

Lowest Common Ancestor. Sprase Table

Дефиниция и примери

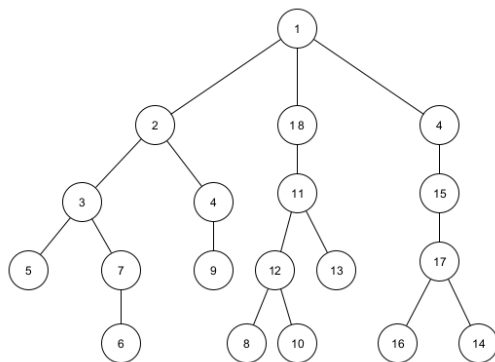
Дефиниция

Нека имаме кореново дърво T с корен $root$. Връх u се нарича предшественик на връх v , ако u лежи на единствения път между $root$ и v . Ще бележим с $depth(u)$ дълбочината на връх u или с други думи казано - разстоянието от $root$ до u . При тази конвенция, най-близкият общ предшественик на u и v , който ще бележим с $lca(u, v)$, ще бъде върхът x с максимална дълбочина, който е предшественик едновременно на u и v .

Примери

В този случай коренът е връх 1.

Фигура 1



- $lca(5, 7) = 3$;

- $lca(4, 9) = 4$;
- $lca(3, 9) = 2$;
- $lca(2, 13) = 1$;
- $lca(4, 14) = 4$;
- $lca(2, 4) = 1$;

Свойства на $lca(u, v)$

- $lca(u, v) = lca(v, u)$
- $lca(u, v) = u$ тогава и само тогава, когато u е предшественик на v
- $lca(u, lca(v, w)) = lca(lca(u, v), w)$.

По тази причина можем да записваме обобщено $lca(u, v, w)$. Това е полезно, ако например имаме нужда да пресмятаме lca на цели интервали от масив. Поради това свойство знаем, че задачата има смисъл и може да се реши със сегментно дърво. От следващото свойство ще научим, че има и по-добър начин.

- $lca(u, v, v) = lca(u, v)$

Това значи, че добавянето на "излишни" върхове към тези, на които търсим lca не променя отговора. Тост ако искаме да сметнем lca на група върхове можем да си ползвадим да сметнем lca на група, която съдържа тези върхове, но по няколко пъти. Това ни дава възможност да пресмятаме lca на интервал от върхове чрез sparse table. Повече по темата ще научите по-късно.

- $lca(u, v) = lca(u, v')$, където v' се получава, когато "качим" връх v на нивото на връх u (разбира се, приемаме, че $depth(u) \leq depth(v)$)
- $depth(lca(u, v)) \leq depth(u)$ и $depth(lca(u, v)) \leq depth(v)$.

Можете да се убедите с примери от Фигура 1:

- $u = 5, v = 6, v' = 7$
- $u = 2, v = 13, v' = 3$
- $u = 11, v = 14, v' = 15$
- $u = 2, v = 9, v' = 2$

Тук ще покажем не съвсем формално доказателство на свойството. Ясно е, че след като само "покачваме" върхове то няма как lca да "слезе". Затова само трябва да проверим, че $lca(u, v)$ е предшественик на u и v' . Нека запишем $l = lca(u, v)$, тривиално е, че l предшества u . Сега трябва да видим дали предшества v' . Допускаме противното: нека l не предшества v' . Ние знаем, че l предшества v . Тъй като ние само сме се качвали нагоре, то единственият вариант l вече да не предшества v' е да сме го "подминали" тоест l да лежи на пътя между v и v' . Ясно е също и че $l \neq v'$. Това обаче е противоречие, понеже $depth(l) \leq depth(u) = depth(v') \leq depth(v)$ и излиза, че няма как l да лежи на пътя между v и v' .

LCA с binary lifting

Използвайки тези свойства можем да изготвим алгоритъм, който намира $lca(u, v)$ за $O(\log N)$.

Забелязваме, че ако имаме два върха u и v на равна дълбочина, то ако започнем постепенно да ги "качваме" едновременно, то стойностите ще се различават до един момент и по-конкретно, първата стойност на съвпадение ще бъде точно $lca(u, v)$. Нека имаме функция $rise(u, n)$, която връща връх, отговарящ на връх u след като бъде "качен" с n стъпки. Тоест така излиза, че трябва да намерим най-малкото n , за което $rise(u, n) = rise(v, n)$ и тази стойност ще бъде $lca(u, v)$. По-късно обаче, ще стане ясно, че е по-добре да намерим последното n , за което $rise(u, n) \neq rise(v, n)$ и така $lca(u, n)$ ще бъде $parent(rise(u, n))$, където $parent(x)$ е родителят на x .

От тези наблюдения става ясно, че е доста удобно да имаме бърз начин да "качваме" върхове. По тази причина е измислена техниката *binary lifting*. Идеята е следната: за всеки връх x пазим $rise(x, 1)$, $rise(x, 2)$, $rise(x, 4)$, ..., $rise(x, 2^k)$, ... (разбира се няма нужда да пазим тези стойности до безкрай, а само до достатъчно голяма степен на 2). Ключовото наблюдение тук е, че тези стойности могат да се пресмятат доста лесно. Например: $rise(x, 1) = parent(x)$. Също така $rise(x, 2) = parent(parent(x)) = rise(rise(x, 1), 1)$. Забелязваме също и че: $rise(x, 2^k) = rise(rise(x, 2^{k-1}), 2^{k-1})$. Това е вярно, понеже искаме да направим 2^k стъпки нагоре, които можем да разделим на два скока по 2^{k-1} . Разбира се, че ако се опитаме да скочим прекалено нагоре, няма да има връх в дървото, който да отговаря на този скок. Например $rise(2, 2)$ в дървото от Фигура 1 не съществува. Затова за такива случаи записваме, че стойността е -1 . Също така приемаме, че $rise(-1, 2^k) = -1$. Сега можем да разширим способностите на нашата функция *rise*. Забелязваме, че ако можем да представим число като сума от степени на двойката, то можем и да направим подходяща поредица от изкачвания, с които да постигнем скок с исканата големина. Например, ако искаме да пресметнем $rise(x, 7)$ можем да използваме $rise(rise(rise(x, 1), 2), 4)$. Тоест, като използваме, че $7 = 4 + 2 + 1$, то правим първо скок с дължина 1, после скок с дължина 2 и накрая скок с дължина 4. Друг пример е: $rise(x, 10) = rise(rise(x, 2), 8)$.

Имайки тези знания можем да направим алгоритъм, който може да намира *lca* на два върха u и v . Допускаме, че $dept(u) \leq depth(v)$. Първо можем да изравним дълбочината на двата върха за $O(\log N)$ и така ще трябва да смятаме *lca* на два върха с еднаква дълбочина. Нека новата стойност на v след изравняването бъде v' . Тогава знаем, че съществува n , за което $rise(u, n) \neq rise(v', n)$ и $rise(u, n+1) = rise(v', n+1)$. Тоест искаме да намерим последното n , за което някакво си условие е в сила. В такива ситуации можем да направим нещо като *binary search* по битовете на n и да се опитваме да правим старши битове да бъдат 1 без да разваляме свойството. По-конкретно, тръгваме да ходим по битовете на числото в обратен ред $MAXBit, MAXBit - 1, MAXBit - 2, \dots, 2, 1, 0$ и за всеки бит b проверяваме дали $rise(u, n + 2^b) \neq rise(v', n + 2^b)$, ако да, то $n += 2^b$ (n започва от 0). За повече детайли вижте

имплементацията.

Имплементация

Имплементацията на lca with binary lifting е също доста проста, както и идеята. Грубо казано, след като имаме определен корен на дървото ще пуснем едно *dfs*, което да инициализира родителите и дълбочините на върховете. Също трябва да попълним стойностите за скоковете нагоре в дървото, което може да се направи лесно, ако ги пазим в таблица. Тук е изложена и примерна имплементация.

```
#include <iostream>
#include <vector>

using namespace std;

const int MAXN = 1e5;
const int MAXLog = 20;

int n;
vector <int> graph[MAXN];

int parent[MAXN], depth[MAXN];
int sparse[MAXLog+2][MAXN];

void dfs(int x, int last, int level)
{
    parent[x] = last;
    depth[x] = level;

    for(int y: graph[x])
    {
        if(y!=last)
            dfs(y, x, level+1);
    }
}

void init(int root)
{
    dfs(root, -1, 1);
}
```

```

for(int x = 1; x<=n; x++) sparse[0][x] = parent[x];

for(int l = 1; l<=MAXLog; l++)
{
    for(int x = 1; x<=n; x++)
    {
        if(sparse[l-1][x]==-1)
            sparse[l][x] = -1;
        else
            sparse[l][x] = sparse[l-1][sparse[l-1][x]];
    }
}

int rise(int x, int levelDiff)
{
    for(int bit = 0; bit<=MAXLog; bit++)
    {
        if(((levelDiff>>bit)&1)==1)
        {
            if(x!=-1)
                x = sparse[bit][x];
        }
    }

    return x;
}

int lca(int u, int v)
{
    if(depth[u]>depth[v])
        swap(u, v);

    v = rise(v, depth[v]-depth[u]);
    if(u==v) return u;

    for(int l = MAXLog; l>=0; l--)
    {
        if(sparse[l][u]!=sparse[l][v])
        {

```

```

        u = sparse[1][u];
        v = sparse[1][v];
    }
}

return parent[u];
}

int main()
{
    cin >> n;
    for(int i = 0; i < n-1; i++)
    {
        int a, b;
        cin >> a >> b;

        graph[a].push_back(b);
        graph[b].push_back(a);
    }

    int root;
    cin >> root;

    init(root);
}

```

Приложение на LCA

Пътища в дърво

Единственият път от u до v в дърво е точно пътят $u \rightarrow lca(u, v) \rightarrow v$. Тоест от u се качваме до $lca(u, v)$ и след това от там слизаме до v .

Проверка за положение на върхове

Можем да проверим дали връх u е предшественик на връх v , ако проверим дали $lca(u, v)$ е равно на u .

Задачи за LCA

Открито първенство на София по информатика 2020 - В2 Пътища

Условие на задачата

Анализ

Codeforces - Hill Climbing

Условие и анализ на задачата

LCA с Euler Tour

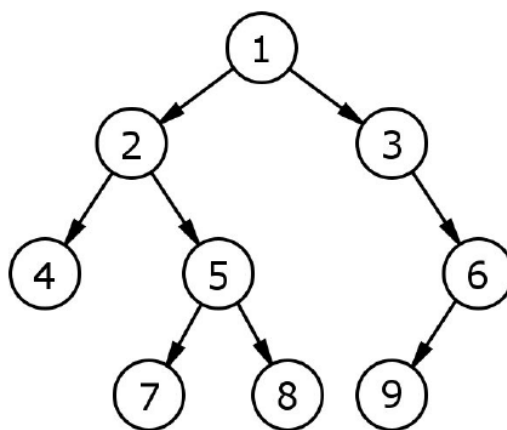
Tutorial от cp-algorithms

Euler Tour

Euler tour или Ойлерово обхождане е начин за обхождане на дърво базиран на DFS. Идеята е, че коренът на поддърво стои в началото и края на подмасива, който представлява поддървото, а също така и между всеки два подмасива, отговарящи за някое поддърво на поддървото. По-конкретно, примерна имплементация на алгоритъма е следната.

```
void dfs(int x, int last, vector <int> &eulerTour)
{
    eulerTour.push_back(x);
    for(int y: adj[x])
    {
        if(y!=last)
        {
            dfs(y, x, eulerTour);
            eulerTour.push_back(x);
        }
    }
}
```

Фигура 2



Ето как би изглеждало едно примерно Ойлерово обхождане на дървото от Фигура 2. Тук сме показали и дълбочината на върха, понеже тя ще е важна по-късно.

ind	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
vertex	1	2	4	2	5	7	5	8	5	2	1	3	6	9	6	3	1
depth	0	1	2	1	2	3	2	3	2	1	0	1	2	3	2	1	0

Оказва се, че ако искаме да намерим lca на два върха u и v трябва да намерим върха, който е с най-малка дълбочина и се намира между първите срещания на тези върхове. Първото срещане на върх u е индексът, на който върх u се среща за пръв път в ойлеровото обхождане. Можете да се убедите с примери. Грубо идеята е, че lca е най-високият връх на пътя между два върха, а този интервал, който се получава че разглеждаме съдържа път, който може да не е прост, но е не се "изкачва" прекалено много. Откриването на този връх може да стане по много начини - с коренова декомпозиция, сегментно дърво и т.н., но ние ще се спрем на имплементацията със sparse table, понеже най-често тази комбинация се оказва полезна.

Sparse table

Tutorial от cp-algorithms

Подобно на кореновата декомпозиция и сегментните дървета, sparse table-а също пази определена информация от търсения вид за разни интервали от нашия масив. По-конкретно, нека приемем, че ще търсим минимум в интервал. Нека имаме масив $a[]$ с размер n . Тогава sparse table-а $sparse[j][i]$ ще пази минимума за интервала $[i, i + 2^j - 1]$. Разбира се няма нужда да използваме стойности за j по-големи от $\log_2(n)$. Също така, ако се окаже, че $i + 2^j - 1 \geq n$ (тоест излиза от масива), тогава $sparse[j][i]$ ще пази минимум само за елементите до края на масива (един вид си представяме, че след края има безброй неутрални елементи спрямо операцията, която извършваме, в случая на \min този елемент е $+\infty$). Забелязваме също, че можем лесно да пресмятаме стойностите на $sparse[i][j]$. В общия случай, когато не излизаме от масива $sparse[j][i] = \min(sparse[j-1][i], sparse[j-1][i + 2^{j-1}])$. Така можем да пресметнем всички нужни ни стойности. Ето една примерна имплементация.

```
for(int i = 0; i < n; i++) sparse[0][i] = a[i];
for(int l = 1; l <= MAXLog; l++)
{
    for(int i = 0; i < n; i++)
    {
        if(i + (1 << (l-1)) >= n)
            sparse[l][i] = sparse[l-1][i];
        else
            sparse[l][i] = min(sparse[l-1][i],
                               sparse[l-1][i + (1 << (l-1))]);
    }
}
```

Другият въпрос, който остава е как да правим query в тази структура. Обръщаме внимание, че sparse table работи само при оператори, които са идемпотентни, тоест добавянето на елемент по няколко пъти към "сметката" не я променя. По-конкретно, всички знаем, че $\min(a, b) = \min(a, b, a)$. Тоест като добавим елемент няколко пъти, стойността се запазва. Това важи за функции като lca , gcd (НОД),

$lcm(\text{НОК})$, max и други. Обръщаме внимание, че не важи за сума, тоест $sum(a, b) \neq sum(a, b, a)$ в общия случай.

Връщайки се към конкретната задача: как да намираме min за числата в интервала $[l, r]$ бързо. Забелязваме, че интервала може да се покрие от два интервала, които имат размер точна степен на двойката, по-конкретно $sz = 2^{\lceil \log_2(r-l+1) \rceil}$, нека отбележим цялата част на двоичния логаритъм със $L = \lceil \log_2(r-l+1) \rceil$. Така минимумът за един интервал е точно $min(sparse[L][l], sparse[L][r - 2^L + 1])$. Обърнете внимание, че тези два интервала могат да се пресичат. Това е и причината да изискваме идемпотентност.

Цялата на част на двоичния логаритъм можем предварително да пресcompute-нем по такъв начин.

```
log2[1] = 0;
for(int x = 2; x <= MAXN; x++)
    log2[x] = log2[x/2] + 1;
```

Ето и една примерна реализация за RMQ (range minimum query).

```
int rmq(int l, int r) //range minimum query
{
    return min(sparse[log2[r-l+1]][l],
               sparse[log2[r-l+1]][r - (1 << log2[r-l+1]) + 1]);
}
```

Цялостен алгоритъм

След като вече знаем алгоритъмът с Ойлерово обхождане и можем да боравим със sparse table остава само да направим имплементация. С тези инструменти ние можем да решаваме задачата за lca за $O(N \log N)$ пресcompute и $O(Q)$ за отговаряне на всичките Q заявки.

Тъй като тук ние трябва да връщаме чрез sparse table-а не самата минимална стойност на дълбочина, а върхът, който я "притежава" то можем да постъпим по няколко начина. Единият е да пазим в структура двете информации - връх и дълбочина, и да напишем

функция *min* за тази структура (може и със `std::pair` без да се занимаваме със специални `min` функции. Друг вариант е да напишем специална функция, която при вход от два върха *u* и *v* да върне този, който има по-малка дълбочина. Това ще бъде и стратегията за тази имплементация. Малка имплементационна подробност е, че размера на ойлеровото обхождане може да бъде двоен на размера на дървото, затова трябва масивите да бъдат по-големи.

Можете да тествате имплементацията си тук: [Library Checker - Lowest Common Ancestor](#)

```
#include <iostream>
#include <vector>

using namespace std;

const int MAXN = 5e5;
const int MAXLog = 20;

int n;
vector <int> adj[MAXN+5];

int depth[MAXN+5], firstSeen[MAXN+5];
int sparse[MAXLog+2][MAXN*2+5], log2[MAXN*2+5];

void dfs(int x, int last, int level, vector <int> &eulerTour)
{
    depth[x] = level;
    firstSeen[x] = eulerTour.size();

    eulerTour.push_back(x);
    for(int y: adj[x])
    {
        if(y!=last)
        {
            dfs(y, x, level+1, eulerTour);
            eulerTour.push_back(x);
        }
    }
}
```

```

int getShallowerVertex(int u, int v)
{
    if(depth[u]<depth[v]) return u;
    return v;
}

void init(int root)
{
    vector<int> eulerTour;
    dfs(root, -1, 0, eulerTour);

    log2[1] = 0;
    for(int x = 2; x<=2*MAXN; x++)
        log2[x] = log2[x/2] + 1;

    for(int i = 0; i<eulerTour.size(); i++) sparse[0][i] =
        eulerTour[i];
    for(int l = 1; l<=MAXLog; l++)
    {
        for(int i = 0; i<eulerTour.size(); i++)
        {
            if(i+(1<<(l-1)) >= eulerTour.size())
                sparse[l][i] = sparse[l-1][i];
            else
                sparse[l][i] = getShallowerVertex(sparse[l-1][i],
                    sparse[l-1][i+(1<<(l-1))]);
        }
    }
}

int rmq(int l, int r) //range minimum query
{
    return getShallowerVertex(sparse[log2[r-l+1]][l],
        sparse[log2[r-l+1]][r - (1<<log2[r-l+1]) + 1]);
}

int lca(int u, int v)
{
    if(firstSeen[u]>firstSeen[v]) swap(u, v);

```

```

    return rmq(firstSeen[u], firstSeen[v]);
}

int main()
{
    ios::sync_with_stdio(false);
    cin.tie(nullptr);

    int Q;
    cin >> n >> Q;
    for(int i = 1; i < n; i++)
    {
        int p;
        cin >> p;

        adj[p].push_back(i);
    }

    init(0);
    while(Q--)
    {
        int u, v;
        cin >> u >> v;

        cout << lca(u, v) << '\n';
    }
}

```
