

CHRZAN Marcin¹
CISZEWSKI Tomasz²

WYKORZYSTANIE TECHNOLOGII SATELITARNEJ DO PRECYZYJNEGO WYZNACZANIA POŁOŻENIA WAD W SZYNACH KOLEI DUŻYCH PRĘDKOŚCI

W artykule przedstawiono koncepcję wydzielenia sygnałów satelitarnych na potrzeby wyznaczania precyzyjnego położenia wad w szynach kolei dużych prędkości. Zostanie zaprezentowany model systemu wraz z jego aplikacją podczas rzeczywistych badań. Problem szybkiej identyfikacji uszkodzeń, a w szczególności ich położenia, będzie istotnym warunkiem prawidłowego utrzymania szlaków kolejowych przy jednoczesnym podniesieniu prędkości technicznej pociągów.

USE OF SATELLITE TECHNOLOGY FOR PRECISION DETERMINING POSITION DEFECTS IN HIGH SPEED RAIL

This paper presents the concept of separation of the satellite signals for determining the precise location of defects in the high-speed rail. System model will be presented along with its application during the actual testing. The problem of rapid identification of defects, in particular their location, will be an important prerequisite for proper maintenance of railway routes, while increasing the technical speed of trains.

1. WSTĘP

Na całym świecie tworzone są systemy wykorzystujące elementy nawigacyjne do precyzyjnej kontroli ruchu powietrznego i naziemnego. Jednym z takich systemów jest powstały w USA system satelitarny NAVSTAR/GPS w skrócie zwany dalej GPS (*Global Positioning System*). Dane nawigacyjne z tego systemu wykorzystywane są na szeroką skalę w technice wojskowej, nawigacji morskiej i lotniczej oraz w aplikacjach motoryzacyjnych.

W zastosowaniach kolejowych system ten jest wprowadzany przez zarządy kolei amerykańskich, francuskich, niemieckich do wyznaczania położenia anteny odbiornika znajdującego się na lokomotywie a tym samym wyznaczenia określonych współrzędnych

¹ Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki; 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29.
Tel: + 48 48 361-77-00, 361-77-32, Fax: + 48 48 361-77-42, E-mail: m.chrzan@pr.radom.pl

² Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki; 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29.
Tel: + 48 48 361-77-00, 361-77-16, Fax: + 48 48 361-77-42, E-mail: t.ciszewski@pr.radom.pl

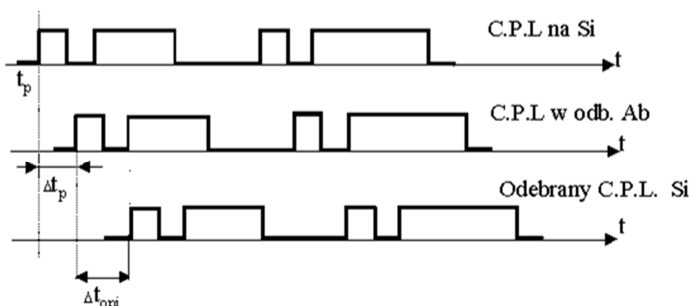
całego pociągu lub jego elementów. Aplikacja ta wynika z faktu, że wykorzystywane dzisiaj systemy zabezpieczenia ruchu kolejowego wymagają dużej ilości infrastruktury przytorowej narażonej na dewastację.

Szybki rozwój techniki telekomunikacyjnej i nawigacji satelitarnej stwarza dla kolei nowe możliwości realizacji funkcji prowadzenia i kierowania ruchem pociągów a także identyfikacji elementów infrastruktury z wykorzystaniem map cyfrowych. Na tym tle istnieje potrzeba określenia dla PKP programu wdrażania systemów wykorzystujących nowe techniki i technologie, umożliwiającą koncentrację i automatyzację funkcji prowadzenia i kierowania ruchem pociągów a jednocześnie umożliwiające pełną inwentaryzację elementów infrastruktury. Dlatego wyzwaniem dla kolei staje się opracowanie koncepcji prowadzenia badań szlaków kolejowych z wykorzystaniem radiowej transmisji danych i satelitarne systemu pozycjonowania (GPS). Przedstawiona w artykule koncepcja wykorzystania sygnałów pozyskiwanych z systemu GPS do precyzyjnego wyznaczania wad w szynach kolejowych może stanowić podstawę do zmiany jakościowej w identyfikacji miejsc niebezpiecznych na szlaku kolejowym.

2. OKREŚLENIE POZYCJI ZA POMOCĄ SATELITÓW SYSTEMU GPS

Zasada określania pozycji w systemie GPS opiera się na jednoczesnym pomiarze parametrów nawigacyjnych względem kilku satelitów obserwowanych ponad powierzchnią horyzontu.

Jeżeli przyjmijemy, że ciągi C/A i P są generowane na satelitach i w odbiornikach użytkowników w jednolitym czasie (jak na rys. 1), to wówczas czas propagacji FEM odpowiada opóźnieniu pomiędzy początkiem ciągu repliki dla danego satelity, generowanej w odbiorniku a ciągiem odebrany przez odbiornik od określonego satelity.



Rys. 1 Ciągi generowane w satelicie i odbiorniku

Mając R_i , $i = 1, 2, 3, 4$ oraz współrzędne satelitów S_i , $i = 1, 2, 3, 4$ możemy napisać równanie:

$$R_i = \sqrt{(S_{x_i} - U_x)^2 + (S_{y_i} - U_y)^2 + (S_{z_i} - U_z)^2} \quad (1)$$

gdzie: $R_i = \Delta t_{opi} \cdot C$ - promień powierzchni pozycyjnej,
 S_x, S_y, S_z - znane współrzędne satelity,
 U_x, U_y, U_z - poszukiwane współrzędne pozycji odbiornika,
 R_i - pomierzona odległość do S_i .

Powyższe założenia dotyczące jednolitego czasu w istotny sposób komplikują konstrukcję odbiornika i w istotny sposób zwiększają jego cenę.

Rzeczywiste odbiorniki nie posiadają jednolitego czasu. Zatem replika ciągu wytwarzana w odbiorniku nie jest w fazie z ciągiem generowanym na satelicie, posiada dowolne opóźnienie Δt . Zakładamy, że mierzymy również opóźnienie w czasie pomiędzy ciągiem-repliką wygenerowanym w odbiorniku a ciągiem odebrany z satelity Δt_{opi} , jak przedstawia rysunek 1. Wyznaczona odległość na podstawie tego opóźnienia nie będzie faktyczną odległością do satelity, nazywamy ją pseudoodległością d_i^* , $i = 1, 2, 3, 4$.

$$d_i^* = R_i + c \cdot \Delta t_i \quad (2)$$

Zastosowanie metody odległościowej w celu określenia współrzędnych użytkownika w przestrzeni trójwymiarowej oraz korekcji skali czasu w odbiorniku wiąże się z rozwiązaniem układu równań z czterema niewiadomymi:

$$\begin{aligned} d_1^* &= c\Delta t_1 = |\vec{r}_1 - \vec{R}| + \Delta\tau \times c \\ d_2^* &= c\Delta t_2 = |\vec{r}_2 - \vec{R}| + \Delta\tau \times c \\ d_3^* &= c\Delta t_3 = |\vec{r}_3 - \vec{R}| + \Delta\tau \times c \\ d_4^* &= c\Delta t_4 = |\vec{r}_4 - \vec{R}| + \Delta\tau \times c \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie: d_{1-4}^* - zmierzone pseudoodległości,

$|\vec{r}_{1-4} - \vec{R}| = d_{1-4}$ - rzeczywiste odległości pomiędzy obiektem a poszczególnymi satelitami,

R - wektor łączący obiekt ze środkiem układu współrzędnych (środkiem Ziemi),

$\Delta\tau$ - błąd skali czasu użytkownika w stosunku do skali czasu systemu GPS

c - prędkość propagacji fal radiowych.

Z analizy czynników mających wpływ na dokładność określania pozycji obiektu wynika, że największą dokładność zapewniają pomiary dokonane wobec satelitów umieszczonych nisko nad horyzontem. Istotne zatem znaczenie ma układ geometryczny aktualnie wykorzystywanych satelitów. Wielkością charakteryzującą wpływ geometrii układu satelitów na dokładność pomiaru jest tzw. współczynnik geometryczny i oznaczany w literaturze jako GDOP (*Geometric Dilution of Precision*). Współczynnik GDOP jest definiowany jako:

$$GDOP = \sqrt{\Gamma_{\varphi\varphi} + \Gamma_{\lambda\lambda} + \Gamma_{HH} + \Gamma_{tt}} \quad (4)$$

gdzie: $\Gamma_{\varphi\varphi}$, $\Gamma_{\lambda\lambda}$, Γ_{HH} , Γ_{tt} - składowe błędy pozycji obiektu odpowiednio dla szerokości geograficznej, długości geograficznej, wysokości oraz czasu.

Na podstawie analizy zależności współczynnika Γ od parametrów przestrzennych systemu można wnioskować, że:

- istnieje dolne ograniczenie wysokości satelitów wywołane wpływem troposfery oraz ograniczenie górne wynikłe z dokładności pomiarów parametru nawigacyjnego,
- istnieją granice tolerancji nierównomierności rozłożenia satelitów na linii wysokości,
- zmiany różnicy azymutów między dwoma satelitami w granicach $60^\circ \div 80^\circ$ nie powodują istotnego wzrostu współczynnika geometrycznego,
- obserwacja jednego z trzech satelitów na większej wysokości kątowej niż zalecana nie wpływa znacząco na wzrost współczynnika geometrycznego,
- zmiana położenia czwartego satelity powoduje zmianę składowych współczynników geometrycznych, zwłaszcza współczynnika związanego z wysokością obiektu.

Z powyższego wynika potrzeba jednoczesnej widzialności co najmniej czterech satelitów GPS.

3. WYKORZYSTANIE TECHNIKI SATELITARNEJ DO POZYCJONOWANIA WAD W SZYNACH W WAGONIE DIAGNOSTYCZNYM

Koncepcja zbudowania i wdrożenia do eksploatacji wagonu defektoskopowego powstała w latach 90 ubiegłego wieku. Była spowodowana koniecznością prowadzenia badań masowych szyn kolejowych, co z kolei wiązało się z prędkością pomiaru. Pierwsza wersja wagonu jak i dalsze wersje rozwojowe powstawały na Politechnice Radomskiej przy czynnym udziale byłych pracowników tworzących aplikacje sprzętowe.



Rys.2 Wagon defektoskopowy [źródło PLK-SA]

Ze względu na tematykę artykułu w dalszej części zostanie omówiona część wagonu dotycząca wyznaczania pozycji wad w szynach z wykorzystaniem technologii satelitarnej. Ze względu na częstotliwość odświeżania pomiarów (1Hz) w zastosowanym dla potrzeb badań sprzęcie ujawnił się dotkliwy problem wyznaczania położenia automatu między kolejnymi pomiarami.

Ponieważ w trakcie badań diagnostycznych toru wagon defektoskopowy znajduje się w ruchu z typową prędkością badawczą ok. 10 m/s to w trakcie badań mimo stosunkowo dużej precyzji wyznaczania położenia (0,7-2m) pomiędzy kolejnymi odczytami położenia

wagon przemieszczał się znacznie (ok. 10 m) pomiędzy kolejnymi odczytami (a wynikające stąd błędy pomiaru znacznie przekraczały błędy odczytu pozycji GPS). Z tego powodu dla potrzeb wyznaczania położenia między odczytami opracowano prostą metodę interpolacji położenia.

Warunkiem koniecznym poprawności interpolacji jest duża bezwładność pojazdu. W przypadku pojazdów kolejowych ten warunek wydaje się być spełniony. W praktyce badań sprawdzono dwie metody interpolacji wielomianowej (zerowego i pierwszego stopnia). W prostrzej z metod założono, że w odcinkach pomiędzy kolejnymi pomiarami wagon defektoskopowy porusza się cały czas z ostatnio odczytaną prędkością (stąd wymaganie bezwładności).

Zmianę położenia na trasie wyznacza się wówczas rzutując przejechaną drogę Δs na graf obrazujący trasę:

$$\Delta s = V_i \cdot t \quad (5)$$

W drugim sposobie pod uwagę wzięto dwie ostatnie odczytane prędkości. Kolejną wyznaczamy z liniowej zależności jaką wyznaczają dwie ostatnio odczytane prędkości.

W tym wypadku nową prędkość wyznaczamy z zależności:

$$V_{i+1} = \frac{V_i - V_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} (t_{i+1} - t_{i-1}) + V_{i-1} \quad (6)$$

Bieżąc pokonaną drogę uzyskamy całkując numerycznie uzyskaną funkcję prędkości w czasie

$$\Delta S = \int_{t_i}^{t_{i+1}} V(t) \quad (7)$$

Drogę podobnie jak poprzednio odkładamy na grafie opisującym drogę poprzez rzutowania na poszczególne odcinki grafu.

Ze względu na duże bezwładności pojazdów kolejowych (prędkość pomiarowa max około 50 km/h) obie metody w praktyce dają podobne rezultaty.

4. KONCEPCJA WYKORZYSTANIE TECHNIKI SATELITARNEJ DO POZYCJONOWANIA WAD W SZYNACH W RĘCZNYM DEFEKTOSKOPIE DIAGNOSTYCZNYM

Głównym problemem masowych badań defektoskopowych szyn jest posiadanie przez PKP jednego wagonu defektoskopowego. Dlatego też istnieje potrzeba wyposażenia regionalnych zakładów PLK w większą liczbę ręcznych defektoskopów. Badania takie są wykonywane obecnie na terenie Polski przez 24 zespoły defektoskopowe wyposażone w urządzenia ultradźwiękowe umieszczone na wózkach, jednak „wydajność” pomiarowa w tym przypadku wynosi od 6 – 9 km toku szynowego dziennie.



Rys.3 Pomiar szyny wózkiem defektoskopowym [źródło PLK-SA]

Urządzenia te diagnozują wady w szynach, lecz nie podają ich położenia względem szlaku kolejowego. Zastosowanie odbiorników satelitarnych jako źródło wyznaczania pozycji wad może wpłynąć na znaczne uproszczenie i przyspieszenie identyfikacji odcinków szyn o uszkodzonej strukturze.

Do badań na szlaku kolejowym wykorzystano wózek defektoskopowy wyposażony w odbiornik Magellan AC 12 z anteną zewnętrzną magnesową rys 4.

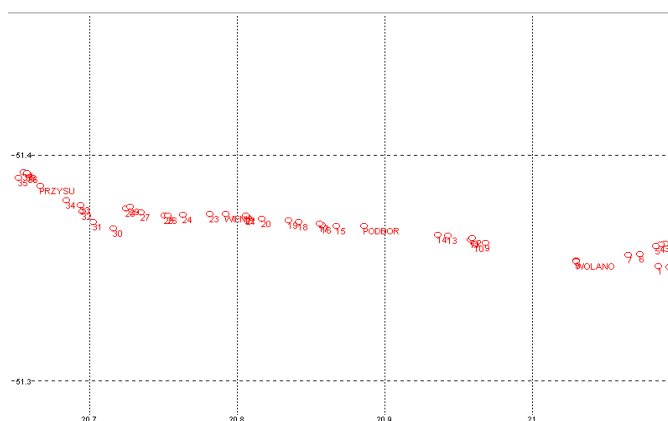


Rys. 4 antena GPS zainstalowana na wózku defektoskopowym

Weryfikacji pomiarów dokonano na szlaku kolejowym Wolanów – Przysucha (rys. 5 i 6). Podczas pomiarów ręcznych weryfikowany był pomiar automatyczny z wagonu defektoskopowego.



Rys.5 Badania na szlaku kolejowym



Rys. 6 Pomiary położenia wad w szynach z wykorzystaniem odbiornika GPS i wózka defektoskopowego z zainstalowanym defektoskopem Metrison DI60

Podczas pomiarów zweryfikowano również możliwość zmiany kąta nachylenia anteny względem wózka pod wpływem prowadzenia go przez operatora. Wyniki pomiarów prezentuje Tabela 1.

Tabela 1 Zestawienie badań położenia anteny odbiornika nawigacyjnego na wózku pomiarowym

Położenie	Zmierzona długość geograficzna	σ długości [m]	Zmierzona szerokość geograficzna	σ szerokości [m]
10 ⁰	21.902424	0,63	51.350241	0,45
20 ⁰	21.902321	0,59	51.350364	0,43
30 ⁰	21.902443	0,61	51.350294	0,44

Tabela 1 ilustruje wpływ zmiany położenia anteny na odbiór sygnału. W warunkach rzeczywistych odpowiadało to sytuacji, kiedy defektoskop był przemieszczany przez operatora wzdłuż toku szynowego. Ze względu na możliwości techniczne udało się

wyeliminować wpływ wielodrożności propagacyjnej przez wybranie terenu mało zurbanizowanego. Badania wykonano z dyskretnością 0,1s (możliwa rozdzielczość pomiaru odbiornika GPS) dla kąta nachylenia anteny odbiorczej (10,20,30) stopni.

5. WNIOSKI

W przypadku dobrej widoczności satelitów i korzystania z systemów różnicowych niedokładność wyznaczania położenia sięgała około 8 m. co było nie do przyjęcia dla planowanego zastosowania. Tak duży błąd lokalizowania obiektu był rezultatem przemieszczania się wagonu w okresach między kolejnymi odczytami położenia. Niska (choć typowa dla odbiorników GPS) częstotliwość odświeżania pomiaru (1Hz) powodowała, że przy prędkości badań diagnostycznych (do 10 m/s) zmiana położenia pojazdu była na tyle duża, że dewalutowała uzyskane dość dokładne wyniki pomiaru. W przypadku wózka defektoskopowego problem ten nie występuje, ponieważ wózek porusza się z prędkością nie wpływającą na dyskretyzację pomiaru.

Z tego powodu zastosowano prostą metodę interpolacji liniowej, która znacznie poprawiła otrzymane rezultaty. W przypadku jej użycia błędy lokalizacyjne nie przekraczały zwykle 1 m (przy dostępności korekcji różnicowej), co jest wynikiem zadawalającym z punktu widzenia planowanego zastosowania. W trakcie badań dostępność korekcji przekraczała 99% czasu badań, co oznacza, że w praktyce można wykorzystywać system satelitarny do tego rodzaju pomiarów.

Dokładność systemów satelitarnych nie jest wysoka tak aby mogły być one bezpośrednio wykorzystywane do metkowania pomiarów, jednak ze względu na praktykę weryfikacji rezultatów automatycznych badań ultradźwiękowych przez badania prowadzone ręcznie uzupełnienie wskazań lokalizacji wady względem obiektów na szlaku kolejowym jest cenne, gdyż znalezienie wady przez załogę weryfikującą staje się łatwiejsze jeśli załoga defektoskopowa będzie wyposażona w odbiornik GPS.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Chrzan M., Łukasik Z., Kęska K.: Positioning systems for railway means of transport. The telematic locating train methods, Computer systems aided science and engineering work in transport, mechanics and electrical engineering, Radom 2008. Rozdział w Monografii, Nr 122, str. 61-67. ISSN 1642-5278
- [2] T. Ciszewski: Correlation method of calibrating multi-channel ultrasonic flow detector for the automatic testing rails and wheels, *Prace Naukowe Transport z.61 Technika Komputerowa w systemach transportowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007, ISSN 1230-9265, pp. 97-107
- [3] T. Ciszewski, Z. Łukasik: "Improving the method of the calibration multichannel ultrasonic flaw detectors for measurements with angle probes", *AEEE (Journal of Advances in Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Electrical Engineering)*, No. 1-2 Vol. 7/2008, Zilina University
- [4] Bojarczak P., Chałko L., Dobrosławski T., Gołąbek P., Lesiak P., Pawełczyk M.: "Mobile diagnostics of the sideway faulty state detection devices for railway cars". Reliability, safety and diagnostics of transport structures and means 2008". University of Pardubice, Czech Republic, 25-26 September 2008, p. 180-188
- [5] Lesiak P.: Mobilna diagnostyka szyn w torze kolejowym. Wyd. Politechniki Radomskiej, seria monografie, nr 116, Radom 2008, stron 202.