

Aleksander NOWAK¹

DOKŁADNOŚĆ WZGLĘDNA GNSS W KONTEKŚCIE WYZNACZENIA ORIENTACJI PRZESTRZENNEJ UGV

W artykule przedstawiono rozważania teoretyczne i wyniki eksperymentów, których celem było udzielenie odpowiedzi na pytanie, czy dokładność względna GNSS (z ang.: Global Navigation Satellite Systems – Globalne Satelitarne Systemy Nawigacyjne) umożliwia wyznaczenie kątów orientacji przestrzennej autonomicznego pojazdu typu UGV (z ang.: Unmanned Ground Vehicle – Bezałogowy Pojazd Lądowy). W badaniach wykorzystano parę jednakowych odbiorników GNSS pracujących w trybach: GPS, DGPS LF/MF oraz EGNOS.

RELATIVE ACCURACY OF GNSS IN THE CONTEXT OF DETERMINATION OF UGV SPATIAL ORIENTATION

The paper presents the analysis and results of experiments which the main goal was to give an answer to the problem, if relative accuracy of GNSS (Global Navigation Satellite Systems) allows to determine spatial orientation of autonomous UGV (Unmanned Ground Vehicle). In the experiments two identical GNSS receivers were used. They worked in GPS, DGPS LF/MF and EGNOS modes.

1. WSTĘP

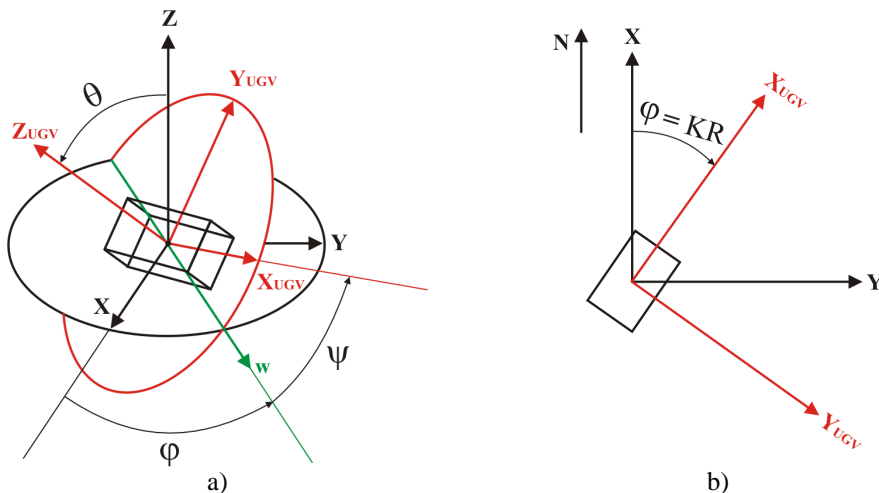
Ambicją konstruktorów autonomicznych pojazdów typu UGV jest, by były one w stanie zastąpić człowieka w środowisku, w którym prowadzenie operacji jest zbyt niebezpieczne dla życia lub kończą się ludzkie możliwości. Zadania wykonywane przez roboty typu UGV w trybie pełnej autonomii, stawiają ogromne wyzwania przed systemem nawigacyjnym pojazdu. Musi on zapewnić wysoką dokładność, niezawodność, ciągłość i wiarygodność wyznaczeń pozycji, prędkości i kątów orientacji przestrzennej. Proces nawigacji często odbywa się w nieznanym środowisku, w którym dynamicznie zmienia się zarówno otoczenie jak i rozmieszczenie obiektów zainteresowań – statycznych i dynamicznych. Duża różnorodność przeszkód i warunków środowiskowych sprawia, że proces autonomicznej nawigacji UGV należy do grupy najbardziej skomplikowanych. Jednym z problemów jest określenie kątów orientacji przestrzennej robota typu UGV. W niniejszym

¹Institut Nawigacji i Hydrografii Morskiej, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni, ul. Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia, e-mail: a.nowak@amw.gdynia.pl, tel. +48 58 626 27 74, +48 883 911 654

artykule podjęto próbę udzielenia odpowiedzi na pytanie, czy na otwartej przestrzeni problem ten jest możliwy do rozwiązania przy pomocy pary odbiorników GNSS.

2. ROZWAŻANIA TEORETYCZNE

Ograniczona objętość publikacji spowodowała, iż skupiono się wyłącznie na przypadku, w którym płaszczyzna $OX_{UGV}Y_{UGV}$ wyznaczona przez układ związany z pojazdem pokrywa się z płaszczyzną horyzontu. Dodatkowo założono, że globalnym układem współrzędnych, w którym odbywa się nawigacja pojazdu UGV, będzie układ kartezjański, gdzie oś X pokrywa się z południkiem geograficznym i skierowana jest na północ, a oś Y pokrywa się z równoleżnikiem i skierowana jest na wschód. Wówczas jedyny interesujący nas kąt orientacji przestrzennej będzie równy kursowi rzeczywistemu pojazdu KR, rozumianemu jako kąt zawarty pomiędzy północną częścią południka geograficznego, a osią symetrii wzdłużnej pojazdu. Sytuację tą przedstawiono na rys.1b i 2.

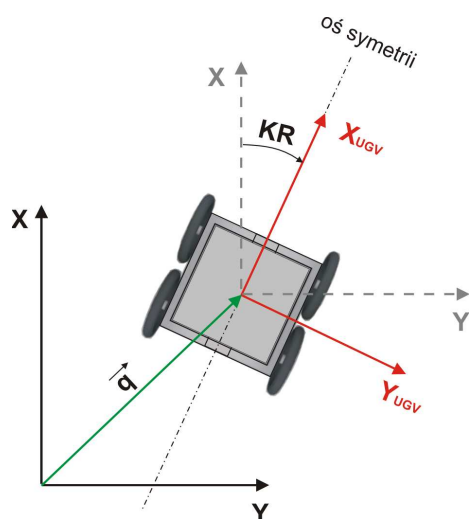


Rys.1. Określenie przestrzennego położenia pojazdu UGV za pomocą kątów orientacji przestrzennej; a) przypadek ogólny; b) przypadek szczególny – kąt orientacji przestrzennej φ równy jest kursowi rzeczywistemu pojazdu KR

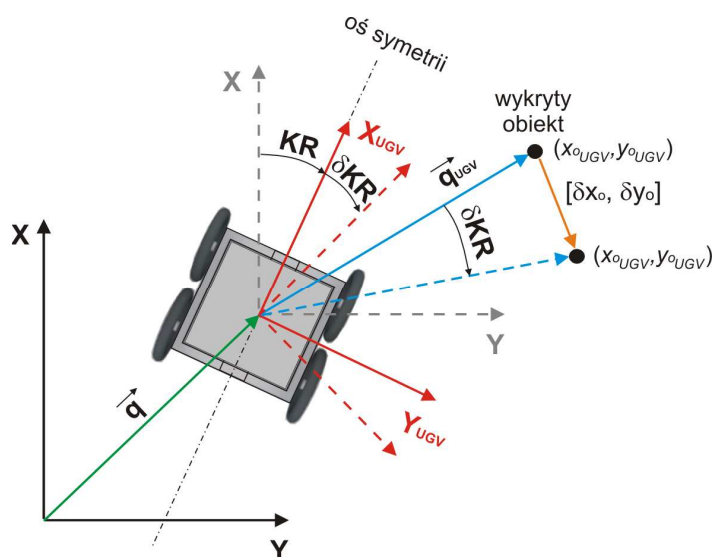
Na rys.1b przedstawiono pewien szczególny przypadek, w którym środki układu globalnego i związanego z pojazdem pokrywają się. Ogólnie jednak, układy te są przesunięte względem siebie o pewien wektor q . Sytuację tą obrazuje rys.2.

Określenie kursu rzeczywistego pojazdu UGV (zarówno w statyce jak i dynamicie) ma podstawowe znaczenie z punktu widzenia procesu nawigacji i mapowania terenu. Wszystkie znane współrzędne obiektów znajdujących się w obszarze działania UGV, jak i punkty, do których ma pojazd podążać, wyrażone są w globalnym układzie współrzędnych. Natomiast współrzędne obiektów wykrywanych przez pojazd wyrażone są w układzie związanym z pojazdem, gdyż sensory i urządzenia za pomocą których dokonuje się detekcji umieszczone są na pojeździe oraz skalibrowane zgodnie z jego osią symetrii wzdłużnej.

Zatem zarówno proces nawigacji jak i mapowania wymagają ciągłej transformacji pomiędzy dwoma wspomnianymi układami współrzędnych, której dokładność zależała będzie między innymi od precyzji określenia kursu rzeczywistego pojazdu UGV. Obrazuje to rys.3.



Rys.2. Wzajemne położenie układów związanego z pojazdem ($OX_{UGV}Y_{UGV}$) i globalnego (OXY), wyrażone za pomocą wektora przesunięcia \mathbf{q} i kursu rzeczywistego KR



Rys.3. Błędy współrzędnych wykrywanych obiektów w układzie globalnym (OXY), spowodowane błędem określenia kursu rzeczywistego KR

W ogólnym przypadku, dokładność określenia współrzędnych obiektów w układzie globalnym OXY, a wykrywanych w układzie lokalnym związanym z pojazdem UGV – $OX_{UGV}Y_{UGV}$, zależała będzie od trzech czynników:

- dokładność wyznaczenia współrzędnych pojazdu UGV w globalnym układzie współrzędnych OXY (dokładności określenia współrzędnych wektora przesunięcia \mathbf{q}),
- dokładności określenia kursu rzeczywistego KR pojazdu UGV,
- dokładności określenia położenia wykrytego obiektu w lokalnym układzie współrzędnych związanym z pojazdem $OX_{UGV}Y_{UGV}$ (dokładności określenia współrzędnych wektora wykrytego obiektu \mathbf{q}_{UGV}).

Na rys.3 pokazano, że nawet przy bezbłędnym określeniu współrzędnych pozycji pojazdu w globalnym układzie OXY (współrzędnych wektora przesunięcia \mathbf{q}) i położenia wykrytego obiektu w lokalnym układzie związanym z pojazdem $OX_{UGV}Y_{UGV}$ (współrzędnych wektora \mathbf{q}_{UGV}), współrzędne wykrytego obiektu będą obarczone błędami δx_o , δy_o , związanymi z błędem określenia kursu rzeczywistego δKR . Matematycznie, gdyby wektor \mathbf{q} , \mathbf{q}_{UGV} , i KR były wyznaczone bezbłędnie, transformację współrzędnych wykrytego obiektu z układu lokalnego związanego z pojazdem do układu globalnego opisywałyby następujące równania:

$$\begin{aligned}x_o &= x_q + x_{oUGV} \cdot \cos KR - y_{oUGV} \cdot \sin KR \\y_o &= y_q + x_{oUGV} \cdot \sin KR + y_{oUGV} \cdot \cos KR\end{aligned}\quad (1)$$

gdzie: x_o, y_o – współrzędne wykrytego obiektu w układzie globalnym,
 x_{oUGV}, y_{oUGV} – współrzędne wykrytego obiektu w układzie lokalnym związanym z pojazdem UGV,
 x_q, y_q – współrzędne wektora \mathbf{q} przesunięcia układu związanego z UGV względem układu globalnego,
 KR – kurs rzeczywisty pojazdu UGV.

Natomiast, w sytuacji, w której kurs rzeczywisty robota wyznaczony byłby z błędem równym δKR , równania (1) przekształcą się w:

$$\begin{aligned}x_o' &= x_q + x_{oUGV} \cdot \cos(KR + \delta KR) - y_{oUGV} \cdot \sin(KR + \delta KR) = x_o + \delta x_o \\y_o' &= y_q + x_{oUGV} \cdot \sin(KR + \delta KR) + y_{oUGV} \cdot \cos(KR + \delta KR) = y_o + \delta y_o\end{aligned}\quad (2)$$

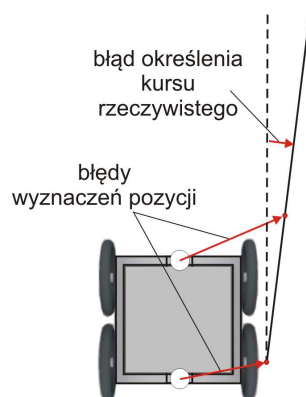
gdzie: x_o', y_o' – współrzędne wykrytego obiektu w układzie globalnym, w przypadku wystąpienia błędu określenia kursu rzeczywistego pojazdu UGV,
 $\delta x_o, \delta y_o$ – błąd współrzędne wykrytego obiektu w układzie globalnym,
 δKR – błąd określenia kursu rzeczywistego.

Porównując równania (1) i (2) można obliczyć błąd wyznaczenia współrzędnych obiektów w układzie globalnym, które zostały wykryte w układzie lokalnym związanym z pojazdem, spowodowany błędem określenia kursu rzeczywistego robota. Dla zilustrowania problemu

posłużmy się przykładem: jeżeli obiekt zostanie wykryty na odległości 20 m od pojazdu, to błąd określenia kursu rzeczywistego równy 3° spowoduje, że współrzędne wykrytego obiektu w układzie globalnym będą obarczone błędem przekraczającym 1 m (dokładnie 1.048 m). Daje to błąd na poziomie 5% zasięgu wykrycia. Jest to dość znaczna wielkość, jeżeli weźmiemy po uwagę, iż założyliśmy, że współrzędne robota w układzie globalnym i współrzędne wykrytego obiektu w układzie lokalnym zostały wyznaczone bezbłędnie.

Dokładność względna określenia pozycji (z ang.: relative accuracy), to dokładność wyznaczenia pozycji w stosunku do innego użytkownika tego samego systemu w tym samym czasie i układzie współrzędnych. Wyrażony nią błąd odzwierciedla stopień korelacji pomiędzy błędami kilku równocześnie pracujących odbiorników. Miara ta informuje, jakie są w tym samym momencie błędy wskazań kilku odbiorników GNSS. W przeciwieństwie do dokładności przewidywanej, jej weryfikacja lub ocena wymaga co najmniej dwóch odbiorników pracujących według tych samych reguł przetwarzania i obróbki odbieranych sygnałów.[1]

Z powyższej definicji wynika, że możliwym jest określenie kursu rzeczywistego pojazdu UGV przy pomocy dwóch odbiorników GNSS, pod warunkiem wysokiej dokładności względnej systemu. W takim przypadku nie ma znaczenia jakie są błędy wyznaczeń współrzędnych obu anten, ale jak silna jest korelacja między nimi. Zależność tą obrazuje poniższy rysunek (rys.4)



Rys.4. Błąd określenia kursu rzeczywistego jako funkcja błędu względnego pozycji

Kurs rzeczywisty pojazdu typu UGV można wyznaczyć na podstawie różnic współrzędnych anten umieszczonych z przodu i z tyłu robota, tak jak to pokazano na rys.4, zgodnie z poniższą zależnością:

$$KR = \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \quad (3)$$

gdzie: Δx , Δy – różnice współrzędnych anten odbiorników GNSS.

Oczywiście zastosowania praktyczne wymagają rozważenia znaków Δx i Δy oraz oddzielnego opisu dla sytuacji, gdy jedna lub obie z różnic wynoszą 0, nie ma to jednak znaczenia dla dalszych rozważań.

Jeżeli założymy, że odległość pomiędzy antenami umieszczonymi na pojeździe UGV wynosi 1 m, to do uzyskania precyzji wyznaczeń kursu rzeczywistego KR na poziomie 3° , dokładność względna musiałaby wynosić 52 mm. W przypadku, gdyby okazało się, że błędy wyznaczeń współrzędnych obu anten nie są skorelowane, to tego rzędu dokładności absolutne w czasie rzeczywistym zapewniają jedynie techniki RTK, w tym serwis NAWGEO sieci ASG-EUPOS. Żadne inne techniki GNSS nie zbliżają się nawet do takiej precyzji wyznaczeń. Wobec powyższego, jedyną nadzieją jest uzyskanie wysokiej dokładności względnej wyznaczeń. Sprawdzono to eksperymentalnie, określając w drodze statycznych kampanii pomiarowych dokładność względną innych technik GNSS – GPS, DGPS LF/MF i EGNOS.

Do eksperymentu wykorzystano prototyp pojazdu UGV, który budowany jest w ramach pracy naukowo-badawczej realizowanej w Instytucie Nawigacji i Hydrografii Morskiej Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni. Na pojeździe umieszczono dwa bliźniacze odbiorniki firmy CSI typu miniMax. Pojazd z zamontowanymi odbiornikami przedstawiono na poniższym zdjęciu.

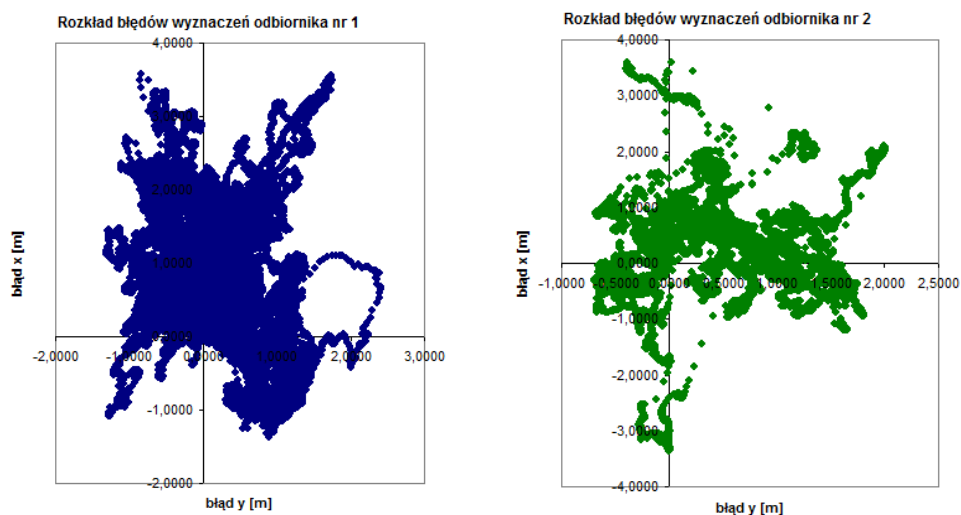


Rys.5. Prototypowy robot typu UGV z zamontowaną aparaturą pomiarową

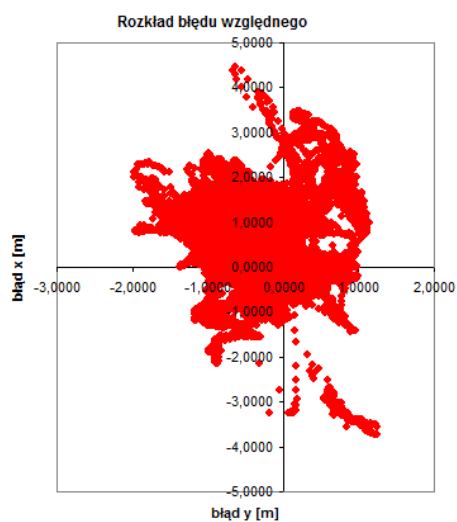
Odbiornik CSI miniMax, to 12 kanałowy odbiornik pracujący w trybach GPS/DGPS/EGNOS z maksymalną częstotliwością wyznaczeń równą 5Hz. Pojazd UGV umieszczono na otwartej przestrzeni, unieruchomiono i wykonano 12 h kampanie pomiarowe dla każdego z serwisów, przy czym częstotliwość wyznaczeń wynosiła 1 Hz. Wszystkie kampanie wykonywano w godzinach od 06:00 do 18:00. Rzeczywiste współrzędne anten wyznaczono w drodze pomiarów RTK, wykorzystując w tym celu punkt referencyjny oddalony od miejsca pomiarów o niecałe 200 m. Rzeczywista odległość między antenami wynosiła 63 cm. Zarejestrowane dane opracowano pod kątem dokładności absolutnej i względnej.

3.1 System GPS

Na poniższym rysunku (rys.6) zaprezentowano rozkład błędów wyznaczeń GPS dla obu anten, natomiast na rys.7 rozkład błędu względnego.



Rys.6. Rozkład błędów absolutnych wyznaczeń GPS w płaszczyźnie horyzontu odbiorników umieszczonych na pojeździe UGV



Rys.7. Rozkład błędu względnego wyznaczeń GPS w płaszczyźnie horyzontu dla odbiorników umieszczonych na pojeździe UGV

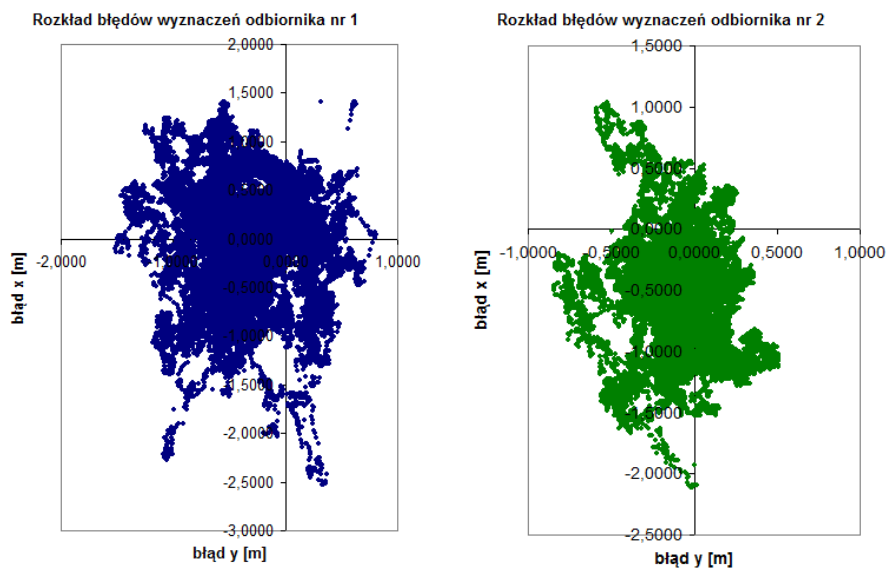
Jak wynika z powyższych wykresów, błędy wyznaczeń współrzędnych GPS obu anten nie są skorelowane, co w konsekwencji prowadzi do tego, że dokładność względna wyznaczeń jest na podobnym poziomie, co dokładności absolutne poszczególnych odbiorników. W poniższej tabeli (tab.1) zawarto wartości poszczególnych dokładności, wyrażone jako odchylenia standardowe błędów wyznaczeń dla $p=0.95$.

Tab. 1. Dokładności wyznaczeń GPS

Rodzaj dokładności	Błąd wyznaczeń w płaszczyźnie horyzontu ($p=0.95$)
Dokładność absolutna odbiornika nr 1	2.9 m
Dokładność absolutna odbiornika nr 2	2.27 m
Dokładność względna odbiorników nr 1 i 2.	2.31 m

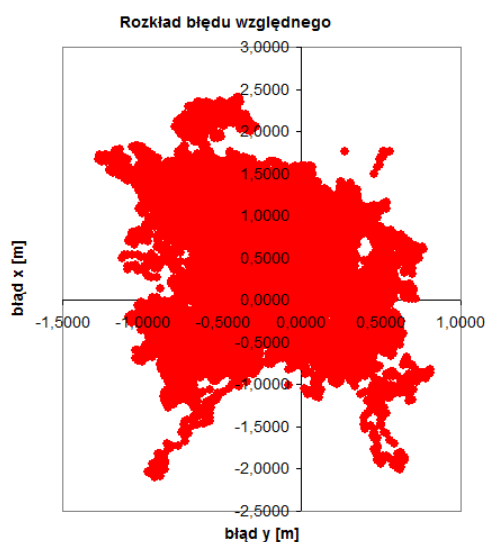
3.2 System DGPS LF/MF i EGNOS

Następnie przeprowadzono kampanie pomiarowe z wykorzystaniem DGPS LF/MF oraz EGNOS. W trybie DGPS odbierano korekty różnicowe ze stacji referencyjnej w Rozewiu, natomiast w EGNOS, odbiornik ustawiony był w tryb pracy z satelitą geostacjonarnym o najlepszym stosunku sygnału do zakłóceń.



Rys.8. Rozkład błędów absolutnych wyznaczeń DGPS LF/MF w płaszczyźnie horyzontu dla odbiorników umieszczonych na pojeździe UGV

Na powyższym rysunku zaprezentowano rozkłady błędów absolutnych wyznaczeń DGPS LF/MF w płaszczyźnie horyzontu dla odbiorników umieszczonych na pojeździe UGV, natomiast na rys. 8, rozkład błędu względnego tych samych odbiorników.

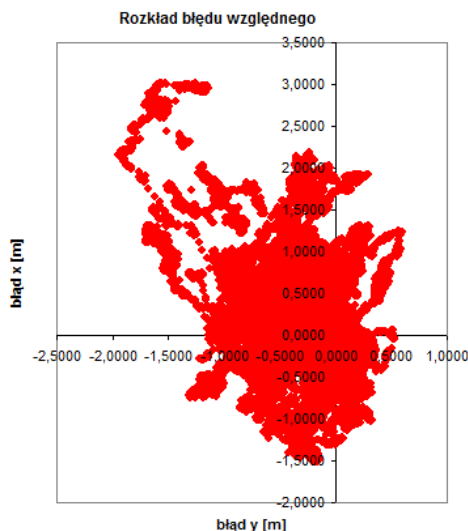


Rys.9. Rozkład błędu względnego wyznaczeń DGPS LF/MF w płaszczyźnie horyzontu dla odbiorników umieszczonych na pojeździe UGV

Z przedstawionych rozkładów wynika, że również w przypadku DGPS LF/MF nie zaobserwowano korelacji pomiędzy błędami wyznaczeń. Podobna sytuacja miała miejsce również w przypadku, gdy odbiorniki pracowały w trybie EGNOS. Poniżej zaprezentowano jedynie rozkład błędu względnego (rys.10), natomiast w tab. 2. zebrano uzyskane wyniki badań dokładności absolutnej i względnej GPS, DGPS LF/MF i EGNOS.

Tab. 2. Porównanie dokładności wyznaczeń GPS, DGPS LF/MF i EGNOS

Rodzaj systemu	Dokładność absolutna odb.nr 1 $p=0.95$	Dokładność absolutna odb.nr 2 $p=0.95$	Dokładność względna $p=0.95$
GPS	2.9 m	2.27 m	2.31 m
DGPS LF/MF	1.63 m	1.41 m	2.12 m
EGNOS	1.87 m	1.3 m	1.82 m



Rys.10. Rozkład błędów względnych wyznaczeń EGNOS w płaszczyźnie horyzontu dla odbiorników umieszczonych na pojeździe UGV

3. WNIOSKI

Mimo, że wykorzystanie odbiorników GNSS w nawigacji jest powszechne, głównie za sprawą niewielkiej ceny i gabarytów oraz łatwości z jaką uzyskuje się współrzędne pozycji, to nie wszystkie elementy wektora stanu pojazdu typu UGV można wyznaczyć za ich pomocą. Dokładności absolutne GNSS są wystarczające do sprawnego prowadzenia nawigacji, ale nie zapewniają określenia kątów orientacji przestrzennej robota. Ponadto, przeprowadzone badania pokazały, że błędy wyznaczeń dwóch odbiorników GNSS nie są ze sobą skorelowane (nawet przy zastosowaniu dwóch bliźniaczych odbiorników), co w konsekwencji sprawia, że dokładność względna jest na poziomie zbliżonym do absolutnej. Zatem zdaje się, że jedynie technika RTK daje możliwość określenia położenia przestrzennego pojazdu za pomocą GNSS.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Specht C.: *System GPS*, Biblioteka Nawigacji nr 1, Pelplin, Wydawnictwo "Bernardinum", 2007.
- [2] Felski A., Urbański J.: *Satelitarne systemy nawigacji i bezpieczeństwa żeglugi*, Gdynia, Akademia Marynarki Wojennej, 1997.
- [3] Januszewski J.: *Systemy satelitarne w nawigacji morskiej*, Gdynia, Fundacja rozwoju Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni, 2002.
- [4] Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J.: *GPS Theory and practice*, Fourth edition, Wien New York, Springer, 1997.