

Dopravně závislé řízení silničního provozu ve městech

I. Nagy, J. Homolová, P. Pecherková

1. května 2007

Abstrakt:

Článek se zabývá problematikou automatického zpětnovazebního řízení dopravy ve městech. Základní jednotkou pro řízení je dopravní mikrooblast, tvořená několika světelně řízenými křižovatkami a opatřená měřením charakteristik dopravního proudu pomocí detektorů. Tato mikrooblast je popsána pomocí stavového modelu, kde stav je tvořen délkami kolon v ramenech křižovatek a vstupními obsazenostmi. Model je odhadován pomocí Kalmanova filtru a použit pro řízení. Optimalizace se provádí metodou lineárního programování a jejím výsledkem je nastavení světelných znaků světelných signalizačních zařízení, přičemž kritérium řízení zaručuje minimum váženého součtu délek kolon v mikrooblasti. Hierarchicky výše stojí nadřazené řízení, které koordinuje činnost jednotlivých mikrooblastí ve větší dopravní oblasti.

Klíčová slova:

Řízení dopravy, světelná signalizace, dopravní detektory, dopravní model, odhadování, zpětnovazební řízení.

1 Úvod

Problémy s dopravou ve městech jsou známy. Intenzita dopravy nabývá hodnot saturevaných toků v městské síti, což způsobuje tvorbu kolon. V důsledku toho se prodlužuje cestovní doba řidičů (doba zdržení) i doba pře-

pravy pomocí městské hromadné dopravy (MHD). Je několik možností, jak řešit daný problém.

První z nich je zvýhodnění MHD před individuální automobilovou dopravou (IAD). Takováto zvýhodnění se nazývají preference MHD. Patří sem např. preference tramvají na řízených křižovatkách, kdy se po průjezdu vozidla detekčním prvkem vyšle infrasignál pro přednost a řadič křižovatky tramvaj upřednostní v nejbližším možném časovém okamžiku. Dále je to preference vyjádřená dopravním značením, případně změnou dopravního režimu (např. vyhrazené jízdní pruhy pro autobusy MHD) a preference využívající stavebních úprav včetně úprav zastávek (např. oddělovací tvarovky tramvajových tratí, „videňské“ zastávky, apod.). To však situaci s narůstáním kolon IAD neřeší. Právě naopak, preference MHD kolony ještě prodlužuje.

Druhou možností, jak řešit daný problém, jsou stavební úpravy. Máme na mysli rozšiřování komunikací, výstavbu mimoúrovňových křižovatek a městských obchvatů odvádějících přebytečnou dopravní zátěž mimo centrální část města. Toto je sice účinné řešení, ale velmi drahé a mnohde nepoužitelné. Ve velkých historických městech, kterých je u nás mnoho, jsou komunikace vedeny v ulicích, které vznikaly před dlouhou dobou a nebyly koncipovány na takové zatížení a objem dopravy. Avšak historická zástavba je natolik cenná, že většinou není přípustné ji měnit ve prospěch rozšíření a vylepšení místních komunikací pro IAD.

Třetí možností je on-line optimalizace řízení dopravního provozu. V tomto případě máme na mysli řízení pomocí světelných znaků u světelných signalizačních zařízení (SSZ) křižovatek městských komunikací. Aby toto řízení bylo účinné, je třeba, aby bylo stanoveno v závislosti na okamžité dopravní situaci v strategických místech dopravní oblasti, tzn. na všech ramenech řízených křižovatek. Cílem takového řízení je minimalizovat tzv. dobu zdržení řidiče při cestě řízenou dopravní oblastí.

Je zřejmé, že tak palčivý problém jako řízení dopravy ve městech je úlohou, kterou se nezabýváme pouze u nás. Pokouší se ji více či méně úspěšně vyřešit celá řada pracovišť prakticky ve všech vyspělých zemích světa. Ale realita v řízení dopravy je zatím všude dosti podobná jako u nás. Řízení dopravy je většinou statické, založené na pevných signálních plánech s pevným nastavením signálu „volno“ (dále jen „zelená“) či signálu „stůj“ (dále jen „červená“) na SSZ. Někdy může být použito několik signálních plánů, které se střídají podle pevného časového plánu. Toto uspořádání zhruba vyhovuje potřebám jednotlivých denních období, avšak počítá se jen s typickými situacemi. Kromě tohoto globálního způsobu řízení se také používá určitá

“lokální inteligence” křižovatek v jejich dynamickém (zpětnovazebním) řízení. To spočívá většinou v tom, že pokud je v jízdním pruhu ve směru do křižovatky detekován provoz (přítomnost vozidel), dojde k prodloužení zeleného signálu o pevně daný inkrement. Prodlužování se provádí až do dosažení maximální délky zelené podle výchozího signálního plánu. Pokud však v daném časovém rozmezí není v jízdním pruhu detekováno jediné vozidlo, zelený signál je pro danou signální skupinu (tj. jízdní pruhy) ukončen ve prospěch následujících.

Řízení dopravy ve městech, odvozené od aktuálně měřených dat, je značně složité. Důvodem k tomu jsou saturace (kdy intenzita dopravy je vyšší než kapacita dopravní sítě), ke kterým v městech dochází v ranních a odpoledních špičkách velmi často. Zůstává tedy jen minimální volný manévrovací prostor pro řídicí zásahy, tedy ani optimálním řízením nelze takovou dopravní situaci radikálně zlepšit. Proto se většina odborníků ve světě zaměřuje na jednodušší problém, kterým je řízení provozu na dálnicích, zejména pak na dálničních přípojkách. Tady jsou jízdní pruhy dostatečně dlouhé na to, aby se mohlo úspěšně předpokládat, že k jejich úplnému zaplnění nikdy nedojde. Měření je pak vždy možno provádět v místech, kam kolona ještě nedosáhla a vždy zůstává volný prostor pro řídicí zásahy.

2 Formulace úlohy

Jako sledovaný a řízený systém uvažujeme dopravní mikrooblast, tj. logicky vymezenou část městské dopravní sítě s několika světelně řízenými křižovatkami a s měřením dat na indukčních detektorech. Cílem prezentované úlohy na lokální úrovni je vhodným nastavením světelných znaků dosáhnout minima váženého součtu délek kolon v této mikrooblasti. Nadřazená úroveň řízení pak bere v úvahu i sousední mikrooblasti a koordinuje jejich činnost tak, aby nedocházelo k jejich negativnímu vzájemnému ovlivňování. To zajišťuje tak, že udržuje rovnoměrnost dopravní zátěže mezi jednotlivými mikrooblastmi.

Komentář k formulaci úlohy:

1. Optimální nastavení světelné signalizace bude v čase proměnné a bude reagovat na okamžitý stav dopravy. Informaci o tomto stavu bude získávána z průběžně měřených dat.

2. Kritérium minimálních kolon je zvoleno jako kompromis mezi dopravními a technicko výpočetními požadavky. Nejlepším dopravním kritériem, používaným pro posouzení kvality městské dopravy, je doba jízdy mezi pevně definovanými body. To je ale veličina, kterou nelze přímo měřit ani počítat. Vezmeme-li v úvahu, že podstatnou část zdržení při jízdě ve městě představuje popojíždění v kolonách, lze předpokládat, že doba jízdy je v podstatě určena délkou kolon.

3. Volba lineárního kritéria pro dopravní řízení v mikroregionu umožňuje použití jednoduché a stabilní metody řízení. Nevýhodou je, že může docházet ke kompenzaci požadavků na jednotlivá ramena křižovatek. Z tohoto důvodu bylo kritérium zvoleno jako vážený součet délek kolon, kde váhy mohou být dopravně závislé. Zároveň vnucené nastavení vah dopravním operátorem je prostředkem k prosazení jeho speciálních záměrů nebo může být využito při reakci na některé výjimečné stavy v dopravě (preferenze, havárie apod.).

2.1 Měření dat

Naše formulace řízení jako řízení zpětnovazebního se opírá o on-line měřená reálná data. Těmito daty jsou pro nás základní charakteristiky dopravního proudu měřené na detektorech umístěných na vybraných místech pod povrchem jízdnic pruhů, a to ve většině ramen řízených křižovatek. Detektor je indukční smyčka. Indukčnost této smyčky se mění s pohybem jádra, které představuje projíždějící vozidlo. Prakticky lze říci, že detektor produkuje signál, který má hodnotu nula, jestliže je detektor volný, a má hodnotu jedna, jestliže nad detektorem projíždí vozidlo. Signál měřený na detektoru v průběhu určité časové periody je posloupnost různě širokých pulzů - každý pulz indikuje jedno projíždějící auto, šířka tohoto pulzu vypovídá o okamžité rychlosti projíždějícího vozidla a jeho typu. Počet pulzů ve sledované periodě je roven počtu projetých vozidel a tento počet vztážený na délku periody dává **intenzitu dopravního proudu** [vozidel/čas]. Celková délka impulzů, tj. součet šířek jednotlivých impulzů ve sledované periodě, dělená délkou této periody určuje **obsazenost** [%], která je svým významem velmi blízká hustotě dopravního proudu.

2.2 Řízení

Další data, která tentokrát neměříme, ale chceme je generovat coby optimální řídicí zásahy, jsou délky zelených signálů. Řízení dopravy na SSZ probíhá v určitém nastaveném **cyklu** [s], během kterého se vystřídají všechny

kombinace signálů, tj. červený, žlutý a zelený, pro všechny signální skupiny, tj. pro celou křižovatku. Celý sled všech signálů pro jednu signální skupinu se nazývá **fáze**. Daný sled nebo-li fáze má tedy celkovou délku shodnou s dobou cyklu, avšak jednotlivé signály jsou ve fázích prostřídány způsobem, který maximalizuje průjezd vozidel s ohledem na bezpečnost. Vzhledem ke stavební úpravě a dopravní situaci je tedy počet fází navržen tak, aby byl minimalizován střet tzv. kolizních proudů, tedy takových, které se při průjezdu křižovatkou křížují. Nejjednodušším signálním plánem je ten, kdy se v cyklu střídají pouze dvě fáze - pro příčný a kolmý směr. K těmto základním fázím mohou přistupovat další fáze či mezifáze (např. pouze odbočení doleva). **Poměr zelené [%]** pro daný cyklus je definován jako doba zelené v tomto cyklu dělená jeho délkou.

3 Dopravní model

Jestliže chceme ovlivňovat délky kolon v řízených křižovatkách dopravní mikrooblasti, musíme je nejprve „poznat“. Nejjednodušší cesta k poznání je měření. Ačkoliv se již začínají objevovat cesty, jak přímo měřit délky kolon (videodetekce a následná analýza obrazu, sledování polohy vybraných automobilů pomocí GPS, apod.), jsou tyto metody prozatím značně finančně náročné a ne příliš spolehlivé (závislost na počasí, apod.). Proto považujeme délku kolon za veličinu neměřenou a poznáváme ji prostřednictvím modelování. Z tohoto důvodu v základu našich úvah stojí model dopravní mikrooblasti. Abychom dosáhli maximální jednoduchosti, která je zárukou praktické aplikovatelnosti výsledných algoritmů řízení, stavíme model na základě fyzikálních závislostí. První z nich - **model kolony** - říká, že kolona se prodlužuje s příjíždějícími vozidly a zkracuje s těmi, která z ní odjedou na zelenou. Druhá závislost uvažovaná v modelu - **model obsazenosti**, je závislost obsazenosti měřené na strategickém detektoru na délce kolony. Tato závislost vychází ze skutečnosti, že konec kolony není ostře ohraničen a hustota vozidel postupně narůstá od hustoty běžného provozu až po hustotu kolony. Tento hustotní nárůst má přibližně lineární charakter. Kombinací těchto dvou závislostí dostaneme model, který vypovídá o délkách kolon v závislosti na měřených veličinách (vstupní intenzita dopravního proudu, obsazenost, délka zelené na SSZ). Vzhledem k tomu, že **(i)** ne všechny vstupní intenzity jsou měřeny (např. na vnitřních spojovacích komunikacích v mikrooblasti), **(ii)** ne všechny parametry modelu jsou zcela přesné (např. saturovaný tok, což je maximální počet vozidel, který může projet danou komunikací během jedné hodiny zelené) nebo dokonce **(iii)** některé parametry jsou časově proměnné

(např. odbočovací poměry v křižovatkách), je model pod vlivem neurčitosti a hodnoty kolon nelze jednoduše napočítávat a je třeba je předpovídat. Tyto předpovědi potom slouží pro výpočet vlastního řízení.

3.1 Značení

Při zápisu matematického modelu pro popis dopravní mikrooblasti se budeme držet následujícího značení:

t značí diskrétní časový okamžik, ve kterém sledujeme systém a měříme data,

x_t označuje vzorek (měření) veličiny x v čase t ,

apostrof, tedy např. x'_t , označuje transpozici.

3.2 Model kolony

Model kolony v závislosti na příjezdech a odjezdech vyjadřují následující rovnice

$$\xi_{t+1} = \xi_t + I_t - Sz_t, \quad (1)$$

$$\xi_{t+1} = (1 - z_t) I_t, \quad (2)$$

kde

ξ_t je délka kolony v čase t ; a podobně pro čas $t+1$, [počet vozidel/cyklus],

I_t je vstupní intenzita [počet vozidel/cyklus],

S je saturovaný tok [počet vozidel/cyklus]

z_t poměr zelené (podíl doby zelené a cyklu) [%].

První rovnice (1) platí v případě, kdy „kolona je“, tj. v daném rameni nestačí během jednoho cyklu, tj. jedné zelené, projet všechna vozidla, která během této zelené ke křižovatce přijedou. Tato situace může nastat těmito způsoby: (i) v předchozím cyklu je kolona „příliš“ dlouhá a/nebo (ii) příjezdová intenzita je „příliš“ vysoká. Kolona se vytváří v důsledku velkého provozu. V opačném případě říkáme, že „kolona není“ a platí druhá rovnice

(2). Ta vyjadřuje tu skutečnost, že kolona se v tomto případě vytváří pouze v důsledku zavedení SSZ, tedy během červené. Obě rovnice se v modelu přepínají podle aktuálního stavu dopravy.

V modelu se předpokládá, že intenzita I_t je měřena na strategickém detektoru, který měří příjezd vozidel s minimálním zkreslením. Toho je ale dosaženo jen tehdy, jestliže konec kolony tento detektor nikdy nepřekryje. Porušení tohoto předpokladu (buď proto, že kolony jsou dlouhé, nebo proto, že detektor neleží v dostatečné vzdálenosti) může být zdrojem dalších neurčitostí, a to v měření.

Dalším předpokladem je znalost saturovaného toku S . Ten je určen při dopravním návrhem komunikace a považuje se za stálý. Nicméně, jeho hodnota se časem může trochu měnit a v době řízení nemusí jeho teoretické hodnotě odpovídat. Saturovaný tok popisuje ideální průjezd vozidel, který je stanoven za předpokladu „průměrného“ vozidla a „průměrného“ řidiče. Jeho skutečná hodnota může být tedy chybná v závislosti na projíždějích řidičích a vozidlech, a proto je třeba jej znovu určit nebo považovat za neznámý parametr a identifikovat jej.

3.3 Model obsazenosti

Počítání délek kolon z příjezdů a odjezdů je velmi prosté, jsou-li splněny všechny předpoklady na znalost systému. V ostatních případech je třeba hledat další vztahy, směrem od měřených veličin k délkám kolon. Tento vztah existuje ve tvaru

$$O_t = \kappa \xi_t + \lambda, \quad (3)$$

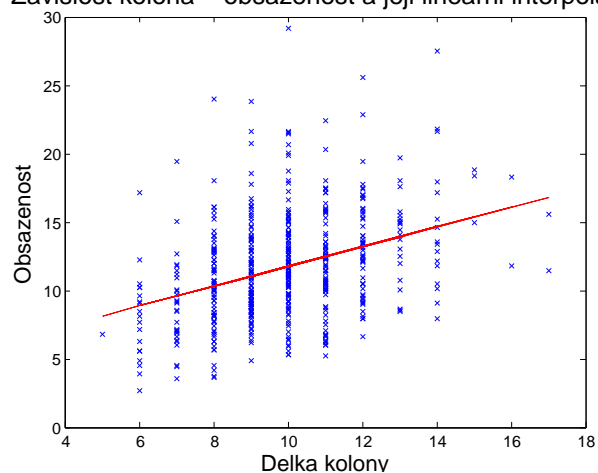
kde

O_t je obsazenost v čase t , [%]

κ, λ jsou parametry modelu (3), které lze přibližně určit podle krajních bodů popisované přímky, spíše se však počítá s jejich průběžnou identifikací.

Praktická ukázka skutečného vztahu kolona-obsazenost a jeho aproximace přímkou je uvedena na obrázku 1.

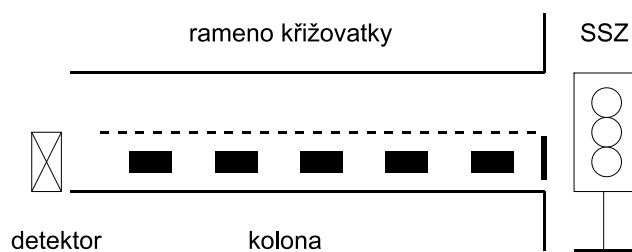
Zavislost kolona – obsazenost a její linearni interpolace



Obrázek 1: Vztah kolona-obsazenost a jeho aproximace

3.4 Model ramene křižovatky

Jestliže zmíněné dva modely (kolony (1) a obsazenosti (3)) spojíme, vytvoříme model ramene křižovatky, které uvažujeme podle obrázku 2.



Obrázek 2: Rameno křižovatky

V rameni se formuje kolona o délce ξ_t . Stavový model napíšeme pro stav $x_t = [\xi_t, O_t]'$, který je sestaven z veličin délka kolony a vstupní obsazenost, modelovaných pomocnými modely (1) a (3). Tvar stavové rovnice modelu je následující:

$$\begin{bmatrix} \xi_{t+1} \\ O_{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \kappa & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_t \\ O_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -S \\ -\kappa S \end{bmatrix} z_t + \begin{bmatrix} I_t \\ \kappa I_t + \lambda \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Výstupní rovnici modelu budeme psát pro výjezd z křižovatky. Pro jednoduchost zápisu budeme uvažovat situaci, kdy vozidla v křižovatce mohou projíždět pouze rovně (jinak bychom výjezd museli počítat jako součet výjezdů ze všech ramen křižovatky, vážený poměry odbočení). Tento výjezd na konci sledované periody η_{t+1} je roven tomu, co projelo na zelenou, tedy

$$\eta_{t+1} = S z_t = -(\xi_{t+1} - \xi_t) + I_t \quad (5)$$

Minulou délku kolony ξ_t nahradíme jejím bodovým odhadem $\hat{\xi}_t$ a výstup $y_{t+1} = [\eta_{t+1}, O_{t+1}]'$ je

$$\begin{bmatrix} \eta_{t+1} \\ O_{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_{t+1} \\ O_{t+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{\xi}_t + I_t \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Komentář k modelu:

1. První rovnice stavového modelu je bilance příjezdů a odjezdů vozidel v koloně podle (1). První rovnice výstupního modelu vyjadřuje výjezd z kolony (5) s dosazeným modelem kolony (1).
2. Druhá rovnice stavového modelu je model obsazenosti (3) do kterého je opět dosazen model kolony (1), který přepočítává délku kolony ξ_{t+1} na její minulou hodnotu ξ_t . Druhá rovnice výstupního modelu je pouhá identita pro obsazenost, která říká, že druhá složka měřeného výstupu je přímo rovna druhé složce stavu.

Uvedený model popisuje situaci, kdy ve sledovaném rameni kolona je. V případě, kdy kolona není, bude v modelu místo rovnice (1) vystupovat rovnice (2). Existenci nebo neexistenci kolony lze na konci zelené lze zjišťovat buď teoretickým odhadem podle bilance vjezdu, stávající kolony a teoretického saturovaného toku nebo měřením, tedy detektorem před stopčárou.

3.5 Model mikrooblasti

Model ramene křižovatky, který jsme uvedli v předchozím odstavci, je stavební jednotkou pro vytváření modelu křižovatky a mikrooblasti. Vstupem může být buď měřená intenzita, jestliže v rameni existuje strategický detektor, nebo vypočtená intenzita, určená všemi toky, které do příslušného ramene vtékají. Tyto toky lze určit z výjezdů odpovídajících sousedních ramen, násobených příslušnými odbočovacími poměry. Tak lze vytvořit odpovídající stavový model mikrooblasti ve tvaru

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + F + w_t, \quad (7)$$

$$y_t = Cx_t + G + v_t, \quad (8)$$

kde

matice A, B, C, F, G jsou obecně časově proměnné, protože obsahují veličiny závislé na čase, a musejí být konstruovány pro každý časový okamžik znova,

šumy w_t a v_t , které zatím neumíme uvažovat jinak než jako normální a které shrnují všechny neurčitosti modelu.

3.6 Komplikace při modelování

Dosud naznačený postup odvození modelu mikrooblasti spoléhá na ideální podmínky - všechno, co je třeba měřit, je správně měřeno a všechno, co je třeba znát, je známé a v čase neproměnné. To se týká především měření vstupních intenzit ve všech ramenech mikrooblasti a přesné znalosti parametrů modelu (tj. saturovaných toků, odbočovacích poměrů a parametrů k a λ z regrese vztahu kolona-obsazenost (3)). Očekávat splnění všech těchto předpokladů v reálné mikrooblasti je nerealistické. Jediný způsob, jak tento problém řešit, je tyto parametry průběžně odhadovat. To ale znamená současný odhad stavu i parametrů modelu, což ovšem vede na nelineární úlohu. Takový přechod však znamená velký skok na nejistou půdu.

Podívejme se proto podrobněji alespoň na základní ze zmíněných předpokladů modelu a důvody jejich nereálnosti.

Měření vstupních intenzit: Měřicí detektory, které mám dodávají hodnoty intenzit a obsazeností dopravního proudu, se umísťují zpravidla jen v ramenech řízených křižovatek. Vedlejší silnice detektory obvykle vybaveny

nejsou, a nelze tak získat informaci o tom, kolik vozidel z nich vjíždí nebo vyjíždí do měřených ramen. Tyto toky pak působí jako porucha přičítaná k měřeným údajům. Přitom tyto poruchy mohou být značně velké a proměnné - vezměme například příjezd k parkovišti nějakého velkého obchodního domu.

Detektory: Detektory jsou umístěny buď přímo u stopčáry (výzvové detektory) nebo v kratší vzdálenosti od ní (vzdálené detektory), tj. kolem 30 metrů. Pokud to možnosti dovolí, je možné instalovat detektory ve vzdálenosti 70 a více metrů (strategické detektory). Pro naše použití jsou třeba výhradně detektory strategické. Jenom tyto měří množství vozidel přijíždějících do kolony, a to ještě za předpokladu, že konec kolony na ně nezasahuje - tedy, že opravdu měří příjezd do kolony a nikoli pohyb vozidel v koloně. Předchozí dva typy detektorů jsou téměř vždy ovlivněny pohybem vozidel v koloně.

Znalost parametrů: Hodnoty potřebných parametrů jsou dány v dopravním návrhu mikrooblasti. Tento dopravní návrh je sice velmi důkladný a opírá se o rozsáhlá měření v mikrooblasti, může být ale vzhledem k trvalému vývoji mikrooblasti méně nebo více zastaralý, a tedy nepřesný. Navíc vždy uvádí pouze teoretické nebo průměrné hodnoty těchto parametrů (saturovaný tok nebo poměry odbočení).

Neproměnnost parametrů: Vedle úplné neznalosti nebo nepřesné znalosti parametrů existuje ještě další problém. Některé parametry jsou časově proměnné - konkrétním příkladem jsou odbočovací poměry. Důvod je prostý: ráno jezdí lidé jinam než odpoledne nebo večer. Tato proměnnost odbočovacích poměrů byla skutečně experimentálně ověřena na datech z ulice Žitná v Praze. Pokud by existoval jenom konečný počet variant pro hodnoty těchto proměnných parametrů a jednotlivé varianty by mezi sebou přecházely dostatečně rychle, bylo by možno pamatovat několik sad parametrů a ty mezi sebou přepínat. Pokud jsou změny náhodné, nezbyvá než je průběžně identifikovat.

Normální šumy Výpočetní postupy, které bychom rádi využili pro odhad, se striktně opírají o “normalitu”. Použijeme-li však normální šumy v modelu (viz např. (7)), říkáme, že odchylka v odhadu kolony může být jak kladná, tak i záporná. To je ale pravda jen v případě, kdy kolona je dostatečně dlouhá. Bude-li délka kolony blízká nule, mohou záporné odchylky (realizace normálního šumu) dávat záporné délky kolon. A to je samozřejmě nepřijatelné. Příma (a poněkud hrubá) cesta, jak se zbavit záporných kolon, je zaokrouhlovat vše záporné na nulu. Protože ale používáme dynamický model (závislost x_{t+1} na x_t), je zaokrouhlení vnější zásah, ze kterého je

model “zmaten”. Dostaneme x_{t+1} , které z modelu nemohlo vzejít. Důkladným řešením je proto použití šumů, které zachovávají nezápornost generovaných hodnot. Je to např. rovnoměrné nebo log-normální rozdělení. Odchod od “normality” však v nemalé míře komplikuje teorii odhadování, od které požadujeme prakticky realizovatelné algoritmy.

4 Odhad

Model, který jsme právě zkonstruovali, slouží pro syntézu řízení. Popisuje řízenou veličinu (délky kolon) v závislosti na řídicí veličině (poměr zelené). Dosazením modelu do kritéria řízení (vážený součet délek kolon) vyjádříme kritérium v závislosti na řídicí veličině. Následně kritérium optimalizujeme, tj. hledáme hodnoty řídicí veličiny tak, aby kritérium bylo minimální. Po pravdě řečeno, tímto postupem řídíme tak, aby předpovědi z modelu byly optimální. Jestliže se model shoduje s realitou nebo jí alespoň dostatečně odpovídá, dosáhneme efektu blízkého tomu, jako bychom řídili samotný (reálný) proces popsaný modelem.

Z předchozích úvah je patrné, že pro cíl úlohy řízení je velmi důležitá co nejlepší shoda modelu s realitou. Tu získáme pomocí odhadu hodnot neznámých veličin modelu, přičemž odhadovací proces se provádí na základě porovnání odhadu hodnoty neznámé veličiny a informace získané z měřených dat.

V případě našeho modelu je možno uvažovat neurčitost různého stupně.

1. Jestliže vsadíme na dostatečnou přesnost parametrů modelu a připustíme pouze nepřesnosti v měření a další nepredikovatelné poruchy v modelu, stojíme před úlohou lineárního odhadu stavu x_{t+1} (viz model (7)). Tento předpoklad ale není právě to, o co se lze v praktických aplikacích bez obav opírat. Vede však na časově nenáročném a spolehlivém algoritmu řízení modelu.
2. Jestliže připustíme nepřesnosti v měření, např. způsobené existencí neměřených vjezdů, nepřesnosti nebo neznalosti hodnot některých parametrů, či dokonce jejich proměnlivost v čase, setkáváme se s problémem současného odhadu stavu a parametrů. To je problém nelineárního odhadování, jehož složitost skokově narůstá proti předchozím případům. Zde neexistuje optimální analytické řešení a je třeba se uchýlit

k aproximativním suboptimálním krokům, často s částečným numerickým řešením jednotlivých částečných úloh. Řešení vede většinou na časově velmi náročné výpočty a celková stabilita není automaticky zaručena. Ukazuje se ale, že pro praktickou realizaci dopravního řízení je třeba s tímto typem úlohy počítat.

V následujících odstavcích řekneme něco více k jednotlivým bodům.

4.1 Výpočet kolon z modelu

Pro přímý výpočet kolon v jednotlivých ramenech nám zcela postačí model (1). Je však třeba si uvědomit, že se jedná o model s “integračním” charakterem. Proto chyby, kterých se v průběhu výpočtu dopustíme, neodeznívají, ale naopak se kumulují. Pokud se jedná o chyby zcela nahodilé (s nulovou střední hodnotou a nekorelované s odhadem délek kolon), mohou se kompenzovat. Startovací bod pro kumulativní výpočet délky kolony je noc, kdy jsou kolony nulové. To je počáteční podmínka pro výpočet, kdy se všechny nasčítané chyby anulují a začíná se počítat znovu a přesně.

V tomto „restartu“ při prostém výpočtu délek kolon je určitá naděje pro vylepšení této jednoduché metody odhadu a její přivedení k praktické použitelnosti. Jedná se o to, zda se dají najít takové restartovací (nebo korekční) body i přes den a výpočet korigovat z nějaké další, externě získané informace. Tady se nabízí možnost využít i jiné než strategické detektory, a to ne jako měřiče intenzity, ale jako indikátory konce kolony. Toho je možno dosáhnout sledováním obsazenosti na detektoru. Jestliže tato obsazenost dosáhne určité maximální hodnoty, lze říci, že v tom okamžiku k měřicímu detektoru dosáhl konec kolony a překryl jej. V tom okamžiku známe délku kolony a výpočet lze podle ní kalibrovat.

4.2 Kalmanův filtr

Jestliže nelze délky kolon přesně počítat z důvodu nepřesnosti měření a výskytu poruch, je třeba je odhadovat. V následujícím odstavci bude v hrubých rysech popsána metoda rekurzivního odhadování stavu při použití stavového modelu, která se podle svého autora nazývá **Kalmanův filtr** [3]. Tato metoda má dva hlavní kroky:

1. **Predikce**, při které se ze stavové rovnice modelu (7) předpovídá (tj. vypočítá za podmínky nulového šumu) budoucí hodnotu stavu.

2. **Filtrace**, ve které se předpovězená hodnota z prvního kroku opravuje podle nově naměřených dat. Přesněji řečeno, z odhadu stavu se podle výstupní rovnice (8) určí předpověď výstupu \hat{y}_t . Chyba predikce se pak získá jako rozdíl této předpovědi a skutečně naměřeného výstupu y_t . Oprava stavu je pak úměrná této chybě, a to s koeficientem úměrnosti vypočteným pomocí průběžně odhadované kovariance odhadů stavu.

Kalmanův filtr tedy funguje ve zpětné vazbě a své odhady koriguje v souvislosti s průběžně měřenými daty. Pro jeho dobré korekční vlastnosti je však nutné správné nastavení kovariančních matic normálních šumů stavové a výstupní rovnice w_t a v_t modelu (7), (8). Tyto kovariance je třeba stanovit na základě apriorní informace o dopravní oblasti nebo na základě apriori změřených dat. Další možností je automatická konstrukce kovariančních matic pro tuto filtraci, což je ovšem úloha netriviální a usilovně se na ní pracuje [9].

4.3 Lokální nelineární filtry

V případě, že bereme v úvahu současně nepřesnost měření a neznalost či časovou proměnnost některých parametrů, je potřeba využít nelineárních filtrů. Tyto filtry pracují obecně se stavovým modelem (7), (8) v nelineárním tvaru a kromě stavu současně odhadují i parametry modelu. Pro naše účely se jako nejperspektivnější ukazuje metoda DD1 („Divided Difference Filter of the First Order“)[5]. Tato metoda předpokládá stavový model v nelineárním tvaru s normálním šumem:

$$\begin{aligned}x_{t+1} &= g(x_t, u_t, \theta) + w_t \\y_t &= h(x_t, \theta) + v_t\end{aligned}$$

a linearizuje jej rozvojem funkcí g a h pomocí absolutního a lineárního členu Taylorova rozvoje. Derivace funkcí g a h nahrazuje centrálními diferencemi, čímž se vyhýbá nutnosti tyto funkce analyticky derivovat. S linearizovaným stavovým modelem se dále již analogicky sleduje postup kalmanovské filtrace. Tato metoda je dostatečně jednoduchá, takže poskytuje výsledky v relativně velmi krátkém čase a může tak být dobře použita pro odhad stavu v reálném čase.

Jedním z úskalí této metody je ale problém správného startu odhadovacího algoritmu. Je to nejen otázka správné volby kovariančních matic šumů modelu jako u lineární Kalmanovy filtrace, ale také správného nastavení počátečních hodnot neznámých parametrů (počáteční stav opět volíme nulový).

V případě nesprávného nastavení kovariančních matic tak může dojít ke kompenzaci mezi odhady stavu a odhady neznámých parametrů, případně odhady mohou divergovat a vyvolat nestabilitu celého procesu odhadování. Zde, vedle velmi pečlivé konstrukce počátečních kovariancí šumů, bude nutné rovněž průběžně kontrolovat všechny odhady a provádět jejich korekci podle předem vymezených přípustných intervalů jejich hodnot. Právě omezení parametrů se při již provedených experimentech ukázalo jako velmi účinné. Odhadování takovým pomocným zásahem překoná určitou „informační krizi“ a dále již většinou pokračuje dobře.

4.4 Globální nelineární filtry

Druhým směrem se ve vývoji nelineárního odhadování vydávají globální filtry, nebo-li vzorkovací metody, které jsou většinou založeny na metodách Monte Carlo [8, 1]. Odhadované proměnné jsou popsány jako náhodné veličiny pomocí svých podmíněných hustot pravděpodobností. Tyto hustoty, které vlivem nelinearity modelu nemají reprodukovat se tvar, a nemohou proto být rozumně vyjádřeny analyticky, jsou popisovány pomocí datových shluků. Tyto shluky jsou generovány z hustot právě pomocí metody Monte Carlo. Popsané odhadovací metody jsou robustní a mají potřebnou stabilitu odhadu, nejsou vázány na normalitu šumů a při dostatečném počtu vzorků může být dosaženo potřebné přesnosti bez ohledu na typ aproximace nelineární funkce. Jejich nevýhodou však je, že tak jako všechny postupy opřené o metodu Monte Carlo, jsou velmi pomalé. Nelze je tedy použít pro on-line odhad.

Jako nejnadějnější z existujících nelineárních filtrů se nám jeví metoda nazývaná Particle filters [10], která pracuje na principu více filtrů běžících paralelně vedle sebe. Pro odhad budoucího stavu například současně pracuje 100 Kalmanových filtrů s různým nastavením parametrů. V daném rozhodovacím kroku se dá přednost tomu z nich, který má nejlepší odhad vzhledem k naměřené hodnotě, tj. má nejmenší chybu predikce. Pro další krok se daných 100 Kalmanových filtrů převzorkuje, a to s váhou úměrnou úspěšnosti odhadu.

Uvedená metoda tedy nepracuje ve dvou krocích, ale ve třech: (i) predikce, kdy se vytvoří nová sada vzorků reprezentující novou hustotu pravděpodobnosti, (ii) korekce, kdy dochází k modifikaci vah jednotlivých vzorků (váha určuje, jak je která hodnota pravděpodobná) a nakonec (iii) převzorkování nebo-li „zahození“ vzorků s malou váhou a vytvoření nových v naší oblasti zájmu.

4.5 Předpokládané řešení

Jako možné řešení problematiky nelineárního odhadování se jeví použití vhodné kombinace lokálního a globálního nelineárního filtru. Lokální filtr by běžel v krátké periodě vzorkování dat, tedy v reálném vzorkovacím čase, a produkoval by své (lokální) odhady. Nad ním, v podstatně delší periodě, by běžel globální filtr a jeho výsledky, které by byly k dispozici vždy na konci dlouhé periody, by korigovaly nebo alespoň stabilizovaly výsledky lokálního filtru.

5 Lokální řízení

Dostáváme se s k našemu hlavnímu cíli, kterým je řízení. Jak jsme se již zmínili, nejprve se budeme zajímat o lokální řízení uvnitř jednotlivých mikrooblastí, kde naším cílem bude dosáhnout co nejkratších a po ramenech vyvážených kolon. Potom přistoupíme k řízení mikrooblastí tak, aby dopravní situace byla dobrá i z globálního pohledu.

5.1 Formulace pro lineární programování

Základem pro syntézu optimálního řízení je kritérium optimality a odpovídající model. Konstrukcí modelu a jeho přiblížením k realitě v procesu odhadování jsme se zabývali v předchozích odstavcích. Nyní přistoupíme k volbě vlastního kritéria řízení. Toto kritérium musí (i) mít solidní praktický základ a (ii) vést na rozumně složité počítání, které je řešitelné v potřebném časovém intervalu.

Praktický základ kritéria

Nejčastěji používaným kritériem pro kvalitu dopravy ve městech je tzv. doba jízdy, resp. doba zdržení, řidiče mezi dvěma pevně definovanými body (často se bere doba jízdy z okraje města do centra). Doba zdržení je kromě jiného závislá také na délkách kolon na ramenech, kterými řidič projíždí. Proto budeme kritérium, které chceme minimalizovat, uvažovat ve formě váženého součtu délek kolon v mikrooblasti, tj. ve tvaru

$$J = \sum_{i=1}^{N_{\xi}} \omega_i \xi_i, \quad (9)$$

kde N_ξ je počet kolon v mikrooblasti; ω_i jsou váhy pro jednotlivé kolony a ξ_i jsou délky kolon v mikrooblasti.

Váhy ω_i mohou být nastaveny pevně nebo mohou být i datově závislé. Tyto váhy mají zaručit, že kolony nebudou pouze minimalizovány, ale že budou mít také přibližně stejnou délku, bude-li to možné a žádoucí. Pomocí těchto vah lze preferovat důležité směry v dopravní síti a používat je tak i k řízení některých výjimečných stavů v dopravě. Například pohyb preferovaného vozidla (sanitka, požární vůz, atd.) může být i ve zcela saturovaném prostředí upřednostněn tak, že uměle nastavíme váhu pro příslušný jízdní pruh na značně velkou hodnotu a urychlíme tak pohyb celé kolony v daném jízdním pruhu.

Úloha lineárního programování

Pro úlohu lineárního programování je potřeba stanovit kromě kritéria ještě všechna omezení pro používané veličiny a vymežit tak plochu mnohoúhelníku, na které se nalézá řešení úlohy. Systém omezení pro optimalizaci lineárním programováním je dán jednak modelem (7), (8), jednak dalšími podmínkami jako je nezápornost všech veličin, jejich minimální a maximální hodnoty, apod. Jedním omezením, které plyne čistě z dopravní podstaty řešené úlohy, je omezení signálním plánem. To říká, že celkový součet dob zelených je pro jednu křižovatku konstantní a roven době cyklu zmenšenou o dobu, která je nutná z hlediska bezpečnosti při průjezdu jednotlivých toků křižovatkou (lze si je přibližně představit jako žlutý signál, jejich výpočet je vždy přesně vymezen a váže se k vlastní stavební úpravě křižovatky). Naše úloha je tedy vlastně úloha přerozdělení celkové doby cyklu vymezené pro průjezd vozidel mezi jednotlivé fáze, tj. signální skupiny.

Pro formulaci úlohy lineárního programování definujeme nový stav sestavený z původního stavu a poměru zelené coby optimalizované veličiny:

$$X_t = \left[x'_{t+1}, z'_t \right]', \quad (10)$$

kde znaménko ' značí transpozici.

Z kritéria (9), úpravou modelu (7), (8) a z dalších omezujících podmínek dostaneme úlohu lineárního programování v tomto tvaru

$$J = c'X_t \rightarrow \min, \quad (11)$$

$$QX_t = q, \quad (12)$$

$$X \in (0, r). \quad (13)$$

Jednotlivé, nově zavedené matice (vektory) mají následující význam:

c je vektor korespondující se stavem X a má váhy ω_i tam, kde stav X má délky kolon, tj. v první části stavu x_{t+1} (viz (10)), jinde má nuly.

Q je matice, složená z matic původního modelu (7), (8), tj. $[I, -B]$, kde I je jednotková matice odpovídajícího rozměru. V dalších řádcích je pak vyjádřením podmínky konstantního součtu relativních zelených pro jednotlivé křižovatky.

q je vektor tvořený $A\hat{x}_t - F$, kde \hat{x}_t je bodový odhad původního stavu x_t . Zbývající část, odpovídající počtu křižovatek, je pak doplněna výše zmíněnou celkovou dobou zeleného signálu pro jednotlivé křižovatky.

Výsledkem optimalizace je vektor X_t , který minimalizuje kritérium (11) a splňuje uvedená omezení (12) a (13). Pro nás to znamená, že dostaneme nastavení zelených, které minimalizuje délky kolon a přitom zachovává fyzikální i dopravní smysluplnost.

Jednoduchost výpočtů

Kritérium navržené podle (9) je lineární a spolu s lineárním modelem (7), (8) (s dosazenými bodovými odhady parametrů a neměřených vstupů) tvoří lineární optimalizační problém, pro který lze dobře použít jednoduchou a numericky stabilní metodu lineárního programování. Touto metodou je optimální řešení nalezeno v konečném počtu kroků, jehož počet nepřesáhne počet omezení pro danou úlohu. Jedná se o tzv. simplexovou metodu, kdy na dané ploše simplexu vygenerovaném na základě daných omezení je vyhledáno řešení, tj. bod na hranici simplexu, které minimalizuje stanovené kritérium (9). Profesionální softwarové balíky obsahují funkce pro lineární programování, které pracují v mnohem menším počtu kroků tak, že mnohoúhelník prohledávají efektivněji než vrchol po vrcholu. Tyto metody jsou rovněž odolné proti situacím, kdy je optimum mnohoznačné nebo cykluje (tj. přeskakuje

mezi několika stavy). Samozřejmě, pokud mnohoúhelník omezení má nulovou plochu, řešení neexistuje. To je ale závada v zadání a nikoli v řešení. Tato situace v našem případě může nastat pouze výjimečně, např. při počátečním ladění parametrů v identifikaci. Praktické experimenty ukázaly, že pak zcela postačí ponechat řešení z minulého kroku. Parametry se doladí a zadání je opět v pořádku.

5.2 Řízení na konečném horizontu

Naznačené řízení, kdy v každém časovém kroku proběhne optimalizace, může být ale nebezpečné. To, co je optimální pro přítomnost, nemusí být optimální z hlediska delšího budoucího vývoje. Jednoduše řečeno, statické optimální řízení může být takové, že ve snaze dosáhnout všeho v jenom kroku, připraví pro další vývoj systému tak nepříznivé podmínky, že může dojít až k jeho nestabilitě. Proto je vhodné počítat řízení ne jenom pro jeden, ale rovnou pro několik kroků dopředu. Realizovat je pak možno právě jen první krok ze spočtené posloupnosti řídicích zásahů, opravit nově odhadnuté parametry a pokračovat dále stejným způsobem. Tomuto způsobu optimalizace se říká řízení na ustupujícím horizontu, kdy se konečný horizont pro optimalizaci postupně sune před aktuálním okamžikem.

V našem případě jsme postupovali tou nejjednodušší cestou, tedy s využitím stávajícího modelu. Pro výpočty délek kolon v budoucích okamžicích jsou však potřeba budoucí hodnoty dat (vstupních intenzit dopravních toků). Jejich vývoj jsme popsali pomocí regresního modelu druhého řádu a tímto modelem jsme je na uvažovaném horizontu predikovali. Řízení pro budoucí okamžiky jsme pak počítali s použitím těchto predikcí (bodových odhadů) a stávajícího modelu (resp. s parametry v daném čase aktuálními). Zvolený postup je tedy pouze určitým přiblížením k postupu optimálnímu, ukazuje se ale, že zcela postačujícím. Efekt řízení na horizontu, i když ani nešlo o udržení stability, se prokázal ve výsledných charakteristikách řízených dat.

6 Nadřazené řízení

Lokálního řízení v jednotlivých mikroblastech může vyvolávat akce, kterými si mikroblasti mezi sebou vzájemně „škodí“. Aby se tomuto zabránilo, je třeba nad lokální řídicí systémy postavit globální (koordinační) řídicí systém, který by dohlížel nad jednotlivými mikroblastmi a usměrňoval jejich

činnost tak, aby nebyla proti zájmu celé dopravní oblasti, kterou jednotlivé mikrooblasti tvoří. Za tímto účelem je nejprve třeba vytvořit model oblasti.

6.1 Model pro nadřazené řízení

Jedná se o model, popisující dopravní zátěž určité oblasti tvořené několika mikrooblastmi. Dopravní zátěží je zde myšleno množství vozidel, která jsou v kolonách v jednotlivých mikrooblastech. Cílem nadřazeného řízení je zabránit nerovnoměrnosti počtu vozidel v jednotlivých mikrooblastech, s vytěsněním nadbytečných vozidel za hranice dopravní makrooblasti.

Takový model je možno vytvořit v analogii s modelem lokálním, a to s následujícím přibližným vyjádřením jeho jednotlivých prvků. Mikrooblasti představují ramena křižovatky a vozidla v celé mikrooblasti pak kolonu na tomto rameni. SSZ jsou reprezentovány SSZ těch křižovatek jednotlivých mikrooblastí, které zprostředkovávají přechod mezi sousedními mikrooblastmi, příp. mezi mikrooblastí a návazným, neřízeným okolím. Pro celý makroregion je tedy nutné stanovit tzv. kritické křižovatky, které se nacházejí buď na vnitřních rozhraních mezi mikrooblastmi nebo jsou vstupy do celé makrooblasti. Pouze tyto křižovatky ovlivňují celkové vstupy a výstupy jednotlivých mikrooblastí a jsou tedy analogií vstupních ramen mikrooblasti.

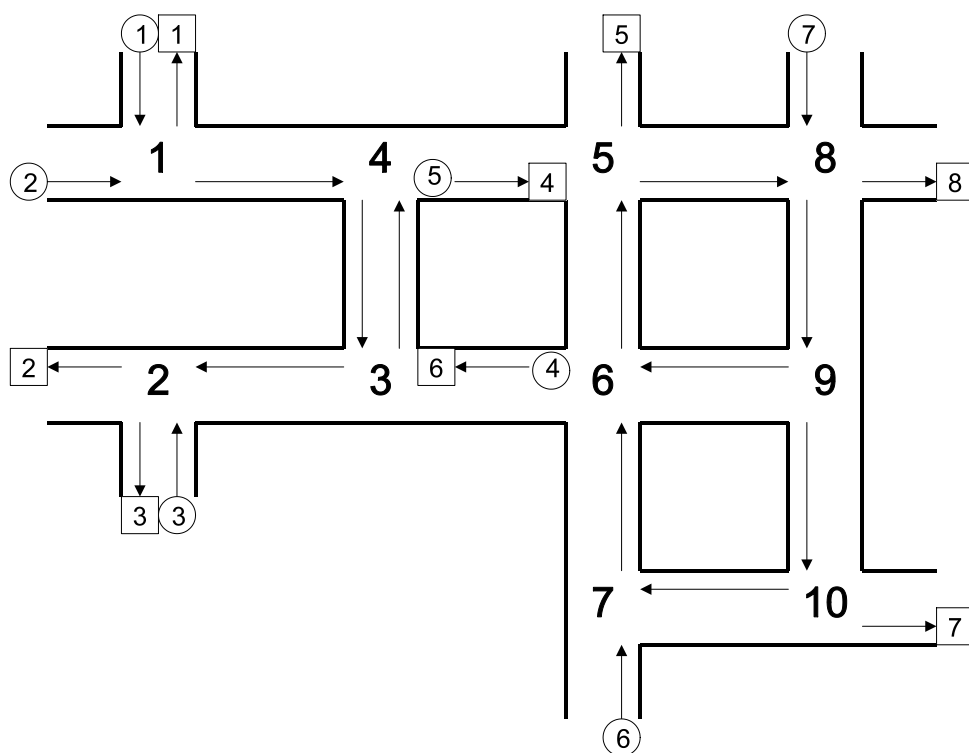
Počty vozidel v jednotlivých mikrooblastech je možno určit jako součet vozidel ve všech kolonách mikrooblasti. K tomu využijeme bodových odhadů z lokálních úrovní, které považujeme za dostatečně přesné a zde je tedy považujeme za známé. V nadřazené úrovni řízení tak odpadá úloha odhadování.

6.2 Nadřazené řízení

Řízení v nadřazené úrovni je opět víceméně analogií řízení lokálního, vzhledem k nepotřebnosti odhadovací fáze však mnohem jednodušší. Na druhé straně je ale obtížnější určit rozumnou strategii pro řízení. Jsme si vědomi, že v současnosti navržená strategie rovnoměrné dopravní zátěže po celé oblasti (v analogii s lokální úrovní) nemusí být zdaleka jediná a vždy vhodná. Nic ale nebrání formulaci několika dalších strategií a přípravě optimálního řízení pro každou z nich. Dopravní operátor by potom mohl sám volit strategii, která se mu zdá v daném okamžiku nejlepší. Jediným omezením tedy prozatím zůstává požadavek na linearitu kritéria řízení i všech omezujících podmínek, aby bylo možné opětovně využít optimalizační metodu lineárního programování.

7 Experimenty

V této kapitole ukážeme výsledky několika experimentů s výslednými odhadovacími a řídicími algoritmy. Experimenty jsou prováděny na pokusné testovací oblasti deseti křižovatek na obrázku 3. Křižovatky jsou zde označeny většími čísly a směr jízdy v ramenech šipkami. V oblasti je celkem 7 měřených vstupů a 8 měřených výstupů. Měřené vstupy jsou označeny kroužkem u příslušné šipky a měřené výstupy čtverečkem.



Obrázek 3: Testovací oblast - deset křižovatek

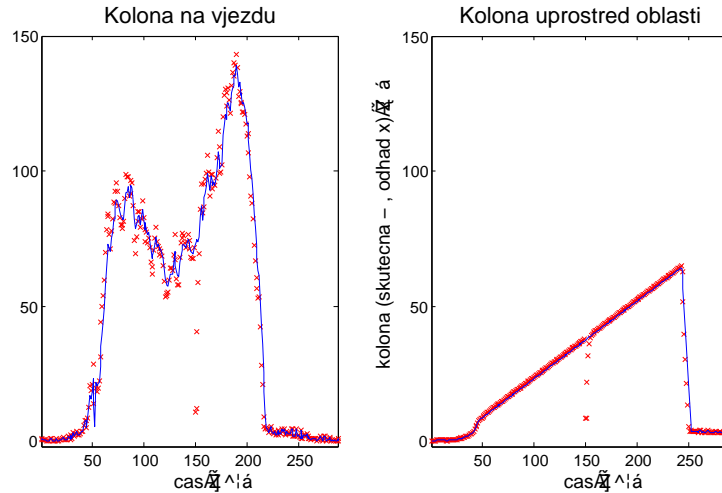
Dopravní oblast na obrázku 3 lze také chápat jako soustavu dvou mikrooblastí. První mikrooblast je tvořena křižovatkami 1 až 4, druhá křižovatkami 5 až 10. Proto jsou mezi křižovatkami 4 a 5, resp. 3 a 6 rovněž umístěny

měřící detektory. Vstupem (přesněji vstupními intenzitami) jsou v našem experimentu reálná data měřená v 90-ti vteřinové periodě v jedné z pražských oblastí. Data nám poskytlo ELTODO a.s, Praha. Systém je pod vlivem poruch ve formě šumů s nenulovými středními hodnotami tak, aby představovaly i „drifty“, které jsou pro systém s integračním charakterem nepříjemné.

7.1 Odhad

Pro demonstraci kvality odhadu stavu jsme pro přehlednost vybrali křižovatky 1 a 5 (viz obrázek 3). V křižovatce 1 budeme sledovat rameno vstupující shora, v křižovatce 5 rameno vstupující zleva. „Reálné“ průběhy délek kolon, nebo-li délky získané digitální simulací dopravy v oblasti, jsou na obrázku 4 vyznačeny plnou tenkou čarou. Ačkoliv se oba průběhy dosti liší, jejich tvar je snadno zdůvodnitelný. Rameno v křižovatce 1 je vstupní rameno, kam se vozidla sjíždějí v daném případě v podstatě volným proudem. Proto je v koloně dobře viditelný typický denní průběh (dopolední a odpolední špička, sedlo v poledne). Rameno z křižovatky 5 je vstupem pouze do druhé mikrooblasti naší testovací dopravní oblasti a vstupují do něho pouze vozidla z výstupního ramene křižovatky č. 4. Její vstupní rameno (zleva), které do ní jako jediné přivádí vozidla, je téměř celý den saturované, a tedy propouští vozidla v konstantním toku, který se rovná její kapacitě. Odtud plyne víceméně rovnoměrný nárůst kolony na grafu vpravo obrázku číslo 4.

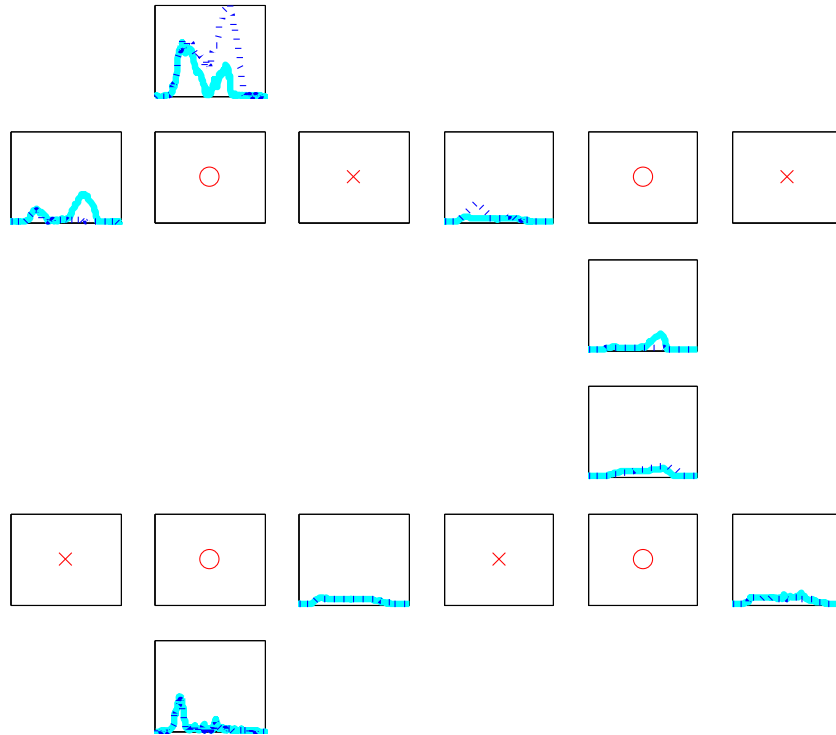
Při experimentu byly odhadovány délky kolon s periodou 5 min., a to v celé oblasti. Bez poruch se samozřejmě kolony počítaly zcela správně podle vztahu (1). Předmětem testu byla otázka, co se stane, jestliže přijde porucha, o které se vztah (1) „přímo nedozví“, např. vynulování části stavu (tj. délek kolon) nebo velká porucha průběžného odhadu stavu. V tomto okamžiku má přispět na pomoc vztah (3). Podle něj pak neodpovídá obsazenost na strategickém detektoru odhadu délky kolony (právě vynulovanému) a přes Kalmanův filtr má dojít k jeho korekci. K vynulování stavu došlo při experimentu kolem kroku 150, jak je patrné na průběhu odhadů délek kolon, které jsou označeny na obrázku (4) křížky. Navíc, odhady byly vynulovány v celé oblasti. Z obrázku je také vidět, že ke korekci podle očekávání dochází okamžitě a odhad opět pokračuje na správných hodnotách.



Obrázek 4: Korekce odhadu po poruše

7.2 Řízení

Testy řízení provedeme opět na celé testovací oblasti podle obrázku (3). Pro přehlednost však ukážeme výsledky jen v první mikrooblasti, která zahrnuje křižovatky 1 až 4 (viz obrázek (5)). Každá křižovatka je reprezentována čtyřmi obrázky. Obrázek uprostřed s kroužkem naznačuje vždy střed křižovatky, obrázky kolem (jsou tři, protože všechny křižovatky jsou tříramenné) reprezentují vstupní ramena této křižovatky. Obrázek s křížkem označuje jednosměrné výjezdní rameno, kde se kolona nemůže tvořit, obrázek s grafem představuje vstupní rameno, kde se kolona v důsledku SSZ vyskytuje. V grafu je zachycen denní průběh délky kolony, a to přerušovanou tmavší čarou je zachycena délka kolony s konstantním řízením, plná světlejší čára představuje délku kolony při řízení navrženým řídicím systémem. Všimněme si zejména ramen první křižovatky. Při řízení s konstantní zelenou bylo vodorovné rameno celý den volné a svislé rameno zahlcené. Navržené řízení se snaží velké kolony zmenšovat. To ale nelze absolutně. Jediným možným řešením je přerozdělit zelené mezi obě ramena tak, aby celková situace byla



Obrázek 5: První testovací oblast - pevné a optimální řízení

příznivější. Výsledkem je sice určité zvýšení kolon ve vodorovném rameni, avšak doprovázené výrazným zmenšením kolon v rameni svislém.

8 Závěr

Popsaný systém dopravního řízení určený pro městský provoz je zatím jen prvním krokem v tomto směru. Jako takový byl záměrně volen co možná

nejjednodušeji. Volba fyzikálního modelování vedoucí na velmi jednoduché vztahy (1) a (3), s jejichž pomocí je následně sestaven stavový model křižovatky (7) a (8), jeho odhad pomocí Kalmanova filtru a následná optimalizace pomocí lineárního programování, jsou velmi jednoduchými a stabilními postupy. Snad jediná, zatím ne zcela jasná záležitost, jsou nelineární odhady. Ty ale z větší části řadíme již do oblasti budoucího výzkumu a vývoje. V současném stádiu lze jednoznačně konstatovat, že pro případy dopravních oblastí s dostatkem strategických detektorů na vstupních ramenech do řízené oblasti pracuje navržené řízení dobře a spolehlivě. Při znalosti dopravních parametrů oblasti toto řízení vyžaduje ladění jen uživatelských parametrů, a to v minimálním počtu.

Ačkoli je řízení zvoleno jako velmi jednoduché, je celý systém řízení značně složitý. Je to především tím, že samotný dopravní systém je složitý. Je třeba si uvědomit, že oblast je složena z křižovatek, křižovatky z ramen, ramena z pruhů (vstupních a výstupních, různých směrů), atd. A navíc napříč tím vším jdou fáze cyklu SSZ. Toto vše optimálně naprogramovat představuje poměrně náročnou úlohu, která vyžaduje velkou míru opatrnosti a důsledné testování. Pak je možné získat jednoduše ovladatelný systém, který se z dosavadních simulačních experimentů zdá být účinným.

Reference

- [1] J. F. G. De Freitas, M. Niranjana, A. H. Gee, and A. Doucet. Sequential monte carlo methods for optimisation of neural network models. Technical report, Cambridge, England, 1998. CUED/F-INFENG/TR-328.
- [2] J. Homolová and I. Nagy. Traffic model of a microregion. In P. Horáček, M. Šimandl, and P. Zítek, editors, *Preprints of the 16th World Congress of the International Federation of Automatic Control*, pages 1–6, Prague, July 2005. IFAC.
- [3] R. E. Kalman. New results in linear filtering and prediction theory. *Journal of Basic Engineering*, pages 34–45, 1960. Transactions ASME.
- [4] J. Kratochvílová and I. Nagy. Traffic control of microregion. In J. Andryšek, M. Kárný, and J. Křacík, editors, *CMP'04: MULTIPLE PARTICIPANT DECISION MAKING, Theory, algorithms, software and applications*, pages 161 – 171, Adelaide, May 2004. Advanced Knowledge International.

- [5] M. Nørgaard, N. K. Poulsen, and O. Ravn. New developments in state estimation for nonlinear systems. *Automatica*, 36(11):1627–1638, 2000.
- [6] P. Pecherková and J. Duník. Setting of covariance for kalman filter. In *Proceedings of the 11th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies, Sustainable Transportation*, page 739, Hong Kong, December 2006. Hong Kong Society for Transportation Studies.
- [7] J. Příkryl, I. Nagy, and J. Homolová. Probabilistic model of a traffic network. In *Modelling 2005, Book of Abstracts. WB University, Pilsner 2005*, pp. 20, pages 1–2, Praha, March 2005. Sdružení pro dopravní telematiku ČR.
- [8] C. P. Robert and G. Casella. *Monte Carlo Statistical Methods*. Springer Verlag, 1999.
- [9] M. Šimandl and J. Duník. Multi-step prediction and its application for estimation of state and measurement noise covariance matrices. Technical report, 2006. University of West Bohemia in Pilsen, Faculty of Applied Sciences, Department of Cybernetics.
- [10] M. Šimandl and O. Straka. Nonlinear estimation by particle filters and cramér-rao bound. In *Preprints of the 15Th Triennial World Congress of the IFAC*, Barcelona, July 2002.