

MARIUSZ SPECHT

Katedra Geodezji i Oceanografii Akademii Morskiej w Gdyni
mariuszspecht1992@gmail.com

Ocena dokładności określenia pozycji systemów EGNOS i DGPS na podstawie wieloletnich pomiarów w latach 2006–2014

Zarys treści. Systemy DGPS (ang. Differential GPS) i EGNOS (ang. European Geostationary Navigation Overlay Service) zalicza się do grupy satelitarnych systemów wspomagających (ang. Satellite Based Augmentation System – SBAS). Systemy te cechują się znacznie lepszymi charakterystykami nawigacyjnymi niż system GPS, w związku z czym znajdują szerokie zastosowanie w nawigacji morskiej, lądowej i powietrznej. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że z roku na rok zwiększa się dokładność określenia pozycji przez system GPS. Skutkiem tego jest równoległe zwiększanie dokładności określenia pozycji przez wszystkie systemy wspomagające.

W związku z tym, że charakterystyki dokładnościowe wspomnianych systemów ulegają ciągłej poprawie, a ich użytkownicy nie posiadają bieżącej informacji o aktualnym stanie, to zasadne jest przeprowadzenie okresowych badań w tym zakresie. W tym celu zrealizowano długoterminowe kampanie pomiarowe w latach 2006–2014 i na ich podstawie wyznaczono wartości miar opisujących dokładności określenia pozycji uzyskiwane przez oba systemy.

Słowa kluczowe: system DGPS, system EGNOS, system GPS, dokładność określenia pozycji, długoterminowe kampanie pomiarowe

1. Wstęp

Dokładność określenia pozycji systemu GPS jest uzależniona od wartości wybranego współczynnika geometrycznego (DOP) oraz ekwiwalentnego błędu pomiaru odległości użytkownika (UERE), na który składają się błędy zarówno URE (Y. Wang, R. Li 2013), jak i błąd odbiornika użytkownika (UEE). Wartość UEE dla odbiorników z lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku wynosiła typowo 5,5 m ($p=0,95$), natomiast współcześnie wynosi 1,6 m ($p=0,95$) (U.S. DoD 2008). W związku z powyższym wzór na dokładność określenia pozycji można przedstawić w postaci następującej zależności (P. Grall, C. Specht 2011):

$$DRMS = UERE \cdot DOP = \sqrt{(URE^2 + UEE^2)} \cdot DOP \quad (1)$$

gdzie:

DRMS – błąd średni pozycji (horyzontalny, wertykalny, przestrzenny), czasu, w zależności

od wybranego współczynnika DOP (ang. Distance Root Mean Square) [m],
UERE – ekwiwalenty błąd pomiaru odległości użytkownika (ang. User Equivalent Range Error) [m],
URE – błąd pomiaru odległości użytkownika (ang. User Range Error) [m],
UEE – błąd odbiornika użytkownika (ang. User Equipment Error) [m],
DOP – odpowiedni współczynnik geometryczny położenia satelitów względem odbiornika: GDOP, PDOP, HDOP, VDOP, TDOP (ang. Dilution Of Precision) [-].

Równanie (1) na dokładność określenia współrzędnych pozycji dla systemu GPS ma postać uproszczoną, przez co jest wystarczającą i uniwersalną dla wielu zastosowań. Jest ono prawidłowe, gdy wszystkie błędy pomiaru pseudoodległości podlegają rozkładowi normalnemu (rozkład Gaussa). Na rycinie 1 zaprezentowano zmianę wartości podwójnego błędu pozycji (2DRMS) 2D systemu GPS ($p=0,95$)

w funkcji zmiennej wartości URE (B.K. Bailey 2014), przy założeniu UEE wynoszącego 0,8 m (RMS) oraz współczynnika HDOP równego 1,5.

Z roku na rok zwiększa się dokładność określenia pozycji przez system GPS, a tym samym systemów go wspomagających (DGPS i EGNOS). W tym celu przeprowadzono liczne badania na obszarze Polski dotyczące oceny zmian dokładności systemów DGPS i EGNOS. Długoterminowe kampanie pomiarowe zrealizowane w 2006 i 2009 r. wykazały, że oba systemy cechują się znacznie lepszymi charakterystykami dokładnościowymi niż system GPS (M. Dziewicki, C. Specht 2009; M. Mięśkowski i inni 2006; C. Specht 2007a; C. Specht 2011). Dla użytkowników cywilnych tego systemu dokładność określenia pozycji nie powinna przekraczać 9 m ($p=0,95$) w płaszczyźnie horyzontalnej i 15 m ($p=0,95$) w płaszczyźnie wertykalnej (U.S. DoD 2008).

Pomiary archiwalne jak i wykonane w 2014 r. opracowano wykorzystując ten sam algorytm obliczeniowy w oprogramowaniu Mathcad 15. W dalszej części artykułu zostanie dokonana analiza porównawcza dokładności określenia współrzędnych pozycji systemów DGPS i EGNOS przeprowadzona w okresie ostatnich lat na podstawie długoterminowych kampanii pomiarowych.

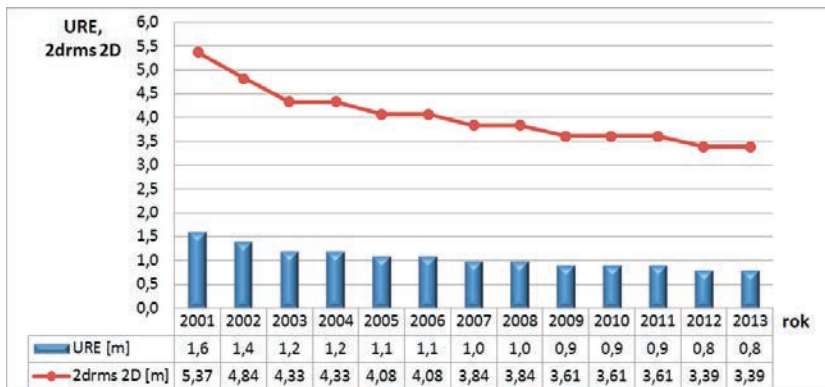
2. Rodzaje i miary dokładności określenia pozycji

Podstawową charakterystyką nawigacyjną każdego systemu pozycyjnego jest dokład-

ność określenia pozycji. W artykule podjęto próbę oceny zmiany wartości tego parametru w ciągu ostatnich 8 lat.

Dokładność określenia pozycji oznacza stopień zgodności statystyk zmierzonych współrzędnych pozycji z wartościami rzeczywistymi lub tymi, które przyjmujemy za rzeczywiste. Miarą dokładności określenia pozycji jest jej błąd, który możemy oceniać w odniesieniu do dowolnego wymiaru: przestrzeni lub płaszczyzny. W celu określenia statystyk błędów wyznaczenia pozycji w nawigacji stosuje się trzy rodzaje dokładności (C. Specht 2007b; U.S. DoD i inni 2012):

- dokładność przewidywana określenia pozycji (ang. *predictable accuracy*), to dokładność określenia pozycji wyrażona w systemie współrzędnych geodezyjnych, związana z modelem Ziemi – elipsoidą; informuje o rozkładzie statystycznym pozycji zmierzonych systemem w stosunku do wartości rzeczywistych w układzie współrzędnych używanych przez system;
- dokładność powtarzalna określenia pozycji (ang. *repeatable accuracy*), to dokładność, z którą system pozwala użytkownikowi powrócić do wcześniej określonej pozycji we współrzędnych właściwych dla danego systemu; informuje o rozkładzie statystycznym pozycji w stosunku do ustalonej arbitralnie jej wartości, za którą najczęściej uważa się pozycję uśrednioną w serii pomiarowej;
- dokładność względna określenia pozycji (ang. *relative accuracy*), to dokładność określenia pozycji odniesiona do innego użytkownika



Ryc. 1. Wartość podwójnego błędu pozycji (2DRMS) 2D dla systemu GPS zależna od URE z lat 2001–2013 (C. Specht 2015). Wartość URE określono na podstawie pracy B.K. Bailey (2014)

Tab. 1. Wybrane miary dokładności określenia pozycji

Miara dokładności	Wymiar	Prawdopodobieństwo	Formuła	Definicja
RMS	1D	68,3%	$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}{n-1}}$	Odchylenie standardowe błędu średniokwadratowego wyznaczonego względem φ , λ , lub h
DRMS	2D	63,2–68,3%	$DRMS(2D) = \sqrt{(\sigma_\varphi)^2 + (\sigma_\lambda)^2}$	Pierwiastek sumy kwadratów błędów średniokwadratowych wyznaczonych względem φ , λ , (h)
	3D		$DRMS(3D) = \sqrt{(\sigma_\varphi)^2 + (\sigma_\lambda)^2 + (\sigma_h)^2}$	
2DRMS	2D	95,4–98,2%	$2DRMS(2D) = 2 \cdot \sqrt{(\sigma_\varphi)^2 + (\sigma_\lambda)^2}$	Podwojona wartość DRMS
	3D		$2DRMS(3D) = 2 \cdot \sqrt{(\sigma_\varphi)^2 + (\sigma_\lambda)^2 + (\sigma_h)^2}$	
CEP	2D	50%	$CEP = 0.589 \cdot (\sigma_\varphi + \sigma_\lambda)$	Promień okręgu, o środku w pozycji rzeczywistej, w którym mieści się 50% pomiarów
SEP	3D	50%	$SEP = 0.513 \cdot (\sigma_\varphi + \sigma_\lambda + \sigma_h)$	Promień sfery, o środku w pozycji rzeczywistej, w której mieści się 50% pomiarów
R68	2D	68%	$R68(2D) = 1.28 \cdot CEP$	Promień okręgu (sfery), o środku w pozycji rzeczywistej, w którym mieści się 68% pomiarów
	3D		$R68(3D) = 0.59 \cdot SEP$	
R95	2D	95%	$R95(2D) = 2.08 \cdot CEP$	Promień okręgu (sfery), o środku w pozycji rzeczywistej, w którym mieści się 95% pomiarów
	3D		$R95(3D) = 1.04 \cdot SEP$	
gdzie: σ_φ – średnia niepewność kwadratowa wyznaczenia szerokości geodezyjnej (geograficznej) σ_λ – średnia niepewność kwadratowa wyznaczenia długości geodezyjnej (geograficznej) σ_h – średnia niepewność kwadratowa wyznaczenia wysokości elipsoidalnej				

tęgo samego systemu, w tym samym czasie i układzie współrzędnych.

Podstawowe miary dokładności określenia współrzędnych pozycji stosowane w szeroko rozumianej nawigacji zostały przedstawione w tabeli 1 (NovAtel Positioning Leadership 2003; F. van Diggelen 2007; B. Whelan, J. Taylor 2013).

3. Pomiarowa ocena dokładności systemów DGPS i EGNOS

3.1. Założenia ogólne badań

Ze względu na zmieniające się wartości błędów określenia pozycji systemów DGPS i EGNOS

Tab. 2. Statystyki błędów pozycji systemu DGPS dla kampanii pomiarowych wykonanych w latach 2006, 2009 i 2014

Statystyka błędu pozycji	DGPS 2006		DGPS 2009		DGPS 2014	
	Dokładność powtarzalna	Dokładność przewidywalna	Dokładność powtarzalna	Dokładność przewidywalna	Dokładność powtarzalna	Dokładność przewidywalna
Liczba pomiarów	2 187 842		214 842		951 698	
<i>RMS (φ)</i>	0,78 m	0,81 m	0,12 m	0,13 m	0,37 m	0,40 m
<i>RMS (λ)</i>	0,61 m	0,62 m	0,16 m	0,17 m	0,25 m	0,26 m
<i>RMS (h)</i>	1,43 m	1,43 m	0,33 m	0,34 m	0,60 m	0,60 m
<i>DRMS(2D)</i>	0,99 m	1,02 m	0,20 m	0,21 m	0,44 m	0,48 m
<i>2DRMS (2D)</i>	1,98 m	2,04 m	0,40 m	0,42 m	0,88 m	0,96 m
<i>DRMS (3D)</i>	1,74 m	1,76 m	0,39 m	0,40 m	0,75 m	0,77 m
<i>CEP (2D)</i>	0,78 m	0,83 m	0,16 m	0,16 m	0,33 m	0,36 m
<i>R68 (2D)</i>	1,01 m	1,06 m	0,21 m	0,21 m	0,43 m	0,47 m
<i>R95 (2D)</i>	1,77 m	1,79 m	0,39 m	0,40 m	0,75 m	0,83 m
<i>SEP (3D)</i>	1,35 m	1,39 m	0,29 m	0,38 m	0,55 m	0,59 m
<i>R68 (3D)</i>	1,74 m	1,77 m	0,39 m	0,51 m	0,72 m	0,76 m
<i>R95 (3D)</i>	3,02 m	3,04 m	1,00 m	1,20 m	1,39 m	1,40 m

Tab. 3. Statystyki błędów pozycji systemu EGNOS dla kampanii pomiarowych wykonanych w latach 2006 i 2014

Statystyka błędu pozycji	EGNOS 2006		EGNOS 2014	
	Dokładność powtarzalna	Dokładność przewidywalna	Dokładność powtarzalna	Dokładność przewidywalna
Liczba pomiarów	1 774 705		927 553	
<i>RMS (φ)</i>	3,52 m	3,74 m	0,38 m	1,61 m
<i>RMS (λ)</i>	2,28 m	2,33 m	0,23 m	0,29 m
<i>RMS (h)</i>	6,22 m	6,51 m	0,69 m	1,09 m
<i>DRMS(2D)</i>	4,19 m	4,41 m	0,45 m	1,64 m
<i>2DRMS (2D)</i>	8,39 m	8,82 m	0,90 m	3,27 m
<i>DRMS (3D)</i>	7,50 m	7,87 m	0,82 m	1,97 m
<i>CEP (2D)</i>	1,67 m	2,36 m	0,30 m	1,52 m
<i>R68 (2D)</i>	2,28 m	2,99 m	0,40 m	1,68 m
<i>R95 (2D)</i>	7,64 m	7,62 m	0,84 m	2,31 m
<i>SEP (3D)</i>	2,80 m	3,90 m	0,51 m	1,75 m
<i>R68 (3D)</i>	3,96 m	4,91 m	0,66 m	1,99 m
<i>R95 (3D)</i>	12,86 m	13,44 m	1,65 m	2,90 m

przeprowadzono trzy długoterminowe kampanie pomiarowe w latach 2006–2014 (H. Śniegocki i inni 2014):

- Pierwsza kampania pomiarowa odbyła się w marcu 2006 r. W trakcie tej kampanii zarejestrowano odpowiednio 1 774 705 pomiarów dla systemu EGNOS i 2 187 842 dla systemu DGPS z częstotliwością rejestracji co 1 s,

- Druga kampania pomiarowa odbyła się w lipcu i w sierpniu 2009 r. W trakcie tej kampanii zarejestrowano 214 842 pomiarów dla systemu DGPS z częstotliwością rejestracji co 1 s,

- Trzecia kampania pomiarowa odbyła się w kwietniu i w maju 2014 r. W trakcie tej kampanii zarejestrowano odpowiednio 927 553 pomiarów dla systemu EGNOS i 951 698 dla systemu DGPS z częstotliwością rejestracji co 1 s.

Celem pomiarów było wyznaczenie miar dokładności wyznaczenia współrzędnych pozycji 2D i 3D obu systemów. Stacja referencyjna DGPS Rozewie generowała depezę RTCM typu 9-3 transmitując poprawki pseudoodległościowe do odbiornika jednoczęstotliwościowego znajdującego się w porcie Gdynia. Był to punkt referencyjny o współrzędnych elipsoidalnych wynoszących odpowiednio: B=54°31,75524' N, L=18°33,57418' E, H=68,07 m względem którego wykonywano wszystkie pomiary dla systemów EGNOS i DGPS. Przyjęto następujące minimalne wymagania dla realizacji pomiarów:

- pomiary na częstotliwości L1,
- wysokość topocentryczna > 5°,
- poziom natężenia sygnału min. 40 dBμV oraz stosunek sygnału do szumu min. 19 dB dla DGPS,

- współczynnik geometryczny PDOP dla kąta elewacji (maskowania) akceptowanych satelitów < 10°,

- współczynnik geometryczny HDOP dla kąta elewacji (maskowania) akceptowanych satelitów < 6°,

- format zapisu danych – standard NMEA-0183 (komunikat GGA).

Na rycinie 2 zaprezentowano miejsce realizacji pomiarów – radiolatarnię portu Gdynia.

3.2. Metoda opracowania danych

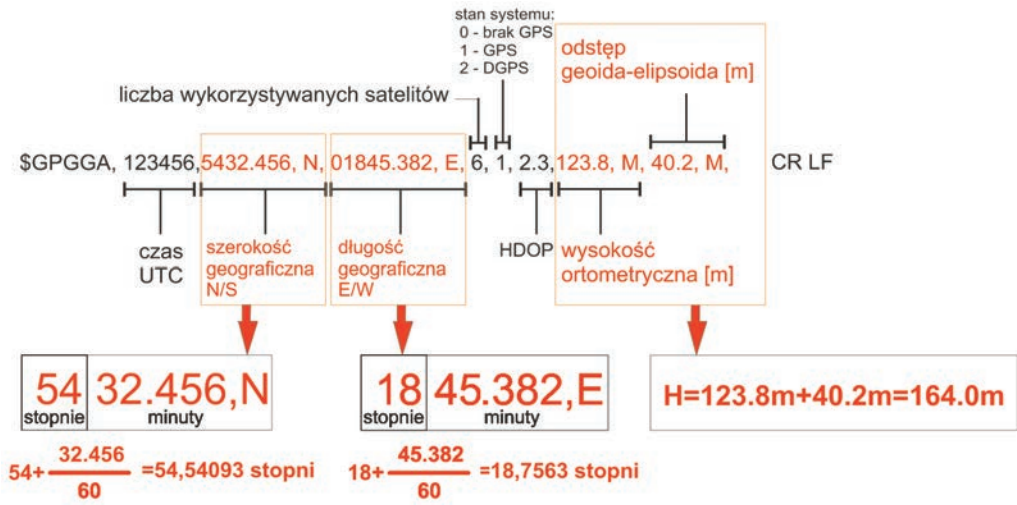
Pozyskiwanie danych o współrzędnych pozycji odbiorników stanowi początkowy etap realizacji badań. Znacząca większość ze współ-



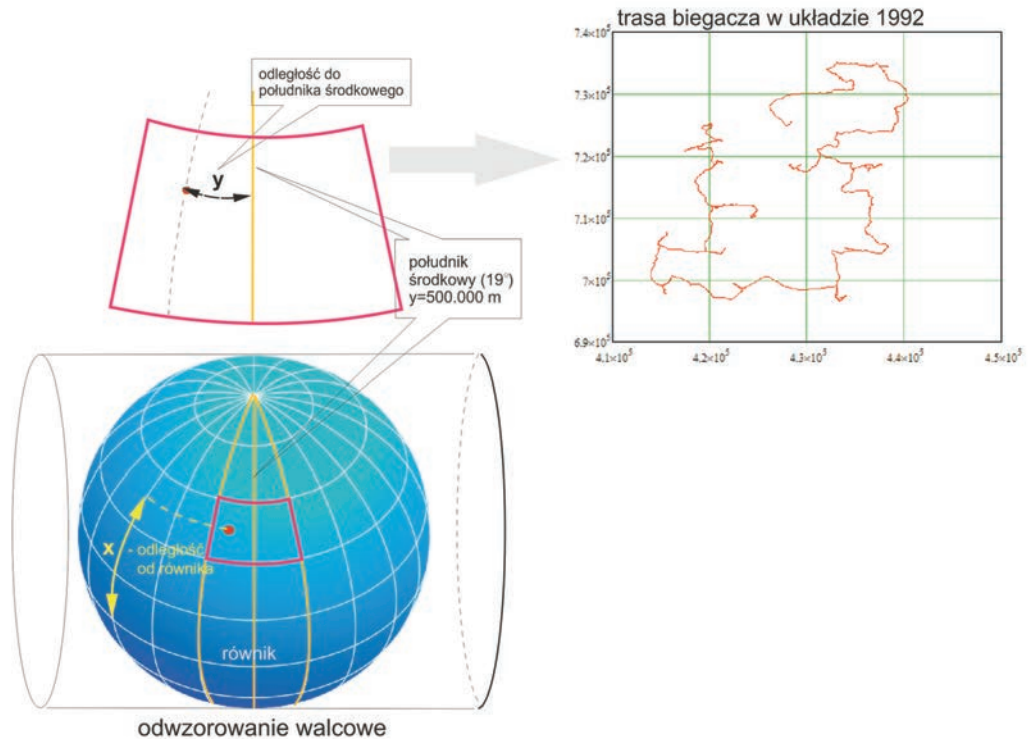
Ryc. 2. Miejsce pomiarów – radiolatarnia portu Gdynia

ześnie produkowanych odbiorników DGPS i EGNOS umożliwia zapisywanie ich w sposób automatyczny. Producenci stosują dwie zasadnicze strategie zapisu. Pierwsza z nich pozwala zapisywać zmierzone dane w zastrzeżonym standardzie producenta, którego format uniemożliwia konwersję zapisanych danych do plików tekstowych o określonych i dostępnych użytkownikowi formatach. W tym przypadku opracowanie danych możliwe jest tylko z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania. Drugą grupę stanowią odbiorniki posiadające możliwość automatycznego zapisu danych pomiarowych w formie plików tekstowych o zdefiniowanych formatach danych. Najczęściej stosowanym formatem zapisu danych jest standard NMEA (ang. National Maritime Electronic Association), gdzie wykorzystuje się przeznaczony do zapisu współrzędnych komunikat GGA (ang. Global Positioning System Fix Data). Na rycinie 3 kolorem pomarańczowym oznaczono dane istotne z punktu widzenia analizy dokładności określenia pozycji.

Współrzędne szerokości i długości geograficznych prezentowane w mierze kątowej (krzywoliniowej) uniemożliwiają wyznaczenie błędów poszczególnych pomiarów. W tym celu należy dokonać ich rzutowania z powierzchni elipsoidy obrotowej WGS-84 ($a=6378137,00$ m, $b=6356752,314$ m) (M.J. Merrigan i inni 2002;



Ryc. 3. Opis komunikatu GGA standardu NMEA. Przykład obliczenia szerokości geograficznej oraz wysokości względem MSL (ang. Mean Sea Level) na podstawie danych GGA



Ryc. 4. Istota odwzorowania Gaussa-Krügera wraz z przykładową mapą i naniesioną trasą sportowca

NIMA 2000) na powierzchnię płaską przy wykorzystaniu transformacji Gaussa-Krügera stosowanej powszechnie w geodezji. W wyniku obliczeń uzyskuje się współrzędne płaskie (x, y), gdzie wartość x oznacza odległość (w metrach) punktu od równika, liczona po łuku południka (na elipsoidzie obrotowej WGS-84), a zmienna y to odległość (w metrach) od ustalonego arbitralnie południka środkowego. Znak minus oznacza, że punkt znajduje się na zachód od południka, natomiast plus odpowiada położeniu na wschód od południka. Celem uniknięcia ujemnych wartości współrzędnych na osi y często do wyniku dodaje się stałą wartość wynoszącą np. 500 000 m (w układzie 2000). Dopuszczalne jest również wykorzystanie układu 1992 do realizacji tego typu obliczeń. Istotę odwzorowania Gaussa-Krügera (w układzie 1992) przedstawiono na rycinie 4.

W referowanych badaniach wykorzystano układ 2000, a zamiast współrzędnych kątowych na kartezjańskie zrealizowano wykorzystując niżej przedstawione zależności (R.E. Deakin i inni 2010):

$$x = k \cdot R \cdot \left[\frac{S(B)}{R} + \frac{(\Delta L)^2}{2} \cdot \sin(B) \cdot \cos(B) + \frac{(\Delta L)^4}{24} \cdot \sin(B) \cdot \cos^3(B) \cdot (5 - t^2 + 9 \cdot \eta^2 + 4 \cdot \eta^4) + \frac{(\Delta L)^6}{720} \cdot \sin(B) \cdot \cos^5(B) \cdot (61 - 58 \cdot t^2 + t^4 + 270 \cdot \eta^2 - 330 \cdot \eta^2 \cdot t^2 + 445 \cdot \eta^4) \right] \quad (2)$$

$$y = R \cdot \left[\Delta L \cdot \cos(B) + \frac{(\Delta L)^3}{6} \cdot \cos^3(B) \cdot (1 - t^2 + \eta^2) + \frac{(\Delta L)^5}{120} \cdot \cos^5(B) \cdot (5 - 18 \cdot t^2 + t^4 + 14 \cdot \eta^2 - 58 \cdot \eta^2 \cdot t^2 + 13 \cdot \eta) \right] \quad (3)$$

gdzie:

B, L – zmierzone współrzędne elipsoidalne,
R – promień krzywizny przekroju elipsoidy,
S(B) – odległość od równika do punktu o określonych współrzędnych [m],

ΔL – odległość punktu od południka osiowego [m],
k – współczynnik skali wynoszący 0,999923.

Pozostałymi parametrami odwzorowania do współrzędnych płaskich w układzie 2000 były:

$$t = \tan(B) \quad \text{oraz} \quad \eta = \frac{e^2 \cdot \cos^2(B)}{1 - e^2} \quad (4, 5)$$

gdzie:

e – pierwszy mimośród elipsoidy,

η – kąt orientacji zniekształceń elipsy.

Opracowanie wyników dla wszystkich kampanii zrealizowano w oprogramowaniu Mathcad 15 którego pierwszym etapem było przeliczenie współrzędnych B, L do x, y.

3.3. Wyniki badań

Dla oceny wartości statystycznych poszczególnych miar dokładności (przedstawionych w poprzednim rozdziale) opracowano arkusz w oprogramowaniu Mathcad 15, dzięki któremu wyznaczono je w sposób automatyczny. W tabelach 2 i 3 zestawiono wyniki oceny miar dokładności określenia pozycji dla systemów DGPS i EGNOS.

W ramach badań dokonano również analiz rozkładu zmiennej losowej, jaką jest błąd pojedynczego pomiaru w ujęciu typowych statystyk stosowanych w nawigacji. Rozkład statystyczny błędów wyznaczenia pozycji może zostać zaprezentowany za pomocą rozkładu Rayleigha

w postaci funkcji gęstości prawdopodobieństwa $f(x; \sigma)$ i dystrybuanty $F(x)$ (H. Śniegocki i inni 2014):

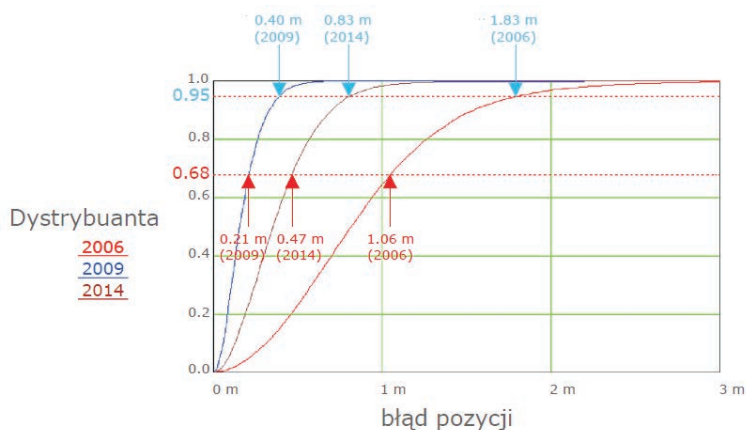
$$f(x; \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad \text{oraz} \quad F(x) = 1 - e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (6, 7)$$

dla $x \in [0, \infty)$, gdzie parametr skali σ jest definiowany jako:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (8)$$

gdzie:

N – liczba pomiarów.



Ryc. 5. Dystrybuanta błędu 2D pozycji przewidywanej systemu DGPS w trakcie kampanii pomiarowych w latach 2006, 2009 i 2014



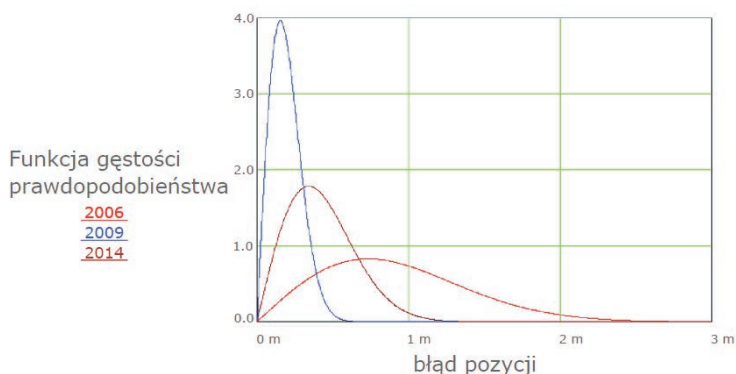
Ryc. 6. Dystrybuanta błędu 2D pozycji przewidywanej systemu EGNOS w trakcie kampanii pomiarowych w latach 2006 i 2014

Oceniając w sposób porównawczy oba systemy (DGPS i EGNOS) na rycinach 5 i 6 zaprezentowano dystrybuanty rozkładu Rayleigha, a na rycinach 7 i 8 funkcje gęstości prawdopodobieństwa rozkładu Rayleigha.

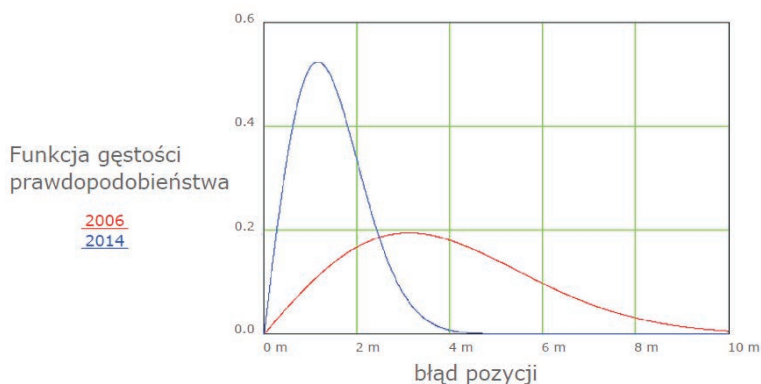
4. Wnioski

Analiza wyników przeprowadzonych badań wykazała, że rozkłady błędu 2D pozycji przewidywanej systemu DGPS w trakcie kampanii w latach 2009 i 2014 wyniosły odpowiednio

0,40 m i 0,83 m, a dla kampanii z 2006 r. 1,83 m ($p=0,95$). Różnice te wynikały przede wszystkim ze stosowania (od 2009 r.) bardziej zaawansowanych technologicznie odbiorników GPS, które są podstawowym elementem stacji referencyjnych systemu DGPS. Ponadto w przypadku systemów różnicowych znaczący wpływ na uzyskiwane dokładności pozycji ma odległość odbiornika od stacji referencyjnej. Badania zostały wykonane w stosunkowo niewielkiej odległości od stacji (40 km), co skutkowało wysokim poziomem natężenia sygnału (52 dB μ V/m) oraz stosunkiem sygnału do szumu (20 dB)



Ryc. 7. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa błędów 2D pozycji przewidywanej systemu DGPS w trakcie kampanii pomiarowych w latach 2006, 2009 i 2014



Ryc. 8. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa błędów 2D pozycji przewidywanej systemu EGNOS w trakcie kampanii pomiarowych w latach 2006 i 2014

(H. Śniegocki i inni 2014). Zgodnie ze standardem wydanym przez IALA (IALA, 2004) dokładność w płaszczyźnie horyzontalnej jaką musi zapewnić system różnicowy, wynosi 10 m ($p=0,95$). W związku z powyższym należy stwierdzić, że polski system DGPS może być wykorzystywany w nawigacji przy pozycjonowaniu statków podchodzących do portu, w żegludze przybrzeżnej, hydrografii, eksploracji zasobów morza, do wspierania pracy systemów służących do nadzoru ruchu statków (ang. *Vessel Traffic Service* – VTS) oraz automatycznej identyfikacji statków (ang. *Automatic Identification System* – AIS).

Na podstawie uzyskanych dokładności wyznaczeń współrzędnych pozycji można stwierdzić, że system EGNOS cechuje się nieznacznie gorszymi charakterystykami dokładnościowymi od systemu DGPS. Statystyki błędów 2D pozycji systemu EGNOS w trakcie kampanii w 2014 r. wyniosły 2,82 m, a dla kampanii z 2006 r. – 7,55 m ($p=0,95$). Należy zauważyć, iż ogłoszenie pełnej operacyjności serwisu otwartego systemu EGNOS (ang. *EGNOS Open Service*) spowodowało znaczący wzrost jego dokładności, co potwierdzają pomiary zrealizowane w 2014 roku. Zgodnie z wymaganiami dokładność serwisu otwartego systemu EGNOS po-

winna być nie większa niż 3 m w płaszczyźnie horyzontalnej i 4 m w płaszczyźnie wertykalnej ($p=0,95$) (DG ENTR 2014). Jak wykazały przeprowadzone badania w Gdyni, system EGNOS

spełnia wyżej opisane wymogi dokładnościowe, w związku z czym może być stosowany m.in. w wybranych aplikacjach lotnictwa cywilnego, nawigacji morskiej i lądowej.

Literatura

- Bailey B.K., 2014, *GPS Modernization Update & Program Plans*. Proceedings of the 13th Meeting of National Space-Based Positioning, Navigation, and Timing Advisory Board.
- Deakin R.E., Hunter M.N., Karney C.F.F., 2010, *The Gauss-Krüger Projection*. Proceedings of the 23rd Victorian Regional Survey Conference.
- DG ENTR, 2014, *EGNOS Open Service (OS) – Service Definition Document*. Revision 2.1.
- Dziewicki M., Specht C., 2009, *Position Accuracy Evaluation of the Modernized Polish DGPS*. „Polish Maritime Research” Vol. 16, issue 4, s. 57–61.
- Grall P., Specht C., 2011, *Ocena porównawcza standardów SPS systemu GPS w aspekcie dokładności określenia pozycji*. „Zeszyty Naukowe AMW” nr 3 (186), s. 43–56.
- IALA, 2004, *Recommendation R-121 on the Performance and Monitoring of DGNSS Services in the Frequency Band 283.5 – 325 kHz*. Edition 1.1.
- Merrigan M.J., Swift E.R., Wong R.F., Saffell J.T., 2002, *A Refinement to the World Geodetic System 1984 Reference Frame*. Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, s. 1519–1529.
- Mięsikowski M., Nowak A., Specht C., Oszczak B., 2006, *EGNOS – Accuracy Performance in Poland*. „Annual of Navigation” no. 11, s. 63–72.
- NIMA, 2000, *Department of Defense World Geodetic System 1984, Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems*. 3rd Edition.
- NovAtel Positioning Leadership, 2003, *GPS Position Accuracy Measures*. APN-029 Revision 1.
- Specht C., 2007a, *DGPS and EGNOS Systems in Hydrographic Survey – Accuracy Analyses at the Polish Sea Area*. „Hydroacoustics” Vol. 10, s. 193–198.
- Specht C., 2007b, *System GPS*. Pelplin: Wydawnictwo Bernardinum.
- Specht C., 2011, *Accuracy and Coverage of the Modernized Polish Maritime Differential GPS*. „Advanced in Space Research” Vol. 47, issue 2, s. 221–228.
- Specht C., Mania M., Specht M., Skóra M., 2015, *Accuracy of the GPS Positioning System in a Context of Increasing the Number of Satellites in the Constellation*. „Polish Maritime Research” Vol. 22, issue 2, s. 9–14.
- Śniegocki H., Specht C., Specht M., 2014, *Testing Accuracy of Maritime DGPS System Based on Long-Term Measurements Campaigns Over the Years 2006–2014*. „International Journal of Civil Engineering and Technology” Vol. 5, issue 10, s. 1–8.
- U.S. DoD, 2008, *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard*. 4th Edition.
- U.S. DoD, U.S. DHS, U.S. DoT, 2012, *2012 Federal Radionavigation Plan*.
- Van Diggelen F., 2007, *GNSS Accuracy – Lies, Damn Lies and Statistics*. „GPS World” Vol. 18, no. 1, s. 27–32.
- Wang Y., Li R., 2013, *The Analysis of Character of User Range Accuracy*. „Lecture Notes in Electrical Engineering” Vol. 244, s. 267–277.
- Whelan B., Taylor J., 2013, *Precision Agriculture for Grain Production Systems*. Clayton: CSIRO Publishing.

Estimating accuracy of defining position by EGNOS and DGPS systems based on multi-year measurements in 2006–2014

Summary

DGPS and EGNOS belong to a group of satellite based augmentation systems (SBAS). These systems have much better navigational characteristics than the GPS, and therefore are widely used in sea, land and air navigation. On the basis of the analyses follow that the GPS increases the accuracy in determining the position from year to year. The effect is parallel to the increase of accuracy of the positioning delivered by all of augmentation systems. In view of the fact that the accuracy characteristics of these

systems are being improved on constant basis and that their users don't have current information about the actual status, it is reasonable to conduct periodic researches in this area. For this purpose, the long-term measurement campaigns were executed in years 2006–2014, and based on their results they indicated the values of measures describing the accuracy of positions obtained by both systems.

Keywords: DGPS, EGNOS, GPS, accuracy of positioning, long-term measurement campaigns