

**ZESZYTY NAUKOWE NR 2 (74)  
AKADEMII MORSKIEJ  
W SZCZECINIE**

---

**EXPLO-SHIP 2004**

---

Arkadiusz Tomczak, Paweł Zalewski

**Analiza wpływu konstelacji GNSS na jakość i dostępność  
pozycji w porcie Świnoujście**

Słowa kluczowe: GPS, GNSS, bezpieczeństwo nawigacji, port Świnoujście

*Analizowano geometrię aktualnej konstelacji systemu GNSS (obejmującej 28 aktywnych satelitów GPS) dla obserwatora znajdującego się w porcie Świnoujście. Uwzględniono zakłócenia, jakim ona podlega pod wpływem istniejącej infrastruktury portowej. Określono kąty przesłonięcia w zależności od pozycji statku na torze wodnym i umiejscowienia anteny GPS na statku. Na tej podstawie oceniono dostępność pozycji GPS w porcie Świnoujście. Grupując parametry dostępnych podczas 24 h obserwacji satelitów w czterech głównych sektorach (Pn, W, Pd, Z), przeprowadzono analizę statystyczną wpływu usytuowania satelitów na jakość geometryczną pozycji odbiornika GNSS.*

**Analysis of the GNSS Constellation Impact on the Quality  
and Availability of Position in the Port of Świnoujście**

Key words: GPS, GNSS, safety of navigation, Port of Świnoujście

*The paper presents an analysis of the current GNSS constellation geometry (comprising 28 active GPS satellites) performed in the Port of Świnoujście. The geometry disturbances resulting from the harbour infrastructure were taken into consideration and values of mask angles were determined depending on ship's position in the fairway and GPS antenna location. On this basis the availability of GPS position in the Port of Świnoujście was evaluated. The statistical analysis of satellites locations' impact on the geometrical quality of GNSS receiver's position was made after grouping available satellites' parameters into four main sectors (N, E, S, and W).*

## Wprowadzenie

W ciągu ostatniej dekady GPS (Global Positioning System) stał się podstawowym systemem pozycjonowania na statkach morskich. Wraz z rozwojem tej technologii producenci wprowadzają na rynek coraz dokładniejsze odbiorniki. Najlepsze z nich określają pozycję, poprawioną różnicowo w czasie rzeczywistym, z dokładnością  $\pm 1 - 5$  cm. W najbliższej przyszłości (2006 – 2008 r.) oddany zostanie do użytku europejski system satelitarnego pozycjonowania GALILEO. GALILEO z liczbą 30 operacyjnych satelitów wraz z amerykańskim GPS wejdzie w skład globalnego nawigacyjnego systemu satelitarnego GNSS. Producenci sprzętu zapewniają, że odbiorniki będą przygotowane do wspólnej eksploatacji obu systemów. Teoretycznie nie wystąpią zatem przedziały czasu, w których niemożliwe będzie uzyskanie trójwymiarowej pozycji w dowolnym punkcie na kuli ziemskiej. Duża liczba satelitów znacznie poprawi jakość i dostępność sygnału GNSS. W tej sytuacji satelitarne techniki pozycjonowania obiektów, a w szczególności jednostek morskich, wydają się być najdokładniejszymi i najwygodniejszymi sposobami określania parametrów wektora stanu statku, którymi są nie tylko współrzędne pozycji, ale również jego prędkość, kąt drogi, kurs, przechył, trym i zanurzenie.

Inżynieria ruchu morskiego wykorzystuje techniki satelitarnego pozycjonowania do oceny bezpieczeństwa ruchu statków na obszarach ograniczonych [3, 4]. Na podstawie rejestrowanych w trzech wymiarach zmian położenia (szerokość geograficzna, długość geograficzna i wysokość nad przyjętym poziomem odniesienia), minimum dwóch anten rozmieszczonych w charakterystycznych punktach statku, możliwe jest wyznaczenie trajektorii ruchu i osiadania manewrującej jednostki, co w efekcie daje możliwość określenia bezpiecznego obszaru manewrowego. Wybór odbiorników i technik pomiarowych powinien być poprzedzony gruntowną analizą dokładności, strefy działania i dyspozycyjności systemu pozycyjnego, określonych w ścisłej relacji z rejonem badań, występującą na nim infrastrukturą i badanymi jednostkami. Wiedza o błędach i ograniczeniach systemu niezbędna jest do optymalnego zaplanowania sesji pomiarowej ze względu na dobór technik i narzędzi pomiarowych, czasu wykonania i wiarygodnej oceny uzyskanych wyników badań.

Dokładność pozycji GNSS jest między innymi zależna od geometrii systemu, czyli liczby satelitów i ich rozmieszczenia względem jednostki. Możliwość wyznaczenia pozycji trójwymiarowej 3D determinuje liczba satelitów, która nie może być mniejsza niż 4, a ich wysokości topocentryczne nie mogą być mniejsze niż graniczne wysokości topocentryczne zadane w odbiorniku. Właściwą geometrię systemu mogą zakłócić zarówno elementy infrastruktury obszaru ograniczonego [2], jak i statku (np. maszty, nadbudówki, ładunek pokładowy).

## **1. Eksperyment badawczy**

W przeprowadzonych badaniach użyto następujących urządzeń:

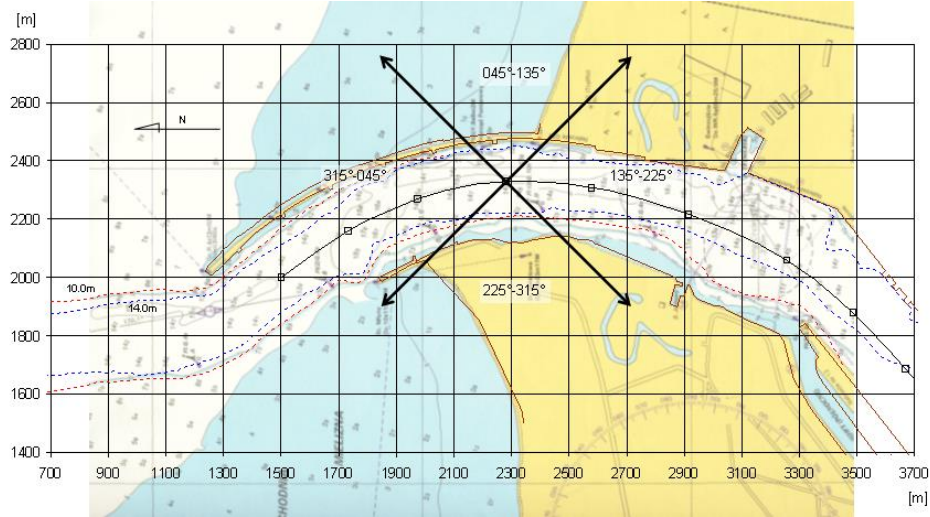
1. Dwa 12-kanalowe odbiorniki GPS Pro XRS firmy Trimble z wbudowanym odbiornikiem poprawek różnicowych modulacji MSK o wersji oprogramowania 1.42, charakteryzujące się:
  - a) technologią Everest redukującą błędy pochodzące od odbić wielokrotnych (wielotorowości sygnału),
  - b) częstotliwością uaktualniania pozycji 1 Hz,
  - c) możliwością pomiaru fazowego na fali nośnej o minimalnym czasie początkowej rejestracji statycznej równym 10 min.
2. Dwa przenośne rejestratory Trimble TSC1 Asset Surveyor z wersją oprogramowania 4.02 i 5.00.
3. Dwie anteny Trimble o możliwości odbioru: L1 GPS / MSK radiolatarni DGPS IALA / L1 satelitarnego serwisu WADGPS.
4. Komputer klasy PC z oprogramowaniem Trimble Pathfinder Office w wersji 2.51 umożliwiającym dwukierunkowy transfer danych pomiędzy aplikacjami GIS a rejestratorami Asset Surveyor oraz różnicowy post – processing danych zarejestrowanych w stacji ruchomej i bazowej.

Badania przeprowadzono w dwóch etapach na terenie portu Świnoujście. Pierwszy zasadniczy etap obejmował dwudziestoczęterogodzinną sesję pomiarową, wykonaną w pobliżu główek wejściowych portu Świnoujście, na 1,5 – 2 km toru wodnego. Podczas drugiego etapu zmierzono wysokości obiektów należących do infrastruktury portowej, mogących ograniczać lub uniemożliwiać przebieg sygnału na drodze satelita – odbiornik. Ze względu na fakt, że liczba satelitów widzianych przez odbiornik jest uzależniona nie tylko od geometrii systemu, ale również od kursu jednostki i przeszkód występujących wokół niej, obszar wokół statku podzielono na 4 sektory:

- północny N ( $315^\circ - 045^\circ$ ),
- wschodni E ( $045^\circ - 135^\circ$ ),
- południowy S ( $135^\circ - 225^\circ$ ),
- zachodni W ( $225^\circ - 315^\circ$ ).

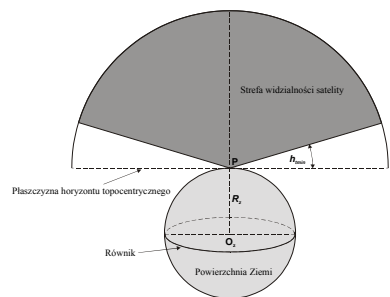
Powyższy podział umożliwił analizę geometrii systemu z uwzględnieniem kursów jednostek wchodzących do portu i wychodzących z portu, a także kierunków, na których występują przeszkody. Rysunek 1 przedstawia rejon badań z dziewięcioma punktami pomiarowymi (oznaczonymi symbolem „□”), osią toru wodnego i sektorami, na które został on podzielony.

Za pomocą autorskiej aplikacji, zaprojektowanej w środowisku Delphi na komputerze klasy PC, obliczono liczbę widocznych satelitów w poszczególnych sektorach, ich wysokości topocentryczne i stosunek sygnał/szum. Na tej podstawie dokonano statystycznej analizy wymienionych parametrów.



Rys. 1. Akwen badań w porcie Świnoujście  
 Fig. 1. Research area in the Port of Świnoujście

Według map nawigacyjnych i geodezyjnych wyznaczono odległości do przeszkód z dziewięciu punktów pomiarowych. Znając wysokość i odległość przeszkód, obliczono minimalne wysokości umieszczenia anten GPS dla statków poruszających się w osi symetrii toru wodnego, wchodzących i wychodzących z portu. Oceniono przydatność systemu GPS w aspekcie wykorzystania najnowszych technik pomiarowych, opartych na pomiarze fazy fali nośnej, w odbiornikach dwuczęstotliwościowych RTK.



Rys. 2. Strefa widzialności satelity S z punktu P z uwzględnieniem dolnej granicznej wysokości topocentrycznej obserwacji  $h_{min}$  [1]

Fig. 2. Satellite visibility zone from point P taking into account elevation mask  $h_{min}$  [1]

Stworzono dodatkową aplikację wyliczającą minimalną wysokość topocentryczną w czasie rzeczywistym, która powinna być zadana w odbiorniku, podczas przejścia danym obszarem ograniczonym (rys. 2, zależność (1)):

$$h_{t\min} = \arctan\left(\frac{h_o - h_a}{d}\right) \text{ [}^\circ\text{]} \quad (1)$$

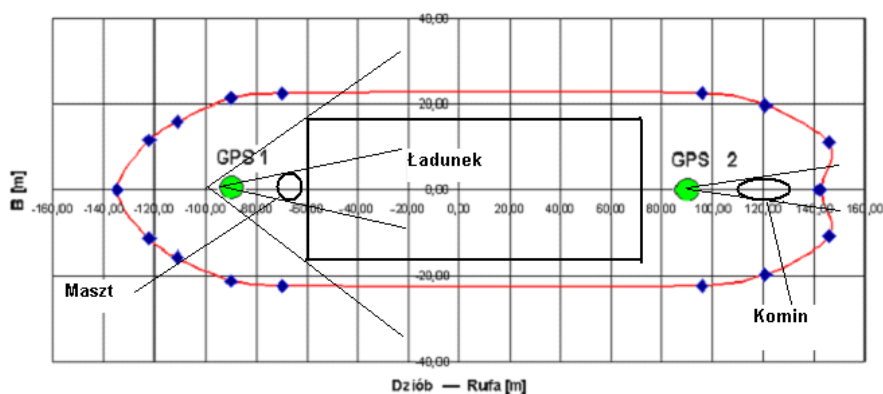
gdzie:

- $h_o$  – wysokość obiektu – przeszkody [m],
- $h_a$  – wysokość do podstawy anteny odbiornika GPS [m],
- $d$  – odległość do obiektu – przeszkody [m].

Badania zakończono porównaniem uzyskanych wartości stosunku sygnału do szumu (SNR) satelitów.

## 2. Rezultaty badań

Otrzymane wyniki interpretowano w odniesieniu do dwóch odbiorników zainstalowanych w osi symetrii statku. Odległość między odbiornikami powinna być możliwie największa [4]. Natomiast wysokość umieszczenia anten taka, by ograniczyć lub wyeliminować przesłonięcia pochodzące od przeszkód występujących na brzegu i na pokładzie jednostki. Rysunek 3 ilustruje przykładowe rozmieszczenie anten GPS.



Rys. 3. Przykładowe rozmieszczenie anten GPS na statku wraz sektorami, w których mogą wystąpić przesłonięcia sygnału

*Fig. 3. Examples of locations of GPS antennas with signal masking sectors presented*

Antena dziobowa zostanie umieszczona na wysokości około 3 m nad pokładem dziobówki. Z tego powodu w sektorze około  $45^\circ$  w kierunku rufy (w kącie kursowym  $157,5^\circ - 180^\circ$  na lewą i prawą burtę) zostanie zasłonięta przez ładunek

nek znajdujący się na pokładzie (statki ro-ro i kontenerowce, gazowce). Unie-  
możliwiony będzie odbiór sygnału od satelitów znajdujących się w tym sektorze,  
nawet dla znacznych (kilkadziesiąt stopni) wysokości topocentrycznych.  
W sektorze około  $5^\circ - 8^\circ$  również w kierunku rufy ( $176^\circ - 180^\circ$  LP burta) znaj-  
duje się maszt dziobowy. Miejscem mocowania anteny rufowej jest pokład pe-  
lengowy. Znajduje się ona znacznie wyżej od anteny dziobowej. Przeszkodę  
stanowi natomiast komin, który może przysłaniać antenę w sektorze  $000^\circ - 010^\circ$   
w odbiorze sygnału od satelitów znajdujących się za rufą statku ( $170^\circ - 180^\circ$  LP  
burta). Istotne znaczenie w odbiorze sygnałów od satelitów mają wysokości  
topocentryczne tychże satelitów, które powinny być większe, niż wysokości  
przeszkód.

## 2.1. Liczba widocznych satelitów

Rozkład ilościowy satelitów w poszczególnych sektorach azymutów przed-  
stawiono w tabeli 1. Podano maksymalne, minimalne, średnie i najczęstsze wy-  
stąpienia satelitów w okresie 24 godzin. W tabeli 2 podano ilościowy rozkład  
satelitów widocznych dookoła horyzontu anteny dla azymutów w pełnym zakre-  
sie kątów  $000^\circ - 360^\circ$ .

Tabela 1

Ilościowy rozkład satelitów systemu GPS dla czterech sektorów azymutów: l.max – największa  
liczba satelitów widocznych w sektorze, l.min – najmniejsza liczba satelitów widocznych w sekto-  
rze, l.s – średnia liczba satelitów widocznych w sektorze, l.m – modalna, najczęstsza liczba sateli-  
tów widocznych w sektorze

*Numerical distribution of GPS satellites in four sectors of azimuths*

Sektory azymutów	$315^\circ - 045^\circ$	$045^\circ - 135^\circ$	$135^\circ - 225^\circ$	$225^\circ - 315^\circ$
l.max	3	5	5	5
l.min	0	1	0	1
l.s	1	3	2	3
l.m	1	3	2	3

Tabela 2

Ilościowy rozkład satelitów dla pełnego zakresu azymutów  
*Numerical distribution of GPS satellites in full azimuths range*

Sektory azymutów	l.max	l.min	l.s	l.m
Liczba sat.	11	5	9	9

Ilość widocznych satelitów w poszczególnych sektorach jest znacznie zróż-  
nicowana. W sektorze  $315^\circ - 045^\circ$ , obejmującym kursy, jakimi poruszają się  
statki wychodzące z portu występują okresy, w których liczba satelitów była  
równa 0. Wartość najczęstsza wynosiła 1, a maksymalna liczba satelitów to 3.

Zbliżoną sytuację obserwuje się w sektorze  $135^{\circ} - 225^{\circ}$ , gdzie mimo iż największa liczba widocznych satelitów wyniosła 5, to wystąpiły momenty, w których ani jeden satelita nie był dostępny. W sektorach  $045^{\circ} - 135^{\circ}$  i  $225^{\circ} - 315^{\circ}$ , najczęściej obserwowano 3 satelity. Nie wystąpiły okresy, w których nie było żadnego widocznego satelity.

Dla pełnego zakresu azymutów ( $000^{\circ} - 360^{\circ}$ ) zaobserwowano 9 satelitów jako najczęściej występującą ilość. Maksymalna liczba satelitów wyniosła 11, a minimalna 5. Zakładając brak występowania przesłoneń anten GPS przez przeszkody, określenie pozycji trójwymiarowej byłoby możliwe przez cały okres obserwacji.

## 2.2. Wysokości topocentryczne

Tabela 3 przedstawia najczęstsze (moda) i średnie (średnia) wartości wysokości topocentrycznych satelitów w poszczególnych sektorach, obliczone dla średnich, maksymalnych i minimalnych wartości wysokości topocentrycznych satelitów zarejestrowanych podczas obserwacji.

Tabela 3

Średnie i modalne wartości wysokości topocentrycznych satelitów obliczone dla średnich, maksymalnych i minimalnych wysokości topocentrycznych satelitów zarejestrowanych podczas obserwacji w poszczególnych sektorach  
*Average and mode values of satellites elevations calculated for average, max, min satellite elevations registered in particular sectors*

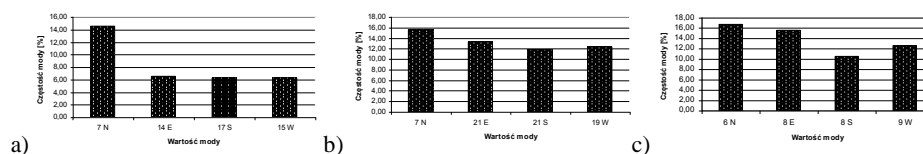
Wysokości topocentryczne		$315^{\circ} - 045^{\circ}$	$045^{\circ} - 135^{\circ}$	$135^{\circ} - 225^{\circ}$	$225^{\circ} - 315^{\circ}$
Średnia	Moda [°]	0	22	27	32
	Średnia [°]	9	36	37	36
Max.	Moda [°]	0	64	51	46
	Średnia [°]	10	57	54	56
Min.	Moda [°]	0	23	10	6
	Średnia [°]	8	18	23	18

W sektorze  $315^{\circ} - 045^{\circ}$  wartością najczęstszą jest liczba  $0^{\circ}$  oznaczając, że najczęściej nie obserwowano żadnego satelity, co potwierdza wyniki zaprezentowane w tabeli 1. Wartości średnie w tym sektorze nie przekraczają  $10^{\circ}$ . W wypadku wystąpienia przeszkód o wysokościach topocentrycznych większych niż  $10^{\circ}$ , prawie żaden satelita nie byłby widoczny. Mała liczba widocznych satelitów i ich niewielkie wysokości topocentryczne rzutują na to, że strefa działania systemu i jego dyspozycyjność w sektorze  $315^{\circ} - 045^{\circ}$  ma najgorsze parametry. W pozostałych sektorach najmniejszą wartość mody dla minimalnych wartości wysokości topocentrycznych wyliczono w sektorze  $225^{\circ} - 315^{\circ}$  i wyniosła ona  $6^{\circ}$ . Wartości średnie dla średnich wysokości są prawie identyczne i wynoszą  $36^{\circ}$

i  $37^\circ$ . Przewyższają one znacznie prawdopodobne wysokości topocentryczne przeszkód występujących w tych sektorach, zapewniając dość dobre warunki działania systemu.

### 2.3. SNR (Signal to Noise Ratio) – stosunek sygnału do szumu

Na wykresach rysunku 4 przedstawiono wartość mody i rozkład procentowy częstości mody dla średnich, maksymalnych i minimalnych SNR zarejestrowanych podczas obserwacji. Uznano, iż wartość najczęstszą najlepiej opisuje parametr SNR i może być wykorzystana do oceny przydatności systemu GPS w danym obszarze ograniczonym.



Rys. 4. Wartość i częstość mody obliczone dla a) średnich, b) maksymalnych, c) minimalnych SNR w sektorach: N, E, S, W

*Fig. 4. Value and frequency of mode calculated for a) average, b) maximum, c) minimum SNR in sectors: N, E, S, W*

Najniższe i jednocześnie najczęściej występujące wartości SNR obliczono dla sektora N ( $315^\circ - 045^\circ$ ) bez względu na to, czy były to maksymalne, minimalne lub średnie SNR zarejestrowane podczas obserwacji. W sektorach pozostałych dla maksymalnych i średnich SNR wartości najczęstsze są prawie identyczne i przewyższają dwukrotnie najczęstsze wartości obliczone w sektorze N. Jednoznacznie można stwierdzić, że parametr SNR przyjmuje w sektorze N wartości najmniej korzystne ( $315^\circ - 045^\circ$ ).

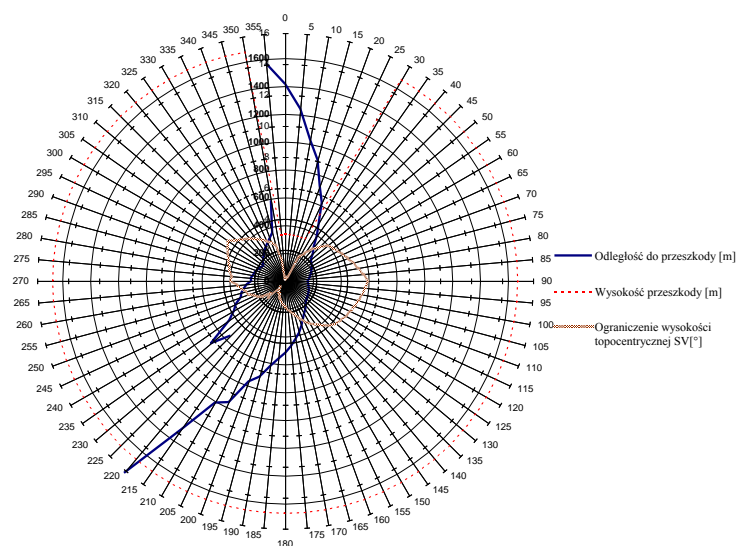
### 2.4. Mapa ograniczeń widzialności satelitów

Na podstawie danych z pomiarów przeprowadzonych na terenie portu Świnoujście, sporządzono aplikację generującą radarową mapę infrastruktury portowej dla kolejnych pozycji osiągniętych przez jednostkę wchodzącą lub wychodzącą z portu.

Rysunek 5 przedstawia przykładową mapę sporządzoną dla danej pozycji statku wychodzącego z portu (w szóstym punkcie pomiarowym licząc od główek). W centrum mapy, dookoła pozycji statku, znajduje się obwódca wyznaczająca graniczną wysokość topocentryczną [ $^\circ$ ], poniżej której żaden satelita nie będzie widoczny. Informacja ta może być wykorzystana do optymalnego ustawienia granicznej wysokości topocentrycznej odbiornika biorącego udział w pomiarach, w dowolnym obszarze badań. Oprócz symulacji, aplikacja może

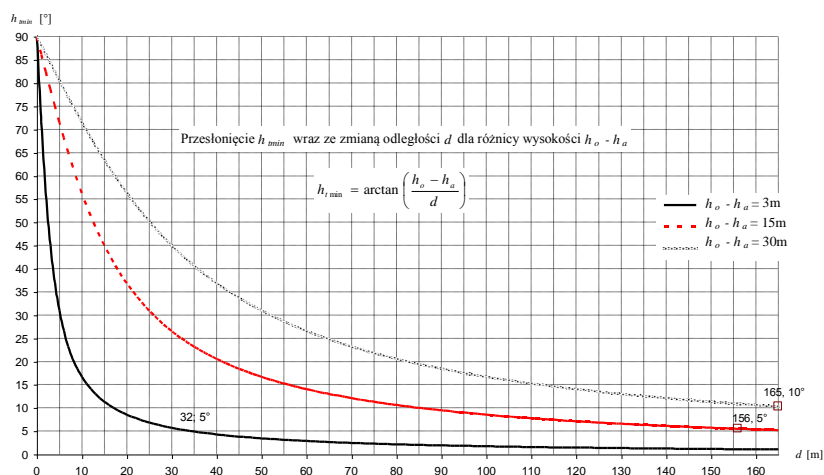


zostać użyta w czasie rzeczywistym do monitorowania zmian minimalnych wysokości topocentrycznych, powstających na skutek ruchu jednostki względem infrastruktury portowej.



Rys. 5. Radarowa mapa infrastruktury portowej z naniesioną obwiednią wyznaczającą graniczną wysokość topocentryczną

Fig. 5. Radar chart of harbour infrastructure with drawn line of minimum satellite elevation mask



Rys. 6. Przesłonięcie  $h_{min}$  wraz ze zmianą odległości  $d$  dla różnicy wysokości  $h_o - h_a$

Fig. 6. Change of elevation mask  $h_{min}$  depending on distance  $d$  and difference of height  $h_o - h_a$

Wykres na rysunku 6 przedstawia kąt przesłonięcia anteny odbiornika ( $h_{min}$ ) w funkcji odległości ( $d$ ) od przeszkody, dla trzech przyjętych różnic wysokości obiektu stanowiącego przeszkodę i wysokości anteny GPS: 3 m, 15 m i 30 m (zależność (1)). Wraz ze wzrostem odległości anteny GPS od przeszkody wartość przesłonięcia  $h_{min}$  maleje i zmierza do zera. Kąt przysłonięcia  $5^\circ$ , który jest powszechnie przyjętą wysokością topocentryczną zadawaną w odbiornikach GPS uzyskamy, kiedy antena odbiornika znajdzie się 32,5 m; 156,5 m i 165,1 m od przeszkody, odpowiednio, gdy różnica wysokości przeszkody i anteny odbiornika ( $h_o - h_a$ ) wynosi 3 m, 15 m i 30 m.

## Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

- w porcie Świnoujście najbardziej niekorzystne warunki odbioru sygnału satelitarnego występują z kierunków północnych ( $315^\circ - 045^\circ$ ), czyli sektora rufowego statków wchodzących i dziobowego statków wychodzących z portu;
- w praktyce z tych kierunków występują także największe przesłonięcia na statku (maszty, nadbudówki), a rozrzut pozycji według wstępnej analizy statystycznej jest największy w kierunku N-S, czyli po osi toru;
- w krótkich okresach (kilka do kilkunastu minut) liczba widocznych satelitów spada do 5 i uwzględniając ewentualne przesłonięcia na statku, może się zdarzyć, że nie będzie można uzyskać pozycji GPS a tym bardziej RTK;
- przedstawiony sposób (algorytm) analizy dostępności sygnału satelitarnego na akwenu ograniczonym można potraktować jako procedurę, którą wraz ze wstępnym planowaniem dostępnej konstelacji (np. za pomocą aplikacji firmowych i zarejestrowanego wcześniej almanachu) powinno się każdorazowo wykonywać przed badaniami ruchu statku z wykorzystaniem systemu GNSS;
- aplikacja tworząca mapę ograniczeń widzialności satelitów na podstawie danych almanachu może zostać użyta do planowania ograniczeń wysokości topocentrycznych satelitów lub w czasie rzeczywistym do monitorowania zmian minimalnych wysokości topocentrycznych powstających na skutek ruchu jednostki względem infrastruktury portowej.

## **Literatura**

1. Januszewski J., *Systemy satelitarne w nawigacji morskiej*, Fundacja WSM Gdynia, 2002.
2. Januszewski J., *Widzialność satelitów w akwenach ograniczonych*, Zeszyty Naukowe nr 70 Wyższej Szkoły Morskiej w Szczecinie – Inżynieria Ruchu Morskiego 2003, WSM Szczecin, 2003.
3. Tomczak A., *Ocena dokładności systemu GPS w pomiarach dynamicznych*, Zeszyty Naukowe nr 70 Wyższej Szkoły Morskiej w Szczecinie – Inżynieria Ruchu Morskiego 2003, WSM Szczecin, 2003.
4. Zalewski P., *Applying Two DGPS Receivers to the Direction Measurement in Marine Traffic Engineering Research*, IX Międzynarodowa Konferencja Inżynierii Ruchu Morskiego, WSM Szczecin, 2001.

*Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.*

## **Recenzenci**

prof. dr hab. inż. Andrzej Felski  
prof. dr hab. inż. kpt.ż.w. Stanisław Gućma

## **Adresy Autorów**

dr inż. Paweł Zalewski  
mgr inż. Arkadiusz Tomczak  
Akademia Morska w Szczecinie  
Instytut Inżynierii Ruchu Morskiego  
ul. Wały Chrobrego 1/2, 70-500 Szczecin