

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

Дискретное логарифмирование в конечном поле

Задача дискретного логарифмирования, как и задача разложения на множители, применяется во многих алгоритмах криптографии с открытым ключом. Предложенная в 1976 году У. Диффи и М. Хеллманом для установления сеансового ключа, эта задача послужила основой для создания протоколов шифрования и цифровой подписи, доказательств с нулевым разглашением и других криптографических протоколов.

Пусть над некоторым множеством Ω произвольной природы определены операции сложения «+» и умножения « \cdot ». Множество Ω называется *кольцом*, если выполняются следующие условия:

1. Сложение коммутативно: $a + b = b + a$ для любых $a, b \in \Omega$;
2. Сложение ассоциативно: $(a + b) + c = a + (b + c)$ для любых $a, b, c \in \Omega$;
3. Существует нулевой элемент $0 \in \Omega$ такой, что $a + 0 = a$ для любого $a \in \Omega$;
4. Для каждого элемента $a \in \Omega$ существует противоположный элемент $-a \in \Omega$, такой, что $(-a) + a = 0$;
5. Умножение дистрибутивно относительно сложения:

$$a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c, (a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c,$$

для любых $a, b, c \in \Omega$.

Если в кольце Ω умножение коммутативно: $a \cdot b = b \cdot a$ для любых $a, b \in \Omega$, то кольцо называется *коммутативным*.

Если в кольце Ω умножение ассоциативно: $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$ для любых $a, b, c \in \Omega$, то кольцо называется *ассоциативным*.

Если в кольце Ω существует единичный элемент e такой, что $a \cdot e = e \cdot a = a$ для любого $a \in \Omega$, то кольцо называется *кольцом с единицей*.

Если в ассоциативном, коммутативном кольце Ω с единицей для каждого ненулевого элемента a существует обратный элемент $a^{-1} \in \Omega$ такой, что $a^{-1} \cdot a = a \cdot a^{-1} = e$, то кольцо называется *полем*.

Пусть $m \in \mathbb{N}, m > 1$. Целые числа a и b называются *сравнимыми по модулю m* (обозначается $a \equiv b \pmod{m}$), если разность $a - b$ делится на m . Некоторые свойства отношения сравнимости:

1. *Рефлексивность*: $a \equiv a \pmod{m}$.
2. *Симметричность*: если $a \equiv b \pmod{m}$, то $b \equiv a \pmod{m}$.
3. *Транзитивность*: если $a \equiv b \pmod{m}$ и $b \equiv c \pmod{m}$, то $a \equiv c \pmod{m}$.

Отношение, обладающее свойством рефлексивности, симметричности и транзитивности, называется *отношением эквивалентности*. Отношение сравнимости является отношением эквивалентности на множестве \mathbb{Z} целых чисел.

Отношение эквивалентности *разбивает* множество, на котором оно определено, на *классы эквивалентности*. Любые два класса эквивалентности либо не пересекаются, либо совпадают.

Классы эквивалентности, определяемые отношением сравнимости, называются *классами вычетов по модулю m* . Класс вычетов, содержащий число a , обозначается $a \pmod{m}$ или \bar{a} и представляет собой множество чисел вида $a + km$, где $k \in \mathbb{Z}$; число a называется представителем этого класса вычетов.

Множество классов вычетов по модулю m обозначается $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$, состоит ровно из m элементов и относительно операций сложения и умножения является *кольцом классов вычетов по модулю m* .

Пример. Если $m = 2$, то $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z} = \{0 \pmod{2}, 1 \pmod{2}\}$, где $0 \pmod{2} = 2\mathbb{Z}$ – множество всех четных чисел, $1 \pmod{2} = 2\mathbb{Z} + 1$ – множество всех нечетных чисел.

Обозначим $F_p = \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$, p – простое целое число и назовем конечным полем из p элементов. Задача дискретного логарифмирования в конечном поле F_p

формулируется так: для данных целых чисел a и b , $a > 1, b > p$, найти логарифм – такое целое число x , что $a^x \equiv b \pmod{p}$ (если такое число существует). По аналогии с вещественными числами используется обозначение $x = \log_a b$.

Безопасность соответствующих криптосистем основана на том, что, зная числа a, x, p вычислить $a^x \pmod{p}$ легко, а решить задачу дискретного логарифмирования трудно. Рассмотрим p -Метод Полларда, который можно применить и для задач дискретного логарифмирования. При этом случайное отображение f должно обладать не только сжимающими свойствами, но и вычислимостью логарифма (логарифм числа $f(c)$ можно выразить через неизвестный логарифм x и $\log_a f(c)$). Для дискретного логарифмирования в качестве случайного отображения f чаще всего используются ветвящиеся отображения, например:

$$f(c) = \begin{cases} ac, & \text{при } c < \frac{p}{2} \\ bc, & \text{при } c > \frac{p}{2} \end{cases}$$

При $c < \frac{p}{2}$ имеем $\log_a f(c) = \log_a c + 1$, при $c > \frac{p}{2}$ – $\log_a f(c) = \log_a c + x$.

Алгоритм, реализующий p -Метод Полларда для задач дискретного логарифмирования.

Вход. Простое число p , число a порядка r по модулю p , целое число $b, 1 < b < p$; отображение f , обладающее сжимающими свойствами и сохраняющее вычислимость логарифма.

Выход. Показатель x , для которого $a^x \equiv b \pmod{p}$, если такой показатель существует.

1. Выбрать произвольные целые числа u, v и положить $c \leftarrow a^u b^v \pmod{p}, d \leftarrow c$.
2. Выполнять $c \leftarrow f(c) \pmod{p}, d \leftarrow f(f(d)) \pmod{p}$, вычисляя при этом логарифмы для c и d как линейные функции от x по модулю r , до получения равенства $c \equiv d \pmod{p}$.
3. Приравняв логарифмы для c и d , вычислить логарифм x решением сравнения по модулю r . Результат: x или "Решений нет".

Пример. Решим задачу дискретного логарифмирования $10^x \equiv 64 \pmod{107}$, используя р-Метод Полларда. Порядок числа 10 по модулю 107 равен 53.

Выберем отображение $f(c) \equiv 10c \pmod{107}$ при $c < 53$, $f(c) \equiv 64c \pmod{107}$ при $c \geq 53$. Пусть $u = 2, v = 2$. Результаты вычислений запишем в таблицу:

Номер шага	c	$\log_a c$	d	$\log_a d$
0	4	$2+2x$	4	$2+2x$
1	40	$3+2x$	76	$4+2x$
2	79	$4+2x$	56	$5+3x$
3	27	$4+3x$	75	$5+5x$
4	56	$5+3x$	3	$5+7x$
5	53	$5+4x$	86	$7+7x$
6	75	$5+5x$	42	$8+8x$
7	92	$5+6x$	23	$9+9x$
8	3	$5+7x$	53	$11+9x$
9	30	$6+7x$	92	$11+11x$
10	86	$7+7x$	30	$12+12x$
11	47	$7+8x$	47	$13+13x$

Приравниваем логарифмы, полученные на 11-м шаге: $7+8x \equiv 13+13x \pmod{53}$. Решая сравнение первой степени, получаем: $x \equiv 20 \pmod{53}$.

Проверка: $10^{20} \equiv 64 \pmod{107}$.

Задания к лабораторной работе

1. Реализовать алгоритм программно.
2. Получить у преподавателя задание, содержащее числа p, a, b и вычислить логарифм.