基于区块链的频谱共享

Chen SUN†，Shuo WANG†

†无线网络研究部，北京实验室，中国研发中心，索尼（中国）有限公司，平安国际金融中心商业裙楼3层301室，新源南路1号，朝阳区，北京，中国，邮编100027。电子邮箱：chen.sun@sony.com

摘要频谱共享长期以来一直被视为提高频谱资源利用率的一种方法。集中式地理位置数据库方法已被全球商业应用所采用。近年来，区块链被视为以分布式方式支持频谱共享的平台。与其他商品一样，频谱或频谱使用权可以通过区块链进行交易。然而，这会导致特定频率信道的使用地点发生变化，从而产生潜在干扰。本文提出了一种用于基于区块链的频谱共享的基于干扰的共识和智能合约。我们还将介绍区块链的其他方面，例如跨链交易、跨层频谱协调和激励机制，这些方面仍需针对频谱共享应用进行研究。

关键词 认知无线电系统（CRS）、动态频谱接入（DSA）、共存、区块链、共识、智能合约

1. 引言

随着未来无线服务对带宽的需求不断增长，频谱监管机构在分配有限频谱资源时面临巨大挑战。然而，授权频谱在时间和空间上往往未得到充分利用。为解决这一问题，人们提出了一种名为频谱共享的新范式，使次级系统有机会使用主系统拥有的闲置频谱资源。现有的频谱管理技术（如电视白空间和公民宽带无线电服务）采用集中式地理位置数据库，为无线设备分配频谱，并保护现有用户[1][2]。尽管集中式方案在实现动态频谱接入方面有效，但由于所有干扰计算和频谱分配决策均由中心实体完成，因此对频谱管理者的计算能力要求较高。近年来，人们提出了基于区块链的去中心化频谱管理方法，尤其是在中国和欧洲。

区块链是一种分布式账本技术，它将数据组织成区块，并以仅追加模式将这些区块链接起来。通过执行共识机制，在对等节点之间验证交易，并保持各节点上的账本同步更新。区块链具有去中心化、匿名性和可审计性等特点。

频谱共享的某些特性与区块链的应用场景相符。首先，频谱使用具有实时性，需要及时处理，而本地化频谱账本能够满足这一需求。其次，频谱共享涉及多个可能彼此不信任的利益相关方，这一问题可以通过区块链解决。第三，借助区块链，无线设备之间可以直接进行频谱共享，无需中介。

然而，与其他商品的交易相比，频谱交易有其独特之处。最重要的一点是，频谱交易意味着无线电发射机位置的变化。这可能会对卖方和买方附近那些“无辜”的无线网络造成干扰。在分层系统中，频谱使用受主系统的干扰预算限制。交易可能涉及消耗干扰预算而非直接交换频段。另一个方面是，与有线环境中的应用相比，用于区块传播的无线信道变化可能会影响区块链系统的性能。

本文介绍了基于区块链的频谱共享的多个方面，例如基于干扰的共识、区块设计、跨链交易、跨层频谱协调和激励机制。本文结构如下：第 2 节介绍频谱共享和区块链技术的标准化活动。第 3 节阐述基于区块链的频谱共享的技术方面。最后，第 4 节总结全文。

2. 频谱共享与区块链的标准化活动

2.1. 频谱共享的标准化

电视白空间（TVWS）技术最先针对频谱共享进行了标准化。多个 IEEE 工作组，例如 IEEE 802.11af、802.22、802.19.1 和 P1900.6，针对电视白空间的不同方面制定了标准，包括系统要求、架构、传感器信息交换等。[3] [4]。

在美国，无线创新论坛（WinnForum）已针对 3550-3700 MHz 的公民宽带无线电服务频段制定了频谱共享标准。在欧洲，ETSI 已针对 2300-2400 MHz 频段的授权共享接入下移动宽带服务制定了相关标准。

2.2. 通信领域区块链技术的标准化 国际电信领域的多个研究组

联盟（ITU），例如 FG DLT，SG13 和 SG20，一直致力于区块链技术标准化工作，涵盖基于分布式账本技术的应用和服务的概念、用例及参考架构。ETSI 于 2018年成立了许可型分布式账本（PDL）行业规范组（ISG）。IEEE标准协会一直通过开展多项活动，推动区块链标准化，例如将分布式账本技术用于物联网（IoT）数据管理、网联自动驾驶车辆、区块链访问控制和区块链互操作性。

中国通信标准化协会（CCSA）在多个工作组开展了与区块链相关的研究项目和工作项目。《区块链及其在下一代无线网络中的应用技术报告》将频谱共享确定为区块链技术的重要用例之一 [5]。随后，针对无线网络架构的区块链解决方案研究进一步探讨了基于区块链的动态频谱共享的关键问题和技术要求 [6]。

3. 基于区块链的频谱共享：关键问题与潜在解决方案

3.1. 考虑干扰的共识机制 频谱共享与其他基于区块链的数据共享之间最重要的区别之一是干扰的影响。在

无线网络中，需要提高验证速度，以确保服务质量（QoS）。我们在 [7] 中提出的方法是根据干扰关系，在验证区域中选取少数节点。只有当验证区域中的所有节点都批准交易，并表示接受该交易将造成的干扰时，该交易才被视为有效并得以执行。与比特币等传统方案将交易数据发送给网络中的所有节点相比，较小的验证区还可以节省共识时间。

3.2. 激励机制 在有 m

个移动网络运营商（MNO）和服务提供商（SP）使用基于区块链的频谱交易平台来管理频谱使用和交易信息的场景中，MNO（作为领导者）可以向 SP 出售频谱以获取经济利益，而 SP （作为跟随者）则可以为最终用户提供更好的服务。如何在这些利益相关方之间实现平衡？鉴于 SP 之间存在竞争关系，且各方都追求自身利益最大化，我们将频谱交易过程建模为分层斯塔克尔伯格博弈，并提出一种补偿激励机制，以最大化频谱购买方的效用，并确保竞争性 SP 之间的公平性 [8]。

3.3. 跨链交易 单

链结构的吞吐量限制了大规模频谱交易的性能。我们提出了一种多区块链架构及相应的跨链机制，以提高频谱交易的速度 [9]。如前所述，频谱交易会导致现有用户与无线设备之间干扰关系的变化。因此，有必要找到可信赖且可靠的中介，以确保跨链频谱交易的安全性。我们进一步在该架构中结合了公证机制和中继链机制，其中共存管理器担任公证人，选定的公民宽带无线电服务设备将维护一条决策区块链。决策区块链用于在不同群组之间共享信息，并可提高公证机制的可扩展性。

3.4. 跨层频谱协调 一些频谱共享框架

例如，公民宽带无线电服务（CBRS）包含多个优先级不同的层级。为保护现有用户，所有层级的次级用户产生的累积干扰都不应超过干扰阈值。目前，这些次级用户的干扰预算是在所有用户之间平均分配或按固定比例分配的。区块链技术为不同层级之间协调频谱使用提供了一种颇具前景的解决方案。首先，为共享同一频谱的设备建立频谱区块链。只有在低优先级层级的设备不会对更高层级和现有用户造成有害干扰时，才能接入频谱。借助频谱区块链，较低层级的设备可以请求较高层级的设备调整其干扰预算，并确保对现有用户造成的累积干扰不超过保护阈值。这种跨层频谱协调可以增加能够接入共享频谱的低层级用户总数。

4. 结论 本文

中总结了各标准制定组织在频谱共享和区块链技术方面的标准化工作。随后，介绍了基于区块链的动态频谱共享中的关键问题，并提出了相应的解决方案。通过讨论，我们看到区块链技术在动态频谱共享应用中的巨大潜力，这将为各种无线网络（如移动公用网络、Wi-Fi、车联网和专用网络）高效、公平地利用宝贵的频谱资源铺平道路。

参考文献

[1] E. Hossain 等，“认知无线电：法规、标准与技术概述，” IEEE Communications Magazine，第51卷，第7期，第138–145页，2013年7月。[2] C. Sun 和 R. Jiao，“动态频谱接入无线网络的离散排除区，” IEEE Access，第8卷，第49551–49561页，2020年。[3] M. D. Mueck 等，“ETSI 面向（电视）白频段的机会式频谱共享技术，”《机会式频谱共享与白频段接入：现实实践》，2015年2月。[4] G. P. Villardi 等，“实现多个认知网络在电视白频段中的共存，” IEEE Wireless Communications，第18卷，第4期，第32–40页，2011年8月。[5] CCSA TC5，《区块链及其在下一代无线网络中的应用技术报告》，2020B96。[6] CCSA TC5，《面向无线网络架构的区块链方案研究》，2021B94[7] Y. Liang 等，“基于区块链的频谱管理中的基于干扰的共识与交易验证机制，” IEEE Access，第9卷，第90757–90766页，2021年。[8] S. Wang 和 C. Sun，“区块链赋能的动态频谱共享：标准、研究现状与未来方向，” TechRxiv 预印本 TechRxiv: 19395176.v1，2022年。[9] Y. Liang 等，“面向 CBRS系统中分布式频谱共享的多区块链方案，” IEEE 认知通信与网络汇刊，已录用，2023 年。