

软件定义物联网研究综述

陈 亮¹, 李 峰¹, 任保全¹, 杨建喜²

(1. 军事科学院系统工程研究院, 北京 100166; 2. 北京电子科技学院, 北京 100070)

摘 要: 概述了当前物联网发展过程中存在的主要问题, 研究了软件定义网络与物联网结合的可行性, 在总结分析相关软件定义物联网架构的基础上, 给出了 SDIoT (Software-Defined Internet of Things) 通用架构, 举例分析了软件定义车联网基本架构; 通过对现有研究成果的分析梳理, 从异构互连、资源管理、安全可靠 3 个方面阐述了面临的挑战及关键技术; 最后, 以车联网为例, 阐明了 SDIoT 的优势及前景, 展望了未来可能的研究方向。

关键词: 物联网; 软件定义网络; 异构互连; 资源管理

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)05-1019-14

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20200561

Software-Defined Internet of Things: A Survey

CHEN Liang¹, LI Feng¹, REN Bao-quan¹, YANG Jian-xi²

(1. Institute of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100166, China;

2. Beijing Electronic Science and Technology Institute, Beijing 100070, China)

Abstract: The main problems in the current development process of the Internet of Things are outlined, and the feasibility of the combination of software defined network and the Internet of Things is studied. After summarizing and analyzing the relevant software-defined Internet of Things architecture, the SDIoT general architecture is proposed and the basic architecture of Software-Defined Vehicular Networks is discussed. Through the analysis of the existing research results, the challenges and key technologies are elaborated from three aspects: heterogeneous interconnection, resource management, security and reliability. Finally, taking Vehicular Ad-hoc Network as an example, the advantages and prospects of SDIoT applications are clarified, and the possible research directions in the future is prospected.

Key words: internet of things; software defined network; heterogeneous interconnection; resource management

1 引言

物联网 (Internet of Things, IoT) 将人类生存的物理世界网络化、信息化, 实现了分离的物理世界和信息空间互连和整合, 已被广泛应用于工业控制、环境监测、仓储物流、国防军事等领域, 并逐渐成为全球科技战略发展的焦点之一。据全球著名调查统计数据门户网站 Statista 预测, 2025 年全球物联网连接设备将达到 754.4 亿^[1], 并带来近十万亿美元的市场产值规模。然而, 随着物联网规模的不断扩大, 接入设备数量和种类的逐渐增多, 海量数据传输与处理需求突显, 传统的物联网体系架构在异构互连、资源管理、业务处理等方面面临着极大的挑战^[2]。

软件定义网络 (Software Defined Network, SDN) 是近年来广受关注的一种新型网络架构。与传统网络不同, SDN 将控制平面和转发平面分离, 通过集中的控制

器进行管理, 无须依赖底层网络设备 (路由器、交换机、防火墙等), 从而屏蔽了来自底层网络设备的差异, 实现了网络的集中管理和可扩展, 并能够在控制层应用的配合下自动、快速、动态地配置和优化网络资源。鉴于 SDN 在网络管理、网络安全、网络虚拟化、流量工程等方面取得的成功应用, 国内外研究学者开始将软件定义的思想引入物联网中, 设计新型软件定义物联网 SDIoT 架构, 以屏蔽数量繁多的物联网网络协议, 简化物联网设备的配置和管理, 实现从感知接入到网络、从网络到应用的深度可控, 实现基础设施资源的虚拟化和面向多业务服务需求的动态重构。

2 软件定义物联网架构

目前, 研究人员针对 SDIoT 提出了一些具体的网络架构和研究方向, 如软件定义的数据中心网络^[3] (Data

Center Network, DCN)、蜂窝网^[4](Cellular Network, CN)、移动自组织网络^[5](Mobile Ad-Hoc Network, MANET)、无线传感网^[6](Wireless Sensor Networks, WSN)、物联网关^[7]、物联网安全^[8]等。从应用领域来看,有软件定义配电物联网^[9]、软件定义车联网^[10]、软件定义智慧楼宇^[11]等。这些研究表明,SDN能够简化物联网网络管理,有利于实现异构网络互连、资源动态管控和安全可靠的业务应用。

控制平面设计是 SDIoT 架构设计的关键。按照控制器部署方式的不同,SDIoT 架构可以分为集中式控制器部署、分布式控制器部署和混合式控制器部署。其中,集中式控制器控制性能较好,但容易引发单点故障问题;分布式控制器容错性能较高,但面临着控制器之间的同步问题;混合式控制器具备上述两种部署方式的优点,但通信代价较大。

在集中式控制器部署方式中,Sahrish 等人^[12]提出了一种基于 SDN 的集中式 IoT 通用架构,该架构由末端感知网、SDN 网关、核心网和 SDN 控制器构成,各类感知设备采集数据后,通过 SDN 网关传输至应用层,SDN 网关支持 OpenFlow 和 SensorFlow 协议,实现了不同异

构网络的互联互通。Zeng 等人^[13]则在传感网中,提出了一种支持传感应用动态重编程的 SDSN 架构,实现了传感节点的低功耗控制。

在分布式控制器部署方式中,Ola 等人^[14]提出了一种基于 SD-MEC 的物联网分域架构,该架构由设备层、网络层、控制层和应用层组成,每个物联网域包括一个 SDN + NFV 网关,提供协议识别、接入控制、边缘计算和服务质量保证;TinySDN^[15]则是一个基于 TinyOS 的分布式多控制器框架,由支持 SDN 的传感节点和多个控制节点组成,支持带内流量控制,有效解决了传感网有限的能量供应等问题。

在混合式控制器部署方式中,Djamila 等人^[16]提出了一种包括控制模型、数据模型、云/雾计算模型、安全和隐私保护模型、终端用户模型等组成的通用体系架构,其中,控制模型由主控制器、次级控制器和本地控制器组成,从而支持复杂异构网络的细粒度管控。

表 1 总结分析了当前与 SDIoT 有关的解决方案、应用领域、控制器部署方式、主要特点及方案局限性。在此基础上,为便于 SDIoT 的设计与实现,从功能与流程角度提出了软件定义物联网通用架构,如图 1 所示。

表 1 软件定义物联网解决方案及对比*

方案	应用领域	控制器	主要特点	局限性
Sensor OpenFlow ^[6]	WSN	混合式	基于 OpenFlow 的协议识别,支持网络内数据包处理及多种类型寻址方式	能量利用效率不高,规则设置不够灵活
SD-WSN ^[17]	WSN	集中式	可编程的网络重配置,支持角色动态重定义	存在一定的硬件限制,可扩展性不强
SDN-WISE ^[18]	WSN	分布式	传感器节点可编程为有限状态机,减少了节点与 SDN 控制器之间的交换信息量	缺乏架构设计细节,缺乏安全可靠设计
SDSN ^[13]	WSN	集中式	采用 OTAP 和 FPGA 技术,针对不同传感任务,支持传感应用动态重编程	节点能耗较高
TinySDN ^[15]	WSN	分布式	基于 TinyOS 的支持多控制器框架,支持带内流量控制	控制节点与传感节点间路由效率不高
Soft-WSN ^[19]	WSN	集中式	设计了基于东西向管理的传感网络架构,支持设备管理和拓扑管理策略	消息传输在控制层与数据层之间进行,能量效用不高
SDCSN ^[20]	WSN	混合式	设计了基于分簇的传感网络架构,簇由简单节点、路由节点和簇头组成,簇头定义为控制器,简化了网络管理、拓扑变化适应能力	对传感节点要求较高,存在一定硬件条件限制
Yu 等人 ^[5]	MANET	集中式	设计了基于 SDN 的多跳 MANET,控制器采用开放网络操作系统,交换机采用 Open vSwitch 协议,网络管理灵活	控制器计算开销较大,网络延迟较高
Labraoui 等人 ^[21]	MANET	分布式	设计了基于 SDN 的机会式网络流量卸载机制,通过自主构建的机会式无线网状网络,实现了接入网流量的有效卸载	存在单点路径失效问题,缺乏路由快速重建机制
SoftRAN ^[22]	5G/LTE	分布式	设计了基于 SDN 的无线接入网架构,支持基站虚拟化和可编程	架构缺乏对无线网络资源管理与分配的细节考虑
SoftCell ^[23]	CN	分布式	重新定义了核心网网络架构,SDN 控制器负责获取网络拓扑及负载状态信息,支持不同类型业务的路由选择	缺乏对网络架构的明确定义和功能划分

续表

方案	应用领域	控制器	主要特点	局限性
C-RAN ^[4]	CN	分布式	设计了基带处理单元池,支持同一物理层网络上承载多张虚拟无线网络,控制层功能和数据转发部分解耦	控制与数据转发功能未完成解耦,网络延迟和回程链路开销较大
Han 等人 ^[24]	5G	分布式	简化多层网络架构,设计了基于小蜂窝协作异构网络的宏蜂窝用户分流策略	多控制器同步,网络开销较大
SDN-CASLUA ^[25]	LTE	混合式	设计了基于 SDN 的载波感知 LTE 非授权接入协议,通过网络参数监测,制定满足干扰和容量需求的频谱分配决策	从协议角度考虑了频谱资源分析,但对整个网络状态实时变化考虑不够
DMF ^[26]	CN	混合式	基于 SDN、NFV 和云计算协同设计了无人机蜂窝管理框架,系统管理了地面基站与无人机基站的共存	对如何提升用户 QoS 及资源分配细节考虑不够
Azizian 等人 ^[10]	DCN	混合式	设计了基于 SDN 和云计算的车辆嵌入式软件更新架构,减少了网络流量,提高了网络性能	软件更新策略细节考虑不够,网络资源利用率存在提升空间
B4 ^[3]	DCN	混合式	基于 SDN 的数据中心互联网络,通过任务分离和带宽计算,支持全局流量优化和超高网络链路利用率	网络发生故障时边缘网络链路最大利用率和最小利用率上升较大,存在优化负载均衡策略的空间

* 由于物联网应用层主要以有线网为主,SDN 技术在有线网已得到了广泛应用,故不作为本文主要研究内容

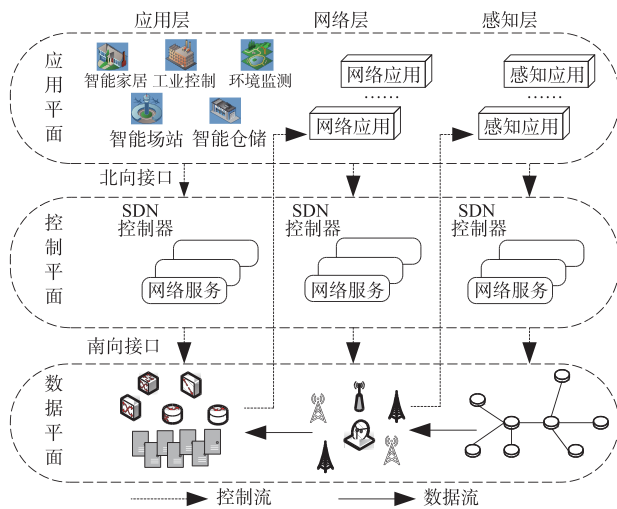


图1 软件定义物联网通用架构

SDIoT 通用架构纵向上由 SDN 架构的应用平面、控制平面和数据平面组成;横向上由 IoT 架构的应用层、网络层和感知层组成。其中,应用平面由各种行业应用和用户编程实现的网络应用及传感应用构成;控制平面包括部署方式不同而逻辑集中的各类控制器和网络服务;数据平面由网络设备、基站、传感节点等组成,并依据控制器下发的转发规则进行数据转发。

SDIoT 通用架构展示了其逻辑层次结构,可作为具体应用架构设计的参考。因此,对上述抽象通用架构进行具体实现时,需要充分考虑具体应用场景和网络架构特点,有针对性的选用或开发,从而有效解耦控制平面和数据平面。

以车辆自组织网络 (Vehicular Ad-hoc Network, VANET) 场景为例,其应用需求包括多维状态感知、异构网

络接入、节点高速移动、实时信息反馈等。因此,在通用架构的指导下,本节设计了软件定义车联网混合式多控制器架构^[27,29],如图 2 所示。车辆配备车载单元 (On board Unit, OBU) 通过无线链路与路侧单元 (Road Side Unit, RSU) 和基站 (Base Station, BS) 进行通信,RSU 和 BS 通过有线链路接入核心网络与云中心连接。其中 OBU 通过 RSU 或 BS 向中心控制器发送上下文信息,包括地理位置信息、车辆传感信息 (速度、方向、运行状态等) 和周边车辆转发信息等,全局 SDN 控制器根据中心控制器构建全局拓扑信息和状态信息,制定相应的策略规则,RSU 和 BS 依据本地状态信息,执行策略规则。同时,SDN 控制器范围延伸至 OBU,车辆间可以通过多跳分发实时交通信息,及时共享路况信息。

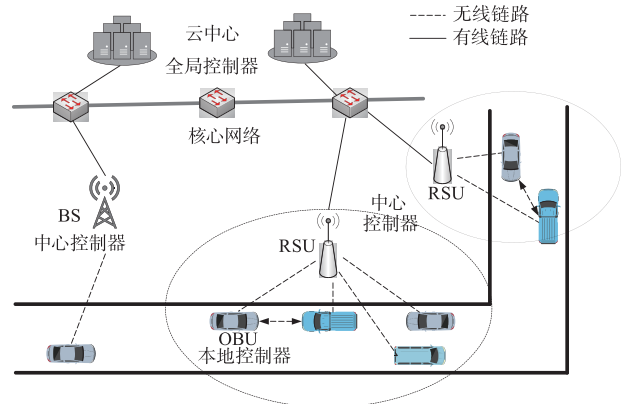


图2 软件定义车联网基本架构

3 挑战及关键技术

本节在 SDIoT 通用架构的指导下,结合物联网节点能量有限、海量终端接入、异构网络互联等关键特征,分

别从异构互连、资源管理、安全可靠 3 个方面,汇总整理 SDIoT 研究成果,分析其面临的挑战及相应的关键技术, 如图 3 所示.

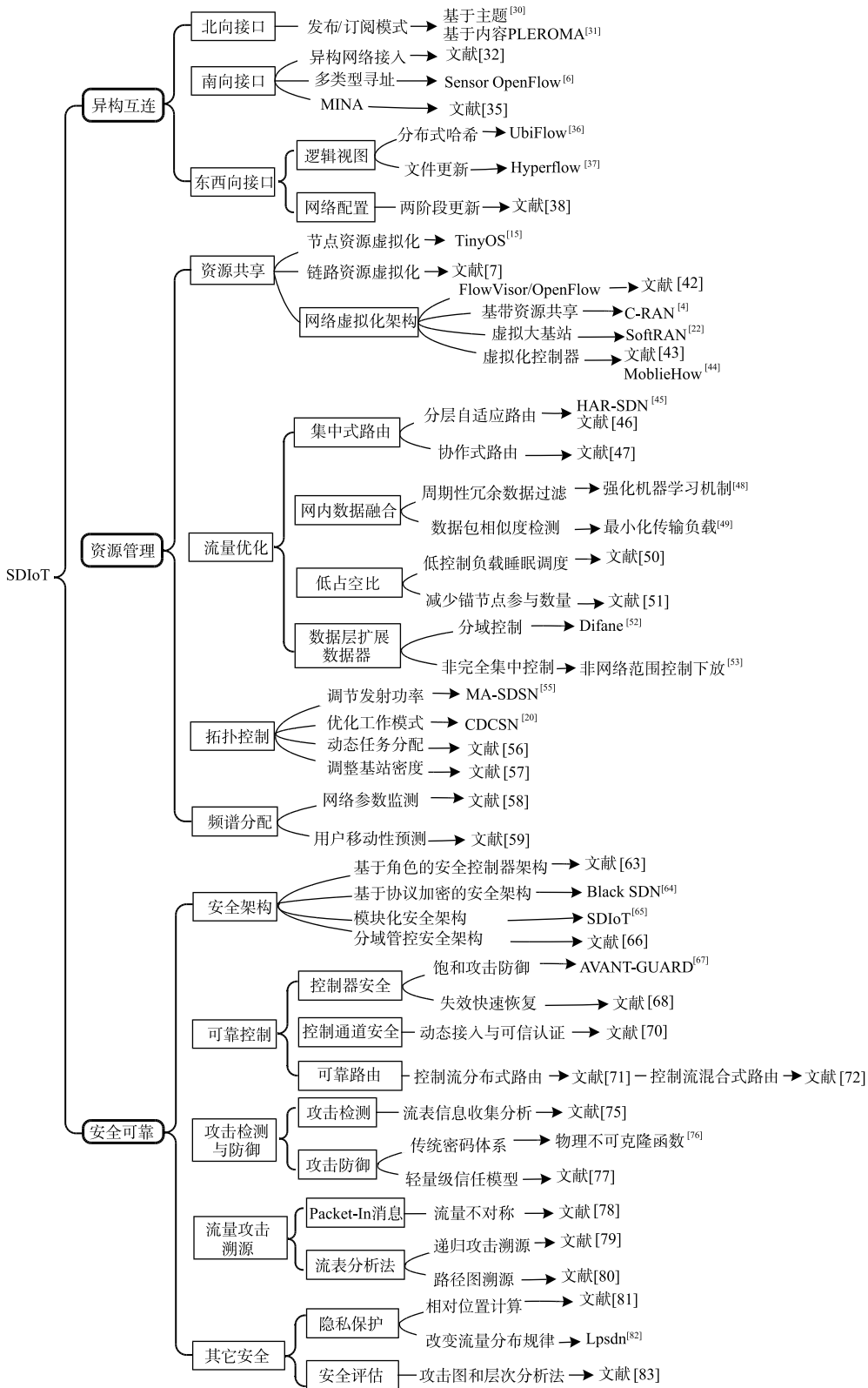


图3 SDIoT研究成果汇总

3.1 异构互连

物联网通过射频识别、传感器、定位装置等终端设备和 ZigBee、蓝牙、WSN、WiFi、移动通信网(如 2G ~ 5G、无线局域网)、互联网等网络通信技术,将人类生活所处的物理世界逐步映射到了信息感知空间,实现了人与人、物与物和人与物之间的广泛互连。然而由于终端设备多样、通信网络异构、应用场景复杂,互联互通成为物联网亟需解决的首要问题。

SDN 的网络可编程特性,实现了网络的抽象、简化,打破了设备厂商互通的壁垒,有效保证了异构 SDIoT 之间的互连共享。根据 SDIoT 通用架构,控制平台通过北向接口与应用平面交互,通过南向接口与数据平面交互,控制平面之间协同工作通过东西向接口实现。因此,接口协议的规范化是打破异构技术之间通信壁垒的基础手段,能够有效解决 IoT 互连共享所面临的终端设备复杂、通信网络异构、应用服务多样等问题。

在北向接口协议方面,Wang 等人^[30]提出了一个面向物联网应用的、基于 SDN 的主题式发布/订阅通信平台,并分析了平台所能够解决的标准化、自寻址和自路由、互操作等开放性问题,为物联网应用提供了无缝接入服务。PLEROMA^[31]则是一个基于 SDN、面向内容的发布/订阅系统中间件,PLEROMA 利用逻辑集中的控制器实现了带宽有效利用、多个 SDN 网络间的互操作和独立配置。

在南向接口协议方面,Wang 等人^[32]基于 SDN 设计了一套统一的异构无线网络管控协议,以支持不同网络的接入设备和 SDN 控制器之间的通信交互。同时基于 SWAN 平台和开源 5G 联盟的 LTE 网络实验平台搭建了异构无线网络融合试验环境,分析和验证了 WLAN 和 LTE 网络下异构无缝切换性能,实现了毫秒级切换时延。Luo 等人^[6]提出了 Sensor OpenFlow 概念,以支持网络内数据包处理及多种类型寻址方式。该方案针对 WSN 中 ZigBee 的 16 位网络地址和级连属性值对标地址,设计了不同的流规则匹配格式,较好适应了不同类型寻址需求。同时提出了可在 WSN 使用的 IP 方案:嵌入式 IPv4 协议 uIP^[33]和适用于 IEEE 802.15.4 之上的适配层协议 6LoWPAN^[34],从而使资源受限的节点成为可被直接寻址和访问的设备。Qin 等人^[35]则基于高性能、自适应的网络应用框架 MINA,设计了适用于物联网环境的软件定义架构,该架构支持 WiFi、WiMAX、LTE、ZigBee 等异构复杂无线网络接入,能够满足不同物联网任务下的服务质量动态调整。

除了南、北向接口,SDIoT 架构还面临着多控制器的协同工作问题,即东、西向接口的定义和规范化,保持控制节点逻辑视图和网络配置的一致性异构网络协同顺畅运行的基础。

Wu 等人^[36]提出了一个基于分布式控制器架构的 SDIoT 系统 UbiFlow,通过部署分布式 SDN 控制器,将整个网络架构划分成不同的 SDN 域,并采用分布式哈希方式保持域间控制器逻辑视图的一致性。Hyperflow^[37]则是一个逻辑集中、物理分布的控制器,每台控制器都能够获得全局网络拓扑,但仅负责区域范围内的 OpenFlow 交换机,控制器间的网络通信采用基于文件更新的发布/订阅模式,保持了整个网络逻辑视图的一致性,并且具有较好的可扩展性。

为了实现网络配置数据包级别的一致性,Reitblatt 等人^[38]提出了一种两阶段更新机制,在每个数据包中都记录了一个版本号。当网络配置发生变化时,为了更新到当前版本,其首先更改网络边界交换机的配置,只允许通过记录有当前版本号数据包包的交换机进入网络,直到网络中不再出现上一个版本的数据包后,再恢复交换机配置,从而实现全网新版本的网络配置。

由于 IoT 网络通信协议规范制定的独立性和应用领域的多样性,不同通信技术之间难以直接连通。SDIoT 首要目标就是打破异构技术之间的通信壁垒,通过开放的接口协议,如 OpenFlow 协议,对控制平面和数据平面解耦,通过软件编程方式满足多种协议规范,实现网络行为的可管、可控和可变,从而保证异构 SDIoT 的互连共享^[39]。

3.2 资源管理

在 IoT 中,从终端设备发出请求到收到上层应用信号反馈,经历了末端网、接入网、核心网等多种类型的网络传输,节点的资源受限、移动性和异构网络的复杂性使之承受了极大的资源负载。因此,如何灵活、动态地调整和分配可用资源,最大限度地降低资源消耗,是 IoT 面临的挑战性难题。本小节从资源共享、流量优化和拓扑控制三个方面对 SDIoT 的资源管理进行论述。

3.2.1 资源共享

虚拟化技术是实现资源共享的主要方式,其解除了网络功能与专用硬件的依存关系,支持不同虚拟网络共享同一物理网络资源,允许不同用户共享或独占网络资源切片,提高了资源利用率和网络资源管理效率^[40]。

TinySDN^[15]是基于 TinyOS 的 SDN 框架,主要组件包括支持 SDN 功能的传感器节点和 SDN 控制器节点。由于 TinyOS 上层部署了小型虚拟机 Mate^[41],实现了节点资源的虚拟化,能够动态满足应用需求,提高了节点资源的利用率。

Paganelli 等人^[7]针对 NGSON(The Next Generation Service Overlay Network)提出了体系结构扩展模型,充分利用 SDN 网络可编程和细粒度流量控制能力及网络虚拟化机制,对链路资源进行了虚拟化,实现了链路资源的合理分配和细粒度网络服务。

Chen 等人^[42]基于网络虚拟化平台 FlowVisor 和 OpenFlow 设计了一个资源管理方案,用于共享和动态分配企业网络资源. 该方案将物理网络资源分割成不同的网络切片,每个分片的网络资源可以动态调整,从而提升了企业网络的利用率.

中国移动提出的云无线接入网络(Cloud-Radio Access Networks, C-RAN)架构^[41]将不同基站的基带处理功能集中在基带处理单元池中,解耦了通信系统硬件架构与软件功能,支持同一个物理层网络上多张虚拟无线网络承载,实现了基带处理资源的共享和资源的优化配置.

类似地,SoftRAN^[22]架构引入了 SDN 控制器实现了 LTE 网络中无线资源的虚拟化及管理. SoftRAN 将部署于一定地理区域内的基站进行虚拟化抽象,形成虚拟大基站的概念,SDN 控制器具有该大基站的全局网络视图,实现了对网络资源的统一调度和管理.

此外,Liang 等人^[43]则提出了一种移动网络虚拟化架构,通过移动虚拟化控制器将无线频谱资源和无线网络基础设施进行虚拟化,实现了无线网络服务与网络基础设施虚拟化,提高了资源利用率. 华为研究人员^[44]提出了基于 SDN 和 NFV 的 MobileFlow 移动网络架构,该架构由控制器和转发实体两部分组成,是一个全虚拟化架构,控制器和转发实体均基于通用硬件实现. 其中,控制器完成传统核心网网关控制功能,转发实体支持 OpenFlow 协议,并且支持电信级数据转发和隧道建立.

3.2.2 流量优化

网络流量管理是 IoT 资源管理的重要方面. 充分利用 SDN 集中控制所带来的路由协作、冗余过滤、睡眠调度等技术优势,优化网络流量,减少节点控制流和数据流收发,减少能量消耗,是提升资源利用效率的可行方法.

与传统分布式路由策略相比,利用 SDN 技术进行集中式路由规划更有利于实现全局最优化、降低网络时延以及延长网络寿命. HAR-SDN^[45]是一个分层自适应路由算法,该算法考虑了网络吞吐量和节点剩余能量,利用 SDN 集中控制优势和全局网络视角,在全局控制器中采用 Hopfield 神经网络算法计算簇间最优路径作为本地路由,然后结合本地路由与目标移动性,进行全局路径优化,实现了节能情况下更高的传输速率. 其后,Mohsin 等人^[46]在此基础上,仿真验证了海豚回声定位算法与其他的启发式搜索算法相比,能够获得更高的网络吞吐量和更低的能量消耗. Fei 等人^[47]则提出了一种基于软件定义无线网络架构的协作式路由算法,路由器仍负责传统的路径发现,并将相关链路信息发送给 SDN 控制器,控制器负责完成协作式路由的相关

功能,包括干扰模型建立、辅助节点选择及路由有效性验证,从而找到最佳转发路径,显著提高了网络传输带宽和降低了传输延迟.

在数据融合方面,Huang 等人^[48]采用 SDN 思想提出了基于强化学习机制的周期性冗余过滤和负载均衡路由技术,实现了数据平面内的网络融合,减少了网络流量传输,提高了能量利用率和环境自适应能力. Li 等人^[49]则以传感节点负载和相邻传感节点之间的数据包相似度作为约束条件,由 SDN 控制器求解数据流传输负载最小化问题,减少了冗余数据包传输数量,并在此基础上提出了一种数据流拆分最优化算法,从最优中继节点选择的角度,寻找从源节点到目的节点的最优路由路径.

在低占空比方面,Zhao 等人^[50]提出了一种低控制负载的睡眠调度方案,SDN 控制器根据节点发送的指标数据,决定节点睡眠状态,并采用基于能耗的 k 重邻居连接算法 EC-CKN 对网络控制进行更新,最小化网络中总控制流量. 为有效减少定位节点参与数量,Zhu 等人^[51]提出了一个集中式的节点调度方案,SDN 控制器根据目标节点所连接锚节点的数量,以流表下发的方式决定锚节点工作与休眠状态,降低了网络流量消耗.

为了有效减少数据平面与控制器之间的通信开销,Yu 等人^[52]提出了一种由 OpenFlow 交换机、权威交换机和普通交换机组成的典型数据层扩展控制器 Difane,权威交换机负责管理域内的普通交换机. 普通交换机需要与控制器通信时,需先和分区内的权威交换机通信,由权威交换机添加新的流规则,并转发该分组,从而减少了分组处理时延和与控制器的通信开销. Jagadeesan 等人^[53]则提出了一种局部网络范围操作的控制器,并将节点自身可决定的事件的控制权限下放到终端节点,从而有效减少了流量产生和传输.

3.2.3 拓扑控制

由于 IoT 终端节点所处环境复杂、资源有限和不断运动的特性,其网络拓扑经常发生变化. 传统 IoT 节点部署之后,节点功能和节点组成的网络功能很难发生改变. SDIoT 则能够通过节点功率调节、模式设置和邻居节点选择等,动态调整网络拓扑,有效提高资源利用效率,减少能量消耗^[54].

在节点功率控制方面,MA-SDSN^[55]是一个基于移动节点辅助的软件定义传感网络架构,其以功率控制为出发点,通过马尔可夫链重定位概率矩阵进行移动节点的调度,仿真结果表明,在保证网络连通性前提下,有效降低了网络平均时延和平均节点发射功率,提高了网络生命期.

在节点模式控制方面,Olivier 等人^[20]提出了一种基于集群的软件定义传感网络架构,主节点将部分控

制功能下放到各集群的簇头中以缓解控制开销,集群内部由簇头控制和协调其他所有节点承担控制器角色,网络拓扑发生变化时,簇头节点优先调度簇内资源以保证任务质量,从而合理降低了网络能耗,提高了网络灵活性。

在节点任务分配方面,Luo 等人^[56]提出了一种基于 SDN/NFV 的信息物理系统融合网络能效优化管理方案。该方案中逻辑集中控制器负责收集传感节点的剩余能量、邻居、位置等信息,并基于博弈论做出拓扑决策,该决策用于实时、有效确定拓扑分组以及虚拟网络功能的部署,仿真结果表明,与传统方法相比,有效降低了网络能耗。

在移动基站设置方面,Pan 等人^[57]利用 SDN 控制器全局化视角和无人机基站的灵活特性,提出了基于无人机部署的资源分配算法,该算法通过调整无人机基站密度,在最小化无人机传输功率的同时,最大化了关联用户数,提高了网络资源利用效率。

此外,Al-Rubaye 等人^[58]为了缓解智能电网中频谱资源短缺,提出了一种基于 SDN 的非授权频段接入协议,通过利用控制器的全局化视角监测和收集与频谱分配相关的网络参数,制定频谱分配决策,从而满足用户服务质量需求。Yang 等人^[59]则设计了一种异构蜂窝网络中基于用户移动性预测的资源分配系统,该系统中 SDN 控制器首先完成下一时刻用户网络位置的预测,进而根据用户与基站距离、基站缓存内容和用户请求等状态参数,然后使用交替方向乘子法算法求解小基站的频谱和功率分配问题,提高了网络整体吞吐量。

在资源受限的 IoT 中,提高资源管理效率能够有效降低网络运营成本,延长网络寿命。SDIoT 中,资源共享主要采用虚拟化的方式实现了“一虚多”和“多虚一”,从而提供弹性网络资源供给,提升了网络资源利用率;流量优化则是通过优化网络流量传输,减少能量消耗,提高了节点生存时间;拓扑控制则通过动态调整网络拓扑结构,提升了网络负载平衡等网络服务能力。但是,如何平衡引入 SDN 带来的额外资源开销和 IoT 获得的高效资源管理是 SDIoT 值得研究的重点问题。

3.3 安全可靠

随着 IoT 接入设备数量和种类的急剧增多、网络规模的不断扩大,传统的安全机制已逐渐难以解决其所面临的安全挑战^[60]。SDN 的全局视图、多粒度网络控制能力等特征能够为 IoT 提供更好的系统故障或攻击行为的感知、预警和响应,为 IoT 安全问题改善带来了新的机遇^[61,62]。

3.3.1 安全架构

目前针对 SDIoT 的安全研究仍处于起步阶段,为解决物联网面临的安全威胁,Kalkan 等人^[63]提出了一种

基于角色的 SDIoT 安全控制器架构,利用 SDN 集中控制特性将控制器划分为入侵控制器、密钥控制器和加密控制器,减轻了单一控制器的管理负担。Black SDN^[64]是一个基于协议加密的 IoT 安全架构,其将 SDN 控制器作为可信第三方,并对报头和有效载荷进行了加密处理,实现了设备间的安全通信。

此外,Wang 等人^[65]设计了一种模块化的 SDIoT 安全架构,该架构通过在感知层、转发层和控制层进行安全模块扩展的基础上,设计了信任管理、攻击检测与响应等安全功能,有效增强了抵御攻击的能力。Olivier 等^[66]则提出了一种基于 SDN 分域管控的 IoT 安全架构,各域包含自身的安全策略和管控方式,域间的连接建立和信息交换则由域中的边缘控制器完成。

3.3.2 可靠控制

可靠控制是实现 SDIoT 集中控制的必要保证。在 IoT 中,广泛采用的无线通信信道,使得终端节点从发出请求到收到响应所经历的时间较长,在一定程度上增加了可靠控制的难度。从整个控制过程,可以将可靠控制划分为控制器安全、控制通道安全和可靠路由等。

在控制器安全方面,Shin 等人^[67]从控制平面与数据平面之间通信瓶颈出发,提出了基于数据平面的安全扩展模块 AVANT-GUARD,通过动态减少控制平面与数据平面的交互操作和及时更新控制平面网络状态信息等,有效抵御了针对控制平面的饱和攻击。为了快速解决控制器失效问题,Chan 等人^[68]则提出了一种多域 SDN 中控制器失效快速恢复方法,该方法首先采用自适应时间阈值的方式来检测控制器失效,然后综合考虑控制器负载、控制距离等因素,及时将失效的节点重新分配到正常控制器下。

在控制通道安全方面,Benton 等人^[69]指出基于 TLS 安全协议的 OpenFlow 安全控制通道存在身份认证、流表安全验证、中间人攻击和拒绝服务攻击等安全威胁。Kreutz 等人^[70]则指出可采用动态设备接入、控制器与节点设备间的可信认证等手段来增强控制通道的安全性。

在可靠路由方面,针对分布式路由缺乏网络全局视图难以提供最优路由传输路径,而集中式路由又可能产生的单点失效问题,Detti 等^[71]提出了利用基于 OpenFlow 的集中式路由协议来传输数据流,控制流及控制器失效时数据流的转发则采用分布式路由协议。Yuan 等人^[72]考虑到控制流的重要性,提出了一种基于按需距离矢量路由协议 AODV 和 OpenFlow 的混合路由模型,其中 AODV 作为基于 OpenFlow 的路由失效时的替代协议,用于完成网络故障排除和网络配置等任务,提高了网络控制的可靠性。

3.3.3 攻击检测与防御

SDIoT 将网络流量的控制能力从交换设备中分离

并进行集中管理,不仅有利于网络实时监测与部署,还能提供更加直观的基于流量监控的攻击检测方式,同时 SDN 控制器的网络策略下发机制能够快速将流量清洗策略下发至所有网络设备,实现实时、快速的 DDOS 检测^[73,74].

随着网络规模扩大、交换设备数目增多,监控开销、检测延迟、性能瓶颈等问题逐渐显现,为了缓解控制器与交换机之间南向接口的通信压力,Yang 等人^[75]提出了一种分布式攻击检测机制,该机制利用交换机本身剩余的计算资源,将部分安全功能下放至边缘交换机中,实现部分安全攻击检测功能,从而缓解了监控开销、降低了检测延迟.

在攻击防御方面,鉴于 SDIoT 控制器较强的计算能力使得传统物联网中难以实现的安全算法能够较容易地集成在控制器中.对此,Huang 等人^[76]提出了一种基于物理不可克隆函数的组密钥分发机制,SDN 控制器负责密钥的集中管理,增强了节点抵御窃听攻击、克隆攻击的能力.考虑到传统基于密码体系的安全措施难以抵御妥协节点发起的内部攻击问题,针对 IoT 感知层存在的选择性转发攻击和新流攻击,Wang 等人^[77]提出了一种基于贝叶斯的轻量级本地信任模型,模型将控制流表和数据流表进行了分离设计,同时扩展了感知节点的 SensorFlow 流表项,通过本地信任监测和本地信任评估完成对网络中恶意节点的有效识别.

3.3.4 流量攻击溯源

与流量攻击检测相比,利用 SDN 技术进行攻击溯源的研究相对较少.已有研究成果可主要分为基于 Packet-In 消息的攻击溯源机制和基于流表分析的攻击溯源机制.

基于 Packet-In 消息的攻击溯源机制原理是当攻击者通过伪造数据报文发动攻击时,会在攻击路径上产生大量 Packet-In 消息,控制器可以据此实现追踪定位.例如,Yin^[78]提出了一种基于流量不对称的溯源算法,当目标遭受 DDOS 攻击时,SDN 控制器会监控以被攻击对象为目的 IP 的 Packet-In 消息,当发现某交换机制的某个端口发送至被攻击对象的报文流量大于接收的报文流量时,则认为该端口为攻击源端口,并进行丢包处理.

基于流表分析的攻击溯源机制原理是由 SDN 控制器获取交换机转发规则,根据报文头部信息依次匹配找到上一个转发的交换机,直到找到攻击源.例如,Wang^[79]提出了一种基于 SDN 的递归攻击溯源机制,SDN 控制器利用集中控制和全局视图,迭代分析流表项,从而查找并确定转发了攻击报文的交换机;Jia^[80]提出了一种基于流表分析的路径图溯源算法,该算法根据 SDN 控制器获取的交换机流表项依赖关系建立了网络攻击数据流路径图,进而确定攻击源.

3.3.5 其它安全

在隐私保护方面,SDN 控制器的细粒度流量控制能够增强网络流量的安全性和隐私性.针对移动网络条件下 SDN 集中式的数据处理可能带来的位置隐私安全问题,Fei 等人^[81]提出了一个移动终端相对位置解决方案.该方案利用控制器的全局视角,在分析网络拓扑结构的基础上,通过计算移动终端之间,基站之间以及移动终端和基站之间的距离,得到终端相对位置信息,从而避免了用户位置隐私的暴露.Lpsdn^[82]则通过软件定义的方式动态更换了数据转发节点,主动改变了网络流量分布规律,有效抵御了攻击者探测汇聚节点位置的行为.

在安全评估方面,Luo 等人^[83]提出了一种针对软件定义移动网络的安全评估机制.针对移动网络的动态性、复杂性,提出了基于攻击图和层次分析法的安全评估方法,仿真结果表明该方法能够有效评估软件定义移动网络的安全性.

此外,在 IoT 资源隔离方面,为了防止用户使用资源时的相互干扰,需要对 SDN 控制平面和数据平面进行隔离,保障租户网络服务的稳定性和可靠性,提升租户网络安全;在 IoT 边界控制方面,网络虚拟化使得网络物理边界愈发模糊,对防火墙等安全设备的部署也造成了一定的困难,SDN 控制器利用细粒度的流量控制能力,能够将域间流量均衡定向的流转到分布式部署的安全设备中,从而保障网络边界安全.

综上,SDIoT 带来的高度可控性,使其安全防护能力比传统 IoT 具有更多的优势,能够更好的发现和攻击行为、网络隐患或进行流量控制等.但是由于 SDIoT 还处于初步研究阶段,架构和功能设计还不够完善,其本身也面临着一定的安全隐患^[84,85].例如,在传统 IoT 中,攻击者需要对绝大多数交换机都成功发动攻击才能造成整体的网络瘫痪,而在 SDIoT 中只需要切断 SDN 控制器就能够实现大范围的网络瘫痪.因此,针对 SDIoT 控制平面的安全增强研究是重中之重,一方面需要增强控制器流量监测和接入认证措施,另一方面需要在考虑应用平面与数据平面安全的同时,加强各层之间接口协议安全的研究^[86].

4 应用案例

本节设计了软件定义车联网(Software-Defined Vehicular Networks,SDVN)应用案例,对比分析了在突发交通事故产生时传统分布式 VANET 和 SDVN 的处理流程、效率、安全性等,为 SDIoT 的深入研究提供一定的参考.

4.1 场景介绍

SDVN 应用案例如图 4 所示,道路所有车辆均配备 OBU,OBU 与 OBU、OBU 与 RSU 之间采用专用短程通

信技术 (Dedicated Short Range Communication, DSRC), 偏远地区采用 4G/5G 移动通信, 道路交通云监测中心负责对道路交通信息的收集、处理、存储和分析预测。因此, 事故车辆、云监测中心、交警车辆之间涉及 4 条基本信息传输路径, 即路径 A 至路径 D, 如表 2 所示。

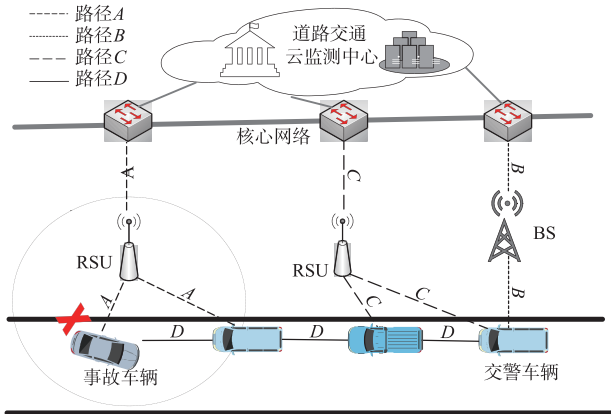


图4 软件定义车联网应用案例

表 2 信息传输路径分析

路径代号	通信双方	网络基础设施	通信距离
A	事故车辆-云监测中心	DSRC、互联网	长
B	云监测中心-交警车辆	互联网、4G/5G	长
C	云监测中心-交警车辆	DSRC、互联网	长
D	事故车辆-交警车辆	DSRC	短

考虑本文为定性分析, 假定信息传输通信时延仅与网络类型、传输距离相关, 即以 T_n 代表路径 N 的传输时延, 则 $T_a \approx T_b \approx T_c > T_d$ 。

4.2 流程对比

针对当前道路上发生的交通事故, 分布式 VANET 和 SDVN 的处理流程分别如图 5(a) 和图 5(b) 所示。

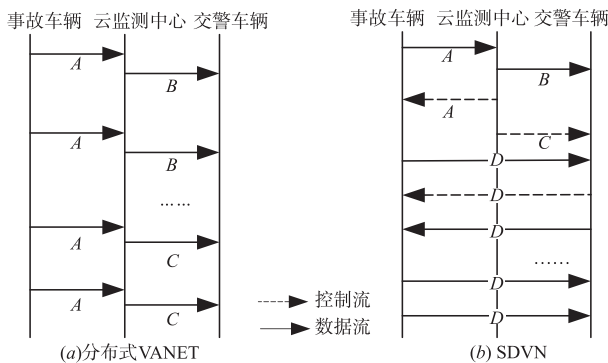


图5 突发交通事故处理流程

(1) 分布式 VANET 处理流程:

步骤 1 事故车辆传感监测模块检测到交通事故发生后, 通过路径 A 向云监测中心报警;

步骤 2 云监测中心根据上传事故信息, 通过路径

B 向距离最近的交警车辆下达出警任务;

步骤 3 事故车辆将实时状态信息、周围车辆状况等通过路径 A 发送至云监测中心;

步骤 4 云监测中心将事故实时信息通过路径 C 发送给交警车辆;

步骤 5 重复步骤 3、4, 直至交通事故处理结束。

(2) SDVN 处理流程:

步骤 1 事故车辆传感监测模块检测到交通事故发生后, 通过路径 A 向云监测中心报警;

步骤 2 云监测中心根据上传事故信息, 通过路径 B 向距离最近的交警车辆下达出警任务;

步骤 3 云监测中心根据全局控制器收集的的道路交通信息, 计算事故车辆和交警车辆最佳多跳 V2V (vehicle-to-vehicle) 路径, 并将转发规则下发至路径所有中继节点流表中;

步骤 4 事故车辆将实时状态信息、周围车辆状况等通过路径 D 发送至交警车辆;

步骤 5 交警车辆通过路径 D 向沿线车辆发送事故信息和避让命令;

步骤 6 按需执行步骤 5, 重复执行 4, 直至交通事故处理结束。

4.3 结果分析

根据上述突发交通事故处理流程, 对分布式 VANET 和 SDVN 处理过程进行总结分析, 如表 3 所示。

表 3 突发交通事故处理结果分析

	异构快速互连	资源有效分配	安全可靠路由
分布式 VANET	不支持	不支持	不支持
SDVN	支持	支持	支持

(1) 异构快速互连

异构快速互连是保持车辆终端实时在线, 提供稳定业务应用功能的基本要求。本案例中, 传统 VANET 采用了分布式体系结构, 事故车辆仅能通过道路交通监测云平台将信息转发至交警车辆, 无法短时间通过自身 OBU 寻找到就近的交警车辆。SDVN 由于采用了 SDN 技术, 使得整个网络具备了可编程能力, 道路交通监测云平台利用车辆状态信息获取车辆与不同接入技术间的关联度, 快速规划事故车辆与交警车辆之间 V2V 通信的最优参数集合, 包括设备参数、路由参数等, 并以控制命令方式下发, 使车辆在保持蜂窝连接的同时, 实现 V2V 通信的快速切换, 提高用户服务质量。

(2) 资源有效分配

资源有效分配是防止网络拥塞、节省频谱资源、提高车联网网络性能的重要基础, 也是面向应用提供按需服务的重要体现。在本案例中, 分布式 VANET 中事故车辆与交警车辆只能基于有限网络信息进行卸载决

策,如历史网络参数等,并不能反映当前网络实时状态,甚至可能形成非有益决策. SDVN 则利用 SDN 控制器掌握的全局网络和车辆状态信息,能够动态地根据实时状态,测量事故车辆与交警车辆之间是否存在 V2V 路径,减少车辆 OBU 计算开销,实现蜂窝网络流量卸载,提高资源利用效率.

(3) 安全可靠路由

安全可靠路由是保障信息传输时效性和可靠性,提高交通事故处理效率的重要支撑. 在本案例中,SDVN 通过构建事故车辆与交警车辆间的 V2V 通信路径,事故状态信息直接通过传输时延最短的路径 D 发送,大大节约了网络传输时延. 同时,考虑到车辆行驶的不确定性,常常会打破事故车辆与交警车辆之间原有的 V2V 路径规划. 为防止单点路径失效,SDN 控制器可提供快速路径修复机制,找到备份节点,并将新的流表规则发送至所有相关节点. 此外,由于 SDN 控制器具有集中式的网络视图,能够通过对数据平面的流量分析识别潜在攻击,隔离恶意或自私节点,提高通信安全性、可靠性.

综上,SDVN 与分布式 VANET 相比具有更强的灵活性、可扩展性和自适应性,能够快速联通异构网络,提高资源利用效率,保障通信安全可靠,有效提升交通事故处理效率. 事实上,目前国内外已有许多关于 SDVN 的相关研究. 例如,2014 年加州大学 Ian Ku 等人^[27]首次提出了 SDVN 概念,并从架构和服务的角度仿真验证了 SDVN 的可行性;Salahuddin 等人^[87]设计了基于 SDN 的路边单元车载云,实现了对路边单元的云管理;Liu 等人^[88]则提出了一种混合车载网络中基于 SDN 的协作式数据调度算法,降低了传输延迟,提高了转发效率. SDN 在网络资源管控、可扩展性等方面的技术优势,正符合车载网络在节点移动性、网络动态性、网络异构性等方面的特征和需求,因而在 VANET 中引入 SDN 的思想能够更好地解决其目前存在的节点协同难、流量不均衡、网络利用率低等瓶颈问题.

5 总结与展望

本文在总结近年来软件定义物联网相关架构的基础上,分析了其与 IoT 的感知层、网络层和应用层 3 层架构的对应关系、主要特点及控制器部署方式,提出了 SDIoT 通用架构,并进行了分析讨论. 然后结合 IoT 节点资源有限、海量终端接入、异构网络互联等关键特征,从异构互连、资源管理和安全可靠 3 个方面对现有研究成果进行了梳理. 最后,以车联网交通事故突为例简要分析了 SDIoT 的优势和前景.

尽管众多研究人员针对 SDIoT 开展了系列的探讨与研究,并取得了相关成果,但该领域研究仍然处于初步阶段,存在大量值得关注的研究方向:

(1) 标准制定

IoT 和 SDN 的标准化工作已经得到了全球标准化组织的重视,并相继展开了标准制定工作,如 ITU-T、IETF、ONF、ETSI 等. 其中,ONF 是目前最具有影响力的 SDN 标准化组织,致力于 SDN 和 OpenFlow 技术的标准化以及商业化;ITU-T 则专门成立了 SG20 研究组负责制定全球物联网、智慧城市及社区方面的国际标准,并通过与 ONF 联络协商,开展了针对运营商网络的 SDN 场景对象、相关架构的研究,同时陆续在 SG13 及 SG11 全会上发布了相关标准. 由于涉及复杂多样的信息通信技术,SDIoT 的标准制定需要世界各大标准化组织的协同努力,需要 SDIoT 领域研究人员投入更多的精力.

(2) 控制器实现

无线通信网络的时延敏感性和 SDN 技术的集中控制之间存在着天然的矛盾,因此 SDIoT 需要根据通信网络特征、网元和终端计算处理能力等,设计符合具体应用场景下的控制器实现方案,重点需要考虑集中控制粒度、控制器模式、控制器与控制器间的通信机制等.

(3) 能效优化

位于 IoT 感知层的终端节点大多是能量受限的,为了尽可能保障节点在线率,延长 SDIoT 网络生命期,一是需要通过对节点的动态配置,充分运用有限资源保证节点功能的正常运转;二是需要利用控制器全局视角,根据节点能量剩余、网络吞吐量等设计节能高效的路由协议;三是研究终端节点能量自供给技术,包括无线充电技术、环境能量收集技术等,从而更好地解决能量受限问题.

(4) 共存发展

SDIoT 为了能够更好的融入市场,需要兼容多种层级的网络架构. 一方面需要考虑 SDN 技术在 IoT 3 层架构中研究和应用的均衡性,目前应用层中有线网的 SDN 技术应用已经较为成熟,网络层中以 LTE、5G 移动通信网络为代表的无线网络也展开了相关应用,特别是 5G 系统将 4G 核心网的网元进行了软件和硬件解耦,将软件部分重构为网络功能,将控制平面和用户平面分离,采用基于服务的接口方式,支持控制平面间控制功能的交互及根据不同业务需求的网络功能编排和部署,而感知层中移动自组织网络等的应用案例则相对较少;另一方面则需要考虑 SDN 与 IoT 各层原有非软件定义架构的兼容共存性,以提高实际应用场景的经济性.

(5) 安全增强

虽然 SDIoT 的集中控制、全局拓扑等优势为改善 IoT 安全问题带来了重大机遇,但是由于 IoT 网络的脆弱性,SDN 技术的引入同样带来了控制器的安全性、流规则合法性和一致性、南向和北向协议的安全性等问题. 因此,SDIoT 需要克服自身安全缺陷,加强安全技术

研究,同时将内生安全、可信计算、动态防御等前沿安全理念融入架构设计过程中。

参考文献

- [1] Statista Research Department. Internet of things (IoT) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025 (in billions) [R/OL]. <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>, 2020-4-25.
- [2] Tayyaba S K, Shah M A, Khan N S, et al. Software-Defined networks (SDNs) and internet of things (IoTs): A qualitative prediction for 2020[J]. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2016, 7(11):385–404.
- [3] Jain S, Kumar A, Mandal S, et al. B4: Experience with a globally-deployed software defined WAN[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2013, 43(4):3–14.
- [4] Chihlin I, Yuan Y, Huang J, et al. Rethink fronthaul for soft RAN[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(9):82–88.
- [5] Yu H C, Quer G, Rao R R, et al. Wireless SDN mobile ad hoc network: From theory to practice [A]. *International Conference on Communications [C]*. Paris, France: IEEE ICC, 2017. 1–7.
- [6] Luo T, Tan H, Quek T Q, et al. Sensor OpenFlow: Enabling software-defined wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(11):1896–1899.
- [7] Paganelli F, Ulema M, Martini B. Context-aware service composition and delivery in NGSONs over SDN[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(8):97–105.
- [8] Kalkan K, Gur G, Alagoz F. Defense mechanisms against DDoS attacks in SDN environment[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(9):175–179.
- [9] 吕军, 栾文鹏, 刘日亮, 等. 基于全面感知和软件定义的配电物联网体系架构[J]. *电网技术*, 2018, 42(10):3108–3115.
Lv J, Luan W P, Liu R L, et al. Architecture of distribution internet of things based on widespread sensing & software defined technology[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(10):3108–3115. (in Chinese)
- [10] Azizian M, Cherkaoui S, Hafid A, et al. Vehicle software updates distribution with SDN and cloud computing[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(8):74–79.
- [11] Kathiravelu P, Sharifi L, Luís V. Cassowary: Middleware platform for context-aware smart buildings with software-defined sensor networks [A]. *Proceedings of the 2nd Workshop on Middleware for Context-Aware Applications in the IoT [C]*. Vancouver, Canada: ACM, 2015. 1–6.
- [12] Tayyaba S K, Shah M A, Khan O A, et al. Software defined network (SDN) based internet of things (IoT): A road ahead [A]. *Proceedings of the 17th International Conference on Future Networks and Distributed Systems [C]*. Cambridge, UK: ACM, 2017. 1–8.
- [13] Zeng D, Li P, Guo S, et al. Energy minimization in multi-task software-defined sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2015, 64(11):3128–3139.
- [14] Salman O, Elhaji I, Kayssi A, et al. An architecture for the Internet of things with decentralized data and centralized control [A]. *2015 IEEE/ACS 12th International Conference of Computer Systems and Applications [C]*. Marrakech, Morocco: IEEE, 2016. 1–8.
- [15] Oliveira B T D, Gabriel L B, Margi C B, et al. TinySDN: Enabling multiple controllers for software-defined wireless sensor networks [A]. *2014 IEEE Latin-America Conference on Communications [C]*. Cartagena de Indias, Colombia: IEEE, 2014. 1–6.
- [16] Bendouda D, Rachedi A, Haffaf H. Programmable architecture based on software defined network for internet of things: Connected dominated sets approach [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2018, 80(3):188–197.
- [17] Miyazaki T, Yamaguchi S, Kobayashi K, et al. A software defined wireless sensor network [A]. *International Conference on Computing, Networking and Communications [C]*. Honolulu, USA: IEEE, 2014. 847–852.
- [18] Galluccio L, Milardo S, Morabito G, et al. SDN-WISE: Design, prototyping and experimentation of a stateful SDN solution for wireless sensor networks [A]. *2015 IEEE International Conference on Computer Communications [C]*. Hong Kong, China: IEEE, 2015. 513–521.
- [19] Bera S, Misra S, Roy S K, et al. Soft-WSN: Software-Defined WSN management system for IoT applications [J]. *IEEE Systems Journal*, 2018, 12(3):2074–2081.
- [20] Olivier F, Carlos G, Florent N, et al. SDN based architecture for clustered WSN [A]. *Proceedings of The 9th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing [C]*. Blumenau, Brazil: IEEE, 2015. 342–347.
- [21] Labraoui M, Boc M M, Fladenmuller A. Opportunistic SDN-controlled wireless mesh network for mobile traffic offloading [A]. *International Conference on Selected Topics in Mobile & Wireless Networking [C]*. Avignon, France: IEEE Computer Society, 2017. 1–7.
- [22] Gudipati A, Perry D, Li L E, et al. SoftRAN: Software defined radio access network [A]. *Proceedings of the Second Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking [C]*. Helsinki, Finland: ACM, 2013. 25–30.
- [23] Jin X, Li L E, Vanbever L, et al. SoftCell: Scalable and

- flexible cellular core network architecture [A]. Proceedings of the Ninth ACM Conference on Emerging Network Experiment and Technology [C]. Santa Barbara, USA: ACM, 2013. 163 – 174.
- [24] Han T, Han Y, Ge X, et al. Small cell offloading through cooperative communication in software-defined heterogeneous networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 20(16) : 7381 – 7392.
- [25] Maksymyuk T, Kyryk M, Jo M, et al. Comprehensive spectrum management for heterogeneous networks in LTE-U [J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(6) : 8 – 15.
- [26] Boryaliniz I, Yanikomeroğlu H. The new frontier in RAN heterogeneity: Multi-tier drone-cells [J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(11) : 48 – 55.
- [27] Ku I, Lu Y, Cerqueira E, et al. Towards software-defined VANET: Architecture and services [A]. 2014 13th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop [C]. Piran, Italy: IEEE, 2014. 103 – 110.
- [28] He Z, Cao J, Liu X. SDVN: Enabling rapid network innovation for heterogeneous vehicular communication [J]. IEEE Network, 2016, 30(4) : 10 – 15.
- [29] Duan P, Peng C, Zhu Q, et al. Design and analysis of software defined vehicular cyber physical systems [A]. 2014 20th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems [C]. Hsinchu, China: IEEE, 2014. 412 – 417.
- [30] Wang Y, Zhang Y, Chen J, et al. An SDN-based publish/subscribe-enabled communication platform for IoT services [J]. China Communications, 2018, 15(1) : 95 – 106.
- [31] Tariq M A, Kokiehofe B, Bhowmik S, et al. PLEROMA: A SDN-based high performance publish/subscribe middleware [A]. Proceedings of the 15th International Middleware Conference [C]. Bordeaux, France: ACM, 2014. 217 – 228.
- [32] Wang L, Lu Z, Wen X, et al. An SDN-based seamless convergence approach of WLAN and LTE networks [A]. 2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference [C]. Chongqing, China: IEEE, 2016. 944 – 947.
- [33] Dunkels A, Sterlind F, He Z. An adaptive communication architecture for wireless sensor networks [A]. Proceedings of the 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems [C]. Sydney, Australia: ACM, 2007. 335 – 349.
- [34] RFC 4919, IPv6 over low-power wireless personal area networks (6LoWPANs): Overview, assumptions, problem statement, and goals; RFC 4919 [S]. 2007.
- [35] Qin Z, Denker G, Giannelli C, et al. A software defined networking architecture for the internet-of-things [A]. 2014 IEEE Network Operations and Management Symposium [C]. Krakow, Poland: IEEE, 2014. 1 – 9.
- [36] Wu D, Arkhipov D I, Asmare E, et al. UbiFlow: Mobility management in urban-scale software defined IoT [A]. 2015 IEEE Conference on Computer Communications [C]. Hongkong, China: IEEE, 2015. 208 – 216.
- [37] Tootoonchian A, Ganjali Y. HyperFlow: A distributed control plane for OpenFlow [A]. Proceedings of the 2010 Internet Network Management Conference on Research on Enterprise Networking [C]. Berkeley, USA: ACM, 2011. 3 – 3.
- [38] Reitblatt M, Foster N, Rexford J, et al. Abstractions for network update [A]. Proceedings of the ACM SIGCOMM 2012 Conference [C]. Helsinki, Finland: ACM, 2012. 323 – 334.
- [39] 赵慧. 5G 无线接入网络的异构切换技术研究 [D]. 西安, 西安电子科技大学, 2018.
Zhao H. Handoff in heterogeneous radio access networks of 5G [D]. Xi' an, China: Xidian University, 2018. (in Chinese)
- [40] Tran T D, Le L B. Resource allocation for efficient bandwidth provisioning in virtualized wireless networks [A]. 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference [C]. San Francisco, USA: IEEE, 2017. 1 – 6.
- [41] Levis P, Madden S, Polastre J, et al. TinyOS: An Operating System for Sensor Networks [M]. Springer, Germany: Ambient Intelligence, 2005. 115 – 148.
- [42] Chen J L, Ma Y W, Kuo H Y, et al. Software-Defined network virtualization platform for enterprise network resource management [J]. Emerging Topics in Computing, IEEE Transactions on, 2016, 4(2) : 179 – 186.
- [43] Liang C, Yu F. Wireless virtualization for next generation mobile cellular networks [J]. Wireless Communications IEEE, 2015, 22(1) : 61 – 69.
- [44] Pentikousis K, Wang Y, Hu W. Mobileflow: Toward software-defined mobile networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(7) : 44 – 53.
- [45] Zhao Z, Wang J, Guo H, et al. A hierarchical adaptive routing algorithm of wireless sensor network based on software-defined network [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2018, 14(8) : 1 – 15.
- [46] Masood M, Fouad M M, Seyedzadeh S, et al. Energy efficient software defined networking algorithm for wireless sensor networks [J]. Transportation Research Procedia, 2019, 40(7) : 1481 – 1488.
- [47] 费宁, 徐力杰, 成小惠. 基于软件定义无线网络的协作式路由实现和性能分析 [J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(5) : 967 – 976.
Fei N, Xu L J, Cheng X H. Implementation and evaluation of cooperative routing in software defined wireless net-

- working[J]. Journal of Computer Research and Development, 2019, 56(5): 967–976. (in Chinese)
- [48] Huang R, Chu X, Zhang J, et al. Scale-free topology optimization for software-defined wireless sensor networks: A cyber-physical system[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017, 13(6): 1–12.
- [49] Li G, Guo S, Yang Y, et al. Traffic load minimization in software defined wireless sensor networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(3): 1370–1378.
- [50] Yang X, Pan C, Chen M, et al. Distributed resource allocation for mobile users in cache-enabled software defined cellular networks[A]. 2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing[C]. Hangzhou, China; IEEE, 2018. 1–6.
- [51] Zhu Y, Zhang Y, Xia W, et al. A software-defined network based node selection algorithm in WSN localization [A]. Proceedings of 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference[C]. Nanjing, China; IEEE, 2016. 1–5.
- [52] Yu M, Rexford J, Freedman M J, et al. Scalable flow-based networking with DIFANE [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2010, 40(4): 351–362.
- [53] Jagadeesan N A, Krishnamachari B. Software-defined networking paradigms in wireless networks: A survey [J]. ACM Computing Surveys, 2015, 47(2): 1–11.
- [54] Aziz A A, Sekercioglu Y A, Fitzpatrick P, et al. A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime of battery powered wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2013, 15(1): 121–144.
- [55] Haohao Y, Cui D, Feng Y, et al. A movement-assisted software-defined sensor network with NFV support [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2018, 34(2): 156–165.
- [56] Luo S, Wang H, Wu J, Li J, Guo L, Pei B. Improving energy efficiency in industrial wireless sensor networks using SDN and NFV [A]. Proceedings of 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference [C]. Nanjing, China; IEEE, 2016. 6–10.
- [57] 潘春雨. 软件定义蜂窝网中的资源管理技术研究[D]. 北京, 北京邮电大学, 2019.
- Pan C. Research on Resource Management in Software-Defined Cellular Networks [D]. Beijing, China; Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese)
- [58] 赵腾, 王海晖, 彭云, 等. 软件定义无线传感器网络中低控制负载的睡眠调度[J]. 武汉工程大学学报, 2017, 39(5): 488–495.
- Zhao T, Wang H H, Peng Y, et al. Low control overhead-based sleep scheduling for software-defined wireless sensor networks[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(5): 488–495. (in Chinese)
- [59] Alrubaye S, Aulin J. Grid modernization enabled by SDN controllers: Leveraging interoperability for accessing unlicensed band [J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(5): 60–67.
- [60] Zheng S. Research on SDN-based IoT security architecture model [A]. 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference [C]. Chongqing, China; IEEE, 2019. 575–579.
- [61] Giotis K, Argyropoulos C, Androulidakis G, et al. Combining OpenFlow and sFlow for an effective and scalable anomaly detection and mitigation mechanism on SDN environments [J]. Computer Networks, 2014, 62(4): 122–136.
- [62] Khan F I, Hameed S. Software defined security service provisioning framework for internet of things [J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2016, 7(12): 411–412.
- [63] Kalkan K, Zeadally S. Securing internet of things (IoT) with software defined networking (SDN) [J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(9): 186–192.
- [64] Chakrabarty S, Engels D W, Thathapudi S. Black SDN for the internet of things [A]. 2015 IEEE 12th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems [C]. Dallas, USA; IEEE, 2016. 190–198.
- [65] 王睿. 面向软件定义物联网的信任管理及攻击防御机制研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- Wang R. Research on trust management and attack defense mechanisms for software-defined internet of things [D]. Jinan, China; Shandong University, 2018. (in Chinese)
- [66] Olivier F, Carlos G, Florent N, et al. New security architecture for IoT network [J]. Procedia Computer Science, 2015, 52(1): 1028–1033.
- [67] Shin S, Yegneswaran V, Porras P, et al. AVANT-GUARD: Scalable and vigilant switch flow management in software-defined networks [A]. Proceedings of the 2013 ACM SIGSAC Conference on Computer & Communications Security [C]. Berlin, Germany; ACM, 2013. 413–424.
- [68] Chan Y C, Wang K, Hsu Y H. Fast controller failover for multi-domain software-defined networks [A]. 2015 European Conference on Networks and Communications [C]. Paris, France; IEEE, 2015. 370–374.
- [69] Benton K, Camp L J, Small C. Openflow vulnerability assessment [A]. Proceedings of the Second ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking [C]. Hong Kong, China; ACM, 2013. 151–152.
- [70] Kreutz D, Ramos F M V, Verissimo P. Towards secure and dependable software-defined networks [A]. Proceed-

- ings of the Second ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking[C]. Hong Kong, China; ACM, 2013. 55 – 60.
- [71] Detti A, Pisa C, Salsano S, et al. Wireless mesh software defined networks (wmsDN)[A]. 2013 IEEE 9th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications [C]. Lyon, China; IEEE, 2013. 89 – 95.
- [72] Yuan A S, Fang H, Wu Q, et al. OpenFlow based hybrid routing in wireless sensor networks[A]. 2014 IEEE Ninth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing[C]. Singapore, Singapore; IEEE, 2014. 1 – 5.
- [73] Braga R, Mota E, Passito A, et al. Lightweight DDoS flooding attack detection using NOX/OpenFlow[A]. IEEE Local Computer Network Conference [C]. Denver, USA; IEEE, 2010. 408 – 415.
- [74] Yan Q, Yu F R, Gong Q, et al. Software-defined networking (SDN) and distributed denial of service (DDoS) attacks in cloud computing environments: A survey, some research issues, and challenges[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2016, 18(1): 602 – 622.
- [75] Yang X, Han B, Sun Z, et al. SDN-based DDoS attack detection with cross-plane collaboration and lightweight flow monitoring[A]. 2017 IEEE Global Communications Conference[C]. Singapore, Singapore; IEEE, 2017. 1 – 6.
- [76] Huang M, Yu B, Li S, et al. PUF-Assisted group key distribution scheme for software-defined wireless sensor networks[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(2): 404 – 407.
- [77] Wang R, Zhang Z, Zhang Z, et al. ETMRM: An energy-efficient trust management and routing mechanism for SD-WSNs[J]. Computer Networks, 2018, 139(7): 119 – 135.
- [78] 尹达. SDN 环境下 DDOS 攻击检测算法研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2017.
Yin D. Research on Algorithm of DDOS Attack Detection in SDN Environment [D]. Changsha, China; Hunan Normal University, 2017. (in Chinese)
- [79] 汪谦. 基于 SDN 的分布式拒绝服务攻击防范方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
Wang Q. DDoS Defense Mechanism Based on Software Defined Network [D]. Hangzhou, China; Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [80] 贾雪松. 面向 SDN 的入侵防御与取证方法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2018
Jia X S. Research on Intrusion Prevention and Forensics Technology in SDN [D]. Nanjing, China; Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018. (in Chinese)
- [81] Fei N, Zhuang Y, Gu J, et al. Privacy-preserving relative location based services for mobile users[J]. China Communications, 2015, 12(5): 152 – 161.
- [82] Bangash Y, Zeng L, Deng S, et al. Lpsdn: Sink-node location privacy in WSNs via SDN approach[A]. 2016 IEEE International Conference on Networking, Architecture and Storage [C]. Long Beach, China; IEEE, 2016. 1 – 10.
- [83] Luo S, Dong M, Ota K, et al. A security assessment mechanism for software-defined networking-based mobile networks[J]. Sensors, 2015, 15(12): 31843 – 31858.
- [84] Mostafaei H, Menthi M. Software-Defined wireless sensor networks: A survey[J]. Journal of Network and Computer Applications (JNCA), 2018, 119(10): 42 – 56.
- [85] Sood K, Yu S, Xiang Y. Software-Defined wireless networking opportunities and challenges for Internet-of-Things: A review [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(4): 453 – 463.
- [86] 黄美根, 黄一材, 郁滨, 等. 软件定义无线传感网络研究综述[J]. 软件学报, 2018, 29(9): 2733 – 2752.
Huang M G, Huang Y C, Yu B, et al. Software-Defined wireless sensor networks: A research survey [J]. Journal of Software, 2018, 29(9): 2733 – 2752. (in Chinese)
- [87] Salahuddin M A, Al-Fuqaha A, Guizani M. Software-Defined networking for RSU clouds in support of the internet of vehicles [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2015, 2(2): 133 – 144.
- [88] Liu K, Ng J K Y, Lee V C S, et al. Cooperative data scheduling in hybrid vehicular Ad Hoc networks; VANET as a software defined network [J]. ACM Transactions on Networking, 2016, 24(3): 1759 – 1773.

作者简介



陈亮 男, 1991 年 5 月生, 河南浚县人。军事科学院系统工程研究院工程师, 主要研究方向: 网络空间安全, 物联网。
E-mail: yixu199151@sina.com



李峰(通信作者) 男, 1982 年 2 月生, 河南固始人。军事科学院系统工程研究院高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向: 自然语言处理、物联网。
E-mail: li_bopr@126.com