

引用格式: 陈能成, 肖长江, 杨超, 等. 地理空间传感网融合服务技术与应用[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(1): 11-20. [Chen N C, Xiao C J, Yang C, et al. Technology and application of the fusion service of geospatial sensor web[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(1): 11-20.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190479

地理空间传感网融合服务技术与应用

陈能成¹, 肖长江², 杨超³, 王伟¹

1. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079; 2. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092;
3. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 武汉 430074

Technology and Application of the Fusion Service of Geospatial Sensor Web

CHEN Nengcheng^{1*}, XIAO Changjiang², YANG Chao³, WANG Wei¹

1. State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The space-air-ground-sea stereo and integrated geospatial sensor web have gradually formed along with the development of remote sensing data network, sensor web, internet of things (IoT), and artificial intelligence. The sensing resources of the geospatial sensor web are of multiple sources, heterogeneity, and dispersion. These characteristics result in the grand technical challenges of sharing and managing heterogeneous resources, real-time access of geospatial information with multiple protocols, spatiotemporally seamless and autonomous sensing of geospatial information, and accurate prediction of key parameters, especially when facing the personalized, instant, and smart application needs of multi-level users. It is hard for static geographical information service to meet the demands of geo-events for integrated monitoring, early warning and decision support, and focusing application. Therefore, there are urgent needs to develop fusion service technologies of the geospatial sensor web, as well as real-time dynamic geographical information service platforms. To solve these problems, this paper proposed online access, integrated management, space-ground fusion, spatiotemporal prediction, and focusing service models and methods. With the online access, dynamic management methods for sensing spectrum resources, and transparent access methods based on heterogeneous sensor protocols pool were proposed; a cyber-physical spatiotemporal information service environment was established, which realized the efficient access of spatiotemporal information with heterogeneous protocols. With the integrated management, sharable and interoperable information models including sensor observation process information description model, observation data description model, observation event description model, and dynamic observation capability index model were proposed, which tackled the coupling problem of sensor web and GIS, and realized large-scale integrated management and sharing of space-air-ground-sea platforms and sensors for the integrated

收稿日期: 2019-08-31; 修回日期: 2019-11-01.

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFB2100500); 国家自然科学基金项目(41890822); 湖北省自然科学基金创新群体项目(2016CFA003)。[**Foundation items:** National Key Research and Development Program, No.2018YFB2100500; National Natural Science Foundation of China (NSFC) Program, No.41890822; Creative Research Groups of Natural Science Foundation of Hubei Province of China, No.2016CFA003.]

作者简介: 陈能成(1974—), 男, 福建德化人, 教授、博士生导师, 研究方向为对地观测传感网、地理智能、网络GIS和智慧城市。E-mail: cnc@whu.edu.cn

monitoring of fairway, hydrology, soil, meteorology, and ocean. With space-ground fusion, a point-surface-collaboration and seamless reconstruction model, and evaluation-collaboration-reconstruction, cross-scale, seamless and continuous sensing methods were proposed, which improved the sensing quality by 14 times with respect to using satellite only and meanwhile keeping sensing frequency the same as the station networks, providing new ways for continuous monitoring of resources, environments, and disasters. For spatiotemporal predictions, ensemble models of multiple machine learning models, ensemble models of statistical models and dynamic models, and a spatiotemporal deep learning model were proposed, which realized high-resolution and high-precision predictions of meteorological parameters at regional scales. For the focusing service, a geo-control method based on instant sensing feedback, a time-continuous maximal covering location model, and an automatic aggregation sensing method were proposed, which improved the spatiotemporal coverage of sensing by 18%, and realized active and on-demand sensing of spatiotemporal information. Based on the sensor web observation information models and using the architecture of satellite-ground-collaboration spatiotemporal information sensing as a service, a geospatial sensor web spatiotemporal information sensing and service system named GeoSensor was developed, which has the functions of sensing, access, cognition, and control. The GeoSensor has been successfully applied to the sensing management and service of spatiotemporal information in the Yangtze River, the ocean and the smart city. In the future, the theory of smart sensing and cognition of people, water, and city will be further developed, the technology of crowd-sourced sensing, spatial intelligence, and cognition service of space-air-ground-sea-people will be developed, and large-scale applications in the Yangtze River Economic Zone will be conducted as well.

Key words: geospatial sensor web; online access; integrated management; satellite-ground fusion; spatiotemporal prediction; focusing service

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

摘要:随着遥感数据网、传感网、物联网和人工智能的发展,逐渐形成空天地海立体化、集成化和一体化的地理空间传感网。地理空间传感网感知资源呈现出多源、异构和分散的特征,面向多层次用户个性化、即时化和智能化应用需求,存在异构资源共享管理、多协议实时接入、时空无缝感知、自动化感知和精准预测等技术挑战。静态地理信息服务由于无法提供鲜活的地理信息,难以满足地理事件的综合监测、决策预警和聚焦应用需求,急需发展地理空间传感网融合服务技术和实时动态地理信息服务平台。本文围绕信息物理网环境下空天地海观测平台的观测高效共享和融合服务问题,提出了传感网观测共享信息模型和点面观测协同无缝重建模型,突破了观测在线接入、集成管理、星地融合、时空预测和聚焦服务等地理空间传感网融合服务关键技术,研制了包含“感—联—知—控”等功能的传感网时空信息网络感知服务系统 GeoSensor,介绍了 GeoSensor 在流域、海洋和城市等典型应用。未来将进一步发展“人—水—城”智能感知认知理论,突破“空天地海人”群智感知、空间智能和认知服务技术,开展长江经济带应用。

关键词:地理空间传感网;在线接入;集成管理;星地融合;时空预测;聚焦服务

1 引言

地理感知资源呈现出多源、异构和分散的特征,现有地理信息服务模式难以满足地理事件的综合监测、决策预警和聚焦应用需求,具体表现为:

(1)感知资源集成管理难。传感网^[1-2]是地理信息实时动态获取的重要手段之一,空天地海观测平台和传感器等感知资源呈现出观测模式不同、类型多样、尺度差异大等特征,近年来 GIS 空间数据模型在三维、时态、语义等方面取得了重要进展,但仍

无法有效表达复杂的地理事件观测过程。

(2)地理信息快速感知难。传感网实现了高频率观测流和高通量覆盖信息的动态获取,迫切需要突破高频高通量流式观测接入和地理规划控制等技术瓶颈,在统一时空参考框架下,实现感知资源的实时动态接入和高效地理信息服务。

(3)地理信息无缝感知难。卫星观测空间连续而时间断续,地面站网感知时间连续而空间离散,空间无缝与时间连续是时空信息无缝持续感知亟待解决的矛盾,迫切需要突破星地观测定量评估、

星地协同连续感知和点面协同无缝重建方法。

(4)关键参数精准预测难。数值预报方法大尺度、大范围预测,难以用于区域小尺度高分辨率的传感网关键参数预测,传统机器学习方法难以对长时序依赖建模,或容易过拟合,导致预测精度低。此外,在对参数场预测时,主要采用逐点顺序预测的方式,过程繁琐低效。为了提高传感网关键参数预测的精度和效率,迫切需要发展多模型集成预测方法和时空预测模型。

(5)地理信息自主感知难。星地异构观测系统信息获取被动、面向任务聚焦服务低效,如何基于事件地理知识对观测过程进行优化控制,提供协同聚焦、闭环自适应观测控制模式和主动按需时空信息感知能力是需要重点突破的问题。

(6)实时地理信息服务平台缺乏。地理信息系统发展至今,尚缺乏能提供鲜活空间信息和实现快速辅助决策的传感网实时地理信息服务平台,以实现空天地海传感器、数据融合分析预测和模型决策预警一体化,以满足流域、海洋和城市等地理事件日常管理、公共服务和应急决策实时、动态和综合的时空信息需求。

针对上述问题,笔者团队围绕地理空间传感网时空信息融合服务开展了模型和技术方法研究,攻克了地理空间传感网在线接入、集成管理、星地融合、时空预测和聚焦服务技术瓶颈,研制了传感网时空信息网络感知服务系统,并应用于长江流域水资源监测、海洋关键参数预测和智慧城市时空信息感知。

2 关键技术

2.1 空天地海异质观测在线接入

国际权威杂志 Science 和资讯公司 Gartner 预测 2020 年全球联网设备将达到百亿,星地感知通信资源紧缺、协议异构和服务跨系统,国际电信联盟 ITU 认为频谱资源利用率低和协议异构是制约时空信息快速感知的技术瓶颈。针对在线快速感知技术瓶颈,我们提出了异构传感器协议池透明接入方法,构建了虚实融合的时空信息服务环境,实现了异构协议时空信息高效接入。

(1)感知频谱资源动态管理技术

针对亿级空天地海传感器感知通信频谱资源利用率低,发明了基于认知无线电的多用户多信道

环境自适应联合感知技术,发展了多用户协作感知模型和多信道任务优化分配策略,实现了大规模观测频谱资源的即时感知、按需分配和高效利用,感知时间由 EGC 的 161 ms 和 MRC 的 143 ms 缩短到 120 ms,信道综合感知时间缩短了 20%^[3-4]。

(2)异构传感器协议池透明接入技术

异构协议接入是制约地理信息物联网融合的技术瓶颈。针对该问题,提出了 IEEE 智能传感器模型和 OGC 传感网信息模型语义整合方法^[5],研制了支持异构协议池和存算分离并行接入^[6]的观测服务软件 MongoSOS,兼容 IEEE1451、WiFi、ZigBee、Bluetooth 和 Modbus 等协议,千级用户单服务器并发接入效率是德国 52°North SOS (146 条/s) 的 29 倍,实现了多种协议感知数据流的高效接入。

(3)虚实融合的时空信息柔性服务技术

针对跨地域、跨层级和跨系统感知即服务问题,提出了虚实融合的“观测云”服务方法,构建了“规划-获取-处理”一体化时空信息服务环境,实现了实时观测、融合信息和未来规划 3 种模式柔性感知服务,如图 1 所示。

2.2 空天地海异质观测集成管理

针对传感网空天地海异质观测资源集成管理问题,本文提出了传感网观测共享信息模型(图 2),实现了面向航道、水文、土壤、气象、海洋综合监测的空天地海平台传感器大规模集成管理和共享应用。

(1)针对感知节点的观测过程、观测数据和观测对象信息共享和精准管理问题,提出了体现时空特征和事件过程的传感网观测共享信息模型^[7-10](传感器观测过程信息描述模型、观测数据描述模型、观测事件信息描述模型和动态观测能力指数模型),建立了与 GIS 通用数据模型的无缝集成表达,评估了传感器在特定任务下的观测能力,实现了不同观测任务和观测能力的定量映射。与 IEEE 1451、ISO 19130 和 OGC O&M 相比,观测共享信息模型实现了观测过程与 GIS 数据模型的融合表达,解决了综合监测传感器、观测数据和观测事件的共享表征和精准管理问题。

(2)统一时空框架下的节点资源高效管理是传感网与 GIS 无缝集成的技术关键,通过刻画传感网感知单元、处理算法和应用模型 3 类资源标识、特征、时空和能力等 9 个方面的信息,屏蔽了传感网系统底层硬件差异,实现了传感网 3 类资源的全网统

(3)如何动态耦合不同机理的空天地海观测资源,是综合监测的关键技术难题。针对该问题,建立了观测系统级耦合模型、日常松散耦合及应急紧耦合的监测新模式^[12]。通过信息模型和开放接口总线,屏蔽了观测系统接口和处理算法差异,实现了观测、处理算法和应用模型的动态聚合;提出了顾及应急事件全生命周期的多星多尺度互补增强和星地时间同步空间互补增强观测方法,实现了不同尺度高空间分辨率和高时间分辨率的地表环境动态感知^[13-14]。与美国NASA^[15]传感网、欧盟传感网SANY^[16]和OGC传感网SWE^[17]相比,紧耦合监测模式实现了空天地海观测的动态聚合,揭示了多观测系统动态耦合服务的应用机理。

2.3 流式观测数据星地融合

卫星观测空间连续而时间断续,地面站网感知时间连续而空间离散,星地感知时间不同步、能力差异大,现有方法难以精确评估;全球任意时刻约35%陆表受云遮挡,从而导致光学遥感卫星感知中断,感知不连续。NASA AIST指出,空间无缝与时间连续是时空信息无缝持续感知亟待解决的矛盾。针对这一问题,我们提出了点面协同无缝重建模型和“评估—协同—重建”跨尺度无缝连续感知方法,感知质量提高到15倍,感知频率与站网同步,为资源环境灾害持续监测提供了新途径。

(1)星地观测定量评估模型

针对天地感知难以精确评估问题,提出了观测能力评估指数模型^[10, 18],研制了传感器建模和资源集成管理软件,从广度、深度、频度、质量和数据五个维度揭示了传感器感知能力,定量评估了全链路观测能力信息,相比于OGC单传感器信息模型和

WMO三参数感知能力评估方法,该模型为感知能力认知与排序提供了刻度精准的信息依据,实现了大规模观测网感知能力定量计算和空天地海平台传感器的集成管理。

(2)星地协同连续感知方法

在能力评估的基础上,建立了多星协作能力增强与互补关联计算方法,提出了面向事件发生、发展和消亡等过程的星地协同监测方法^[19],研制了天地传感器集成查询系统,每阶段自动选择最优传感器,发挥了星地感知手段互补优势,构建了“Sensor Web 2.0”多流程协同感知系统,实现了卫星、无人机和地面多种感知手段的并行协同,提升了大范围长时序资源环境灾害持续跟踪能力。

(3)点面协同无缝重建模型

针对星地感知能力差异大固有矛盾,利用站网时间连续与卫星空间连续优势,提出了点面协同无缝重建模型^[20],构建了同位关联、同物近似、时序推理和空间邻近四类重建规则,站网感知时间连续弥补了卫星观测时间间断不足,卫星空间连续弥补了站网空间离散不足,解决了全云遮挡下时空无缝重建难题,点面协同重建结果UIQI相较于站网重建提升了400%,相较于卫星重建提升了1400%(图3)。

2.4 关键参数时空预测

气象参数预测对于气候变化监测以及提前识别极端天气/气候事件至关重要。现有物理模型分辨率低,难以满足区域高分辨率精细预测需求,常规单一机器学习模型预测精度低。针对该问题,我们提出了基于多机器学习模型集成、统计模型和动力模型集成以及时空深度学习模型的海表温度预测,实现了气象参数区域尺度的高分辨率高精度预测。

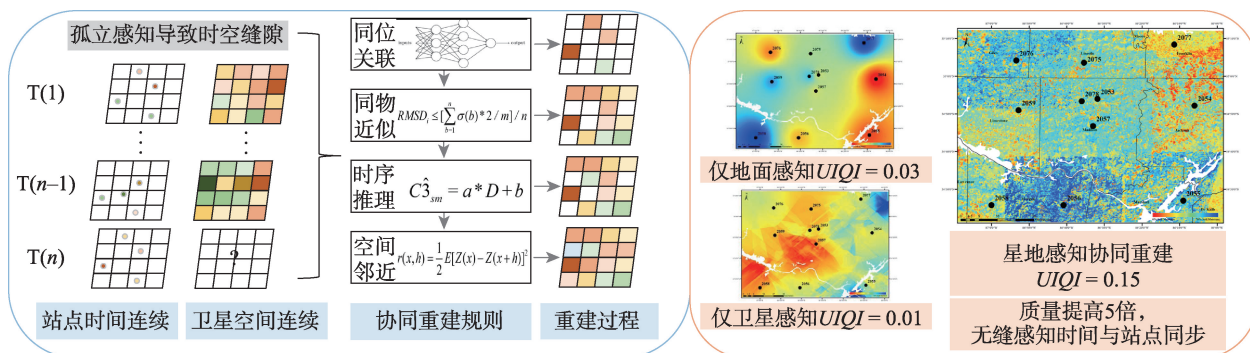


图3 点面协同无缝重建模型

Fig. 3 Seamless reconstruction model based on point-surface collaboration

(1) 多机器学习模型集成预测

针对海表温度单点中短期预测精度低的问题,提出了长短期记忆深度神经网络(Long Short-term Memory, LSTM)与自适应提升决策树(Adaptive Boosting, AdaBoost)集成的预测方法(LSTM-AdaBoost)^[21],通过平均化策略集成,实现了2个异质预测器的强强联合,有效提高了海表温度单点中短期预测精度(显著优于支持向量机模型,且优于长短期记忆网络和自适应提升决策树单独预测结果)。

(2) 统计模型和动力模型集成预测

针对统计模型和动力模型在中国区域干旱预测精度低的问题,我们提出了基于贝叶斯模型融合多个统计模型(支持向量机、人工神经网络、小波预处理、长短期记忆网络、ARFIMA和线性回归)和动力模型(包括北美多模型组合的6个气候模型)的预测方法^[22],有效提高了干旱预测精度。

(3) 时空深度学习模型预测

针对海表温度场整体高精度预测问题,提出了海表温度场整体预测时空深度学习模型^[23],通过同时提取海表温度在时间和空间2个维度上的关联关系,并利用网格中周围点的当前及过去状态预测中

心网格未来的状态,有效提高了海表温度场预测的精度(精度优于持续模型、支持向量机以及长短期记忆网络模型)。同时,通过采用端对端的方式进行预测,直接输出目标海表温度场(图4),实现了区域海表温度场的整体、高效预测。

2.5 传感网信息聚焦服务

星地异构观测系统信息获取被动、面向任务聚焦服务^[24]低效。针对该问题,我们提出了位置智能感知优化控制技术,构建了大立体赛博物理网的节点最优覆盖、闭环控制和自动聚合感知方法,感知时空综合覆盖度提高了18%,实现了时空信息“主动按需”智慧化获取。

(1) 节点最优覆盖感知方法

最优覆盖是星地观测资源优化配置NP-hard难题。针对该问题,从卫星观测窗口及地面站网协同覆盖角度,构建了时间连续最大覆盖的大规模节点协同优化布局模型(TMCLP)^[25],提出了大立体赛博物理网的天地联合节点协作方法,研制了长江流域水文站网规划管理平台,实现了星地时空最优覆盖,时空覆盖度从原有的69.39%提升到协作后的87.38%,感知时空综合覆盖度提高了18%(图5)。

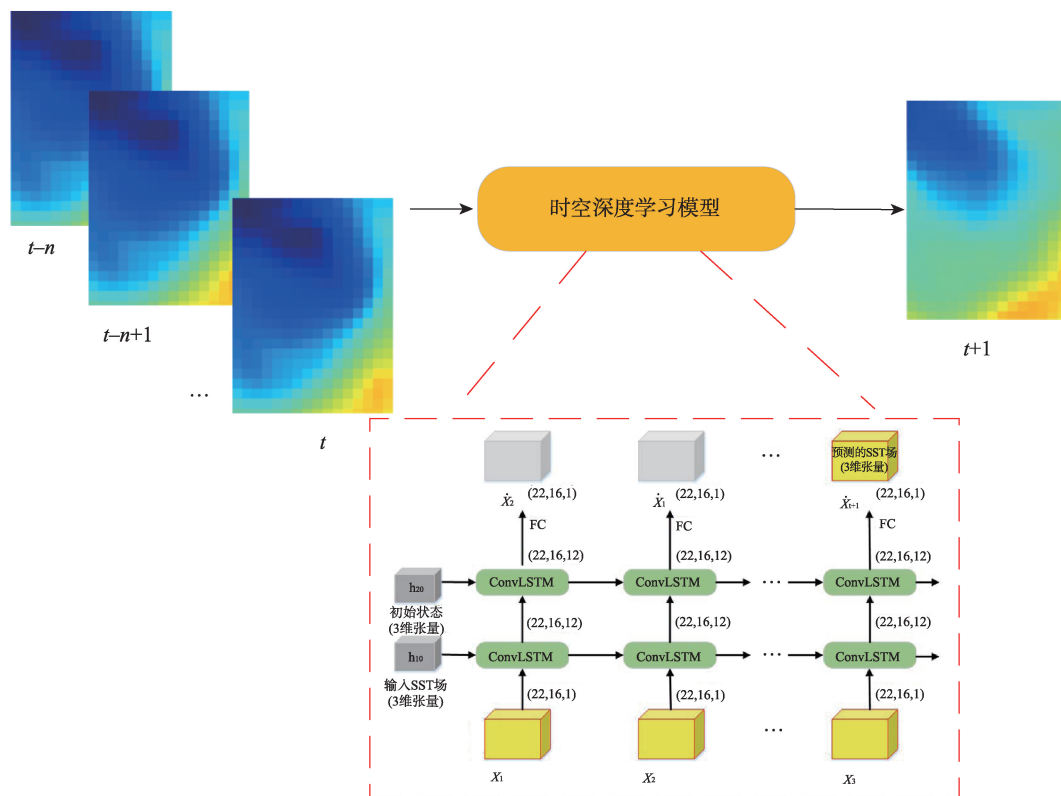


图4 海表温度场“端到端”整体预测示意图

Fig. 4 End-to-end prediction of sea surface temperature field by the proposed spatiotemporal deep learning model

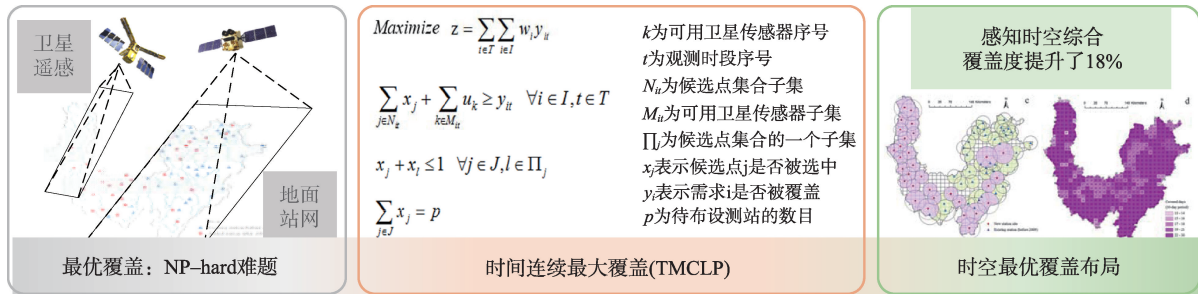


图5 节点最优覆盖原理

Fig. 5 Principle of the optimal coverage of sensor web nodes

(2) 过程闭环控制感知技术

针对城市和流域异质传感器智能网络控制问题,提出了基于位置的赛博物理网观测过程闭环控制技术^[26]。从地理事件监测需求出发,通过感知位置匹配分析和地理围栏控制,即时反馈感知状态,按实况环境调整感知行为,实现了基于实况地理环境的传感器智能在线控制,促进了时空信息从“被动盲目”到“主动按需”智慧化获取模式跃升。

(3) 自动协作聚合感知技术

针对异质感知自动聚合问题,提出了基于工作流和地学知识驱动的赛博物理网聚合感知技术^[27],建立了具有开放和自动化特点的观测过程建模、观测链生成与聚焦决策执行的观测与模型聚合的资源环境灾害事件探测与制图框架;基于地学知识模

型、位置观测和决策需求,优化服务聚合模型,实现了从地学知识模型到时空观测即时获取、网络制图与在线决策的自动化,有效提升了赛博物理网时空信息感知自动化和智能化水平,实现了森林野火探测、洪涝灾害范围提取、区域农业干旱监测和城市突发事件信息提取。

3 传感网地理信息服务平台与应用

在传感网观测信息模型和星地协同时空信息感知即服务体系架构的基础上,研制了地理空间传感网时空信息网络感知与服务平台 GeoSensor^[28],包含“感—联—知—控”等功能,平台架构如图6所示。相比于德国的 52°North、美国 ESRI 的 GeoSEv-



图6 GeoSensor平台架构

Fig. 6 Architecture of GeoSensor

ent和微软的SenorMap等国外先进平台,该平台具备:①与专业感知系统集成能力,能够协同空天地海多平台多协议的异构传感器;②感知全过程服务能力,可以实现观测过程、数据和功能的网络组合即时共享;③辅助分析决策与模拟仿真能力,实现了城市、航道、流域和海洋十余种复杂过程的模拟仿真和关键要素的预测。

3.1 流域水资源监测应用

相关技术和软件平台应用于金沙江下游梯级水电站管理、长江上游水库群信息共享、长江干线航道监测与辅助分析和广东省中小河流洪水预警预报等,实现了卫星和无人机数据的动态接入,水文、气象和航标等观测信息的实时接入、多元观测数据的高效处理、公共信息服务和灾害天气、河演分析、泥沙淤积及洪水演进过程动态模拟仿真,在长江上游蓄水发电、防汛抗旱和安全通航等综合监测与决策预警中发挥了重要作用(图7)。

3.2 海洋关键参数监测应用

相关技术应用于我国东海等海域,实现了统一时空框架下卫星和浮标等多类观测平台60余种传感器亿条观测的统一接入、集成管理、融合处理、分析预测、在线制图和共享服务(图8),形成了对海洋

气象要素(气压、风场、温度、湿度、降水、云雾)和海洋水文要素(海浪、潮位等)的高分辨率监测能力。

3.3 城市信息化建设应用

相关技术应用于南平智慧城市时空信息云平台、电网设备管理、厦门智慧水务、智慧天水、福建省数字城市管理云服务系统等建设,实现了电网设备资产的智能监测与管理、水务设施的智能巡检与管理和城市突发事件综合应急与决策(图9),提升了城市管理水平和公共服务能力。

4 结论与展望

本文针对当前空天地海集成化地理空间传感网融合服务技术瓶颈,阐述了传感网观测的在线接入、集成管理、星地融合、时空预测和聚焦服务等核心关键技术,介绍了时空信息智慧感知技术体系和软硬件平台,并在智慧流域、智慧城市和智慧海洋等领域开展了应用,增强了流域、城市和海洋公共服务和应急处置能力。

未来将进一步发展“人—水—城”智能感知认知理论,开展“空天地海人”群智感知、空间智能和认知服务技术研究,针对长江经济带绿色可持续发展建设战略开展更大规模的推广应用。



图7 长江中上游21座水库群信息共享

Fig. 7 Information sharing among 21 reservoirs in the middle and upper reaches of the Yangtze river

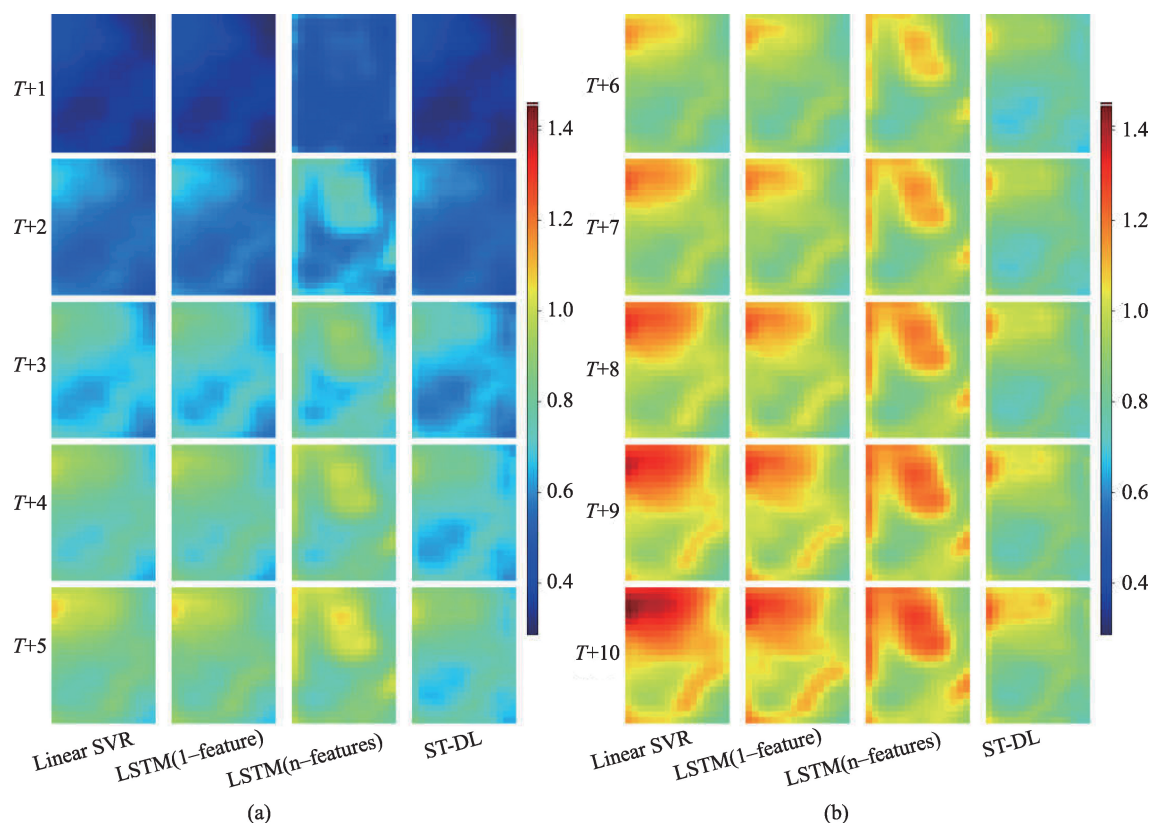


图8 海表温度时空预测

Fig. 8 Spatiotemporal prediction of sea surface temperature

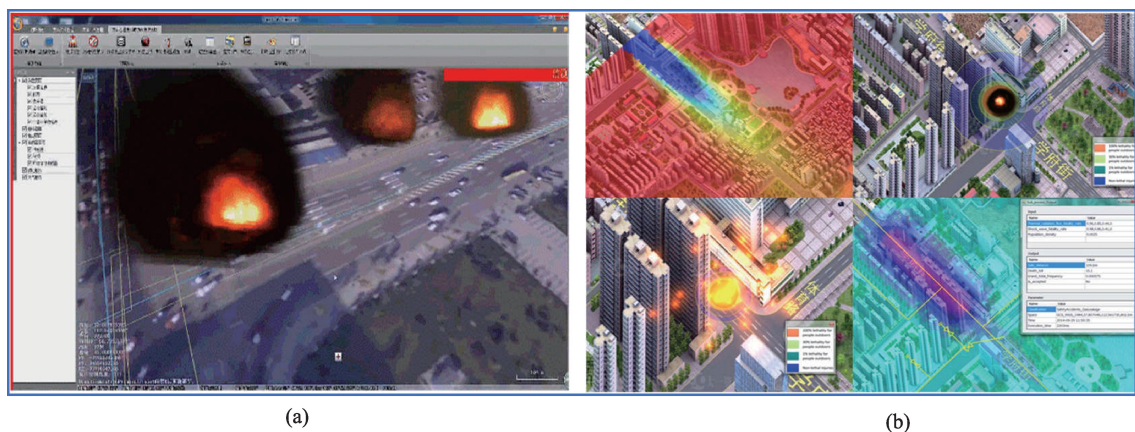


图9 城市突发事件综合分析与决策支持

Fig. 9 Integrated analysis and decision-making support for urban emergencies

参考文献(References):

- [1] Botts M, Percivall G, Reed C, et al. Sensor web enablement: Overview and high level architecture[R]. OpenGIS White Paper, 2007:7-165.
- [2] Zhang X, Chen N C, Chen Z Q, et al. Geospatial sensor web: A cyber- physical infrastructure for geoscience research and application[J]. Earth-science reviews, 2018, 185:684-703.
- [3] Zhao N, Pu F L, Xu X, et al. Optimization of multi-channel cooperative sensing in cognitive radio networks[J]. IET Communications, 2013,7(12):1177-1190.
- [4] Zhao N, Pu F L, Xu X, et al. Cognitive wideband spectrum sensing using cosine-modulated filter banks[J]. International Journal of Electronics, 2015,102(11):1890-1901.
- [5] Pu F L, Wang Z L, Du C, et al. Semantic integration of wireless sensor networks into open geospatial consortium sensor observation service to access and share environmental monitoring systems[J]. IET Software, 2016,10(2):45-53.

- [6] 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. [Yuan S, Chen N C, Xiao C J, et al. Storage-computation separation method for in-situ sensor observation access[J]. Computer Systems & Applications, 2017,26(7):90-96.]
- [7] Chen N C, Hu C L. A sharable and interoperable meta-model for atmospheric satellite sensors and observations [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012,5(5):1519-1530.
- [8] Chen N C, Liu Y B, Li J, et al. A spatio-temporal enhanced metadata model for interdisciplinary instant point observations in smart cities[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017,6(2):50.
- [9] Chen N C, Du W Y, Song F, et al. FLCNDEM: An event metamodel for flood process information management under the sensor web environment[J]. Remote Sensing, 2015,7(6):7231-7256.
- [10] Chen N C, Zhang X. A dynamic observation capability index for quantitatively pre-evaluating diverse optical imaging satellite sensors[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(2):515-530.
- [11] Chen N C, Wang K, Xiao C J, et al. A heterogeneous sensor web node meta-model for the management of a flood monitoring system[J]. Environmental Modelling & Software, 2014,54:222-237.
- [12] Li D R, Zeng L L, Chen N C, et al. A framework design for the Chinese National Disaster Reduction System of Systems (CNDRSS) [J]. International Journal of Digital Earth, 2014,7(1):68-87.
- [13] Zhang X, Chen N C, Chen Z Q. Spatial pattern and temporal variation law- based multi- sensor collaboration method for improving regional soil moisture monitoring capabilities[J]. Remote Sensing, 2014,6(12):12309-12333.
- [14] Chen N C, Li J Z, Zhang X. Quantitative evaluation of observation capability of GF-1 wide field of view sensors for soil moisture inversion[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2015,9(1):097097.
- [15] Moe K, Smith S, Prescott G, et al. Sensor web technologies for NASA earth science[C]//Aerospace Conference, 2008 IEEE. IEEE, 2008:1-7.
- [16] Havlik D, Schimak G, Denzer R, et al. Introduction to SA-NY (Sensors Anywhere) Integrated Project[C]//EnviroInfo. 2006:541-546.
- [17] Bröring A, Echterhoff J, Jirka S, et al. New generation sensor web enablement[J]. Sensors, 2011,11(3):2652-2699.
- [18] Chen N C, Xing C J, Zhang X, et al. Spaceborne earth-observing optical sensor static capability index for clustering [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015,53(10):5504-5518.
- [19] Zhang X, Chen N C, Li J Z, et al. Multi-sensor integrated framework and index for agricultural drought monitoring [J]. Remote sensing of environment, 2017,188:141-163.
- [20] 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.
- [21] Xiao C J, Chen N C, Hu C L, et al. Short and mid-term sea surface temperature prediction using time-series satellite data and LSTM-AdaBoost combination approach[J]. Remote Sensing of Environment, 2019,233:111358.
- [22] Xu L, Chen N C, Zhang X, et al. An evaluation of statistical, NMME and hybrid models for drought prediction in China[J]. Journal of hydrology, 2018,566:235-249.
- [23] Xiao C J, Chen N C, Hu C L, et al. A spatiotemporal deep learning model for sea surface temperature field prediction using time- series satellite data[J]. Environmental Modelling & Software, 2019,120:104502.
- [24] 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. [Chen N C, Wang X L, Xiao C J, 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.]
- [25] Wang K, Guan Q F, Chen N C, et al. Optimizing the configuration of precipitation stations in a space-ground integrated sensor network based on spatial-temporal coverage maximization[J]. Journal of Hydrology, 2017,548: 625-640.
- [26] Chen N C, Xiao C J, Pu F L, et al. Cyber-physical geographical information service-enabled control of diverse in-situ sensors[J]. Sensors, 2015,15(2):2565-2592.
- [27] Chen N C, Di L P, Yu G N, et al. Geo-processing workflow driven wildfire hot pixel detection under sensor web environment[J]. Computers & Geosciences, 2010,36(3): 362-372.
- [28] 陈能成,杨训亮,王晓蕾.地理空间传感网信息公共服务平台的设计与实现[J].地球信息科学学报,2013,15(6): 887-894,917. [Chen N C, Yang X L, Wang X L. Design and implementation of geospatial sensor web information public service platform[J]. Journal of Geo- information Science, 2013,15(6):887-894,917.]