

Aleksander NOWAK¹

PROBLEMY POZYCJONOWANIA SATELITARNEGO W AGLOMERACJACH MIEJSKICH

W artykule przedstawiono rozważania teoretyczne i wyniki eksperymentów, których celem było zasygnalizowanie pewnych problemów związanych z zastosowaniem GNSS (z ang.: Global Navigation Satellite Systems – Globalne Satelitarne Systemy Nawigacyjne) w aglomeracjach miejskich. W pierwszej części artykułu przedstawiono rozważania dotyczące potencjalnych problemów związanych z wyznaczaniem współrzędnych pozycji w środowisku występowania wysokich budynków, które zobrazowano przykładami literaturowymi. W części drugiej zaprezentowano wyniki badań własnych, dotyczących dostępności metod monitorowania wiarygodności GNSS (RAIM) typu „snapshot” w aglomeracjach miejskich. Eksperymenty numeryczne wykonano z wykorzystaniem autorskiego oprogramowania.

SOME PROBLEMS OF SATELLITE POSITIONING IN URBAN AREAS

The paper presents results of analysis and experiments concerning some problems and limitations of satellite positioning in urban areas. In the first part of the paper the potential threads connected with fixing in high buildings environment are described. They are illustrated by examples from literature. In the second one, the results of own experiments concerning availability of “snapshot” receiver autonomous integrity monitoring methods (RAIM) in urban areas are presented. They were done on author's software.

1. WSTĘP

Dynamiczny wzrost aplikacji GNSS, stymulowany łatwością w pozyskiwaniu danych o położeniu obiektu, miniaturyzacją i niską ceną odbiorników sprawił, że koniecznym staje się postawienie pytania o ograniczenia pozycjonowania satelitarne w aglomeracjach miejskich. Pytanie zdaje się być zasadne, jeżeli weźmiemy pod uwagę, że wysokie budynki powodują blokowanie sygnałów satelitarnych (zmniejszając tym samym liczbę śledzonych przez odbiornik satelitów) oraz odbijają sygnały, co może prowadzić do błędów grubych wyznaczeń. Oba zjawiska są niebezpieczne. W pierwszym przypadku, może dojść do spadku dokładności pozycji na skutek pogorszenia geometrii segmentu kosmicznego (wzrostu geometrycznych współczynników dokładności DOP – zwanych też współczynnikami rozmycia precyzji). W drastycznej sytuacji liczba widocznych satelitów

¹Instituut 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

może uniemożliwić wyznaczenie współrzędnych pozycji. Ponadto, pogorszenie geometrii segmentu kosmicznego może niekorzystnie wpłynąć na dostępność metod monitorowania wiarygodności GNSS z poziomu odbiornika – RAIM. Natomiast błędy grube wyznaczeń spowodowane odbiciem sygnałów od budynków mogą mieć znaczne wartości (nawet kilkaset metrów), co w aplikacjach wymagających np. lokalizacji obiektu, stanowi spory problem.

W niniejszym artykule podjęto próbę przybliżenia wspomnianych zagadnień oraz zaprezentowano wyniki eksperymentów potwierdzających słuszność przyjętego toku rozumowania.

1. ROZWAŻANIA TEORETYCZNE

Wyznaczenie współrzędnych pozycji przy pomocy GNSS odbywa się na podstawie 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 nieznanymi i traktowany jako czwarta niewiadoma – obok trójwymiarowych współrzędnych pozycji. W związku z tym, mierzony parametr często nazywamy pseudoodległością. Błąd średni pozycji GNSS szacujemy z następującej zależności:

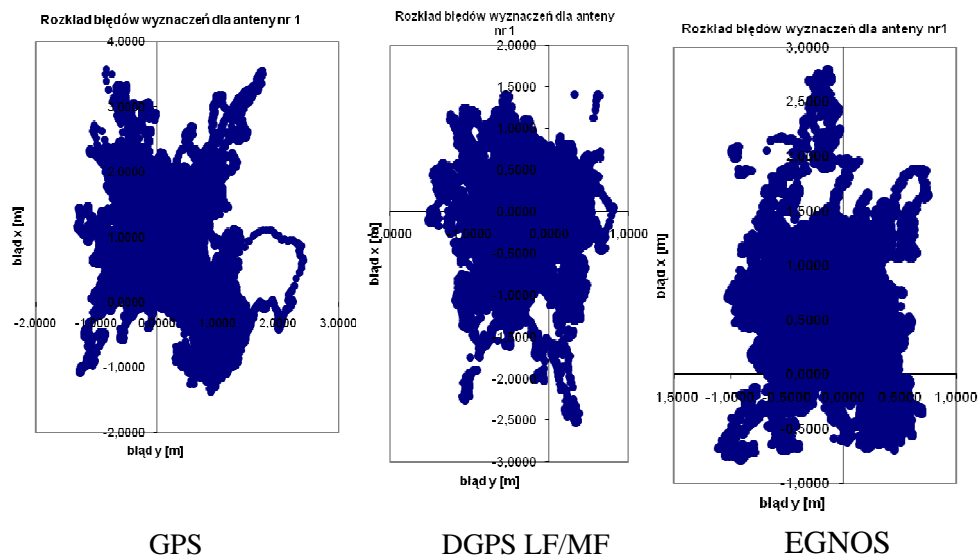
$$M = \sigma_{\rho} \cdot DOP, \quad (1)$$

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). Na otwartej przestrzeni (przy braku przeszkód terenowych) wyznaczenie współrzędnych nie stanowi większego problemu. Obecna konstelacja GPS zapewnia widoczność od 8 do 12 satelitów. Dzięki temu, wpływ geometrii segmentu kosmicznego na dokładność wyznaczonych współrzędnych jest praktycznie znikomy (wartości geometrycznych współczynników dokładności DOP są bliskie 1) i można stwierdzić, że dokładność pozycji zależy jedynie od σ_{ρ} . Ponieważ dokładności wyznaczeń GNSS na otwartej przestrzeni poświęcono szereg publikacji, a całkowita widoczności sfery niebieskiej w terenach o wysokiej zabudowie zdarza się rzadko, to sytuacji tej nie rozważano w ramach niniejszego artykułu. Dla porządku przedstawiono jedynie rozkłady błędów wyznaczeń wybranych GNSS – GPS, DGPS LF/MF oraz EGNOS. Wyniki uzyskano w drodze 24 godzinnych statycznych sesji pomiarowych, przeprowadzonych w warunkach całkowitej widzialności sfery niebieskiej (brak przesłon terenowych). W pomiarach wykorzystano odbiornik miniMax firmy CSI, który umożliwia wybór różnych trybów GNSS, w tym GPS, DGPS LF/MF i EGNOS. Antenę odbiornika

umieszczono na dachu budynku Akademii Marynarki Wojennej. Wyniki zaprezentowano na rys.1 oraz zamieszczono w tab.1.



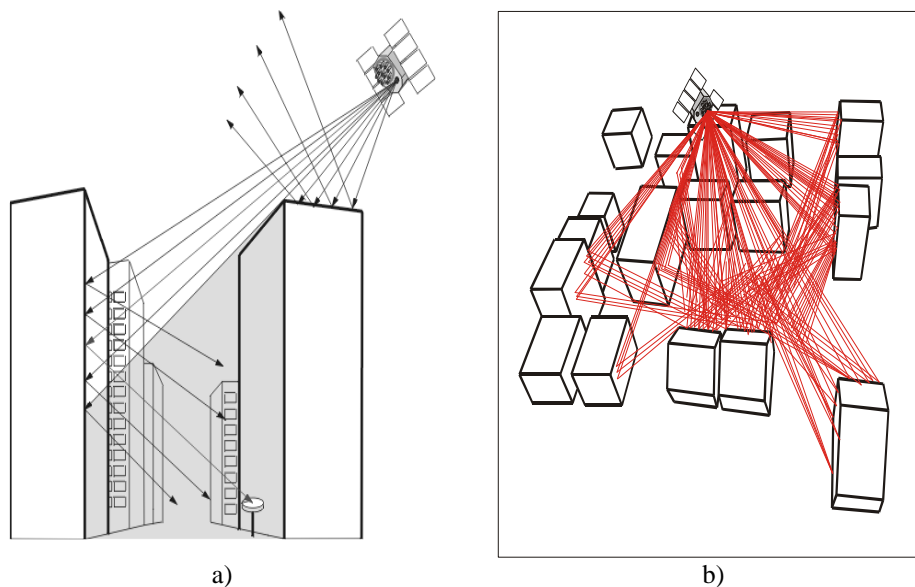
Rys. 1. Dokładność horyzontalna wybranych GNSS na otwartej przestrzeni

Tab. 1. Dokładność horyzontalna wybranych GNSS na otwartej przestrzeni

System	GPS	DGPS LF/MF	EGNOS
Dokładność horyzontalna (p=0.95)	2.9 m	1.41 m	1.87 m

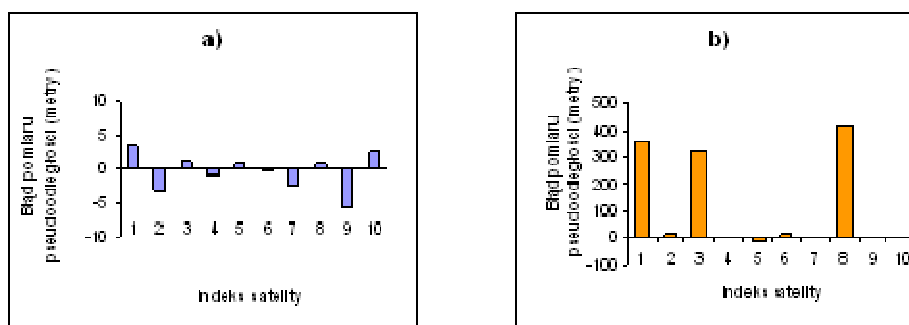
Z danych zamieszczonych w tab.1 wynika, że dokładność GPS nawet bez wspomaganie różnicowego waha się na poziomie pojedynczych metrów, zatem zdaje się być wystarczająca dla większości zadań nawigacyjnych i lokalizacyjnych. Sprawa zmienia się diametralnie w momencie wyznaczania współrzędnych między wysokimi budynkami. Efekty cienia radiowego (związany z blokowaniem sygnałów) i wielodrogowości (spowodowanego odbiciem sygnałów) sprawiają, że wyznaczone współrzędne mogą być obciążone znacznymi błędami (nawet kilkuset metrów). Nie są to błędy związane z wadliwą pracą systemu, lecz warunkami pomiarów odległości do satelitów.

Problem pojawiania się błędów grubych pomiarów pseudoodległości w warunkach występowania zjawiska cienia radiowego i wielodrogowości sygnałów przedstawiono na rys.2.



Rys. 2. Błąd pomiaru odległości do satelity związany ze zjawiskiem cienia radiowego i wielodrogowością sygnałów

Z rys.2 wynika, że przy niekorzystnym układzie budynków błędy pomiarów odległości do satelitów mogą być znaczne. Dla przykładu na rys.3 zaprezentowano różnice w wielkości błędów pomiarów pseudoodległości na otwartej przestrzeni i w aglomeracji miejskiej o wysokiej zabudowie. Opis przeprowadzonych badań można znaleźć w [1].



Rys. 3. Błędy pomiarów pseudoodległości; a) na otwartej przestrzeni; b) w terenie o wysokiej zabudowie[1]

Duże błędy pomiarów pseudoodległości przekładają się na znaczne błędy wyznaczeń współrzędnych pozycji. W tab.2 zamieszczono przykładowe błędy wyznaczeń zarejestrowane podczas pomiarów wykonanych na 4 ulicach w aglomeracji miejskiej o wysokiej zabudowie. Eksperyment szczegółowo opisano w [7].

Tab. 2. Przykładowe błędy wyznaczeń GNSS zarejestrowane w aglomeracji miejskiej[7]

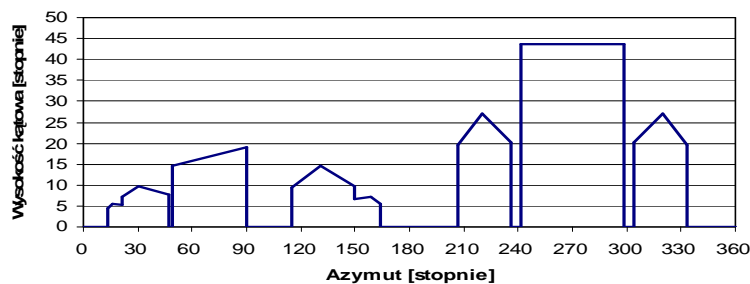
Nr trasy	RMS [m]	Błąd max. [m]
1	68	487
2	106	2110
3	90	490
4	113	1002

Kolejnym ograniczeniem zastosowania pozycjonowania satelitarne w aglomeracjach miejskich jest spadek dostępności metod monitorowania wiarygodności z poziomu odbiornika RAIM (z ang. Receiver Autonomous Integrity Monitoring) typu „snapshot”. Zadaniem tych metod jest ochrona użytkownika przed błędami grubymi wyznaczeń. Powstały one z myślą o nawigacji lotniczej i w związku z tym, przy ich opracowaniu przyjęto założenia, które są słuszne tylko na otwartej przestrzeni. Pierwszym jest, że w pomiarach pseudoodległości może wystąpić tylko jeden błąd grubo pomiaru. Drugim, że wyeliminowanie dowolnego satelity z rozwiązania nawigacyjnego nie spowoduje znaczącego pogorszenia geometrii segmentu kosmicznego (wzrostu współczynników DOP)[4]. Ponieważ błędy pomiaru pseudoodległości w aglomeracjach miejskich spowodowane są efektem odbicia sygnałów od budynków, a z drugiej strony budynki powodują, że liczba widocznych satelitów spada, to ani jedno ani drugie założenie nie jest uprawnione. Zatem, w aglomeracjach miejskich należy spodziewać się znaczącego pogorszenia dostępności metod RAIM typu „snapshot”.

2. SYMULACJE NUMERYCZNE

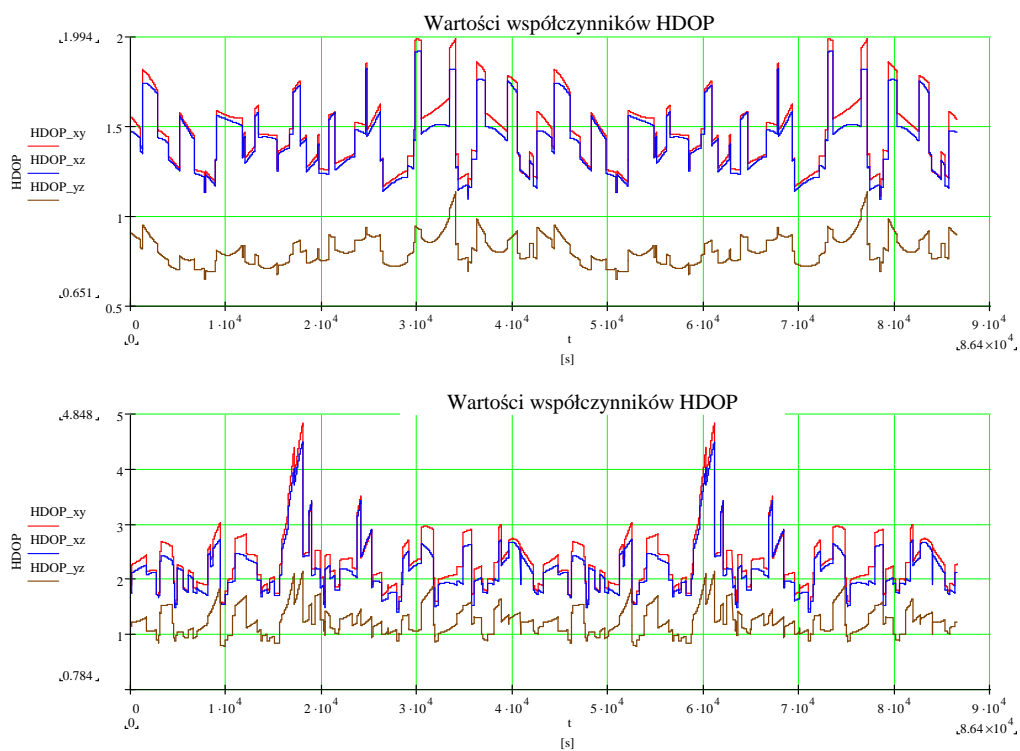
Symulacje numeryczne przeprowadzono na autorskim oprogramowaniu. Dotyczyły one wpływu aglomeracji miejskiej na dostępność metod RAIM typu „snapshot”. Zasyulowano zmiany geometrii segmentu kosmicznego wywołane obecnością budynków, a otrzymane wyniki przeanalizowano pod kątem przewidywanego poziomu ochrony ARP zapewnianego przez analizowane metody RAIM. Następnie obliczone ARP porównano z założonym wymaganym poziomem ochrony i w ten sposób określono zmiany dostępności.

Symulowano 24 godziną statyczną sesję pomiarową, w której wirtualny odbiornik umieszczony był między budynkami, które tworzyły przesłonę terenową (odcinały część horyzontu), tak jak to pokazano na rys.4. Oprogramowanie umożliwiło jednoczesną rejestrację liczby widocznych satelitów, wartości geometrycznych współczynników dokładności DOP oraz przewidywanych poziomów ochrony ARP (z ang. Approximated Radial-error Protected) w warunkach zasyulowanych przeszkód terenowych i tak jakby tych przeszkód nie było. Pozwoliło to na określenie zmian ARP wywołanych obecnością budynków wokół anteny odbiornika, w stosunku do pomiarów wykonywanych na otwartej przestrzeni.



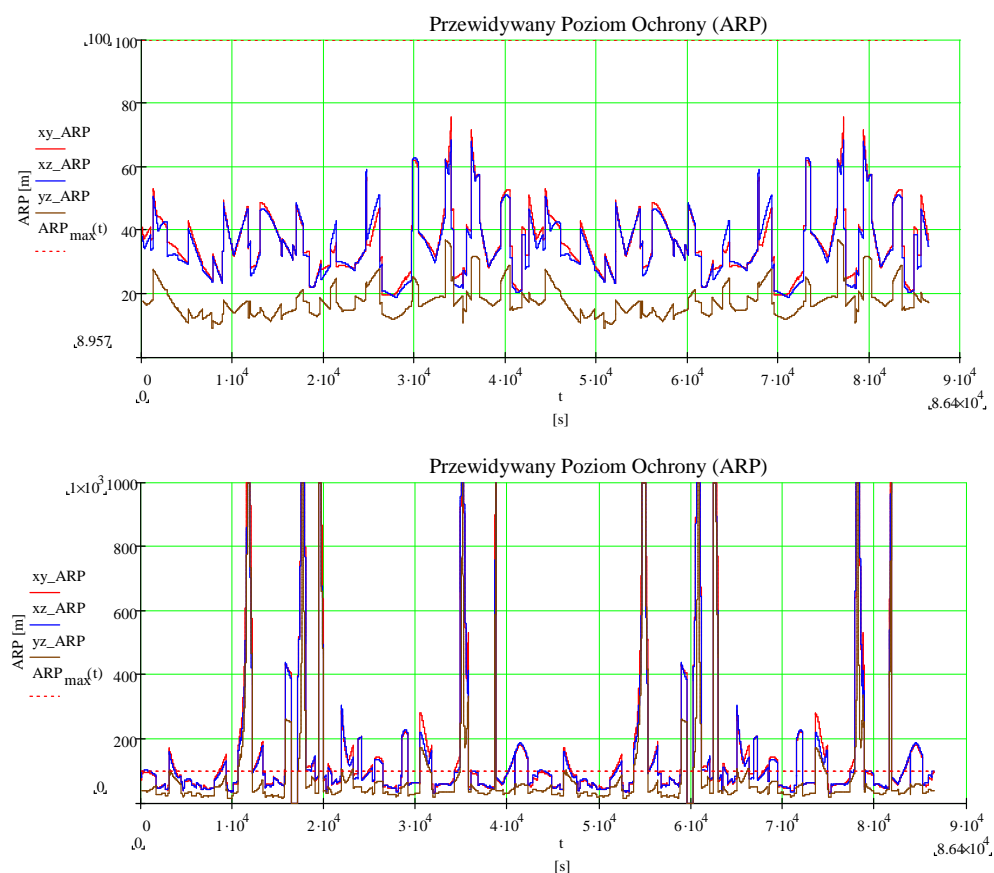
Rys.4. Wysokości katowe budynków użyte do zasymulowania wpływu aglomeracji miejskiej na dostępność metod RAIM typu „snapshot”

Wprowadzenie przesłon terenowych spowodowało spadek liczby widocznych satelitów, a to z kolei spowodowało wzrost wartości współczynników DOP. Porównanie HDOP (z ang.: Horizontal DOP) zaprezentowano na rys.5.



Rys. 5. Wartości współczynników HDOP w funkcji czasu. Na otwartej przestrzeni – wykres górny; Gdy występują przeszkody terenowe – wykres dolny[6]

Na rys. 5 górny wykres przedstawia wartości współczynników HDOP w poszczególnych płaszczyznach (oznaczone odpowiednio jako HDOP_{xy}, HDOP_{xz} i HDOP_{yz}) w funkcji czasu na otwartej przestrzeni, natomiast dolny, te same wielkości w przypadku występowania budynków, które odcinały część horyzontu, tak jak to pokazano na rys.4. Wprowadzenie przeszkód terenowych spowodowało nie tylko wzrost wartości współczynników DOP, co oczywiście pogorszyło dokładności wyznaczeń zgodnie z zależnością (1), ale również obłożyło wartości przewidywanego poziomu ochrony ARP metod RAIM typu „snapshot”. Uzyskane wyniki zaprezentowano na rys.6.

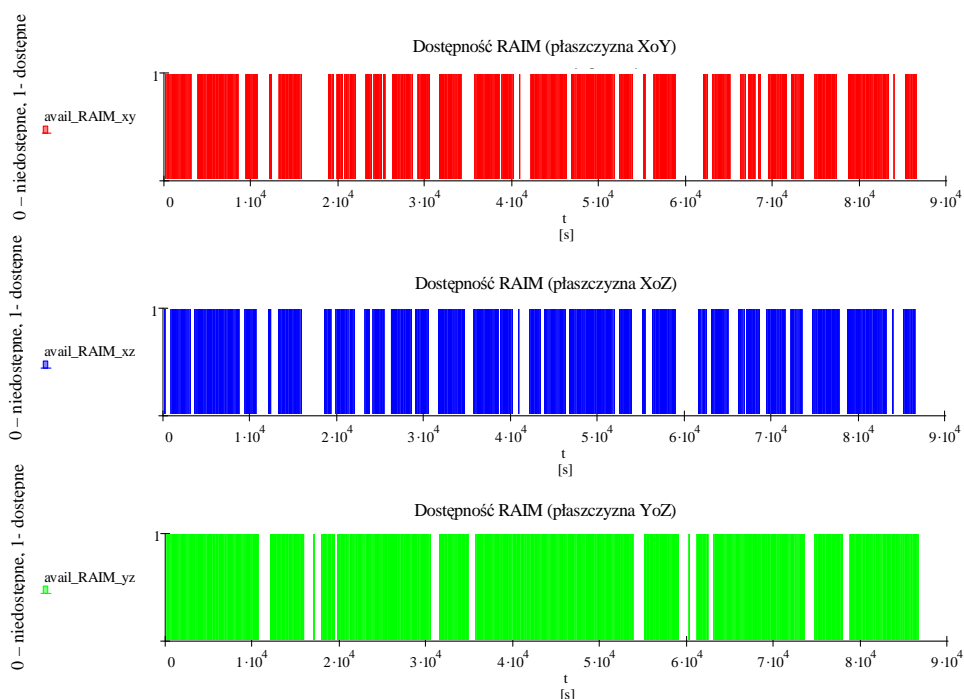


Rys. 6. Wartości przewidywanego poziomu ochrony ARP metod RAIM typu „snapshot” w funkcji czasu. Na otwartej przestrzeni – wykres górny; Gdy występują przeszkody terenowe – wykres dolny[6]

Na rys. 6 czerwoną linią kropkowaną zaznaczono założony wymagany poziom ochrony równy 100 m. Dla takiego poziomu określono zmiany dostępności metod RAIM typu „snapshot”, przy czym zdefiniowano następujące stany:

- Stan zdadności – ARP jest mniejsze bądź równe założonemu wymaganemu poziomowi ochrony,
- Stan niezdatności – ARP jest większe od założonego wymaganego poziomu ochrony.

Z rys.6 wynika, że dla założonego wymaganego poziomu ochrony równego 100 m, na otwartej przestrzeni dostępność metod RAIM typu „snapshot” wynosi 1. Natomiast wprowadzenie przeszkód terenowych spowodowało wyraźny spadek dostępności. Uzyskane wynik przedstawiono w tab.3, natomiast na rys.7 przedstawiono zmiany stanów, gdzie 1- stan zdadności, 2 – stan niezdatności.



Rys. 7. Zmiany stanów RAIM typu „snapshot” w warunkach występowania przeszkód terenowych

Tab.3. Dostępność RAIM typu „snapshot” w warunkach występowania przeszkód terenowych

Płaszczyzna	XoY	XoZ	YoZ
Dostępność RAIM typu „snapshot”	0.61	0.62	0.85

3. WNIOSKI

Lawinowy wzrost aplikacji GNSS, w tym związanych z pozycjonowaniem i lokalizacją w aglomeracjach miejskich (gdzie warunki pomiarów znacznie różnią się od tych na otwartej przestrzeni) wymusza przeanalizowanie problemów, jakie powodować mogą blokowanie sygnałów przez budynki (zjawisko cienia radiowego) i ich odbijanie (zjawisko wielodrogowości). Obecnie w profesjonalnych nawigacyjnych zastosowaniach GNSS dokładność pozycji jest tak samo ważna jak wiarygodność systemu. W niniejszym artykule zasygnalizowano, że obecność budynków niekorzystnie wpływa zarówno na jedno, jak i drugie. W literaturze można znaleźć szereg przykładów, gdzie autorzy pokazują, jak duże błędy wyznaczeń mogą spowodować sygnały odbite. Natomiast wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych (których przykłady zaprezentowano w niniejszym artykule) jednoznacznie wykazują na znaczący spadek dostępności metod monitorowania wiarygodności GNSS z poziomu odbiornika (RAIM) typu „snapshot”, spowodowany obecnością budynków. Co prawda metody typu „snapshot” są jednymi z trzech typów metod RAIM, jednak pozostałe (wielosensoryczne i filtracyjne) nie zawsze można zastosować w aplikacjach związanych z pozycjonowaniem i lokalizacją w aglomeracjach miejskich. Zatem dalsze badania dotyczące ograniczeń w zastosowaniu GNSS zdają się być konieczne.

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., Wąż 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] Salycheva O., Cannon M.E., (2005), *INS/HSGPS Integration in Downtown Areas*, European Journal Navigation, August 2005.
- [8] Sturza M.A., *Fault Detection and Isolation (FDI) Techniques for Guidance and Control Systems*, AGARDOGRAPH No. 314, AGARD, NATO, 1991.
- [9] Sturza M.A., *Navigation System Integrity Monitoring Using Redundant Measurements*, NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation, Vol. 35, 1989.