

PB165 Grafy a sítě: Plánování na počítačové síti I.

Plánování komunikace současně běžících úloh: paralelní úlohy s komunikací

- plánování strojů pro úlohy
- plánování současně probíhající komunikace

Plánování současně probíhajících přenosů

- plánování všech komunikací pro aktuální okamžik
- plánování strojů neuvažováno

Plánování úloh s precedencemi

- plánování strojů pro úlohy
- plánování přenosu dat po ukončení úlohy jiné úloze (úlohám)

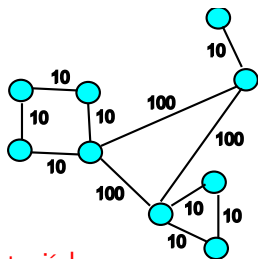
Problémy plánování úloh na počítačové síti

- Stroj: dán počet procesorů
- Úlohy prováděny na jednom nebo více uzlech počítačové sítě
 - vyžadují několik procesorů
- Úlohy potřebují k výpočtu **data**
 - data dané velikosti na jednom nebo více uzlech
 - data je nutné přenést na uzel, kde se úloha bude počítat
 - realita: data jsou často zreplikována na několika uzlech
- Linka:
 - **kapacita linky**: velikost přenesených dat za časovou jednotku
 - např. 100Mb/s, 1Gb/s, 10Gb/s
 - **latence**: doba nutná na přenos dat po lince
- Cíl: **realizovat všechny úlohy tak, jak postupně (dynamicky) přibývají**
 - úlohy musí mít dostatek procesorů
 - data musí ležet v době výpočtu na uzlu, kde se počítá úloha
 - je nutné plánovat i přenosy dat tak, aby bylo možné data přenést vzhledem k latenci i kapacitě linek na cestě

Základní model: multi-operační rozvrhování

Multi-operační rozvrhování

- úloha se skládá z několika operací
- může/nemusí být určeno pořadí operací
- operace má zadáno
 - dobu provádění, konkrétní stroj k provádění
- stroj: na každém stroji maximálně jedna operace
- doba na dopravu t_{hl} mezi stroji h a l : **závislá na strojích**
 - kapacita cest mezi stroji neomezená
 - délka cesty mezi stroji = součet odpovídajících dob na dopravu
- cíl: realizovat všechny operace všech úloh
při minimalizaci času dokončení všech úloh

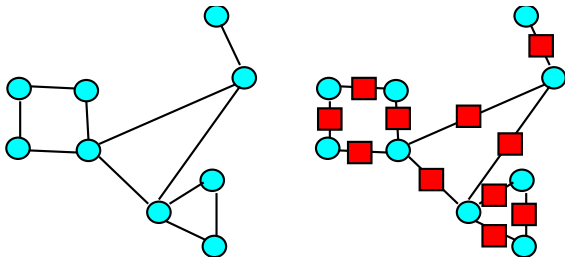


Grafová reprezentace

- **orientovaný hranově ohodnocený graf**
- vrchol: stroj
- hrana: pokud lze přejít přímo z jednoho stroje na druhý
- ohodnocení hrany: doba na dopravu z jednoho stroje na druhý

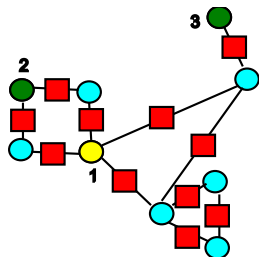
Rozšířený model: reprezentace síťových zdrojů

- Vrcholově ohodnocený neorientovaný graf
- Vrchol: stroj nebo linka
- Ohodnocení vrcholu-stroje: počet procesorů
- Ohodnocení vrcholu-linky: kapacita linky
 - linka je chápána jako zdroj, který má zadánu kapacitu
 - doba zpracování úlohy na lince (tj. přenosu dat pro úlohu na lince) odpovídá latenci
- Hrany: pokud jsou stroje A a B přímo spojeny linkou C, pak existují hrany AC a BC

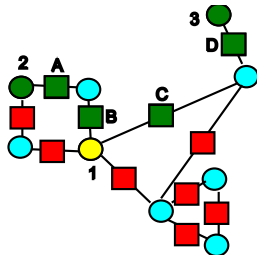


Plánování úlohy na počítačové síti: příklad

- Úloha naplánována k provádění na uzlu 1
- Data na uzlech 2 a 3

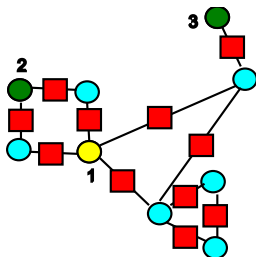


- Data jsou přenesena přes D,C a A,B
- Kapacita linek A,B,C,D musí být v daném čase postačující
- Celková doba přenosu do 1:
 $\max(\text{latenceA} + \text{latenceB}, \text{latenceD} + \text{latenceC})$

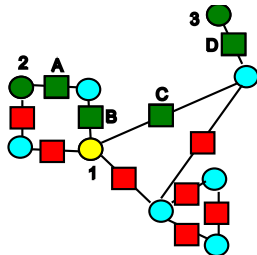


Plánování úlohy na počítačové síti: příklad

- Úloha naplánována k provádění na uzlu 1
- Data na uzlech 2 a 3



- Data jsou přenesena přes D,C a A,B
- Kapacita linek A,B,C,D musí být v daném čase postačující
- Celková doba přenosu do 1: $\max(\text{latenceA} + \text{latenceB}, \text{latenceD} + \text{latenceC})$



Otázky:

- Je možné takovouto úlohu naplánovat za probíhajícího provozu na síti?
- Je možné ji naplánovat při modifikaci cest pro přenosy?
- Obecně: jak naplánovat úlohu(y) za daného provozu na síť?

směrování

Příklady aplikací plánování přenosů

Plánování datových přenosů a výpočtů pro speciální zařízení a přístroje

- umožňuje plánovat přenosy dopředu na danou dobu, kdy budou linky dostupné (bulk přenosy dat)
- např. RHIC (relativistic heavy ion collider, USA)
a zpracování dat pro HENP (High Energy and Nuclear Physics)

Plánování přenosů videa v rámci kolaborativního prostředí

- kapacita přenášených dat srovnatelná s kapacitou linek
- nutná reakce na okamžitý stav počítačové sítě a naplánování na síť za daných aktuálních podmínek
- např. medicínské aplikace, snímání sportovních zápasů, výuka pomocí videa (vzdálená výuka, přístup např. k operačním sálům na medicíně, záznam a zpracování přednášek)
- systém CoUniverse vyvíjený na FI MU
 - <https://www.sitola.cz/CoUniverse>

Umělecká představení na dálku



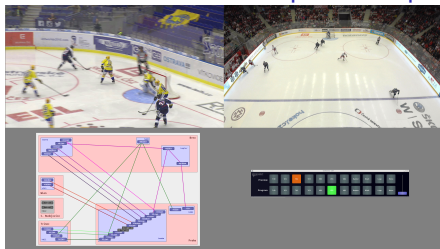
přesná synchronizace a vysoká kvalita

Výuka neslyšících



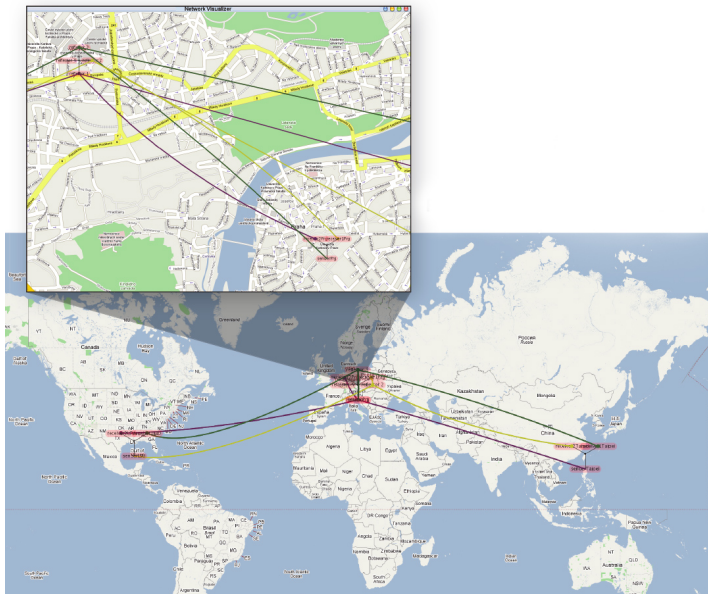
vysoká kvalita vícebodové komunikace

Distribuovaná mediální produkce pro živé vysílání



omezené možnosti komprese

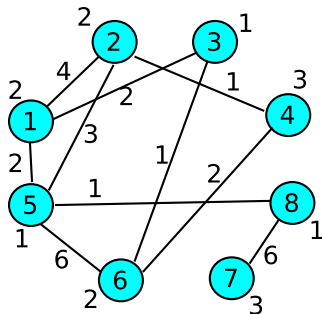
Naplánované spojení pomocí CoUniverse



Paralelně komunikující úlohy

Paralelní aplikace

- n komunikujících úloh
- m procesorů
- několik úloh prováděno **zároveň** na každém procesoru
- tj. opět plánování pro daný časový okamžik
- kromě přenosů explicitně uvažována zátěž na uzlech



Grafová reprezentace

- **hranově a vrcholově ohodnocený neorientovaný graf**
- ohodnocené vrcholy: úlohy s danou výpočetní náročností
- ohodnocené hrany: **průběžně** komunikující úlohy s komunikační náročností

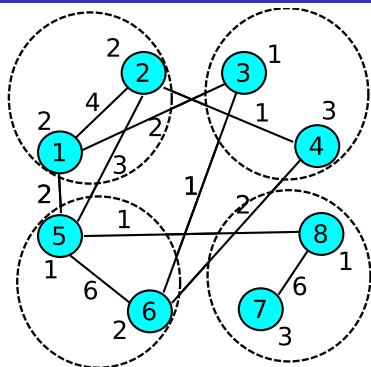
Paralelně komunikující úlohy

Paralelní aplikace

- n komunikujících úloh
- m procesorů
- několik úloh prováděno **zároveň** na každém procesoru
- tj. opět plánování pro daný časový okamžik
- kromě přenosů explicitně uvažována zátěž na uzlech

Grafová reprezentace

- **hranově a vrcholově ohodnocený neorientovaný graf**
- ohodnocené vrcholy: úlohy s danou výpočetní náročností
- ohodnocené hrany: **průběžně** komunikující úlohy s komunikační náročností



Vyvažování zátěže (*load balancing*):

přirazení úloh na procesory tak, aby

- byla vyvážená zátěž jednotlivých procesorů
- byla minimalizována komunikace úloh na různých procesorech

Formulace problému vyvažování zátěže jako
problému rozdělení grafu (*graph partitioning*)

Rozdělení grafu $G = (V, E)$ na $V = V_1 \cup \dots \cup V_m$ tak, že je

- $V_1 \cap \dots \cap V_m = \emptyset$
- $G_1 = (V_1, E_1), \dots, G_m = (V_m, E_m)$
- E_i tvořeno hranami, jejichž oba vrcholy patří do V_i
- součet ohodnocení vrcholů v jednotlivých V_i „zhruba stejný“
- součet ohodnocení hran $E \setminus \{E_1 \cup \dots \cup E_m\}$ spojujících různé V_j a V_k minimalizován

Speciální případ: $V = V_1 \cup V_2$ bisekce grafu (graph bisection), tj. z grafu $G = (V, E)$ vytvoříme dva podgrafy (V_1, E_1) (V_2, E_2) tak, že

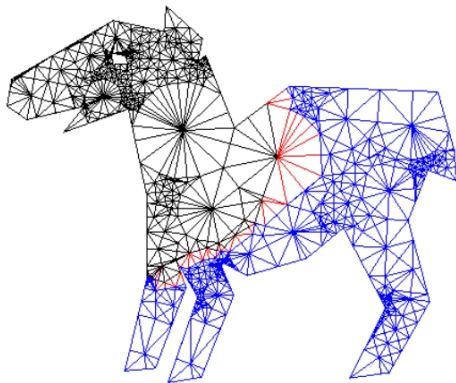
- $V = V_1 \cup V_2, V_1 \cap V_2 = \emptyset$
- E_i tvořeno hranami, jejichž oba vrcholy patří do V_i , tj.
 $E_1, E_2 \subset E, E_1 \cap E_2 = \emptyset, E_i$
- součet ohodnocení vrcholů ve V_1 a V_2 je „zhruba stejný“
- součet ohodnocení hran $E \setminus \{E_1 \cup E_2\}$ spojující vrcholy z V_1 a V_2 je minimalizován

Jak nalézt vhodné rozdělení grafu?

- problém optimálního rozdělení je NP-úplný
 - už pro bisekci: prohledání všech podmnožin množiny vrcholů (podmnožina a její doplněk tvoří V_1 a V_2)
- nutné použít dobré heuristiky

Heuristika: opakovaná bisekce grafu

Základní používaný princip při rozdělení grafu:
rozdělení množiny vrcholů V na 2^k částí:
rekurzivní bisekce grafu k -krát

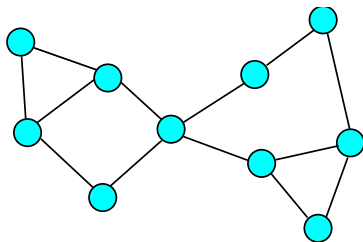
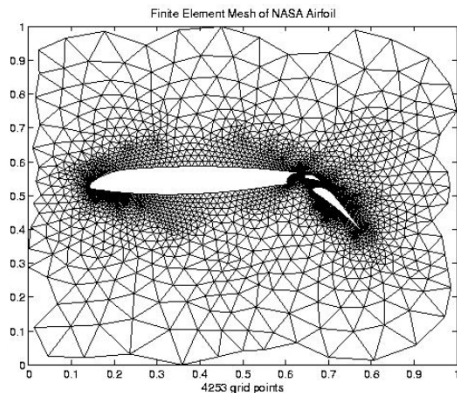


58 dělicích hran

Rozdělení se souřadnicemi vrcholů (partitioning with nodal coordinates)

Myšlenka rozdělení pomocí souřadnic vrcholů

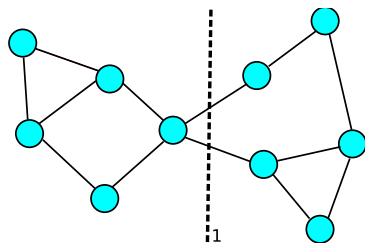
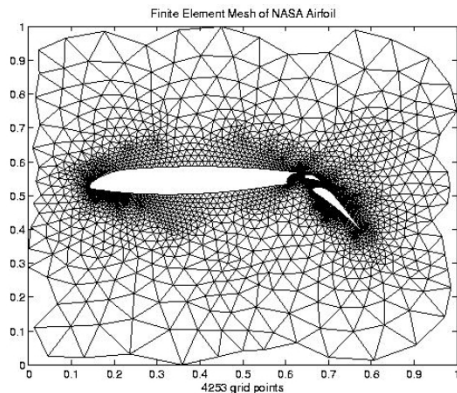
- každý vrchol má souřadnice v prostoru → **rozdělení prostoru**
- pomocí dělicí přímky, která dělí vrcholy v prostoru na poloviny



Rozdělení se souřadnicemi vrcholů (partitioning with nodal coordinates)

Myšlenka rozdělení pomocí souřadnic vrcholů

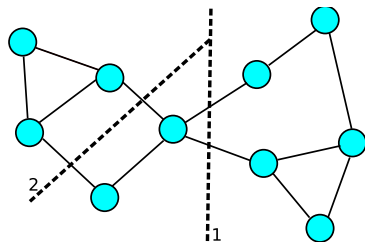
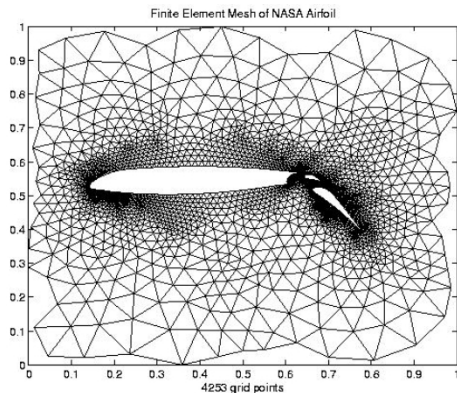
- každý vrchol má souřadnice v prostoru → **rozdělení prostoru**
- pomocí dělicí přímky, která dělí vrcholy v prostoru na poloviny



Rozdělení se souřadnicemi vrcholů (partitioning with nodal coordinates)

Myšlenka rozdělení pomocí souřadnic vrcholů

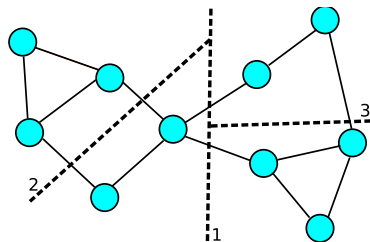
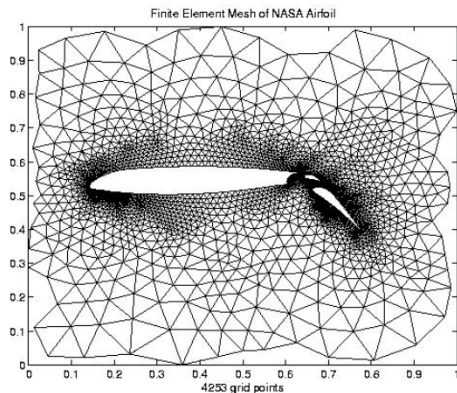
- každý vrchol má souřadnice v prostoru → **rozdělení prostoru**
- pomocí dělicí přímky, která dělí vrcholy v prostoru na poloviny



Rozdělení se souřadnicemi vrcholů (partitioning with nodal coordinates)

Myšlenka rozdělení pomocí souřadnic vrcholů

- každý vrchol má souřadnice v prostoru → **rozdělení prostoru**
- pomocí dělicí přímky, která dělí vrcholy v prostoru na poloviny



Problém:

- plánování datových přenosů, kde se velikost přenášených dat blíží kapacitám používaných linek

Varianty:

- plánování přenosů v čase
 - je třeba uvažovat plánování zdrojů v čase
- plánování současně probíhajících přenosů
 - není uvažován čas, vše se plánuje pro aktuální okamžik
 - není tedy ani uvažováno plánování úloh v čase na uzly
 - pro tento případ uvedeme základní model

Grafová reprezentace: uzel

Na uzlu $v \in V$ se mohou nacházet různé aplikace

- producent $p \in P$ produkuje data
- konzument $c \in C$ přijímá data
- distributor $d \in D$ je schopen rozesílat přijímaná data do několika linek distributor jako náročná aplikace nejvýše jeden na uzlu distributor = application-level multicast (ALM) agent možné varianty distributora:
 - 1 distributor může data transformovat (transkódovat) přenášená data
 - např. z nekomprimovaného HDTV videa na HDV MPEG2 video
 - 2 data jsou stejného typu, tj. distributor je reflektorem (uvažováno dále)

Uzel má několik rozhraní (interfaces), po kterých posílá a přijímá data

- množina všech rozhraní I
- kapacita rozhraní $capacity_I(i)$ pro $i \in I$
- linky připojené k rozhraní $links(i)$ pro $i \in I$

Grafová reprezentace (dokončení)

Linka $l \in L$ má určen

- počáteční uzel $begin(l)$
- koncový uzel $end(l)$
- latenci $latency(l)$
- kapacitu $capacity(l)$

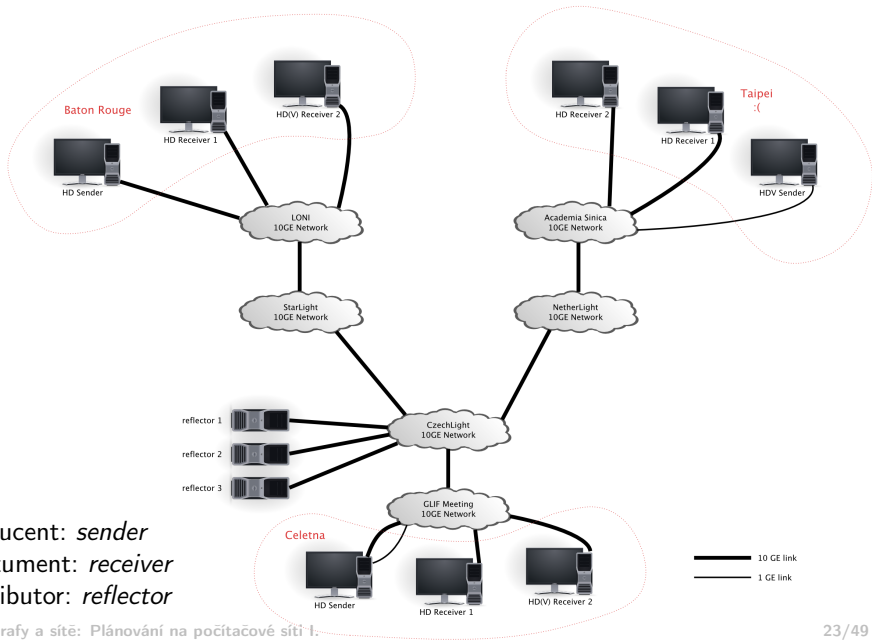
Linky reprezentují logickou strukturu sítě

- reálná struktura sítě často neznámá
- zahlcení linky detekováno monitorováním stavu sítě
- v případě nutnosti možné přepřánování
 - nutné realizovat v reálném čase
tj. vyžaduje rychlou odezvu

Orientovaný graf (V, L)

- vrcholy: množina uzlů $v \in V$
- hrany: množina orientovaných linek $l \in L$
- tento graf reprezentuje základní strukturu, se kterou pracujeme

Ukázka sítě při plánování datových přenosů



Stream $s \in S$ je datový tok od producenta ke konzumentům

- $bandwidth(s)$ udává požadovanou **šířku pásma** datového toku streamu
- příjem dat streamu s je požadován množinou zadaných konzumentů $consumers(s) \subseteq C$
- data streamu s vysílá právě jeden producent $p = producer(s) \in P$
 - *obecně* může existovat více producentů a cílem plánování je pak vybrat producenty zajišťující maximální kvalitu danou typem přenášených dat
 - např. nekomprimované HDTV video, HDV MPEG2 video, HDV MPEG4 video
 - pro *zjednodušení* můžeme předpokládat, že každý stream má předem jednoznačně určeného producenta
 - vhodného producenta lze vypočítat předem

Předpokládáme tedy: **pro každý stream přesně určen jeden producent**

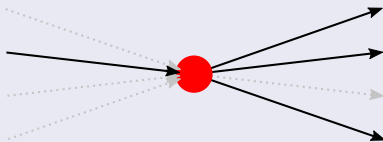
Problém plánování několika streamu

- naplánovat všechny streamy z S na dostupné linky tak, aby byla optimalizována zadaná kritéria, např.
 - minimalizace celkové latence
 - při uvažování kvality spojení: maximalizace kvality přenášených dat
- všechny přenosy probíhají zároveň

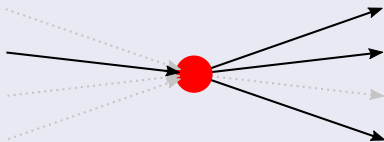
Konstrukce distribučního stromu pro každého producenta/stream s

- distribuční strom jako podgraf grafu (V, L)
- kořen stromu: uzel s producentem $producer(s)$
- listy stromu: uzly s konzumenty $consumers(s)$
- vnitřní uzly stromu: uzly s distributory

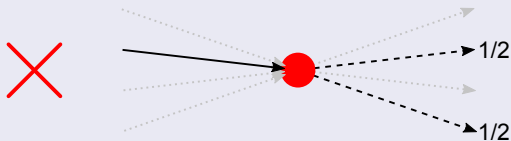
Distributor vytváří kopie dat



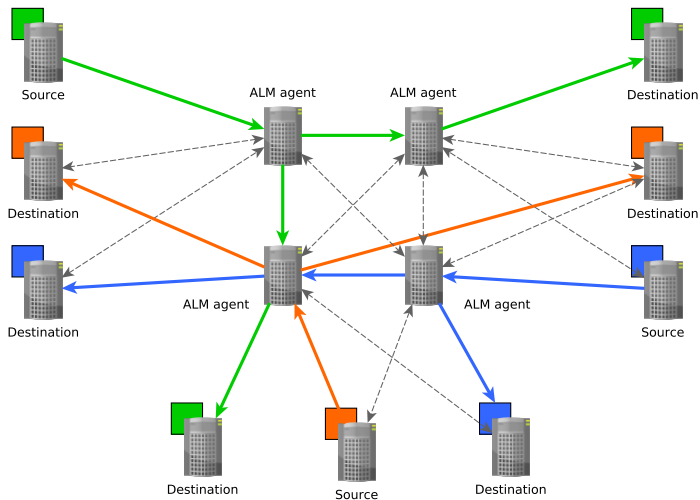
Distributor vytváří kopie dat



Všechny pakety jdou k jednomu konzumentovi po jedné cestě



Ukázka distribučních stromů



Modely

- model založený na linkách
- model založený na cestách
- model založený na uzlech

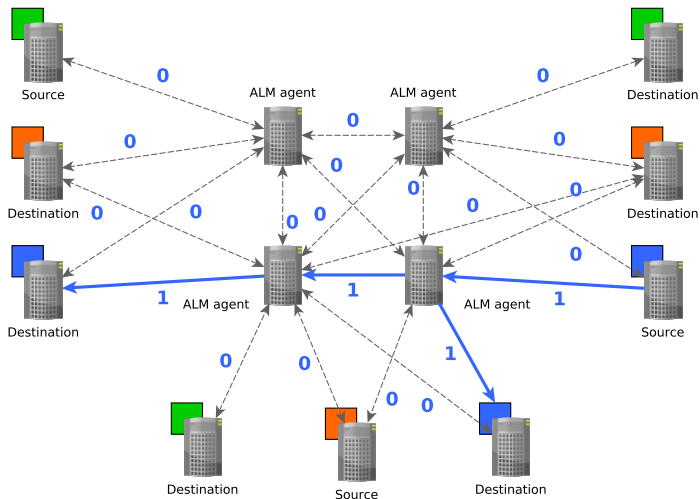
Model založený na linkách (*link-based model*)

- pro každý požadavek (stream) s : proměnná pro každý link l
- **Proměnná** $x_{s,l}$ pro každý stream s a každou linku l

$$x_{s,l} = \begin{cases} 1 & \text{jestliže } s \text{ prochází po } l \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$$

- **Cíl:** nalézt hodnoty proměnných $x_{s,l}$ optimální vzhledem k zadanému optimalizačnímu kritériu
- pro tento model si ukážeme vyjádření typických požadavků problému

Ukázka distribučního stromu pro jeden stream



0/1 ukazují hodnoty $x_{s,l}$ proměnných pro vybraný stream s a všechny linky l

Model založený na cestách (*path-based model*)

- pro každý požadavek s : proměnná pro každou možnou cestu p mezi zdrojem (producent) a cílem (konzument)

$$x_{s,p} = \begin{cases} 1 & \text{jestliže jde požadavek } s \text{ po cestě } p \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$$

- náročné pokud je hodně možných cest

Model založený na uzlech (*node-based model*)

- pro každý požadavek s : proměnná pro každý uzel v

$$x_{s,v} = \begin{cases} 1 & \text{jestliže je uzel } v \text{ použit pro požadavek } s \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$$

Konzistentní plánování

- kapacita linek a rozhraní
- posílání a přijímání dat
- vlastnosti konzumenta a producenta
- vlastnosti distributora
- eliminace cyklů

Optimální plánování

- optimalizační kritéria

Celková latence musí být minimalizována

$$\text{minimize } \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} \text{latency}(l) \cdot x_{s,l}$$

Další kritéria:

- **maximalizace kvality přenosu**
 - při zajišťování linek s maximální kapacitou pro přenášená data
- **balancování latencí všech linek**
 - při video-konferencích k zajištění bezproblémového přerušení a vstupu do probíhající video-konference

Kapacita linky

- Požadovaná šířka pásma pro všechny streamy nesmí překročit kapacitu žádného linku

$$\forall l \in L \quad \sum_{s \in S} \text{bandwidth}(s) \cdot x_{s,l} \leq \text{capacity}(l)$$

Kapacita linky

- Požadovaná šířka pásma pro všechny streamy nesmí překročit kapacitu žádného linku

$$\forall l \in L \quad \sum_{s \in S} \text{bandwidth}(s) \cdot x_{s,l} \leq \text{capacity}(l)$$

Kapacita rozhraní

- Streamy přenášené jedním rozhraním nesmí překročit jeho kapacitu

$$\forall i \in I \quad \sum_{s \in S} \sum_{l \in \text{links}(i)} \text{bandwidth}(s) \cdot x_{s,l} \leq \text{capacity}_l(i)$$

Kdo může posílat data?

- Pokud není na počátečním uzlu linky l
ani producent streamu s ani distributor \Rightarrow

$$x_{s,l} = 0$$

Kdo může posílat data?

- Pokud není na počátečním uzlu linky l
ani producent streamu s ani distributor \Rightarrow

$$x_{s,l} = 0$$

Kdo může přijímat data?

- Pokud není na koncovém uzlu linky l
ani konzument streamu s ani distributor \Rightarrow

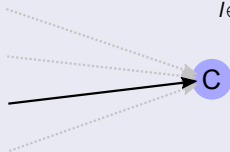
$$x_{s,l} = 0$$

Vlastnosti konzumenta a producenta

Konzument c přijímá data právě jednou linkou

$$\forall s \in S \forall c \in \text{consumers}(s)$$

$$\sum_{l \in L \wedge c \in \text{end}(l)} x_{s,l} = 1$$

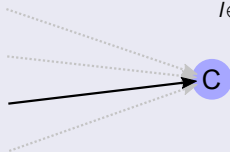


Vlastnosti konzumenta a producenta

Konzument c přijímá data právě jednou linkou

$$\forall s \in S \forall c \in \text{consumers}(s)$$

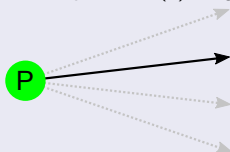
$$\sum_{l \in L \wedge c \in \text{end}(l)} x_{s,l} = 1$$



Producent posílá data právě jednou linkou

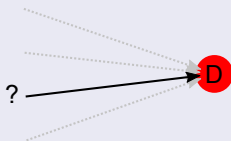
$$\forall s \in S$$

$$\sum_{l \in L \wedge \text{producer}(s) \in \text{begin}(l)} x_{s,l} = 1$$



Distributor přijímá data nejvýše jednou

$$\forall d \in D \quad \sum_{s \in S} \sum_{l \in \text{inlinks}(d)} x_{s,l} \leq 1$$

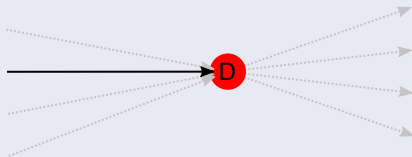


- $\text{inlinks}(d)$ linky, které vstupují do uzlu distributora
- $\text{outlinks}(d)$ linky, které vystupují z uzlu distributora

Distributor přeposílá příchozí stream

- **aktivní distributor** pro stream s

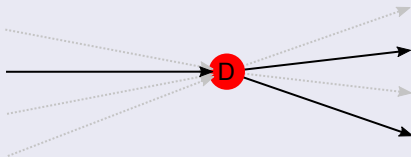
$$\forall d \in D \quad \sum_{l \in \text{inlinks}(d)} x_{s,l} \leq \sum_{l \in \text{outlinks}(d)} x_{s,l}$$



Distributor přeposílá příchozí stream

- **aktivní distributor** pro stream s

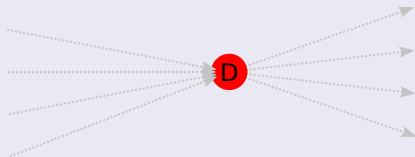
$$\forall d \in D \quad \sum_{l \in \text{inlinks}(d)} x_{s,l} \leq \sum_{l \in \text{outlinks}(d)} x_{s,l}$$

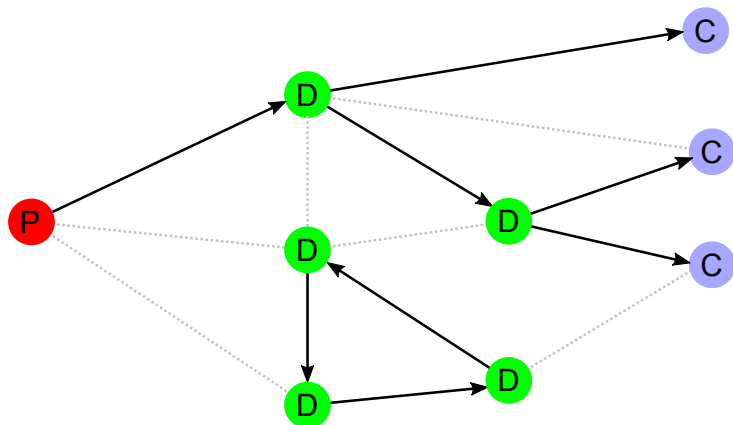


Na distributorovi nevznikají žádná data

- **neaktivní distributor** pro stream s

$$\forall d \in D \quad \sum_{l \in \text{inlinks}(d)} x_{s,l} = 0 \Leftrightarrow \sum_{l \in \text{outlinks}(d)} x_{s,l} = 0$$

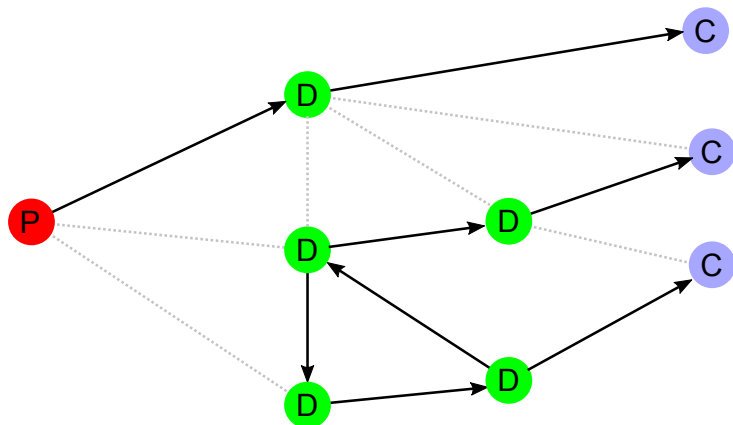




- Všechny cykly mezi distributory je nutné zakázat

Příklad řešení:

- Nejvýše $k - 1$ používaných linek mezi každou k -ticí uzlů pro každý stream
 - ve stromu s k uzly je $k - 1$ hran, přidáním další hrany vznikne cyklus



- Všechny cykly mezi distributory je nutné zakázat

Příklad řešení:

- Nejvýše $k - 1$ používaných linek mezi každou k -ticí uzlů pro každý stream
 - ve stromu s k uzly je $k - 1$ hran, přidáním další hrany vznikne cyklus

- Uvedený model popisuje základní množinu požadavků pro řešení problémů plánování datových přenosů
- Při řešení konkrétního problému nutné přidat specifická omezení a také redundantní omezení pro úspěšné/efektivní řešení problému
- Daný model (a jeho rozšíření na konkrétní aplikaci) lze řešit pomocí
 - **grafových algoritmů** (toky v síti, hledání cest v grafu)
 - **programování s omezujícími podmínkami**
 - např. CoUniverse využívá pro plánování Java řešič Choco pro omezující podmínky
 - **celočíselné programování**
 - optimální plánovač pro CoUniverse
 - zahrnuta částečná znalost topologie sítě + komprese dat
 - **meta-heuristiky** (lokální prohledávání)
 - např. ant colony optimization – prohledávání pomocí kolonie mravenců
 - zahrnutí částečné znalosti topologie sítě, komprese dat
a dále i nepřesné znalosti topologie sítě a přeplánování při změně

Datové přenosy: příklad

Pro zadanou počítačovou síť uveďte seznam proměnných. Navrhněte, jak by mohl být datový přednos realizován a uveďte odpovídající hodnoty proměnných reprezentující řešení optimalizující celkovou latenci. Jaká je celková latence?

Ohodnocení linku l

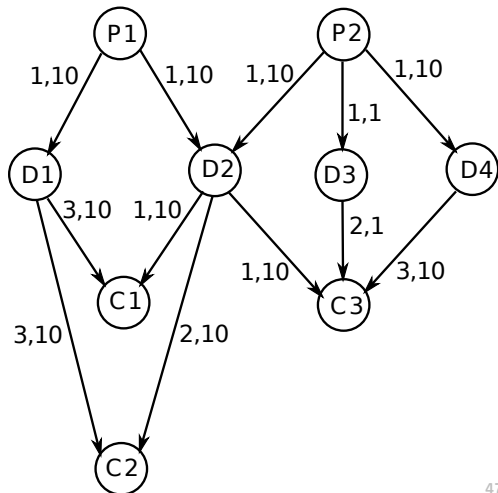
- $latency(l), capacity(l)$

Stream s_1

- $bandwidth(s_1) = 5$
- $producer(s_1) = P_1$
- $consumers(s_1) = \{C_1, C_2\}$

Stream s_2

- $bandwidth(s_2) = 5$
- $producer(s_2) = P_2$
- $consumers(s_2) = \{C_3\}$



Datové přednosy: výsledný graf

Proměnné:

• pro stream s_1 : $x_{s_1,1}, \dots, x_{s_1,12}$

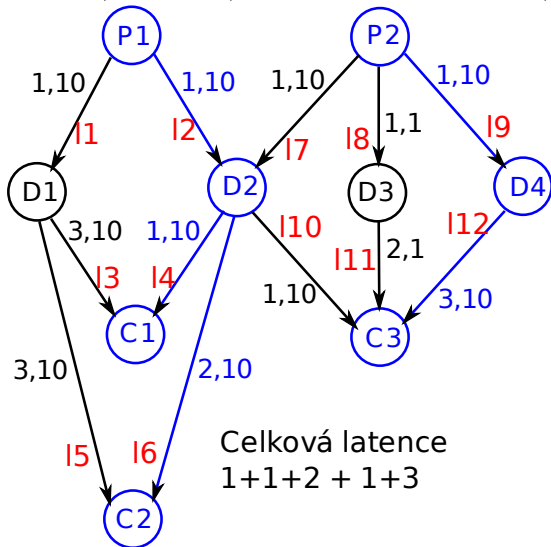
pro stream s_2 : $x_{s_2,1}, \dots, x_{s_2,12}$

$$x_{s_1,2} = 1$$

$$x_{s_1,4} = 1$$

$$x_{s_1,6} = 1$$

pro ostatní linky
a stream s_1 ... 0



$$x_{s_2,9} = 1$$

$$x_{s_2,12} = 1$$

pro ostatní linky
a stream s_2 ... 0

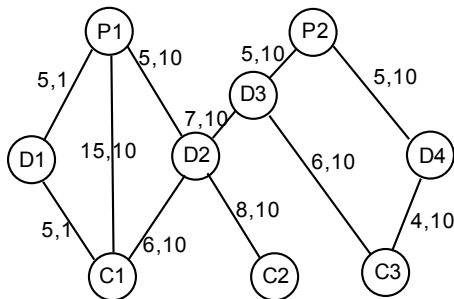
Celková latence
 $1+1+2+1+3$

Datové přenosy: cvičení

Pro graf počítačové sítě na obrázku uvažujte datové přenosy pro stream s_1 a s_2 , které jsou zadány následujícím způsobem

- stream s_1 : $\text{bandwith}(s_1)=10$, $\text{producer}(s_1)=P1$, $\text{consumer}(s_1)=\{C1\}$;
- stream s_2 : $\text{bandwith}(s_2)=10$, $\text{producer}(s_2)=P2$, $\text{consumer}(s_2)=\{C2,C3\}$.

Ohodnocení hran grafu přitom udává jejich latenci a kapacitu.



Uveďte, jaké proměnné jsou nutné při řešení tohoto *problému datových přenosů* a navrhnete jejich vhodné hodnoty tak, aby odpovídající řešení minimalizovalo celkovou latenci. Jaká je pak celková latence?