Konspekt

Piotr Chołda

22 listopada 2017

1 Projektowanie topologii, wymiarowanie z modularnymi przepływnościami oraz użycie koncepcji sprawiedliwości

1.1 Projektowanie topologii oraz użycie modułów przepływności

1. Problemy projektowania z użyciem zmiennych dyskretnych (nieciągłych).

2. Projektowanie topologiczne ze stałymi kosztami (TDFCM, *Topological Design with a Fixed Charge Model*), sformułowanie L-P:

   - Indeksy:
     - ⋆ $e = 1, 2, \ldots, E$ łącza (które mogą być zainstalowane);
     - ⋆ $d = 1, 2, \ldots, D$ zapotrzebowania;
     - ⋆ $p = 1, 2, \ldots, P_d$ dopuszczalne ścieżki przepływów mogących realizować zapotrzebowanie d.
   - Zmienne:
     - ⋆ x_{dp} wielkość przepływu realizującego zapotrzebowanie d, korzystającego ze ścieżki p,
     - ⋆ y_e przepływność do zainstalowania na łączu e,
     - ⋆ u_e $= 1$ jeśli łącze e jest zainstalowane;
       $= 0$, w przeciwnym przypadku (**binarna** zmienna decyzyjna).
   - Stałe:
     - ⋆ δ_{edp} $= 1$ jeśli łącze e należy do ścieżki p realizującej zapotrzebowanie d;
       $= 0$ w przeciwnym przypadku;
     - ⋆ h_d rozmiar zapotrzebowania d, które ma być zrealizowane;
     - ⋆ ξ_e stały koszt użycia jednostki przepływności na łączu e;
     - ⋆ κ_e koszt „otwarcia” (tj. uruchomienia) łącza;
     - ⋆ W wystarczająco duża wartość („duże W”).
   - Funkcja celu: min $\mathbf{F}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) = \sum_e (\xi_e y_e + \kappa_e u_e)$.
   - Ograniczenia:
     - ⋆ $\sum_p x_{dp} = h_d$ $\quad d = 1, 2, \ldots, D$;

- ⋆ $\sum_d \sum_p \delta_{edp} x_{dp} = y_e \quad e = 1, 2, \ldots, E$;
- ⋆ $y_e \leq W u_e \quad e = 1, 2, \ldots, E$;
- ⋆ $\mathbf{y}$ and $\mathbf{x}$ — nieujemne ciągłe oraz $\mathbf{u}$ — binarne.

3. Problemy projektowania sieci z poszukiwaniem umiejscowienia węzłów:
   - dodajemy zmienne binarne u_v oznaczające potrzebę (lub jej brak) instalacji węzła v;
   - uwzględniamy zmienne u_v w funkcji celu;
   - dodajemy stałe opisujące incydencję między łukami/łączami a węzłami jak w sformułowaniu N-L: a_{ev}, b_{ev};
   - dodajemy ograniczenia: $\sum_e (a_{ev} + b_{ev}) u_e \leq W u_v \quad v = 1, 2, \ldots, V$.
4. Projektowanie z modularną przepływnością łączy (M: moduł rozmiaru dla przepływności łączy, *module size of the link capacity*, np. $M = 10\,\mathrm{Gb/s}$), *modular dimensioning*:
   - y_e — całkowitoliczbowe, problem typu MI(L)P (bo x_{dp} są ciągłe):
     - ⋆ ograniczenia typu LINK: $\sum_d \sum_p \delta_{edp} x_{dp} \leq M y_e \; e = 1, 2, \ldots, E$;
     - ⋆ ograniczenia typu PATH — bez zmian.
   - u_{dp} — binarne/całkowitoliczbowe (przepływy nie są zbifurkowane [*non-bifurcated*]), y_e — całkowitoliczbowe, problem typu I(L)P:
     - ⋆ ograniczenia typu LINK: $\sum_d \sum_p \delta_{edp} h_d u_{dp} \leq M y_e \; e = 1, 2, \ldots, E$;
     - ⋆ ograniczenia typu PATH: $\sum_p u_{dp} = 1 \; d = 1, 2, \ldots, D$.
5. Projektowanie z wieloma modułami, modułowość inkrementacyjna:
   - Wiele niezależnych modułów (*multiple modules*): M_k, $k = 1, 2, \ldots, K$:
     - ⋆ ustalanie przepływności łącza jak składanie zawartości pudełek;
     - ⋆ ξ_{ek} koszt użycia modułu przepływności k na łączu e (stała);
     - ⋆ M_k wielkość modułu przepływności k (stała);
     - ⋆ y_{ek} liczba modułów k do zainstalowania na łączu e (zmienna);
     - ⋆ funkcja celu: min $\mathbf{F}(\mathbf{y}) = \sum_e \sum_k \xi_{ek} y_{ek}$;
     - ⋆ $\sum_d \sum_p \delta_{edp} x_{dp} \leq \sum_k M_k y_{ek} \quad e = 1, 2, \ldots, E$;
     - ⋆ y_{ek} — całkowitoliczbowe.
   - Wielkości opisywane inkrementacyjnie (*incremental modular function*): m_k, $k = 1, 2, \ldots, K$:
     - ⋆ ustalanie przepływności łącza zgodnie z uporządkowaniem narzucanym przez wielkości modułów;
     - ⋆ u_{ek} określa czy użyto modułu przepływności k na łączu e (zmienna);
     - ⋆ funkcja celu: min $\mathbf{F}(\mathbf{u}) = \sum_e \sum_k \xi_{ek} u_{ek}$,
     - ⋆ $\sum_d \sum_p \delta_{edp} x_{dp} \leq \sum_k m_k u_{ek} \quad e = 1, 2, \ldots, E$,
     - ⋆ $u_{e1} \geq u_{e2} \geq \cdots \geq u_{eK} \quad e = 1, 2, \ldots, E$,
     - ⋆ u_{ek} — binarne.
   - Wartości ξ_{ek} oraz M_k/m_k zapewne różnią się w przypadku obu podejść.

1.2 Użycie pojedynczych przepływów

1. Pojęcie przepływu niezbifurkowanego (*non-bifurcated/unsplittable flow*).

2. Sformułowanie problemu (liniowego programowania binarnego BIP, *Binary Integer Programming*) alokacji zasobów z przepływami niezbifurkowanymi (sformułowanie typu L-P), bez funkcji celu (poszukiwanie jedynie rozwiązania dopuszczalnego):

   - Indeksy, stałe: (*jak poprzednio, w podstawowych problemach alokacji zasobów z rutingiem przepływów w sformułowaniu L-P*).
   - Zmienne:
     - ⋆ u_{dp} przyjmuje wartość 1, jeśli na potrzeby zapotrzebowania d używa się przepływu na ścieżce p (w przeciwnym razie: 0).
   - Ograniczenia:
     - ⋆ $\sum_p u_{dp} = 1 \qquad d = 1, 2, \ldots, D;$
     - ⋆ $\sum_d \sum_p \delta_{edp} h_d u_{dp} \leq c_e \qquad e = 1, 2, \ldots, E;$
     - ⋆ $\mathbf{u}$ — wartość binarna.

3. Sformułowanie problemu alokacji zasobów z przepływami niezbifurkowanymi (sformułowanie typu N-L), również wersja z limitem przeskoków (*hop limit*):

   - Indeksy, stałe: (*jak poprzednio, w podstawowych problemach alokacji zasobów z rutingiem przepływów w sformułowaniu N-L*).
   - Zmienne:
     - ⋆ u_{ed} przyjmuje wartość 1, jeśli na potrzeby zapotrzebowania d używa się przepływów przechodzących przez łącze e (w przeciwnym razie: 0).
   - Ograniczenia:
     - ⋆ $\sum_e a_{ev} u_{ed} - \sum_e b_{ev} u_{ed} = \begin{cases} 1 & \text{jeśli } v = s_d \\ 0 & \text{jeśli } v \neq s_d, v \neq t_d \\ -1 & \text{jeśli } v = t_d \end{cases}$
       $d = 1, 2, \ldots, D,\ v = 1, 2, \ldots, V;$
     - ⋆ $\sum_e a_{ev} u_{ed} \leq 1 \qquad d = 1, 2, \ldots, D,\ v = 1, 2, \ldots, V;$
     - ⋆ $\sum_d h_d u_{ed} \leq c_e \qquad e = 1, 2, \ldots, E.$

4. Modyfikacja problemów w celu ustrzeżenia się przed sytuacją, w której przy założonych poziomach przepływności powyższe sformułowania okazują się sprzeczne/nierozwiązywalne:

   - Indeksy, stałe, funkcja celu: (*jak poprzednio, w podstawowych problemach alokacji zasobów z rutingiem przepływów w sformułowaniu L-P*).
   - Zmienne:
     - ⋆ z ciągła zmienna pomocnicza.
   - Funkcja celu: min. z

- Ograniczenia:
  - ⋆ $\sum_p u_{dp} = 1$ $\quad d = 1, 2, \ldots, D$;
  - ⋆ $\sum_d \sum_p \delta_{edp} h_d u_{dp} \leq c_e + z$ $\quad e = 1, 2, \ldots, E$;
  - ⋆ $\mathbf{u}$ — wartość binarna.

1.3 Sprawiedliwe rozmieszczenie ruchu sieciowego

1. Różne podejścia do optymalizacji przenoszonego ruchu przy ograniczonych możliwościach budżetowych lub ograniczonych przepływnościach łączy i założeniu, że ruch jest elastyczny (*elastic traffic*):
   - Maksymalizacja przepustowości (*throughput maximization*)
   - Sprawiedliwość MMF (*max-min fairness*) i pojęcie porządku leksykograficznego (oraz opartego na nim rozwiązania problemu)
   - Sprawiedliwość proporcjonalna (*proportional fairness*)
2. Linearyzacja problemu przy zastosowaniu koncepcji sprawiedliwości proporcjonalnej.

1.4 Dobór wag algorytmu rutingu

1. Dobór wag dla algorytmów najkrótszej ścieżki.
2. Pojęcie ECMP (*Equal Cost Multi-Path*).
3. Problem wyszukiwania wag przy założania trasowania na najkrótszych ścieżkach:
   - Indeksy:
     - ⋆ $s, t, v = 1, 2, \ldots, V$ węzły;
     - ⋆ $e = 1, 2, \ldots, E$ łuki,
   - Stałe:
     - ⋆ h_{vt} rozmiar zapotrzebowania z węzła v do węzła t;
     - ⋆ $i(e), j(e)$ węzły odpowiednio rozpoczynający i kończący łuk e;
     - ⋆ M duża liczba;
     - ⋆ c_e przepływność zainstalowana na łuku e.
   - Zmienne:
     - ⋆ w_e waga łuku e;
     - ⋆ r_{vt} długość najkrótszej ścieżki z węzła v do węzła t ($r_{vv} = 0$);
     - ⋆ x_{et} wielkość przepływu realizującego zapotrzebowania do węzła t na łuku e;
     - ⋆ y_{vt} wielkość każdego z niezerowych przeływów realizujących zapotrzebowanie z węzła v do węzła t, które rozmieszczono na łuku wychodzącym z węzła v;
     - ⋆ u_{et} zmienna binarna równa 1 wtedy i tylko wtedy gdy łuk e leży na najkrótszej ścieżce do węzła t.
   - Ograniczenia:

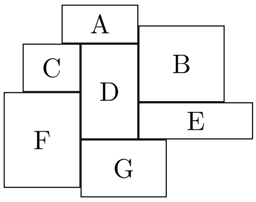
- $\star$ $\sum_{\{e:j(e)=t\}} x_{et} = \sum_{s\neq t} h_{st}$ $t = 1, 2, \ldots, V$;
- $\star$ $\sum_{\{e:i(e)=v\}} x_{et} - \sum_{\{e:j(e)=v\}} x_{et} = h_{vt}$
  $t, v = 1, 2, \ldots, V,\ t \neq v$;
- $\star$ $\sum_t x_{et} \leq c_e$ $e = 1, 2, \ldots, E$;
- $\star$ $0 \leq r_{j(e)t} + w_e - r_{i(e)t} \leq (1 - u_{et})\, M$
  $e = 1, 2, \ldots, E,\ t = 1, 2, \ldots, V$;
- $\star$ $1 - u_{et} \leq r_{j(e)t} + w_e - r_{i(e)t}$
  $e = 1, 2, \ldots, E,\ t = 1, 2, \ldots, V$;
- $\star$ $w_e \geq 1$ $e = 1, 2, \ldots, E$;
- $\star$ $x_{et} \leq u_{et} \sum_v h_{vt}$ $e = 1, 2, \ldots, E,\ t = 1, 2, \ldots, V$;
- $\star$ $0 \leq y_{i(e)t} - x_{et} \leq (1 - u_{et}) \sum_v h_{vt}$
  $e = 1, 2, \ldots, E,\ t = 1, 2, \ldots, V$;

4. Ograniczanie podziału przepływów dla zapotrzebowań (*limited split*): $\sum_{\{e:i(e)=v\}} u_{et} \leq n$ $t, v = 1, 2, \ldots, V,\ t \neq v$

5. Minimalizacja maksymalnego użycia łuku:
   - Min. t,
   - s.t.: $t \geq (\sum_t x_{et})/c_e$ $e = 1, 2, \ldots, E$.

1.5 Zadania

1. Poniżej podano fragment pewnego problemu optymalizacyjnego. W podanej postaci to sformułowanie nie jest poprawnie zapisanym zadaniem MILP. **(a)** Dlaczego? **(b)** Proszę je poprawić tak, żeby było poprawnym zadaniem MILP. **(c)** Proszę zinterpretować znaczenie zmiennych u_{dp} oraz ograniczeń.
   - Indeksy:
     - $\star$ $e = 1, 2, \ldots, E$ łącza;
     - $\star$ $d = 1, 2, \ldots, D$ zapotrzebowania;
     - $\star$ $p, q = 1, 2, \ldots, P_d$ dopuszczalne ścieżki przepływów mogących realizować zapotrzebowanie d.
   - Stałe:
     - $\star$ $\delta_{edp} = 1$ jeśli łącze e należy do ścieżki p mogącej realizować zapotrzebowanie d; w przeciwnym przypadku 0
   - Zmienne:
     - $\star$ w_e waga łącza e, wartość ciągła nieujemna;
     - $\star$ u_{dp} wartość binarna;
   - Ograniczenia:
     - $\star$ $\forall_{d=1,2,\ldots,D}$ $\sum_p u_{dp} = 1$;
     - $\star$ $\forall_{d=1,2,\ldots,D}\, \forall_{q=1,2,\ldots,P_d}$ $\sum_{p=1,2,\ldots,P_d} \sum_e \delta_{edp} w_e u_{dp} \leq \sum_e \delta_{edq} w_e$.



Rysunek 1: Przykład sieci „komórkowej".

2. Proszę sformułować w postaci problemu programowania matematycznego LP lub MILP (z wyraźnym rozpisaniem indeksów, stałych, zmiennych, funkcji celu i ograniczeń) następujący problem projektowania sieci opisany werbalnie: projektuje się sieć komórkową, przy czym obszar objęty siecią dzieli się na wiele komórek, z których każda ma kształt prostokątny[1], jak przykładowo pokazano na rys. 1. Taki sposób podziału obszaru jest z góry zadany i traktujemy go jako daną wejściową do problemu: sąsiedztwo jest opisane za pomocą stałych a_{ij} ($i, j = 1, \ldots, N$; $i \neq j$), które przyjmują wartość 1 gdy komórki i, j ze sobą sąsiadują (w przeciwnym przypadku — 0). Do obsługi ruchu jest wymagane przydzielenie jednego zestawu częstotliwości w każdej z komórek. Ze względu na unikanie interferencji zakłada się, że nie wolno w sąsiadujących komórkach używać tego samego zestawu częstotliwości (np. gdyby komórki były rozmieszczone jak na rysunku, komórkom A i C należałoby przydzielić różne zestawy częstotliwości; ale już komórkom B i C można byłoby przydzielić te same zestawy częstotliwości). Załóżmy, że interesujący nas obszar podzielono na N komórek, a operator może wykorzystać M różnych zestawów częstotliwości. Operator chciałby użyć do pokrycia obszaru jak najmniej różnych zestawów częstotliwości. Proszę dodatkowo podać (jako funkcje N oraz M): (a) liczbę zmiennych całkowitoliczbowych, (b) liczbę ograniczeń równościowych oraz (c) liczbę ograniczeń nierównościowych występujących w tym problemie. Czy można z góry przewidzieć, jakie jest ograniczenie górne wymaganej liczby różnych zestawów częstotliwości?

3. Proszę zinterpretować (tzn. napisać, jaką dokładnie sytuację ma modelować) poniższe sformułowanie „łącze-ścieżka" (L-P). Sformułowanie dotyczy pewnego problemu optymalnego projektowania sieci.

   - Indeksy:
     - ⋆ $e = 1, 2, \ldots, E$ łącza;
     - ⋆ $d = 1, 2, \ldots, D$ zapotrzebowania;
     - ⋆ $p = 1, 2, \ldots, P_d$ dopuszczalne ścieżki przepływów mogących realizować zapotrzebowanie d.
   - Stałe:
     - ⋆ $\delta_{edp} = 1$ jeśli łącze e należy do ścieżki p realizującej zapotrzebowanie d;
       $= 0$ w przeciwnym przypadku;

[1]Stosujemy to uproszczenie na potrzeby zadania, w praktyce komórka ma inny kształt.

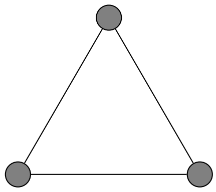
- ⋆ h_d referencyjny rozmiar zapotrzebowania d, które może być zrealizowane;
- ⋆ ξ_e koszt dodania jednostki przepływności na łączu e;
- ⋆ α pewna wartość stała (należy m.in. zinterpretować jej znaczenie).

- Zmienne:
  - ⋆ x_{dp} ciągła wielkość przepływu realizującego zapotrzebowanie d, korzystającego ze ścieżki p;
  - ⋆ y_e ciągła wielkość przepływności przydzielonej do zainstalowania na łączu e;
  - ⋆ β pewna zmienna ciągła (należy m.in. zinterpretować jej znaczenie).
- Funkcja celu: $\max \beta$.
- Ograniczenia:
  - ⋆ $\sum_p x_{dp} \geq \beta h_d \qquad d = 1, 2, \ldots, D;$
  - ⋆ $\sum_d \sum_p \delta_{edp} x_{dp} = y_e \qquad e = 1, 2, \ldots, E;$
  - ⋆ $\sum_e \xi_e y_e \leq \alpha.$

Następnie proszę: (a) zmodyfikować to sformułowanie w taki sposób, żeby uwzględniało fakt, iż w sieci zainstalowana przepływność łączy może przyjmować tylko wartości dyskretne (kombinacje 100, 200 lub 500 jednostek przepływności); (b) zapisać ten problem używając sformułowania o charakterze dowolnej (tj. zwykłej lub zagregowanej, można sobie którąś wybrać) postaci „węzeł-łącze” (N-L); będzie to zapewne wymagało dodania kolejnych stałych, zmiennych i ograniczeń (może być też konieczna modyfikacja istniejących ograniczeń).

4. Proszę sformułować w postaci problemu programowania matematycznego LP lub MILP (z wyraźnym rozpisaniem indeksów, stałych, zmiennych, funkcji celu i ograniczeń) następujący problem projektowania sieci opisany werbalnie: dla sieci trójkątnej złożonej z trzech łączy i trzech węzłów, pokazanej na rys. 2, istnieją trzy zapotrzebowania (między każdą z możliwych par węzłów, każde zapotrzebowanie jest na 2,25 Mb/s). Funkcja kosztu użycia przepływności na pojedynczym łączu jest nieliniowa i wyraża się wzorem: $K = O^2$ (K: koszt obliczony dla obciążenia łącza przepływnością O wyrażoną w Mb/s). Chcielibyśmy tak rozmieścić przepływy realizujące zapotrzebowania, żeby kosztowało to w sumie jak najmniej. Obciążenie na żadnym z łączy nie może przekraczać 4 Mb/s. Sformułowanie problemu ma być liniowe, więc funkcję kosztu trzeba będzie zlinearyzować (powinny zostać użyte co najmniej dwa segmenty liniowe, nie muszą być równej długości). W sformułowaniu proszę uwzględnić konkretne wartości numeryczne.

5. Proszę sformułować w postaci problemu programowania matematycznego LP lub MILP (z wyraźnym rozpisaniem indeksów, stałych, zmiennych, funkcji celu i ograniczeń) następujący problem projektowania sieci opisany werbalnie: dla sieci trójkątnej złożonej z trzech łączy i trzech węzłów, pokazanej na rys. 2, istnieją trzy zapotrzebowania (między każdą z możliwych

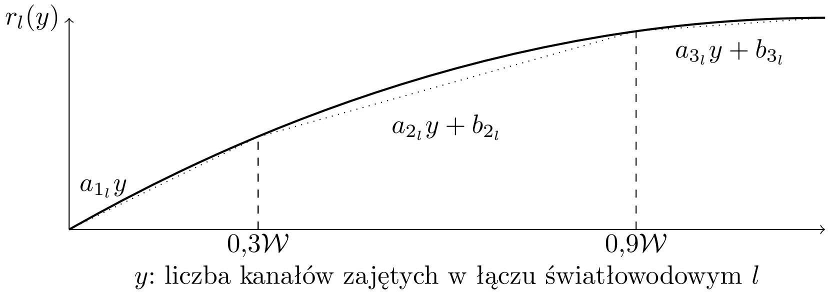


Rysunek 2: Sieć trójkątna.

par węzłów, każde zapotrzebowanie jest na 4,75 Mb/s). Funkcja kosztu użycia przepływności na pojedynczym łączu jest nieliniowa i wyraża się wzorem: $K = \sqrt{O}$ (K: koszt obliczony dla obciążenia łącza przepływnością O wyrażoną w Mb/s). Chcielibyśmy tak rozmieścić przepływy realizujące zapotrzebowania, żeby kosztowało to w sumie jak najmniej. Obciążenie na żadnym z łączy nie może przekraczać 9 Mb/s. Sformułowanie problemu ma być liniowe, więc funkcję kosztu trzeba będzie zlinearyzować (powinny zostać użyte co najmniej dwa segmenty liniowe, nie muszą być równej długości). W sformułowaniu proszę uwzględnić konkretne wartości numeryczne.

6. Proszę sformułować w postaci problemu programowania matematycznego LP lub MILP (z wyraźnym rozpisaniem indeksów, stałych, zmiennych, funkcji celu i ograniczeń) następujący problem projektowania sieci opisany werbalnie: dla sieci trójkątnej złożonej z trzech łączy i trzech węzłów, pokazanej na rys. 2, istnieją trzy zapotrzebowania (między każdą z możliwych par węzłów, każde zapotrzebowanie jest na 4,75 Mb/s). Funkcja użyteczności na pojedynczym łączu (tj. zysk operatora z zainstalowania określonej przepływności) jest nieliniowa i wyraża się wzorem: $K = \sqrt{O}$ (K: wartość użyteczności wynikająca z zainstalowania przepływności O na łączu, wyrażonej w Mb/s). Chcielibyśmy tak rozmieścić przepływy realizujące zapotrzebowania, żeby sumaryczna użyteczność była jak największa. Obciążenie na żadnym z łączy nie może przekraczać 9 Mb/s. Sformułowanie problemu ma być liniowe, więc funkcję kosztu trzeba będzie zlinearyzować (powinny zostać użyte co najmniej dwa segmenty liniowe, nie muszą być równej długości). W sformułowaniu proszę uwzględnić konkretne wartości numeryczne.

7. Proszę sformułować w postaci problemu programowania matematycznego LP lub MILP (z wyraźnym rozpisaniem indeksów, stałych, zmiennych, funkcji celu i ograniczeń) następujące zagadnienie projektowania sieci opisane werbalnie. Jest to zagadnienie znalezienia tras dla przepływów (tj. rutingu) z przydziałem zasobów optycznych oraz maksymalizacją zysku (*routing and wavelength assignment for maximizing revenue*). Mamy daną topologię sieci optycznej składającą się ze zbioru łączy światłowodowych $\mathcal{L}$ i węzłów optycznych $\mathcal{V}$, przy czym w ramach każdego łącza mamy do dyspozycji jedno włókno światłowodowe, w którym możemy transmitować dane za pomocą kanałów optycznych, z których każdy używa jednej z $\mathcal{W}$ nośnych dostępnych we włóknie (tzn. używamy systemu WDM). Z góry zadano $\mathcal{S}$: zbiór zapotrzebowań między różnymi parami węzłów sieci. Każde zapotrzebowanie ma określony rozmiar strumienia, który powinien

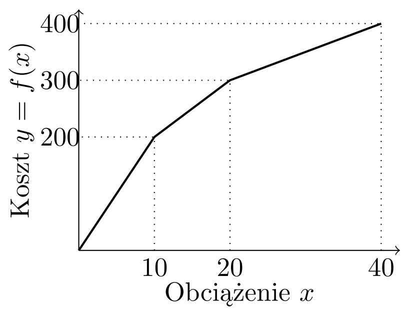


Rysunek 3: Przykładowa funkcja opisująca zysk.

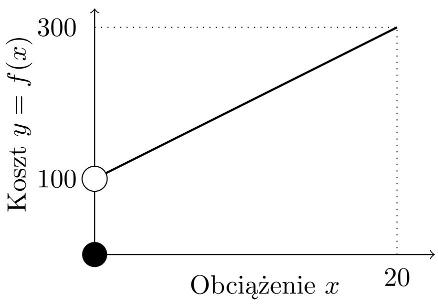
być przenoszony na jego potrzeby, przy czym jego wielkość to wielokrotność całkowita przepływności charakterystycznej dla pojedynczego kanału (tzn. wielokrotność może być 1, 2,...). Wielkość tej wielokrotności podaje się za pomocą wartości stałej t_s ($s \in \mathcal{S}$). Zakłada się, że nie wszystkie zapotrzebowania muszą być zrealizowane w 100% (a nawet niektóre nie muszą być zrealizowane w ogóle), ale nigdy nie przydziela się żadnemu zapotrzebowaniu ułamkowej przepływności kanału. Operator zarabia na każdym zajętym kanale r_l ($l \in \mathcal{L}$) jednostek monetarnych. Po sformułowaniu problemu w takiej wersji, proszę uwzględnić, że funkcja zysku związana z użyciem kanałów w pojedynczym włóknie jest opisywana za pomocą zależności nieliniowej pokazanej na rys. 3 (parametry a_{i_l} oraz b_{i_l} mogą być różne dla różnych łączy). Na potrzeby opracowania sformułowania można wprowadzić wszystkie niezbędne zmienne i stałe (jeśli nie podano ich wyżej). Sformułowanie może być typu L-P lub N-L (proszę sobie wybrać dowolnie). Czy rozwiązanie problemu zawsze istnieje?

8. Proszę sformułować zbiór równości/nierówności (być może dobierając również jakieś zmienne pomocnicze, np. całkowitoliczbowe, albo jakieś stałe) opisujących relację między zmienną x, oznaczającą obciążenie łącza ($0 \leq x \leq 40$), a wartością $y = f(x)$, tj. kosztem użycia takiego łącza w zależności od tego obciążenia (dysponując tymi równościami/nierównościami powinniśmy być w stanie po podstawieniu konkretnej wartości x obliczyć odpowiednią wartość y). Ograniczenia mają być adekwatne do opisu problemu liniowego programowania matematycznego ze zmiennymi całkowitoliczbowymi MILP, w którym minimalizuje się funkcję celu zależną od kosztu użycia łącza. Sama zależność między y a x jest przedstawiona na rys. 4.

9. Proszę sformułować zbiór równości/nierówności (być może dobierając również jakieś zmienne pomocnicze, np. całkowitoliczbowe, albo jakieś stałe) opisujących relację między zmienną x, oznaczającą obciążenie łącza ($0 \leq x \leq 20$), a wartością y, tj. kosztem użycia takiego łącza w zależności od tego obciążenia (dysponując tymi równościami/nierównościami powinniśmy być w stanie po podstawieniu konkretnej wartości x obliczyć odpowiednią wartość y). Ograniczenia mają być adekwatne do opisu problemu liniowego programowania matematycznego ze zmiennymi całkowitoliczbowymi MILP, w którym minimalizuje się funkcję celu zależną od kosztu



Rysunek 4: Przykładowa funkcja opisująca taryfę wklęsłą przedziałami liniową.

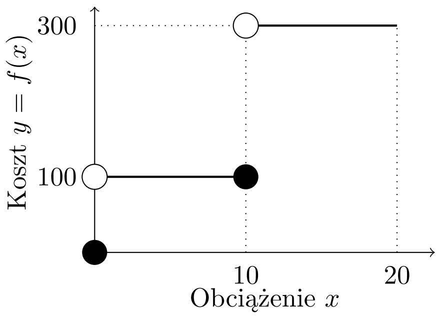


Rysunek 5: Przykładowa funkcja opisująca taryfę liniową z dodatkowym kosztem instalacji/dzierżawy.

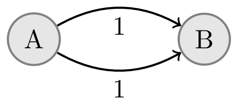
użycia łącza. Sama zależność między y a x jest przedstawiona na rys. 5. Jest to taryfa liniowa z dodatkowym kosztem instalacji/dzierżawy przy niezerowym obciążeniu.

10. Proszę sformułować zbiór równości/nierówności (być może dobierając również jakieś zmienne pomocnicze, np. całkowitoliczbowe, albo jakieś stałe) opisujących relację między zmienną x, oznaczającą obciążenie łącza ($0 \leq x \leq 20$), a wartością y, tj. kosztem użycia takiego łącza w zależności od tego obciążenia (dysponując tymi równościami/nierównościami powinniśmy być w stanie po podstawieniu konkretnej wartości x obliczyć odpowiednią wartość y). Ograniczenia mają być adekwatne do opisu problemu liniowego programowania matematyczego ze zmiennymi całkowitoliczbowymi MILP, w którym minimalizuje się funkcję celu zależną od kosztu użycia łącza. Sama zależność między y a x jest przedstawiona na rys. 6. Niniejszą taryfę można nazwać taryfą skokową (z dwojakim ryczałtem).

11. Na rys. 7 jest dany graf ważony (wagi krawędzi oznaczają przepływności łączy). Problem projektowania sieci polega na znalezieniu przepływu (być może zbifurkowanego) o rozmiarze 0,95 między węzłami A i B, przy czym suma średnich opóźnień na wszystkich łączach ma być zminimalizowana. Z teorii masowej obsługi wiemy, że średnie opóźnienie na łączu o prze-



Rysunek 6: Przykładowa funkcja opisująca taryfę skokową.



Rysunek 7: Prosta sieć z dwoma węzłami i dwoma łukami.

pływności c, które przenosi średni ruch o wartości t, wyraża się wzorem:

$$d(c,t) = \frac{t}{c-t} \text{ dla } 0 \le \frac{t}{c} < 1. \tag{1}$$

Proszę sformułować (definiując odpowiednie indeksy, zmienne, funkcję celu i ograniczenia) zadanie programowania liniowego LP lub MILP, które modeluje postawiony problem. Zależność (1) przybliżamy za pomocą następującej funkcji:

$$\widetilde{d}(c,t) = \begin{cases} \frac{3}{2}t & \text{jeśli } 0 \le \frac{t}{c} \le \frac{1}{3} \\ \frac{9}{2}t - c & \text{jeśli } \frac{1}{3} \le \frac{t}{c} \le \frac{2}{3} \\ 15t - 8c & \text{jeśli } \frac{2}{3} \le \frac{t}{c} \le \frac{4}{5} \\ 50t - 36c & \text{jeśli } \frac{4}{5} \le \frac{t}{c} \le \frac{9}{10} \\ 200t - 171c & \text{jeśli } \frac{9}{10} \le \frac{t}{c} \le \frac{19}{20} \\ 4000t - 3781c & \text{jeśli } \frac{19}{20} \le \frac{t}{c} < 1. \end{cases}$$

Czy sformułowany problem jest wypukły albo wklęsły?

12. Proszę sformułować w postaci problemu programowania matematycznego LP lub MILP (z wyraźnym rozpisaniem indeksów, stałych, zmiennych, funkcji celu i ograniczeń) następujący problem projektowania sieci opisany werbalnie: pewien amerykański operator sieci rozległych dysponuje dwoma odrębnymi sieciami na Zachodnim i Wschodnim Wybrzeżu USA. Postanowił je połączyć ze sobą i oczywiście chce zrobić to jak najtaniej. Na Zachodnim Wybrzeżu dysponuje ruterami rozmieszczonymi w następujących miastach: Seattle, San Francisco i Los Angeles. Natomiast rutery na Wschodnim Wybrzeżu znajdują się w Nowym Yorku, Waszyngtonie i Atlancie. Zdecydowano, że obie sieci zostaną połączone za pomocą jednego transkontynentalnego kabla optycznego, który będzie korzystał ze wzmacniacza

umieszczonego albo w Chicago albo w Dallas. Kabel optyczny będzie z jednej strony podłączony do rutera na Zachodnim Wybrzeżu, a z drugiej — do rutera na Wschodnim Wybrzeżu. Operator jest w stanie oszacować KO_{ij}, tj. koszt położenia odcinka kabla między miastem i oraz miastem j (innego rodzaju koszty nie interesują nas w tym problemie).

13. Proszę sformułować w postaci problemu programowania matematycznego LP lub MILP (z wyraźnym rozpisaniem indeksów, stałych, zmiennych, funkcji celu i ograniczeń) następujący problem projektowania sieci opisany werbalnie: w celu skonstruowania pewnego systemu naziemnego dla łączności satelitarnej wybrano m potencjalnych lokalizacji anten. Do dyspozycji mamy p typów anten. Chcemy umieścić anteny co najwyżej trzech różnych typów, przy czym zakładamy, że w jedej lokalizacji będzie co najwyżej jedna antena określonego typu. Niech BW_i oznacza dostępną przepływność „w dół" realizowaną za pomocą pojedynczej anteny typu i. Niech KO_i oznacza wyrażony w złotych koszt instalacji pojedynczej anteny typu i. Ani przepływność „w dół" dla anteny ani jej koszt nie zależą od miejsca instalacji, a tylko od typu anteny. Anten typu i mamy dostępnych w magazynie MA_i i nie możemy liczyć na dodatkowe dostawy. Chcemy zbudować system, którego ogólny koszt jest jak najmniejszy i w którym sumaryczna przepływność „w dół" nie jest mniejsza niż B.

14. Proszę sformułować w postaci problemu programowania matematycznego LP lub MILP (z wyraźnym rozpisaniem indeksów, stałych, zmiennych, funkcji celu i ograniczeń) następujący problem projektowania sieci opisany werbalnie: w celu skonstruowania pewnego systemu naziemnego dla łączności satelitarnej wybrano n potencjalnych lokalizacji anten. W każdej lokalizacji ma zostać zainstalowana jedna antena. W przypadku każdej instalowanej anteny trzeba zdecydować, jakiego będzie typu. Istnieje m typów anten. Niech BW_i oznacza dostępną przepływność „w dół" realizowaną za pomocą pojedynczej anteny typu i. Niech KO_i oznacza wyrażony w złotych koszt instalacji pojedynczej anteny typu i. Ani przepływność „w dół" dla anteny ani jej koszt nie zależą od miejsca instalacji, a tylko od typu anteny. System ma być zbudowany za nie więcej niż BU złotych. Anten typu i mamy dostępnych w magazynie MA_i i nie możemy liczyć na dodatkowe dostawy. Chcemy zbudować system, w którym sumaryczna przepływność „w dół" jest jak największa.

15. Poniżej zdefiniowano problem optymalizacyjny (z użyciem sformułowania zagregowanego typu węzeł-łącze, A/N-L) służący do znalezienia przepływów w sieciach oraz parametrów konfiguracyjnych. **(a)** O jakiego rodzaju konfigurację chodzi? **(b)** Proszę zinterpretować znaczenie stałych i zmiennych, których definicji nie podano. **(c)** Proszę zinterpretować znaczenie funkcji celu oraz wszystkich ograniczeń.

    - Indeksy:
        - ⋆ $e = 1, 2, \ldots, E$ łuki sieci;
        - ⋆ $s, t, v = 1, 2, \ldots, V$ węzły sieci.
    - Stałe:
        - ⋆ h_{vt} (*należy zinterpretować znaczenie tych stałych*);

- $i(e)$ węzeł początkowy łuku e;
- $j(e)$ węzeł końcowy łuku e;
- c_e przepływność zainstalowana na łuku e;
- M bardzo duża liczba.

• Zmienne ciągłe nieujemne:

- Z (*należy zinterpretować znaczenie tej zmiennej*);
- w_e waga (metryka) łuku e;
- r_{vt} długość (waga) najkrótszej ścieżki z węzła v do węzła t ($r_{vv} \equiv 0$);
- x_{et} przepływ na łuku e do węzła t.
- y_{vt} (*należy zinterpretować znaczenie tych zmiennych*).

• Zmienne binarne:

- u_{et} zmienna przyjmująca wartość 1 wtedy i tylko wtedy gdy łuk e należy do najkrótszej ścieżki do węzła t.

• Funkcja celu (*należy zminimalizować jej znaczenie*): $\min Z$.

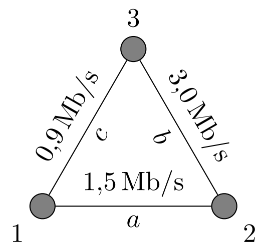
• Ograniczenia (*należy zinterpretować znaczenie każdego z ograniczeń*):

- $\sum_{\{e:j(e)=t\}} x_{et} = \sum_{s \neq t} h_{st}$ $\quad t = 1, 2, \ldots, V$;
- $\sum_{\{e:i(e)=v\}} x_{et} - \sum_{\{e:j(e)=v\}} x_{et} = h_{vt}$ $\quad t, v = 1, 2, \ldots, V \quad t \neq v$;
- $\sum_t x_{et} \leq Z c_e$ $\quad e = 1, 2, \ldots, E$;
- $0 \leq r_{j(e)t} + w_e - r_{i(e)t} \leq (1 - u_{et}) M$ $\quad e = 1, 2, \ldots, E \quad t = 1, 2, \ldots, V$;
- $1 - u_{et} \leq r_{j(e)t} + w_e - r_{i(e)t}$ $\quad e = 1, 2, \ldots, E \quad t = 1, 2, \ldots, V$;
- $x_{et} \leq u_{et} \sum_{v \neq t} h_{vt}$ $\quad e = 1, 2, \ldots, E \quad t = 1, 2, \ldots, V$;
- $0 \leq y_{i(e)t} - x_{et} \leq (1 - u_{et}) \sum_{v \neq t} h_{vt}$ $\quad e = 1, 2, \ldots, E, t = 1, 2, \ldots, V$;
- $w_e \geq 1$ $\quad e = 1, 2, \ldots, E$;
- $0 \leq Z \leq 1$.

16. Proszę sformułować w postaci problemu programowania matematycznego LP lub MILP (z wyraźnym rozpisaniem indeksów, stałych, zmiennych, funkcji celu i ograniczeń) następujący problem projektowania sieci opisany werbalnie: operator poszukuje optymalnego rozpływu ruchu w sieci, biorąc pod uwagę maksymalizację zsumowanych przepływności przydzielonych łączom. Sieć jest opisana jako graf $G(V, E)$, w którym V reprezentuje węzły optyczne, zaś E reprezentuje łącza. Wolumen ruchu dla zapotrzebowania między dowolną parą węzłów (n, m) (gdzie: $n, m \in V$, $n \neq m$) jest równy $|n - m| \times 10$ Gb/s (np. wielkość ruchu między węzłami 2 i 7 ma wynosić $|7 - 2| \times 10 = 50$ Gb/s). Każde łącze reprezentuje jedno włókno optyczne przenoszące do 40 kanałów optycznych. Każdy kanał optyczny ma przepływność maksymalną 10 Gb/s. W sieci nie występuje konwersja długości fal, z których korzystają kanały optyczne, w związku z tym dane przenoszone między wybraną parą węzłów przez cały czas używają tych samych częstotliwości optycznych (np. jeśli zdecydujemy się przenosić ruch z węzła a do węzła b w taki sposób, że opuszcza on węzeł a w kanałach optycznych λ_7 i λ_{15}, to w takim razie ruch ten używa kanałów λ_7 i λ_{15} na całej swojej ścieżce do węzła b). Operator dysponuje pewnym budżetem, z którego musi sfinansować transmitowanie danych. Budżet wynosi

Tablica 1: Zapotrzebowania związane z siecią przedstawioną na rys. 8

Zapotrzebowanie między węzłami	**Dopuszczalne ścieżki dla zapotrzebowania**
1-2	$\{a\}$, $\{c, b\}$
1-3	$\{a, b\}$, $\{c\}$
2-3	$\{b\}$, $\{a, c\}$



Rysunek 8: Sieć trójkątna z zainstalowanymi przepływnościami. Zaznaczono identyfikatory łączy a, b oraz c, a także dopuszczalną przepływność na każdym z łączy.

100 000 PLN. Długość dowolnego łącza (n, m) (gdzie: $n, m \in V$, $n \neq m$ i $(n, m) \in E$) jest równa $|n - m| \times 100$ km. Koszt transmisji 10 Gb/s ruchu na odległość 100 km to 1000 PLN.

17. Proszę znaleźć maksymalny rozpływ ruchu w sieci pokazanej na rys. 8 przy zapewnieniu sprawiedliwości MMF (*max-min fairness*). Tabela 1 przedstawia dodatkowe ograniczenia:

18. Poniżej przedstawiono fragment dobrze znanego sformułowania problemu optymalizacyjnego, dotyczącego przydzielania zasobów oraz rozmieszczenia przepływów realizujących pewne zapotrzebowania w sieci telekomunikacyjnej:

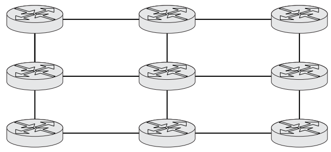
- Indeksy:
  - ⋆ $e = 1, 2, \ldots, E$ łącza;
  - ⋆ $d = 1, 2, \ldots, D$ zapotrzebowania/żądania;
  - ⋆ $p = 1, 2, \ldots, P_d$ ścieżki przepływów mogących realizować żądanie d.
- Stałe:
  - ⋆ δ_{edp}= 1 jeśli łącze e należy do ścieżki p realizującej zapotrzebowanie d; w przeciwnym przypadku: 0;
  - ⋆ h_d rozmiar zapotrzebowania d, które ma być zrealizowane.
- Zmienne:
  - ⋆ x_{dp} ciągła wielkość przepływu realizującego żądanie d, korzystającego ze ścieżki p.
- Ograniczenia:
  - ⋆ $\sum_p x_{dp} = h_d$ $\quad d = 1, 2, \ldots, D$.

Proszę zrealizować (traktując je jak odrębne zadania) następujące polecenia: (a) tak zmodyfikować to sformułowanie problemu optymalizacyjnego (tzn. zmienić lub dodać ograniczenia, w razie potrzeby dodając zmienne lub stałe), żeby zapewnić iż każde zapotrzebowanie zostanie zrealizowane z pomocą co najmniej W różnych przepływów; (b) tak zmodyfikować to sformułowanie problemu optymalizacyjnego (tzn. zmienić lub dodać ograniczenia, w razie potrzeby dodając zmienne lub stałe), żeby zapewnić iż każde zapotrzebowanie spełniające niżej podaną właściwość **WŁ** będzie korzystało z co najwyżej dwóch różnych przepływów. Właściwość **WŁ** charakteryzuje tylko takie zapotrzebowanie, na potrzeby którego chociaż jeden z używanych przepływów (tzn. przepływ niezerowy realizujący to zapotrzebowanie) musi skorzystać ze ścieżki zawierającej więcej niż $W-1$ łączy.

19. Poniżej przedstawiono fragment dobrze znanego sformułowania problemu optymalizacyjnego, dotyczącego przydzielania zasobów oraz rozmieszczenia przepływów realizujących pewne zapotrzebowania w sieci telekomunikacyjnej:

- Indeksy:
  - ⋆ $e = 1, 2, \ldots, E$ łuki;
  - ⋆ $v = 1, 2, \ldots, V$ węzły;
  - ⋆ $d = 1, 2, \ldots, D$ zapotrzebowania.
- Stałe:
  - ⋆ h_d wielkość zapotrzebowania d;
  - ⋆ s_d węzeł źródłowy dla zapotrzebowania d;
  - ⋆ t_d węzeł ujścia dla zapotrzebowania d;
  - ⋆ $a_{ev} = 1$ jeśli łuk e rozpoczyna się w węźle v; 0, w przeciwnym przypadku;
  - ⋆ $b_{ev} = 1$ jeśli łuk e kończy się w węźle v; 0, w przeciwnym przypadku;
- Zmienne:
  - ⋆ x_{ed} wielkość przepływu realizującego zapotrzebowanie d na łuku e.
- Ograniczenia:
  - ⋆ $$\sum_e a_{ev}x_{ed} - \sum_e b_{ev}x_{ed} = \begin{cases} h_d & \text{jeśli } v = s_d \\ 0 & \text{jeśli } v \neq s_d, v \neq t_d \\ -h_d & \text{jeśli } v = t_d \end{cases}$$
    $$d = 1, 2, \ldots, D,\ v = 1, 2, \ldots, V.$$

Proszę tak zmodyfikować to sformułowanie problemu optymalizacyjnego (tzn. zmienić lub dodać ograniczenia, w razie potrzeby dodając zmienne lub stałe), żeby zapewnić iż każde zapotrzebowanie będzie korzystało z co najmniej dwóch różnych przepływów, jeśli chociaż jeden przepływ używany na jego potrzeby (tzn. przepływ niezerowy realizujący to zapotrzebowanie) korzysta ze ścieżki zawierającej więcej niż W łuków.



Rysunek 9: Przykładowa sieć typu Manhattan.

20. Na rys. 9 pokazano sieć typu Manhattan. Przepływność każdego z łączy wynosi 100 Gb/s. Proszę sformułować zadanie optymalizacji liniowej, dzięki któremu będzie można uzyskać rozpływ ruchu dla pojedynczego zapotrzebowania między parą węzłów N1-N9 (wielkość zapotrzebowania: 60 Gb/s), ale w taki sposób, żeby ruch był jak najbardziej zrównoważony między wszystkimi węzłami (tj. żeby wielkości ruchu przenoszone na każdym z łączy były zbliżone do siebie najbardziej, jak to tylko jest możliwe). Idealne zrównoważenie (tj. taki sam ruch na każdym z łączy) nie jest osiągalne — dlaczego? Proszę również znaleźć ten pożądany rozpływ (jakąkolwiek metodą — nawet zgadywania).

1.6 Lektury

1.6.1 Materiał wykładu

Zagadnienia omówione w ramach tego wykładu są w dużym stopniu opisane w następującej książce:

- Michał Pióro and Deepankar Medhi. *Routing, Flow and Capacity Design in Communication and Computer Networks.* Morgan Kaufmann Publishers—Elsevier, San Francisco, CA, 2004: chapter 4.2.3, 4.3, 5.5-5.6, 6.1-6.3.

1.6.2 Lektura obowiązkowa

Lektura obowiązkowa związana z niniejszym wykładem: Andreas Bley, Bernard Fortz, Eric Gourdin, Kaj Holmberg, Olivier Klopfenstein, Michał Pióro, Artur Tomaszewski, and Hakan Ümit. Optimization of OSPF Routing in IP Networks. In Arie M.C.A Koster and Xavier Muñoz, editors, *Graphs and Algorithms in Communication Networks*, chapter 8, pages 199–240. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2010.

1.6.3 Bibliografia uzupełniająca

- Dritan Nace and Michał Pióro. Max-Min Fairness and Its Applications to Routing and Load-Balancing in Communication Networks: A Tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 10(4):5–17, October/December 2008: projektowanie sieci sprawiedliwych.

- Poompat Saengudomlert. *Optimization for Communications and Networks.* CRC Press/Science Publishers, Boca Raton, FL, 2012: metody rozwiązywania różnych problemów w kontekście projektowania sieci.