

Andrzej Banachowicz
Akademia Marynarki Wojennej

Ryszard Bober, Tomasz Szewczuk, Adam Wolski
Akademia Morska w Szczecinie

BADANIE WPŁYWU GEOMETRII SYSTEMU NA DOKŁADNOŚĆ OKREŚLANIA POZYCJI ZA POMOCĄ ODBIORNIKA GPS

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań zależności dokładności pozycji określanej za pomocą odbiornika GPS w funkcji HDOP. Okazuje się, że w przypadku odbiorników wielokanałowych zależność tę można opisać funkcją liniową, co nie miało miejsca w odbiornikach sekwencyjnych. Liniowa zależność pomiędzy błędem pozycji a HDOP może świadczyć o stosunkowo małym wpływie pozostałych źródeł błędów pomiarowych na wynik końcowy.

WPROWADZENIE

Systemy nawigacyjne mają strukturę przestrzenno-czasową. Szczególnie jest to istotne w przypadku satelitarnych systemów nawigacyjnych. Klasyczne pojęcie geometrii dwuwymiarowej nawigacji (na powierzchni kuli ziemskiej) zostało uogólnione na przestrzeń czterowymiarową ($X, Y, Z, \Delta t$ lub φ, λ, H i Δt). Współczynniki geometryczne wiążą się z kątem przecięcia linii (powierzchni) regresji zmiennych losowych (w przypadku naziemnych systemów nawigacyjnych z kątem przecięcia „średnich” linii pozycyjnych). Uogólnienie współczynników geometrycznych pozycyjnego systemu nawigacyjnego pojawiło się wraz z potrzebami przestrzennej interpretacji dokładności współrzędnych pozycji. Początkowo dotyczyło to określania pozycji systemem LORAN-C w lotnictwie, a później pojęcie rozszerzono na system GPS (i inne systemy satelitarne). Współcześnie definiuje się współczynniki geometryczne dla różnych układów współrzędnych i różnych systemów nawigacyjnych.

Najczęściej stosowane współczynniki geometryczne pozycyjnego systemu nawigacyjnego to [5, 8]:

1. GDOP (*Geometric Dilution of Precision*) — ogólny współczynnik geometryczny, charakteryzuje on dokładność systemu w przestrzeni czterowymiarowej ($\varphi, \lambda, H, \Delta t$).
2. PDOP (*Position Dilution of Precision*) — pozycyjny współczynnik geometryczny, charakteryzuje dokładność pozycji w przestrzeni trójwymiarowej (φ, λ, H).
3. HDOP (*Horizontal Dilution of Precision*) — horyzontalny współczynnik geometryczny, charakteryzuje dokładność pozycji w przestrzeni dwuwymiarowej (φ, λ); obliczany w płaszczyźnie horyzontu obserwatora; jest on odpowiednikiem klasycznego współczynnika geometrii systemu nawigacyjnego.
4. VDOP (*Vertical Dilution of Precision*) — wertykalny współczynnik geometryczny, charakteryzuje dokładność systemu w przestrzeni jednowymiarowej (H); współczynnik geometrii określenia wysokości elipsoidalnej.
5. TDOP (*Time Dilution of Precision*) — czasowy współczynnik geometryczny, charakteryzuje dokładność systemu w przestrzeni jednowymiarowej (Δt); skala czasu poprawek zegara odbiornika.

Wprowadza się również współczynniki charakteryzujące dokładność wzdłuż południka i równoleżnika (w DGPS):

- NDOP (*North Dilution of Precision*);
- EDOP (*East Dilution of Precision*).

W ogólnym przypadku współczynniki geometryczne pozycyjnego systemu nawigacyjnego oblicza się jako pierwiastki arytmetyczne śladów odpowiednich macierzy geometrii systemu nawigacyjnego [1, 2].

Dokładność określania pozycji w systemie GPS zależy od wielu czynników, których wpływ został szeroko opisany w literaturze [4, 5, 6, 7, 8]. Na dokładność określania współrzędnych pozycji wpływ mają między innymi błędy wynikające z opóźnienia jonosferycznego i troposferycznego, efektów relatywistycznych, błędów zegarów satelitów, błędów efemeryd satelitów oraz błędów wynikających z wielodrogowości odbieranego sygnału [3]. Część tych błędów wynikająca z działania segmentów kosmicznego i nadzoru może być oszacowana i podawana jest w depeszy nawigacyjnej w postaci współczynnika URA (*User Range Accuracy*). Dla większości współczesnych odbiorników GPS błędy instrumentalne odbiornika są na tyle małe, że o dokładności określania pozycji w głównej mierze decyduje geometria systemu (rozmszczenie satelitów w stosunku do odbiornika). Błąd wyznaczenia pozycji Δ może zostać określony z zależności:

$$\Delta = \text{DOP} \cdot \text{UERE}, \quad (1)$$

gdzie: DOP — współczynnik geometrii systemu (o odpowiednim wymiarze);
 UERE — oszacowany w odbiorniku błąd pseudoodległości.

W przypadku pozycji dwuwymiarowej dokładność określenia pozycji będzie zależała od współczynnika HDOP obliczanego ze wzoru:

$$\text{HDOP} = \frac{1}{\sigma_\rho} \sqrt{\sigma_\varphi^2 + \sigma_\lambda^2}, \quad (2)$$

gdzie: σ_ρ — średni błąd pomiaru pseudoodległości;
 σ_φ — średni błąd pomiaru szerokości geograficznej;
 σ_λ — średni błąd pomiaru długości geograficznej.

Wartość HDOP zależy od rozmieszczenia na sferze niebieskiej satelitów wykorzystywanych do wyznaczania pozycji. W zależności od geometrii systemu współczynnik HDOP przyjmuje różne wartości. Im mniejszy HDOP, tym pozycja jest dokładniejsza.

POMIARY

W celu określenia wpływu rozmieszczenia satelitów na dokładność określania pozycji w systemie GPS wykonano kilkadziesiąt sesji pomiarowych. Wszystkie obserwacje zostały przeprowadzone w laboratorium Akademii Morskiej w Szczecinie (rys. 1.). Badania prowadzono przy wykorzystaniu dwóch odbiorników MiniMax firmy CSI WIRELESS. Łącznie wykonano 24 serie pomiarowe w dniach od 16 do 29 maja 2006 roku, w różnych porach doby, rejestrując dane co 1 s. Dane rejestrowane były w formacie NMEA-0183. Rejestrowano rekordy \$GPGGA, \$GPGGL, \$GPGSA, \$GPGST, \$GPGSV i \$GPZDA. W celu zapewnienia zróżnicowanych warunków odbioru w poszczególnych seriach pomiarowych zmieniano minimalny kąt elewacji (kąt maskowania) akceptowanych satelitów. W tabeli 1. przedstawiono zestawienie wykonanych sesji pomiarowych.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe w laboratorium Akademii Morskiej w Szczecinie

Tabela 1. Czas wykonania, liczba pomiarów i kąt maskowania (α)

Nr serii	Data	Czas pomiaru	Liczba pomiarów	α [°]
1	16.05.2006	1826 do 2333	16227	20
2	18.05.2006	0934 do 1541	20774	20
3	18.05.2006	1804 do 1952	6484	30
4	18.05.2006	2107 do 2359	10358	30
5	19.05.2006	0111 do 0809	25035	20
6	19.05.2006	0823 do 1411	20886	30
7	19.05.2006	0810 do 1137	11000	25
8	20.05.2006	0539 do 0727	4759	35
9	20.05.2006	0544 do 0728	5953	30
10	20.05.2006	0813 do 1155	8883	35
11	21.05.2006	0650 do 0716	1381	10
12	21.05.2006	0847 do 0915	1721	30
13	21.05.2006	1139 do 1754	22448	25
14	21.05.2006	1812 do 2010	7125	25
15	25.05.2006	1017 do 1252	7318	5
16	26.05.2006	1905 do 2154	10114	30
17	27.05.2006	0050 do 0438	13695	30
18	27.05.2006	0919 do 1339	15597	30
19	27.05.2006	1816 do 1931	4483	30
20	27.05.2006	2059 do 2214	4453	30
21	27.05.2006	2224 do 2352	5304	30
22	28.05.2006	0046 do 0548	18099	30
23	28.05.2006	0904 do 1443	20357	30
24	29.05.2006	0043 do 0544	18063	30

ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

Na podstawie zarejestrowanych danych NMEA-0183: \$GPGGA, \$GPGGL, \$GPGSA, \$GPGST, \$GPGSV i \$GPZDA dla każdego z pomiarów określono następujące wartości:

- czas UTC każdego pomiaru (godzina, minuta, sekunda);
- szerokość geograficzną pozycji odbiornika GPS — φ ;
- długość geograficzną pozycji odbiornika GPS — λ ;
- współczynnik horyzontalny dokładności pozycji HDOP;
- liczbę satelitów wykorzystanych do określania pozycji;
- wysokość wzniesienia anteny.

Dane te posłużyły do obliczenia następujących wielkości:

- średniej szerokości geograficznej;
- średniej długości geograficznej;

- błędu pozycji M_o (dla $P = 0,95$);
- średniej liczby satelitów wykorzystanych do określenia pozycji przez system GPS (średnia ze wszystkich pomiarów).

Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 2.

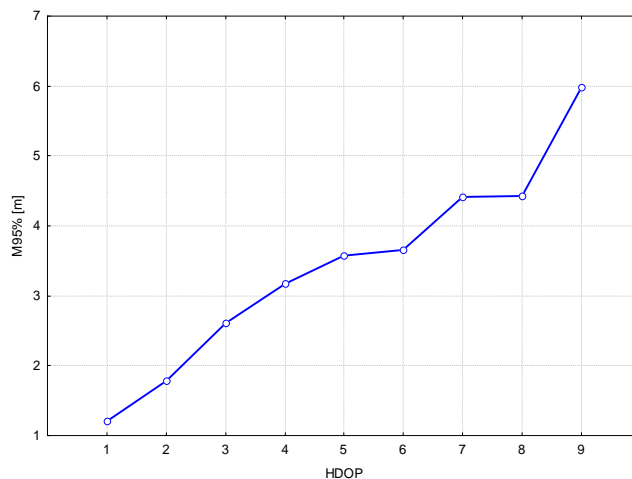
Tabela 2. Wartości średnie wyników pomiarów

Nr serii	Średnia szerokość φ_{sr}	Średnia długość λ_{sr}	HDOP _{sr}	n_{sr}	M_o [m]
1	53°25,74861'	014°33,81959'	1,80	6	1,24
2	53°25,74873'	014°33,82091'	1,94	5	2,66
3	53°25,74745'	014°33,82120'	3,66	5	3,82
4	53°25,74731'	014°33,81922'	2,61	5	5,19
5	53°25,74846'	014°33,81977'	2,04	6	1,86
6	53°25,74900'	014°33,82006'	2,20	6	3,51
7	53°25,74702'	014°33,82033'	2,52	6	2,74
8	53°25,74727'	014°33,81890'	4,08	4	4,06
9	53°25,74713'	014°33,81853'	2,91	4	0,68
10	53°25,74861'	014°33,82127'	2,79	3	2,62
11	53°25,74697'	014°33,81932'	1,01	8	0,17
12	53°25,74886'	014°33,81982'	5,29	4	1,38
13	53°25,74754'	014°33,81992'	1,92	5	2,65
14	53°25,74777'	014°33,82050'	3,02	5	2,20
15	53°25,74781'	014°33,82017'	1,03	8	1,87
16	53°25,74711'	014°33,81983'	3,43	4	6,36
17	53°25,74863'	014°33,82014'	2,33	6	2,14
18	53°25,74789'	014°33,82036'	2,00	5	2,05
19	53°25,74751'	014°33,82184'	3,36	5	8,03
20	53°25,74741'	014°33,81873'	4,50	4	4,00
21	53°25,74803'	014°33,82110'	3,45	4	2,17
22	53°25,74894'	014°33,82080'	2,46	6	2,80
23	53°25,74801'	014°33,82156'	2,05	5	2,94
24	53°25,74861'	014°33,81959'	2,45	6	3,41

W celu oszacowania wpływu współczynnika geometrycznego HDOP na dokładność określania pozycji pogrupowano wyniki pomiarów w poszczególnych seriach pomiarowych w zależności od wartości HDOP. Dla tak pogrupowanych wyników obliczono błąd pozycji M_o ($P = 0,95$) w poszczególnych przedziałach HDOP. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń dla każdej serii pomiarowej wykonano wykresy zależności błędu średniego pozycji M_o w funkcji HDOP (funkcję tę oznaczono na poniższych rysunkach jako $M_o = f(\text{HDOP})$).

Rysunki 2., 3. i 4. ilustrują przebieg wybranych funkcji (serii pomiarowych) $M_o = f(\text{HDOP})$ dla ustawionego kąta maskowania w odbiorniku na 20°, 25° i 30°.

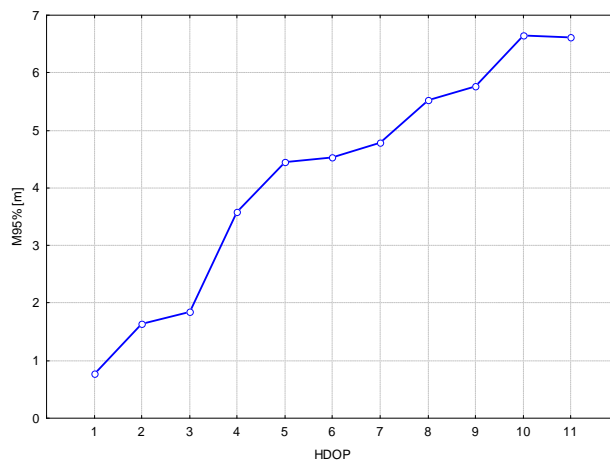
Seria pomiarowa nr 2



	$M_o(95\%)$ [m]	HDOP
HDOP 0,5 do 1,4	1,20	1
HDOP 1,5 do 2,4	1,78	2
HDOP 2,5 do 3,4	2,61	3
HDOP 3,5 do 4,4	3,17	4
HDOP 4,5 do 5,4	3,57	5
HDOP 5,5 do 6,4	3,65	6
HDOP 6,5 do 7,4	4,41	7
HDOP 7,5 do 8,4	4,43	8
HDOP 8,5 do 9,4	5,98	9

Rys. 2. Wykres zależności $M_o = f(\text{HDOP})$, ustawienie maski 20°

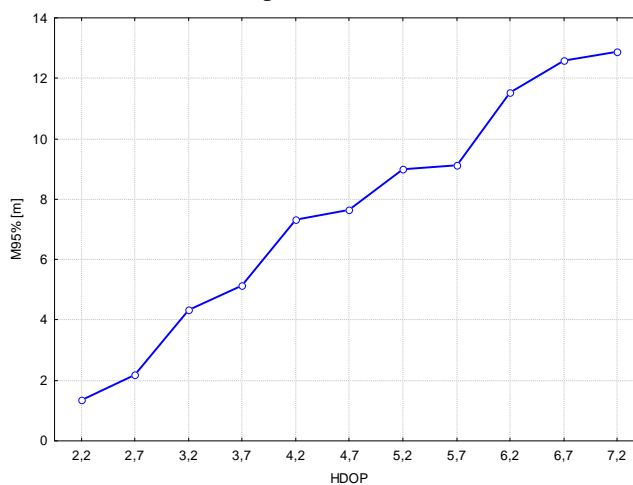
Seria pomiarowa nr 7



	$M_o(95\%)$ [m]	HDOP
HDOP 0,5 do 1,4	0,77	1
HDOP 1,5 do 2,4	1,64	2
HDOP 2,5 do 3,4	1,85	3
HDOP 3,5 do 4,4	3,58	4
HDOP 4,5 do 5,4	4,44	5
HDOP 5,5 do 6,4	4,52	6
HDOP 6,5 do 7,4	4,79	7
HDOP 7,5 do 8,4	5,53	8
HDOP 8,5 do 9,4	5,76	9
HDOP 9,5 do 10,4	6,65	10
HDOP 10,5 do 11,4	6,61	11

Rys. 3. Wykres zależności $M_o = f(\text{HDOP})$, ustawienie maski 25°

Seria pomiarowa nr 16



	$M_o(95\%)$ [m]	HDOP
HDOP 2,0 do 2,4	1,35	2,2
HDOP 2,5 do 2,9	2,17	2,7
HDOP 3,0 do 3,4	4,33	3,2
HDOP 3,5 do 3,9	5,15	3,7
HDOP 4,0 do 4,4	7,31	4,2
HDOP 4,5 do 4,9	7,63	4,7
HDOP 5,0 do 5,4	9,00	5,2
HDOP 5,5 do 5,9	9,12	5,7
HDOP 6,0 do 6,4	11,53	6,2
HDOP 6,5 do 6,9	12,58	6,7
HDOP 7,0 do 7,4	12,87	7,2

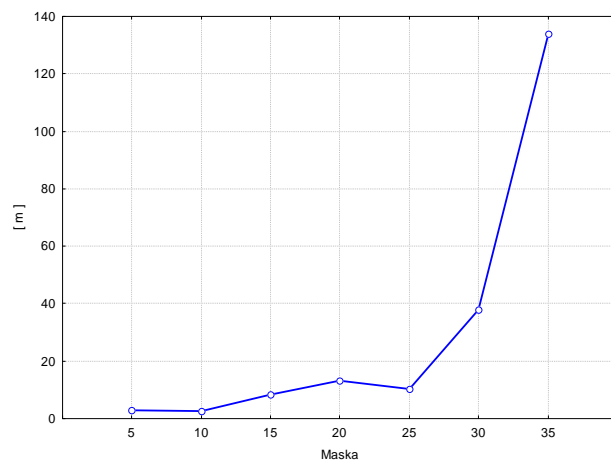
Rys. 4. Wykres zależności $M_o = f(\text{HDOP})$, ustawienie maski 30°

W celu zweryfikowania wyników badań przeprowadzono pomiary równoległe za pomocą dwóch identycznych odbiorników MiniMAX CSI [4]. Pomiary wykonano w cyklach dobowych od 08.12.2007 do 19.12.2007 z częstotliwością próbkowania 5 Hz. Jeden z odbiorników miał ustawiony stały kąt maskowania 5° , w drugim zaś w kolejnych seriach pomiarowych zmieniano kąt elewacji co 5° w zakresie od 5° do 35° . Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 3.

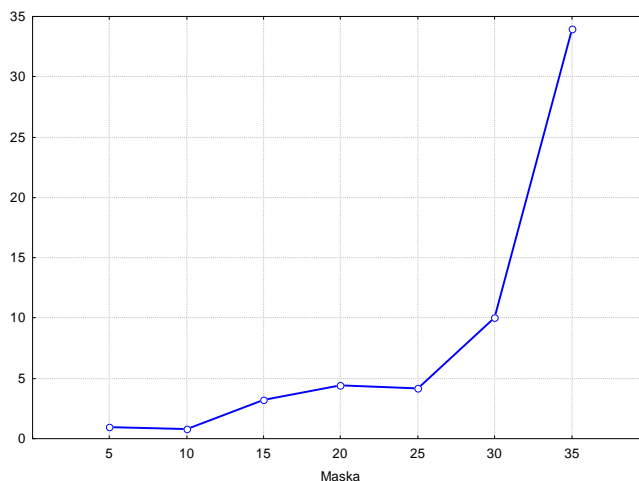
Tabela 3. Zestawienie wyników pomiarów równoległych

Data pomiarów	Kąt elewacji	Średnia szerokość $\varphi_{\text{śr}}$	Średnia długość $\lambda_{\text{śr}}$	HDOP _{śr}	Mo (95%) [m]
08.12–09.12	5°	$53^\circ 25,74993'$	$14^\circ 33,82085'$	0,95	3,94
	35°	$53^\circ 25,75706'$	$14^\circ 33,82215'$	12,91	133,80
09.12–10.12	5°	$53^\circ 25,74993'$	$14^\circ 33,82058'$	0,95	3,75
	30°	$53^\circ 25,74906'$	$14^\circ 33,82263'$	14,50	37,76
10.12–11.12	5°	$53^\circ 25,74966'$	$14^\circ 33,82091'$	0,94	2,47
	25°	$53^\circ 25,74860'$	$14^\circ 33,82037'$	5,47	10,34
11.12–12.12	5°	$53^\circ 25,74970'$	$14^\circ 33,82094'$	0,94	2,97
	20°	$53^\circ 25,74890'$	$14^\circ 33,82020'$	2,22	13,11
13.12–14.12	5°	$53^\circ 25,74969'$	$14^\circ 33,82101'$	0,94	2,64
	15°	$53^\circ 25,74896'$	$14^\circ 33,82012'$	1,60	8,40
17.12–18.12	5°	$53^\circ 25,74997'$	$14^\circ 33,82081'$	0,94	3,21
	10°	$53^\circ 25,74899'$	$14^\circ 33,82027'$	1,08	2,68
18.12–19.12	5°	$53^\circ 25,74956'$	$14^\circ 33,82085'$	0,94	3,06
	5°	$53^\circ 25,74895'$	$14^\circ 33,82016'$	0,94	2,88

Na podstawie wyników z tabeli 3. wykonano wykres zależności błędu pozycji od ustawionego w odbiorniku kąta maskowania (rys. 5.) oraz wykres stosunku błędu pozycji ($P = 95\%$) określanej przez odbiornik o ustawionym danym kącie maskowania do błędu pozycji (również $P = 95\%$) określanej przez odbiornik z ustawionym kątem maskowania 5° (rys. 6.).



Rys. 5. Zależności błędu pozycji od kąta elewacji (maski) ustawionego w odbiorniku



Rys. 6. Wykres stosunku błędów pozycji określanych dla zmiennego kąta elewacji do błędów pozycji dla kąta elewacji równego 5° (w funkcji kąta elewacji)

WNIOSKI

W przypadku satelitarnych systemów nawigacyjnych, przy wykorzystaniu nadliczbowych pomiarów, geometria systemu (konfiguracja widocznych satelitów) nie ma już tak mocnego wpływu na dokładność pozycji, jaką miała w przypadku odbiorników sekwencyjnych [1] lub naziemnych systemów radionawigacyjnych.

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski szczegółowe:

1. Istnieje prawie liniowa zależność błędu pozycji od horyzontalnego współczynnika geometrii systemu GPS — $M_o = f(\text{HDOP})$, rysunki 2., 3. i 4. Może to świadczyć o małym wpływie pozostałych źródeł błędów na dokładność pozycji.
2. W poszczególnych seriach pomiarowych występowały różnice pomiędzy błędami pozycji przy podobnych wartościach HDOP. Związane jest to z faktem, że na błędy określania pozycji w systemie GPS mają wpływ, oprócz geometrii systemu, również inne czynniki.
3. Dla małych kątów elewacji (do 10 stopni) zmiana kąta maskowania nie ma istotnego wpływu na dokładność określania pozycji (rys. 5.). Jest to skutkiem uwzględnienia w obliczaniu współrzędnych pozycji praktycznie tych samych satelitów w tym przedziale kątów elewacji.
4. Antena odbiornika systemu GPS powinna być montowana w miejscu zapewniającym widzenie możliwie dużego obszaru nieba (prawie całej górnej półsfery).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Januszewski J., *Systemy satelitarne GPS, Galileo i inne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.
- [2] Parkinson B. W., Spilker J. J., *Global Positioning System: Theory and Applications*, Vol. I, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Washington 1996.
- [3] Banachowicz A., *Parametry operacyjno-techniczne systemu nawigacyjnego, EXPLO-SHIP '99 „Problemy eksploatacji statków morskich i śródlądowych oraz urządzeń portowych”*, Szczecin — Międzyzdroje — Kopenhaga 1999.
- [4] Banachowicz A., Wolski A., *The Geometrical Factors of a Navigational System*, Національний Авіаційний Університет, Проблеми Інформатизації Та Управління, Збірник Наукових Праць, 11/2004, Київ.
- [5] Bober R., Szewczuk T., Wolski A., *Examination of Parallel Operation of GPS Receivers*, XII International Scientific and Technical Conference on Marine Traffic Engineering, AM w Szczecinie, Szczecin 2007.
- [6] Lamparski J., *NAVSTAR GPS. Od teorii do praktyki*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2001.
- [7] Narkiewicz J., *GPS Globalny System Pozycyjny*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2003.
- [8] Bober R., Szewczuk T., Wolski A., *An effect of urban development on accuracy of the GPS/EGNOS system*, [in:], *Advanced in Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Gdynia 2007.

ABSTRACT

The authors have examined the relation between the accuracy of position determined by a GPS receiver and a HDOP function. It turns out that for multi-channel receivers the relation can be expressed by a linear function, which was not the case for sequential receivers. A linear relation between a position error and HDOP may prove that the other sources of measurement errors do not affect much the final result.

Recenzent

prof. dr Józef Urbański
