

## TEST OF PRECISION OF GPS POSITIONING SYSTEMS DEDICATED FOR AGRICULTURAL MACHINERY POSITIONING

### Summary

*Global positioning system, (GPS) has many civil applications. One of them is precision agriculture where GPS is applied in soil mapping, and agricultural machinery guidance. This last field of application makes high requirements for precision and reliability for positioning system. In this work the static and dynamic test of one widely applied in precision agriculture receiver AgGPS 132 was made. As the result of this test it was ascertained, that this system provides almost sub-meter repeatability of position measurement without any own reference station, and can be applied in machine guidance in such operations as fertiliser spreading.*

## BADANIA DOKŁADNOŚCI POMIARU POZYCJI MASZYN W TERENIE OTWARTYM ZA POMOCĄ SATELITARNEGO SYSTEMU GPS, DEDYKOWANEGO DLA ZASTOSOWAŃ ROLNICZYCH

### Streszczenie

*Globalny system pozycjonowania obiektów (GPS) znajduje obecnie wiele cywilnych zastosowań. Jednym z nich jest tzw. rolnictwo precyzyjne, gdzie GPS jest stosowany do sporządzania map glebowych, map plonów, oraz do prowadzenia maszyn rolniczych po polu. To ostatnie zastosowanie stwarza bardzo wysokie wymagania odnośnie dokładności i niezawodności działania systemu nawigacyjnego. W ramach pracy przedstawiono własne badania statyczne i dynamiczne dokładności jednego z powszechnie stosowanych w rolnictwie precyzyjnym, specjalnie dedykowanego dla zastosowań rolniczych systemu AgGPS 132. Ustalono, że nawet bez zastosowania własnej stacji referencyjnej można uzyskać powtarzalność pomiaru pozycji w granicach 1 m co pozwala na zastosowanie systemu w zabiegach rozsiewania nawozu.*

### Wprowadzenie

Od czasu pełnego udostępnienia do cywilnego użytku amerykańskiego systemu GPS (Navstar), satelitarne systemy pozycjonowania obiektów ruchomych weszły niezwykle szybko do praktycznego użytku, niemal we wszystkich dziedzinach ludzkiej działalności, w których zachodzi potrzeba wyznaczania położenia geograficznego obiektu w otwartej przestrzeni. Ograniczając się do rolnictwa, system GPS znalazł przede wszystkim zastosowanie w pomiarach granic pól uprawnych dla potrzeb zarządzania agrotechniką i pozyskiwania niezbędnych danych geodezyjnych do wniosków o dotacje bezpośrednie UE, do sporządzania map zasobności gleb, plonów, a wreszcie do automatycznego lub półautomatycznego prowadzenia maszyn po zaplanowanych trajektoriach. System ten można także wykorzystać do kontroli pracy maszyn, podobnie jak w transporcie, oraz jako precyzyjny wzorzec czasu.

Obecnie GPS nie jest już jedynym takim systemem. Konkuruje z nim systemy takie jak rosyjski Glonass, czy europejski system Galileo, którego budowę niedawno rozpoczęto. Przydatność systemu pozycjonowania do zamierzonych celów zależy od jego dokładności. Nawigacja drogowa, sporządzanie map glebowych, zwykle nie wymagają najwyższej dokładności pomiaru pozycji, stąd standardowa obecnie osiągalna dokładność pomiaru położenia w granicach 15 m może być w zupełności wystarczająca. Dokładne pomiary geodezyjne, prowadzenie maszyn po wyznaczonej trajektorii, wymagają jednak dokładności większej w granicach kilkunastu centymetrów a nawet milimetrów. Takie pomiary wymagają już zastosowania pomiarów różnicowych tzw. DGPS, w których określa się położenie ruchomego odbiornika względem nieruchomej stacji bazowej z odbiornikiem referencyjnym.

### Dokładność GPS

Dokładność GPS zależy od bardzo wielu czynników uwarunkowanych ogromną złożonością tego systemu. Dla zrozumienia istoty błędów występujących przy pomiarach pozycji geograficznej za pomocą GPS należy pokrótce scharakteryzować jego działanie. W geodezji położenie danego punktu pomiarowego określa się zwykle w sposób względny, metodą tzw. triangulacji. Polega ona na tym, że jeśli znamy dokładne współrzędne dwóch punktów bazowych, to współrzędne punktu trzeciego można obliczyć na podstawie znanych zależności trygonometrycznych, mierząc albo dwa kąty przyległe do znanego boku trójkąta o zmierzonej długości, albo mierząc długości pozostałych boków tegoż trójkąta, czyli boków łączących dane punkty z punktem, którego współrzędne są poszukiwane. W przestrzeni trójwymiarowej zamiast trójkąta mamy do czynienia z czworościanem.

Jako punkty bazowe w systemie GPS służą trzy satelity systemu, które odbiornik GPS wybiera sobie spośród widocznych nad horyzontem tak, by błąd pomiaru wypadł jak najmniejszy. Optymalna konfiguracja satelitów bazowych jest wtedy, gdy razem z punktem wyznaczanym, wyznaczają one czworościan o kształcie jak najlepiej zbliżonym do regularnego, tj. o równych krawędziach. W przypadku, gdy satelity bazowe leżą zbyt blisko siebie, kąt wierzchołkowy takiego czworościanu wypada zbyt mały, co prowadzi do znacznych błędów obliczania pozycji, nawet przy małych błędach pomiaru odległości. Ponieważ wszystkie satelity systemu poruszają się po swoich orbitach z prędkością kosmiczną, konfiguracja satelitów na niebie jest szybkozmienna. Odbiornik GPS musi śledzić te satelity i w miarę ich pojawiania się nad horyzontem i zachodzenia, zmieniać

satelity bazowe. Pomiar odległości pomiędzy wyznaczonym punktem a danym satelitą odbywa się poprzez pomiar czasu propagacji sygnału radiowego od satelity do odbornika GPS. Sygnał ten jest nadawany na dwóch częstotliwościach nośnych zwanych L1 i L2, z których w odbiornikach cywilnych wykorzystywana jest głównie częstotliwość L1 (całkowicie 1500 MHz). Częstotliwość ta niesie, nadawany w ściśle określonych chwilach czasu wyznaczonych przez zegar atomowy zainstalowany na satelicie, cyfrowy kod pseudolosowy, według którego odbiornik rozpoznaje satelitę, z którego on pochodzi. Odbiornik GPS mierzy przesunięcie czasowe pomiędzy chwilą odbioru a chwilą nadania. Na tej podstawie obliczana jest – poprzez pomnożenie tego czasu przez prędkość fali radiowej (prędkość światła), tzw. pseudoodległość. Ponieważ jednak zegary kwarcowe odbiorników GPS nie są tak dokładne jak zegary atomowe satelitów, istnieje konieczność ich synchronizacji, co wymaga zmierzenia dodatkowej, czwartej pseudoodległości, na podstawie której można skorygować błąd zegara odbiornika. Wymaga to rozwiązania odpowiedniego układu równań, co wykonuje procesor odbiornika GPS. Pozycje satelitów bazowych są wyznaczane na podstawie znanych parametrów ich orbit. Ewentualne zakłócenia tych orbit wymagają korygowania tychże parametrów. Wartości korekt są przekazywane do odbiornika z satelity w ściśle wyznaczonych odstępach czasowych. Aby wyznaczyć precyzyjnie parametry orbit satelitów systemu istnieje na całej Ziemi szereg stacji naziemnych dokonujących nieprzerwanym pomiarów orbit satelitów systemów z ogromną dokładnością pojedynczych milimetrów. Pozycja odbiornika jest wyznaczana w skomplikowanym procesie obliczeniowym, w którym każda wchodząca w grę wielkość jest obciążona pewnym błędem. Błąd wynikowy jest zależny od tych błędów składowych, jak też od jakości algorytmu obliczeniowego, który może zawierać różne procedury filtrowania błędów losowych, w tym także błędów grubych.

Ponieważ każdy odbiornik ustawiony w tym samym miejscu może bazować na nieco innym zestawie satelitów (średnio nad horyzontem znajduje się ok. 12 satelitów z 24 wchodzących w skład systemu Navstar) oraz fakt, że różna jest jakość układów elektronicznych odbiorników, szczególnie w jego części analogowej, a także różne algorytmy przetwarzania odbieranych sygnałów, wyniki pomiaru dokonane za pomocą różnych odbiorników w tym samym miejscu czasie, mogą być różne.

Najistotniejszą przyczyną błędów są zmiany stanu atmosfery (szczególnie jonosfery) powodujące fluktuacje prędkości rozchodzenia się fal radiowych. Zakłócenia te można usunąć stosując technikę pomiarów różnicowych DGPS. W pomiarach różnicowych błędy pomiaru tych samych pseudoodległości, jako jednakowe dla obu odbiorników, znoszą się całkowicie, gdy odbiorniki stoją na tym samym punkcie. W miarę wzrostu odległości pomiędzy odbiornikiem ruchomym i referencyjnym, błędy te narastają. Zamiast stosować własny, bardzo kosztowny odbiornik referencyjny można skorzystać ze stacji referencyjnych dostępnych komercyjnie, lub bezpłatnego serwisu, w którym poprawki błędów spowodowanych zakłóceniami atmosferycznymi są dostarczane do odbiornika GPS z satelity geostacjonarnej. W USA System ten nosi nazwę WASC. Jego europejskim odpowiednikiem jest system EGNOS. Technologia DGPS pozwala na pomiar wektorów (odległości pomiędzy dwoma odbiornikami) z dokładnością rzędu pojedynczych milimetrów. Aby taką dokładność osiągnąć

stosuje się technikę RTK (Real Time Kinematic), która polega na śledzeniu przesunięcia fazowego częstotliwości nośnej pomiędzy odbiornikiem ruchomym i nieruchomym. Jest to, jak dotąd, technologia bardzo kosztowna. Jakkolwiek zasada działania takiego systemu wydaje się bardzo prosta, to jego zasadniczą wadą jest niejednoznaczność wyniku obliczeń pozycji, wynikająca z faktu, iż to samo przesunięcie fazowe może występować w wielu stosunkowo blisko siebie położonych punktach na powierzchni Ziemi, co wymaga zastosowania dodatkowych skomplikowanych procedur dla usunięcia tej niejednoznaczności.

Innym nieskomplikowanym sposobem poprawiania dokładności pomiaru jest klasyczne postępowanie statystyczne, w którym wynik pomiaru nieznannej wartości wielkości mierzonej wyznaczany jest jako średnia arytmetyczna z wielu pomiarów. Jak wiadomo, przy założeniu losowego rozkładu błędów, średnia ta dąży asymptotycznie do nieznannej wartości rzeczywistej mierzonej wielkości. Tę procedurę można jednak stosować jedynie w pomiarach geodezyjnych. Nie nadaje się ona do stosowania na obiektach ruchomych, ze względów dość oczywistych.

Drugą, poważną przyczyną błędów jest wielotorowość, tj. możliwość dochodzenia do odbiornika oprócz sygnału bezpośredniego również sygnałów odbitych od Ziemi lub budynków. Można temu przeciwdziałać za pomocą specjalnych konstrukcji układów elektronicznych oraz ekranów osłaniających anteny odbiornika od szkodliwych sygnałów odbitych. Do dalszych przyczyn obniżenia dokładności należy zaliczyć błędy zegarów atomowych satelitów i zegarów kwarcowych odbiorników, błędy wyodrębnienia zboczy sygnałów cyfrowych nadawanych przez satelity, niedokładności algorytmów zaimplementowanych w odbiorniku, błędy pomiaru parametrów orbit satelitów itp. W układach sterowania maszyn ważne jest również opóźnienie (latency) pomiędzy chwilą, której dotyczy pomiar pozycji, a chwilą dostarczenia przez odbiornik GPS danych o tej pozycji do systemu nadrzędnego. Czas ten wynosi ok. 100 ms i może być różny dla różnych odbiorników. Jak widać, błędy pozycjonowania zależą od tak wielu zmiennych czynników, że nie mogą one być jednoznacznie wyznaczone teoretycznie. Wynika stąd potrzeba empirycznego badania danego systemu na obszarze, na którym ma on być eksploatowany, gdyż w różnych punktach Ziemi błędy te mogą się różnić. W literaturze można spotkać wiele publikacji dotyczących wyznaczania dokładności prowadzenia maszyn według GPS, jak również dokładności pomiarów pozycji dokonywanych za pomocą GPS. Pomiaru te mogą być wykonywane w warunkach statycznych, gdy odbiornik jest nieruchomy, lub w warunkach dynamicznych, gdy odbiornik porusza się na pojeździe. Metody badania bywają też przedmiotem standaryzacji w różnych krajach [3].

Testowanie odbiornika GPS w warunkach statycznych polega zwykle na zapisywaniu do pliku wyników pomiarów dokonywanych przez GPS zainstalowany w punkcie o znanych współrzędnych i następnie statystycznej analizie tych wyników. W rezultacie takiej analizy otrzymujemy parametry rozkładu statystycznego błędów, takie jak błąd średni w danym przedziale czasu, błąd maksymalny, odchylenie standardowe czy kwantyle rozkładu błędów. Badanie dynamiczne jest trudniejsze, gdyż wymaga jednoczesnego pomiaru pozycji rzeczywistej metodą gwarantującą dokładność co najmniej o rząd wyższą niż wynosi dokładność badanego odbiornika. Najczęściej wykorzystuje się do tego celu system RTK GPS gwarantujący dokładność pomiaru

na poziomie 1-2 cm [2, 5, 6]. Pozostaje jednak niepewność co do działania systemu wzorcowego. Stąd niektórzy autorzy porównują wyniki badań uzyskane jeszcze innymi metodami. Najprostszym sposobem jest wymuszenie ruchu odbiornika po ściśle wyznaczonej trajektorii, np. wzdłuż rozciągniętego drutu lub promienia laserowego. W ten sposób można sprawdzić sam odbiornik, jednak nie można testować systemu automatycznego prowadzenia maszyny (parallel tracking). Aby to umożliwić opracowano, oprócz zastosowania RTK GPS, inne metody. W pracy [1] zastosowano metodę polegającą na rozłożeniu na powierzchni w wybranych punktach trasy specjalnych ślizgów metalowych, po których przeslizguje się poprzeczna belka zaczepiona za ciągnikiem. Na belce umieszczono szereg styków elektrycznych, które są zwierane przez ślizg umieszczony na gruncie. W ten sposób można wyznaczyć z dużą dokładnością wartość zboczenia ciągnika z zadanego toru w wybranych punktach tego toru, rozlokowanych wzdłuż niego.

Porównując obie metody autorzy stwierdzają, że uzyskane obydwoma metodami wyniki są zgodne. Zauważają oni jednak, że oba systemy, DGPS oraz RTK GPS, bazują na tej samej metodzie pomiaru pozycji, co może w warunkach odbioru zbyt słabego sygnału GPS prowadzić do pojawiania się grubych błędów [1].

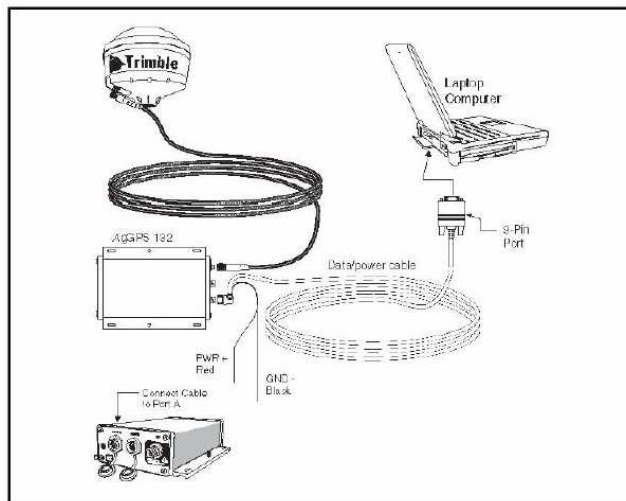
Jakkolwiek w literaturze można znaleźć więcej wyników badań dokładności odbiorników GPS, wciąż istnieje potrzeba prowadzenia nowych badań, a to z uwagi na różnice dokładności pomiaru wynikające z różnych stref geograficznych, dostępności stacji referencyjnych, specyfiki ukształtowania terenu a nawet ukształtowania maszyn, na których instaluje się taki odbiornik. Nie bez znaczenia jest fakt, że sam system GPS jest wciąż udoskonalany. Stare satelity zastępowane są nowymi, z lepszymi wzorcami czasu, udoskonalany jest też system śledzenia orbit i opracowywania poprawek różnicowych, co na ogół podnosi dokładność pomiarów. Możliwa jest też degradacja systemu czy to przez celowe zakłócanie jego pracy, czy też starzenie się niezwykle skomplikowanej aparatury całego tego systemu.

### Cel badań własnych

Głównym celem własnych badań było uzyskanie obiektywnych danych potrzebnych dla określenia przydatności danego odbiornika, przeznaczonego do zastosowań agrotechnicznych (Trimble Ag GPS 132), do prowadzenia maszyn po równoległych ścieżkach oraz oszacowanie potencjalnych błędów takiego prowadzenia. Oszacowanie takie może być dokonane na podstawie symulacji komputerowej ruchu agregatu na polu, co wymaga utworzenia modelu błędu pomiaru pozycji dla danego odbiornika GPS. Do tego celu potrzebne są dane empiryczne dotyczące zarówno statystycznego rozkładu błędu pomiaru pozycji, jak i dynamiki zmian tego błędu. W literaturze nie podaje się tak szczegółowych danych. Do charakteryzowania tej dynamiki może służyć także funkcja autokorelacji ujawniająca związek pomiędzy błędami kolejnych pomiarów, który w tym przypadku może być bardzo silny. W literaturze koncentrowano się głównie na statystycznym rozkładzie błędów, podczas gdy autokorelacja sygnału pomiarowego może mieć duży wpływ na błędy prowadzenia maszyny, gdyż uniemożliwia filtrowanie zakłóceń losowych poprzez uśrednienie wyników kilku kolejnych pomiarów.

### Program i metodyka badań

Program badań obejmował zarówno badania statyczne jak i dynamiczne. W obu przypadkach odbiornik połączono z komputerem w obu przypadkach odbiornik połączono z komputerem typu notebook za pomocą standardowego kabla RS232 oraz z akumulatorem zasilającym 12V. Odbiornik w jednosekundowych odstępach wysyłał na port szeregowy standardowe komunikaty NMEA, które były zapisywane za pomocą programu HIPERTEMINAL, zainstalowanego w systemie Windows XP, do pliku tekstowego.



Rys. 1. Schemat połączenia odbiornika GPS z komputerem według instrukcji firmowej

Fig. 1. Scheme of GPS receiver connection with computer according to company's instruction

Badania statyczne polegały na zapisywaniu komunikatów generowanych przez odbiornik umieszczony w stałym punkcie. Zapisywane dane poddawano następnie analizie statystycznej za pomocą własnego oprogramowania zapisanego w języku Delphi. W pierwszej fazie tej analizy program odczytuje z pliku współrzędne geograficzne oraz czas GPS. Następnie kątowe współrzędne geograficzne układu WGS84 przeliczono na układ współrzędnych prostokątnych, którego początek przyjęto w punkcie średniej pozycji wskazywanej przez ten odbiornik. Do tego przeliczenia zastosowano metodę podaną w pracy [3]. Opracowanie statystyczne, wykonane za pomocą tego programu, obejmowało:

- wyznaczenie funkcji autokorelacji sygnału błędu;
- wyznaczenie parametrów dwuwymiarowego rozkładu Gaussa opisującego rozkład wyników pomiaru pozycji wokół wartości średniej;
- wyznaczenie promienia obszaru błędów obejmującego 100% wyników pomiaru;
- wyznaczenie jednowymiarowego rozkładu empirycznego promienia błędu i aproksymacja tego rozkładu rozkładem Weibulla;
- wyznaczenie rozkładu prędkości dryftu błędu pomiarowego;
- wyznaczenie parametrów procesu Markowa symulującego przebieg zmiany błędu pomiaru pozycji czasie, o parametrach statystycznych zbliżonych do zaobserwowanych.

Dla przeprowadzenia testów dynamicznych zbudowano specjalny wózek dwukołowy, na którym zainstalowano

odbiornik wraz z anteną, komputer typu notebook oraz akumulator samochodowy 12 V. Antenę odbiornika umieszczono na wierzchołku krótkiego masztu, który zawieszono na wysięgniku wózka wahadłowo, obciążając koniec tego masztu akumulatorem. Dzięki temu maszt niezależnie od przechyłów wózka zachowuje pionową pozycję, co zwiększa dokładność pomiaru. Wózek ten tak skonstruowano, aby po dodaniu napędzanego trzeciego koła kierowanego, uzyskać model pojazdu do eksperymentowania z software'm do automatycznego prowadzenia maszyn.



Rys. 2. Wózek pomiarowy z zamontowanym odbiornikiem GPS i komputerem  
*Fig. 2. Measurement trolley with mounted GPS receiver and computer*

Badania dynamiczne polegały na tym, że wózek ten przemieszczano ręcznie wzdłuż ściśle wytyczonej trasy, rejestrując strumień danych z odbiornika w pliku dyskowym komputera. Jako poligon doświadczalny wykorzystano boisko stadionu sportowego do gry w hokeja na trawie. W odległości 100 m od boiska znajduje się 8 kondygnacyjny budynek, zwrócony zachodnią elewacją w stronę tegoż boiska. Boisko ma wypoziomowaną powierzchnię i dokładnie wyznaczone linie proste oraz łuki, które wykorzystano jako linie odniesienia (bazy pomiarowe). Wózek doświadczalny przesuwano dokładnie wzdłuż środka tych linii wielokrotnie, o różnych porach dnia.

Odchyłka ręcznego prowadzenia wózka wzdłuż linii boiska nie przekraczała 3-5 cm, co mieści się całkowicie w tolerancji trajektorii przy prowadzeniu maszyn rolniczych. Kilkakrotny przejazd po tej samej trasie pozwalał na wyznaczenie rozrzutu tychże trajektorii wokół wyliczonego położenia średniego. Zarówno ten rozrzut, jak i dynamika zmian błęd pomiarowego, są potrzebne do właściwego doboru parametrów generatora błędów pomiarowych w programie symulacyjnym do badania ruchu pojazdu sterowanego za pomocą GPS.

Podobnie, jak w badaniach statycznych, zapisany jest plik tekstowy, zawierający współrzędne geograficzne w globalnym układzie współrzędnych elipsoidalnych WGS84. Plik ten przetworzono następnie za pomocą opisanego wyżej programu na plik współrzędnych kartezjańskich. Początek układu współrzędnych prostokątnych, przyjęto w punkcie startowym trajektorii.

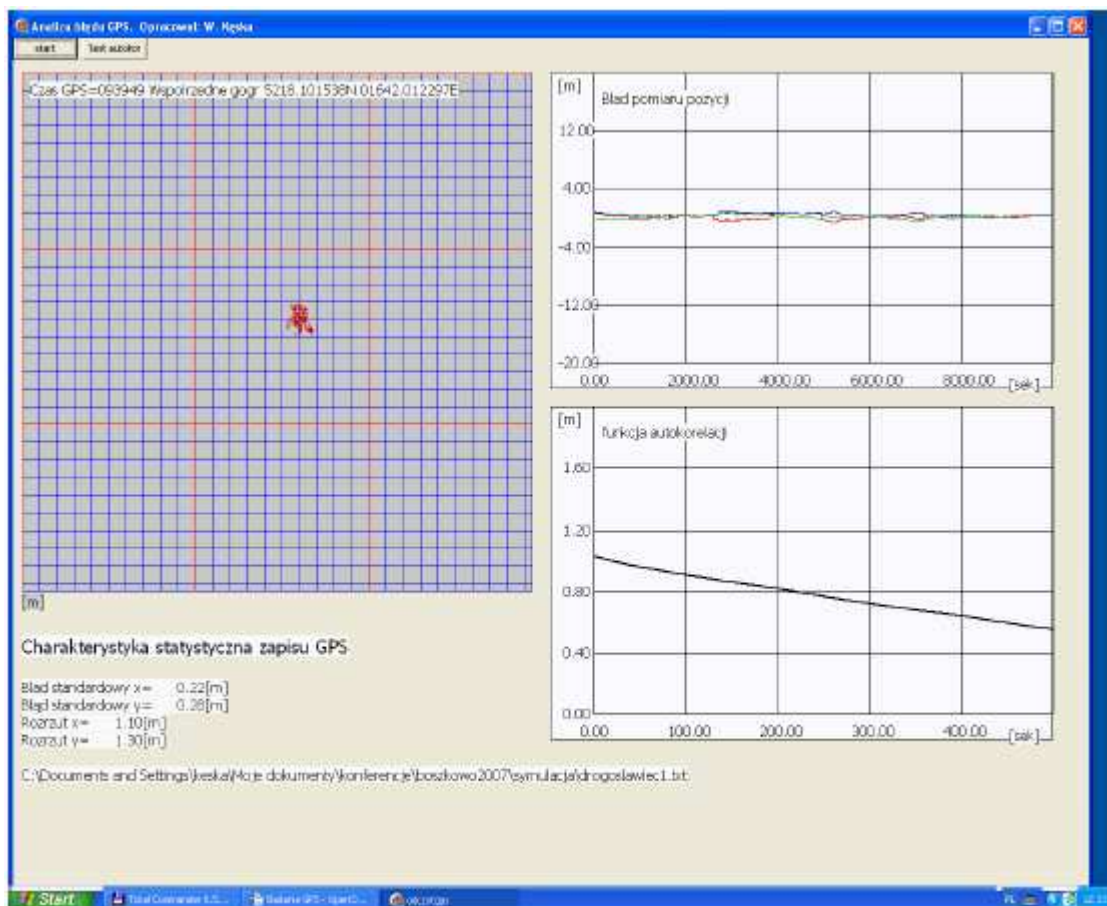
## Rezultaty badań

Testy statyczne wykonano w dwóch punktach: w otwartym polu na terenie wsi Drogosławiec oraz na terenie Poznania w punkcie oddalonym o 0,5 m od zachodniej elewacji budynku o wysokości 7 m. Współrzędne geograficzne obu punktów zaznaczono na wykresach z wynikami pomiarów. Na poniższych wykresach przedstawiono zarejestrowane odczyty pozycji odbiornika oraz funkcję autokorelacji dla funkcji odchylenie odczytu pozycji od wartości średniej. Na osi poziomej wykresów zmiany odczytu pozycji jest czas w sekundach, mierzony od początku testu. Linia czerwona i zielona oznaczają składowe odchylenie wyniku pomiaru w danej chwili czasu od wartości średniej, odpowiednio na kierunkach NS i WE, zaś linia niebieska wartość wypadkową.

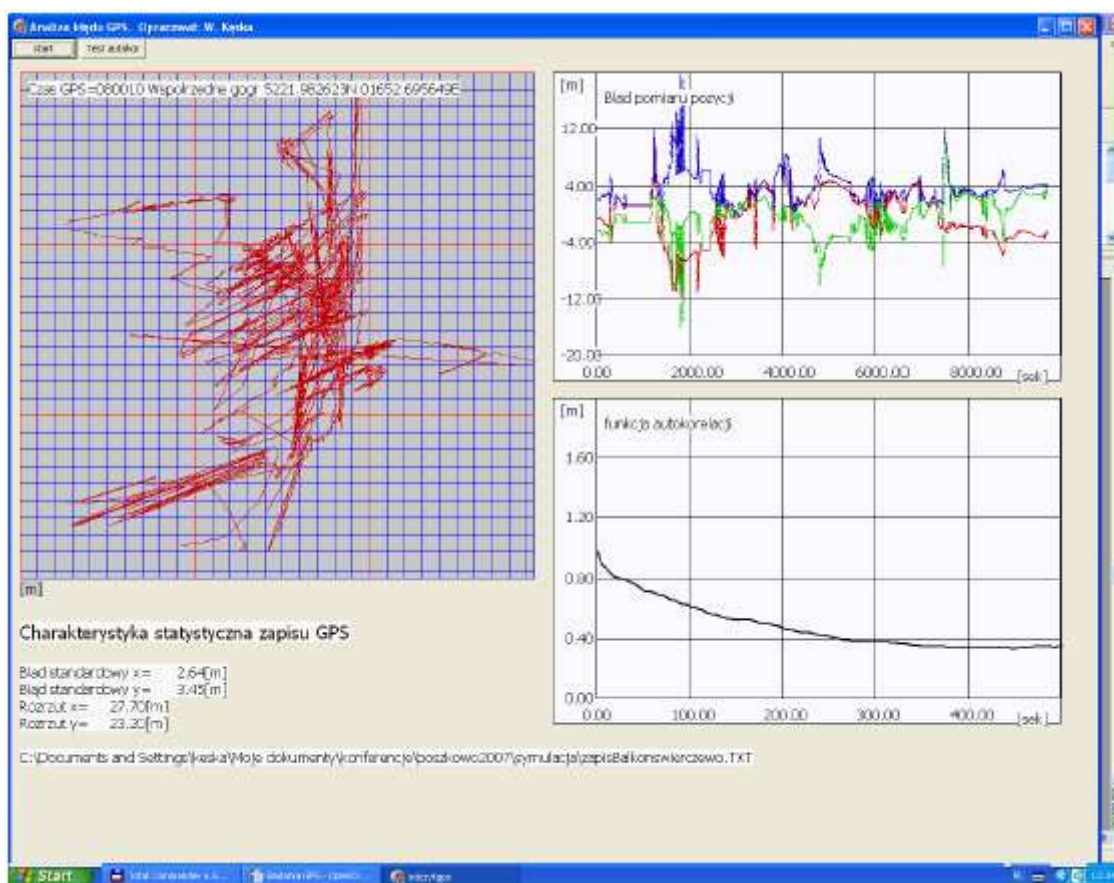
Na rys. 3 przedstawiono zapis wykonany w otwartym polu, w ciągu ok. 10000 sekund. Jak widać odchylenie wyników pomiaru od wartości średniej w swej głównej masie nie przekracza tutaj 1 metra. Kolejne wyniki pomiarów są silnie ze sobą skorelowane. Pokazuje to wykres, na którym przedstawiono funkcję autokorelacji sygnału położenia dla przesunięć do 400 s.

Rys 4 pokazuje, w jakim stopniu degraduje się dokładność wskazań pozycji w okolicy budynku. Zastąpienie połowy nieba przez budynek, prowadzi do wzrostu rozrzutu wyników pomiaru do ok. 20 m. (ok. dwudziestokrotnie). Liczba widzialnych satelitów zmniejsza się do 4-5, czyli dolnej granicy w ogóle umożliwiającej obliczanie pozycji. Funkcja autokorelacji zachowuje jednak w dalszym ciągu dość wysokie wartości.

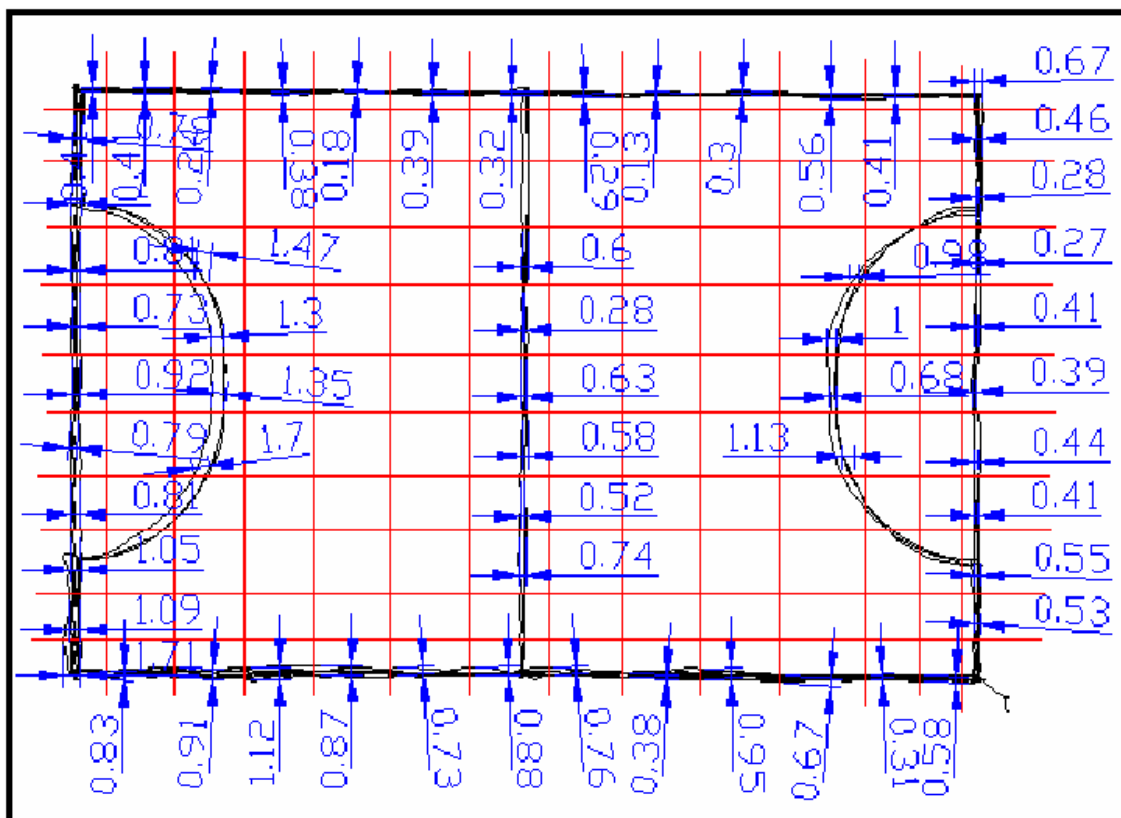
W wyniku realizacji programu badań dynamicznych uzyskano obszerny plik z zapisem położenia wózka i czasu. Wyniki przeliczania współrzędnych linii bazowych, po których poruszał się wózek, zapisano jako współrzędne linii łamanej w pliku tekstowym, w formacie skryptu dla programu graficznego ProgeCAD. W ten sposób sporządzono automatycznie w tym programie rysunek obrazujący przebieg zmierzonej trajektorii wózka. Program graficzny typu CAD, bazujący na modelu wektorowym grafiki, pozwala na odczytywanie współrzędnych punktów na rysunku z dowolną dokładnością. W tymże programie, posługując się jego narzędziami, zmierzono potrzebne parametry statyczne rozrzutu błędów pomiaru trajektorii. Trasę przejazdu ze zmierzonymi rozrzutami wyników pomiarów pozycji w tym samym punkcie trasy wózka przedstawiono na rys. 5. Jak widać, powtarzalność zarejestrowanych trajektorii wózka pomiarowego na ogół mieści się, podobnie jak w pomiarach statycznych, w granicach 1 m. Powtarzalność pomiarów na tym poziomie może być wystarczająca dla takich zastosowań jak pomiary pól dla potrzeb dotacji UE oraz zarządzania agrotechniką (obliczanie pracochłonności zużycia środków chemicznych, paliwa itp.), sporządzania map zasobności gleb i plonów, oraz prowadzenia maszyn w czystym polu, przy siewie nawozu i opryskach.



Rys. 3. Przebieg błędów pomiaru w punkcie 1 (odsłonięty horyzont)  
 Fig. 3. Course of measurement errors in point 1 (uncovered horizon)



Rys. 4. Przebieg błędów pomiaru pozycji i wykres funkcji autokorelacji dla punktu 2 (zasłonięta wschodnia część nieba)  
 Fig. 4. Course of position measurement errors and diagram of autocorrelation function for point 2 (covered eastern part of sky)



Rys. 5. Trajektoria wózka zarejestrowana w trakcie badań dynamicznych i jej rozrzut  
 Fig. 5. Trolley trajectory registered during dynamic tests and its spread around real position

Nie jest natomiast wystarczająca do prowadzenia maszyn w międzyrzędziach oraz siewników rzędowych. Tu niezbędnym jest zastosowanie technologii RTK GPS oraz techniki rozpoznawania obrazu optycznego z kamer video.

### Wnioski

Rezultaty przeprowadzonych badań upoważniają do wyprowadzenia następujących wniosków:

1. Precyzyjny odbiornik GPS dedykowany do zastosowań rolniczych pozwala na prowadzenie maszyn po równoległych ścieżkach z dokładnością około 1 m, nawet bez stosowania własnej stacji referencyjnej DGPS.
2. Dokładność pomiaru silnie zakłóca sąsiedztwo wysokich budynków. Stąd należy się liczyć ze znacznymi błędami prowadzenia w przypadku występowania takich przeszkód.
3. Funkcja autokorelacji, wyliczona dla sygnału błędu pomiarowego GPS, wykazuje bardzo powolny spadek, co z zasady ogranicza możliwości odfiltrowania szumu losowego od błęd pomiarowego za pomocą uśredniania wyników kilku kolejnych pomiarów lub innych metod.

### Literatura

- [1] Adamchuk V.I., Hoy R.M., Meyer G. E., Kocher M. F.: GPS-based auto guidance test program development. Precision Agriculture '07. Wageningen Academic Publishers, 2007.
- [2] Han S., Zhang Q, Noh H., Shin B.: A dynamic performance evaluation method for DGPS receivers under linear parallel-tracking applications. Transactions of the ASAE, 1997, 47(1), 321-329.
- [3] ION standards 1997. Recommended test procedures for GPS receivers ION STD 101, ION, Alexandria, Virginia, USA.
- [4] Lamparski J. GPS w geodezji. Gall, Katowice, 2003.
- [5] Taylor R. K., Shrock M.D, Blomefield J., Bora G., Brockmeier G, Burton W., Calson B., Gattis J., Groenong R., Kopriva J, Oleen N., Ney J., Simmelnk G, Vondracek J.: Dynamic testing of GPS receivers. Transactions of the ASAE, 2004, 47(4), 1017-1025
- [6] Weltzien C., Noack P., Persson K.: GPS receiver accuracy test-dynamic and static for best comparison of results. Precision Agriculture 2003, Wageningen Academic Publishers.