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 2024年12月23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

中本聪的区块链

- 区块链技术首先被用于分布式系统以及飞机控制系统
- 在2009年当区块链被用于比特币以后，获得了广泛的关注和发展
- 其中最核心的就是中本聪的区块链系统
- 不仅仅是数字货币的尝试，从理论角度也是突破：
  - 首个在未经许可的环境中（permissionless environment）中达成共识的区块链

未经许可环境中的区块链

- 未经许可环境中的区块链系统很久以来被认为是不存在的
- 难点：
  - 女巫攻击（Sybil Attack）：因为在未经许可环境中，所以
  - 攻击者可以伪装成任意他人
  - 攻击者也可以伪装成很多人
- 突破：
  - 想法：通过工作量证明（Proof of Work）来避免女巫攻击
  - 每一次投票都要通过算力来实现。系统中多数算力是诚实的，则能保证系统的一致性和活跃性

中本聪区块链

- 每个用户都拥有一个链（chain）
- 区块：
  - 包含首个区块
  - $chain[i] = (h_{-1}, \eta, txs, h)$
    - h_{-1}是之前一个区块的哈希
    - η是一个难题的结果
    - txs是许多交易的集合
    - h是当前区块的哈希值

一些简单的记号

- $chain[-l]$：倒数第l个区块
- $chain[:l]$：从第0个到第l个区块
- $chain[:-l]$：$chain[0,\ldots,k-l]$，其中k是当前区块
- $\left|chain\right|$：链的长度
- _：用来表示任意字符
- 中本聪区块链的第0区块：
  - “The Times 03/Jan/2009 Chancellor on brink of second bailout for banks”
  - “财政大臣正处于第二次银行救助边缘”

区块链

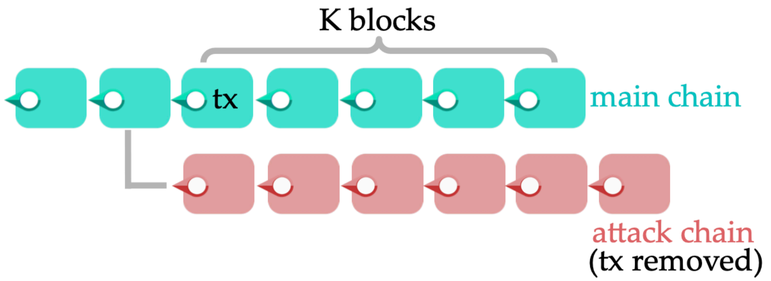
- 挖矿：
  - 对于一个区块链$chain$而言，令最后一个区块是$(_, _, _, h^\star)$
  - 如果想要“挖”一个新的区块
    - 计算η使得$\mathsf{H}(h^\star, \eta, txs) < D_p$
    - 其中H为一个工作证明寓言机，通常用一个哈希函数来实现
    - D_p是一个难度参数，D_p越小难度越大
    - 如果上述条件满足，则$(h^\star, \eta, txs, \mathsf{H}(h^\star, \eta, txs))$为一个新的区块

一些注释

- 假设哈希函数H像一个随机寓言机
  - 计算哈希函数H的原象，不能利用代数结构
  - 也就是说计算原象只能够通过穷举的方式
  - 另外，因为哈希函数H满足抗碰撞性：
    - 所以每一个区块都与整条链唯一绑定

最长链

- 中本聪的最重要的思想之一：
  - 总是选取最长链作为确认的链
  - 无论何时$chain[:-K]$被确认
  - 如果一个区块在最长链的倒数K区块以上，那么就确认该区块
  - 如果攻击者想要更改某个区块的数值，则需要伪造K+1个区块。
  - 为什么安全?



中本聪区块链严格定义

- 我们这里简单假设总算力是提前知道的，在实际比特币系统中，挖矿的难度会根据算力进行调整。
- 同样，我们假设在一个同步网络当中。其中诚实用户的信息能够在Δ时间后被收到。
- 对算力证明建模：我们使用$(H, H.ver)$其中H为算力证明中的工作函数，$H.ver$被用来证明计算出来的结果是正确的。
- 我们假设每个计算节点都拥有同样的算力，不同算力的节点可以被拆分成很多的节点。

中本聪区块链

- 第一个区块是$(0,0,\perp,\mathsf{H}(0,0,\perp))$
- 如果一个节点收到$chain'$是一个被验证的链，并且是目前接收到的最长链$chain$的延长。则将$chain$替换成为$chain'$
- 令$chain[-1]=(_,_,_,h_{-1})$，随机选取η，计算$h=\mathsf{H}(h_{-1},\eta,txs)$，如果$h<D_p$则将$chain\|(h_{-1},\eta,txs,h)$发送给所有节点。
- 在任何时间点，每个节点所确认的链都是$chain[:-K]$

如何选取难度参数

- 比特币中，难度为所有人计算10分钟可以获得下一个区块
- 但是这个时间太长了，通常使用K=6
- 但是这个参数也不能太小：
  - 诚实的节点包含网络延迟Δ
  - 攻击者可能并不需要受到延迟的困扰

如何选取难度参数

- 简单的估计（不严谨）：
  - p是每一轮中一个节点计算一个区块的概率（这个概率非常小）
  - 那么所有诚实节点（51%）加在一起能够计算一个节点的概率是
  - $1-(1-p)^{0.51n} \approx 0.51pn \ll 1$，也就是说所有诚实节点预计$\frac{1}{0.51pn}$产生一个新的区块
  - 假设所有Δ轮中所有诚实节点都没有成功，那么打折率是
    - $\frac{\frac{1}{0.51pn}}{\frac{1}{0.51pn}+\Delta} \approx 1-0.51pn\Delta$
  - 诚实节点的算力在打折率$1-0.51pn\Delta$的情况下，仍然要超过攻击者算力

如何选取难度?

- 选择$p \in (0,1)$
  - 当p固定以后可以选择$D_p = p \cdot 2^{\lambda}$
- 假设q是攻击者的比例
  - 那么$(1-q)(1-2pn\Delta) \geq (1+\varepsilon) \cdot q$
  - 这里2和之前非正式的计算中0.51不一样，但是2才是满足严格证明所需要的参数

中本聪区块链的性质

- 链增长的下界：
  - 在固定时间内，诚实用户的链会增长多少
- 链质量：
  - 对于任意连续K个区块，有多少是有诚实用户获得的
- 一致性：
  - 诚实用户的倒数K个区块之前一定是别的诚实用户的链的前缀

链增长的下界

- 令$\alpha = (1 - q)np$是每一轮预计有多少诚实用户挖到区块
- 但是，因为有延迟所以我们要乘上打折率
  - $(1 - 2np\Delta)\alpha$
- 为什么我们关心链增长率?
  - 因为活跃性和链增长率高度相关
  - 但是，单独增长率还不够，因为攻击者也可以挖矿，可以制造一些无用的区块。人为降低活跃性。

链质量

- 对于任意连续K个区块，有多少是有诚实用户获得的
  - 非常粗略的估计，诚实用户的算力占比是μ，那么大约有$K \cdot \mu$个区块是由诚实用户所产生的

一致性与活跃性

- 中本聪区块链的一致性：
  - 只关注最长的一条链的倒数K个区块以前的链是否互为前缀
- 活跃性：
  - 如果一个诚实的用户收到一个交易了以后，会在多久以后被所有诚实用户所接收到

比特币

- 区块链货币中
- 挖矿
  - 工作：计算哈希函数提供下一个区块
  - 奖励：
    - 挖取每个哈希块的时候，包含一个pk，sk即为获取的奖励
    - 开始每个区块50个比特币，210000个区块以后减半（4年），约2140年后归零
- 交易
  - 每个交易区块中都包含支付给矿工的交易费用

区块链攻击-自私挖矿攻击

- 每个矿工都希望能够获取更多的区块
- 诚实状况下，获得的奖励与算力成正比
- 比特币：无法抵御自私挖矿攻击
  - 结论：如果每个区块的奖励相同
    - 使用1/3的算力，最多可收集1/2的挖矿奖励
    - 使用49%的算力，最多可以收集96%的挖矿奖励

自私挖矿攻击

- 诚实矿工：
  - 挖取区块以后立即广播发送给他人
- 自私矿工：
  - 挖取区块B以后，将区块B拿在手上。
  - 直到诚实挖矿者也挖到一个区块B’与B在同一高度上。
  - 如果B能够比B’传递更快那么他可以让别人接受B而不是B’。
  - 该操作可以重复执行。
- 攻击者优势：自私矿工可以替换掉一个诚实用户的区块。

自私挖矿攻击-粗略计算

- 假设敌手拥有$\rho < 1/2$的算力,网络延迟为$\Delta = 0$.
- 在一个很长的时间窗口中T个区块被挖出.
- 那么正常情况下,
  - 敌手获得$\rho \cdot T$个区块
  - 诚实用户获得$(1-\rho) \cdot T$个区块
- 然而每个敌手获得的区块都可以顶替掉一个诚实用户获得的区块
  - 所以实际诚实用户获得的区块大约是$(1-\rho T) - \rho T = (1-2\rho)T$
  - 总区块数为$1 - 2\rho T + \rho T = (1-\rho)T$

自私挖矿攻击-粗略计算

- 然而每个敌手获得的区块都可以顶替掉一个诚实用户获得的区块
  - 所以实际诚实用户获得的区块大约是$(1-\rho T)-\rho T=(1-2\rho)T$
  - 总区块数为$(1-2\rho)T+\rho T=(1-\rho)T$
- 区块链的质量为:
  - $\frac{1-2\rho}{1-\rho}$
- 敌手控制的区块比例为:$1-\frac{1-2\rho}{1-\rho}$
  - $\rho=1/3$,上述比例为1/2
  - $\rho=49\%$,上述比例为96%

自私挖矿攻击-讨论

- 上述攻击的局限性:
  - 假设攻击者在获取到同样长度的链时,选择最先到达的链
  - 攻击者的区块总会提前到达
  - 如果自私挖矿者与网络供应商没有关系的话,则攻击效果不是很理想

自私挖矿攻击

- 如何防护自私挖矿攻击, 最直接的想法:
  - 当有同样长度的链到达时,采用更好的决定方法
  - 最为简单的方式:
    - 随机选取一个最长的链
    - 敌手仍然有1/2的成功概率

Fruitchain[PasShi17]

- 保证的性质
  - 对于控制小于$\rho P < \frac{1}{2}P$算力的敌手,即使不遵循协议规则,其获得的奖励为$\delta \cdot \rho G$
    - G为总共获得的奖励个数
    - $\delta \in (0,1)$