数字货币和区块链

- 共识与区块链

山东大学网络空间安全学院

钱宸 2023年11月29日

区块链与共识协议

- 简介与历史
- 拜占庭广播与Dolev-Strong协议
- 拜占庭广播（无签名）
- 区块链
- 区块链协议

简介与历史

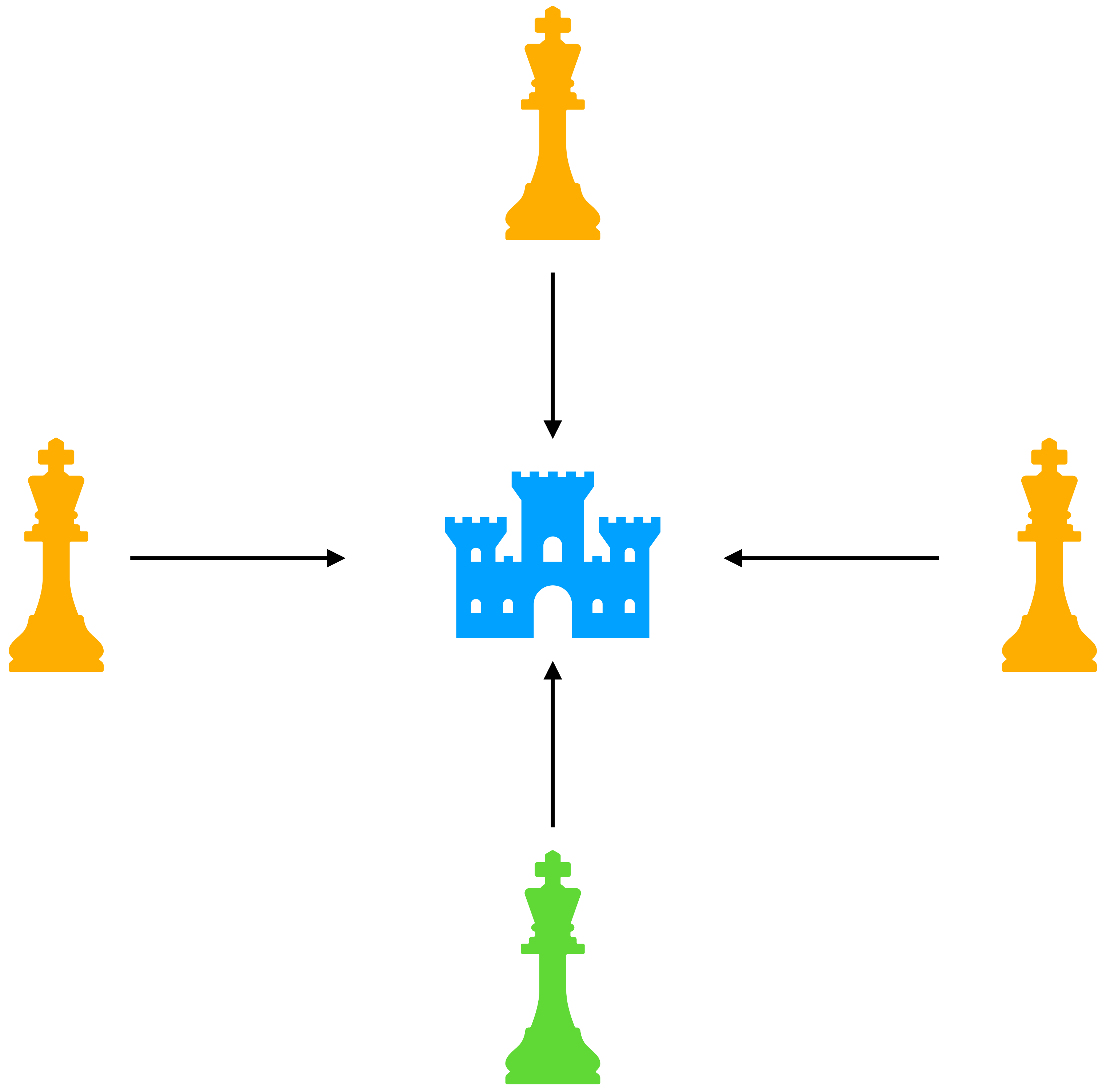
- 共识协议：
  - 分布式共识协议的优点
    - 能够保证在分布式协议中，恶意或损坏的计算节点不影响最终结果（类似纠错码的作用）
  - 历史：
    - 飞机控制系统
    - Google和Facebook的基础设施
    - 2009年以来被用于数字货币等

一些简单的说明

- 共识协议
  - N方$(P_1, P_2, \ldots, P_n)$参与计算，最终获得共识C
- 攻击者
  - 在协议开始之前选定一个集合$S \subseteq [n]$破坏
  - $\forall i \in S . P_i$不用遵守协议，可以任意计算发出的值
  - 所有S集合中的用户，可以共谋。

拜占庭协议（Lamport,Shostak,Pease ’82）

- 多个将军攻击一个城池
- 只存在两两之间的信息交互
- 有叛徒存在，叛徒可以传递任何信息
- 其中有一个大将军发号施令
- 所以会出现一下三种情况：
    - 所有人都进攻→攻下城池✓
    - 所有人都撤退→无损伤撤退✓
    - 一部分人进攻一部分人撤退→失败✗



拜占庭将军协议 - （拜占庭广播）

- 目标：
  - 所有诚实的将军都会做同样的决定
  - 如果发号施令的大将军是诚实的，则所有诚实的将军都会遵守相同的决定
- 注意：
  - 如果大将军肯定是诚实的，那么问题是显然的
  - 所有人只要遵守大将军的指令即可

可信分布式系统

- 对应到分布式系统中
  - 每一个节点都有可能失败
  - 通信都是1对1发送
  - 最终要达成共识

现实中的例子

- 考试开卷还是闭卷?
- 最简单的方法是老师来发布通知。（“诚实大将军”情况）
- 班长一对一通知，
  - 可能有部分同学不想考试。。所以，会不诚实遵守协议（“非诚实将军”）
  - 也有可能班长自己也不想考试（“非诚实大将军”）
  - 目标：所有想考试的同学都能达成共识

具体定义

- 计算节点：假设一共有n个计算节点，被定义为$P = \{1, 2, ..., n\}$。
  - 定义其中1号为“大将军”，信息发布者s
  - 遵循协议的用户被称为诚实的
  - P中有一部分用户$T \subseteq P$，不遵守协议可以在任意时间，发送给任意用户任意信息。被称为叛徒。且叛徒也可以共谋，信息共享。
    - 通常可以模拟成为一个用户控制所有叛徒
    - 我们不知道谁是叛徒，否则的话协议也是简单的

具体定义

- 通信模型：
  - 一对一通信
  - 每一个用户都有自己的签名公私钥，保证通信传输不会被更改
  - $\langle m \rangle_i$表示(m, σ)其中σ是m能被用户i的公钥验证的签名
  - 通信模式：
    - 同步通信模型，每一次信息发出都会在一轮内到达（本课程默认模式）
    - 非同步通信模型

具体定义

- 叛徒模型：
  - 叛徒必须是在协议开始执行之前就选定 - 静态叛徒模型（本课程默认设定）
  - 叛徒可以在协议执行期间选定 - 动态叛徒模型

拜占庭广播协议

- 运行：
  - 由信息发布者s收到一个比特$b \in \{0,1\}$
  - 所有的用户集合P分成叛徒集合T和诚实用户集合H。即：P = T ∪ H且T ∩ H = ∅
  - 开始运行协议，协议结束后每一个诚实的用户都输出一个比特b_i
- 保证以下性质：
  - 一致性：$\forall i,j \in H . b_i = b_j$
  - 正确性：如果所有信息发布者s是诚实的且收到的信息是b，则$\forall i \in H . b_i = b$

尝试

- 最简单的尝试：
  - 第一轮：P_1随机选择一个比特b，并将$\langle b\rangle_1$发送给所有用户（包括他自己）
  - 第二轮：所有用户输出自己收到的比特。
- 一致性?
  - 如果$1 \in H$（P_1是诚实的），则协议保证一致性
  - 如果$1 \in T$（P_1是叛徒），则无法保证协议一致性

再次尝试

- 总结上述，发现要让诚实的用户达成一致→加入投票机制
- 想法：假设一共有$2k+1$个人，其中最多k个叛徒，那么投票产生结果
- （2k+1）个用户
  - 第一轮：P_1随机选择一个比特b，并将$\langle b \rangle_1$发送给所有用户（包括他自己）
  - 第二轮：所有用户将自己收到的比特发送给所有人
  - 第三轮：每个用户发送自己收到最多的比特
- 这个协议满足一致性要求么？✘

再次尝试

- （2k+1）个用户
  - 第一轮：P_1随机选择一个比特b，并将$\langle b \rangle_1$发送给所有用户（包括他自己）
  - 第二轮：所有用户将自己收到的比特发送给所有人（包括用户自身）
  - 第三轮：每个用户发送自己收到最多的比特
- 攻击：将$(2,\ldots,2k+1)$的$2k$个用户分成S_0和S_1两个不同的集合
  - P_1发送$\langle 0 \rangle_1$给所有S_0中的用户；P_1发送$\langle 1 \rangle_1$给所有S_1中的用户
  - P_1投票$\langle 0 \rangle_1$给所有S_0中的用户；P_1投票$\langle 1 \rangle_1$给所有S_1中的用户

再再次尝试 - Dolev-Strong（SIAMCOMP '83）协议

- 假设有k个叛徒，一共有n个用户参与协议：
- 运行：每个用户都有一个集合extr_i，初始状态为空集
  - 第0轮：P_1随机选择一个比特b，并将$\langle b\rangle_1$发送给所有用户（包括他自己）
  - 第r轮（r = 1 到k+1）：
    - 收到消息$\langle \bar{b}\rangle_{1,j_1,\ldots,j_{r-1}}$，如果$\bar{b} \notin \text{extr}_i$，则$\text{extr}_i = \text{extr}_i \cup \{\bar{b}\}$
    - 并将$\langle \bar{b}\rangle_{1,j_1,\ldots,j_{r-1},i}$发送给每一个用户
  - 结束的时候如果$\left|\text{extr}_i\right| = 1$，则输出该比特，否则输出0

Dolev-Strong协议

- 为什么Dolev-Strong协议安全？为什么Dolve-Strong协议需要k+2轮？
- 几个想法：
  - 签名保证即使是叛徒也无法更改信息内容
  - 假设只有k轮：
    - （错误）~~两个诚实的用户（其中之一是信息发送者），k个叛徒~~
    - （正确）一共有k个叛徒，包含信息发送者。
    - 第0轮，发送$\langle 1 \rangle_1$给每个用户
    - 第k轮，伪造一个$\langle 0 \rangle_{1,j_1,\ldots,j_{k-1}}$发送个一个诚实的用户
    - 一个诚实的用户输出0，其他输出1

Dolev-Strong协议

- 一致性、正确性
- 正确性：
  - 如果信息发送者是诚实的
  - 那么$\langle 1-b \rangle_1$中的签名从来没有出现过
  - 所以，所有的诚实用户都会返回b

Dolev-Strong协议

- 一致性：
  - 证明两个性质
  - 引理1: 令$r \leq k$。如果第r轮结束的时候，某个诚实的用户i，对应的extr$_i$中有$\bar{b}$，则在第$r+1$轮结束的时候，每个诚实的用户的extr$_i$中都有$\bar{b}$。
  - 引理2：如果第$k+1$轮结束的时候，某个诚实的用户i，对应的extr$_i$中有$\bar{b}$，则在第$k+1$轮结束的时候，每个诚实的用户的extr$_i$中都有$\bar{b}$。

Dolev-Strong 协议

- 引理1: 令$r \leq k$。如果第r轮结束的时候，某个诚实的用户i，对应的$extr_i$中有$\bar{b}$，则在第$r+1$轮结束的时候，每个诚实的用户的$extr_i$中都有$\bar{b}$。
- 证明：
    - 挑选第一次$\bar{b}$进入$extr_i$的时候，假设为第t轮。
    - 则在第$t+1$轮结束的时候所有诚实用户的$extr_i$中都有$\bar{b}$。

Dolev-Strong 协议

- 引理2：如果第$k+1$轮结束的时候，某个诚实的用户i，对应的$extr_i$中有$\bar{b}$，则在第$k+1$轮结束的时候，每个诚实的用户的$extr_i$中都有$\bar{b}$。
- 证明：分两种情况讨论。
  - 第一种：假如$extr_i$在第k轮的时候就已经包含了$\bar{b}$，则根据引理1可得
  - 第二种：如果$\bar{b}$实在第k+1轮的时候新加入$extr_i$的:
    - 则我们观察可知，第r轮加入的信息都包含r个签名。
    - 即：新加入的$\bar{b}$包含k+1个签名，其中至少有一个是诚实的用户j。
    - 所以诚实用户j的$extr_j$在第k轮的时候就包含$\bar{b}$，所以由引理1可得。

Dolev-Strong 协议

- 一致性：
  - 引理1: 令$r \leq k$。如果第r轮结束的时候，某个诚实的用户i，对应的extr$_i$中有$\bar{b}$，则在第$r+1$轮结束的时候，每个诚实的用户的extr$_i$中都有$\bar{b}$。
  - 引理2：如果第$k+1$轮结束的时候，某个诚实的用户i，对应的extr$_i$中有$\bar{b}$，则在第$k+1$轮结束的时候，每个诚实的用户的extr$_i$中都有$\bar{b}$。
  - 所以，第k+1轮结束的时候，所有诚实用户的extr$_i$都是相同的。
  - 一致性可证。

一些讨论

- Dolev-Strong同时证明了任意确定性拜占庭广播都必须有$k+1$轮（k个叛徒）
- 但是在实际中，因为不知道叛徒人数，所以必须得$n+1$轮。
- 某些情况中十分低效：
    - 加入随机数可以降低轮数