

## Analysis of positioning errors of the GPS navigation receivers

### Analiza błędów wyznaczania pozycji odbiorników nawigacyjnych systemu GPS

Łukasz Budzyński<sup>a,\*</sup>, Eligiusz Pawłowski<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Computer Science, Lublin University of Technology, Nadbystrzycka 36B, 20-618 Lublin, Poland

<sup>b</sup> Department of Automation and Metrology, Lublin University of Technology, Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, Poland

#### Abstract

The article compares the accuracy of receivers related to the geolocation process in the GPS system. To determine the accuracy of the receivers, a series of research experiments were conducted based on test cases. For the needs of the research, a research platform for collecting data from the GPS system was designed and constructed. The research results are presented in the form of tables and graphic charts.

**Keywords:** GPS; Navigation; Telecommunication

#### Streszczenie

W artykule porównano dokładność odbiorników związanych z procesem geolokalizacji w systemie GPS. W celu określenia dokładności odbiorników przeprowadzono serię eksperymentów badawczych w oparciu o przypadki testowe. Na potrzeby badań została zaprojektowana oraz skonstruowana platforma badawcza służąca do gromadzenia danych z systemu GPS. Rezultaty badań przedstawiono w postaci tabel oraz wykresów graficznych.

**Słowa kluczowe:** GPS; Nawigacja; Telekomunikacja

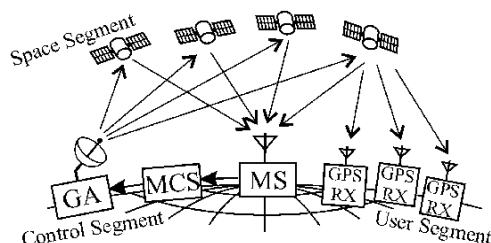
\*Corresponding author

Email address: [lukasz.budzynski@pollub.edu.pl](mailto:lukasz.budzynski@pollub.edu.pl) (Ł. Budzyński)

©Published under Creative Common License (CC BY-SA v4.0)

## 1. Wstęp

Systemy nawigacji satelitarnej GNSS umożliwiają uzyskanie dokładnych informacji na temat pozycji badanego obiektu. Najbardziej popularnym systemem tego typu jest Amerykański system GPS, jest to system o zasięgu globalnym, składający się z 31 satelitów krążących po orbicie ziemskiej [1]. Podstawową zasadą działania systemu GPS jest nieustanny pomiar czasu wysłanego przez satelitę do odbiornika GPS. W celu prawidłowego funkcjonowania segmentu kosmicznego konieczna jest konstelacja przynajmniej 24 satelitów, poruszających się po orbitach kołowych [1-3]. Satelity GPS rozmieszczone są na 6 orbitach oznaczonych za pomocą liter A,B,C,D,E,F wzdłuż równika co  $60^\circ$  [1-2]. Rozmieszczenie satelitów na orbitach A,B,C,D,E,F umożliwia uzyskanie widoczności co najmniej 5 satelitów w każdym obszarze kuli ziemskiej [2, 4]. Na rysunku 1 przedstawiono konfigurację systemu GPS.

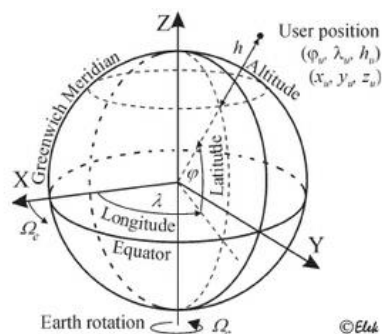


Rysunek 1: Konfiguracja systemu GPS, MMC – Główna stacja kontroli, MS - Stacja monitorująca, GA – Antena naziemna, GPS RX – Odbiornik użytkownika [1].

GPS składa się z trzech segmentów: segmentu kosmicznego, segmentu naziemnego oraz segmentu użytkownika [3]. Głównym zadaniem segmentu naziemnego jest monitorowanie segmentu kosmicznego. Stacje monitorujące przesyłają dane do głównej stacji kontrolnej, na ich podstawie wyznaczane są poprawki do segmentu kosmicznego [1]. Segment użytkownika składa się z odbiorników, jego celem jest odbiór sygnału wysyłanego za pośrednictwem segmentu kosmicznego i określenie pozycji odbiornika na ich podstawie [4-5].

## 2. Podstawy systemu GPS

Podstawową zasadą działania systemu GPS jest wyznaczenie pozycji satelity oraz odbiornika GPS w określonym układzie współrzędnych [5]. W systemie GPS współrzędne odbiornika oraz satelity przedstawione są w kartezjańskim układzie współrzędnych, znanym inaczej jako układ WGS84 [1, 6].



Rysunek 2: Układ współrzędnych WGS84 [1].

Początek układu współrzędnych znajduje się w centrum Ziemi, oś Z przebiega przez oś obrotu Ziemi, osie X oraz Y pokrywają się z płaszczyzną równikową. Oś X przechodzi przez południk zerowy [1]. Układ WGS84 jest zakotwiczony do osi Ziemi i obraca się razem z nią. W celu wyznaczenia pozycji odbiornika GPS satelita wysyła depeszę nawigacyjną w której zawarta jest informacja na temat orbity, po której porusza się satelita oraz czasu jej nadania [1]. Odbiornik odbiera sygnał pochodzący z satelity z różnicą czasu potrzebną do propagacji fali radiowej na drodze satelita-odbiornik. Mając powyższe na uwadze czas potrzebny do propagacji fali radiowej można wyznaczyć ze wzoru numer 1 [1, 7]:

$$\Delta T = t_1 - t_2 \quad (1)$$

gdzie  $\Delta T$  jest czasem propagacji sygnału radiowego na drodze satelita-odbiornik,  $t_1$  jest czasem zawartym w depeszy nawigacyjnej,  $t_2$  jest dokładnym czasem odbiornika. Ponieważ prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w próżni wynosi  $c = 299\,792\,458$  m/s odległość pomiędzy odbiornikiem GPS a satelitą można wyznaczyć ze wzoru 2 [1, 7]:

$$d = c\Delta T \quad (2)$$

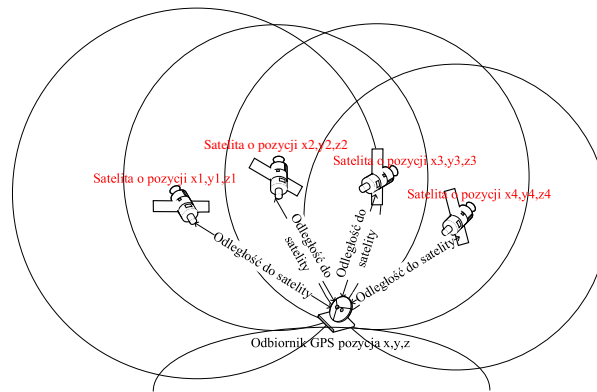
gdzie  $d$  jest odległością satelita-odbiornik,  $c$  jest prędkością fali elektromagnetycznej. Uwzględniając wzory numer 1 oraz 2 można wyznaczyć strefę o promieniu  $d$ , w której centrum obecny jest satelita, a na jej brzegach możliwe aktualne pozycje odbiornika GPS zgodnie z równaniem numer 3 [1, 7, 8]:

$$(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 = (c\Delta T)^2 \quad (3)$$

gdzie  $x_1, y_1, z_1$  jest współrzędną geograficzną satelity,  $x, y, z$  jest współrzędną geograficzną odbiornika. Nieznane współrzędne geograficzne odbiornika określane są na podstawie odległości odbiornika do satelity, z którego pochodzi dana depesza nawigacyjna. Aby wyznaczyć pozycję odbiornika w postaci 3D konieczna jest widoczność przez odbiornik przynajmniej 3 satelitów. W praktyce jednak do wyznaczenia pozycji potrzebujemy 4 satelitów, z uwagi na wystąpienie różnic w zegarach atomowych [7]. Czwarty satelita umożliwia wyznaczenie błędu dokładności czasu. Rezultatem powyższego jest układ równań numer 4 [1, 8]:

$$\begin{aligned} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 &= c^2(t_1 - t)^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 &= c^2(t_2 - t)^2 \\ (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2 &= c^2(t_3 - t)^2 \\ (x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2 &= c^2(t_4 - t)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie  $x_{1..4}, y_{1..4}, z_{1..4}$  to współrzędne satelitów,  $x, y, z$  to współrzędna odbiornika  $t_{1..4}$ , to czas propagacji fali radiowej,  $t$  to błąd zegara satelity. Rozwiązanie układu równań numer 4 umożliwia wyznaczenie pozycji odbiornika GPS. Na rysunku numer 3 przedstawiono ideę działania systemu GPS opisaną równaniem numer 4.



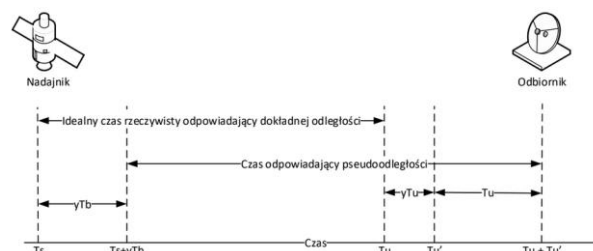
Rysunek 3: Idea działania systemu GPS [6].

### 3. Błędy systemu GPS

Wyznaczone wartości długości geograficznej, szerokości geograficznej, wysokości nad poziomem morza na podstawie równania numer 4 nie są dokładne i zawierają błąd wyznaczania pozycji. Główne błędy składające się na błąd określenia pozycji odbiornika to: błąd efemeryd, błąd położenie satelitów względem ziemi (DOP), błąd wynikający z niedokładności zegarów satelitarnych, opóźnienie sygnału, wielodrogowość, efekty relatywistyczne, błąd zegara odbiornika, błąd dokładności odbiornika [1]. Błąd obliczania pseudoodległości satelity w stosunku do odbiornika można wyznaczyć ze wzoru:

$$\beta_D = \beta_{at} + \beta_{sz} + \beta_{wd} + \beta_e \quad (5)$$

gdzie  $\beta_D$  jest błędem dokładności,  $\beta_{at}$  jest błędem wynikającym z opóźnienia sygnału w atmosferze,  $\beta_{sz}$  jest błędem szumów i braku dokładnej rozdzielczości odbiornika,  $\beta_{wd}$  jest błędem wielotorowości sygnału GPS,  $\beta_e$  jest błędem układów elektrycznych odbiornika. Sytuację powyżej opisaną przedstawiono na rysunku numer 4 [7].



Rysunek 4: Zależności czasowe odbiornik -nadajnik [7].

W oparciu o rysunek 4 można wyznaczyć odległość odbiornika do satelity zgodnie z równaniem numer 6 [7]:

$$\begin{aligned} d &= c[(Tu' + Tu) - (Ts + \gamma Tb)] = \\ C(Tu' - Ts) + c(Tu - \gamma Tb) &= c(Tu + \gamma Tu - Ts) + C(Tu - \gamma Tb) = D_{rz} + c(Tu - \gamma Tb + \gamma Tu) \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie  $d$  to odległość odbiornika do satelity,  $Ts$  to czasem w którym sygnał został nadany,  $Tu$  to czas w którym sygnał powinien dotrzeć do odbiornika,  $Tu'$  to czas w którym sygnał dociera do odbiornika,  $\gamma Tb$  to błąd zegara satelity,  $Tu$  to błąd zegara odbiornika,  $Drz$  to

dokładna rzeczywista odległość do odbiornika. Przy założeniu, że  $Drz$  jest dokładną rzeczywistą odległością do odbiornika otrzymujemy równanie numer 7 [7].

$$drz = c(Tu - Ts) = c\Delta T \quad (7)$$

Składowa  $(Tu - Ts)$  reprezentuje błąd rzeczywistej odległości odbiornika od satelity.

#### 4. Sposoby wyznaczania dokładności w systemie GPS

Podstawowym parametrem do pomiaru dokładności wykonanych pomiarów z wykorzystaniem jednej pozycji jest parametr RMS – Root Man Square. RMS znany inaczej jako estymator odchylenia standardowego wyznaczany jest ze wzoru 8, 10. Należy uwzględnić jednak, że jest on podawany w stopniach szerokości oraz długości geograficznej [1, 9-10].

$$\sigma_\lambda = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{\lambda} - \lambda_k)^2} \quad (8)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_k \quad (9)$$

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{\varphi} - \varphi_k)^2} \quad (10)$$

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_k \quad (11)$$

gdzie  $\varphi_k, \lambda_k$  to wartość pomiaru,  $\bar{\varphi}, \bar{\lambda}$  to średnia wartość pomiarów,  $n$  jest liczbą pomiarów. Ponieważ RMS opisuje błąd wyznaczania pozycji w postaci jednowymiarowej w szerokości oraz długości geograficznej, należy przeliczyć ten błąd na metry wykorzystując równania 12, 13 [1, 9-10]:

$$\sigma_x = \sigma_\lambda \frac{2\pi r_e \cos(\varphi)}{360^\circ} \quad (12)$$

$$\sigma_y = \sigma_\varphi \frac{2\pi r_e}{360^\circ} \quad (13)$$

gdzie  $\sigma_x, \sigma_y$  to błąd pomiaru w metrach,  $\sigma_\varphi$  to błąd w szerokości geograficznej,  $\sigma_y$  to błąd w długości geograficznej,  $r_e$  to średni promień kuli ziemskiej w postaci idealnej. W praktyce wykorzystuje się błąd DRMS Distance Root Mean Square określający błąd w różnych kierunkach [1, 10]:

$$DRMS = \sqrt{(\sigma_x)^2 + (\sigma_y)^2} \quad (14)$$

gdzie  $\sigma_x$  – średnia niepewność kwadratowa określona na podstawie długości geograficznej,  $\sigma_y$  – średnia niepewność kwadratowa określona na podstawie szerokości geograficznej. W celu zwiększenia dokładności

wyznaczanych pozycji zastosowanie ma parametr podwójnej odległościowej średniej niepewności kwadratowej, w języku angielskim Twice the Distance Root Mean Square – 2DRMS określa równanie 15 [9-10].

$$2DRMS = 2\sqrt{(\sigma_x)^2 + (\sigma_y)^2} \quad (15)$$

W zastosowaniu jest również parametr potrójnej odległościowej średniej niepewności kwadratowej [1, 9].

$$3DRMS = 3\sqrt{(\sigma_x)^2 + (\sigma_y)^2} \quad (16)$$

CEP (Circular Error Probability) – błąd kołowy jest miarą wyznaczania dokładności współrzędnych geograficznych określanych na podstawie długości promienia okręgu, w którym znajduje się 50% błędnych pomiarów. Punkt środkowy jest wyznaczany na podstawie współrzędnych rzeczywistych średnich wartości. Błąd kołowy odpowiada za wyznaczenie dokładności współrzędnych dwuwymiarowych. Parametr CEP wyznaczany jest zgodnie z równaniem 17 [1, 9-10].

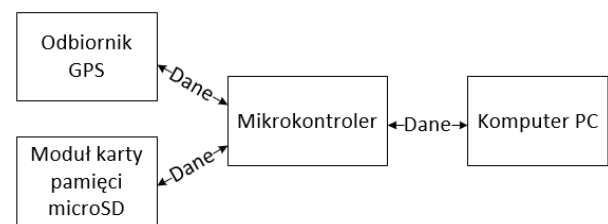
$$CEP = 0,62\sigma_x + 0,56\sigma_y \quad (17)$$

Parametr CEP jest prawidłowy dla wartości  $\frac{\sigma_y}{\sigma_x} > 0,3$ . Błąd R95 jest promieniem okręgu w którym znajdują się 95% pomiarów. Na podstawie równania 18 można wyznaczyć wartość R95 uwzględniając parametr CEP [1, 9-10].

$$CEP(95\%) = R95 = 2,08CEP = 2,08(0,62\sigma_x + 0,56\sigma_y) \quad (18)$$

#### 5. Platforma badawcza

W celu przeprowadzenia pomiarów pozycji odbiornika GPS zbudowano platformę badawczą przedstawioną na rysunku 5.



Rysunek 5: Platforma badawcza.

Projekt oparto na mikrokontrolerze Arduino UNO oraz odbiorniku L76X GPS module. Dane pochodzące z satelitów w postaci komunikatów NMEA odbierane przez odbiornik, są przesyłane do mikrokontrolera z wykorzystaniem protokołu UART. W kolejnym etapie dane poddano zdekodowaniu w mikrokontrolerze Arduino za pośrednictwem biblioteki TinyGPSPlus, która umożliwia zdekodowanie danych zawartych w pakietach NMEA [11]. Dane w ten sposób zdekodowane są zapisywane na karcie microSD oraz wysyłane do komputera PC za pośrednictwem portu USB. Wykorzystanie programu CoolTerm umożliwiło zapis danych przesyłanych do komputera w pliku .txt. Uzyskane w ten sposób dane poddano analizie z wykorzystaniem programu

MatLab. Dokładność odbiornika deklarowana przez producenta w karcie katalogowej produktu to 2,5m CEP [12].

## 6. Badania

Wykorzystując platformę pomiarową opisaną w rozdziale 5 przeprowadzono pomiary trzech przypadków testowych:

1. Badania współczynnika CEP odbiornika L76X w porównaniu do urządzenia wzorcowego przez okres 24 godzin w zmiennych warunkach atmosferycznych.
2. Badanie współczynnika CEP odbiornika L76X w stałym punkcie odniesienia przez okres jednej godziny.
3. Porównanie danych uzyskanych z wykorzystaniem odbiornika L76X do przebytej trasy.

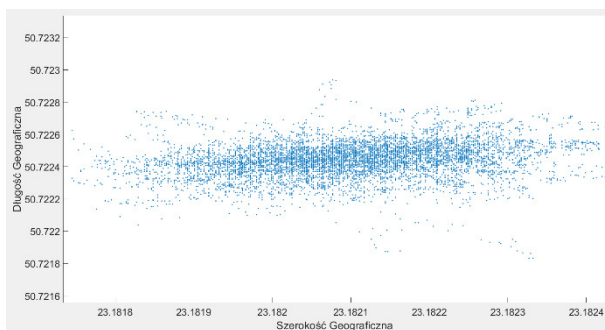
W trakcie przeprowadzania badań dla przypadków testowych określonych w punktach 1, 2, 3 wystąpiły warunki pogodowe przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1: Warunki pogodowe

Przypadek 1				
Godzina	Temp [°C]	Zachmurzenie	Ciśnienie	Opady
0:00-6:00	2-4	Całkowite	1015 hPa	Tak
6:00-12:00	5-10	Całkowite	1013 hPa	Tak
12:00-18:00	10-13	Częściowe	1012 hPa	Przelotne
18:00-0:00	10-5	Brak	1011hPa	brak
Przypadek 2				
15:00-16:00	18	Brak	1021 hPa	Brak
Przypadek 3				
12:00-13:00	13	Brak	1011 hPa	Brak

## 7. Wyniki

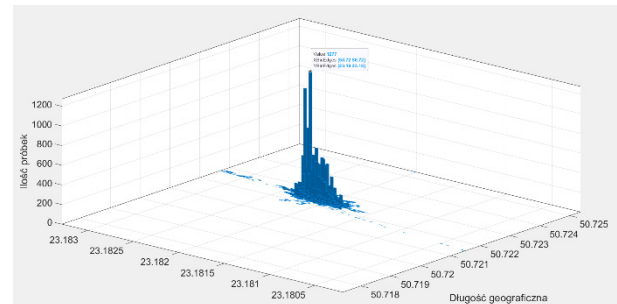
Wyznaczenie dokładnej pozycji odbiornika L76X było kluczowym problemem napotkanym podczas przeprowadzania badań. W celu otrzymania wiarygodnych wyników przeprowadzono 24 godzinne badanie z użyciem urządzenia wzorcowego. Na rysunku 6 przedstawiono wyniki z przeprowadzenia 24 godzinnych badań z wykorzystaniem odbiornika L76X, uzyskano 30 tysięcy próbek geolokalizacyjnych pozycji odbiornika L76X.



Rysunek 6: Zarejestrowane pozycje odbiornika L76X.

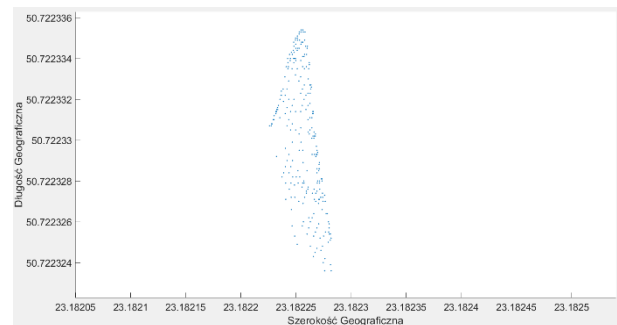
Na podstawie równania 7 oraz 9 wyznaczono punkt centralny zbioru danych jako  $50.7224633^\circ$  długości geograficznej oraz  $23.1821494^\circ$  szerokości geograficznej. W celu wyznaczenia rozkładu empirycznego pozycji utworzono histogram, przedstawiony na rysunku 7 wykres wyznacza najczęściej lokalizowaną pozycję

odbiornika GPS. Mając powyższe na uwadze możemy wyznaczyć najczęściej określaną pozycję jako  $50.7224651^\circ$  długości geograficznej oraz  $23.1821412^\circ$  szerokości geograficznej.



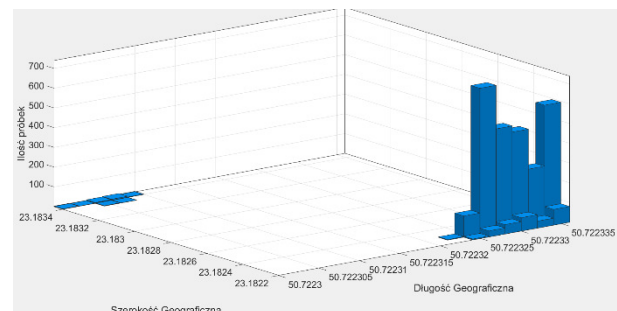
Rysunek 7: Histogram odbiornika L76X.

Na podstawie wzoru 17 wyznaczono parametr CEP = 1.32 m. W czasie badania odbiornika L76X przeprowadzono równoczesne pomiary z wykorzystaniem urządzenia wzorcowego, w ich trakcie uzyskano 10 tysięcy próbek określających pozycję wzorcowego odbiornika GPS. Punkty przedstawione na rysunku 8 są wynikami 24 godzinnych pomiarów z wykorzystaniem odbiornika wzorcowego.



Rysunek 8: Zarejestrowane pozycje odbiornika wzorcowego.

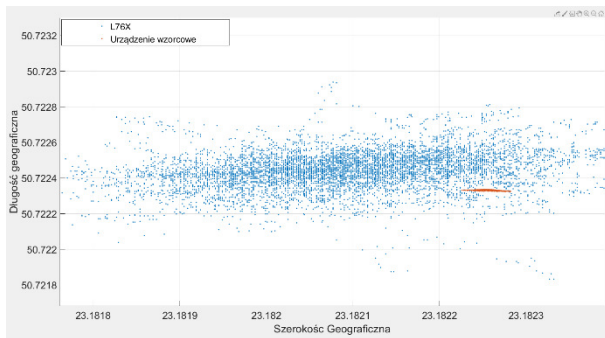
Na rysunku 9 przedstawiono rozkład empiryczny pozycji odbiornika wzorcowego.



Rysunek 9: Histogram urządzenia wzorcowego.

Na podstawie rysunku 9 można określić najczęściej wyznaczaną pozycję określaną jako  $50.7223262^\circ$  długości geograficznej oraz  $23.182275^\circ$  szerokości geograficznej. Obliczając średnią arytmetyczną na podstawie równania 7 oraz 9 z uzyskanych danych pomiarowych wyznaczono punkt centralny o współrzędnych  $50.7223303^\circ$  długości geograficznej oraz  $23.1822706^\circ$  szerokości geograficznej. Wynik parametru CEP otrzymanego z wyliczeń na podstawie wzoru 17 wyniósł

CEP=5.19 m. Porównanie otrzymanych pozycji urządzenia wzorcowego oraz odbiornika L76X przedstawiono na rysunku 10.



Rysunek 10: Porównanie pozycji odbiorników.

Uwzględniając najczęściej występujące pomiary uzyskane z wykorzystaniem histogramów oraz średnich wartości pomiarów można wyznaczyć przybliżoną odległość urządzenia wzorcowego w stosunku do odbiornika L76X. W tabeli 2 przedstawiono porównanie wyznaczonych pozycji.

Tabela 2: Najczęstsze pozycje odbiorników

Badany odbiornik	Długość Geograficzna średnia	Szerokość Geograficzna średnia
Odbiornik L76X	50.7224633°	23.1821494°
Urządzenie wzorcowe	50.7223303°	23.1822706°
Badany odbiornik	Długość Geograficzna histogram	Szerokość Geograficzna histogram
Odbiornik L76X	50.72246851°	23.1821412°
Urządzenie wzorcowe	50.72232622°	23.1822752°

Na podstawie tabeli 2 można wyznaczyć różnicę odległości pomiędzy najczęściej występującymi pomiarami.

Tabela 3: Różnica pomiędzy pomiarami

Różnica pomiędzy	Różnica w długości geograficznej [m]	Różnica w szerokości Geograficznej średnia [m]
Wartość średnia pomiarów	14,80	12,30
Najczęściej występującymi pomiarami	15,82	13,32

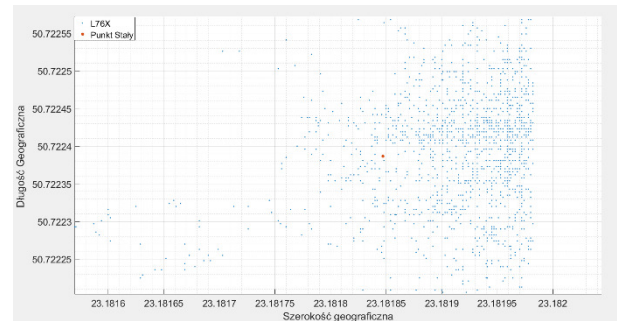
Analizując tabelę 3 można dojść do wniosku że uśrednianie rezultatów badań wyznaczania pozycji nawigacyjnych daje większą dokładność w stosunku do najczęściej występujących pomiarów. W tabeli 4 przedstawiono porównanie współczynników CEP dla 24 godzinowego okresu badawczego.

Tabela 4: Porównanie parametrów CEP

Badany odbiornik	Wyznaczona wartość parametru CEP
L76x GPS Module	1.32
Urządzenie wzorcowe	5.18

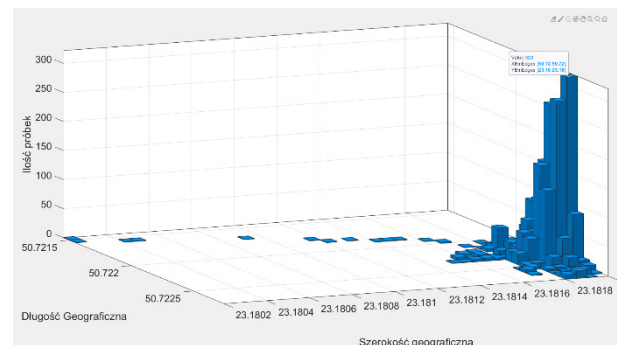
W drugim przypadku testowym porównano pozycje odbiornika L76X do pozycji stałej o niezmiennych współrzędnych geograficznych. W celu otrzymania wiarygodnych wyników przeprowadzono godzinne badania geolokalizacyjne. Przez ten okres uzyskano

2 tysiące próbek. Na rysunku 11 czerwoną kropką oznaczono stały niezmienny punkt o współrzędnych geograficznych 50.722386° długości geograficznej oraz 23.1818470° szerokości geograficznej, na niebiesko widoczne są współrzędne geograficzne uzyskane w wyniku przeprowadzonych pomiarów.



Rysunek 11: Pozycje odbiornika w zależności od punktu stałego.

Określając centralny punkt na podstawie równania 9 oraz 11 otrzymano wynik 50.722386° długości geograficznej oraz 23.1818470° szerokości geograficznej. Rozkład empiryczny w postaci histogramu przedstawia rysunek 12.



Rysunek 12: Częstotliwość pomiarów współrzędnych geograficznych.

Rezultatem obliczeń parametru CEP na podstawie wzoru 17 jest wynik 1.13 m. W tabeli 5 przedstawiono porównanie uzyskanych współrzędnych geograficznych.

Tabela 5: Zależności pomiędzy punktami

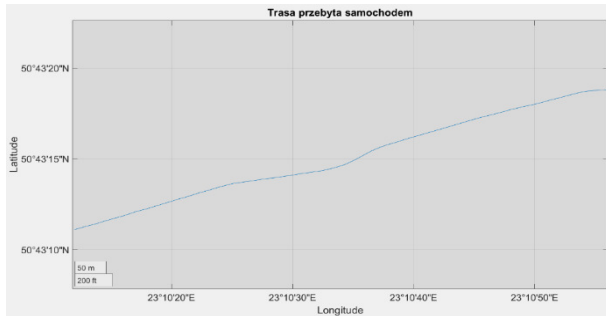
Punkt	Szerokość Geograficzna	Długość Geograficzna
Punkt średnia	23.181890°	50.722330°
Punkt histogram	23.181920°	50.722330°
Punkt stały	23.181847°	50.722386°

Na podstawie tabeli 5 możemy wyznaczyć odległości punktu stałego w stosunku do punktu średniego oraz punktu najczęściej występującego.

Tabela 6: Różnica odległości

Odległość pomiędzy	Różnica w długości geograficznej [m]	Różnica w szerokości Geograficznej [m]
Punkt stały – Punkt Średni	4,41	5,74
Punkt stały – Punkt histogram	7,48	5,74

W trzecim przypadku testowym platformę pomiarową umieszczono w samochodzie osobowym i pokonano trasę przedstawioną na rysunku 13.



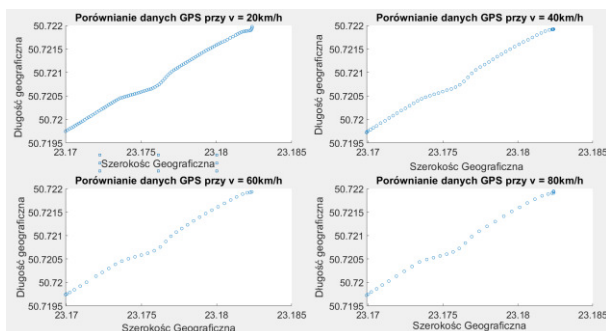
Rysunek 13: Przebyta trasa.

W celu zbadania dokładności pomiarów w zależności od prędkości samochodu przeprowadzono cztery próby badawcze z prędkościami zgodnymi z tabelą 7.

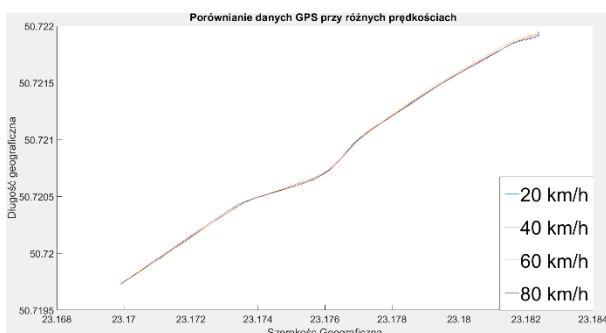
Tabela 7: Zależność prędkości od liczby próbek

Prędkość	Czas Przebycia Drogi	Liczba Uzyskanych Próbek
$v_1 = 20 \text{ km/h}$	3:20	98
$v_2 = 40 \text{ km/h}$	1:56	56
$v_3 = 60 \text{ km/h}$	1:12	39
$v_4 = 80 \text{ km/h}$	0:50	28

Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 14.



Rysunek 14: Wyniki pomiarów.



Rysunek 15: Porównanie przebytych tras.

Konfrontując ze sobą wyniki pomiarów przeprowadzonych przy prędkościach 20km/h, 40 km/h, 60 km/h, 80km/h dokonano graficznej prezentacji widocznej na rysunku 15 przebytych tras zgodnych z rysunkiem 13. Poddając analizie rysunek 14,15 możemy stwierdzić, że dokładność wyznaczania punktów geolokalizacyjnych zależy od ilości próbek pobranych z przemieszczającego się obiektu. W przypadku pomiaru z prędkością

80 km/h widoczny jest znaczący spadek dokładności odwzorowania przebytej trasy.

## 8. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Parametr CEP odbiornika L76X GPS Module podczas pierwszego przypadku testowego wyniósł 1,32 m. Porównując do wartości parametru CEP wynoszącego 2,5 m podawanego przez producenta modułu można stwierdzić że moduł spełnia kryterium określone przez producenta,
2. Parametr CEP urządzenia wzorcowego podczas badań wyniósł 5,19, mając powyższe na uwadze można stwierdzić że odbiornik L76X jest 3,5 razy dokładniejszy,
3. Różnica w długości geograficznej według średnich wartości pomiaru pomiędzy urządzeniem wzorcowym a modułem L76X wynosiła 14,80 m natomiast w szerokości geograficznej 12,30 m,
4. Różnica w długości geograficznej według najczęściej występujących wartości pomiaru pomiędzy urządzeniem wzorcowym a modułem L76X wynosiła 15,82 m natomiast w szerokości geograficznej 13,32 m,
5. Parametr CEP odbiornika L76X GPS Module podczas drugiego przypadku testowego wyniósł 1,13 m. Porównując do wartości parametru 2,5 m podawanego przez producenta modułu możemy stwierdzić że moduł spełnia kryterium określone przez producenta,
6. Różnica w długości geograficznej według średnich wartości pomiaru pomiędzy miejscem wzorcowym (drugi przypadek badawczy) a modułem L76X wynosiła 4,40 m natomiast w szerokości geograficznej 5,73 m,
7. Różnica w długości geograficznej według najczęściej występujących wartości pomiaru pomiędzy urządzeniem wzorcowym (drugi przypadek badawczy) a modułem L76X wynosiła 7,48 m natomiast w szerokości geograficznej 5,73 m,
8. Porównując wyniki badań przeprowadzonych podczas ruchu z wykorzystaniem samochodu osobowego (trzeci przypadek badawczy), możemy stwierdzić że w przypadku większej ilości próbek otrzymujemy dokładniejszy pomiar geolokalizacyjny.

## Literatura

- [1] E. Pawłowski, Experimental study of a positioning accuracy with GPS receiver, the 12th Conference on Selected Problems of Electrical Engineering and Electronics, WZEE 2015.
- [2] Dr. Bernhard Hofmann-Wellenhof, GNSS Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo & more., SpringerWien NewYork 9783211730126.
- [3] D. Doberstein, Fundamentals of GPS Receivers. A Hardware Approach, Springer Science+Business Media, 2012.
- [4] E. Dziadczyk, Satellite Navigation System GPS, Conference: CAD Systems in Microelectronics, 2007.

- [5] J. Lamparski, Navstar GPS od teorii do praktyki, Wydawnictwo uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2001.
- [6] NMEA Reference Manual, rev. 1, SiRF Technology Inc. January 2005.
- [7] E. D. Kaplan, Understanding GPS Principles and Applications Second edition, Artech House, London.
- [8] J. Narkiewicz, Budowa działanie, zastosowanie”, WKŁ, Warszawa 2003.
- [9] E. Pawłowski, An experimental investigation into the positioning accuracy of low-cost gps receivers in labview environment, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2015.
- [10] Novatel, GPS Position Accuracy Measures, December, 2003.
- [11] S. Ashrtaf, A low-cost solution for unmanned aerial vehicle navigation in a global positioning system–denied environment, International Journal of Distributed Sensor Networks, June 18, 2018.
- [12] Dokumentacja techniczna odbiornika L76X GPS Module.