

Динамическое программирование

Борис Золотов (Б06, Б09)

Иван Казменко (Б01, Б02)

Владислав Макаров (Б03, Б05)

Арина Филимонова (Б10)

Санкт-Петербургский Государственный Университет

Вторник, 26 ноября 2024 года

Содержание

1 Одномерные задачи

- Числа Фибоначчи
- Лестница
- Динамика и индукция
- Анти-лестница
- Кузнечик
- Восстановление ответа

2 Двумерные задачи

- Число сочетаний
- Наибольшая общая подпоследовательность
- Редакционное расстояние
- Строка и шаблон
- Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Содержание

1 Одномерные задачи

- Числа Фибоначчи
- Лестница
- Динамика и индукция
- Анти-лестница
- Кузнечик
- Восстановление ответа

2 Двумерные задачи

- Число сочетаний
- Наибольшая общая подпоследовательность
- Редакционное расстояние
- Строка и шаблон
- Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Числа Фибоначчи

Определение: $F_0 = 0$, $F_1 = 1$, $F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$ при $n \geq 2$.

Задача: дано n , вычислите F_n .

Числа Фибоначчи

C++, рекурсия:

```
1  #include <iostream>
2  using namespace std;
3
4
5
6
7  int fib (int n) {
8      if (n < 2) return n;
9      return fib (n - 1) + fib (n - 2);
10 }
11
12
13
14 int main () {
15     int n;
16     while (cin >> n)
17         cout << fib (n) << endl;
18     return 0;
19 }
```

ВВОД:

5
30
40
45

ВЫВОД:

5
832040
102334155
1134903170

Числа Фибоначчи

C++, рекурсия:

```
1  #include <iostream>
2  using namespace std;
3
4
5
6
7  int fib (int n) {
8      if (n < 2) return n;
9      return fib (n - 1) + fib (n - 2);
10 }
11
12
13
14 int main () {
15     int n;
16     while (cin >> n)
17         cout << fib (n) << endl;
18     return 0;
19 }
```

Пример $n = 5$:

- $5 \rightarrow 4, 3$
- $\cdot 4 \rightarrow 3, 2$
- $\cdot \cdot 3 \rightarrow 2, 1$
- $\cdot \cdot \cdot 2 \rightarrow 1, 0$
- $\cdot \cdot \cdot \cdot 1$
- $\cdot \cdot \cdot \cdot \cdot 0$
- $\cdot \cdot \cdot 1$
- $\cdot \cdot 2 \rightarrow 1, 0$
- $\cdot \cdot \cdot 1$
- $\cdot \cdot \cdot 0$
- $\cdot 3 \rightarrow 2, 1$
- $\cdot \cdot 2 \rightarrow 1, 0$
- $\cdot \cdot \cdot 1$
- $\cdot \cdot \cdot \cdot 0$
- $\cdot \cdot 1$

Числа Фибоначчи

C++, рекурсия с запоминанием (memoизация):

```
1  #include <iostream>
2  using namespace std;
3
4  int f [99];
5
6  int fib (int n) {
7      if (f[n] == 0) {
8          if (n < 2) f[n] = n;
9          else f[n] = fib (n - 1) + fib (n - 2);
10     }
11     return f[n];
12 }
13
14 int main () {
15     int n;
16     while (cin >> n)
17         cout << fib (n) << endl;
18     return 0;
19 }
```

ВВОД:

5
30
40
45

ВЫВОД:

5
832040
102334155
1134903170

Числа Фибоначчи

C++, рекурсия с запоминанием (мемоизация):

```
1  #include <iostream>
2  using namespace std;
3
4  int f [99];
5
6  int fib (int n) {
7      if (f[n] == 0) {
8          if (n < 2) f[n] = n;
9          else f[n] = fib (n - 1) + fib (n - 2);
10     }
11     return f[n];
12 }
13
14 int main () {
15     int n;
16     while (cin >> n)
17         cout << fib (n) << endl;
18     return 0;
19 }
```

Пример $n = 5$:

- $5 \rightarrow 4, 3$
- $\cdot 4 \rightarrow 3, 2$
- $\cdot \cdot 3 \rightarrow 2, 1$
- $\cdot \cdot \cdot 2 \rightarrow 1, 0$
- $\cdot \cdot \cdot \cdot 1$
- $\cdot \cdot \cdot \cdot \cdot 0$
- $\cdot \cdot \cdot 1$ запомнено
- $\cdot \cdot 2$ запомнено
- $\cdot 3$ запомнено

Числа Фибоначчи

C++, итеративное решение:

```
1  #include <iostream>
2  using namespace std;
3
4  int main () {
5      int f [99];
6      f[0] = 0;
7      f[1] = 1;
8      for (int i = 2; i < 99 /*???*/; i++)
9          f[i] = f[i - 1] + f[i - 2];
10     int n;
11     while (cin >> n)
12         cout << f[n] << endl;
13     return 0;
14 }
```

ВВОД:

5
30
40
45

ВЫВОД:

5
832040
102334155
1134903170

Числа Фибоначчи

Python, рекурсия:

```
1  import sys
2
3
4  def fib (n):
5      if n < 2:
6          return n
7      return fib (n - 1) + fib (n - 2)
8
9  for line in sys.stdin:
10     n = int (line)
11     print (fib (n))
```

ВВОД:

```
5
30
40
45
```

ВЫВОД:

```
5
832040
102334155
1134903170
```

Числа Фибоначчи

Python, рекурсия с запоминанием (мемоизация):

```
1  import functools, sys
2
3  @functools.lru_cache (maxsize = None)
4  def fib (n):
5      if n < 2:
6          return n
7      return fib (n - 1) + fib (n - 2)
8
9  for line in sys.stdin:
10     n = int (line)
11     print (fib (n))
```

ВВОД:

5
30
40
45

ВЫВОД:

5
832040
102334155
1134903170

Числа Фибоначчи

D, рекурсия:

```
1  import std;
2
3
4  int fib (int n) {
5      if (n < 2) return n;
6      return fib (n - 1) + fib (n - 2);
7  }
8
9  void main () {
10     foreach (line; stdin.byLine) {
11         auto n = line.to !(int);
12         writeln (fib (n));
13     }
14 }
```

ВВОД:

```
5
30
40
45
```

ВЫВОД:

```
5
832040
102334155
1134903170
```

Числа Фибоначчи

D, рекурсия с запоминанием (мемоизация):

```
1  import std;
2
3  alias fib = memoize !(fibImpl);
4  int fibImpl (int n) {
5      if (n < 2) return n;
6      return fib (n - 1) + fib (n - 2);
7  }
8
9  void main () {
10     foreach (line; stdin.byLine) {
11         auto n = line.to !(int);
12         writeln (fib (n));
13     }
14 }
```

ВВОД:

```
5
30
40
45
```

ВЫВОД:

```
5
832040
102334155
1134903170
```

Содержание

1 Одномерные задачи

- Числа Фибоначчи
- Лестница
- Динамика и индукция
- Анти-лестница
- Кузнечик
- Восстановление ответа

2 Двумерные задачи

- Число сочетаний
- Наибольшая общая подпоследовательность
- Редакционное расстояние
- Строка и шаблон
- Наибольшая возрастающая подпоследовательность

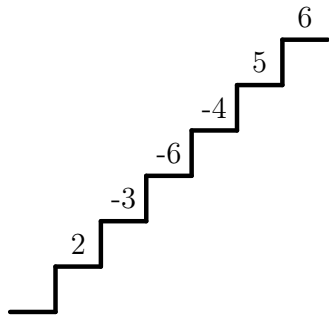
Лестница

- Есть лестница из n ступенек.
- Мы начинаем у подножия лестницы, на нулевой ступеньке.
- На ступеньках написаны числа a_1, a_2, \dots, a_n .
- Мы должны оказаться на n -й ступеньке.
- За один шаг мы поднимаемся либо на одну, либо на две ступеньки.
- Наши баллы – сумма чисел, на которые мы шагнули.
- Как подняться по лестнице, чтобы максимизировать баллы?

Лестница

- Есть лестница из n ступенек.
- Мы начинаем у подножия лестницы, на нулевой ступеньке.
- На ступеньках написаны числа a_1, a_2, \dots, a_n .
- Мы должны оказаться на n -й ступеньке.
- За один шаг мы поднимаемся либо на одну, либо на две ступеньки.
- Наши баллы – сумма чисел, на которые мы шагнули.
- Как подняться по лестнице, чтобы максимизировать баллы?

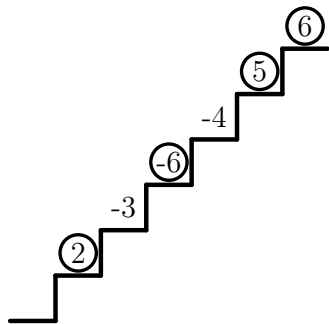
Пример 1:



Лестница

- Есть лестница из n ступенек.
- Мы начинаем у подножия лестницы, на нулевой ступеньке.
- На ступеньках написаны числа a_1, a_2, \dots, a_n .
- Мы должны оказаться на n -й ступеньке.
- За один шаг мы поднимаемся либо на одну, либо на две ступеньки.
- Наши баллы – сумма чисел, на которые мы шагнули.
- Как подняться по лестнице, чтобы максимизировать баллы?

Пример 1, решение:



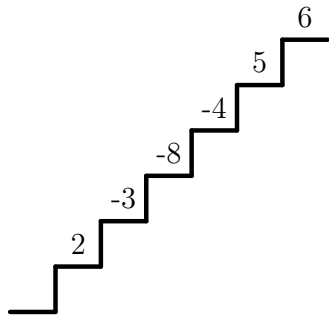
Ответ:

$$2 + (-6) + 5 + 6 = 7.$$

Лестница

- Есть лестница из n ступенек.
- Мы начинаем у подножия лестницы, на нулевой ступеньке.
- На ступеньках написаны числа a_1, a_2, \dots, a_n .
- Мы должны оказаться на n -й ступеньке.
- За один шаг мы поднимаемся либо на одну, либо на две ступеньки.
- Наши баллы – сумма чисел, на которые мы шагнули.
- Как подняться по лестнице, чтобы максимизировать баллы?

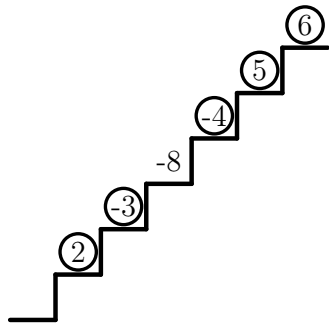
Пример 2:



Лестница

- Есть лестница из n ступенек.
- Мы начинаем у подножия лестницы, на нулевой ступеньке.
- На ступеньках написаны числа a_1, a_2, \dots, a_n .
- Мы должны оказаться на n -й ступеньке.
- За один шаг мы поднимаемся либо на одну, либо на две ступеньки.
- Наши баллы – сумма чисел, на которые мы шагнули.
- Как подняться по лестнице, чтобы максимизировать баллы?

Пример 2, решение:



Ответ:

$$2 + (-3) + (-4) + 5 + 6 = 6.$$

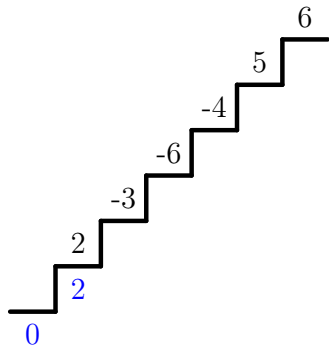
Лестница, решение

- Давайте решать более общую задачу.
- Для каждого k от 0 до n :
- Как подняться на k -ю ступеньку, чтобы максимизировать баллы?

Лестница, решение

- Давайте решать более общую задачу.
- Для каждого k от 0 до n :
- Как подняться на k -ю ступеньку, чтобы максимизировать баллы?
- Назовём это значение $f(k)$.
- База: $f(0) = 0$.
- База: $f(1) = a_1$.

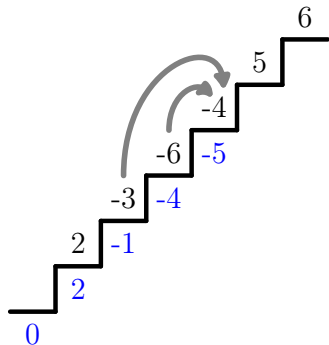
Пример 1:



Лестница, решение

- Давайте решать более общую задачу.
- Для каждого k от 0 до n :
- Как подняться на k -ю ступеньку, чтобы максимизировать баллы?
- Назовём это значение $f(k)$.
- База: $f(0) = 0$.
- База: $f(1) = a_1$.
- Пусть мы уже нашли $f(k')$ для всех $k' < k$.
- Как подняться на k -ю ступеньку?
- Мы пришли либо с $k - 1$ -й ступеньки, либо с $k - 2$ -й ступеньки.

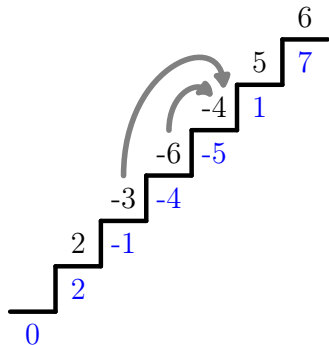
Пример 1, $k = 4$:



Лестница, решение

- Давайте решать более общую задачу.
- Для каждого k от 0 до n :
- Как подняться на k -ю ступеньку, чтобы максимизировать баллы?
- Назовём это значение $f(k)$.
- База: $f(0) = 0$.
- База: $f(1) = a_1$.
- Пусть мы уже нашли $f(k')$ для всех $k' < k$.
- Как подняться на k -ю ступеньку?
- Мы пришли либо с $k - 1$ -й ступеньки, либо с $k - 2$ -й ступеньки.

Пример 1, $k = 4$:



$$f(k) = a_k + \max(f(k-1), f(k-2))$$

Лестница, код

Рекурсия:

```
1  #include <algorithm>
2  #include <iostream>
3  using namespace std;
4
5  int a [10001];
6
7
8  int f (int n) {
9      if (n == 0) return 0;
10     if (n == 1) return a[1];
11
12     return a[n] + max (f (n - 1), f (n - 2));
13 }
14
15
16 int main () {
17     int n;  cin >> n;
18     for (int i = 1; i <= n; i++)  cin >> a[i];
19
20     cout << f (n) << endl;
21     return 0;
22 }
```

Лестница, код

Рекурсия с запоминанием (мемоизация):

```
1  #include <algorithm>
2  #include <iostream>
3  using namespace std;
4
5  int a [10001];
6  int mf [10001];
7
8  int f (int n) {
9      if (n == 0) return 0;
10     if (n == 1) return a[1];
11     if (mf[n] == INT_MAX)
12         mf[n] = a[n] + max (f (n - 1), f (n - 2));
13     return mf[n];
14 }
15
16 int main () {
17     int n;  cin >> n;
18     for (int i = 1; i <= n; i++)  cin >> a[i];
19     for (int i = 0; i <= n; i++)  mf[i] = INT_MAX;
20     cout << f (n) << endl;
21     return 0;
22 }
```

Лестница, код

Итеративное решение:

```
1  #include <algorithm>
2  #include <iostream>
3  using namespace std;
4
5  int a [10001];
6  int f [10001];
7
8  int main () {
9      int n;  cin >> n;
10     for (int i = 1; i <= n; i++)  cin >> a[i];
11     f[0] = 0;
12     f[1] = a[1];
13     for (int i = 2; i <= n; i++)
14         f[i] = a[i] + max (f[i - 1], f[i - 2]);
15     cout << f[n] << endl;
16     return 0;
17 }
```

Содержание

1 Одномерные задачи

- Числа Фибоначчи
- Лестница
- **Динамика и индукция**
- Анти-лестница
- Кузнечик
- Восстановление ответа

2 Двумерные задачи

- Число сочетаний
- Наибольшая общая подпоследовательность
- Редакционное расстояние
- Строка и шаблон
- Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Динамика и индукция

Динамическое
программирование:

- Найдём $f(n)$.
- База: $f(0) = 0, f(1) = a_1$.
- Предположение: пусть $f(k')$ уже найдены для всех $k' < k$.
- Переход: тогда $f(k) = a_k + \max(f(k-1), f(k-2))$.
- Ответ: $f(n)$.

Математическая
индукция:

- Докажем, что $f(n)$ посчитано верно.
- База: $f(0) = 0, f(1) = a_1$.
- Предположение: пусть $f(k')$ уже посчитаны верно для всех $k' < k$.
- Переход: тогда $f(k) = a_k + \max(f(k-1), f(k-2))$ тоже посчитано верно.
- Значит, $f(n)$ посчитано верно.

Динамика и индукция

Динамическое
программирование:

- Найдём $f(n)$.
- База: $f(0) = 0, f(1) = a_1$.
- Предположение: пусть $f(k')$ уже найдены для всех $k' < k$.
- Переход: тогда $f(k) = a_k + \max(f(k-1), f(k-2))$.
- Ответ: $f(n)$.

Математическая
индукция:

- Докажем, что $f(n)$ посчитано верно.
- База: $f(0) = 0, f(1) = a_1$.
- Предположение: пусть $f(k')$ уже посчитаны верно для всех $k' < k$.
- Переход: тогда $f(k) = a_k + \max(f(k-1), f(k-2))$ тоже посчитано верно.
- Значит, $f(n)$ посчитано верно.

Динамика и индукция

Динамическое
программирование:

- Найдём $f(n)$.
- База: $f(0) = 0$, $f(1) = a_1$.
- Предположение: пусть $f(k')$ уже найдены для всех $k' < k$.
- Переход: тогда $f(k) = a_k + \max(f(k-1), f(k-2))$.
- Ответ: $f(n)$.

Математическая
индукция:

- Докажем, что $f(n)$ посчитано верно.
- База: $f(0) = 0$, $f(1) = a_1$.
- Предположение: пусть $f(k')$ уже посчитаны верно для всех $k' < k$.
- Переход: тогда $f(k) = a_k + \max(f(k-1), f(k-2))$ тоже посчитано верно.
- Значит, $f(n)$ посчитано верно.

Динамика и индукция

Динамическое программирование:

- Найдём $f(n)$.
- База: $f(0) = 0, f(1) = a_1$.
- Предположение: пусть $f(k')$ уже найдены для всех $k' < k$.
- Переход: тогда $f(k) = a_k + \max(f(k-1), f(k-2))$.
- Ответ: $f(n)$.

Математическая индукция:

- Докажем, что $f(n)$ посчитано верно.
- База: $f(0) = 0, f(1) = a_1$.
- Предположение: пусть $f(k')$ уже посчитаны верно для всех $k' < k$.
- Переход: тогда $f(k) = a_k + \max(f(k-1), f(k-2))$ тоже посчитано верно.
- Значит, $f(n)$ посчитано верно.

Динамика и индукция

Динамическое
программирование:

- Найдём $f(n)$.
- База: $f(0) = 0, f(1) = a_1$.
- Предположение: пусть $f(k')$ уже найдены для всех $k' < k$.
- Переход: тогда $f(k) = a_k + \max(f(k-1), f(k-2))$.
- Ответ: $f(n)$.

Математическая
индукция:

- Докажем, что $f(n)$ посчитано верно.
- База: $f(0) = 0, f(1) = a_1$.
- Предположение: пусть $f(k')$ уже посчитаны верно для всех $k' < k$.
- Переход: тогда $f(k) = a_k + \max(f(k-1), f(k-2))$ тоже посчитано верно.
- Значит, $f(n)$ посчитано верно.

Содержание

1 Одномерные задачи

- Числа Фибоначчи
- Лестница
- Динамика и индукция
- **Анти-лестница**
- Кузнечик
- Восстановление ответа

2 Двумерные задачи

- Число сочетаний
- Наибольшая общая подпоследовательность
- Редакционное расстояние
- Строка и шаблон
- Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Анти-лестница

- Есть последовательность из n чисел: a_1, a_2, \dots, a_n .
- Мы хотим выбрать подпоследовательность.
- При этом нельзя выбирать два соседних элемента.
- Как максимизировать сумму выбранных чисел?

Анти-лестница

- Есть последовательность из n чисел: a_1, a_2, \dots, a_n .
- Мы хотим выбрать подпоследовательность.
- При этом нельзя выбирать два соседних элемента.
- Как максимизировать сумму выбранных чисел?

Пример 1:

1	3	4	-6	-7	8	3	4	6
---	---	---	----	----	---	---	---	---

Анти-лестница

- Есть последовательность из n чисел: a_1, a_2, \dots, a_n .
- Мы хотим выбрать подпоследовательность.
- При этом нельзя выбирать два соседних элемента.
- Как максимизировать сумму выбранных чисел?

Пример 1, решение:



Ответ: $1 + 4 + 8 + 6 = 19$.

Анти-лестница

- Есть последовательность из n чисел: a_1, a_2, \dots, a_n .
- Мы хотим выбрать подпоследовательность.
- При этом нельзя выбирать два соседних элемента.
- Как максимизировать сумму выбранных чисел?

Пример 2:

1	7	4	-6	-7	8	3	4	6
---	---	---	----	----	---	---	---	---

Анти-лестница

- Есть последовательность из n чисел: a_1, a_2, \dots, a_n .
- Мы хотим выбрать подпоследовательность.
- При этом нельзя выбирать два соседних элемента.
- Как максимизировать сумму выбранных чисел?

Пример 2, решение:



Ответ: $7 + 8 + 6 = 21$.

Анти-лестница, решение 1

- Давайте решать более общую задачу.
- Для каждого k от 0 до n :
- Пусть мы взяли k -е число последним.
- Как при этом максимизировать сумму?

Пример 1:

1	3	4	-6	-7	8	3	4	6
---	---	---	----	----	---	---	---	---

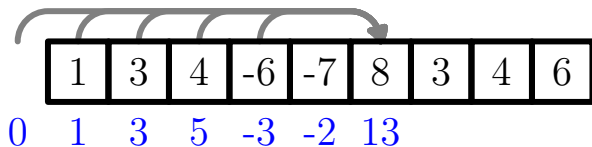
0 1

- Назовём это значение $f(k)$.
- База: пусть $f(0) = 0$.
- База: $f(1) = a_1$.

Анти-лестница, решение 1

- Давайте решать более общую задачу.
- Для каждого k от 0 до n :
- Пусть мы взяли k -е число последним.
- Как при этом максимизировать сумму?

Пример 1:

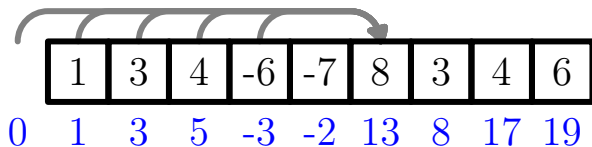


- Пусть мы уже нашли $f(k')$ для всех $k' < k$.
- Как посчитать $f(k)$?
- Предыдущим мы могли взять $k - 2$ -е число, или $k - 3$ -е, ..., или первое, или нулевое (то есть ничего не взять).

Анти-лестница, решение 1

- Давайте решать более общую задачу.
- Для каждого k от 0 до n :
- Пусть мы взяли k -е число последним.
- Как при этом максимизировать сумму?

Пример 1:



- Получается $f(k) = a_k + \max(f(k-2), f(k-3), \dots, f(1), f(0))$.
- Ответ — это $\max(f(0), f(1), \dots, f(n))$.
- Решение работает за $O(n^2)$.

Анти-лестница, решение 2

- Давайте решать другую более общую задачу.
- Для каждого k от 0 до n :
- Рассмотрим префикс последовательности: a_1, a_2, \dots, a_k .
- Как при этом максимизировать сумму?

Пример 1:

1	3	4	-6	-7	8	3	4	6
---	---	---	----	----	---	---	---	---

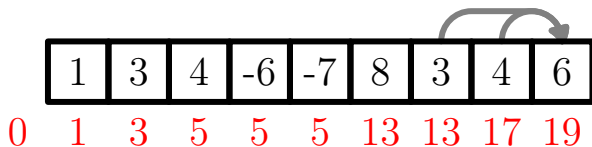
0 1

- Назовём это значение $g(k)$.
- База: $g(0) = 0$.
- База: $g(1) = \max(0, a_1)$.

Анти-лестница, решение 2

- Давайте решать другую более общую задачу.
- Для каждого k от 0 до n :
- Рассмотрим префикс последовательности: a_1, a_2, \dots, a_k .
- Как при этом максимизировать сумму?

Пример 1:



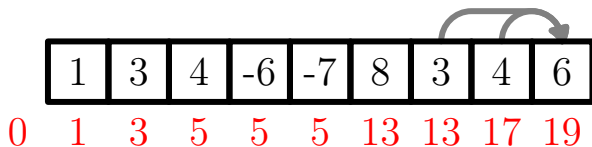
Как найти $g(k)$, если мы уже знаем $g(k')$ для всех $k' < k$?

- Мы можем не брать a_k , тогда возьмём ответ из $g(k-1)$.
- Мы можем взять a_k , тогда добавим ответ из $g(k-2)$.

Анти-лестница, решение 2

- Давайте решать другую более общую задачу.
- Для каждого k от 0 до n :
- Рассмотрим префикс последовательности: a_1, a_2, \dots, a_k .
- Как при этом максимизировать сумму?

Пример 1:



- Получается $g(k) = \max(g(k-1), a_k + g(k-2))$.
- Ответ — это $g(n)$.
- Решение работает за $O(n)$.

Содержание

1 Одномерные задачи

- Числа Фибоначчи
- Лестница
- Динамика и индукция
- Анти-лестница
- **Кузнечик**
- Восстановление ответа

2 Двумерные задачи

- Число сочетаний
- Наибольшая общая подпоследовательность
- Редакционное расстояние
- Строка и шаблон
- Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Кузнечик — может или нет

- Есть лента из клеток, по которой прыгает кузнечик.
- Он начинает в клетке 1.
- Из любой клетки x он может прыгнуть в клетки $x + a$, $x + b$ и $x + c$.
- Пример: $a = 2$, $b = 3$, $c = 5$.
- Может ли кузнечик добраться до клетки n ?

Кузнечик — может или нет

- Есть лента из клеток, по которой прыгает кузнечик.
- Он начинает в клетке 1.
- Из любой клетки x он может прыгнуть в клетки $x + a$, $x + b$ и $x + c$.
- Пример: $a = 2$, $b = 3$, $c = 5$.
- Может ли кузнечик добраться до клетки n ?

Обобщим задачу: для каждой клетки k выясним, может ли кузнечик до неё добраться.

- База: $f(1) = \text{true}$.
- Пересчёт: $f(k) = f(k - a) \vee f(k - b) \vee f(k - c)$.

Кузнечик — может или нет

- Есть лента из клеток, по которой прыгает кузнечик.
- Он начинает в клетке 1.
- Из любой клетки x он может прыгнуть в клетки $x + a$, $x + b$ и $x + c$.
- Пример: $a = 2$, $b = 3$, $c = 5$.
- Может ли кузнечик добраться до клетки n ?

Псевдокод:

```
f[1] := true
for k := 2, ..., n:
    f[k] := false
    if k > a and f[k - a]: f[k] := true
    if k > b and f[k - b]: f[k] := true
    if k > c and f[k - c]: f[k] := true
```

Кузнечик — как можно быстрее

- Есть лента из клеток, по которой прыгает кузнечик.
- Он начинает в клетке 1.
- Из любой клетки x он может прыгнуть в клетки $x + a$, $x + b$ и $x + c$.
- **За какое минимальное число прыжков** кузнечик может добраться до клетки n ?

Кузнечик — как можно быстрее

- Есть лента из клеток, по которой прыгает кузнечик.
- Он начинает в клетке 1.
- Из любой клетки x он может прыгнуть в клетки $x + a$, $x + b$ и $x + c$.
- За какое минимальное число прыжков кузнечик может добраться до клетки n ?

Обобщим задачу: для каждой клетки k выясним, за какое минимальное число прыжков кузнечик может до неё добраться.

- База: $f(1) = 0$.
- Пересчёт: $f(k) = 1 + \min(f(k - a), f(k - b), f(k - c))$.

Кузнечик — как можно быстрее

- Есть лента из клеток, по которой прыгает кузнечик.
- Он начинает в клетке 1.
- Из любой клетки x он может прыгнуть в клетки $x + a$, $x + b$ и $x + c$.
- За какое минимальное число прыжков кузнечик может добраться до клетки n ?

Псевдокод:

```
f[1] := 0
for k := 2, ..., n:
  f[k] := infinity
  if k > a: f[k] := min (f[k], 1 + f[k - a])
  if k > b: f[k] := min (f[k], 1 + f[k - b])
  if k > c: f[k] := min (f[k], 1 + f[k - c])
```

Кузнечик — ямы

- Есть лента из клеток, по которой прыгает кузнечик.
- Он начинает в клетке 1.
- Из любой клетки x он может прыгнуть в клетки $x + a$, $x + b$ и $x + c$.
- В некоторых клетках — ямы, туда попадать нельзя.
- За какое минимальное число прыжков кузнечик может добраться до клетки n ?

Кузнечик — ямы

- В некоторых клетках — ямы, туда попадать нельзя.
- За какое минимальное число прыжков кузнечик может добраться до клетки n ?

Обобщим задачу: для каждой клетки k выясним, за какое минимальное число прыжков кузнечик может до неё добраться.

- База: $f(1) = 0$.
- Пересчёт: $f(k) = 1 + \min(f(k - a), f(k - b), f(k - c))$.
- Если $h_k = \text{true}$ (hole, яма в клетке k), то пусть $f(k) = \infty$.

Кузнечик — ямы

- В некоторых клетках — ямы, туда попадать нельзя.
- За какое минимальное число прыжков кузнечик может добраться до клетки n ?

Псевдокод:

```
f[1] := 0
for k := 2, ..., n:
  f[k] := infinity
  if not h[k]:
    if k > a: f[k] := min (f[k], 1 + f[k - a])
    if k > b: f[k] := min (f[k], 1 + f[k - b])
    if k > c: f[k] := min (f[k], 1 + f[k - c])
```

Кузнечик — сок

- Есть лента из клеток, по которой прыгает кузнечик.
- Он начинает в клетке 1.
- Из любой клетки x он может прыгнуть в клетки $x + a$, $x + b$ и $x + c$.
- В некоторых клетках — ямы, туда попадать нельзя.
- В каждой клетке есть неотрицательное количество сока.
- За какое минимальное число прыжков кузнечик может добраться до клетки n ?
- Из всех таких маршрутов выберите тот, на котором кузнечик соберёт как можно больше сока.

Кузнечик — сок

- В некоторых клетках — ямы, туда попадать нельзя.
- В каждой клетке есть неотрицательное количество сока.
- За какое минимальное число прыжков кузнечик может добраться до клетки n ?
- Из всех таких маршрутов выберите тот, на котором кузнечик соберёт как можно больше сока.

Обобщим задачу. Для каждой клетки k найдём пару: минимальное количество прыжков до неё, максимальное количество сока при таком количестве прыжков.

- База: $f(1) = \{0, j_1\}$; пусть j_k (juice) — количество сока в клетке k .
- Пересчёт: $f(k) = \{1, j_k\} + \text{best}(f(k-a), f(k-b), f(k-c))$.
- Если $h_k = \text{true}$ (hole, яма в клетке k), то пусть $f(k) = \{\infty, 0\}$.

Кузнечик — сок

- В некоторых клетках — ямы, туда попадать нельзя.
- В каждой клетке есть неотрицательное количество сока.
- За какое минимальное число прыжков кузнечик может добраться до клетки n ?
- Из всех таких маршрутов выберите тот, на котором кузнечик соберёт как можно больше сока.

Псевдокод:

```
f[1] := {0, -j[1]}
for k := 2, ..., n:
  f[k] := {infinity, 0}
  if not h[k]:
    if k > a: f[k] := min (f[k], {1, -j[k]} + f[k - a])
    if k > b: f[k] := min (f[k], {1, -j[k]} + f[k - b])
    if k > c: f[k] := min (f[k], {1, -j[k]} + f[k - c])
```

Содержание

1 Одномерные задачи

- Числа Фибоначчи
- Лестница
- Динамика и индукция
- Анти-лестница
- Кузнечик
- Восстановление ответа

2 Двумерные задачи

- Число сочетаний
- Наибольшая общая подпоследовательность
- Редакционное расстояние
- Строка и шаблон
- Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Восстановление ответа

- Есть лента из клеток, по которой прыгает кузнечик.
- Он начинает в клетке 1.
- Из любой клетки x он может прыгнуть в клетки $x + a$, $x + b$ и $x + c$.
- В некоторых клетках — ямы, туда попадать нельзя.
- За какое минимальное число прыжков кузнечик может добраться до клетки n ?
- Как именно нужно прыгать кузнечику для этого?

Восстановление ответа

- В некоторых клетках — ямы, туда попадать нельзя.
- За какое минимальное число прыжков кузнечик может добраться до клетки n ?
- Как именно нужно прыгать кузнечику для этого?

Обобщим задачу: для каждой клетки k выясним, за какое минимальное число прыжков кузнечик может до неё добраться.

- База: $f(1) = 0$.
- Пересчёт: $f(k) = 1 + \min(f(k - a), f(k - b), f(k - c))$.

Восстановление ответа

- В некоторых клетках — ямы, туда попадать нельзя.
- За какое минимальное число прыжков кузнечик может добраться до клетки n ?
- Как именно нужно прыгать кузнечику для этого?

Псевдокод:

```
f[1] := 0
for k := 2, ..., n:
  f[k] := infinity
  if not h[k]:
    if k > a: f[k] := min (f[k], 1 + f[k - a])
    if k > b: f[k] := min (f[k], 1 + f[k - b])
    if k > c: f[k] := min (f[k], 1 + f[k - c])
```

Восстановление ответа — обратные рёбра

Будем восстанавливать путь с конца: стоя в клетке x , смотреть, из какой клетки могло получиться значение $f(x)$.

Восстановление ответа — обратные рёбра

Будем восстанавливать путь с конца: стоя в клетке x , смотреть, из какой клетки могло получиться значение $f(x)$.



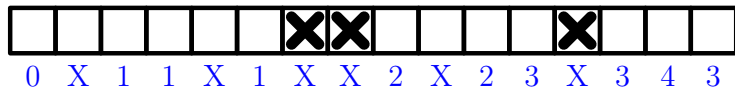
Псевдокод:

```

x := n
steps.add (x)
while x > 1:
    if x > a and f[x] = 1 + f[x - a]: x -= a
    else if x > b and f[x] = 1 + f[x - b]: x -= b
    else if x > c and f[x] = 1 + f[x - c]: x -= c
    steps.add (x)
reverse (steps)
  
```

Восстановление ответа — обратные рёбра

Будем восстанавливать путь с конца: стоя в клетке x , смотреть, из какой клетки могло получиться значение $f(x)$.



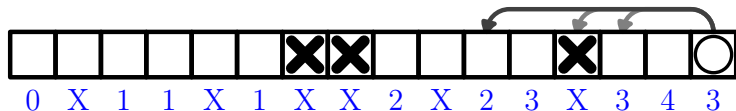
Псевдокод:

```

x := n
steps.add (x)
while x > 1:
    if x > a and f[x] = 1 + f[x - a]: x -= a
    else if x > b and f[x] = 1 + f[x - b]: x -= b
    else if x > c and f[x] = 1 + f[x - c]: x -= c
    steps.add (x)
reverse (steps)
  
```

Восстановление ответа — обратные рёбра

Будем восстанавливать путь с конца: стоя в клетке x , смотреть, из какой клетки могло получиться значение $f(x)$.



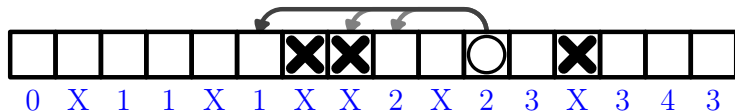
Псевдокод:

```

x := n
steps.add (x)
while x > 1:
    if x > a and f[x] = 1 + f[x - a]: x -= a
    else if x > b and f[x] = 1 + f[x - b]: x -= b
    else if x > c and f[x] = 1 + f[x - c]: x -= c
    steps.add (x)
reverse (steps)
  
```

Восстановление ответа — обратные рёбра

Будем восстанавливать путь с конца: стоя в клетке x , смотреть, из какой клетки могло получиться значение $f(x)$.



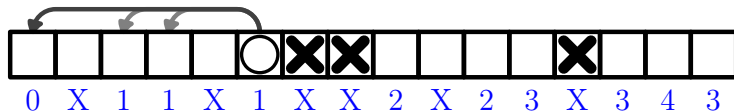
Псевдокод:

```

x := n
steps.add (x)
while x > 1:
    if x > a and f[x] = 1 + f[x - a]: x -= a
    else if x > b and f[x] = 1 + f[x - b]: x -= b
    else if x > c and f[x] = 1 + f[x - c]: x -= c
    steps.add (x)
reverse (steps)
  
```

Восстановление ответа — обратные рёбра

Будем восстанавливать путь с конца: стоя в клетке x , смотреть, из какой клетки могло получиться значение $f(x)$.



Псевдокод:

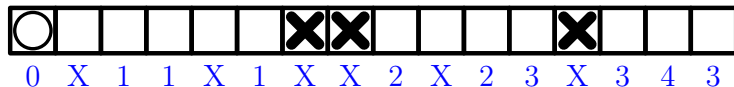
```

x := n
steps.add (x)
while x > 1:
    if x > a and f[x] = 1 + f[x - a]: x -= a
    else if x > b and f[x] = 1 + f[x - b]: x -= b
    else if x > c and f[x] = 1 + f[x - c]: x -= c
    steps.add (x)
reverse (steps)

```

Восстановление ответа — обратные рёбра

Будем восстанавливать путь с конца: стоя в клетке x , смотреть, из какой клетки могло получиться значение $f(x)$.



Псевдокод:

```

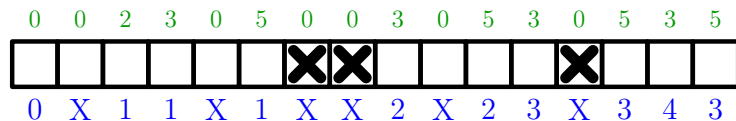
x := n
steps.add (x)
while x > 1:
    if x > a and f[x] = 1 + f[x - a]: x -= a
    else if x > b and f[x] = 1 + f[x - b]: x -= b
    else if x > c and f[x] = 1 + f[x - c]: x -= c
    steps.add (x)
reverse (steps)
  
```

Восстановление ответа — хранение предков

Для каждой клетки k не только выясним, за какое минимальное число прыжков кузнечик может до неё добраться, но и заппомним, каким прыжком он туда попал.

Восстановление ответа — хранение предков

Для каждой клетки k не только выясним, за какое минимальное число прыжков кузнечик может до неё добраться, но и заппомним, каким прыжком он туда попал.



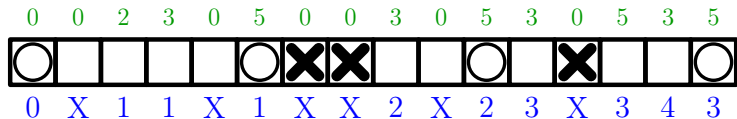
Псевдокод:

```

f[1] := 0
for k := 2, ..., n:
  f[k] := infinity
  if not h[k]:
    if k > a and f[k] > 1 + f[k - a]:
      p[k] := a, f[k] := 1 + f[k - a]
    if k > b and f[k] > 1 + f[k - b]:
      p[k] := b, f[k] := 1 + f[k - b]
    if k > c and f[k] > 1 + f[k - c]:
      p[k] := c, f[k] := 1 + f[k - c]
  
```

Восстановление ответа — хранение предков

Для каждой клетки k не только выясним, за какое минимальное число прыжков кузнечик может до неё добраться, но и заппомним, каким прыжком он туда попал.



Будем восстанавливать путь с конца: стоя в клетке x , сдвигаться назад на величину прыжка p_x .

Псевдокод:

```

x := n
steps.add (x)
while x > 1:
    x -= p[x]
    steps.add (x)
reverse (steps)
  
```

Содержание

1 Одномерные задачи

- Числа Фибоначчи
- Лестница
- Динамика и индукция
- Анти-лестница
- Кузнечик
- Восстановление ответа

2 Двумерные задачи

- **Число сочетаний**
- Наибольшая общая подпоследовательность
- Редакционное расстояние
- Строка и шаблон
- Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Число сочетаний

Постановка задачи:

- Есть n различных объектов.
- Выбираем из них k различных (порядок не важен).
- Сколько способов это сделать? Обозначим как C_n^k .

Объекты можно просто пронумеровать числами от 1 до n .

Пример: $n = 4$, $k = 2$. Получаем $C_4^2 = 6$.

1	2	3	4	Сочетание
1	2	3	4	1, 2
1	2	3	4	1, 3
1	2	3	4	1, 4
1	2	3	4	2, 3
1	2	3	4	2, 4
1	2	3	4	3, 4

Число сочетаний

Постановка задачи:

- Есть n различных объектов.
- Выбираем из них k различных (порядок не важен).
- Сколько способов это сделать? Обозначим как C_n^k .

Объекты можно просто пронумеровать числами от 1 до n .

Пример: $n = 4$, $k = 2$. Получаем $C_4^2 = 6$.

1	2	3	4	Сочетание
1	2	3	4	1, 2
1	2	3	4	1, 3
1	2	3	4	1, 4
1	2	3	4	2, 3
1	2	3	4	2, 4
1	2	3	4	3, 4

Число сочетаний

Вычисление C_n^k – комбинаторное решение:

- Выбираем первый объект n способами.
- Выбираем второй объект из оставшихся $n - 1$ способом.
- ...
- Выбираем k -й объект из оставшихся $n - k + 1$ способом.
- Каждое сочетание получилось $k!$ раз в различных порядках.
- Поэтому поделим ответ на $k! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots k$.

Получаем, что

$$\begin{aligned} C_n^k &= \frac{n \cdot (n - 1) \cdots (n - k + 1)}{1 \cdot 2 \cdots k} \\ &= \frac{1 \cdot 2 \cdots (n - k)}{1 \cdot 2 \cdots (n - k)} \times \frac{(n - k + 1) \cdot (n - k + 2) \cdots n}{1 \cdot 2 \cdots k} \\ &= \frac{n!}{k! \times (n - k)!}. \end{aligned}$$

Число сочетаний

Вычисление C_n^k – комбинаторное решение:

- Выбираем первый объект n способами.
- Выбираем второй объект из оставшихся $n - 1$ способом.
- ...
- Выбираем k -й объект из оставшихся $n - k + 1$ способом.
- Каждое сочетание получилось $k!$ раз в различных порядках.
- Поэтому поделим ответ на $k! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot k$.

Итоговая формула:

$$C_n^k = \frac{n!}{k! \times (n - k)!}$$

Пример: $n = 4$, $k = 2$. Получаем

$$C_4^2 = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4}{1 \cdot 2 \times 1 \cdot 2} = \frac{24}{4} = 6.$$

Число сочетаний

Вычисление C_n^k — сведение к подзадачам:

- Рассмотрим объект с номером n .
- Если мы выберем его, из $n - 1$ оставшегося объекта нужно будет выбрать ещё $k - 1$.
- Если мы не выберем его, из $n - 1$ оставшегося объекта нужно будет выбрать ещё k .

Получаем, что

$$C_n^k = C_{n-1}^{k-1} + C_{n-1}^k.$$

База: $C_0^0 = 1$, $C_n^k = 0$ при $k < 0$ или $k > n$.

Пример: $n = 4$, $k = 2$. Получаем $C_4^2 = 6$.

Число сочетаний

$n \setminus k$	-1	0	1	2	3	4
0	0	1	0	0	0	0
1	0	?	?	0	0	0
2	0	?	?	?	0	0
3	0	?	?	?	?	0
4	0	?	?	?	?	?

Получаем, что

$$C_n^k = C_{n-1}^{k-1} + C_{n-1}^k.$$

База: $C_0^0 = 1$, $C_n^k = 0$ при $k < 0$ или $k > n$.

Пример: $n = 4$, $k = 2$. Получаем $C_4^2 = 6$.

Число сочетаний

$n \setminus k$	-1	0	1	2	3	4
0	0	1	0	0	0	0
1	0	1	1	0	0	0
2	0	1	2	1	0	0
3	0	1	3	3	1	0
4	0	1	4	6	4	1

Получаем, что

$$C_n^k = C_{n-1}^{k-1} + C_{n-1}^k.$$

База: $C_0^0 = 1$, $C_n^k = 0$ при $k < 0$ или $k > n$.

Пример: $n = 4$, $k = 2$. Получаем $C_4^2 = 6$.

Число сочетаний

n \ k	-1	0	1	2	3	4
0	0	1	0	0	0	0
1	0	1	1	0	0	0
2	0	1	2	1	0	0
3	0	1	3	3	1	0
4	0	1	4	6	4	1

Получаем, что

$$C_n^k = C_{n-1}^{k-1} + C_{n-1}^k.$$

База: $C_0^0 = 1$, $C_n^k = 0$ при $k < 0$ или $k > n$.

Пример: $n = 4$, $k = 2$. Получаем $C_4^2 = 6$.

Число сочетаний

n \ k	-1	0	1	2	3	4
0	0	1	0	0	0	0
1	0	1	1	0	0	0
2	0	1	2	1	0	0
3	0	1	3	3	1	0
4	0	1	4	6	4	1

Псевдокод:

```
for n := 0, ..., maxN:  
  c[n][0] := 1  
  for k := 1, ..., n:  
    c[n][k] := c[n - 1][k - 1] + c[n - 1][k]
```

Содержание

1 Одномерные задачи

- Числа Фибоначчи
- Лестница
- Динамика и индукция
- Анти-лестница
- Кузнечик
- Восстановление ответа

2 Двумерные задачи

- Число сочетаний
- **Наибольшая общая подпоследовательность**
- Редакционное расстояние
- Строка и шаблон
- Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наибольшая общая подпоследовательность

Определения:

- Подпоследовательность последовательности p_1, p_2, \dots, p_k (будем обозначать как $p_{1..k}$) — это последовательность $p_{i_1}, p_{i_2}, \dots, p_{i_r}$ для индексов $1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_r \leq k$.
- Общая подпоследовательность $a_{1..m}$ и $b_{1..n}$ — это последовательность, являющаяся подпоследовательностью и для a , и для b .

Постановка задачи:

- Есть две последовательности $a_{1..m}$ и $b_{1..n}$.
- Требуется найти общую подпоследовательность максимальной длины.

Из чего именно состоят последовательности — не важно.

Мы будем рассматривать последовательности целых чисел.

Наибольшая общая подпоследовательность

Пример:

- $a = (1, 2, 4, 6, 3), m = 5$
- $b = (5, 1, 4, 2, 6, 3, 2), n = 7$

Наибольшая общая подпоследовательность

Пример:

- $a = (1, 2, 4, 6, 3)$, $m = 5$
- $b = (5, 1, 4, 2, 6, 3, 2)$, $n = 7$
- Наибольшая общая подпоследовательность:

$p = (1, 2, 6, 3)$, её длина равна 4.

Как подпоследовательность a : $p = (a_1, a_2, a_4, a_5)$.

Как подпоследовательность b : $p = (b_2, b_4, b_5, b_6)$.

Наибольшая общая подпоследовательность

Пример:

- $a = (1, 2, 4, 6, 3)$, $m = 5$
- $b = (5, 1, 4, 2, 6, 3, 2)$, $n = 7$
- Наибольшая общая подпоследовательность:
 $p = (1, 2, 6, 3)$, её длина равна 4.
Как подпоследовательность a : $p = (a_1, a_2, a_4, a_5)$.
Как подпоследовательность b : $p = (b_2, b_4, b_5, b_6)$.
- Другой оптимальный ответ:
 $q = (1, 4, 6, 3)$, её длина также равна 4.
Как подпоследовательность a : $q = (a_1, a_3, a_4, a_5)$.
Как подпоследовательность b : $q = (b_2, b_3, b_5, b_6)$.

Наибольшая общая подпоследовательность

Сводим к следующим подзадачам:

- Даны префиксы последовательностей a и b : $a_{1..i}$ и $b_{1..j}$.
- Найдём их наибольшую общую подпоследовательность.

Решение подзадачи для $a_{1..i}$ и $b_{1..j}$:

- Пусть оптимальное решение непусто (иначе всё очевидно).
- Рассмотрим последнее число в нём.
- Это число равно какому-то a_x ($1 \leq x \leq i$).
- Это число также равно какому-то b_y ($1 \leq y \leq j$).
- Значит, для получения оптимального решения нужно решить подзадачу для префиксов $a_{1..x-1}$ и $b_{1..y-1}$ и приписать к полученному решению это число (оно равно a_x и b_y).
- Если пар (x, y) несколько, ...

Наибольшая общая подпоследовательность

Сводим к следующим подзадачам:

- Даны префиксы последовательностей a и b : $a_{1..i}$ и $b_{1..j}$.
- Найдём их наибольшую общую подпоследовательность.

Решение подзадачи для $a_{1..i}$ и $b_{1..j}$:

- Пусть оптимальное решение непусто (иначе всё очевидно).
- Рассмотрим последнее число в нём.
- Это число равно какому-то a_x ($1 \leq x \leq i$).
- Это число также равно какому-то b_y ($1 \leq y \leq j$).
- Значит, для получения оптимального решения нужно решить подзадачу для префиксов $a_{1..x-1}$ и $b_{1..y-1}$ и приписать к полученному решению это число (оно равно a_x и b_y).
- Если пар (x, y) несколько, ...

Наибольшая общая подпоследовательность

Сводим к следующим подзадачам:

- Даны префиксы последовательностей a и b : $a_{1..i}$ и $b_{1..j}$.
- Найдём их наибольшую общую подпоследовательность.

Решение подзадачи для $a_{1..i}$ и $b_{1..j}$:

- Пусть оптимальное решение непусто (иначе всё очевидно).
- Рассмотрим последнее число в нём.
- Это число равно какому-то a_x ($1 \leq x \leq i$).
- Это число также равно какому-то b_y ($1 \leq y \leq j$).
- Значит, для получения оптимального решения нужно решить подзадачу для префиксов $a_{1..x-1}$ и $b_{1..y-1}$ и приписать к полученному решению это число (оно равно a_x и b_y).
- Если пар (x, y) несколько, найдём лучшее из решений для всех таких пар.

Наибольшая общая подпоследовательность

Сводим к следующим подзадачам:

- Даны префиксы последовательностей a и b : $a_{1..i}$ и $b_{1..j}$.
- Найдём их наибольшую общую подпоследовательность.

Решение подзадачи для $a_{1..i}$ и $b_{1..j}$:

- Пусть оптимальное решение непусто (иначе всё очевидно).
- Рассмотрим последнее число в нём.
- Это число равно какому-то a_x ($1 \leq x \leq i$).
- Это число также равно какому-то b_y ($1 \leq y \leq j$).
- Значит, для получения оптимального решения нужно решить подзадачу для префиксов $a_{1..x-1}$ и $b_{1..y-1}$ и приписать к полученному решению это число (оно равно a_x и b_y).
- Если пар (x, y) несколько, можно рассматривать только максимальные x и y .

Наибольшая общая подпоследовательность

	b_j		5	1	4	2	6	3	2
a_i	$i \setminus j$	0	1	2	3	4	5	6	7
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	2	0	0	2
4	3	0	0	0	2	0	0	0	0
6	4	0	0	0	0	0	3	0	0
3	5	0	0	0	0	0	0	4	0

Пример:

- $a = (1, 2, 4, 6, 3), m = 5$
- $b = (5, 1, 4, 2, 6, 3, 2), n = 7$

Наибольшая общая подпоследовательность

	b_j		5	1	4	2	6	3	2
a_i	$i \setminus j$	0	1	2	3	4	5	6	7
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	2	0	0	2
4	3	0	0	0	2	0	0	0	0
6	4	0	0	0	0	0	3	0	0
3	5	0	0	0	0	0	0	4	0

- $f(i, j)$ — ответ для $a_{1..i}$ и $b_{1..j}$ при условии, что $a_i = b_j$
- База: $f(i, 0) = f(0, j) = 0$
- Ответ: $\max_{i=0..m} \max_{j=0..n} f(i, j)$
- Асимптотика: $O(m^2n^2)$ времени, $O(mn)$ памяти

Наибольшая общая подпоследовательность

	b_j		5	1	4	2	6	3	2
a_i	$i \setminus j$	0	1	2	3	4	5	6	7
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	2	0	0	2
4	3	0	0	0	2	0	0	0	0
6	4	0	0	0	0	0	3	0	0
3	5	0	0	0	0	0	0	4	0

```

for i := 1, ..., m:
  for j := 1, ..., n:
    if a[i] = b[j]:
      for u := 0, ..., i - 1:
        for v := 0, ..., j - 1:
          f[i][j] := max (f[i][j], f[u][v] + 1)
  
```

Наибольшая общая подпоследовательность

	b_j		5	1	4	2	6	3	2
a_i	$i \setminus j$	0	1	2	3	4	5	6	7
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
2	2	0	0	1	1	2	2	2	2
4	3	0	0	1	2	2	2	2	2
6	4	0	0	1	2	2	3	3	3
3	5	0	0	1	2	2	3	4	4

Пример:

- $a = (1, 2, 4, 6, 3), m = 5$
- $b = (5, 1, 4, 2, 6, 3, 2), n = 7$

Наибольшая общая подпоследовательность

	b_j		5	1	4	2	6	3	2
a_i	$i \setminus j$	0	1	2	3	4	5	6	7
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
2	2	0	0	1	1	2	2	2	2
4	3	0	0	1	2	2	2	2	2
6	4	0	0	1	2	2	3	3	3
3	5	0	0	1	2	2	3	4	4

- $g(i, j)$ – лучший из ответов в прямоугольнике $[0..i] \times [0..j]$
- База: $g(i, 0) = g(0, j) = 0$
- Ответ: $g(m, n)$
- Асимптотика: $O(m^2n^2)$ времени (???), $O(mn)$ памяти

Наибольшая общая подпоследовательность

	b_j		5	1	4	2	6	3	2
a_i	$i \setminus j$	0	1	2	3	4	5	6	7
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
2	2	0	0	1	1	2	2	2	2
4	3	0	0	1	2	2	2	2	2
6	4	0	0	1	2	2	3	3	3
3	5	0	0	1	2	2	3	4	4

- $g(i, j)$ — лучший из ответов в прямоугольнике $[0..i] \times [0..j]$
- Все решения, в которых последнее число не является одновременно a_i и b_j , уже учтены либо в прямоугольнике $[0..i] \times [0..j - 1]$, либо в прямоугольнике $[0..i - 1] \times [0..j]$
- Асимптотика: $O(mn)$ времени, $O(mn)$ памяти

Наибольшая общая подпоследовательность

	b_j		5	1	4	2	6	3	2
a_i	$i \setminus j$	0	1	2	3	4	5	6	7
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
2	2	0	0	1	1	2	2	2	2
4	3	0	0	1	2	2	2	2	2
6	4	0	0	1	2	2	3	3	3
3	5	0	0	1	2	2	3	4	4

```

for i := 1, ..., m:
  for j := 1, ..., n:
    g[i][j] := max (g[i][j - 1], g[i - 1][j])
    if a[i] = b[j]:
      g[i][j] := max (g[i][j], g[i - 1][j - 1] + 1)
  
```

Содержание

1 Одномерные задачи

- Числа Фибоначчи
- Лестница
- Динамика и индукция
- Анти-лестница
- Кузнечик
- Восстановление ответа

2 Двумерные задачи

- Число сочетаний
- Наибольшая общая подпоследовательность
- Редакционное расстояние
- Строка и шаблон
- Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Редакционное расстояние

Определение:

- Редакционное расстояние (или расстояние Левенштейна) $d(s, t)$ между двумя строками s и t — это минимальное количество добавлений, удалений и замен символов, которые нужно сделать с s , чтобы получить t .

Пример:

- $d(\text{gets}, \text{goat}) = 3$: $\text{gets} \xrightarrow{-s} \text{get} \xrightarrow{e \rightarrow o} \text{got} \xrightarrow{+a} \text{goat}$.
Другой способ: $\text{gets} \xrightarrow{e \rightarrow o} \text{gots} \xrightarrow{t \rightarrow a} \text{goas} \xrightarrow{s \rightarrow t} \text{goat}$.

Постановка задачи:

- По двум данным строкам требуется найти редакционное расстояние между ними.

Замечание:

- Строки s и t равноправны: к каждому действию есть обратное. Если выполнить обратные действия в обратном порядке, из t получится s .

Редакционное расстояние

Сводим к следующим подзадачам:

- Даны префиксы (начала) строк s и t : $s_{1..i}$ (префикс строки s длины i) и $t_{1..j}$ (префикс строки t длины j).
- Найдём редакционное расстояние между ними.

Решение подзадачи для $s_{1..i}$ и $t_{1..j}$:

- Если $s_i = t_j$, перейдём к решению подзадачи для $s_{1..i-1}$ и $t_{1..j-1}$.
- В противном случае оптимальная последовательность действий непуста, и либо с s_i , либо с t_j случилось хотя бы одно действие.
- Рассмотрим какое-нибудь из этих действий.
- Если это удаление, то это удаление символа s_i . Делаем его и переходим к подзадаче для $s_{1..i-1}$ и $t_{1..j}$.
- Если это добавление, то это добавление символа t_j . Делаем его и переходим к подзадаче для $s_{1..i}$ и $t_{1..j-1}$.
- Если это замена, то это замена символа s_i на символ t_j . Делаем её и переходим к подзадаче для $s_{1..i-1}$ и $t_{1..j-1}$.

Редакционное расстояние

Сводим к следующим подзадачам:

- Даны префиксы (начала) строк s и t : $s_{1..i}$ (префикс строки s длины i) и $t_{1..j}$ (префикс строки t длины j).
- Найдём редакционное расстояние между ними.

Решение подзадачи для $s_{1..i}$ и $t_{1..j}$:

- Если $s_i = t_j$, перейдём к решению подзадачи для $s_{1..i-1}$ и $t_{1..j-1}$.
- В противном случае оптимальная последовательность действий непуста, и либо с s_i , либо с t_j случилось хотя бы одно действие.
- Рассмотрим какое-нибудь из этих действий.
- Если это удаление, то это удаление символа s_i . Делаем его и переходим к подзадаче для $s_{1..i-1}$ и $t_{1..j}$.
- Если это добавление, то это добавление символа t_j . Делаем его и переходим к подзадаче для $s_{1..i}$ и $t_{1..j-1}$.
- Если это замена, то это замена символа s_i на символ t_j . Делаем её и переходим к подзадаче для $s_{1..i-1}$ и $t_{1..j-1}$.

Редакционное расстояние

Сводим к следующим подзадачам:

- Даны префиксы (начала) строк s и t : $s_{1..i}$ (префикс строки s длины i) и $t_{1..j}$ (префикс строки t длины j).
- Найдём редакционное расстояние между ними.

Решение подзадачи для $s_{1..i}$ и $t_{1..j}$:

- Если $s_i = t_j$, перейдём к решению подзадачи для $s_{1..i-1}$ и $t_{1..j-1}$.
- В противном случае оптимальная последовательность действий непуста, и либо с s_i , либо с t_j случилось хотя бы одно действие.
- Рассмотрим какое-нибудь из этих действий.
- Если это удаление, то это удаление символа s_i . Делаем его и переходим к подзадаче для $s_{1..i-1}$ и $t_{1..j}$.
- Если это добавление, то это добавление символа t_j . Делаем его и переходим к подзадаче для $s_{1..i}$ и $t_{1..j-1}$.
- Если это замена, то это замена символа s_i на символ t_j . Делаем её и переходим к подзадаче для $s_{1..i-1}$ и $t_{1..j-1}$.

Редакционное расстояние

Пример:

- $s = \text{gets}$
- $t = \text{goat}$

	t_j		g	o	a	t
s_i	$i \setminus j$	0	1	2	3	4
	0	0	1	2	3	4
g	1	1	0	1	2	3
e	2	2	1	1	2	3
t	3	3	2	2	2	2
s	4	4	3	3	3	3

- База: $d(i, 0) = i$, $d(0, j) = j$
- Ответ: $d(m, n)$, где m — длина строки s , а n — длина строки t
- Асимптотика: $O(mn)$ времени, $O(mn)$ памяти

Редакционное расстояние

Пример:

- $s = \text{gets}$
- $t = \text{goat}$

	t_j		g	o	a	t
s_i	$i \setminus j$	0	1	2	3	4
	0	0	1	2	3	4
g	1	1	0	1	2	3
e	2	2	1	1	2	3
t	3	3	2	2	2	2
s	4	4	3	3	3	3

Псевдокод:

```

for i := 1, ..., m:
  for j := 1, ..., n:
    if s[i] = t[j]:
      d[i][j] := d[i - 1][j - 1]
    else:
      d[i][j] := 1 + min (d[i - 1][j      ],
                          d[i - 1][j - 1],
                          d[i      ][j - 1])
  
```

Содержание

1 Одномерные задачи

- Числа Фибоначчи
- Лестница
- Динамика и индукция
- Анти-лестница
- Кузнечик
- Восстановление ответа

2 Двумерные задачи

- Число сочетаний
- Наибольшая общая подпоследовательность
- Редакционное расстояние
- Строка и шаблон
- Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Строка и шаблон

Определения:

- Шаблон — это строка, которая может содержать специальные символы '?' и '*'.
- Обычному символу шаблона можно поставить в соответствие ровно один такой же символ строки.
- Специальному символу '?' можно поставить в соответствие ровно один любой символ строки.
- Специальному символу '*' можно поставить в соответствие любую (в том числе и пустую) последовательность любых символов строки.
- Строка s длины m соответствует шаблону p длины n , если она разбивается на n частей так, что i -я часть строки соответствует i -му символу шаблона.

Строка и шаблон

Постановка задачи:

- По данным s и p нужно определить, соответствует ли строка s шаблону p .

Пример:

- $s = \text{button}$, $p = ?u*t*n$

- Соответствие:

```
b u t t o n
? u * t * n
```

- Другой способ:

```
b u      t t o n
? u * t * n
```

Строка и шаблон

Сводим к следующим подзадачам:

- Даны префиксы (начала) строки s и шаблона t : $s_{1..i}$ (префикс строки s длины i) и $p_{1..j}$ (префикс шаблона p длины j).
- Выясним, есть ли между ними соответствие.

Решение подзадачи для $s_{1..i}$ и $p_{1..j}$:

- Если p_j – обычный символ, сравним его с s_i и в случае равенства перейдём к решению подзадачи для $s_{1..i-1}$ и $p_{1..j-1}$.
- Если $p_j = ?$, перейдём к решению подзадачи для $s_{1..i-1}$ и $p_{1..j-1}$.
- Если $p_j = *$, соответствие есть тогда и только тогда, когда соответствие есть хотя бы в одной из подзадач для $s_{1..k}$ и $p_{1..j-1}$ при $0 \leq k \leq i$.

Замечание:

- Чтобы база была простой, допишем к обеим строкам спереди одинаковый специальный символ, например, #.

Строка и шаблон

Сводим к следующим подзадачам:

- Даны префиксы (начала) строки s и шаблона t : $s_{1..i}$ (префикс строки s длины i) и $p_{1..j}$ (префикс шаблона p длины j).
- Выясним, есть ли между ними соответствие.

Решение подзадачи для $s_{1..i}$ и $p_{1..j}$:

- Если p_j — обычный символ, сравним его с s_i и в случае равенства перейдём к решению подзадачи для $s_{1..i-1}$ и $p_{1..j-1}$.
- Если $p_j = ?$, перейдём к решению подзадачи для $s_{1..i-1}$ и $p_{1..j-1}$.
- Если $p_j = *$, соответствие есть тогда и только тогда, когда соответствие есть хотя бы в одной из подзадач для $s_{1..k}$ и $p_{1..j-1}$ при $0 \leq k \leq i$.

Замечание:

- Чтобы база была простой, допишем к обеим строкам спереди одинаковый специальный символ, например, #.

Строка и шаблон

	s_i	#	b	u	t	t	o	n
p_j	$j \setminus i$	1	2	3	4	5	6	7
#	1	1	0	0	0	0	0	0
?	2	0	1	0	0	0	0	0
u	3	0	0	1	0	0	0	0
*	4	0	0	1	1	1	1	1
t	5	0	0	0	1	1	0	0
*	6	0	0	0	1	1	1	1
n	7	0	0	0	0	0	0	1

- База: $f(0, 0) = 1$, $f(i, 0) = 0$ при $i > 0$, $f(0, j) = 0$ при $j > 0$
- Ответ: $f(m, n)$
- Асимптотика: $O(m^2n)$ времени (???), $O(mn)$ памяти

Строка и шаблон

Псевдокод:

```
for i := 1, ..., m:
  for j := 1, ..., n:
    if p[j] = '*':
      f[i][j] := 0
      for k := 0, ..., i:
        f[i][j] := f[i][j] or f[k][j - 1]
    else if p[j] = '?':
      f[i][j] := f[i - 1][j - 1]
    else:
      f[i][j] := f[i - 1][j - 1] and (s[i] = p[j])
```

- База: $f(0,0) = 1$, $f(i,0) = 0$ при $i > 0$, $f(0,j) = 0$ при $j > 0$
- Ответ: $f(m,n)$
- Асимптотика: $O(m^2n)$ времени (???), $O(mn)$ памяти

Строка и шаблон

	s_i	#	b	u	t	t	o	n
p_j	$j \setminus i$	1	2	3	4	5	6	7
#	1	1	0	0	0	0	0	0
?	2	0	1	0	0	0	0	0
u	3	0	0	1	0	0	0	0
*	4	0	0	1	1	1	1	1
t	5	0	0	0	1	1	0	0
*	6	0	0	0	1	1	1	1
n	7	0	0	0	0	0	0	1

При $p_j = *$:

- $f(i, j) = f(0, j - 1) \vee \dots \vee f(i - 1, j - 1) \vee f(i, j - 1)$
- $f(i - 1, j) = f(0, j - 1) \vee \dots \vee f(i - 1, j - 1)$
- Значит, $f(i, j) = f(i - 1, j) \vee f(i, j - 1)$

Строка и шаблон

Псевдокод:

```
for i := 1, ..., m:
  for j := 1, ..., n:
    if p[j] = '*':
      f[i][j] := f[i - 1][j] or f[i][j - 1]
    else if p[j] = '?':
      f[i][j] := f[i - 1][j - 1]
    else:
      f[i][j] := f[i - 1][j - 1] and (s[i] = p[j])
```

- База: $f(0, 0) = 1$, $f(i, 0) = 0$ при $i > 0$, $f(0, j) = 0$ при $j > 0$
- Ответ: $f(m, n)$
- Асимптотика: $O(mn)$ времени, $O(mn)$ памяти

Содержание

1 Одномерные задачи

- Числа Фибоначчи
- Лестница
- Динамика и индукция
- Анти-лестница
- Кузнечик
- Восстановление ответа

2 Двумерные задачи

- Число сочетаний
- Наибольшая общая подпоследовательность
- Редакционное расстояние
- Строка и шаблон
- **Наибольшая возрастающая подпоследовательность**

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Определения:

- Подпоследовательность последовательности a_1, a_2, \dots, a_n (будем обозначать как $a_{1..n}$) — это последовательность $a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_k}$ для индексов $1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n$.
- Подпоследовательность длины k , для которой выполнено $a_{i_1} < a_{i_2} < \dots < a_{i_k}$, называется возрастающей.

Постановка задачи:

- Есть последовательность $a_{1..n}$.
- Требуется найти её возрастающую подпоследовательность максимальной длины.

Из чего именно состоит последовательность — не важно.

Мы будем рассматривать последовательность целых чисел.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Пример:

- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4, 8, 5)$, $n = 9$.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Пример:

- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4, 8, 5)$, $n = 9$.
- Наибольшая возрастающая подпоследовательность:
 $p = (1, 2, 4, 5)$, её длина равна 4.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Пример:

- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4, 8, 5)$, $n = 9$.
- Наибольшая возрастающая подпоследовательность:
 $p = (1, 2, 4, 5)$, её длина равна 4.
- Другой оптимальный ответ:
 $q = (3, 6, 7, 8)$, её длина также равна 4.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Пример:

- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4, 8, 5)$, $n = 9$.
- Наибольшая возрастающая подпоследовательность:
 $p = (1, 2, 4, 5)$, её длина равна 4.
- Другой оптимальный ответ:
 $q = (3, 6, 7, 8)$, её длина также равна 4.
- Ещё один оптимальный ответ:
 $r = (1, 2, 4, 8)$, её длина также равна 4.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Подзадачи:

- Будем решать задачу на префиксах последовательности.
- Выпишем **все** возрастающие подпоследовательности:

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Подзадачи:

- Будем решать задачу на префиксах последовательности.
- Выпишем **все** возрастающие подпоследовательности:
- $a = (3), n = 1: 3$.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Подзадачи:

- Будем решать задачу на префиксах последовательности.
- Выпишем **все** возрастающие подпоследовательности:
- $a = (3)$, $n = 1$: 3.
- $a = (3, 6)$, $n = 2$: 3, 6; 36.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Подзадачи:

- Будем решать задачу на префиксах последовательности.
- Выпишем **все** возрастающие подпоследовательности:
- $a = (3), n = 1: 3.$
- $a = (3, 6), n = 2: 3, 6; 36.$
- $a = (3, 6, 1), n = 3: 1, 3, 6; 36.$

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Подзадачи:

- Будем решать задачу на префиксах последовательности.
- Выпишем **все** возрастающие подпоследовательности:
- $a = (3)$, $n = 1$: 3.
- $a = (3, 6)$, $n = 2$: 3, 6; 36.
- $a = (3, 6, 1)$, $n = 3$: 1, 3, 6; 36.
- $a = (3, 6, 1, 9)$, $n = 4$: 1, 3, 6, 9; 36, 19, 39, 69; 369.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Подзадачи:

- Будем решать задачу на префиксах последовательности.
- Выпишем **все** возрастающие подпоследовательности:
- $a = (3)$, $n = 1$: 3.
- $a = (3, 6)$, $n = 2$: 3, 6; 36.
- $a = (3, 6, 1)$, $n = 3$: 1, 3, 6; 36.
- $a = (3, 6, 1, 9)$, $n = 4$: 1, 3, 6, 9; 36, 19, 39, 69; 369.
- $a = (3, 6, 1, 9, 7)$, $n = 5$: 1, 3, 6, 7, 9; 36, 17, 37, 67, 19, 39, 69; 367, 369.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Подзадачи:

- Будем решать задачу на префиксах последовательности.
- Выпишем **все** возрастающие подпоследовательности:
- $a = (3)$, $n = 1$: 3.
- $a = (3, 6)$, $n = 2$: 3, 6; 36.
- $a = (3, 6, 1)$, $n = 3$: 1, 3, 6; 36.
- $a = (3, 6, 1, 9)$, $n = 4$: 1, 3, 6, 9; 36, 19, 39, 69; 369.
- $a = (3, 6, 1, 9, 7)$, $n = 5$: 1, 3, 6, 7, 9; 36, 17, 37, 67, 19, 39, 69; 367, 369.
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2)$, $n = 6$: 1, 2, 3, 6, 7, 9; 12, 36, 17, 37, 67, 19, 39, 69; 367, 369.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Подзадачи:

- Будем решать задачу на префиксах последовательности.
- Выпишем **все** возрастающие подпоследовательности:
- $a = (3)$, $n = 1$: 3.
- $a = (3, 6)$, $n = 2$: 3, 6; 36.
- $a = (3, 6, 1)$, $n = 3$: 1, 3, 6; 36.
- $a = (3, 6, 1, 9)$, $n = 4$: 1, 3, 6, 9; 36, 19, 39, 69; 369.
- $a = (3, 6, 1, 9, 7)$, $n = 5$: 1, 3, 6, 7, 9; 36, 17, 37, 67, 19, 39, 69; 367, 369.
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2)$, $n = 6$: 1, 2, 3, 6, 7, 9; 12, 36, 17, 37, 67, 19, 39, 69; 367, 369.
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4)$, $n = 7$: 1, 2, 3, 4, 6, 7, 9; 12, 14, 24, 34, 36, 17, 37, 67, 19, 39, 69; 124, 367, 369.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Подзадачи:

- Будем решать задачу на префиксах последовательности.
- Выпишем **все** возрастающие подпоследовательности:
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4, 8)$, $n = 8$:
1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9;
12, 14, 24, 34, 36, 17, 37, 67, 18, 28, 38, 48, 68, 78, 19, 39, 69;
124, 367, 128, 148, 248, 348, 368, 178, 378, 678, 369;
1248, 3678.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Подзадачи:

- Будем решать задачу на префиксах последовательности.
- Выпишем **все** возрастающие подпоследовательности:
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4, 8)$, $n = 8$:
1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9;
12, 14, 24, 34, 36, 17, 37, 67, 18, 28, 38, 48, 68, 78, 19, 39, 69;
124, 367, 128, 148, 248, 348, 368, 178, 378, 678, 369;
1248, 3678.
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4, 8, 5)$, $n = 9$:
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9;
12, 14, 24, 34, 15, 25, 35, 45, 36, 17, 37, 67, 18, 28, 38, 48, 68,
78, 19, 39, 69;
124, 125, 145, 245, 345, 367, 128, 148, 248, 348, 368, 178, 378,
678, 369;
1245, 1248, 3678.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 1:

- Что нужно помнить про возрастающую подпоследовательность, чтобы достраивать её справа? Только последний элемент.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 1:

- Что нужно помнить про возрастающую подпоследовательность, чтобы достраивать её справа? Только последний элемент.
- $a = (3), n = 1: 3.$

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 1:

- Что нужно помнить про возрастающую подпоследовательность, чтобы достраивать её справа? Только последний элемент.
- $a = (3), n = 1: 3.$
- $a = (3, 6), n = 2: 3, 6; ?6.$

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 1:

- Что нужно помнить про возрастающую подпоследовательность, чтобы достраивать её справа? Только последний элемент.
- $a = (3), n = 1: 3$.
- $a = (3, 6), n = 2: 3, 6; ?6$.
- $a = (3, 6, 1), n = 3: 1, 3, 6; ?6$.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 1:

- Что нужно помнить про возрастающую подпоследовательность, чтобы достраивать её справа? Только последний элемент.
- $a = (3), n = 1$: 3.
- $a = (3, 6), n = 2$: 3, 6; ?6.
- $a = (3, 6, 1), n = 3$: 1, 3, 6; ?6.
- $a = (3, 6, 1, 9), n = 4$: 1, 3, 6, 9; ?6, ?9; ???9.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 1:

- Что нужно помнить про возрастающую подпоследовательность, чтобы достраивать её справа? Только последний элемент.
- $a = (3), n = 1$: 3.
- $a = (3, 6), n = 2$: 3, 6; ?6.
- $a = (3, 6, 1), n = 3$: 1, 3, 6; ?6.
- $a = (3, 6, 1, 9), n = 4$: 1, 3, 6, 9; ?6, ?9; ???9.
- $a = (3, 6, 1, 9, 7), n = 5$: 1, 3, 6, 7, 9; ?6, ??, ?9; ???7, ???9.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 1:

- Что нужно помнить про возрастающую подпоследовательность, чтобы достраивать её справа? Только последний элемент.
- $a = (3), n = 1$: 3.
- $a = (3, 6), n = 2$: 3, 6; ?6.
- $a = (3, 6, 1), n = 3$: 1, 3, 6; ?6.
- $a = (3, 6, 1, 9), n = 4$: 1, 3, 6, 9; ?6, ?9; ???9.
- $a = (3, 6, 1, 9, 7), n = 5$: 1, 3, 6, 7, 9; ?6, ?7, ?9; ???7, ???9.
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2), n = 6$: 1, 2, 3, 6, 7, 9; ?2, ?6, ?7, ?9; ???7, ???9.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 1:

- Что нужно помнить про возрастающую подпоследовательность, чтобы достраивать её справа? Только последний элемент.
- $a = (3)$, $n = 1$: 3.
- $a = (3, 6)$, $n = 2$: 3, 6; ?6.
- $a = (3, 6, 1)$, $n = 3$: 1, 3, 6; ?6.
- $a = (3, 6, 1, 9)$, $n = 4$: 1, 3, 6, 9; ?6, ?9; ??9.
- $a = (3, 6, 1, 9, 7)$, $n = 5$: 1, 3, 6, 7, 9; ?6, ?7, ?9; ???7, ??9.
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2)$, $n = 6$: 1, 2, 3, 6, 7, 9; ?2, ?6, ?7, ?9; ???7, ??9.
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4)$, $n = 7$: 1, 2, 3, 4, 6, 7, 9; ?2, ?4, ?6, ?7, ?9; ???4, ???7, ??9.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 1:

- Что нужно помнить про возрастающую подпоследовательность, чтобы достраивать её справа? Только последний элемент.
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4, 8)$, $n = 8$:
1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9;
?2, ?4, ?6, ?7, ?8, ?9;
??4, ??7, ??8, ??9;
???8.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 1:

- Что нужно помнить про возрастающую подпоследовательность, чтобы достраивать её справа? Только последний элемент.
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4, 8)$, $n = 8$:
1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9;
?2, ?4, ?6, ?7, ?8, ?9;
??4, ??7, ??8, ??9;
???8.
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4, 8, 5)$, $n = 9$:
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9;
?2, ?4, ?5, ?6, ?7, ?8, ?9;
??4, ??5, ??7, ??8, ??9;
???5, ???8.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 2:

- Чем меньше последнее число, тем больше возможностей достроить подпоследовательность справа.
Значит, достаточно помнить минимальное такое число.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 2:

- Чем меньше последнее число, тем больше возможностей достроить подпоследовательность справа.
Значит, достаточно помнить минимальное такое число.
- $a = (3), n = 1: 3$.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 2:

- Чем меньше последнее число, тем больше возможностей достроить подпоследовательность справа.
Значит, достаточно помнить минимальное такое число.
- $a = (3), n = 1: 3$.
- $a = (3, 6), n = 2: 3, 6$.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 2:

- Чем меньше последнее число, тем больше возможностей достроить подпоследовательность справа.
Значит, достаточно помнить минимальное такое число.
- $a = (3), n = 1: 3.$
- $a = (3, 6), n = 2: 3, ?6.$
- $a = (3, 6, 1), n = 3: 1, ?6.$

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 2:

- Чем меньше последнее число, тем больше возможностей достроить подпоследовательность справа.
Значит, достаточно помнить минимальное такое число.
- $a = (3), n = 1: 3$.
- $a = (3, 6), n = 2: 3, ?6$.
- $a = (3, 6, 1), n = 3: 1, ?6$.
- $a = (3, 6, 1, 9), n = 4: 1, ?6, ??9$.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 2:

- Чем меньше последнее число, тем больше возможностей достроить подпоследовательность справа.
Значит, достаточно помнить минимальное такое число.
- $a = (3), n = 1: 3.$
- $a = (3, 6), n = 2: 3, ?6.$
- $a = (3, 6, 1), n = 3: 1, ?6.$
- $a = (3, 6, 1, 9), n = 4: 1, ?6, ??9.$
- $a = (3, 6, 1, 9, 7), n = 5: 1, ?6, ???7.$

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 2:

- Чем меньше последнее число, тем больше возможностей достроить подпоследовательность справа.
Значит, достаточно помнить минимальное такое число.
- $a = (3), n = 1: 3.$
- $a = (3, 6), n = 2: 3, ?6.$
- $a = (3, 6, 1), n = 3: 1, ?6.$
- $a = (3, 6, 1, 9), n = 4: 1, ?6, ??9.$
- $a = (3, 6, 1, 9, 7), n = 5: 1, ?6, ???7.$
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2), n = 6: 1, ?2, ???7.$

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 2:

- Чем меньше последнее число, тем больше возможностей достроить подпоследовательность справа.
Значит, достаточно помнить минимальное такое число.
- $a = (3), n = 1: 3.$
- $a = (3, 6), n = 2: 3, ?6.$
- $a = (3, 6, 1), n = 3: 1, ?6.$
- $a = (3, 6, 1, 9), n = 4: 1, ?6, ??9.$
- $a = (3, 6, 1, 9, 7), n = 5: 1, ?6, ???7.$
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2), n = 6: 1, ?2, ???7.$
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4), n = 7: 1, ?2, ???4.$

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 2:

- Чем меньше последнее число, тем больше возможностей достроить подпоследовательность справа.
Значит, достаточно помнить минимальное такое число.
- $a = (3), n = 1: 3.$
- $a = (3, 6), n = 2: 3, ?6.$
- $a = (3, 6, 1), n = 3: 1, ?6.$
- $a = (3, 6, 1, 9), n = 4: 1, ?6, ??9.$
- $a = (3, 6, 1, 9, 7), n = 5: 1, ?6, ???7.$
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2), n = 6: 1, ?2, ???7.$
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4), n = 7: 1, ?2, ???4.$
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4, 8), n = 8: 1, ?2, ???4, ???8.$

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Наблюдение 2:

- Чем меньше последнее число, тем больше возможностей достроить подпоследовательность справа.
Значит, достаточно помнить минимальное такое число.
- $a = (3), n = 1: 3.$
- $a = (3, 6), n = 2: 3, ?6.$
- $a = (3, 6, 1), n = 3: 1, ?6.$
- $a = (3, 6, 1, 9), n = 4: 1, ?6, ??9.$
- $a = (3, 6, 1, 9, 7), n = 5: 1, ?6, ???7.$
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2), n = 6: 1, ?2, ???7.$
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4), n = 7: 1, ?2, ???4.$
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4, 8), n = 8: 1, ?2, ???4, ???8.$
- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4, 8, 5), n = 9: 1, ?2, ???4, ???5.$

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Итак, для каждого префикса и для каждой длины будем помнить минимальное число, на которое может заканчиваться возрастающая подпоследовательность такой длины.

- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4, 8, 5)$, $n = 9$.

$n = 0$	∞	∞	∞	∞	∞	\dots
$n = 1$	3	∞	∞	∞	∞	\dots
$n = 2$	3	6	∞	∞	∞	\dots
$n = 3$	1	6	∞	∞	∞	\dots
$n = 4$	1	6	9	∞	∞	\dots
$n = 5$	1	6	7	∞	∞	\dots
$n = 6$	1	2	7	∞	∞	\dots
$n = 7$	1	2	4	∞	∞	\dots
$n = 8$	1	2	4	8	∞	\dots
$n = 9$	1	2	4	5	∞	\dots

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

- $a = (3, 6, 1, 9, 7, 2, 4, 8, 5)$, $n = 9$.

$n = 0$	∞	∞	∞	∞	∞	∞	\dots
$n = 1$	3	∞	∞	∞	∞	∞	\dots
$n = 2$	3	6	∞	∞	∞	∞	\dots
$n = 3$	1	6	∞	∞	∞	∞	\dots
$n = 4$	1	6	9	∞	∞	∞	\dots
$n = 5$	1	6	7	∞	∞	∞	\dots
$n = 6$	1	2	7	∞	∞	∞	\dots
$n = 7$	1	2	4	∞	∞	∞	\dots
$n = 8$	1	2	4	8	∞	∞	\dots
$n = 9$	1	2	4	5	∞	∞	\dots

Мы видим, что:

- Для каждого n последовательность неубывающая.
- При переходе $n \rightarrow n + 1$ меняется ровно один элемент.
- Его позицию можно найти двоичным поиском.

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Код для поиска длины:

```
vector <int> d(n, oo);  
for (auto x : a)  
    *lower_bound(begin(d), end(d), x) = x;  
r = lower_bound(begin(d), end(d), oo) - begin(d);
```

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Код для поиска длины:

```
vector <int> d(n, oo);  
for (auto x : a)  
    *lower_bound(begin(d), end(d), x) = x;  
r = lower_bound(begin(d), end(d), oo) - begin(d);
```

Как найти саму подпоследовательность?

Наибольшая возрастающая подпоследовательность

Код для поиска длины:

```
vector <int> d(n, oo);  
for (auto x : a)  
    *lower_bound(begin(d), end(d), x) = x;  
r = lower_bound(begin(d), end(d), oo) - begin(d);
```

Как найти самую подпоследовательность?

- Она нигде явно не записана.
- Можно для каждого числа, попавшего в d , хранить его позицию в a , а не само число.
- Когда d меняется, запишем в массив предков p позицию предыдущего элемента в d .
- По массиву предков можно восстановить путь как обычно.

Вопросы?

Вопросы?