Тема 2.2. Классические симметричные криптосистемы

Шифрование с использованием метода шифрующих таблиц

С начала эпохи Возрождения (конец XIV столетия) начала возрождаться и криптография. Наряду с традиционными применениями криптографии в политике, дипломатии и военном деле появляются и другие задачи - защита интеллектуальной собственности от преследований инквизиции или заимствований злоумышленников. В разработанных шифрах перестановки того времени применяются шифрующие таблицы, которые в сущности задают правила перестановки букв в сообщении.

В качестве ключа в шифрующих таблицах используются:

• размер таблицы;

• слово или фраза, задающие перестановку;

• особенности структуры таблицы.

Одним из самых примитивных табличных шифров перестановки является простая перестановка, для которой ключом служит размер таблицы. Например, сообщение

ТЕРМИНАТОР ПРИБЫВАЕТ СЕДЬМОГО В ПОЛНОЧЬ

записывается в таблицу поочередно по столбцам. Результат заполнения таблицы из 5 строк и 7 столбцов показан на рис. 2.

После заполнения таблицы текстом сообщения по столбцам для формирования шифртекста считывают содержимое таблицы по строкам.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Т | Н | П | В | Е | Г | Л |
| Е | А | Р | А | Д | О | Н |
| Р | Т | И | Е | Ь | В | О |
| М | О | Б | Т | М | П | Ч |
| И | Р | Ы | С | О | О | Ь |

Если шифртекст записывать группами по пять букв, получается такое шифрованное сообщение:

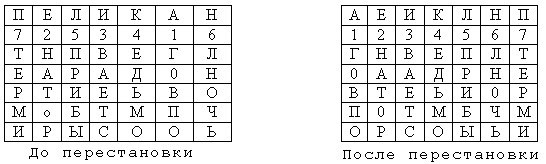
ТНПВЕ ГЛЕАР АДОНР ТИЕЬВ ОМОБТ МПЧИР ЫСООЬ

Естественно, отправитель и получатель сообщения должны заранее условиться об общем ключе в виде размера таблицы. Следует заметить, что объединение букв шифртекста в 5-буквенные группы не входит в ключ шифра и осуществляется для удобства записи несмыслового текста. При расшифровании действия выполняют в обратном порядке.

Несколько большей стойкостью к раскрытию обладает метод шифрования, называемый одиночной перестановкой по ключу. Этот метод отличается от предыдущего тем, что столбцы таблицы переставляются по ключевому слову, фразе или набору чисел длиной в строку таблицы.

Применим в качестве ключа, например, слово

ПЕЛИКАН,



а текст сообщения возьмем из предыдущего примера. На рисунке показаны две таблицы, заполненные текстом сообщения и ключевым словом, при этом левая таблица соответствует заполнению до перестановки, а правая таблица - заполнению после перестановки.

В верхней строке левой таблицы записан ключ, а номера под буквами ключа определены в соответствии с естественным порядком соответствующих букв ключа в алфавите. Если бы в ключе встретились одинаковые буквы, они бы были понумерованы слева направо. В правой таблице столбцы переставлены в соответствии с упорядоченными номерами букв ключа.

При считывании содержимого правой таблицы по строкам и записи шифртекста группами по пять букв получим шифрованное сообщение:

ГНВЕП ЛТООА ДРНЕВ ТЕЬИО РПОТМ БЧМОР СОЫЬИ

Для обеспечения дополнительной скрытности можно повторно зашифровать сообщение, которое уже прошло шифрование. Такой метод шифрования называется *двойной перестановкой*. В случае двойной перестановки столбцов и строк таблицы перестановки определяются отдельно для столбцов и отдельно для строк. Сначала в таблицу записывается текст сообщения, а потом поочередно переставляются столбцы, а затем строки. При расшифровании порядок перестановок должен быть обратным.

Пример выполнения шифрования методом двойной перестановки показан на рисунке. Если считывать шифртекст из правой таблицы построчно блоками по четыре буквы, то получится следующее:

ТЮАЕ ООГМ РЛИП ОЬСВ

Ключом к шифру двойной перестановки служит последовательность номеров столбцов и номеров строк исходной таблицы (в нашем примере последовательности 4132 и 3142 соответственно).

Число вариантов двойной перестановки быстро возрастает при увеличении размера таблицы:

• для таблицы 3х3 36 вариантов;

• для таблицы 4х4 576 вариантов;

• для таблицы 5х5 14400 вариантов.

Однако двойная перестановка не отличается высокой стойкостью и сравнительно просто "взламывается" при любом размере таблицы шифрования.

Шифрование методом магического квадрата

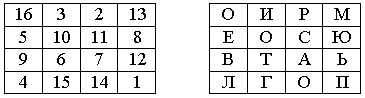
В средние века для шифрования перестановкой применялись и магические квадраты.

*Магическими квадратами* называют квадратные таблицы с вписанными в их клетки последовательными натуральными числами, начиная от 1, которые дают в сумме по каждому столбцу, каждой строке и каждой диагонали одно и то же число.

Шифруемый текст вписывали в магические квадраты в соответствии с нумерацией их клеток. Если затем выписать содержимое такой таблицы по строкам, то получится шифртекст, сформированный благодаря перестановке букв исходного сообщения. В те времена считалось, что созданные с помощью магических квадратов шифртексты охраняет не только ключ, но и магическая сила.

Пример магического квадрата и его заполнения сообщением

ПРИЛЕТАЮ ВОСЬМОГО



ПРИЛЕТАЮ ВОСЬМОГО

Шифртекст, получаемый при считывании содержимого правой таблицы по строкам, имеет вполне загадочный вид:

ОИРМ ЕОСЮ ВТАЬ ЛГОП

Число магических квадратов быстро возрастает с увеличением размера квадрата. Существует только один магический квадрат размером 3х3 (если не учитывать его повороты). Количество магических квадратов 4х4 составляет уже 880, а количество магических квадратов 5х5 - около 250000.

Система Цезаря

Шифр Цезаря является частным случаем шифра простой замены (одноалфавитной подстановки). Свое название этот шифр получил по имени римского императора Гая Юлия Цезаря, который использовал этот шифр при переписке с Цицероном (около 50 г. до н.э.).

При шифровании исходного текста каждая буква заменялась на другую букву того же алфавита по следующему правилу. Заменяющая буква определялась путем смещения по алфавиту от исходной буквы на К букв. При достижении конца алфавита выполнялся циклический переход к его началу. Цезарь использовал шифр замены при смещении К = 3. Такой шифр замены можно задать таблицей подстановок, содержащей соответствующие пары букв открытого текста и шифртекста.

Например, послание Цезаря

VENI VIDI VICI

в переводе на русский означает "Пришел, Увидел, Победил"), направленное его другу Аминтию после победы над понтийским царем Фарнаком, сыном Митридата, выглядело бы в зашифрованном виде так:

YHQL YLGL YLFL

Взлом шифра. Шифр Цезаря может быть легко взломан даже в случае, когда взломщик знает только зашифрованный текст. Можно рассмотреть две ситуации:

* Взломщик знает (или предполагает), что использовался простой шифр подстановки, но не знает, что это — схема Цезаря.
* Взломщик знает, что использовался шифр Цезаря, но не знает значение сдвига.

В первом случае шифр может быть взломан, используя те же самые методы что и для простого шифра подстановки, такие как частотный анализ и т. д. Используя эти методы, взломщик, вероятно, быстро заметит регулярность в решении и поймёт, что используемый шифр — это шифр Цезаря.

Во втором случае взлом шифра является даже более простым. Существует не так много вариантов значений сдвига (26 для английского языка), все они могут быть проверены методом грубой силы. Один из способов сделать это — выписать отрывок зашифрованного текста в столбец всех возможных сдвигов — техника, иногда называемая как «завершение простого компонента»

Шифрующие таблицы Трисемуса

В 1508 г. аббат из Германии Иоганн Трисемус написал печатную работу по криптологии под названием "Полиграфия". В этой книге он впервые систематически описал применение шифрующих таблиц, заполненных алфавитом в случайном порядке. Для получения такого шифра замены обычно использовались таблица для записи букв алфавита и ключевое слово (или фраза). В таблицу сначала вписывалось по строкам ключевое слово, причем повторяющиеся буквы отбрасывались. Затем эта таблица дополнялась не вошедшими в нее буквами алфавита по порядку.

Поскольку ключевое слово или фразу легко хранить в памяти, то такой подход упрощал процессы шифрования и расшифрования. Поясним этот метод шифрования на примере. Для русского алфавита шифрующая таблица может иметь размер 4х8. Выберем в качестве ключа слово БАНДЕРОЛЬ. Шифрующая таблица с таким ключом показана на рисунке.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Б | А | Н | Д | Е | Р | О | Л |
| Ь | В | Г | Ж | З | И | Й | К |
| М | П | С | Т | У | Ф | Х | Ц |
| Ч | Ш | Щ | Ы | Ъ | Э | Ю | Я |

Как и в случае полибианского квадрата, при шифровании находят в этой таблице очередную букву открытого текста и записывают в шифртекст букву, расположенную ниже ее в том же столбце. Если буква текста оказывается в нижней строке таблицы, тогда для шифртекста берут самую верхнюю букву из того же столбца.

Например, при шифровании с помощью этой таблицы сообщения

ВЫЛЕТАЕМПЯТОГО

получаем шифртекст

ПДКЗЫВЗЧШЛЫЙСЙ

Такие табличные шифры называются монограммными, так как шифрование выполняется по одной букве. Трисемус первым заметил, что шифрующие таблицы позволяют шифровать сразу по две буквы. Такие шифры называются биграммными.

Шифр Плейфера

Шифр Плейфера использует матрицу 5х5 (для латинского алфавита, для кириллического алфавита необходимо увеличить размер матрицы до 4х8), содержащую ключевое слово или фразу. Для создания матрицы и использования шифра достаточно запомнить ключевое слово и четыре простых правила. Чтобы составить ключевую матрицу, в первую очередь нужно заполнить пустые ячейки матрицы буквами ключевого слова (не записывая повторяющиеся символы), потом заполнить оставшиеся ячейки матрицы символами алфавита, не встречающимися в ключевом слове, по порядку (в английских текстах обычно опускается символ «Q», чтобы уменьшить алфавит, в других версиях «I» и «J» объединяются в одну ячейку). Ключевое слово может быть записано в верхней строке матрицы слева направо, либо по спирали из левого верхнего угла к центру. Ключевое слово, дополненное алфавитом, составляет матрицу 5х5 и является ключом шифра.

Для того чтобы зашифровать сообщение, необходимо разбить его на биграммы (группы из двух символов), например «Hello World» становится «HE LL OW OR LD», и отыскать эти биграммы в таблице. Два символа биграммы соответствуют углам прямоугольника в ключевой матрице. Определяем положения углов этого прямоугольника относительно друг друга. Затем, руководствуясь следующими 4 правилами, зашифровываем пары символов исходного текста:

1. Если два символа биграммы совпадают (или если остался один символ), добавляем после первого символа «Х», зашифровываем новую пару символов и продолжаем. В некоторых вариантах шифра Плейфера вместо «Х» используется «Q».

2. Если символы биграммы исходного текста встречаются в одной строке, то эти символы замещаются на символы, расположенные в ближайших столбцах справа от соответствующих символов. Если символ является последним в строке, то он заменяется на первый символ этой же строки.

3. Если символы биграммы исходного текста встречаются в одном столбце, то они преобразуются в символы того же столбца, находящиеся непосредственно под ними. Если символ является нижним в столбце, то он заменяется на первый символ этого же столбца.

4. Если символы биграммы исходного текста находятся в разных столбцах и разных строках, то они заменяются на символы, находящиеся в тех же строках, но соответствующие другим углам прямоугольника.

Для расшифровки необходимо использовать инверсию этих четырёх правил, откидывая символы «Х» (или «Q»), если они не несут смысла в исходном сообщении.

Пример. Используем ключ «playfair example», тогда матрица примет вид:

P L A Y F

I R E X M

B C D G H

J K N O S

T U V W Z

Зашифруем сообщение «Hide the gold in the tree stump»

HI DE TH EG OL DI NT HE TR EX ES TU MP

1. Биграмма HI формирует прямоугольник, заменяем её на BM.

2. Биграмма DE расположена в одном столбце, заменяем её на ND.

3. Биграмма TH формирует прямоугольник, заменяем её на ZB.

4. Биграмма EG формирует прямоугольник, заменяем её на XD.

5. Биграмма OL формирует прямоугольник, заменяем её на KY.

6. Биграмма DI формирует прямоугольник, заменяем её на BE.

7. Биграмма NT формирует прямоугольник, заменяем её на JV.

8. Биграмма HE формирует прямоугольник, заменяем её на DM.

9. Биграмма TR формирует прямоугольник, заменяем её на UI.

10. Биграмма EX находится в одной строке, заменяем её на XM.

11. Биграмма ES формирует прямоугольник, заменяем её на MN.

12. Биграмма TU находится в одной строке, заменяем её на UV.

13. Биграмма MP формирует прямоугольник, заменяем её на IF.

Получаем зашифрованный текст «BM ND ZB XD KY BE JV DM UI XM MN UV IF»

Таким образом сообщение «Hide the gold in the tree stump» преобразуется в «BMNDZBXDKYBEJVDMUIXMMNUVIF»

В иллюстрациях. Предположим, что необходимо зашифровать биграмму OR. Рассмотрим 4 случая:

1)

\* \* \* \* \*

\* O Y R Z

\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*

OR заменяется на YZ

2)

\* \* O \* \*

\* \* B \* \*

\* \* \* \* \*

\* \* R \* \*

\* \* Y \* \*

OR заменяется на BY

3)

Z \* \* O \*

\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*

R \* \* X \*

\* \* \* \* \*

OR заменяется на ZX

4)

\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*

Y O Z \* R

\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*

OR заменяется на ZY

Система Вижинера

В шифре Цезаря каждая буква алфавита сдвигается на несколько позиций; например в шифре Цезаря при сдвиге +3, A стало бы D, B стало бы E и так далее. Шифр Виженера состоит из последовательности нескольких шифров Цезаря с различными значениями сдвига. Для зашифровывания может использоваться таблица алфавитов, называемая tabula recta или квадрат (таблица) Виженера. Применительно к латинскому алфавиту таблица Виженера составляется из строк по 26 символов, причём каждая следующая строка сдвигается на несколько позиций. Таким образом, в таблице получается 26 различных шифров Цезаря. На каждом этапе шифрования используются различные алфавиты, выбираемые в зависимости от символа ключевого слова. Например, предположим, что исходный текст имеет вид:

ATTACKATDAWN

Человек, посылающий сообщение, записывает ключевое слово («LEMON») циклически до тех пор, пока его длина не будет соответствовать длине исходного текста:

LEMONLEMONLE

Первый символ исходного текста A зашифрован последовательностью L, которая является первым символом ключа. Первый символ L шифрованного текста находится на пересечении строки L и столбца A в таблице Виженера. Точно так же для второго символа исходного текста используется второй символ ключа; то есть второй символ шифрованного текста X получается на пересечении строки E и столбца T. Остальная часть исходного текста шифруется подобным способом.

Исходный текст: ATTACKATDAWN

Ключ: LEMONLEMONLE

Зашифрованный текст: LXFOPVEFRNHR

Расшифровывание производится следующим образом: находим в таблице Виженера строку, соответствующую первому символу ключевого слова; в данной строке находим первый символ зашифрованного текста. Столбец, в котором находится данный символ, соответствует первому символу исходного текста. Следующие символы зашифрованного текста расшифровываются подобным образом.

Если буквы A—Z соответствуют числам 0—25, то шифрование Виженера можно записать в виде формулы:

Расшифровка:

Двойной квадрат Уитсона

В 1854 г. англичанин Чарльз Уитстон разработал новый метод шифрования биграммами, который называют "двойным квадратом". Свое название этот шифр получил по аналогии с по-либианским квадратом. Шифр Уитстона открыл новый этап в истории развития криптографии. В отличие от полибианского шифр "двойной квадрат" использует сразу две таблицы, размещенные по одной горизонтали, а шифрование идет биграммами, как в шифре Плейфейра. Эти не столь сложные модификации привели к появлению на свет качественно новой криптографической системы ручного шифрования. Шифр "двойной квадрат" оказался очень надежным и удобным и применялся Германией даже в годы второй мировой войны.

Поясним процедуру шифрования этим шифром на примере. Пусть имеются две таблицы со случайно расположенными в них русскими алфавитами (рис.12). Перед шифрованием исходное сообщение разбивают на биграммы. Каждая биграмма шифруется отдельно. Первую букву биграммы находят в левой таблице, а вторую букву - в правой таблице. Затем мысленно строят прямоугольник так, чтобы буквы биграммы лежали в его противоположных вершинах. Другие две вершины этого прямоугольника дают буквы биграммы шифротекста. Т.е. шифрование происходит как в системе Плейфера, только первая буква биграммы находится в первой таблице, а вторая буква биграммы — во второй.