数字货币和区块链

- 中心化数字货币

山东大学网络空间安全学院

钱宸 2023年11月15日

数字货币

- 中心化数字货币定义与安全性
- 基于离散对数的数字货币
- 可传递数字货币定义
- 可传递数字货币构造

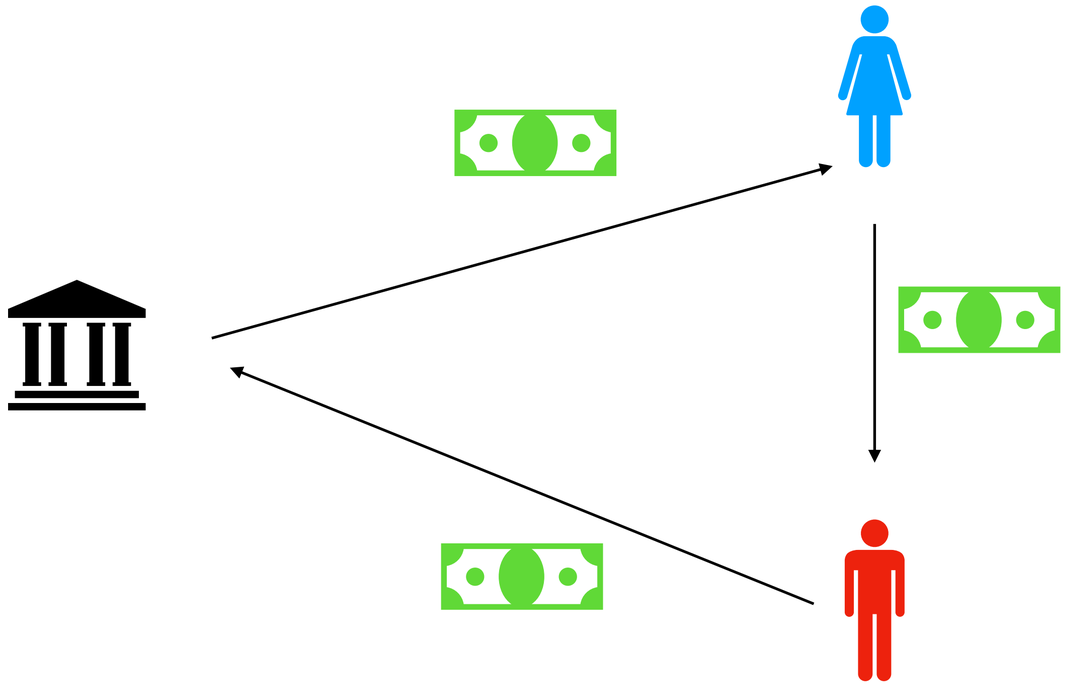
Chaum 数字货币

优点：

- 高效
- 匿名性
- 抗双支付攻击
- 可离线交易

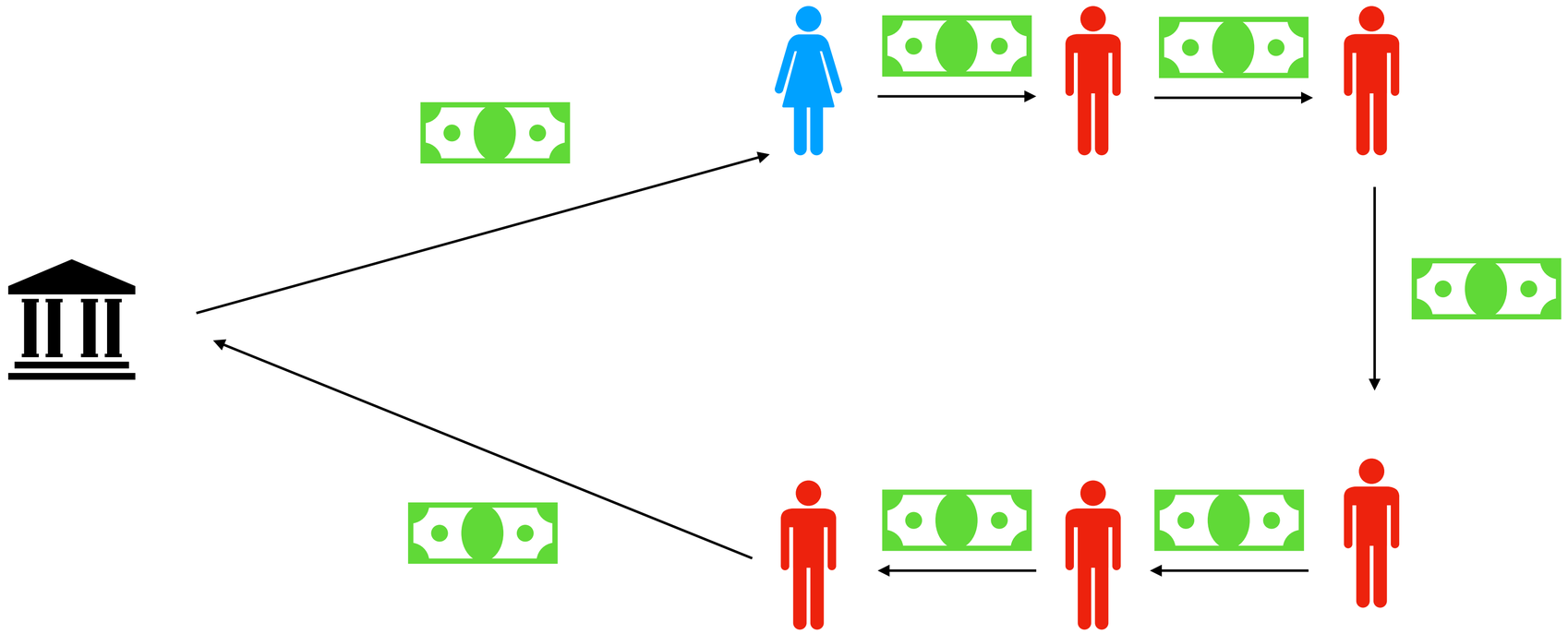
缺点：

- 交易过程无法延续
- 数字货币无法分割



改进数字货币

- 我们这里考虑改进数字货币的可传递性：
- 理想情况：
  - 货币可传递
  - 匿名性
  - 抗双支付
  - 不可抵赖



可传递货币 - 可靠性

- 对应Chaum数字货币的正确性
- Chaum数字货币：
  - 正常生成的货币，能够被银行承认。
- 可传递数字货币：
  - 正常生成的货币，能够被传递给下一个人，并最终被银行承认。

匿名性回顾

- 在Chaum数字货币中，匿名性
  - Bank $\xrightarrow{C}$ Alice $\xrightarrow{D}$ Bob $\xrightarrow{E}$ Bank
  - 银行没办法将C和E联系起来。
  - 性质主要由盲签名算法来保证

可传递数字货币 - 匿名性

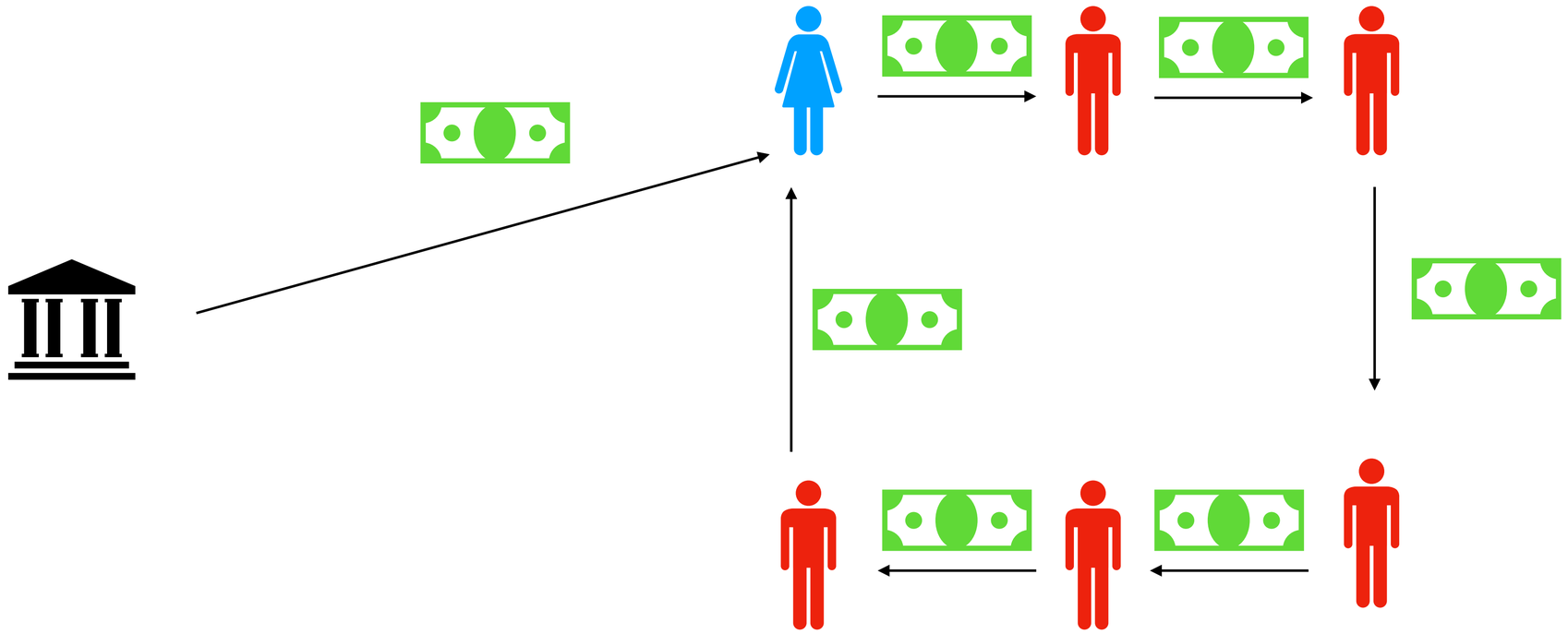
- 可传递货币的匿名性?
  - 不同级别的安全性定义
  - 货币匿名性
  - 货币透明性
  - 用户匿名性

可传递数字货币 - 货币匿名性

- Chaum数字货币匿名性的直接拓展
  - Bank $\xrightarrow{C_1}$ A_1 $\xrightarrow{C_2}$ A_2 $\xrightarrow{C_3}$ … $\xrightarrow{C_k}$ Bank
  - 银行无法将C_1与C_k联系起来
  - 然而改匿名性定义看上去并不是很足够

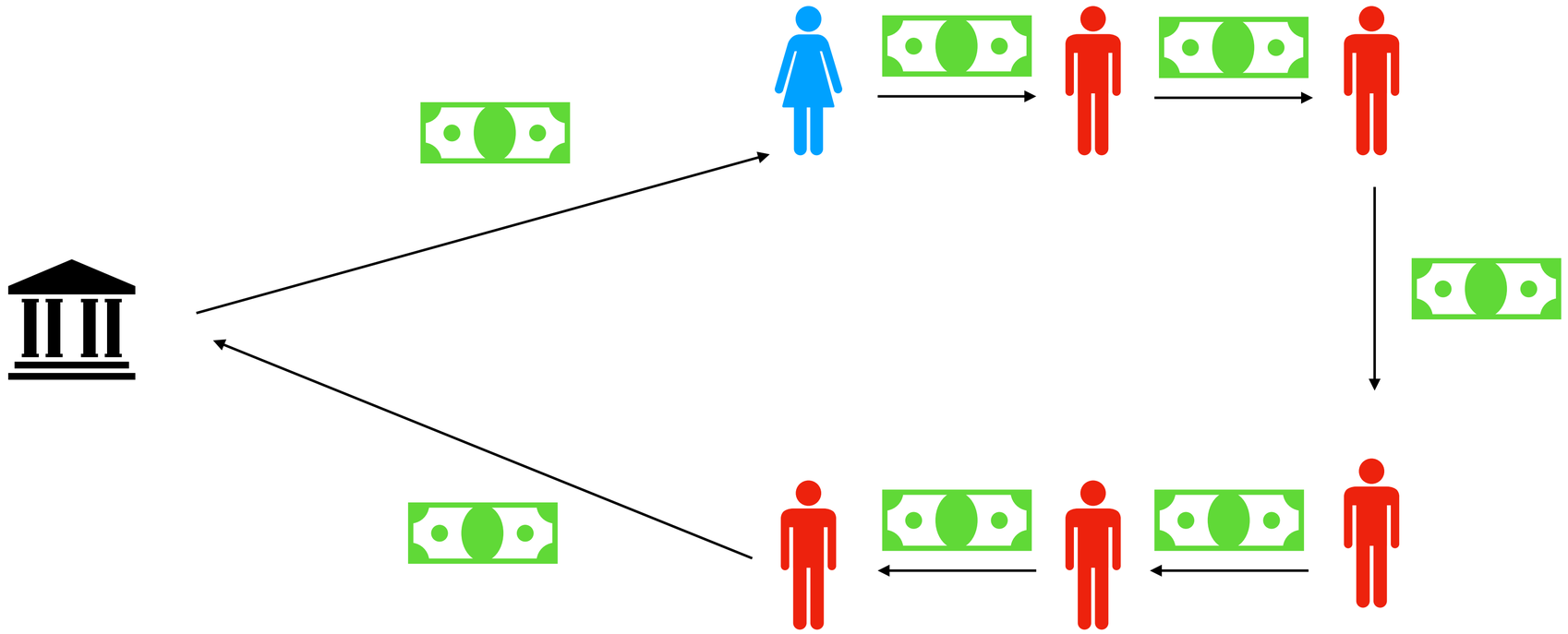
可传递数字货币 - 货币透明性

- 在传递的过程中每一个节点都具有匿名性



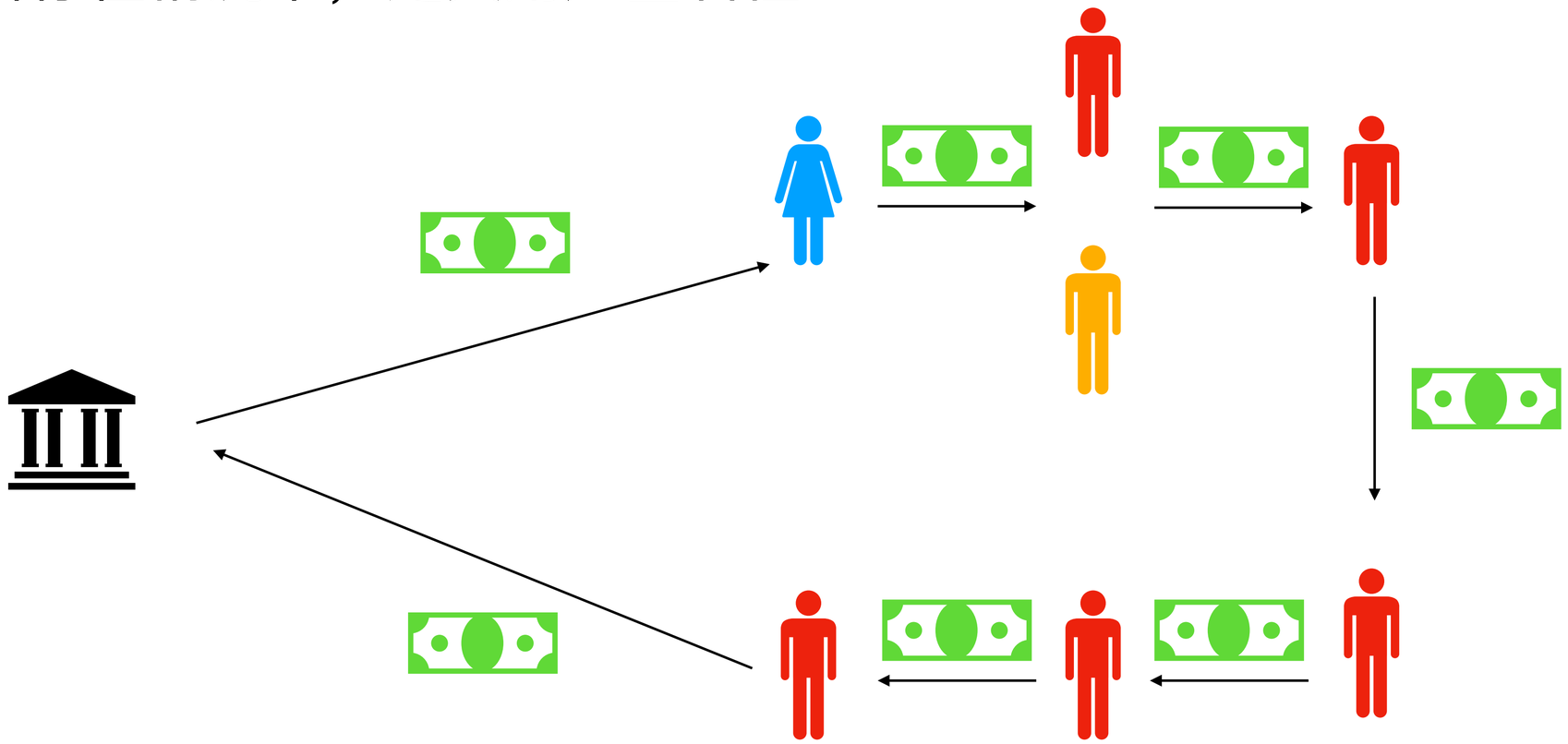
可传递数字货币 - 共谋攻击

- 然而，在有多方参与货币支付的时候，共谋攻击无法避免



可传递数字货币 - 用户匿名性

- 考虑上述共谋攻击存在情况下，定义用户匿名性



可传递数字货币 - 匿名性总结

- 完全照搬Chaum数字货币匿名性
  - 货币匿名性
- 每个用户节点都保证匿名性
  - 货币透明性
- 共谋攻击无法避免
  - 用户匿名性

可传递货币 - 抗双支付

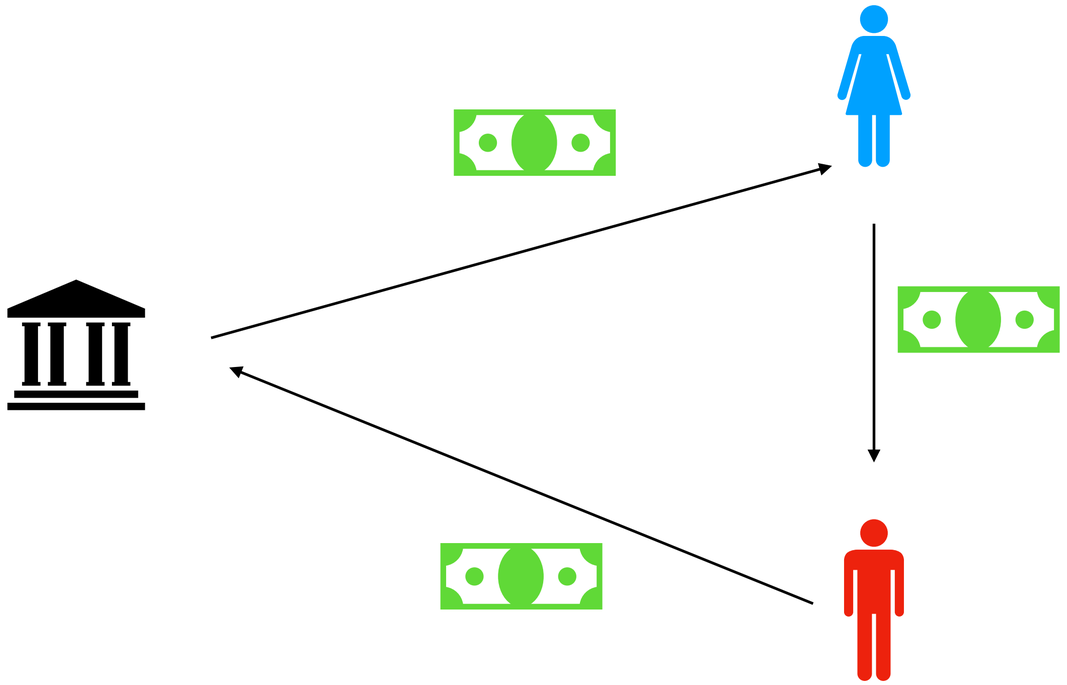
- 如果在货币支付过程中Alice发生了双支付
  - 则兑付的时候Alice的身份被银行识别

可传递货币 - 不可抵赖性

- 和Chaum数字货币类似
  - 假设银行判定Alice双支付攻击行为存在
  - Alice无法抵赖

可传递数字货币 - 第一次尝试

- 直接支付给第三方呢?
- Chaum数字货币:
  - $f_{\mathrm{SN}}(pk_a, sk_a, pk_b), \pi_{a,b}, \sigma$
  - 问题?
    - 如果Bob进行了双支付→
      - 银行仍然追查到Alice



可传递数字货币 - 双支付攻击的简单拓展

- 仔细观察Chaum数字货币算法：
- $f_{\mathsf{SN}}(pk_a, sk_a, pk_b), \pi_{a,b}, \sigma$
- $= pk_A^{pk_B}\mathsf{H}(sk_A)$
- 双支付攻击：
- $\sigma, f_{\mathsf{SN}}(pk_a, sk_a, pk_b), f_{\mathsf{SN}}(pk_b, sk_b, pk_c), f_{\mathsf{SN}}(pk_c, sk_c, pk_d)$
- 必须保证每一个序列号都是正确产生的，但是又不能和银行进行交互

可传递数字货币 - 可变换签名

- Chase, Kohlweiss, Lysyanskaya, Meiklejohn CSF'14
  - Malleable Signatures: New Definitions and Delegatable Anonymous Credentials
- 提出了可变换签名：
  - $\mathsf{Setup}(1^\lambda) \rightarrow (\mathsf{vk}, \mathsf{sk})$
  - $\mathsf{Sig}(\mathsf{sk}, \mathsf{m}, \mathsf{T}) \rightarrow \sigma$，签名的同时规定一个明文变换。
  - $\mathsf{Ver}(\mathsf{vk}, \sigma, \mathsf{m}) \rightarrow \{0, 1\}$
  - $\mathsf{Trans}(\mathsf{T}, \sigma) \rightarrow \sigma'$

可传递数字货币

- $\sigma, f_{\mathsf{SN}}(pk_a, sk_a, pk_b), f_{\mathsf{SN}}(pk_b, sk_b, pk_c), f_{\mathsf{SN}}(pk_c, sk_c, pk_d)$
- 这里σ为一个可变换签名，其中变换T被定义为诚实的序列号生成
- 即，对于诚实产生的签名满足
  - $\mathsf{Ver}(\mathsf{vk}, \sigma, \{\mathsf{f}_{\mathsf{SN}}(\mathsf{pk}_i, \mathsf{sk}_i, \mathsf{pk}_{i+1})\}_{i\in\{1,\ldots,k\}}) = 1$

双支付攻击的匿名性考虑 - 零知识证明

- 现有数字货币：
- $\sigma, f_{\mathsf{SN}}(pk_a, sk_a, pk_b), f_{\mathsf{SN}}(pk_b, sk_b, pk_c), f_{\mathsf{SN}}(pk_c, sk_c, pk_d)$
  - 货币匿名性 YES
  - 货币透明性 NO
- 如何解决?
  - 将每个序列号都加密，并加上零知识证明（Groth-Sahai EC'08）
  - $\mathsf{ct}_\sigma, \mathsf{ct}_1, \mathsf{ct}_2, \mathsf{ct}_3, \ldots, \mathsf{ct}_k, \pi$，利用加密与零知识的可随机性

防止双支付攻击 - 公钥加密算法

- $ct_\sigma, ct_1, ct_2, ct_3, \ldots, ct_k, \pi$
- 然而，银行并不知道序列号本身，所以无法进行双支付检测。
- 解决方法：
  - 用银行的公私钥对来进行加密

补充：双支付实现

- 这里零知识证明可随机化的条件→具有代数结构
  - 所以之前利用哈希函数的双支付无法实现
- Anonymous Transferable E-Cash
  - Baldimtsi, Melissa Chase, Georg Fuchsbauer, and Kohlweiss (PKC'15)
- 前期知识：双线性对
  - $e : \mathbb{G}_1 \times \mathbb{G}_2 \to \mathbb{G}_T$，其中$g_1 \in \mathbb{G}_1, g_2 \in \mathbb{G}_2$
  - 满足
    - $e(g_1^x, g_2) = e(g_1, g_2^x)$
    - $e(g_1^0, g_2) = e(g_1, g_2^0) = g_T^0$

具有代数结构的序列号

- $(e, p, \mathbb{G}_1, \mathbb{G}_2, \mathbb{G}_T, g_1, g_2, g_T)$
- $pp = g_1, g_2, h_1, h_2, \bar{h}_1, \bar{h}_2$
- $f_{\mathsf{SN}}(n_{i+1}, sk_{i+1}) = (N_{i+1}, M_{i+1})$, 其中$N_{i+1} = g_1^{n_{i+1}}, M_{i+1} = g_2^{sk_{i+1} \cdot n_{i+1}}$
- $f_{\mathsf{DS}}(ID_i, n_i, sk_i, (N_{i+1}, M_{i+1})) = (A_i, B_i, \bar{A}_i, \bar{B}_i)$
- 其中

$$A_i = N_{i+1}^{ID_i} h_1^{n_i} \qquad B_i = M_{i+1}^{ID_i} h_2^{n_i}$$

$$\bar{A}_i = N_{i+1}^{sk_i} \bar{h}_1^{n_i} \qquad \bar{B}_i = M_{i+1}^{sk_i} \bar{h}_2^{n_i}$$

具有代数结构的序列号

- $f_{\mathsf{DS}}(ID_i, n_i, sk_i, (N_{i+1}, M_{i+1})) = (A_i, B_i, \bar{A}_i, \bar{B}_i)$
  - 其中
    $$A_i = N_{i+1}^{ID_i} h_1^{n_i} \qquad B_i = M_{i+1}^{ID_i} h_2^{n_i}$$
    $$\bar{A}_i = N_{i+1}^{sk_i} \bar{h}_1^{n_i} \qquad \bar{B}_i = M_{i+1}^{sk_i} \bar{h}_2^{n_i}$$
- 抗碰撞
- 抗双支付