

基于区块链的时间敏感性金融交易协议研究

史爱武, 胡子晗, 李林逸, 张世林

(武汉纺织大学 计算机与人工智能学院, 湖北 武汉 430200)

摘要: 传统区块链系统因采用依赖区块高度来确定交易截止时间的方式, 致使时间敏感性交易的处理效率较为低下。为此, 提出一种基于动态时间约束的共识机制以及整合自适应交易打包算法 ATPA 的区块链交易协议。该协议以构建交易的精确截止时间为核心, 结合 ATPA 的动态优先级调整机制, 实现对时间敏感性交易的优先处理。实验结果显示, 当交易频率足够大时, 该方案处理时间敏感性交易的成功率达到 98.3%, 有效吞吐量比传统 BH 链提高了 2.19 倍。所提方案优化了高并发场景下的交易处理效率与资源利用率, 能有效满足时效性金融交易场景的需求。

关键词: 区块链; 时间敏感性交易; 共识机制; 自适应打包; 有效吞吐量

DOI: 10.11907/rjdk.251188

中图分类号: TP392

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2026)006-0150-06

扫描二维码阅读全文:



Research on Time-sensitive Financial Transaction Protocol Based on Blockchain

SHI Aiwu, HU Zihan, LI Linyi, ZHANG Shilin

(School of Computer Science and Artificial Intelligence, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China)

Abstract: The traditional blockchain system relies on the height of the block to determine the transaction deadline, which results in low processing efficiency of time sensitive transactions. Therefore, a consensus mechanism based on dynamic time constraints and a blockchain transaction protocol integrating the adaptive transaction packaging algorithm ATPA are proposed. The protocol focuses on building an accurate deadline for transactions, and combines the dynamic priority adjustment mechanism of ATPA to achieve priority processing for time sensitive transactions. The experimental results show that when the transaction frequency is large enough, the success rate of the scheme for time sensitive transactions reaches 98.3%, and the effective throughput is 2.19 times higher than that of the traditional BH chain. The proposed scheme optimizes transaction processing efficiency and resource utilization in high concurrency scenarios, and can effectively meet the needs of time sensitive financial transaction scenarios.

Key Words: blockchain; time-sensitive trading; consensus mechanism; adaptive packaging; effective throughput

0 引言

在金融交易领域, 时效性与时间敏感性占据着至关重要的地位。以证券交易、期权交易等典型场景为例, 其对交易时效性有着极高要求, 任何细微的时间延迟都可能引发交易失败, 进而造成经济损失^[1-3]。在此背景下, 相较于传统金融系统, 区块链金融系统凭借其在交易环节所具备的去中心化特性以及高效性等显著优势, 展现出巨大的应

用潜力与发展前景^[4]。

近年来, 许多学者聚焦于区块链金融交易系统中交易顺序和打包机制的研究, 这是交易处理的关键步骤。例如, Ruan 等^[5]提出一种细粒度的并发控制方法, 通过在打包排序阶段对交易重新进行排序来提高交易成功率。Qi 等^[6]提出一种针对数据中心网络的高吞吐量、低延迟许可区块链框架, 旨在解决传统区块链架构在处理交易时面临的性能瓶颈问题, 尤其是通用许可链框架 (如 Hyperledger Fabric) 在交易竞争率高时吞吐量急剧下降的问题。以上

收稿日期: 2025-03-17

作者简介: 史爱武 (1972-), 男, 博士, CCF 会员, 武汉纺织大学计算机与人工智能学院副教授, 研究方向为云计算与大数据; 胡子晗 (1999-), 男, 武汉纺织大学计算机与人工智能学院硕士研究生, 研究方向为云计算与大数据; 李林逸 (1999-), 男, 武汉纺织大学计算机与人工智能学院硕士研究生, 研究方向为云计算与大数据; 张世林 (2001-), 男, 武汉纺织大学计算机与人工智能学院硕士研究生, 研究方向为云计算与大数据。

研究的本质是为了获取经济效益的最大化,提高系统的吞吐量 and 可扩展性,并非是为了处理时间敏感性交易(Sensitive-time Transaction, S-TX),该类交易对处理时间有严格要求^[7-8]。

为提高区块链系统的交易效率,Shi 等^[9]提出一种交易排序和参数优化方法,利用深度强化学习来智能调整区块参数,在高竞争环境下显著降低了交易延迟,提高了吞吐量。值得注意的是,通过优化区块参数来增强系统性能,本质上还是通过调整区块高度(Block Height, BH)来确定交易的截止日期。Li 等^[10]提出的 FISCO-BCOS 方案能够实现区块间和区块内的并行处理,从而提升系统吞吐量,不过其采用先到先服务策略,并不能有效处理那些时效性要求较高的交易。

为提高区块链系统的交易时效性,Sokolik 等^[11]探讨了区块链交易排序中的年龄感知公平性(Age-aware Fairness),旨在通过优先处理等待时间较长的交易来降低交易的尾部延迟(Tail Latency),从而提升系统的整体公平性和响应速度。Zhou 等^[12]提出基于智能优化的交易流量控制机制,有效减少了区块链网络在高负载下的交易确认延迟,增强了区块链的时效性表现。然而,现有针对时效性交易的打包机制和交易排序研究没有考虑交易的截止时间要求。

以往的许可区块链系统受限于共识机制,需要依赖 BH 确定交易截止日期,而区块的生成时间易波动,从而导致转换后的 BH 无法准确反映交易的准确截止时间^[13-14]。此外,在遇到交易高峰期时,许可区块链系统会存在并行数量大的问题,打包策略无法及时优先处理 S-TX,从而导致经济损失。针对上述问题,结合已有研究,本文提出一

种时间敏感性金融交易协议。该协议基于时间截止日期来实现一致性共识机制,并采用动态交易打包算法(Adaptive Transaction Packing Algorithm, ATPA)提高交易吞吐量,能有效提高 S-TX 的成功率^[15]。该协议不仅避免了因时钟漂移而导致的本地时间波动,而且提高了系统的资源利用率。

1 时间敏感性金融交易协议设计

本文协议通过结合运行在联盟链上的拜占庭容错(Byzantine Fault-Tolerant, BFT)威胁模型来完成整个 S-TX 过程^[16]。协议总体流程如图 1 所示。

联盟链是一种许可区块链,与非许可区块链的代表以太坊相比,其能通过高效的共识算法来实现高并发业务。本文协议的 3 个阶段在联盟链交易共识轮次中执行,分别为打包阶段、验证阶段和区块共识提交阶段^[17-18]。在交易确认前,提议节点会收集客户端生成并签署的交易,并通过 ATPA 算法对交易池中的 S-TX 进行当前轮次的候选列表打包。验证节点对提议节点广播的候选列表进行本地交易,使用的共识算法为联盟链中通用的 BFT,验证节点对交易完成本地核验后,会向提议节点反馈该交易的有效性判定结果。验证节点对交易进行本地核验后会向提议节点反馈该交易的有效性判定结果。为确保对 S-TX 进行准确处理,本文协议引入动态时间约束共识机制。该机制允许验证节点根据本地时钟执行交易,并判断其是否在截止时间前完成。由于节点间可能存在时钟偏差,为避免因个别节点判断差异而导致交易失效,提议节点会收集所有验证节点的本地有效性判断结果,并采用阈值机制(即在

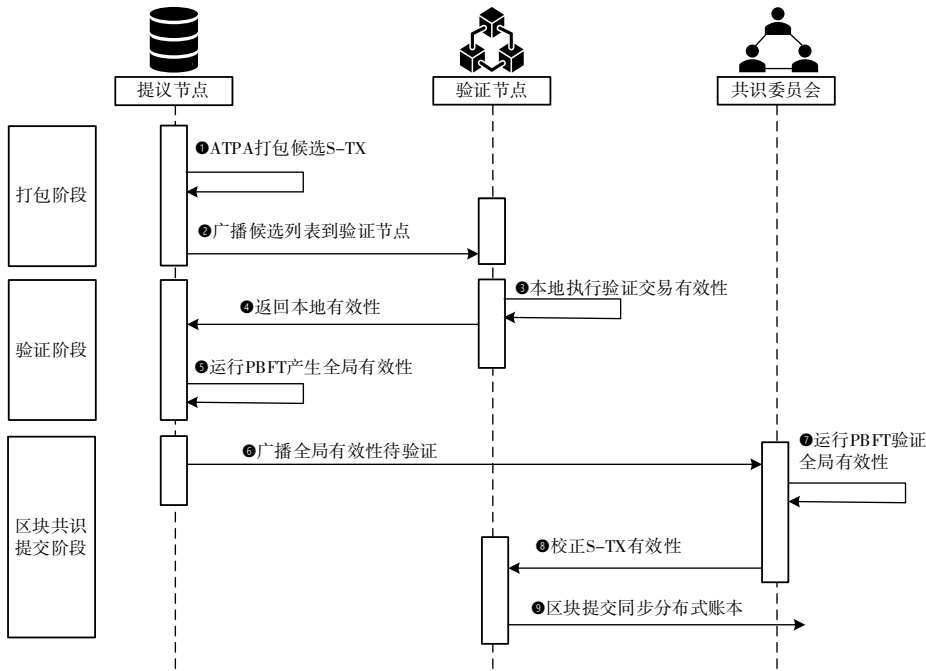


Fig. 1 Time sensitive financial transaction protocol process
图 1 时间敏感性金融交易协议流程

包含 $3f+1$ 个验证节点的 BFT 系统中,至少有 $2f+1$ 个节点返回正向判断,其中 f 表示系统所能容忍的最大拜占庭失效节点数)来整合各节点的局部判断,从而在全网范围内达成一致的全局有效性结论。随后,由提议节点收集所有本地交易结果,再次使用 BFT 进行最终有效性判定,并将最终候选列表提交至共识委员会。该委员会对提交的交易有效性达成共识,确保全网状态一致,生成新区块并将其广播至全网络。

2 ATPA 算法

2.1 算法总体设计

ATPA 算法以贪心算法为核心,分为优先级排序和迭代选择两个阶段。优先级排序的主要目的为提高排序速度和效率,减少算法运行时间。在迭代选择阶段前进行排序可以提前决定哪些交易最需要被处理,从而降低后续每轮迭代中的计算复杂度。在打包阶段,需要及时进行的交易会被放入交易节点的初始交易池中,初始交易池表示为 $F = \{1, 2, 3, \dots, f\}$,其中 f 为 F 中 S-TX 的数量。最终的 S-TX 候选列表表示为 $K = \{1, 2, 3, \dots, k\}$,其中 k 为 K 中 S-TX 的数量。

在以太坊中, gas 机制被用于衡量执行特定交易所需的计算工作量。本文使用 gas 来表示区块链系统中交易所需的计算资源,并使用 G 表示交易节点在一轮共识周期中执行 S-TX 的总 gas 量^[19]。每个 $S-TX_i$ 的属性为 $\langle g_i, d_i, t_i \rangle (i \in F)$,其中 g_i 表示所需的 gas 量, d_i 表示截止时间, t_i 表示交易执行时间。算法的核心在于迭代阶段的迭代选择过程,直到 G 消耗完或无法再选出新的交易来提高总体效用,迭代结束。

2.2 优先级排序阶段

优先级排序是指为 S-TX 分配初始优先级。在该阶段,ATPA 算法会最大化地计算每个 S-TX 在候选列表第一个位置时的资源效用 U_i ,再计算资源效率 Re 。公式为:

$$Re = \frac{U_i}{g_i} \quad (1)$$

Re 会按照递减顺序对每个 S-TX 进行排序。在此之前,需要引入选择奖励和选择惩罚来最大化最终列表 K 中有效 S-TX 的数量,从而提高算法性能。引入选择奖励是为了提升高紧迫性 S-TX 的优先级,剩余处理时间更少的交易能获得更高的优先级。因此, S-TX 的紧迫程度越高,选择该交易的收益就越大。设 k 为 S-TX 的顺序,历史选择集合使用 $M = \{1, 2, 3, \dots, k-1\}$ 表示。对于选择顺序为 k 的 $S-TX_i$,根据其剩余处理时间来定义其选择奖励 $R_{i,k}$ 表示为:

$$R_{i,k} = \frac{1}{d_i - \left(T + \sum_{m=1}^{k-1} t_m\right)}, k \in K, m \in M \quad (2)$$

式中: T 为本地计时器获取的当前时间戳; $T +$

$\sum_{m=1}^{k-1} t_m$ 能够计算出当前时间与前 $k-1$ 个 S-TX 时间的总和,由此可以得出交易 $S-TX_i$ 的剩余处理时间。剩余处理时间越短的交易会获得越高的选择奖励,从而被优先打包处理。

定义成本惩罚项 C_i 来反映交易资源占用与系统负载的动态关系。在每轮共识周期中, S-TX 的资源成本与前置处理工作密切相关,成本惩罚因子 C_i 可用于量化每笔交易的资源成本。公式为:

$$C_i = g_i \cdot \frac{F - \bar{F}}{\bar{F}} \quad (3)$$

式中: $\bar{F}$ 表示交易池的平均长度或平均负载水平,用于衡量当前负载是否偏高。交易对系统资源的占用越多,成本惩罚 C_i 也越高。

除了成本问题,还应考虑 S-TX 的顺序给其他交易带来的影响。若将某一 S-TX 置于候选列表前列,可能会导致后续交易因等待超时而失效,进而便会产生顺序惩罚 $O_{i,k}$ 。计算公式为:

$$O_{i,k} = \sum_{j \neq i} 1_{\{S-TX_j \text{ 因 } k \text{ 而过期}\}} \quad (4)$$

当第 i 笔 S-TX 被分配至第 k 执行顺位时,系统需优先完成前 k 笔 S-TX 的执行流程,此时该顺位分配行为则可能造成其他交易因等待而超时失效。其中, $1_{[\cdot]}$ 为指示函数,当括号内条件满足时取值为 1,否则取 0。 $O_{i,k}$ 则用于统计因该分配策略而失效的 S-TX 总数量。

交易 i 的选择惩罚 $P_{i,k}$ 由成本惩罚 C_i 和顺序惩罚 $O_{i,k}$ 两部分组成。 $P_{i,k}$ 越大,表示交易 i 在位置 k 上的资源消耗或给其他交易带来的过期风险越大,在打包策略中降低其优先级。其计算公式为:

$$P_{i,k} = C_i + O_{i,k} \quad (5)$$

在式(2)中考虑选择奖励和式(5)中考虑选择惩罚后,即可得出总效用 $U_{i,k}$:

$$U_{i,k} = R_{i,k} - \gamma P_{i,k} \quad (6)$$

式中: γ 为一个可配置参数,具体数值可在实验中根据需求调试,目的是在资源限制与交易紧迫性之间实现权衡,从而最大化区块链系统的整体性能。

在计算完所有 S-TX 的效用后,系统会根据式(1)得到的效用率在初始交易池 F 中对所有交易进行降序排列。

2.3 迭代选择阶段

迭代选择阶段是 ATPA 算法的核心,经资源效率排序后输出的初始交易池 F 会继续作为输入进行迭代选择阶段。在该阶段,系统会一直运行,直到一轮共识周期的 gas 耗尽或无法再选出新的交易来提高系统整体效用为止。迭代选择阶段包括优先选择、位置分配和位置替换 3 个关键步骤。

2.3.1 优先选择

在每次迭代中,ATPA 算法会从已初始排序的交易池 F 中选择一个子集来构成比较集 W_k ,只有该集合中的交易才有机会在本次迭代中被选择。 W_k 的大小由选择窗口 S_k

决定,窗口大小会影响算法的执行效率。由于交易的选择会动态影响最终候选列表 K , S_k 的大小也需要动态调整。本文引入参数 b_k ,通过计算每轮迭代后当前系统资源状态与历史资源状态的平均汇报比率来实现对参数 S_k 的动态调整。公式为:

$$b_k = \sqrt{G_r \cdot \frac{1}{k-1} \cdot \frac{\sum_{c=1}^{k-1} \max_{m \in W_c} U_{m,c}}{\max_{m \in W_{k-1}} U_{m,k-1}}} \quad (7)$$

式中: G_r 为当前剩余 gas ; $\max_{m \in W_c} U_{m,c}$ 为历史窗口中第 c 轮迭代的最大效用。因此, S_k 可表示为:

$$S_k = \begin{cases} b_k \cdot S_{k-1}, & \text{if } \max_{m \in W_{k-1}} U_{m,k-1} > 0 \\ \alpha \cdot S_{k-1}, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

式中: α 为动态窗口扩展因子,为大于1的常量参数。如果在新一轮迭代中找到有效的S-TX,那本轮迭代便会根据剩余 gas 量和历史效用均值减小 S_k ,反之则会将其扩大 α 倍来增强搜索能力。此外,在开始迭代前需要手动设定 S_k 的初始值 S_1 。为满足后续实验需求,本文借鉴贪心算法策略,结合过往实验经验与初步实验数据完成参数调优工作,最终确定当参数 α 取值为1.5时,系统可取得最优收敛效果^[20]。

从已初步排序的 F 中选择S-TX并加入到比较集 W_k 中,根据式(6)计算出每个交易的效用 U ,从中选出效用最大的交易记为 v 。

2.3.2 位置分配

如果被选择到的 v 能增加当前的总效用 U ,ATPA算法会使用 $insert(v)$ 函数将 v 添加到最终候选列表 K 中,然后更新总效用 U 和剩余 gas 量 G_r 。

2.3.3 位置替换

如果被选择到的 v 不能增加当前的总效用 U ,ATPA算法会尝试使用 v 来替换 K 中的S-TX,如果 v 在替换候选列表中的某交易后能提高总效用,算法便会执行 $displace(u, v)$ 函数来替换 K 中 $S-TX_u$ 的位置。更新总效用 U 以及剩余 gas 量 G_r ,完成一次迭代。直到本轮共识 gas 耗尽或选不出新的S-TX来提升系统效用时迭代阶段结束,ATPA算法将最终候选列表 K 返回给交易节点。

2.4 算法复杂性分析

在初始交易池中,假设 n 为S-TX的数量,优先级排序阶段的时间复杂度为 $O(n \log n)$ 。在迭代选择阶段需要考虑不同步骤的时间复杂度,其中优先选择、位置分配和位置替换的时间复杂度分别为 $O(n)$ 、 $O(1)$ 和 $O((K-1)n)$,迭代选择阶段的最大时间复杂度为 $O(n+1+(K-1)n)$ 。当最大迭代次数为 K 时,ATPA算法的总体时间复杂度为 $O(n \log n + Kn + 1)$ 。

因此,ATPA算法的时间复杂度可简化为 $O(n \log n)$ 。相较于文献[8]中先到先打包策略 $O(n^2)$ 的时间复杂度,本文算法展现出显著优势。

3 实验方法与结果分析

3.1 实验设置

为满足BFT共识的 $3f+1$ 节点要求,使用4台PC构建的分布式环境进行模拟实验,每台PC部署5个虚拟机以满足节点规模要求,测试环境为Ubuntu 22.04 LTS,虚拟机内存为4 GB,硬盘容量为200 GB,带宽为200 Mb/s,区块链实验平台为Hyperledger Fabric。在实验中,节点分为共识节点和观察节点,其中共识节点参与区块生成与验证,观察节点仅同步数据,模拟节点时钟漂移范围设置为 $[0, 1s]$ 。本文使用一个真实的以太坊数据集,其包含147万笔由BH决定截止时间的真实历史交易,对每笔交易添加一个新的字段“截止日期”,即 $S-TX_i$ 的一个属性 d_i ^[21]。模拟实验通过3阶段比较分析传统BH链体系、未整合ATPA算法与整合ATPA算法的本文协议之间的性能差异,其中BH链采用PBFT(Practical Byzantine Fault Tolerance)作为共识协议。

3.2 评价指标

使用以下3个指标评价区块链系统对S-TX的处理能力:①有效吞吐量。指单位时间内S-TX的有效打包数量。该指标不仅反映了系统处理交易的速度,而且直接关系到系统在高负载环境下的实际性能。对于S-TX来说,只有在交易截止时间内被执行完成才有实际价值。当有效吞吐量高时,说明系统在有限的资源下能成功处理更多交易;②S-TX成功率。指S-TX有效成交量与S-TX总数的比例。由于S-TX的截止时间要求严格,部分交易可能会因为延迟、资源不足等原因未能按时执行而作废。成功率越高,说明系统对S-TX的调度越有效。未能按时执行的交易可能需要承担额外的费用或惩罚,因此成功率的提高能有效降低这样的无效经济支出;③ gas 使用率。指打包有效S-TX所消耗的 gas 占区块总 gas 的比例,反映了系统在执行交易过程中的资源利用效率。使用率越高,说明每一单位 gas 的利用越高效。

3.3 实验结果与分析

3.3.1 有效吞吐量

如图2所示,本文协议无论是否整合ATPA算法,其有效吞吐量均高于BH链。当S-TX抵达频率达到700 TX/s时,整合ATPA算法的协议有效吞吐量达到493.1,未整合ATPA算法的协议为348.7,而BH链仅为225.6。未整合ATPA算法协议的有效吞吐量比BH链提高了1.54倍,整合ATPA算法协议的有效吞吐量比BH链提高了2.19倍。随着S-TX抵达频率越来越高,BH链的有效吞吐量持续降低,这是由于随着负载的升高,区块链系统很难再通过识别合适的BH来确定交易的具体截止时间。未整合ATPA算法协议的有效吞吐量亦有所下降,这是由于先到先交易的打包策略会导致打包速率陷入瓶颈。而本文协议的有

效吞吐量会随着S-TX 抵达频率的增加而不断增加,最终达到最大值。

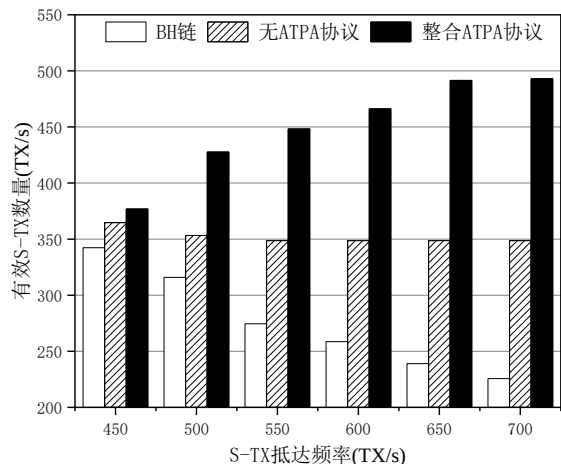


Fig. 2 Effective throughput under different time sensitive transaction arrival frequencies

图2 不同S-TX 抵达频率下的有效吞吐量

3.3.2 S-TX 成功率

如图3所示,当S-TX 抵达频率达到700 TX/s时,BH链的成功率降低至41.9%,无ATPA算法的协议与整合ATPA算法的协议分别为71.6%和98.3%,与BH链相比分别提高了1.71和2.35倍。随着S-TX 抵达频率的增加,BH链的成功率不断下降,这是由于随着系统负载的提高,待处理的事务将会超出BH链的处理能力。无ATPA算法的协议成功率下降幅度低于BH链,而本文协议的成功率没有显著下降。

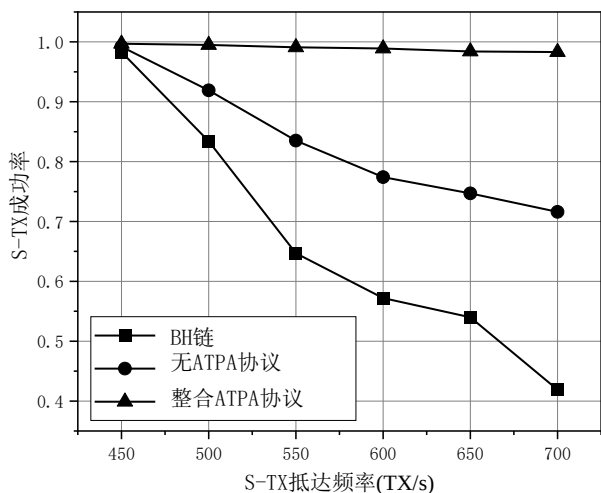


Fig. 3 Transaction success rate under different time sensitive transaction arrival frequency

图3 不同S-TX 抵达频率下的交易成功率

3.3.3 gas 使用率

如图4所示,区块链系统中的gas 消耗会随着交易量的累积而增大。然而,受限于区块链单点资源的有限性与去中心化要求之间的不可调和性,gas 使用率会逐步下降。从图中可以看出,BH链在S-TX 抵达频率达到700 TX/s

时,其gas 使用率仅为61.3%,造成了严重的资源浪费。而无ATPA算法的协议与整合ATPA算法协议的gas 使用率分别为95.8%和99.3%,相比BH链分别提高了1.56倍与1.62倍。在实验过程中,本文协议的gas 使用率均超过99%,这得益于ATPA算法的动态调整机制有效减少了无效交易与打包效率低的影响。

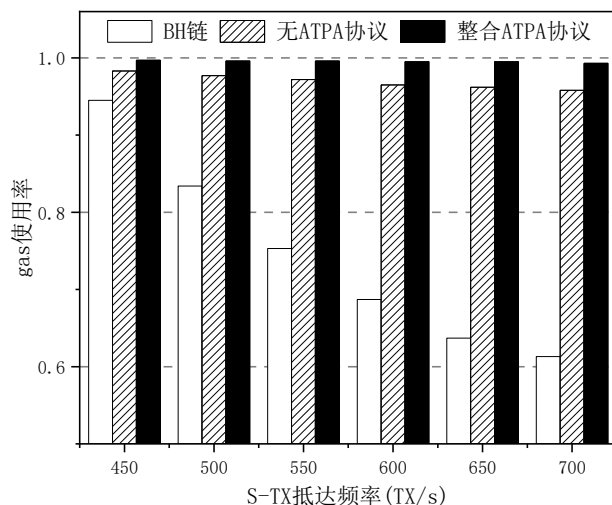


Fig. 4 Gas utilization rate under different time sensitive transaction arrival frequency

图4 不同S-TX 抵达频率下的gas 使用率

3.3.4 与其他协议的性能比较

从S-TX 处理速率、打包速率、处理延迟性以及宽带开销4个维度对本文协议与现有支持处理交易截止日期的协议进行比较,结果如表1所示。其中,文献[22]提出交易顺序公平性(Transaction Order-Fairness)这一新的共识属性,并设计了Aequitas 协议来实现这一属性,同时满足一致性和活跃性。该协议虽从共识层面保障了交易排序的宏观公平性,但未针对临近截止日期的交易进行细粒度的优先级调度。可以看出,除宽带开销高于文献[11]和[12]协议外,本文协议在其他3个维度的表现均为最佳,这是由于本文协议在打包交易时增加了额外的迭代选择阶段。然而本文协议能显著提升系统吞吐量以及交易成功率,这种牺牲可以接受的。本文协议整体的带宽资源消耗与传统BH链损失的资源相当,因此在总资源消耗相同的场景中,其更能满足S-TX 的需求。

Table 1 Performance comparison of different protocols

表1 不同协议性能比较

协议	S-TX 处理速率	打包速率	处理延迟能力	宽带开销
文献[11]协议	中	高	中	中
文献[12]协议	低	中	低	低
文献[22]协议	中	中	中	低
本文协议	高	高	高	中

4 结语

本文针对时间敏感性金融交易场景中传统区块链系

统的局限性,提出一种新的共识机制与动态打包策略,通过构建交易中基于具体截止时间约束的一致性协议,结合自适应交易打包策略,实现了对S-TX优先级的动态调整。实验结果表明,本文协议能提升系统的交易成功率与吞吐量,同时保持低延迟与高资源利用率。然而,本文未考虑协议在不同平台上面对不同体量交易时的适用性,未来可进一步探索不同平台体量下的协议框架改进策略,并扩展至跨链协同场景,为时效性区块链金融服务提供更鲁棒的解决方案。

参考文献:

- [1] SABOUR A K, WAELI A A. The effect of blockchain technology as a moderator on the relationship between big data and the risk of financial disclosure (analytical study in the Egyptian and Iraqi stock exchange) [J]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2023, 1 (13): 132-142.
- [2] RATHEE G, IQBAL R, WAQAR O, et al. On the design and implementation of a blockchain enabled e-voting application within iot-oriented smart cities [J]. IEEE Access, 2021, 9: 34165-34176.
- [3] LI G, XUE J, LI N, et al. Blockchain-supported business model design, supply chain resilience, and firm performance [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 163: 102773.
- [4] SHEN W. Blockchain financial regulation in the era of digital economy: status, risk and response [J]. People's Forum · Academic Frontiers, 2022 (18): 52-69.
沈伟. 数字经济时代的区块链金融监管: 现状、风险与应对 [J]. 人民论坛·学术前沿, 2022 (18): 52-69.
- [5] RUAN P, LOGHIN D, TA Q T, et al. A transactional perspective on execute-order-validate blockchains [C]//Proceedings of the 2020 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 2020: 543-557.
- [6] QI J, CHEN X, JIANG Y, et al. Bidl: a high-throughput, low-latency permissioned blockchain framework for datacenter networks [C]//Proceedings of the ACM SIGOPS 28th Symposium on Operating Systems Principles, 2021: 18-34.
- [7] SWATHI P, VENKATESAN M. Scalability improvement and analysis of permissioned-blockchain [J]. ICT Express, 2021, 7 (3): 283-289.
- [8] FANNING K, CENTERS D P. Blockchain and its coming impact on financial services [J]. Journal of Corporate Accounting & Finance, 2016, 27 (5): 53-57.
- [9] SHI J, WU H, LUO D, et al. Instantchain: enhancing order-execute blockchain systems for latency-sensitive applications [C]//International Conference on Database Systems for Advanced Applications, 2023: 483-498.
- [10] LI H, CHEN Y, SHI X, et al. Fisco-bcos: an enterprise-grade permissioned blockchain system with high-performance [C]//Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, 2023: 1-17.
- [11] SOKOLIK Y, ROTTENSTREICH O. Age-aware fairness in blockchain transaction ordering [C]//2020 IEEE/ACM 28th International Symposium on Quality of Service, 2020: 1-9.
- [12] ZHOU J, WANG X, LI Q, et al. Improving blockchain performance in clinical trials using intelligent optimal transaction traffic control mechanism in smart healthcare applications [J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 170: 108327.
- [13] JAVAID M, HALEEM A, SINGH R P, et al. A review of blockchain Technology applications for financial services [J]. BenchCouncil transactions on benchmarks, standards and evaluations, 2022, 2 (3): 100073.
- [14] AMIRI M J, AGRAWAL D, ABBADI AEL. Parblockchain: leveraging transaction parallelism in permissioned blockchain systems [C]//2019 IEEE 39th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), 2019: 1337-1347.
- [15] WANG Q, LI F J, NI X L, et al. Research on blockchain consensus algorithm and application [J]. Exploration of Computer Science and Technology, 2022, 16 (6): 1214-1242.
王群, 李馥娟, 倪雪莉, 等. 区块链共识算法及应用研究 [J]. 计算机科学与探索, 2022, 16 (6): 1214-1242.
- [16] MIGUEL C, BARBARA L. Practical Byzantine fault tolerance and proactive recovery [J]. ACM Transactions on Computer Systems (TOCS), 2002, 20 (4): 398-461.
- [17] MA X F, DU M X, YU W B, et al. Blockchain based supply chain financial service platform [J]. Big Data, 2018, 4 (1): 13-21.
马小峰, 杜明晓, 余文兵, 等. 基于区块链的供应链金融服务平台 [J]. 大数据, 2018, 4 (1): 13-21.
- [18] LENG J D, LYU X Q, JIANG Y, et al. Review of research on consensus mechanism of alliance chain [J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2021, 5 (1): 56-65.
冷基栋, 吕学强, 姜阳, 等. 联盟链共识机制研究综述 [J]. 数据分析与知识发现, 2021, 5 (1): 56-65.
- [19] ZARIR A A, OLIVA G A, JIANG Z M, et al. Developing cost-effective blockchain-powered applications: a case study of the gas usage of smart contract transactions in the ethereum blockchain platform [J]. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology (TOSEM), 2021, 30 (3): 1-38.
- [20] LIU A, CHEN J, HE K, et al. Dynashard: secure and adaptive blockchain sharding protocol with hybrid consensus and dynamic shard management [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 12 (5): 5462-5475.
- [21] WOOD G. Ethereum: a secure decentralised generalised transaction ledger [J]. Ethereum Project Yellow Paper, 2014, 151: 1-32.
- [22] KELKAR M, ZHANG F, GOLDFEDER S, et al. Order-fairness for Byzantine consensus [C]//Advances in Cryptology - CRYPTO 2020: 40th Annual International Cryptology Conference, 2020: 451-480.

(责任编辑:尹晨茹)