架 AH-64D“长弓阿帕奇”武装直升机控制 1 架“无人小鸟”(ULB) 无人机所搭载的武器。

2006 年 8 月, 洛克希德·马丁公司完成了一种新型的指挥控制系统 MCA, 实现了对无人机的指挥控制。该系统被安装在 1 架 UH-60“黑鹰”直升机上, 并在试验中成功演示了通过战术通用数据链(TCDL)对 1 架“猎人”战术无人机实施控制的能力。

2009 年 3 月, 波音公司成功地演示了预警机、战斗机与侦察无人机的协同作战。演习中, E-3A 预警机派出“扫描鹰”无人机进行侦察。“扫描鹰”传回目标视频, E-3A 随即派出 F-16 战斗机对目标进行攻击。

近年来, 美军还使用“基奥瓦勇士”(OH-58D)和“阿帕奇”直升机以及

P-3 巡逻机与多种无人机开展协同作战研究, 并取得不少成果。例如 2010 年 9 月, “基奥瓦勇士”开始加装“有人机-无人机系统数据链”(L2MUM)。目前美国陆军所有的“基奥瓦勇士”都加装了该系统。2011 年 11 月, “阿帕奇”直升机利用 UTA 数据链对 1 架 MQ-1C“灰鹰”无人机的飞行路径实施控制, 且控制过程中 2 架飞机都处于飞行状态。

最近, 据日本外交学者网站透露, 美国空军在即将公布的《自主地平线》报告中还探讨了有人机与无人机的协作问题, 并提到了 F-35 战机飞行员将能够一边飞行一边控制附近的一群无人机。

除了美国, 英国也一直在进行这方面的研究。2006 年 10 月底, 作为英国国防部某研发项目的部分内容, 奎奈蒂克(QinctiQ)公司以 BAC 1-11 飞机模拟无人机, 成功验证了新型的无人机控制和管理方法, 实现了战斗机控制和

自主组织多架无人机。

2007 年 4 月, 奎奈蒂克公司和英国国防部还成功进行了 1 架“狂风”综合航电样机(TIARA)作为指挥机与模拟无人机的 BAC1-11 飞机的编队飞行试验, 实现了 1 名有人机飞行员直接控制 4 架无人机。

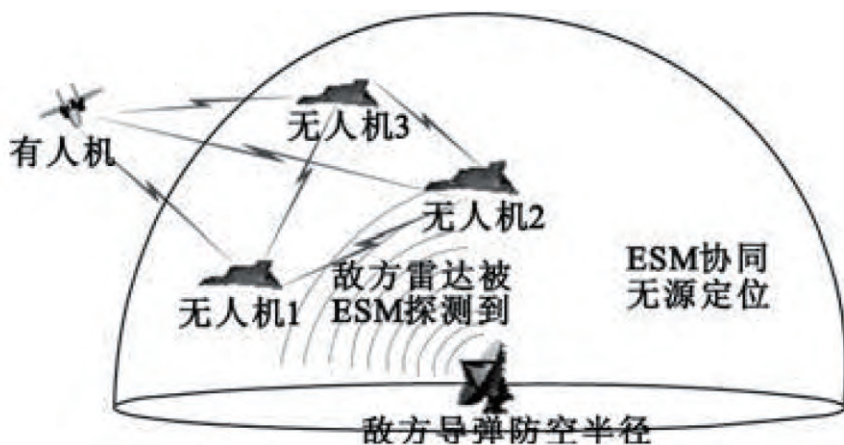
有人 / 无人机协同作战模式

协同作战主要指有人 / 无人机之间的联合战术行动, 在空-空、空-地以及空-海的不同作战环境下, 有人 / 无人机之间的协同模式可划分为 3 种: 态势感知、协同攻击和协同防御, 下面分别予以介绍。

态势感知

利用有人 / 无人机的多个资源跟踪同一目标, 可有效提高跟踪质量, 且可实时显示目标未被跟踪(如未分配)或者不能跟踪(如未在自己的视场内)的

图 1 协同态势感知



状态,从而极大增强有人/无人战斗机编队的状态感知能力。同时,如图1所示,利用互联的空中C2平台、战斗机、无人机(共享角度跟踪数据)及多种技术,可有效地对无源辐射或有源辐射目标实施协同定位。通过协同方式还可改善其他活动,包括地形跟随/地形回避、在恶劣环境条件下加油或飞行突防编队和进入机动飞行。

协同攻击

对空目标攻击如图2所示,由1架有人机带领双无人机编队执行对空目标攻击任务,无人机突前并保持雷达静默。当无人机高速隐蔽接敌到其武器作用距离范围时,有人机开启雷达对目标进行探测,将目标信息通过协同网络实时传输给无人机,并启动无人机武器发射指令,然后对飞行中的武器制导,实现对敌空中目标的攻击。

分布式多任务协同攻击如图3所示,有人机指挥多架无人机编队执行对地攻击作战任务,实现分布式的协同攻击作战。每架无人作战飞机各自配置ESM、SAR、光电/红外等不同的传感

器,以及不同类型的对地攻击武器,以降低单架无人作战飞机的成本。各无人机分工合作、密切协同,在有人机指挥控制下作为整体执行目标探测、识别、攻击、评估等多种任务。

跨平台制导如图4所示,是无人机与有人机编队,有人机可以将无人机作为扩展的武器舱,控制其武器的发射。在导弹打击过程中,若被攻击地面目标移动位置或实施电子干扰,导致导弹初始目标数据出现误差,那么由于有人机处于敌方地空导弹威胁之外,则可接管对导弹的控制并进行中段制导,提供不断的目标更新数据,以提高打击效能。

防区外攻击如图5所示,无人作战飞机与有人作战飞机编队。有人作战飞机处于敌防区外安全位置,无人作战飞机突前到防区内,直接获取敌方目标位置信息或接收来自地面单兵的侦察信息,并将其传送到有人作战飞机,有人作战飞机发射超视距精确制导空地武器(发射后不管)。如果目标移动或变化,由处于防区内的无人作战飞机通过实时更新的目标位置数据对飞行的空地

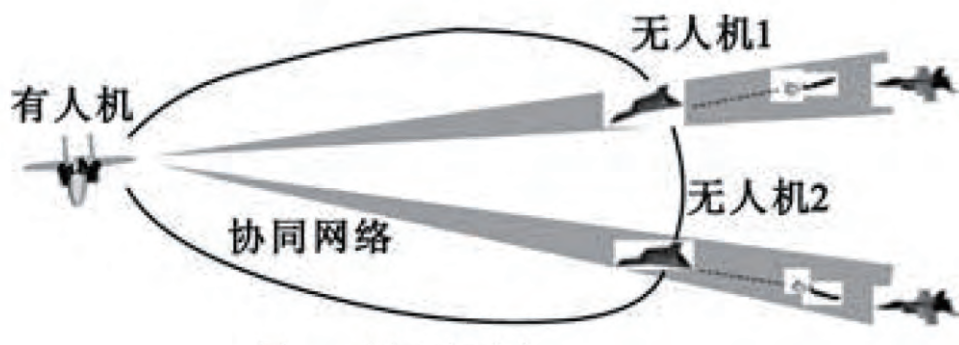
导弹进行制导。

协同防御

有人/无人机协同防御的最大优势在于提高了威胁告警能力。多机编队进行机载告警设备组网,对来袭导弹等威胁目标协同告警,以增强对威胁目标来袭方向、威胁程度的告警准确性。传统的单平台装备的干扰设备数量、功能有限,难以同时在时域、频域、空域,以及信号波形等方面对敌威胁、雷达进行持续稳定的有效干扰。而有人/无人机协同多机编队进行机载有源和无源电子干扰设备组网,可以实现协同防御,如图6所示。在实施有源电子干扰时,编队各成员之间可进行干扰区域、干扰目标、干扰时机、干扰样式、干扰参数、干扰功率等协同。在实施无源电子干扰时,编队各成员之间进行干扰物类型、干扰物投放时机、干扰物投放数量、干扰物投放时间间隔等协同。

有人/无人机协同作战关键技术

图 2 对空目标攻击



根据国外研究情况,目前针对有人/无人机协同作战的研究划分为两个方面:一是有人/无人机协同作战概念的研究和试验验证;二是有人/无人机协同作战关键技术的研究,尤其是有人机对无人作战飞机指挥控制系统技术的开发。这二者之中,前者的研究关系到有人/无人机协同作战这一新兴作战模式的作战运用,同时对后者关键技术的研究具有牵引性的作用。

通过对有人/无人机协同作战概念的分析理解,不难看出,有人/无人机协同作战的过程实质上是有人机对无人机的指挥控制过程。换言之,无人机的参与作战主要依赖于有人机的指挥和控制,而并非传统的地面控制站。这也就对有人作战飞机提出了更高的能力要求。从技术层面而言,为了实现有人/无人机协同作战,提高无人机的智能化水平无疑是十分重要而又十分艰巨的任务。相对而言,从有人机一侧着手不仅技术难度小,更容易取得突破,而且也符合最初采用有人/无人机混合搭配、优势互补的初衷。因而,国外研究部门目前及预计未来一段时期内也大

都把指挥控制系统技术作为最核心的关键技术开展技术攻关和演示验证。

有人/无人机协同作战的关键技术主要有:

有人/无人机的交互控制技术

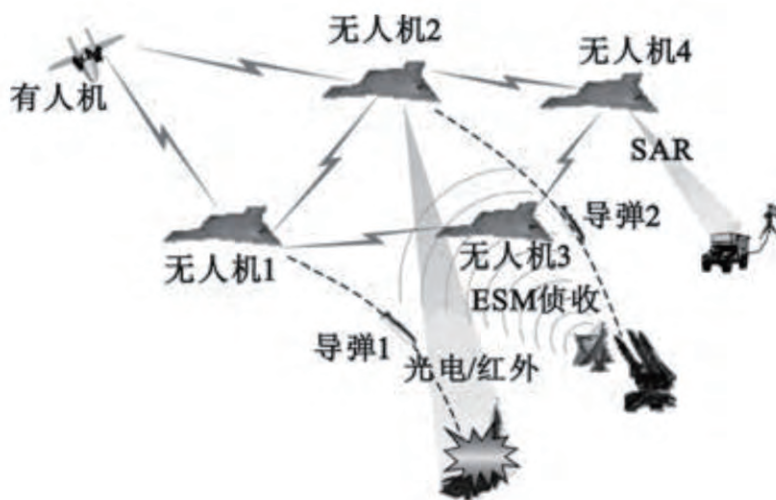
有人机和无人机在执行任务过程中承担不同职责,通过相互之间的数据、信息交互,实现任务的协同。整个协同任务过程中,有人机操作人员不仅要接收来自地面的指挥控制信息、执行本机作战任务,还要根据战场情况指挥控制无人机,这大大增加了有人机操作人员的工作负担。设计简单有效的有人/无人机协同交互控制方式,将为任务的完成提供有力保障。这类交互可采用不同的手段来实现,比如语音、文本、图形等。然而,无论采用何种方式,都必须定义一套完整的指令集,以便于交互信息在无人机端的识别、理解、执行以及在机间数据链中的传输。协同任务指令集包含3个方面:有人机任务命令集、无人机指令集以及指令编码。指令集的设计应该满足完备、简约、规范的要求,以便为实现有人/无人机

之间方便快捷的交互奠定基础。

有人/无人机协同态势感知

有人/无人机协同态势感知是对时间与空间纵深内各元素的感知领悟,以及对它们的企图、即将发展的状态趋势的理解。协同态势感知通过以下步骤完成:利用各种传感器获取所有可以得到的信息,理解获得信息中对我态势有利的信息,估计态势可能发展的方向,假定它不受外力影响,评价外来因素对预测的影响。有人/无人机编队通过态势感知中获得的信息优势,利用战场的绝对知识从而采取正确的决策和行动。态势感知的方法有基于性能的方法、主观性方法以及问卷或询问式方法。在复杂的环境中,性能的方法缺乏敏感性和诊断价值,主观法没有意识到它们所获得的信息可能丢失从而缺乏精确性,而问卷方法由于某些未曾考虑事件的发生导致调查的有效性下降。科学家们提出了一种直接的基于态势感知全球评估技术的询问式方法,在询问中随机冻结仿真,询问的结果与冻结仿真的态势进行比较,比较结果使

图3 分布式多任务协同攻击



得态势感知的自我评价和观察评估技术更趋客观。

协同目标分配方法

协同目标分配指的是为了有人/无人机协同一致完成任务,考虑各种约束条件,对飞机分配攻击目标,确定打击目标的武器,进行武器配置和编队配置,确定目标的打击点/方向以及有人机与无人机协同的武器投放区域等。有人/无人机协同目标分配是组合优化问题,是一类NP难题,这类问题的求解主要有两种思路,一是精确搜索,如穷举法;另一种是启发式搜索,在搜索过程中加入一定启发因子,指导搜索向一个比较小的范围内进行,如模拟退火、禁忌搜索、神经网络和遗传算法等等。无论哪一种思路,巨大的计算代价始终是NP问题的一个难以克服的难点。目前,一些新的方法和理论也被用来解决此类目标分配问题,如Hopfield神经网络、满意决策理论、蚁群算法、拍卖理论、市场调配理论等,并且还显示出一定的有效性。

有人/无人机协同航路规划技术

有人/无人机协同航路规划是在有人/无人机协同目标分配方案的基础上规划出各飞机可行的、有效的协同航路。数学规划是一类多阶段决策过程的最优化方法。数学规划方法最近的应用是解决了ROSAT卫星的观测任务规划问题。在用数学规划计算三维最优路径时,把三维最优路径分解成水平方向和垂直方向分别进行计算,较好地解决了维数灾难问题。混合整数线性规划(MILP)法通过分解任务分配和路径规划问题,同时将飞行器动力模型在允许范围内线性化处理,构造一个整数线性规划模型来处理规划问题。 A^* 算法生成飞机的飞行航路,通过使包含危险和航路长度的代价函数最小,得到简单的二维航路。 D^* 优化算法在不断的知识学习中,应用图论技术持续地修正路径和有效地生成一条新的优化路径,可以实现实时动态路径重规划。Voronoi图表由于构造算法简练、几何意义明确而广泛应用于求解机器人和飞行器路径规划问

题。在人工智能方法求解任务规划问题中,除了启发式搜索法和专家系统法以外,还有神经网络法、模糊控制法、遗传算法等。

毁伤效能评估技术

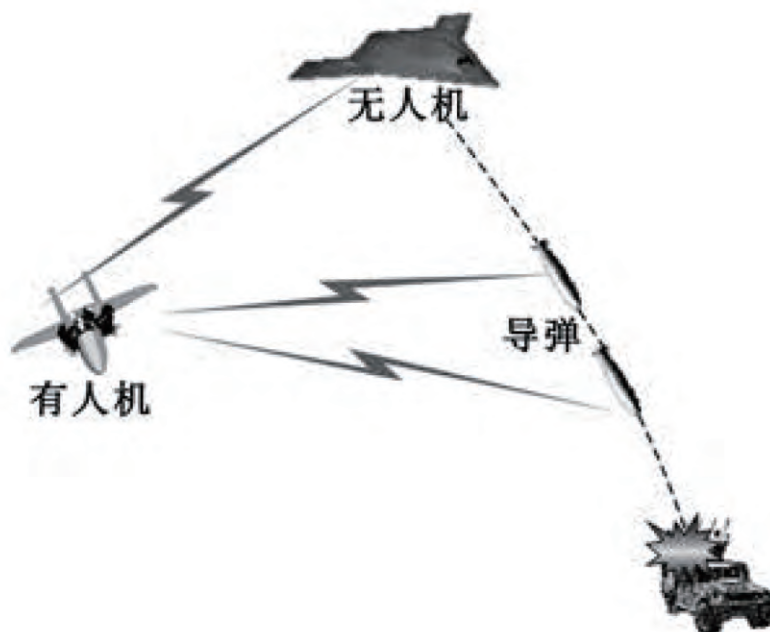
目标毁伤效果评估是指对目标实施攻击后,对目标的毁伤效果进行的综合评价。根据评估的结果,指挥员可以判断已实施的火力打击是否达到预期的毁伤效果,是否需要再次打击,对于节约武器资源和抓住战机有着重要的意义。

无人机在机载武器攻击目标的同时对战场进行监视,并利用电视摄像机或全景照相机对目标进行拍摄,对拍摄到的杀伤效果进行分析。由于无人机可能受到地面防空设施的攻击,所以有人驾驶飞机需要对总体攻击效果以及本方的损伤状况进行评估。

智能决策

战场环境的瞬息万变产生了大量

图4 跨平台制导



的信息，客观上需要飞行员根据战场信息的变化，及时、准确地制定和调整编队中无人机的作战方案，但是，在实际战场环境中，飞行员在心理上和生理上都很难胜任这样繁重的工作，因此需要一套高智能化水平的智能决策系统来辅助飞行员进行战术决策。

高带宽、高可靠数据链技术

数据链是一种按规定的消息格式和通信协议，在目标探测传感器系统、指挥控制系统与作战平台之间，实时处理、交换和分发格式化数字信息（包括语音、图像和数据等）的战术信息系统。其主要特点是具有标准化的报文格式和传输特性。

现代战场上，随着各种先进传感器的广泛应用，侦察平台所能获得的情报数据量急剧增加，与此同时，作战单元间信息共享和交流的需求也在不断增加，这就导致战场上有大量信息等待及时、准确地分发。但传统的信息分发系统由于效率相对较低且不同程度地存在着一定的封闭性，难以满足上述信息分发需求。为此，拥有先进军事技

术的美军于20世纪后期开始着力打造能够适应现代战争需求的宽带数据链系统，以提高侦察情报的利用效率。

迄今为止，美军发展的数据链系统主要有三大类：

第一类是以传输战场态势信息和作战指挥信息为主的“态势感知数据链”，即美军的TADIL（战术数字式信息链），北约称之为“4号链、11号链、16号链或者22号链”等。

第二类是“武器协同数据链”，是一种防空系统、反导系统、航空导弹（炸弹）等各类打击武器专用的数据链，其实时性要求很高。

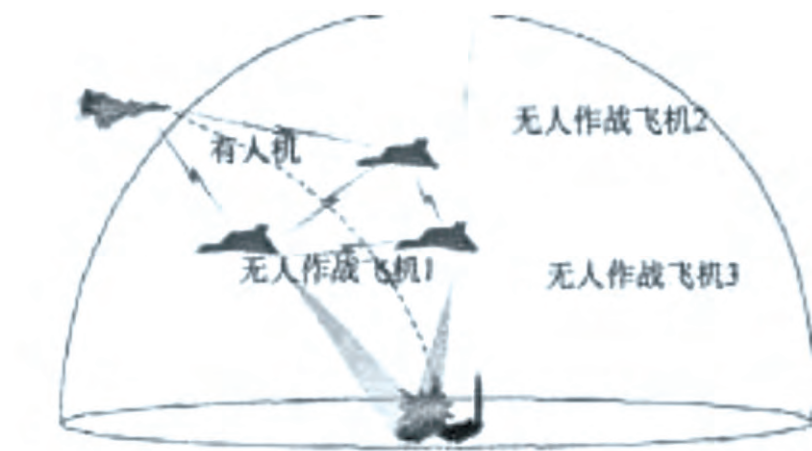
第三类是“情报侦察数据链”，美军称之为“情报、监视与侦察数据链”（ISR），用于将各种平台获取的目标数据（包括图像情报和信号情报数据）传送到情报接收系统或者情报处理系统。目前主要有两大类型，一种是海湾战

争以前研制成功并投入使用的专用型数据链，即SCDL监视与控制数据链；一种是海湾战争以后不断发展的全军通用型数据链，即CDL通用数据链。

与前两类数据链相比较，“情报侦察数据链”最突出的特点是传输数据量很大，传输速率高，一般都在2Mbps以上（前者一般只有几百kbps）。因此，美军通常将这种数据链称为“宽带情报侦察数据链”，并指出，“情报侦察数据链”是“未来陆、海、空、天作战空域交换情报侦察数据的关键设备”。

作为网络中心战体系结构中的重要支撑技术之一，宽带数据链在战场情报传输系统中占有非常重要的地位，已成为C⁴ISR（指挥、控制、通信、计算机、情报、监视和侦察）系统赖以存在和发挥效能的关键，但也是C⁴ISR系统中最易受到干扰破坏的薄弱环节。

图 5 防区外攻击



因此, 打造保密、抗干扰和抗摧毁的高可靠宽带数据链是各国努力追求的目标, 并且这也直接关系到未来无人机的协同作战能力。

高带宽数据链技术

一般的侦察无人机装有合成孔径雷达 (SAR)、机载测试雷达 (SLAR)、移动目标指示雷达 (MIT)、红外 (IR) 或光电传感器等各种雷达或视频传感器, 无人机获取的图像和视频的分辨率越来越高, 数据量自然也是越来越大, 要确保这些信息传输的实时性, 只有不断提高无人机数据链的传输速率。为进一步提高对无人机所获取情报进行分析的可靠性, 美国相关机构已经计划制定更清晰度的图像标准来替代美国国家地理情报局在 2005 年发布的标准 MISP/STANG4609 中所定义的高清图像标准, 即图像分辨率必须由原来的 1280×720 像素提高至 1920×1080 像素。要根据这一新标准提供实时彩色或热成像图像, 则要求无人机数据链必须提供 $3 \sim 6\text{Gbps}$ 的传输速率。这么高的传输速率, 除了对图像压缩技术要求更高以外, 也对数据链的传输带宽提出了更高的要求。

目前无人机数据链基带信号的调

制和编码方式为 BPSK 和 OQPSK 调制和卷积编码。为了提高传输带宽, 国内外都在研究 OFDM (正交频分复用) 技术和 UWB (超宽带) 技术在无人机数据链中的应用。

针对侦察射频数据吞吐的瓶颈问题, 美国空军和 DARPA 还投资开展了一项光学与射频综合数据链试验的研究项目, 用于空空和空地之间的情报数据传输, 其数据传输速率将比目前的纯微波数据传输系统提高几千倍。

高可靠数据链技术

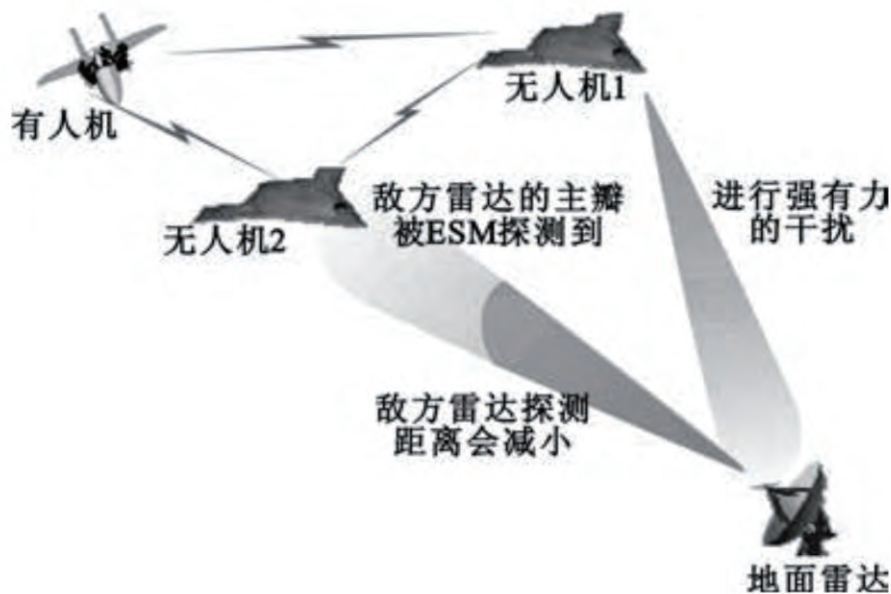
美国空军情报主管拉里·詹姆斯少将曾在《C⁴ISR 月刊》举办的论坛上表示, 在高冲突环境下保持对无人机的控制 and 数据链接是很困难的问题。的确, 随着战场电子技术的不断发展, 无人机数据链面临的电子对抗形势正日趋严峻, 其抗干扰和抗截获能力已显得尤为重要, 不仅要保护无人机收集到的数据和情报, 还要防止敌人通过数据链定位打击地面控制站, 甚至发出干扰信号篡夺无人机的控制权。因此, 保证无人机数据链的安全性是无人机数据

链发展的基本前提。

目前数据链抗干扰技术已从单一技术的抗干扰, 发展到多种技术相结合; 从单一物理层的抗干扰发展到包括网络层、应用层在内的多个层面结合优化的抗干扰; 从单一设备的抗干扰发展到系统级、网络级的综合抗干扰。所采用的抗干扰体制主要还是以扩展频谱 (直扩、跳频、跳时、混合扩频) 技术为主, 结合各种非扩展频谱技术, 包括信道编码、交织、分集 (时间、空间、频率、极化)、智能天线、自适应干扰对消、加密等。而这些抗干扰技术的应用也主要集中在数据率较低的情况下, 如具有较强抗干扰能力的 Link-16, 平均数据率仅为 256kbps , SCDL 的最大传输速率也仅有 1.9Mbps 。最高传输速率达 274Mbps 的 CDL 反向链路采用的抗干扰措施仅有简单的纠错编码技术。关于美军情报、监视与侦察数据链在高速情况下如何对抗强多径干扰的同时又能提升其抗敌方电磁干扰的能力, 这方面尚未见到相关报道, 但这却是宽带数据链不得不面对的严峻问题。

宽带数据链需要在复杂的物理环

图 6 协同干扰防御



境和恶劣的电磁环境下进行高速率、大容量信息传输，这样的应用需求对抗干扰体制提出了新的考验。抗干扰技术研究需要解决的两个关键问题是：频率选择性衰落引起的码间干扰问题（ISI）和敌方的电磁干扰问题。为有效地对抗敌方电磁干扰，目前主要的解决方案是扩展频谱技术，它具有低截获概率，抗干扰性强等优势，是目前抗干扰通信体制的主流技术，已经被广泛地应用到军事和民用通信系统中。而码间干扰问题，移动通信中传统的解决方案有两种：单载波加时域均衡（如第二代移动通信），但在宽带情况下，ISI 非常严重，对均衡器的要求非常高，抽头数量要足够多，训练序列足够长，训练时间也要足够长，均衡算法也变得非常复杂；直接序列扩频加 Rake 接收（如第三代移动通信），但宽带情况下，存在扩频增益和高速码流的矛盾，Rake 接收机的复杂度也受到限制，因为多径数量较多，同时也存在较大的能量

损失。

为解决频率选择性衰落所引起的码间干扰问题，目前民用宽带无线通信中有效的解决方案有两种：正交频分复用（OFDM）和单载波频域均衡（SC-FDE）。由于 802.11 和 HiperLAN/2 协议在 WLAN 中的广泛应用，OFDM 技术已相对成熟。SC-FDE 有效结合了 OFDM 和传统单载波传输技术的优势，同样具有潜在的多径对抗能力和高效频谱利用率，它和 OFDM 技术具有相同的基带信号处理实现复杂度，却克服了 OFDM 峰均比高和子载波间干扰的问题，近两年已开始成为新的研究热点。

美军在无人机数据链规划层面上历来非常重视安全性问题，早在 2003 年，美国国防财政部就提出投资约 1.5 亿美元用于无人机数据链的抗干扰和保密技术研究。除此之外，美国国防部还在大力推广工作在 Ku 波段的无人机数据链，虽然此数据链受物理特性

的限制存在一些局限性，但由于可以提供更高的安全性，仍受到美军的青睐。当然，无人机数据链的安全与性能的权衡也很重要，为此，美军还在利用新型、高效的调制解调技术、纠错编码技术、高速跳频和宽带扩频及相关技术，以研制电磁兼容性好、截获概率低、抗干扰能力强的高性能无人机数据链。

结语

有人 / 无人机协同作战是未来战争的一个重要发展趋势，它充分利用有人机和无人机各自的优势，分工协作，以发挥最大的作战效能，是无人机参与作战的一种新颖而实用的作战模式。随着各国对该领域研究的不断深入，也许在不久的将来，有人 / 无人机协同作战将会作为一种主要的作战样式呈现在实战之中。 