

Aleksander NOWAK¹

SYMULACJE NUMERYCZNE WPŁYWU PRZESZKÓD TERENOWYCH NA DOKŁADNOŚĆ WYZNACZEŃ GNSS

W artykule przedstawiono przykładowe wyniki symulacji wpływu przeszkód terenowych na dokładność wyznaczeń GNSS (z ang.: Global Navigation Satellite Systems). Opisano założenia do symulacji, model przeszkód terenowych oraz wnioski wypływające z przeprowadzonych badań. Symulacje przeprowadzono z wykorzystaniem autorskiego oprogramowania.

NUMERICAL SIMULATIONS OF TERRAIN OBSTACLES INFLUENCE ON GNSS FIXES ACCURACY

The paper presents exemplary results of numerical simulation of terrain obstacles influence on GNSS (Global Navigation Satellite Systems) fixes accuracy. Assumptions to the simulations, model of terrain obstacles and drawn conclusions from done experiments are described. The simulations were done on author's software.

1. WSTĘP

Od momentu ogłoszenia pełnej operacyjności systemu GPS w 1995 roku obserwujemy lawinowy wzrost aplikacji nawigacji satelitarnej w różnych dziedzinach gospodarki, w tym w transporcie. W efekcie pojawienie się systemów wspomaganie różnicowego oraz prac nad reaktywacją rosyjskiego GLONASS i budową europejskiego Galileo i chińskiego COMPASS, w środowisku zajmującym się nawigacją satelitarną zaczął funkcjonować akronim GNSS (od ang.: Global Navigation Satellite Systems), obejmujący wszystkie rozwiązania pozycyjne bazujące na satelitarnych systemach nawigacyjnych.

Proces nawigacji za pomocą GNSS nie zawsze odbywa się na otwartej przestrzeni. W aglomeracjach miejskich, w górach czy na terenach zalesionych część sfery niebieskiej zostaje przesłonięta przez szeroko rozumiane przeszkody. Z jednej strony powodują one pogorszenie warunków obserwacji (część satelitów zostaje zasłonięta), z drugiej zaś, niektóre obiekty jak np. budynki mogą odbijać sygnały satelitarne i powodować błędy w pomiarze odległości do satelitów. Oba zjawiska wpływają niekorzystnie na dokładności wyznaczeń GNSS i mogą sprawić, że błędy pozycji będą kilkudziesięciokrotnie większe od tych obserwowanych na otwartej przestrzeni.

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

W niniejszym artykule przedstawiono przykładowe wyniki symulacji numerycznych, dotyczących przewidywanego wpływu budynków w aglomeracji miejskiej na dokładność wyznaczeń współrzędnych pozycji metodami GNSS.

1. WPLYW BUDYNKÓW NA WYZNACZENIA GNSS

Wyznaczenie współrzędnych pozycji przy pomocy GNSS odbywa się w drodze pomiaru odległości do co najmniej 4 satelitów. Odległość ta jest mierzona na podstawie czasu przejścia sygnału od satelity do odbiornika, przy czym błąd zegara odbiornika jest nieznaną i traktowaną jako czwarta niewiadoma – obok trójwymiarowych współrzędnych pozycji. W związku z tym, mierzony parametr często nazywamy pseudoodległością. Błąd średni pozycji GNSS szacujemy z następującej zależności:

$$M = \sigma_{\rho} \cdot DOP, \quad (1)$$

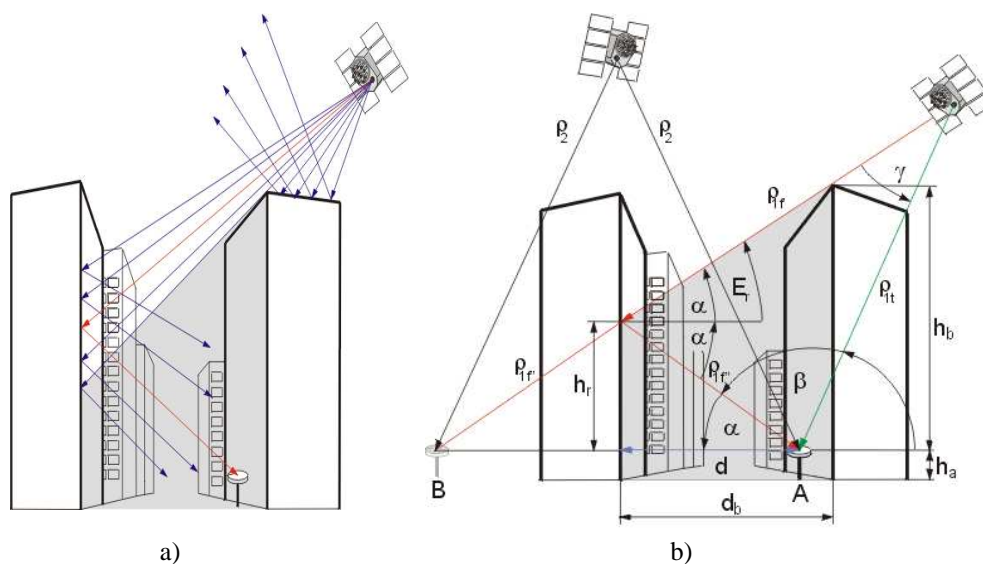
gdzie:

- M - błąd średni pozycji,
- σ_{ρ} - odchylenie standardowe błędów pomiarów pseudoodległości,
- DOP - geometryczny współczynnik dokładności (zwany także współczynnikiem rozmycia precyzji).

Wielkość σ_{ρ} uzależniona jest od metody pomiaru pseudoodległości, techniki pomiaru, warunków pomiarów i klasy odbiornika. DOP natomiast, jest funkcją liczby widocznych satelitów i ich rozmieszczenia względem pozycji odbiornika (tzw. geometrii segmentu kosmicznego).

Obecność przeszkód terenowych będzie wpływała niekorzystnie zarówno na σ_{ρ} , jak i DOP. Sygnały satelitarne odbijają się od budynków praktycznie bezstratnie. Powoduje to zagrożenie wykonania pomiaru odległości do satelity nie na podstawie sygnału bezpośredniego, lecz nawet kilkukrotnie odbitego od budynku. To oczywiście skutkuje pojawieniem się błędu grubego pomiaru, który zwiększa wielkość σ_{ρ} . Budynki powodują także tzw. efekt cienia radiowego. Ponieważ sygnały satelitarne są silnie tłumione przez materiały, z których wykonane są budowle, to odbiór sygnału bezpośredniego od satelity, który jest zasłonięty przez budynek jest niemożliwy. Zatem w miastach obserwujemy spadek liczby widocznych satelitów – czasami nawet poniżej liczby umożliwiającej wyznaczenie współrzędnych pozycji. Poza tym, widoczne satelity „skupione” są w pewnych obszarach sfery niebieskiej (tych nieprzesłoniętych przez przeszkody) i często nie ma możliwości obserwacji satelitów znajdujących się niżej nad horyzontem. To powoduje pogorszenie geometrii segmentu kosmicznego. W konsekwencji, wartości geometrycznych współczynników dokładności mogą mieć kilkudziesięciokrotnie większe wartości niż na otwartej przestrzeni. Zatem, w terenach o wysokiej zabudowie należy spodziewać się pogorszenia dokładności wyznaczeń GNSS, zarówno za sprawą pojawiania się błędów grubych pomiarów pseudoodległości, jak i drastycznego wzrostu wartości współczynników DOP.

Problem występowania błędów grubych pomiarów pseudoodległości w warunkach cienia radiowego i wielodrogowości sygnałów przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Błąd pomiaru odległości do satelity związany ze zjawiskiem cienia radiowego i wielodrogowości sygnałów

Na rys.1b przedstawiono sytuację, w której na skutek jednokrotnego odbicia sygnału od budynku błędnie wyznaczono współrzędne anteny odbiornika (zamiast współrzędnych punktu A wyznaczono współrzędne punktu B). Z rys.1b wynika, że błąd pomiaru odległości do satelity $\varepsilon_{\rho_{lt}}$ (w przypadku jednokrotnego odbicia sygnału) można opisać następującą zależnością:

$$\varepsilon_{\rho_{lt}} = (\rho_{1f'} + \rho_{1f''}) - \rho_{lt} \quad (2)$$

gdzie:

- $\varepsilon_{\rho_{lt}}$ - błąd pomiaru odległości do satelity,
- $\rho_{1f'} + \rho_{1f''}$ - całkowita droga, jaką przebył sygnał odbity,
- ρ_{lt} - prawdziwa odległość do satelity.

Ponieważ odległość między budynkami jest niewspółmiernie mała w porównaniu z odległością do satelity, to:

$$\rho_{1f'} \approx \rho_{lt} \quad (3)$$

i równanie (2) uprości się do:

$$\varepsilon_{\rho_{lt}} \approx \rho_{2f^n} \cdot \quad (4)$$

Stosując oznaczenia przyjęte na rysunku, $\varepsilon_{\rho_{lt}}$ możemy obliczyć jako:

$$\varepsilon_{\rho_{lt}} = \sqrt{h_r^2 + d^2} = \sqrt{(h_b - d_b \tan \alpha)^2 + d^2} \cdot \quad (5)$$

Z (5) wynika, że błąd pomiaru odległości będzie tym większy, im wyższy budynek powodujący cień radiowy i im większa odległość do budynku odbijającego sygnał, a co za tym idzie, im większa odległość między budynkami. Zauważyć należy, że w przypadku sygnałów wielokrotnie odbitych (gdzie n_r – liczba odbić) zajdzie następująca zależność:

$$\varepsilon_{\rho_{lt}} > (n_r - 1) d_b \cdot \quad (6)$$

W związku z tym, błąd pomiaru pseudoodległości może wynieść nawet kilkaset metrów.

2. SYMULACJE NUMERYCZNE

Symulacje numeryczne dotyczyły wpływu efektu cienia radiowego i wielodrogowości sygnałów na dokładność wyznaczeń GNSS. Przeprowadzono je na autorskim oprogramowaniu. Aplikacja umożliwia stworzenie nominalnych warunków pomiarowych, poprzez rozmieszczenie satelitów na orbitach i ustalenie odchylenia standardowego błędu pomiaru pseudoodległości do poszczególnych satelitów. Sygnały odbite modelowane są jako dodatkowe błędy zwiększające pomierzony parametr o zadaną wielkość. Ponadto, program umożliwia zasymulowanie zjawiska blokowania sygnałów przez budynki (cienia radiowego).

Warunki pomiarowe, w których przeprowadzono przykładowe symulacje zebrano w tab.1 i 2. Błąd pozycji estymowanej ($p=0.95$) wyniósł 9.6 m, a współczynnik GDOP (Global Dilution Of Precision) 3.7.

Tab.1. Warunki pomiarowe – wartości zmierzonych pseudoodległości

Symulowane wyniki pomiarów pseudoodległości (odchylenie standardowe błędu pomiaru 6 m)			
SV 01	21480623.2 m	SV 17	21787252.3 m
SV 02	21971919.2 m	SV 23	23541613.4 m
SV 08	22175603.9 m	SV 24	24022907.4 m
SV 14	22747561.5 m		

Tab.2. Warunki pomiarowe – współrzędne odbiornika i satelitów

Pozycja odbiornika x, y, z i błąd zegara użytkownika w układzie ECEF			
x = 6378137.0 m	y = 0.0 m	z = 0.0 m	$(c \cdot \delta T) = 85000$ m
Pozycje satelitów (x_s, y_s, z_s) w układzie ECEF			
	x [m]	y [m]	z [m]
SV 01	22808160.9	-12005866.6	-6609526.5
SV 02	21141197.5	-2355056.3	-15985716.1
SV 08	20438959.3	-4238967.1	16502090.2
SV 14	18432296.2	-18613382.5	-4672400.8
SV 17	21772117.8	13773269.7	6656636.4
SV 23	15561523.9	3469098.6	-21303596.2
SV 24	13773316.6	15929331.4	-16266254.4

Symulacja polegała na tym, że po kolei każdy symulowany pomiar pseudoodległości obarczono dodatkowym 150 m błędem (symulującym pomiar sygnału odbitego). Wyniki symulacji zawarto w tab.3.

Tab.3. Błąd pozycji δM spowodowany 150 m błędem pomiaru pseudoodległości do jednego satelity

Satelita	SV01	SV02	SV08	SV14	SV17	SV23	SV24
δM	210 m	228 m	141 m	187 m	189 m	103 m	182 m

Jak widać, 150 m błąd pomiaru pseudoodległości spowodował różne wartości błędów wyznaczenia pozycji δM , w zależności od tego, w pomiarze do którego satelity wystąpił.

Następnie zasymulowano przysłonięcie satelity SV 01 i SV 24 (nie spowodowało to wzrostu błędu pozycji estymowanej przy braku sygnałów odbitych, ale pogorszyło geometrię segmentu kosmicznego – GDOP = 5.9). Powtórzono eksperyment, ponownie obarczając po kolei każdą zmierzoną pseudoodległość dodatkowym 150 m błędem. Wyniki zebrano w tab.4.

Tab.4. Błąd pozycji δM spowodowany 150 m błędem pomiaru pseudoodległości do jednego satelity przy zasłoniętym satelicie SV01 i SV24

Satelita	SV01	SV02	SV08	SV14	SV17	SV23	SV24
δM	zasłonięty	534 m	155 m	106 m	144 m	486 m	zasłonięty

Zasłonięcie satelity SV01 i SV24 spowodowało bardzo duży wzrost błędu określenia pozycji użytkownika w dwóch przypadkach – SV02 i SV23. Dla satelity SV17 i SV14 dokładność pozycji poprawiła się, a dla SV 08 pozostała na zbliżonym poziomie.

Jak wynika z przytoczonych przykładowych wyników symulacji, wpływ sygnałów odbitych na rozwiązanie nawigacyjne jest zjawiskiem złożonym i wymagającym gruntownej analizy. Nie ma wątpliwości, że obszary zabudowane powodują błędy w określeniu współrzędnych położenia użytkownika. Ich wielkość silnie zależy od geometrii segmentu kosmicznego i może mocno odbiegać (być kilkadziesiąt razy większa) od podanych w standardzie SPS-2008. W [7] wykazano, że wystąpienie błędu grubego pomiaru pseudoodległości powoduje przesunięcie wyznaczeń pozycji o pewien wektor, którego kierunek, zwrot i wartość zależą od tego, do którego satelity pomiar pseudoodległości obarczony był błędem grubym i jakiej wielkości był to błąd. Wystąpienie błędu grubego nie powoduje natomiast zmiany kształtu rozkładu współrzędnych, który zależy wyłącznie od błędów przypadkowych pomiarów – kształt i rozmiar rozkładu pozostają takie same, przesuwa się natomiast jego środek (patrz rys. od 2a do 2f).

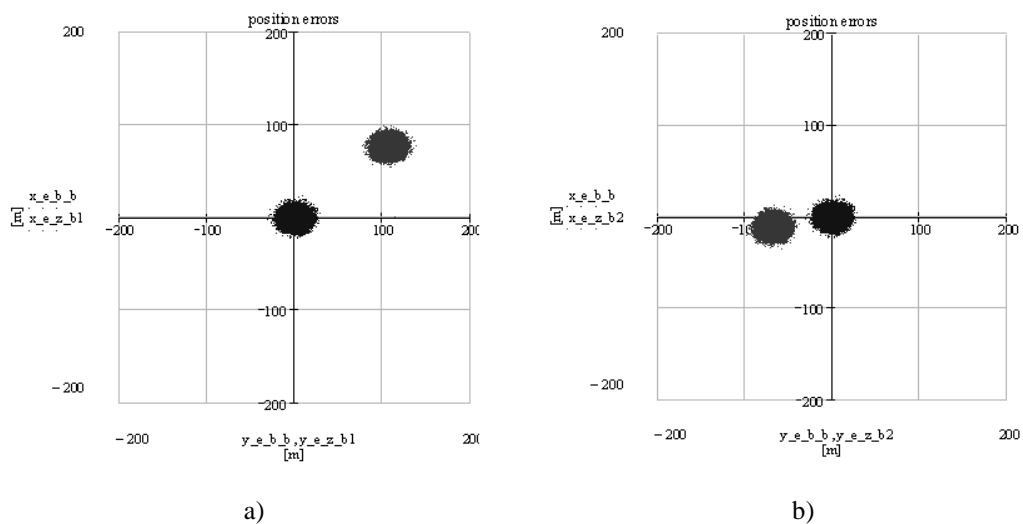
W celu zobrazowania opisanego zjawiska przeprowadzono następujący eksperyment. Przy pomocy opracowanego oprogramowania wybrano losowo układ geometryczny widocznych satelitów GPS. Ich azymuty i wysokości topocentryczne (kąty elewacji) zawarte zostały w tab.5.

Tab. 5. Azymuty i wysokości topocentryczne satelitów GPS w wylosowanym układzie geometrycznym

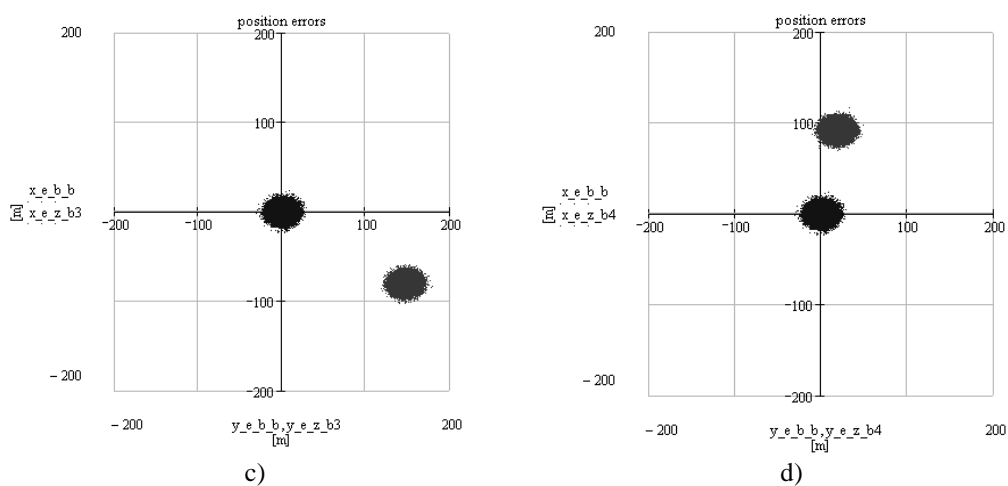
<i>Nr satelity</i>	<i>Azymuty</i>	<i>Wysokości topocentryczne</i>	<i>Nr satelity</i>	<i>Azymuty</i>	<i>Wysokości topocentryczne</i>
1	144,7°	06,3°	4	011,2°	34,7°
2	328,1°	53,7°	5	052,5°	82,3°
3	309,3°	05,8°	6	240,6°	44,2°

Następnie przeprowadzono Symulację 86 400 wyznaczeń, przy czym założono, że błędy przypadkowe pomiarów opisane będą niezależnymi zmiennymi losowymi o standardowym rozkładzie normalnym i odchyleniu standardowym $\sigma_p = 6$ m. W ten sposób otrzymano rozkład pozycji w sytuacjach, gdy w pomiarach nie pojawiły się błędy grube (kolor ciemniejszy na rys.2a-f). W kolejnych krokach obarczano jeden pomiar pseudoodległości (kolejno do każdego widocznego satelity) błędem grubym równym 200 m i ponownie przeprowadzono symulację 86 400 wyznaczeń. W ten sposób otrzymano rozkłady współrzędnych pozycji w sytuacji wystąpienia błędu grubego pomiaru.

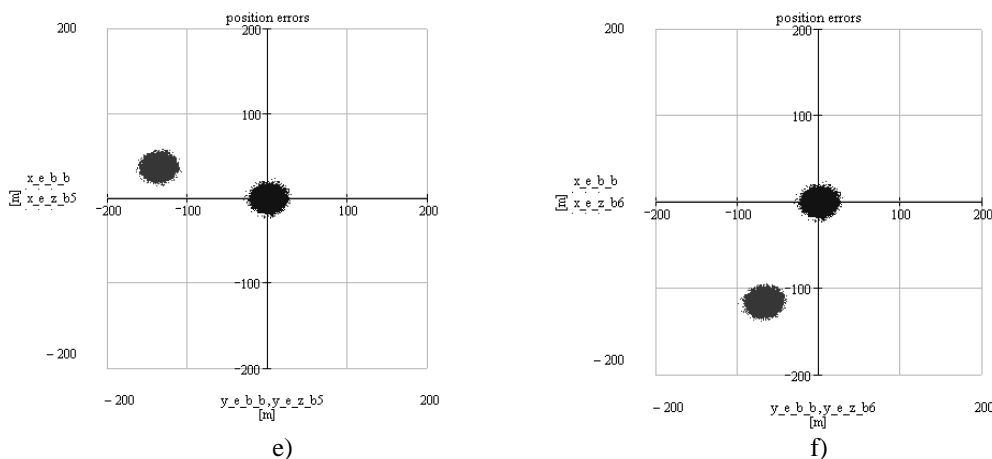
Otrzymane wyniki w płaszczyźnie XoY przedstawiono w formie graficznej na poniższym rysunku, przy czym rys.2a odpowiada sytuacji, gdy błędny pomiar wykonano do satelity nr 1, rys.2b, gdy do satelity nr 2, itd.



Rys. 2a i b. Rozkłady wyznaczeń w płaszczyźnie XoY względem pozycji rzeczywistej; (kolor ciemniejszy) – brak błędu grubego, (kolor jaśniejszy) – wystąpił błąd gruby



Rys. 2c i d. Rozkłady wyznaczeń w płaszczyźnie XoY względem pozycji rzeczywistej; (kolor ciemniejszy) – brak błędu grubego, (kolor jaśniejszy) – wystąpił błąd gruby



Rys. 9e i f. Rozkłady wyznaczeń w płaszczyźnie XoY względem pozycji rzeczywistej; (kolor ciemniejszy) – brak błędu grubego, (kolor jaśniejszy) – wystąpił błąd grubo

Zaprezentowane przykładowe wyniki symulacji ponownie potwierdziły, że wpływ błędu grubego pomiaru pseudoodległości zależy od miejsca satelity (do którego wystąpił błąd grubo pomiaru) w układzie geometrycznym widocznych satelitów. Z grubsza rzecz ujmując, jeżeli wyeliminowanie danego satelity z rozwiązania nawigacyjnego nie powoduje dużej zmiany wartości współczynników DOP, to błąd w pomiarze pseudoodległości do tego satelity wywiera mniejszy wpływ na błędy wyznaczeń współrzędnych pozycji (patrz rys.2b). W przeciwnym razie ten wpływ jest znaczny.

3. WNIOSKI

Zaprezentowane przykładowe wyniki symulacji pokazują, że mimo powszechności zastosowań GNSS do wyznaczania współrzędnych obiektów, systemy te posiadają pewne ograniczenia. Ponieważ sygnał wysyłany przez segment kosmiczny (umożliwiający użytkownikowi pomiar odległości do satelitów i na tej podstawie wyznaczenie współrzędnych pozycji i czas) jest z jednej strony blokowany przez przeszkody terenowe, a z drugiej, może się od nich odbijać, warunki pozycjonowania w aglomeracjach miejskich diametralnie różnią się od tych występujących na otwartej przestrzeni. Użytkownik nie może zakładać, że dokładności pozycji będą podobne do tych obserwowanych przy „czystym” horyzoncie (na poziomie pojedynczych metrów). Wyniki przeprowadzonych badań ukazują, że błędy współrzędnych mogą sięgać kilkuset metrów, co wymusza dalsze badania nad metodami wykrycia, identyfikacji i eliminacji błędów grubych w pomiarach pseudoodległości. Niska cena odbiorników nawigacji satelitarnej sprawia, że aplikacje GNSS to nie tylko profesjonalne systemy lokalizacji i monitorowania obiektów, ale też szeroka gama użytkowników, dla których odbiornik GNSS jest „nieomylnym” informatorem o położeniu. Zatem zdaje się, że od zapewnienia odpowiednich metod monitorowania wiarygodności GNSS w aglomeracjach miejskich i w warunkach

występowania przeszkód terenowych, zależeć będzie bezpieczeństwo szeroko rozumianej nawigacji.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Agarwal N., *Algorithms for GPS Operation Indoors and Downtown*, GPS Solutions, 2002.
- [2] Brown R.G., *A Baseline GPS RAIM Scheme and a Note on the Equivalence of Three RAIM Methods*, NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation, Vol. 39, No. 3, 1992.
- [3] Brown R.G., *GPS RAIM: Calculation of Thresholds and Protection Radius Using Chi-square Methods – a Geometric Approach*, RTCA paper No 491-494/SC159-584, 1994.
- [4] Brown R.G., *Receiver Autonomous Integrity Monitoring*, Global Positioning System: Theory and Applications, vol. II, 1996.
- [5] Nowak A., Waż M., *Wpływ aglomeracji miejskiej na dokładność wyznaczenia pozycji za pomocą satelitarnych systemów nawigacyjnych*, Zeszyty Naukowe Nr 6(78) Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin, 2005.
- [6] Nowak A., Specht C., *Snapshot RAIM Algorithms Availability in Urban Areas*, Annual of Navigation, No. 11/2006, 2006.
- [7] Nowak A., *Influence of Pseudorange Measurement Errors and Space Segment Geometry on GPS Fixes Distribution*, Advances in Computer Science – Network Centric Warfare, ISBN 978-83-922739-8-1, Gdynia 2009, s.148-154.
- [8] Salycheva O., Cannon M.E., (2005), *INS/HSGPS Integration in Downtown Areas*, European Journal Navigation, August 2005.
- [9] Sturza M.A., *Fault Detection and Isolation (FDI) Techniques for Guidance and Control Systems*, AGARDOGRAPH No. 314, AGARD, NATO, 1991.
- [10] Sturza M.A., *Navigation System Integrity Monitoring Using Redundant Measurements*, NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation, Vol. 35, 1989.