

Určování trajektorie z akcelerometrického měření

V posledních letech se již všeobecně prosazuje názor, že extenzivní rozvoj dopravy má své limity, a že tyto limity již nejsou za naším myšlenkovým horizontem. Hlavní omezující faktory jsou přitom chápány jako ekonomické a prostorové – urbanistická a environmentální omezení.

Ekonomická omezení kupodivu nepředstavují primární překážku pro růst dopravy a pro rozvoj dopravní infrastruktury. Růst hrubého domácího produktu je ve většině zemí vykazován jako pozitivní ukazatel, přičemž energeticky náročná doprava a stavebně náročné budování dopravní infrastruktury k tomuto růstu podstatně přispívají. Na druhé straně ale stabilní poptávka po surovinách v rozvíjených zemích a prudce rostoucí poptávka v rozvíjejících se ekonomikách spolu s klesajícími zdroji způsobují výrazný a setrvalý růst jejich cen – především ropy, jako hlavního energetického zdroje pro dopravu. Je pravděpodobné, že tento tlak nakonec převáží a promítne se do omezování dopravy příslušným ekonomickým mechanismem.

Obdobně lze dovozovat, že ani konstrukční náročnost dopravní infrastruktury nefunguje jako okamžitý limit rozvoje dopravy, ale bude to spíše nedostatek surovinových zdrojů a prostorová omezení, která budou mít za následek přeměrování zdrojů do „měkkých“ technologií, méně náročných na zdroje. Stále častěji se hovoří o dopravně-telematických aplikacích, které by mohly umožnit intenzivnější využití současné dopravní sítě při menší náročnosti ve srovnání s extenzivním rozvojem sítě. Všeobecně se předpokládá, že telematika zajistí vyšší bezpečnost provozu, umožní plynulou dopravu s vyloučením dopravních kongescí a sekundárně sníží spotřebu pohonných hmot.

Bez pokročilých satelitních technologií určování polohy (nejznámějším příkladem je GPS, budoucím příslibem pak systém Galileo) se přitom žádná z aplikací tohoto druhu téměř jistě neobejde. Kromě satelitních měření se zde významně uplatňují akcelerometrická měření digitálními akcelerometry a inerciální měřicí systémy založené na gyroskopických měřeních. Současné použití více typů měření vede k nutnosti jejich integrace, což jsme ověřili při testování jízdy v červenci roku 2009 na brněnském Masarykově okruhu.

VYUŽITÍ AKCELEROMETRU

V současnosti jsou snadno dostupné senzory akcelerace s digitálním výstupem, jejichž parametry se liší zejména v rozsahu měřitelného zrychlení (2–20 g), přesnosti (8–16bitové), linearitě a počtu nezávislých čidel (jedno- až trojosé).

Výhody měření pohybu vozidla pomocí akcelerometru jsou zřejmé:

- měření není závislé na vnějších podmínkách (viditelnosti satelitů),
- akcelerometrické senzory jsou ve srovnání s přijímači GPS velmi levné,
- frekvence měření může být o několik řádů vyšší.

Velmi vhodný je tento typ měření pro verifikaci mikroskopických modelů dopravního proudu OAM (Optimal Acceleration Model), kde můžeme přímo určovat vztah zrychlení, vnějších podmínek a parametrů vozidla. Určování zrychlení pomocí měření GPS je složitější a dosahuje nižší úrovně přesnosti.

Na druhé straně určení dalších parametrů trajektorie vozidla přímo z akcelerace je problematické. Obvykle neznáme přesnou prostorovou orientaci senzoru, jeho kalibrace je určena s určitou chybou a vlastní měření je zatíženo šumem (např. tepelným). V zjednodušeném případě jednoosého lineárního akcelerometru můžeme naměřené zrychlení vyjádřit vztahem:

$$a(t) = C_1 + C_2[u(t) + w(t)] \quad (1)$$

kde C_1 a C_2 jsou kalibrační konstanty, u je naměřená digitální hodnota, w je superponovaný šum.



Obr. 1 – Satelitní snímek brněnského Masarykova okruhu. Orientace snímku je otočena o 180° (sever je dole a východ vlevo) pro lepší srovnání s výsledky měření.

Rychlost pak určíme prostou integrací tohoto zrychlení:

$$v(t) = \int_{t_0}^t a(t) dt \quad (2)$$

a v optimálním případě můžeme předpokládat, že šumové vlastnosti akcelerometru nejsou závislé na velikosti zrychlení, tedy pro dostatečně velký interval je můžeme zanedbat.

I v tomto případě však zůstává nejistota zejména při stanovení konstanty C_1 , která se projeví při stanovení rychlosti odchylkou rostoucí lineárně s délkou měřeného intervalu a po dostatečně dlouhé době měření znehodnotí. Ještě složitější situace nastane samozřejmě při určování polohy vozidla z akcelerometrického měření, kde chyba uvedených konstant způsobí odchylku rostoucí dokonce kvadraticky s časem.

Při doplňujícím měření pomocí GPS přijímače lze však získat určité výhody z obou měření. Profesionální řešení vychází z aplikace Kalmanova filtru, resp. Kalmanova vyrovnání, které je však značně algoritmicky náročné a vyžaduje poměrně přísné předpoklady o statistických charakteristikách všech vstupů.

V práci se však pokusíme o jednodušší přístup, který demonstruje citlivost a stabilitu metod výpočtu charakteristik trajektorie z naměřených akcelerometrických dat.

KALIBRACE AKCELEROMETRU

Použili jsme trojosý, osmibitový akcelerometr s nastaveným rozsahem 0–3 g. Kalibrační vztah (1) jsme určili za předpokladu linearity akcelerometru takto:

Pro každou osu akcelerometru nalezneme klidovou polohu minimální a maximální naměřené hodnoty odpovídající zřejmě gravitačnímu zrychlení $-g$ a g . Po dosažení do vztahu (1) dostaneme dvě lineární rovnice o dvou neznámých, z nichž určíme konstanty C_1 a C_2 pro každou osu akcelerometru. Rozptýl naměřených hodnot při klidové poloze senzoru dosahuje až několik bitů. Je to dáno jednak konstrukčními vlastnostmi kondenzátorového senzoru, jednak mikrotřesy v místě měření. Navzdory určení konstant z měření velkého množství hodnot akcelerace, jsou tyto zatíženy relativně velkou chybou. Vlivem šumu je totiž obtížné stanovit přesnou polohu akcelerometru pro maximální a minimální hodnotu zrychlení v dané ose. Tabulka 1 shrnuje kalibraci konstant akcelerometru při daném rozsahu.

Tab. 1 – Kalibrační konstanty jednotlivých os akcelerometru

Osa	C_1 [ms^{-2}]	C_2 [$\text{ms}^{-2}/\text{bit}$]
X	-22,34 ~ 0,02	0,156 ~ 0,001
Y	-21,58 ~ 0,04	0,158 ~ 0,002
Z	-19,83 ~ 0,04	0,152 ~ 0,002

Tab. 2 – Určení souřadných os obecně umístěného akcelerometru

Složky zrychlení	Vertikální vektor	Tečný vektor	Normálový vektor
X	-0,610	0,175	0,775
Y	0,751	-0,210	0,631
Z	-0,250	-0,961	0,003

Nalezení složek zrychlení

Při upevnění měřicí desky do vozidla nebylo možné přesně určit polohu jednotlivých os akcelerometru. Tento problém však bylo možné řešit pomocí předpokládaných hodnot, resp. směrů zrychlení. Pro vozidlo v klidu je zřejmě velikost naměřeného vektoru zrychlení (prostřednictvím kalibračního vztahu) rovna gravitačnímu zrychlení a jeho směr je *vertikální* k zemskému povrchu. Odečtením tohoto vektoru od všech změřených hodnot dostaneme *vektor horizontálního zrychlení*. Jeho tečnou složku lze určit pomocí předpokladu ryze podélného (tečného) zrychlení při rozjezdu vozidla na dlouhé startovací rovince. Z naměřených hodnot zrychlení v této oblasti získáme průměrný vektor rovnou-

běžný s podélnou osou vozidla. Jednotkový vektor v tomto směru pak získáme normováním pomocí velikosti průměrného vektoru. *Příčnou* složku zrychlení (normálový jednotkový vektor) získáme vektorovým součinem jednotkového vertikálního a tečného vektoru.

Získaná trojice jednotkových vektorů zrychlení v definovaných osách vozidla je v tabulce 2. Velikost uvedených vektorů je rovna jedné. Skalární součin každé dvojice vektorů je s tolerancí chyb ve složkách zrychlení roven nule.

Požadovanou složku zrychlení pak určíme z naměřené hodnoty pomocí skalárního součinu změřeného vektoru s jednotkovým vektorem v dané ose.

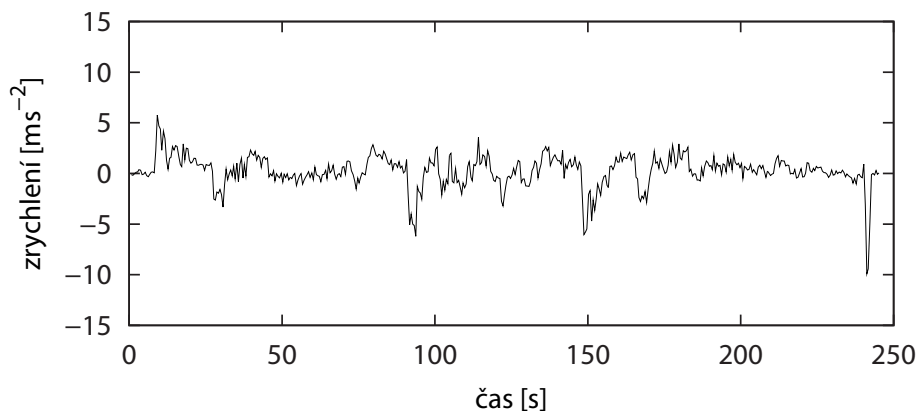
Výsledky měření

Na obrázku 1 je průběh zrychlení velmi ostré jízdy na Masarykově okruhu (délka závodní dráhy je 5,394 km a má 14 zatáček). Z celkové doby jízdy – cca 240 s lze stanovit průměrnou rychlost testovací jízdy 22,5 m/s, tj. 81 km/h.

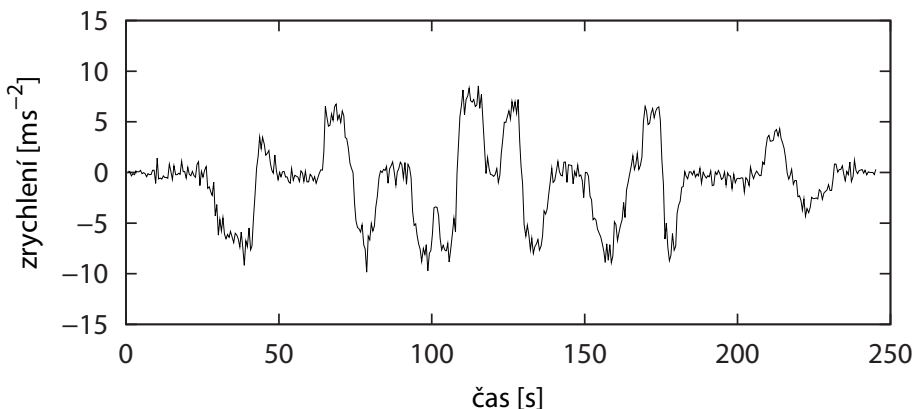
Tečná složka zrychlení (graf 1) ukazuje obvyklý průběh akcelerace, při zobrazení podrobností je patrný pokles akcelerace na nulu v okamžicích řazení rychlostních stupňů. V případě decelerace je výrazná zejména poslední fáze jízdy, kdy vozidlo brzdilo za použití systému ABS. Decelerace v takovém případě dosahuje hodnot až jednoho g.

Příčná (odstředivá) složka zrychlení (graf 2) je opět velmi výrazná ve všech 14 zatáčkách, vozidlo projíždělo oblouky na hranici možností. Před zahájením oblouku (téměř bez přechodnicové fáze) je patrná decelerace v podélné složce.

Celková hodnota horizontálního zrychlení (graf 3) je vždy kladná a kromě počátečního klidu není téměř nikdy nulová. Z obrázku je dobře patrný šum naměřeného zrychlení způsobený dílem vibracemi vozidla, dílem vlastním šumem měřicího zařízení.



Graf 1 – Tečné zrychlení (podélný směr)



Graf 2 – Normálové zrychlení (příčný směr)

STANOVENÍ RYCHLOSTI VOZIDLA Z AKCELEROMETRICKÉHO MĚŘENÍ

Podélnou rychlost získáme integrací podélné akcelerace. Pro srovnání byla provedena numerická integrace prostou obdélníkovou a dále Simpsonovou metodou, jejichž matematické základy lze nalézt v příslušné literatuře.

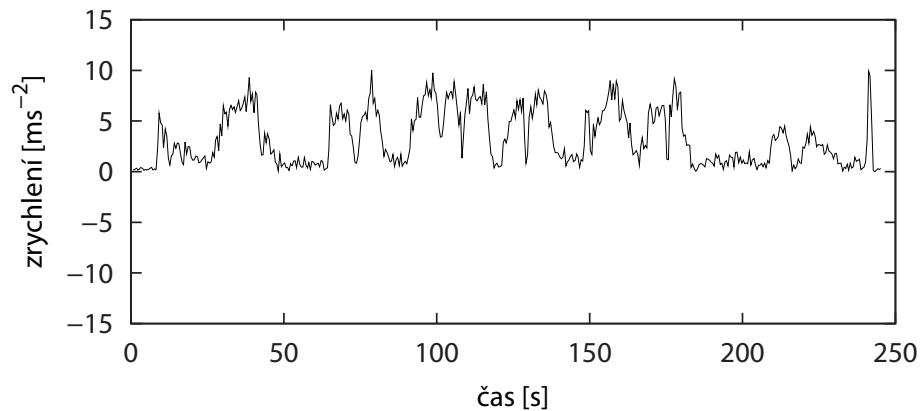
Z grafu 4 je patrné, že rozdíl integračních metod je vlivem hustého vzorkování prakticky zanedbatelný. V počáteční fázi je opět dobře patrné řazení rychlostních stupňů, kdy je rychlost zhruba konstantní. Na druhé straně je zřejmé, že po určitém časovém intervalu rychlost nabývá nereálných hodnot a po konečné deceleraci, která uvedla vozidlo opět do klidu, dosáhla hodnoty více než 40 m/s. Je zřejmé, že drift

rychlosti je způsoben integrací počáteční malé chyby při kalibraci a určování polohy akcelerometru. Podrobnější analýzu poskytne srovnání s rychlostí získanou pomocí GPS přijímače.

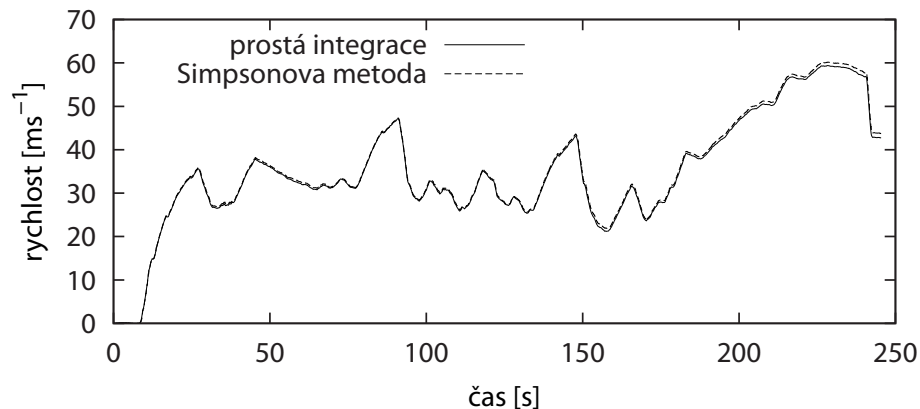
SYNCHRONIZACE AKCELEROMETRICKÉHO A SATELITNÍHO MĚŘENÍ RYCHLOSTI

Měření pomocí akcelerometru poskytuje soubor dat s počátečním určením času pomocí hodin v počítači a další určení zlomků sekund od počátku měření, které je přiřazeno ke každému vzorku dat – viz tab. 3.

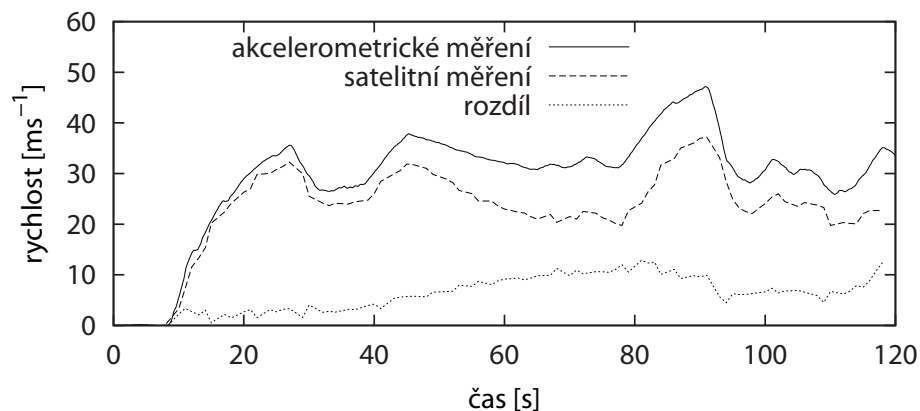
Přijímač GPS na druhé straně poskytuje soubor v tzv. formátu NMEA, přičemž některé NMEA zprávy jsou opatřeny satelitním časem. Frekvence vzorkování přijímače GPS je obvykle 1 Hz – viz tab 4.



Graf 3 – Horizontální zrychlení (vodorovná složka)



Graf 4 – Integrace podélné akcelerace, pro srovnání byla provedena numerická integrace prostou obdélníkovou a dále Simpsonovou metodou. Výsledky jsou prakticky shodné.



Graf 5 – Průběh rychlostí získaných integrací akcelerometrického měření a satelitním měřením GPS. Poslední křivka znázorňuje průběžný rozdíl obou metod.

Tab. 3 – Formát dat poskytovaných digitálním akcelerometrem

```
Start: Thu Jul 30 20:07:57 2009
t=0.740;x=104;y=185;z=114
t=0.850;x=104;y=184;z=112
t=0.960;x=103;y=185;z=110
t=1.070;x=102;y=185;z=115
t=1.180;x=105;y=185;z=113
t=1.240;x=103;y=186;z=114
t=1.350;x=103;y=184;z=112
...
```

Z poskytnutých zpráv lze použít zprávu RMC obsahující údaj o okamžité rychlosti přijímače. Její formát je následující – viz tab. 5.

Pro zpracování dat bylo použito prostředí MS Excel. Data z akcelerometru byla vložena do tabulky, pomocí výše uvedených úvah byly vypočteny jednotkové souřadné vektory a naměřená data byla po kalibraci rozložena na podélnou a příčnou složku.

Dále byl vytvořen krátký program v jazyce Visual Basic, který ze souboru NMEA vybral pouze zprávy RMC a uložil údaje o čase a rychlosti. Podprogram pak vložil naměřené údaje do tabulky měření akcelerometrem podle časových údajů z obou měření.

V grafu 5 je porovnání průběhu rychlosti získané integrací akcelerometrického měření a měření metodou GPS. Je zřejmé, že měření pomocí akcelerometru je hladší a lokálně přesnější. Na druhé straně je zatíženo chybou, která s časem roste – její vývoj ve srovnání s absolutním měřením GPS vyjadřuje spodní křivka, která roste s časem prakticky lineárně až do 80 sekund měření. Nabízí se proto oprava integrační konstanty o malou hodnotu tak, aby obě metody dávaly obdobné výsledky. Opravná hodnota o několik řádů nižší, než je rozptyl akcelerometrického měření, postačuje pro výpočet správné rychlosti po dobu více než jedné minuty od počátku měření (cca 1,5 km).

Stanovení azimutu trajektorie

Směr pohybu vozidla (azimut) lze stanovit z normálové složky zrychlení. Pro velikost odstředivého zrychlení totiž platí:

$$a_n = \frac{v_t^2}{R} \quad (3),$$

kde v_t je podélná rychlost a R poloměr otáčení. Pro úhel $\Delta\alpha$ změny směru podélné rychlosti mezi dvěma časovými vzorky lze psát:

$$\Delta\alpha = \frac{v_t \Delta t}{R} \quad (4).$$

Dosadíme-li ze vztahu (3), můžeme vyjádřit změnu úhlu ve stupních takto:

$$\Delta\alpha = \frac{180}{\pi} \frac{a_n \Delta t}{v_t} \quad (5).$$

Počáteční směr rychlosti je třeba určit z mapových podkladů nebo azimutem poskytovaným v NMEA zprávě přijímačem GPS (viz tab. 5). Pokud je vozidlo v klidu, je pochopitelně azimut neurčitý, proto je zapotřebí zahájit odcítání azimutu až po startu vozidla.

Z grafu 6 je opět patrná dobrá shoda mezi průběhem azimutu trajektorie vypočteným na základě akcelerometrického měření a azimutem přímo poskytovaných GPS přijímačem. Po dvou minutách jízdy se však začíná

azimuty vzdalovat vlivem malé absolutní chyby při určování normálového zrychlení a podélné rychlosti. Azimut určený akcelerometrickým měřením má hladší průběh a opět lze předpokládat, že jeho lokální hodnota je přesnější než měření metodou DGPS.

Stanovení přesné trajektorie

Kinematickou metodou KOF (Kinematic On the Fly) byla pomocí profesionální geodetické dvoufrekvenční aparatury Leica Systems 1200 zjištěna trajektorie s centimetrovou přesností a hustotou vzorkování 10 Hz. Programové vybavení pro zpracování fázového měření KOF poskytuje horizontální souřadnice a výšky v národním souřadnicovém systému S-JTSK a výškovém systému Bpv, zatímco aparatura Magellan využívající jednodušší metodu DGPS poskytuje souřadnice v prostorovém systému WGS-84 s hustotou vzorkování 1 Hz. Proto bylo zapotřebí převést prostorové souřadnice na systém S-JTSK. Tato úloha není triviální, používají se při ní dílčí transformace opírající se o sadu převodních klíčů mapujících dotčené území.

Lze však použít také zjednodušený převod polohových souřadnic mezi oběma systémy pomocí polynomu 3. stupně:

$$X = X_0 + A + B\varphi + C\lambda + D\varphi^2 + E\varphi\lambda + F\lambda^2 + G\varphi^3 + H\varphi^2\lambda + I\varphi\lambda^2 + J\lambda^3 \quad (6),$$

kde A, B, \dots, J jsou vektorové koeficienty, φ a λ jsou zeměpisné souřadnice a X je hledaný vektor v soustavě S-JTSK.

Koeficienty polynomu jsou určeny z transformačního klíče Helmertovy transformace, ke kterému bylo použito 174 identických trigonome-

Tab. 4 – Formát dat poskytovaných přijímačem DGPS, zvýrazněny jsou časové údaje

```
$GPGGA,180756.00,4912.16613,N,01626.75199,E,1,07,1.1,452.31,M,43.8,M,,*55
$GPGSA,A,3,30,29,16,31,24,21,10,,,,,02.2,01.1,01.9*03
$GPGSV,3,1,11,30,27,136,41,12,03,130,26,29,64,066,39,06,04,266,32*78
$GPGSV,3,2,11,16,34,304,41,31,39,237,41,24,63,086,42,21,56,181,41*77
$GPGSV,3,3,11,10,21,057,34,13,03,348,,23,02,314,*45
$GPRMC,180756.00,A,4912.1661,N,01626.7520,E,00.0,000.0,300709,03,E,A*25
$GPGGA,180757.00,4912.16611,N,01626.75192,E,1,07,1.1,452.56,M,43.8,M,,*5C
$GPGSA,A,3,30,29,16,31,24,21,10,,,,,02.2,01.1,01.9*03
$GPGSV,3,1,11,30,27,136,40,12,02,131,25,29,64,066,40,06,04,266,33*75
$GPGSV,3,2,11,16,34,304,40,31,39,237,41,24,63,086,42,21,56,181,41*76
$GPGSV,3,3,11,10,21,057,32,13,03,347,,23,02,313,*4B
$GPRMC,180757.00,A,4912.1661,N,01626.7519,E,00.0,000.0,300709,03,E,A*2E
$GPGGA,180758.00,4912.16610,N,01626.75188,E,1,07,1.1,452.72,M,43.8,M,,*5F
$GPGSA,A,3,30,29,16,31,24,21,10,,,,,02.2,01.1,01.9*03
$GPGSV,3,1,11,30,27,136,40,12,02,131,25,29,64,066,39,06,04,266,32*7A
$GPGSV,3,2,11,16,34,304,39,23,02,313,28,31,39,237,39,24,63,086,40*70
$GPGSV,3,3,11,21,56,181,40,10,21,057,32,13,03,347,*45
$GPRMC,180758.00,A,4912.1661,N,01626.7519,E,00.0,000.0,300709,03,E,A*21
...
```

Tab. 5 – Kódování ve zprávě NMEA typu RMC

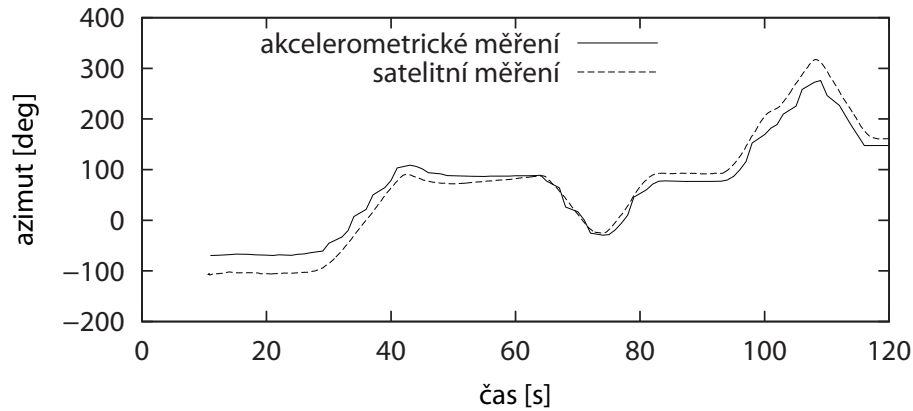
Příklad:
 \$GPRMC,180757.00,A,4912.1661,N,01626.7519,E,00.0,000.0,300709,03,E,A*2E
 Kde:

RMC	Recommended Min. Sentence C (minimální doporučené údaje)
180757.00	Satelitní čas měření, 18:07:57 UTC
A	Status, A = platný záznam
4912.1661, N	49° 12.1661' – severní šířka
01626.7519, E	16° 26.7519' – východní délka
00.0	Horiz. složka rychlosti v uzlech (1.944 m/s = 1 uzel)
000.0	Okamžitý azimut ve stupních
300709	Datum, 30. 7. 2009
03,E	Úhel magnetické deklinace
*6A	Kontrolní suma zprávy

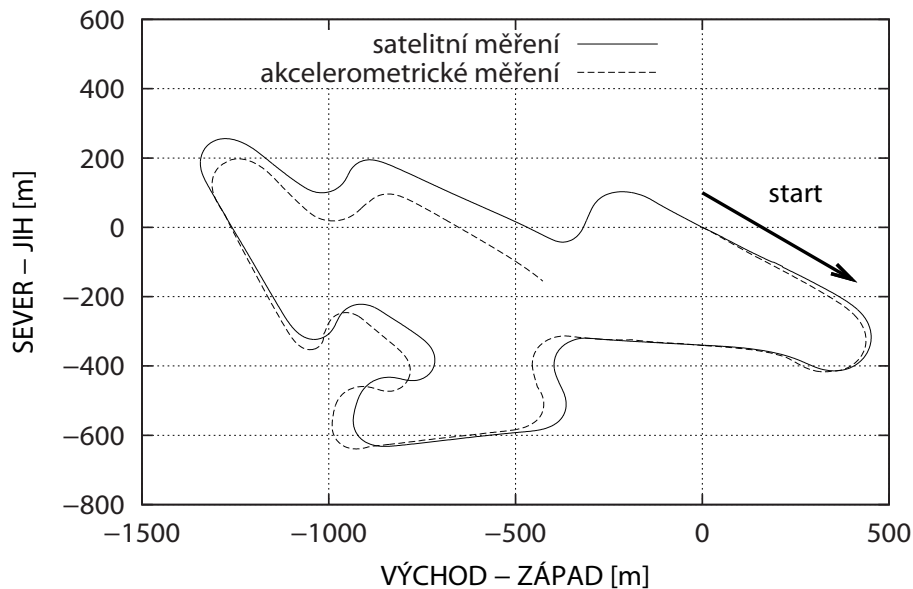
trických bodů, rovnoměrně rozložených na území bývalé Československé republiky. Souřadnice těchto bodů jsou známy v obou souřadnicových systémech, jednak z terestrických metod měření československé triangulační sítě a jednak z GPS měření v rámci kampaně DOPNUL. Přesnost polynomičného převodu souřadnic ze systému WGS-84 do S-JTSK je dána hodnotou směrodatné polohové odchylky 3 m. V pří-

padě převodu ze systému S-JTSK do WGS-84 je uváděna hodnota směrodatné polohové odchylky 1 m.

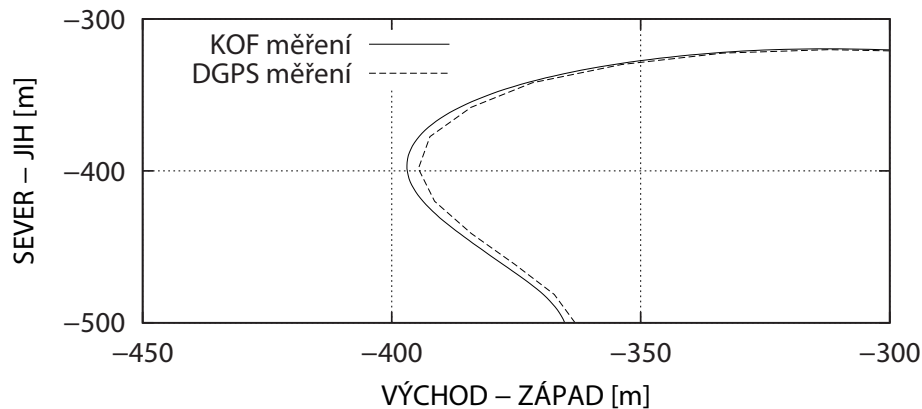
V grafu 7 je vynesena trajektorie jízdy získaná metodou KOF a integrací akcelerometrického řešení. Metoda DGPS včetně transformace do systému JTSK je naprosto postačující pro navigační účely, s metodou KOF se shoduje a drobné rozdíly odhalí až pohled na de-



Graf 6 – Azimut trajektorie vypočtený na základě akcelerometrického měření a poskytovaný přímo GPS přijímačem.



Graf 7 – Celkový pohled na trajektorii jízdy na okruhu získanou ze satelitního měření metodou Kinematic On the Fly (KOF) a integrací akcelerometrického měření. Zhruba po dvou kilometrech jízdy dosahuje chyba určení polohy prostřednictvím akcelerometru několika desítek metrů.



Graf 8 – Metoda DGPS včetně transformace do systému JTSK je naprosto postačující pro navigační účely, s metodou KOF se shoduje i při detailním pohledu.

tail ešovitě zatáčky, ze kterého vidíme při velmi rychlé jízdě 25 m/s chybu měření přibližně 1 m.

Z celkového náhledu (graf 7) pak vyplývá, že zhruba po dvou kilometrech jízdy dosahuje chyba určení polohy prostřednictvím akcelerometru několika desítek metrů, což však lze považovat za relativně dobrý výsledek vzhledem k jednoduchosti a nezávislosti použité aparatury.

ZÁVĚR

Ideální postup by umožnil srovnáním akcelerometrického a GPS měření navrhnout opravnou konstantu a extrapolovat její použití i na měření, kde metoda GPS selhává (v zástavbě apod.) Bohužel se ukazuje, že oprava (jakkoli malá) se po relativně dlouhých intervalech skokem mění. Důvod těchto změn může spočívat v zanedbání sklonu vozovky a náklonu vozidla, mohou být však způsobeny i hlubšími mechanismy vyplývajícími z šumových aspektů měření.

Rozhodně však lze doplnit GPS měření levnou akcelerometrickou metodou, která umožňuje lokální zpřesnění měření, které se však musí periodicky synchronizovat s GPS pro kompenzaci driftu vlivem nepřesného určení integrační konstanty.



doc. RNDr. Jiří Macur, CSc.

Vystudoval Přírodovědeckou fakultu Masarykovy univerzity v Brně, obor Fyzika pevné fáze. Dnes působí jako docent na Ústavu informatiky Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Zabývá se zejména alternativními pohony, nelineární dynamickými systémy, jejich modelováním a využitím v inženýrských aplikacích.



Ing. Petr Holcner, Ph.D.

Vystudoval Fakultu stavební Vysokého učení technického v Brně, obor Konstrukce a dopravní stavby. Dnes zde působí jako odborný asistent na Ústavu pozemních komunikací. Zabývá se projektováním pozemních komunikací a dopravním inženýrstvím s důrazem na kritickou analýzu a modelování environmentálních dopadů dopravních řešení na společnost.



Ing. Jiří Bureš, Ph.D.

Absolvent Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, oboru Geodézie a kartografie, v současnosti působí jako odborný asistent na Ústavu geodézie. Zabývá se inženýrskou geodézií, měřeními ve stavebnictví a průmyslu a aplikacemi měřících družicových technologií GNSS.



Mgr. Tomáš Apeltauer

Vystudoval Přírodovědeckou fakultu Masarykovy univerzity v Brně, obor Teoretická fyzika a astrofyzika. Dnes působí jako asistent na Ústavu informatiky Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Zabývá se zejména modelováním dynamických systémů a objektivně orientovaným programováním.

Absolutní určení směru i rychlosti z akcelerometrického měření je znehodnoceno v tomto uspořádání zhruba po minutě jízdy, za kterou vozidlo urazilo přibližně 1,5 km.

Na trhu jsou v současnosti k dispozici profesionální měřicí čipy pro inerciální měření (tzv. IMU jednotky), které obsahují tříosý akcelerometr a tříosé gyroskopické zařízení umožňující zjišťovat rotaci a pootočení s integrovaným až 16bitovým převodníkem. Náklady na jejich pořízení (cca \$500) jsou relativně malé a lze očekávat, že při jejich použití by se přesnost akcelerometrického měření ještě podstatně zvýšila. Rekonstrukce trajektorie je totiž velmi citlivá na změnu azimutu, který lze takto měřit přímo – bez nutnosti integrace zatíženou značnou integrační chybou.

Inerciální měření má tedy oproti satelitnímu měření několik výhod:

- při ověřování mikroskopických modelů dopravního proudu poskytuje daleko přesnější informace o akceleraci,
- nezávisí na viditelnosti satelitů,
- lze dosáhnout mnohem vyšší frekvence vzorkování, je lokálně přesnější.

Je přitom zřejmé, že pro dlouhodobé měření ho nelze použít samostatně a musí se doplnit satelitními metodami.

Tento příspěvek byl zpracován za podpory výzkumného záměru MSM 0021630519.

doc. RNDr. Jiří Macur, CSc.,

macur.j@fce.vutbr.cz,

Mgr. Tomáš Apeltauer,

apeltauer.t@fce.vutbr.cz,

Ústav informatiky Fakulty stavební
Vysokého učení technického v Brně

Ing. Petr Holcner, Ph.D.,

holcner.p@fce.vutbr.cz,

Ústav pozemních komunikací

Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně

Ing. Jiří Bureš, Ph.D.,

bures.j@fce.vutbr.cz,

Ústav geodézie Fakulty stavební
Vysokého učení technického v Brně

ZDROJE INFORMACÍ:

- Apeltauer, T.; Macur, J.; Holcner, P.; Kyselý, M. Přesné měření pohybu vozidel pomocí satelitních metod. Silniční obzor, 2007, roč. 2007, č. 3, s. 65-69. ISSN: 0322-7154
- Wiener, N., The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., 1949
- Savitzky, A., Golay, M.J.E., Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, Analytical Chemistry, Vol. 36, No. 8, 1964
- Maybeck, P.S., Stochastic models, estimation and control, vol. 1, Academic Press – A Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich Publisher, 1979

Determining trajectory from accelerometric measurement

It is assumed generally that telematics shall assure higher operational safety, enable continuous traffic excluding traffic congestions and secondarily, it shall decrease the fuel consumption. Without advance satellite technology for determining position (the well-known example is GPS, for future it shall be the promised Galileo system) no application of this type can do without this for sure. Apart from satellite measurements, the accelerometric measurement may be applied significantly here using digital accelerometers and inertial measurement systems based on gyroscopic measurements. Current use of more types of measurements shall lead to the need of their integration which has been verified during the test ride in July 2009 on the Masaryk circuit in Brno. This article describes details, results and conclusion of the measurements.