

控制与决策

Control and Decision

船联网上基于区块链的航行事件信息过滤方法

汪洋, 叶挺, 陈志强, 王腾飞, 吴兵

引用本文:

汪洋, 叶挺, 陈志强, 等. 船联网上基于区块链的航行事件信息过滤方法[J]. *控制与决策*, 2025, 40(1): 148–154.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1745>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

车辆跟随控制策略的状态可达集建模及验证方法

A modeling and verification method of state reachable set for vehicle following control strategy

控制与决策. 2021, 36(7): 1679–1685 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1562>

基于最佳相位匹配的减摇鳍低航速控制策略

Best phase matching based control strategy for ship stabilizer at low speed

控制与决策. 2021, 36(4): 940–946 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1028>

基于最佳相位匹配的减摇鳍低航速控制策略

Best phase matching based control strategy for ship stabilizer at low speed

控制与决策. 2021, 36(4): 940–946 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1028>

基于多块信息提取的AUV资源勘查系统故障检测

Fault detection of AUV resource exploration system based on multi-block information extraction

控制与决策. 2021, 36(4): 790–800 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0732>

考虑个体累积共识贡献的犹豫模糊语言自适应共识模型

Adaptive consensus model with hesitant fuzzy linguistic information considering individual cumulative consensus contribution

控制与决策. 2021, 36(1): 187–195 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0556>

船联网上基于区块链的航行事件信息过滤方法

汪洋^{1,2,3}, 叶挺^{1,2,3}, 陈志强⁴, 王腾飞³, 吴兵^{1,2,3†}

1. 武汉理工大学 水路交通控制全国重点实验室, 武汉 430063;
2. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 武汉 430063;
3. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 武汉 430063;
4. 长江水上交通监测与应急处置中心, 武汉 430014)

摘要: 船联网 (internet of vehicle, IoS) 是船舶信息交换的载体. 基于区块链技术, 在 IoS 上构建一种可信的信息交换机制, 并提出相应的航行事件置信度计算与船舶信誉管理方案. 该方案借鉴信息过滤的思想得到船舶综合相似度, 利用加权熵值反向计算融合的评级, 根据回应船舶评级偏离融合评级的程度更新回应船舶的信誉值; 然后采用最小二乘法建立信誉值倒数与评级误差之间的拟合关系, 从而得以更新报告船舶的信誉值; 进一步设计基于船舶信誉值的 DPoS (delegated proof of stake) 共识机制, 旨在优先选择信誉值较高的船舶作为见证者船舶, 以保障系统出块环境的稳定性和高效性. 结果显示, 在船舶滥用行为占比为 40% 的情况下, 航行事件真实性判定的准确率仍在 75% 以上. 研究表明, 所提出的方案不仅有效提高了航行事件真实性判定的准确率, 还能识别恶意船舶并限制其滥用行为, 从而保证 IoS 环境的安全和稳定.

关键词: 船联网; 航行事件通告; 区块链; 信息过滤; 信誉管理方案; DPoS 共识机制

中图分类号: U698 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1745

引用格式: 汪洋, 叶挺, 陈志强, 等. 船联网上基于区块链的航行事件信息过滤方法 [J]. 控制与决策, 2025, 40(1): 148-154.

Blockchain-based information filtering method for navigational events within internet of ships

WANG Yang^{1,2,3}, YE Ting^{1,2,3}, CHEN Zhi-qiang⁴, WANG Teng-fei³, WU Bing^{1,2,3†}

1. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
3. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
4. Yangtze River Waterway Transportation Monitoring and Emergency Center, Wuhan 430014, China)

Abstract: The internet of ships (IoS) serves as the carrier for maritime information exchange. Based on the blockchain technology, this paper aims to establish a reliable information exchange mechanism on the IoS by using a credibility calculation method for navigation events in the IoS and a reputation management scheme for the ships involved. This scheme draws on the principles of information filtering to obtain the comprehensive similarity of ships, calculates the fused rating through reverse computation of weighted entropy, and then updates the reputation value of responding ships based on the deviation between their rating and the fused rating. Afterwards, the paper establishes a fitting relationship between the reciprocal of reputation value and rating error using the least squares method, so that the reputation value of the reporting ship is computed and updated. In addition, a delegated proof of stake (DPoS) consensus mechanism is developed, which depends on the reputation values of ships. This mechanism prioritizes the selection of ships with higher reputation values as witness ships to maintain the stability and efficiency of the system's blocking environment. Empirical results demonstrate the effectiveness of the proposed scheme, showing that under conditions of 40% ship misuse, the accuracy of authenticating navigational events remains above 75%. The study confirms that the proposed scheme not only improves the accuracy of authenticity determination, but also skillfully identifies and restricts the activities of malicious vessels. This helps to strengthen the security and stability of the IoS environment.

Keywords: internet of ships; notification of navigational events; blockchain; information filtering; reputation management scheme; delegated proof of stake (DPoS) consensus mechanism

收稿日期: 2023-12-15; 录用日期: 2024-06-02.

基金项目: 湖北省自然科学基金项目 (2021CFB324); 国家自然科学基金项目 (52372320, 52272422).

责任编辑: 闫敬.

†通讯作者. E-mail: bing.wu@whut.edu.cn.

0 引言

船舶运输是全球交通运输的最重要方式之一。截止2022年,船舶运输的货物占全球贸易量的80%以上^[1]。与此同时,通讯和计算技术的迅速发展,也推动着船舶航行朝自主化的方向演进。在物联网(internet of things, IoT)技术的推动下,面向通航环境的感知能力不断增强,这为提高船舶航行安全和效率提供了更多的支持^[2]。船联网(internet of ships, IoS)是IoT在水上交通领域的一种实现形式,涵盖了各类船载/岸基通信单元及其通信链路。由于节点的移动性,船-船、船-岸间的互联成为IoS中最吸引研究人员注意力的议题。随着船舶在航行中持续进行跨域移动,船舶之间发生机会性的相遇,彼此之间形成了类似社交网络般的短暂性相邻关系。这种关系由于依赖于船舶在空间位置上的临近而并不持久,使得船舶间难以维系长期而稳定的连接关系,因而信息真实性问题成为IoS中数据交换的一个主要挑战^[3]。

人们较早就注意到车联网(internet of vehicle, IoV)中节点行为的社会特性,并围绕这个问题展开了深入研究。IoS与IoV有非常本质的相似性,包括机会性相遇、实体移动性、非持续通信链路等。从可信计算的角度,在类似IoV这样的分布式和移动环境中,成员所形成社会网络上的信任问题一直是研究者高度关注的问题。例如,Cheng等^[4]针对IoV中的社会网络提出了三值逻辑的信任评估模型,用以支持对主观信任和客观信任评估;Ahmed等^[5]将IoV中的信任区分为事件信任、节点信任和推荐信任,他们提出的方法旨在为这3种信任建立关联。近年来的研究越来越倾向于使用区块链方法来计算IoV中节点间的信任或某个节点的信誉,此方面的工作较为丰富^[6]。在IoS中,船舶间的信任可以理解为某个船舶发布信息的可信程度,或者某艘船舶实际行为与其承诺(或期望)行为之间的符合程度。在理想情况下,IoS中船舶会基于自律的假定,播发真实准确的信息。然而,倘若存在船舶出于恶意或自私动机而滥用IoS的信息传播功能(如散播失实信息),则不仅会让相信了不实信息的船舶成为直接受害者,还会整体损害IoS上航行事件真实性的可信度。因此,通过对船舶信任进行动态计算,在考虑船舶之间信任程度的前提下,有选择、有策略地采信IoS上传播的信息,更有把握对繁杂、真伪不定的信息进行甄别,遏制船舶在发布事件信息中的不诚实行为。在这一背景下,对一艘船舶信任程度的整体衡量可以用一个标量来表示,称之为船舶的信誉值。通过参考任意某个船舶的信誉值,能为其他船舶需对它建立何种程度的信任做出判断。将信息过滤

的概念引入IoS系统,有望为节点信任评估与信息甄别间的耦合提供一种更贯通的处理和计算手段。信息过滤是指根据用户的信息需求对动态信息流进行取舍,以筛选出满足用户需求的信息^[7]。对于一个给定的船舶节点,针对IoS中发布的各航行事件信息,利用船舶给出的回应评级以及船舶自身信誉值,结合时间与空间权重,实现对于相关事件置信度计算及船舶信誉值更新。本文围绕IoS上的航行事件信息置信度评估,提出一种基于区块链的信息过滤和信任管理方案,具体工作包括:1)构建IoS中对航行事件信息的评测机制。利用智能合约遍历区块链上针对某航行事件的评级,根据回应船舶的权重修正该事件置信度熵值,以此给出航行事件整体置信度。2)设计一种船舶信誉更新机制。依托报告船舶与回应船舶间的相似度,结合航行事件置信度判定结果对相关船舶进行信誉值更新。3)提出一种基于船舶信誉值的DPoS(R-DPoS)共识机制。通过基于船舶信誉值的见证者船舶选举机制,确保信誉值较高的船舶更容易成为见证者船舶,以此保障区块链系统的整体出块效率,并有效维护出块环境的稳定性。

1 船联网上的区块链

区块链的概念首次通过比特币提出^[8],它是一种利用加密算法、P2P网络以及共识机制等技术将数据单元相互连接,并随时间增长而延长的链式结构。首先,区块链网络中的各节点需要完成身份认证,保证了IoS平台中各船舶均具备真实且唯一的身份标识^[9]。将区块链应用于IoS上,每个船舶成为广域P2P网络中的一个节点,而航行事件和船舶信誉信息被分散存储在各个节点上,有效降低单点故障的风险。其次,区块链网络中数据不可篡改的特性保障了区块中数据的完整性,尤其是船舶航行数据及船舶信誉信息难以被非法修改或删除。同时,通过部署在区块链上的智能合约,IoS平台可以在船舶信誉值动态更新的过程中保持公正和准确,避免人为干预。此外,若某些航行事件被举报为虚假事件,IoS可以利用区块链的可回溯性检索相关船舶,降低其信誉值。

2 应用场景和系统架构

2.1 应用场景

图1展示了典型IoS场景下船舶进行事件通告的场景。当报告船舶 S_1 和 S_2 遭遇航行事件时(如突发极端天气),会向其他船舶广播该事件。接收船舶(即回应船舶) S_3 和 S_4 会根据自身经历或依托他船信息对该事件进行评级,区块链的智能合约将基于该评级对事件的综合置信度进行计算,这两类信息都将进

入“事务(交易)池”.最后,由R-DPoS选举产生的见证者船舶 S_5 验证事务池中的事务,基于事件置信度对相关船舶进行信誉监督,然后更新到区块链上.

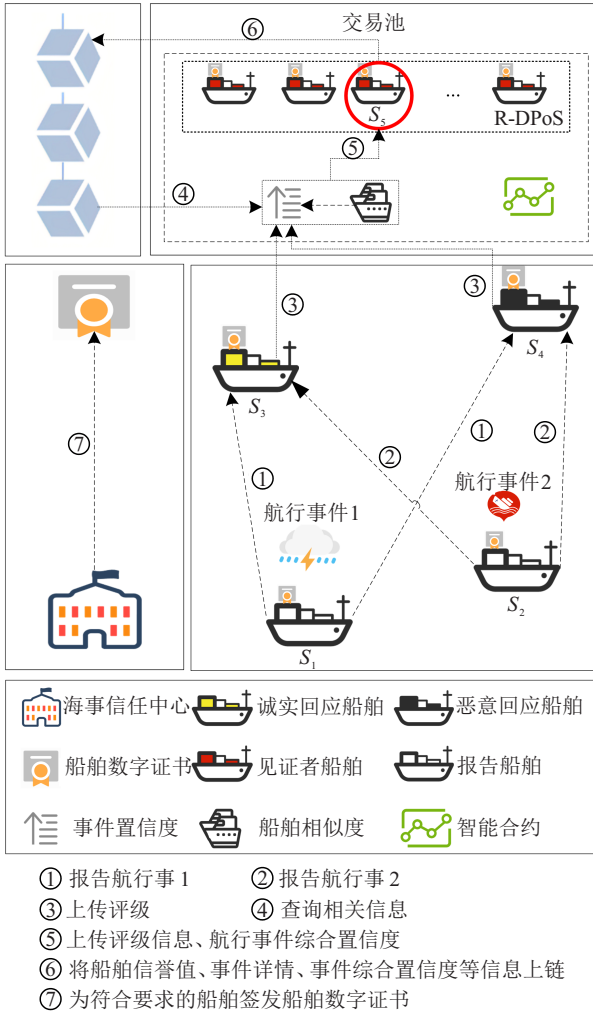


图1 IoS中典型的应用场景

2.2 系统架构

针对报告船舶和回应船舶的滥用行为,提出一种IoS框架下基于区块链的船舶信息过滤信任管理方案.方案所使用的符号如表1所示,要素包括:

1) 船舶:作为航行事件的实际参与者,根据其职责(角色)不同,可分为报告船舶、回应船舶和见证者船舶.船舶的角色随着场景的变迁会发生变化.

① 报告船舶(I类船舶):当船舶 S_i 向IoS广播航行事件时,船舶 S_i 即成为报告船舶.事件通告报文必备的报文字段如表1的描述.

② 回应船舶(II类船舶):当船舶 S_j 参与航行事件评级时,船舶 S_j 即成为回应船舶.回应报文必备的报文字段如表1的描述.

③ 见证者船舶(III类船舶):DPoS机制中,具有生产区块权力的船舶,它们由其他船舶选举出来.

2) 区块链:作为分布式数据库,由全体船舶共同维护,用于存储IoS节点信誉值及航行事件简报.

表1 报告和回应报文的主要字段

字段符号	含义
RS_{ID}^i	I类船舶 S_i 的身份编码
ET	航行事件类型
EL	航行事件发生经纬度
ETS	航行事件发生的时间
E_{ID}	航行事件的唯一标识码
S_i	I类船舶 S_i
VS_{ID}^j	II类船舶 S_j 的身份编码
S_j	II类船舶 S_j
RL	回应事件地点的经纬度
RTS	回应事件的时间
E_{ID}	航行事件的唯一标识码
Rating	II类船舶 S_j 对于航行事件的评级
$A B$	字段A与字段B相连接
Hash(Z)	使用散列函数对Z进行散列
$SIG_x[Y]$	使用X的私钥对内容Y进行签名
数据主体(main data)	$RS_{ID}^i ET E_{ID} EL ETS$
受保护的数据	$main\ data Hash(main\ data) SIG_{S_i}[Hash(main\ data)]$
数据主体(main data)	$VS_{ID}^j Rating E_{ID} RL RTS$
受保护的数据	$main\ data Hash(main\ data) SIG_{S_j}[Hash(main\ data)]$

3) 监管机构(maritime trust authority, MTA):负责初始化IoS网络,为符合要求的船舶生成公私钥对并颁发和管理船舶数字证书.

3 基于信息过滤的信誉算法与实现

3.1 算法框架

为便于表述,约定如下记法.

给定某I类船舶 S_i 及其报告的事件 $e_i(\tau)$,此事件引起II类船舶 $S_{k_j}(j \in \{1, 2, \dots, P\})$ 的回应,包含事件评级值. $S_{c_m}(m \in \{1, 2, \dots, L\})$ 参加见证者船舶的竞选,投票船舶为 $S_{v_b}(b \in \{1, 2, \dots, Q\})$, S_{c_m} 中的胜出者成为正式的见证者船舶,用 $S_{c_m}(\hat{m} \in \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_L\}) \subseteq \{1, 2, \dots, L\}$ 表示.为准确更新相关船舶的信誉值,采取如下步骤.

step 1: “报告-回应”机制及其协议支持.在航行途中,船舶会实时向外界报告其所遭遇的航行事件.这些事件构成了一个事件集合 $E, E = \bigcup_{i=1}^M \{e_i(1), e_i(2), \dots, e_i(n_i)\}$.其中: n_i 表示I类船舶共报告了 n_i 起航行事件, M 表示I类船舶的总数, $e_i(\tau)$ 表示I类船舶报告的第 τ 起事件, $\tau \in \{1, 2, \dots, n_i\}$.针对给定事件 $e_i(\tau)$,所有参与事件验证的II类船舶及其回应评级分别形成一个II类船舶集合 $Ans(e_i(\tau)) = \{S_{k_1}, S_{k_2}, \dots, S_{k_p}\}$ 和评级集合 $R = \bigcup_{j=1}^P \{r_{k_j}(e_i(\tau))\}$, P 表示针对事件 $e_i(\tau)$ 播发回应报文并给出置信度评级的II类船舶总数, $r_{k_j}(e_i(\tau))$ 表示II类船舶针对报

告事件 $e_i(\tau)$ 的置信度评级, $j \in \{1, 2, \dots, P\}$. 通过信息过滤的方法, 根据船舶对已有历史事件的评级计算船舶间相似度, 同时结合报文时间戳差值等因素, 计算回应报文时空置信度的衰减.

step 2: 船舶航行事件评级及置信度判定. 回应船舶对航行事件的评级方式包括4类: 如实评级、虚假评级、从众评级以及不参与评级. 系统基于回应船舶的事件评级计算事件置信度的综合熵值.

step 3: 船舶信誉值计算. 船舶历史信誉值构成了一个信誉集合 $REP = \{Rep_i, Rep_{k_1}, \dots, Rep_{k_p}, Rep_{c_1}, \dots, Rep_{c_L}, Rep_{v_1}, \dots, Rep_{v_Q}\}$, 其中 Rep_i 、 Rep_{k_j} 、 Rep_{c_m} 、 Rep_{v_b} 分别表示I类船舶、II类船舶、候选见证者船舶、投票船舶的最近信誉值. 根据 **step 2** 的计算结果, 结合船舶历史信誉值和事件评级, 对回应船舶和报告船舶的信誉值进行动态更新.

step 4: 全局船舶信誉值更新. 系统采用基于船舶信誉值的 DPoS (R-DPoS) 共识机制选举 S_{c_m} . S_{c_m} 的职责是将船舶最新信誉值、航行事件详情、航行事件置信度及各船舶回应评级进行数据打包, 组装成区块并上链.

通过上述步骤, IoS 中相关船舶的信誉值能够被更新. 整个过程旨在对船舶的不诚实或滥用行为施以束缚, 为航行事件提供一个可信的信息发布平台.

3.2 船舶综合相似度计算

1) 船舶行为相似度.

某一航行事件的I类船舶可以在另一起航行事件中作为回应船舶, 具备航行事件验证能力的船舶会基于自身经验或掌握的信息, 通过回应报文对信息进行评级, 评级区间为 $[0, 1]$, 评级越大表示回应船舶越确信该事件发生. 采用修正的余弦相似度计算船舶行为相似度^[10]为

$$S(a, b) = \frac{\sum_{e(\tau) \in E_{a,b}} (r_a(e(\tau)) - \bar{r}_a)(r_b(e(\tau)) - \bar{r}_b)}{\sqrt{\sum_{e(\tau) \in E_a} (r_a(e(\tau)) - \bar{r}_a)^2} \sqrt{\sum_{e(\tau) \in E_b} (r_b(e(\tau)) - \bar{r}_b)^2}}. \quad (1)$$

其中: \bar{r}_a 和 \bar{r}_b 分别表示船舶 a 和 b 历史航行事件评级的平均值, $E_{a,b}$ 表示船舶 a 和 b 共同参与的航行事件交集, E_a 和 E_b 分别表示船舶 a 和 b 各自参与验证的航行事件集合, $r_a(e(\tau))$ 和 $r_b(e(\tau))$ 分别表示船舶 a 和 b 针对 E_a 和 E_b 航行事件集合的评级.

2) 回应报文的时空置信度减弱.

一般而言, 距离所报告事件 $e_i(\tau)$ 的发生地越近、

回应越及时, 越能说明回应船舶了解事件真相. 为此, 通过二者距离差来计算时空差异对置信度的减损

$$D(e_i(\tau), k_j) = e^{-\alpha \cdot \text{diff}_T(e_i(\tau), k_j) \cdot \text{diff}_S(e_i(\tau), k_j)}. \quad (2)$$

其中: $\text{diff}_T(e_i(\tau), k_j)$ 和 $\text{diff}_S(e_i(\tau), k_j)$ 分别表示II类船舶与I类船舶围绕事件 $e_i(\tau)$ 所产生“报告-回应”报文之间的时空差异, 而这个差异将对 $r_{k_j}(e_i(\tau))$ 产生减损; α 为调节因子.

3.3 船舶航行事件评级及置信度判定

1) 船舶航行事件评级行为.

在船舶航行事件发生后, II类船舶针对该事件的回应可归纳为4种情况, 即如实评级、虚假评级、从众评级以及不参与评级. 这4种现象的具体情况如下:

① 如实评级: 诚实II类船舶通过自身掌握的信息对目标航行事件进行评级, 为IoS提供可信、无偏的海上交通信息.

② 虚假评级: 恶意II类船舶以自身信誉值作为赌注, 扰乱IoS信息空间中的秩序或谋取其他利益.

③ 从众评级: II类船舶并未掌握当前航行事件相关信息, 仅试图通过模仿他船试图赚取信誉值奖励.

④ 不参与评级: 系统中船舶未能掌握航行事件实情, 也不愿意从众评级, 从而不参与该起航行事件的评级.

2) 船舶航行事件置信度判定.

系统利用智能合约, 基于II类船舶针对特定航行事件的评级, 对该事件综合置信度进行计算, 如下所示:

$$-R(e_i(\tau)) \cdot \log_2(R(e_i(\tau))) - (1 - R(e_i(\tau))) \cdot \log_2(1 - R(e_i(\tau))) = E. \quad (3)$$

其中: $R(e_i(\tau))$ 表示航行事件 $e_i(\tau)$ 的综合置信度; E 表示航行事件的综合熵值, 其表达式为

$$E = \sum_{j=1}^P E_{k_j}(e_i(\tau)) \cdot \bar{w}_{k_j}. \quad (4)$$

其中: \bar{w}_{k_j} 表示参与事件评级II类船舶的权重系数; $E_{k_j}(e_i(\tau))$ 表示基于II类船舶所给评级计算得到的航行事件熵值, 公式为

$$E_{k_j}(e_i(\tau)) = -r_{k_j}(e_i(\tau)) \cdot \log(r_{k_j}(e_i(\tau))) - (1 - r_{k_j}(e_i(\tau))) \cdot \log(1 - r_{k_j}(e_i(\tau))). \quad (5)$$

其中: $r_{k_j}(e_i(\tau))$ 表示参与事件评级的II类船舶对于航行事件 $e_i(\tau)$ 的评级, 权重 \bar{w} 的计算如下所示:

$$\bar{w}_{k_j}(e_i(\tau), k_j) = \frac{Rep_{k_j} \times D(e_i(\tau), k_j)}{\sum_{j=1}^P Rep_{k_j} \times D(e_i(\tau), k_j)}. \quad (6)$$

3.4 船舶信誉值计算

1) II类船舶的信誉值更新.

事件评级偏离率 $\text{Dev}_{k_j}(e_i(\tau))$ 影响着II类船舶的信誉值更新,其含义为 $r_{k_j}(e_i(\tau))$ 与 $R(e_i(\tau))$ 的偏离程度,当二者的差值越小,则说明此评级越贴近航行事件的真实情况. 偏离率计算方式如下所示:

$$\text{Dev}_{k_j}(e_i(\tau)) = \frac{|R(e_i(\tau)) - r_{k_j}(e_i(\tau))|}{R(e_i(\tau))}. \quad (7)$$

根据II类船舶对事件评级的偏移量,区块链系统基于智能合约对该类船舶进行信誉值的更新,如下所示:

$$\text{Rep}_{k_j}^{(n+1)}(e_i(\tau)) = \min(\text{Rep}_{k_j}^{(n)} \cdot f(\text{Dev}_{k_j}(e_i(\tau))), 1). \quad (8)$$

其中: $\text{Rep}_{k_j}^{(n+1)}(e_i(\tau))$ 表示II类船舶参与航行事件 $e_i(\tau)$ 后的最新信誉值, $\text{Rep}_{k_j}^{(n)}$ 表示上一次信誉值. $f(x)$ 是类似高斯分布的表达式,为

$$f(x) = \frac{1 + \varepsilon}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) + 0.5. \quad (9)$$

其中: 0.5 表示最严厉的惩罚; ε 表示船舶信誉值奖励增量,可由实际情况进行设定; σ 的值为

$$\sigma = \frac{1 + \varepsilon}{(0.5 + \varepsilon)\sqrt{2\pi}}. \quad (10)$$

2) I类船舶的信誉值更新.

船舶间的综合相似度构成了一个 $P + 1$ 阶的相似度矩阵 H , 船舶置信度误差 Err 在I类船舶的信誉值更新过程中起到关键作用,且与船舶相似度以及船舶给出的评级相关,如下所示:

$$\text{Err}(e_i(\tau)) = H \cdot \begin{bmatrix} r_i(e_i(\tau)) \\ r_{k_1}(e_i(\tau)) \\ \vdots \\ r_{k_P}(e_i(\tau)) \end{bmatrix} - \hat{\lambda} \cdot R(e_i(\tau)) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

其中: $r_i(e_i(\tau))$ 表示I类船舶对自身报告事件的评级,取值为1; $r_{k_P}(e_i(\tau))$ 表示II类船舶针对航行事件 $e_i(\tau)$ 的评级; $\hat{\lambda}$ 表示评级偏差均值.

由式(11)可得船舶置信度误差 Err 的模 $|\text{Err}|$, 结合各II类船舶最新信誉值的倒数 $\text{Rep}_{k_j}^{-1}$, 利用最小二乘法模型得到线性拟合方程,进而计算权重系数 μ 和补偿系数 η , 最终计算I类船舶的信誉值,如下所示:

$$\begin{bmatrix} \text{Rep}_{k_1}^{-1} \\ \vdots \\ \text{Rep}_{k_P}^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\text{Err}_{k_1}| & 1 \\ \vdots & \vdots \\ |\text{Err}_{k_P}| & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu \\ \eta \end{bmatrix}. \quad (12)$$

计上式为 $Y = XK$, 则在最小二乘意义下求解下式:

$$K = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (13)$$

最终可以得到I类船舶的信誉值更新计算式

$$\text{Rep}_i^{-1} = \mu \cdot \text{Err}_i + \eta. \quad (14)$$

3.5 区块链的更新

R-DPoS 中 S_{c_m} 选举依赖于相关船舶的信誉值,如下所示.

算法1: R-DPoS 共识机制算法

输入: 候选见证者船舶集合 Y_{c_m} , 所有船舶集合 Y_{all} , 附议见证者船舶的数量 $\text{Num}_{S_{c_m}}^{\text{agree}}$, 所有船舶信誉值集合 $\text{REP} = \{\text{Rep}_{c_1}, \dots, \text{Rep}_{c_m}, \text{Rep}_{v_1}, \dots, \text{Rep}_{v_b}\}$;
输出: 见证者船舶集合 Y_{ws} .

- 1) step 1: 筛选出候选见证者船舶中最大信誉值 $\text{Rep}_{c_m}^{(\max)}$.
- 2) if $\text{Rep}_{c_m}^{(\max)} = \text{Rep}_{c_1}$ then
- 3) for 在集合 Y_{c_m} 中的候选见证者船舶 i
- 4) if $\text{Rep}_{c_m} > \text{Rep}_{c_m}^{(\max)}$ then
- 5) $\text{Rep}_{c_m}^{(\max)} = \text{Rep}_{c_m}$
- 6) end
- 7) end
- 8) end
- 9) step 2: 计算候选见证者船舶的最终投票值 $Y_{\text{CVV}}^{(c_m)}$.
- 10) for 在集合 Y_{c_m} 中的候选见证者船舶 i
- 11) for 在集合 Y_{all} 中的投票船舶 j
- 12) 为 S_{c_m} 投票;
- 13) 计算投票总值 $Y_{\text{CVV}}^{(c_m)} = \sum_{b=1}^Q \frac{\text{Rep}_{c_m}}{\text{Rep}_{c_m}^{(\max)}} \times \text{Rep}_{v_b}$;
- 14) 将 $Y_{\text{CVV}}^{(c_m)}$ 加入 Y_{c_m} 集合
- 15) end
- 16) end
- 17) step 3: 在候选见证者船舶投票集合中筛选出见证者船舶 S_{c_m} .
- 18) 见证者船舶数量 N_{ws} 等于统计集合 Y_{ws} 中元素的数量;
- 19) if $N_{\text{ws}} < N$ then
- 20) if $\text{Rep}_{c_m}^{(\max)} = \text{Rep}_{c_1}$ then
- 21) for 在集合 Y_{c_m} 中的船舶 i
- 22) if $\text{Rep}_{c_m} > \text{Rep}_{c_m}^{(\max)}$ then
- 23) $\text{Rep}_{c_m}^{(\max)} = \text{Rep}_{c_m}$;
- 24) 将 S_{c_m} 加入 Y_{ws} ;
- 25) 将 S_{c_m} 从集合 Y_{c_m} 中移除
- 26) end
- 27) end
- 28) end
- 29) end
- 30) step 4: 见证者船舶按顺序生成区块并广播.
- 31) for 在集合 Y_{ws} 中的见证者船舶 i
- 32) 生成区块;
- 33) 由其他见证者船舶验证区块的合法性;
- 34) if $\text{Num}_{S_{c_m}}^{\text{agree}} \leq \frac{2}{3} \text{Num}_{S_{c_m}}^{\text{all}} + 1$ then
- 35) 广播区块
- 36) else
- 37) 丢弃区块;
- 38) 将 S_{c_m} 从集合 Y_{ws} 中移除
- 39) end
- 40) end

IoS 中信誉值高于 Th_{trust} 的船舶均可参与 S_{c_m} 的竞选. 此外, 通过对比候选见证者船舶获得的投票总数, 可以筛选出前 N 艘船舶作为此次选举出的见证者船舶. 见证者船舶按顺序在各自的出块周期内生成区块并广播, 当超过三分之二加一非出块III类船舶认为该区块是合法区块时, 该区块将被添加至区块

链的末尾并在全网广播,相应的出块III类船舶将获得额外的信誉值奖励。

4 实验仿真与分析

4.1 仿真环境与参数设置

为测试本文所提出方法的性能,采用 Matlab 进行仿真实验。在仿真过程中整体构建了IoS的真实环境,涵盖3种不同类型的船舶:生成区块的 S_{c_m} ,广播航行事件的I类船舶,以及事件验证的II类船舶,包括友善和恶意的II类船舶。仿真主要参数包括: $Th_{trust} = 0.5, \alpha = 0.001, \beta = 0.9, \sigma = 0.3$ 。

4.2 航行事件真实性判定的准确率

为验证所提出基于信息过滤的II类船舶评级对航行事件置信度判定准确率,本节选取100艘船舶作为II类船舶,共同对50起航行事件真实性进行验证。在仿真过程中,100艘II类船舶在一定范围的海域内随机分布,其中设定不同比例的恶意船舶,同时引入一组IoV中的对照实验作为基准,该方案以车辆与事件发生地之间距离作为事件可信度主要判断依据^[11]。此方法在IoV中事件信息置信度判定领域内得到广泛的应用,以此作为对照实验组有助于表征所提出方案的性能。针对不同比例的恶意船舶分别进行50次仿真实验,统计仿真结果的平均值,仿真结果如图2所示。

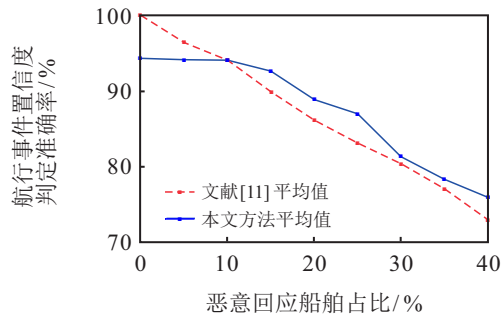


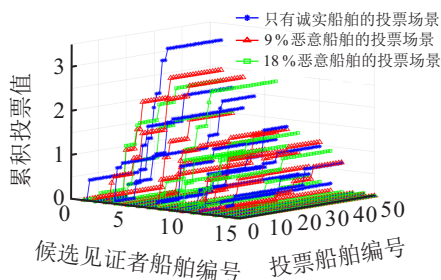
图2 船舶滥用行为情况下航行事件置信度判定准确率

虽然在初始阶段本文提出的方案在事件置信度判定上的准确率略低于文献[11]所呈现的方法,但随着船舶滥用行为占比减小,航行事件置信度判定准确率逐步提升。尤其是在恶意回应船舶占比在10%左右时,本文方案在事件置信度判定方面的表现已超越文献[11]所提方案的结果;进一步地,当系统中恶意II类船舶占比为40%时,本文所提出方案在事件真实性判定准确率方面仍高于75%。

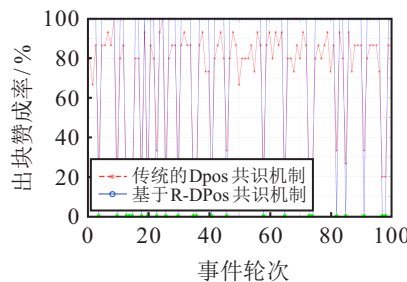
4.3 共识机制可行性分析

1) III类船舶选举可行性分析。

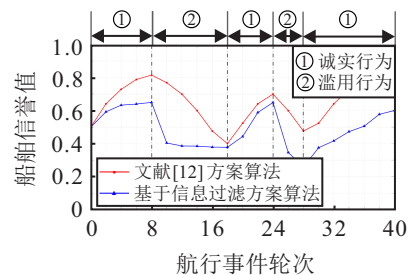
为评估R-DPoS共识机制的可行性,模拟III类船舶竞选过程,并选取15艘船舶作为候选见证者船舶,且初始信誉值随船舶编号的增加而降低。另取50艘船舶作为投票船舶对其进行投票,同时存在5%船舶投弃权票的情况,仿真结果如图3(a)所示。



(a) 候选见证者船舶累积投票值变化



(b) 共识机制出块赞成率对比



(c) 船舶信誉值变化

图3 主要仿真结果

图3展示了3种不同投票环境下候选见证者船舶获得的累积投票值,尽管系统中恶意投票船舶占比逐渐增加,但在每一种投票环境中,最终累积投票值较高的候选见证者船舶始终是初始信誉值较高的船舶。这表明,无论恶意投票的影响如何,具有较高初始信誉值的候选见证者船舶均能获得更多的累积投票值。因此,本文所提出的R-DPoS共识机制能够有效保证信誉值较高的候选见证者船舶在竞选过程中保持优势,保障系统中出块环境的稳定性。

2) 出块率可行性分析。

在图3(b)中,针对100起航行事件的仿真场景,存

在随机数量的虚假事件,在图中以绿点进行标识。在基于R-DPoS共识机制的方案中, S_{c_m} 均为高信誉值船舶,因此在区块中包含虚假事件的情况下,能够达成不出块共识。相比之下,采用传统的DPoS共识机制的方案由于无法保证 S_{c_m} 均为高信誉值船舶,所以存在一定成功出块的概率,进而对IoS环境造成破坏。另一方面,当区块中包含的航行事件均为真实事件时,基于R-DPoS共识机制的方案能够达成出块共识,而传统的DPoS共识机制方案却依旧存在一定机率禁止出块,这将导致航行信息无法有效广播至在网船舶,增加了航行事故发生的概率。

4.4 信誉值更新算法有效性分析

由于目前IoS上关于数据交换的研究尚很缺乏,而有关区块链在IoS的P2P网络中的应用亦难以检索得到.为此,本文选取IoV中具有代表性的成果^[12]开展对比研究.文献[12]的方法是IoV研究领域利用区块链进行信任管理方面具有代表性的工作,工作的出发点与本文有相似之处.然而,本文相对文献[12]仍有显著的算法差异,突出表现在:1)为节点对事件发表评价时参考其他节点对该事件的评价,并应用信息过滤方法;2)基于节点信誉对DPoS见证人选举施加影响;3)不依赖RSU计算移动节点的信誉值,因为IoS中没有RSU.因此,比照文献[12]来检验本文所设计算法的合理性和有效性,符合两者的初衷.

对于任意船舶,其初始信誉值设为0.5,共模拟40起航行事件记录信誉值变化,如图3(c)所示.在前8起航行事件中,船舶信誉值因其诚实行为缓慢增长.然而,在第8到第18起事件中,船舶的滥用行为遭系统惩罚,导致其信誉值下降.特别地,本方案对于船舶恶意行为惩罚力度明显强于文献[12],因此能够更有效地鉴别恶意船舶.第18到第24起事件中,船舶回归诚实行为使其信誉值再次增长.但是,本方案的增长趋势低于文献[12],能够有效抑制不良历史船舶重建信誉.第24到第28起事件中,船舶再次实施滥用行为,导致其信誉值再次被扣除.最后的12起航行事件中,船舶如实回应事件信息,信誉值缓慢恢复.上述过程说明本方案在鉴别并限制船舶恶意行为方面表现出较好的性能.

5 结论

本文提出了一种适用于IoS的船舶航行事件信息过滤信任管理方案.该方案结合相关船舶的信誉值以及事件评级,采用加权熵值反向计算融合的方法得到航行事件的评级,从而在一定程度上维护了IoS整体可信环境.同时,为应对部分船舶的滥用行为,结合所提出的R-DPoS共识机制建立了一套完备的船舶信誉值奖惩机制,从而鼓励诚实船舶保持规范行为.仿真结果表明,所提方案在分布式环境中基于信息过滤实现信任管理是可行的.

参考文献(References)

- [1] UNCTAD. Review of maritime transport 2022[EB/OL]. (2022-11-29)[2023-11-14]. <https://unctad.org/rmt2022>.
- [2] Wang T F, Wu Q, Zhang J F, et al. Autonomous decision-making scheme for multi-ship collision avoidance with iterative observation and inference[J]. Ocean Engineering, 2020, 197: 106873.
- [3] Bolbot V, Theotokatos G, Boulougouris E, et al. A novel

cyber-risk assessment method for ship systems[J]. Safety Science, 2020, 131: 104908.

- [4] Cheng T, Liu G C, Yang Q, et al. Trust assessment in vehicular social network based on three-valued subjective logic[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2019, 21(3): 652-663.
- [5] Ahmed S, Al-Rubeaai S, Tepe K. Novel trust framework for vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(10): 9498-9511.
- [6] Yang Z G, Wang R Y, Wu D P, et al. Blockchain-enabled trust management model for the Internet of vehicles[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(14): 12044-12054.
- [7] 陈亮, 郭婷, 刘韵婷, 等. 基于过滤机制筛选信息的多智能体策略方法[J]. 控制与决策, 2022, 37(6): 1643-1648.
(Chen L, Guo T, Liu Y T, et al. Research on multi-agent strategy based on filtering mechanism to filter information[J]. Control and Decision, 2022, 37(6): 1643-1648.)
- [8] Nakamoto S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system[EB/OL]. (2008-11-01)[2023-11-14]. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [9] 汪洋, 叶挺, 李廷文, 等. 自主船舶航行系统信息空间安全: 挑战与探索[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2023, 51(2): 64-76.
(Wang Y, Ye T, Li T W, et al. Cyberspace security for autonomous ship navigation system: Challenges and explorations[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2023, 51(2): 64-76.)
- [10] 徐选华, 王兵, 周艳菊. 基于信任机制的不完全信息大群体决策方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(4): 577-585.
(Xu X H, Wang B, Zhou Y J. Method for large group decision making with incomplete decision preference information based on trust mechanism[J]. Control and Decision, 2016, 31(4): 577-585.)
- [11] Yang Z, Yang K, Lei L, et al. Blockchain-based decentralized trust management in vehicular networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 1495-1505.
- [12] Zhang H B, Liu J J, Zhao H L, et al. Blockchain-based trust management for Internet of vehicles[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 2021, 9(3): 1397-1409.

作者简介

汪洋(1976—),男,副研究员,博士,主要研究方向为水路交通风险与应急、水路交通信息安全, E-mail: wangyang.itsc@whut.edu.cn;

叶挺(1994—),男,硕士,主要研究方向为区块链、网络安全, E-mail: 971173084@qq.com;

陈志强(1977—),男,工程师,学士,主要研究方为水上交通监测分析, E-mail: 69843833@qq.com;

王腾飞(1988—),男,讲师,博士,主要研究方向为船舶避碰、船舶航行安全, E-mail: wangtengfei@whut.edu.cn;

吴兵(1986—),男,研究员,博士,主要研究方向为水路交通安全控制, E-mail: bing.wu@whut.edu.cn.