Гайд, тутор, обучающая методичка по алгоритму Эль Гамаля

Схема Эль-Гамаля — это криптосистема с открытым ключом, основанная на трудности вычисления дискретных логарифмов в конечном поле. Криптосистема включает в себя алгоритм шифрования и алгоритм цифровой подписи. Схема была предложена Тахером Эль-Гамалем в 1985 году. Он усовершенствовал систему Диффи-Хеллмана и получил два алгоритма, которые использовались для шифрования и для обеспечения аутентификации. В отличие от RSA алгоритм Эль-Гамаля не был запатентован и, поэтому, стал более дешевой альтернативой.

Что такое криптосистема с открытым и закрытым ключом (или как её ещё называют – ассиметричное шифрование)?

Это такая система, где чтобы зашифровать сообщение используется один ключ, а чтобы расшифровать – второй, в отличие от симметричного шифрования, где используется один и тот же ключ для шифрования и расшифровки. Здесь эти ключи называют так: первый – это открытый (или публичный), а второй – закрытый (или секретный). Открытый ключ рассказывается кому угодно, с помощью него сообщение шифруется и передаётся обладателю этого ключа. Далее он (обладатель) расшифровывает сообщение с помощью секретного ключа.

Теперь сам алгоритм:

**Первым** делом нужно сгенерировать числа P и A (1 < A < P - 1) такие, что P простое, а A является генератором мультипликативной группы кольца вычетов по модулю P (*или как ещё это называют: A – это первообразный корень по модулю P*).

Что такое генератор мультипликативной группы кольца вычетов по модулю P? В данном случае это число A такое, что все числа из интервала [1, 2, 3, …, P-1] могут быть представлены как различные степень A mod(P). Рассмотрим на примере:

Возьмём группу Z7: {0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}. Недолго думая, выберем число 3. Проверим:

31 = 3 mod(7) | 34 = 4 mod(7)

32 = 2 mod(7) | 35 = 5 mod(7)

33 = 6 mod(7) | 36 = 1 mod(7)

Видно, что все числа {1, 2, 3, 4, 5, 6} представляются в виде (3^i)mod(7), где i от 1 до 6 {1= 36, 2=32, 3=31, 4=34, 5= 35, 6=33}. Значит 3 – это генератор мультипликативной группы кольца вычетов по модулю 7. Но это только пример, здесь 3 и 7 – очень маленькие числа. На самом деле на практике берутся числа, у которых хотя бы 250-300 цифр в записи.

Чтобы было просто генерировать такие числа можно использовать следующий подход: простое число P берётся такое, что P = 2\*q+1, где число q тоже простое. Тогда в качестве A можно взять число, для которого выполняется: Aq mod(P)≠1 и 1 < A < P – 1. Такой выбор числа P также и усиливает криптостойкость.

**Вторым** шагом каждый пользователь выбирает себе секретный ключ X и публичный ключ Y следующий образом:

X такое, что: 1 < X < P-1

Y такое, что: Y = AX mod(P)

Будем обозначать X1 и Y1 секретный и публичный ключи для пользователя 1 и X2 и Y2 для пользователя 2 соответственно, и так далее.

По сути, теперь уже можно начинать шифровать и дешифровать сообщения. А также их подписывать.

Введём ещё одно обозначение. Будем обозначать числом m само сообщение. Это число может быть получено разными способами, главное, чтобы оно не было бы больше, чем P. Хотя бы можно поступать так: какое-то сообщение представляется в двоичном виде (*каждую букву представить как байт, а потом просто записать все эти байты один за другим*), этот же двоичный вид может представлять число m. Ну а если это число m получается больше, чем P, то сообщение можно “разбить” на более мелкие.

Добавим ещё одно обозначение: операцию деления по модулю mod. Другими словами, она находит просто остаток от деления. Например, 24mod(10) = 4 или 13mod(11) = 2, или 5mod(2) = 1 и т. д.

**Шифрование, передача и расшифровка**:

Пользователь 1 хочет отправить сообщение m в зашифрованном виде.

Шаг 1: пользователь 2 передаёт пользователю 1 числа P, A и Y2.

Шаг 2: пользователь 1 находит числа k, r и e:

k такое, что наибольший общий делитель k и P-1 равен 1.

r = Ak mod(P)

e = (m\*Y2k) mod(P)

Теперь зашифрованное сообщение представляется в таком виде (r, e). То есть зашифрованное сообщение (r, e) передаётся пользователю 2.

Шаг 3: пользователь 2 расшифровывает:

m = (e\*r(P-1-X2)) mod(P)

Почему это вообще работает?!

Начнём с теоремы Эйлера. Она гласит:

Если a и P взаимно просты (то есть их наибольший общий делитель равен 1), то aφ(P) mod(P) = 1, где φ(P) – это функция Эйлера. Теперь про функцию Эйлера – это функция, которая равна количеству натуральных чисел, меньших P и взаимно с простых с P. Например, φ(24) = 8, так как всего 8 чисел, меньших 24, взаимно просты с 24 (*т. е. имеют наибольший общий делитель 1*): 1, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23. Нетрудно догадаться, что если P – простое, то все числа, меньшие P, будут взаимно просты с P. Т.е. получается, что если a не делится на простое число P, то a(P-1) mod(P) = 1 (это называется малой теоремой Ферма).

Так вот, говорилось что:

m = (e\*r(P-1-X2)) mod(P), где e = (m\*Y2k) mod(P), r = Ak mod(P) и Y2 = AX2 mod(P). Подставим e, r и Y2 в (e\*r(P-1-X2)) mod(P):

m = ( (m\*Y2k) \* Ak\*(P-1-X2)) mod(P) = ( (m\*Ak\*X2) \* Ak\*(P-1-X2) ) mod(P)

Сразу возникает вопрос, а так вообще можно делать? Ну подставлять, например, это вот (a\*3)mod(P) = с сюда (31\*с\*b)mod(P) так, что уберётся первый mod: (31\*(a\*3)mod(P) \* b)mod(P). Так вот, так делать можно (проверьте сами на каком-нибудь примере), и получится:

(31\*с\*b)mod(P) = (31\* (a\*3)mod(P) \* b)mod(P) = (93 \* a \* b)mod(P)

Продолжим:

( (m\*Ak\*X2) \* Ak\*(P-1-X2) ) mod(P) = ( (m\*Ak\*X2+ k\*(P-1-X2)) mod(P) =

( (m\*Ak\*(P-1)) mod(P) = [обозначим t = Ak] = ( (m\*t(P-1)) mod(P) = [по теореме выше, так как P изначально простое, t(P-1) mod(P) = 1] = ( (m\*1) mod(P) = m. Действительно, m = m.

Ладно, звучит всё хорошо, но что, если мы будем полностью слушать канал, в котором передаются все эти сообщения? Тогда мы узнаем: P, A, e, r и Y2. Но как ни крути раскрыть m не получится, у нас не хватает X2 и k. Подбирать их будем до конца вселенной, если, конечно, речь идёт о больших числах.

Теперь подпись сообщений. Или как её в данном случае лучше назвать – электронная подпись. Она позволяет подписать сообщение так, что если его чуть-чуть изменить, то сразу станет понятно, что это (чуть-чуть изменённое сообщение) вы не подписывали.

Но сначала нужно понять, что такое хеш-функция. Это такая функция f(x) = y, что y вычислить очень легко, а вот x найти, зная y, очень сложно. Скажем вместо x подставляется набор байт (сколь угодно длинный), который на выходе даёт (ровно N байт) = y. Причём если в x поменять где-нибудь хотя бы 1 бит, то y изменится настолько, что его даже x не узнает. В общем смысл понятен. Например, такой функцией может быть SHA-512 или SHA-256, MD5 и т.д. Ну или вообще такое: f(a, b) = y, где, для наглядности, a и b простые, а y = a\*b. Здесь y вычислить легко, а вот восстановить a и b сложно.

**Подпись сообщений.**

Пользователь хочет подписать сообщение M (*это вполне может быть документ или просто строка символов*).

Шаг 1: Пользователь пользуется хэш-функцией f(M) = m. На выходе получается в данном случае число.

Шаг 2: Пользователь вычисляет числа k, r и e:

k такое, что 1 < k < P-1

r = Ak mod(P)

e = ((m – X\*r)\*k-1) mod(P-1), тут k-1 – это мультипликативное обратное. Что это такое и как его найти скажу ниже. Также обращаю внимание на “mod(P**-1**)”.

Теперь кому-то (кому надо) передаётся само сообщение M, P, A и (r, e), где (r, e) и есть подпись сообщения.

Шаг3: Проверка подписи. Снова вычисляется m = f(M). Далее если выполняется условие: (Yr\*re) mod(P) = Am mod(P) - то подпись верна.

Замечание: здесь очень важно, чтобы было действительно сложно вычислить x, зная y=f(x). Ведь можно меняя биты в x рано или поздно найти такое x`, что f(x`) = f(x), так как y=f(x) фиксированной длины, а x – нет.

Замечание: важно, чтобы k было одноразовым для каждого M, так как можно (если всё-таки подобрать k) узнать X = ((m – k\*e)\*r-1) mod(P-1), а зная X, можно подделать подпись, да и вообще расшифровывать сообщения.

Почему это всё верно? Было сказано, что e = ((m – X\*r)\*k-1) mod(P-1). Выразим отсюда m = (e\*k + X\*r) mod(P-1) (да, так тоже можно делать). Замечу (для примера), что если (a)mod(P) = b, то a = P\*c + b, где с – какое-то целое число. Действительно, выражение (a = P\*c + b) показывает, что b – это остаток от деления a на P (изначально говорилось, что mod – это остаток). Частное c сейчас нас не сильно волнует. Тогда получается, что m = (P-1)\*c + (e\*k + X\*r).

Теперь Am mod(P) = A(P-1)\*c + (e\*k + X\*r) mod(P) = (Ac\*(P-1)\*A(e\*k + X\*r) ) mod(P) = [сделаем замену t = Ac] = (t(P-1)\*A(e\*k + X\*r) ) mod(P) = [по малой теореме Ферма или по теореме Эйлера: t(P-1) mod(P) = 1, т.к. P простое] = (A(e\*k + X\*r) ) mod(P) = (Ae\*k \* AX\*r) mod(P) = [вспомним, что Ak mod(P) = r и AX mod(P) = Y] =

(Yr \* re) mod(P). В общем, что и требовалось доказать.

Замечу, что вместо M можно использовать какой-нибудь ключ, тем самым подписать его. Но об этом позже.

Теперь вернёмся к вопросу: “Что такое мультипликативное обратное и как его искать?”. Если совсем прямо, то (k-1)mod(P) = (1/k)mod(P). Лучше это рассмотреть на примере: (1/9)mod(7) = (x)mod(7). Нужно найти x. Умножим правую и левую часть на 9: (1)mod(7) = 1 = (9\*x)mod(7). Другими словами, 1= 7\*c + 9\*x, где c – какое-то целое число.

Вот это вот: 1= 7\*c + 9\*x – называется диофантово уравнение. Решается оно так:

9 = 7\*1 + 2 | отсюда выразим 2 + подставим в нижнее: 1 = 7- (9-7)\*3 = 7\*2-3\*9

7 = 2\*3 + 1 | отсюда выразим 1= 7-2\*3

2 = 1\*2 + 0

Имеем: 1= 7\*c + 9\*x и 1 = 7\*2-3\*9. Отсюда x = (-3) mod(7) = (-3+7) mod(7) = 4. Замечу, что 7 mod(7) = 0, а нуль можно сколько угодно раз прибавлять. Действительно:

(9\*(1/9) ) mod(7) = 1 = (9\*x)mod(7) = (9\*4) mod(7) = (36) mod(7) = 1.

Короче (1/9) mod(7) = 4. Вот так это находится.

Всё звучит хорошо. Но как мы узнаем, что к нам пришёл публичный ключ именно того пользователя, от которого мы хотим (*его вообще-то могут поменять, пока он к вам “идёт”, и тогда вы будете общаться с кем-то вообще другим*)? И вообще, как узнать публичный ключ нужного нам пользователя?

Вот постановка задачи: Майк хочет получить публичный ключ Антона так, чтобы гарантировать, что это именно его публичный ключ. Скажем, что Майк и Антон никак не могут встретиться лично. Здесь в игру вступает Пётр (или центр сертификации).

**Цифровые сертификаты:**

Цифровым сертификатом будем называть подписанную кем-то документ, в котором содержится публичный ключ, его описание и данные владельца этого публичного ключа.

Шаг 0: Пётр всем как-нибудь рассказывает свой публичный ключ. По радио, по телевизору, на заборе, в рекламе или ещё как-то.

Шаг 1: Пётр каким-то образом удостоверяет личность Антона (*например, Пётр зарабатывает на жизнь тем, что он ездит к людям и лично с ними встречается, тем самым он удостоверяется в личности этих пользователей, или пользователи сами приезжает к Петру*) и получает публичный ключ Антона.

Шаг 2: Пётр подписывает публичный ключ Антона + добавляет к нему какой-нибудь описание. Например, имя и почту Антона. Или ещё пример: добавляет описание, что Пётр полностью доверяет Антону, и Антон может подписывать другие ключи также, как Пётр.

Шаг 3: Пётр отсылает Антону его теперь уже подписанный ключ.

Шаг 4: теперь Антон может отослать Майку свой подписанный публичный ключ или Майк сам может запросить подписанный ключ у Петра (*всё же ведь Пётр подписывает публичную информацию, поэтому он предоставит Майку ключ*).

Шаг 5: Майк смотрит, что этот подписанный ключ был подписан именно Петром (*для этого Майк использует публичный ключ Петра, который был всем рассказан в шаге 0*).

Замечание: публичный ключ Петра может быть подписан другим пользователем, доверие к которому больше и так далее.

Теперь давайте проанализируем всю эту ситуацию. Если в подписанном ключе изменить хоть 1 бит, то подпись сразу станет не верна. Так что можно вполне быть уверенным, что никто не изменил подписанный ключ, пока он шёл от Петра к Антону или Майку или от Антона к Майку.

Вообще, чтобы зашифровать сообщение с помощью алгоритма Эль-Гамаля, нужны большие вычислительные мощности. А если сообщений много? Намного разумнее будет использовать алгоритм Эль-Гамаля, чтобы обменяться каким-нибудь ключом для симметричного шифрования. Например, для AES-256 или тому подобных.

Использованные источники:

1) Басалова Г.В. Основы криптографии. 2016. - С. 156-233.

2) Б.Я.Рябко, А.Н.Фионов КРИПТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ. - Москва: Горячаялиния Телеком, 2005. - С. 31-34, 41-50.

3) AES-256 на Java // habr URL: https://habr.com/ru/post/444764/ (дата обращения: 30.04.2020).

4) TAHER ELGAMAL A Public Key Cryptosystem and a Signature Scheme Based on Discrete Logarithms // IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY. - JULY 1985. - №4.

5) Rabin M. O. Probabilistic algorithm for testing primality // JOURNAL OF NUMBER THEORY . - 1980. - №12. - С. 128-138.

6) Lee C. H., Lee P. J A Key Recovery Attack on Discrete Log-based Schemes Using a Prime Order Subgroup