

# PB165 – Grafy a sítě

## Hledání nejkratších cest

# Obsah přednášky

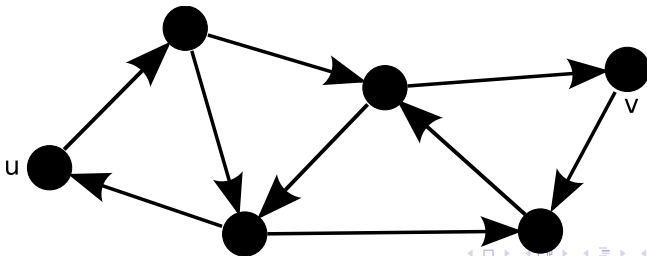
- 1 Úvod
- 2 Nejkratší cesty z jednoho vrcholu
  - Dijkstrův algoritmus
  - A\* algoritmus
  - Bellman-Ford algoritmus
- 3 Cesty mezi všemi vrcholy
  - Floyd-Warshallův algoritmus
  - Distribuovaný Floyd-Warshallův algoritmus

# Vzdálenost v grafu

Pro připomenutí:

- Délka cesty v neohodnoceném grafu je rovna počtu hran na této cestě.
- Vzdálenost  $\delta(u, v)$  vrcholů  $u, v$  v grafu je délka nejkratší cesty z  $u$  do  $v$ .
- Vzdálenost mezi dvěma vrcholy nemusí být v případě orientovaného grafu symetrická.

Obrázek: Nejkratší cesty z  $u$  do  $v$  a naopak se liší.



# Vzdálenost v ohodnoceném grafu

V reálných aplikacích hledání nejkratších cest jsou hrany grafu obvykle nějakým způsobem ohodnoceny - např. vzdálenosti mezi městy silniční sítě, latence síťových spojů.

## Definice

*Délka cesty v ohodnoceném grafu je rovna součtu ohodnocení hran na této cestě.*

- Vzdálenost vrcholů je opět rovna délce nejkratší cesty.
- Aby měl pojem vzdálenosti význam, v grafu nemůže existovat cyklus záporné délky.

# Nejkratší cesty a cykly

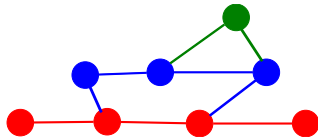
## Věta

*Pokud v grafu neexistuje cyklus záporné nebo nulové délky, je nejkratší sled v grafu (nejkratší) cestou.*

## Důkaz.

Nechť je součástí sledu  $s$  cyklus  $c$ . Tento cyklus má zřejmě kladnou délku. Potom existuje sled, který je "podsledem"  $s$  a cyklus  $c$  je z něj "vystřižen". Jelikož  $c$  má kladnou délku, je tento sled kratší než sled  $c$  obsahující. Takto lze pokračovat a sled zkracovat, dokud obsahuje nějaké cykly. Výsledný sled, který neobsahuje žádný cyklus, je cestou.  $\square$

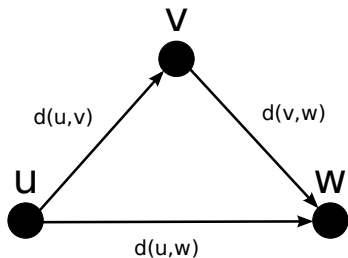
**Obrázek:** Nejkratší sled je vyznačen červeně. Delší sledy vedou i po modrých a zelených hranách a tvoří cykly.



# Trojúhelníková nerovnost

Graf  $G$  splňuje *trojúhelníkovou nerovnost*, pokud pro libovolnou trojici jeho vrcholů  $u, v, w$  platí:

$$\delta(u, w) \leq \delta(u, v) + \delta(v, w)$$



Obecný graf tuto nerovnost nespĺňuje. Příkladem, pro který trojúhelníková nerovnost platí, je např. graf nejkratších silničních vzdáleností mezi městy.

# Dijkstrův algoritmus

- "Klasický" algoritmus hledání nejkratší cesty.
- Najde nejkratší cesty z jednoho vrcholu do všech ostatních.
  - Musí proto projít všechny vrcholy.
- Pracuje pro orientovaný i neorientovaný graf.
- Vyjma nezáporných cyklů vyžaduje nezáporné ohodnocení *všech* hran.
- Lineární paměťová složitost.
- Časová složitost závisí na použité datové struktuře.

# Dijkstrův algoritmus – popis

- Počáteční vrchol označíme  $s$ .
- Pro každý vrchol  $v$  grafu je udržována hodnota  $d[v]$  – délka nejkratší nalezené cesty z  $s$  do  $v$ .
  - Na počátku  $d[s] = 0$  pro počáteční vrchol a  $d[v] = \infty$  pro ostatní vrcholy.
  - Po skončení výpočtu obsahuje  $d[v]$  délku nejkratší cesty v grafu, pokud taková existuje, nebo  $\infty$  v opačném případě.
- Dále v proměnné  $p[v]$  ukládáme předchůdce vrcholu  $v$  na doposud nalezené nejkratší cestě z  $u$ .
  - Před výpočtem nastavíme hodnotu  $p[v]$  jako nedefinovanou pro všechny vrcholy.
  - Po skončení výpočtu je nejkratší cesta posloupnost vrcholů  $s, p[\dots p[v] \dots], \dots p[p[v]], p[v], v$ .



# Dijkstrův algoritmus – popis

- Všechny vrcholy jsou rozděleny do dvou vzájemně disjunktních množin:
  - $S$  obsahuje všechny vrcholy, pro něž je v  $d[v]$  uložena definitivní nejkratší cesta z  $s$  do  $v$  v grafu.
  - $Q$  obsahuje všechny ostatní vrcholy.
- Vrcholy množiny  $Q$  jsou ukládány v prioritní frontě.
  - Nejvyšší prioritu má vrchol  $u$  s nejnižší hodnotou  $d[u]$  – nelze do něj již nalézt kratší cestu než která je aktuální.
- V každé iteraci jsou provedeny následující kroky:
  - Odstraň vrchol  $u$  z počátku fronty.
  - Přesuň vrchol  $u$  z množiny  $Q$  do  $S$ .
  - Relaxuj všechny hrany  $(u, v)$ :
    - Pokud  $d[v] > d[u] + w(u, v)$ , uprav  $d[v]$ .
  - $w(u, v)$  značíme ohodnocení (weight) hrany  $(u, v)$ .

# Dijkstrův algoritmus – pseudokód

Vycházíme z počátečního vrcholu  $s$ , nek. značíme  $\infty$ .

Vlož všechny vrcholy do  $Q$ .

$d[s] = 0$ ;  $p[s] = \text{nedef}$ ;

Pro všechny vrcholy  $v$  v grafu vyjma počátečního:

|  $d[u] = \text{nek}$ .

|  $p[u] = \text{nedef}$ .

Dokud není  $Q$  prázdná:

| Odstraň z  $Q$  vrchol  $u$  s nejvyšší prioritou

| Pro všechny hrany  $(u, v)$  proved' :

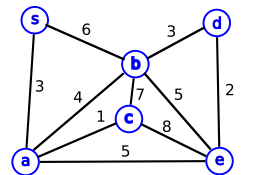
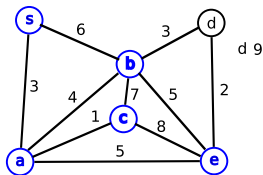
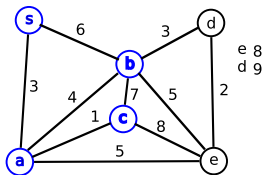
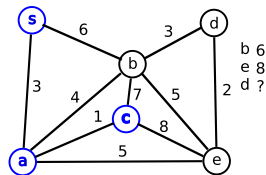
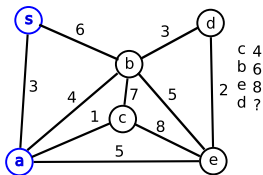
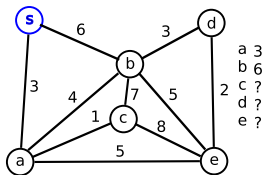
| | Pokud  $d[v] > d[u] + w(u,v)$

| | |  $d[v] = d[u] + w(u,v)$

| | |  $p[v] = u$

## Dijkstrův algoritmus – příklad

**Obrázek:** Vrcholy množiny  $S$  jsou vyznačeny modře. Napravo od grafu je znázorněn stav prioritní fronty.



# Dijkstrův algoritmus – animace/ilustrace výpočtu

- animace výpočtu na ukázkovém grafu
  - <http://www.unf.edu/~wkloster/foundations/DijkstraApplet/DijkstraApplet.htm>
- komentovaný výpočet
  - <http://www.youtube.com/watch?v=8Ls1RqHCOPw>
- výpočet s možností definice vlastního grafu
  - <http://www.cse.yorku.ca/~aaw/HFHuang/DijkstraStart.html>
- ilustrace výpočtu
  - <http://www.animal.ahrgr.de/showAnimationDetails.php3?lang=en&anim=16>

# Dijkstrův algoritmus – časová složitost

Označme  $n = |V|$ ,  $m = |E|$ .

- Inicializace je provedena v lineárním čase vzhledem k počtu vrcholů.
- Každou hranou prochází algoritmus vždy právě jednou nebo dvakrát (v případě neorientovaného grafu).
- Hlavní cyklus je proveden vždy  $n$ krát.
- Je tudíž provedeno vždy právě  $n$  výběrů z prioritní fronty.
- Složitost výběru z fronty záleží na její implementaci:
  - **Pole, seznam vrcholů** – výběr lze provést v lineárním čase, složitost celého algoritmu je tedy  $\mathcal{O}(n^2 + m)$ .
  - **Binární halda** – výběr je proveden v čase  $\mathcal{O}(\log(n))$ . Při každé relaxaci hrany může dojít k aktualizaci haldy ( $\mathcal{O}(\log(n))$ ), celková složitost je tak rovna  $\mathcal{O}((n + m)\log(n))$ .
  - **Fibonacciho halda** – složitost výběru stejná jako v případě binární haldy, složitost úpravy haldy při relaxaci je ovšem konstantní – výsledná složitost algoritmu  $\mathcal{O}(m + n\log(n))$ .  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Fibonacci\\_heap](http://en.wikipedia.org/wiki/Fibonacci_heap)

# Dijkstrův algoritmus – využití

Dijkstrův algoritmus je používán v link-state směrovacích protokolech. Ty pracují na principu zasílání sousedních "vrcholů" aktivními síťovými prvky, které se směrování zúčastní.

- Každý aktivní prvek periodicky rozesílá seznam sousedních vrcholů.
- Ten je propagován skrze síť ke všem aktivním prvkům.
- Každý aktivní prvek nezávisle na ostatních vypočítá strom nejkratších cest do všech ostatních aktivních prvků.
- Riziko vzniků smyček v routovacích tabulkách.

Nejpoužívanější link-state protokoly jsou OSPF a IS-IS. Oba používají Dijkstrův algoritmus.

# A\* algoritmus

- Upravený Dijkstrův algoritmus.
- Používá se zejména k nalezení cesty do jednoho vrcholu – např. navigace.
- Krom délky nejkratší cesty do každého vrcholu bere při vyhledávání v úvahu i heuristický odhad jeho vzdálenosti od cíle.
- Každé cestě je přiřazen heuristický odhad délky jako součet ohodnocení jejích hran a heuristické ohodnocení koncového vrcholu.
- Do prioritní fronty nejsou ukládány vrcholy grafu, ale cesty.
  - Nejvyšší prioritu má cesta s nejnižším heuristickým ohodnocením.

# A\* algoritmus

- Pro každý vrchol je uloženo, je-li již "uzavřen" či nikoliv, tzn., byl-li již navštíven, prozkoumán odebráním z fronty některé cesty v tomto vrcholu končící.

Dijkstrův algoritmus lze použít také k nalezení cesty do jednoho vrcholu grafu. Obvykle ale projde mnoho neperspektivních vrcholů – např. při vyhledávání trasy v mapě jde i opačným směrem stejně daleko, jak správným.

A\* tyto vrcholy eliminuje pomocí heuristiky, je-li vhodně zvolena.

- Časová složitost závisí na kvalitě zvolené heuristiky – nejhůře může být exponenciální, nejlépe polynomiální, a to vůči délce optimální cesty.
- Paměťová složitost může být v nejhorším případě také exponenciální – existuje několik zlepšujících variant algoritmu.

Více informací v přednášce doc. Hliněného:

<http://www.video.muni.cz/public/ITI/ITI2.avi>



# A\* algoritmus – pseudokód

Označme počáteční vrchol  $s$ , koncový  $c$ .

Označ všechny vrcholy jako neuzavřené.

Inicializuj prioritní frontu  $Q$  vrcholem (cestou)  $s$ .

Dokud  $Q$  není prázdná:

| Odstraň cestu  $p$  z  $Q$ .

| Necht'  $x$  je koncový vrchol  $p$ .

| Pokud  $x$  je uzavřený:

| | pokračuj další iterací.

| Pokud  $x = c$ :

| | Vrat' cestu  $p$  jako výsledek.

| Uzavři  $x$ .

| Pro všechny hrany  $(x, y)$ :

| | Vlož do fronty cestu  $p + (x, y)$

Vrat' zprávu o neexistenci cesty.

# Bellman-Ford algoritmus

- Stejně jako Dijkstrův algoritmus vypočítá vzdálenosti všech vrcholů grafu z jednoho zdroje.
- Základní strukturou podobný Dijkstrovu algoritmu.
- Graf smí obsahovat i záporně ohodnocené hrany.
- Cykly s celkovým záporným ohodnocením jsou algoritmem detekovány.
- Namísto výběru hrany k relaxaci v každé iteraci relaxuje všechny hrany.
- Vyšší časová složitost než Dijkstrův algoritmus –  $\mathcal{O}(mn)$ .

# Bellman-Ford – pseudokód

Proměnné  $d[v]$  a  $p[v]$  mají stejný význam jako u Dijkstrova algoritmu. Počet vrcholů grafu označme  $n$ .

```
d[s] = 0; p[s] = undef;
```

```
Pro všechny vrcholy v grafu vyjma počátečního:
```

```
| d[u] = nek.
```

```
| p[u] = nedef.
```

```
Opakuj n-krát:
```

```
| Pro všechny hrany (u,v):
```

```
| | Pokud  $d[v] > d[u] + w(u,v)$ 
```

```
| | |  $d[v] = d[u] + w(u,v)$ 
```

```
| | |  $p[v] = u$ 
```

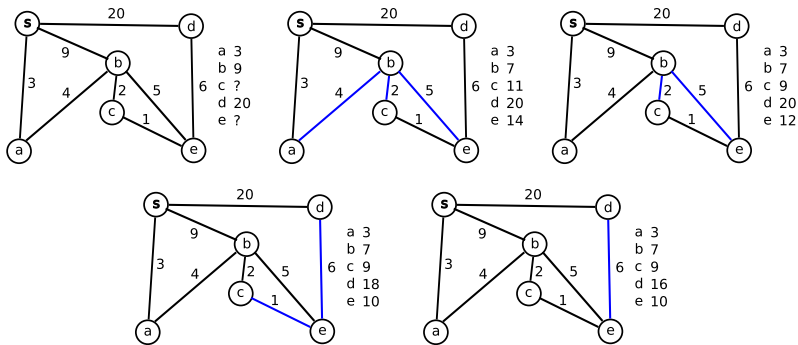
```
Pro všechny hrany (u,v) opakuj:
```

```
| Pokud  $d[v] > d[u] + w(u,v)$ :
```

```
| | Chyba: graf obsahuje cyklus neg. váhy
```

# Bellman-Ford – příklad

**Obrázek:** Relaxované hrany v každém kroku jsou vyznačeny modře. Napravo od grafu je vypsána délka nejkratších cest do vrcholů. V poslední (nezobrazené) iteraci již nedojde k žádným změnám.



# Bellman-Ford – animace/ilustrace výpočtu

- komentovaná animace výpočtu (česky)
  - <http://www.youtube.com/watch?v=LrYL6akqpHU>
- komentovaná animace výpočtu (anglicky)
  - [http://www.csanimated.com/animation.php?t=Bellman-Ford\\_algorithm](http://www.csanimated.com/animation.php?t=Bellman-Ford_algorithm)

# Bellman-Ford – aplikace

- Bellman-Ford algoritmus je používán v druhé třídě směrovacích protokolů – distance-vector.
- Namísto struktury celého grafu jsou mezi aktivními prvky přenášeny jim známé vzdálenosti do ostatních aktivních prvků.
- Každý aktivní prvek periodicky rozesílá tyto sobě známé vzdálenosti k ostatním.
- Obdrží-li aktivní prvek tabulku vzdáleností, provede relaxaci hran, případně aktualizuje svoji směrovací tabulku a rozešle svým sousedům.
- Distance-vector protokoly mají nižší výpočetní složitost než link-state protokoly.
- Neznámějšími distance-vector protokoly jsou RIP, BGP, EGP.

# Floyd-Warshallův algoritmus

- Vypočítává nejkratší vzdálenost mezi všemi dvojicemi vrcholů v grafu.
- Graf může obsahovat záporně ohodnocené hrany, cykly s celkovým záporným ohodnocením vedou k chybnému řešení.
- Mezi každými dvěma dvojicemi vrcholů postupně vylepšuje nejkratší známou vzdálenost.
- V každém kroku algoritmu je definována množina vrcholů, kterými je možno nejkratší cesty vést.
- Každou iterací je do této množiny přidán jeden vrchol.
- V každé z  $n$  iterací jsou aktualizovány cesty mezi všemi  $n^2$  dvojicemi vrcholů. Časová složitost algoritmu je tedy  $\mathcal{O}(n^3)$ .
- Paměťová složitost algoritmu je  $\mathcal{O}(n^2)$ .

# Floyd-Warshallův algoritmus – bližší popis

- Necht' jsou vrcholy grafu očíslovány  $1 \dots n$ .
- Nejprve algoritmus uvažuje pouze hrany grafu. Následně prohledává cesty procházející pouze vrcholem 1. Poté cesty procházející pouze vrcholy 1, 2, atd.
- Mezi každými dvěma vrcholy  $u, v$  je v  $k + 1$ . iteraci algoritmu známa cesta využívající vrcholů  $1 \dots k$ .
- Pro nejkratší cestu mezi těmito vrcholy využívající vrcholů  $1 \dots k + 1$  jsou dvě možnosti:
  - Vede opět pouze po vrcholech  $1 \dots k$ .
  - Vede po vrcholech  $1 \dots k$  z  $u$  do vrcholu  $k + 1$  a z něj poté do  $v$ .
- Na konci výpočtu jsou známy nejkratší cesty využívající všech vrcholů grafu.



# Floyd-Warshallův algoritmus – pseudokód

- V matici  $d$  na pozici  $d[i][j]$  je uložena vypočtená vzdálenost vrcholů  $i, j$ .
- Vstupem je graf v podobě matice sousednosti, kde jednotlivé prvky značí ohodnocení hrany nebo  $\infty$

Pro všechna  $k$  od 1 do  $n$ :

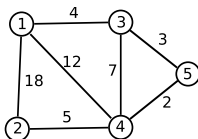
| Pro všechna  $i$  od 1 do  $n$ :

| | Pro všechna  $j$  od 1 do  $n$ :

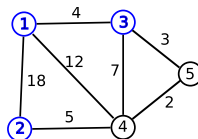
| | |  $d[i][j] = \text{minimum}(d[i][j], d[i][k] + d[k][j])$

# Floyd-Warshallův algoritmus – příklad

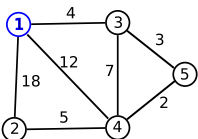
**Obrázek:** Vrcholy, kterými mohou vést cesty, jsou vyznačeny. Matice udává nejkratší nalezené vzdálenosti mezi dvojicemi vrcholů.



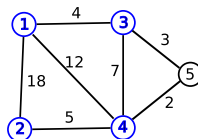
	1	2	3	4	5
1	0	18	4	12	?
2	18	0	?	5	?
3	4	?	0	7	3
4	12	5	7	0	2
5	?	?	3	2	0



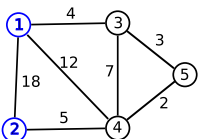
	1	2	3	4	5
1	0	18	4	11	7
2	18	0	22	5	25
3	4	22	0	7	3
4	11	5	7	0	2
5	7	25	3	2	0



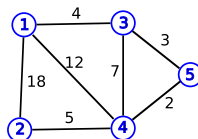
	1	2	3	4	5
1	0	16	4	11	7
2	16	0	12	5	7
3	4	12	0	7	3
4	11	5	7	0	2
5	7	7	3	2	0



	1	2	3	4	5
1	0	14	4	9	7
2	14	0	10	5	7
3	4	10	0	5	3
4	9	5	5	0	2
5	7	7	3	2	0



	1	2	3	4	5
1	0	14	4	9	7
2	14	0	10	5	7
3	4	10	0	5	3
4	9	5	5	0	2
5	7	7	3	2	0



	1	2	3	4	5
1	0	14	4	9	7
2	14	0	10	5	7
3	4	10	0	5	3
4	9	5	5	0	2
5	7	7	3	2	0

# Distribuovaný Floyd-Warshall

Výhodou Floyd-Warshallova algoritmu je jeho snadná aplikace v distribuovaném prostředí – mezi autonomními jednotkami, které si mohou informace předávat jen pomocí zasílání zpráv po síti.

- Každý vrchol grafu vypočítává nejkratší cesty do všech ostatních vrcholů grafu.
- Na začátku zná každý vrchol jen cestu do svých sousedů.
- Stejně jako v sekvenční variantě algoritmu, každá iterace algoritmu přidává jeden vrchol, kterým mohou procházet hledané nejkratší cesty.
- Přidaný vrchol v každé iteraci rozešle svoji tabulku vzdáleností ostatním vrcholům grafu.
- Ostatní vrcholy pomocí své a přijaté tabulky aktualizují nejkratší cesty do všech vrcholů.

# Distribučovaný Floyd-Warshall – pseudokód

Algoritmus je spuštěn ve vrcholu  $u$ .

$d[u] = 0$ ;  $p[u] = \text{ndef}$ .

Pro všechny ostatní vrcholy  $v$ :

| Je-li  $v$  sousední vrchol:

| |  $d[v] = w(u,v)$ ;  $p[v] = v$ ;

| Jinak:

| |  $d[v] = \text{nekon.}$ ;  $p[v] = \text{ndef}$ ;

Dokud nebyly vybrány všechny vrcholy:

| Vyber doposud nevybraný vrchol  $v$ .

| Pokud  $u = v$ :

| | Rozešli ostatním vrcholům pole  $d$ .

| Jinak:

| | Přijmi od vrcholu  $v$  jeho pole  $d$ .

| Pro všechny vrcholy  $w$ :

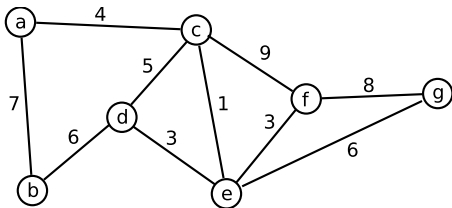
| |  $d[w] = \text{minimum}(d[w], d[v]+d_v[w])$ , uprav  $p[v]$ .

# Distribuovaný Floyd-Warshall

- Pro správnost algoritmu je nutné, aby všechny výpočetní uzly (vrcholy grafu) vybraly vždy stejný vrchol, který poté rozesílá svoji tabulku vzdáleností.
- Algoritmus je neefektivní z hlediska množství zasílaných dat. Pokud v některém vrcholu platí  $d[v] = \infty$  pro právě vybraný vrchol  $v$ , jeho cesty se nijak neupraví a nemusí mu tedy být zasílána tabulka vzdáleností tohoto vrcholu.
- Před rozesláním tabulky vzdáleností se mohou vrcholy vzájemně informovat, které mají obdržet tuto tabulku s výrazně nižšími nároky na přenesená data  $\Rightarrow$  Touegův algoritmus.
- Další informace:
  - Ajay D. Kshemkalyani, Mukesh Singhal. *Distributed Computing: Principles, Algorithms, and Systems*. Cambridge University Press, 2008. Str. 151-155

## Cvičení

- 1 Na grafu níže vypočítejte nejkratší cesty použitím Dijkstrova, Bellman-Fordova a Floyd-Warshallova algoritmu. V případě prvních dvou použijte různé počáteční vrcholy.



- 2 Navrhněte způsob implementace nastíněného vylepšení distribuovaného Floyd-Warshallova algoritmu. Uvažujte, že výpočetní uzly mohou zasílat zprávy jen po hranách grafu (broadcasting je implementován přeposíláním zpráv mezi uzly).

## Cvičení

- 3 Proč nepracuje Dijkstrův algoritmus korektně na grafech obsahujících záporně ohodnocené hrany? K jakým výsledkům může dojít, je-li na takovém grafu spuštěn?
- 4 Dokažte tvrzení, označované také jako trojúhelníková nerovnost v grafech:

$$\forall u, v, w \in V(G) : \delta(u, w) \leq \delta(u, v) + \delta(v, w)$$

- 5 Necht' vstupem Bellman-Fordova algoritmu je graf, v němž každá nejkratší cesta obsahuje nejvýše  $k$  hran. Navrhněte úpravu algoritmu umožňující ukončit výpočet po  $k + 1$  iteracích.