

Západočeská univerzita v Plzni  
Fakulta aplikovaných věd

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
**Semidefinitní programování v kombinatorické  
optimalizaci**

Autor: Ondřej Špaček  
Vedoucí práce: Doc. Ing. Roman Čada, Ph.D.

Plzeň, 2020

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury uvedené v seznamu, který je uveden na konci této práce.

V Plzni dne .....

.....

podpis

## Poděkování

Především bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Romanu Čadovi, Ph.D. za spoustu času, který mi věnoval a cenné rady při řešení problémů spojených s vypracováním diplomové práce.

## Abstrakt

## Klíčová slova

## Abstract

## Keywords

# Obsah

Úvod	2
<b>I Konvexní optimalizace</b>	<b>3</b>
<b>1 Základní geometrické pojmy</b>	<b>4</b>
1.1 Přímký a úsečky . . . . .	4
1.2 Affiní prostory . . . . .	4
1.3 Konvexní množiny . . . . .	5
1.4 Kužely . . . . .	5
1.5 Nadroviny a poloprostory . . . . .	6
1.6 Polyedry a polytopy . . . . .	8
<b>2 Lineární programování</b>	<b>10</b>
2.1 Formulace úlohy . . . . .	10
2.2 Dualita . . . . .	11
2.3 Komplementární skluzovost . . . . .	12
<b>3 Semidefinitní programování</b>	<b>14</b>
<b>4 Kuželové programování</b>	<b>15</b>
<b>II Kombinatorické úlohy</b>	<b>16</b>
<b>5 Shannonova kapacita</b>	<b>17</b>
5.1 $\Theta(C_5) = \sqrt{5}$ . . . . .	18
<b>6 Problém maximálního řezu</b>	<b>20</b>
<b>7 Problém obchodního cestujícího</b>	<b>21</b>

<i>OBSAH</i>	1
<b>III Implementace</b>	<b>22</b>
8 Lovászova theta funkce	23
9 Problém maximálního řezu	24
Závěr	25

# Úvod

Část I

Konvexní optimalizace



# Kapitola 1

## Základní geometrické pojmy

### 1.1 Přímký a úsečky

Mějme dva body  $x_1, x_2 \in \mathbb{R}^n$  takové, že  $x_1 \neq x_2$  a parametr  $\theta \in \mathbb{R}^n$ . Potom výraz

$$y = \theta x_1 + (1 - \theta)x_2 \quad (1.1)$$

popisuje **přímku** procházející body  $x_1$  a  $x_2$ . Pro  $\theta = 0$  dostáváme bod  $x_2$  a pro  $\theta = 1$  bod  $x_1$ . Omezíme-li  $\theta$  na interval  $\langle 0, 1 \rangle$ , dostaneme **úsečku** s koncovými body  $x_1$  a  $x_2$ . Výraz 1.1 lze přepsat do tvaru

$$y = x_2 + \theta(x_1 - x_2),$$

který můžeme interpretovat jako součet počátečního bodu  $x_2$  a nějakého násobku směrového vektoru  $x_1 - x_2$ .

### 1.2 Afinity prostory

Říkáme, že  $C \subseteq \mathbb{R}^n$  je **afinní prostor**, jestliže přímka procházející libovolnými dvěma různými body z  $C$  leží v  $C$ . Tedy  $C$  obsahuje lineární kombinace libovolných dvou bodů z  $C$ , jestliže součet koeficientů lineární kombinace je roven jedné. To lze zobecnit i pro více než dva body. Lineární kombinace  $\theta_1 x_1 + \dots + \theta_k x_k$  bodů  $x_1, \dots, x_k$  taková, že  $\theta_1 + \dots + \theta_k = 1$ , se nazývá **afinní kombinace** bodů  $x_1, \dots, x_k$ . Indukcí z definice afinního prostoru lze snadno ukázat, že pokud  $C$  je afinní množina,  $x_1, \dots, x_k \in C$  a  $\theta_1 + \dots + \theta_k = 1$ , potom bod  $\theta_1 x_1 + \dots + \theta_k x_k \in C$ .

Nechť  $C$  je afinní prostor a  $x_0 \in C$ , potom množina

$$V = C - x_0 = \{x - x_0 \mid x \in C\}$$

je **vektorový prostor**, tj. množina, která je uzavřená na sčítání a násobení skalárem.

Afinní prostor  $C$  lze vyjádřit jako

$$C = V + x_0 = \{v + x_0 \mid v \in V\},$$

kde  $V$  je vektorový prostor a  $x_0$  je počátek. Poznamenejme, že vektorový prostor  $V$  asociovaný s afinním prostorem  $C$  nezávisí na volbě počátku  $x_0$ .

**Dimenze** afinního prostoru  $C = V + x_0$  je definována jako dimenze vektorového prostoru  $V = C - x_0$ , kde  $x_0$  je libovolný prvek z  $C$ . Množina všech afinních kombinací bodů množiny  $C \subseteq \mathbb{R}^n$  se nazývá **afiní obal** množiny  $C$ . Afinní obal množiny  $C$  budeme značit

$$\mathbf{aff} C = \{\theta_1 x_1 + \cdots + \theta_k x_k \mid x_1, \dots, x_k \in C, \theta_1 + \cdots + \theta_k = 1\}.$$

Afinní obal je nejmenší afinní prostor, který obsahuje množinu  $C$ . Tedy, jestliže  $S$  je afinní prostor takový, že  $C \subseteq S$ , potom  $\mathbf{aff} C \subseteq S$ .

### 1.3 Konvexní množiny

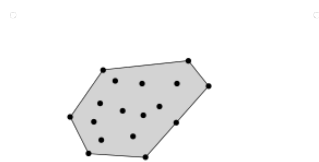
Říkáme, že množina  $C$  je **konvexní**, jestliže úsečka mezi libovolnými dvěma body z  $C$  leží také v  $C$ . Jinak řečeno, jestliže pro libovolné dva body  $x_1, x_2 \in C$  a libovolné  $\theta \in \langle 0, 1 \rangle$  platí, že  $\theta x_1 + (1 - \theta)x_2 \in C$ . Poznamenejme, že každý afinní prostor je zároveň konvexní množinou. Podobně jako afinní kombinaci definujeme **konvexní kombinaci** bodů  $x_1, \dots, x_k$  jako  $\theta_1 x_1 + \cdots + \theta_k x_k$ , kde  $\theta_1 + \cdots + \theta_k = 1, \theta_i \geq 0$  pro  $i = 1, \dots, k$ . **Konvexní obal** množiny  $C$  je množina všech konvexních kombinací bodů z množiny  $C$ , značíme

$$\mathbf{conv} C = \{\theta_1 x_1 + \cdots + \theta_k x_k \mid x_i \in C, \theta_i \geq 0, i = 1, \dots, k, \theta_1 + \cdots + \theta_k = 1\}.$$

Analogicky, konvexní obal množiny  $C$  je nejmenší konvexní množina, která obsahuje množinu  $C$ . Pro představu viz obrázek 1.1.

### 1.4 Kužely

Množina  $C$  se nazývá **kužel**, jestliže pro každé  $x \in C$  a  $\theta \geq 0$  platí, že  $\theta x \in C$ . Je-li  $C$  navíc konvexní, pak se  $C$  nazývá **konvexní kužel**. Tedy  $C$  je konvexní kužel, jestliže pro libovolné  $x_1, x_2 \in C$  a  $\theta_1, \theta_2 \geq 0$  platí, že  $\theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 \in C$ . Říkáme, že bod ve tvaru  $\theta_1 x_1 + \cdots + \theta_k x_k$ , kde  $\theta_1, \dots, \theta_k \geq 0$  je **kuželovou kombinací** bodů  $x_1, \dots, x_k$ . Dále, pokud  $x_i$  leží v konvexním kuželu množiny  $C$ , potom libovolná kuželová kombinace bodu  $x_i$  leží rovněž

(a) Množina bodů  $C$ (b)  $\text{conv } C$ 

Obrázek 1.1: Konvexní obal množiny

v konvexním kuželu množiny  $C$ . Platí, že množina  $C$  je konvexní kužel právě tehdy, když  $C$  obsahuje všechny kuželové kombinace svých bodů. **Kuželový obal** množiny  $C$  je množina, která obsahuje všechny kuželové kombinace množiny  $C$ , tj.

$$\text{cone } C = \{\theta_1 x_1 + \cdots + \theta_k x_k \mid x_i \in C, \theta_i \geq 0, i = 1, \dots, k\}.$$

Kuželový obal množiny  $C$  je zároveň nejmenší konvexní kužel, který obsahuje množinu  $C$ . Pro představu viz obrázek 1.2.

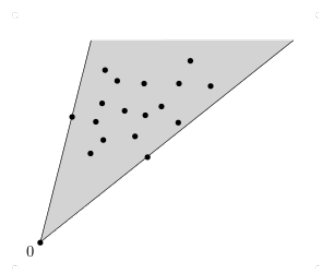
## 1.5 Nadroviny a poloprostory

**Nadrovina** je množina ve tvaru

$$\{x \mid a^T x = b\},$$

kde  $a \in \mathbb{R}^n$ ,  $a \neq 0$  a  $b \in \mathbb{R}$ . Analyticky se na nadrovinu koukáme jako na množinu všech řešení netriviální lineární rovnice. Geometricky zase jako na množinu všech bodů takových, že mají konstantní skalární součin s normálovým vektorem  $a$ . Konstanta  $b$  značí posunutí nadroviny od počátku. Nadrovinu také můžeme vyjádřit jako

$$\{x \mid a^T(x - x_0) = 0\} = x_0 + \{v \mid a^T v = 0\},$$

(a) Množina bodů  $C$ (b) **cone**  $C$ 

Obrázek 1.2: Kuželový obal množiny

kde  $x_0$  je libovolný bod této nadroviny a  $\{v \mid a^T v = 0\}$  je množina všech vektorů, které jsou kolmé k normálovému vektoru  $a$ . Nadrovina je tedy množina, která obsahuje bod  $x_0$  a libovolný bod ve tvaru  $x_0 + v$ , kde  $v$  je vektor, který je kolmý k normálovému vektoru  $a$ . Pro ilustraci v  $\mathbb{R}^2$  viz obrázek 1.3a.

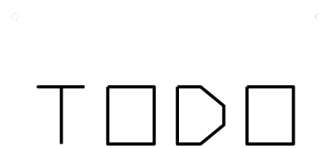
Nadrovina dělí  $\mathbb{R}^n$  na dva poloprostory. Množina

$$\{x \mid a^T x \leq b\}, \text{ resp. } \{x \mid a^T x < b\},$$

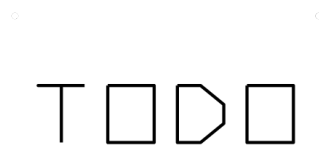
kde  $a \neq 0$  se nazývá (uzavřený) **poloprostor**, resp. **otevřený poloprostor**. Je to tedy množina všech řešení netriviální lineární nerovnice. Podobně jako nadrovinu, můžeme poloprostor vyjádřit ve tvaru

$$\{x \mid a^T(x - x_0) \leq 0\}, \text{ resp. } \{x \mid a^T(x - x_0) < 0\},$$

kde  $a \neq 0$  a  $x_0$  je libovolný bod z nadroviny  $\{x \mid a^T x = b\}$ . Poloprostor tedy obsahuje bod  $x_0$  a libovolný bod  $x_0 + v$ , kde  $v$  je vektor, který s vnějším normálovým vektorem svírá tupý nebo pravý úhel. Tato interpretace je v  $\mathbb{R}^2$  ilustrována na obrázku 1.3b. Ještě poznamenejme, že poloprostory jsou konvexní množiny, ale samozřejmě nejsou affíní.



(a) Nadrovina



(b) Poloprostor

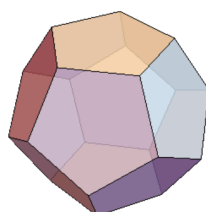
Obrázek 1.3: Nadrovina a poloprostor v  $\mathbb{R}^2$ .

## 1.6 Polyedry a polytopy

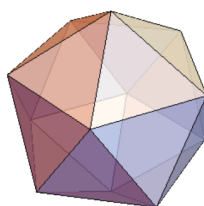
Mějmě konečně mnoho uzavřených poloprostorů v  $\mathbb{R}^n$ . Množina, která vznikne jejich průnikem se nazývá **polytop**. Je-li navíc polytop omezený, potom ho nazýváme **polyedr**. Polyedr lze také ekvivalentně definovat jako konvexní obal konečně mnoha bodů v  $\mathbb{R}^n$ . Příkladem polyedrů v  $\mathbb{R}^3$  jsou např. platónská tělesa, viz obrázek 1.4. Důležitý fakt říká Minkowského-Weyleova věta: každý polytop  $P$  je konečně generovaný a můžeme ho vyjádřit jako

$$P = \mathbf{conv} (u_1, \dots, u_r) + \mathbf{cone} (v_1, \dots, v_s),$$

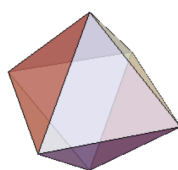
kde  $u_i, v_i$  jsou extrémní vrcholy  $P$ .



(a) Dodecahedron.



(b) Icosahedron.



(c) Octahedron.

Obrázek 1.4: Platónská tělesa.

# Kapitola 2

## Lineární programování

### 2.1 Formulace úlohy

Úlohou lineárního programování rozumíme minimalizaci nebo maximalizaci lineární **účelové funkce** vzhledem k lineárním **omezením**, kde tato omezení jsou dána soustavou lineární rovnic a nerovnic. Úlohu lineárního programování lze formulovat v několika ekvivalentních tvarech, které se liší zadáním omezení. Úloha v **kanonickém tvaru** má svá omezení dána soustavou lineárních nerovnic  $Ax \leq b$ . Tedy:

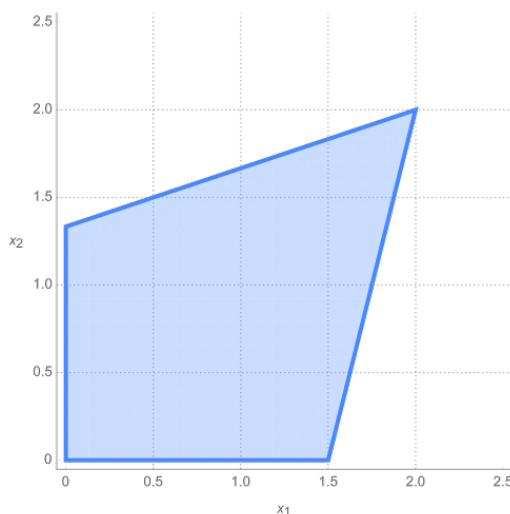
$$\max \{c^T x \mid Ax \leq b, x \geq 0\}, \quad (\text{LP-P})$$

kde  $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ,  $b \in \mathbb{R}^n$ ,  $x \in \mathbb{R}^n$  a  $c \in \mathbb{R}^n$ . **Přípustná množina řešení** je průnikem poloprostorů, které jsou definovány soustavou nerovnic  $Ax \leq b$  a **nezáporného ortantu**, tj. množiny  $\{x \in \mathbb{R}^n \mid x_i \geq 0, i = 1, \dots, n\}$ . Obě tyto množiny jsou konvexní a tedy i jejich průnik je rovněž konvexní množina. Dále, protože přípustnou množinu máme popsanou soustavou konečně mnoha lineárních nerovnic, geometricky se na úlohu LP-P můžeme koukat jako na maximalizaci lineární funkce přes polyedr, který je definován touto soustavou.

**Příklad.** Mějme následující úlohu:

$$\begin{aligned} \max \quad & x_1 + x_2 \\ \text{s.t.} \quad & -x_1 + 3x_2 \leq 4 \\ & 4x_1 - x_2 \leq 6 \\ & x \geq 0. \end{aligned} \quad (\text{P1})$$

Přípustná množina řešení je zobrazena na obrázku 2.1. Řešením úlohy je vektor  $x^* = (2, 2)$  s cenou 4. Implementace v softwaru MOSEK: <https://github.com/c0n73x7/D1PL0MK4/blob/master/mosek/ex1.py>.



Obrázek 2.1: Přípustná množina řešení k úloze P1.

## 2.2 Dualita

Úloha LP-P se nazývá **primární úloha**. Ke každé primární úloze můžeme přiřadit příslušnou **duální úlohu**. Je to opět úloha lineárního programování, která pro případ LP-P je ve tvaru:

$$\min \{b^T y \mid A^T y \geq c, y \geq 0\}. \quad (\text{LP-D})$$

**Příklad.** Duální úloha k úloze P1 je ve tvaru:

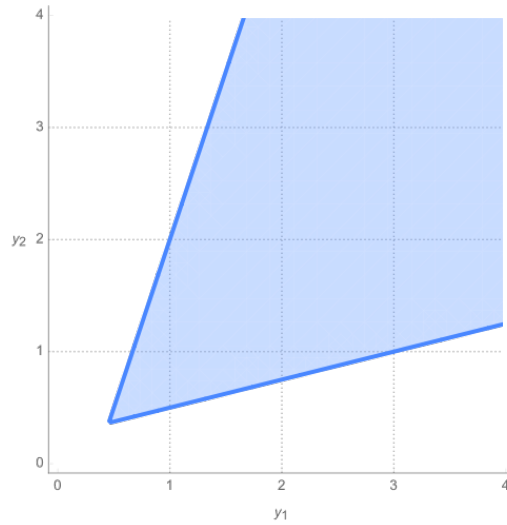
$$\begin{aligned} \min & 4y_1 + 6y_2 \\ & -y_1 + 4y_2 \geq 1 \\ & 3y_1 - y_2 \geq 1 \\ & y \geq 0. \end{aligned} \quad (\text{P2})$$

Přípustná množina řešení je zobrazena na obrázku 2.2. Řešením úlohy je vektor  $y^* \approx (0.4546, 0.3636)$  s cenou 4. Implementace v softwaru MOSEK: <https://github.com/c0n73x7/D1PL0MK4/blob/master/mosek/ex2.py>.

Všimněme si, že v příkladech P1 a P2 mají řešení  $x^*$  i  $y^*$  stejnou cenu. To není náhoda a tento fakt je obsahem silné věty o dualitě, kterou dokázala skupina kolem Alberta W. Tuckera v roce 1948. Začneme slabou větou o dualitě.

**Věta 1** (Slabá o dualitě). *Nechť  $\tilde{x}$  je přípustné řešení LP-P a  $\tilde{y}$  je přípustné řešení LP-D. Potom  $c^T \tilde{x} \leq b^T \tilde{y}$ .*





Obrázek 2.2: Přípustná množina řešení k úloze P2.

Tedy každé přípustné řešení  $\tilde{y}$  duální úlohy LP-D nám dává horní odhad na maximum účelové funkce primární úlohy LP-P. Graficky můžeme slabou větu o dualitě interpretovat jako na obrázku 2.3. Zatím tedy nevíme, zda vždy existují přípustná (optimální) řešení  $x^*$  pro úlohu LP-P a  $y^*$  pro úlohu LP-D, pro která platí  $c^T x^* = b^T y^*$ . Kladnou odpověď dostaneme z již zmíněné silné věty od dualitě.



Obrázek 2.3: Slabá věta o dualitě.

**Věta 2** (Silná o dualitě). *Jestliže úlohy LP-P a LP-D mají přípustná řešení. Potom*

$$\max \{c^T x \mid Ax \leq b, x \geq 0\} = \min \{b^T y \mid A^T y \geq c, y \geq 0\}.$$

Se znalostí silné věty o dualitě můžeme obrázek 2.3 upravit na obrázek 2.4.

## 2.3 Komplementární skluzovost

Pro odvození tzv. podmínky komplementární skluzovosti nejprve převedeme úlohy LP-P a LP-D do jiných tvarů. V primární úloze povolíme  $x \in \mathbb{R}^n$ . Tedy



Obrázek 2.4: Ceny přípustných řešení primární a příslušné duální úlohy.

primární úloha je ve tvaru:

$$\max \{c^T x \mid Ax \leq b\}. \quad (\text{LP-P2})$$

A příslušná duální úloha je ve tvaru:

$$\min \{b^T y \mid A^T y = c, y \geq 0\}. \quad (\text{LP-D2})$$

Nechť  $\tilde{x}$  je přípustné řešení a  $x^*$  je optimální řešení úlohy LP-P2,  $\tilde{y}$  je přípustné řešení a  $y^*$  je optimální řešení úlohy LP-D2. **Dualitní rozdíl**  $\tilde{x}$  a  $\tilde{y}$  je číslo  $b^T \tilde{y} - c^T \tilde{x} \geq 0$ . Ze silné věty o dualitě samozřejmě plyne, že pro optimální řešení  $x^*$  a  $y^*$  je dualitní rozdíl roven 0. Vyjdeme z dualitního rozdílu optimálních řešení:

$$b^T y^* - c^T x^* = y^{*T} b - y^{*T} A x^* = y^{*T} (b - A x^*) = 0.$$

Poslední rovnost přepíšeme maticově:

$$[y_1^*, \dots, y_m^*] \left( \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^* \\ \vdots \\ x_n^* \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Dostáváme tedy soustavu rovnic  $y_i^* (b_i - a_{i-} x^*) = 0$ , kde  $i = 1, \dots, m$ . Tedy buď  $y_i^* = 0$  nebo  $b_i - a_{i-} x^* = 0$ . **Podmínka komplementární skluzovosti** je splněna, jestliže pro přípustná řešení  $\tilde{x}, \tilde{y}$  platí buď  $\tilde{y}_i = 0$  nebo  $b_i - a_{i-} \tilde{x} = 0$ ,  $i = 1, \dots, m$ . Pokud nastane  $b_i - a_{i-} \tilde{x} = 0$ , potom říkáme, že **vazba**  $a_{i-} \tilde{x} \leq b_i$  **je aktivní**.

**Věta 3.** *Nechť  $\tilde{x}$  je přípustné řešení LP-P2 a  $\tilde{y}$  je přípustné řešení LP-D2. Potom  $\tilde{x}, \tilde{y}$  jsou optimální právě tehdy, když platí podmínka komplementární skluzovosti.*

## Kapitola 3

# Semidefinitní programování

## Kapitola 4

### Kuželové programování

# Část II

## Kombinatorické úlohy

# Kapitola 5

## Shannonova kapacita

Představme si zašuměný komunikační kanál, kterým posíláme zprávy, které jsou složeny ze symbolů (písmen) nějaké konečné abecedy. Vlivem šumu mohou být některé symboly špatně interpretovány a naším cílem je vybrat co největší počet slov délky  $k$  tak, aby žádná dvě slova nebyla vlivem šumu zaměnitelná.

Problém si formalizujeme v řeči teorie grafů. Mějme neorientovaný graf  $G = (V, E)$ , kde množina vrcholů představuje symboly z konečné abecedy a dva vrcholy  $x, y$  jsou spojeny hranou, pokud vrchol  $x$  může být vlivem šumu zaměněn za  $y$ .

Maximální počet nezaměnitelných zpráv délky 1 je roven  $\alpha(G)$ , kde  $\alpha(G)$  značí velikost největší nezávislé množiny v grafu  $G$ . Pro popis delších zpráv definujeme **silný součin**  $G \cdot H$  grafů  $G$  a  $H$  následovně:

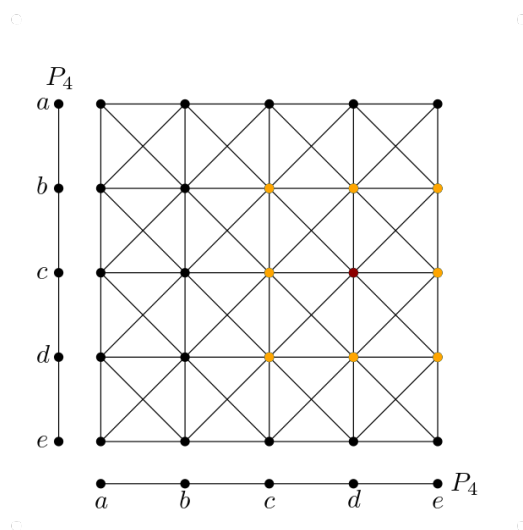
$$V(G \cdot H) = V(G) \times V(H),$$

$$\begin{aligned} E(G \cdot H) = & \{(i, u)(j, v) \mid ij \in E(G) \wedge uv \in E(H)\} \cup \\ & \{(i, u)(j, v) \mid ij \in E(G) \wedge u = v\} \cup \\ & \{(i, u)(j, v) \mid i = j \wedge uv \in E(H)\}. \end{aligned}$$

**Příklad.** Pro graf  $P_4 = a - b - c - d - e$  je silný součin  $P_4 \cdot P_4$  zobrazen na obrázku 5.1. Z obrázku je hezky vidět, že např. zpráva  $cd$  (na obrázku červeně) může být zaměněna s  $bc$ ,  $bd$ ,  $be$ ,  $cc$ ,  $ce$ ,  $dc$ ,  $dd$  a  $de$  (na obrázku oranžově). Podobně pro další zprávy.

Pro jednoduchost budeme silný součin  $k$  kopií grafu  $G$  značit  $G^k$ . Tedy  $\alpha(G^k)$  je maximální počet nezaměnitelných zpráv délky  $k$ . **Shannonova kapacita** grafu  $G$  je číslo

$$\Theta(G) = \lim_{k \rightarrow +\infty} \alpha(G^k)^{1/k}.$$

Obrázek 5.1:  $P_4 \cdot P_4$ 

Neví se, zda pro libovolný graf  $G$  existuje vůbec nějaký algoritmus, kterým bychom určili hodnotu  $\Theta(G)$ . Přesto je alespoň něco známo. Pro perfektní grafy Claude E. Shannon ukázal, že  $\Theta(G) = \alpha(G)$ . To také znamená, že pro perfektní grafy lze  $\Theta(G)$  určit v polynomiálním čase. Dalším kdo se problémem zabýval byl László Lovász, který velmi hezkým způsobem ukázal, že kružnice délky 5 má kapacitu  $\sqrt{5}$ . Na Lovászův postup se dále podíváme, protože vede k obecnému hornímu odhadu na  $\Theta(G)$ .

## 5.1 $\Theta(C_5) = \sqrt{5}$

**Tenzorový součin** vektorů  $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n)$  a  $\mathbf{v} = (v_1, \dots, v_m)$  je

$$\mathbf{u} \circ \mathbf{v} = (u_1 v_1, \dots, u_1 v_m, u_2 v_1, \dots, u_n v_m).$$

Užitečné bude následující pozorování, které dává do souvislosti skalární a tenzorový součin.

**Pozorování.** Nechť  $\mathbf{x}, \mathbf{u}$  jsou vektory délky  $n$  a  $\mathbf{y}, \mathbf{v}$  jsou vektory délky  $m$ . Potom platí

$$(\mathbf{x} \circ \mathbf{y})^T (\mathbf{u} \circ \mathbf{v}) = (\mathbf{x}^T \mathbf{u}) (\mathbf{y}^T \mathbf{v}). \quad (5.1)$$

*Důkaz.* Levá strana:

$$\begin{aligned} & (x_1 y_1, x_1 y_2, \dots, x_1 y_m, \dots, x_n y_m)^T (u_1 v_1, u_1 v_2, \dots, u_1 v_m, \dots, u_n v_m) = \\ & x_1 y_1 u_1 v_1 + x_1 y_2 u_1 v_2 + \dots + x_1 y_m u_1 v_m + \dots + x_n y_m u_n v_m \end{aligned}$$

Pravá strana:

$$\begin{aligned} & (x_1 u_1 + \cdots + x_n u_n) \cdot (y_1 v_1 + \cdots + y_m v_m) = \\ & x_1 y_1 u_1 v_1 + x_1 y_2 u_1 v_2 + \cdots + x_1 y_m u_1 v_m + \cdots + x_m y_m u_n v_m \end{aligned}$$

□

Mějme graf  $G = (V, E)$ , kde  $V = \{1, \dots, n\}$ . Systém  $(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n)$  jednotkových vektorů v Euklidovském prostoru takový, že

$$\forall ij \notin E \implies \mathbf{v}_i \perp \mathbf{v}_j$$

nazýváme **ortonormální reprezentace** grafu  $G$ . Poznamenejme, že každý graf má nějakou ortonormální reprezentaci, např.  $1 \mapsto \mathbf{e}_1, \dots, n \mapsto \mathbf{e}_n$ .

**Lemma 1.** *Nechť  $(\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_n)$  je ortonormální reprezentace grafu  $G$  a  $(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_m)$  je ortonormální reprezentace grafu  $H$ . Potom  $\mathbf{u}_i \circ \mathbf{v}_j$  je ortonormální reprezentace grafu  $G \cdot H$ .*



## Kapitola 6

### Problém maximálního řezu

## Kapitola 7

### Problém obchodního cestujícího

# Část III

## Implementace

## Kapitola 8

### Lovászova theta funkce

## Kapitola 9

### Problém maximálního řezu

## Závěr