

Michał MIELCZAREK

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA METROLOGII, ul. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Przegląd metod estymacji indywidualnej prędkości pojazdu na podstawie profilu magnetycznego. Nowe kierunki badań

Mgr inż. Michał MIELCZAREK

W 2009 ukończył studia na kierunku Elektrotechnika, specjalność Computer Engineering in Electrical Systems w Akademii Górniczo-Hutniczej. Od 2010r. doktorant w katedrze Metrologii Akademii Górniczo-Hutniczej. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z pomiarem parametrów ruchu drogowego.

e-mail: michal.mielczarek@agh.edu.pl**Streszczenie**

Dotychczas stosowane metody estymacji prędkości pojazdów przy użyciu pętli indukcyjnych podzielić można na dwie grupy: pierwszą z nich jest estymacja prędkości kolumny pojazdów, drugą zaś estymacja indywidualnej prędkości pojazdu. W pracy porównano pięć znanych metod estymacji indywidualnej prędkości pojazdu. Zaproponowano dwie nowe metody wyznaczania współczynnika SR jako wielkości proporcjonalnej do prędkości pojazdu. Autor zaprezentował również nowe metody estymacji indywidualnej prędkości pojazdu: metodę mediany i najmniejszych kwadratów, oraz metodę mediany i interpolacji liniowej.

Słowa kluczowe: pętla indukcyjna, estymator, LSE, traffic-1.

A review of methods for individual vehicle speed estimation based on magnetic signature. New ways of investigations**Abstract**

Travel time is one of the most important parameter describing traffic. This parameter is closely related to the vehicle speed. Methods of vehicle speed estimation can be divided into two groups: estimation of car volume speed and estimation of individual car speed. In this paper there are compared five known methods. Two areas of investigations are proposed. Two new methods for determining the SR (as a value proportional to the vehicle speed) coefficient are proposed. The first one is modification of the DSL method, in which the least-square method is used to fit a curve in the range of 0.1 to 0.6 of the magnetic profile amplitude. The second, treats the mean value of two edges (leading and trailing) as a value proportional to the vehicle speed. The new method (mean value of two edges) for determining SR was ranked on the third place (RMSE 11.47 %) in a passenger car class. More tests of this method are necessary (for different car classes). Moreover, two new methods for speed estimation are proposed: the median and least square method, and the median and linear interpolation method.

Keywords: single loop detector, speed estimation, LSE, traffic measurement.

1. Wstęp

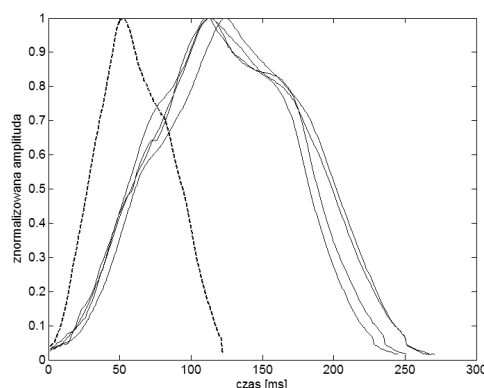
Jednym z podstawowych parametrów określających drogowy system komunikacyjny jest czas podróży. Parametr ten jest ściśle powiązany z prędkością pojazdu. Od kiedy zaczęto stosować pętle indukcyjne w celu estymacji prędkości pojazdów, powstało wiele metod jej wyznaczania. Badania rozwinęły się w dwóch głównych kierunkach. Pierwszym z nich jest estymacja prędkości kolumny pojazdów, drugim zaś, znacznie bardziej interesującym, jest wyznaczanie indywidualnej prędkości pojazdu poprzez analizę jego profilu magnetycznego „odciśniętego” na pętli indukcyjnej zatopionej w asfalcie.

Najprostszym systemem stosowanym do wyznaczenia indywidualnej prędkości pojazdu jest system wyposażony w dwie pętle indukcyjne (tzw. speed trap) oddalone od siebie o znaną odległość. Pomiar prędkości w takich systemach nie jest skomplikowany, bowiem mierzony jest w nich czas, w którym pojazd pokonał znaną odległość między pętlami. System choć prosty, nie jest chętnie stosowany, ze względu na podwojenie kosztów w porównaniu z systemami jedнопętlowymi. Drugim czynnikiem, który wpłynął na rozwój metod estymacji prędkości z pojedynczych czujników indukcyjnych jest istniejąca już sieć tych czujników. Pierwotnie systemy pętli indukcyjnych służyć miały do monitorowania natężenia ruchu drogowego. W tej roli świetnie spisywały się pojedyncze czujniki indukcyjne i dlatego były najczęściej montowane. W tym momencie warto postawić sobie pytanie: czy zmieniać istniejącą już infrastrukturę pojedynczych czujników indukcyjnych, czy może opracować metodę estymacji prędkości z czujników już zainstalowanych? Racjonalnym wydaje się być drugie podejście. Na przestrzeni lat, opracowano pięć metod estymacji prędkości pojazdu z pojedynczego czujnika indukcyjnego, metody te zostaną zestawione w niniejszej pracy. Autor wskaże nowe obszary działań, które skutkować mogą opracowaniem kolejnych metod.

2. Profil magnetyczny pojazdu

System pomiarowy wyposażony jest w pętlę indukcyjną o wymiarach 2 m x 1,2 m, montowaną w asfalcie, czujniki typu speed trap (mierzące prędkość pojazdu z dokładnością do 1 km/h) oraz elektronikę gromadzącą informacje o przejeżdżających pojazdach (czyli rejestrującą profile magnetyczne pojazdów, oraz prędkości).

Na rysunku 1 przedstawiono profile magnetyczne czterech pojazdów należących do kategorii „samochody osobowe” jadących z tą samą prędkością 70 km/h oraz jednego (linia przerywana) jadącego z prędkością 150 km/h.



Rys. 1. Profile magnetyczne samochodów osobowych jadących z prędkością 70 km/h i 150 km/h

Fig. 1. Magnetic profiles of cars at speed of 70 km/h and 150 km/h

Łatwo zauważyć, że stromość zboczy profilu zależy od prędkości z jaką porusza się pojazd. Im prędkość większa, tym bardziej strome zbocza. Z tej zależności korzysta większość algorytmów estymacji prędkości indywidualnej pojazdu.

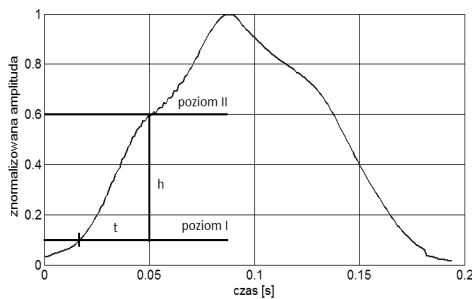
3. Metody wyznaczania szybkości narastania zbocza profilu magnetycznego pojazdu - SR (slew rate)

Metoda I

DSL (direct slew rate)

Pierwsza metoda przedstawiona na rysunku 2, do obliczenia nachylenia zbocza profilu wykorzystuje dwa arbitralnie przyjęte poziomy (poziom I – stanowiący 10 % amplitudy zbocza oraz poziom II – 60 % amplitudy). Po określeniu tych dwóch poziomów, szybkość narastania zbocza wyznaczona jest przez stosunek odległości poziomów h do czasu osiągnięcia tych poziomów t (1).

$$SR = \frac{h}{t} \tag{1}$$



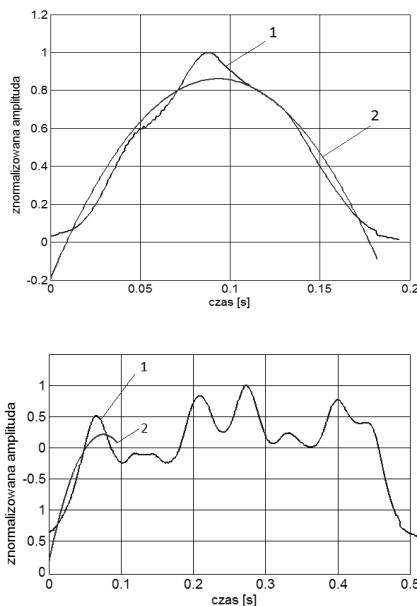
Rys. 2. Metoda DSL
Fig. 2. DSL method

Metoda II

PAD (parabolic approximation derivative)

Ten algorytm aproksymuje część profilu (od jego początku, do wystąpienia pierwszego minimum) wielomianem stopnia 2 (f_2), następnie liczy pochodną tego wielomianu, a jako SR (2) (z ang. Slew rate – szybkość narastania) przyjmuje maksymalną wartość obliczonej pochodnej.

$$SR = f_2'_{max} \tag{2}$$



Rys. 3. Metoda PAD. 1-profil magnetyczny, 2-wielomian
Fig. 3. PAD method. 1-magnetic signature, 2-polynomial

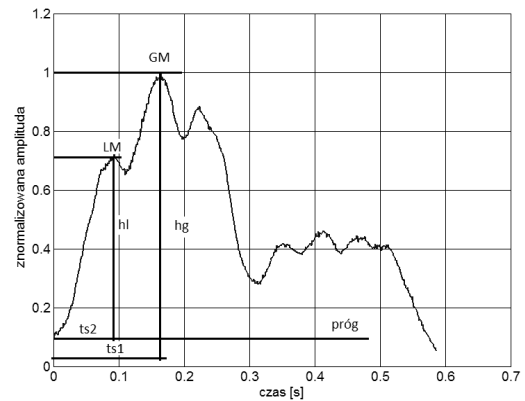
Metoda III. Metoda IV

GM (global maximum). LM (local maximum)

Metody zaproponowane przez Sun C. et al [2] do wyznaczenia SR wykorzystują odpowiednio maksimum globalne i lokalne. Do wyznaczenia stromości zbocza profilu, metody wykorzystują stosunek odległości wartości danego maksimum od wybranego a priori progu (h_l, h_g) do czasu osiągnięcia tych wartości (ts_2, ts_1) (3) i odpowiednio (4)

$$SR_I = \frac{h_g}{ts_1} \tag{3}$$

$$SR_{II} = \frac{h_l}{ts_2} \tag{4}$$



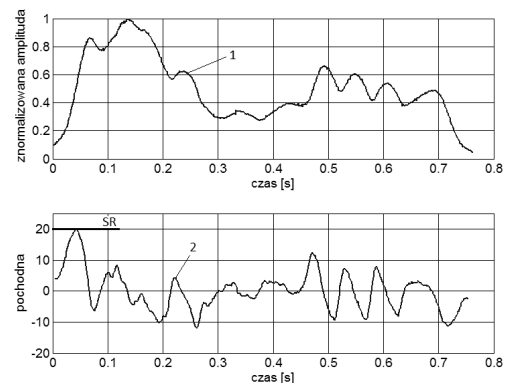
Rys. 4. Metoda GM oraz LM
Fig. 4. GM and LM methods

Metoda V

MPD (magnetic profile derivative)

Metoda ta, zaproponowana przez Gajda J. et al [1] numerycznie różniczkuje cały profil magnetyczny pojazdu, następnie jako wartość proporcjonalną do prędkości pojazdu podaje maksymalną wartość tej pochodnej (5).

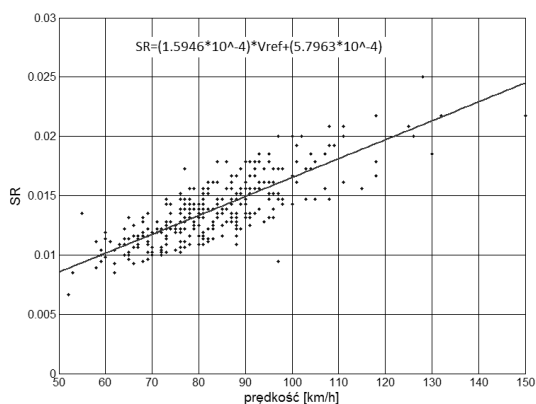
$$\begin{aligned} f_1 &- \text{profil} \\ f_2 &= f_1' \\ SR &= f_{2max} \end{aligned} \tag{5}$$



Rys. 5. Metoda MPD. 1-profil magnetyczny, 2-pochodna
Fig. 5. MPD method. 1-magnetic signature, 2-derivative

4. Estymacja prędkości pojazdu

Rysunek 6 przedstawia populację 319 pojazdów z kategorii pojazdów osobowych dla których wyznaczono współczynnik SR metodą DSL. Prędkość V_{ref} każdego pojazdu została zmierzona za pomocą czujników speed trap. Sposób ten pozwolił na wyznaczenie współczynników a i b równania prostej ($SR=aV_{ref}+b$) dopasowanej metodą najmniejszych kwadratów. Otrzymany model $V=(SR-b)/a$ służy do wyznaczania prędkości kolejnych pojazdów bez udziału czujników speed trap.



Rys. 6. Zależność SR od prędkości – model DSL
Fig. 6. SR to speed relation – DSL model

5. Porównanie metod

W tabeli 1 podano błędy pięciu omawianych algorytmów dla poszczególnych klas pojazdów.

Tab. 1. Porównanie błędów poszczególnych metod [1]
Tab. 1. Comparison of the errors of particular methods

Metoda	Pojazdy osobowe	Van	Autobusy	Pojazdy dostawcze 2 osiowe	Ciężarówki 5 osiowe
I	14,9	23,4	30,0	46,7	339
II	11,8	19,1	18,5	22,3	47,1
III	7,9	26,1	58,5	81,5	372
IV	10,4	27,7	16,6	37,4	100
V	12,2	16,7	18,5	82,1	53,9

Błąd RMS w %

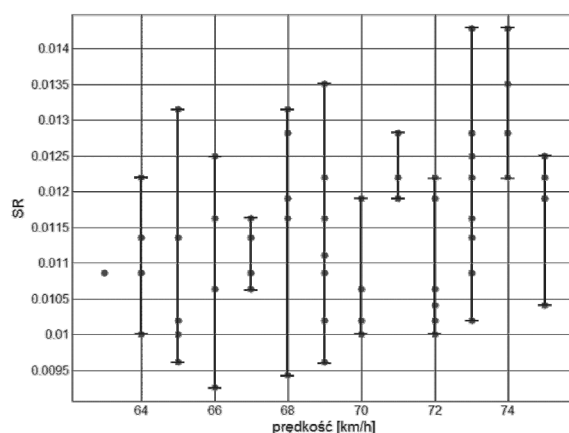
Najmniejszy błąd średniokwadratowy estymacji prędkości uzyskano dla klasy pojazdów osobowych i wyniósł on 7,9 %. W przypadku pojazdów należących do kategorii pojazdy 5-osiowe najmniejszy błąd wyniósł 47,1 %, co oznacza że żaden z proponowanych algorytmów nie jest wystarczająco dokładny dla tej kategorii i szukać należy nowych rozwiązań.

6. Nowe kierunki badań

Propozycje metod wyznaczania SR

Wielkość błędu estymacji prędkości w głównej mierze zależy od wariancji parametru SR w każdym z przedziałów prędkości.

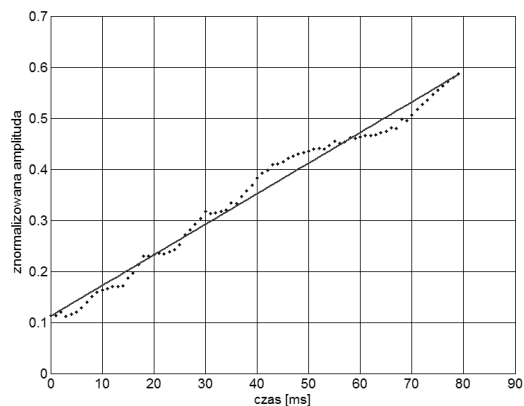
Obliczając SR dowolną metodą dla kilku pojazdów jadących z tą samą prędkością otrzymamy różne wartości tego parametru – rysunek 7. Im mniejsza była by wariancja SR, tym lepiej dopasowany został by model. Dlatego idealną metodą wyznaczania wielkości zależnej od prędkości pojazdu, była by metoda, która na podstawie profili dwóch pojazdów jadących z jednakową prędkością dawałaby dwa identyczne co do wartości parametry. Poszukiwane algorytmy powinny dążyć zatem do minimalizacji wariancji parametru SR.



Rys. 7. Wariancja parametru SR
Fig. 7. Variances of SR parameter

Modyfikacja metody DSL

Metoda ta, biorąc pod uwagę tylko 2 punkty profilu magnetycznego pojazdu (punkty w których profil osiąga wartości amplitudy 0,1 oraz 0,6), jest metodą czułą na niewielkie zmiany profilu w okolicach tych punktów. Z rysunku 1 widać zafalowania profilu w okolicach od około 0,05 do 0,2 oraz od około 0,5 do 0,7 wartości amplitudy. Metodę DSL można by łatwo „uodpornić” na tego rodzaju zafalowania wyznaczając SR jako współczynnik kierunkowy a prostej $y=ax+b$ dopasowanej do próbek profilu w przedziale od 0,1 do 0,6, co przedstawia poniższy rysunek.

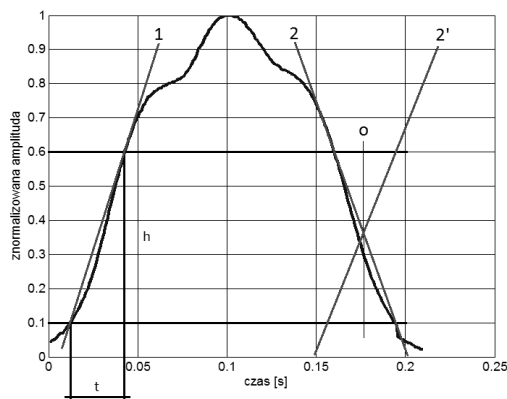


Rys. 8. Modyfikacja metody DSL
Fig. 8. DSL method modification

Średnia nachylenia zboczy

Wszystkie znane metody nie korzystające z pochodnych (metody I III i IV) bazują na zboczach narastającym profilu. Intuicyjnie wydaje się, że zbocze opadające również powinno nieść informację o prędkości pojazdu.

Proponowana w tym miejscu metoda powinna wyznaczać parametr SR jako średnią wartość współczynników prostych będących modelami zbocza narastającego - 1 i odbitego względem prostej o zbocza opadającego - 2'. Metodę ilustruje rysunek 9.



Rys. 9. Metoda – średnia nachylenia zboczy
Fig. 9. Edges mean value method

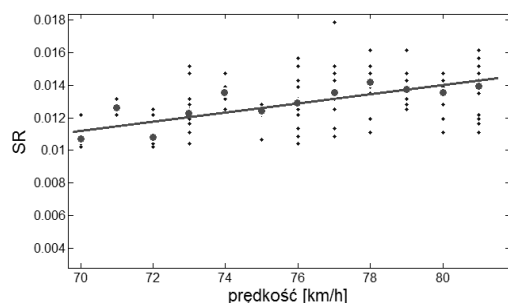
Testy przeprowadzone przez autora wykazały, że metoda ta w przypadku pojazdów należących do kategorii pojazdy osobowe daje błąd rms mniejszy o ponad 3 % (11,47 % zamiast 14,9 %) w stosunku do tradycyjnej metody DSL. Przy obniżeniu górnego progu do 0,5 (zamiast 0,6) błąd tej metody spada do 10,1%. Metoda wymaga dalszych testów (dla innych kategorii pojazdów).

7. Inne podejścia do estymacji prędkości indywidualnej pojazdu

Dotychczas, wszystkie wyżej opisane algorytmy, po wyznaczeniu parametru SR (opisującego szybkość narastania zbocza) bądź maksimum pochodnej, w celu estymacji prędkości wykorzystywały metodę najmniejszych kwadratów do wyznaczenia modelu. Modelem tym była funkcja postaci $y=ax+b$. Dopasowanie modelu do zbioru punktów przy pomocy tej metody jest aproksymacją, a co za tym idzie punkty te nie należą do modelu (za wyjątkiem skończonej liczby punktów). Innym podejściem mogłaby być interpolacja, której zadaniem jest znalezienie funkcji przechodzącej przez zadane punkty.

Mediana i LSE

Nowym rozwiązaniem w estymacji prędkości indywidualnej pojazdu na podstawie parametru proporcjonalnego do zmian prędkości może być metoda, która w algorytmie wyznaczania modelu (LSE) nie wykorzystuje wszystkich parametrów SR, lecz z każdego podzbioru SR dla każdej prędkości oblicza medianę, która następnie bierze udział w wyznaczaniu modelu.

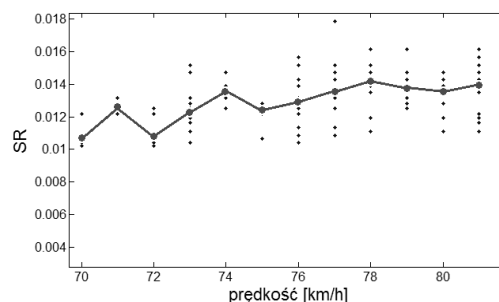


Rys. 10. Metoda mediany oraz najmniejszych kwadratów
Fig. 10. Median and least square estimator method

Metoda ta przedstawiona została na rysunku 10.

Mediana i interpolacja

Kolejna proponowana metoda różniłaby się od wcześniej prezentowanej tym, że zamiast aproksymacji modelu metodą najmniejszych kwadratów, model stanowiłaby interpolacja liniowa punktów będących medianami w każdym przedziale prędkości. Metodę ilustruje rysunek 11.



Rys. 11. Metoda mediany oraz interpolacji
Fig. 11. Median and interpolation method

8. Podsumowanie

Dotychczas stosowane algorytmy estymacji indywidualnej prędkości pojazdów nie dają zadowalających rezultatów. W najlepszym wypadku jest to 7,9 % błędu (rms) w przypadku algorytmu Sun C. et al [2] dla pojazdów osobowych. Przedstawiona przez autora metoda uśredniania nachyleń zboczy obciążona jest błędem 11,47 %; daje ona co prawda 3,43 % przewagi nad metodą klasyczną DSL, jednak wciąż pozostaje w tyle za metodą III (7,9 %). Artykuł przedstawia nowe metody estymacji prędkości na podstawie parametru SR, które jednak wymagają testów. Sensownym rozwiązaniem było by stosowanie algorytmu estymacji prędkości innego dla każdej klasy pojazdów, co jest możliwe po uprzednim zastosowaniu algorytmów klasyfikacji pojazdów.

Opracowanie jest częścią projektu badawczego nr N N505 375537, finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

9. Literatura

- [1] Gajda J., Sroka R., Stencel M., Żegleń T.: Measurement of Road Traffic Parameters Using an Inductive Single-Loop Detector, 9th International Symposium on Electrical Instruments in Industry, Glasgow 1997.
- [2] Sun C., Ritchie S.: Individual Vehicle Speed Estimation Using Single-Loop Inductive Waveforms, California PATH Working Paper, 1999.
- [3] Gajda J., Stencel M.: Determination of Road Vehicle Types Using an Inductive Loop Detector, XIV IMEKO World Congress, Tampere, Finlandia, 1997.

otrzymano / received: 02.07.2010
przyjęto do druku / accepted: 02.08.2010

artykuł recenzowany