СТРУКТУРЫ ДАННЫХ

Списки. Понятие абстрактной структуры данных. Хеш-таблицы и поисковые деревья

К. Владимиров, Syntacore, 2023
mail-to: konstantin.vladimirov@gmail.com

СЕМИНАР 4.1

Односвязные списки.

Идея односвязного списка

- Идея односвязного списка довольно проста: каждый узел содержит указатель на следующий

```
struct node_t {
  struct node_t *next;
  int contents;
};
```

- Узлы такого рода динамических структур данных обычно выделяются в куче

```
struct node_t *top = calloc(1, sizeof(struct node_t));
```

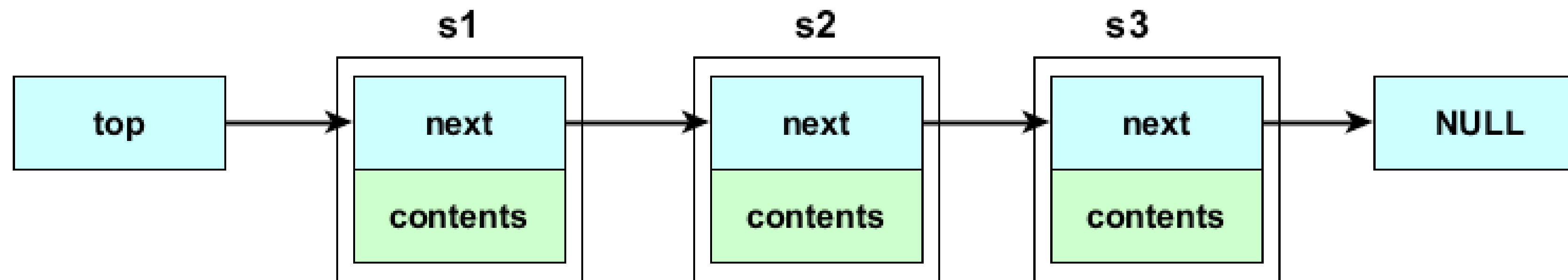
```
top->next = calloc(1, sizeof(struct node_t));
```

- Это бывает удобно изобразить картинкой

Идея односвязного списка

- Идея односвязного списка довольно проста: каждый узел содержит указатель на следующий

```
struct node_t {struct node_t *next; int contents; };
```

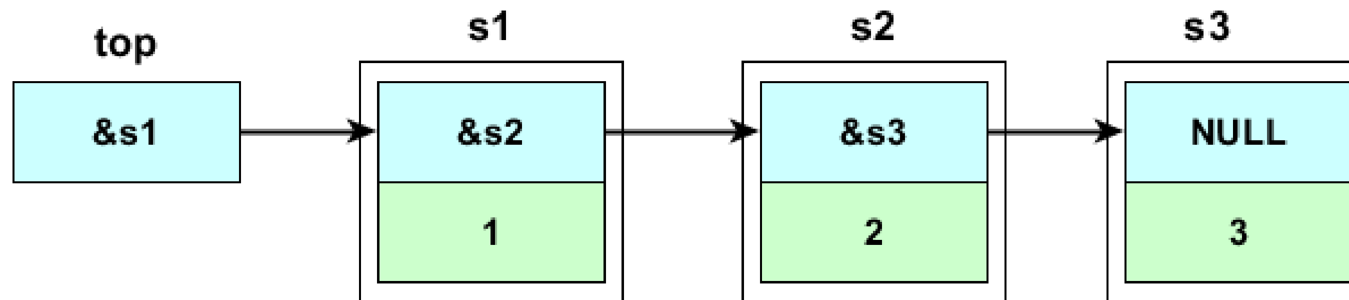


- Картинку можно несколько конкретизировать, учтя значения полей, выставленные на предыдущем слайде

Идея односвязного списка

- Идея односвязного списка довольно проста: каждый узел содержит указатель на следующий

```
struct node_t {struct node_t *next; int contents; };
```



- Динамические структуры данных крайне полезны
- По традиции мы начнём их изучение со списков (хотя они как раз сами по себе не слишком полезны, зато очень просты)

Problem AL: работа со списками

- Ваша задача: написать две функции
- Построить односвязный список из файлового ввода, такой, что все чётные числа идут в начале, а все нечётные в конце

```
struct node_t *read_list(FILE *inp);
```

- Файл представляет собой просто целые числа разделённые через пробел

```
1 65 78 2 34
```

- Удалить односвязный список, получив указатель на первый элемент

```
void delete_list(struct node_t *top);
```

Bucket sort: мозговой штурм

- Давайте подумаем как применить списки к сортировке.
- Основной проблемой counting sort была необходимость выделять в плохих случаях куда больше бакетов чем элементов в массиве.

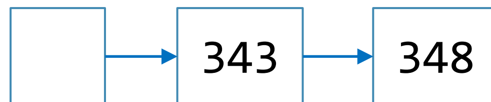
126	348	343	432	316	171	556	670

0	1	2	3	4	5	6	...	126	...
0	0	0	0	0	0	0	...	1	...

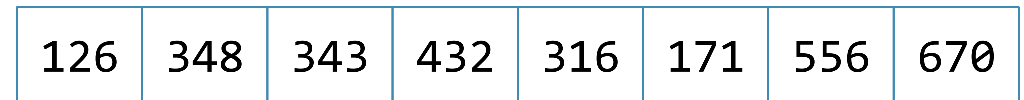
- Если у нас есть динамические структуры данных, можно ли это митигировать?

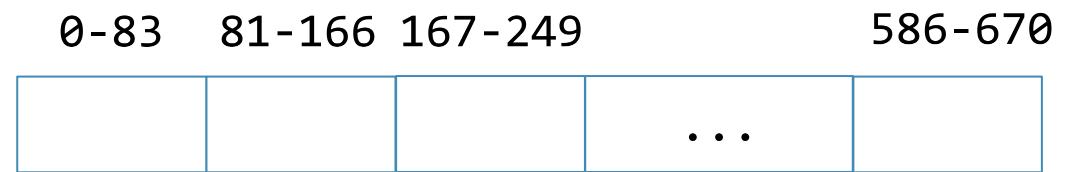
Bucket sort: основная идея

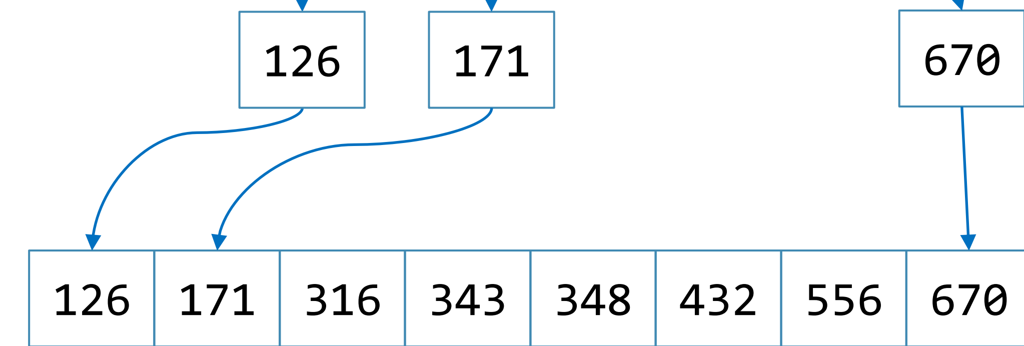
- Выделим **столько же** бакетов, сколько элементов в массиве.
- При вставке в каждый бакет элемент ставится на своё место



- В конце мы просто проходим все бакеты и комбинируем их.





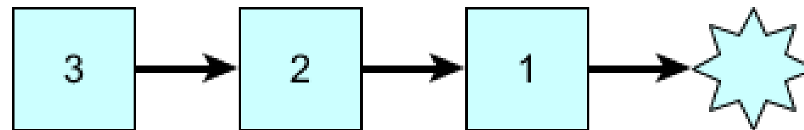


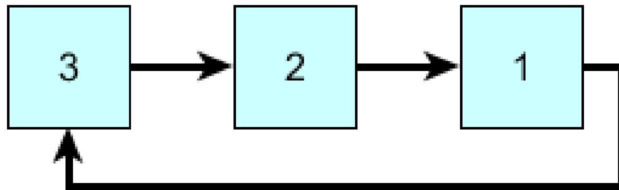
Problem RBS

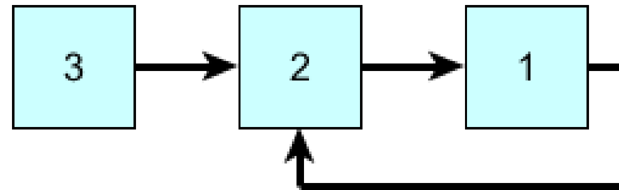
- Сформируем бакеты разделив максимальное число M на N частей. В бакете с номером k хранятся числа от $(k-1)\left\lfloor\frac{M}{N}\right\rfloor$ до $k\left\lfloor\frac{M}{N}\right\rfloor$. В последнем бакете хранятся все до конца.
- Ваша задача распечатать через пробелы все бакеты. Разделите их нулевыми символами (ноль в конце каждого бакета).
- Вход: `8 126 348 343 432 316 171 556 670`
- Выход: `0 126 0 171 0 316 0 343 348 0 432 0 556 0 670 0`
- Вход: `10 187 329 731 517 71 468 429 237 621 860`
- Выход: `71 0 0 187 237 0 329 0 429 0 468 0 517 0 621 0 731 0 860 0`

Обсуждение

- Кажется циклический список мало отличается от обычного…







Задача: есть ли петля?

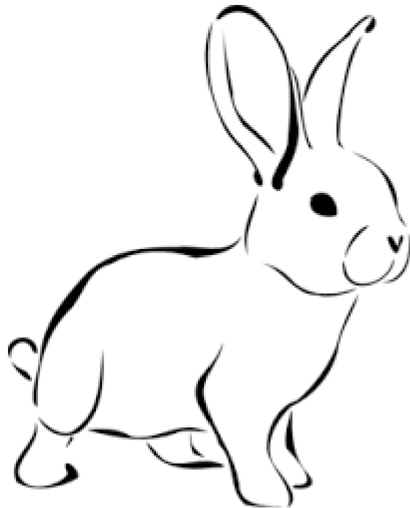
- Вам на вход приходит связный список

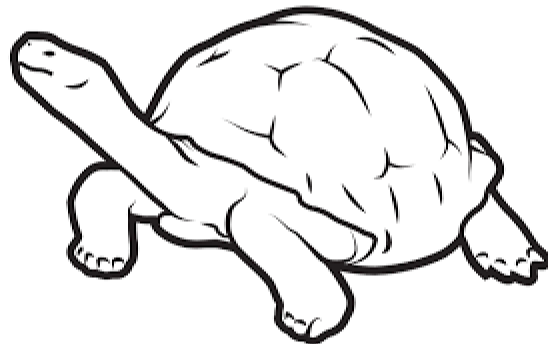
```
struct list_t {
  struct list_t *next;
  int data;
};

int somefunc(struct list_t *top);
```

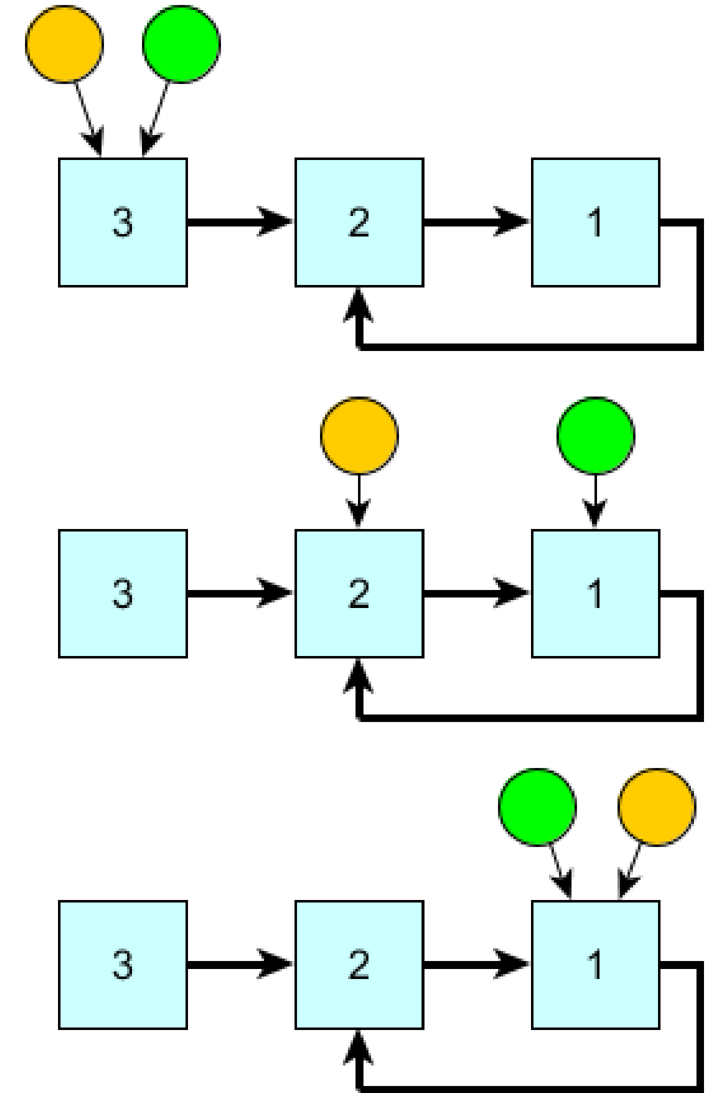
- Возможно в нём есть петля. Возможно он кончается на нулевой указатель. Как это определить?

Алгоритм Флойда

- Начинают два указателя: заяц и черепаха
- Заяц за каждый ход продвигается вперёд на два элемента, а черепаха на один
- Если они встретились, значит петля есть

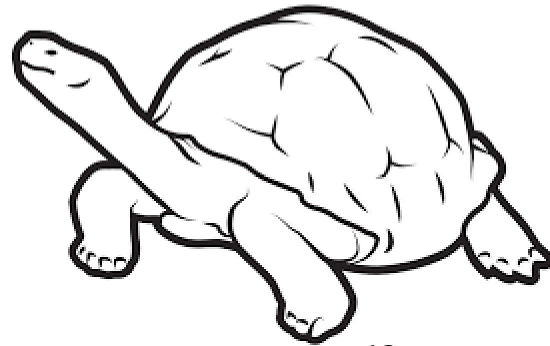
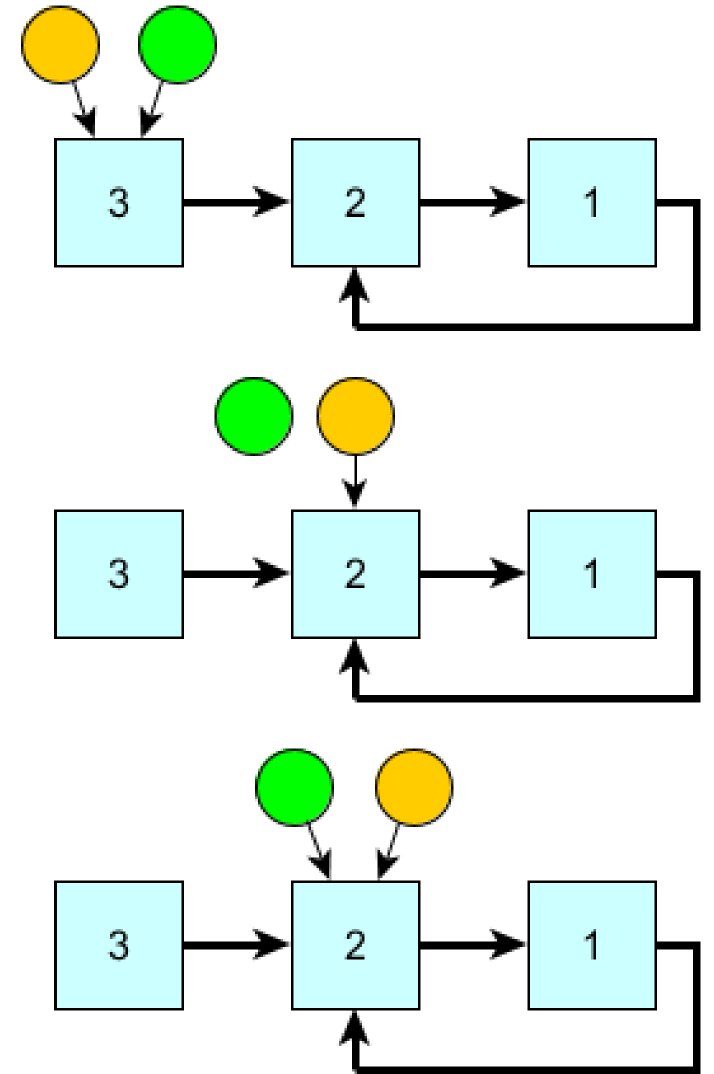






Алгоритм Брента

- Начинают два указателя: заяц и черепаха
- Заяц за каждый ход продвигается вперёд на единицу и несёт с собой телепорт
- Как только он прошёл очередную степень двойки, он телепортирует туда черепаху
- Если они встретились, значит петля есть

Problem HL – петля в связном списке

- Вам на вход приходит какой-то список, заданный всё той же структурой

```
struct list_t {
  struct list_t *next;
  int data;
};
```

- Вы должны написать функцию, которая определяет есть ли в нём петля

```
int list_is_a_loop(struct list_t *top) {
  // TODO: ваш код здесь
}
```

- Вернуть `0` (нет) или `1` (есть). Используйте любой из двух описанных методов

Problem HL2 – длина петли

- Вам на вход приходит какой-то список, заданный всё той же структурой

```
struct list_t {
  struct list_t *next;
  int data;
};
```

- Вы должны написать функцию, которая определяет длину петли если она есть и возвращает `0`, если её нет

```
int loop_len(struct list_t *top);
```

- Попробуйте адаптировать один из ранее приведённых алгоритмов для этого
- Разумное решение не будет использовать много дополнительной памяти

Problem RG: период генератора

- Вам дан генератор $x_{j+1} = f(x_j)$, при этом вы не знаете функцию f
- Вам нужно написать функцию, которая ищет длину цикла в генераторе, начиная с $x_0 = 0$

```
typedef int (*generator_t)(int);

unsigned cycle_len(generator_t gen);
```

- Например при $f(x) = (x + 2)\ \%\ 5, x_0 = 0$ генерируется последовательность `0, 2, 4, 1, 3, 0, 2, ...` и длина цикла равна 5
- Заметьте, вовсе не факт, что x_0 встретится ещё раз (генератор может быть смещённым). Но для любого j $>$ i, $x_j = x_i$ означает цикл

Обсуждение

- Представьте, что у вас стоит задача **развернуть** односвязный список, не содержащий петли
- Как вы представляете себе её решение?

Алгоритм RFL – рекурсивный разворот

- Основная идея в том, что `reverse(x:xs) = reverse(xs):x`

```
struct list_t * reverse(struct list_t *top) {
  struct list_t *xs;
  if (NULL == top) return NULL;
  if (NULL == top->next) return top;
  xs = reverse(top->next);
  top->next->next = top; // единственное тонкое место
  top->next = NULL;
  return xs;
}
```

- Алгоритм сравнительно прост и красив. Увы достаточно длинный список переполнит стек

Problem LR – развернуть итеративно

- Это ещё одна обычная проблема вида рекурсия-в-итерацию
- Ваша задача написать функцию разворота односвязного списка, которая будет работать за $O(1)$ по памяти

```
struct list_t *reverse(struct list_t *top);
```

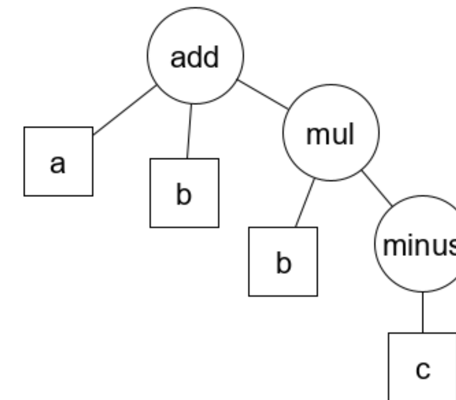
- Заметьте, что алгоритм RFL тратит $O(N)$ памяти на стек вызовов

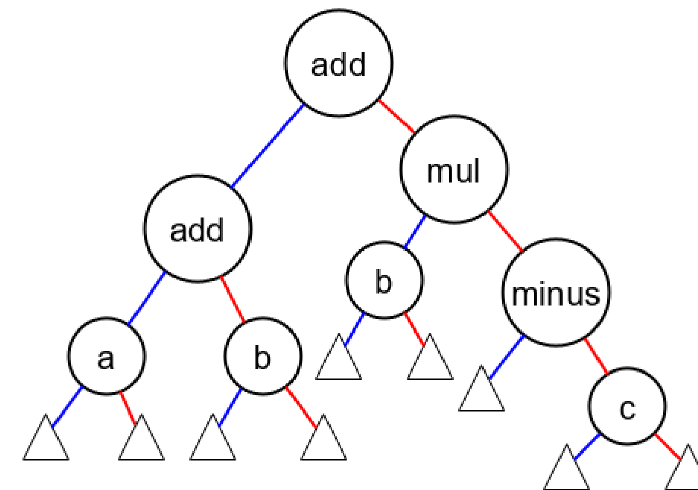
СЕМИНАР 4.2

Деревья и их обходы

Деревья и бинарные деревья

- **Дерево** T это множество узлов, один из которых является корнем $root(T)$, а остальные можно разделить на непересекающиеся множества T_i (поддеревья T), каждое из которых также является деревом.
- **Бинарное дерево** B это множество узлов, которое либо пусто, либо содержит корень $root(B)$ и элементы двух непересекающихся бинарных деревьев: левого B_L и правого B_R.





Как представить бинарное дерево на С

```
struct node {
  struct node *parent; // родитель
  struct node *left;   // выделенный левый потомок
  struct node *right;  // выделенный правый потомок
  void *data;          // данные в узле
};
```

- Теперь мы различаем левого и правого потомка.
- Чаще всего нас просят так или иначе обойти дерево.

Классификация обходов

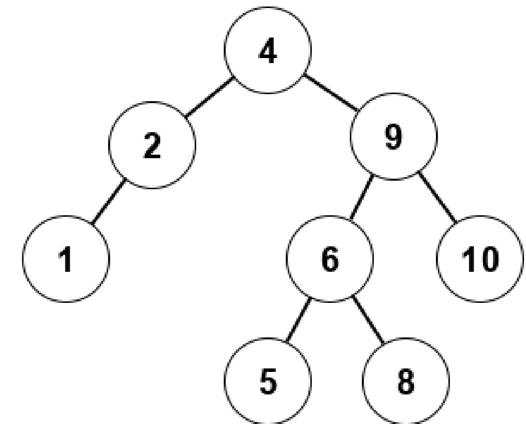
- Inorder: LNR
  - Используется для линеаризации дерева.
- Preorder: NLR
  - Топологический порядок.
- Postorder: LRN
  - Порядок удаления дерева.
- Можно придумать много других обходов, например обход в ширину, в глубину и так далее.

Problem IPO

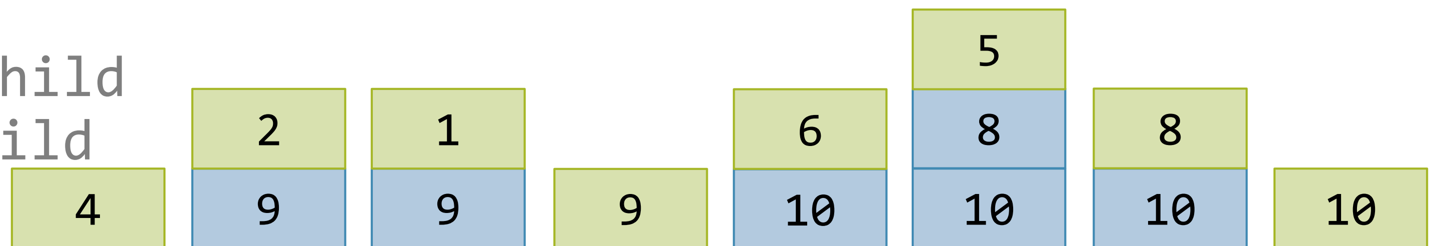
- На входе указатель на вершину дерева.
- На выходе её preorder обход.

Обходы итерацией и стек

- Скорее всего прошлую проблему вы решали рекурсивно.
- Как могло бы выглядеть решение без рекурсии?




```
void iterative_preorder(node* root) {
  stacknode* s = NULL;
  stack_push(&s, root);

  while (!empty(s)) {
   // pop item
   // print it
   // push its right child
   // push its left child
  }
}
```



Организация стека

- Внезапно стек это просто односвязный список.

```
struct stacknode {
  struct stacknode *next;    // следующий элемент
  struct node *data;         // узел в стеке
};
```

- Довольно легко написать push и pop.

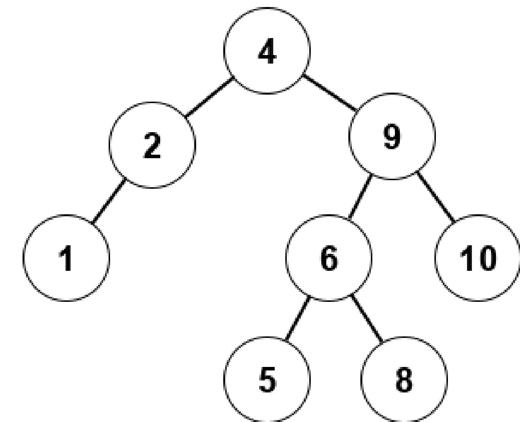
```
void push(struct stacknode **stack, struct node *data) {
  struct stacknode *tmp = calloc(1, sizeof(struct stacknode));
  tmp->data = data; tmp->next = *stack;
  *stack = tmp;
}
```

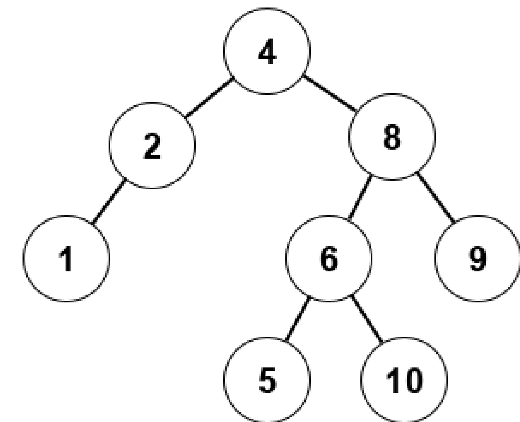
Problem SPO

- На входе указатель на вершину дерева.
- На выходе её preorder обход, полученный итеративно.

Поисковые бинарные деревья

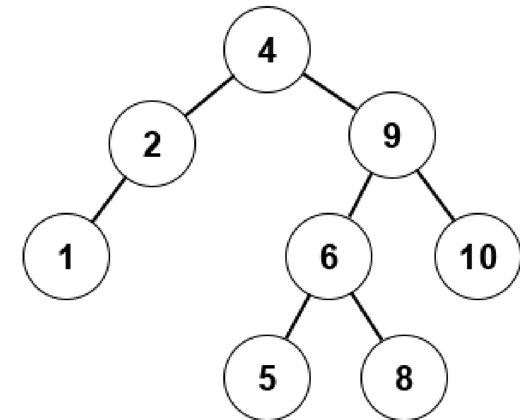
- Поисковым бинарным деревом называется дерево для которого:
- $x \epsilon B_L \leftrightarrow x < root(B)$
- $x \epsilon B_R \leftrightarrow x > root(B)$
- Одно (обычно первое) из этих соотношений может быть не строгим
- Как вы думаете почему такие деревья называют поисковыми?
- Оба ли дерева справа поисковые?

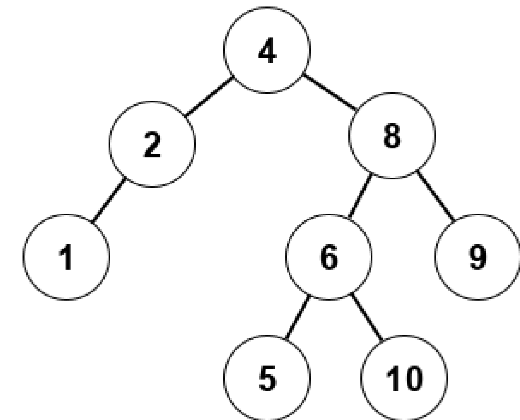




Problem IS – проверить поисковость

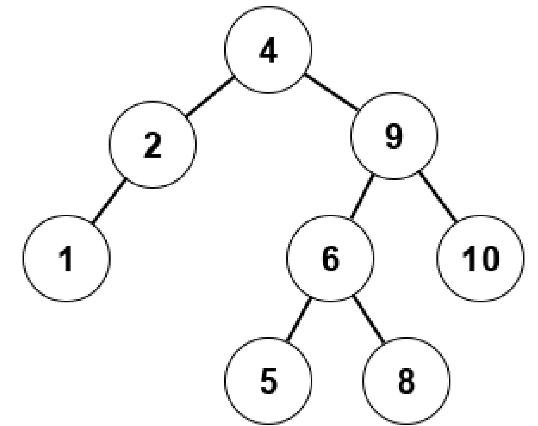
- На входе указатель на вершину дерева.
- На выходе `1` если дерево поисковое и `0` если нет
- В первом случае поисковое, во втором нет, см. картинку справа.





Естественный порядок

- Если бинарное дерево является поисковым, то его топология диктуется добавлением в него новых элементов
- Например $4\ 2\ 1\ 9\ 6\ 10\ 5\ 8$ и т.д.
- Мало того, поисковые деревья обладают своего рода устойчивостью к небольшим нарушениям порядка
- Скажем $4\ 2\ 9\ 10\ 6\ 8\ 5\ 1$ даст то же дерево справа
- В целом мы можем переставлять любые поддеревья
- Тем не менее, $4\ 1\ 2\ 9\ 10\ 6\ 8\ 5$ или $1\ 2\ 4\ 9\ 10\ 6\ 8\ 5$ это уже несколько другие деревья (нарисуйте их)



Problem NO – natural order

- На входе количество узлов и потом последовательность чисел для вставки

```
8
4 2 9 10 6 8 5 1
```

- На выходе preorder порядок

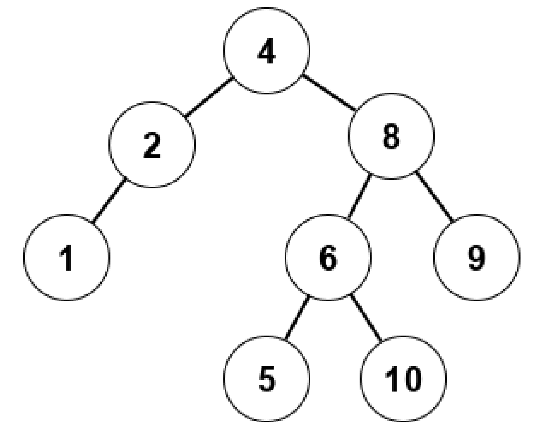
```
4 2 1 9 6 5 8 10
```

- Обратите внимание: естественный порядок задаёт класс эквивалентности.

Problem TT* – дерево из обходов

- На входе файл, содержащий данные а также preorder и inorder обходы дерева

```
8
1 2 4 5 6 10 8 9  /* inorder */
4 2 1 8 6 5 10 9  /* preorder */
```

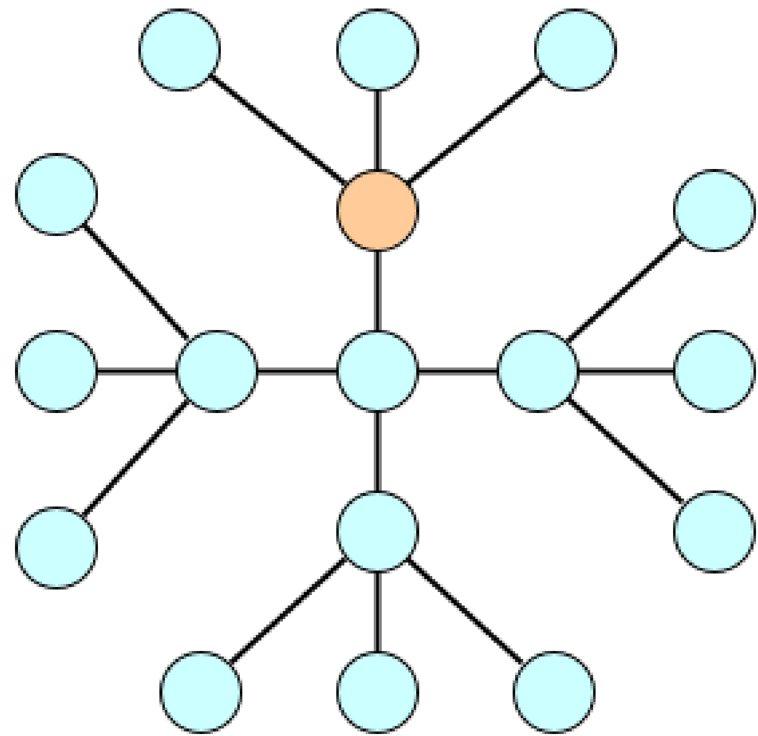


- На выходе postorder порядок.

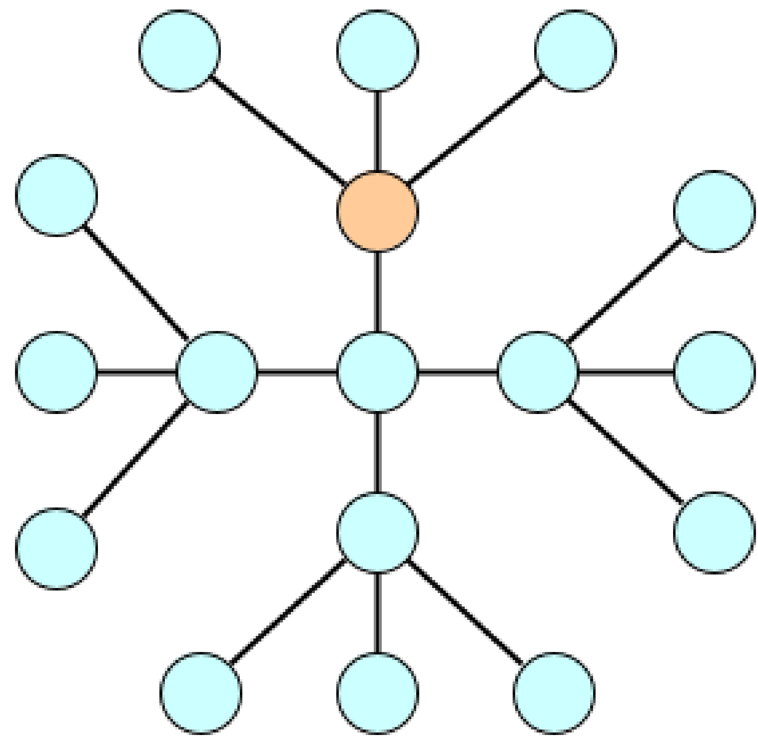
```
1 2 5 10 6 9 8 4  /* postorder */
```

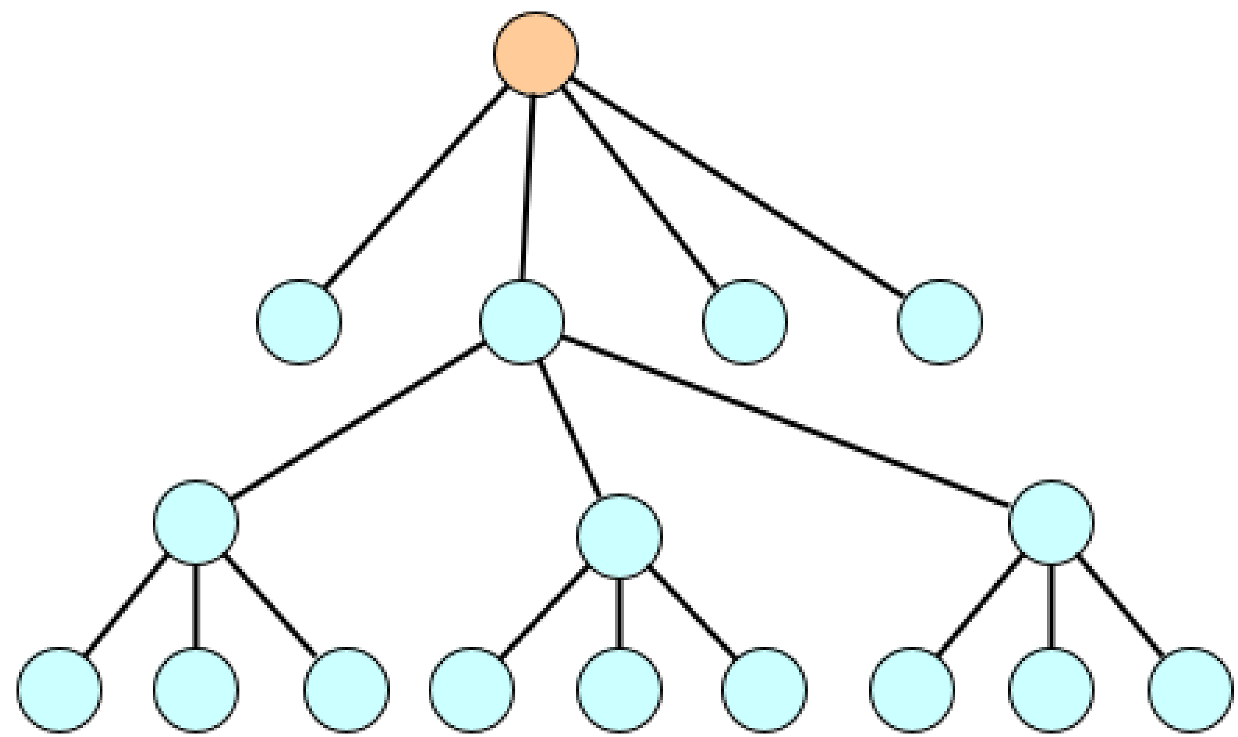
- Теоретическое задание: подумайте хватит ли вам любой пары из трёх обходов, чтобы восстановить третий?

Что перед вами?

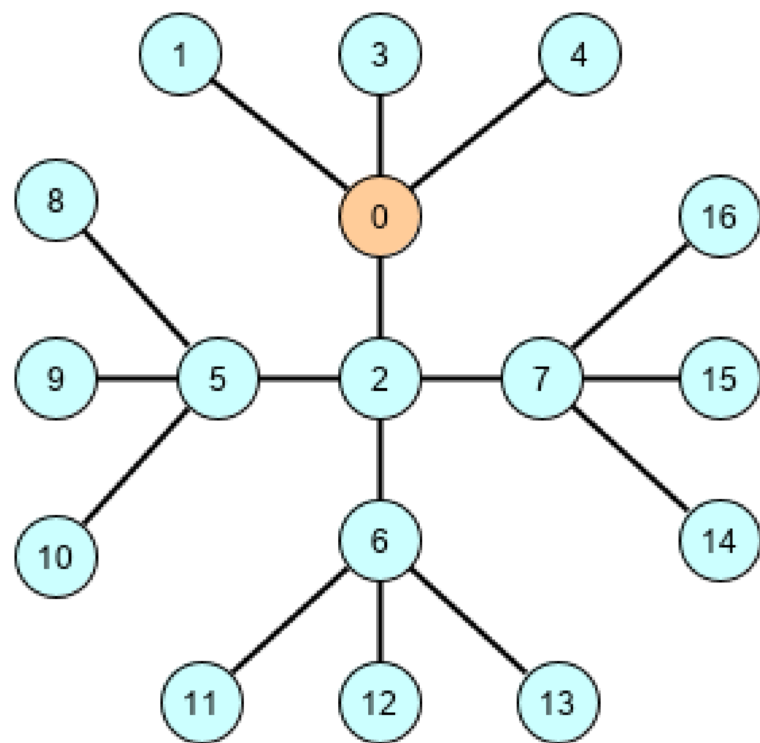


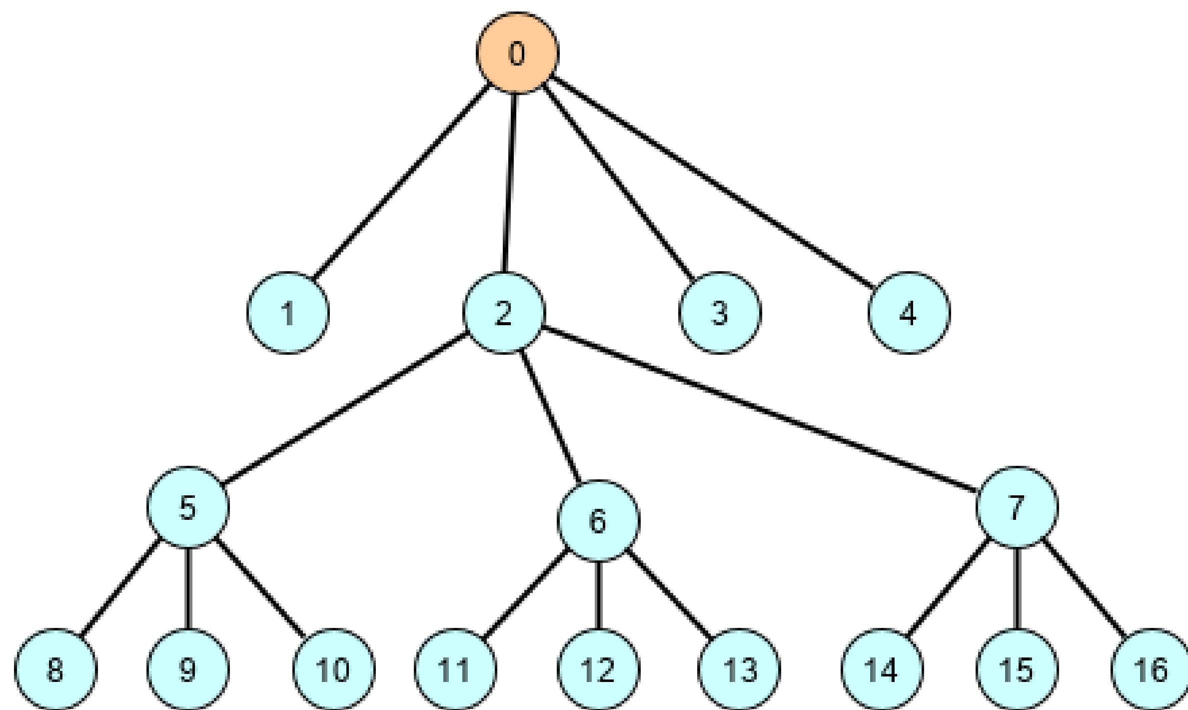
Что перед вами?





Что перед вами?





Как представить дерево на C

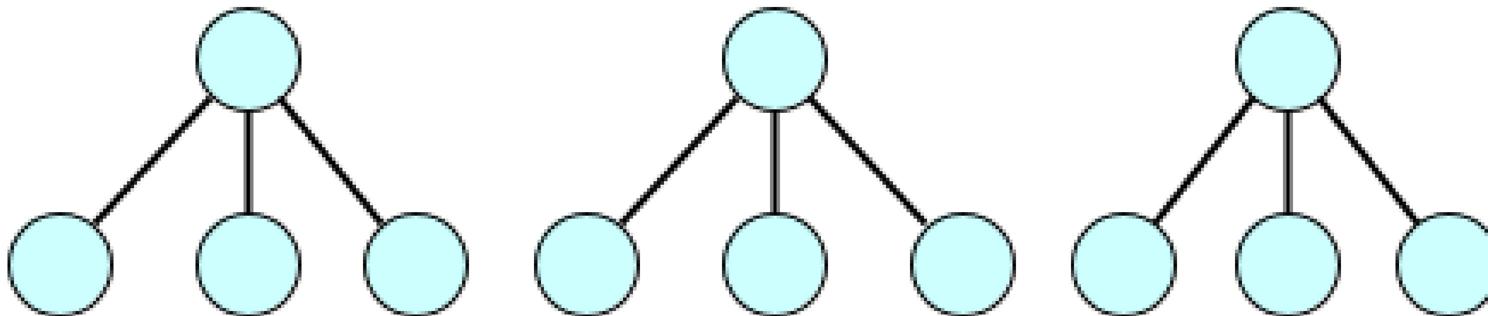
```
struct childlist_t;

struct node_t {
  struct node_t *parent;
  struct child_list_t *nodes; // список связанных вершин
  void *data;                 // данные в узле
};

struct childlist_t {
  struct node_t *child;
  struct childlist_t *next;
};
```

- Это наиболее общее и при этом не слишком удобное представление.

Немного о лесах

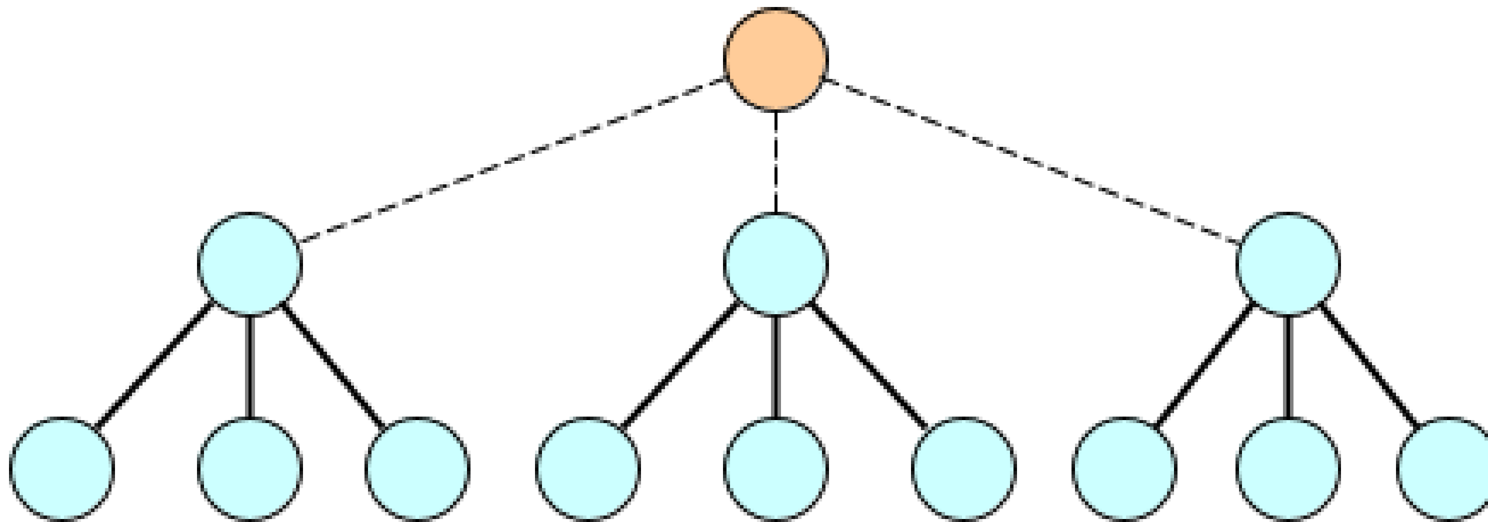
- Лес это одно или несколько деревьев. Как представить лес в программе на C?

```
struct forest_t {
  struct child_list_t* topnodes_; // список деревьев
};
```



Немного о лесах

- Лес это одно или несколько деревьев. Как представить лес в программе на C?
- Оказывается лес это дерево без вершины

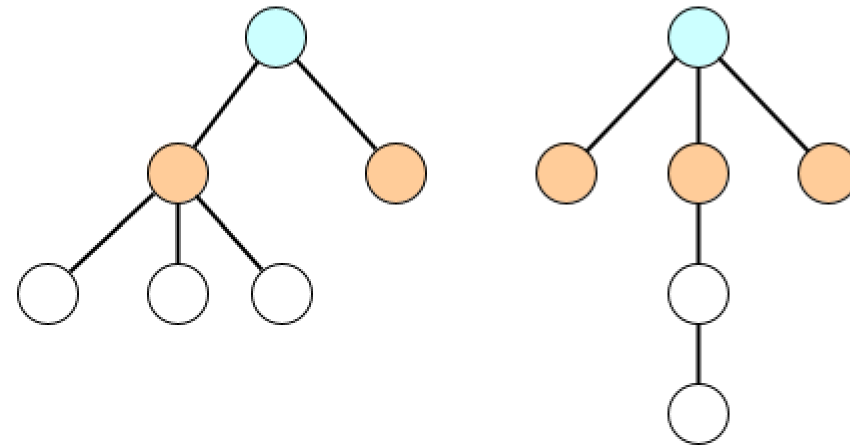


Скобочное выражение это лес

- Рассмотрим правильную расстановку скобок

((( ) ( ) ( )) ( )) (( ) ((( ))) ( ))

- Довольно очевидно, что это лес
- Но такое чувство что это не самое удобное представление для работы

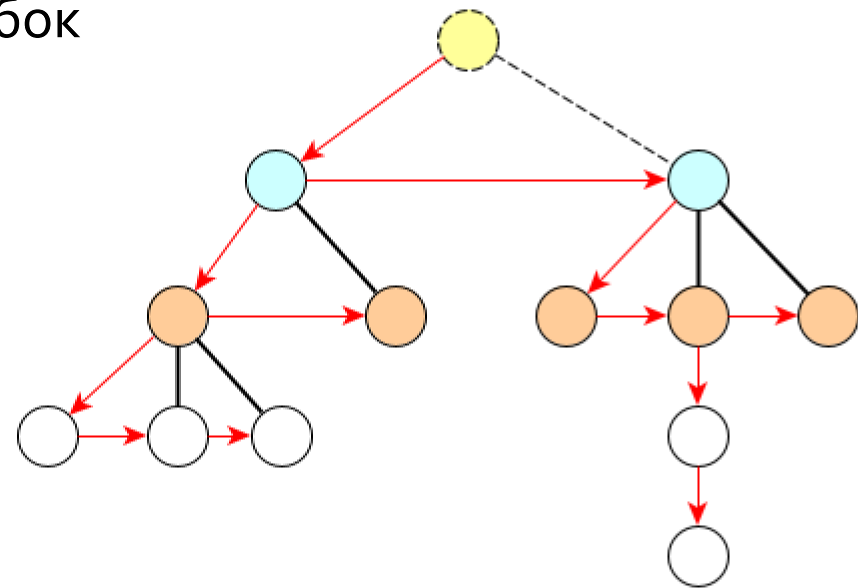


Скобочное выражение это лес

- Рассмотрим правильную расстановку скобок

((()()())())(()((()))())

- Довольно очевидно, что это лес
- Но такое чувство что это не самое удобное представление для работы
- Проведём стрелки к первому брату и к первому потомку
- И внезапно мы видим…

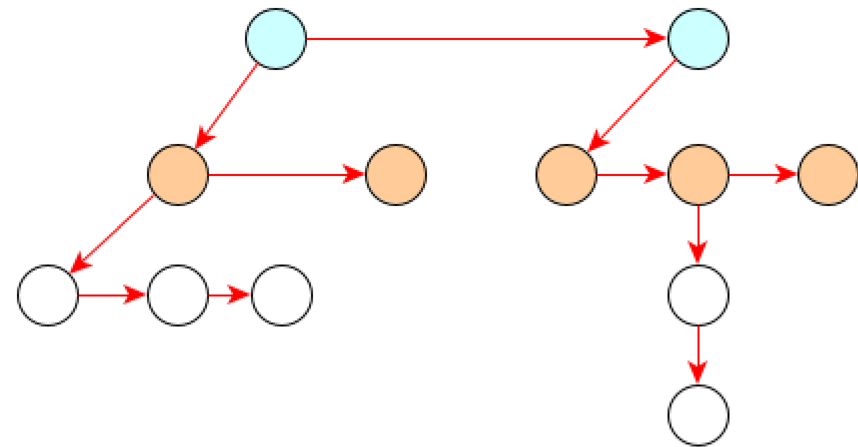


Скобочное выражение это лес

- Рассмотрим правильную расстановку скобок

((( ) ( ) ( )) ( )) (( ) ((( ))) ( ))

- Довольно очевидно, что это лес
- Но такое чувство что это не самое удобное представление для работы
- Проведём стрелки к первому брату и к первому потомку

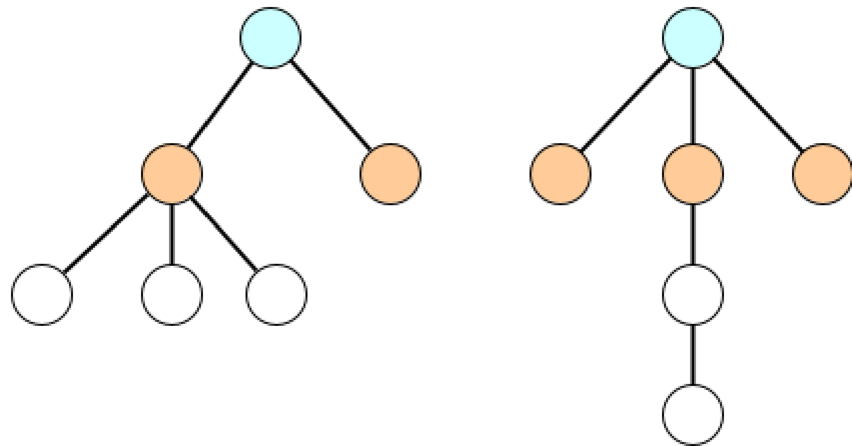


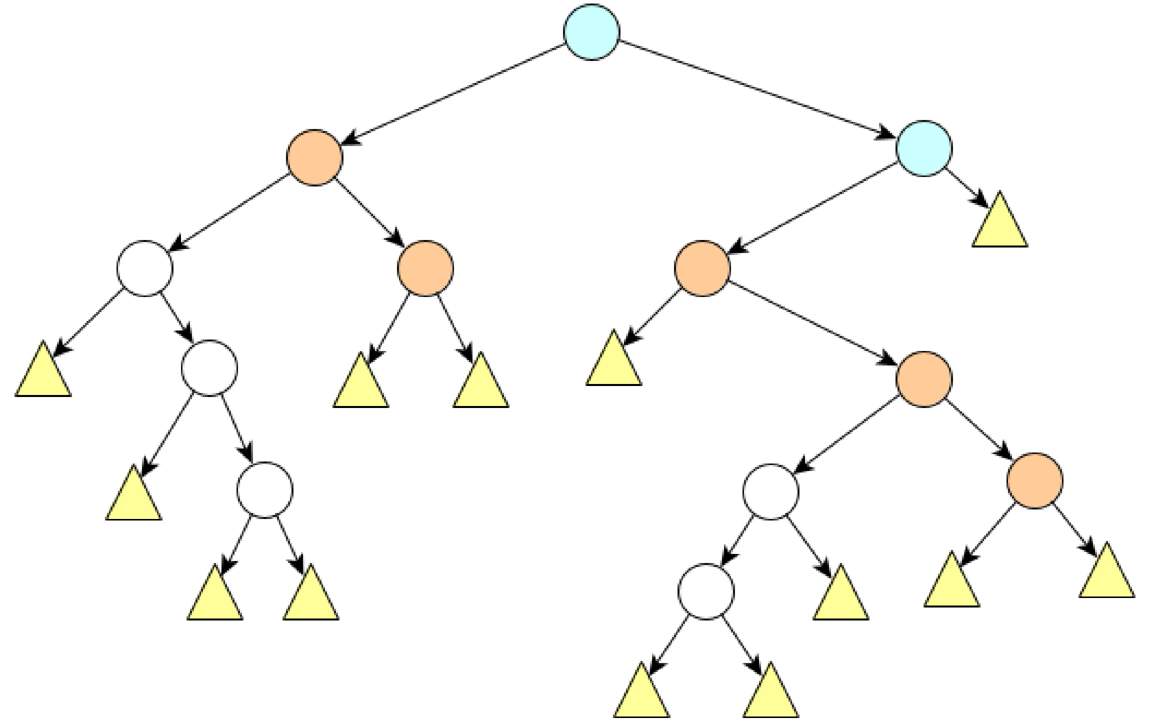
- И внезапно мы видим что у нас получилась древовидная структура с двумя связями на каждый узел. Итак любой лес это…

Лес это бинарное дерево

- Внезапно это бинарное дерево

((( ) ( ) ( )) ( )) (( ) ((( ))) ( ))



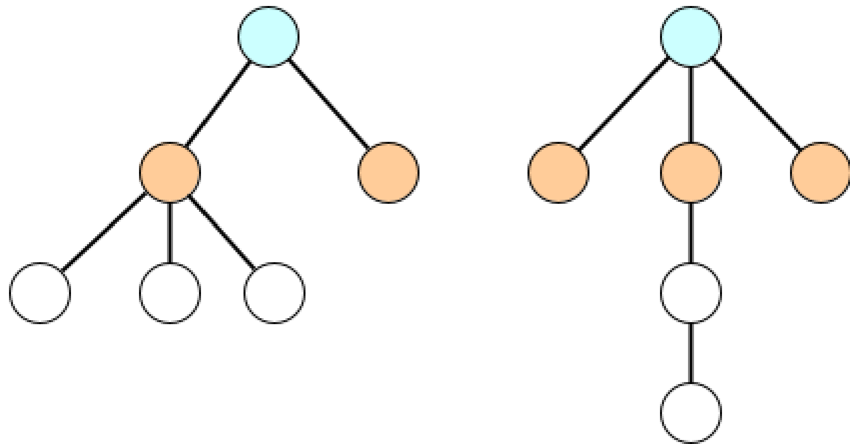


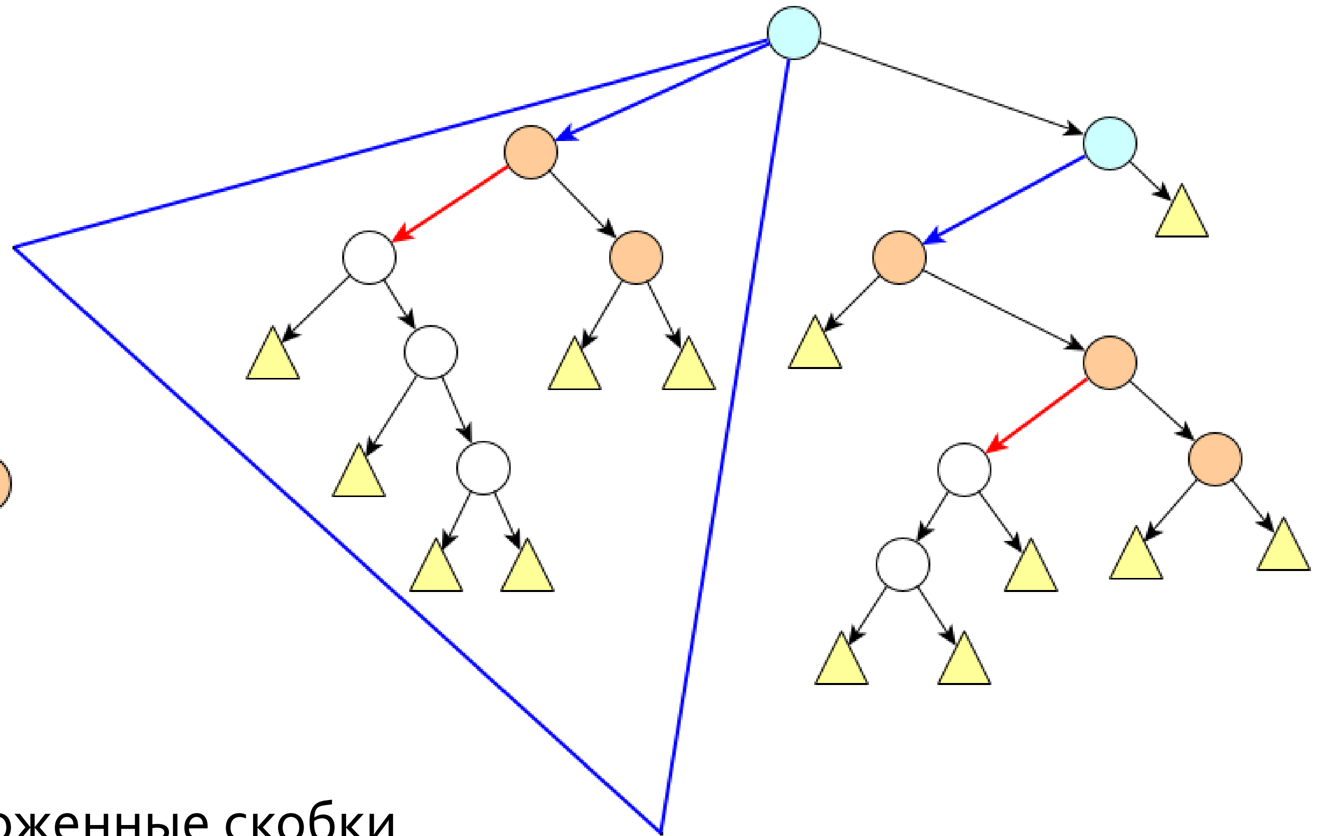
- Кстати, а вы увидели в бинарном дереве последовательность скобок?

2-дерево это расстановка скобок

- Внезапно это бинарное дерево

((()()())())(()((()))())

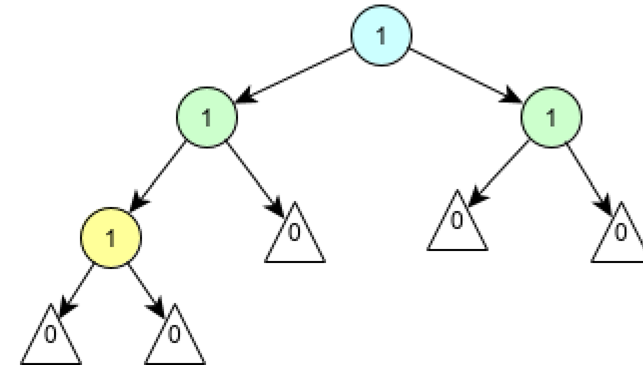




- Если есть левый потомок, это вложенные скобки
- Если есть правый потомок это скобки, стоящие рядом

Бинарные деревья и 0-1 представление

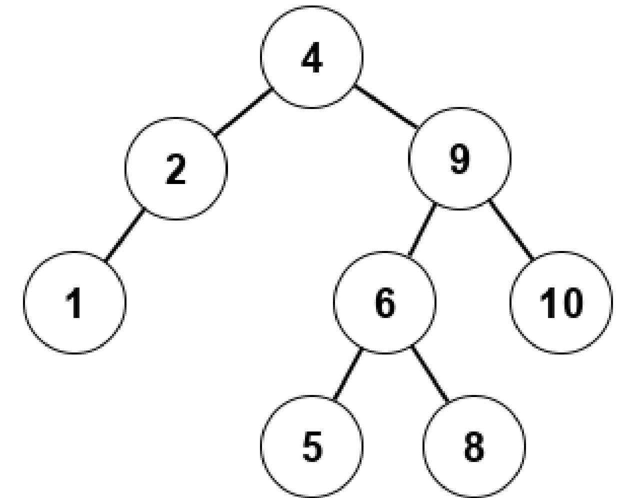
- Любое бинарное дерево соответствует строке из нулей и единиц.
- `1 1 1 0 0 0 1 0 0`
- Очевидно нулей должно быть на один больше, поэтому последний ноль можно сэкономить.
- Приведите пример строки с правильным числом нулей и единиц, которой не соответствует ни одно дерево?



Представление в текстовом файле

- Естественное представление: хранить топологию отдельно и значения отдельно.

```
8
1 1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 1 0 0 1 0
4 2 1 9 6 5 8 10
```



- Обратите внимание на картинке справа не нарисованы нулевые листья, но мы всегда помним, что они есть.
- Также при таком представлении мы естественным образом храним preorder обход.

СЕМИНАР 4.3

Хеш-таблицы, структуры данных и многомодульные программы.

Пример: телефонная книга

- У вас есть список друзей и список их номеров в международном формате (до 15 цифр)

Alice	**44-7911-975-72-83**
Bob	44-7911-486-92-83
Camilla	8-800-555-31-35
Daniel	8-800-765-91-35

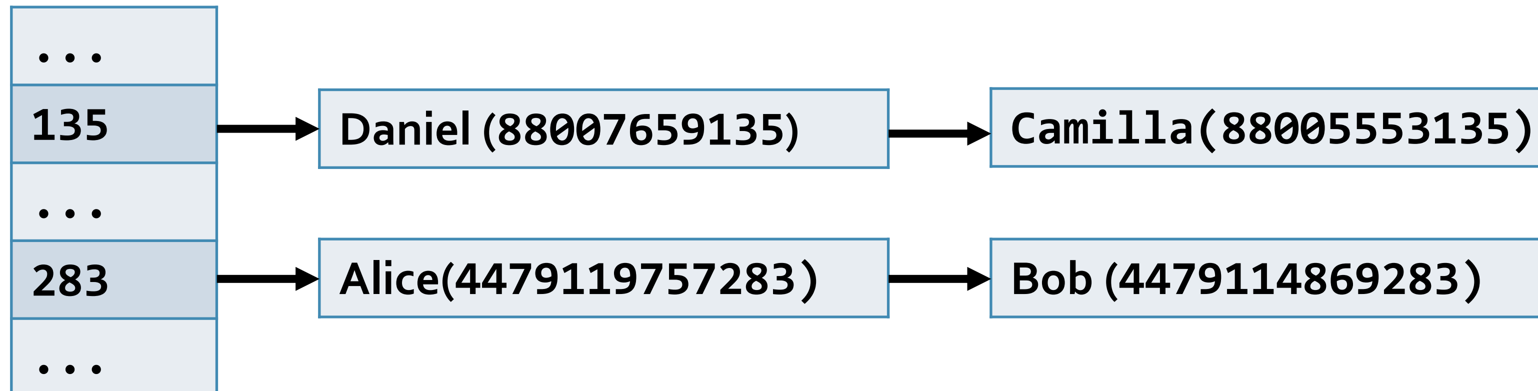
- Вам нужно выбрать структуру данных, которая позволяла бы:
  - Быстро добавить человека и его номер
  - Найти имя человека по номеру телефона

Обсуждение

- Можно выбрать сортированный по номеру массив
  - Преимущества: быстрый поиск $O(lgN)$
  - Недостатки: медленная вставка $O(N)$
- Можно выбрать список
  - Преимущества: быстрая вставка $O(1)$
  - Недостатки: медленный поиск $O(N)$
- Конечно лучше всего было бы сделать прямую адресацию по номерам телефонов, тогда и поиск и вставка были бы $O(1)$
- Можем ли мы отобразить все номера телефонов на разумный диапазон, скажем $0 \div 999$?

Хеширование

- Запишем это как функцию $h(n) = n \ \% \ m$ (где m это мощность отображения, в данном случае $m = 1000$). Мощность определяет количество бакетов
- Тогда имеем массив из `1000` списков



- Уже сейчас видно, что если повезёт и коллизий не будет, то поиск $O(1)$ и вставка $O(1)$. Увы сейчас хеш-функция $h(n)$ довольно плоха

Универсальные семейства функций

- Случайно выбранная функция из такого семейства гарантированно будет в среднем не хуже, чем любая другая для этого класса.
- Везде далее m это мощность хеша, p это простое число, большее m.
- Для целых чисел это семейство:

$h_{a,b}(x) = \left((ax + b) \,\%\, p\right) \% \, m$, при этом $a \neq 0$.

- Для строк это семейство:

$h_r(\mathrm{c}_1 \dots \mathrm{c}_l) = h_{int}\left(\left(\sum_{i=1}^{l} \mathrm{c}_i r^{l-i}\right) \% \, p\right)$ где h_{int} это произвольно выбранная $h_{a,b}$.

https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_hashing

Реализация хеш-функций

- Если что-то считается миллионы раз за выполнение программы, его реализации лучше быть как можно более оптимальной
- Пусть w это количество бит в машинном слове (обычно 16 или 32) и мощность $m = 2^M, M < w$
- Тогда неплохая хеш-функция для целых реализуется как

```
unsigned hashint(unsigned a, unsigned b, unsigned x) {
  return (a*x + b) >> (w – M);
}
```

- Заметьте, здесь `(a*x + b)` уже вычисляется по модулю 2^{32} без явного деления
- Аналогично выкручиваются со строками (см. $[WUNI]$).

Problem XC: подсчёт коллизий

- Ваша задача: имея произвольную функцию хеширования строки и произвольную последовательность строк, подсчитать количество коллизий.

```
typedef int (*get_hash_t)(const char *s);

int ncollisions(char **strs, get_hash_t f) {
  // TODO: your code here
}
```

- Эта функция впоследствии может быть использована для оценки качества хеш-функций над строками.

Домашняя работа HWH – словарь

- На стандартном вводе название текстового файла, лежащего по рабочему пути программы и список слов
- На стандартном выводе список частот встретившихся слов
- Например пусть text.txt содержит стишок отсюда: https://en.wikipedia.org/wiki/This_Is_the_House_That_Jack_Built

```
> echo "text.txt farmer horse Jack" > test.stdin
> ./a.out < test.stdin
1 2 12
```

- Поскольку слово farmer встретилось 1 раз и так далее
- Постарайтесь использовать хеш-таблицы для упрощения подсчёта

Поиск подстроки в строке

A	B	A	B	A	C	A	A	B	A	C	A	B	C	A	C	B	C	A	A	A
A	B	A	C	A	B															

- Наивный алгоритм: перебирать каждую подстроку с каждой.

```
for (Off = 0; Off < HaystackSize - NeedleSize; ++Off) {
  int Found = 1;
  for (Pos = 0; Pos < NeedleSize; ++Pos)
    if (HayStack[Off + Pos] != Needle[Pos]) {
      Found = 0; break
    }
  if (Found == 1) return Off;
}
```

Поиск подстроки в строке

- Можем ли мы использовать хеширование для эффективного поиска подстроки?

A	B	A	B	A	C	A	A	B	A	C	A	B	C	A	C	B	C	A	A	A
A	B	A	C	A	B															

- Вычислим хеш $h_{target} = h_{string}(ABACAB)$
- Здесь функция h_{string} это упрощённая универсальная функция для строк

$$h_r(\mathrm{c}_1 \ldots \mathrm{c}_l) = \left(\sum_{i=1}^{l} \mathrm{c}_i r^{l-i}\right) \% \, p$$

- Первые шесть символов строки в которой мы ищем дают $h_{string}(ABABAC)$
- Можем ли мы легко перейти от него к $h_{string}(BABACA)$?

Циклические свойства хеш-функции

- Ещё раз посмотрим на формулу $h_r(c_1 \dots c_l) = \left(\sum_{i=1}^{l} c_i r^{l-i}\right) \% \, p$
- $h_r(c_2 \dots c_{l+1}) = \left(\left(h_r(c_1 \dots c_l) - c_1 r^{l-1}\right) * r + c_{l+1}\right) \% \, p$
- Интуитивно: мы убираем первый символ, сдвигаем строку умножением и добавляем последний
- Можно предварительно подсчитать $n = r^{l-1} \% \, p$
- Сигнатура для функции обновления

```
unsigned update_hash(unsigned hash, unsigned n, char cf, char cl);
```

- Напишите эту функцию

Обсуждение

- Циклические свойства хеш-функций наталкивают на идёю «циклического хеша», который обновляется с каждым новым продвижением подстроки

A	B	A	B	A	C	A	A	B	A	C	A	B	C	A	C	B	C	A	A	A
	A	B	A	C	A	B														

- Вместо $O(Nm)$ имеем $O(N)$ потому что обновление хеша происходит за константное время
- Это называется алгоритмом Рабина-Карпа

Алгоритм RK – поиск подстроки

- Проверяет наличие подстроки needle в строке haystack

```
// assume strlen(needle) much lesser then strlen(haystack)
int rabin_karp(const char *needle, const char *haystack) {
  unsigned n, target, cur, count = 0, left = 0, right = strlen(needle);

  target = get_hash(needle, needle + right);
  cur = get_hash(haystack, haystack + right);
  n = pow_mod(R, right - 1, Q); // алгоритм POWM

  while(target != cur && haystack[right] != 0) {
    cur = update_hash(cur, n, haystack[left], haystack[right]);
    left += 1; right += 1;
  }

  return (target == cur) ? left : 0;
}
```

Problem KC: коллизии Рабина-Карпа

- В алгоритме RK никак не обработан случай коллизии хеш-функции, когда хеши совпали, а строка найдена неверно
- Ваша задача доработать с учётом коллизий функцию

```
int rabin_karp(const char *needle, const char *haystack);
```

- Выберите в качестве хеш-функции нечто не слишком совершенное, например

$$h(\mathrm{c}_1 \ldots \mathrm{c}_l) = \left(\sum_{i=1}^{l} \mathrm{c}_i 10^{l-i} \right) \% \ 31$$

- Проверьте как работает поиск с коллизиями

Обсуждение

- Главный недостаток хеш-таблиц (и шире хеш-функций как идеи) это стирание информации о естественном порядке объектов
- Например пусть нужно индексировать города расстоянием от Москвы
  - Сложить их в хеш-таблицу по этому расстоянию легко
  - Также легко получить город на расстоянии 60 километров
  - Но увы, получить все города от 50 до 100 километров невозможно
- Говорят, что хеш-отображения не позволяют делать range-based queries
- И это естественным образом приводит нас к поисковым деревьям

Алгоритм RQ – поиск диапазона

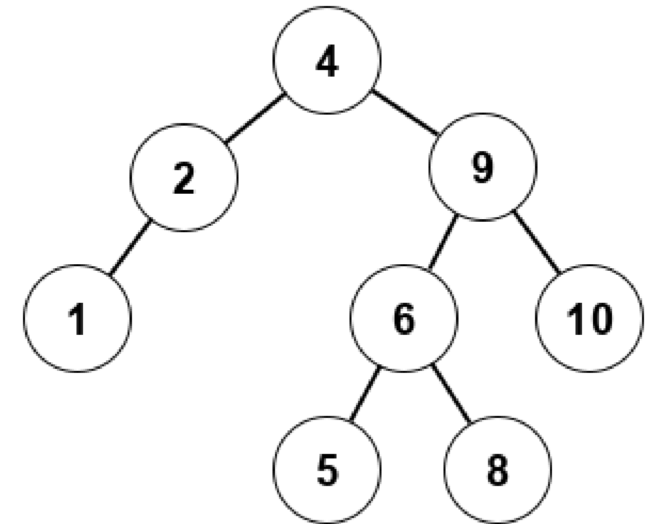
- Важнейшим преимуществом поисковых деревьев над хеш-таблицами является возможность запроса диапазона

```
typedef void (*visit_t)(const struct node_t *);

void visit_range(struct node_t *top, int l, int r, visit_t v) {
  if (NULL == top) return;
  if (l <= node_data(top) && r >= node_data(top))
    v(root);
  if (l <= node_data(top))
    visit_range(node_left(top), l, r, v);
  if (r >= node_data(top))
    visit_range(node_right(top), l, r, v);
}
```

Обход дерева алгоритмом RQ

- Можно сказать, что алгоритм RQ обходит дерево
- Допустим на входе дерево как слева с запросом [2, 8]
- В каком порядке узлы будут выведены?

```
if (/* some check */)
  visit(root);
if (/* some check */)
  visit_range(/* to left */, l, r, v);
if (/* some check */)
  visit_range(/* to right */, l, r, v);
```



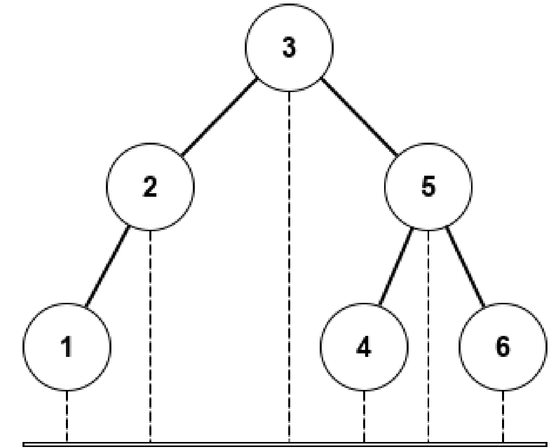
- Можно ли изменить алгоритм RQ для сортированного вывода: 2 4 5 6 8?

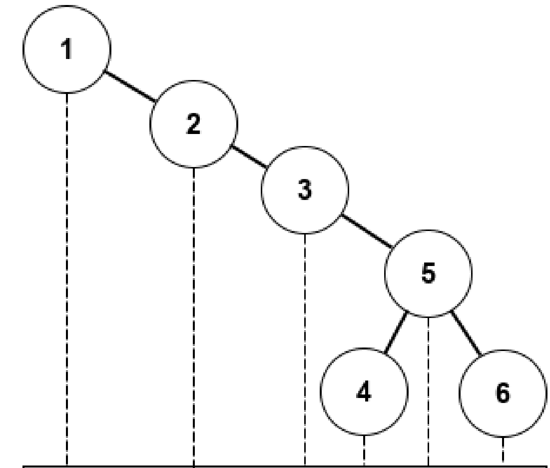
Problem RBQ: запросы городов

- На выходе количество записей а потом на каждой строчке название города без пробелов и далее расстояние до центра страны
- Далее на входе количество запросов и сами запросы (два числа от и до)
- На выходе: количество городов на расстоянии от левой до правой границы запроса включительно

Разбалансированность

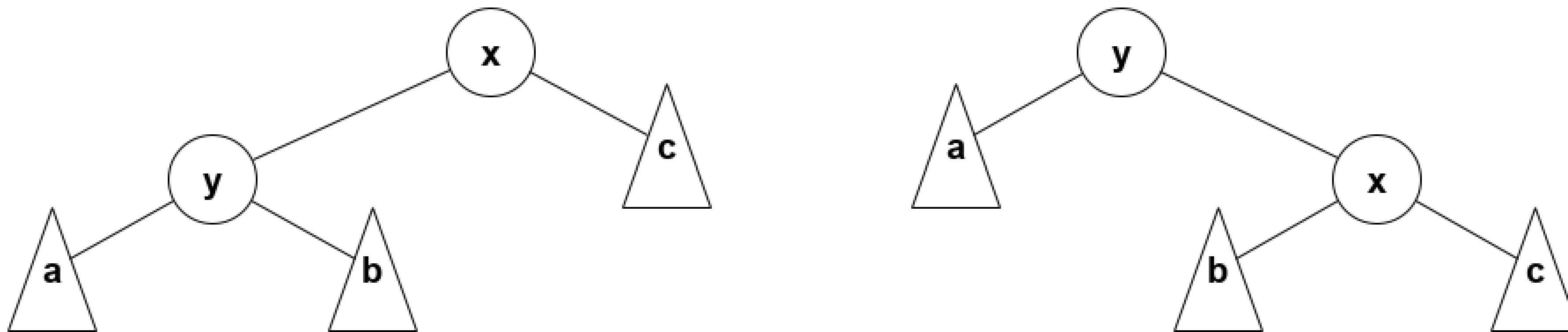
- Существенной проблемой для алгоритма RQ является то, что он логарифмический только в лучше случае
- Мы можем легко представить плохой случай: при неудачном порядке добавления тех же узлов дерево может не быть сбалансированным
- В этом случае поиск в дереве (даже в поисковом) не лучше, чем поиск в списке
- Поэтому поисковые деревья принято при построении балансировать





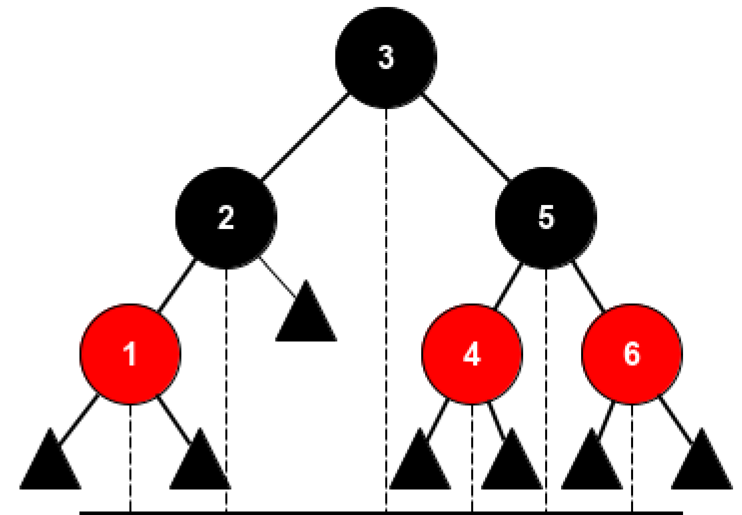
Поддержка свойств поисковости

- Базовая трансформация сохраняющая свойства поисковости но меняющая относительную высоту поддеревьев это левый и правый поворот



Красно-черные деревья

- Надлежащим количество поворотов можно сделать любое дерево полезным, но это нетривиальная задача
- Гораздо проще при каждой вставке поддерживать поворотами какой-нибудь инвариант, который гарантирует нам полезность дерева
- **Красно-черный** инвариант:
  - Корень черный
  - Все нулевые потомки черные
  - У каждого красного узла все потомки чёрные
  - На любом пути от данного узла до каждого из нижних листьев одинаковое количество чёрных узлов



Обсуждение

- Структуры данных слишком легко запутать.
- Можно запутать список, хеш-таблицу и даже поисковое дерево.
- Что если в структуре данных появятся лишние связи?
- Например попробуйте прогнать процедуру переворота на зацикленном списке или поиск в дереве на сломанном дереве и посмотрите результат.
- Интересный вопрос: что же делать?

Обсуждение

- Плохой вариант: при каждом вызове любой функции проверять целостность структуры данных.
- Хороший вариант несколько менее очевиден. И он называется **инкапсуляция**.
- Но прежде давайте немного скажем о многомодульных программах.

Многомодульные программы

- Предположим, что вы написали очень интересную программу.

```
// ipow возводит n в степень x
unsigned long long ipow(unsigned n, unsigned x) {
  // тут очень умная реализация
}

int main () {
  // тут основная программа, использующая ipow
}
```

- Она работает, но вы обнаружили, что функция ipow может быть вам нужна и в других программах, т.е. может быть переиспользована.

Выносим функцию в модуль

- Вы можете сделать отдельный модуль с функцией ipow.
- В модуле myprog вам нужно только определение.

```
> gcc myprog.c mypow.c -o myprog
```

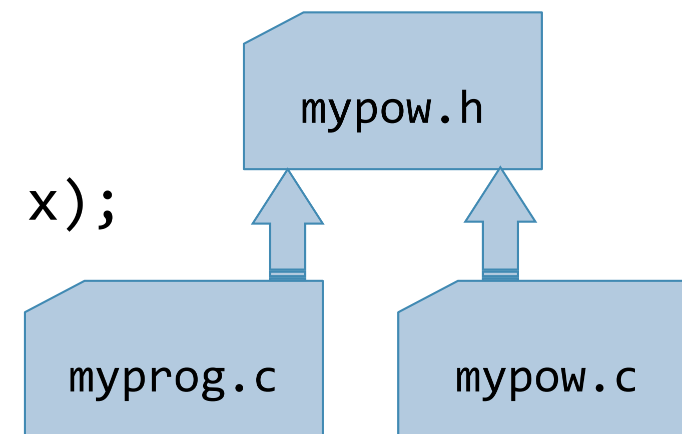
```
// myprog.c
unsigned long long ipow(unsigned n, unsigned x);

int main() {
  // тут основная программа, использующая ipow
}
```

- Это работает. Все ли видят проблемы с таким подходом?

Заголовочные файлы

- Выход это составить заголовочный файл с определением и включить его и в файл с реализацией и в файл с использованием.

```
// --- файл mypow.h ---

unsigned long long ipow(unsigned n, unsigned x);
```




```
> gcc myprog.c mypow.c -o myprog
```

- Внутри myprog.c мы воспользуемся текстовым включением.

```
#include <stdio.h>
#include "mypow.h"
```

- Вид скобок определяет путь поиска файлов: треугольные скобки – файл ищется по системным путям.

Стражи включения

- Один заголовочный файл может быть включён в тысячи файлов в одном проекте.
- Чтобы избежать лишних включений, можно использовать прагму.

```
// --- файл mypow.h ---
#pragma once
unsigned ipow(unsigned n, unsigned x);
```

- Позднее мы поговорим о стражах включения подробнее.

Список как структура данных

- Представьте, что список вынесен в модуль как в `encap-sll.h` / `encap-sll.c`
- Внешний интерфейс выглядит примерно так

```
struct list_t; // объявление списка, детали спрятаны

struct list_t *list_create(int d);
struct list_t *list_push(struct list_t * pre, int d);
struct list_t *list_pop(struct list_t * pre);
```

- Такой список в принципе не может случайно зациклиться, так как вся работа с ним осуществляется только функциями его **открытого интерфейса**
- И каждая из этих функций **поддерживает инварианты своего типа данных**

Структуры данных

- Список не единственная структура данных. Самые известные это:
  - Динамические массивы
  - Линейные и циклические списки
  - Хеш-таблицы
  - Поисковые деревья
- Обсуждение: чем отличаются друг от друга структуры данных?

Хеш-таблица как структура данных

- Как структура данных, хеш-таблица тоже инкапсулируется в отдельном модуле
- Интерфейс может выглядеть как:

```
struct hashmap_t; // объявление таблицы, детали спрятаны

struct hashmap_t *hashmap_create(unsigned m);
int hashmap_add(struct hashmap_t *h, unsigned key,
                const char *value);

const char *hashmap_find(struct hashmap_t *h, unsigned key);
void hashmap_destroy(struct hashmap_t *h);
```

- Разумеется реальный интерфейс может быть гораздо богаче и интереснее

Структура дерева: первая попытка

- Самый низкоуровневый способ работать с бинарными деревьями это работать со структурой отдельного узла

```
struct node_t;

struct node_t *node_alloc(int, struct node_t *, struct node_t *);
void node_free(struct node_t *);

struct node_t * node_left(struct node_t *);
struct node_t * node_right(struct node_t *);
int node_data(struct node_t *);
```

- В таком виде инкапсуляции в общем немного. Такую структуру можно запутать даже не зная представления `node_t`

Структура данных для дерева

- Теперь мы можем работать с поисковым бинарным деревом не в терминах его узлов, а в терминах его данных

```
struct tree_t; // balanced search tree

void tree_add_value(struct tree_t *top, int value);
void tree_has_value(struct tree_t *top, int value);
void tree_visit_range(struct tree_t *top, int l, int r, visit_t v);

void tree_free(struct tree_t *top);
```

- И только в этом случае упорядоченное отображение (дерево) становится такой же настоящей структурой данных, какой ранее стало неупорядоченное (хеш)

Обсуждение

- Если мы добавим подержку красно-черного инварианта при вставках и удалениях, изменит ли это нашу структуру данных?

Литература

- $[C11]$ ISO/IEC – "Information technology – Programming languages – C", 2011
- $[K\&R]$ Brian W. Kernighan, Dennis Ritchie – The C programming language, 1988
- $[Cormen]$ Thomas H. Cormen – Introduction to Algorithms, 2009
- $[TAOCP]$ Donald E. Knuth – The Art of Computer Programming, 2011
- $[SALG]$ Robert Sedgewick Algorithms, 4th edition, 2011
- $[WUNI]$ en.wikipedia.org/wiki/Universal_hashing