

无人机辅助的物联网通信技术及其应用

刘亚林, 戴弘宁, 王曲北剑

(澳门科技大学资讯科技学院, 澳门 999078)

摘要: 物联网旨在为“物”节点提供广覆盖和海量的连接服务, 其收集的“物”数据可以为应用层的智能决策提供支持。然而, 由于“物”的接入点以固定方式部署, 物联网的网络拓扑结构缺乏灵活性, 从而难以对移动性较高的“物”节点或者区域实现动态覆盖。此外, 现有的物联网通信技术存在远程覆盖盲区, 使得海量“物”节点无法在一些地理环境复杂的地方“联网”。而无人机具有高机动性、低成本和可灵活部署的特点, 适合用来解决上述“物”节点接入问题。因此, 研究了无人机辅助物联网的通信技术, 帮助物联网扩展现有的网络覆盖范围, 增强物联网拓扑结构的灵活性, 并提供更加多样化的物联网服务。

关键词: 物联网; 无人机; 低功率广域网; 多无人机自组织网络; 无人机通信网络

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2019.00131

Unmanned aerial vehicle enabled communication technologies and applications for Internet of things

LIU Yalin, DAI Hongning, WANG Qubeijian

Faculty of Information Technology, Macau University of Science and Technology, MacauSAR 999078, China

Abstract: The Internet of things (IoT) is designed to provide the wide coverage and the massive connectivity service for “things” node, and the collected “things” data can provide support for the intelligent decision-making at the application layer. However, due to the fixed deployment of the access point of the “things” node, the topology of the IoT network is not flexible, consequently making it difficult to dynamically cover the IoT node or regions with high mobility. In addition, the current IoT communication technology suffers from the remote blind area, which makes it impossible for a large number of “things” node to connect to establish the “network” in some geologically-complexed regions. UAV has high mobility, low cost and flexible deployment, which is suitable to solve the above issues. Studying the communication technology of UAV assisted IoT, help the IoT to extend the existing network coverage, enhance the flexibility of the IoT topology and provide more diverse IoT service.

Key words: Internet of things, unmanned aerial vehicle, low power wide area network, multi-UAV Ad Hoc network, UAV communication network

1 引言

当前的物联网应用主要使用两种通信技术, 包括适用于短距离覆盖的近距无线通信 (SRWC, short range wireless communications) 技术和适用于长距离覆盖的低功率广域网 (LPWAN, low power wide area

networks) 技术^[1-3], 这两种通信技术决定了物联网的覆盖范围主要取决于网络接入节点 (AP, access point) 的位置、部署数量和范围。具体而言, 物联网接入点的部署数量取决于不同通信技术在实际应用场景中的部署设计, 如 SRWC 的接入点只需部署到有信息采集需求的“物”所在的地方即可。而

收稿日期: 2019-09-25; 修回日期: 2019-11-16

基金项目: 澳门科学技术发展基金资助项目 (No.0026/2018/A1)

Foundation Item: Macao Science and Technology Development Fund (No.0026/2018/A1)

LPWAN 的接入点(即物联网网关)则需要尽可能地进行大量部署,使其覆盖整个物联网的使用区域。

然而,当前物联网接入点的位置固定且其部署范围有限,这导致物联网的发展面临两个挑战。1) 物联网的部署区域限制性。部分地理环境复杂且偏远的地区因为网络部署成本高而难以实现“物”的“联网”,如原始森林、自然生态保护区、冰川和偏僻的海岛等。2) 网络拓扑结构缺乏灵活性。现有物联网接入点的部署一方面难以满足移动性的接入需求,另一方面也难以实现动态按需覆盖的要求。

无人机因其本身具有高机动性、低成本以及可灵活部署的特点,适合用于解决物联网网络部署所面临的挑战。本文旨在研究无人机用于辅助物联网的通信技术,以帮助物联网扩展现有的网络覆盖范围,并增强物联网拓扑结构的灵活性。

2 物联网

2.1 物联网的通信技术

物联网是为实现海量“物”数据收集并联网处理的网络通信技术,海量“物”节点的联网能进一步促进“万物互联”的实现。因而,带着“万物互联”的愿景,期望能打造一个连接“一切”的网络(即“物联网”),从而为人们的生产和生活带来极大便利。目前,物联网技术的实现主要基于其期望效益和实现成本之间的权衡。1) 效益方面:物联网期望实现广覆盖和大连接,这需要大范围网络设施的部署以及连接海量“物”节点的网络接入技术;2) 成本方面:物联网期望实现低成本以满足长期持续性运营,这使得各网络节点数量和通信软/硬件成本都受到限制。

当前,物联网应用的主流通信技术包括两种,即SRWC 技术和 LPWAN 技术,物联网通信技术如图 1 所示。SRWC 技术部署成本低,但是通信距离短且传输数据量少,适合用于“物”节点的身份验证或命令控制,在实际场景中多应用于工业物流的供应链管理上;LPWAN 技术的部署成本高,但是通信距离长并且传输数据量远大于 SRWC 技术,可用于“物”节点的长距离数据上传和下载,能达到数据联网的目的。

SRWC 技术是一种低功率短程通信技术,在物联网诞生初期被长期使用。由于其低廉的部署成本以及超低的通信功率,一直被用来支持移动型终端的接触式通信,如环境反向散射(ambient backscatter)、近场通信(NFC, near field communications)、射频识别(RFID, radio frequency

identification) 和低功率蓝牙(BLE, bluetooth low energy)。虽然 SRWC 技术的通信成本低,但是无法组成广域的通信网络。因此,大部分基于 SRWC 的物联网应用需要利用传统的长距离网络进行信息集中处理,如移动蜂窝网络。但是“SRWC 技术+蜂窝网络”的数据联网模式不能应对大规模扩展的终端接入需求,因为这将极大地占用网络资源,增加物联网应用的通信成本。

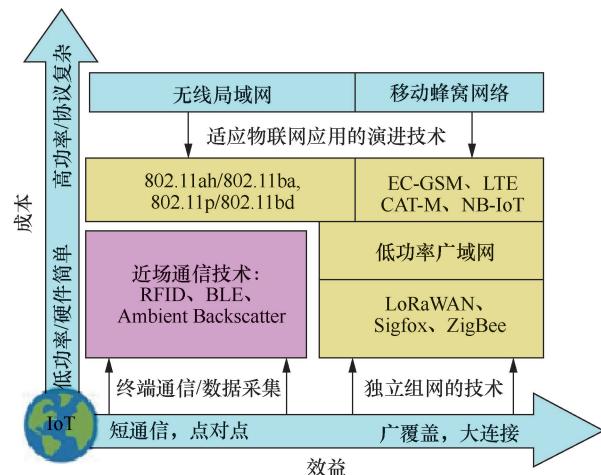


图 1 物联网通信技术

LPWAN 技术是当前提出的主要物联网通信技术,代表一系列能满足广覆盖效益和低功率成本的网络技术。这些技术包括:1) 基于现有移动蜂窝网络设备的窄带物联网(NB-IoT)和LTE-M 技术;2) 基于无线局域网的 IEEE 802.11ah 和 IEEE 802.11p 协议;3) 基于独立组网和未授权频段的长距离广域网(LoRaWAN)技术和 Sigfox 技术等。这些技术通过部署新的网络节点(如 LoRaWAN 技术重新部署的网关)或者通过已有网络设施(如 NB-IoT 借用现有的蜂窝网络设施)来实现广域覆盖以及长距离传输。另外,这些技术在无线通信协议层和终端物理层上都进行了针对物联网场景的设计,如简化的无线协议和低功率通信的物联网芯片。

目前,基于上述两种通信技术的物联网应用已经逐渐部署到人们的生产和生活中。如通过 RFID 标签共享大型仓库中单个物品的确切位置,帮助物流和供应链等行业节省搜索时间并降低人工成本;通过低成本可支持大量网络节点的 ZigBee 技术来感知大量部署的智慧家庭传感设备。

2.2 物联网的覆盖挑战

物联网在覆盖上存在接入点部署位置固定且范

围有限的问题，造成两个覆盖挑战，即网络拓扑结构不灵活和存在远程覆盖盲区，物联网的覆盖挑战如图2所示。

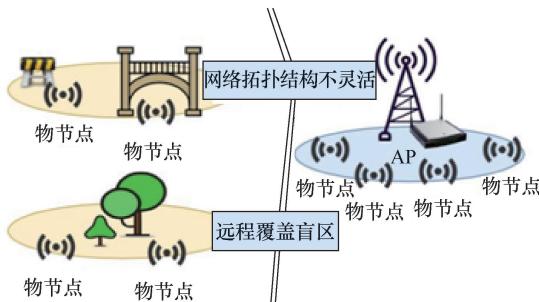


图2 物联网的覆盖挑战

首先，物联网的发展面临网络拓扑结构不灵活的挑战。现有的物联网应用场景为了节省成本，通常将网络设施节点部署在易于部署和管理的固定位置上且数量有限。在这种固定拓扑的网络部署方式下，一些区域因为建筑环境复杂或者受到意外破坏，其覆盖性能将大幅度降低甚至成为覆盖盲点，如施工工地、火灾/地震现场、大型集会现场和窄小的巷子等。因而，需要增加上述区域的网络弹性，使其网络节点能灵活补充和变化位置，从而提高其覆盖性能。进一步地，这种网络覆盖的增加可以为移动性需求较高的物联网应用提供通信支持，如罪犯追踪和应急通信等。

另外，当前的物联网存在远程覆盖盲区的问题。物联网的覆盖范围基于大量通信网络节点的部署范围，如蜂窝网络基站或者独立配置网关等。由于网络构建成本和带来的效益之间的有效平衡，物联网的网络节点一般能部署在城区和某些郊外的工业园区。而对于部分偏僻且地理环境复杂的区域（即远程覆盖盲区），如沙漠、海洋、牧场和山区，则因无法带来相应的效益而缺乏通信设施的建设。但在这些缺少通信设施的远程覆盖盲区里，仍期望能实现环境质量检测、林场生态研究和自然灾害监测等需要数据传感和联网分析的应用。

面对上述两个物联网的覆盖挑战，需要设计一个弹性扩展物联网覆盖性能的解决方案。此方案需要能低成本地实现物联网远程接入盲区的信号覆盖，并且可以灵活地为物联网提供移动接入，从而增强物联网的拓扑弹性。高移动性的无人机结合灵活的通信网络技术可帮助完成此解决方案。

3 无人机

无人机最早用于军事领域，指可控制、可携带多种任务设备的无人驾驶航空器^[4-6]。为了能长时间执行多种无人军事任务（侦查、诱惑敌方以及目标打击等），军事上的无人机通常载荷较大，因而设计为固定翼的大体量外形。近年来，载荷小、续航时间偏短的小型民用无人机逐渐走进了人们的视野。如搭载摄影机的小型旋转翼无人机，相对于大型固定翼无人机拥有更灵活的机动性，可以帮助航拍爱好者进行小区域内可控的空中摄影。另外，经过专门的机载任务设计，各种不同功能的无人机也逐渐被应用于商业领域，如空中快递、紧急医疗投送和空中基站等。固定翼与旋转翼无人机如图3所示，给出了两种无人机技术的对比。无人机能得到如此多样的应用，主要基于其可控的机动性，如通过地面监控站远程控制飞行路线，或者通过机载的智能算法控制其躲避障碍物等。

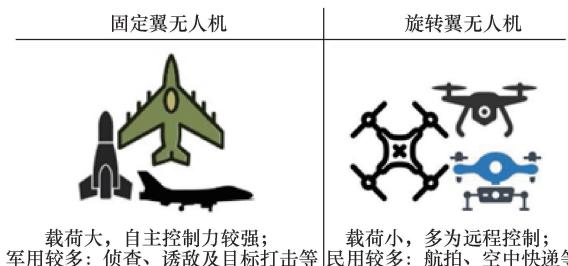


图3 固定翼与旋转翼无人机

无人机控制系统（UAS, unmanned aerial system）是为无人机应用提供飞行控制服务的系统。常见的无人机控制服务包括飞行姿势调整、自动定位/跟踪及视频监控等。典型的无人机系统由3个部分组成：无人机、地面控制站及两者之间的通信链路，无人机控制系统如图4所示。

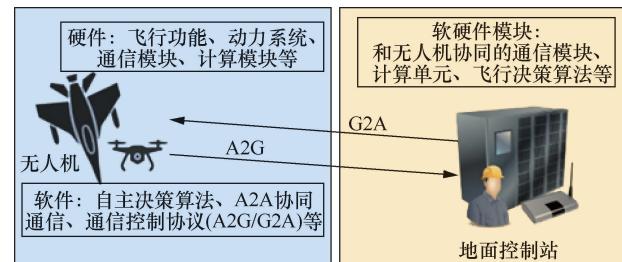


图4 无人机控制系统

大型无人机的飞行距离一般较远，远超过地面控制链路的无线通信范围，因而，大型无人机的飞

行控制系统主要依赖于其预先搭载的自主控制系统。在实际场景中,因为无线通信距离有限,并且大型无人机的自主起飞/降落是个复杂的控制过程,所以,在大部分大型无人机飞行任务中,都是通过地面控制方式遥控无人机的起飞和降落过程,当无人机到达巡航高度后才让无人机切换成自动驾驶模式,再完成相应任务。小型无人机的应用主要依赖其超强的机动性,但其小体量无法搭载自主控制系统,因而,一般飞行范围受无线通信范围限制。所以,小型无人机的控制系统更多地依赖于地面控制和通信链路。

针对实际需求和应用,无人机控制系统通常需要系统地对如下3个部分分别进行设计,以实现稳定飞行,从而完成具体的飞行任务。

对于无人机,需要完成软、硬件两个方面的设计。1) 硬件方面,需要针对具体的应用为无人机选取合适的飞行动力硬件、任务配置硬件等。针对任务载荷较大、续航时间较长的无人机应用,如空对海的图像遥测或者空对地(A2G, air-to-ground)的森林防火救援应用,需要选取体量较大、动力系统较强甚至需要选取可稳定飞行的固定翼无人机。针对任务载荷量小、灵活度要求较高的无人机应用,如城市罪犯追踪、事故现场的即时采样,则可选取小体量、续航时间较短但机动性极高的旋转翼无人机。针对不同的应用,需要为无人机装载专门的任务载荷硬件,包括计算能力、摄像头、信号处理单元和防窃听设备等,具体将根据实际任务进行设计。2) 软件方面,需要针对机载自主决策和远程通信控制两个方向开发专门的算法和通信协议,同时搭配合适的计算存储单元和通信收/发模块。针对远程的脱机任务,如空中运输、人工降雨和地质勘测等,需要为无人机搭载自适应控制算法以应对复杂的地质和气象环境,使其能够做到自主机动性变换,如防撞击、躲避障碍物和姿势调整等。此外,针对无人机用于远程数据传输及无线控制的应用,如空中基站、空中数据采集回传等任务,需要为无人机配备合适的无线收/发器及通信协议,甚至需要搭载协同特定协议的通信模块,配备合适的数据处理和存储单元。

地面控制站是远程控制无人机飞行以及调度无人机任务的信息数据处理中心,因此,地面控制站需要设计如下功能,包括和无人机协同的通信软/硬件模块、足够大的计算存储单元、针对无人机飞行任务的集中式智能决策算法及远程安全检测和

召回机制等。

无人机和地面控制站之间的通信链路的设计,决定了无人机控制系统的通信性能。具体而言,链路设计包括A2G和地对空(G2A, ground-to-air)两部分,分别对应无人机到控制站的下行链路信息和控制站到无人机的上行链路控制命令的传输。具体设计取决于通信要求以及应用场景中的无线信道状态。如利用无人机来进行空中实时监控的应用,需要达到超高数据传输速率和尽可能短的时延,这需要使用较大传输速率的通信协议或者通信网络,如5G及5G下一代通信网络(5G beyond)。此外,远程遥感监测的高空无人机传输距离太长且不需要实时回传,因而,可以使用卫星通信或者自主回航后下载遥测数据。

除了无人机和地面控制站之间的链路,多无人机执行协同任务时可能会通过空对空(A2A, air-to-air)链路进行通信。A2A通信链路通常为直线传播链路,可以通过多个无人机的移动性来建模。因而,针对A2A链路的研究工作会涉及多个无人机的协同设计,包括路由协议和协同路径规划。路由协议和路径规划的特定设计目标通常在覆盖区域和飞行/通信时延之间进行权衡。所以,A2A通信链路的设计将完全由多无人机协同的通信协议决定,这需要无人机本身装载自组织通信相关的收/发模块和路由协议。

4 无人机辅助物联网的通信

利用无人机可控的机动性,并结合现有的物联网通信技术,将能够解决物联网覆盖范围受限的问题,从而实现更灵活且多样化的物联网应用^[4,7-10]。无人机辅助进行物联网任务时,可以通过物联网通信网络进行数据重传或者接收云端控制命令,不仅极大地扩展物联网的覆盖范围,也能提升无人机应用的智能性。本节介绍无人机辅助物联网的通信,将通过两种网络实现:1) 无人机辅助的边缘物联网,是指无人机和地面物联网节点之间的网络,其通信性能由A2G/G2A链路决定;2) 多无人机协同的物联网,是指多无人机进行协同物联网任务的网络,其通信性能由A2A链路决定。在实际应用中,无人机物联网解决方案一般根据具体情况混合使用这两种网络。

4.1 无人机辅助的边缘物联网

无人机可以用作现有物联网的边缘节点,以增

加现有物联网的拓扑弹性。无人机辅助的边缘物联网如图 5 所示, 其网络拓扑包括 3 个部分: 无人机、与无人机相连接的地面节点和两者之间的通信链路 (A2G/G2A 链路), 上节提到的远程无人机控制系统就组成了一个无人机边缘通信网络。在此网络中, 无人机可作为中继或者基站节点, 它是地面网络设施的拓展和补充, 与辅助的地面通信网络具有相同的通信结构和协议。

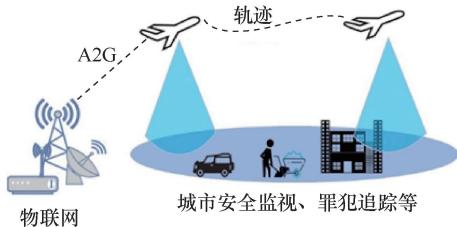


图 5 无人机辅助的边缘物联网

无人机辅助的边缘物联网可实现实时的无人机数据上传和地面网络控制命令下载, 其覆盖范围仅限于现有网络设施的周边区域, 因而可以为现有物联网提供灵活的覆盖和实时的通信, 如可将无人机用于空中监视、控制干扰器和边缘计算节点等, 因此, 通过无人机辅助物联网构建灵活立体的网络拓扑, 从而增加网络弹性。

无人机作为物联网边缘节点的网络架构可适用于具有网络覆盖但覆盖性较弱或者不能灵活覆盖的区域, 如建筑工地、城市灾区、高速公路以及城区建筑遮蔽的狭窄巷子和闹市。这些区域或多或少受到建筑障碍物的遮蔽或者受到无线链路灵活性的限制, 从而缺少物联网的应用服务。而无人机可以帮助现有网络提供灵活的边缘接入网络, 如无人机可以作为按需中继节点、基站或网关连接物联网节点。另外, 可控机动性的优势让无人机可以支持物联网边缘通信的自我维护。如当边缘侧的物联网节点因不稳定因素而破坏或丢失时, 无人机可以用作节点投掷器并将物联网节点放置在合适的区域。同时, 无人机还可以作为灵活的数据采集器, 补偿丢失的物联网边缘通信。

4.2 多无人机协同的物联网

多无人机协同的物联网, 通常是由多个无人机以自组织网络结构的形式完成一定范围的协作物联网通信任务, 多无人机协作的物联网通信如图 6 所示。多无人机自组织网络可以实现协同通信, 可以完成大规模“物”传感器部署区域中的数据采集

或者遥测任务, 具体应用包括灾难管理和森林监测等。对于在偏远地区执行任务的自主无人机, 地面控制器的功能可以集成在机载中, 因此, 自主无人机本身变为无人机控制系统。当无人机飞向偏远地区时, 由多个无人机组成的自组织网络是一个孤立的系统。同时, 无人机在沿着设计路径飞回地面控制中心时, 连接到地面网络。

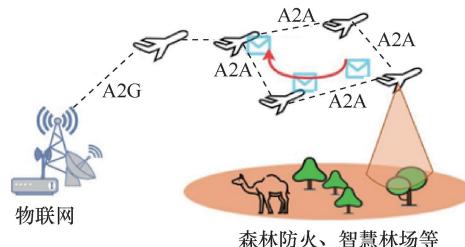


图 6 多无人机协作的物联网通信

对于多无人机协同的物联网方案, 无人机可以为每个特定的应用区域建立一个协同自组织网络, 此网络主要用于满足该区域灵活性的通信需求, 如智慧交通场景下多无人机对某段城市公路进行应急交通指挥。另外, 应用区域的多无人机协同网络需要涉及物联网应用控制中心的数据上传链路。对于实时性物联网应用, 数据上传可以通过就近的网络设施接入实现; 对于时延容忍型的物联网应用, 多无人机的数据上传只能通过长时延的远距离通信方式, 如卫星通信或者先进行无人机召回再提取数据。

多无人机自组织协同通信具有灵活的网络拓扑, 因而, 其研究点主要是动态路由协议的设计。具体路由设计可以考虑多种路由度量, 如多路径功能、负载均衡、无环路能力、动态顽健性和能效等。对于多无人机协同的物联网来说, 不仅要使用灵活的网络拓扑, 还需要考虑其网络覆盖性能和与地面“物”节点通信的功能。因此, 多无人机协同物联网的研究需要满足一定 A2G 通信覆盖和链路条件下的多无人机协同路径规划。然而, 对于多无人机协同覆盖的实现, 更多依赖于多无人机组织网络中的 A2A 链路。所以, 多无人机协同物联网的关键是设计能在移动性条件下完成协同覆盖需求的 A2A 通信协议。

5 应用

无人机辅助物联网通信可以为物联网带来网络结构灵活、覆盖全面且高效的应用, 如安全监控、

军事侦察、科学研究、罪犯追踪、地震风险评估、交通检测、施工管理和水利测绘等。结合最新的研究成果,本节介绍4个典型无人机辅助物联网的应用:空中监视系统、通信安全保护、水下数据采集、空中供能和数据采集。

5.1 空中监视系统

无人机配置监控摄像机并结合物联网通信技术后将能帮助开发一种高效、智能的空中监视系统,无人机辅助的空中监视应用如图7所示,这个空中监视系统将极大地提高其在军事和民用领域的监视服务质量^[11-12]。无人机曾经常被用来在复杂的战场执行许多军事任务,尤其当无人机作为空中“侦探”时,可在战场上探测敌方部队的行动,并监视作战情况。此外,无人机还可以定期侦察可疑区域,如边境监视。军事领域应用的无人机监视也在现有的学术工作中被广泛研究。显然,无人机作为灵活的空中监视设备可节省大量固定监控设备的运营成本。同时,无人机在避免暴露和严格执行轨迹设计任务方面极其高效,特别是在难以到达的地区(如山区、冰雪道路、沙漠等)执行任务的可靠性提升显著。由于可扩展的覆盖范围和智能计算资源,物联网可以很好地支持无线连接以及智能反侦测,进一步实现无人机军事任务的可靠远程控制。

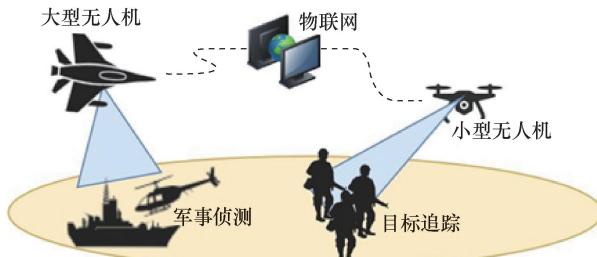


图7 无人机辅助的空中监视应用

在过去的几十年里,将无人机进行商用的空中摄影的应用越来越多,这类应用主要依赖于其地面控制器的远程控制系统以及无人机自身装载的自动飞行控制系统。通过一个小型的地面控制器和无线通信技术,可以实现对无人机进行视野范围的调整、摄影目标的锁定和飞行路线的规划等,然而,由于其空地两端设备的计算和存储资源有限,因此这个小型的空地两端控制系统的智能性是有限的。若将无人机监视系统进行联网,可以利用网络云端或者地面边缘端的设备提供极大的计算存储容量,从而可执行人工智能(AI, artificial intelligence)算

法进行照片和视频的分析和判别,进而实现智能的空中监视系统。该智能空中监视系统需要设计一种用于连接无人机到互联网AI解析中心的安全无线传输协议,这种连接使互联网能够高效监控无人机的记录,并因此做出更智能的决策。

5.2 通信安全保护

无人机可在空中为现有通信提供灵活、可调节位置和协议的保护机制。物联网的边缘通信通常采用简化的访问协议来降低成本,但是这些简化的访问协议容易被恶意攻击者破解。如利用机器学习的方法,通过学习大量加密信息从而提取加密信息。由于上述原因,信息泄露已成为物联网中极大的安全隐患之一。无人机可以形成一个专用的边缘网络来提供物理安全性,如使用无人机作为干扰器来干扰窃听通信,或者通过在无人机中配置专用协议来提供增强的加密安全性。

无人机辅助的友好干扰方案是一个可行的物联网保护方案,可以在保证数据传输安全的前提下降低由加密产生的巨大计算成本^[13]。无人机可作为友好干扰器,通过固定在其身上的定向天线发射人工噪声,从而干扰窃听者接收机密信息。无人机友好干扰方案的应用场景如图8所示。在工厂中,物联网节点采集各种工业数据,并通过网关或者接入点以无线传输的方式接收这些数据。虽然窃听者无法获得进入工厂的权限,但其仍然可以在工厂周围接收工厂内的机密信息。因此,可以部署一些无人机干扰器围绕工厂边缘飞行,同时,发射人工噪声干扰窃听活动从而达到保护工厂内安全通信的目的。其中,无人机干扰器以一定高度围绕保护区域飞行并且向下发射干扰信号,通过干扰信号形成干扰区域。



图8 无人机友好干扰方案的应用场景

5.3 水下数据采集

随着各种海事活动的发展,水下物联网引起人

们的巨大关注。典型的水下物联网应用包括海洋环境监测、水下生物监测、军事防御和水产管理等。水下物联网通常包含多个传感器节点和汇聚节点（用于数据收集）。水下传感器节点将感知数据传输到分布于水面的汇聚节点，然后，汇聚节点再将收集的数据传送到离岸设备。由于离岸设备计算与电力的限制，集中计算数据处理任务通常在远离物联网的远程数据处理中心完成。然而，建立和维护连接水下物联网和陆上数据中心的基础设施是不划算的，尤其是执行远程海洋任务。

无人机辅助数据采集方案作为新兴技术可以帮助陆上数据处理中心和水下物联网建立通信链路^[14]。无人机辅助的水下传感数据采集如图 9 所示，传感器节点分布于水下，而汇聚节点部署于水面。由于电磁信号在水中的巨大衰落，水下通信通常采用声信号进行传输，具体为图 9 中实线箭头。不同于水下通信，无人机与汇聚节点之间属于空中通信，通常采用电磁信号进行传输，具体为图 9 中虚线箭头。

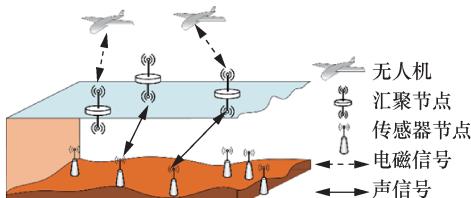


图 9 无人机辅助的水下传感数据采集

5.4 空中供能和数据采集

物联网的大量应用将产生海量“物”终端设备的数据采集和上传任务，对于地处偏僻且缺乏网络设施联系的“物”节点，通常会遇到电池容量受限的问题。当无数据传输需求时，这些物联网倾向于选择停止侦听信道以节省能量。无人机和无线供能（WET, wireless energy transferring）技术的结合可以解决上述物联网数据采集问题^[15]。无人机辅助的供能式数据采集如图 10 所示，无人机作为物联网数据采集器时，可以将无线电能量传输到“物”节点，使得该节点具有足够的能量用于将数据传输到无人机。许多物联网应用场景可以从无人机辅助的供能和数据采集中受益，如智慧林场和水质监测。

已有的研究工作中，很多无人机用于 WET 或数据采集的工作。这些工作主要以无人机的移动轨迹为设计目标，研究在特定区域内特定分布节点的

最大化供能或者最大化传输速率，只有少量的工作对于无人机供能和数据采集相结合进行研究。文献[15]采用能量波束形成技术设计可控的无线能量供应，以定向方式将无线电能量传输到物联网节点，从而提高能量收集效率。未来的空中供能技术期望大量应用在各个场景中，在此前提下，供能过程将会根据具体的通信耗能来决定最大化的使用效益。

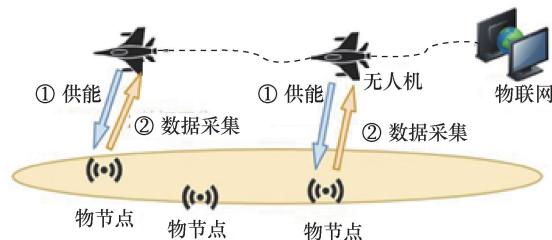


图 10 无人机辅助的供能式数据采集

6 结语

本文分析了无人机辅助物联网的通信技术及相关应用。主要关注物联网通信的灵活性和可拓展性。物联网发展的未来是实现万物互联，从而给信息产业带来科技性的颠覆。但这个未来需要一个随处可见的“物”节点的联网技术，无人机因为其可控的机动性，可以辅助现有物联网实现这种随处可见的“物”的连接。此外，无人机还可以作为灵活的数据采集器，补偿丢失的物联网边缘通信，进一步实现随处皆“物联”。

参考文献：

- [1] 王晓闻. 5G 无线移动通信技术下的物联网时代[J]. 通信电源技术, 2018, 35(11): 189-190.
WANG X W. The Internet of things age under 5G wireless mobile communication technology[J]. Telecommunication Power Technology, 2018, 35(11): 189-190.
- [2] NASKAR S, BASU P, SEN A K. A literature review of the emerging field of IoT using RFID and its applications in supply chain management[M]. Pennsylvania: IGI Global, 2020.
- [3] MEKKI K, BAJIC E, CHAXEL F, et al. Overview of cellular LPWAN technologies for IoT deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT[C]// 2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops. IEEE, 2018: 197-202.
- [4] GUPTA L, JAIN R, VASZKUN G. Survey of important issues in UAV communication networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 1123-1152.
- [5] 赵婷婷. 无人机地面站与航迹规划的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
ZHAO T T. Research on the unmanned aerial vehicle (UAV) ground

- control system and path planning[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [6] 狄春雷. 小型无人机飞行控制系统设计及其自适应方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- DI C L. Design of flight control system and research of adaptive control algorithm for small UAV[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [7] 贺子健, 艾元, 闫实, 等. 无人机通信网络的容量与覆盖性能[J]. 电信科学, 2017, 33(10): 65-70.
- HE Z J, AI Y, YAN S, et al. Performance evaluation of capacity and coverage in UAV communication networks[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(10): 65-70.
- [8] 刘鑫胜. 无人机网络的性能分析与优化研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- LIU X S. Research on performance analysis and optimization of UAV network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [9] 王巍, 赵继军, 彭力, 等. 基于 UAV 的移动物联网远距离通信节能策略研究[J]. 电子学报, 2018, 46(12): 2914-2922.
- WANG W, ZHAO J J, PENG L, et al. Research on the energy saving strategy for long distance communication of mobile Internet of things based on UAVs[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(12): 2914-2922.
- [10] 宋庆恒, 郑福春. 基于无人机的物联网无线通信的潜力与方法[J]. 物联网学报, 2019(1): 82-89.
- SONG Q H, ZHENG F C. Potential and methods of wireless communications for Internet of things based on UAV[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019(1): 82-89.
- [11] 赵亮, 胡张兵, 黄晶, 等. 基于无人机的物联网监测系统[J]. 物联网技术, 2018, 8(10): 12-14.
- ZHAO L, HU Z B, HUANG J, et al. Monitoring system of Internet of things based on UAV[J]. Internet of Things Technologies, 2018, 8(10): 12-14.
- [12] 杨鼎成, 刘伟东, 肖霖, 等. 基于无人机的区域环境监测物联网系统[J]. 现代电子技术, 2019, 42(1): 19-23.
- YANG D C, LIU W D, XIAO L, et al. UVA-based Internet of things system of regional environment monitoring[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(1): 19-23.
- [13] WANG Q, DAI H N, WANG H, et al. UAV-enabled friendly jamming scheme to secure industrial Internet of things[J]. Journal of Communications and Networks, 2019, 21(5): 481-490.
- [14] JOHANSEN T A, ZOLICH A, HANSEN T, et al. Unmanned aerial vehicle as communication relay for autonomous underwater vehicle: field tests[C]//2014 IEEE Globecom Workshops. IEEE, 2014.
- [15] LIU Y, DAI H N, PENG Y, et al. Poster: UAV-enabled data acquisition scheme with directional wireless energy transfer[C]//Proceedings of the 2019 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks. Junction Publishing, 2019: 220-221.

作者简介



刘亚林 (1996-), 女, 四川达州人, 澳门科技大学博士生, 主要研究方向为无线能量传输技术在无人机通信或物联网中的应用。



戴弘宁 (1977-), 男, 上海人, 澳门科技大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为工业物联网、大数据分析、区块链、移动智能和大规模无线网络。



王曲北剑 (1993-), 男, 宁夏石嘴山人, 澳门科技大学博士生, 主要研究方向为无人机辅助物联网的性能分析。