

武汉大学学报 信息科学版

GEOMATICS AND INFORMATION SCIENCE OF WUHAN UNIVERSITY

智慧城市感知基站:未来智慧城市的综合感知基础设施

陈栋, 张翔, 陈能成

引用本文:

陈栋, 张翔, 陈能成. 智慧城市感知基站:未来智慧城市的综合感知基础设施[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(2): 159–180.

CHEN Dong,ZHANG Xiang,CHEN Nengcheng. Smart City Awareness Base Station: A Prospective Integrated Sensing Infrastructure for Future Cities[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(2): 159–180.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于时空位置大数据的公共疫情防控服务让城市更智慧](#)

Public Epidemic Prevention and Control Services Based on Big Data of Spatiotemporal Location Make Cities more Smart
武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 475–487,556 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200145>

[利用道路网眼实现路网的增量式更新](#)

An Incremental Road Network Update Based on Road Network Meshes
武汉大学学报·信息科学版. 2019, 44(8): 1107–1114 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20170185>

[联合图像与单目深度特征的强化学习端到端自动驾驶决策方法](#)

Reinforcement Learning Based End-to-End Autonomous Driving Decision-Making Method by Combining Image and Monocular Depth Features
武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(12): 1862–1871 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210409>

[可持续城市化与国土空间优化](#)

Sustainable Urbanization and Territorial Spatial Optimization
武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 1–11 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200365>

[“城区”的内涵及空间界定](#)

Connotations and Spatial Delimitation of Urban Area
武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(9): 1370–1377 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200507>



智慧城市感知基站:未来智慧城市的综合感知基础设施

陈 栋¹ 张 翔^{2,3} 陈能成^{1,2,3,4}

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 国家地理信息系统工程技术研究中心,湖北 武汉,430074

3 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,湖北 武汉,430074

4 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

摘 要:感知设备的接入、集成管理与服务是实现智慧城市的首要前提。为了剖析当前智慧城市感知技术的发展和挑战,首先系统性论述了智慧城市感知的需求与复杂性,梳理了智慧城市感知技术体系的发展过程和网络架构;然后在此基础上,针对未来智慧城市感知中泛在接入、可信感知和智慧管理的重要挑战,提出了智慧城市感知基站这一全新的解决方案,论述了智慧城市感知基站作为未来智慧城市综合感知基础设施的重要角色,并从其原型机上介绍了整个系统的运行原理;最后围绕智慧城市感知基站,分析和展望了其在社区场景和应急场景下的应用前景。

关键词:智慧城市;物联网;传感网;自动化决策;数字孪生

中图分类号:P208;TP277;TP872

文献标志码:A

近年来,随着城镇化进程加速,城市的不断扩张带来了人口剧增、资源短缺、环境污染和交通拥堵等典型的“城市病”^[1],成为城市建设与城市管理的难题。为了破解“城市病”带来的窘境,建设智慧城市就显得非常重要^[2-3]。智慧城市是数字城市在智能化^[4-7]时代的拓展与升华^[8-11],其基础是利用新一代的信息通信技术和物联化的方式实现动态感知、实时分析和智慧服务^[12-15]。智慧城市通过获取透明、鲜活和完整的城市信息,并以规范的方式实现数据共享、科学分析和有效利用,从而改善城市居民生活质量,提高城市运作和服务效率^[16-18]。2006年,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》中明确提出了“感知中国”的概念^[19]。2010年和2018年,国家科技部先后部署了“智慧城市”863计划主题项目和“物联网与智慧城市关键技术及示范”国家重点研发专项等前沿项目。2019年,国家先后出台了《智慧城市时空大数据平台建设技术大纲》和《新型城镇化建设重点任务》等政策性文件,明确了建设智慧城市与智慧社会的重要性。

随着智慧城市相关研究的推进,在感知采集设备^[20]、信息服务基础设施^[21]、数据处理分析和行业智慧应用平台等方面取得了一系列成果^[22-24]。特别是在城市感知领域,随着物联网^[25]、泛在计算、边缘智能^[26]和人工智能等新兴技术的发展,相关理论与技术迎来了新一轮的创新契机^[27-30]。智慧城市感知的核心是物联网技术^[31]、云计算的方法和数字孪生的思想与概念^[32]。总而言之,智慧城市将在之前数字城市的基础上,充分利用前沿信息通信技术以及计算方法实现智慧管理和智慧服务^[33-35]。

尽管如此,智慧城市感知服务仍然存在大量亟待解决的问题。例如,当前城市感知服务只掌握数据,忽略了数据来源(包括传感器的类型、通讯协议、感知设备实时健康状态等),缺乏主动控制感知网络物理形态的能力,且新传感器部署后无法即插即用,需要在服务端进行传感器注册等工作。目前来看,可能这些限制并不会显著地影响智慧城市建设运行,但随着城市感知网络愈加复杂,感知资源的种类愈发多样化,人们对高质

收稿日期:2021-05-09

项目资助:国家重点研发计划(2018YFB2100500)。

第一作者:陈栋,博士生,主要从事智慧城市感知服务的研究工作。wuhanclain@hotmail.com

通讯作者:陈能成,博士,教授。cnc@whu.edu.cn

量感知数据的需求也不断提高。因此,实现海量异构传感器的统一接入,感知资源在物理空间的主动协同,以及具备边缘智能的处理能力等,皆为城市感知服务在当下面临的重大问题。

本文首先聚焦智慧城市的综合感知需求、现今广泛使用的智慧城市感知网络以及感知技术体系,综述其发展过程以及典型应用,并指出现阶段智慧城市感知网络的一些技术问题和复杂性给未来智慧城市感知网络部署带来的重大挑战;然后,重点提出智慧城市感知基站的构想^[36],并通过基站原型机对主要功能进行分析;最后,围绕智慧城市感知基站原型机,展望了智慧城市感知基站在智慧城市的多种应用场景。

1 智慧城市感知需求和复杂性

1.1 智慧城市中的感知需求

目前国内外已经构建了一些与智慧城市感知相关的信息系统,并且实现了感知、通信、数据

分析处理与可视化的核心功能^[37-40],如美国麻省理工学院研发的Live Singapore、Urban Sensing,美国国际商用机器公司研发的Smart Rio和Intelligent Operations Center,武大吉奥智慧城市运维平台^[41]和烽火科技的FitIoT城市物联网感知服务方案等。在软件服务层面,它们具备显著的优势,即通过互联网与智能传感器建立通信,能够满足交通、环保和规划等感知业务的需求^[42-45],但是由于缺乏对底层感知硬件资源的统一集成与管理,它们并不是一套完整的面向城市尺度的公共基础设施体系,如缺乏从感知层面实现多种无线电与通信总线的接入^[46-48],导致在现场无法实现智能传感器的即插即用,也缺乏实现感知资源相互访问以及自动协同观测的能力,更不能支持多种业务类型,以打破传统城市感知中的信息孤岛。因此,感知需求在智慧城市的架构中是一项既“基层”又“核心”的需求。本文认为,智慧城市感知需求包含全域感知、精准感知、异构感知和多元感知4个层面的要求^[49-50],如图1所示。



图1 智慧城市的感知需求

Fig.1 Awareness Requirements in Smart City

1)全域感知。全域感知是智慧城市综合感知体系的顶层,它是发展城市数字孪生的基础,也有助于推进智慧城市虚实融合的发展。全域感知将汇聚城市中所有的感知、处理与服务能力,为智慧城市提供全周期、全方位、全要素、全天候的有效感知。

2)精准感知。精准感知决定了数据的可用性。要实现更精确的感知,位于目标观测区域内的各项智能传感器需要实现高密度、高时空分辨率的观测与采集,以提高感知数据的丰度。精准感知不仅对观测数据有严格的约束,同时也要求清晰明确地掌握感知设备的状况信息等。

3)异构感知。智慧城市的异构感知包括平台

异构与协议异构。协议异构是指城市感知中,各类传感器通过无线局域网(wireless local area network, WLAN)、射频识别(radio frequency identification, RFID)、低功耗蓝牙(blueetooth low energy, BLE)、紫蜂(ZigBee)、窄带物联网(narrow band Internet of Things, NB-IoT)和远程无线传输技术(long range wireless transmission technology, LoRa)等网络通信协议^[51-53],将室内外各类基础感知设备联网,并进行全周期、全方位、全要素、全天候的感知。平台异构是指通过空天地感知平台为智慧城市提供全面观测,包括上述不同物联接口协议构成的地面的原位感知站点(地面传感网)、无人测量车、无人船、无人机、卫星遥感、视频网络等。

4)多元感知。在城市感知体系中,除基本的环境参数外^[54-58],对人车物等动态目标的感知也极为重要,这是构成多元感知体系的一部分。对于车辆而言,还需要进行实时驾驶员人脸识别、车辆货物识别以及车辆时空轨迹跟踪等^[59-63]。对人而言,除了身份识别信息外,在智慧社区和智慧医疗中还需要采集和分析人体活动信息,如心电活动、脑电活动和肺循环活动等^[64-65]。这些多领域的感知对象构成了多元化的感知需求^[66-67]。

1.2 智慧城市感知网络的复杂性

当前,在智慧城市的建设中部署了大量功能各异的感知模块,可以基本满足城市中多元化信息获取的需要^[68-71],如图 2 所示。但是如何将城市中多元异构的感知资源进行有效集成和利用,同时运用异构感知资源集成管理、异构感知平台的自动控制、联合观测和边缘智能等方法技术构建互联互通的城市感知服务,是一项复杂且充满挑战的研究课题。



图 2 智慧城市综合感知数据流与感知架构

Fig.2 Perception Datastream and System Architecture of Smart City Integrated Sensing

为此,为了理解智慧城市感知网络的复杂性,本文认为要把握感知观测链上的两个重点环节:

1)通信协议与通信方式。在智慧城市的传感网中具备多样化的智能传感器,在物理场景的部署中,往往会采用不同设备制造商生产的传感器,因此每个设备制造商将根据生产设备的观测物理对象和属性选择不同的通信协议。通信协议是一项复杂的概念,它涉及到接口协议、数据链路层协议、网络协议等方面,只有在通信协议完全一致的情况下,智能传感器才可能组成传感网并实现数据交互和通信。在智慧城市中,智能传感器分为 3 种类型:(1)基于现场总线的智能传感器,如 1-Wire^[72]、RS485/RS232、控制器局域网(controller area network, CAN)、电气与电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 1451 等。(2)无线智能传感器,主要是采用工业、科学与医疗(industrial scientific medical, ISM)免执照无线频段的个人区域网(personal area network, PAN)无线通信接口协议,常见的协议包括 BLE、ZigBee 和 LoRa 等。随着近年来窄带物联网与第五代通信技术的发展,

以 NB-IoT 为首的基于低功耗广域网的无线通信协议也得到了广泛应用^[73],这些通信协议的特点是低功耗、低带宽和低成本^[74-75]。(3)基于传输控制协议/网际协议(transmission control protocol/internet protocol, TCP/IP)的智能传感器,主要是固定宽带网络与移动无线宽带网络,无论采用何种通信链路,不同的智能传感器和数据接收器只有在相同的接口协议下才允许建立通信。允许建立通信并不代表就能实现通信,这还需要上层协议一致,如统一采用 Modbus 协议。因此,智慧城市中通信协议各异的传感器必然为感知网络的建设带来巨大挑战。

2)网络连接。网络连接在智慧城市感知技术中为所有硬件、软件、协议、访问控制和拓扑提供支持,在整个智慧城市的感知观测与服务中起到承上启下的作用。网络架构可以将智能传感器获取的感知数据同步到感知服务中心,同时,智能传感器也能接收来自感知服务中心的请求。现阶段智慧城市建设中,广泛使用了以下 3 种网络连接方式:(1)直接连接;(2)通过中间件实现网络协议转换;(3)通过中间件对数据进行处理

后连接。其中,直接连接是一项最快捷和最基础的通信方式,智能传感器通过互联网建立 TCP/IP 或用户数据包协议(user datagram protocol, UDP)连接后,应用超文本传输协议(hypertext transfer protocol, HTTP)、遥测传输和受限应用协议(constrained application protocol, CoAP)等方式进行连接^[76-77],如图3所示。直接连接需要智能传感器本身具备连接互联网的能力,其优点在于方便简易、能够快速部署,但其缺点也不容忽视,即大量物联网设备通过互联网与感知中心服务器建立直接连接时,高并发请求可能导致设备连接遇到阻塞,感知服务系统可能短暂处于无响应状态,或者服务端处理请求速度降低,这将增加处理延迟与响应时间,降低智慧城市中智能传感器的工作效率。通过中间件实现网络转换的连接方式主要用在 ZigBee、LoRa 或者 BLE 等基于 PAN 的智能传感器网络上。通过在该观测区域安装专用数据收发机以接收该观测区域的智能传感器的感知数据,并通过该数据收发机与远程终端单元(remote terminal unit, RTU)、远

程遥测模块或者协议转换器的连接,使得该区域的感知数据能集成管理并传送至智慧城市感知中心。这种通信模式类似于数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA),广泛用于水利电力工程、机械工程等自动化控制领域。方式(3)的组网原理类似方式(2),在功能上相对于方式(2)增加了数据处理过程,这种方式可在边缘端对采集的数据进行有效的清洗、分析和可视化,在降低网络请求数量与网络连接带宽的情况下,能保证发送到城市感知中心的数据均为有价值的数,减少服务端的数据处理压力。尽管采用中间件连接的方式能有效降低互联网访问和服务器数据处理的压力,但也存在一定限制,比如只能允许一种或者少量物理层协议的统一接入,在协议转换过程中,对数据链路层协议的兼容性也有限。这些限制也导致了现阶段大量物联网设备依然靠传统的互联网方式进行网络连接,会给智慧城市的多元异构感知带来不可预测的网络缺陷。

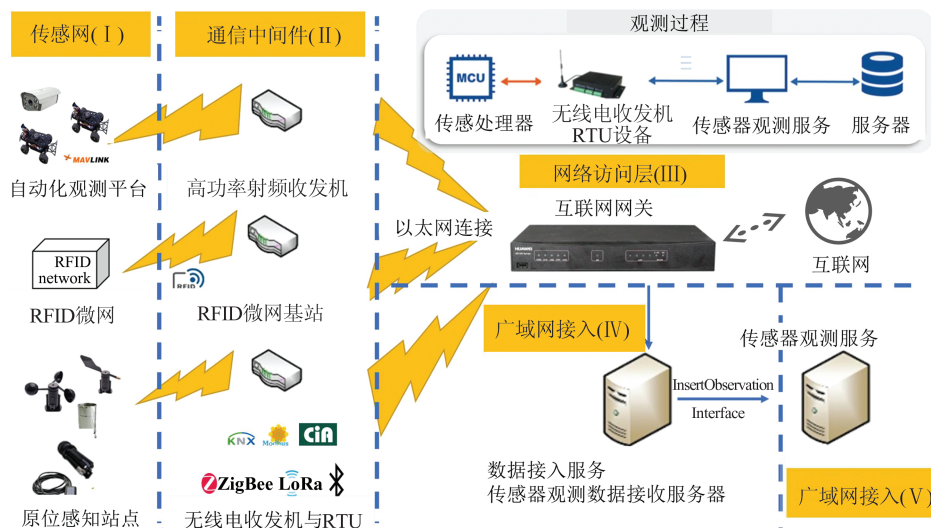


图3 智慧城市传感网的网络架构与观测链

Fig.3 Network Architecture and Measure Chain of Sensor Web in Smart City

2 智慧城市感知技术体系的发展

在过去的半个世纪里,对地观测和智慧城市的科技发展经历了“基于实验的感知体系”“基于传感器的感知体系”以及“基于地理空间传感网的感知体系”,这些观测模式将不断改善城市时空综合感知体系的效率、实时与融合问题。图4对其发展过程进行了简要回顾,并进一步分析了当前地理空间传感网模式下城市感知面临的挑

战以及未来基于智慧城市感知基站的服务方案。

2.1 基于实验的感知体系

在20世纪70年代,科学家们提出“基于实验的感知体系”的模式时,并没有空间信息系统、智慧地球乃至智慧城市的概念,对地球的观测也仅仅是雏形。对于地学的观测和研究,地球科学家一般选择一系列具有代表性的地点进行现场采样或者现场获取观测结果后,将其记录在纸

质档案上^[78-82],并带回样品(或者记录数据)到实验室进行理化分析。基于实验的感知体系虽然具备高精度的感知结果,但是缺点也不容忽视。该感知体系在数据收集、数据处理、数据提取以

及数据发布上都需要大量人力,且选择采样点也严重依赖专家的先验知识,同时,“基于实验的感知体系”发布的数据具有一定的滞后性,并不能满足实时响应的需求。



图 4 地理空间感知体系的迭代与发展过程

Fig.4 Iteration and Development Process of Geospatial Perception System

2.2 基于离散传感器的感知体系

随着计算机技术、电子通信技术与材料科学的发展,人们发明了越来越多的传感器,研究人员通过各种传感器进行自动化探测和测量,通过提出基于离散传感器的感知体系,为对地观测带来了巨大变革。因此,科研人员不需要屡次前往实验场地进行采样和分析,他们部署在现场的原位传感器网络将自动完成测量程序。这些原位传感器包括以土壤温湿度与盐分传感器为例的电学传感器,也包括实现光照观测的光电式传感器和实现地表振动观测的压电式传感器,甚至还有更先进和复杂的传感器,如断层扫描设备、热红外或者多光谱仪、激光雷达等。除了原位传感器网络外,利用遥感技术可以对地表的参数进行大尺度的估测和反演,改善了地面原位传感网存在的空间分辨率低的问题。

基于传感器网络的感知体系不仅仅是依靠更先进的传感器,同时计算机的高效处理和储存技术也为基于传感器网络的感知体系带来了重大贡献^[83-88]。尤其是计算机制图学和空间信息数据库技术,这两项技术被认为是地球科学和空间科学研究的重要突破。此外,计算机建模技术与地理信息系统的更新迭代也促进了空间科学的发展。将传感器观测的数据储存到空间信息数据库,并通过计算机进行分析建模,智慧地球的

雏形也逐渐清晰。尽管基于离散传感器的感知体系能提高观测效率、时空连续性以及全天候全天候的观测能力,但它也存在一些弊端,如无法做到异构数据的统一管理、统一接入、在线处理和高度集成。如何使得这些异构感知平台变得网络化,且具备更强大的边缘智能能力便成为了地球科学与智慧地球研究的发展方向^[89-92]。

2.3 基于地理空间传感网的感知体系

随着地学感知体系的不断发展和完善,智慧地球和数字孪生的愿景也逐渐产生。智慧地球、智慧城市和数字孪生是相辅相成的。在早期,空间信息系统领域的研究人员创造性地将开放地理空间网络引入研究与工程领域,这加速了数字地球的发展^[93-94]。如美国宇航局地球观测卫星的观测数据可提供在线的浏览和分析,同时开放地理空间联盟(Open Geospatial Consortium, OGC)提出并开发了地理标记语言与在线地图服务,美国环境系统研究所(Environmental Systems Research Institute, ESRI)推出了 ArcGIS 服务器和 ArcGIS Online,这些工作都为智慧地球和智慧城市的发展做了大量的前期工作和铺垫。尽管基于 Web 的空间信息服务为存档数据提供了一个在线数据交互平台,但是忽略了实时数据交互能力。在智慧城市乃至智慧地球的发展过程中,通过大量的异构传感器之间的融合协作可提高感

知精确度。可见,地理空间网络服务在智慧城市的建设中只是一项基本的技术。

在地理空间网络服务的框架内,还需要通过大量异构传感器获得实时的环境数据,因此构建传感器网络的需求便应运而生。传感器网络可形成一套复杂的感知资源自适应通信系统,且该系统能在互联网实现传感器资源数据交互。为了构建地理空间传感网,OGC提出了传感器网络使能(sensor web enablement, SWE)的标准^[95-98],其中包括了观测与测量、传感器标记语言和服务模型标准,如传感器观测服务(sensor observation service, SOS)、传感器规划服务(sensor planning service, SPS)和传感器事件服务(sensor event service, SES)等。显然,传感器网络和地理空间网络服务构成的地理空间传感网为对地观测带来巨大的改变,同时也推进着智慧地球的发展。

2.4 地理空间传感感知接入体系的局限性

为了实现城市中多元异构感知平台的统一接入,目前广泛采用的网络架构是以互联网为通信主线的感知数据交互方式,如图5所示。这是一种以广域互联网(wide area network, WAN)为“总线”,通过TCP/IP或UDP协议建立感知资源(智能传感器网络)与服务中心的网络连接,实现

数据的交互。尽管该架构可以解决城市中的空地感知数据各异带来的接入问题,但是碎片化的结构带来的弊端往往被地学以及地理信息科学的研究人员忽略。具体表现为:(1)系统模块分散,缺乏中端和末端的区块管理,同时分散的模块可能采用不同的物理层协议和数据通信协议,因此协议解析将会消耗感知中心的系统资源。该架构是以WAN为骨干,感知中心需要建立大量的IP访问实现感知数据接收。在未来,感知设备的增长速率远远高于淘汰速率,因而随着站点的不断增加,当感知站点的数量达到服务中心承载能力的顶峰时,可能会出现数据延迟(如类似于TCP面向连接协议)、数据上传失败(如类似于UDP非连接协议)等严重的技术问题。(2)基于WAN“总线”的感知网络存在较高的功耗和更高的投资成本,功耗高主要表现在原位站点采用蜂窝数据网络进行通信,通信模块将给感知站点带来较高的功耗。同时,为了保证设备的正常运行,必须加装额外的供电模块,这导致设备体积与成本增加。(3)系统抗物理破坏能力低,在感知端出现异常、网络层出现中断、服务端出现运行异常时,都将会导致数据的完整性降低,引发智慧城市综合感知系统的观测结果可信度受限。

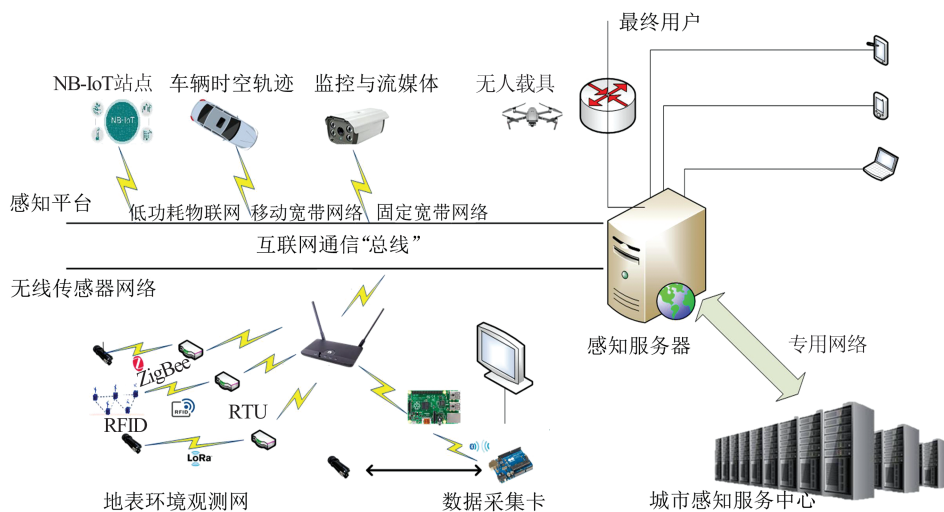


图5 以互联网为通信主线的感知数据交互

Fig.5 Sensing Data Interaction Using Internet as Communication Mainline

近年来,随着物联网技术的发展,以ZigBee、LoRa、BLE等协议为主流的低功耗个人区域网(low-power PAN, LoPAN)在智慧社区、精准农业、智慧城市等场景得到广泛的应用。但是LoPAN使用的ISM免执照频段对无线电功率有严格的限制,导致这些物联网设备的通信范围受限。同时,这些物联网设备在实际应用中依然会

建立大量的网络请求,并产生低数据量的IP服务。在感知服务中心,依然需要为感知设备提供协议解析、数据处理、应用发布等服务的能力。可见这是一种以服务中心为核心的体系架构,且缺乏感知网络双向访问、统一集成、控制与管理的能力。

因此,科研人员和技术人员需要根据上文的综述分析提出一套全新的方案以解决现阶段智

慧城市建设中出现的如下几点问题:(1)城市感知中心仅仅能做到数据的获取(即只掌握数据),但是忽略了数据来源;(2)由于协议等参数不统一导致现场环境下无法实现新传感器的即插即用,需要对前端硬件进行升级改造或者在服务端调试升级;(3)无法主动控制感知网络的物理形态。

3 智慧城市感知基站的构想

本文从未来智慧城市的建设和服务需求出发,结合低功耗物联网、高速无线通信等前沿技术,提出了“智慧城市综合感知基站”的概念。同时“智慧城市综合感知基站”是一项网络物理基础设施,是一种位于城市感知边缘的一体化适配器,通过形成“感知-数据-资源”的即时联动体系,实现按时、按需和精准的感知需求。本节围绕“智慧城市综合感知基站”的主要特征进行分析和介绍。

3.1 感知基站的定义与概念

智慧城市感知基站是一台可实现多种物联网通信协议统一接入且支持混合组网的硬件设施,设备中运行的嵌入式软件将实现感知基站的数据解析与封装。智慧城市感知基站可覆盖约 1 km²的城市街区,实现该区域内感知设备的即插即用,并提供感知数据处理的服务。如移动电话基站可以为覆盖区域内的移动电话提供信号,但相对于传统移动通信基站,感知基站的增量不仅在于能接入多种物联网通信协议,同时也能提供边缘智能与异构感知平台主动协同观测的能力。

考虑到现阶段智慧城市感知服务下的智能传感器普遍建立于以感知服务中心和 WAN 支撑的体系架构,这种体系为智能传感器的统一访问和管理带来了较大的限制和困难。在未来的智慧城市感知网中,大到城市尺度,小到社区和建筑尺度,将会部署各种多元异构的智能传感器,这对现有的技术架构是一种挑战,也是创新的机遇。这项挑战来自于传统的智慧城市感知架构

在高并发场景下引发的网络阻塞,进而带来感知信息延迟与丢失。其创新是提出了一种去中心化的智慧城市感知服务架构。

首先,较传统技术下的智能传感器技术,采用物联网的智能传感器可以在实现设备轻量化、低功耗的同时,兼备即插即用等特性。这些传感器可快速实现高密度大规模的部署,使得城市感知时空分辨率大幅度提升,满足下一代智慧城市的感知需求。城市时空信息感知基站的架构将实现多种物联接口协议的混合组网、自主适配,无需通过互联网建立连接。每个城市感知基站均具备数据处理能力,可以满足街区尺度数据采集和服务需求。城市感知基站采用订阅访问的方式向服务端和街区的最终用户提供服务,并将多组数据以同一个数据包和请求发送到服务端,大幅度降低网络请求次数,提高网络的稳定性,降低服务端数据处理的压力。

3.2 感知基站的主要特征

智慧城市感知基站需要具备如下特性以满足下一代智慧城市综合感知服务的需求。

1)异构传感器的即插即用。在下一代的智慧城市传感网的建设中,智能传感器是智慧城市综合感知的最小单元,也是让城市中万物相连的根基。随着智能传感器的研发热度不断增加,未来在环境监控、生物医疗、城市交通等方面将涌现数以万计的传感器。智能传感器要实现数据的传输与统一接入,必须要实现物联接口协议的统一。物联接口协议包括物理层协议和数据传输层协议,物理层协议是一项电气规范,如 IEEE 802.15.X,它是建立连接的链路协议。常见的物理层协议包括 ZigBee、LoRa、BLE、RFID 等,这些协议的自身特性将决定其在城市综合感知下的应用能力。表 1 针对这些常见的物联网通信协议进行了标准传输距离、传输速度以及应用场景方面的对比,需要注意的是,这些传输距离为城市场景下实测的传输距离,在真实部署时具备参考意义。

表 1 物联网常见通信协议的特性分析

Tab.1 Characteristic Analysis of Common Communication Protocols in Internet of Things

协议类型	标准传输距离	传输速度	需求	应用场景
ZigBee	不超过 1 500 m(增加功放)	小于 250 kbit/s	低功耗、距离有限、速率低	精准农业、智能家居等
LoRa	不超过 3 000 m(增加功放)	可靠速率 37.5 kbit/s	低功耗、距离较长、速率低	智能抄表、环境感知网络等
BLE	不超过 100 m	1 Mbit/s	功耗较低、距离有限、速率较高	医疗电子设备、可穿戴设备
NB-IoT	取决于运营商网络覆盖范围	160~250 kbit/s	低功耗、长距离、大范围、高密度、速率低	智慧路灯、充电桩、智能垃圾桶等
RFID	主动式 RFID 大约为 30 m	有源读写仅 1 600 bit/s	低功耗、近距离、定位与识别	标签识别、智能交通系统等

在智慧城市感知服务中,常见的数据传输协议包括遥测领域的Modbus、Profibus,视频流传输协议实时流传输协议(real time streaming protocol, RTSP),无人机、无人车使用的Mavlink协议等。在智慧城市综合感知服务中,数据传输协议的种类远远多于物理层协议。因此,智慧城市感知基站的首要目标是实现物联接口协议的统一接入与解析。由于物理层协议的接入与解析依赖于硬件模块,目前智慧城市感知基站具备5种通用物理层协议的接入能力,物理层协议的接入能力可通过外部设备互联快速服务(peripheral component interconnect express, PCIe)进行扩展。数据传输协议的解析主要依

赖于软件的支持,因此城市感知基站目前具备十余种数据传输协议的解析能力,后期可通过软件安装或者空中升级的方式提高数据协议解析能力,以满足物联网传感器的统一集成和管理。

2)自适应的接入能力。智慧城市感知基站是一项网络物理基础设施,本文认为其覆盖范围应当参考移动网络的基站,实现街区(社区)尺度下的覆盖能力。在智慧社区中,考虑到人车物等多场景的监测需求,智慧城市感知基站应当具备以千为计数的接入量级,每分钟接收和处理的流量不低于1 024MB。表2为对1 km²的智慧街区的感知数据需求的调研分析。

表2 多场景应用与监测的智慧街区感知需求

Tab.2 Awareness Requirements of Smart Commuality Including Multi-Scenario Application

站点类型	通信技术	覆盖范围	覆盖密度	数据量/(MB·min ⁻¹)
环境感知	ZigBee、LoRa、NB-IoT混合组网	室内外	空间分辨率不低于10 m、 数量不少于100个	不低于1
机器视觉观测	RTSP+LAN	室内外	数量不少于30路@4 K分辨率	不低于6 000
无人载具观测	Modbus、RTSP、无线电与5G移动数据	室外、空中	无人载具不少于5台@1080 P	不低于1 000
人体感知	BLE组建无线体域网(WBAN)、 5G+WLAN遥测数据传输	室内外	同时接入数量不少于300路	不低于100
RFID微网	RFID	室内外	标签数量不少于300个	忽略不计

3)可信赖的计算能力。智慧城市感知基站具备较强的硬件性能是保证计算能力可信的前提。目前,主流的企业级中央处理器(central processing unit, CPU)和具备统一计算设备架构(compute unified device architecture, CUDA)的高性能图形处理器均可满足街区尺度下感知平台的协议解析与观测数据的处理需求。

4)应急场景下的鲁棒性。智慧城市综合感知中的应急场景包括两部分:一是数据处理能力。智慧城市感知基站可实现多元异构感知平台的观测数据融合与处理,通过图像识别、语义分析等方式对潜在的自然灾害以及事故现场进行实时预判,实现智慧城市街区尺度的监测预警与智能决策。二是运行能力。通过内置的应急电源保证城市感知基站在掉电状态依然能维持运转;通过多种无线链路实现混合组网,即使公共电信网络出现中断,城市感知基站在街区尺度下依然能保持指挥、通信、遥测以及回传功能的运行。

可见,智慧城市感知基站作为一项城市中的基础设施,虽然脱离了智慧城市感知服务中心带来的“中心化”的架构,但是更加注重边缘智能与边缘服务。智慧城市感知基站在街区尺度可实

现感知站点的统一接入管理、街区场景的数据处理与计算等,解决了传统智慧城市时空信息服务中数据承载量有限、网络不稳定等因素带来的感知能力缺失的问题。本文将根据智慧城市感知基站的构想,介绍现阶段研发的智慧城市感知基站的原型机。

4 智慧城市感知基站的原型

4.1 整体设计

在国家重点研发专项课题2018YFB2100500的支持下,本文提出了智慧城市感知基站的构想,并研发了原型机^[36]。同时,为了测试智慧城市感知基站的原型机的核心技术指标,验证其能否担当综合感知基础设置的角色,解决多观测和多协议的统一接入问题,本文提出了3个设计目标:(1)城市感知基站应具备多种异构物联接口协议的统一接入与解析能力;(2)城市感知基站作为软硬件融合的设备,能具备网络通信、现场管理、系统控制与识别、数据解析和传输等功能;(3)城市感知基站将成为智慧城市中的网络物理基础设施,是一个边缘化的设备,对感知中心起

到“承上”,对智能传感器起到“启下”的作用。图 6 描述了智慧城市感知基站在城市感知网络中的

定位,对比图 3 发现,采用城市感知基站服务模式的网络架构要比传统观测链精简。

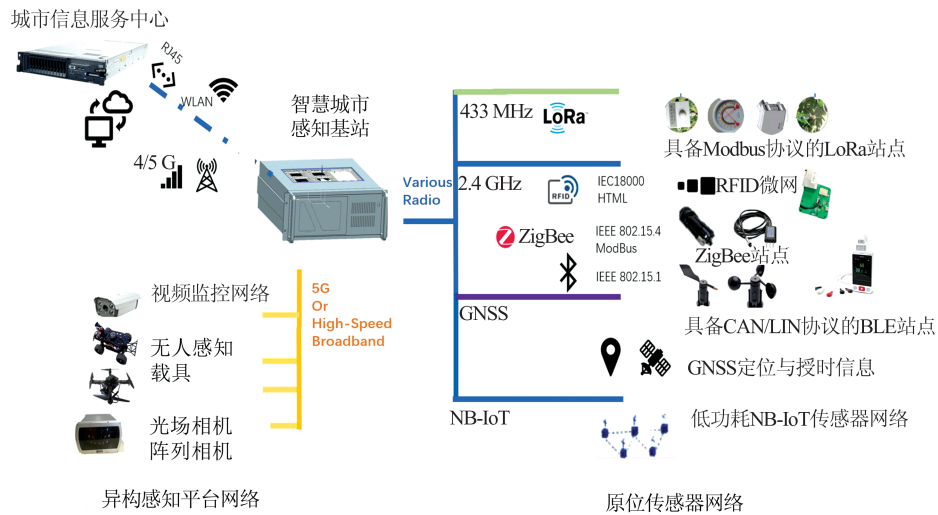


图 6 智慧城市感知基站在城市感知网络中的定位

Fig.6 Location of Smart City Sensing Base Stations in City Sensing Network

智慧城市感知基站是一个全面的、集成的系统,基于SWE国际标准规范,它在智能城市中动态集成了大量异构传感器,并提供边缘计算功能。它实现了不同物联接口协议的统一接入,并避免了采集设备的过度分散。城市感知基站不仅具备不同物联接口协议下智能传感设备的连接能力,还具备数据初步分析和处理能力,并通过OGC接口规范将数据上传到城市感知中心服务器,从而减少了发送到服务器的数据包数量,并确保了稳定性。

4.2 硬件系统

智慧城市感知基站的硬件系统包括电源、计算服务、储存器、无线电收发、网络与人机交互6大核心模块。电源模块为城市感知基站中的硬件提供持续电源供应;计算服务模块可实现协议解析、数据处理、服务建立与感知可视;感知结果将由基站中的储存模块进行临时储存。对于智慧城市感知基站而言,最重要的模块是无线电收发模块、网络模块与人机交互模块,由于人机交互模块属于软件支持范畴,因此将在§4.3中详细介绍。

1)无线电收发模块。无线电收发模块由一块包含信号处理、射频单元、基带与功放的电路构成。城市感知基站的原型机由晶宏科技生产的LQFP44封装的STC15系列单片机构成,并在该单片机上进行二次开发实现数据采集、Modbus协议封装与解析以及数据寄存等功能。在射频与通信上,由于智慧城市感知基站需要实现异构感知协议的接入,因此在无线电收发模块上嵌入

了ZigBee的TI-CC2530F256、BLE的RTL8762 AG、LoRa的AI-Think Ra-02及Nordic nRF51822模块,以实现物联接口通信协议的统一接入。

2)网络模块。网络模块可实现城市感知基站与城市感知服务中心的通信,也为NB-IoT站点或采用5G通信的无人载具提供网络连接。城市感知基站的原型机采用万兆有线网络、第六代无线局域网以及5G通信模块实现城市感知基站的网络通信功能。

3)人机交互模块。感知基站的原型机提供了丰富的用户交互方式,其包括3大部分:第一部分是基于物理硬件的控制,通过控制开关可以直接对无线电收发机实现启停操作,前面板的LED仪表盘显示了当前物理连接状态等信息;第二部分是基于软件的控制,通过触控面板实现感知设备的接入、管理、数据分析等功能;第三部分是数据输出和可视化,嵌入式的人机交互软件与订阅服务均可实现数据的输出与可视化。

4)电源模块。为了保证感知数据的正常收发,智慧城市感知基站通常使用交流电源提供能源。若电网故障导致设备掉电时,系统提供两套电源以保证感知基站的正常运行,在短时间断电的情况下,通过不间断电源系统以保证感知基站与辅助计算单元维持运行;若出现长时间断电,备用低压电源将保证感知基站中的无线电收发机的正常工作,并将无线电收发机获取的数据暂存于非易失性储存器中,待设备恢复供电后,采集的数据将由感知基站进行处理。这种冗余化

设计的电源模块能最大可能地保证感知基站数据收集的完整性与连续性,使得感知数据具备较高的时间分辨率。

5)计算机与储存模块。计算机模块是位于城市感知基站原型机中的X64架构计算机,该计

算机中运行了感知基站的嵌入式人机交互软件。采集的各项数据以及数据产品将保存在城市感知基站的储存阵列中,用户和服务端可订阅需获得的数据。图7中对智慧城市感知基站提供的主要服务与支持进行了图解与剖析。

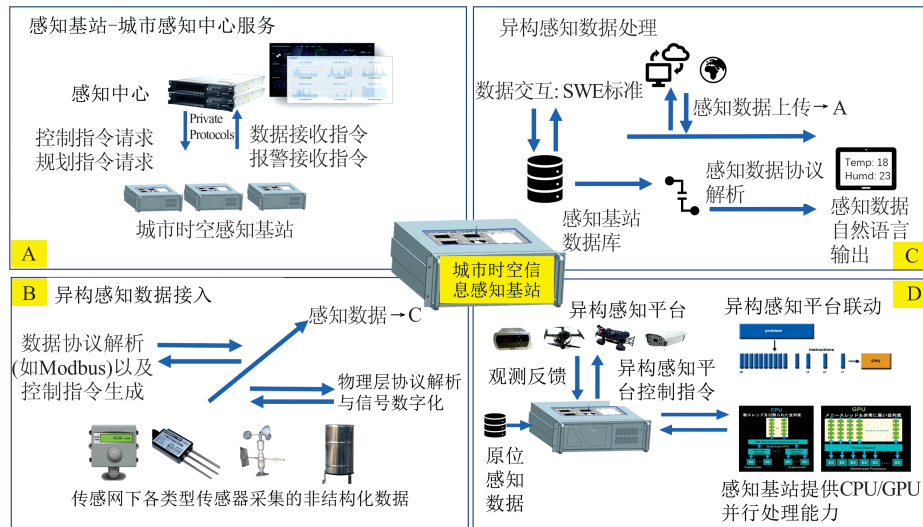


图7 智慧城市感知基站提供的主要服务与支持

Fig.7 Main Services and Support Provided by Smart City Sensing Base Stations

4.3 软件支持

智慧城市感知基站的运转离不开硬件架构的支持,同样需要一套规范化的嵌入式软件以实现感知的相关功能。在智慧城市感知基站的原型设备上,本文部署和运行了一套“城市时空信息网络感知基站系统软件”,该软件基于Java环境开发,整体采用客户端/服务器(client/server, C/S)体系结构,通过互联网实现与外部设备的数据交互,用户可以借助网页端实现对传感器相关信息的查询、浏览。该软件对接入的数据进行统一处理,并将处理后的数据向服务端上传,同时具备接收来自服务端的传感器规划信息的能力。此外,该软件还实现了各类协议传感器的可视化、注册、删除、修改、查询等功能,基本满足不同协议传感器统一接入及管理的需要。软件支持包括以下几个部分:

1)软件逻辑结构

该嵌入式软件采用分层模式,将应用程序按功能划分,提高底层的复用率,包括表现层、业务逻辑层和数据层。这3个层次相对独立,增强了架构的可维护性。表现层主要用于显示数据和接收用户输入的数据,为用户提供一种交互式操作的界面。本系统前端框架采用Vue.js框架向用户展示传感器数据,并结合Cesium向用户展示地

理位置信息,结合Echarts可视化库实现图表数据的展示。在Web端软件中分为信息汇总分析窗口、协议展示窗口、平台展示窗口以及二维平面地图、基于球体的三维可视化展示。业务逻辑层专门负责包装各类应用服务,并向表现层提供用于展示服务的接口。业务逻辑层服务包括传感器控制服务、传感器在线注册服务、传感器数据实时接入服务、传感器检索服务和传感器可视化服务;考虑到应用与底层协议栈的交互,数据层负责存储数据,并与系统进行数据双向传输。数据层中包含10种协议的传感器数据、7类观测平台接入的数据,接入组件的位置数据、卫星轨道数据以及基础地理数据等。

2)模块化功能设计

根据需求分析,软件功能总分为3个基本模块,即协议数据接入模块、协议通用管理模块和可视化模块,功能描述见表3。

3)用户交互界面

本软件界面基于Vue.js框架进行设计,前后端分离以提高开发效率,降低开发难度。通过数据双向绑定和定义组件,丰富并美化界面。界面包括系统主界面、可视化界面等。图8是团队研发的智慧城市感知基站的原型机以及交互界面。

表 3 智慧城市感知基站软件功能模块列表

Tab.3 Software Function Module List of Smart City Awareness Base Stations

模块	功能描述
协议数据接入模块	接收 10 种物联网协议传感器数据,并将其保存至数据库中,10 种协议包括 ZigBee、LoRA、BLE、RFID、NB-IoT、4G/5G、WLAN/LAN、Modbus、RTP/RTSP/RTCP、Mavlink 和蓝牙
协议通用管理模块	提供 10 类物联网协议传感器的接入,包含传感器的注册、实时数据的展示、历史数据的查询、更改传感器信息、删除传感器数据等功能
可视化模块	对系统接入不同协议的传感器数据和平台数据进行总览,统计分析各类数据信息;提供对传感器的设备、位置信息进行二维地图、三维球体地图的可视化展示功能



图 8 智慧城市感知基站原型机的硬件与软件

Fig.8 Prototype Machine with Software of Smart City Sensing Base Stations

4.4 测试分析

为了进一步验证城市感知基站的可靠性,以及城市感知基站是否具备高密度覆盖以及主动协同观测服务的能力,本文在真实场景下开展了城市感知基站原型机的可靠性验证和分析。

4.4.1 测试区域

测试区域位于湖北省武汉市江夏区豹澥街道,在该区域选择了 1 km²的网格街区进行实验,实验场地以及在无人机影像上标记的实验场地部署设备的参考位置如图 9 所示。



图 9 实验场地以及部署设备的参考位置

Fig.9 Reference Location of Deployed Equipments in Experiment Zone

4.4.2 部署设备

为了展开测试工作,实验场地配置了城市感知基站原型机1台、辅助计算单元1台、RFID微网基站2组、蓝牙微网基站1组、LoPAN(含LoRa与ZigBee)原位感知站点10组、NB-IoT原位感知站点30组、RFID微网传感器14组、BLE生物传感器2组、无人测量载具3个以及RTSP视频采集相机4路,在服务中心配置Web服务器

1台。通过上述配置产生真实场景的观测数据后,可对城市感知基站的感知接入、数据处理功能、数据上报与订阅等进行基本验证。但是这并不能对城市感知基站的最高负荷与承载能力进行测试,因此,最高负荷与承载能力测试采用配置了Jmeter的压力测试设备进行。本次压力测试中采用的软硬件实测环境以及测试工具描述见表4。

表4 感知基站承载能力测试环境与工具

Tab.4 Environment and Tool of Load Capacity Test for City Awareness Base Stations

测试环境与工具	终端	描述	数量
硬件环境	Elasticsearch: 感知基站	CPU:E5-2620v3@2.4 GHz, 12核, 128 GB内存 网络地址: 172.15.20.1	5
	应用服务器: 辅助计算单元	CPU:E5-2620v3@2.4 GHz, 12核, 128 GB内存 网络地址:172.15.20.2	
	Jmeter压测机:PC 02-04	CPU:i5 3.40 GHz, 4核, 8 GB内存 网络地址:192.168.31.xx	
软件环境	Elasticsearch: CentOS7	感知基站: Elasticsearch 5.6.12	5
	辅助计算单元: CentOS7	应用服务: Tomcat8.5, Kafka_2.11-2.2.0	
测试工具	Jmeter压测机: Windows 7, Windows 10, CentOS7	压测: Jmeter 3.2	2
测试工具	Apache Jmeter 3.2	负载测试工具, 虚拟在线用户, 实时性能监测, 测试结果分析和记录	2
	Firebug 2.0.13	记录用户处理事件时间以及请求内容	

4.4.3 主要监控指标与结论

1) 异构感知设备接入情况。这是一项关于软硬件系统的测试,考虑到测试需要依据相应的国家标准,本文依据GB/T25000, 51—2016《系统与软件工程系统与软件质量要求和评价(SQuaRE)》第51部分:就绪可用软件产品(RUSP)的《质量要求和测试细则》,以

黑盒方式完成相关测试。该设备的异构感知设备接入能力与情况见表5。该项测试由具备实验室认可合作组织多边相互承认协议(iLac-MRA)资质,且同时具备中国认可国际互认检测(Testing CNAS)资质的第三方机构根据《中华人民共和国计量法》进行强制检测。

表5 异构感知设备接入能力与接入情况

Tab.5 Heterogeneous Sensing Device Access Capability

模块名称	设备名称/功能	配置说明	通信地址	接入状态
基础硬件环境	CPU: Intel(R)Core(TM) i5-9600KF 内存: 24 GB DDR4	CPU具备3.7 GHz的主频以及6核心/ 线程的处理能力	192.168.1.104	可用
基础软件环境	GPU: NVIDIA GeForce RTX2060Ti 操作系统: Windows 10 数据库系统: MySQL 5.7 运行环境: Internet Explorer 11	—	—	—
内外网络环境	内用网络环境: 武汉大学校园网 外用网络环境: 中国电信5G	采用Huawei AR651, Huawei CPE Pro2 无线数据终端进行数据收发	公网地址	可用
无线电收发模块	ZigBee: TI CC2530 SoC LoRa: AI-Thinker Ra-02 SoC BLE: RealTek RTL8762A BLE RFID: nFR51822 2.4 GHz RF SoC	—	计算机通讯端口 (COM)	可用

2) 负载测试场景测试结果。为了确保城市综合感知基站的服务端及软件具备观测数据的高效接入能力(即单节点每秒接入点观测数据超过 10 000),且支持百万级规模传感器的管理,根据 GB/T25000,51-2016《系统与软件工程系统与软件质量要求和评价(SQuaRE)》第 51 部分:就绪可用软件产品(RUSP)的《质量要求和测试细则》,对系统进行性能需求分析后,完成压力测试。

系统主要通过接入服务接口进行数据收发,平均每一次的数据收发均为单个传感器的一次请求,因此要求实时吞吐量大于 10 kbit/s。通过构建表 4 的软硬件实测环境以及测试工具,根据

相关规范制定了性能监控指标范围,期待测试结果(模拟传感器通过接口向服务器发送观测数据)与实际测试结果见表 6。监控指标的说明如下:(1)内存:内存是确定系统瓶颈的第一个步骤;(2)CPU:排除内存因素后如果计数器的值比较大,同时网卡和硬盘的占用率低,那么可以确定是 CPU 瓶颈;(3)数据收发:判断网络连接速度是否存在瓶颈,该计数器值和网络带宽的比值不高于 50%;(4)磁盘驱动器长时间处于忙状态且使用率持续大于 85%,说明存在磁盘瓶颈和内存问题。通过运行测试脚本模拟传感器向感知基站发送观测数据,完成模拟压力测试。由观测结果可知,各项指标均可达到预期水平。

表 6 软件性能测试的期待结果与实测结果

Tab.6 Expected Results and Actual Results of Software Test

预期测试阈值	实际测试数值	测试结果
接入服务接口吞吐量:不低于 10 000 次/s	3 台压测机吞吐量分别是: 19 384.5 次/s、24 295.6 次/s 和 33 506.5 次/s	通过
支持管理传感器数量:百万级规模	3 台压测机请求数量分别是: 11 631 617 次、14 577 616 次 和 20 103 932 次	通过
接口请求成功率:100%	无请求失败情况	通过
感知基站的 CPU 平均使用率:≤95%	感知基站:38.72%;辅助计算单元:72.78%	符合预期
感知基站的内存平均使用率:≤95%	感知基站:12.53%;辅助计算单元:26.91%	符合预期

5 城市感知基站的应用和展望

全球科技的发展从第一次工业革命到今天的工业 4.0,实现了工业制造设备的数字化与万物相连^[99-101]。在此基础之上,未来的智慧城市将聚焦到整体“巨系统”,但设施“边缘化”。在物联网数据终端、数据互联互通、展示中心与服务和城市基础设施的引导性发展下,城市新型基础设施也是未来智慧城市的发展方向之一。最终,未来的智慧城市将围绕数字孪生发展,从基础建设领域的建筑信息模型(building information modeling, BIM)到地理信息系统(geographic information system, GIS)再到数字孪生^[102-105],以及城市中的人机融合,将城市中的实体与居民构建的物理世界和数字化的世界进行孪生化。这将导致设备面临着缺乏统一接入能力、缺乏统一数据标准规范、网络复杂度不断上升、数据分析与计算量呈指数增加等挑战^[106-108]。本文提出的城市感知基站是一项定位于地球空间感知与物联网领域的时空信息网络物理基础设施,就目前而言,其优势包括如下 3 点:

1) 改变了传统模式下以城市感知服务中心为核心的服务框架,强化了边缘端和城市感知基站的应用与服务,将基层数据的采集与分析交由城市感知基站处理,可大大降低城市感知中心的服务压力,提高整体系统的鲁棒性。

2) 改变了传统网络架构下“端对端”的服务模式,采用了以感知基站为中心的“承上启下”服务模式,感知基站接收与处理覆盖范围内的观测数据,通过解析、订阅、访问、按需推送的方式提供街区尺度的时空信息感知服务。

3) 改变了传统模式下只掌握数据不掌握来源、无法主动控制感知网络物理形态和新的传感器无法真即插即用的问题,采用城市感知基站后可以避免上述问题,从根本上解决了感知设备之间带来的信息孤岛,整体感知服务能力受限的问题。

5.1 基于感知基站的智慧社区建设与运营

传统的智慧社区能做到传感器感知数据的可视化,以及人、车、物识别与统计等基础信息服务,但是这些信息服务是由单一传感器或者是传感器组获取到的,不具备主动协同观测的能力。在未来的智慧社区观测场景中,人、车、物的联合

观测以及多感知设备协同观测的意义非凡。将城市感知基站作为智慧社区感知的协同中心,结合去边缘化的智能传感器网络,本文以智慧社区与智慧交通为示范场景进行展示。

1) 室内外小场景的精确感知。随着社会的发展,中国已经步入老龄化社会,空巢老人的养老问题已经成为一个泛在的社会问题^[109],如何从智慧城市和智慧社区的角度解决该方面的问题仍然是未来的一项重要研究。空巢老人的精确感知,不仅要考虑感知信息的精准度,还需要考虑到对用户隐私的主动式安全保护等方面。通常来说,空巢老人的健康监护方面会涉及到心电图、心率、血氧饱和度、呼吸^[110]、血压、生命活动、跌倒等方面的观测参数,其所需传感器包括心电图、血氧饱和度、肺活动传感器^[111]、血压传感器、

皮肤电活动传感器^[112]、加速度传感器等,因此实时获取和感知的数据相当庞大。在过去采用“端到端”的网络架构,高并发的用户实时数据被发送到城市感知中心(智慧城市健康平台等),对网络服务来说是一项巨大的考验。在采用了城市感知基站后,感知数据将被发送到城市感知基站,并经过处理、提取与分析等过程。通过订阅与推送,终端用户、网格员、社区卫生所等单位可以直接通过该街区的城市感知基站得到数据,提高管理效率。考虑到某些参数并非需要实时测量(仅在某种条件触发下进行测量),通过城市感知基站的协同观测服务,可以使这些传感器变得更加智能。图10描述了智慧城市中的人体体域感知网、智慧城市感知基站以及远程健康监测服务的关系。

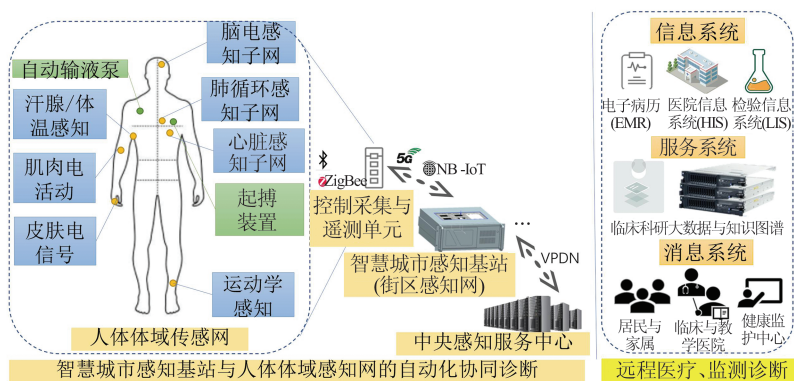


图10 智慧城市中的人体体域感知网、智慧城市感知基站以及远程健康监测服务的关系

Fig.10 Relationship of Body Area Network, Smart City Sensing Base Stations and Remote Health Monitoring Services

通过人体体域感知网与城市感知基站的智能协同观测服务,不仅实现了精确感知,同时通过城市感知基站提供的自动化服务可以实现生命体征的初步判定,将生命威胁降到最低。采用低功耗和按需/应急事件访问的观测模式,可以减少设备在待命状态下不必要的资源浪费以及对隐私进行保护。

2) 室外大场景的精确感知。交通拥堵永远是城市中最大的痛点,尽管现阶段科研与工程人员提供智慧交通的解决方案,但是依然无法做到交通的精准感知,其痛点便是原位传感器丰度较低,观测对象与目标有限,且智能传感器之间无法做到协同观测^[113]。城市感知基站便能解决传统交通感知中精确度有限的问题。在交通场景中部署RFID原位站点以及高像素相机阵列,可以实现大场景下的交通感知,实现交通畅行度、交通实时速率等相关参数的分析。城市中很多拥堵来自于轻微的交通剐蹭或者违法的非机动

车,交通管理部门和保险管理部门通常需要频繁出动,进行现场勘查定责,这导致整体通行和服务效率受限。图11展现了采用城市感知基站后构建交通场景的自动化感知过程。

通过这种城市感知基站在室外交通大场景的协同观测,在满足精确感知的情况下,提高了交通管理的自动化与网格化^[114]。

5.2 基于感知基站的应急场景管理

在未来的智慧城市中,应急场景的感知能力是一项重要的衡量标准。城市的应急场景包括地震、内涝等^[115],城市中的感知基础设施以及终端设备往往依赖于互联网的连接。在电力和网络中断的情况下,往往会导致感知能力的停止,进而应急场景下的感知能力将严重受限^[116-117]。通过城市感知基站提供的多元异构应急场景连接能力,城市感知基站的主体部分具备独立的电源系统,保证不受到市电中断的影响。同时,城市感知基站具备短报文、高通量射频电台与卫星

通讯的能力,保证城市感知基站在地面网络中断的情况下,可依靠卫星等链路提供低带宽基础通讯业务,同时也可依靠全球导航卫星系统(global

navigation satellite system, GNSS) 卫星实现授时、短报文等通讯业务。这些应急性能将维持城市感知基站在应急场景下的感知能力。

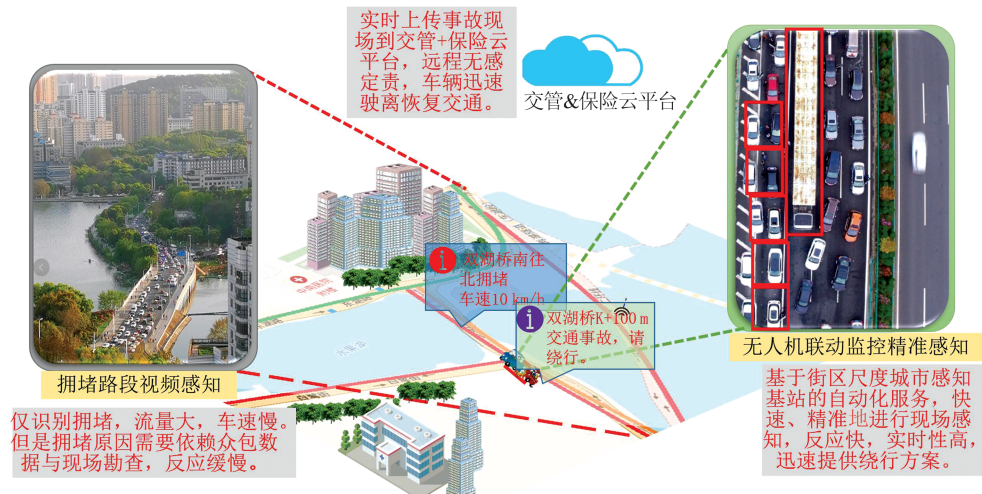


图 11 智慧城市感知基站辅助实现交通场景下的多感知设备联动

Fig.11 Smart City Awareness Base Stations in Realizing Interconnection of Multiple Sensing Devices in Traffic Scenarios

6 结 语

近十年飞速发展的信息通信技术为智慧城市的建设发展提供了基础设施与关键服务。在过去的十年,智慧城市感知由行业孤立在线感知逐步发展为多网融合综合感知,为城市提供了多维度的感知能力。但这也带来了一定的困难与限制,这些限制包括网络通信、设备供电与体积、是否具备即插即用的可能性等问题,这些问题已经成为当前智慧城市综合感知中的瓶颈。经过研究与实践,本文提出了智慧城市感知基站的创新概念和一代原型。感知基站有望提供城市中多元异构感知站点接入、多感知平台主动协同控制和应急通信保障等功能,满足全域感知、精准感知、异构感知和多元感知等核心需求,成为未来智慧城市的重要基础设施之一。

测试检验以及知识产权申明:本文中提及的智慧城市感知基站及其原型设备,包括设备本身(软件、硬件)以及用于服务端的软件已通过了第三方检测机构的技术测评。①本文中提及的城市感知基站设备及其性能测试已根据《中华人民共和国计量法》进行实验室强制检测,检验机构计量认证书编号(CMA): 181709010203;并获得中国认可国际互认检测(Testing CNAS L11851)。②本文中服务端软件涉及到的城市多尺度综合感知服务系统获得了国际实验室认可合作组织多边相互承认协议(iLac-MRA)的检测,同时获得了中国认可

国际互认检测(Testing CNAS L4584)。③本文中提及的智慧城市感知基站软件(城市时空信息网络适配器系统软件)已受到中华人民共和国版权法、计算机软件保护条例以及计算机软件著作权登记办法保护,并获得中华人民共和国国家版权局计算机软件著作权登记证书(2020SR1712129)。④本文中提及的智慧城市感知基站的硬件(支持多协议的时空信息网络适配器)已经受到中华人民共和国专利法的保护,专利申请号 202110351815.4。

参 考 文 献

- [1] Wang Jiayao, Liu Rong, Cheng Yi, et al. Making the City Smarter[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2011, 28(2): 79-83 (王家耀, 刘嵘, 成毅, 等. 让城市更智慧[J]. *测绘科学技术学报*, 2011, 28(2): 79-83)
- [2] Chun S A, Kim D, Cho J S, et al. Framework for Smart City Model Composition [J]. *International Journal of E-Planning Research*, 2021, 10(3): 50-69
- [3] McQuire S. Urban Digital Infrastructure, Smart Cityism, and Communication [J]. *International Journal of E-Planning Research*, 2021, 10(3): 1-18
- [4] Li Deren, Gong Jianya, Shao Zhenfeng. From Digital Earth to Smart Earth[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(2): 127-132 (李德仁, 龚健雅, 邵振峰. 从数字地球到智慧地球[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2010, 35(2): 127-132)

- [5] Chen Nengcheng, Liu Yingbing, Sheng Hao, et al. Key Techniques and System for Comprehensive Decision-Making of Spatio-Temporal Information in Smart City[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2278-2286 (陈能成, 刘迎冰, 盛浩, 等. 智慧城市时空信息综合决策关键技术及系统[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12): 2278-2286)
- [6] Xi Mao, Zhang Jin. Building Smart Communities Based on Spatio-Temporal Information Services [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014 (S2): 307-310 (席茂, 张锦. 基于时空信息服务构建智慧社区[J]. 测绘通报, 2014(S2): 307-310)
- [7] Xiong Zhang. Discussion on the Achievements and Development of Smart City 863 Project [J]. *Information China*, 2013(10): 44-45 (熊璋. 浅谈智慧城市 863 项目成果与发展[J]. 中国信息界, 2013(10): 44-45)
- [8] Li Deren, Shao Zhenfeng, Yang Xiaomin. Theory and Practice from Digital City to Smart City [J]. *Geospatial Information*, 2011, 9(6): 1-5 (李德仁, 邵振峰, 杨小敏. 从数字城市到智慧城市的理论与实践[J]. 地理空间信息, 2011, 9(6): 1-5)
- [9] Dang Anrong, Zhen Maocheng, Wang Dan, et al. Current Situation and Trends of the New Smart City Development in China [J]. *Science & Technology Review*, 2018, 36(18): 16-29 (党安荣, 甄茂成, 王丹, 等. 中国新型智慧城市发展进程与趋势[J]. 科技导报, 2018, 36(18): 16-29)
- [10] Guo Renzhong, Lin Haojia, He Biao, et al. GIS Framework for Smart Cities [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(12): 1829-1835 (郭仁忠, 林浩嘉, 贺彪, 等. 面向智慧城市的 GIS 框架[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(12): 1829-1835)
- [11] Huang Wei. Map of National Geographic Information Public Service Platform [J]. *Satellite Application*, 2014(1): 41-44 (黄蔚. 国家地理信息公共服务平台天地图[J]. 卫星应用, 2014(1): 41-44)
- [12] Luo Zhen, Sang Ziqin, Qi Fei. The Technology Framework and Functional Requirements of Public Support Platform in Smart City [J]. *Information and Communications Technologies*, 2014, 8(5): 54-59 (罗振, 桑梓勤, 齐飞. 智慧城市公共支撑平台技术架构及功能要求[J]. 信息通信技术, 2014, 8(5): 54-59)
- [13] Chen Zhenyong, Xu Zhouchuan, Li Qingguang, et al. A Novel Framework of Data Sharing and Fusion in Smart City—SCLDF [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2014, 51(2): 290-301 (陈真勇, 徐州川, 李清广, 等. 一种新的智慧城市数据共享和融合框架: SCLDF [J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(2): 290-301)
- [14] Cieřlik E. Towards the Industry 4.0: Have ICT Services Improved the Position of Central and Eastern Europe in Global Production Linkages? [J]. *Manufacturing Letters*, 2021, 28: 11-16
- [15] Li J X, Xiang Y, Sellis T, et al. Guest Editorial: Advanced Complex Data Analytics for Smart City Industrial Environment [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(6): 4127-4130
- [16] Zhang Yi, Chen Yujun, Du Bowen, et al. Multi-modal Data Fusion Model for Smart City [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(12): 2683-2690 (张义, 陈虞君, 杜博文, 等. 智慧城市多模式数据融合模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(12): 2683-2690)
- [17] Han Han, Li Haihua, Guan Xin. Study on Convergence and Interconnection Model of Smart City System [J]. *Telecommunications Network Technology*, 2015(9): 26-31 (韩涵, 李海花, 关欣. 智慧城市系统汇聚及互联模型研究[J]. 电信网技术, 2015(9): 26-31)
- [18] Poongodi M, Sharma A, Hamdi M, et al. Smart Healthcare in Smart Cities: Wireless Patient Monitoring System Using IoT [J]. *The Journal of Supercomputing*, 2021, 77(11): 12230-12255
- [19] The State Council of the People's Republic of China. Outline of National Medium and Long Term Science and Technology Development Plan (2006—2020) [EB/OL]. [2006-06-07]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_240244.htm (中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)[EB/OL]. [2006-06-07]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_240244.htm)
- [20] Liu Hong. Construction Scheme of Special Line Carrying Network for Smart City [J]. *Telecom Engineering Technics and Standardization*, 2021, 34(3): 11-16 (刘虹. 面向智慧城市的专线承载网建设方案[J]. 电信工程技术与标准化, 2021, 34(3): 11-16)
- [21] Li Xia, Liu Xiaoping. Spatial Information Technology for Facilitating “Three-Plan Integration” Using Geographical Simulation and Optimization [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1308-1318 (黎夏, 刘小平. “三规合一”服务的空间信息技术: 地理模拟与优化[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 1308-1318)
- [22] Feng Shengzhong, Li Genguo, Li Xuelei, et al. De-

- velopment Strategy of Emerging Applications of HPC[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(6): 640-647 (冯圣中, 李根国, 栗学磊, 等. 新兴高性能计算行业应用及发展战略[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(6): 640-647)
- [23] Feng Shengzhong, Fan Jianping. The Challenge and Opportunity of Smart City to High Performance Computing[J]. *Journal of Integration Technology*, 2012, 1(2): 84-87 (冯圣中, 樊建平. 高性能计算的智慧城市机遇与挑战[J]. 集成技术, 2012, 1(2): 84-87)
- [24] Peng Ling, Chen Wenjian, Li Gaosheng, et al. Research on the Pulsating Visualization of Smart Cities Based on Spatial Big Data[J]. *Geomatics World*, 2016, 23(1): 58-63 (彭玲, 陈文建, 李高盛, 等. 基于空间大数据的智慧城市脉动可视化研究[J]. 地理信息世界, 2016, 23(1): 58-63)
- [25] Doostmohammadian M, Rabiee H R. On the Observability and Controllability of Large-Scale IoT Networks: Reducing Number of Unmatched Nodes via Link Addition[J]. *IEEE Control Systems Letters*, 2021, 5(5): 1747-1752
- [26] Pham C, Nguyen D T, Tran N H, et al. Optimized IoT Service Chain Implementation in Edge Cloud Platform: A Deep Learning Framework[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2021, 18(1): 538-551
- [27] Li Deren. The "Internet Plus" Space-Based Information Services [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 708-715 (李德仁. 论“互联网+”天基信息服务[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 708-715)
- [28] Chen Chaoyang. Analysis of 5G Technology Innovation Application in Smart City[J]. *Electronic Technology*, 2021, 50(3): 96-97 (陈朝阳. 智慧城市的 5G 技术创新应用分析[J]. 电子技术, 2021, 50(3): 96-97)
- [29] Bai Shigang. Application Analysis of 5G Technology in Smart City Deployment [J]. *Electronics World*, 2020(23): 184-185 (柏世刚. 5G 技术在智慧城市部署中的应用分析[J]. 电子世界, 2020(23): 184-185)
- [30] Wang Jingyuan, Li Chao, Xiong Zhang, et al. Survey of Data-Centric Smart City[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2014, 51(2): 239-259 (王静远, 李超, 熊璋, 等. 以数据为中心的智慧城市研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(2): 239-259)
- [31] Li Xiaohui. Research on Key Technologies of the IoT Infrastructure for Smart City [J]. *Computer Measurement & Control*, 2017, 25(7): 8-11 (李晓辉. 面向智慧城市的物联网基础设施关键技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(7): 8-11)
- [32] Zhang Xinchang, Li Shaoying, Zhou Qiming, et al. The Rationale and Innovative Thinking of Building Digital Twin City [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(3): 147-152 (张新长, 李少英, 周启鸣, 等. 建设数字孪生城市的逻辑与创新思考[J]. 测绘科学, 2021, 46(3): 147-152)
- [33] Chen Nengcheng, Zhang Liangpei. Concept and Characteristics of Integrated Earth Observation Sensor Web[J]. *Journal of Geomatics*, 2015, 40(5): 4-7 (陈能成, 张良培. 空天地一体化对地观测传感网的概念与特征[J]. 测绘地理信息, 2015, 40(5): 4-7)
- [34] Chen Zeqiang, Chen Nengcheng, Wu Jiekui, et al. Technology Architecture and Standard Demands of Spatio-Temporal Information Cloud Platform for Smart City[J]. *Telecommunications Network Technology*, 2017(5): 46-51 (陈泽强, 陈能成, 吴杰魁, 等. 智慧城市时空信息云平台技术体系与标准需求[J]. 电信网技术, 2017(5): 46-51)
- [35] Chen Jing, Xiang Longgang, Gong Jianya. Virtual Globe-Based Integration and Sharing Service Method of GeoSpatial Information [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2013, 43(11): 1770-1784 (陈静, 向隆刚, 龚健雅. 基于虚拟地球的网络地理信息集成共享服务方法[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(11): 1770-1784)
- [36] Chen D, Zhang X, Chen N, et al. Geospatial Sensor Web Adaptor for Integrating Diverse Internet of Things Protocols Within Smart City[J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020: 115-121
- [37] Zhao Ping. Smart Fire Based on Internet of Things Technology [J]. *Intelligent City*, 2019, 5(18): 83-84 (赵平. 基于物联网技术的智慧消防建设[J]. 智能城市, 2019, 5(18): 83-84)
- [38] Wang Jianwei. Application Research of Smart and Environmental Protection in Urban Environmental Governance [J]. *Environment and Development*, 2019, 31(7): 239-240 (王建伟. 智慧环保在城市环境治理中的应用研究[J]. 环境与发展, 2019, 31(7): 239-240)
- [39] Sun Qiuye, Yang Lingxiao, Zhang Huaguang. Smart Energy—Applications and Prospects of Artificial Intelligence Technology in Power System [J]. *Control and Decision*, 2018, 33(5): 938-949 (孙秋野, 杨凌霄, 张化光. 智慧能源—人工智能技术在电力系统中的应用与展望[J]. 控制与决策, 2018,

- 33(5): 938-949)
- [40] Li Deren, Wang Mi, Shen Xin, et al. From Earth Observation Satellite to Earth Observation Brain [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(2): 143-149 (李德仁, 王密, 沈欣, 等. 从对地观测卫星到对地观测脑[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(2): 143-149)
- [41] Ge Jingjing. Liu Yifu: Operation and Maintenance After Smart City Construction is Very Important [J]. *Information China*, 2017(6): 57-60 (戈晶晶. 刘奕夫: 智慧城市建设后的运维至关重要[J]. 中国信息界, 2017(6): 57-60)
- [42] Beaudon E, Gabrielli P, Sierra-Hernández M R, et al. Central Tibetan Plateau Atmospheric Trace Metals Contamination: A 500-Year Record from the Puruogangri Ice Core[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601/602: 1349-1363
- [43] Carpenter B M, Marone C, Saffer D M. Weakness of the San Andreas Fault Revealed by Samples from the Active Fault Zone [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(4): 251-254
- [44] Filella M. Antimony Interactions with Heterogeneous Complexants in Waters, Sediments and Soils: A Review of Data Obtained in Bulk Samples [J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, 107(3/4): 325-341
- [45] Fonseca F T, Egenhofer M J, Agouris P, et al. Using Ontologies for Integrated Geographic Information Systems[J]. *Transactions in GIS*, 2002, 6(3): 231-257
- [46] Toschi G M, Campos L B, Cugnasca C E. Home Automation Networks: A Survey [J]. *Computer Standards & Interfaces*, 2017, 50: 42-54
- [47] Nichols J, Myers B A. Controlling Home and Office Appliances with Smart Phones[J]. *IEEE Pervasive Computing*, 2006, 5(3): 60-67
- [48] Zhang S Y, Xiao P P, Zhu J, et al. Design of Smart Home Control System Based on Cortex-A8 and ZigBee [C]//2014 IEEE 5th International Conference on Software Engineering and Service Science, Beijing, China, 2014
- [49] Kuai Yanli. Development Status and Improvement Path of Urban Intelligent Governance [J]. *Governance*, 2021(9): 9-15 (邹艳丽. 城市智慧治理的发展现状与完善路径[J]. 国家治理, 2021(9): 9-15)
- [50] Chen Caihui, Xian Shanshan. An Analysis of US Armed Forces "Joint All-Domain Operation" Concept [J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2020, 15(10): 917-921 (陈彩辉, 线珊珊. 美军“联合全域作战(JA-DO)”概念浅析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(10): 917-921)
- [51] Khalifeh A, Darabkh K A, Khasawneh A M, et al. Wireless Sensor Networks for Smart Cities: Network Design, Implementation and Performance Evaluation [J]. *Electronics*, 2021, 10(2): 218
- [52] Celaya-Echarri M, Azpilicueta L, Lopez-Iturri P, et al. Radio Wave Propagation and WSN Deployment in Complex Utility Tunnel Environments [J]. *Sensors*, 2020, 20(23): 6710
- [53] Kambourakis G, Koliass C, Geneiatakis D, et al. A State-of-the-Art Review on the Security of Mainstream IoT Wireless PAN Protocol Stacks [J]. *Symmetry*, 2020, 12(4): 579
- [54] Li Deren, Zhang Liangpei, Xia Guisong. Automatic Analysis and Mining of Remote Sensing Big Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(12): 1211-1216 (李德仁, 张良培, 夏桂松. 遥感大数据自动分析与数据挖掘[J]. 测绘学报, 2014, 43(12): 1211-1216)
- [55] Wang Wei, Zheng Zhong, Li Pengfei, et al. A Mission Oriented Measuring Method for Imaging Satellite Sensors' Observing Capabilities [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(12): 1480-1483 (王伟, 郑重, 李鹏飞, 等. 面向任务的成像卫星传感器观测能力度量方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(12): 1480-1483)
- [56] Chen Nengcheng, Liu Xiaolin, Gong Jianya. Design and Implementation of Space-Time Coverage Capability Evaluation and Optimum Combination Observation System for Satellite Sensor [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(9): 69-73 (陈能成, 刘晓林, 龚健雅. 卫星传感器时空覆盖能力评估与优选组合系统设计与实现[J]. 测绘通报, 2018(9): 69-73)
- [57] Hu Chuli, Liu Yidong, Zhang Xiang. An Emergency Mission Oriented Evaluating Method for Space-Based Satellite Sensors' Observation Combination [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(10): 1313-1318 (胡楚丽, 刘一冬, 张翔. 一种面向应急任务的天基传感器观测组合方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(10): 1313-1318)
- [58] Zhang X, Chen N C. Reconstruction of GF-1 Soil Moisture Observation Based on Satellite and in Situ Sensor Collaboration under Full Cloud Contamination [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(9): 5185-5202

- [59] Chen D, Chen N C, Zhang X, et al. Next-Generation Soil Moisture Sensor Web: High-Density in Situ Observation over NB-IoT [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(17): 13367-13383
- [60] Zhu Qing. Full Three-Dimensional GIS and Its Key Roles in Smart City [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2014, 16(2): 151-157 (朱庆. 三维 GIS 及其在智慧城市中的应用 [J]. *地球信息科学学报*, 2014, 16(2): 151-157)
- [61] Ning Jinsheng, Yao Yibin, Zhang Xiaohong. Review of the Development of Global Satellite Navigation System [J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2013, 1(1): 3-8 (宁津生, 姚宜斌, 张小红. 全球导航卫星系统发展综述 [J]. *导航定位学报*, 2013, 1(1): 3-8)
- [62] Yang Yuanxi. Progress, Contribution and Challenges of Compass/BeiDou Satellite Navigation System [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1): 1-6 (杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战 [J]. *测绘学报*, 2010, 39(1): 1-6)
- [63] Li Deren, Guo Sheng, Hu Qingwu. 3S(RS, GPS, GIS) Integration Technology Based LD2000 Series Mobile Mapping System and Its Applications [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(3): 272-276 (李德仁, 郭晟, 胡庆武. 基于 3S 集成技术的 LD2000 系列移动道路测量系统及其应用 [J]. *测绘学报*, 2008, 37(3): 272-276)
- [64] Aghababaei M H, Azemi G, O'Toole J M. Detection of Epileptic Seizures from Compressively Sensed EEG Signals for Wireless Body Area Networks [J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 172: 114630
- [65] Touijer B, Ben Maissa Y, Mouline S. IEEE 802.15.6 CSMA/CA Access Method for WBANs: Performance Evaluation and New Backoff Counter Selection Procedure [J]. *Computer Networks*, 2021, 188: 107759
- [66] Yuan Sai, Chen Nengcheng, Xiao Changjiang, et al. Storage-Computation Separation Method for In-Situ Sensor Observation Access [J]. *Computer Systems & Applications*, 2017, 26(7): 90-96 (袁赛, 陈能成, 肖长江, 等. 存算分离的原位传感器观测接入方法 [J]. *计算机系统应用*, 2017, 26(7): 90-96)
- [67] Xie Xiange, Liu Xuefeng. Heterogeneous Sensor Data Access and Management in Sensor Observation Service [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2016, 39(7): 154-159 (谢贤鹤, 刘学锋. 传感器观测服务中异构感知数据的接入与管理 [J]. *电子测量技术*, 2016, 39(7): 154-159)
- [68] Jurado Pérez L, Salvachúa J. Simulation of Scalability in Cloud-Based IoT Reactive Systems Leveraged on a WSN Simulator and Cloud Computing Technologies [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(4): 1804
- [69] Shan Zhiguang. Top-Level Design, Construction and Operation of the Central System for Smart Cities [J]. *Frontiers*, 2021(9):42-49 (单志广. 智慧城市中枢系统的顶层设计与建设运营 [J]. *人民论坛·学术前沿*, 2021(9):42-49)
- [70] Li Deren, Shen Xin, Gong Jianya, et al. On Construction of China's Space Information Network [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(6): 711-715 (李德仁, 沈欣, 龚健雅, 等. 论我国空间信息网络的构建 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2015, 40(6): 711-715)
- [71] Gong Jianya, Wang Guoliang. From Digital City to Smart City: New Challenges to Geographic Information Technology [J]. *Journal of Geomatics*, 2013, 38(2): 1-6 (龚健雅, 王国良. 从数字城市到智慧城市: 地理信息技术面临的新挑战 [J]. *测绘地理信息*, 2013, 38(2): 1-6)
- [72] Wu T, Zhou X M, He X N, et al. Design of Distributed Temperature-Measuring System Based on 1-Wire Bus for Ultra-Kilometre Frozen Deep Well [J]. *Evolutionary Intelligence*, 2021: 1-10
- [73] Abbas A M, Youssef K Y, Zekry A, et al. NB-IoT Optimisation: Holistic View for Smart Cities Applications with Smart Meters Networks Case Study [J]. *IET Communications*, 2021, 15(1): 112-125
- [74] González I, Calderón A J, Portalo J M. Innovative Multi-Layered Architecture for Heterogeneous Automation and Monitoring Systems: Application Case of a Photovoltaic Smart Microgrid [J]. *Sustainability*, 2021, 13(4): 2234
- [75] Găitan V G, Zagan I. Experimental Implementation and Performance Evaluation of an IoT Access Gateway for the Modbus Extension [J]. *Sensors*, 2021, 21(1): 246
- [76] Akhtar S, Zahoor E. Formal Specification and Verification of MQTT Protocol in PlusCal-2 [J]. *Wireless Personal Communications*, 2021, 119(2): 1589-1606
- [77] Pradhan M. Federation Based on MQTT for Urban Humanitarian Assistance and Disaster Recovery Operations [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(2): 43-49
- [78] Garrett R G. The Determination of Sampling and Analytical Errors in Exploration Geochemistry [J].

- Economic Geology*, 1969, 64(5): 568-569
- [79] McBratney A B, Webster R, Burgess T M. The Design of Optimal Sampling Schemes for Local Estimation and Mapping of Regionalized Variables - I: Theory and Method [J]. *Computers & Geosciences*, 1981, 7(4): 331-334
- [80] Zhang Xiang, Chen Nengcheng, Li Jizhen, et al. Multi-Sensor Integrated Framework and Index for Agricultural Drought Monitoring [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 188: 141-163
- [81] Eltner A, Kaiser A, Castillo C, et al. Image-Based Surface Reconstruction in Geomorphometry—Merits, Limits and Developments [J]. *Earth Surface Dynamics*, 2016, 4(2): 359-389
- [82] McCullough A, James P, Barr S. Near Real-Time Geoprocessing on the Grid: A Scalable Approach to Road Traffic Monitoring [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2012, 26(10): 1939-1957
- [83] Hart J K, Martinez K. Environmental Sensor Networks: A Revolution in the Earth System Science? [J]. *Earth Science Reviews*, 2006, 78 (3/4): 177-191
- [84] Kim D H, Ghaffari R, Lu N, et al. Electronic Sensor and Actuator Webs for Large-Area Complex Geometry Cardiac Mapping and Therapy [J]. *PNAS*, 2012, 109(49): 19910-19915
- [85] Cnudde V, Boone M N. High-Resolution X-Ray Computed Tomography in Geosciences: A Review of the Current Technology and Applications [J]. *Earth Science Reviews*, 2013, 123: 1-17
- [86] De Longueville B, Annoni A, Schade S, et al. Digital Earth's Nervous System for Crisis Events: Real-Time Sensor Web Enablement of Volunteered Geographic Information [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2010, 3(3): 242-259
- [87] Debret M, Sebag D, Desmet M, et al. Spectrocolorimetric Interpretation of Sedimentary Dynamics: The New "Q7/4 Diagram" [J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, 109(1/2): 1-19
- [88] Delin K. The Sensor Web: A Macro-Instrument for Coordinated Sensing [J]. *Sensors*, 2002, 2 (7): 270-285
- [89] Wang Lingyun, Li Qi, Yu Wencheng. WebService and Spatial Geographic Information Interoperability [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2004, 29(1): 38-41 (王凌云, 李琦, 喻文承. Web Service与地理信息互操作 [J]. *测绘科学*, 2004, 29(1): 38-41)
- [90] Xiao C J, Chen N C, Wang X L, et al. A Semantic Registry Method Using Sensor Metadata Ontology to Manage Heterogeneous Sensor Information in the Geospatial Sensor Web [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2016, 5(5): 63
- [91] Xiang Longgang, Wang Xingxing, Gong Jianya. A Multi-Level Abstraction Model for City Sensing Observation Data [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015(11): 39-43 (向隆刚, 王星星, 龚健雅. 城市传感网观测数据的多层次摘要模型 [J]. *测绘通报*, 2015(11): 39-43)
- [92] Ji Genlin, Zhao Bin. A Survey of Spatiotemporal Data Mining for Big Data [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 37(1): 1-7 (吉根林, 赵斌. 面向大数据的时空数据挖掘综述 [J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2014, 37(1): 1-7)
- [93] Di L P, Zhao P S, Yang W L, et al. Intelligent Geospatial Web Services [C]//Proceedings of 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea (South), 2005
- [94] Di L P, Moe K R, van Zyl T L. Earth Observation Sensor Web: An Overview [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2010, 3(4): 415-417
- [95] Chen N C, Di L P, Yu G N, et al. A Flexible Geospatial Sensor Observation Service for Diverse Sensor Data Based on Web Service [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(2): 234-242
- [96] Huang C Y, Liang S. A Sensor Data Mediator Bridging the OGC Sensor Observation Service (SOS) and the OASIS Open Data Protocol (OData) [J]. *Annals of GIS*, 2014, 20(4): 279-293
- [97] Zhao Jianhua, Zhang Haitao, Zhang Shuliang, et al. Different Urban GIS Interoperation Based on OGC Web Service Model [J]. *Modern Surveying and Mapping*, 2006, 29(1): 6-9 (赵建华, 张海涛, 张书亮, 等. 基于 OGC Web 服务模型的城市异构 GIS 互操作 [J]. *现代测绘*, 2006, 29(1): 6-9)
- [98] Wen Yongning, Lü Guonian, Yang Hui, et al. A Service-Oriented Framework of Distributed Geographic Model Integration [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(2): 160-168 (温永宁, 闾国年, 杨慧, 等. 面向服务的分布式地学模型集成框架研究 [J]. *遥感学报*, 2006, 10(2): 160-168)
- [99] Gong Jianya, Li Xiaolong, Wu Huayi. Spatiotemporal Data Model for Real-Time GIS [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(3): 226-232 (龚健雅, 李小龙, 吴华意. 实时 GIS 时空数据模型 [J]. *测绘学报*, 2014, 43(3): 226-232)

- [100] Li Deren, Yao Yuan, Shao Zhenfeng. Big Data in Smart City[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(6): 631-640 (李德仁, 姚远, 邵振峰. 智慧城市中的大数据[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(6): 631-640)
- [101] Li Deren, Ma Jun, Shao Zhenfeng. Spatio-Temporal Big Data and Its Application[J]. *Satellite Application*, 2015(9): 7-11 (李德仁, 马军, 邵振峰. 论时空大数据及其应用[J]. 卫星应用, 2015(9): 7-11)
- [102] Huang Y S, Shih S G, Yen K H. An Integrated GIS, BIM and Facilities Infrastructure Information Platform Designed for City Management[J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2021, 44(4): 293-304
- [103] Ma Y P. Extending 3D-GIS District Models and BIM-Based Building Models into Computer Gaming Environment for Better Workflow of Cultural Heritage Conservation[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(5): 2101
- [104] Karimi S, Iordanova I. Integration of BIM and GIS for Construction Automation, a Systematic Literature Review (SLR) Combining Bibliometric and Qualitative Analysis[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021, 28: 4573 - 4594
- [105] Wyszomirski M, Gotlib D. A Unified Database Solution to Process BIM and GIS Data[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(23): 8518
- [106] Shen Derong, Yu Ge, Wang Xite, et al. Survey on NoSQL for Management of Big Data[J]. *Journal of Software*, 2013, 24(8): 1786-1803 (申德荣, 于戈, 王习特, 等. 支持大数据管理的NoSQL系统研究综述[J]. 软件学报, 2013, 24(8): 1786-1803)
- [107] Chen Chongcheng, Lin Jianfeng, Wu Xiaozhu, et al. Massive Geo-Spatial Data Cloud Storage and Services Based on NoSQL Database Technique[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, 15(2): 166-174 (陈崇成, 林剑峰, 吴小竹, 等. 基于NoSQL的海量空间数据云存储与服务方法[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(2): 166-174)
- [108] Wang Jiayao. Smart City in the Era of Big Data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(5): 3-7 (王家耀. 大数据时代的智慧城市[J]. 测绘科学, 2014, 39(5): 3-7)
- [109] Ni Enjie, Lü Jin. A New Model to Solve the Problem of Elderly Care—Building a Smart Home Elderly Care Platform[J]. *Management and Administration*, 2021(5): 115-118 (倪恩捷, 吕津. 解决养老问题的新模式: 构建智慧居家养老平台[J]. 经营与管理, 2021(5): 115-118)
- [110] Li Z F, Li Y R, Zhao G Q, et al. A Model for Obstructive Sleep Apnea Detection Using a Multi-Layer Feed-Forward Neural Network Based on Electrocardiogram, Pulse Oxygen Saturation, and Body Mass Index[J]. *Sleep and Breathing*, 2021, 25(4): 2065-2072
- [111] Carta A F, Bitos K, Furian M, et al. ECG Changes at Rest and During Exercise in Lowlanders with COPD Travelling to 3100 m[J]. *International Journal of Cardiology*, 2021, 324: 173-179
- [112] Chae J, Hwang S, Seo W, et al. Relationship Between Rework of Engineering Drawing Tasks and Stress Level Measured from Physiological Signals[J]. *Automation in Construction*, 2021, 124: 103560
- [113] Chen Nengcheng, Wang Xiaolei, Xiao Changjiang, et al. Model and System for Event-Driven Focusing Service of Information Resources in Smart City[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(12): 1633-1638 (陈能成, 王晓蕾, 肖长江, 等. 事件驱动的城市信息聚焦服务模型与系统[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(12): 1633-1638)
- [114] Xiang Longgang, Gong Jianya, Wu Tao, et al. Trajectory Data Geographic Association Modeling and Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2019 (向隆刚, 龚健雅, 吴涛, 等. 轨迹数据地理关联建模与分析[M]. 北京: 科学出版社, 2019)
- [115] Liu Yong, Zhang Shaoyue, Liu Lin, et al. Research on Urban Flood Simulation: A Review from the Smart City Perspective[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(4): 494-504 (刘勇, 张韶月, 柳林, 等. 智慧城市视角下城市洪涝模拟研究综述[J]. 地理科学进展, 2015, 34(4): 494-504)
- [116] Hu Chuli, Zhong Xiang, Guan Qingfeng, et al. An Integrated Management Method of EO Sensor Resources Oriented to Emergency Observation Planning[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, 17(6): 631-637 (胡楚丽, 钟翔, 关庆锋, 等. 面向应急观测规划的对地观测传感器集成管理方法与应用[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(6): 631-637)
- [117] Hu Chuli, Chen Nengcheng, Guan Qingfeng, et al. An Integration and Sharing Method for Heterogeneous Sensors Oriented to Emergency Response in Smart City[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2014, 51(2): 260-277 (胡楚丽, 陈能成, 关庆锋, 等. 面向智慧城市应急响应的异构传感器集成共享方法[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(2): 260-277)

Smart City Awareness Base Station: A Prospective Integrated Sensing Infrastructure for Future Cities

CHEN Dong¹ ZHANG Xiang^{2,3} CHEN Nengcheng^{1,2,3,4}

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 National Engineering Research Center of Geographic Information System, Wuhan 430074, China

3 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

4 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: Nowadays, a vast number of sensors and observation platforms bring a significant challenge for city perception. In the study, we focus on developing of a smart city tempo-spatial perception system. The concept of smart city awareness base station (SCABS) is proposed in this study, and the SCABS architecture considers the above problems. **Methods:** Firstly, we systematically reviewed the requirements and the complexity of smart city perception and summarized the development process and network architecture of smart city perception technology systems. On this basis, the challenges of ubiquitous access, trusted perception and intelligent management in future smart city perception are addressed. Then, this paper sorted out the demand for future city perception services and constructed the architecture of SCABS. Finally, we standardized the technical indicators and service capabilities of SCABS. **Results:** We constructed the prototype of SCABS. According to the qualitative analysis and experiments based on real environment, we found that SCABS with unified access, integrated management, and edge intelligence can meet the access and management ability of multi-platform and high-density sensing resources. **Conclusions:** SCABS would act an essential role in the smart city perception in the future. As a cyber-physical infrastructure, it expects to cover various scenarios in the city with multiple heterogeneous perception access and hybrid access of multi-protocols, and to automatically support the multi-platform coordinated control. The SCABS meets global, accurate, heterogeneous, and multiple sensory perception. The SCABS is expected to be one of the critical infrastructures of the future smart city.

Key words: smart city; Internet of Things; sensor network; automated decision; digital twins

First author: CHEN Dong, PhD candidate, specializes in smart city sensing services. E-mail: wuhanclain@hotmail.com

Corresponding author: CHEN Nengcheng, PhD, professor. E-mail: cnc@whu.edu.cn

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China(2018YFB2100500).

引文格式: CHEN Dong, ZHANG Xiang, CHEN Nengcheng. Smart City Awareness Base Station: A Prospective Integrated Sensing Infrastructure for Future Cities[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(2): 159-180. DOI: 10.13203/j.whugis20210224(陈栋,张翔,陈能成.智慧城市感知基站:未来智慧城市的综合感知基础设施[J].武汉大学学报·信息科学版,2022,47(2): 159-180.DOI:10.13203/j.whugis20210224)