

1 Введение

Дадим некоторые базовые определения. Абелевой группой будем называть множество G с определенной на нем операцией $+$ для которого выполнены следующие аксиомы:

1. $\forall a, b \in G \ a + b \in G$
2. $\exists 0 : a + 0 = 0 + a \in G$
3. $\forall a \in G \ \exists -a \in G : a + (-a) = 0$
4. $\forall a, b \in G \ a + b = b + a$
5. $\forall a, b, c \in G \ a + (b + c) = (a + b) + c$

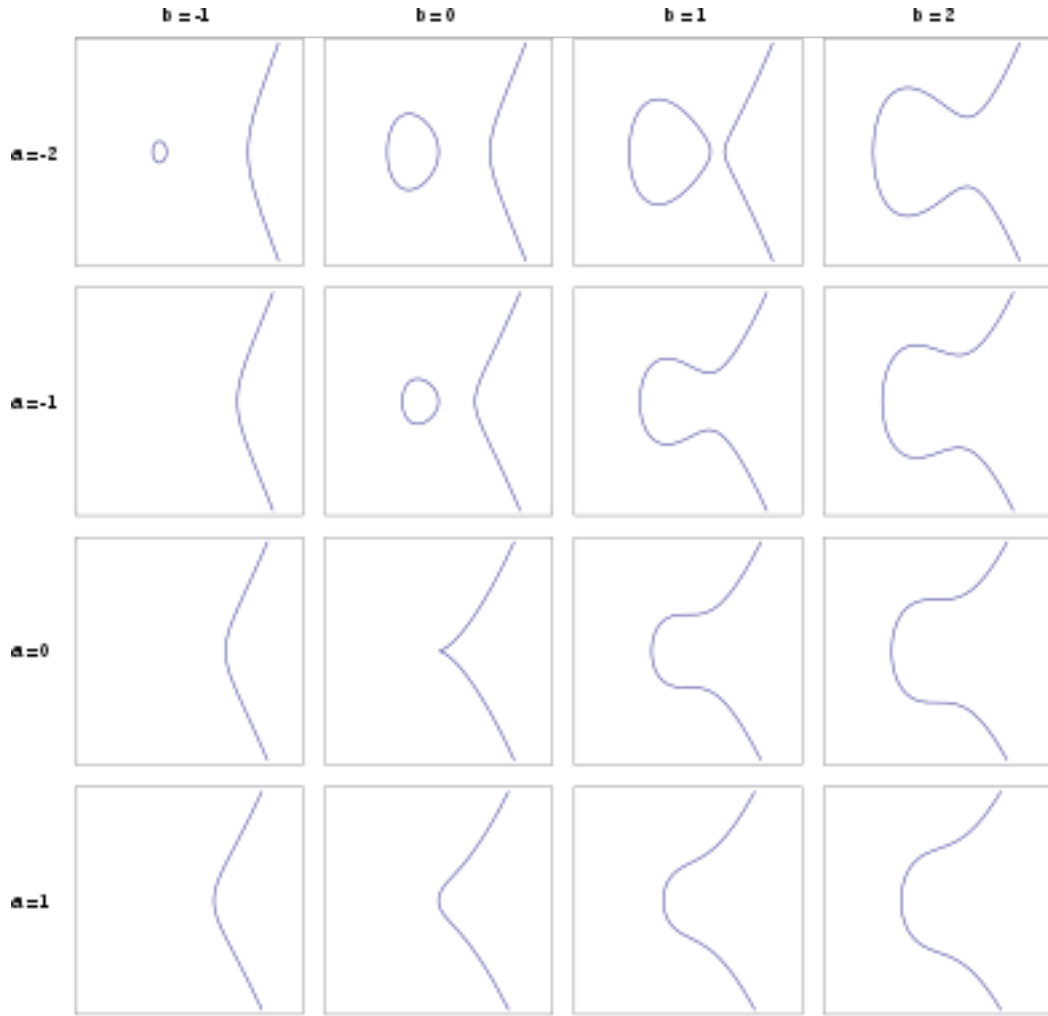
Проще говоря группой назовем множество элементы которого можно складывать, вычитать и в котором имеется нейтральный элемент относительно данной операции.

Сформулируем теорему Лагранжа: пусть $H \subset G$ – подгруппа в G , n – число элементов в G , m – число элементов в H . тогда $m|n$. Так же отметим важное свойство: для любого элемента $g \in G$ выполнено $ng = 0$.

Предположим что мы сейчас работаем в \mathbb{R}^2 . Дадим общее определение того что такое эллиптическая кривая. *Эллиптической кривой* назовем множество точек (x, y) , удовлетворяющих уравнению $y^2 + a_1xy + a_3y = x^3 + a_2x^2 + a_4x + a_5$, где a_i – некоторый числа. Множество таких точек обозначим как

$$E = \{(x, y) | y^2 + a_1xy + a_3y = x^3 + a_2x^2 + a_4x + a_5\}.$$

Это было достаточно общее определение, далее будем предполагать что эллиптическая кривая задана уравнением $y^2 = x^3 + ax + b$. Далее картинка на которой показана зависимость множества точек от параметров a, b .



Как можно видеть, имеем 2 разные ситуации: когда график кривой представляет из себя множество, состоящие из одной связной компоненты и из двух. Так же можно видеть, что при некоторый значениях параметров возникают особенности: кривая может пересечь саму себя, а так же есть точка излома. Кривые, обладающие такими особенностями называют вырожденными. Для определения всех этих ситуаций введем понятие *дискриминанта*. *Дискриминантом* эллиптической кривой назовем величину

$$\Delta = -16(4a^3 + 27b^2)$$

Если $\Delta < 0$, то кривая имеет две компоненты, если $\Delta > 0$, то кривая имеет одну компоненту. Если же $\Delta = 0$, то кривая является вырожденной.

Далее будем предполагать что кривая является невырожденной, то есть ее дискриминант отличен от нуля.

Последнее что нам потребуется это ввести понятие бесконечно удаленной точки. Чтобы не углубляться в науку скажем что это точка, находящаяся где-то за пределами плоскости и принадлежащая нашей эллиптической кривой. Таким образом будем рассматривать кривые вида

$$E = \{(x, y) | y^2 = x^3 + ax + b, -16(4a^3 + 27b^2) \neq 0\} \cup \{\infty\}$$

2 Сложение точек на кривой

Введем понятие нейтрального элемента. Нейтральным элементом относительно нашего сложения назовем бесконечно удаленную точку.

Определим сумму трех точек эллиптической кривой. Сумма трех точек P, Q, R' равна нулю, если эти три точки лежат на одной прямой.

Введем понятие обратного элемента. Противоположной к точке $P = (x_P, y_P)$ является точка $-P = (x_P, -y_P)$. Проверим что это так. Действительно, в качестве третьей точки возьмем ∞ , и проведем прямую, получим что $P + (-P) + 0 = 0$.

Из такого геометрического определения видно, что операция коммутативна и ассоциативна.

Теперь научимся по заданным координатам точек и уравнению кривой вычислять их сумму. Пусть заданы две точки $P = (x_P, y_P)$ и $Q = (x_Q, y_Q)$. Вычислим точку R , которая удовлетворяет соотношению $P + Q + R = 0$. Предположим, что $Q \neq -P$ и $Q \neq 0$, так как в этих случаях ответ очевиден. Раз точки не лежат на вертикальной прямой, то мы можем определить коэффициент наклона k прямой, проходящей через эти точки. Теперь подставим уравнение полученной прямой в уравнение эллиптической кривой и получим что

$$x_R = k^2 - x_P - x_Q, \quad y_R = y_P + k(x_R - x_P)$$

В случае $P = Q$ проводим касательную, для которой $k = \mp \frac{3x_P^2 + a}{2y_P}$. Это ничто иное, как коэффициент наклона касательной к графику функции $y = \pm \sqrt{x^3 + ax + b}$.

Примеры: $y^2 = x^3 - 7x + 10$, $P = (1, 2)$, $Q = (3, 4)$, $P + Q = (1, 2)$.

Теперь введем понятие умножения точки на целое число. Пусть задано $n \in \mathbb{Z}$, $n > 0$, тогда $nP = \underbrace{P + P + \dots + P}_{n \text{ раз}}$. Если же $n < 0$, то $nP = \underbrace{(-P) + (-P) + \dots + (-P)}_{-n \text{ раз}}$

Здесь можно отметить следующий факт: чтобы вычислить nP потребуется порядка $\log_2 n$ операций, что достаточно быстро, в то время как по nP и P найти n достаточно сложно. Эта задача называется проблемой дискретного логарифма.

3 Эллиптические кривые над конечными полями

Теперь рассмотрим случай, когда основным полем является не \mathbb{R} , а \mathbb{Z}_p , где p – простое число большее 3. Определение эллиптической кривой над \mathbb{Z}_p никак не меняется. Это так же множество точек, которые удовлетворяют заданному уравнению. Все что измениться – формулы сложения точек. В формулах для случая на \mathbb{R} достаточно заменить деление взятием обратного по модулю p . Обратный элемент можно найти с помощью расширенного алгоритма Евклида.

В данной ситуации возникает вопрос о количестве точек эллиптической кривой. На него отвечает теорема Хассе, утверждающая, что число точек на эллиптической кривой над \mathbb{Z}_p близко к числу p .

4 Циклическая группа точки кривой

Важным для дальнейшего понимания алгоритмов криптографии на эллиптических кривых является понятие циклической группы. Обозначим как N – количество точек на кривой. Заметим, что для любой точки P верно равенство $N \cdot P = 0$. Рассмотрим некоторую точку P на кривой над \mathbb{Z}_p и будем ее последовательно умножать на числа $1, 2, \dots, n, \dots$ до тех пор пока результат не станет равен нулю. Полученное множество точек $\{0, P, 2P, \dots, (n-1)P\}$ будем называть циклической группой, порожденной точкой P . Число n называется порядком группы, а число $h = N/n$ –

кофактор группы. Утверждается что число h всегда целое. Теперь можно вывести одно очень важное равенство: $n(hP) = 0$.