

软件定义无线传感器网络研究综述*

黄美根, 黄一才, 郁滨, 周伟伟

(信息工程大学, 河南 郑州 450001)

通讯作者: 黄美根, E-mail: huang_meigen@163.com



摘要: 研究了分布式无线传感器网络在异构互连和资源管理等方面存在的问题, 深入分析了软件定义网络与无线传感器网络结合的必要性, 在总结大量软件定义无线传感器网络架构后, 给出了通用架构, 并对应用面、控制面和数据面进行了详细阐述. 进一步, 从异构互连、资源管理、可靠控制、网络安全这 4 个方面梳理出当前存在的挑战及相应关键技术, 在此基础上, 通过案例比较说明了软件定义无线传感器网络的优势和前景, 并对未来研究工作进行了展望.

关键词: 无线传感器网络; 软件定义网络; 通用架构; 异构互连; 能量有效

中图法分类号: TP393

中文引用格式: 黄美根, 黄一才, 郁滨, 周伟伟. 软件定义无线传感器网络研究综述. 软件学报, 2018, 29(9): 2733-2752. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5605.htm>

英文引用格式: Huang MG, Huang YC, Yu B, Zhou WW. Software-Defined wireless sensor networks: A research survey. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2018, 29(9): 2733-2752 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5605.htm>

Software-Defined Wireless Sensor Networks: A Research Survey

HUANG Mei-Gen, HUANG Yi-Cai, YU Bin, ZHOU Wei-Wei

(Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In this paper, the problems of distributed wireless sensor networks in heterogeneous interconnection and resource management are studied, and the necessity of combining software-defined networking with wireless sensor networks is analyzed. After summarizing a large number of software-defined wireless sensor networks architectures, a general architecture, in which the application plane, control plane and data plane can be described in detail, is proposed. In addition, the existing challenges and key technologies are laid out from four aspects: heterogeneous interconnection, resource management, reliable control and network security. Furthermore, advantages and prospects of the software-defined wireless sensor networks are illustrated via case comparison, and some future research work is outlined.

Key words: wireless sensor networks; software-defined networking; general architecture; heterogeneous interconnection; energy efficiency

在无线传感器网络(wireless sensor networks, 简称 WSN)的发展历史中, 面向应用精确设计可以很好地满足用户需求, 而分布式部署与运行则可以更好地适应传感监测环境, 这两点是 WSN 获得快速发展和广泛应用的关键^[1,2]. 最近, 具有广阔前景的物联网(Internet of things, 简称 IoT)、信息物理系统(cyber-physical systems, 简称 CPS)等蓬勃发展^[3], WSN 作为其中感知物理世界的关键支撑技术, 在迎来快速发展机遇的同时, 也面临着前所未有的挑战.

* 基金项目: 信息保障技术重点实验室开放基金(KJ-15-104)

Foundation item: Key Laboratory of Information Assurance Technology Open Fund (KJ-15-104)

收稿时间: 2017-11-22; 修改时间: 2018-04-16; 采用时间: 2018-5-23; jos 在线出版时间: 2018-06-07

CNKI 网络优先出版: 2018-06-07 14:53:47, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20180607.1453.007.html>

(1) 互连共享

当前,分布式 WSN 已经独立发展出如 ZigBee^[4],6LoWPAN^[5],WirelessHART^[6]等多种遵循 IEEE 802.15.4^[7]规范的无线通信技术,但相互之间均无法直接连通^[8],难以实现传感数据的快速共享,而这已经逐渐成为阻碍 WSN 在 IoT,CPS 中获得进一步发展的关键。

(2) 高效管理

在当前分布式 WSN 中,传感节点不仅需要处理传感任务,还需要参与路由维护等网络管理任务,因此节点设计日趋臃肿,而这本质上与 WSN 能量受限的特性相冲突,同时使网络管理变得更为繁杂,而这将成为 IoT,CPS 等网络管理中不可忽视的负载,严重制约了 WSN 的应用潜力。

(3) 动态感知

面向具体应用设计的分布式 WSN 较为僵硬,资源管理模式固化,从而无法根据上层应用需求快速进行柔性改变.因此,当前分布式 WSN 无法满足 IoT 和 CPS 对感知物理世界的动态按需传感需求^[9],这也在一定程度上限制了 WSN 的快速发展。

软件定义网络(software-defined networking,简称 SDN)是一种全新的网络体系框架,已被视为未来网络的重要样式之一^[10].网络抽象将控制面从数据面中解耦出来,数据面仅负责路由转发,控制面则实现路由决策,而应用面为用户提供网络可编程服务,从而极大增强了网络的灵活性.OpenFlow 是 SDN 网络体系框架中的南向接口协议,负责提供一系列规范,以实现网络数据流的通用转发和高效操纵^[11].目前,OpenFlow 是应用 SDN 技术的主流,在一定程度上推动了 SDN 的发展.清华大学张朝昆等人对 SDN 体系结构以及数据面、控制面的关键技术进行了详细阐述^[12].左青云等人则具体对 OpenFlow 南向接口协议以及 SDN 各关键组件进行了深入研究^[13].

随着面临的上述 3 点挑战日益严重,分布式 WSN 迫切需要进行变革以更好地满足实际应用需求^[14].SDN 采用基于流的数据转发方式,关注重点是数据的交换和转发^[15],而 WSN 受具体部署传感器类型的制约,本质上是面向数据的^[16],因此,SDN 的快速转发与 WSN 的高效感知正好互补.另外,SDN 通用、灵活和高效管理的特性也恰好可以有效地解决上述挑战^[17].于是,在这样的应用背景和现实需求下,SDN 被引入 WSN,成为下一代 WSN 技术探索的主流,本文将这种网络称为软件定义无线传感器网络(software-defined wireless sensor networks,简称 SDWSN).

2012 年,Mahmud^[18]和 Luo^[19]几乎同时探讨了 SDN 与 WSN 的融合(两者均认为自己最先进进行这项研究),为 SDWSN 的诞生做出了重要贡献.其中,Mahmud 设计的基于 OpenFlow 的传感器 flow-sensor 使传统硬件变为可编程硬件,嵌入式操作系统则由网络操作系统取代,而设备制造商也转变为设备所有者,将原本由硬件定义的 WSN 变为由软件定义的 WSN,共同构成一个支持可编程和定制化的 SDWSN^[18].Luo 则在 OpenFlow 的基础上结合 WSN 应用需求改进提出了 Sensor OpenFlow,旨在对 SDWSN 南向接口协议进行标准化,另外还考虑了与分布式 WSN 的兼容问题^[19].值得一提的是,尽管 SDN 能够极大地促进 WSN 的发展,但 Choi 等人仍然认为当前 SDN 本身还不够成熟,其与 WSN 的结合也还需要进行充分评估后方能得出结论^[20];同时,通过整合 SDN 和 WSN 可以有效优化能量消耗的观点也还值得商榷^[21].然而,Hunkeler 等人则不以为然,通过详细的实验论证,发现集中式管理相比于分布式管理具有更大的优势,体现在传感节点功能简化、网络高效管理和诊断、网络参数配置更合理等方面,因此认为集中式管理可以更好地适应未来 WSN 的需求^[22].目前,这种观点得到了学术界的广泛认同^[23-30].相比于分布式 WSN,SDWSN 具有如下明显优势。

(1) 软件定义支持异构互连

面向异构无线传感器网络,通过基于流的转发方式实现软件定义的数据包路由,而无需传感节点理解复杂的路由协议,在物理层和 MAC 层,则借助软件定义无线电和软件定义 MAC 来定制数据收发行为,从而实现异构网络之间的互连共享。

(2) 集中控制增强网络管理

基于控制转发分离策略,SDWSN 采取集中控制原则,网络管理员可以充分利用控制面维护的网络全局视图来更好地制定管理策略,从而支持远程动态的配置和改变网络状态及传感节点行为,极大地提高资源管理效

率,简化网络管理复杂度.

(3) 架构解耦助力网络创新

通过标准化接口协议来解耦架构各层面之间的依赖性,使相关技术能够独立且快速地发展,同时,结合网络可编程服务构建传感网络实验床,从而极大地方便用户部署及测试新协议或算法,网络创新速度和效率得到明显提升.

本文第1节在对比分析相关 SDWSN 架构的基础上,总结提出 SDWSN 通用架构并进行讨论.第2节重点对当前 SDWSN 存在的挑战及关键技术进行详细阐述.第3节则以消防联动应用案例来具体阐明 SDWSN 的应用优势与前景.最后一节总结全文,并对 SDWSN 未来可能的研究方向进行展望.

1 软件定义无线传感器网络架构

源于 SDWSN 采取集中控制原则,控制面成为架构设计的关键,因此,本文从控制面中控制器部署方式来分类目前学术界在网络架构方面的研究成果.此外,其他分类标准还包括网络部署方式、南向接口协议、网络编程方式、网络可容纳节点数量等.其中,按网络部署方式可分为全新部署架构和混合部署架构:全新部署架构无法与分布式 WSN 兼容,所有传感节点均需要重新部署,适合于新建楼宇、新开发景区等未部署 WSN 的场合;而混合部署架构则支持分布式 WSN 和 SDWSN 共存,更适用于改造现有分布式 WSN 部署的区域.

当前,SDWSN 中控制器部署方式有3种,分别为单控制器部署、水平多控制器部署和层次化多控制器部署,如图1所示.其中,水平多控制器部署和层次化多控制器部署的主要区别在于集中控制的方式:前者多个控制器是以分布式的方式实现逻辑集中,而后者则是从物理上实现集中控制.相对而言,物理集中控制性能较好,但通信代价较大;而逻辑集中控制容错性较高,难点在于保持控制器之间的同步.

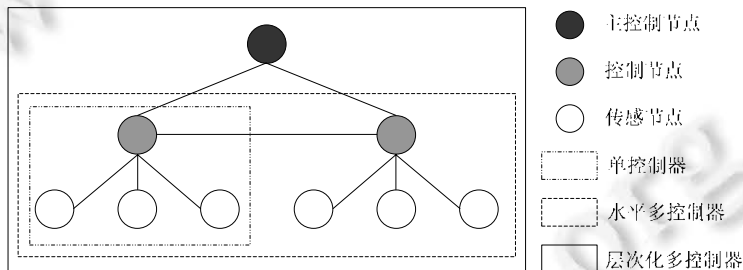


Fig.1 SDWSN controller deployment including single controller, parallel multi-controller and hierarchical multi-controller

图1 包含单控制器、水平多控制器和层次化多控制器的 SDWSN 控制器部署方式

在单控制器部署方式中,Zeng 等人结合云计算提出了一个支持“传感即服务”^[31]的软件定义传感网络 (software-defined sensor networks,简称 SDSN)架构^[32].在该架构中,针对不同传感任务,控制器通过无线重编程技术^[33]对传感节点进行动态重编程,Elon 系统^[34]也通过可替换组件的方式实现了动态修改传感节点代码的功能.随后,作者所属团队进一步在 SDSN 上实现了传感节点角色动态重定义功能^[35],可有效延长网络寿命^[36].另外,Gante 等人提出了在 WSN 基站上实现控制器的通用架构,以增强网络的智能化管理^[37].Jayashree 和 Princy 则将簇头定义为有线网中的交换机,唯一控制器部署于 WSN 基站,旨在节约传感节点能量^[38].

在水平多控制器部署方式中,基于 TinyOS^[39]的 TinySDN 框架^[40]由支持 SDN 的传感节点和 SDN 控制节点组成,其中,SDN 控制节点可以有多个.SDN-WISE 架构^[41]则通过设计拓扑管理层来使多个控制器运行在本地或远程节点上,其是目前唯一开源的架构,下载地址:<https://github.com/sdnwiselab/>.其他相关架构^[42,43]也均采用了水平多控制器部署方式.

在层次化多控制器部署方式中,Han 等人通过在各网络域中设立域中心控制器,并由主控制器采取信息分

发策略对转发节点行为进行控制,首次实现了层次化多控制器结构^[44].软件定义分簇传感网络(software-defined clustered sensor networks,简称 SDCSN)架构^[45]通过在将簇头设定为控制器的同时负责管理各簇,并最终受部署在基站上的中心控制器管理.进一步,为每个传感节点配置一个受中心控制器统一调度的本地控制器,则可以实现更为扁平的层次化多控制器部署^[46].

表1为目前针对SDWSN提出的架构及其主要特点,在此基础上,总结提出软件定义无线传感器网络通用架构如图2所示.

Table 1 Classify multiple SDWSN architectures with controller deployment

表 1 以控制器部署方式分类 SDWSN 架构

控制器部署方式	网络架构	主要特点
单控制器	SDSN ^[32]	支持“传感即服务”和动态重编程
	SDWSN ^[35]	设计了角色生成与递送机制以支持角色动态重定义
	Gante 等人 ^[37]	控制器部署于基站,支持网络智能化管理
	Jayashree 等人 ^[38]	将簇头定义为交换机,节约传感节点能量
水平多控制器	TinySDN ^[40]	基于 TinyOS 设计,采取带内控制方式支持多控制器,减少控制时延
	SDN-WISE ^[41]	采用有限状态机实现了有状态的流表规则,支持网络切片共享,架构源码公开,可同时支持仿真实验与实物实验,支持能量有效
	SDIoT ^[42]	简化 IoT 管理,数据的转发、存储及安全均支持软件定义化
	Li 等人 ^[43]	支持不同层次的应用共享设备、数据和软件等资源
层次化多控制器	Han 等人 ^[44]	通过混合路由机制支持服务质量保证的信息分发,同时优化主控制器的部署位置
	SDCSN ^[45]	基于分簇传感网络设计,将簇头定义为控制器并负责簇内安全管理,以支持“安全网格”概念 ^[47]
	Jacobsson 等人 ^[46]	每个传感节点均配置有一个受中心控制器统一控制的本地控制器,负责启动、重配置和监控可重配置的软件部分,支持能量有效

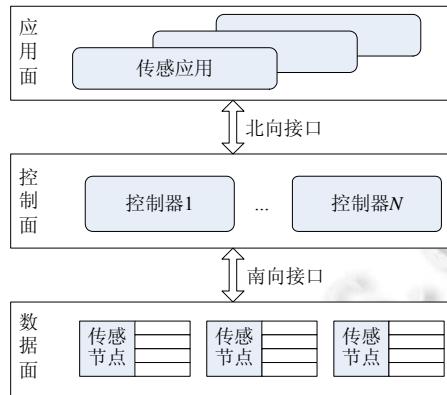


Fig.2 Software-defined wireless sensor networks general architecture

图 2 软件定义无线传感器网络通用架构

与有线网中 SDN 架构类似,架构总体上分为应用面、控制面和数据面.其中,

- 应用面由用户编程实现的各应用(如传感应用)构成;
- 控制面包括逻辑集中的各控制器(可以采取不同的部署方式),通常,这些控制器具有不同功能,如安全控制器、流量控制器等;
- 数据面由各传感节点组成,节点在获取传感数据后,依据控制器下发的转发规则进行数据转发,本身不参与路由决策.

与有线网不同的是:传感节点本身并不是交换机设备,而且可能存在部分传感节点不具备路由功能,因此,数据面管控难度较大.控制面是实现网络抽象的关键,通过南向接口与数据面进行交互,获取传感节点状态和控制传感节点行为,并通过北向接口向应用面提供网络抽象视图,方便用户编程实现所需的网络服务.

需要说明的是:该通用架构主要侧重于原则性和指导性,具有清晰的逻辑层次结构;同时,独立多控制器设计可以有效增强控制面的可靠性,并兼容上述 3 种控制器部署方式。因此,参考该通用架构设计具体应用架构时,可以有效继承上述优点,而难点是需要对各层面、各组件进行详细设计,如控制器、传感节点、北向编程接口等。其中,控制器设计最为关键,其优劣直接影响整个网络性能,如 TinySDN^[40]采取模块化方法对控制器进行了重点研究,以期通过设计控制器服务模块来高效执行 SDN 控制器任务。同时,传感节点设计也不容忽视,其性能直接影响传感效率和节点寿命。在需求可寻址传感网络项目(解释并响应用户抽象传感需求的广域传感网络)的支持下,SDSN^[32]采取基于现场可编程门阵列(field programmable gate array,简称 FPGA)设计了软件定义的传感节点原型,从而支持感知周围环境和用户需求,并结合无线重编程技术动态改变自身角色进行快速适应。该项目最大技术挑战在于使分布式传感节点支持包括物理层和 MAC 层的整个通信协议栈的软件定义化,从而使节点的快速完全重构成为可能。然而,SDN-WISE^[41]则直接基于 TIMAC 协议栈(遵循 IEEE 802.15.4 规范)进行流转发、控制器发现等功能设计,即,简化实现了不完全软件定义的传感节点。

因此,对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及网络部署实际情况,然后针对性选用或开发各层面和组件的实现技术,从而造就了丰富多彩的网络架构。以建设适用于智慧城市的 SDWSN 为例,应用场景需求包括复杂传感应用、高效网络控制、异构传感节点、简洁编程接口等。因此,在通用架构的指导下,SDWSN 控制面需要部署层次化多控制器,且需充分考虑传感应用的复杂性和传感节点的异构性,合理高效分配传感任务,提升传感服务的智慧程度;数据面则有必要支持分域管理模式,以优化网络资源消耗;应用面则需考虑同时接入本地用户和云端用户,并提供无差别服务。此外,控制器间的东西向接口需要重点考虑网络视图同步的效率,而各层面之间的南北向接口在注重编程简洁性的同时,还需重点评估可能存在的安全风险。

在 SDWSN 中,传感节点数据转发采用基于流的方式。其中,流是指一系列具有某些相同性质的数据包,同时,这些相同性质也是控制器制定流转发规则的基础。通常,流转发规则包括匹配规则、动作和计数器等,传感节点上安装的所有流转发规则共同构成了传感节点的流表(功能上等价于路由表)。

在南向接口设计上,大部分架构都采取 SDN 中的 OpenFlow,该协议是面向有线网络的,未充分考虑节点的移动性,通常需要进行合理的改进,以使其可以更好地适应 WSN 应用环境。因此,Nguyen 等人从整合传感节点配置协议的角度提出了 SFlow 南向接口协议^[48],但只进行了概念设计。SDN-WISE^[41]则通过扩展规则匹配域至数据包任意位置,设计并实现了全新的匹配流表。

目前,有线网中的 SDN 北向接口仍然没有标准化,但随着市场对具有统一接口、无状态、自描述等特征的 REST 的认可,因而在北向接口设计中,REST 占有重要地位。文献[49]对北向接口 API 中应用元数据实现自动化编程的相关内容进行了综述。另外,在 SDN 诞生之前,Mottola 和 Picco 在可编程 WSN 中提出了简洁灵活的 SPIDEY 语言^[50],以实现逻辑社区进行快速编程,该语言对 SDWSN 中北向接口设计具有一定的参考价值。

2 挑战及关键技术

目前,学术界针对 SDN 与 WSN 的结合研究仍然处于起步阶段,重在探索 SDN 应用于 WSN 的可行性以及引入的优势,具体的实用化研究并不多见。文献[1]以 SDWSN 架构为核心,综述分析了该架构设计中面临的快速更新、一致性等主要挑战,并从软件定义功能角度出发对技术方案进行了分类,侧重于孤立的 SDWSN。而源于 WSN 是 IoT、CPS 中感知物理世界的核心技术,因此本文从 IoT、CPS 等现实应用背景出发,针对互连共享、高效管理和动态感知等基本需求,在 SDWSN 通用架构的指导下,结合 WSN 数据传感和传输等关键特征,分别从异构互连、资源管理、可靠控制和网络安全等 4 个方面来分析 SDWSN 研究中存在的挑战以及相应关键技术,并汇总研究成果如图 3 所示。其中,网络异构互连是下一代网络的基本要求,资源管理的高效是 SDN 的优势所在,可靠控制是集中控制性能的必要保证,网络安全是 SDWSN 广泛应用的前提条件。因此,上述 4 个方面可以基本囊括 SDWSN 两大核心功能——动态高效传感和安全可靠传输,具有较好的代表性。

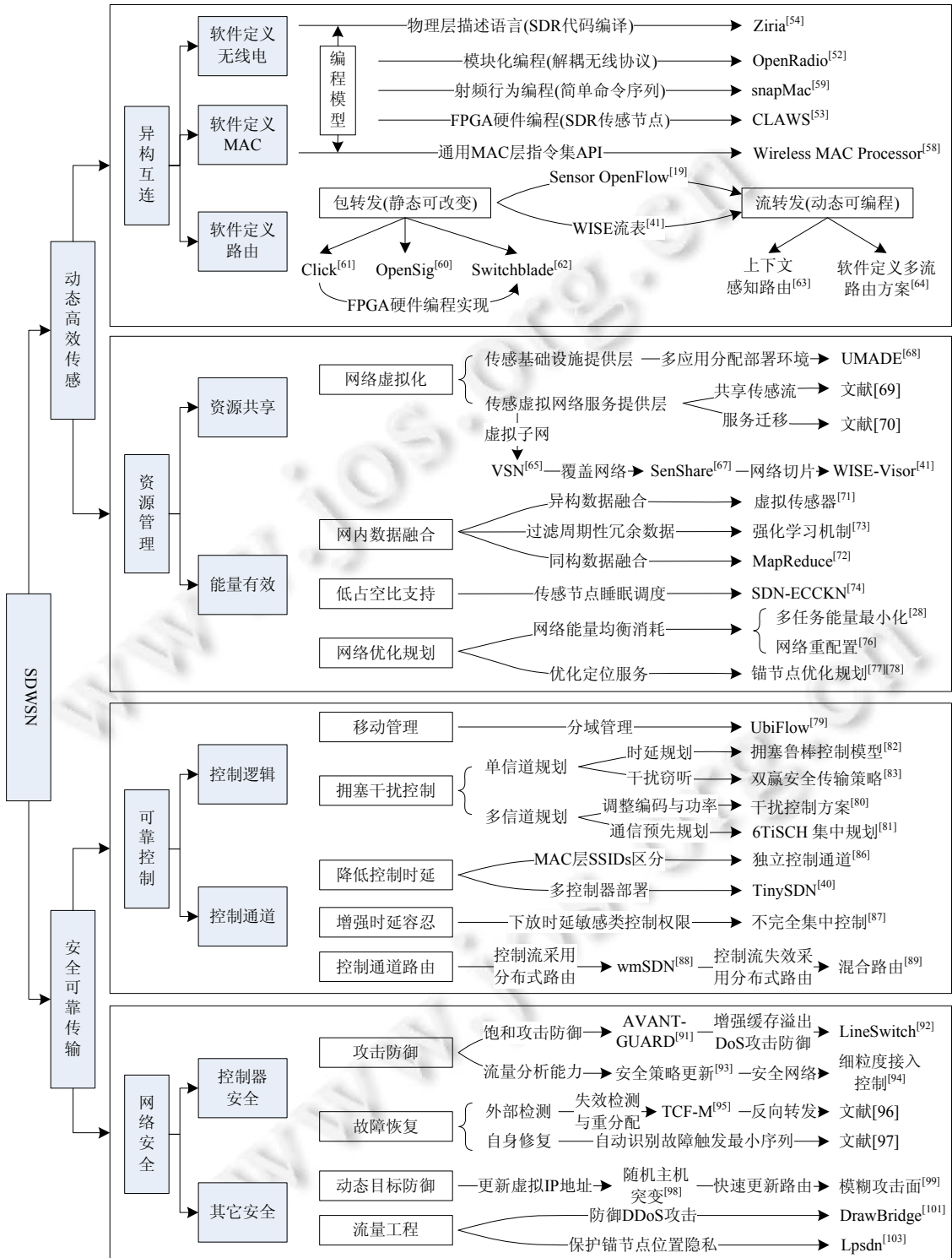


Fig.3 Research summary of software-defined wireless sensor networks

图3 软件定义无线传感器网络研究成果汇总

2.1 异构互连

为满足万物互连共享的需求,面向应用精确设计的分布式 WSN 开始向支持异构互连转变,而这正是 SDN 引入 WSN 的根本原因之一。目前,WSN 的主流实现技术有 ZigBee,6LoWPAN,WirelessHART 等。ZigBee 是当前最为流行的实现技术,低功耗、低成本是其主要优势,应用于楼宇自动化、智能能源等领域;6LoWPAN 通过在 LR-WPAN 中引入 IPv6 来支持海量传感设备的接入,应用领域与 ZigBee 类似;WirelessHART 是一种主要应用于工业领域以实现实时、可靠控制的无线通信标准。这些具体实现技术的底层协议均采用 IEEE 802.15.4 规范,但相互之间却只能通过复杂的桥接设备实现互连,部署灵活性较差,而且运行、维护成本较高。

由于网络可编程是 SDN 的特征之一,因而 SDWSN 与可编程无线网络具有一定的功能重叠,体现在可编程 MAC 和可编程路由等方面。本小节首先介绍通过基于软件定义无线电和软件定义 MAC 实现软件定制化的网络数据包收发行为,然后分析通过基于流的方式实现软件定义路由,而无需传感节点理解相应路由协议,从而实现 WSN 异构设备之间的互连共享。

(1) 软件定义无线电和软件定义 MAC

软件定义无线电(software-defined radio,简称 SDR)指以软件方式实现物理层射频通信中的大部分基础构件,软件定义 MAC 则指采用软件定义方式实现通用的 MAC 层协议,两者极大地促进了可编程无线设备的发展。为实现软件定制化的网络数据包收发行为,SDR 与软件定义 MAC 通常同时应用,在同一射频资源上隔离、定制和管理多个无线协议是未来无线网络发展的重要趋势^[51]。

OpenRadio^[52]是一个可编程的无线数据面。通过将无线协议从硬件中解耦并将其划分为处理面(操作面)和决定面(逻辑面),OpenRadio 进一步定义了清晰的模块化编程接口来支持多种异构无线协议,如 WiFi,ZigBee 等。其中,解耦屏蔽了底层复杂性,编程接口则使程序员可以快捷地进行协议实现或优化。这种设计方式与 SDN 的思想具有一定的相似性,但 SDN 注重网络层的数据路由,而 OpenRadio 则更关注物理层和 MAC 层的编程。

CLAWS^[53]是一种自适应无线系统,旨在简化当前新协议或算法验证时所需进行的大量协议栈跨层修改,加速技术创新。在 CLAWS 中,主要创新点在于作者搭建了一种彻底实现 SDR 的传感节点,该节点通过在单个 FPGA 之上运行物理层 SDR 工具和操作系统来实现。基于 FPGA 的方式保证了其独立于硬件平台,实现了软件定义 IEEE 802.15.4 规范,具有较好的通用性。

针对当前 SDR 缺乏高效的编程工具,一种 SDR 编程环境 Ziria^[54]被提出,主要由 Ziria 无线物理层编程语言和优化编译器组成。Ziria 语言是一种面向用户的物理层描述语言,优化编译器负责将用户编写的代码编译成高效的 SDR 代码。

在软件定义 MAC 的早期研究中,文献[55-57]发挥了重要作用。在此基础上,抽象的无线 MAC 处理器(wireless MAC processor)^[58]通过将通用的 MAC 层动作、事件等组建成指令集,并以 API 形式供用户调用,从而实现定制化的 MAC 协议。snapMac^[59]则支持通过简单命令序列来对射频行为进行编程。

(2) 软件定义路由

分布式 WSN 中,路由协议都是经过精确设计后安装到传感节点上,其后通常不再进行改变。显然,这种路由协议灵活性较差,且难以根据用户需求进行快速调整,而软件定义路由正好可以较好地解决这些问题。

在提升路由灵活性的探索上,OpenSig^[60]通过分离控制面与数据面,并设计开放接口来保持两个面之间的通信,缺点在于定义接口的静态性。Click 可编程路由^[61]通过将路由逻辑功能视为模块化的元素,从而支持路由原型的快速实现与部署,但仍不具备动态改变路由的能力。而将可编程路由与 FPGA 等可编程硬件相结合,在一定程度上可增加路由转发面的弹性、扩展性和性能^[62]。

软件定义路由的难点在于网络动态可编程,在传统网络架构中,编程灵活性和路由效率通常难以折衷。SDWSN 舍弃基于数据包的路由转发模式,转而采用基于流的转发模式,从而可以更好地支持网络的动态可编程。Shanmugapriya 等人在应用上下文感知路由模型支持动态路由路径规划的基础上,采用基于策略路由的方式使 SDN 控制器可对 WSN 的路由进行高效控制^[63]。软件定义多流路由方案^[64]基于低干扰信道分配机制提出,通过在逻辑上分离数据面中的控制信道和数据信道,并开发了内置软件模块来增加处理速度,显著地增强了网络路

由性能.

在 SDWSN 南向接口协议方面, Sensor OpenFlow^[19] 基于 OpenFlow V1.3.0 设计, 同时, 考虑到 WSN 的面向数据以及包长度受限, 分别针对采用紧凑型网络地址和连结型属性值对标识地址的 WSN 设计了不同的流规则匹配格式, 可以较好地适应不同 WSN 的软件定义路由需求. 此外, SDN-WISE^[41] 通过有限状态机实现了有状态的数据转发平面. 其中, WISE 数据包采用长度为 10 字节的固定包头, WISE 流表仍然由匹配、动作和计数器等部分组成, 每条流表规则的匹配域最多支持 3 条匹配规则. 因此, 基于南向接口协议, 用户通过编程, 并由控制器对传感节点下发相应流表规则, 即可对传感节点路由行为进行精确控制, 实现彻底的软件定义路由.

通常, 无线通信技术均遵循一定的协议规范, 但由于这些协议规范制定的独立性和应用领域的针对性, 不同 WSN 技术之间难以直接连通, 而 SDWSN 的首要目标即是打破异构技术之间的通信壁垒. 协议栈是协议规范的核心, 因此就协议栈而言, 软件定义无线电旨在按需调制物理层无线信号, 软件定义 MAC 侧重灵活定制 MAC 层协议, 软件定义路由则更关注高效控制网络层数据路由, 三者依次为物理层、MAC 层和网络层的软件定义化. 因此, 如何发展和融合软件定义无线电、软件定义 MAC 和软件定义路由, 实现可以动态满足多种 WSN 协议规范的软件定义协议栈, 支持完全以软件方式实现传感节点的快速重构, 从而有效保证异构 SDWSN 之间的互连共享, 是一个有待深入研究和解决的问题.

2.2 资源管理

在 WSN 中, 传感节点通常由电池驱动, 能量极为有限, 如何以尽可能少的能量消耗来完成尽可能多的任务, 是一个具有挑战性的问题. 动态感知一切的需求使 WSN 承受极大的资源负载, 而 WSN 本身具有的资源则受到客观因素的极大制约, 因此, 高效的资源管理对 WSN 而言十分重要, 是推动其快速发展的重要力量. 本小节从资源共享和能量有效两个方面对 SDWSN 的资源管理进行论述.

(1) 资源共享

资源共享是解决分布式 WSN 面向应用精确设计弊端的主要方法. 网络虚拟化是资源共享的一种主要方式, 指在同一物理网络上运行多个虚拟网络, 相互之间进行逻辑隔离.

在早期的资源共享探索中, 虚拟传感网络(virtual sensor networks, 简称 VSN)^[65] 是针对分布式 WSN 无法支持传感节点等物理资源的高效共享而提出, 由与某一具体应用有关的传感节点构成, 并为构造、使用和维护这些传感节点提供协议支持, 从而动态地满足应用需求, 提高资源利用率.

其后, Islam 等人对 WSN 中的虚拟化研究成果进行了综述, 并指出, 虚拟传感网络可分为传感基础设施提供层和传感虚拟网络服务提供层^[66]. SenShare^[67] 为实现支持多应用并发运行的传感基础设施平台, 在将底层设施与用户应用解耦的基础上建立了覆盖网络的概念, 每个应用在一个包含节点硬件抽象层和专用覆盖网络的独立环境中操作运行, 并提出了应用标识地址(类似于路由层的 IP 地址)来实现数据流的有效隔离; 同时, 通过设计类似于有线网络中 FlowVisor 的 WISE-Visor, 也能够实现 SDWSN 中的网络切片共享功能^[41].

另外, 针对传感基础设施提供层, UMADE^[68] 是一种多应用分配和部署环境, 以实际环境中多个传感节点监控某一环境因素存在较大相关性为基础, 有效解决了基于应用监控质量需求动态分配传感节点的问题. 在传感虚拟网络服务提供方面, 网络虚拟化可以带来巨大优势, 支持在不同 WSN 中建立和共享传感流, 显著增强了网络可达性^[69]. Yi 等人针对 IoT 中大范围接入请求背景下的虚拟数据中心分布式接入问题进行了研究, 通过采取服务迁移策略, 当接入请求数量超过阈值时则自动划分为两个子请求团体, 可明显提高负载平衡能力和资源利用率^[70].

(2) 能量有效

WSN 的特性之一即为能量严重受限, 实现能量有效, 是延长网络寿命的根本方法. 考虑到无线数据收发为主要能量消耗来源, 充分利用现有技术, 如网内数据融合、低占空比支持等, 减少传感节点控制流和数据流的收发, 是减少能量消耗的可行方法.

SDN 可以有效解决 WSN 中的根本问题, 如能量有效、数据融合等^[38]. 本质上, 数据融合的目的就是减少通信成本, 保证能量有效. Kabadayi 等人构建了虚拟传感器概念^[71], 本质上是运行在指定传感节点上的网内数据融

合器,通过融合大量传感数据来间接感知环境中难以直接测量的抽象对象,同时提供清晰的融合规范来简化用户编程,优势在于可以融合不同类型的异质数据,节约网络能量消耗.同时,通过在 WSN 中引入 MapReduce 方法实现网内数据融合功能,也可以明显减少网络通信开销^[72].在该方法中,首先由控制器依据网络全局视图规划出一部分子节点运行 Reducer,同时,所有节点运行 Mapper,然后,通过键值对关联的方式将 Mapper 的传感数据发送至相应的 Reducer,并由该 Reducer 融合后发送至汇聚节点.Huang 等人通过采用强化学习机制来过滤周期性的冗余数据,相比传统 WSN,采用 SDN 思想可以减少数据融合过程中传感节点能量消耗的 20%~35%^[73].

在低占空比支持方面,SDN-ECCKN^[74]是一种 SDWSN 中的传感节点睡眠调度机制,以能量平稳消耗的 K 重邻居连接算法 EC-CKN 为基础,实现了更高效的能量管理,可在相同任务量下提高网络剩余能量水平约 30%,同时有效减少网络孤立节点数量.Tomovic 和 Radusinovic 则认为,未来相当一段时间内,SDWSN 将与分布式 WSN 共存,因此针对部分部署 SDWSN 的目标覆盖问题,设计了能量有效的传感节点激活规划算法^[75],可有效平衡网络能量消耗,防止传感节点过快死亡.

此外,Zeng 等人^[28]针对 SDWSN 运行多任务时的能量最小化,从传感节点是否需要被激活、分配何种传感任务以及目标传感采样率等 3 个方面进行了深入研究,以期在满足传感质量需求的前提下,实现全局最优的网络能量消耗.该方法的缺陷在于其假设一个传感节点在给定时刻仅能执行一个传感任务,而通常,传感节点上的不同传感器连接于芯片的不同 IO 引脚,因此可以同时运行.比如在 ZigBee 节点(CC2530 芯片)上,即可同时运行红外传感器和温度传感器.东南大学沈连丰教授团队针对 SDWSN 提出了网络重配置算法^[76],在满足网络需求的基础上,通过优化节点感知半径、网络拓扑结构以及路由算法等实现网络能量的均衡消耗.其后,该团队还对定位服务设计了中心化的锚节点激活规划方案^[77],可减少每轮定位中锚节点所需消耗能量的 50%左右,显著延长了网络寿命.此外,Zhu 等人也设计了一种能量有效的定位节点选择算法^[78],可以有效增强网络定位性能.

资源管理是网络管理的重要任务,而在资源严重受限的 WSN 中,提高资源管理效率可有效节省网络运营成本,且在一定程度上等价于延长网络寿命.而资源共享和能量有效则正是优化资源管理的两个相辅相成的方面:资源共享是提高资源利用率的重要手段,通过虚拟化方式实现以一虚多,达到“开源”的效果,可显著提升负载均衡等网络服务能力;能量有效则是传感应用的重要性能指标,通过优化能量消耗实现“节流”,对传感节点生存时间具有较大的影响.但源于高效率与低能耗的对立性,SDWSN 的资源管理面临着两难困境:一方面,高效资源管理是 SDN 的重要优势;另一方面,节点能量有限是 WSN 的基本特征.因此,如何权衡 SDN 引入的能量开销和 WSN 获得的高效资源管理优势,是一个值得研究的问题.

2.3 可靠控制

可靠控制是 SDN 集中控制性能的必要保证,也是有效缓解网络管理难度的重要途径.在 WSN 中,难以保证服务质量的无线通信使传感节点从发出请求到收到相应响应所经历的时间即控制时延变化较大,进而增加了可靠控制的难度.从整个控制过程上可以将可靠控制任务划分为控制逻辑和控制通道两部分,前者负责依据控制策略产生控制流,后者则负责控制流的可靠转发.

(1) 控制逻辑

集中控制的优势在于形成网络全局视图,其中网络拓扑是关键,由物理上分布或集中部署的多个控制器构成的控制面需在逻辑上进行集中,即形成一致的网络全局视图.控制器基于网络全局视图可对网络中控制事件通过下发相应控制规则进行快速响应,如移动管理、拥塞避免、干扰控制、流表更新等.

在移动管理中,UbiFlow^[79]是一个针对大量异构无线网络中泛在流控制和移动管理的软件定义 IoT 系统,通过划分为不同 SDN 域,部署相应的域控制器,同时采取分布式哈希方式维持各域控制器之间的一致性.UbiFlow 的移动管理思路为:将与节点绑定的超级控制器作为中介来辅助移交,其中,超级控制器负责维护所有节点与当前连接控制器和前续连接控制器之间的对应关系,极大地提升了异构无线网络中的移动管理性能.

而拥塞与干扰控制方面,Gebremariam 等人针对软件定义移动射频网络的干扰控制问题,提出了高效的资源管理方案^[80],在分配非重叠射频信道的基础上,通过调整编码方案和传输功率,有效减缓了网络干扰.Thubert 等人则认为,合理的资源规划是搭建 6TiSCH 等确定性网络的唯一途径^[81].其中,6TiSCH 架构由能量充足的骨干

网和大量低功耗的无线网络组成,通过对任意相邻节点之间的通信进行预先规划,理论上可以实现网络零干扰和零拥塞包丢失,已广泛应用于工业传感器网络.此外,在将网络拥塞的原因归结为传播时延和外部干扰(从单个设备角度而言,外部干扰等价于增大传播时延)的基础上,一个鲁棒控制模型^[82]被提出,通过将充分性条件形式化为线性矩阵不等式进行规划,可显著缩短网络服务总时间,增大网络产出.而 Wang 等人则考虑到认知无线电传感网络中不可避免的频谱感知错误,制定了一个双赢的安全传输策略^[83],核心思想为:在允许传感节点具有一个较宽松的频谱感知错误概率的前提下,利用物理层手段干扰窃听者来保护目标信道的安全通信.

另外,在流表规则一致性更新方面,有线网络中提出了大量有价值的更新方案,但由于 WSN 存储、计算和通信等资源有限,通常难以直接应用,如存储空间需求较大的两阶段更新机制^[84]、增量一致更新方案^[85]等.因此,综合考虑 WSN 应用的具体环境和任务特征,结合传感数据流具有一定的方向性,重点针对网络局部范围进行一致性更新研究,具有较大的实用价值.

(2) 控制通道

可靠的控制通道是实现控制流可靠转发的基础.SDWSN 控制方式包括带内控制和带外控制,由于带外控制需要构建独立的控制网络,所需成本较大,而带内控制方式尽管是以牺牲控制可靠性为代价,仍然受到重点关注.控制通道的一个关键指标即为控制时延,因此可分别从降低控制时延和增强时延容忍两个角度考虑,提升控制面的集中控制性能.

在降低控制时延方面,当控制流与数据流的传输共用同一无线信道时,控制流便成为了网络的一种负载.因此,Dely 等人基于 IEEE 802.11 规范中 MAC 层的 SSIDs 创建了无线 Mesh 网中逻辑上独立的控制通道^[86].由于 IEEE 802.15.4 规范不支持 SSIDs,因此该方法无法直接应用于 WSN.同时,从缩短控制路径的角度入手,在采用带内控制的基础上,TinySDN^[40]通过部署多个控制器来构建更灵巧的控制通道,大幅减少网络平均控制时延.其他支持多控制器部署的 SDWSN 架构(具体见表 1)均能在一定程度上提升网络控制的可靠性.

在增强时延容忍方面,Jagadeesan 等人认为:在无线信道时变的情况下,控制流的产生和传输必然会引入控制时延,使控制策略执行时可能与当前网络状态不匹配^[87],进而提出可将由自身即可决定的事件的控制权限下放到传感节点,而涉及网络范围内的控制则由控制器进行集中处理.这种不完全的集中控制在一定程度上提升了网络对控制时延的容忍度,但本质上违背了 SDN 的集中控制原则.此外,改进传感节点上数据流失配时即请求控制器下发流表规则的 Packet-in 机制是一条可行的思路.

在控制通道的可靠路由方面,学者也进行了一定的探索.源于分布式路由由缺乏网络全局视图而无法提供最优路由传输服务,而集中式路由则可能存在控制器单点失效,因此,综合两者优势的混合路由思想逐渐诞生. Detti 提出利用基于 OpenFlow 的集中式路由协议来转发数据流,而控制流以及控制失效时的数据流转发均交由 OLSR 等分布式路由协议^[88].而 Yuan 等人则认为,控制流的分布式路由不利于网络全局视图的构建,因而提出仅将分布式路由协议作为集中式路由控制失效时的替代协议,提高了网络控制的可靠性^[89].

逻辑集中控制面性能依赖于控制器对数据面的可靠控制,其中,控制逻辑是核心,控制通道是基础.在控制策略的指导下,针对不同网络控制事件,控制逻辑表现为不同的控制规则,传感节点则依据这些规则执行相应的响应行为,从而使控制逻辑在网络中得到有效支持.控制通道则是实现网络控制消息转发的路径,源于控制消息的极端重要性,可靠性是控制通道不可或缺的指标.此外,转发时延对网络控制事件的响应时效性也具有较大的影响,降低控制时延和增强时延容忍是改善控制通道性能的重要手段.尽管目前主要采取控制通道与数据通道混用的带内控制方式,但通过使部分传感节点专司路由控制消息来实现独立的控制通道,可能在拥塞避免、干扰控制等方面具有更突出的表现.

2.4 网络安全

网络安全是 SDWSN 实用化的前提条件.WSN 分布式控制下,安全威胁即攻击面较大,安全呈现易攻难守的局面,如零日攻击、Sybil 攻击、蠕虫攻击等.而在 SDWSN 的集中控制下,安全威胁也更多地集中于控制器,攻守双方的安全博弈游戏将更加透明,同时,控制器对网络流量的完全操纵进一步增加了安全性,总体而言于防守方更为有利.目前,关注 SDWSN 安全方面的研究较少,考虑到网络架构的继承性,部分 SDN 中的安全成果具有一定

的借鉴价值。

(1) 控制器安全

SDN 集中控制原则必然引入控制器单点失效问题。基于此,针对控制器的安全研究主要从攻击防御和故障恢复两个方面着手,前者研究如何防御控制面饱和和攻击、DDoS 攻击等可能导致控制器失效的安全威胁,后者则研究控制器出现故障后如何快速恢复的问题。

在攻击防御方面,王蒙蒙等人在对 SDN 中的安全模型及机制进行综述的基础上指出,目前较为完善的控制器安全防护策略还没有被提出^[90]。Shin 从控制面与数据面之间的固有通信瓶颈出发,针对控制面饱和和攻击,提出了数据面安全扩展 AVANT-GUARD^[91],通过设计连接迁移模块来动态减少控制面与数据面的交互操作;同时,基于数据面的统计信息引入了启动触发模块,及时将数据面网络状态和负载信息等更新到控制面,从而有效抵御攻击。LineSwitch^[92]则认为,AVANT-GUARD 的连接迁移模块在维护状态时会导致新的缓存溢出 DoS 攻击。因此采取基于 IP 地址识别攻击流的思想,联合 SYN 代理和网络流概率黑名单技术,进一步抑制了控制面饱和和攻击。文献[93]针对重配置无线网络指出:利用 SDN 的流量分析能力可显著提升网络安全性能,如可以高效地检测 DDoS 攻击等;另外,针对新的网络攻击样式也可以通过软件方式实时更新安全防护策略。Flauzac 则从网络接入控制角度来防御网络攻击,首次提出了基于 SDN 的 IoT 安全增强架构^[94]。其中,借鉴安全网格的思想,通过加强域控制器之间安全策略及参数的同步,实现了细粒度的网络接入控制,有效降低了安全威胁。

在故障恢复方面,TCF-M^[95]是一种多域 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形式来检测控制器失效;然后,在综合考虑控制器负载、控制距离等因素的基础上,对失去控制的交换机进行重新分配到正常控制器下,从而快速解决控制器的失效问题。Huang 等人则面向多域农业 SDWSN,针对控制器失效时的数据流转发,提出采取反向转发的思路,保证网络不丢包;而针对控制器恢复后的网络信息更新问题,则采取链路层发现协议来更新网络拓扑,然后由控制器下发相应流表规则重新接管传感节点控制权^[96]。此外,Scott 等人的研究侧重点为控制软件自身的故障修复,针对性提出通过自动识别触发故障的最小输入序列来快速发现并消除故障^[97]。

(2) 其他安全

除控制器安全研究以外,针对 SDWSN 中数据面、网络应用以及控制通道等方面的安全也有少量研究,旨在提升网络安全性能。

在数据面安全研究中,将动态目标防御(moving target defense,简称 MTD)思想应用于 SDN,可以显著提高攻击者的攻击代价^[98,99]。Jafarian 通过在隐藏数据面中主机真实 IP 地址的同时频繁更换虚拟 IP 地址,并由网关节点维护两者的对应关系,进而为相关数据流提供地址翻译服务,有效增大了网络攻击面^[98]。通过 STRIDE 方法进行安全性分析表明,这种方式可以减缓大部分安全威胁^[100]。而 Kampanakis 则通过引入随机化技术来模糊攻击面^[99]。此外,DrawBridge^[101]通过采取流量工程的方法来防御针对数据面终端主机的 DDoS 攻击。

应用安全方面,Ahmad 等人认为,无线网络中的安全控制与管理远比有线网络来得复杂和重要;同时还指出:在结合云服务的基础上,SDN 具备潜力支持按需安全服务^[102]。Lpsdn^[103]可对汇聚节点位置隐私进行保护,出发点为提升 WSN 汇聚节点中的数据安全性,具体操作方式为:通过软件定义方式动态更换数据缓存转发节点,从而主动改变网络流量分布规律,使攻击者分析网络流量时处于被动跟踪状态。因此,当对网络流量操纵进行精心设计时,方案可有效抵抗探测汇聚节点位置的流量分析攻击。

针对控制通道安全,Benton 等人对 OpenFlow 协议进行了详细的安全脆弱性评估,并在此基础上指出,采用 TLS 安全协议的 OpenFlow 安全控制通道存在中间人攻击、网关身份认证、流表安全验证、拒绝服务攻击等威胁^[104]。此外,Kreutz 等人也将控制通道的脆弱性列为 SDN 的重要安全威胁之一,同时指出,可通过多样化技术、动态设备接入、控制器与设备的可信认证等手段来增强安全性^[105]。

SDWSN 的安全研究至关重要,互联网的发展经验指出,忽视安全问题必将为此付出沉重代价。现有的安全研究中,源于集中控制原则,针对控制面的安全增强研究是重中之重。目前,学术界主要从攻击防御和故障恢复等方面着手。值得注意的是,安全增强需建立在性能损失可接受的范围内方具有实用价值。同时,也应该重视应

用面和数据面的安全问题.一方面,控制面与应用面、控制面与数据面之间的可信认证是控制面安全的重要屏障;另一方面,应用面安全和数据面安全也是 SDWSN 安全的重要支撑.此外,安全性能评估是验证安全增强研究价值的重要尺度,是安全研究的重要组成部分,因此,设计 SDWSN 中安全性能评估方案具有较大的研究价值.

3 应用案例

针对当前 SDWSN 研究仍处于发展初期的实际情况,设计消防联动应用案例,并通过对比分析分布式 WSN 和 SDWSN 的事故处理流程及效率,突出 SDN 应用于 WSN 的优势及前景,为 SDWSN 的研究提供一定参考.

3.1 背景介绍

消防联动应用案例如图 4 所示,居民小区部署了基于 ZigBee 技术的智能小区安防监测系统,小区周边公共道路上则部署了采用 6LOWPAN 技术的公共安全监测系统,这两套安全系统均通过互联网连接至政府消防部门,以便发现火警后及时请求救援.消防部门监控中心配备有监控终端和监控服务器,消防车辆配置有智能终端和传感控制节点,前者通过电信基站接入互联网,后者可与公共安全监测系统连通.因此,居民小区、消防部门与消防车辆之间有 4 条基本的信息传输路径,即路径 A 到路径 D,具体见表 2,其中,ZigBee 表示智能小区安防监测系统,6LOWPAN 代表公共安全监测系统.

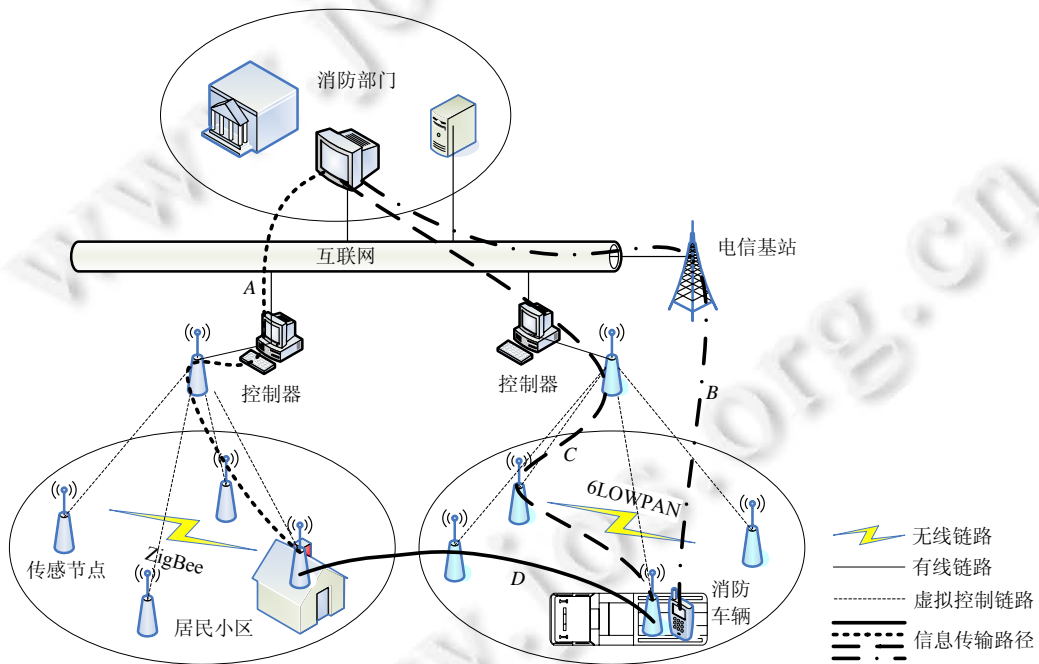


Fig.4 Application case of software-defined wireless sensor networks

图 4 软件定义无线传感器网络应用案例

Table 2 Information transmission path

表 2 信息传输路径

路径标号	通信双方	支撑基础设施	距离
A	居民小区-消防部门	ZigBee、互联网	长
B	消防部门-消防车辆	电信网、互联网	长
C	消防部门-消防车辆	6LOWPAN、互联网	长
D	居民小区-消防车辆	ZigBee,6LOWPAN	短

表 2 中,各传输路径的基础设施网络均不相同,信息调制编码速率等也快慢不一,但考虑到本文为定性分析,

因此假设信息传输时间正比于通信双方的信息传输距离,即:在信息传输时间上,路径 A、路径 B 和路径 C 相等,且远远大于路径 D.现假设居民小区失火,请求消防部门出警救援.

3.2 流程对比

案例中,针对居民小区的火灾救援,分布式 WSN 和 SDWSN 的处理流程分别如图 5(a)和图 5(b)所示,其中有向实线为数据流,有向虚线为控制流,相应字母为路径标号.

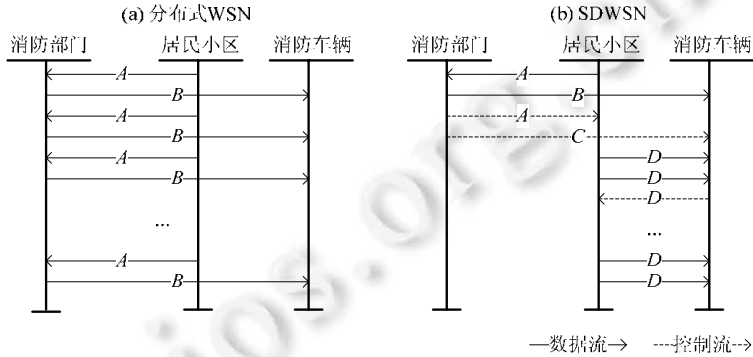


Fig.5 Comparison of case process

图 5 案例处理流程对比

(1) 分布式 WSN 处理流程

- 步骤 1:居民小区失火处传感节点监测到火情后,通过路径 A 向消防部门报警;
- 步骤 2:消防部门通过路径 B 向消防车辆下达救援任务;
- 步骤 3:居民小区失火处传感节点将实时火情状态数据通过路径 A 发送至消防部门;
- 步骤 4:消防部门将火情状态数据通过路径 B 发送至消防车辆;
- 步骤 5:重复步骤 3 和步骤 4,直至火灾救援任务结束.

(2) SDWSN 处理流程

- 步骤 1:居民小区失火处传感节点监测到火情后,通过路径 A 向消防部门报警;
- 步骤 2:消防部门通过路径 B 向消防车辆下达救援任务;
- 步骤 3:消防部门通过路径 A 和路径 C 分别向居民小区和公共道路中相关传感节点下发互连配置命令;
- 步骤 4:居民小区失火处传感节点将实时火情状态数据通过路径 D 发送至消防车辆;
- 步骤 5:消防车辆传感控制节点通过路径 D 向居民小区相关传感节点发送配置命令,以更好地获取火情状态数据;
- 步骤 6:按需执行步骤 5,重复执行步骤 4,直至火灾救援任务结束.

3.3 结果分析

依据上述火灾救援任务处理流程,总结分布式 WSN 和 SDWSN 的消防联动案例结果对比见表 3.

Table 3 Comparison of case results

表 3 案例结果对比

	异构快速互连	灵活高效传感	动态可靠路由
分布式 WSN	不支持	不支持	不支持
SDWSN	支持	支持	支持

SDWSN 在异构快速互连、灵活高效传感以及动态可靠路由等方面相对分布式 WSN 具有更好地表现.其中,异构快速互连得益于 SDWSN 采取软件定义方式(SDWSN 处理流程步骤 3),充分体现了互连共享的优势,而

灵活高效传感和动态可靠路由则源于集中控制方式,有效增强了网络管理能力(SDWSN 处理流程步骤 5),进一步展示了高效管理和动态感知等优异性能.

(1) 异构快速互连

异构快速互连是 SDN 与 WSN 结合的初衷和根本原因,也是案例优势体现的关键,对灵活高效传感和动态可靠路由具有基础支撑作用.

在部署分布式 WSN 的情况下,智能小区安防监测系统和公共安全监测系统均按照自身分布式原则进行管理,无法通过消防部门或消防车辆的配置管理实现两者的直接连通,因此,居民小区的火情状态数据仅能通过消防部门传递到消防车辆上.

而在部署 SDWSN 时,控制面可直接对数据面中传感节点进行快速有效的配置管理.消防部门从监控服务器中获取智能小区安防监测系统和公共安全监测系统的基本信息后,依据相关策略(可由应用面提供)规划出两者互连的最优配置,包括待配置传感节点集合和配置参数集合,最后以控制命令方式下发,从而快速实现两套不同的安全系统之间的互连.

(2) 灵活高效传感

火情状态的灵活高效传感是有效提高现场消防人员救援效率的重要基础,也是面向应用提供按需传感服务的重要体现,包括监测范围和传感精度两个方面.

- 在监测范围上,SDWSN 可以由消防车辆上的传感控制节点进行配置和控制,从而及时将着火区域的传感节点纳入监测范围,甚至可扩展至公共安全监测系统中相关传感节点,一方面,通过扩大传感范围来支持对着火区域的实时跟踪;另一方面,通过调整传感角度或节点位置来快速消除传感覆盖空洞,防止着火区域内部未被传感的情况出现.
- 传感精度主要与传感节点覆盖重数和传感频率有关,覆盖重数和传感频率越高,传感精度就越高.因此,消防车辆中的传感控制节点可对着火区域传感节点进行传感角度和频率的调整,实现对关键部位的重点监控,比如小区幼儿园、配电室、卧室等,为救援人员提供更为精确的辅助信息.

(3) 动态可靠路由

火情状态的动态可靠路由指传感节点监测到火情状态数据后实时更新至消防车辆的过程,是提高火灾救援效率的重要支撑,路由传输的时效性和可靠性是关键.

通过两套安全系统之间的快速互连,火情状态数据直接通过传输时间最短的路径 D 发送,相比其他更新方式,极大地节省了传输时间,同时,也有效节约了传感节点的能量,可为救援人员提供更快速、更持久的信息支持.

考虑到火灾对传感节点的破坏,部分火情状态路由路径可能中断,因此通过动态配置传感节点流表,设计“一主多备”的数据传输路径,并尽量使火情状态数据绕开火灾中心区域,减少路由路径中断概率,在必要时,可实时下发新的流表规则来重置流转发,从而实现更为可靠的火情状态递送.

综上,由消防联动应用案例可以发现,SDWSN 相对分布式 WSN 具有更强的灵活性和适应性.在快速地连通异构无线传感器网络的基础上,通过灵活高效传感和动态可靠路由实现对火情状态采集和传输的全过程高效可靠处理,极大地提升了消防救援效率.因此,SDWSN 可以更好地满足实际需求,应用前景更为广阔.

4 总结与展望

目前,IoT,CPS 等的发展与应用日趋火热,WSN 与 SDN 的结合使感知物理世界的需求可以更好地被满足,针对 SDWSN 的研究也正在如火如荼的进行.因此,本文首先综述了目前学术界诞生的大量 SDWSN 架构,同时,依据控制器部署方式将其分为单控制器部署、水平多控制器部署和层次化多控制器部署这 3 类.在此基础上提出了 SDWSN 通用架构,并分别对应用面、控制面和数据面进行了阐述.然后,结合实际应用背景和 SDN 主要特性,针对动态高效传感、安全可靠传输等 SDWSN 两大核心功能,从异构互连、资源管理、可靠控制、网络安全这 4 个方面对学者的研究成果进行了梳理,并给出了研究成果汇总图.最后,以消防联动案例详细对比分析了 SDWSN 的优势和前景所在.相信在不久的将来,SDWSN 将取代分布式 WSN,迎来快速发展的春天.

目前,有线网络中的SDN技术发展仍不甚成熟,将SDN应用于WSN中所引入的挑战同样也不容忽视,未来SDWSN的研究中以下几个方面可能值得关注。

(1) SDWSN 标准制定

众所周知,标准制定会极大地促进行业发展.SDN技术标准已经得到世界各大标准化组织的关注,如ONF, IETF,ITU,ETSI等^[106].SDWSN作为SDN应用于WSN的实例,SDWSN标准首先应该遵循SDN标准的基本原则,其次也应充分考虑WSN自身的本质特性,最后还需要尽量满足未来发展需求。

(2) 共存过渡方案设计

纵观SDWSN的发展及应用,分布式WSN将与SDWSN在相当一段时间内共存^[107].从市场应用角度考虑,为使SDWSN可以更好地融入市场,降低产业界转型的成本,要求SDWSN发展初期与分布式WSN兼容.因此,研究由分布式WSN向SDWSN的共存过渡方案具有较高的实用价值。

(3) 集中控制程度权衡

WSN中无线链路所引入的通信时延与SDN中时延敏感的可靠控制存在着天然的矛盾^[40,87],因此在SDWSN中,过度的集中控制并不一定能带来网络性能的提升.随着传感节点处理能力的提升,适当将时延敏感且可以下放的控制功能交由传感节点负责,合理权衡控制面的集中控制程度,是一个值得深入探讨的问题。

(4) 网络合作覆盖探索

网络覆盖是网络传感服务质量的重要保证^[28,76].源于支持异构网络互连共享,SDWSN在通过异构网络合作提升网络覆盖性能方面具有较大的潜力.基于此,重点研究如采用ZigBee,6LOWPAN等技术的异构网络之间的合作覆盖策略,关注用户感兴趣的区域,可面向应用提供针对性更强的高质量传感服务。

(5) 网络能量供应优化

能量供应是从根本上解决WSN能量受限的重要方法,包括无线充电技术^[26,108]、环境能量收集技术^[109,110]等.然而,受限于应用环境和部署成本,目前传感节点无线充电或太阳能、风能收集等均存在效率较低的缺陷.因此,借助控制面全局视图,SDWSN可以综合考虑能量消耗与能量供应,并可通过环境能量预测、能量消耗及供应规划等方法来实现全网能量收集和传输的最优化,因而值得进一步深入研究。

(6) 网络安全增强研究

当前,互联网安全威胁频现的主要原因在于发展初期对安全问题考虑较少^[111].因此,SDWSN需要尽可能地开展网络安全增强技术研究,将安全作为发展甚至是未来标准化的重要因素.目前,在具体安全技术上,异构网络互连共享下的传感节点接入控制、网络隐私保护以及控制策略冲突检测等方面有待进一步研究。

References:

- [1] Dong W, Chen GL, Cao CH, Luo LY, Gao Y. Towards a software-defined architecture for wireless sensor networks. *Chinese Journal of Computers*, 2017,40(8):1779–1797 (in Chinese with English abstract).
- [2] O’Shea D, Cionca V, Pesch D. The presidium of wireless sensor networks—A software defined wireless sensor network architecture. In: *Proc. of the Int’l Conf. on Mobile Networks and Management*. 2016. 281–292.
- [3] Al-Fuqaha A, Guizani M, Mohammadi M, Aledhari M, Ayyash M. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015,17(4):2347–2376.
- [4] Baronti P, Pillai P, Chook VWC, Chessa S, Gotta A, Hu YF. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards. *Computer Communications*, 2007,30(7):1655–1695.
- [5] Shelby Z, Bormann C. 6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2009.
- [6] Chen D, Nixon M, Mok A. WirelessHART: Real-Time Mesh Network for Industrial Automation. New York: Springer Publishing Company Inc., 2010.
- [7] WG802.15—Wireless Personal Area Network (WPAN) Working Group. IEEE 802.15.4-2003 Standard. New York: IEEE, 2003. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf>
- [8] Costanzo S, Galluccio L, Morabito G, Palazzo S. Software defined wireless networks: Unbridling SDNs. In: *Proc. of the European Workshop on Software Defined Networking*. IEEE, 2012. 1–6.

- [9] Qin Z, Denker G, Giannelli C, Bellavista P. A software defined networking architecture for the Internet-of-things. In: Proc. of the Network Operations and Management Symp. IEEE, 2014. 1–9.
- [10] McKeown N. Software-Defined networking. In: Proc. of the INFOCOM Key Note. IEEE, 2009. <http://infocom2009.ieee-infocom.org/technicalProgram.htm>
- [11] Mckeown N, Anderson T, Balakrishnan H, Parulkar G, Peterson L, Rexford J, Shenker S, Turner J. OpenFlow: Enabling innovation in campus networks. In: Proc. of the ACM SIGCOMM Computer Communication Review. ACM Press, 2008. 69–74.
- [12] Zhang CK, Cui Y, Tang HY, Wu JP. State-of-the-Art survey on software-defined networking (SDN). Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2015,26(1):62–81 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4701.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004701]
- [13] Zuo QY, Chen M, Zhao GS, Xing CY, Zhang GM, Jiang PC. Research on OpenFlow-based SDN technologies. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013,24(5):1078–1097 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4390.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04390]
- [14] Caraguay ÁLV, Peral AB, López LIB, Villalba LJG. SDN: Evolution and opportunities in the development IoT applications. Int'l Journal of Distributed Sensor Networks, 2014,2014(10):1–10.
- [15] Wu WJ, Yao HP, Huang T, Wang LY, Zhang YH, Liu YJ. Survey of development on future networks and industrial Internet. Journal of Beijing University of Technology, 2017,43(2):163–172 (in Chinese with English abstract).
- [16] Nevala C. Mobility management for software defined wireless sensor networks. Mälardalen University, 2016. 1–41.
- [17] Hu F, Hao Q, Bao K. A survey on software-defined network and OpenFlow: From concept to implementation. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014,16(4):2181–2206.
- [18] Mahmud A, Rahmani R. Exploitation of OpenFlow in wireless sensor networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Computer Science and Network Technology. IEEE, 2012. 594–600.
- [19] Luo T, Tan HP, Quek TQS. Sensor OpenFlow: Enabling software-defined wireless sensor networks. IEEE Communications Letters, 2012,16(11):1896–1899.
- [20] Choi Y, Choi Y, Hong YG. Study on coupling of software-defined networking and wireless sensor networks. In: Proc. of the 8th Int'l Conf. on Ubiquitous and Future Networks. IEEE, 2016. 900–902.
- [21] Haque IT, Abu-Ghazaleh N. Wireless software defined networking: A survey and taxonomy. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016,18(4):2713–2737.
- [22] Hunkeler U, Lombriser C, Hong LT, Weiss B. A case for centrally controlled wireless sensor networks. Computer Networks, 2013,57(6):1425–1442.
- [23] Tayyaba SK, Khan NSA, Naeem J, Shah MA, Asim Y, Kamran M. Software-Defined networks (SDNs) and Internet of things (IoTs): A qualitative prediction for 2020. Int'l Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2016,7(11):385–404.
- [24] Ndiaye M, Hancke GP, Abu-Mahfouz AM. Software defined networking for improved wireless sensor network management: A survey. Sensors, 2017,17(5):1031–1062.
- [25] Qadir J, Ahmed N, Ahad N. Building programmable wireless networks: An architectural survey. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014,2014(1):172–202.
- [26] Ejaz W, Naeem M, Basharat M, Anpalagan A, Kandeepan S. Efficient wireless power transfer in software defined wireless sensor networks. IEEE Sensors Journal, 2016,16(20):7409–7420.
- [27] Liu J, Li Y, Chen M, Dong W. Software-Defined Internet of things for smart urban sensing. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9):55–63.
- [28] Zeng D, Li P, Guo S, Miyazaki T, Hu J, Xiang Y. Energy minimization in multi-task software-defined sensor networks. IEEE Trans. on Computers, 2015,64(11):3128–3139.
- [29] Bernardos CJ, De La Oliva A, Serrano P, Banchs A, Contreras LM, Jin H, Zu Niga JC. An architecture for software defined wireless networking. IEEE Wireless Communications, 2014,21(3):52–61.
- [30] Modieginyane KM, Letswamotse BB, Malekian R, Abu-Mahfouz AM. Software defined wireless sensor networks application opportunities for efficient network management: A survey. Computers and Electrical Engineering, 2018,66(2):274–287.
- [31] Perera C, Zaslavsky A, Christen P, Georgakopoulos D. Sensing as a service model for smart cities supported by Internet of things. Trans. on Emerging Telecommunications Technologies, 2013,25(1):81–93.
- [32] Zeng D, Miyazaki T, Guo S, Tsukahara T, Kitamichi J, Hayashi T. Evolution of software-defined sensor networks. In: Proc. of the IEEE 9th Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks. IEEE, 2013. 410–413.

- [33] Gascón D, Bielsa A, Genicio F, Yarza M. Over the air programming with 802.15.4 and zigbee-OTA. 2011. http://www.libelium.com/over_the_air_programming_ota_802-15-4_zigbee/
- [34] Dong W, Liu Y, Chen C, Gu L, Wu X. Elon: Enabling efficient and long-term reprogramming for wireless sensor networks, *ACM Trans. on Embedded Computing Systems*, 2014,13(4):77:1–27.
- [35] Miyazaki T, Yamaguchi S, Kobayashi K, Kitamichi J, Guo S, Tsukahara T, Hayashi T. A software defined wireless sensor network. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Computing, Networking and Communications*. IEEE, 2014. 847–852.
- [36] Bhardwaj M, Chandrakasan AP. Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assignments. In: *Proc. of the Computer Communications (INFOCOM)*. IEEE, 2002. 1587–1596.
- [37] De Gante A, Aslan M, Matrawy A. Smart wireless sensor network management based on software-defined networking. In: *Proc. of the 27th Biennial Symp. on Communications*. IEEE, 2014. 71–75.
- [38] Jayashree P, Princy FI. Leveraging SDN to conserve energy in WSN—An analysis. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Signal Processing, Communication and Networking*. IEEE, 2015. 1–6.
- [39] Levis P, Madden S, Polastre J, Szewczyk R, Whitehouse K, Woo A, Gay D, Hill J, Welsh M, Brewer E. TinyOS: An operating system for sensor networks. *Ambient Intelligence*, 2005,35(1):383–396.
- [40] De Oliveira BT, Gabriel LB, Margi CB. TinySDN: Enabling multiple controllers for software-defined wireless sensor networks. *IEEE Latin America Trans.*, 2016,13(11):3690–3696.
- [41] Galluccio L, Milardo S, Morabito G, Palazzo S. SDN-WISE: Design, prototyping and experimentation of a stateful SDN solution for wireless sensor networks. In: *Proc. of the Computer Communications (INFOCOM)*. IEEE, 2015. 513–521.
- [42] Jararweh Y, Al-Ayyoub M, Darabseh A, Benkhelifa E, Vouk M, Rindos A. SDIoT: A software defined based Internet of things framework. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2015,6(4):453–461.
- [43] Li Y, Su X, Riekkki J, Kanter T, Rahmani R. A SDN-based architecture for horizontal Internet of things services. In: *Proc. of the 2016 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2016)*. IEEE, 2016. 1–7.
- [44] Han ZJ, Ren W. A novel wireless sensor networks structure based on the SDN. *Int'l Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014, 2014(7):1–7.
- [45] Olivier F, Carlos G, Florent N. SDN based architecture for clustered WSN. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*. IEEE, 2015. 342–347.
- [46] Jacobsson M, Orfanidis C. Using software-defined networking principles for wireless sensor networks. In: *Proc. of the 11th Swedish National Computer Networking Workshop (SNCNW 2015)*. 2015. 1–4.
- [47] Flauzac O, Nolot F, Rabat C, Steffene LA. Grid of security: A new approach of the network security. In: *Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Network and System Security*. IEEE, 2009. 67–72.
- [48] Nguyen TMC, Hoang DB, Chaczko Z. Can SDN technology be transported to software-defined WSN/IoT? In: *Proc. of the 2016 IEEE Int'l Conf. on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*. IEEE, 2016. 234–239.
- [49] Sneps-Sneppé M, Namiot D. Metadata in SDN API for WSN. In: *Proc. of the Int'l Conf. on New Technologies, Mobility and Security*. IEEE, 2015. 1–5.
- [50] Mottola L, Picco GP. Logical neighborhoods: A programming abstraction for wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing in Sensor Systems*. IEEE, 2006. 150–168.
- [51] Granelli F, Gebremariam AA, Usman M, Cugini F. Software defined and virtualized wireless access in future wireless networks: Scenarios and standards. *IEEE Communications Magazine*, 2015,53(6):26–34.
- [52] Bansal M, Mehlman J, Katti S, Levis P. Openradio: A programmable wireless dataplane. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking*. ACM Press, 2013. 109–114.
- [53] Van Den Bergh B, Vermeulen T, Verhelst M, Pollin S. Claws: Cross-layer adaptable wireless system enabling full cross-layer experimentation on real-time software-defined 802.15.4. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2014, 2014(1):187–199.
- [54] Stewart G, Gowda M, Mainland G, Radunovic B, Vytiniotis D, Patterson D. Ziria: Language for rapid prototyping of wireless PHY. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. ACM Press, 2014. 357–358.
- [55] Van Dam T, Langendoen K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*. ACM Press, 2003. 171–180.
- [56] Neufeld M, Fifield J, Doerr C, Sheth A, Grunwald D. SoftMAC—Flexible wireless research platform. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking*. ACM Press, 2005. 1–6.

- [57] Steiner RV, Mück TR, Fröhlich AA. C-MAC: A configurable medium access control protocol for sensor networks. In: Proc. of the Sensors. IEEE, 2010. 845–848.
- [58] Tinnirello I, Bianchi G, Gallo P, Garlisi D, Giuliano F, Gringoli F. Wireless MAC processors: programming MAC protocols on commodity hardware. In: Proc. of the Computer Communications (INFOCOM). IEEE, 2012. 1269–1277.
- [59] De Mil P, Jooris B, Tytgat L, Hoebeke J, Moerman I, Demeester P. snapMac: A generic MAC/PHY architecture enabling flexible MAC design. *Ad Hoc Networks*, 2014,17(3):37–59.
- [60] Lazar AA. Programming telecommunication networks. *IEEE Network*, 1997,11(5):8–18.
- [61] Morris R, Kohler E, Jannotti J, Kaashoek MF. The click modular router. In: Proc. of the 17th ACM Symp. on Operating Systems Principles. ACM Press, 1999. 217–231.
- [62] Anwer MB, Motiwala M, Tariq MB, Feamster N. Switchblade: A platform for rapid deployment of network protocols on programmable hardware. In: Proc. of the ACM SIGCOMM Computer Communication Review. ACM Press, 2010. 183–194.
- [63] Shanmugapriya S, Shivakumar M. Context based route model for policy based routing in WSN using SDN approach. In: Proc. of the BGSIT National Conf. on Emerging Trends in Electronics and Communication. 2015. 1–8.
- [64] Manisekaran SV, Venkatesan R. An analysis of software-defined routing approach for wireless sensor networks. *Computers & Electrical Engineering*, 2016,56(11):456–467.
- [65] Jayasumana AP, Han Q, Illangasekare TH. Virtual sensor networks—A resource efficient approach for concurrent applications. In: Proc. of the Int'l Conf. on Information Technology. IEEE, 2007. 111–115.
- [66] Islam MM, Hassan MM, Lee GW, Huh EN. A survey on virtualization of wireless sensor networks. *Sensors*, 2012,12(2): 2175–2207.
- [67] Leontiadis I, Efstratiou C, Mascolo C, Crowcroft J. Sensure: Transforming sensor networks into multi-application sensing infrastructures. In: Proc. of the European Conf. on Wireless Sensor Networks. 2012. 65–81.
- [68] Bhattacharya S, Saifullah A, Lu C, Roman GC. Multi-Application deployment in shared sensor networks based on quality of monitoring. In: Proc. of the Real-Time and Embedded Technology and Applications Symp. IEEE, 2010. 259–268.
- [69] Mahmud A, Rahmani R, Kanter T. Deployment of flow-sensors in Internet of things' virtualization via openflow. In: Proc. of the 3rd Ftra Int'l Conf. on Mobile, Ubiquitous, and Intelligent Computing. IEEE, 2012. 195–200.
- [70] Meng Y, Chen Q, Xiong N. An effective massive sensor network data access scheme based on topology control for the Internet of things. *Sensors*, 2016,16(11):1846–1870.
- [71] Kabadayi S, Pridgen A, Julien C. Virtual sensors: Abstracting data from physical sensors. In: Proc. of the 2006 IEEE 7th Int'l Symp. on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM 2006). IEEE, 2006. 587–592.
- [72] Anadiotis ACG, Morabito G, Palazzo S. An SDN-assisted framework for optimal deployment of mapreduce functions in WSNs. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2016,15(9):2165–2178.
- [73] Huang R, Chu X, Zhang J, Hu YH. Energy-Efficient monitoring in software defined wireless sensor networks using reinforcement learning: A prototype. *Int'l Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015,2015(10):1–12.
- [74] Wang Y, Chen H, Wu X, Shu L. An energy-efficient SDN based sleep scheduling algorithm for WSNs. *Journal of Network & Computer Applications*, 2016,59(1):39–45.
- [75] Tomovic S, Radosinovic I. Energy efficient target coverage in partially deployed software defined wireless sensor network. In: Proc. of the Int'l Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks. 2016. 729–740.
- [76] Shen LF, Zhu YP, Ding ZM, Yan F, Deng SG. Study on network reconfiguration algorithms in software-defined sensor networks. *Journal on Communications*, 2016,37(7):38–49 (in Chinese with English abstract).
- [77] Zhu YP, Yan F, Zhang YY, Zhang R, Shen LF. SDN-Based anchor scheduling scheme for localization in heterogeneous WSNs. *IEEE Communications Letters*, 2017,21(5):1127–1130.
- [78] Zhu Y, Zhang Y, Xia W, Shen L. A software-defined network based node selection algorithm in WSN localization. In: Proc. of the Vehicular Technology Conf. IEEE, 2016. 1–5.
- [79] Wu D, Arkipov DI, Asmare E, Qin ZJ, Mccann JA. UbiFlow: Mobility management in urban-scale software defined IoT. In: Proc. of the Computer Communications (INFOCOM). IEEE, 2015. 208–216.
- [80] Gebremariam AA, Goratti L, Riggio R, Siracusa D, Rasheed T, Granelli F. A framework for interference control in software-defined mobile radio networks. In: Proc. of the Consumer Communications and Networking Conf. IEEE, 2015. 892–897.
- [81] Thubert P, Palattella MR, Engel T. 6TiSCH centralized scheduling: when SDN meet IoT. In: Proc. of the IEEE Conf. on Standards for Communications and Networking. IEEE, 2016. 42–47.

- [82] Hu X, Guo W. Congestion control in wireless software defined networks with propagation delay and external interference: A robust control approach. *Mobile Information Systems*, 2016,2016(1):1–10.
- [83] Wang D, Ren P, Du Q, Sun L, Wang Y. Reciprocally-Benefited secure transmission for spectrum sensing-based cognitive radio sensor networks. *Sensors*, 2016,16(12):1998–2018.
- [84] Reitblatt M, Foster N, Rexford J, Schlesinger C, Walker D. Abstractions for network update. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. ACM Press, 2012. 323–334.
- [85] Katta NP, Rexford J, Walker D. Incremental consistent updates. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking*. ACM Press, 2013. 49–54.
- [86] Dely P, Kassler A, Bayer N. Openflow for wireless mesh networks. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Computer Communications and Networks*. IEEE, 2011. 1–6.
- [87] Jagadeesan NA, Krishnamachari B. Software-Defined networking paradigms in wireless networks: A survey. *ACM Computing Surveys*, 2014,47(2):1–11.
- [88] Detti A, Pisa C, Salsano S, Blefari-Melazzi N. Wireless mesh software defined networks (wmSDN). In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*. IEEE, 2013. 89–95.
- [89] Yuan AS, Fang HT, Wu Q. Openflow based hybrid routing in wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE 9th Int'l Conf. on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*. IEEE, 2014. 1–5.
- [90] Wang MM, Liu JW, Chen J, Mao J, Mao KF. Software defined networking: Security model, threats and mechanism. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2016,27(4):969–992 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5020.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.005020]
- [91] Shin S, Yegneswaran V, Porras P, Gu G. AVANT-GUARD: Scalable and vigilant switch flow management in software-defined networks. In: *Proc. of the ACM Sigsac Conf. on Computer & Communications Security*. ACM Press, 2013. 413–424.
- [92] Ambrosin M, Conti M, De Gaspari F, Poovendran R. LineSwitch: Efficiently managing switch flow in software-defined networking while effectively tackling DoS attacks. In: *Proc. of the ACM Symp. on Information, Computer and Communications Security*. ACM Press, 2015. 639–644.
- [93] El-Mougy A, Ibnkahla M, Hattab G, Ejaz W. Reconfigurable wireless networks. *Proc. of the IEEE*, 2014,103(7):1125–1158.
- [94] Flauzac O, Gonzalez C, Hachani A, Nolot F. SDN based architecture for IoT and improvement of the security. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Advanced Information Networking and Applications Workshops*. IEEE, 2015. 688–693.
- [95] Chan YC, Wang K, Hsu YH. Fast controller failover for multi-domain software-defined networks. In: *Proc. of the European Conf. on Networks and Communications*. IEEE, 2015. 370–374.
- [96] Huang T, Yan S, Yang F, Liu J. Multi-Domain SDN survivability for agricultural wireless sensor networks. *Sensors*, 2016,16(11): 1861–1874.
- [97] Scott C, Wundsam A, Raghavan B, Panda A, Or A, Lai J, Huang E, Liu Z, El-Hassany A, Whitlock S. Troubleshooting blackbox SDN control software with minimal causal sequences. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. ACM Press, 2015. 395–406.
- [98] Jafarian JH, Al-Shaer E, Duan Q. Openflow random host mutation: Transparent moving target defense using software defined networking. In: *Proc. of the Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks*. ACM Press, 2012. 127–132.
- [99] Kampanakis P, Perros H, Beyene T. SDN-Based solutions for moving target defense network protection. In: *Proc. of the 2014 IEEE 15th Int'l Symp. on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM 2014)*. IEEE, 2014. 1–6.
- [100] Tasch M, Khondoker R, Marx R, Bayarou K. Security analysis of security applications for software defined networks. In: *Proc. of the Aintec 2014 on Asian Internet Engineering Conf.* ACM Press, 2014. 23–30.
- [101] Li J, Berg S, Zhang M, Reiher P, Wei T. DrawBridge: Software-defined DDoS-resistant traffic engineering. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. ACM Press, 2014. 591–592.
- [102] Ahmad I, Namal S, Ylianttila M, Gurtov A. Security in software defined networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015,17(4):2317–2346.
- [103] Bangash Y, Zeng L, Deng S, Feng D. Lpsdn: Sink-node location privacy in WSNs via SDN approach. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Networking, Architecture and Storage*. IEEE, 2016. 1–10.
- [104] Benton K, Camp LJ, Small C. Openflow vulnerability assessment. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking*. ACM Press, 2013. 151–152.
- [105] Kreutz D, Ramos FMV, Verissimo P. Towards secure and dependable software-defined networks. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking*. ACM Press, 2013. 55–60.

- [106] Halpern JM. Standards collisions around SDN. IEEE Communications Magazine, 2014,52(12):10–15.
- [107] Tomović S, Radusinović I. Extending the lifetime of wireless sensor network with partial SDN deployment. Telfor Journal, 2016, 8(1):8–13.
- [108] Wei Y, Ma X, Yang N, Chen Y. Energy-Saving traffic scheduling in hybrid software defined wireless rechargeable sensor networks. Sensors, 2017,17(9):2126–2143.
- [109] Kosunalp S. An energy prediction algorithm for wind-powered wireless sensor networks with energy harvesting. Energy, 2017, 139(6):1275–1280.
- [110] Li Y, Shi R. An intelligent solar energy-harvesting system for wireless sensor networks. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2015,2015(1):179–190.
- [111] Quan W, Zhang HK. Future Internet architecture: Research status, hot topics, and development practice. Scientia Sinica Informationis, 2017,47(6):804–810 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [1] 董玮,陈共龙,曹晨红,罗路遥,高艺.面向软件定义架构的无线传感器网络.计算机学报,2017,40(8):1779–1797.
- [12] 张朝昆,崔勇,唐嵩嵩,吴建平.软件定义网络(SDN)研究进展.软件学报,2015,26(1):62–81. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4701.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004701]
- [13] 左青云,陈鸣,赵广松,邢长友,张国敏,蒋培成.基于 OpenFlow 的 SDN 技术研究.软件学报,2013,24(5):1078–1097. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4390.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04390]
- [15] 吴文君,姚海鹏,黄韬,王露瑶,张延华,刘韵洁.未来网络与工业互联网发展综述.北京工业大学学报,2017,43(2):163–172.
- [76] 沈连丰,朱亚萍,丁兆明,燕锋,邓曙光.软件定义传感器网络重配置算法研究.通信学报,2016,37(7):38–49.
- [90] 王蒙蒙,刘建伟,陈杰,毛剑,毛可飞.软件定义网络:安全模型、机制及研究进展.软件学报,2016,27(4):969–992. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5020.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.005020]
- [111] 权伟,张宏科.未来互联网体系的研究现状、热点与探索实践.中国科学:信息科学,2017,47(6):804–810.



黄美根(1990—),男,湖南娄底人,硕士,CCF 学生会员,主要研究领域为无线传感器网络,软件定义网络,网络安全.



郁滨(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为信息安全,无线网络安全,视觉密码.



黄一才(1985—),男,讲师,主要研究领域为无线网络安全.



周伟伟(1990—),男,博士,主要研究领域为无线传感器网络,网络安全.