

TODO: nekonzistence v n a N TODO: udelat poradek v citacich

# Kapitola 1

## Grafy, stromy

**TODO: nejaký hezký obrázek?** V této kapitole definujeme graf jakožto matematickou strukturu, popíšeme základní pojmy týkající se grafů a nastíníme možné vztahy mezi grafem a maticí. Dále definujeme strom, jakožto speciální případ grafu. Terminologie je převzata z [13]

### 1.1 Základní grafová terminologie

**Definice 1.** Mějme množinu  $V$  a množinu  $E = \{\{u, v\} \mid u, v \in V\}$ . Uspořádanou dvojici  $G := (V, E)$ , nazveme neorientovaný graf. Množinu  $V$  nazýváme množinou vrcholů grafu  $G$ , jejím prvkům říkáme vrcholy, množinu  $E$  nazýváme množinou hran grafu  $G$ , jejím prvkům říkáme hrany. Prvky hrany  $e$  označujeme jako vrcholy incidentní hraně  $e$  nebo koncové body hrany  $e$ . Říkáme, že hrana  $e = \{v, w\}$  spojuje vrcholy  $v$  a  $w$ .

Pokud neuvažujeme hrany jako nejvýše dvouprvkové množiny vrcholů, ale jako uspořádané dvojice  $(u, v)$ , nazýváme odpovídající graf **orientovaný**. Obvykle uvažujeme orientované a neorientované grafy zvlášť, ale je možné uvažovat i jejich kombinaci. Graf, v němž se vyskytují jak orientované tak neorientované hrany, nazýváme **smíšený**. Řekneme, že neorientovaný graf  $G$  je **úplný**, pokud  $\forall u, v \in V (\{u, v\} \in E)$ .

Povšimněme si, že v definici grafu není vyloučen případ, kdy jsou oba koncové body hrany shodné. Hrana je pak jednoprvkovou množinou a nazýváme ji **smyčkou** v grafu.

**Poznámka 1.** V neorientovaném grafu  $G = (V, E)$  platí, že jeho množina hran  $E$  je podmnožinou  $\binom{V}{2} \cup V$ , kde  $\binom{V}{2}$  značí množinu všech dvouprvkových podmnožin množiny  $V$ . V orientovaném grafu  $H = (W, F)$  je  $F$  podmnožinou množiny  $W \times W$ , tj. všech uspořádaných dvojic vrcholů z  $W$ .

**Stupněm vrcholu**  $v \in V$  rozumíme počet vrcholů spojených s vrcholem  $v$ , značíme  $d(v)$ . Množinu všech vrcholů, které jsou v grafu  $G$  spojeny s vrcholem  $v$  značíme  $\text{adj}_G(v)$ .

**Definice 2.** **Podgrafem** grafu  $G$  nazveme libovolný graf  $H = (W, F)$  který splňuje:  $W \subseteq V$ ,  $F \subseteq E$  a všechny vrcholy incidentní hranám z  $F$  náleží do  $W$ . Úplný podgraf grafu  $G$  nazýváme **klikou** v grafu  $G$ . Podgrafem grafu  $G$  **indukovaným** množinou vrcholů  $W$

nazveme takový podgraf  $G$ , který obsahuje všechny hrany grafu  $G$ , jejichž oba koncové body náležejí do  $W$ , značíme  $G(W)$ .

**Definice 3.** Mějme graf  $G = (V, E)$  a zobrazení  $\omega : V \rightarrow \mathbb{R}$ , resp.  $c : E \rightarrow \mathbb{R}$ . Přidáním zobrazení  $\omega$ , resp.  $c$  ke grafu  $G$  dostaneme graf, který nazýváme **ohodnocený**, resp. **vážený** reálným ohodnocením.

**Definice 4.** Mějme neorientovaný graf  $G = (V, E)$ , nechť  $k$  je přirozené číslo. Posloupnost vrcholů  $(v_i)_{i=1}^k$  nazveme **sledem** v grafu  $G$ , pokud  $\forall i \in \{1, \dots, k\} (\{v_{i-1}, v_i\} \in E)$ . Pokud navíc  $\forall i, j \in \{1, \dots, k\} (i \neq j \Rightarrow v_i \neq v_j)$ , nazveme posloupnost  $(v_i)_{i=1}^k$  **cestou**.

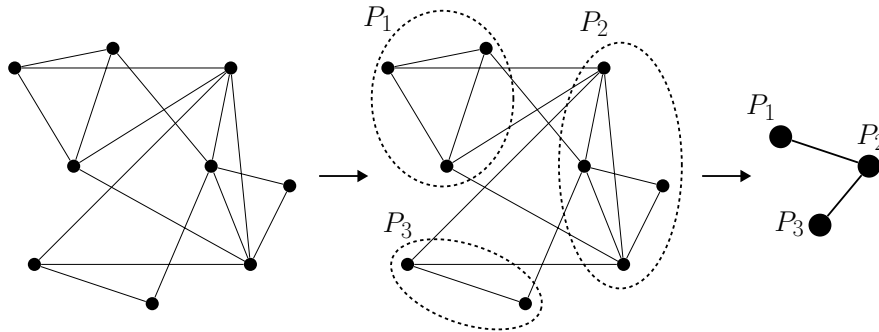
Existuje-li mezi libovolnými dvěma vrcholy grafu cesta, řekneme, že graf je **souvislý**. **Vzdáleností** dvou vrcholů v souvislém grafu  $G = (V, E)$  nazveme délku nejkratší cesty mezi těmito dvěma vrcholy. **Vzdáleností** vrcholu  $v \in V$  od množiny vrcholů  $W \subset V$  nazveme minimální vzdálenost mezi vrcholem  $v$  a libovolným vrcholem náležícím do  $W$ .

Při používání víceúrovňových metod dělení grafů (kapitola **TODO: refmultilevel**) budeme často odvozovat z grafu jiný graf shluknutím množin jeho vrcholů. Takový graf budeme nazývat faktorgraf a formálně jej definujeme následovně.

**Definice 5.** Nechť  $\mathcal{P} = \{P_1, \dots, P_n\}$  je rozkladem množiny vrcholů  $V$  grafu  $G = (V, E)$ . Faktorgrafem grafu  $G$  nazveme graf  $G/\mathcal{P} = (\mathcal{P}, \mathcal{E}_{\mathcal{P}})$ , kde

$$((P_i, P_j) \in \mathcal{E}_{\mathcal{P}} \text{ pro } i, j \in \hat{n}, i \neq j) \Leftrightarrow P_i \cap \text{adj}_G(P_j) \neq \emptyset.$$

Proces vytváření faktorgrafu  $G/\mathcal{P}$  z grafu  $G$  je znázorněn na obrázku 1.1



Obrázek 1.1: Proces vytváření faktorgrafu

**TODO: potřebuju ctvercovou sit**

## 1.2 Strom

Nyní zavedme základní pojmy týkající speciální třídy grafů nazývané stromy [13]

**Definice 6. Stromem**  $T = (V, E)$  nazveme konečný souvislý neorientovaný graf bez cyklů. Pokud navíc v grafu  $T$  vyznačíme bod  $r \in V$ , nazýváme uspořádanou dvojici  $(T, r)$  **kořenovým stromem** a bod  $r$  nazveme kořenem tohoto stromu.

Z definice stromu je patrné, že každý vrchol  $v$  kořenového stromu  $(T, r)$  spojuje s kořenem tohoto stromu právě jedna cesta. Vrcholy ležící na této cestě nazveme **předchůdci** vrcholu  $v$ . Předchůdce vrcholu  $v$  různé od  $v$  nazýváme **vlastními předchůdci** vrcholu  $v$ . Vrcholy, jejichž předchůdcem je vrchol  $v$ , nazýváme **následníky** vrcholu  $v$ . Vrcholy bez následníků nazýváme **listy stromu**  $T$ , vrcholy alespoň s jedním následníkem nazýváme **vnitřní vrcholy** stromu.

**Definice 7. Podstromem** stromu  $T$  určeným vrcholem  $v$  nazveme indukovaný podgraf stromu  $T$  tvořený vrcholem  $v$  a všemi jeho následníky.

### 1.3 Vztah grafu a matice

Grafy a matice spolu úzce souvisí, což nám umožňuje převádět problémy na maticích na problémy na grafech a naopak. Nezanedbatelným praktickým důsledkem jejich vzájemného vztahu je i možnost používat grafové algoritmy při řešení některých maticových úloh, především může být tento přístup výhodný pro řídké matice. Dělení grafů může posloužit například při snaze o paralelizaci rozkladu matice.

Neorientovaný graf  $G = (V, E)$  s vrcholy  $V = v_1, \dots, v_m$  a hranami  $E = e_1, \dots, e_n$ . Tento graf lze reprezentovat pomocí matice dvěma základními způsoby. **Maticí sousednosti**, neboli adjacenční matici, nazveme matici  $A_G$  o rozměrech  $m \times m$ , jejíž prvek na pozici  $(i, j)$  je definován jako:

$$(A_G)_{i,j} := \begin{cases} 1 & \text{existuje-li hrana spojující vrcholy } v_i, v_j \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$$

**Maticí incidence** grafu  $G$  nazveme matici o rozměrech  $m \times n$  definovanou následovně:

$$(\bar{A}_G)_{i,j} := \begin{cases} 1 & \text{je-li } v_i \text{ koncovým vrcholem hrany } e_j \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$$

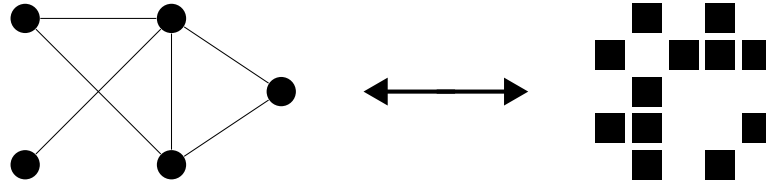
V kapitole **TODO: refspektral** budeme potřebovat **Laplaceovu matici**  $Q$  grafu  $G$ , která je definována následovně:

$$Q_{ij} := \begin{cases} -1 & \text{pro } i \neq j, (v_i, v_j) \in E \\ 0 & \text{pro } i \neq j, (v_i, v_j) \notin E \\ d(i) & \text{pro } i = j \end{cases}$$

Laplaceovu matici  $Q$  lze tedy vyjádřit jako  $Q = D - A_G$ , kde  $D$  značí diagonální matici se stupni jednotlivých vrcholů na diagonále.

Pokud chceme reprezentovat matici pomocí grafu, většinou nám stačí zachytit její strukturu. V takovém případě můžeme pro popis obecně nesymetrické matice  $A$  o rozměrech  $n \times n$  použít orientovaný graf s množinou vrcholů  $V = v_1, \dots, v_n$  a množinou hran  $E = \{(v_i, v_j) | a_{ij} \neq 0\}$ . V případě, že je matice  $A$  symetrická, můžeme ji analogickým způsobem reprezentovat pomocí neorientovaného grafu. Pokud bychom chtěli do grafu zanést i numerické hodnoty jednotlivých prvků matice, museli bychom použít ohodnocený graf.

**Poznámka 2.** Pro jednoduchost zavedme následující terminologii. Říkáme, že graf  $G$  **odpovídá** matici  $A$  právě tehdy, když matice  $A$  má nenulové prvky na stejných pozicích jako matice sousednosti grafu  $G$ .



Obrázek 1.2: Příklad grafu a jemu odpovídající struktury matice

Pro reprezentaci ne nutně čtvercové matice  $A$  o rozměrech  $m \times n$  můžeme také použít bipartitní graf, který je definován následovně:

**Definice 8.** Graf  $G = (V, E)$  nazveme bipartitním, pokud existuje rozklad množiny  $V$  na podmnožiny  $R, B$  takové, že  $\binom{R}{2} \cap E = \binom{B}{2} \cap E = \emptyset$ .

Jinými slovy se jedná o graf, který lze rozdělit na dvě části tak, že v žádné z částí není ani jedna hrana. Takovýto bipartitní graf se standardně značí  $G = (R, B, E)$  a pokud za jeho pomoci chceme reprezentovat matici  $A$ , pokládáme  $|R| = m$ ,  $|B| = n$  a  $E = \{(v_i, v_j) \mid v_i \in R, v_j \in B, a_{ij} \neq 0\}$ .

**TODO: Příklad = obrázek**

## Kapitola 2

# Dělení grafů

TODO: doplnit, nejdriv viceurovnove, cela prace smeruje k tomu, ze se prerozdeluje. Metis, profesionalni kod - aplikuje viceurovnove deleni. Vicurovnove deleni - hlavni koncept. Spektral na nejhrubsi, KL pri zjemnovani. OHODNOCENE - pri zdrcavani vrcholu i hran v multilevelu.

V této kapitole formálně popíšeme problém dělení grafu na  $k$  podgrafů a definujeme pojmy s ním spojené. Vzhledem k tomu, že v naší implementaci používáme pro dělení grafů profesionální softwarovou knihovnu METIS [10], zaměříme se nejprve na schéma víceúrovňového dělení grafu jakožto algoritmus používaný při profesionálních implementacích dělení grafů. Dále se budeme věnovat některým technikám, které tvoří součást víceúrovňového dělení grafů, konkrétně spektrálnímu dělení grafu **TODO: zdroj** a vylepšovacímu algoritmu podle Kernighana a Lina [12]. Na závěr kapitoly zmíníme algoritmus metody vnořených řezů (Nested Dissection) jakožto konkrétní příklad víceúrovňového algoritmu pro dělení grafů **TODO: zdroj**.

Dělení grafů na  $k$  podgrafů je praktický problém s bohatým teoretickým zázemím a mnoha aplikacemi. Může nám pomoci při řešení parciálních diferenciálních rovnic na moderních počítačových architekturách [23] a nezanedbatelnou roli hraje také při výrobě mikroprocesorů metodou VLSI nebo při řešení velkých systémů lineárních rovnic [12, 21]. Často dochází k omezení se na dělení grafu na dva podgrafy, v této práci se však pokusíme prozkoumat i vliv dělení grafu na více částí.

Podmínky, která jsou na výsledné rozdělení grafu kladeny, se mohou lišit v závislosti na daném použití. V této kapitole popíšeme klasická kritéria, která se používají pro určování kvality rozdělení grafu, v kapitole 4 poté bude popsán problém dělení grafů vzhledem k dodatečným kritériím (například vzhledem k maticovým operacím).

### 2.1 Formální definice dělení grafu

Jako dělení grafu na  $k$  částí označujeme hledání rozkladu množiny vrcholů tohoto grafu na  $k$  podmnožin. V nejklaštějších případech je problém dělení grafů na  $k$  podgrafů definován následovně.

Mějme graf  $G = (V, E)$ ,  $|V| = n$ . **Rozdělením grafu  $G$  na  $k$  podgrafů** nazveme

rozklad množiny vrcholů  $V$  na vzájemně disjunktní podmnožiny  $V_1, V_2, \dots, V_k$ . Řekneme, že rozdělení je **optimální** vzhledem k základním kritériím, pokud splňuje:

1.  $\forall i \in \{1, \dots, k\} \quad |V_i| = n/k$
2. Počet hran spojujících vrcholy ležící v různých podmnožinách je minimální možný.

Rozdělení grafu běžně zapisujeme jako vektor  $P$  o délce  $n$  takový, že pro každý vrchol  $v \in V$  je podgraf, v němž se vrchol  $v$  nachází, určen  $v$ -tou složkou vektoru  $P$ .

Pokud má graf  $G$  sudý počet vrcholů a rozdělíme ho na dvě části s množinami vrcholů  $V_1, V_2$ , které mají stejný počet prvků, nazveme toto rozdělení **bisekcí** a velikost hranového separátoru nazýváme **šířkou bisekce**.

Mějme graf  $G = (V, E)$  a jeho rozdělení na  $k$  podgrafů s množinami vrcholů  $V_1, V_2, \dots, V_k$ . Množinu hran, jejichž jeden koncový bod náleží do  $V_i$  a druhý do  $V_j$  pro  $i \neq j$  nazveme **hranovým separátorem**, značíme  $\delta(A, B)$ . Jinou variantou nalézt rozdělení grafu definované pomocí vrcholového separátoru. **Vrcholovým separátorem**  $V_S$  grafu  $G$  nazveme podmnožinu množiny vrcholů  $V$  takovou, že odstraněním všech vrcholů náležících do  $V_S$  z grafu  $G$  dojde k jeho rozpadu na nejméně  $k$  komponent odpovídajících jednotlivým částem rozdělení. Řešení problému optimální transformace mezi hranovým a vrcholovým separátorem, známe-li jeden z nich, můžeme naléznout v [22]. To nám ale nic neříká o řešení problému samotného nalezení optimálního hranového nebo vrcholového separátoru [17].

Ukazuje se, že rozhodovací problém pro optimální rozdělení grafu je NP-úplný [6]. Existují však algoritmy, které rozdělí graf v rozumném čase, přičemž kvalita jimi nalezeného rozdělení bude poměrně dobrá [16].

## 2.2 Obecné schéma víceúrovňového dělení grafů

Víceúrovňové dělení grafů slouží k převedení problému dělení grafu s velkým počtem vrcholů na problém dělení grafu s počtem vrcholů výrazně menším. Tím může dojít k výraznému zkrácení času potřebného pro běh algoritmu **TODO: zdroj**, proto je tento postup využíván v profesionálních softwarových nástrojích pro dělení grafů [8, 10]. Nejobecnější popis tohoto schématu sestává ze tří základních fází: zhrubovací fáze (coarsening phase), rozdělení vzniklého grafu a projekce tohoto rozdělení zpět na původní graf (refinement phase).

**Zhrubovací fáze** Základní myšlenkou zhrubovací fáze víceúrovňového schématu dělení grafů je vytvořit z původního grafu  $G$  graf  $G_m$  s menším počtem vrcholů. Jinými slovy jde o konstrukci posloupnosti grafů  $(G_i)_0^m$  takové, že  $G_0 := G$  a pro každé dva po sobě jdoucí členy této posloupnosti platí, že  $G_{i+1}$  je faktorgrafem  $G_i$  s menším počtem vrcholů.

Pro konstrukci posloupnosti  $(G_i)_0^m$  existuje několik možných postupů [11] **TODO: zdroje? kaku je souhrn**. Ve většině schémat pro tvorbu grafu s méně vrcholy jsou podmnožiny množiny vrcholů grafu  $G_i$  spojovány v jeden vrchol, čímž vznikne hrubší graf  $G_{i+1}$  splňující výše uvedené podmínky kladené na posloupnost  $(G_i)_0^m$ . Při konstrukci

členu  $G_{i+1}$  z členu  $G_i$  je pro udržení strukturálních informací o původním grafu nutné, abychom použili ohodnocený graf, kde ohodnocení vrcholů a hran při tvorbě faktorgrafu pokládáme pro každý vrchol (resp. hranu) roven součtu vah všech vrcholů (resp. hran) spojením kterých daný vrchol (resp. hrana) vznikl.

**Definice 9.** Mějme graf  $G = (V, E)$ . Párováním grafu  $G$  nazveme podmnožinu množiny  $E$ , pro kterou platí, že žádné dvě hrany z této množiny nemají společný koncový bod. Maximálním párováním grafu  $G$  nazveme párování grafu  $G$  s nejvyšším možným počtem hran.

Pro získání hrubšího grafu byly popsány dva hlavní postupy. První z nich je založen na nalezení vhodného párování a následném spojení každé dvojice vrcholů spojených hranou náležící do párování do jednoho [4, 15]. Aby došlo k rychlému zmenšení počtu vrcholů grafu, je vhodné volit maximální párování [9]. Druhý postup hledání vhodných množin vrcholů pro sloučení je založen na spojování skupin vrcholů, které jsou spojeny mnoha hranami [11] **TODO: konkrétní? kaku je souhrn.**

**Dělení získaného grafu** V této fázi dochází k rozdělení grafu  $H$  libovolným algoritmem pro dělení grafů, například lze použít spektrální dělení popsané níže v kapitole 2.3. Pomocí tohoto algoritmu získáme rozdělení  $P_m$  grafu  $G_m$ .

**Projekce rozdělení na původní graf** Cílem této fáze je převést získané rozdělení  $P_m$  grafu  $G_m$  na rozdělení  $P_0$  vstupního grafu  $G$ . Toho dosáhneme postupnou tvorbou posloupnosti rozdělení  $P_{m-1}, \dots, P_1$  grafů  $G_{m-1}, \dots, G_1$ . Nejjednodušším způsobem projekce rozdělení grafu  $G_{i+1}$  na rozdělení grafu  $G_i$  je umístit všechny vrcholy grafu  $G_i$ , jejichž spojením vznikl vrchol  $v$  grafu  $G_{i+1}$  do části rozdělení, v níž leží vrchol  $v$ .

Tento postup však není optimální, protože graf  $G_i$  má větší počet vrcholů než  $G_{i+1}$  a má tedy více stupňů volnosti vzhledem k optimalitě rozdělení. Díky tomu může nastat situace, kdy rozdělení  $P_i$  získané z rozdělení  $P_{i+1}$  lze dále vylepšit. Nejběžněji využívaným algoritmem pro vylepšování rozdělení grafu je algoritmus podle Kernighana a Lina [12], který bude popsán v kapitole 2.4. Kvůli snížení časové náročnosti aplikace tohoto algoritmu se častěji setkáme s jeho aplikací pouze na části jednotlivých podgrafů ležících v blízkosti hranového či vrcholového separátoru než s jeho aplikací na celý graf [11].

## 2.3 Spektrální dělení

**TODO: pro  $k$  částí?**

## 2.4 Algoritmus podle Kernighana a Lina

Algoritmus podle Kernighana a Lina (KL algoritmus) vznikl v roce 1970 s cílem dělit elektrické obvody na kartách [12]. V jeho základní podobě se jedná o algoritmus pro vylepšování již získaného rozdělení grafu, pro jeho funkci je tedy nutné poskytnout mu



vstupní rozdělení grafu. Pokud používáme algoritmus podle Kernighana a Lina přímo jako dělicí algoritmus, můžeme vstupní rozdělení lze zvolit libovolně. Jeho výsledky pro různá počáteční rozdělení se však mohou lišit. Proto je v praxi je výhodné, aby představovalo vstupní rozdělení rozumnou aproximaci optimálního rozdělení. Kvůli tomu se algoritmus podle Kernighana a Lina obvykle používá v kombinaci s jiným algoritmem pro dělení grafů, případně jako součást většího celku - například při víceúrovňovém dělení grafu ve fázi projekce hrubého rozdělení na vstupní graf (viz kapitola 2.2). V tomto případě je většinou využita modifikace tohoto algoritmu, která bere v úvahu pouze vrcholy blízko separátoru. **TODO: KL algoritmus pro  $k$  částí, vrcholový separátor - je to tak, že se vždycky přehazuje mezi dvojicí částí?**

## 2.5 Metoda vnořených řezů

Metoda vnořených řezů byla navržena a publikována v roce 1973 Alanem Georgem **TODO: cite**. Jedná se o analyticky dobře popsany algoritmus využívající metodu rozděl a panuj pro řešení problémů na řídkých maticích pomocí jejich převedení na grafy a dělení těchto grafů. Tento algoritmus je teoreticky velmi dobře popsán pro některé speciální typy grafů, například pro čtvercové sítě. V této práci jej uvádíme jako konkrétní příklad přístupu k víceúrovňovému dělení grafů a proto se **TODO: ?budeme zabývat jeho obecnou formou pomocí níž lze dělit libovolné grafy.**

## Kapitola 3

# Rozklady matic

Při řešení maticových úloh velkých rozměrů je často výhodné si danou matici rozložit na součin dvou nebo více matic a díky tomu původní problém převést na sérii výpočetně jednodušších problémů. Jako klasické příklady úloh z numerické lineární algebry, při jejichž řešení nám mohou rozklady matic pomoci, uveďme hledání řešení soustav lineárních algebraických rovnic či problém nalezení vlastních či singulárních čísel a příslušných vektorů. Rozklady matic navíc hrají nezanedbatelnou roli například v QR algoritmu, LR algoritmu [7] nebo Lanczosově algoritmu [14, 20]. Rozklady matic nám mohou pomoci odhalit i teoretické vlastnosti a strukturu matic a odpovídajících maticových problémů. Příkladem takového rozkladu je singulární rozklad (SVD decomposition) [7].

Rozklady matic můžeme rozdělit na dvě základní skupiny - úplné rozklady a neúplné rozklady. V této práci nás budou zajímat především rozklady, které se týkají řídkých matic, tedy matic, které obsahují velké množství nulových prvků. U takových matic bereme pro zefektivnění výpočtů do úvahy strukturu jejich nenulových prvků. Při výpočtu úplného rozkladu řídké matice může v průběhu rozkladu docházet ke změnám ve struktuře jejích nenulových prvků. Proces výpočtu úplného rozkladu může být pak výpočetně velmi náročný. V takovém případě je častou praxí nepočítat úplný rozklad, ale vypočítat jen jeho aproximaci, o které hovoříme jako o neúplném rozkladu a pro získání řešení soustavy je třeba jej kombinovat s nějakou iterační metodou [3].

**TODO: Je to potřeba?** V námi popisovaném základním modelu rozkladů matic se omezíme na úplný rozklad symetrické a pozitivně definitní matice. Nejedná se o samostatné omezení, při řešení mnoha praktických úloh se setkáváme právě s maticemi splňujícími tyto podmínky. Navíc se ukazuje, že i pro matice, které nejsou symetrické nebo pozitivně definitní, lze při jejich rozkladech vyjít z tohoto modelu. **TODO: end**

### 3.1 Úplné rozklady

Společným znakem algoritmů pro úplný rozklad matice je, že při práci v přesné aritmetice, dokážou tyto algoritmy najít přesný rozklad matice v konečně mnoha krocích. Nejklasičtější příkladem takového algoritmu je symetrická eliminace, jejímž speciálním případem je Choleského rozklad, který pro nás bude obzvláště zajímavý. V této

kapitole nebudeme ve schématech rozlišovat řídké a husté matice.

V této práci pro nás bude zajímavý především Choleského rozklad jakožto konkrétní příklad algoritmu pro úplný rozklad matice. Jedná se o speciální případ symetrické eliminace, která bude v této kapitole taktéž popsána.

### 3.1.1 Symetrická eliminace

Cílem **symetrické eliminace** je rozložit danou čtvercovou matici  $A$  na tvar  $LDL^T$ , kde  $L$  je dolní trojúhelníková matice a  $D$  je diagonální matice. Obecně pro indefinitní matice je třeba pro zajištění numerické stability tohoto algoritmu vynásobit danou matici nějakou permutační maticí [5]. Pro pozitivně definitní matice je však stabilita zajištěna i bez toho. **TODO: cite**

Mějme matici  $A$  o rozměrech  $N \times N$ . Symetrickou eliminací matice  $A$  nazveme hledání konečných posloupností  $A_0, \dots, A_{N-1}, L_1, \dots, L_{N-1}$  splňujících, že  $(\forall i \in \{1, \dots, N-1\}) (A_{i-1} = L_i A_i L_i^T)$  a  $A_{N-1} = D$ . Předpis pro hledání těchto posloupností je následující:

$$\begin{aligned} A_0 = A &= \begin{pmatrix} d_1 & v_1^T \\ v_1 & \bar{H}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{v_1}{d_1} & I_{N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 & 0 \\ 0 & \bar{H}_1 - \frac{v_1 v_1^T}{d_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \frac{v_1^T}{d_1} \\ 0 & I_{N-1} \end{pmatrix} \\ &= L_1 \begin{pmatrix} d_1 & 0 \\ 0 & H_1 \end{pmatrix} L_1^T = L_1 A_1 L_1^T \\ A_1 &= \begin{pmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & v_2^T \\ 0 & v_2 & \bar{H}_2 \end{pmatrix} = L_2 A_2 L_2^T \\ &\vdots \\ A_{N-1} &= D, \end{aligned} \tag{3.1}$$

kde  $H_i = \bar{H}_i - \frac{v_i v_i^T}{d_i}$ . Zřejmě pak  $A = LDL^T$ , kde  $L := L_1 \cdots L_{N-1}$

### 3.1.2 Choleského rozklad

**Choleského rozklad** je speciálním případem symetrické eliminace. Jeho cílem je rozložit pozitivně definitní matici  $A$  na tvar  $A = LL^T$ , kde matici  $L$  označujeme jako faktor matice  $A$ . Jinými slovy se jedná o symetrickou eliminaci matice  $A$ , kde požadujeme, aby matice  $D$  byla rovna jednotkové matici. Jedná se o modifikaci Gaussovy eliminace pro symetrické pozitivně definitní matice. Základní informaci o existenci Choleského rozkladu pozitivně definitní matice nám dává následující věta, jejíž důkaz můžeme nalézt například v [7].

**Věta 1.** *Pro libovolnou pozitivně definitní matici  $A$  existuje jednoznačný rozklad  $A = LL^T$ , kde  $L$  je dolní trojúhelníková matice s kladnými prvky na diagonále.*

Pro výpočet Choleského rozkladu matice  $A$  stačí modifikovat algoritmus 3.1 tak, aby matice  $D$  vznikající při symetrické eliminaci matice  $A$  byla rovná jednotkové matici. Toho dosáhneme následovně:

$$\begin{aligned}
 A_0 = A &= \begin{pmatrix} d_1 & v_1^T \\ v_1 & \bar{H}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{d_1} & 0 \\ \frac{v_1}{\sqrt{d_1}} & I_{N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \bar{H}_1 - \frac{v_1 v_1^T}{d_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{d_1} & \frac{v_1^T}{\sqrt{d_1}} \\ 0 & I_{N-1} \end{pmatrix} \\
 &= L_1 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & H_1 \end{pmatrix} L_1^T = L_1 A_1 L_1^T \\
 A_1 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & v_2^T \\ 0 & v_2 & \bar{H}_2 \end{pmatrix} = L_2 A_2 L_2^T \\
 &\vdots \\
 A_{N-1} &= L_N I_N L_N^T,
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

kde opět zřejmě platí, že  $L = L_1 \dots L_N$ .

Matici  $L$  můžeme však z matic  $L_1, \dots, L_N$  vypočítat výrazně jednodušším způsobem.

**Lemma 1.** *Při konstrukci Choleského rozkladu  $LL^T$  matice  $A$  pomocí algoritmu (3.2) platí*

$$L = L_1 + L_2 + \dots + L_N - (N-1)I_N, \tag{3.3}$$

tj.  $i$ -tý sloupec  $L$  je roven  $i$ -tému sloupci  $L_i$ .

*Důkaz.* Matice  $L_i$  má tvar

$$\begin{pmatrix} 1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & 1 & & & 0 \\ & & & \sqrt{d_i} & & \\ & & & \frac{\vec{v}_i}{\sqrt{d_i}} & 1 & \\ 0 & & & & & \ddots \\ & & & & & & 1 \end{pmatrix}.$$

Vynásobením matice  $L_i$  a  $L_j$ , kde  $i < j$ , zjevně dostanu

$$\begin{pmatrix} 1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & \sqrt{d_i} & & & 0 \\ & & \frac{\vec{v}_i}{\sqrt{d_i}} & \ddots & & \\ & & & & \sqrt{d_j} & \\ 0 & & & & \frac{\vec{v}_j}{\sqrt{d_j}} & \ddots \\ & & & & & & 1 \end{pmatrix},$$

což je přesně matice  $L_i + L_j - I$ . Z toho již plyne tvrzení lemmatu.  $\square$

Pro výpočet prvků matice  $L$  existují tři základní postupy: submaticové schéma vyplývající přímo z lemmatu 1, řádkové schéma s použitím metody ohraničování a sloupcové schéma. V přesné aritmetice jsou všechna tři tato schémata ekvivalentní, ale v případě **TODO: nepřesné aritmetiky? Je to vhodné pojmenování?**, se kterou se standardně při počítačových výpočtech setkáváme, mohou schémata dávat různé výsledky. Tato schémata napočítávají prvky matice  $L$  v různém pořadí. Navíc, efektivní modifikace rozdělení je velmi pevně propojena s očíslováním vrcholů částí rozděleného grafu (popsáno v 4.1).

**Submaticové schéma** S pomocí lemmatu 1 můžeme navrhnout submaticové schéma pro výpočet faktoru  $L$  následovně. Matici  $L$  získáváme po sloupcích, ale při výpočtu  $i$ -tého sloupce zároveň počítáme submatici  $H_i = \bar{H}_i - \frac{v_i v_i^T}{d_i}$  matice  $A$ , kterou potřebujeme pro výpočet zbylých částí faktoru matice  $A$  (viz algoritmus (3.2)).

**Řádkové schéma - metoda ohraničování** Jiným přístupem, který můžeme zvolit pro získání Choleského rozkladu  $LL^T$  matice  $A$  je řádkové schéma využívající metodu ohraničování (bordering method) **TODO: cite**. Nejprve přepíšeme matici  $A$  do tvaru

$$A = \begin{pmatrix} M & \vec{u} \\ \vec{u}^T & s \end{pmatrix},$$

přičemž pro odvození vztahu pro výpočet prvků faktoru  $L$  předpokládáme, že Choleského rozklad  $L_M L_M^T$  matice  $M$  již známe. Pak pro Choleského rozklad matice  $A$  platí:

$$A = \begin{pmatrix} L_M & 0 \\ \vec{w}^T & t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_M^T & \vec{w} \\ 0 & t \end{pmatrix},$$

kde je zřejmě  $\vec{w} = L_M^{-1} \vec{u}$  a  $t = (s - \vec{w}^T \vec{w})^{1/2}$ .

Pro získání Choleského rozkladu matice  $M$ , jehož znalost jsme výše předpokládali, můžeme použít stejný postup. Rekursivním použitím této metody dostáváme soustavu lineárních algebraických rovnic pro výpočet  $i$ -tého řádku matice  $L$ .

$$\begin{pmatrix} l_{1,1} & & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ l_{i-1,1} & \cdots & l_{i-1,i-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_{i,1} \\ \vdots \\ l_{i,i-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{i,1} \\ \vdots \\ a_{i,i-1} \end{pmatrix}$$

$$l_{i,i} = \left( a_{i,i} - \sum_{j=1}^{i-1} l_{i,j}^2 \right)^{\frac{1}{2}}.$$

**Sloupcové schéma** Jedná se o obdobný postup jako v řádkovém schématu, pouze napočítáváme prvky matice  $L$  po sloupcích. Vzorce, které nám vznikou jsou pro  $j =$

$1, 2, \dots, N$  a pro  $i = j + 1, j + 2, \dots, N$  následující:

$$l_{j,j} = \left( a_{j,j} - \sum_{k=1}^{j-1} l_{j,k}^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$l_{i,j} = \left( a_{i,j} - \sum_{k=1}^{j-1} l_{i,k} l_{j,k} \right) / l_{j,j}.$$

### 3.1.2.1 Choleského rozklad pro řídké matice

**TODO:** Tohle je z VU upravené jen minimálně. Vadí to?

V praktických aplikacích Choleského rozkladu se často setkáváme s řídkými maticemi, navíc jsou pro nás řídké matice zajímavé i z hlediska dělení příslušných grafů. Pokud máme řídkou matici, v optimálním případě bychom chtěli, aby i její Choleského faktor byl řídká matice, jejíž dolní trojúhelník má stejnou strukturu jako dolní trojúhelník původní matice.

Mějme čtvercovou matici  $A$  o rozměrech  $N \times N$  a její Choleského rozklad  $LL^T$ . Základním problémem výše zmíněných algoritmů je, že matice  $L$  běžně obsahuje nenulové prvky na místech, na nichž měla matice  $A$  nuly. Toto zaplňování je způsobeno při vytváření posloupnosti matic  $H_i$  (viz algoritmus 3.2), konkrétně při přechodu od matice  $\bar{H}_i$  k matici  $H_i$ . Připomeňme, že mezi těmito dvěma maticemi platí vztah

$$H_i = \bar{H}_i - \frac{\vec{v}_i \vec{v}_i^T}{d_i}.$$

Označme  $\eta(A)$ , resp.  $\eta(\vec{v})$  počet nenulových prvků matice  $A$ , resp. vektoru  $v$ . Pak z lemmatu 1 a ze vztahu pro výpočet  $L_i$  v Choleského algoritmu 3.2 zřejmě platí

$$\eta(L) = N + \sum_{i=1}^{N-1} \eta(\vec{v}_i).$$

Vyslovme větu, ze které nám vyplyne počet informací o počtu multiplikativních operací (násobení a dělení) potřebných pro výpočet Choleského rozkladu matice  $A$ .

**Věta 2.** *Počet multiplikativních operací potřebných pro výpočet Choleského rozkladu  $LL^T$  matice  $A$  o rozměrech  $N \times N$  je roven*

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} \eta(v_i) (\eta(v_i) + 3) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} (\eta(L_{*i}) - 1) (\eta(L_{*i}) + 2),$$

kde  $L_{*i}$  označuje  $i$ -tý sloupec matice  $L$ .

*Důkaz.* Jednotlivá schémata pro výpočet matice  $L$  popsaná v předchozí kapitole se liší pouze v pořadí, v němž výpočet prvků matice  $L$  provádějí.

V  $i$ -tém kroku algoritmu potřebujeme  $\eta(\vec{v}_i)$  operací pro výpočet  $v_i / \sqrt{d_i}$  a  $\frac{1}{2} \eta(\vec{v}_i) (\eta(\vec{v}_i) + 1)$  operací pro vytvoření matice  $\frac{\vec{v}_i \vec{v}_i^T}{d_i}$ . Tvrzení věty dostaneme sečtením přes všechna  $i$ .  $\square$

**Poznámka 3.** Pro hustou matici  $B$  platí, že počet nenulových prvků v jejím Choleského faktoru  $L_B$  je roven  $\frac{1}{2}N(N+1)$ . Z věty 2 je tedy počet operací potřebný pro výpočet Choleského rozkladu matice  $B$  roven

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} i(i+3) = \frac{1}{6}N^3 + \frac{1}{2}N^2 - \frac{2}{3}N. \quad (3.4)$$

Z toho plyne, že počet operací pro výpočet Choleského rozkladu libovolné řídké matice o rozměrech  $N \times N$  lze seshora odhadnout číslem daným vztahem (3.4).

Problém zaplňování se dá alespoň částečně vyřešit tím, že místo rozkladu matice  $A$  provádíme rozklad matice  $PAP^T$ , kde  $P$  je nějaká permutační matice (tj. matice, kterou když vynásobíme matici  $A$ , dojde pouze k permutaci řádků, resp. sloupců matice  $A$ ). Vzhledem k tomu, že jsme od začátku předpokládali, že je matice  $A$  symetrická a pozitivně definitní, je i matice  $PAP^T$  symetrická a pozitivně definitní. Pokud máme zadán problém řešení soustavy  $Ax = b$ , převedeme jej na problém řešení soustavy  $(PAP^T)(Px) = Pb$ . Tento problém je úzce spjat s problémem očíslování grafů při jejich dělení a budeme se jím zabývat v dalších kapitolách.

## Kapitola 4

# Další parametry pro dělení grafu

Dělení grafu lze využít jako nástroj pro paralelizaci problémů, které lze převést na úlohy na grafech. Vzhledem ke vztahu matic a grafů popsanému výše v kapitole 1.3 lze problém minimalizace zaplnění v Choleského faktoru dané matice pomocí permutace řádků a slouců popsaný v kapitole 3.1.2.1 převést na problém na odpovídajícím grafu.

Jak bylo zmíněno, při dělení grafu podle klasické definice bereme ohled pouze na dvě kritéria: na velikost separátoru a vyváženost jednotlivých částí rozdělení. V případě, že dělení grafu využíváme jako součást komplexnějšího algoritmu, například pro paralelizaci nějaké maticové úlohy, nemusí být rozdělení vytvořené s ohledem na tato kritéria optimální. V takovém případě je nutné brát ohled na to, jaké operace budeme na výsledných podgrafech provádět a v závislosti na tom specifikovat nová kritéria.

Pro dělení grafu s ohledem na více než dvě základní kritéria popsaná výše existují dva základní přístupy. Můžeme hledat rozdělení grafu optimalizující všechna kritéria zároveň (apriorní přístup), nebo můžeme graf rozdělit pomocí některého ze základních algoritmů pro dělení grafu a poté vzniklé rozdělení vylepšit tak, abychom optimalizovali vyváženost operací (aposteriorní přístup).

V této práci se zaměříme na situaci, kdy je dělení grafů použito jako nástroj pro vyvažování počtu operací na jednotlivých oblastech při paralelizaci Choleského rozkladu. Požadujeme tedy, aby počet operací potřebný pro Choleského rozklad na jednotlivých oblastech byl v optimálním případě stejný. Zřejmě nám takto vzniká kritérium, které není zahrnuto v kritériích podle klasické definice - ta totiž neberou v potaz počet hran v grafech odpovídajících jednotlivým oblastem, neboli v řeči matic počet nenulových prvků matic sousednosti jednotlivých podgrafů. Čas pro vypočítání rozkladu na jednotlivých oblastech může být kvůli tomu výrazně odlišný. Námi navržený algoritmus bude využívat aposteriorního přístupu, nejprve tedy nalezneme suboptimální řešení vzhledem k základním kritériím a poté budeme přesouvat vrcholy mezi jednotlivými částmi rozdělení s cílem vylepšit jej vzhledem k Choleského rozkladu.

Mějme graf  $G$  a jeho rozdělení na podgrafy  $G_1, \dots, G_k$  s maticemi sousednosti  $A_{G_1}, \dots, A_{G_k}$ . Provedeme Choleského rozklad matic  $A_{G_1}, A_{G_2}$ , označme

$$A_{G_i} = L_{G_i} L_{G_i}^T \text{ pro } i = 1, 2.$$



Pokud existují  $i, j \in \{1, \dots, k\}$  tak, že matice  $L_{G_i}^T$  a  $L_{G_j}^T$  budou mít výrazně různý počet nenulových prvků, je zřejmé, že toto rozdělení grafu  $G$  je nevhodné pro napočítávání Choleského rozkladu na oblastech vzhledem k vyváženosti na počet operací. Někdy pro vyvážení rozdělení za účelem Choleského rozkladu na oblastech stačí vhodně přechíslovat vrcholy grafu  $G$  a tím změnit matice sousednosti odpovídající jednotlivým podgrafům. **TODO: Budeme to dělat takhle, nebo budeme číslovat vrcholy až po rozdělení?**

**Poznámka 4.** Mějme soustavu lineárních algebraických rovnic  $Ax = b$  a hledejme její řešení pomocí Choleského rozkladu této matice  $A = LL^T$  za pomoci dělení grafů. Pro vyřešení soustavy potřebujeme vyřešit rovnice

$$\begin{aligned} Ly &= b \\ L^T x &= y \end{aligned}$$

Pokud rozdělíme graf příslušný matici  $A$  na  $k$  částí a provedeme rozklad matic  $A_1 = L_1 L_1^T, \dots, A_k = L_k L_k^T$  odpovídajících vzniklým podgrafům a matice  $A_S = L_S L_S^T$  odpovídající vrcholovému separátoru, pak lze soustavu  $Ly = b$  napsat ve tvaru

$$\begin{pmatrix} L_1 & & & & \\ & L_2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & L_k & \\ S_1 & S_2 & & S_k & L_S \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \\ y_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \\ b_S \end{pmatrix}$$

a tedy

$$\begin{aligned} y_1 &= L_1^{-1} b_1 \\ y_2 &= L_2^{-1} b_2 \\ &\vdots \\ y_k &= L_k^{-1} b_k \\ y_S &= L_S^{-1} (b_S - S_1 y_1 - S_2 y_2 - \dots - S_k y_k) \end{aligned}$$

Je vidět, že zatímco výpočet  $y_1, \dots, y_k$  může probíhat paralelně, výpočet  $y_S$  je závislý na  $y_1, \dots, y_k$ . Je tedy vhodné, aby separátor byl malý. Soustavu  $L^T x = y$  poté vyřešíme obdobně.

Jak vidíme, vyvstávají nám při dělení grafu s cílem vypočítávat Choleského rozklad na oblastech dvě základní otázky:

1. Jak najít očíslování grafu takové, aby Choleského rozklad na jednotlivých podgrafech byl vyvážený? **TODO: Příkladně bych se k tomu rovnal až výsledné podgrafy**
2. Jak určit počet nenulových prvků v Choleského rozkladu matice se strukturou matice sousednosti jednotlivých podgrafů?

Způsob hledání odpovědí na tyto dvě otázky popíšeme v následujících dvou oddílech.

## 4.1 Algoritmy pro očíslování vrcholů grafu

V tomto oddíle popíšeme základní algoritmy pro očíslování vrcholů grafu. Zřejmě platí, že přechíslováním vrcholů grafu dojde k permutaci řádků a sloupů v jeho matici sousednosti. Hlavní motivací, proč je pro nás číslování vrcholů grafu důležité, tedy je, že permutací řádků matice můžeme výrazně redukovat počet operací potřebných pro její Choleského rozklad.

Na závěr kapitoly se zmíníme o topologickém číslování vrcholů stromu, které pro nás bude potřebné při popisu eliminačních stromů.

### 4.1.1 Číslování vrcholů grafu v závislosti na vzdálenosti od separátoru

V této podkapitole popíšeme nejjednodušší metodu číslování vrcholů podgrafu, který vznikl rozdělením původního grafu na  $n$  částí. Tuto metodu lze používat samostatně, ale vzhledem k její povaze ji lze využít i pro vylepšení ostatních metod očíslování grafu, například ji lze kombinovat s metodou minimálního stupně.

Mějme graf  $G = (V, E)$  a jeho vrcholový separátor  $G_S$ , jehož odebráním se graf rozpadne na  $k$  podgrafů  $G_1, \dots, G_k$ . Popíšeme číslování vrcholů podgrafu  $G_i$ :

1. Položme  $j := 1$ .
2. Nalezneme neočíslovaný vrchol  $v$  grafu  $G_i$  takový, že jeho vzdálenost od vrcholového separátoru v grafu  $G$  je maximální.
3. Tomuto vrcholu dáme číslo  $j$ , položíme  $j := j + 1$ .
4. Pokud jsou všechny vrcholy očíslovány, skončíme, jinak se vrátíme na krok 2

Z algoritmu je vidět, že výsledné očíslování vrcholů grafu nemusí být jednoznačné, protože pokud nalezneme dva nebo více vrcholů, jejichž vzdálenost od separátoru je shodná, můžeme je očíslovat v libovolném pořadí.

### 4.1.2 Číslování vrcholů pomocí metody minimálního stupně

Metoda minimálního stupně je jednoduchým algoritmem pro nalezení očíslování grafu. Algoritmus pro hledání očíslování grafu pomocí této metody je následující:

1. Mějme graf  $G = (V, E)$  a položme  $j := 1$ .
2. Nalezneme neočíslovaný vrchol  $v$  grafu  $G$  s nejmenším stupněm a přiřadíme mu číslo  $j$ .
3. Přidáme hrany mezi vrcholy z  $\text{adj}_G(v)$  tak, aby  $\text{adj}_G(v)$  byla klika v grafu  $G$ .
4. Pokud nejsou všechny vrcholy očíslovány, zvětšíme  $j$  o 1 a vrátíme se na krok 2.

Očíslování vrcholů grafu  $G$  pomocí tohoto algoritmu není jednoznačné, protože vrcholů s minimálním stupněm může být více.

### 4.1.3 Smíšené číslování

Vzhledem k povaze číslování popsaných v oddílech 4.1.2 a 4.1.1 můžeme tyto algoritmy zkombinovat. V tomto oddíle popisujeme dvě možnosti přístupu k tomuto problému.

Pokud máme rozdělení  $G_1, \dots, G_k$  grafu  $G$  s vrcholovým separátorem  $G_S$ , můžeme pro očíslování části  $G_i$  použít číslování vrcholů pomocí metody minimálního stupně, kde při výběru vrcholu ve 2. kroku přidáme kritérium vzdálenosti od separátoru popsané v 4.1.1. Nejprve tedy nalezneme množinu všech vrcholů grafu  $G$ , které mají minimální stupeň a poté mezi nimi zvolíme ten, který má nejmenší stupeň.

**TODO: smíšené s různými koef.**

### 4.1.4 Topologické číslování vrcholů stromu

Topologické číslování vrcholů stromu je intuitivní způsob pro očíslování vrcholů grafu, který je stromem.

**Definice 10.** Mějme graf  $G = (V, E)$ , který je stromem. Očíslování jeho vrcholů nazveme topologickým právě tehdy, když pro každý vrchol  $v \in V$  platí, že libovolný následník vrcholu  $v$  ve stromu  $G$  má nižší číslo než vrchol  $v$ .

## 4.2 Eliminační stromy

**TODO: vic citaci**

V této kapitole se budeme zabývat eliminačními stromy a jejich významem pro rozklady řídkých matic [19]. Eliminační stromy při rozkladu matic hrají důležitou roli, protože nám dávají informaci o zaplnění v Choleského faktoru matice bez toho, abychom museli počítat jednotlivé numerické hodnoty. Lze tedy díky nim jednoduše porovnávat vhodnost zvoleného uspořádání řádků a sloupců matice pro Choleského rozklad.

V této kapitole bez újmy na obecnosti předpokládáme, že matice, jejíž Choleského rozklad chceme napočítávat, je ireducibilní, a tedy graf odpovídající této matici je souvislý.

### 4.2.1 Definice eliminačního stromu matice

Nejprve se omezme na ireducibilní, pozitivně definitní, symetrickou matici  $A_T$  o rozměrech  $n \times n$ , jejíž přidružený graf  $G(A_T)$  je strom. Aby při Choleského rozkladu matice  $A_T$  nedošlo k žádnému zaplnění, stačí když pomocí topologického číslování očísloujeme vrcholy jí přidruženého grafu (z předpokladu se jedná o strom) a řádky a sloupce matice  $A_T$  seřadíme odpovídajícím způsobem. Pak zjevně platí, že matice  $A_T$  má, s výjimkou posledního řádku, pod diagonálou vždy právě jeden nenulový prvek. Díky této vlastnosti označujeme  $A_T$  jako perfektní eliminační matici, tj. existuje permutační matice  $P$  taková, že Choleského rozklad matice  $PA_TP^T$  nebude obsahovat žádné zaplnění [24] (Matice  $PA_TP^T$  můžeme vnímat pouze jako přechíslování řádků a sloupců matice  $A_T$ ).

Proto pro matici  $A_T$  můžeme definovat funkci  $\text{PARENT} : \{1, \dots, n\} \rightarrow \{1, \dots, n\}$  následovně:

$$\forall j \in \{1, \dots, n-1\} \quad \text{PARENT}[j] := p \quad \Leftrightarrow \quad a_{p,j} \neq 0 \wedge p > j$$

a speciálně:  $\text{PARENT}[n] := 0$ .

Zřejmě ve stromu přidruženém k matici  $A_T$  platí, že předchůdcem vrcholu  $x_j$  je vrchol  $x_{\text{PARENT}[j]}$ .

Většinou však nepracujeme s maticemi, jejichž přidružený graf by byl stromem. Zobecníme tedy výše popsanou konstrukci pro libovolnou řídkou, ireducibilní, pozitivně definitní, symetrickou matici  $A$  o rozměrech  $n \times n$ . Předpokládejme, že známe Choleského rozklad této matice, tj.  $A = LL^T$ . **Maticí se zaplněním** nazveme matici  $F$  definovanou jako  $F = L + L^T$ . Dále zavedeme matice  $L_t$  a  $F_t$  následovně:  $L_t$  je matice vzniklá z  $L$  tím, že v každém sloupci vynulujeme všechny prvky pod diagonálou kromě prvku s nejnižším řádkovým indexem a  $F_t := L_t + L_t^T$ .

Z definice  $F_t$  vidíme, že se jedná o matici, jejíž přidružený graf  $G(F_t)$  je strom. Díky tomu můžeme vyslovit následující definici.

**Definice 11. Eliminačním stromem** matice  $A$  nazveme graf  $G(F_t)$  popsaný výše, značíme  $T(A)$ . Podstrom eliminačního stromu  $T(A)$  s kořenem  $x_j$  značíme  $T[x_j]$ . Množinu vrcholů tohoto stromu značíme taktéž  $T[x_j]$ .

Díky této definici můžeme definici funkce  $\text{PARENT}$  přirozeně rozšířit na matici  $A$  následovně:

$$\text{PARENT}[j] := \min \{i > j \mid l_{i,j} \neq 0\},$$

kde  $l_{i,j}$  označuje  $i, j$ -tý prvek matice  $L$ .

**Pozorování 1.** Přímo z definice plyne, že  $T(A)$  a  $T(F)$  jsou identické.

**Pozorování 2.** Pokud  $x_i$  je vlastním předchůdcem  $x_j$  v eliminačním stromu, pak  $i > j$ .

**Tvrzení 1.** *Nechť  $A$  je řádká, ireducibilní, pozitivně definitní, symetrická matice o rozměrech  $n \times n$  s Choleského rozkladem  $LL^T$  a nechť  $i, j \in \{1, \dots, n\}$ ,  $i > j$ . Pak numerické hodnoty sloupce  $L_{\bullet i}$  závisí na sloupci  $L_{\bullet j}$  právě tehdy, když  $l_{i,j} \neq 0$ .*

*Důkaz.* Tvrzení plyne přímo ze vzorců pro výpočet Choleského rozkladu pomocí sloupcového algoritmu popsaného v kapitole 3.2 □

Přímým důsledkem tvrzení 1 je, že graf  $G(F)$  zachycuje informace o závislostech mezi jednotlivými sloupci při výpočtu Choleského rozkladu.

### 4.2.2 Eliminační stromy a Choleského rozklad

Z definice eliminačních stromů je zřejmé, že budou obsahovat velké množství informací o rozkladu matice a procesu jeho vytváření. Například v [26] byly popsány vlastnosti eliminačních stromů vzhledem ke Gaussově eliminaci. My však budeme eliminační stromy

využívat jako nástroj pro výpočet počtu nenulových prvků v Choleského faktoru matice [19]. Uveďme větu, která dává do souvislosti nenulové prvky v Choleského faktoru a strukturu eliminačního stromu [18].

**Věta 3.** *Nechť  $A$  je řídká, ireducibilní, pozitivně definitní, symetrická matice o rozměrech  $n \times n$  s Choleského rozkladem  $LL^T$  a nechť  $i, j \in \{1, \dots, n\}$ . Pak  $[L]_{ij} \neq 0$  právě tehdy, když vrchol  $v_j$  je v eliminačním stromě následníkem vrcholu  $v_k$  takového, že  $[A]_{ik} \neq 0$ .*

Tato věta nám dává návod, jak vypočítat počet nenulových prvků v Choleského faktoru. Uveďme algoritmus popsany v [19]. Obdobný algoritmus s důrazem na implementaci na multiprocsorech můžeme nalézt v [27]. V [2] pak můžeme najít postup, jakým napočítávat počet nenulových prvků ve faktoru a strukturu eliminačního stromu současně.

**TODO: doplnit algoritmus**

## Kapitola 5

# Algoritmizace a implementace

Cílem programu, který jsme implementovali, je ukázat, že rozdělení grafu získané za pomoci profesionální numerické knihovny pro dělení grafů METIS, nemusí být vyvážené vzhledem k výpočtu Choleského rozkladu na vzniklých oblastech. Dále jsme se pokusili navrhnout a otestovat metodu přerozdělení grafu založenou na přecíslování vrcholů grafu. Cílem navržené metody je zlepšit rozdělení grafu tak, aby počet operací potřebných pro Choleského faktORIZACI na jednotlivých oblastech byl pokud možno stejný a nebyl vyšší než maximum z počtu operací při rozdělení počátečním.

**TODO: Fortran, Fortran90, c++ TODO: dělení na kolik částí?**

Naši implementaci můžeme rozdělit na několik logických celků. **TODO: doplnit**

### 5.1 Formát a uložení vstupní matice

V této podkapitole bude popsán vstupní formát matice a způsob její reprezentace v našem programu. **TODO: Zajímá nás jen struktura**

#### 5.1.1 Vstupní formát matice

Jako základní matice pro testování výsledků našeho programu nám posloužily matice uložené ve formátu RSA v souborech s příponou `.rsa` nebo `.rb`. Jako zdroj pro tyto matice jsme použili kolekci [1].

**TODO: popis HB formátu**

Pro testování jsme dále používali matice vygenerované při jednoduché pětibodové diskretizaci dvojrozměrné Poissonovy rovnice (podprogram (poisson)) a několik jednoduchých testovacích matic, které jsme si ručně zapsali do souboru `testing.f90`

#### 5.1.2 Reprezentace matice v programu

Matice je v našem programu uložena v **CSR formátu** (compressed sparse row format) [21, 25], který je běžně využívaným formátem sloužícím pro reprezentaci řídkých matic a grafů.

Mějme řádkou matici  $A$  o rozměrech  $n \times n$ , která obsahuje  $n_e$  nenulových prvků. Tuto matici v programu reprezentujeme pomocí tří polí: pole  $\mathbf{ia}$  o délce  $n + 1$  a polí  $\mathbf{ja}, \mathbf{aa}$  o délce  $n_e$ . V poli  $\mathbf{ja}$  na pozicích  $\mathbf{ia}(i), \dots, \mathbf{ia}(i + 1) - 1$  jsou uloženy sloupcové indexy nenulových prvků na  $i$ -tém řádku matice  $A$ , na odpovídajících pozicích v poli  $\mathbf{aa}$  jsou uloženy numerické hodnoty těchto prvků.

**Příklad 1.** Mějme následující symetrickou matici

$$\begin{pmatrix} 0 & 5 & 0 & 3 & 0 \\ 5 & 0 & 9 & 4 & 2 \\ 0 & 9 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 4 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 2 & 0 & 4 & 0 \end{pmatrix}$$

Pak její reprezentace ve formátu CSR vypadá následovně:

```
ia = [ 1, 3, 7, 8, 11, 13 ]
ja = [ 2, 4, 1, 3, 4, 5, 2, 1, 2, 5, 2, 4 ]
aa = [ 5, 3, 5, 9, 4, 2, 9, 3, 4, 4, 2, 4 ]
```

Pokud budeme uvažovat pouze pole  $\mathbf{ia}, \mathbf{ja}$ , je podle teorie popsané v oddíle 1.3 výsledná reprezentace matice  $A$  zároveň reprezentací neorientovaného grafu, kterému matice  $A$  odpovídá. Pokud tedy nebudeme brát v úvahu hodnoty jednotlivých prvků matice, můžeme při popisu implementace bez újmy na obecnosti pojmy graf a matice zaměňovat.

**Příklad 2.** Vezměme matici z příkladu 1. Pak graf, který je reprezentován pomocí polí  $\mathbf{ia}, \mathbf{ja}$  je zobrazen na obrázku 1.3

## 5.2 Knihovna METIS pro dělení grafu

Pro samotné dělení grafu na  $k$  částí jsme využili knihovnu pro dělení grafů METIS [10] verze 5.1.0. Vzhledem k tomu, že jsme dělení grafů používali jako nástroj pro vyvažování počtu operací při Choleského rozkladu na jednotlivých oblastech, potřebovali jsme nalézt rozdělení grafu pomocí vrcholového separátoru. Takové rozdělení nám poskytne rutina `METIS_ComputeVertexSeparator`, kterou jsme ve Fortranu implementovali pomocí rozhraní `metis_interface.f95` a `metisinclude.c`.

Zmíněná rutina není zmíněna v oficiální dokumentaci knihovny METIS a není tedy ve své základní verzi kompatibilní s jazykem Fortran. Proto bylo nutné učinit několik změn ve formátu CSR tak, aby bylo možné rutinu použít. Nejprve bylo třeba odebrat z grafu smyčky a poté jej přechíslovat tak, aby byly vrcholy indexovány od 0, jak je požadováno v jazycích C a C++.

Výstupem rutiny `METIS_ComputeVertexSeparator` je pole *part* o délce rovné počtu vrcholů grafu. Na  $i$ -té pozici tohoto pole je číslo od 1 do  $k + 1$  (po převedení do Fortranového zápisu), které určuje, ve které části rozdělení se daný vrchol nachází.  $k + 1$  značí, že daný vrchol je ve vrcholovém separátoru.

## 5.3 Tvorba podgrafů a přerozdělení

TODO: doplnit

### 5.3.1 Číslování

TODO: doplnit

### 5.3.2 Přerozdělení

TODO: doplnit

## 5.4 Výpočet Choleského rozkladu

TODO: doplnit

## 5.5 Softwarové požadavky pro běh

TODO: mám to tam vůbec dávat? Pro úspěšné slinkování a zkompileování TODO: nainstalovaný METIS



# Závěr

TODO: doplnit TODO: motivace: nelineární problém viz Tumovy stranky

# Literatura

- [1] Harwell-boeing collection. <https://math.nist.gov/MatrixMarket/data/Harwell-Boeing/>. Accessed: 5. 10. 2018.
- [2] Randolph Bank and R. Kent Smith. General sparse elimination requires no permanent integer storage. *SIAM J. Sci. Stat. Comp*, 8:574–584, 1987.
- [3] R. Barrett, M. Berry, T. F. Chan, J. Demmel, J. Donato, J. Dongarra, V. Eijkhout, R. Pozo, C. Romine, and H. Van der Vorst. *Templates for the Solution of Linear Systems: Building Blocks for Iterative Methods, 2nd Edition*. SIAM, Philadelphia, PA, 1994.
- [4] J. Edmonds. Maximum matching and a polyhedron with 0,1-vertices. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 69B:125–130, 1965.
- [5] George E. Forsythe and Cleve B. Moler. *Computer solution of linear algebraic systems*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1967.
- [6] M. R. Garey and D. S. Johnson. *Computers and Intractability : A Guide to the Theory of NP-Completeness*. Freeman & Co., 1979.
- [7] G. H. Golub and C. F. Van Loan. *Matrix computations*, volume 3 of *Johns Hopkins Series in the Mathematical Sciences*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD, 1983.
- [8] B. Hendrickson and R. Leland. The chaco user’s guide version 2.0. 1995.
- [9] Bruce Hendrickson and Robert Leland. A multilevel algorithm for partitioning graphs. In *Proceedings of the 1995 ACM/IEEE Conference on Supercomputing*, Supercomputing ’95, New York, NY, USA, 1995. ACM.
- [10] G. Karypis. Metis - a software package for partitioning unstructured graphs, partitioning meshes, and computing fill-reducing orderings of sparse matrices version 5.1.0. 2013.
- [11] G. Karypis and V. Kumar. A fast and high quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, 20(1):359–392, 1998.

- [12] B. W. Kernighan and S. Lin. An efficient heuristic procedure for partitioning graphs. *The Bell System Technical Journal*, 49(2):291–307, 1970.
- [13] A. Koubková and V. Koubek. *Datové struktury 1*. Praha: Matfyzpress, 1 edition, 2011.
- [14] C. Lanczos. An iteration method for the solution of the eigenvalue problem of linear differential and integral operators. *J. Research Nat. Bur. Standards*, 45:255–282, 1950.
- [15] E. L. Lawler. *Combinatorial optimization: networks and matroids*. Holt, Rinehart and Winston, New York-Montreal, Que.-London, 1976.
- [16] R. J. Lipton and R. E. Tarjan. A separator theorem for planar graphs. *SIAM J. Appl. Math.*, 36(2):177–189, 1979.
- [17] J. W. H. Liu. A graph partitioning algorithm by node separators. *ACM Trans. Math. Software*, 15(3):198–219, 1989.
- [18] Joseph W. Liu. A compact row storage scheme for cholesky factors using elimination trees. *ACM Trans. Math. Softw.*, 12(2):127–148, June 1986.
- [19] Joseph W. H. Liu. The role of elimination trees in sparse factorization. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, 11(1):134–172, January 1990.
- [20] C. C. Paige. Computational variants of the Lanczos method for the eigenproblem. *J. Inst. Math. Appl.*, 10, 1972.
- [21] S. Pissanetzky. *Sparse matrix technology*. Academic Press, Inc. [Harcourt Brace Jovanovich, Publishers], London, 1984.
- [22] A. Pothen and Ch.-J. Fan. Computing the block triangular form of a sparse matrix. *ACM Trans. Math. Software*, 16(4):303–324, 1990.
- [23] A. Pothen, H. D. Simon, and K. Liou. Partitioning sparse matrices with eigenvectors of graphs. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, 11(3):430–452, 1990.
- [24] D. J. Rose. A graph-theoretic study of the numerical solution of sparse positive definite systems of linear equations. pages 183–217, 1972.
- [25] Y. Saad. SPARSKIT: A basic tool kit for sparse matrix computations, version 2. Technical report, 1994.
- [26] Robert Schreiber. A new implementation of sparse gaussian elimination. *ACM Trans. Math. Softw.*, 8(3):256–276, September 1982.
- [27] Earl Zmijewski and John R. Gilbert. A parallel algorithm for sparse symbolic Cholesky factorization on a multiprocessor. *Parallel Comput.*, 7(2):199–210, 1988.