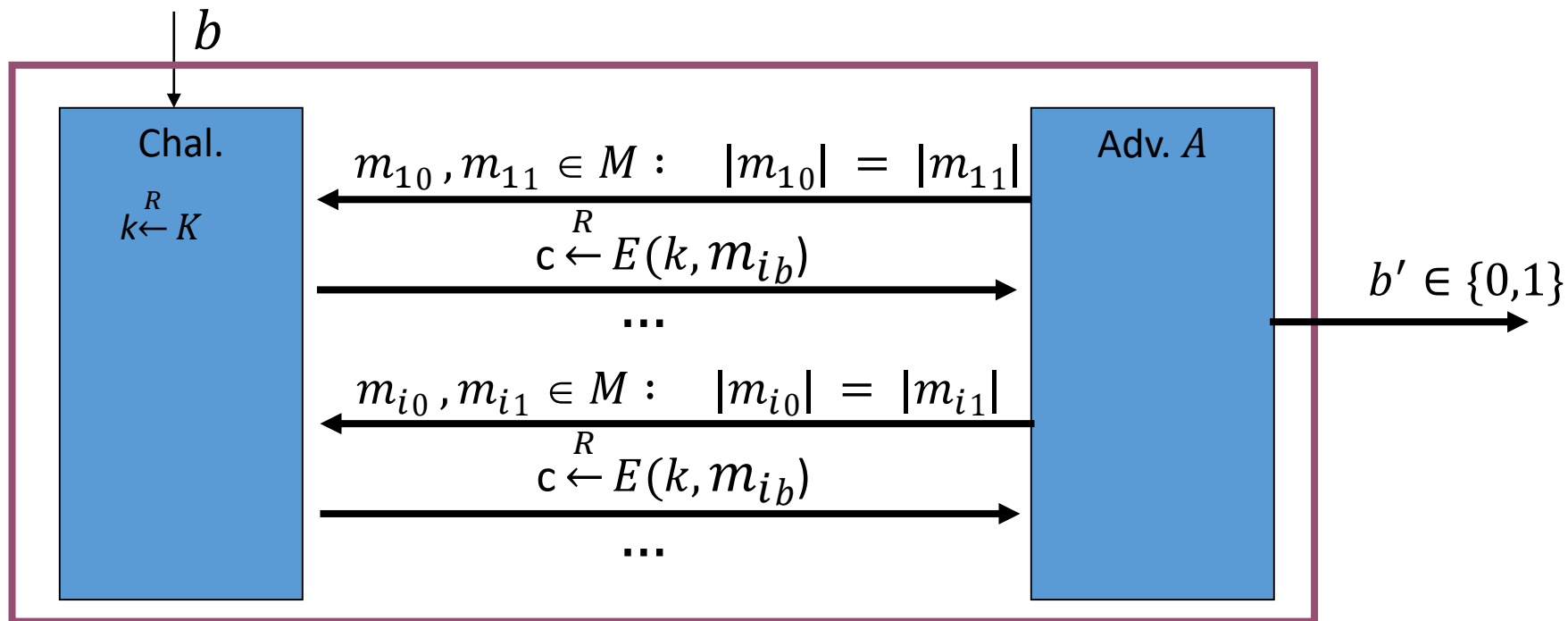


Прикладная Криптография: Симметричные криптосистемы nonce CPA, det-CPA

Макаров Артём
МИФИ 2020

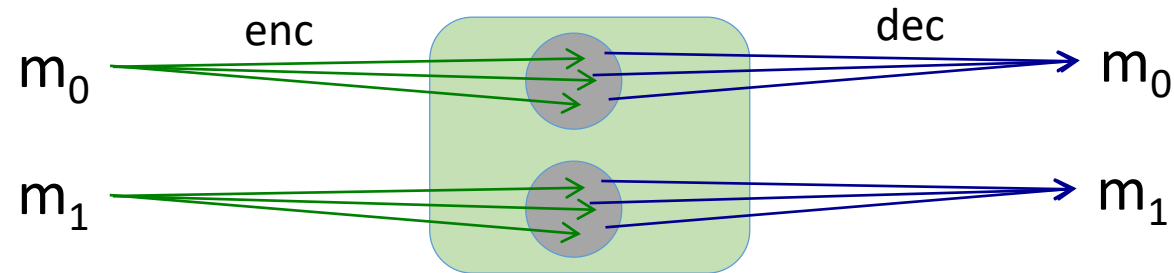
CPA

- Шифр называется CPA стойким, если для любого противника A величина $CPA_{adv}[A, E] = |\Pr[W_0] - \Pr[W_1]| \leq \epsilon$, ϵ – пренебрежимо малая величина.
- Детерминированный шифр не может быть CPA стойким



Вероятностное шифрование

- Как показано ранее, для СРА стойкости необходима «рандомизация» шифртекстов
- Подход 1 – рандомизация функции зашифрования



- Зашифрование одного и того же сообщения даст разные шифртексты
- Необходим внешний источник энтропии
- Шифртексты всегда длиннее открытых текстов, так как необходимо также передать энтропию, необходимую для восстановления открытого текста

Вероятностное шифрование

- Подход 2 – использование уникальных, неповторяющихся величин (nonce)
- $m \rightarrow E(k, *, n) \rightarrow c \rightarrow D(k, *, m) \rightarrow m$
- Nonce должна быть уникально для каждого сообщения, пара (nonce, key) не должна повторяться при жизни ключа.
- В качестве nonce можно использовать счётчик или случайные величины
- Nonce может не пересылаться в явном виде, обе стороны могут синхронно обновлять его.
- Не любое использование nonce даёт стойкие схемы!

CBC vs CTR

$$CPA_{adv}[A, E_{ctr}] \leq \frac{4Q^2l}{N} + 2 * PRF_{adv}[B, F]$$
$$CPA_{adv}[A, E_{cbc}] \leq \frac{2Q^2l^2}{N} + 2 * BC_{adv}[B, E]$$

- CTR режим имеет большую стойкость для фиксированных параметров и блочного шифра
- CTR может использоваться в параллельном режиме, так как зашифрование блоков производит независимо
- Для коротких сообщений CTR может иметь длины шифртекстов значительно короче, чем CBC, так как нет необходимости в дополнении до длины блока.
- CTR использует только функцию зашифрования блочного шифра.
- **IV должны быть случайными!**

Nonce based encryption

- Для всех рассмотренных ранее схем СРА шифрования длина результирующего шифртекста была больше длины открытых тестов из-за добавления вектора инициализации.
- Длина вектора инициализации не зависит от длины сообщения
- Для больших сообщений не является проблемой (добавление 16 байт к мегабайту несущественно)
- Может являться проблемой для небольших шифртекстов, сравнимых с длиной блока (добавление 16 байт к сообщению длинны меньше 16 байт)
- Возможно ли уйти от случайных векторов инициализации?

Nonce based encryption

- Первый подход – хранить некоторое состояние на стороне получателя и отправителя, которое явно или не явно синхронизируется перед процедурой шифрования. Затем обновлять эти значения после приёма-отправления сообщений.
 - Необходима полная синхронизация, при рассинхронизации – необходимо заново проводить процедуру синхронизации
- Второй подход – использование nonce. Вместо использования внутренних состояний использовать уникальные неповторяющиеся величины (nonce).

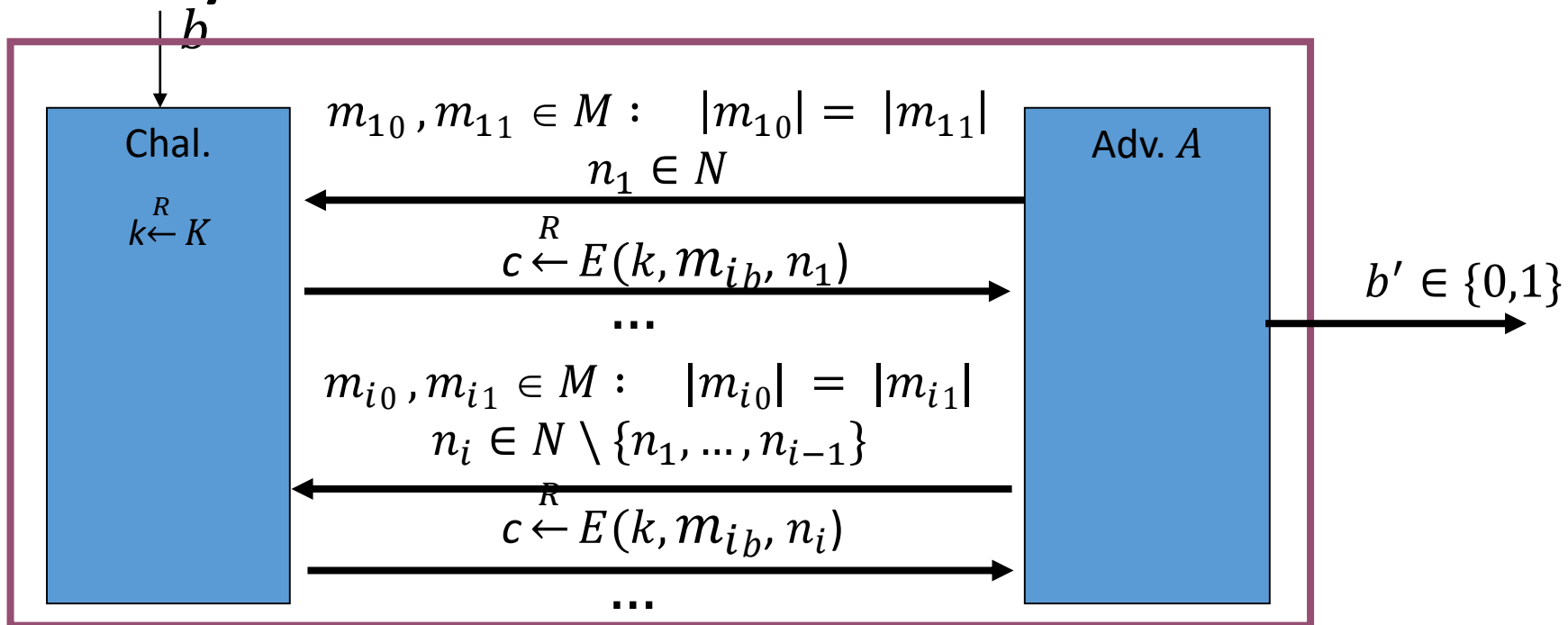
Nonce based encryption

Для $k \in K, t \in M, c \in C, n \in N$ шифром на основе nonce называется пара алгоритмов $E = (E, D)$ на (K, M, C, N) :

- Зашифрование $c = E(k, t, n)$
- Расшифрование $t = D(k, c, n)$
- Корректность $D(k, (E(k, t, n), n) = t$

Nonce based CPA

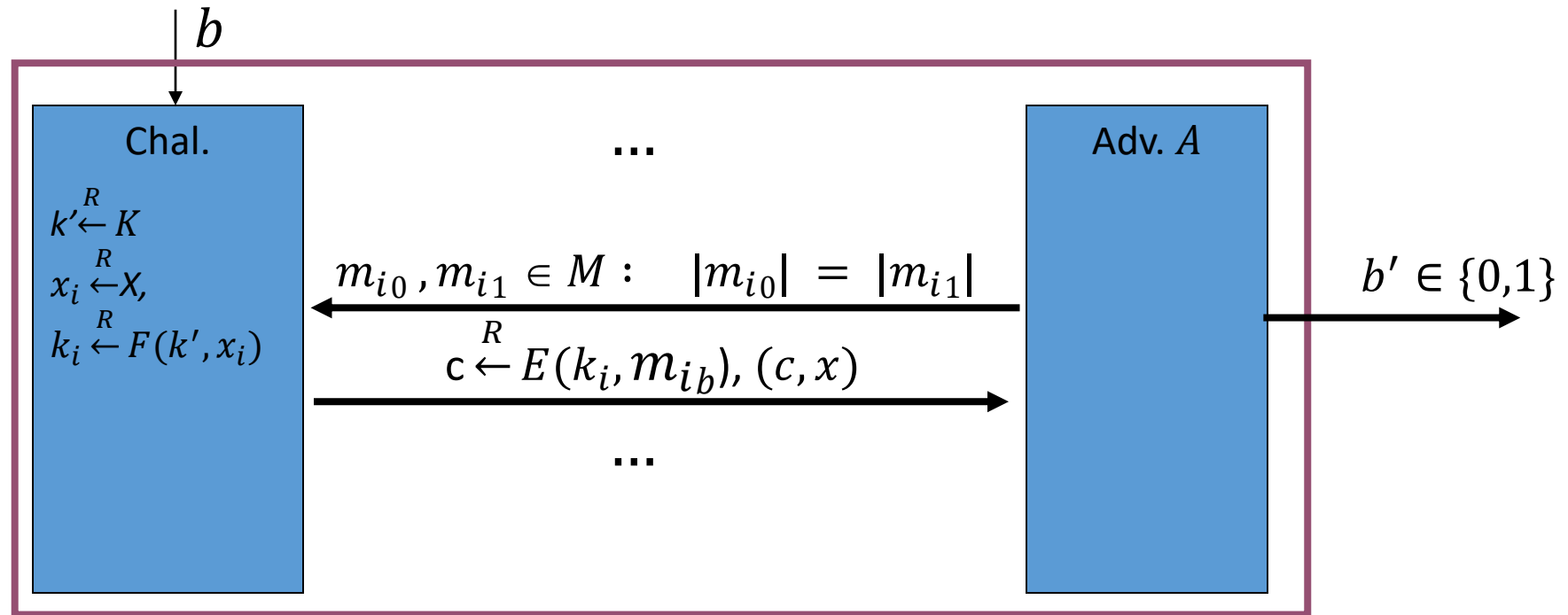
- Шифр на основе nonce называется nCPA стойким, если для любого противника A величина $nCPA_{adv}[A, E] = |\Pr[W_0] - \Pr[W_1]| \leq \epsilon$, ϵ – пренебрежимо малая величина.
- Заметим, что противник полностью выбирает nonce. Единственное требование – **уникальность**.



Построение CPA шифров из семантически стойких шифров

- Пусть $E = (E, D)$ – семантически стойкий шифр на (K, M, C) . Попробуем построить CPA стойкий шифр E' на $(K', M, X \times C)$ используя PRF F на (K', X, K) .
- Ключом k' для E' будет ключ для PRF F . Для шифрования сообщения m выбирается случайный вход для PRF - x . Далее вычисляется ключ для E $k \leftarrow F(k', x)$. Затем m шифруется с использованием ключа k : $c \leftarrow E(k, m)$. Шифртекстом является пара $c' = (c, x)$.
- $E(k', m) = [x \xleftarrow{R} X, k \leftarrow F(k', x), c \leftarrow E(k, m), \text{output } (x, c)]$
- $D(k', c') = [k \leftarrow F(k', x), m \leftarrow D(k, c), \text{output } m]$
- Называется – **гибридная конструкция**.

Игра на СРА стойкость гибридной конструкции



Построение CPA шифров из семантически стойких шифров

Теорема 7.1. Если F – стойкая PRF, E – семантически стойкий шифр, $N = |X|$ - сверхполиномиальная, то введённый ранее шифр E' - CPA стойкий шифр. В частности для любого противника в CPA игре, делающим не более Q запросов к претенденту существует противник B_F в игре на стойкость PRF и противник B_E в игре на семантическую стойкость, причём

$$CPA_{adv}[A, E'] \leq \frac{Q^2}{N} + 2 * PRF_{adv}[B_F, F] + Q * SS_{adv}[B_E, E]$$

Гибридная конструкция на основе nonce

Модифицируем гибридную конструкцию, заменив случайный элемент $x \in X$ на nonce.

Пусть $E = (E, D)$ – семантически стойкий шифр на (K, M, C) .

Для ключа $k' \in K, m \in M, c \in C, x \in X$ определим $E'(k', m, x) = E(k, m), k = F(k', x)$

- $E(k', m) = [x \leftarrow X, k \leftarrow F(k', x), c \leftarrow E(k, m), \text{output } (x, c)]$
- $D(k', c') = [k \leftarrow F(k', x), m \leftarrow D(k, c), \text{output } m]$

Детерминированная гибридная конструкция

Теорема 8.1. Если F – стойкая PRF, E – семантически стойкий шифр, $N = |X|$ – сверхполиномиальная, то введённый ранее шифр E' – nCPA стойкий шифр. В частности для любого противника в nCPA игре, делающим не более Q запросов к претенденту существует противник B_F в игре на стойкость PRF и противник B_E в игре на семантическую стойкость, причём

$$nCPA_{adv}[A, E'] \leq 2 * PRF_{adv}[B_F, F] + Q * SS_{adv}[B_E, E]$$

▷ Аналогично **Теореме 7.1**, без необходимости добавления слагаемого Q^2/N , т.к. коллизии не возможно из за требования уникальности nonce◁

Рандомизированный CRT режим

Рассмотрим ещё один способ построения – на основе CTR режима.

Пусть F PRF на (K, X, Y) . Пусть $X = \{0, \dots, N - 1\}$, $Y = \{0, 1\}^n$. Для полиномиально ограниченной величины $l \geq 1$ определим шифр $E = (E, D)$ на $(K, Y^{\leq l}, X \times Y^{\leq l})$ следующим образом:

Для $k \in K, m \in Y^{\leq l}, v = |m| = |c|, c' = (x, c) \in X \times Y^{\leq l}$

$E(k, m) :=$

$x \xleftarrow{R} \mathcal{X}$

compute $c \in \mathcal{Y}^v$ as follows:

for $j \leftarrow 0$ to $v - 1$ do

$c[j] \leftarrow F(k, x + j \bmod N) \oplus m[j]$

output (x, c) ;

$D(k, c') :=$

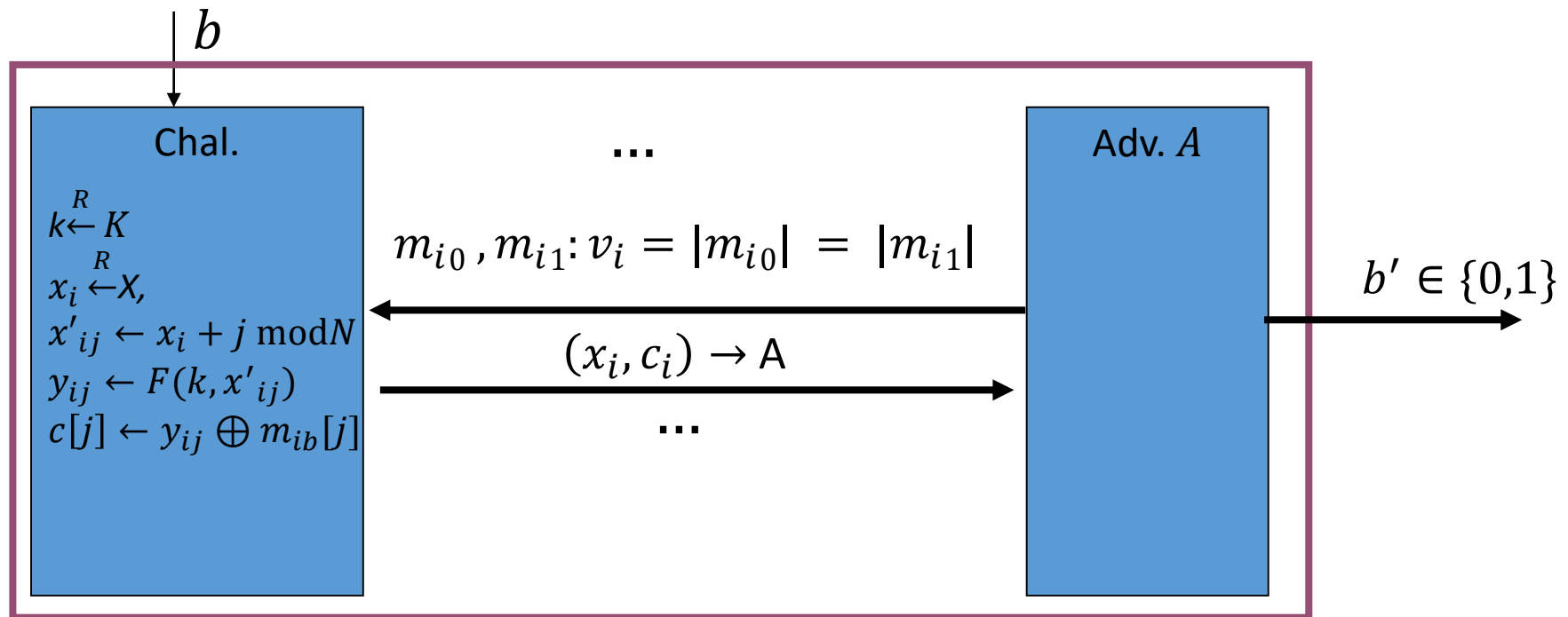
compute $m \in \mathcal{Y}^v$ as follows:

for $j \leftarrow 0$ to $v - 1$ do

$m[j] \leftarrow F(k, x + j \bmod N) \oplus c[j]$

output m .

Игра на СРА стойкость рандомизированного CTR режима



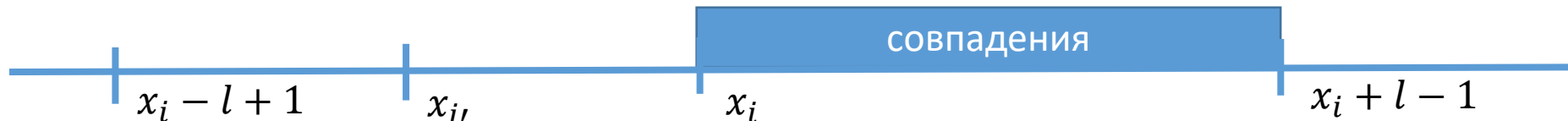
Рандомизированный CRT режим

Теорема 7.2. Если F – стойкая PRF, N - сверхполиномиальная, l – полиномиально ограниченная, то введённый ранее шифр E - CPA стойкий шифр. В частности для любого противника в CPA игре, делающим не более Q запросов к претенденту существует противник B в игре на стойкость PRF причём

$$CPA_{adv}[A, E'] \leq \frac{4Q^2l}{N} + 2 * PRF_{adv}[B, F]$$

Nonce based CTR

- Можно ли построить CTR режим, заменив случайный элемент на nonce?
- Нет! В отличие от гибридной конструкции, где нам была важна уникальность nonce, здесь нам важна не только уникальность «начальных состояний», но и уникальность «отрезков». (См **лемму** из **Теоремы 7.2**).
- Иными словами, если заменить $x_i \in X$ на nonce, то противник может выбрать такие $x_i \neq x_{i'}: \{x_i, \dots, x_i + l - 1\} \cap \{x_{i'}, \dots, x_{i'} + l - 1\} \neq \emptyset$, т.е. могут совпасть счётчики на каком то блоке для различных сообщений => имеем двухразовый блокнот.



Nonce based CTR

- Введём nonce по другому. Пусть $l|N$. Пусть $n \in \{0, \dots, N/l - 1\}$ – nonce, $x = nl$. Т.е. на вход PRF подаётся не nonce, а nonce умноженная на максимально допустимую длину сообщения в блоках.
- Т.е. два различных nonce n_1 и n_2 дают два входа для PRF $x_1 = n_1l, x_2 = n_2l$ в интервалах $\{x_1, \dots, x_1 + l - 1\}$ и $\{x_2, \dots, x_2 + l - 1\}$, которые не пересекаются.

Nonce based CTR

Теорема 8.2. Если F – стойкая PRF, N - сверхполиномиальная, l – полиномиально ограниченная, то введенный ранее шифр E - CPA стойкий шифр. В частности для любого противника в nCPA игре, делающим не более Q запросов к претенденту существует противник B в игре на стойкость PRF причём

$$\text{nCPA}_{adv}[A, E'] \leq 2 * \text{PRF}_{adv}[B, F]$$

▷ Аналогично **Теореме 7.2**, без необходимости добавления слагаемого $\frac{4Q^2l}{N}$, т.к. коллизии не возможно из за требования уникальности nonce◁

CBC

Пусть $E = (E, D)$ блочный шифр на (K, X) где $X = \{0,1\}^n$, $N = |X| = 2^n$.
Для полиномиально ограниченной величины $l \geq 1$ определим шифр $E = (E', D')$ на $(K, X^{\leq l}, X^{\leq l+1} \setminus X^0)$. Зашифрование и расшифрование определены следующим образом:

Для $k \in K, m \in M, v = |m| = |c| - 1$

$E'(k, m) :=$

compute $c \in \mathcal{X}^{v+1}$ as follows:

$c[0] \xleftarrow{\mathcal{R}} \mathcal{X}$

for $j \leftarrow 0$ to $v - 1$ do

$c[j + 1] \leftarrow E(k, c[j] \oplus m[j])$

output c ;

$D'(k, c) :=$

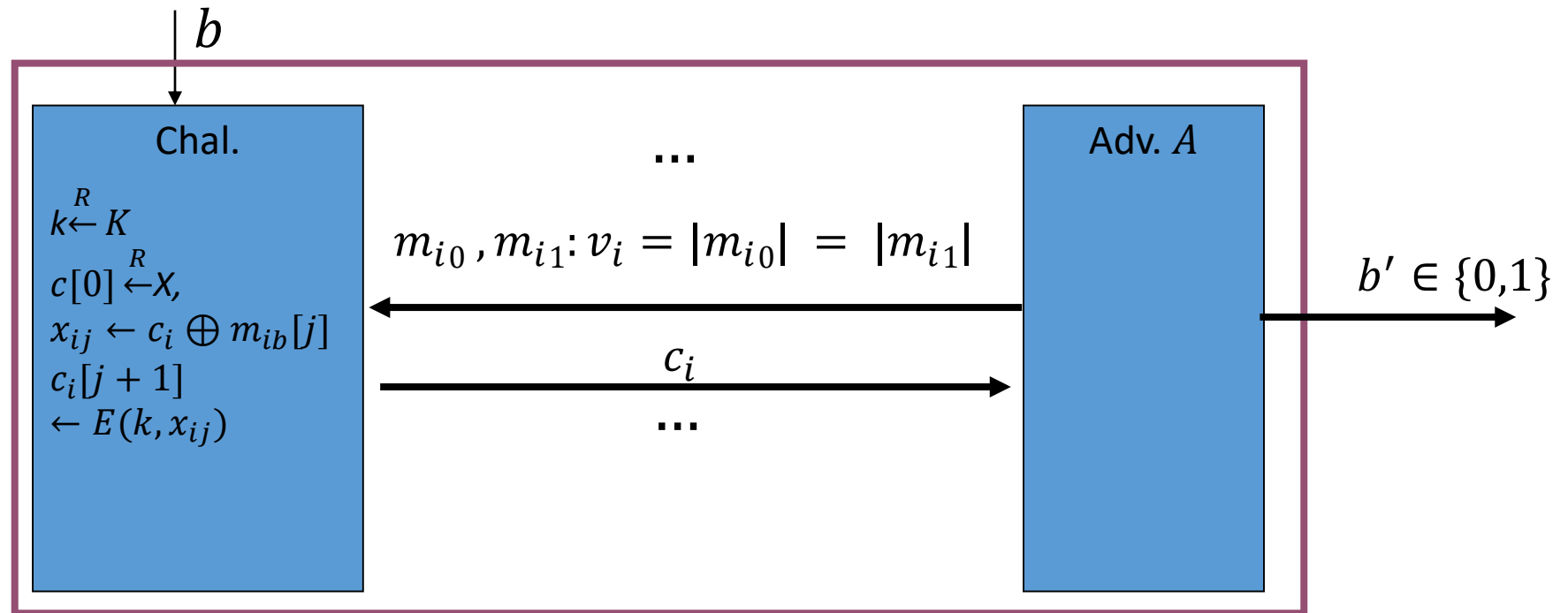
compute $m \in \mathcal{X}^v$ as follows:

for $j \leftarrow 0$ to $v - 1$ do

$m[j] \leftarrow D(k, c[j + 1]) \oplus c[j]$

output m .

Игра на СРА стойкость СВС



CBC

Теорема 7.3. Пусть $E = (E, D)$ – семантически стойкий шифр на (K, C) , $N = |X|$ – сверхполиномиальная, $l \geq 1$ – полиномиально ограниченная. Тогда введенный ранее CBC шифр является CPA стойким, причём для любого противника A в игре на CPA стойкость, делающим не более Q запросов к оракулу, существует противник B в игре на стойкость блочных шифров, при чём

$$CPA_{adv}[A, E'] \leq \frac{2Q^2 l^2}{N} + 2 * BC_{adv}[B, E]$$

Nonce based CBC

- Можно ли построить CBC режим, заменив случайный элемент на nonce?
- Нет! Противник может сделать 2 запроса (m_{10}, m_{11}, n_1) , (m_{20}, m_{21}, n_2) : $m_{10} = n_1 \neq n_2 = m_{20}, m_{11} = m_{21}$. В эксперименте 0 шифртексты будут одинаковые, в эксперименте 1 – разными.

Nonce based CBC

- Идея – заменить случайный IV на псевдослучайный, полученный из nonce с помощью PRF.
- Пусть F – PRF на (K', N', X) , где X – множество блоков блочного шифра $E = (E, D)$, отпрядённого на (K, X) .
- Ключом является элемент из множества $K \times K'$, алгоритм зашифрования и расшифрования отличаются от CBC только в получении $n[0] = F(k', n)$.

CBC

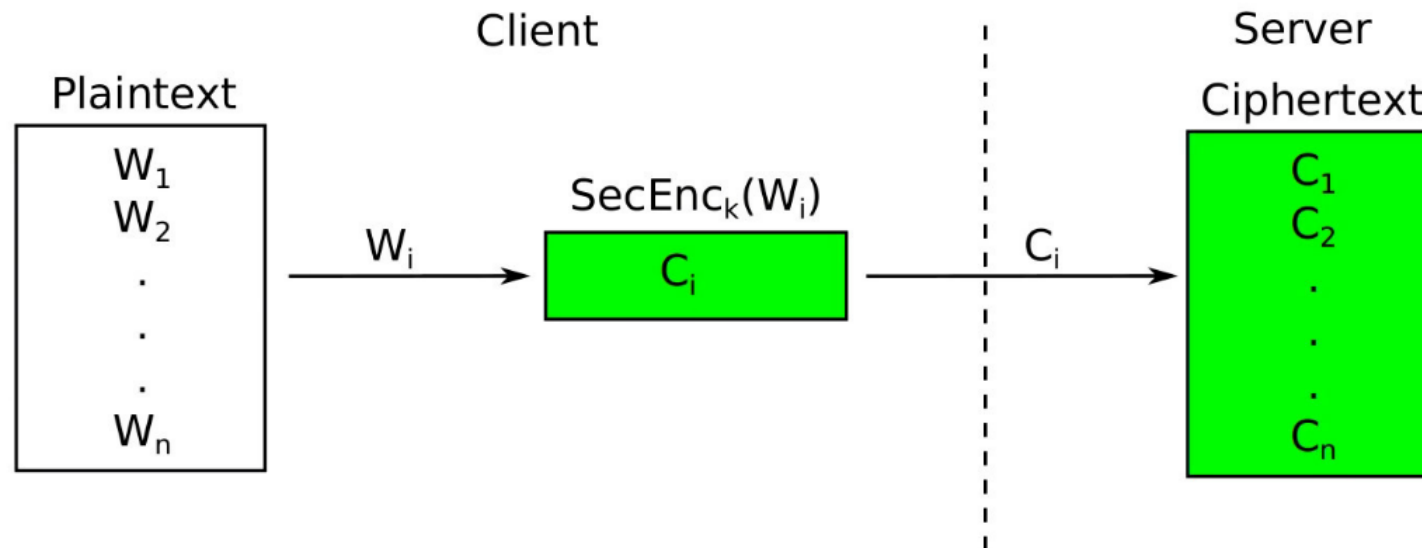
Теорема 8.3. Пусть $E = (E, D)$ – семантически стойкий шифр на (K, C) , $N = |X|$ - сверхполиномиальная, $l \geq 1$ – полиномиально ограниченная. Тогда введенный ранее CBC шифр является CPA стойким, причём для любого противника A в игре на n CPA стойкость, делающим не более Q запросов к оракулу, существует противник B в игре на стойкость блочных шифров, и B_F в игре на стойкость PRF, при чём

$$nCPA_{adv}[A, E'] \leq \frac{2Q^2 l^2}{N} + 2 * BC_{adv}[B, E] + 2 * PRF[B_F, E]$$

▷ Аналогично **Теореме 7.3**, но с учётом использования не только блочного шифра, но и PRF◁

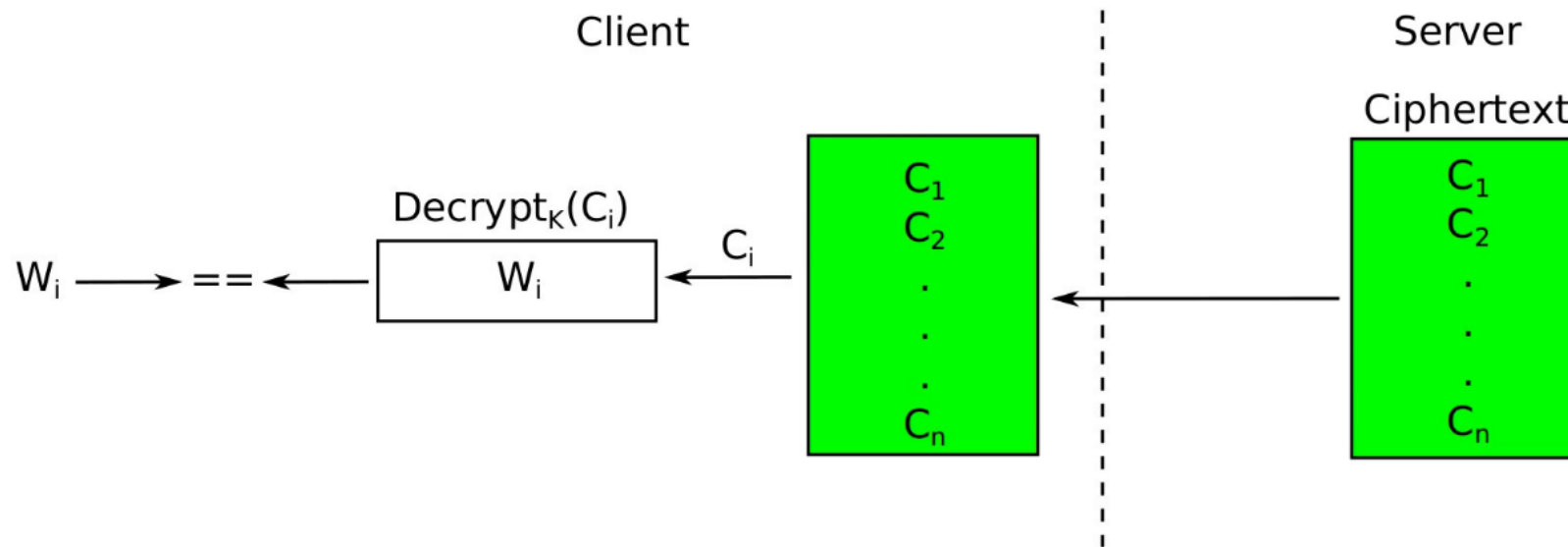
Поиск в базе данных

- Рассмотрим пример – хранение зашифрованных файлов на удалённом сервере.
- При использовании CPA стойкого шифра имеем:



Поиск в базе данных

- Проблема – необходимость выкачивания всей информации для осуществления поиска (выборки)



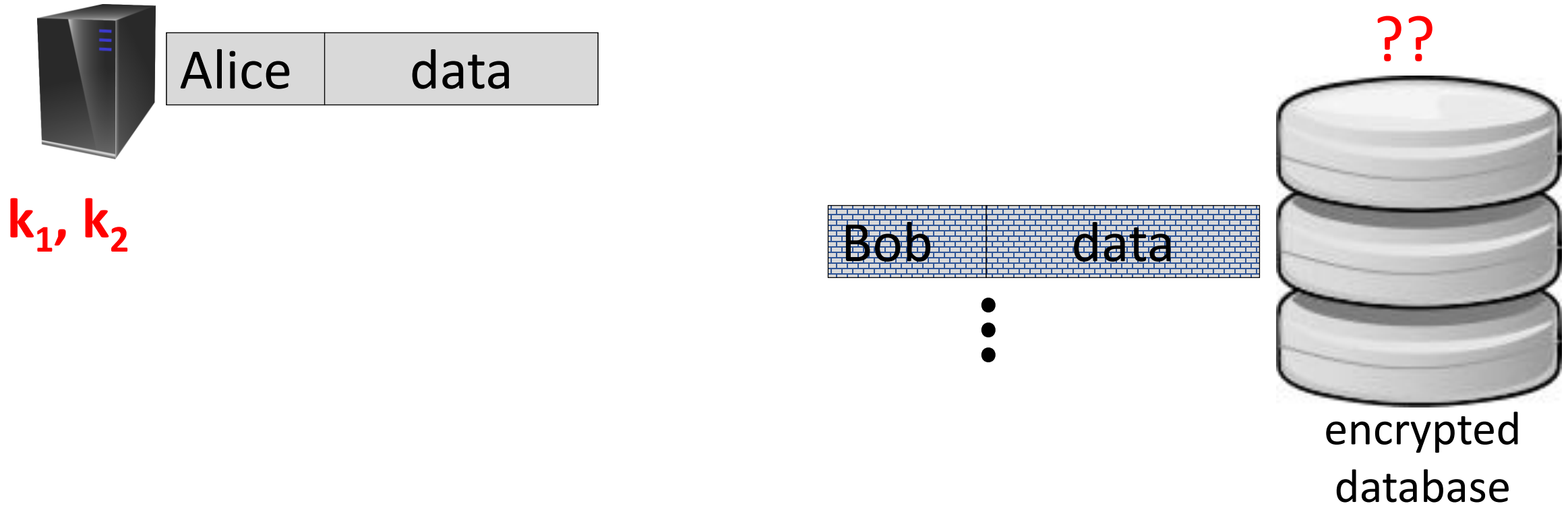
Детерминированное шифрование

Рандомизированное шифрование не позволяет искать на стороне сервера. Хотелось бы реализовать такой сценарий:

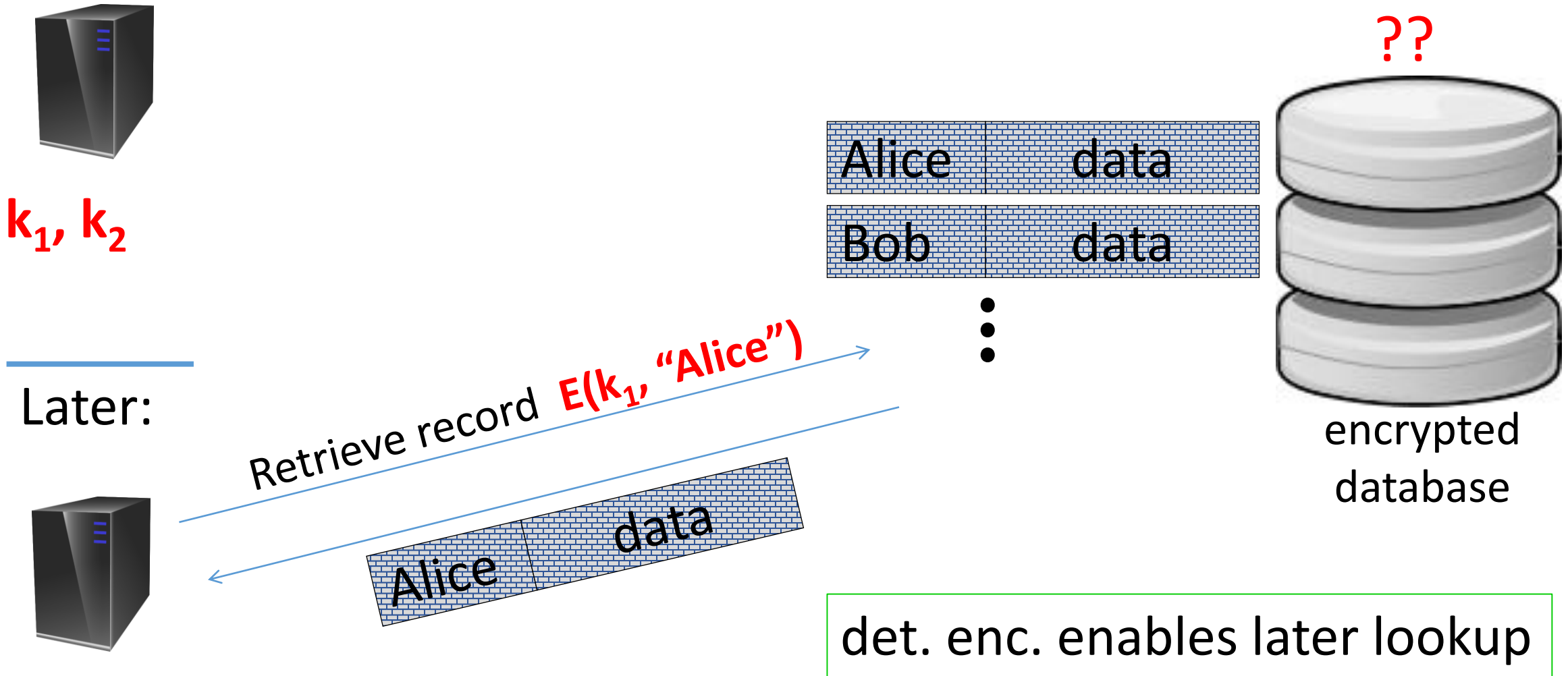
- Пользователь отправляет зашифрованный файл на сервер, приписывая заголовок. Сервер записывает шифртекст без расшифровки
- Для получения файла из базы данных пользователь отправляет зашифрованный (тем же ключом) заголовок и получает шифртекст, который потом расшифровывает.

Данная схема возможна только при детерминированном шифровании

The need for det. Encryption (no nonce)



The need for det. Encryption (no nonce)

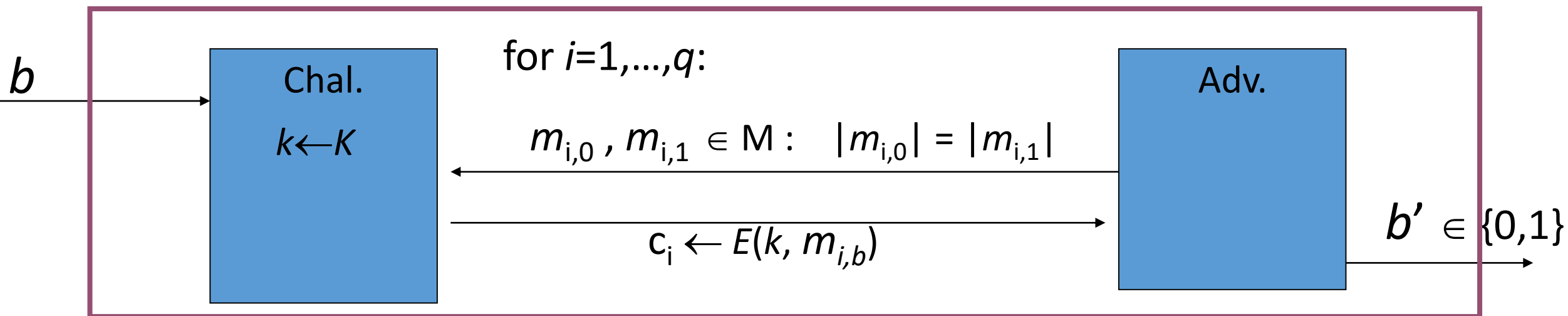


Детерминированное шифрование

- Проблема – при детерминированном шифровании противник может проверять заголовки на равенство, т.к. одинаковые заголовки дают одинаковые зашифрования заголовков.
- Аналогично для шифртекстов. Если множество шифртекстов мало (например шифруются только слова, длины не более 6 символов), и распределение неравномерное, противник может провести частотный анализ и полностью расшифровать все шифртексты.
- Нужно новое определение. Основная идея – сообщения должны быть уникальными для фиксированного ключа.
 - Уникальные идентификаторы, которые не повторяются (номер в очереди, номер передаваемого пакета, уникальный для сессии id пользователя итд)
 - Сообщения выбранные случайно из большого множества (например ключи)

Deterministic CPA security

Пусть $E = (E, D)$ шифр на (K, M, C) . Введём игру на CPA стойкость, в которой противник запрашивает только уникальные сообщения, т.е. $m_{1,0}, \dots, m_{q,0}$ и $m_{1,1}, \dots, m_{q,1}$ различны.

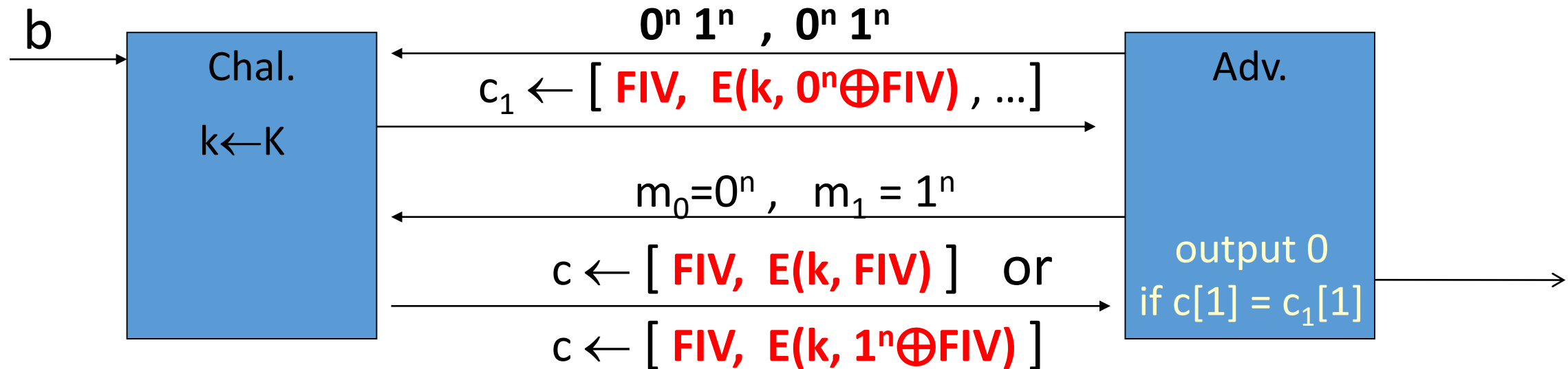


$E = (E, D)$, определённый на (K, M, C) , называется детерминированно CPA стойким, если $\forall A$: A – эффективный алгоритм в игре на стойкость Deterministic CPA величина $dCPA_{adv}[A, E] = |\Pr[W_0] - \Pr[W_1]| \leq \epsilon$, где ϵ – пренебрежимо малая величина.

Фиксированный IV в CBC

Фиксированный IV в CBC не даёт det-CRA стойкость!

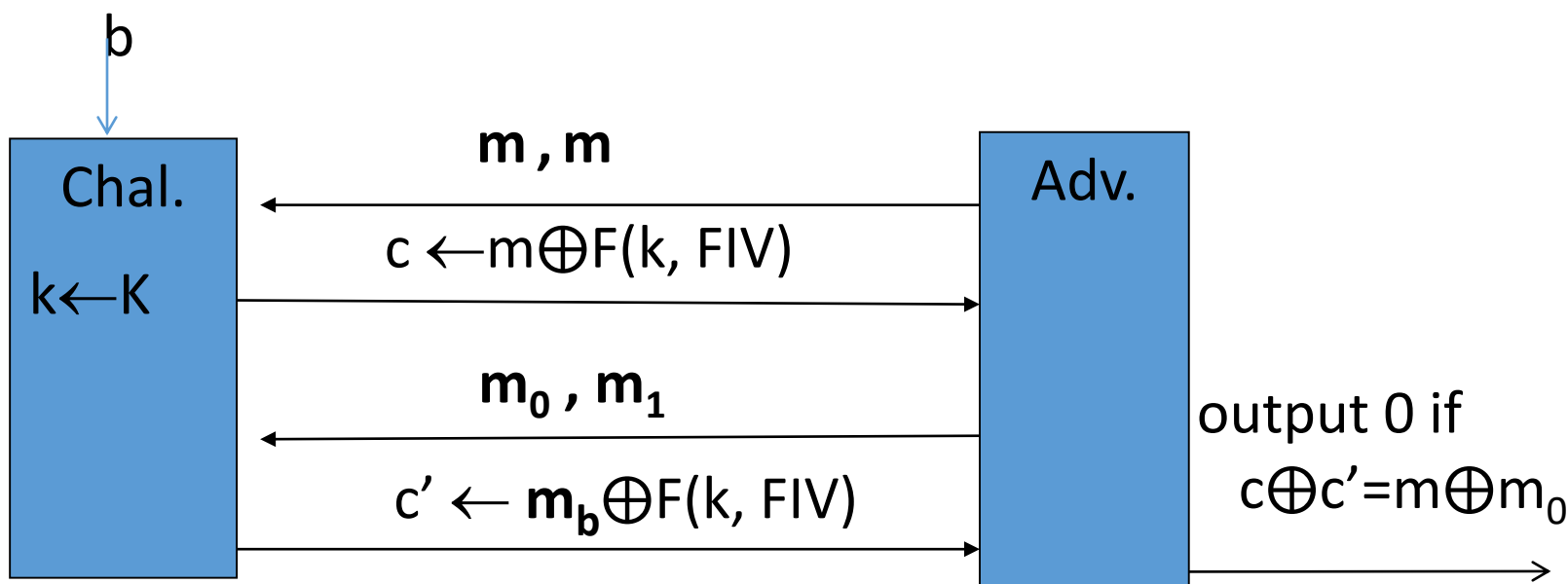
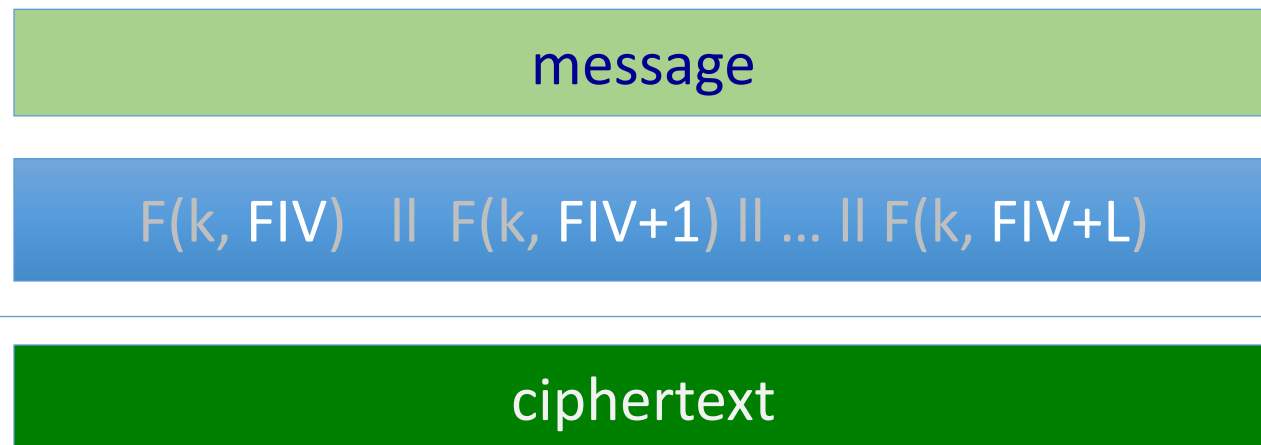
Пусть $E: K \times \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}^n$ стойкая PRP в CBC



Фиксированный IV в CTR

Фиксированный IV в CTR не даёт det-CRA стойкость!

Пусть $F: K \times \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}^n$
стойкая PRF в CTR



Синтетический IV

Пусть $E = (E, D)$ – CPA стойкий шифр на (K, M, C) , $E = (k, m; r)$ – функция зашифрования, использующая случайный вход $r \in_R R$. Пусть F – стойкая PRF на (K', M, R) . Тогда детерминированный шифр $E' = (E', D')$ на $(K \times K', M, C)$:

$$\begin{aligned} E'((k, k'), m) &= E(k, m; F(k', m)), \\ D'((k, k'), c) &= D(k, c) \end{aligned}$$

Называется детерминированным шифром, использующем синтетический IV.

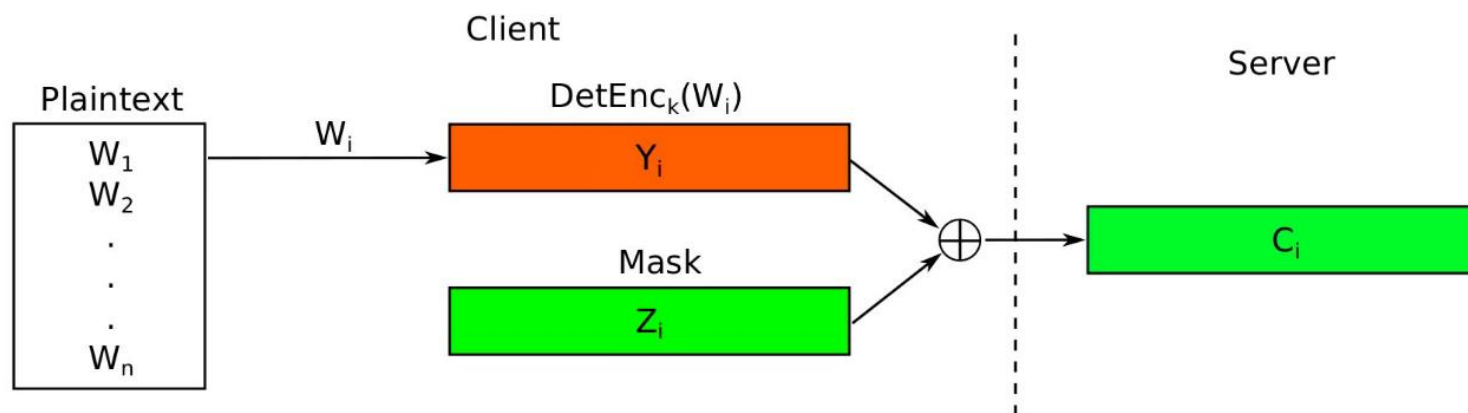
NB: конструкция похожа на использование nonce в CTR и CBC, но случайность заменяется не шифрованием уникального nonce, а шифрованием уникального сообщения (сообщения уникальны для det-CPA).

Теорема 8.4. Описанный выше шифр является det-CPA стойким.

▷ без доказательства, или доказать самим ◁

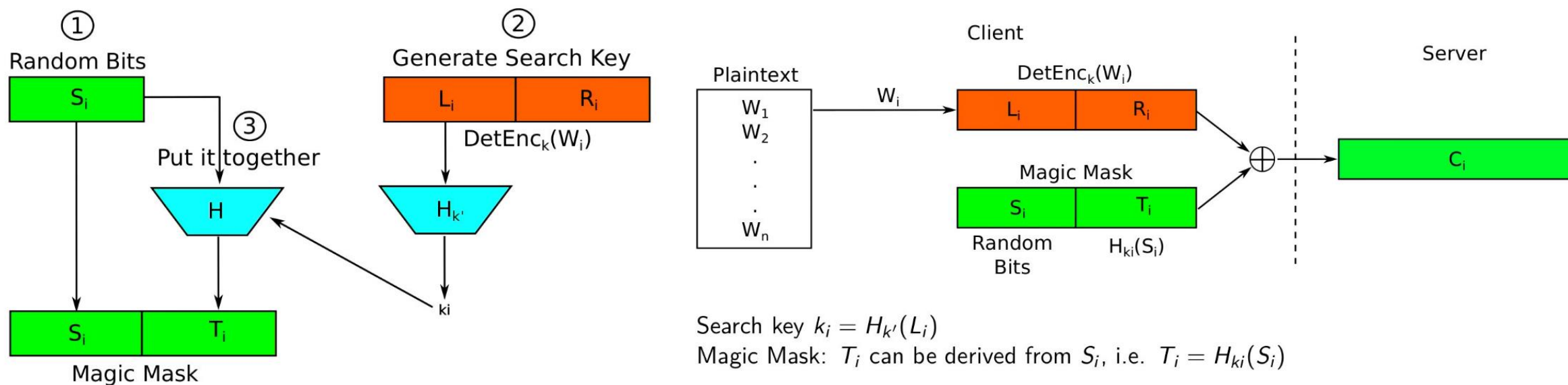
Поиск с использованием маски

- Основная идея – после детерминированного шифрования накладывать на шифртекст некоторую маску, которая может быть использована для поиска



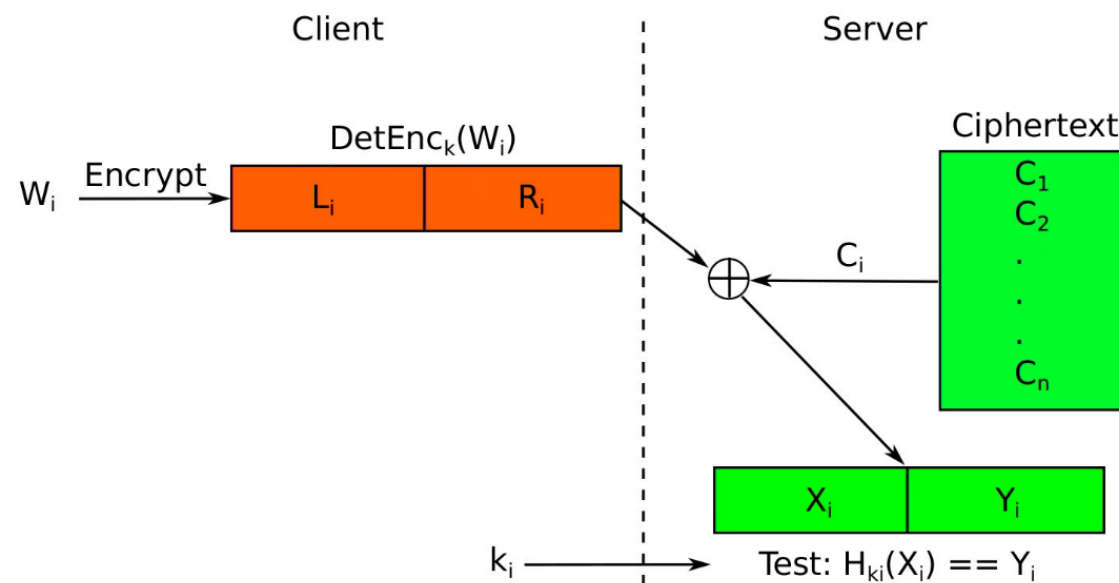
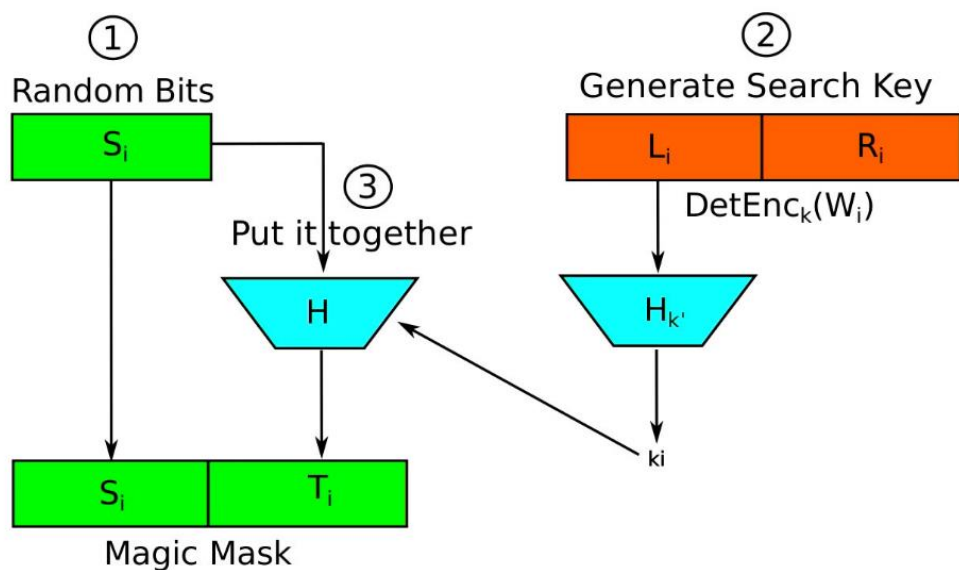
Поиск с использованием маски

- Пример – Song, Wagner, Perrig «Practical Techniques for Searches on Encrypted Data». $H: K \times I \rightarrow O$ – PRF.



Поиск с использованием маски

- Пример – Song, Wagner, Perrig «Practical Techniques for Searches on Encrypted Data». $H: K \times I \rightarrow O$ – PRF.



Выводы

- Шифры решают задачу конфиденциальности информации при пассивном противнике (противнике не влияющем на передаваемые сообщения)
- Абсолютная стойкость – достижимая, но не удобная для построения шифров модель
- Ослабленная версия абсолютной стойкости – семантическая стойкость (одноразовая семантическая стойкость) – используется для построения и анализа шифров при однократном использовании ключа
- При шифровании нескольких сообщений используется СРА стойкость (многократная семантическая стойкость), позволяющая противнику получать зашифрования нескольких сообщений на одном ключе

Выводы

- Основные примитивы – псевдослучайные генераторы, поточные шифры, блочные шифры.
- Для построения семантических и СРА стойких шифров из блочных шифров используют режимы шифрования.
- При использовании режимов шифрования, требующих случайный IV, он должен быть случайным!
- Шифры не должны использоваться для обеспечения целостности или аутентичности!
- Для ряда приложений могут использоваться и другие модели стойкости шифров.