

# Алгоритмы Bear, Lion

Радюш Дарья, Б01-906

20 декабря 2022 г.

## 1 Введение

Известно множество алгоритмов симметричного шифрования, полученных путем деления на раунды и использования в каждом раунде одного и того же алгоритма шифрования с различными преобразованиями или же путём многократного повторения конкретного алгоритма. Первый из этих вариантов не нашёл широкого применения из-за низкой скорости ( $xDES^3$ ), примерами второго можно назвать Double DES, Triple DES. Использовать в алгоритмах блочного симметричного шифрования другие типы криптографических преобразований предложили в 1988 г. Одним из воплощений этой идеи и являются алгоритмы Bear и Lion.

Блочные шифры Bear и Lion были предложены профессором Россом Андерсоном и криптоаналитиком Эли Бихамом в 1995г. Они созданы путём объединения алгоритма генерации псевдослучайных чисел с криптографической хэш-функцией. Bear дважды использует хэш-функцию с независимыми ключами и один раз – поточный шифр с генератором псевдослучайных ключей. Lion использует поточный шифр дважды и хэш-функцию один раз. Доказано, что два этих алгоритма являются безопасными в том смысле, что атаки, которые восстанавливают ключи, по итогу сломают один или оба базовых компонента. Bear и Lion также можно считать намного быстрее существующих блочных шифров. В данной работе рассматривается структура и криптоанализ этих алгоритмов.

## 2 Bear

Как уже говорилось, алгоритм Bear использует два хэша и один поточный шифр. Рассмотрим подробнее.

Пусть блоки входных данных больших размеров (примерно 1Кбайт-1Мбайт) и  $m$  (бит) - размер блока.  $H_K(M)$  - хэш-функция с ключом  $K$  для сообщения  $M$  произвольной длины, результат которой фиксированный размер  $k$  бит. В качестве хэш-функции авторы алгоритмов предлагают использовать SHA-1 или MD5 ( $k = 160$  для SHA-1 и  $k = 128$  для MD5). Эти алгоритмы хэширования являются бесключевыми, однако предлагается вставлять ключ до и после хэшируемых данных ( $\cdot$  - операция конкатенации):

$$H_{k1}(M) = MD5(k1 \cdot M \cdot k1)$$

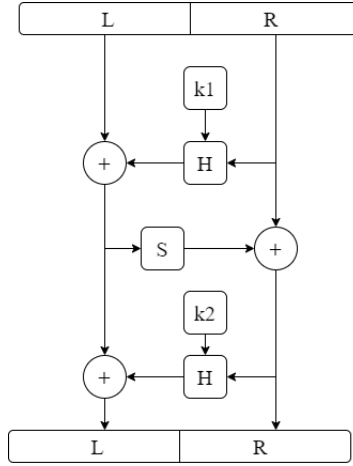


Рис. 1: Алгоритм Bear.

Далее пусть  $S(M)$  - поточный шифр или, более формально, псевдослучайная функция, которая при вводе  $M$  генерирует выходные данные произвольной длины.

Открытый текст  $P$  разделён на левую  $L$  и правую  $R$  части, размеры которых равны  $|L| = k$ ,  $|R| = m - k$ . Ключ состоит из двух подключей  $K = (k1, k2)$  одинакового размера  $b$ ,  $b > k$ .

Шифрование выполняется следующим образом:

$$L = L \oplus H_{k1}(R)$$

$$R = R \oplus S(L)$$

$$L = L \oplus H_{k2}(R)$$

Расшифрование:

$$L = L \oplus H_{k2}(R)$$

$$R = R \oplus S(L)$$

$$L = L \oplus H_{k1}(R)$$

Свойства хэш-функции  $H_k(X) = H'(k \cdot M \cdot k)$ :

- 1) Является необратимой, так как при заданном  $Y$  трудно найти  $X$  такой, что  $H'(X) = Y$ ;
- 2) Уникальна для каждого значения, так как трудно найти неравные  $X$  и  $Y$  такие, что  $H'(X) = H'(Y)$ ;
- 3) Является псевдослучайной, поскольку даже при заданном  $H'(X_i)$  для любого набора входных данных трудно предсказать какой-либо бит  $H'(Y)$  для нового входного  $Y$ .

Свойства поточного шифра  $S(M)$ :

- 1) Сопrotивляется атакам восстановления ключа, поскольку трудно найти начальное  $X$ , учитывая  $Y = S(X)$
- 2) Сопrotивляется атакам расширения, так как трудно расширить какой-либо частичный поток  $Y$ .

### 3 Безопасность алгоритма Bear

Стоит рассмотреть теоремы, которые покажут, почему атаки восстановления ключа по итогу ломают как поточный шифр, так и хэш-функцию.

**Теорема 1.** Оракул, который находит ключ алгоритма Bear по одной паре открытый текст/зашифрованный текст, может эффективно и с высокой вероятностью найти начальное значение  $M$  поточного шифра  $S$  для любого конкретного вывода  $Y = S(M)$ .

Доказательство.

Учитывая  $Y = S(M)$ , мы хотим найти  $M$ . Мы генерируем открытый текст  $P = (L, R)$  и зашифрованный текст  $C = (L', R')$  такой, что  $R \oplus R' = Y$ , и такой, что  $L$  и  $L'$  являются случайными. Поскольку мы предполагаем, что  $|K1| = |K2| > k$ , с высокой вероятностью существуют некоторые значения  $K1$  и  $K2$ , такие, что  $H_{K1}(R) = L \oplus M$  и такие, что  $H_{K2}(R) = L' \oplus M$  (хотя  $M$  все еще неизвестно злоумышленнику). Используя оракул, мы можем найти такие значения  $K1$  и  $K2$ . Учитывая  $K1$  и  $K2$ , мы можем легко вывести  $M$ .

**Теорема 2.** Оракул, который находит ключ алгоритма Bear по одной паре открытый текст/зашифрованный текст, может эффективно и с высокой вероятностью находить прообразы и коллизии хэш-функции  $H$ .

Доказательство.

Вычислим выходные данные потокового шифра для входного 0:  $Y_0 = S(0)$ . Выберем случайное  $R$  и установим  $R' = R \oplus Y_0$ . Установим  $L = L' = 0$  и решим ключ для открытого текста  $P = (L, R)$  и зашифрованного текста  $C = (L', R')$ . Учитывая этот ключ, мы фактически получаем два сообщения, оба из которых хэшируются до нулевого значения. Выбирая входные данные, отличные от нуля, мы можем получить произвольные прообразы.

Рассмотрим случай частичной атаки. Если мы можем расширить выходные данные поточного шифра (например, путём поиска входного ключа), то, учитывая зашифрованный текст и часть открытого текста, мы можем узнать больше информации об открытом тексте. С другой стороны, если для хэш-функции можно обнаружить коллизии, то злоумышленник может найти пары открытых текстов, правые половины которых имеют одинаковое значение, и, таким образом, сгенерировать зашифрованный текст, большинство битов которого предсказуемы.

### 4 Lion

Алгоритм Lion отличен от алгоритма Bear последовательностью использования функций  $H(R)$  и  $S(L)$ , и фрагментов ключа шифрования. Lion, аналогично Bear, делит шифруемый блок на два субблока  $L$  и  $R$  различного размера:  $b1$  и  $b2$ , которые выбираются аналогичным образом. Ключ шифрования делится на два подключа  $k1$  и  $k2$ , размер каждого из которых равен  $b1$ .

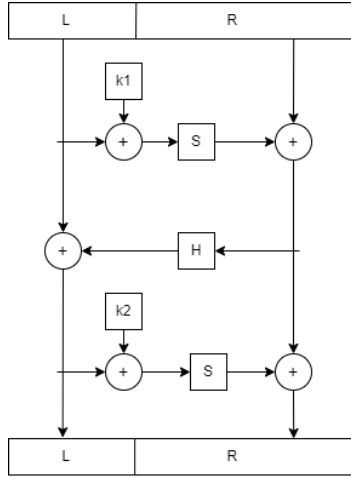


Рис. 2: Алгоритм Lion.

Шифрование выполняется при помощи:

$$R = R \oplus S(L \oplus k1)$$

$$L = L \oplus H(R)$$

$$R = R \oplus S(L \oplus k2)$$

Расшифрование:

$$R = R \oplus S(L \oplus k2)$$

$$L = L \oplus H(R)$$

$$R = R \oplus S(L \oplus k1)$$

В этом случае мы можем иметь более слабое предположение о хэш-функции. Нам не нужно предполагать, что это псевдослучайная функция, а просто то, что она свободна от столкновений, т.е. что трудно найти различные  $X1, X2$  такие, что  $H'(X1) = H'(X2)$ . Поточковый шифр  $S(M)$  в этом случае таков:

- 1) Сопrotивляется атакам восстановления ключа;
- 2) Сопrotивляется атакам расширения;
- 3) Является псевдослучайной.

Снижение безопасности Lion происходит аналогично снижению безопасности Bear; оракул, который находит ключ алгоритма, разрушит обе его компоненты. Частичные атаки также сокращаются, и, например, мы обнаруживаем, что если злоумышленник знает прообраз 0 в хэш-функции, то мы получаем набор слабых ключей; везде, где  $K1 = K2$ , определенные открытые тексты будут зашифрованы для самих себя.

## 5 Производительность алгоритмов

Рассмотренные выше алгоритмы были протестированы, используя блоки различных размеров. Была использована машина DEC Alpha с частотой 133 МГц с SHA1

в качестве хэш-функции и SEAL(симметричный поточный алгоритм шифрования данных, который оптимизирован для программной реализации) в качестве поточного шифрования.

Хэш-функция SHA1 была введена в Bear с помощью  $H_k(M) = H(k1 \cdot M \cdot k1)$ ; поточный шифр  $S(M) = SEAL_M(0) - SEAL_M(1) - SEAL_M(2) - \dots - SEAL_M([m/(64 * 1024 * 8)])$ .

Было обнаружено, что, несмотря на рекламируемые скорости 41,51 Мбит/сек для SHA1 и 114,8 Мбит/сек для SEAL на DEC Alpha с частотой 133 МГц, была получена скорость для BEAR всего около 13 Мбит/сек. Это несколько варьировалось в зависимости от размера блока, от 12,95 Мбит/сек для блоков размером 64 КБ до 13,62 Мбит/сек для блоков размером 1 МБ, что говорит о том, что время настройки ключа для SEAL было значительным. LION подтвердил это; вместо того, чтобы быть значительно быстрее, он работал со скоростью от 14,83 Мбит/сек для блоков размером 64 КБ до 18,68 Мбит/сек для блоков размером 1 МБ. Также проводилось тестирование SEAL для различных размеров блоков; обнаружено, что при включенной настройке ключа он работает на 58,7 Мбит/сек с блоками по 64 КБ и всего 7,6 Мбит/сек с блоками по 4096 байт - это далеко от заявленной производительности.

На актуальных конфигурациях (процессоры Intel 10 поколения и выше с частотой от 3ГГц) скорость алгоритма Bear в среднем 32 Мбайт/сек, а алгоритма Lion 145 Мбайт/сек для блоков размером 64 КБ.

Эти результаты показывают необходимость в поточном шифре, который быстро выполняется в программном обеспечении, но не достигает этого за счет очень медленного расписания ключей. Учитывая такие шифры, ожидается, что BEAR и LION будут очень конкурентоспособны как быстрые блочные шифры.

## 6 Lioness

Авторы алгоритма предположили, что Lion может быть подвержен сложной в реализации комбинированной атаке на основе адаптивного выбора открытого текста и шифртекста. Поэтому был предложен более сложный алгоритм шифрования Lioness, не подверженный подобной атаке. В отличие от «трехраундовых» Bear и Lion, преобразования алгоритма Lioness выполняются в 4 раунда, что и делает алгоритм более сложным и, соответственно, более медленным.

В каждом раунде Lioness используется один из независимых подключей алгоритма  $k1...k4$ .

Шифрование выполняется следующим образом:

$$R = R \oplus S(L \oplus k1)$$

$$L = L \oplus H_{k2}(R)$$

$$R = R \oplus S(L \oplus k3)$$

$$L = L \oplus H_{k4}(R)$$

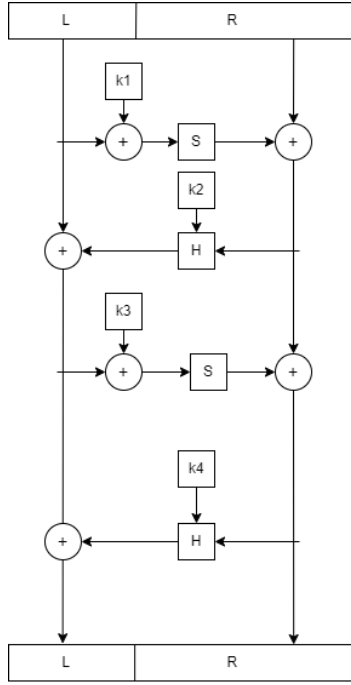


Рис. 3: Алгоритм Lioness.

Расшифрование выполняется применением обратной последовательности операций:

$$L = L \oplus H_{k4}(R)$$

$$R = R \oplus S(L \oplus k3)$$

$$L = L \oplus H_{k2}(R)$$

$$R = R \oplus S(L \oplus k1)$$

Алгоритм Lioness является по своей сути комбинацией преобразований алгоритмов Bear и Lion. Подключи  $k2$  и  $k4$  имеют произвольный размер (аналогично Bear), а подключи  $k1$  и  $k3$  имеют размер  $b1$  (аналогично Lion).

## 7 Режимы работы

Авторы предлагают использовать вышеуказанные шифры со следующими режимами работы:

1. Шифрование одного блока: все сообщение обрабатывается как один блок. Этот режим имеет несколько преимуществ:

(а) Каждый бит зашифрованного текста зависит от всех битов открытого текста очень сложным образом, что повышает криптографическую надежность;

(б) Доказательства безопасности Bear и Lion сохраняются, поскольку только один блок зашифрован любым ключом;

(в) Он предотвращает как дифференциальные, так и линейные атаки, поскольку злоумышленник не может получить более одного блока, зашифрованного одним и тем же ключом.

2. Сообщение может быть разделено на несколько блоков, и каждый блок зашифрован под другим ключом.

3. Lioness также можно использовать со стандартными режимами шифрования DES: можно разделить сообщение на несколько блоков некоторой длины (скажем, 1Кбайт-1Мбайт) и использовать стандартные режимы DES. (DES — алгоритм для симметричного шифрования, утверждённый в 1977 году как официальный стандарт)

Режимы работы, блоки которых являются длинными и/или переменными, могут иметь дополнительные преимущества в конкретных областях применения. Например, при построении протоколов аутентификации использование блочного шифра переменной длины, который обрабатывает каждое сообщение протокола как отдельный блок, предотвратит атаки сращивания, подобные тем, которые были продемонстрированы в реализациях DES-CBC протокола Otway-Rees [MB94]. Другим примером является случай, когда требуется, чтобы все биты сеансового ключа, кроме 40 бит, отправлялись в открытом виде; если кто-то хочет получить максимально достижимый уровень безопасности с учетом этого ограничения, то использование большего блока заставляет криптоаналитика работать усерднее.

## 8 Заключение

Ранее уже было известно, как построить потоковые шифры и хэш-функции из блочных шифров, а хэш-функции из потоковых шифров; показав, как построить блочный шифр из потокового шифра и хэш-функции, авторы завершили набор элементарных сокращений.

Стоит отметить, что Bear, Lion и Lioness являются шаблонными конструкциями, так как не конкретизируют основные используемые параметры. Эти конструкции обладают некоторыми интересными доказуемыми свойствами безопасности, а также могут иметь практическую ценность: они обеспечивают быстроту и надежность блочных шифров, размеры блоков которых велики и изменчивы. Рассмотренные алгоритмы можно было значительно ускорить за счёт разработки поточного шифра с меньшим временем настройки ключа. Это является предметом продолжающихся исследований.

## Список литературы

- [illegible]