

SPECHT Cezary, SZOT Tomasz, SPECHT Mariusz

BADANIE DOKŁADNOŚCI PERSONALNYCH ODBIORNIKÓW GPS W POMIARACH DYNAMICZNYCH

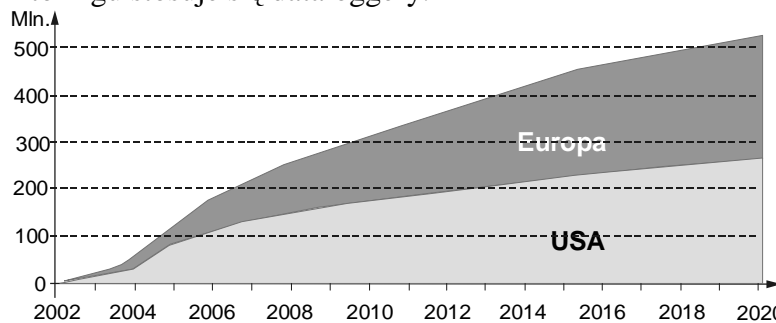
Streszczenie

System GPS stanowi współcześnie podstawowe źródło określania położenia w nawigacji nieprofesjonalnej. Podobne parametry oraz relatywnie niska cena powodują trudności w wyborze urządzenia przez przeciętnego użytkownika. Poniższy artykuł prezentuje ich dokładności wyznaczone eksperymentalnie w pomiarach dynamicznych. Wybrane odbiorniki GNSS zostały podzielone na następujące grupy: wyspecjalizowane odbiorniki przeznaczone do sportowych konkurencji biegowych, rejestratory trasy (DataLogger GPS) oraz odbiorniki rowerowe. Pomiary zostały zrealizowane na stadionie AWFIS w Gdańsku, uprzednio zinwentaryzowanym geodezyjnie.

Współrzędne elipsoidalne zarejestrowane przez odbiorniki GNSS zostały przetransformowane do układu współrzędnych płaskich 2000, stosowanego w Polsce. W dalszej kolejności określono statystyki błędów wyznaczenia współrzędnych pozycji umożliwiające ich kategoryzację jakościową.

WSTĘP

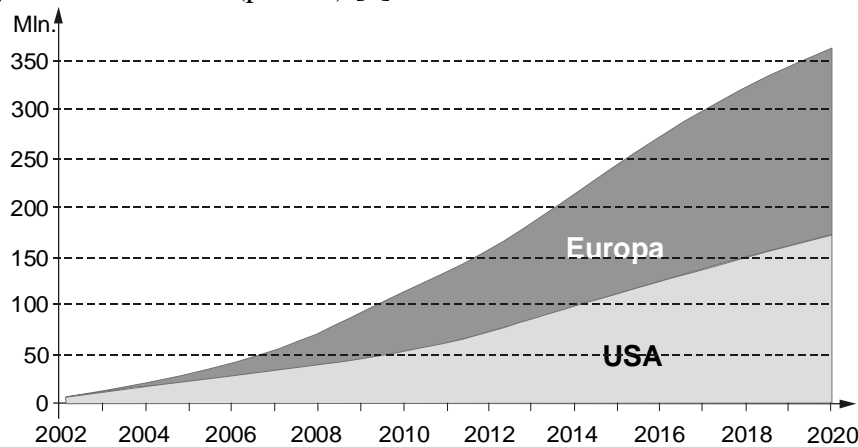
Profesjonalni użytkownicy nawigacyjni - nawigatorzy jeszcze do niedawna byli największą grupą wykorzystującą systemy radionawigacyjne. Znaczące zmiany w tej kwestii nastąpiły w ciągu ostatnich kilku lat, a podyktowane były upowszechnieniem tzw. nawigacji ogólnospołecznej obejmującej użytkowników nieprofesjonalnych wykorzystujących odbiorniki GNSS nawigacji lądowej (samochodowej). W tej grupie rozwijają się współcześnie równoległe dwa kierunki rozwiązań systemów GIS opartych o pozycjonowanie satelitarne. Pierwszy - to aplikacje realizowane z wykorzystaniem telefonii komórkowej (Rys. 1) natomiast drugi to autonomiczne systemy nawigacji pojazdów (Rys. 2) gdzie m.in. w systemach monitoringu stosuje się datalogery.



Rys. 1. Prognozowany wzrost liczby telefonów komórkowych wyposażonych w odbiornik GNSS w Europie i USA [5]

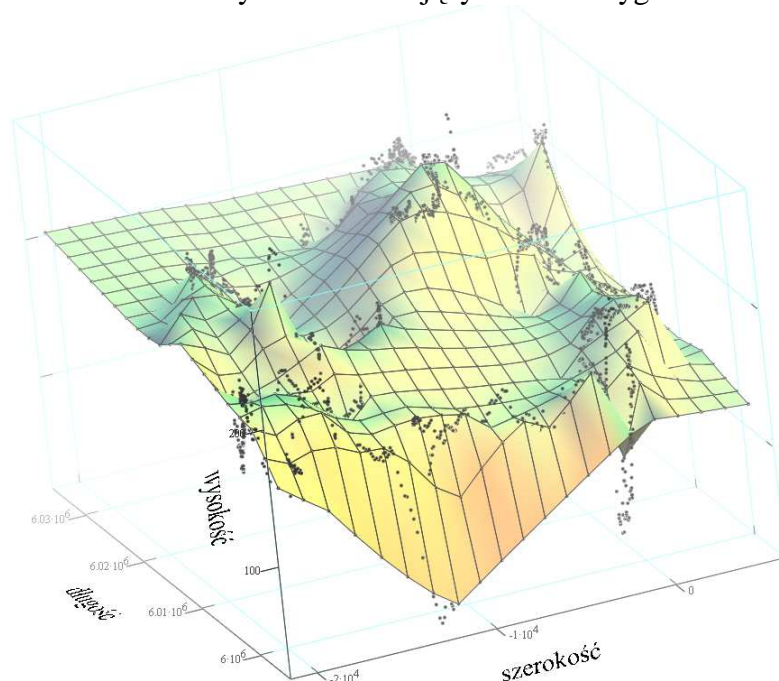
Jednocześnie zwrócić należy uwagę, iż w zakresie rozwiązań GIS stosowane są dziś dwie znacząco odmienne strategie realizacyjne. Pierwsza z nich oparta jest o dynamicznie

rozwijającą się platformę Google Maps, natomiast druga wykorzystuje dedykowane oprogramowanie GIS autorstwa różnych producentów. Dla użytkowników lądowych niewątpliwie decydującym w zakresie wzrostu dokładności określenia pozycji był moment wyłączenia tzw. selektywnej dostępności w systemie GPS skutkujący wzrostem dokładności horyzontalnej ze 100 m do 9 m ($p=0.95$) [2].



Rys. 2. Prognozowany wzrost liczby samochodów wyposażonych w odbiornik GNSS w Europie i USA [5]

Nie sposób nie dostrzec dziś coraz większego rozpowszechnienia wśród użytkowników odbiorników sportowych używanych w rekreacji i sporcie profesjonalnym. Na poniższym rysunku przedstawiono przykładowe zobrazowanie położenia odbiornika sportowego w zawodach sportowych, na tle numerycznego modelu terenu. Prezentowana trasa zawodnika to dystans wynoszący 225 km. Zaznaczone punkty to wynik pomiaru pozycji odbiornikiem GPS świadczący o możliwości istnienia znaczących błędów określenia położenia w szczególności na obszarach leśnych – utrudniających odbiór sygnałów satelitarnych.



Rys. 3. Przykład prezentacji pozycji GPS zawodnika na tle numerycznego modelu terenu

Biorąc powyższe pod uwagę autorzy podjęli się próby oceny dokładności określenia położenia wybranej grupy odbiorników GPS. Pierwszy etap obejmował pomiary statyczne zrealizowane na punkcie geodezyjnym krajowej osnowy geodezyjnej 1 klasy POLREF, które

zreferowano w [4]. Kolejnym etapem była próba oceny dokładności określenia położenia z wykorzystaniem popularnych odbiorników GPS w badaniach dynamicznym, którym poświęcony jest niniejszy artykuł.

1. WYZNACZENIE WZORCOWEJ TRAJEKTORII RUCHU DLA BADANIA DOKŁADNOŚCI ODBIORNIKÓW

Dla realizacji pomiarów dynamicznych umożliwiających ocenę dokładności określenia pozycji można realizować jedynie względem uprzednio wyznaczonych współrzędnych, które umożliwią określenie błędów pojedynczych pomiarów. Zdecydowano, iż wykorzysta się w tym celu bieżnię stadionu sportowego AWFIS, dla której wymagania w zakresie precyzji wyznaczenia nie przekraczają 2 mm, zgodnie z wymaganiami Międzynarodowego Stowarzyszenia Federacji Atletycznych (ang.: International Association of Athletics Federations – IAAF) [3, 6]. Ponadto międzynarodowe normy IAAF ustalają, że nachylenie poprzeczne bieżni powinno wynosić 1 %, a nachylenie podłużne, mierzone w kierunku biegu 0.1 %. Zgodnie z wspomnianymi wytycznymi nachylenie podłużne mierzy się wzdłuż kierunku biegu na odcinkach co 50 m począwszy od mety. Na jednym takim odcinku (czyli na 50 m) to nachylenie nie może przekroczyć 0.1 %. Całkowite nachylenie podłużne winno wynosić 0 % (oznacza to, że suma wszystkich nachyleń mierzonych co 50 m, uwzględniając ich różnice w stosunku do poziomu na linii mety powinna wynosić 0). Na poniższym rysunku przedstawiono zmiany poziomu stadionu zmierzone na pierwszym – wewnętrznym torze pomiarowym.

Pomiary dynamiczne dostępnych odbiorników zrealizowano względem zinventaryzowanej linii pomiarowej, pomiędzy dwoma torami stadionu sportowego, stanowiącej trajektorię wzorcową. W tym celu wykonano niezależne pomiary z wykorzystaniem tachimetru geodezyjnego oraz odbiornika geodezyjnego systemu GPS z wykorzystaniem satelitarnej, geodezyjnej Aktywnej Sieci Geodezyjnej ASG-EUPOS. Szczegółowy opis określania położenia oraz działania tej sieci opisano w [2].

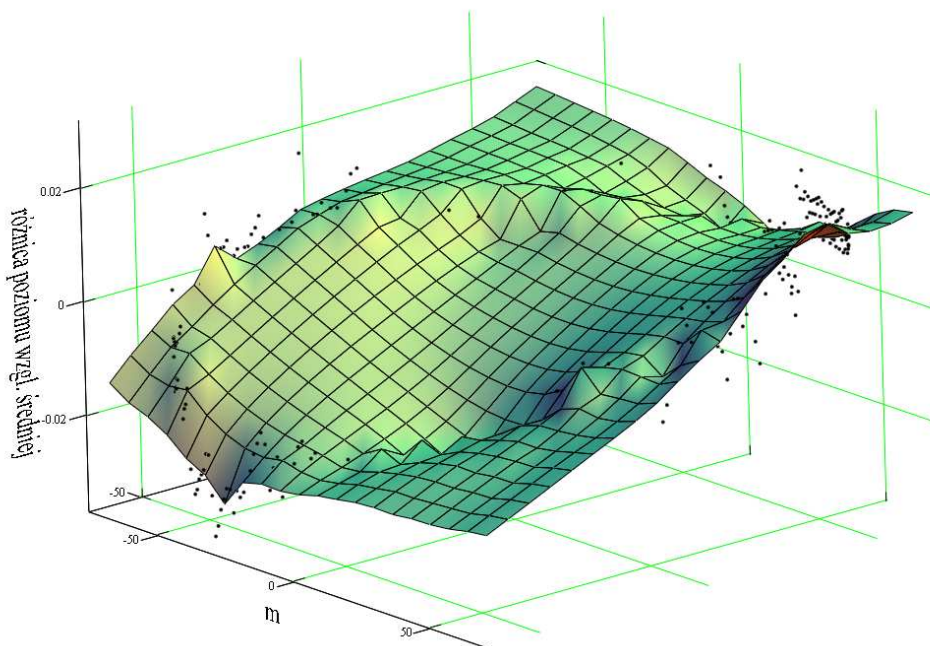
W ramach badań wyznaczono położenie 2 torów przy wykorzystaniu tachimetru elektronicznego Leica TPS 1103 (Rys. 4.). Jest to zautomatyzowana stacja z wewnętrzną rejestracją pomiarów, o dokładność pomiaru kątów 10° , zasięgu 3000 m, przy dokładności wyznaczenia (± 2 mm). Pierwszy z torów wytyczono w odległości 30 cm od skrajni bieżni, natomiast drugi inwentaryzowano w oparciu o przebieg linii rozgraniczającej pierwszy i drugi tor. Pomiar zrealizowano w oparciu o technikę lustrową w której wykorzystano 1.8 metrową tyczkę. W wyniku pomiarów uzyskano 259 pikiet – współrzędnych punktów każdego z torów. Przyjęto zasadę wyznaczenia położenia punktów na prostych co-10 metrów, natomiast na łukach co-1 m. Stanowisko tachimetryczne umieszczono na murawie stadionu zapewniając dobrą wizurę (widoczność) lustra pomiarowego. Każdemu zmierzonemu punktowi przyporządkowano trzy współrzędne ortokartezjańskie względem przyjętego systemu współrzędnych – położenia tachimetru.

Jednocześnie, w celach porównawczych, zrealizowano analogiczne pomiary z wykorzystaniem odbiornika fazowego GNSS Leica VIVA GS-15 z kontrolerem CS-15 (Rys. 4), którego dokładność w trybie kinematycznym (pomiar fazowy) szacować można w poziomie: $10\text{ mm} + 1\text{ ppm (rms)}$ oraz w pionie: $20\text{ mm} + 1\text{ ppm (rms)}$. Został on umieszczony na tyczce pomiarowej mierząc punkty wcześniej wytyczone dla pomiaru tachimetrycznego. Przy wykorzystaniu tego zestawu geodezyjnego zrealizowano pomiary pierwszej linii pomiarowej oraz linii rozgraniczającej tory 1 i 2. Wyznaczone współrzędne punktów zapisywane były na pamięć wewnętrzną odbiornika. obie serie pomiarowe (pierwsza linia pomiarowa stadionu) objęły 259 pomiarów.



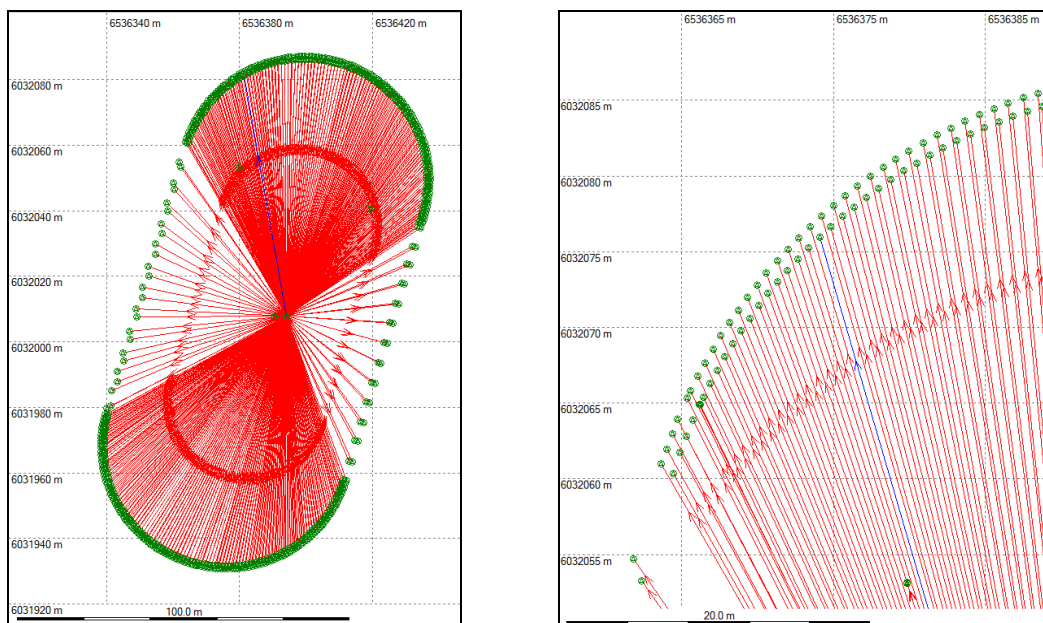
Rys. 4. Przyrządy pomiarowe – tachimetr elektroniczny TPS 1103 (rysunek lewy) oraz odbiornik GNSS Leica VIVA GS 15 (rysunek prawy)

Zrealizowane pomiary tachimetryczne wykazały maksymalne różnice wysokości sięgające 65 mm dla pierwszego toru oraz 48 mm dla linii rozgraniczającej 1 i 2 tor. Wyznaczone odchylenie standardowe dla toru nr 1 wynosi 14.23 mm oraz dla granicy torów 1 i 2 jest ono równe 12.61 mm. Zmiany poziomu stadionu zmierzone metodami tachimetrycznymi przedstawiono na poniższym rysunku.



Rys. 5. Zmiany poziomu stadionu zmierzone metodą tachimetryczną na pierwszym wewnętrznym torze pomiarowym

W wyniku pomiarów otrzymano zestaw współrzędnych geodezyjnych płaskich w państwowym systemie odniesień przestrzennych opartym o odwzorowanie Gaussa-Kruger. Przykładowe współrzędne wyznaczonych linii zaprezentowano poniżej.



Rys. 6. Wyniki pomiaru inwentaryzacyjnego stadionu z wykorzystaniem odbiornika GNSS

2. PRZEBIEG POMIARÓW

Kinematyczne pomiary wskazań pozycji wykonano na stadionie lekkoatletycznym Akademii Wychowania Fizycznego i Sportu w Gdańsku. Odbiorniki (14 różnych modeli) zostały rozmieszczone jeden za drugim na specjalnie do tego celu przygotowanym wózku (Rys. 7), który był prowadzony ze stałą prędkością 5.5-6km/h wzdłuż prawej krawędzi linii rozdzielającej tory 1 i 2. Każde okążenie kończyła ok. 10 metrowe nałożenie pomiarów (usunięte podczas postprocessingowego opracowania w programie Leica Geo Office), wykonane z uwagi na niemożliwą do wyłączenia funkcję „auto-pauzy” jednego z odbiorników, po czym urządzenia wyłączano i na wózku przemieszczano w miejsce rozpoczęcia pomiaru, gdzie były ponownie włączane. Zapisano w ten sposób 7 śladów owalu stadionu (rejestratory - format NMEA, pozostałe - uniwersalny format wymiany GPX, oba przekonwertowano następnie do formatu csv dla dalszego przetwarzania). Czas pomiaru zaplanowano przy wykorzystaniu oprogramowania Trimble Planning 2.8, wybierając porę o minimalnych wartościach współczynników geometrycznych DOP.

Na potrzeby niniejszego artykułu ograniczono się do przeanalizowania dwóch okążień wykonanych przez sześć urządzeń, w podziale na grupy: odbiorniki naręczne dedykowane biegaczom (Garmin Forerunner 310XT i 405), odbiorniki rowerowe (Garmin Edge 205 i 800) oraz uniwersalne rejestratory (Pentagram P3106, Qstarz BT-Q1000).



Rys. 7. Rozmieszczenie urządzeń na wózku pomiarowym

Naręczne odbiorniki serii Forerunner 405 oraz 310XT producent dedykuje głównie biegaczom, choć ten ostatni posiada także ułatwienia dla triathlonistów w postaci mechanizmu pozwalającego na szybki montaż na kierownicy roweru. Oba są wodoszczelne (norma IPX7). Odbiorniki rowerowe Edge 205 oraz 800 posiadają dotykowe wyświetlacze ułatwiające obsługę, a dane mogą być zapisywane w pamięci wewnętrznej lub karcie microSD (proponowany w urządzeniu Garmin tryb Smart Recording polega na zapisywaniu jedynie kluczowych punktów, w których zmienia się kierunek oraz prędkość). Uniwersalne rejestratory posiadają najwięcej możliwości ustawień, producenci podają też ich dokładne charakterystyki nawigacyjne (w przeciwieństwie do urządzeń z pierwszych dwóch grup). W urządzeniach wybrano maksymalną częstość zapisu (1/sek. – Garmin Forerunner 310XT, Pentagram P3106, Qstarz BT-Q1000), lub przyjęto tryb proponowany przez producenta (Garmin Edge 205 i 800, Forerunner 405).

3. OPRACOWANIE WYNIKÓW

Proces analizy wyników obejmował 2 etapy:

1. Przeliczenie współrzędnych zarejestrowanych przez odbiorniki pomiarowe do współrzędnych płaskich otrzymanych w wyniku inwentaryzacji geodezyjnej przebiegu linii stadionu.
2. Obliczenie statystyk – błędów wyznaczenia położenia poszczególnych odbiorników GPS.

Opracowanie wyników pomiarów zrealizowano z wykorzystaniem oprogramowania Mathcad 14 oraz pakietu geodezyjnego Lecia Geo-Office. Pierwszym zagadnieniem było przeliczenie współrzędnych kątowych (szerokość i długość geograficzne) do współrzędnych płaskich x , y w których zapisano zinventaryzowany przebieg linii stadionowych. Współrzędne pozycji odbiorników odwzorowano do współrzędnych płaskich (prostoliniowych) państwowego układu współrzędnych płaskich 2000 (elipsoida GRS-80, w odwzorowaniu Gaussa-Kruggera, południk środkowy 18 stopni, współczynnik skali $k = 0,999923$), zgodnie z zależnościami:

$$x = k \cdot R \cdot \left[\frac{S(B)}{R} + \frac{(\Delta L)^2}{2} \cdot \sin(B) \cdot \cos(B) + \frac{(\Delta L)^4}{24} \cdot \sin(B) \cdot \cos^3(B) \cdot (5 - t^2 + 9 \cdot \eta^2 + 4 \cdot \eta^4) \cdot \right. \\ \left. + \frac{(\Delta L)^6}{720} \cdot \sin(B) \cdot \cos^5(B) \cdot (61 - 58 \cdot t^2 + t^4 + 270 \cdot \eta^2 - 330 \cdot \eta^2 \cdot t^2 + 445 \cdot \eta^4) \right], \quad (1)$$

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

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],

$k = 0,999923$ – współczynnik skali.

Pozostałymi parametrami odwzorowania do współrzędnych płaskich w układzie 2000 były:

$$t = \tan(B), \quad \eta = \frac{e^2 \cdot \cos^2(B)}{1 - e^2}, \quad (3,4)$$

gdzie:

e – pierwszy mimośród elipsoidy,

η – kąt orientacji zniekształceń elipsy.

Drugi etap opracowania wyników obejmował ocenę dokładności wyznaczenia współrzędnych pozycji dla 6 odbiorników GPS. Z powyższego względu zasadnym było arbitralne ustalenie miar oceny dokładności pomiarów dynamicznych poprzez przyjęcie wybranych statystyk stosowanych w pomiarach stacjonarnych odniesionych do wyznaczeń 2D. Najczęściej stosowaną miarą oceny statystycznej błędu pozycji systemu nawigacyjnego jest błąd średni pozycji (ang.: - Distance Root Mean Square - DRMS postaci:

$$DRMS = \sqrt{(\sigma_x)^2 + (\sigma_y)^2} \quad (5)$$

gdzie:

σ_x - średnią niepewnością kwadratową wyznaczenia długości geograficznej (geodezyjnej),

σ_y - średnią niepewnością kwadratową wyznaczenia szerokości geograficznej (geodezyjnej).

Prawdopodobieństwo wystąpienia niepewności DRMS mieści się w przedziale: 63.2-68.3 % i zależy od relacji pomiędzy odchyleniami standardowymi. Dla $\sigma_x = \sigma_y$ $p=63$ %, natomiast dla relacji $\sigma_x = 10 \cdot \sigma_y$ $p=68$ %.

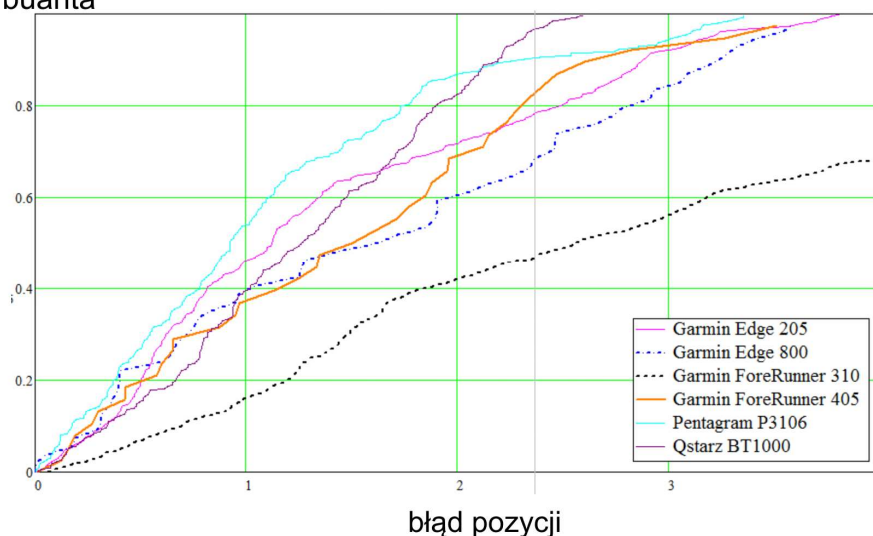
W celu zapewnienia wyższego poziomu ufności pomiarów pozycji w geodezji i nawigacji stosuje się powszechnie miarę podwójnego błędu średniego postaci:

$$2DRMS = 2 \cdot \sqrt{(\sigma_x)^2 + (\sigma_y)^2} \quad (6)$$

Kolejną z miar oceny dokładności jest błąd kołowy (ang.: Circular Error Probability - CEP) odnoszący się do długości promienia okręgu, w którym znajdzie się 50 % pomiarów, wyznaczonych względem współrzędnych rzeczywistych lub przybliżonych.

Analizę otrzymanych wyników zaprezentowano w formie funkcji oraz tabelarycznie. Na poniższym rysunku przedstawiono empiryczne dystrybuanty błędów pozycji poszczególnych odbiorników wyznaczonych dla dwóch pełnych okrążeń stadionu. Wskazują one na istnienie nawet dwukrotnych różnic w dokładności określenia współrzędnych pozycji.

dystrybuanta



Rys. 8. Wartość dystrybuanty w funkcji błędu pozycji testowanych odbiorników sportowych GPS

Najbardziej reprezentatywną formą prezentacji wyników dokładności pozycjonowania jest sposób tabelaryczny, gdzie poszczególnym miarom przypisywany jest poziom ufności wyników. Stąd wyniki oceny dokładności poszczególnych odbiorników zestawiono w poniższej tabeli:

Tab. 1. Miary dokładności testowanych odbiorników sportowych GPS wyliczone z populacji

Typ	Drms (p=0.68)	CEP (p=0.5)	2drms (p=0.95)
Garmin Edge 205	1.776	1.123	3.206
Garmin Edge 800	2.367	1.720	3.551
Garmin ForeRunner 310	3.955	2.567	7.099
Garmin ForeRunner 405	1.963	1.600	3.513
Pentagram P3106	1.323	0.924	3.045
Qstarz BT 1000	1.684	1.267	2.323

Przedstawione powyżej wyniki potwierdziły hipotezę o znaczącej różnicy w statystykach dokładności określenia pozycji przez różne odbiorniki GPS. Najdokładniejszymi w sensie statystyk pozycyjnych okazały się odbiorniki Qstarz BT 1000 oraz Pentagram P3106 należące do grupy dataloggerów. Należy zauważyć, iż wnioski w przeprowadzonych badaniach dynamicznych korespondują z wynikami badań statycznych zrealizowanych na punkcie geodezyjnym opisanych w pozycji [4]. We wspomnianych pomiarach grupa rejestratorów również uzyskiwała najwyższy poziom precyzji pomiarów.

PODSUMOWANIE

1. W artykule zaproponowano metodę pomiarowej oceny dokładności określenia współrzędnych pozycji przez typowe odbiorniki GPS w pomiarach dynamicznych z wykorzystaniem uprzednio zinwentaryzowanych geodezyjnie linii biegni stadionu sportowego.
2. Zrealizowane pomiary wykazały istnienie znaczących różnic pomiędzy dokładnościami wyznaczenia współrzędnych pozycji pomiędzy poszczególnymi grupami odbiorników.

Świadczą one o konieczności prowadzenia dalszych badań w zakresie optymalizacji doboru określonego typu odbiornika względem jego przeznaczenia.

3. Odbiorniki będące rejestratorami wykazują najwyższą dokładność określenia pozycji.

BIBLIOGRAFIA

1. Specht C., Skóra M., *Analiza porównawcza wybranych aktywnych sieci geodezyjnych*, Zeszyty Naukowe AMW, 2009, No. 3, pp. 39–54.
2. *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard 4th Edition*, United States of America Department of Defense, September 2008.
3. *International Association of Athletics Federations - IAAF*, 2008, Track and Field Facilities Manual 2008.
4. Specht C., Szot T., *Ocena funkcjonalna wybranych ogólnodostępnych odbiorników GPS używanych w sporcie*, Zeszyty Naukowe AMW, rok LIII NR 1 (188) 2012, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni, 2012, str. 131-148.
5. Specht C., *System GPS*, Wydawnictwo Bernardinum, Pelplin, 2007.
6. Majsterkiewicz T., Michałowski M., *Założenia dla projektantów stadionów LA*, Polski Związek Lekkiej Atletyki, Komisja Obiektów i Urządzeń, Warszawa 2012.

THE RESEARCH OF ACCURACY OF THE PERSONAL GPS RECEIVERS IN DYNAMIC MEASUREMENTS

Abstract

Currently GPS constitutes the main source of location in an unprofessional navigation. Similar functionality parameters and relatively low price make selected choice very difficult for average user. The article presents accuracy analyses of receivers which were designated in dynamic measurements. Selected GNSS units were divided into groups: specialized receivers dedicated to track events, GPS dataloggers and bicycle receivers. The tests were realized on the sport stadium of the Gdansk University of Physical Education and Sport which were previously inventoried.

The ellipsoidal coordinates archived in the GNSS receivers were transformed in Gauss-Kruger projection to coordinate system "2000" which is applied in Poland. In the further part there were defined statistics of positioning solution errors which allow receivers qualitative categorization.

Autorzy:

prof. dr hab. inż. Cezary SPECHT – Akademia Morska w Gdyni, c.specht@geodezja.pl
mgr inż. Tomasz SZOT – Akademia Wychowania Fizycznego i Sportu w Gdańsku
Mariusz SPECHT – Politechnika Gdańska