

基于区块链的动态频谱共享接入技术

王威^{1,2}, 李祖广^{1,2}, 吴启晖^{1,2}

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏 南京 211106;
2. 电磁频谱空间认知动态系统工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京 211106)

摘要: 引入智能合约的区块链技术具有使能智能结算、价值转移和资源共享等优势, 为动态频谱共享系统中存在的安全与信任机制匮乏等问题提供了新的解决方案。从频谱共享系统的实际需求出发, 首先对区块链技术在频谱共享中的应用进行了概述, 并探讨了区块链应用于大规模频谱共享系统急需解决的关键问题, 然后深入分析了解决上述问题所面临的挑战, 并提出了相应的关键技术及解决思路。

关键词: 动态频谱共享; 区块链; 可信频谱账本; 智能合约

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00168

Dynamic spectrum sharing access technology based on blockchain

WANG Wei^{1,2}, LI Zuguang^{1,2}, WU Qihui^{1,2}

1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China
2. Key Laboratory of Dynamic Cognitive System of Electromagnetic Spectrum Space, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing 211106, China

Abstract: The blockchain technology written in the smart contract has advantages of the enabling intelligent settlement, value transfer and resource sharing, which provides a new secure and trusted platform for the dynamic spectrum sharing system. Firstly, the application of blockchain technology in dynamic spectrum sharing was summarized, considering the requirements of spectrum sharing. The key problems that need to be solved when applying blockchain to the large-scale spectrum sharing system were discussed. After that, the key challenges were analyzed in depth, and corresponding key technologies and possible solutions were provided to the above problems.

Key words: dynamic spectrum sharing, blockchain, trusted spectrum ledger, smart contract

1 引言

物联网 (IoT, Internet of things) 业务数据的不断涌入和无线通信技术宽带化、泛在化、融合化的发展趋势使得频谱需求呈现爆发式增长。然而, 最适合无线通信的 6 GHz 以下的“黄金”频谱资源几乎被分配殆尽, 导致频谱资源面临严重的结构性供

求失衡局面。物联网业务和传统通信业务对频谱需求的日益增长与频谱静态分配和频谱独占模式导致的频谱利用率低之间的矛盾, 迫使人们采用动态频谱共享的模式。2013年4月, 西门子股份公司、爱立信公司和高通公司在已投入使用的 2.3 GHz TD-LTE 网络上进行了全球首次授权共享接入 (ASA, authorized shared access) 试验。美国联邦通

收稿日期: 2020-03-20; 修回日期: 2020-04-25

通信作者: 吴启晖, wuqihui@nuaa.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61827801, No.61631020, No.61931011); 中央高校基本科研业务费资助项目 (No.1004-YAH20016, No.NT2020009)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61827801, No.61631020, No.61931011), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.1004-YAH20016, No.NT2020009)

信委员会 (FCC, Federal Communications Commission) 于 2015 年 4 月在 3.5 GHz 频段上推出公众无线宽带服务 (CBRS, citizens broadband radio service), 实现了无线接入系统与雷达和固定卫星通信业务之间的动态频谱共享。我国于 2005 年开始在频谱资源共享无线通信系统和认知无线电网络等方面进行了广泛而深入的研究工作。目前, 基于认知无线电的动态频谱共享接入技术仍然存在以下 4 个问题。1) 用户用频信息如频段、时长、位置等缺乏统一记录的数据库, 导致频谱共享的态势不明。2) 主次用户之间缺乏有效的激励机制, 导致主用户的频谱共享动机不强。3) 节点的趋利性, 导致认知无线电系统中存在模仿主用户攻击、干扰认知用户、恶意节点伪造感知数据、节点隐私泄露等突出的安全性问题, 且频谱资源的共享交易缺乏足够的信任机制。4) 目前的频谱管理通常依赖于中心化的数据库。一方面, 中心化系统的访问受限在动态频谱管理上存在实时性差、管理成本高等问题; 另一方面, 面对大范围物联网终端频谱共享和动态调整的场景时, 中心化的频谱监管模式将面临严重的维度诅咒问题, 严重制约了动态频谱共享的实现。

区块链技术利用密码学原理和共识机制, 在不确定安全性的网络空间中建立点对点的信任机制, 成为世界各国的发展战略与学术研究的新兴热点。在区块链中引入智能合约使区块链具有使能智能结算、价值转移、资源共享等优势, 推动了区块链与频谱资源共享的融合。利用区块链提供的分布式账本结构, 使频谱交易流通记录能够做到公开透明、不可篡改和可追溯, 充分反映流通各环节状况, 建立频谱交易各链条之间的信任关系。基于共识机制, 在频谱交易之前将确权信息和频谱资源有效绑定并登记存储, 使全网节点可同时验证确权信息的有效性, 并以此明确频谱资产的权利所属人。通过确权建立全新、可信赖的频谱资源权益体系, 为维护频谱主权提供有力保障。在频谱交易中建立规则, 使用智能合约代码表述形式代替合同, 实现了链上支付, 提高了交易的自动化水平。

基于上述研究, 区块链技术为频谱共享中的安全与激励问题提供了很好的解决思路。FCC 和法国国家频谱管理机构等均已开展频谱区块链的研究工作, 基于区块链的频谱共享技术也被列为未来 6G 的核心技术之一。中华人民共和国工业和信息化部 IMT-2030 频谱组也在加快推进频谱区块链的研究。

通过将区块链技术融入动态频谱共享系统中, 可以在保障无线电频谱安全、可靠共享的同时, 提高频谱利用率, 满足具有海量终端、海量数据和海量应用的万物互联业务需求, 具有强大的应用潜力。因此, 本文首先对区块链技术在动态频谱共享系统中的应用进行研究, 提出了实现高效动态频谱共享需要解决的核心问题。然后, 详细分析了解决上述问题所面临的关键技术挑战, 并给出了应对策略。

2 国内外研究现状

近年来, 越来越多的国家将区块链技术上升至国家战略高度, 并在多领域积极探索区块链技术的推广应用。2019 年 7 月 9 日, 美国参议院商业委员会、科学委员会和运输委员会共同批准了《区块链促进法》, 明确要求美国商务部为区块链建立标准定义, 并建立新的法律框架, 为未来新兴技术的应用提供指导并防范风险。同时, FCC 积极推进基于区块链的频谱共享机制, 并将频谱区块链视为美国在下一代无线通信技术中的重要发展战略。中国联合网络通信集团有限公司提出将区块链技术引入 6G 网络中, 以支持通信服务节点之间更安全、更稳健和更扁平化的交互^[1]。中国电信集团有限公司正在研究基于区块链去中心化的物联网平台。

与传统区块链系统主要服务的加密货币应用场景不同, 频谱共享系统复杂的层级关系、多变的应用场景和用户动态、随机的用频行为等因素, 使得区块链与频谱的简单叠加未必能发挥区块链技术的真正潜力。因此, 需要结合频谱共享系统的实际需求和区块链本身的适用条件, 深入研究面向复杂动态系统的体系结构。为了实现频谱供应商与用户之间的频谱共享, 文献[2]设计了一种由用户、通信网络和区块链网络组成的频谱共享架构, 并利用区块链技术构建了两个模块之间统一、可共享的数据库, 以提高频谱态势清晰度。文献[3]介绍了一种基于区块链的分布式移动网络架构, 该架构通过引入智能合约将所有事务由软件代码自动执行, 消除了复杂且高成本的账单系统需求。相对于机器设备, 人类用户具有灵活性强、传输频率高、数据传输量大等特点, 文献[4]提出了一种基于人对人 (H2H, human-to-human) 通信和机器对机器 (M2M, machine-to-machine) 通信共存的频谱区块链共享架构, 通过基于 Gale-Shapley 算法的低复杂度稳定匹配方法来解决用户与设备之间的双边匹配问题。文

献[5]建立了一种高性能集中私有链运行环境和超级账本结构环境并行的全频谱区块链服务(FSBaaS, full-spectrum blockchain as a service)架构,为两个运行环境开发了统一的接口,以满足用户自身的运行环境需求。

在动态频谱共享系统中存在大量资源受限的设备,其存储和计算能力有限,所以此类设备无法存储完整的区块链账本且难以运行复杂的区块链共识算法。因此,在基于区块链的动态频谱共享系统中,需考虑引入边缘计算技术。文献[6]建立了一种通过边缘计算实现车联网区块链信任访问认证的系统,利用边缘计算网络更新用户信息、创建智能合约、降低时延。为了提高移动设备处理计算密集型任务(如实时数据处理任务和挖矿任务等)的能力,文献[7]设计了一种联合计算卸载和货币贷款的区块链驱动边缘计算方案。文献[8]介绍了一种异构资源智能动态匹配的车联网边缘网络系统,在该系统中,用户的计算业务可卸载至边缘网络,边缘网络可实现资源的自适应供给、应用类型识别等。

为了实现频谱资源的深度共享,需要对频谱资源的所有者与需求者进行双向激励,以促进频谱资源的高效交易。文献[9]构建了公有链和联盟链结合的双链系统,公有链用于现金与频谱币(spectrum coin)之间的转换,联盟链则用于频谱交易,并利用博弈论算法根据出租时间、出租频段带宽等计算得到频谱租赁价格,以此激励频谱资源拥有者共享频谱资源。文献[10]提出了一种基于区块链的安全频谱拍卖程序,利用频谱监测方式获取空闲频段,以鼓励授权用户共享频谱,通过两次密封投标来提高频谱拍卖效率,并确保其真实性。该程序具有分布式、可访问性、易验证用户身份、防诈骗等优势。文献[11]提出了一种迭代的双重拍卖机制以实现利益最大化,此机制能够鼓励数据需求方提交投标和确定交易数量及价格。

针对频谱共享中的恶意节点攻击问题,Kotobi等^[12]提出了一种区块链认证协议,该协议采用了一种安全性算法,通过身份验证机制阻止恶意节点在不付费的情况下访问频谱,从而保证移动认知无线网络中的安全频谱共享。文献[13]针对攻击者可以通过数据挖掘算法获取记录在区块链上的隐私信息问题,提出了一种面向联盟链的隐私泄露问题的解决方案。文献[14]提出了一种区块链无线接入网络(B-RAN, blockchain radio access network)架构,并开发了一种分布式、

安全、高效的机制来管理网络访问和在本质上不可信的网络实体间的身份验证。

由上述分析可知,国内外针对基于区块链的动态频谱共享已进行了相关研究,但尚未形成完备的理论体系,为了满足广泛的物联网应用和传统通信系统对响应时间、吞吐量、计算和存储开销等方面的要求,还需要深入研究频谱区块链的体系架构、可信账本构建方法、频谱交易激励机制和频谱智能合约等关键问题。

3 频谱区块链中的关键问题

传统区块链系统主要服务于金融领域,其技术特性难以满足动态频谱共享的要求。为此,需要根据动态频谱共享的特性和应用场景重新设计频谱区块链的体系架构,同时,为了保障频谱区块链的可用性、可信性、安全性和高效性,需要解决如下4个关键问题。

3.1 面对大规模频谱共享系统的区块链体系架构设计

在无线电频谱承载的业务中,既有公众移动通信、广播电视等面向人们日常生活的业务,也有民航、铁路、气象等涉及生命安全和公益性的业务,更有军事国防、抢险救灾等涉及国家安全的业务^[15]。不同业务对服务质量、安全性、频段带宽等的需求不同,从而极大地增加了频谱共享系统的复杂度。同时,考虑频谱资源的特殊性,频谱的拍卖与使用离不开无线电管理部门的监管和行政干预。因此,在频谱区块链体系架构设计过程中,既要考虑国家无线电管理部门的行政审批与监管,又要考虑专用网运营部门、移动运营商、广播电视运营商以及其他相关专用部门等多方参与的特点,并不是完全的无中心化。此外,部分业务对频谱安全的要求非常高,为了实现频谱资源的快速监管和高效共享,需要采用联盟链与私有链相结合的、包含行政监管与市场自由竞争的分级异构混合区块链体系架构方案。在此基础上,考虑频谱共享的实际需求,分层、分模块优化区块链技术。如对频谱区块链的数据结构、存储方式和共识机制等进行重新设计与优化。

3.2 频谱账本的安全可信保障机制

为了实现频谱资源的高效共享与安全管控,需要将频谱交易过程、使用状态等写入频谱账本,形成分布式频谱状态数据库。频谱共享系统的广域、动态特性和频谱数据呈现数据量大、数据类型多

样、数据变化剧烈等特点，给频谱账本的构建带来了极大挑战。考虑频谱资产所有权、账户信息查询、流通过程记录等需求，需要以账户作为资产和交易对象建立基于账户的账本模型。与传统的数据库相比，区块链账本没有删除和修改功能，随着区块数据量的增大，对节点的存储空间和吞吐性能也提出了越来越高的要求，因此，需要研究高效的数据存储机制以实现在保证性能的同时，减少节点对存储空间的要求。虽然区块链通过共识机制解决了分布式节点的信任问题，通过使用数字签名和哈希操作以分布式统一存储保证了信息的不可篡改，然而共识机制无法解决数据造假的问题。为了对节点，尤其是第三方感知节点提供的数据进行质量评估和检验、识别恶意感知节点、保证上链数据的真实性，需要研究基于智能合约的数据防伪机制。

3.3 频谱共享中的激励机制

为了实现频谱资源的深度共享，需要对频谱资源的所有者与需求者进行双向激励，从而促进频谱资源的高效交易。然而，由此也将引发频谱交易过程中的恶意侵占、交易拥塞、交易不公平等问题。为此，需要创建适合频谱交易的支付货币，从而构建交易激励模型，研究交易过程中的公平支付方案，建立频谱共享与租赁机制，最终确保频谱交易的安全、高效完成。现阶段，虽然已有一部分关于频谱交易的研究，但是缺少多网络、多系统之间规范的频谱交易模型，如何激励各用户之间的有效频谱共享和实现交易双方的共赢是急需解决的关键问题。因此，需要研究频谱交易激励策略和多用户协作的频谱共享激励模型，并设计合理的代价函数，从而保证频谱资源所有者和需求者自身利益最大化，促进频谱资源的高效交易。

3.4 针对频谱管理的智能合约协作机制

在网络环境下，由于主次用户之间没有任何信任基础，因此，容易产生欺骗行为，进而失去频谱交易的安全性。同时，无线电频谱网络中存在大量非法用频行为，既给主用户造成了干扰，也增加了无线电监管部门的监督管理难度。智能合约是自动执行合约条款的可编程语言，可以为达成协议的双方建立权利和义务，并由一台计算机或计算机网络自动完成智能合约脚本代码的运行。为了解决频谱区块链网络中各节点互信和监督管理过程中法律、法规的执行问题，频谱区块链需要引入智能合约协作频谱资源管理。因此，需要从交易的初始化、支

付、取款、退款等角度出发，权衡“先发货”和“先付款”的公平性，研究基于智能合约的公平支付协议，以确保交易的公平性，实现真正意义上的频谱资源“面对面”交易。此外，还需考虑监管部门对系统的监督管理，研究基于智能合约的法律、法规运行机制。因此，在频谱协作管理中，既需要考虑交易的公平性，也需要结合法律、法规，从而构建可信的、自动化的协同频谱智能合约管理体系。

4 频谱区块链的关键技术与解决思路

4.1 频谱区块链系统架构

区块链系统架构发展至今经历了 3 次演变，区块链 1.0 架构是以 Nakamoto^[16]最早应用区块链技术创建的比特币为代表的数字化支付的系统架构；区块链 2.0 架构是最先在区块链中引入智能合约的以太坊为典型代表的系统架构^[17]；区块链 3.0 架构目前还没有一个公认的代表，但其将超出金融领域，是可以为各行各业提供企业级应用服务的系统架构。各阶段的区块链架构在具体表现上是不同的，但其基础架构基本都是依据数据层、网络层、共识层、激励层、合约层和应用层这 6 个层级进行划分的^[18]。

频谱区块链要实现频谱、信息资产的流通和转移，其系统架构设计应考虑可用性、有效性和安全性的需求。为此，可采用基于联盟链和私有链的混合系统架构，并遵循严格的用户准入认证机制。频谱共享系统涉及范围大，并且可能存在不同运营商之间的跨运营商交易，适合按多层次的区块链进行设计。在跨区频谱服务场景部署不同运营商的主链，在主链上完成跨区和跨运营商服务，如跨区和跨运营商的身份认证、资产转移、频谱交易和数据交互等。在局部区域内部署局部区域子链和授权专用频段子链，局部区域子链主要服务于单个区域内的区块链应用，如点对点的频谱交易、频谱合约和物联网中数据上传通道的获取等，授权专用频段子链主要服务于授权专用频段的频谱出租、频谱安全保护等。运营商主链与局部区域子链构成侧链关系，局部区域子链通过侧链协议与运营商主链进行资产转移和频谱资源租赁；运营商主链与授权专用频段子链构成互联链关系，两者之间可以进行频谱出租/租赁和资产结算。不同区域间的子链根据通道状况及功能需求实现与主链的灵活互联或解列，完整的运营商主链下可以存在多个区域的不同子链，子链之间并不直接进行数据交互，所有的数据交互

必须经网络安全防护设备（如防火墙）接入主链，由主链完成数据交互。同时，子链与子链之间、子链与主链之间、主链与主链之间的运行安全性互不影响。基于以上原则，频谱区块链整体设计模型如图1所示。

由于区块链是一种链式数据库结构，随着应用时间的增长，公共账本的数据量会越来越大，在实际应用中并不需要每个参与的网络节点都保存完整的数据账本。因此，应根据实际应用场景有选择性地对网络节点进行归类^[19]。考虑主链与子链上节点的不同应用需求以及节点参与区块链不同的认证方式，本文将频谱区块链网络节点划分为全节点、中转节点和轻节点3种类型。其中，全节点一般由频谱网络内的主要参与方组成，如电信运营商，要求其具备完整的账本记录及共识能力，可以完成数据的验证和同步功能，拥有网络内最好的通信资源。中转节点一般由频谱网络内的基础设施组成，如局部区域内的通信基站，要求其具备数据需求的收集和转发能力，可完成辖区内数据的采集和分发功能，提供网络内其他参与方互动信息的中转分发功能，拥有良好的通信资源。轻节点一般由频谱网络内的终端设备组成，如移动电话、民用无人机等，一般具备各类应用的入口功能和完成简化认证协议的能力，完成原始数据的采集、上传，接受网络内其他参与方的互动信息，不具备区块链数据的存储能力，仅存储相邻节点地址信息和区块头信息，拥有较好的通信资源。

考虑大规模频谱共享系统的需求，在频谱区块

链总体设计模型的基础上研究了频谱区块链体系架构的可能方案，频谱区块链的体系架构如图2所示，该架构分为系统前端和系统后端。系统前端是用户与频谱区块链系统的交互窗口，包括面向用户的各类应用接口，可进行频谱租赁与交易、资产转移等；系统后端则是依据区块链基础框架进行设计的。最底层的基础模块包含基础设施和数据层，其中，基础设施包括计算服务、网络服务、频谱感知、边缘服务器和分布式存储等，数据层则负责封装底层数据区块以及相关的数据加密和时间戳等基础数据和基本算法。中间的核心模块包含网络层、共识层、激励层和合约层四大关键功能。其中，网络层包括安全传播机制、身份验证机制和P2P网络等；共识层主要负责封装网络节点各类共识算法，如工作量证明（PoW, proof of work）、股权证明（PoS, proof of stake）、实用拜占庭容错（PBFT, practical Byzantine fault tolerance）算法等；激励层主要考虑频谱区块链体系中的经济因素，包含激励产生经济效益的频谱币发行机制、分配机制和用户信誉值结算等；合约层则负责封装各类编程语言、合约脚本和运行环境，从而支持区块链的可编程特性。最上层的交互模块包含应用层，负责封装区块链的各种应用场景和案例。

4.2 频谱可信账本构建

频谱区块链本质上是一个记录频谱信息的分布式账本，频谱账本中除了包含频谱拍卖、频谱交易、频谱接入等信息以外，还应包含外部频谱

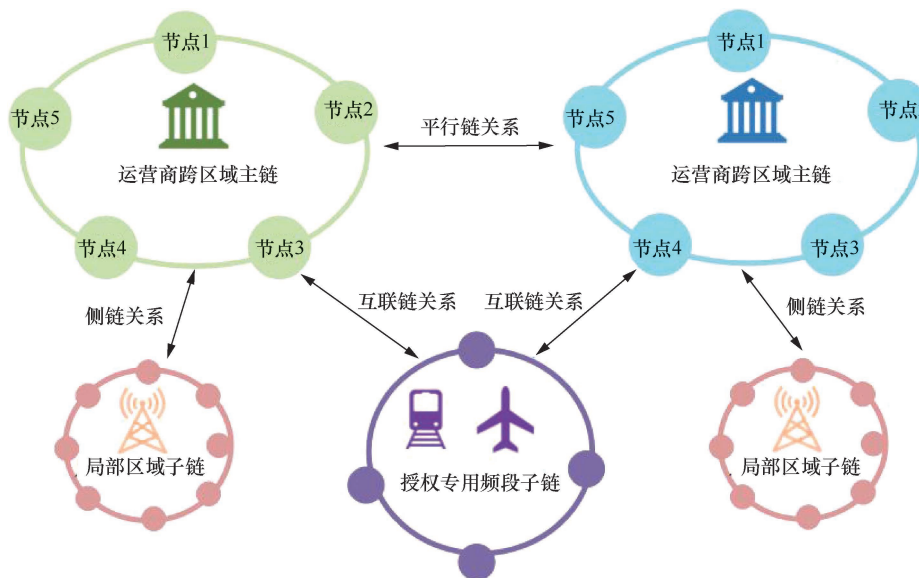


图1 频谱区块链整体设计模型

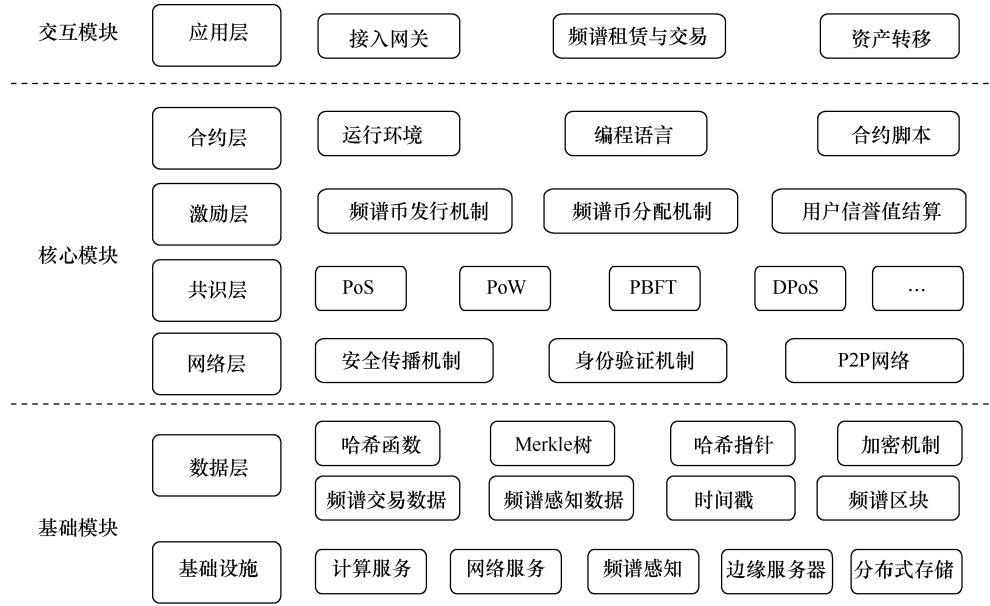


图 2 频谱区块链的体系架构

感知设备提供的感知数据及空闲频谱状态等信息，基于区块链的频谱账本示意图如图 3 所示。频谱账本记录的信息在一定程度上可以为频谱资源的高效共享、公平交易和有效管控提供依据，需要注意的是，频谱信息通常数据量较大，为了保证其能存储于区块中，一方面可以采取数据压缩或预处理方法，另一方面可以将原始的频谱数据上传至边缘存储服务器，而区块链中只存储原始数据在边缘存储器中的根哈希值。频谱区块的结构如图 4 所示，某一时段产生的频谱数据通过哈希计算生成哈希值，各频谱数据的哈希值组成 Merkle 树，频谱数据中的任何一点改变都能在 Merkle 树根上得到反映。

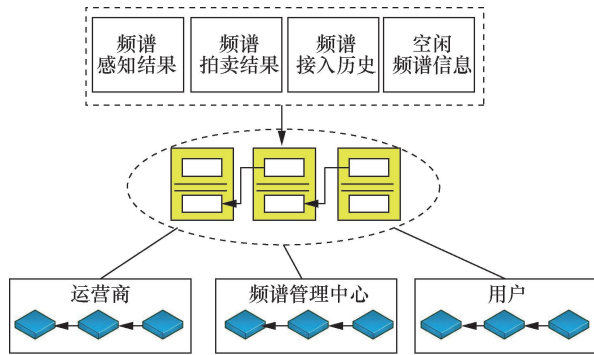


图 3 基于区块链的频谱账本示意图

频谱区块由区块头和区块体组成，其大小根据实际频谱数据和系统性能做出相应调整，同时为了避免出块时间过长或过短，区块大小应在合理范围

内变动。区块头大小为 80 B，分为 6 个部分：版本号、前一区块地址、频谱数据的根哈希值、时间戳、工作量难度证明目标和随机数。版本号大小为 4 B，记录区块头的版本号，用于跟踪软件/协议的更新；前一区块地址大小为 32 B；频谱数据的根哈希值大小为 32 B；时间戳大小为 4 B；随机数大小为 4 B，用于工作量证明的计算参数。区块体的内容包括各种类型的频谱数据，频谱区块中的数据越复杂，则数据量越大，对频谱信息的确认和查询时间就越长，从而使接入时延更大。

同时，为了确保外部感知数据的真实可信，可采用基于智能合约的群智频谱感知方案，如图 5 所示。首先，部署在边缘服务器的频谱管理服务器定期发布频谱数据采集任务，提出包括采集时间要求、频段范围限制和地理区域限定等频谱数据采集任务要求，频谱数据采集任务对频谱设备网络中所有服务器和节点可见。频谱管理服务器在发布频谱数据采集任务的同时，预存相应的频谱币作为完成频谱数据采集任务的奖励。其次，分布式部署的感知节点根据自身的行动计划、电池电量和地理位置决定是否响应频谱数据采集任务。接受任务的节点在智能合约上完成注册，然后智能合约根据不同节点的位置、价格和信誉等完成节点筛选，同时告知被选中的感知节点。最后，感知节点完成频谱感知任务，并将结果上报至智能合约。智能合约完成对数据的验证，确认感知任务是否符合合约要求，并根据合约发放奖励。

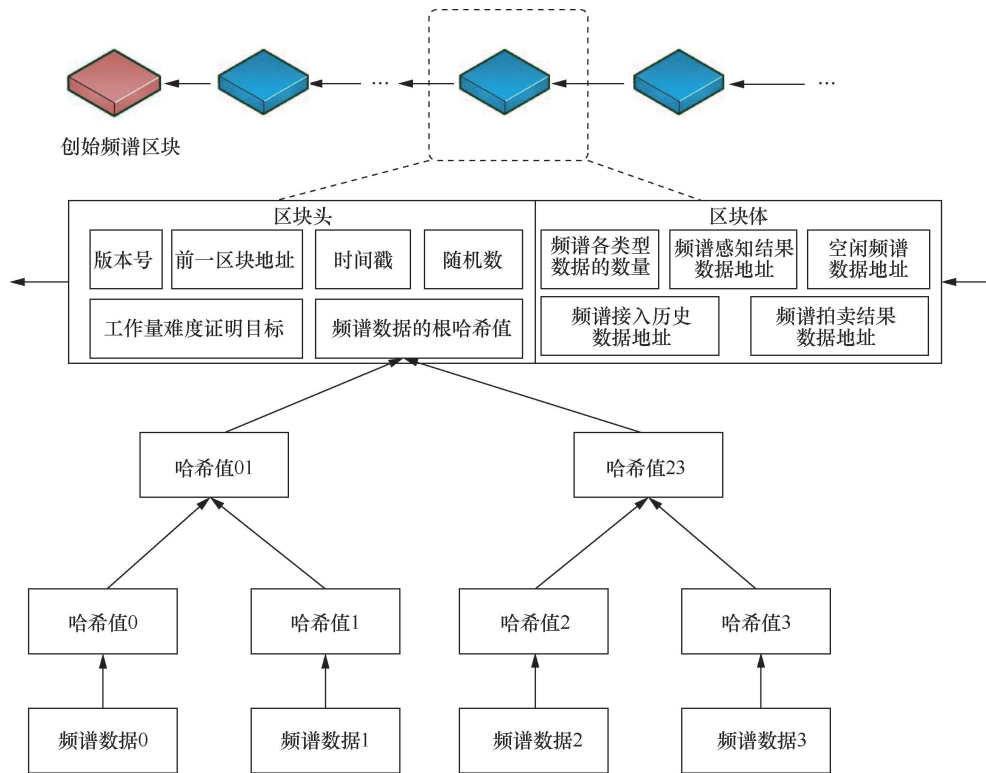


图4 频谱区块的结构

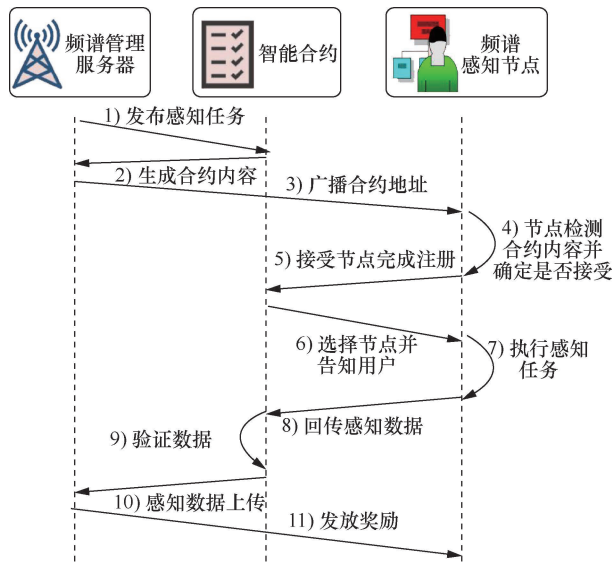


图5 基于智能合约的群智频谱感知方案

4.3 频谱智能合约协作管理

文献[2]设计的频谱共享系统实现了移动运营商的有偿频谱共享、微型运营商的中间获利和用户的频谱使用权获取，该频谱租赁机制考虑了多方利益，但仍未实现频谱用户双方的直接交易。文献[14]通过智能合约中预置的条件检测双方是否满足频谱共享条件，实现了用户与无线网络接入点之间的频谱直接共享。文献[20]研究基于智能合约的频谱

接入方案，实现了主次用户之间的频谱共享，在该方案中，智能合约写入频谱共享、租赁等合约内容，当频谱交易双方达成共识后，智能合约将自动执行频谱交易。通过上述研究内容可知，智能合约可以为点对点的频谱交易提供技术支持。为了保障频谱交易的有序、合法和可信，本文在文献[2]、文献[14]和文献[20]的基础上，开展了基于智能合约的频谱交易验证和激励机制的可能方案研究，基于智能合约的频谱交易验证和激励机制如图6所示。首先，在智能合约代码中预置了合约条款的相应触发条件、响应规则和可信数据源等，其中，触发条件包含特定交易时间、数据资源和共享机构等内容，从而保障系统的有序性；响应规则包含特定交易动作、法律协议等，可以保障交易的合法性；可信数据源主要为频谱交易双方提供可共享的频谱数据源信息。其次，智能合约在经过多方共同协定、各自签名后，随用户发起的交易一起广播至网络各节点，矿工对其进行验证，当验证通过后存储在区块链的特定区块中，用户得到返回的合约地址及合约接口等信息后通过发起交易来调用合约。矿工在受系统预设的激励机制激励下，提供自身的存储、计算等资源验证交易的有效性，矿工收到合约创建或调用交易后在本地沙箱执行环境中创建合约或执行合约代码，

合约代码根据可信外部数据源和检查信息自动判断当前所处场景是否满足合约触发条件，从而严格执行响应规则并更新世界状态。最终，交易验证有效后被打包加入新的数据区块中，新区块经共识机制认证后链接到区块链的主链上，所有更新内容生效，矿工因此获得一定额度的区块奖励。

在智能合约协作管理的频谱交易验证和激励机制中，智能合约通过预置条件规则、集体协定签署、矿工验证的方式允许互不信任的频谱用户双方在没有任何第三方信任机构监督的情况下完成频谱交易，同时，数字代码形式定义的智能合约可以灵活地嵌入频谱管理、资产转移和频谱交易信息内，自动执行合约条款，完成主动或被动的频谱、资产和交易管理，从而实现去中心化、可编程、智能的频谱管理系统。

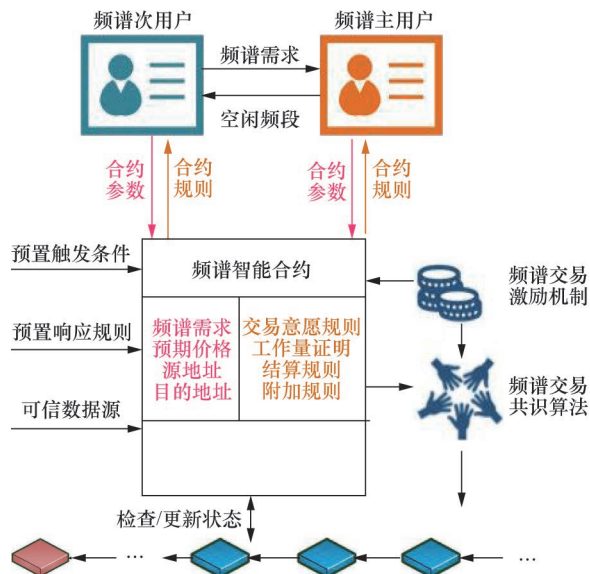
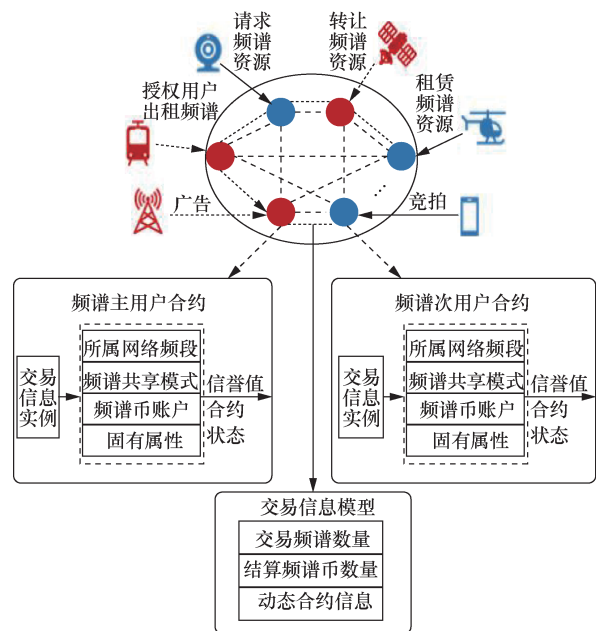


图 6 基于智能合约的频谱交易验证和激励机制

4.4 频谱交易结算方法

在频谱交易网络中，包含人、机、物 3 类参与实体，情况复杂多变，为了有效分离不同参与实体的交易结算，可以在各独立区块中写入智能合约。同时，为了方便频谱交易结算，可引入频谱交易专用货币——频谱币。在文献[21]中，频谱币用于无人机用户与移动运营商之间的频谱交易结算和挖矿奖励。在文献[12]中，频谱币用于认知无线网络的数据传输、次用户与主用户之间的频谱租赁、区块奖励等费用支付。频谱币主要用于频谱交易支付、交易验证奖励和区块奖励等，本文给出了频谱交易模型的可能方案，频谱交易模型如图 7 所示。

区块链由多个主用户和多个频谱次用户共同组成，频谱主用户包括频谱授权用户、转让频谱资源用户等，频谱次用户包括请求频谱资源用户、租赁频谱资源用户等。频谱主次用户将各自的频谱资源和频段需求发布给网络中的所有节点，智能合约根据频谱次用户的频段需求、竞价、用频时长等信息自动与频谱主用户发布的频谱资源、标价、出租时长等信息进行匹配，并将频谱主次用户的账户余额、交易记录、固有属性等信息写入智能合约，自动执行协议并计算频谱主次用户的信誉值。智能合约根据主次用户的信息匹配结果和信誉值判断是否执行频谱共享交易。若频谱共享交易被执行，则智能合约根据交易频谱数量、结算频谱币数量、动态合约信息等建立交易信息模型，频谱交易信息最终被写入频谱账本中。在交易完后，主次用户的信誉值进行同步结算，通过该频谱交易方式，次用户通过花费一定数量的频谱币获取所需的频谱使用权，主用户通过交出频谱使用权获得等价的频谱币。文献[12]主要根据频谱需求者的账户余额判断交易是否执行，本文在频谱交易结算中加入智能合约，根据主次用户信息和信誉值判断交易是否可行，更智能地保障频谱资产归属和价值转移。



● 频谱主用户 ● 频谱次用户 区块链合约 ----- 频谱币交易流

图 7 频谱交易模型

5 结束语

本文针对区块链技术在动态频谱共享中的应

用展开了分析和研究,总结了国内外频谱区块链的研究现状,并指出实现基于区块链的动态、高效、安全的频谱共享急需解决的区块链体系架构、可信频谱账本模型、频谱交易激励机制和频谱协作管理等关键问题。分析了解决这些问题所面临的挑战,研究了对应的解决方法。区块链与动态频谱共享的结合虽然吸引了很多研究者的关注,但目前其研究还处于初级阶段,并未形成完备的标准和规范。从研究角度来看,不管是对于区块链本身还是频谱区块链,对安全性、可扩展性、算法性能等方面的研究还远远不够,区块链与动态频谱共享结合存在的巨大潜力仍需要人们不断探索。

参考文献:

- [1] 代玥玥, 张科, 张彦. 区块链赋能 6G[J]. 物联网学报, 2020, 4(1): 111-120.
- DAI Y Y, ZHANG K, ZHANG Y. Blockchain empowered 6G[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(1): 111-120.
- [2] KIM J, CHA H, KIM S-L. Spectrum leasing for micro-operators using blockchain networks[C]//International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks. 2018: 66-77.
- [3] MAKSYMUK T, GAZDA J, HAN L, et al. Blockchain-based intelligent network management for 5G and beyond[C]//2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT). 2019: 36-39.
- [4] ZHOU Z Y, CHEN X Y, ZHANG Y, et al. Blockchain-empowered secure spectrum sharing for 5G heterogeneous networks[J]. IEEE Network, 2020, 34(1): 24-31.
- [5] CHEN Y L, GU J X, CHEN S, et al. A full-spectrum blockchain-as-a-service for business collaboration[C]//2019 IEEE International Conference on Web Services (ICWS). 2019: 219-223.
- [6] GUO S Y, HU X, ZHOU Z Q, et al. Trust access authentication in vehicular network based on blockchain[J]. China Communications, 2019, 16(6): 18-30.
- [7] ZHANG Z, HONG Z C, CHEN W H, et al. Joint computation offloading and coin loaning for blockchain-empowered mobile-edge computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(6): 9934-9950.
- [8] 张彦, 张科, 曹佳钰. 边缘智能驱动的车联网[J]. 物联网学报, 2018, 2(4): 40-48.
- ZHANG Y, ZHANG K, CAO J Y. Internet of vehicles empowered by edge intelligence[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 2(4): 40-48.
- [9] HAN S, ZHU X. Blockchain based spectrum sharing algorithm[C]//2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT). IEEE, 2019: 936-940.
- [10] LIANG Y C. Blockchain for dynamic spectrum management, dynamic spectrum management[M]. Singapore: Springer, 2020.
- [11] CHEN C, WU J J, LIN H, et al. A secure and efficient blockchain-based data trading approach for Internet of vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(9): 9110-9121.
- [12] KOTOBI K, BILEN S G. Secure blockchains for dynamic spectrum access: a decentralized database in moving cognitive radio networks enhances security and user access[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2018, 13(1): 32-39.
- [13] GAI K K, WU Y L, ZHU L H, et al. Privacy-preserving energy trading using consortium blockchain in smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(6): 3548-3558.
- [14] LING X T, WANG J H, BOUCHOUCHA T, et al. Blockchain radio access network (B-RAN): towards decentralized secure radio access paradigm[J]. IEEE Access, 2019, 7: 9714-9723.
- [15] 丁家昕, 方箭, 王坦. 实施动态频谱管理提高资源利用效率[J]. 中国无线电, 2018(1): 25-28.
- DING J X, FANG J, WANG T. Implementing dynamic spectrum management to improve resource utilization efficiency[J]. China Radio, 2018(1): 25-28.
- [16] NAKAMOTO S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system[R]. Manubot, 2019.
- [17] BUTERIN V. A next-generation smart contract and decentralized application platform[S]. White Paper, 2018.
- [18] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(4): 481-494.
- YUAN Y, WANG F Y. Blockchain: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4): 481-494.
- [19] 丁腾波, 刘宏波, 陶佳, 等. 区块链技术在智慧能源体系中的应用研究[J]. 发电技术, 2019, 40(5): 403-412.
- DING T B, LIU H B, TAO J, et al. Application of block chain technology in intelligent energy system[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(5): 403-412.
- [20] ARIYARATHNA T, HARANKAHADENIYA P, ISTHIKAR S, et al. Dynamic spectrum access via smart contracts on blockchain[C]//2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2019: 1-6.
- [21] QIU J F, GRACE D, DING G R, et al. Blockchain-based secure spectrum trading for unmanned aerial vehicle assisted cellular networks: an operator's perspective[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019: 1.

[作者简介]



王威 (1990-), 男, 山东单县人, 博士, 南京航空航天大学电子信息工程学院研究员, 主要研究方向为无线通信、空天地一体化网络、电磁频谱空间安全、区块链等。



李祖广 (1996-), 男, 江西抚州人, 南京航空航天大学电子信息工程学院学生, 主要研究方向为频谱感知、区块链、无线通信等。



吴启晖 (1970-), 男, 安徽歙县人, 博士, 南京航空航天大学电子信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为认知科学与应用、认知信息论、天地一体化智能信息网络、电磁空间频谱认知智能管控、区块链、无人机认知集群等。