

**Курс «Алгоритмы и алгоритмические языки»  
1 семестр 2015/2016**

**Лекция 19**

# Сортировка

## ◆ *Постановка задачи*

Сортировка – это упорядочение наборов однотипных данных, для которых определено отношение линейного порядка (например,  $<$ ) по возрастанию или по убыванию.

Здесь будут рассматриваться целочисленные данные и отношение порядка " $<$ ".

## ◆ В стандартную библиотеку `stdlib` входит функция `qsort`:

```
void qsort (void *buf, size_t num, size_t size,  
int(*compare)(const void *, const void *));
```

Функция `qsort` сортирует (по возрастанию) массив с указателем `buf`, используя алгоритм быстрой сортировки *Ч.Э.Р. Хоара*, который считается одним из лучших алгоритмов сортировки общего назначения.

Параметр `num` задает количество элементов массива `buf`, параметр `size` – размер (в байтах) элемента массива `buf`.

Параметр `int(*compare)(const void *, const void *)` задает правило сравнения элементов массива `num`.

## Сортировка

- ◆ Функция, указатель на которую передается в `qsort` в качестве аргумента, соответствующего параметру `int(*compare)(const void *, const void *)`, должна иметь описание:

```
int имя функции (const void *arg1, const void *arg2)
```

и возвращать:

- ◆ целое < 0, если *arg1* < *arg2*,
- ◆ целое = 0, если *arg1* = *arg2*
- ◆ целое > 0, если *arg1* > *arg2*

## Сортировка

- ◆ **Простейший алгоритм сортировки:** сведение сортировки к задаче нахождения максимального (минимального) из  $n$  чисел. Нахождение максимума  $n$  чисел ( $n$  сравнений):  
Числа содержатся в массиве `int a[n];`  
`max = a[0];`  
`for (i = 1; i < n; i++)`  
    `if (a[i] > max)`  
        `max = a[i];`
- ◆ **Алгоритм сортировки:** находим максимальное из  $n$  чисел, получаем последний элемент отсортированного массива ( $n$  сравнений); находим максимальное из  $n - 1$  оставшихся чисел, получаем предпоследний элемент отсортированного массива (еще  $n - 1$  сравнений); и так далее.
- ◆ **Общее количество сравнений:**  $1 + 2 + \dots + n-1 + n = n(n - 1)/2$ .  
Сложность алгоритма  $O(n^2)$ .

## Сортировка

- ◆ **Простейший алгоритм сортировки:** сведение сортировки к задаче нахождения максимального (минимального) из  $n$  чисел. Нахождение максимума  $n$  чисел ( $n$  сравнений):  
Числа содержатся в массиве `int a[n];`  
`max = a[0];`  
`for (i = 1; i < n; i++)`  
    `if (a[i] > max)`  
        `max = a[i];`
- ◆ **Алгоритм сортировки:** находим максимальное из  $n$  чисел, получаем последний элемент отсортированного массива ( $n$  сравнений); находим максимальное из  $n - 1$  оставшихся чисел, получаем предпоследний элемент отсортированного массива (еще  $n - 1$  сравнений); и так далее.
- ◆ **Общее количество сравнений:**  $1 + 2 + \dots + n-1 + n = n(n - 1)/2$ .  
Сложность алгоритма  $O(n^2)$ .

# Сортировка

## ◆ **Классификация алгоритмов сортировки**

Различают *внешнюю* и *внутреннюю* сортировку.

Рассматривается только *внутренняя сортировка*: сортируемый массив находится в основной памяти компьютера. *Внешняя сортировка* применяется к записям на внешних файлах.

## **3 общих метода внутренней сортировки:**

- (1) *сортировка обмeнами*: рассматриваются соседние элементы сортируемого массива и при необходимости меняются местами;
- (2) *сортировка выборкой*: идея описана на предыдущем слайде
- (3) *сортировка вставками*: сначала сортируются два элемента массива, потом выбирается третий элемент и вставляется в нужную позицию относительно первых двух и т.д.

## Сортировка

### ◇ *Сортировка обменами (пузырьком)*

Общее количество сравнений (действий):  $n(n - 1)/2$ , так как внешний цикл выполняется  $(n - 1)$  раз, а внутренний – в среднем  $n/2$  раза.

```
void bubble_sort (int *a, int n) {
    int i, j, tmp;
    for (j = 1; j < n; ++j)
        for (i = n - 1; i >= j; --i) {
            if (a[i - 1] > a[i]) {
                tmp = a[i - 1];
                a[i - 1] = a[i];
                a[i] = tmp;
            }
        }
}
```

## Сортировка

### ◆ *Сортировка вставками*

Количество сравнений зависит от степени перемешанности массива **a**. Если массив **a** уже отсортирован, количество сравнений равно  $n - 1$ . Если массив **a** отсортирован в обратном порядке (наихудший случай), количество сравнений имеет порядок  $n^2$ .

```
void insert_sort (int *a, int n) {
    int i, j, tmp;

    for (j = 1; j < n; ++j) {
        tmp = a[j];
        for (i = j - 1; i >= 0 && tmp < a[i]; i--)
            a[i + 1] = a[i];
        a[i + 1] = tmp;
    }
}
```



## Сортировка

- ◆ ***Оценка сложности алгоритмов сортировки***
- ◆ Скорость сортировки определяется количеством сравнений и количеством обменов (обмены занимают больше времени). Эти показатели интересны для худшего и лучшего случаев, а также интересно их среднее значение.
- ◆ Кроме скорости оценивается «естественность» алгоритма сортировки:  
естественным считается алгоритм, который на уже отсортированном массиве работает минимальное время, а на не отсортированном работает тем дольше, чем больше степень его неупорядоченности.
- ◆ Важным показателем является и объем дополнительной памяти для хранения промежуточных данных алгоритма.  
Для рекурсивных алгоритмов расход памяти связан с необходимостью дублировать стек, в котором расположены некоторые промежуточные данные.

## Сортировка

◇ **Оценка сложности алгоритмов сортировки.**

◇ **Теорема.** Для любого алгоритма  $S$  внутренней сортировки сравнением массива из  $n$  элементов количество сравнений

$$C_S \geq O(n \cdot \log_2(n))$$

◇ Доказательство.

(1) Для любого алгоритма  $S$  внутренней сортировки сравнением массива из  $n$  элементов количество сравнений

$$C_S \geq \log_2(n!).$$

(a) Алгоритм  $S$  можно представить в виде двоичного дерева сравнений.

Так как любая перестановка индексов рассматриваемого массива может быть ответом в алгоритме, она должна быть приписана хотя бы одному листу дерева сравнений.

Таким образом, дерево сравнений будет иметь не менее  $n!$  листьев.

## Сортировка

◇ **Оценка сложности алгоритмов сортировки.**

◇ **Теорема.** Для любого алгоритма  $S$  внутренней сортировки сравнением массива из  $n$  элементов количество сравнений

$$C_S \geq O(n \cdot \log_2(n))$$

◇ Доказательство.

(1) Для любого алгоритма  $S$  внутренней сортировки сравнением массива из  $n$  элементов количество сравнений

$$C_S \geq \log_2(n!). \quad (*)$$

(б) Для высоты  $h_m$  двоичного дерева с  $m$  листьями имеет место оценка:

$$h_m \geq \log_2 m.$$

Любое двоичное дерево высоты  $h$  можно достроить до полного двоичного дерева высоты  $h$ , а у полного двоичного дерева высоты  $h$   $2^h$  листьев.

Применив полученную оценку к дереву сравнений, получим оценку (\*)

## Сортировка

◇ **Оценка сложности алгоритмов сортировки.**

◇ **Теорема.** Для любого алгоритма  $S$  внутренней сортировки сравнением массива из  $n$  элементов количество сравнений

$$C_S \geq O(n \cdot \log_2(n))$$

◇ Доказательство.

(2) К  $\log_2(n!)$  применим формулу Стирлинга

$$n! = \sqrt{2\pi n} \cdot n^n e^{-n} e^{\mathcal{G}(n)} \quad (**)$$

$$|\mathcal{G}(n)| \leq \frac{1}{12n}$$

Логарифмируя (\*\*), получаем

$$\log(n!) = \frac{1}{2} \log(2\pi n) + n \cdot \log(n) - n + \mathcal{G}(n)$$

$$\log(n!) \geq O(n \cdot \log(n))$$

## Быстрая сортировка

◇ **QuickSort** – рекурсивная Си-функция следующего вида:

```
/* Быстрая сортировка. Предполагается, что left < right */
static void QuickSort (int *a, int left, int right) {
    /* comp – компаранд, i, j – значения индексов */

    int comp, tmp, i, j;
    i = left; j = right;
    comp = a[(left + right)/2]; //можно a[left] или a[right]

    /* построение Partition – цикл do-while */
    do {
        while (a[i] < comp && i < right)
            i++;
        while (comp < a[j] && j > left)
            j--;
        if (i <= j) {
            tmp = a[i];
            a[i] = a[j];
            a[j] = tmp;
            i++, j--;
        }
    } while (i <= j);
    ...
}
```

## Быстрая сортировка

- ◆ **QuickSort** – рекурсивная Си-функция следующего вида:

```
static void QuickSort (int *a, int left, int right) {  
    ...  
  
    /* продолжение сортировки, если не все отсортировано */  
    if (left < j)  
        QuickSort (a, left, j);  
    if (i < right)  
        QuickSort (a, i, right);  
}
```

- ◆ Программа быстрой сортировки.

```
void qsort (int *a, int n) {  
    QuickSort (a, 0, n - 1);  
}
```

- ◆ Нужно, чтобы значение компаранда было таким, чтобы он попал в середину результирующей последовательности. Мы пытаемся угадать, какой из элементов массива имеет такое значение. Чем лучше мы угадаем, тем быстрее выполнится алгоритм

## Быстрая сортировка

- ◆ Покажем, что цикл `do-while` действительно строит нужное нам разбиение массива `a[ ]`.
  - (1) В процессе работы цикла индексы `i` и `j` не выходят за пределы отрезка `[left, right]`, так как в циклах `while` выполняются соответствующие проверки.
  - (2) В момент окончания работы цикла  
`do-while j ≤ right,`  
так как части разбиения не могут быть пустыми: хотя бы один элемент массива `a[ ]` (в крайнем случае `a[right]`) содержится в правой части разбиения.
  - (3) Аналогично, в момент окончания работы цикла  
`do-while i ≥ left.`
  - (4) В момент окончания работы цикла `do-while` любой элемент подмассива `a[left..j]` не больше любого элемента подмассива `a[i..right]`, что очевидно.

## Быстрая сортировка

- ◆ Работа цикла `do-while` на примере: 5 3 2 6 4 1 3 7.
  - ◆ Пусть в качестве первого компаранда выбран первый элемент массива – 5 (`a[left]`).
  - ◆ Во время первого прохода цикла `do-while` после выполнения обоих циклов `while` получим:  
$$(5) \ 3 \ 2 \ 6 \ 4 \ 1 \ \{3\} \ 7;$$
(в круглых скобках элемент с индексом  $i$ , в фигурных – элемент с индексом  $j$ ).
  - ◆ Поскольку  $i < j$ , элементы, выделенные скобками, нужно поменять местами (оператор `if`):  
$$3 \ (3) \ 2 \ 6 \ 4 \ \{1\} \ 5 \ 7;$$
  - ◆ В результате второго прохода цикла `do-while` получим:  
до обмена 3 3 2 (6) 4 {1} 5 7;  
после обмена 3 3 2 1 ({4}) 6 5 7;
  - ◆ Третий проход лишь увеличивает  $i$ .
  - ◆ Теперь массив `a` состоит из двух подмассивов  
3 3 2 1 4 и 6 5 7  
причем  $i = 5$ ,  $j = 4$ .  
и нужно рекурсивно применить метод к этим подмассивам.



## Быстрая сортировка

- ◆ При выборе компаранда можно брать первый элемент, значение которого больше значения следующего элемента. Для результирующих подмассивов из примера компаранды заключены в квадратные скобки:

3 [3] 2 1 4;

[6] 5 7.

- ◆ Если  $f(n)$  и  $g(n)$  – некоторые функции, то запись  $g(n) = \Theta(f(n))$  означает, что найдутся такие константы  $c_1, c_2 > 0$  и такое  $n_0$ , что для всех  $n \geq n_0$  выполняются соотношения

$$0 \leq c_1 f(n) \leq g(n) \leq c_2 f(n).$$

т.е. при больших  $n$

$f(n)$  хорошо описывает поведение  $g(n)$ .

## Быстрая сортировка

◇ Оценка времени выполнения алгоритма `QuickSort`.

(1) Время выполнения цикла `do-while`

$\Theta(n)$ , где  $n = right - left + 1$ .

(2) для алгоритма `QuickSort` максимальное (наихудшее) время выполнения  $T_{max}(n) = \Theta(n^2)$ .

Наихудшее время: при каждом *Partition* массив длины  $n$  разбивается на подмассивы длины 1 и  $n - 1$ .

(2Д) Для  $T_{max}(n)$  имеет место соотношение

$$T_{max}(n) = T_{max}(n - 1) + \Theta(n).$$

Очевидно, что  $T_{max}(1) = \Theta(1)$ .

Следовательно,

$$T_{max}(n) = T_{max}(n - 1) + \Theta(n) =$$

$$\sum_{k=1}^n \Theta(k) = \Theta\left(\sum_{k=1}^n k\right) = n \cdot (n - 1) / 2 = \Theta(n^2).$$

(3) Если исходный массив `a` отсортирован в порядке убывания, время его сортировки в порядке возрастания с помощью алгоритма `QuickSort` будет  $\Theta(n^2)$ .

## Быстрая сортировка

◇ Оценка времени выполнения алгоритма `QuickSort`.

(4) Минимальное и среднее время выполнения алгоритма *QuickSort*

$$T_{mean}(n) = \Theta(n \cdot \log n)$$

с разными константами: чем ближе разбиение на подмассивы к сбалансированному, тем константы меньше.

(4Д) Доказательство использует теорему о рекуррентных оценках [\[1\]](#)

(5) Рекуррентное соотношение для минимального (наилучшего) времени сортировки  $T_{min}(n)$  имеет вид

$$T_{min}(n) = 2 \cdot T_{min}(n/2) + \Theta(n),$$

так как минимальное время получается тогда, когда на каждом шаге удастся выбрать компаранд, который делит массив на два подмассива одинаковой длины  $\lceil n/2 \rceil$ .

Применяя ту же теорему, получаем  $T_{min}(n) = \Theta(n \cdot \log n)$ .

[\[1\]](#) Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест. Алгоритмы: построение и анализ. М.: МЦНМО, 1999. ISBN 5-900916-37-5, с. 66 – 73.

## Быстрая сортировка

- ◇ Оценка времени выполнения алгоритма `QuickSort`.
- (6) Рекуррентное соотношение для  $T(n)$  в общем случае, когда на каждом шаге массив делится в отношении  $q:(n - q)$ , причем  $q$  равномерно распределено между 1 и  $n$ , также можно решить и установить, что  $T(n) = \Theta(n \cdot \log n)$  (та же книга, с.160 – 164).