УГАТУ

Лекция №9

ЭКЗОТИКА, ЭЗОТЕРИКА, ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Дисциплина: Криптографические методы защиты информации
Преподаватель: Миронов Константин Валерьевич
Поток: БПС-3, ИКТ-5
Учебный год: 2020/21

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Содержание лекции

- **Подписи на основе многократного хеширования**
  - **Подпись Лэмпорта**
  - **Подпись Винтерница**
  - **Дерево Меркла**
- Распределенные реестры
- Прочее

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Одноразовые подписи

One-Time Signature, OTS

Отличия от обычных ЭП:

- Математический аппарат асимметричной криптографии не используется
- Используется хеш-функция, при этом, криптостойкость подписи обеспечивается исключительно криптостойкостью используемой хеш-функции
- Каждую пару ОК-ЗК можно использовать один раз
- Длины ключей больше, вычислительные затраты меньше
- Считаются устойчивыми к гипотетическим квантовым атакам

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Подпись Лэмпорта

Вариант на основе 256-битной хеш-функции

ЗК: 512 случайных блоков по 256 бит, объединенные в 256 пар

$$ЗК = \begin{matrix} ЗК_{1,1}ЗК_{1,2} \\ ЗК_{2,1}ЗК_{2,2} \end{matrix} \vdots \begin{matrix} ЗК_{1,256} \\ ЗК_{2,256} \end{matrix}$$

- Если блоки генерируются на ГПСП, в памяти можно хранить только IV и ключ генератора

ОК: 512 256-битных хешей каждого кода ОК[1,1]…ОК[1,256]ОК[2,1]…ОК[2,256]

$$ОК = \begin{matrix} ОК_{1,1}ОК_{1,2} \\ ОК_{2,1}ОК_{2,2} \end{matrix} \vdots \begin{matrix} ОК_{1,256} \\ ОК_{2,256} \end{matrix}$$

$$ОК_{i,j} = hash(ЗК_{i,j})$$

- Можно публиковать не сам ОК, а только хеш-функцию от него; в таком случае вместе с подписью к документу нужно будет прикладывать ОК

ЭП: 256 кодов по 256 бит

$$ЭП = ЭП_1 \dots ЭП_{256}$$

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Подпись Лэмпорта

Вариант на основе 256-битной хеш-функции

Постановка подписи:

шаг 1. Вычисляется $h = hash(\text{ОТ})$

шаг 2. Для каждого бита h

если i-й бит =0 то $\text{ЭП}_i = \text{ЗК}_{1,i}$

иначе $\text{ЭП}_i = \text{ЗК}_{2,i}$

Проверка подписи:

Вычислить хеши от ЭП и сравнить с соответствующими значениями из ОК

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Подпись Винтерница

Вариант на основе 256-битной хеш-функции

Требует меньше памяти, но больше операций хеширования

- 256-битный $h = hash(\text{ОТ})$ разбивается на блоки $h_1 h_2 \dots h_m$ по w бит (w – степень двойки); каждый блок трактуется как целое число
- ЗК: m псевдослучайных 256-битных случайных кодов

$$\text{ЗК} = \text{ЗК}_1 \text{ЗК}_2 \dots \text{ЗК}_m$$

- ОК: m 256-битных блоков

$$\text{ОК} = \text{ОК}_1 \text{ОК}_2 \dots \text{ОК}_m$$

каждый j-й блок ОК вычисляется на основе соответствующего блока ЗК по алгоритму:

$a = \text{ЗК}_j$

для i от 1 до $2^w - 1$

$a = hash(a)$

$\text{ОК}_j = a$

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Подпись Винтерница

Вариант на основе 256-битной хеш-функции

ЭП: m 256-битных блоков

$$ЭП = ЭП_1 ЭП_2 \dots ЭП_m$$

Процедура постановки:

$h_1 h_2 \dots h_m = hash(ОТ)$

для j от 1 до m

$a = ЗК_j$

для i от 1 до h_j

$a = hash(a)$

$ЭП_j = a$

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Подпись Винтерница

Вариант на основе 256-битной хеш-функции

Процедура проверки:

$h_1 h_2 \dots h_m = hash(\text{ОТ})$

для j от 1 до m

$a = \text{ЭП}_j$

для i от 1 до $(w - h_j - 1)$ выполнить $a = hash(a)$

если $a \neq \text{ОК}_j$ то прервать проверку (ПОДПИСЬ НЕВЕРНА)

конец цикла

завершить проверку (ПОДПИСЬ ВЕРНА)

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Одноразовые подписи

Уменьшение длины ключей

- Если ЗК является ПСП, то в памяти можно хранить только синхропосылку генератора
- Вместо ОК в «цифровой телефонной книге» можно публиковать его хеш-функцию
  - Тогда к самой ЭП надо прикладывать значение ОК
  - т.е. объем телефонной книги уменьшается за счет увеличения объема каждой конкретной подписи

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Одноразовые подписи

Постановка подписи при уменьшенной длине ключей

\\ $ЗК_{внут}, ОК_{внут}$ – ключи заданные исходным алгоритмом OTS

\\ $ЗК_{внеш}, ОК_{внеш}$ –ЗК, хранящийся в памяти шифратора, и ОК, публикуемый в телефонной книге

$ЗК_{внут} = PRF(ЗК_{внеш})$ \\ $PRF(\ \ )$ – функция вычисления ПСП на основе синхропосылки

$ЭП_{внут} = SIGN(ОТ, ЗК_{внут})$ \\ $SIGN(\ \ )$ – функция постановки ЭП исходным алгоритмом OTS

$ОК_{внут} = getOK(ЗК_{внут})$ \\ getOK( ) – функция генерации ОК в исходном алгоритме OTS

$ЭП_{внеш} = \{ЭП_{внут}, ОК_{внут}\}$

Проверка подписи при уменьшенной длине ключей

ЕСЛИ $CHECK(ЭП_{внут}, ОК_{внут}) = FALSE$ ТО ПОДПИСЬ_НЕВЕРНА

\\ $CHECK(\ \ )$ – функция проверки ЭП исходным алгоритмом OTS

ИНАЧЕ ЕСЛИ $HASH(ОК_{внут}) \neq ОК_{внеш}$ ТО ПОДПИСЬ_НЕВЕРНА

ИНАЧЕ ПОДПИСЬ_ВЕРНА

УГАТУ
Уфимский государственный авиационный технический университет

Дерево Меркла

- Режим использования алгоритма OTS, позволяющий публиковать один короткий ОК и затем использовать его многократно
- С помощью ГПСП генерируется $m = 2^n$ закрытых ключей исходного алгоритма OTS $\text{ЗК}_1 \dots \text{ЗК}_m$
  - Желательно, чтобы ГПСП позволял вычислять отдельные ЗК без знания остальных (например, можно использовать шифр в режиме CTR)
- На их основе вычисляется m открытых ключей $\text{ОК}_1 \dots \text{ОК}_m$ и **хеши нижнего уровня** $h_{0,1} \dots h_{0,m}$

$$h_{0,j} = hash(\text{ОК}_i)$$

- Хеши нижнего уровня объединяются попарно, и от каждой пары вычисляется хеш следующего уровня; затем хеши каждого нового уровня объединяются и хешируются аналогичным образом:

$$h_{i,j} = hash(h_{i-1,\,2j-1} || h_{i-1,\,2j})$$

- На верхнем уровне остается только один хеш, он и публикуется в качестве ОК

$$\text{ОК}_{\text{внеш}} = h_{n,1}$$

Дерево Меркла

Процедура постановки подписи

$\backslash\backslash\ alt_1 \dots alt_{n-1}$ – массив альтернативных хешей, которые понадобятся для проверки подписи

$\backslash\backslash\ i$ – хранимый в памяти шифратора порядковый номер подключа

$\backslash\backslash\ \{c, d\} = IntDiv(a, b)$ – функция целочисленного деления a на b, возвращаеь частное c и остаток d

$\text{ЭП}_{\text{внут}} = SIGN(\text{ОТ}, \text{ЗК}_i)$ $\backslash\backslash\ SIGN(\quad)$ – функция постановки ЭП исходным алгоритмом OTS

$k = i$

для j от 1 до n

$\{k, rem\} = IntDiv(k, 2)$

если $rem = 0$ то

$alt_j = h_{j,k-1}$

иначе

$alt_j = h_{j,k+1}$

$\text{ЭП}_{\text{внеш}} = \{\text{ЭП}_{\text{внут}}, \text{ОК}_i, i, alt_1 \dots alt_{n-1}\}$

Дерево Меркла

Процедура проверки подписи

если $CHECK(\text{ЭП}_{\text{внут}}, \text{ОК}_i) = FALSE$ то ПОДПИСЬ_НЕВЕРНА

\\ $CHECK(\quad)$ – функция проверки ЭП исходным алгоритмом OTS

иначе

$a = HASH(\text{ОК}_i)$

$k = i$

для j от 1 до $n - 1$ выполнить

$\{k, rem\} = IntDiv(k, 2)$

если $rem = 0$ то

$a = HASH(\text{ОК}_i || alt_j)$

иначе

$a = HASH(alt_j || \text{ОК}_i)$

если $a \neq \text{ОК}_{\text{внеш}}$ то ПОДПИСЬ_НЕВЕРНА

иначе ПОДПИСЬ_ВЕРНА

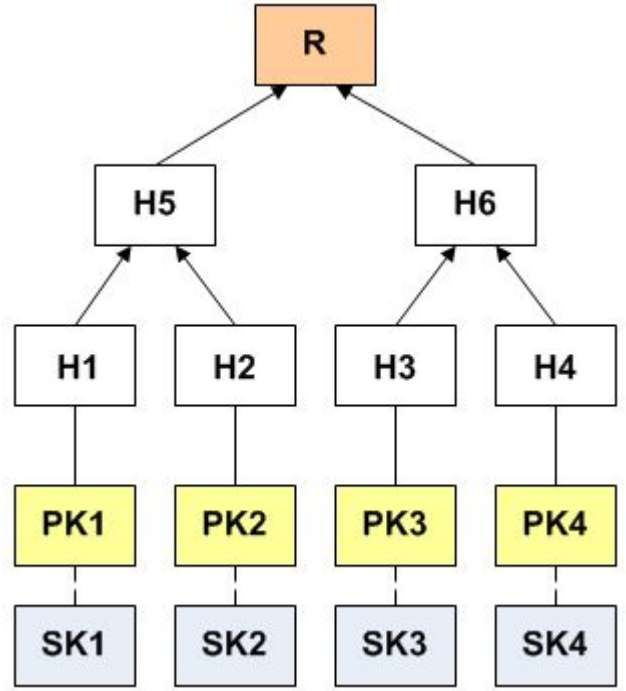
УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Дерево Меркла

Особенности

- На практике $n \leq 24$
- Одним ключом можно подписать m документов
  - m-ю подпись можно поставить на ключ нового дерева
- В памяти шифратора хранятся следующие данные
  - Синхропосылка генератора закрытых ключей (т.е. общий ЗК)
  - Порядковый номер текущего подключа
  - Дерево хешей, либо его верхняя часть



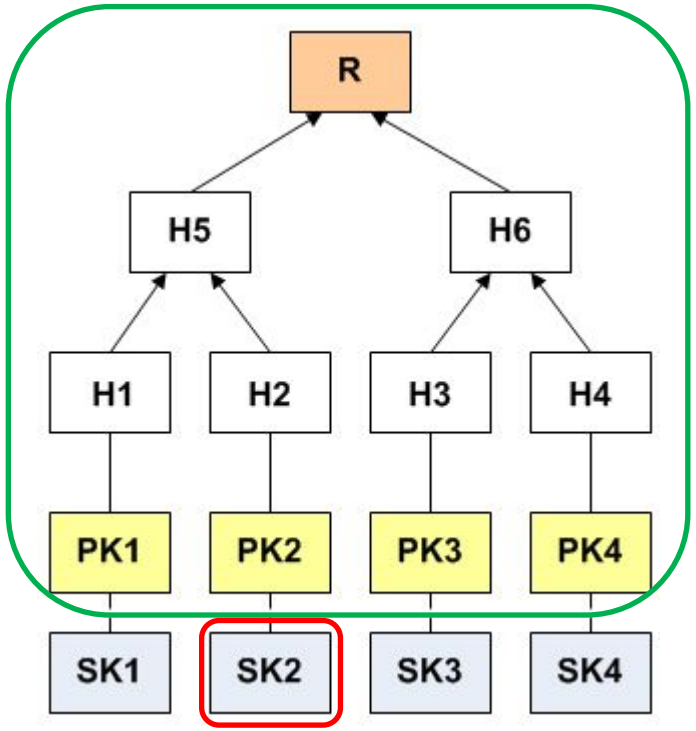
УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

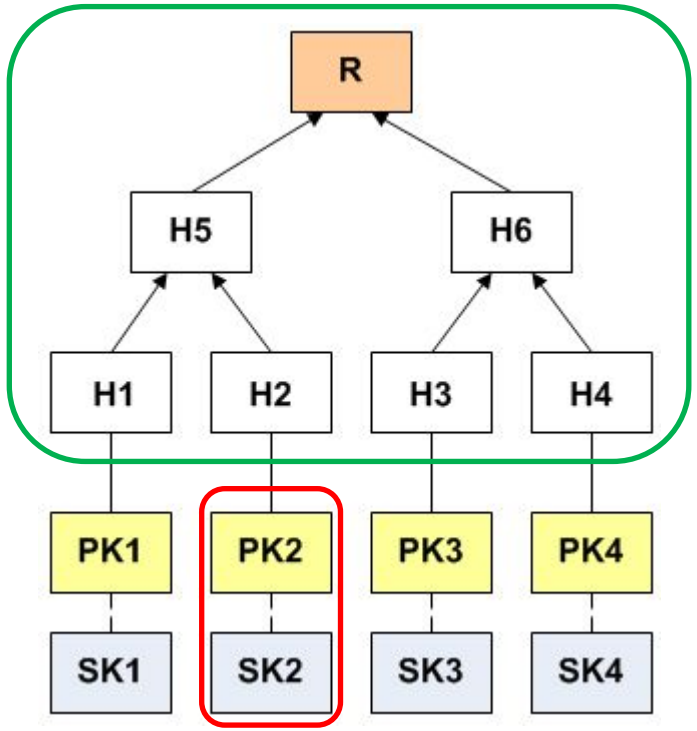
Дерево Меркла

Особенности

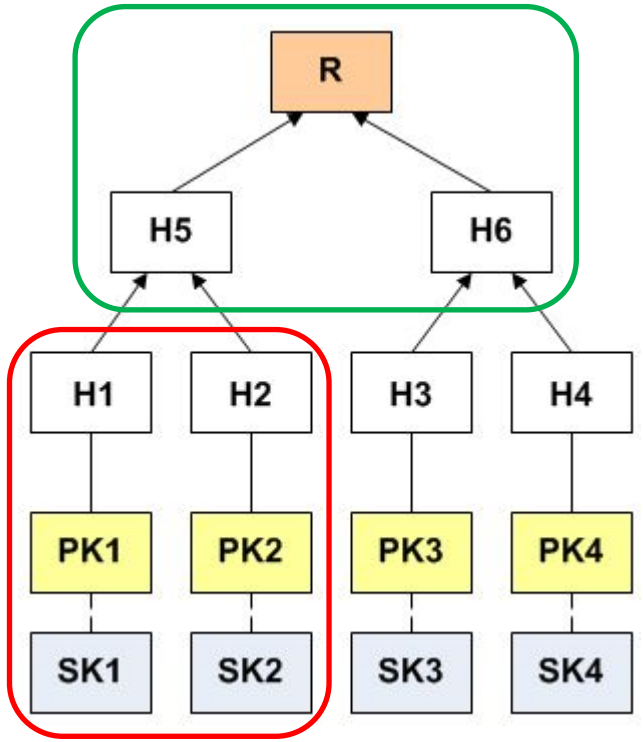
Много памяти, мало вычислений



Немного памяти, немного вычислений



Мало памяти, много вычислений



Информация, вычисляемая в процессе постановки ЭП

Информация, хранимая в памяти шифратора

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Содержание лекции

- Подписи на основе многократного хеширования
- **Распределенные реестры**
- Прочее

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Распределенный реестр

Структура данных, характеризующаяся особенностями:

- Хранимые данные представляют собой **множество записей**, каждая из которых содержит **электронную подпись** ее автора
- Записи могут быть объединены в **блоки**
- Каждая запись (блок) содержит **криптографическую хеш-функцию** одной или нескольких предыдущих записей (блоков)
- Копии структуры хранятся на **множестве узлов сети**

Следствия:

- Добавляя запись в реестр, автор косвенным образом подписывает множество уже содержащихся в нем записей
- Хранение данных в распределенном реестре обеспечивает:
  - криптографическую защиту от подмены данных, в том числе самим автором
  - фиксацию времени их опубликования
- Распределенное хранение защищает от попытки подменить весь реестр целиком
  - Злоумышленник должен контролировать >50% узлов сети

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Распределенный реестр

Поколения распределенных реестров

1-е поколение (DLT 1.0)

- Bitcoin, 2008-2009
- «Классические» криптовалюты
- Реестр используется для хранения данных, а практическое применение этих данных осуществляется другими приложениями

2-е поколение (DLT 2.0)

- Etherium, 2013
- **Смарт-контракт** – алгоритм, задающий взаимодействие пользователей реестра в зависимости от того, какая информация записывается в реестр
- Реестр становится распределенным приложением для выполнения программ

3-е поколение (DLT 3.0)

???

УГАТУ

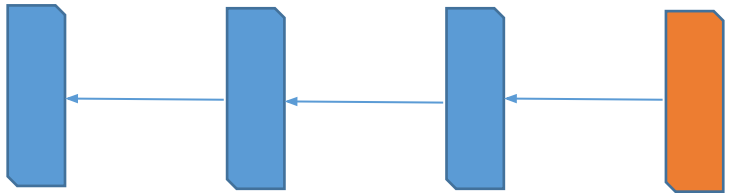
Уфимский государственный авиационный технический университет

Виды распределенных реестров

Цепной реестр

Blockchain

- Все блоки упорядочены хронологически
- Каждая следующая запись содержит хеш-функцию предыдущей
- Проблема: временной промежуток между добавлениями новых записей должен быть больше, чем время синхронизации копий на разных узлах
  - Записи объединяют в блоки
  - Применяются механизмы искусственного замедления генерации блоков
    - Proof of Authority – записывать блоки в реестр могут только определенные узлы
    - Proof of Work – вычислительная сложность добавления записей искусственно завышается, чтобы делать это могли только наиболее мощные узлы (майнеры)



УГАТУ

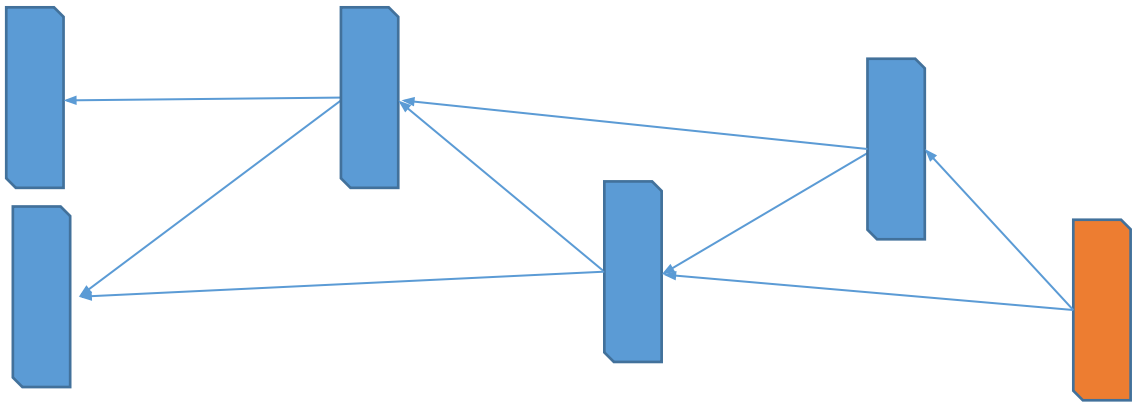
Уфимский государственный авиационный технический университет

Виды распределенных реестров

Графовый реестр

Directed acyclic graph, tangle

- Криптовалюта iota, 2015
- Каждая следующая запись ссылается на некоторые две предыдущие записи
- Объединять записи в блоки и замедлять частоту их добавления не требуется
- Малоинтересно как криптовалюта: в таких реестрах майнеры не нужны



УГАТУ
Уфимский государственный авиационный технический университет

Содержание лекции

- Подписи на основе многократного хеширования
- Распределенные реестры
- **Прочее**
  - **Низкоресурсная криптография**
  - **Квантовые технологии**
  - **Гомоморфные шифры**
  - **Доказательство с нулевым разглашением**
  - **Протоколы тайного голосования**

УГАТУ

Уфимский государственный авиационный технический университет

Содержание лекции

- Распределенные реестры
- Подписи на основе многократного хеширования
- **Прочее**
  - **Квантовые технологии**
  - **Гомоморфные шифры**
  - **Доказательство с нулевым разглашением**
  - **Протоколы тайного голосования**