

# Odbiorniki GNSS w praktyce inżynierskiej

## Badania stacjonarne

Arkadiusz Perski\*, Artur Wieczyński\*, Maria Baczyńska\*,  
Konrad Bożek\*\*, Sławomir Kapelko\*\*, Sebastian Pawłowski\*\*

\*Ośrodek Systemów Bezpieczeństwa, \*\*Ośrodek Systemów Mobilnych,  
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Warszawa

**Streszczenie:** W drugim z serii artykułów przedstawiono wyniki badań stacjonarnych dla różnych konfiguracji zestawu 10 odbiorników GNSS zaliczanych do grupy „low-cost”. Na wstępie omówiono definicje podstawowych błędów określających dokładności wskazań odbiorników GNSS oraz zastosowane w badaniach scenariusze pomiarowe. Badania przeprowadzono na trzech stanowiskach pomiarowych, dobierając je w taki sposób, aby możliwe było sprawdzenie poprawności pracy odbiorników, zarówno dla bardzo korzystnych jak i bardzo niekorzystnych warunków odbioru sygnałów GNSS. Wyniki badań przedstawiają silną korelację warunków środowiskowych z błędami wyznaczania pozycji. W badaniu przeanalizowano wpływ różnych konfiguracji odbiorników na dokładność oraz precyzję pomiarów.

**Słowa kluczowe:** GPS, GLONASS, EGNOS, nawigacja, błędy pomiarowe, CEP, DRMS, 2DRMS, ENU

Ustalona lokalizacja anteny odbiornika pozwala wyeliminować szybkozmienny, losowy czynnik wynikający z warunków odbioru sygnałów GNSS, a szczególnie losowe zakłócenia mające swoje źródło w odbiciach i ugięciach fal radiowych. Zakłócenia tego rodzaju powstają głównie na skutek:

- dynamicznych zmian otoczenia (np. ruch pojazdów, poruszanie się drzew na wietrze), zwłaszcza powierzchni odbijających lub tłumiących fale radiowe (np. metalowych obiektów) w najbliższym sąsiedztwie anteny,
- powolnej zmiany układu satelitów (a dokładniej geometrii konstelacji obserwowanej z Ziemi) wynikającej z ich kołowego ruchu po orbitach, przez co fale radiowe w różnych porach dnia docierają pod różnymi kątami do anteny odbiornika.

Przedstawione fakty sprawiają, że badania stacjonarne (statyczne) są najdokładniejszą i najpopularniejszą formą oceny jakości odbiorników GNSS wykorzystywanych w typowych dla nich aplikacjach. Do pozostałych zalet badań stacjonarnych w kontekście GNSS można zaliczyć:

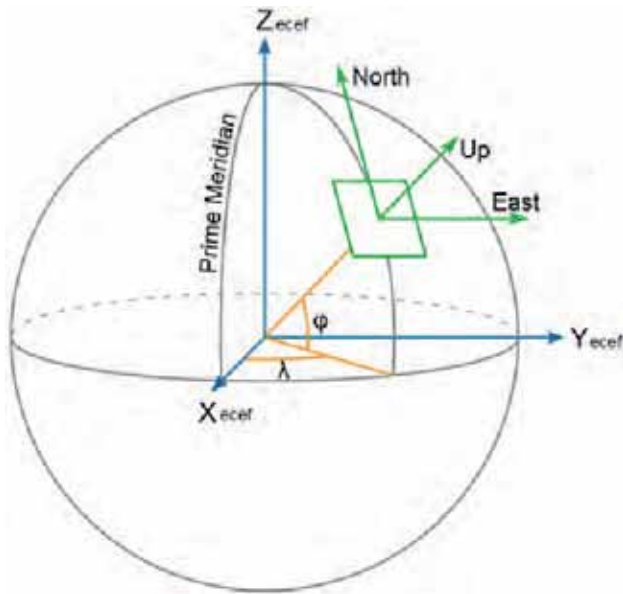
- powtarzalność warunków otoczenia w trakcie pomiarów, rozpatrywana zarówno w okresie krótkoterminowym (badanie powtórzone następnego dnia), jak i długoterminowym (badanie powtórzone w innej porze roku),
- możliwość precyzyjnego wyznaczenia pozycji anteny będącej pozycją referencyjną w obliczeniach, również przez użycie alternatywnych metod jak geodezja, czy metody różnicowe GNSS.

W artykule zostaną zaprezentowane wyniki badań stacjonarnych dla 10 odbiorników GNSS, pochodzących od pięciu producentów dla trzech skrajnie różnych scenariuszy pomiarowych przeprowadzonych w warunkach stacjonarnych.

### 1. Konwersja globalnego układu współrzędnych do płaskiego układu lokalnego

Podstawowym układem współrzędnych, względem którego odbiorniki GNSS podają obliczone pozycje jest układ WGS84. Jest to układ globalny, dla którego położenie punktów określa się względem zdefiniowanej elipsoidy odniesienia podając szerokość (oznaczaną symbolem  $B$  lub  $\varphi$ ) i długość geograficzną ( $L$  lub  $\lambda$ ) a także tzw. wysokość elipsoidalną  $h$  (czyli odległość od elipsoidy odniesienia). Alternatywnie, można podawać współrzędne punktu przy pomocy równoważnych im odpowiednio zdefiniowanych współrzędnych kartezjańskich  $X$ ,  $Y$  i  $Z$ .

O ile dystans mierzony wzdłuż powierzchni Ziemi równy 1 stopniowi kątowemu szerokości geograficznej zmienia się bardzo nieznacznie niezależnie od miejsca pomiaru, o tyle jego wartość dla długości geograficznej maleje wraz z oddalaniem się od ziemskiego równika. Na równiku dystans ten odpowiada 1/360 obwodu równikowego Ziemi, a więc ponad 111 km. Im dalej na północ lub południe, tym odległość ta maleje, osiągając finalnie na biegunach wartość 0. Na południowym (49,0° N) i północnym (54,5°N) krańcu Polski wynosi ona odpowiednio: 72,95 i 64,57 km – różnica jest więc wyraźnie zauważalna.



**Rys. 1.** Realizacja konwersji układu globalnego do układu lokalnego

**Fig. 1.** Realization of conversion of global coordinate system to local coordinate system

Do analizy wyników badań, jakie przeprowadzone w ramach tego cyklu artykułów, wygodniejszy wydaje się być płaski układ lokalny, do którego należy przeliczyć zebrane w trakcie badań współrzędne globalne, uzyskując współrzędne kartezjańskie określane jako **Easting, Northing i Up (ENU)**.

Współrzędne ENU reprezentują przesunięcia dla każdej zmierzonej pozycji (odpowiednio w trzech kierunkach) względem pewnego punktu, stanowiącego środek układu lokalnego.

Na rys. 1 przedstawiono uproszczoną realizację konwersji układu globalnego BLh do układu lokalnego ENU. Uzyskane z odbiornika GNSS współrzędne geograficzne oraz wysokość elipsoidalną należy w pierwszej kolejności przeliczyć do współrzędnych w układzie Earth-centered Earth-fixed (ECEF). Jest to układ kartezjański, w którym oś X pokrywa się z południkiem zerowym (południkiem Greenwich), oś Z pokrywa się z osią obrotu Ziemi, zaś oś Y to oś prostopadła do osi X i osi Z, tworząca z nimi układ prawoskrętny.

Znając współrzędne punktów w układzie ECEF możliwe jest obliczenie współrzędnych w układzie lokalnym. W tym celu należy skorzystać z poniższego równania [1]:

$$\begin{bmatrix} E_i \\ N_i \\ U_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\sin \phi \cos \lambda & -\sin \phi \sin \lambda & \cos \phi \\ \cos \phi \cos \lambda & \cos \phi \sin \lambda & \sin \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - X_R \\ Y_i - Y_R \\ Z_i - Z_R \end{bmatrix}$$

gdzie:

$E_i, N_i, U_i$  – współrzędne  $i$ -tego punktu w układzie lokalnym,

$X_i, Y_i, Z_i$  – współrzędne  $i$ -tego punktu w układzie ECEF,

$X_R, Y_R, Z_R$  – współrzędne środka układu lokalnego wyrażone w układzie ECEF.

## 2. Popularne definicje błędów określania pozycji przez GNSS

Na potrzeby artykułu zawężono analizę błędów wskazań serii odbiorników do analizy błędów określanych wyłącznie dla płaszczyzny. W literaturze naukowej, jak również w notach katalogowych odbiorników GNSS najczęściej funkcjonują dwa rodzaje błędów określanych dla płaszczyzny:

- błąd **CEP** (*ang. Circular Error Probable*), który mówi o długości promienia okręgu o środku w miejscu posadowienia anteny, w którym znajdzie się 50 % wyznaczonych na płaszczyźnie pozycji,
- błąd **DRMS** (*ang. Distance Root Mean Square*), zdefiniowany jako odchylenie standardowe wartości mierzonych, który mając rozkład zbliżony do rozkładu normalnego określa promień okręgu, wewnątrz którego znajduje się 63–68 % wyznaczonych pozycji.

Czasami w notach katalogowych podawany jest również błąd **2DRMS**, którego wartość określa się mnożąc dwukrotnie wartość błędu DRMS, dzięki czemu można określić promień okręgu, w którym znajdzie się 96–98 % wyznaczonych pozycji.

W przypadku błędów wskazań układów GNSS dla odpowiednio dużej liczby próbek wyznaczone pozycje będą rozrzucone na płaszczyźnie i ograniczone figurą o kształcie zbliżonym do elipsy. Podawane prawdopodobieństwo nie ma zatem jednej określonej wartości, jak to ma miejsce dla zmiennej jednowymiarowej, tylko może się wahać w określonym przedziale, w zależności od stopnia spłaszczenia elipsy. Komplikuje to obliczanie wartości błędu CEP, stosowane są więc dwa podejścia [2], przy czym każde z nich rozróżnia dwa warianty, w zależności od wartości współczynnika  $w$ :

$$w = \frac{\sigma_s}{\sigma_L}$$

gdzie  $\sigma_s$  oraz  $\sigma_L$  odnoszą się odpowiednio do mniejszej i większej wartości z odchyłeń standardowych dla współrzędnych Easting i Northing.

Odchylenie standardowe dla każdej ze współrzędnych ENU obliczane jest ze wzoru:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

gdzie:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$n$  – liczba zmierzonych pozycji dla danej serii pomiarowej,

$x_i$  – współrzędna  $i$ -tej pozycji w danym kierunku przeliczona do układu lokalnego.

Rozpatrzmy dwa przypadki:

1. mniej dokładny, w którym szacuje się, że obliczony błąd będzie mniejszy niż 3 %

$$CEP = 0,5887 \cdot (\sigma_s + \sigma_L) \quad \text{dla } 0,154 \leq \omega \leq 1,0$$

$$CEP = 0,6745 \cdot \sigma_L \quad \text{dla } 0 \leq \omega < 0,154$$

2. bardziej dokładne:

- z błędem mniejszym niż 0,26 %  
dla  $0,3 \leq \omega \leq 1,0$ :

$$CEP = 0,6152 \cdot \sigma_s + 0,5620 \cdot \sigma_L$$

- z błędem mniejszym niż 0,49 %  
dla  $0 \leq \omega < 0,3$ :

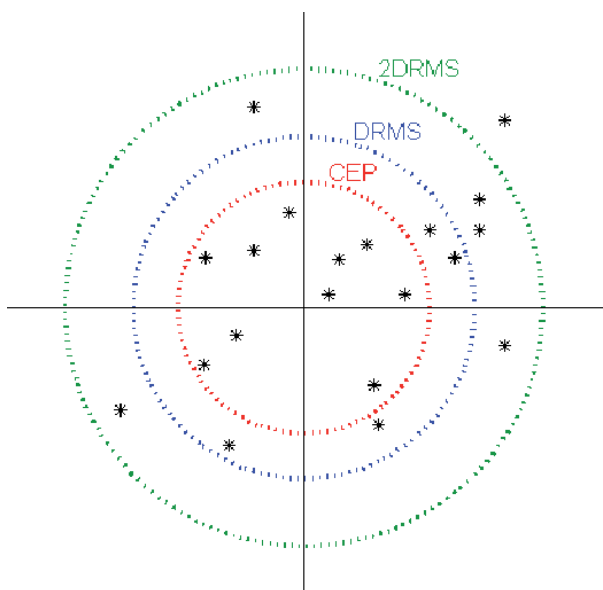
$$CEP = (0,82 \cdot \omega - 0,007) \cdot \sigma_s + 0,6745 \cdot \sigma_L$$

Błąd *DRMS* wyznacza się ze wzoru:

$$DRMS = \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2}$$

Stąd też błąd *2DRMS* to:

$$2DRMS = 2 \cdot DRMS = 2 \cdot \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2}$$



**Rys. 2.** Graficzne interpretacje różnych definicji błędów GNSS  
**Fig. 2.** Graphical interpretation of differences in GNSS error definitions

Dobrym przykładem, pozwalającym projektantowi aplikacji wyobrazić sobie, na ile dobry dla danego zastosowania będzie odbiornik GNSS (rys. 2). Przedstawiono na nim 20 zarejestrowanych pozycji GNSS na płaszczyźnie. Okręgi o różnych kolorach reprezentują graficznie wartości błędów CEP, DRMS, 2DRMS. Niniejszy przykład pokazuje jak interpretować trzy różne definicje błędów dla tego samego odbiornika.

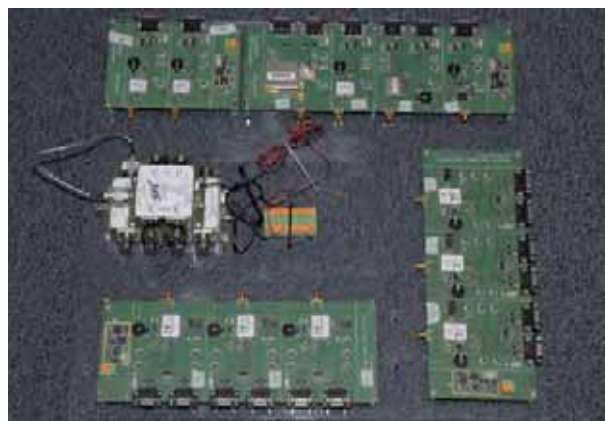
Na 20 zmierzonych pozycji:

- okrąg o promieniu równym CEP (kolor czerwony) będzie obejmował 10 punktów,
- okrąg o promieniu równym DRMS (kolor niebieski) będzie obejmował 14 punktów,
- okrąg o promieniu równym 2DRMS (kolor zielony) obejmie aż 19 punktów.

Jak widać, najbardziej czytelna w kontekście jakości odbiornika wydaje się być znajomość wartości błędu 2DRMS dla jego wskazań. Niestety, jej duża wartość może odstraszać potencjalnego konsumenta, stąd też producenci często posługują się miarami komercyjnie „bardziej przyjaznymi”, np. wartościami błędu CEP.

### 3. Opis platformy badawczej

Do wykonania serii badań wykorzystano specjalnie przygotowane stanowisko testowe składające się z wykonanych w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP płyt ewaluacyjnych z odbiornikami GNSS pochodzącymi od kilku producentów.



**Rys. 3.** Platforma badawcza wykorzystanej do realizacji testów stacjonarnych

**Fig. 3.** The measuring platform used during stationary tests

Zastosowano odbiorniki typu OEM (w formie układów scalonych przygotowanych do wlutowania we własne aplikacje), toteż wymagane było zaprojektowanie i wykonanie płyt ewaluacyjnych PCB wraz z niezbędnymi układami towarzyszącymi, jak układ zasilania, konwertery poziomów napięć itp.

Specyfika badań porównawczych odbiorników GNSS wymaga zapewnienia im dokładnie takich samych warunków odbioru sygnałów GNSS w czasie przeprowadzania pomiarów. Warunek ten istotnie wpływa na jakość uzyskiwanych rezultatów pomiarów, pozwalając na wykluczenie błędów przypadkowych obserwowanych w czasie różnych sesji pomiarowych. Można w tym celu powtarzać pomiary w ściśle zdefiniowanych odcinkach czasu harmonogramem (aby wykonać pomiary przy takiej samej konstelacji satelitów GNSS), nie da się jednak wtedy uniknąć błędów wynikających np. z przypadkowych zmian czasu propagacji sygnału w atmosferze.

W tym celu wykorzystano dwa profesjonalne, aktywne splitterzy antenowe firmy GPS Source podłączone do precyzyjnej wielopasmowej anteny pomiarowej Novatel GPS-702-GGL. Sygnały po rozdzieleniu w splitterach trafiały do wejść antenowych odbiorników z błędem różnic w fazie sygnału dla każdego z wejść mniejszym niż 3°. Uzyskano w ten sposób porównywalne warunki pomiarowe dla każdego z badanych odbiorników.

## 4. Scenariusze pomiarowe

Badania przeprowadzono dla trzech scenariuszy pomiarowych reprezentujących najbardziej typowe sytuacje pracy odbiorników GNSS:

- Scenariusz I – doskonała widoczność nieboskłonu, bez istotnych przeszkód usytuowanych nisko nad horyzontem. Sytuacja taka ma np. miejsce, gdy antena odbiornika znajduje się na dachu samochodu poruszającego się w nizinnym, otwartym terenie pozbawionym wysokiej roślinności.
- Scenariusz II – zapewniona widoczność około połowy nieboskłonu; spotykana, gdy antena odbiornika znajduje się bardzo blisko dużej przeszkody, np. na dachu samochodu zaparkowanego pod wysokim blokiem mieszkalnym.
- Scenariusz III – nieboskłon widoczny jest tylko w niewielkim procencie, gdzie występuje efekt określany z ang. jako tzw. *urban canyon*. Jest to najtrudniejsza sytuacja odbioru sygnałów GNSS, spotykana często w centrach wielkich miast, szczególnie w otoczeniu licznych wysokościowców, ale również w sytuacji, gdy np. samochód porusza się wąskimi uliczkami pośród starych kamienic miast z historyczną zabudową.

Na rys. 4 przedstawiono lokalizację stanowisk pomiarowych znajdujących się na terenie Przemysłowe-

go Instytutu Automatyki i Pomiarów PIAP w Warszawie (52°11' N, 20°55' E), które zostały wybrane w taki sposób, aby jak najlepiej dopasować ich charakterystykę do założonych scenariuszy pomiarowych.

### Scenariusz I – warunki szczególnie korzystne:

Miejsce na specjalnej platformie przygotowanej do badań GNSS umiejscowionej na najwyższym poziomie dachu (4. kondygnacja powyżej poziomu terenu), dobra widoczność nieboskłonu we wszystkich kierunkach dla wszystkich wysokości topocentrycznych.

### Scenariusz II – warunki średnio trudne:

Antena posadowiona na niższym poziomie dachu (3. kondygnacja). Otwarte niebo tylko w zakresie 220–310° w płaszczyźnie poziomej (kierunek pomiędzy SW–NW). W pozostałych kierunkach w odległości około 1 m znajdują się ściany budynku o wysokości ok. 2,5 m.

### Scenariusz III – warunki skrajnie trudne:

Antena posadowiona na dachu parterowego łącznika budynków PIAP. Od strony SW w odległości ok. 1,5 m ściana budynku o wysokości trzech kondygnacji, od strony NE ściana budynku w odległości ok. 2 m o wysokości 1,5 kondygnacji. Widoczność nieba w bardzo wąskim zakresie w kierunku NW–SE.

Dla każdego ze scenariuszy wybrano okres pomiarowy równy dobie gwiazdowej (84 164 s), dzięki czemu każdy z badanych układów mógł doświadczyć zakłóceń związanych z odbiciami i ugięciami sygnałów GNSS w czasie pełnego, pojedynczego przejścia („obrotu”) wszystkich satelitów GNSS obserwowanych w danej lokalizacji.

Sesje pomiarowe następowały jedna po drugiej, z krótkim okresem przerwy wymaganej do zmiany położenia anteny. Badania przeprowadzono przy prawie identycznej, stabilnej pogodzie w dniach 3–5 grudnia 2012 r., co powinno do minimum ograniczyć fluktuację wpływu atmosfery na wyniki obliczeń pozycji dla każdego ze scenariuszy.

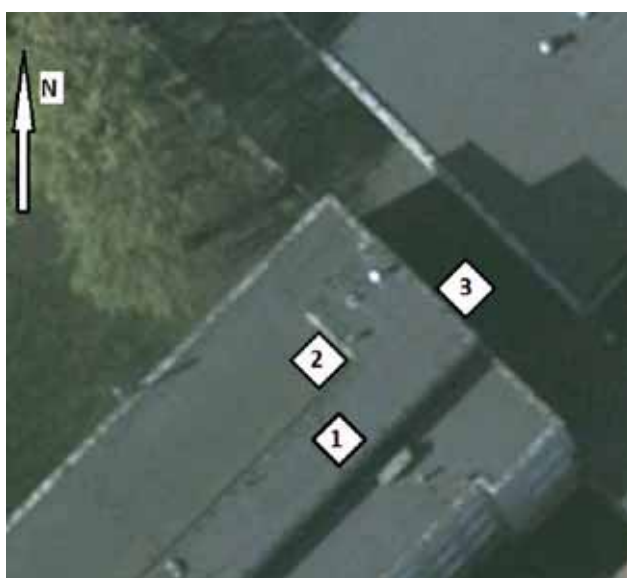
## 5. Testowane odbiorniki

Test przeprowadzono z użyciem 10 sztuk tanich, jednoczesotliwościowych odbiorników GNSS przeznaczonych na rynek masowy. Odbiorniki od danego producenta pochodziły z jednej serii produkcyjnej. W ilościach detalicznych są one dostępne w cenie do 30–40 EUR za sztukę.

W celu zaprezentowania postępu w dziedzinie rozwoju układów GNSS, w teście wzięły udział odbiorniki najnowszej generacji oraz nieco starsze, wyprodukowane w latach 2008–2009.

### 5.1. Zestawienie badanych układów

Do testu wykorzystano odbiorniki GNSS będące układami scalonymi lub zintegrowanymi modułami PCB z przeznaczeniem do integracji z pozostałą elektroniką.



Rys. 4. Lokalizacje anteny GNSS dla trzech scenariuszy pomiarowych

Fig. 4. GNSS antenna positions for three measuring scenarios

**Tab. 1.** Tabela z zestawieniem użytych do testów układów GNSS wraz z ich konfiguracjami**Tab. 1.** Table showing list of tested GNSS receivers with their configuration

| L.p. | Producent            | Model       | Firmware                           | GPS | GLONASS | EGNOS |
|------|----------------------|-------------|------------------------------------|-----|---------|-------|
| 1    | uBlox <sup>A</sup>   | LEA-6N      | V1,00 for GNSS                     | T   | N       | N     |
| 2    | uBlox <sup>A</sup>   | LEA-6N      | V1,00 for GNSS                     | T   | N       | T     |
| 3    | Garmin <sup>B</sup>  | GPS 15 xL-F | 3,8                                | T   | N       | N     |
| 4    | uBlox <sup>A</sup>   | LEA-6N      | V1,00 for GNSS                     | N   | T       | N     |
| 5    | ORCAM <sup>B</sup>   | GPS36FB     | GSW3,2,5_3,3,01.,06-SDK-3EP3,00    | T   | N       | N     |
| 6    | SkyTraq <sup>B</sup> | Venus634LPx | K: 1,4,8; V: 1.8.22, R: 2008.10.23 | T   | N       | N     |
| 7    | NVS <sup>A</sup>     | NV08C-CSM   | 0205                               | T   | N       | N     |
| 8    | NVS <sup>A</sup>     | NV08C-CSM   | 0205                               | N   | T       | N     |
| 9    | NVS <sup>A</sup>     | NV08C-CSM   | 0205                               | T   | T       | N     |
| 10   | NVS <sup>A</sup>     | NV08C-CSM   | 0205                               | T   | N       | T     |

**Tab. 2.** Tabela z deklarowanymi przez producentów dokładnościami odbiorników GNSS**Tab. 2.** Table showing manufacturers declared accuracy of all tested GNSS receivers

| L.p. | Producent | Model       | CEP [m] | DRMS [m] | 2DRMS [m] | GPS | GLONASS | EGNOS |
|------|-----------|-------------|---------|----------|-----------|-----|---------|-------|
| 1    | uBlox     | LEA-6N      | 2,5     | x        | x         | T   | N       | N     |
| 2    | uBlox     | LEA-6N      | 2,0     | x        | x         | T   | N       | T     |
| 3    | Garmin    | GPS 15 xL-F | x       | x        | 15,0      | T   | N       | N     |
| 4    | uBlox     | LEA-6N      | 4,0     | x        | x         | N   | T       | N     |
| 5    | ORCAM     | GPS36FB     | 2,5     | x        | x         | T   | N       | N     |
| 6    | SkyTraq   | Venus634LPx | 2,5     | x        | x         | T   | N       | N     |
| 7    | NVS       | NV08C-CSM   | x       | 1,5      | x         | T   | N       | N     |
| 8    | NVS       | NV08C-CSM   | x       | 1,5      | x         | N   | T       | N     |
| 9    | NVS       | NV08C-CSM   | ?       | ?        | ?         | T   | T       | N     |
| 10   | NVS       | NV08C-CSM   | x       | 1,0      | X         | T   | N       | T     |

**Tab. 3.** Wyniki badań dla scenariusza I**Tab. 3.** Results for the scenario I

| SCENARIUSZ I – idealne warunki odbioru sygnałów GNSS |                         |           |                                                                               |                   |                |                        |                                       |              |        |                 |           |         |         |                                |              |        |
|------------------------------------------------------|-------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------|------------------------|---------------------------------------|--------------|--------|-----------------|-----------|---------|---------|--------------------------------|--------------|--------|
| Numer odbiornika GNSS                                | Rozwiązania nawigacyjne |           | Satelity, z których sygnały zostały wykorzystane do rozwiązania nawigacyjnego |                   |                |                        | Odchylenie standardowe błędu ENU dla: |              |        | Obliczone błędy |           |         |         | Maksymalny rozrzut w kierunku: |              |        |
|                                                      | W ogóle obliczone [%]   | Ważne [%] | Liczba minimalna                                                              | Liczba maksymalna | Liczba średnia | Odchylenie standardowe | Easting [m]                           | Northing [m] | Up [m] | DRMS [m]        | 2DRMS [m] | CEP [m] | SEP [m] | Easting [m]                    | Northing [m] | Up [m] |
| a                                                    | b                       | c         | d                                                                             | e                 | f              | g                      | h                                     | i            | j      | k               | l         | m       | n       | o                              | p            | q      |
| 1                                                    | 100,00 %                | 100,00 %  | 7                                                                             | 12                | 10,1           | 1,2                    | 0,71                                  | 0,78         | 1,39   | 1,06            | 2,11      | 0,88    | 1,48    | 1,78                           | 2,96         | 4,10   |
| 2                                                    | 100,00 %                | 100,00 %  | 7                                                                             | 12                | 10,0           | 1,2                    | 0,31                                  | 0,46         | 0,74   | 0,56            | 1,11      | 0,45    | 0,78    | 1,33                           | 1,75         | 2,54   |
| 3                                                    | 100,00 %                | 100,00 %  | 7                                                                             | 12                | 10,0           | 1,0                    | 1,31                                  | 1,27         | 3,52   | 1,83            | 3,66      | 1,52    | 3,15    | 4,21                           | 4,33         | 10,68  |
| 4                                                    | 100,00 %                | 100,00 %  | 6                                                                             | 10                | 8,3            | 0,8                    | 7,67                                  | 7,52         | 16,41  | 10,75           | 21,49     | 8,94    | 16,22   | 17,62                          | 19,11        | 53,51  |
| 5                                                    | 100,00 %                | 100,00 %  | 7                                                                             | 12                | 10,0           | 1,1                    | 0,96                                  | 1,23         | 2,44   | 1,56            | 3,11      | 1,28    | 2,38    | 3,20                           | 4,30         | 6,88   |
| 6                                                    | 100,00 %                | 100,00 %  | 7                                                                             | 12                | 10,0           | 1,1                    | 0,96                                  | 1,17         | 1,86   | 1,52            | 3,03      | 1,25    | 2,05    | 3,54                           | 4,79         | 5,79   |
| 7                                                    | 100,00 %                | 100,00 %  | 8                                                                             | 13                | 10,3           | 1,3                    | 0,66                                  | 0,66         | 1,29   | 0,93            | 1,86      | 0,77    | 1,34    | 1,51                           | 2,09         | 3,06   |
| 8                                                    | 100,00 %                | 100,00 %  | 4                                                                             | 10                | 7,1            | 1,1                    | 4,02                                  | 4,99         | 7,92   | 6,41            | 12,81     | 5,28    | 8,71    | 6,73                           | 23,25        | 26,30  |
| 9                                                    | 100,00 %                | 100,00 %  | 14                                                                            | 22                | 17,7           | 1,6                    | 0,88                                  | 0,79         | 1,22   | 1,18            | 2,36      | 0,98    | 1,49    | 1,77                           | 2,02         | 2,32   |
| 10                                                   | 100,00 %                | 100,00 %  | 8                                                                             | 13                | 10,3           | 1,2                    | 0,63                                  | 0,65         | 1,24   | 0,91            | 1,81      | 0,75    | 1,29    | 1,41                           | 1,91         | 2,68   |

- Układy pochodziły od następujących producentów:
- u-Blox <http://www.u-blox.com>,
  - Garmin <http://www.garmin.com>,
  - Orcam <http://www.orcam-gps.com>,
  - SkyTraq <http://www.skytraq.com.tw>,
  - NVS Tech. AG <http://www.nvs-gnss.com>.

Układy oznaczone indeksem A (tab. 1) to układy opracowane niedawno, natomiast układy oznaczone indeksem B zostały opracowane kilka lat temu.

## 5.2. Deklarowane dokładności odbiorników

W tab. 2 zestawiono deklarowane przez producentów w notach katalogowych dokładności odbiorników GNSS, opisanych przy pomocy różnych definicji błędów. Podane wartości wskazane są zgodnie z użytymi w trakcie testu konfiguracjami układów ( użytymi konstelacjami GNSS).

Nota katalogowa dla układu nr 9 nie definiowała dokładności w konfiguracji GPS+GLONASS.

## 6. Wyniki badań

Zebrane wyniki pomiarów zostały zaprezentowane w formie tabelarycznej (tab. 3–5) oraz w postaci wykresów.

Wszystkie odbiorniki zostały wstępnie skonfigurowane do wysyłania pełnego zestawu informacji nawigacyjnych, tj. m.in. czasu oraz pozycji geograficznej z częstotliwością co jedną sekundę. Należało zatem oczekiwać 86 164 zestawów danych (zestawów komunikatów NMEA).

Niestety, na skutek deficytu sygnałów GNSS dla danej lokalizacji anteny w określonych chwilach czasowych dla scenariusza II oraz scenariusza III, niektóre z odbiorników wysyłały komunikaty NMEA z pustymi polami. Ich udział procentowy w stosunku do liczby oczekiwanych komunikatów (86 164) zawiera kolumna „b”.

Dodatkowo, pomimo że niektóre zestawy komunikatów NMEA zawierały pełny komplet danych, to odpowiednie pole w danym komunikacie (np. pole „Fix Quality” w komunikacie \$GxGGA) informowało, że wskazywane dane

Tab. 4. Wyniki badań dla scenariusza II

Tab. 4. Results for scenario II

| SCENARIUSZ II – średnio trudne warunki odbioru sygnałów GNSS |                         |           |                                                                               |                   |                |                        |                                       |              |        |                 |           |         |         |                                |              |        |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------|------------------------|---------------------------------------|--------------|--------|-----------------|-----------|---------|---------|--------------------------------|--------------|--------|
| Numer odbiornika GNSS                                        | Rozwiązania nawigacyjne |           | Satelity, z których sygnały zostały wykorzystane do rozwiązania nawigacyjnego |                   |                |                        | Odchylenie standardowe błędu ENU dla: |              |        | Obliczone błędy |           |         |         | Maksymalny rozrzut w kierunku: |              |        |
|                                                              | W ogóle obliczone [%]   | Ważne [%] | Liczba minimalna                                                              | Liczba maksymalna | Liczba średnia | Odchylenie standardowe | Easting [m]                           | Northing [m] | Up [m] | DRMS [m]        | 2DRMS [m] | CEP [m] | SEP [m] | Easting [m]                    | Northing [m] | Up [m] |
| a                                                            | b                       | c         | d                                                                             | e                 | f              | g                      | h                                     | i            | j      | k               | l         | m       | n       | o                              | p            | q      |
| 1                                                            | 100,00 %                | 100,00 %  | 5                                                                             | 12                | 8,5            | 1,2                    | 1,18                                  | 1,36         | 2,75   | 1,80            | 3,60      | 1,49    | 2,72    | 5,35                           | 5,61         | 11,22  |
| 2                                                            | 100,00 %                | 100,00 %  | 5                                                                             | 12                | 8,5            | 1,2                    | 0,91                                  | 1,23         | 2,20   | 1,53            | 3,06      | 1,25    | 2,24    | 5,56                           | 11,02        | 17,33  |
| 3                                                            | 100,00 %                | 100,00 %  | 5                                                                             | 11                | 8,0            | 1,0                    | 3,58                                  | 4,01         | 7,42   | 5,38            | 10,76     | 4,46    | 7,71    | 11,76                          | 20,83        | 35,93  |
| 4                                                            | 100,00 %                | 100,00 %  | 3                                                                             | 10                | 7,0            | 1,2                    | 11,03                                 | 13,49        | 28,33  | 17,43           | 34,85     | 14,37   | 27,19   | 44,97                          | 37,19        | 117,32 |
| 5                                                            | 100,00 %                | 100,00 %  | 4                                                                             | 12                | 8,0            | 1,2                    | 2,03                                  | 3,20         | 4,63   | 3,79            | 7,57      | 3,04    | 5,10    | 13,32                          | 12,50        | 21,63  |
| 6                                                            | 100,00 %                | 100,00 %  | 6                                                                             | 12                | 9,3            | 1,1                    | 1,17                                  | 1,13         | 2,61   | 1,63            | 3,25      | 1,35    | 2,52    | 5,26                           | 4,03         | 7,85   |
| 7                                                            | 100,00 %                | 97,47 %   | 5                                                                             | 12                | 8,8            | 1,2                    | 0,71                                  | 1,08         | 2,06   | 1,30            | 2,59      | 1,05    | 2,0     | 8,74                           | 5,46         | 16,37  |
| 8                                                            | 100,00 %                | 99,97 %   | 4                                                                             | 10                | 6,7            | 1,0                    | 3,95                                  | 5,09         | 10,74  | 6,44            | 12,89     | 5,29    | 10,19   | 8,43                           | 31,31        | 58,87  |
| 9                                                            | 100,00 %                | 100,00 %  | 11                                                                            | 22                | 15,6           | 1,6                    | 0,57                                  | 0,88         | 1,65   | 1,05            | 2,09      | 0,84    | 1,60    | 1,87                           | 2,57         | 4,41   |
| 10                                                           | 100,00 %                | 99,93 %   | 5                                                                             | 12                | 8,9            | 1,2                    | 0,63                                  | 1,04         | 2,09   | 1,22            | 2,43      | 0,97    | 1,96    | 2,18                           | 5,29         | 8,87   |

są albo nieważne, albo obliczone na podstawie przyjętych pewnych założeń pozwalających na wyznaczenie pozycji pomimo braku wystarczającej ilości niezależnych danych GNSS (tzw. tryb *dead reckoning*). Zostały one odrzucone w dalszych analizach. Udział procentowy komunikatów oznaczonych jako „nieważne” w stosunku do wszystkich komunikatów oczekiwanych w czasie trwania pomiaru zawiera kolumna „c”.

W tab. 3–5 zawarto syntetyczne wyniki przeprowadzonych badań. Dobrym rozwiązaniem, dającym pogląd nt. precyzji odbiorników, jest jednak przyjrzenie się, w jaki sposób obliczane pozycje układały się na płaszczyźnie w czasie całego cyklu pomiarowego. Są to wykresy określane w języku angielskim jako *scatter plot*, w których środek układu współrzędnych na każdym wykresie reprezentuje punkt referencyjny przy konwersji współrzędnych ECEF na współrzędne ENU.

Zestaw 30 wykresów, po jednym dla każdego z 10 odbiorników pracujących wg trzech scenariuszy został zaprezentowany w kolejnych podpunktach.

Warto zwrócić uwagę na zmianę skali wykresów wraz ze zmianą scenariusza. Długość boku siatki wynosi odpowiednio: 5 m, 10 m i 20 m.

Przeprowadzone badania stacjonarne dla trzech scenariuszy pomiarowych pozwalają ocenić jakość pracy odbiorników GNSS. Zaprezentowane wyniki badań potwierdzają silną zależność między warunkami pracy odbiornika GNSS a jego wskazaniami. Trudniejsze warunki pracy związane z blokowaniem odbioru i innymi zakłóceniami sygnału GNSS wpływają na znaczne pogorszenie dokładności wskazań odbiorników. W skrajnych sytuacjach wskazania odbiorników były wielokrotnie mniej dokładne od deklarowanych przez ich producenta wartości.

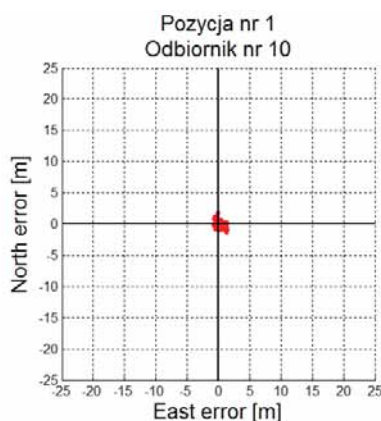
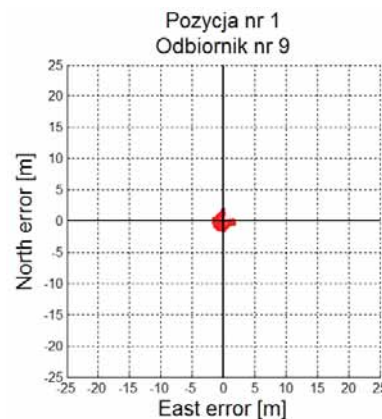
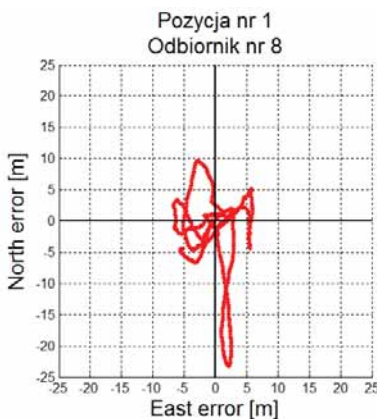
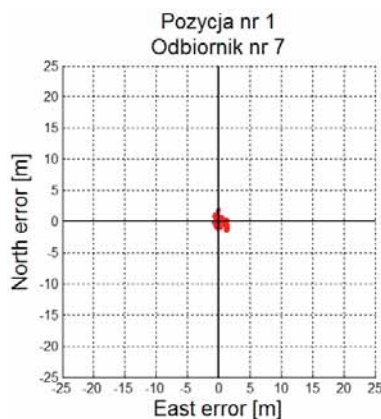
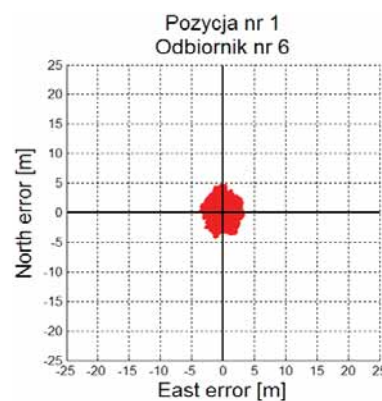
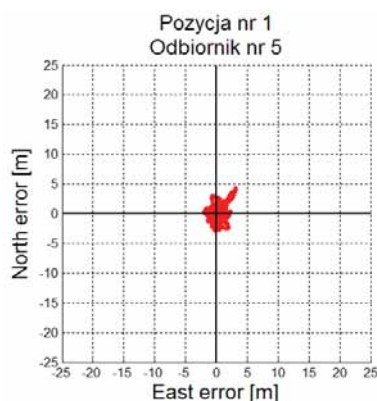
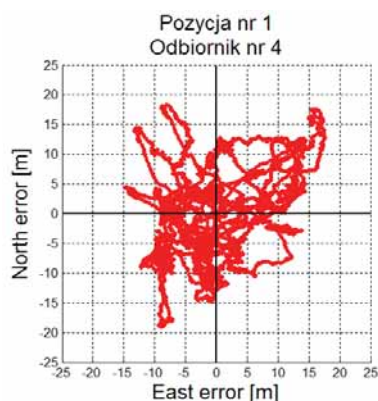
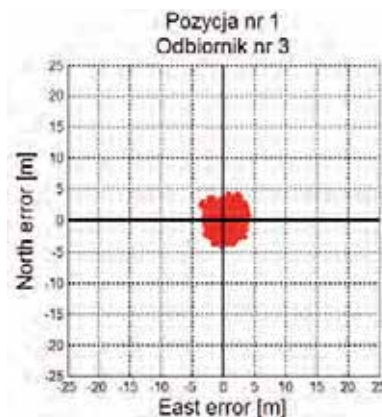
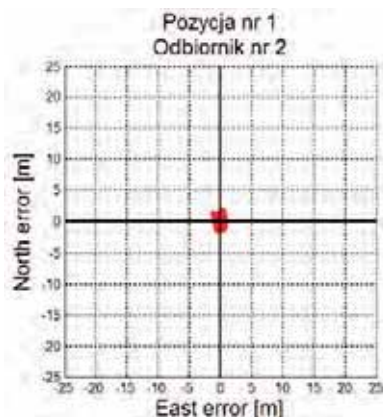
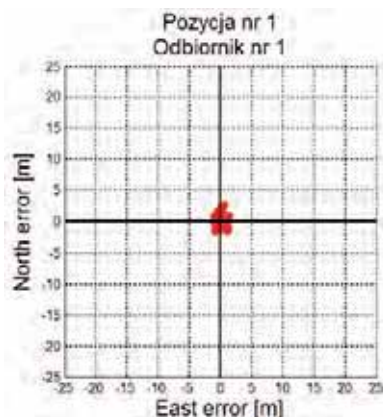
Testy przeprowadzone dla scenariusza III wskazują wyraźną przewagę układu wielosystemowego nad układami jednosystemowymi. Odbiornik nr 9 jako jedyny w teście pracujący w tym samym czasie zarówno z sygnałami GPS jak i GLONASS najlepiej poradził sobie w najtrudniejszych warunkach odbioru sygnałów GNSS. Jednocześnie wcale nie był lepszy od odbiornika jednosystemowego ze wsparciem SBAS, jeśli warunki odbioru były dobre.

Tab. 5. Wyniki badań dla scenariusza III

Tab. 5. Results for scenario III

| SCENARIUSZ III – skrajnie trudne warunki odbioru sygnałów GNSS |                         |           |                                                                               |                   |                |                        |                                        |              |        |                 |           |         |         |                                |              |        |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------|------------------------|----------------------------------------|--------------|--------|-----------------|-----------|---------|---------|--------------------------------|--------------|--------|
| Numer odbiornika GNSS                                          | Rozwiązania nawigacyjne |           | Satelity, z których sygnały zostały wykorzystane do rozwiązania nawigacyjnego |                   |                |                        | Odchylenie standardowe błędów ENU dla: |              |        | Obliczone błędy |           |         |         | Maksymalny rozrzut w kierunku: |              |        |
|                                                                | W ogóle obliczone [%]   | Ważne [%] | Liczba minimalna                                                              | Liczba maksymalna | Liczba średnia | Odchylenie standardowe | Easting [m]                            | Northing [m] | Up [m] | DRMS [m]        | 2DRMS [m] | CEP [m] | SEP [m] | Easting [m]                    | Northing [m] | Up [m] |
| a                                                              | b                       | c         | d                                                                             | e                 | f              | g                      | h                                      | i            | j      | k               | l         | m       | n       | o                              | p            | q      |
| 1                                                              | 100,00 %                | 100,00 %  | 4                                                                             | 12                | 8,4            | 1,4                    | 1,71                                   | 4,55         | 5,52   | 4,86            | 9,73      | 3,61    | 6,25    | 10,98                          | 30,91        | 37,73  |
| 2                                                              | 100,00 %                | 100,00 %  | 4                                                                             | 12                | 8,4            | 1,4                    | 1,71                                   | 4,52         | 5,49   | 4,84            | 9,67      | 3,59    | 6,21    | 10,62                          | 26,78        | 38,83  |
| 3                                                              | 100,00 %                | 100,00 %  | 4                                                                             | 12                | 7,8            | 1,0                    | 3,26                                   | 6,98         | 7,81   | 7,71            | 15,41     | 5,93    | 9,44    | 15,86                          | 37,10        | 42,55  |
| 4                                                              | 99,99%                  | 99,99%    | 3                                                                             | 10                | 7,1            | 0,9                    | 12,74                                  | 12,13        | 24,01  | 17,59           | 35,18     | 14,62   | 25,09   | 54,55                          | 44,41        | 105,67 |
| 5                                                              | 100,00 %                | 100,00 %  | 3                                                                             | 12                | 7,3            | 1,4                    | 2,20                                   | 5,74         | 6,69   | 6,14            | 12,29     | 4,58    | 7,74    | 14,32                          | 50,63        | 54,99  |
| 6                                                              | 100,00 %                | 100,00 %  | 5                                                                             | 12                | 9,0            | 1,1                    | 1,01                                   | 3,28         | 3,81   | 3,43            | 6,87      | 2,47    | 4,34    | 4,07                           | 8,53         | 14,15  |
| 7                                                              | 100,00 %                | 100,00 %  | 4                                                                             | 12                | 8,4            | 1,3                    | 1,23                                   | 3,97         | 3,87   | 4,15            | 8,30      | 2,99    | 4,84    | 8,28                           | 23,62        | 17,15  |
| 8                                                              | 100,00 %                | 99,21 %   | 3                                                                             | 9                 | 6,5            | 1,0                    | 8,70                                   | 6,65         | 10,14  | 10,95           | 21,89     | 8,98    | 13,13   | 79,51                          | 55,42        | 88,74  |
| 9                                                              | 100,00 %                | 100,00 %  | 9                                                                             | 21                | 15,0           | 1,8                    | 0,68                                   | 2,72         | 2,08   | 2,81            | 5,61      | 1,97    | 2,93    | 4,39                           | 7,21         | 5,74   |
| 10                                                             | 100,00 %                | 100,00 %  | 4                                                                             | 12                | 8,4            | 1,3                    | 1,21                                   | 3,88         | 3,80   | 4,06            | 8,12      | 2,92    | 4,74    | 7,05                           | 15,11        | 15,99  |

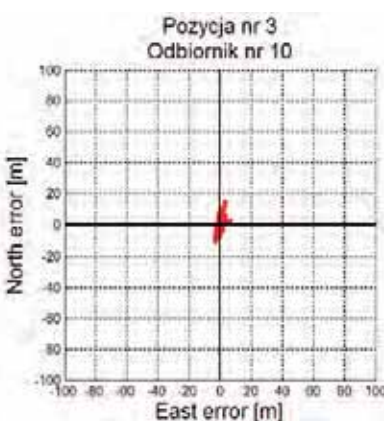
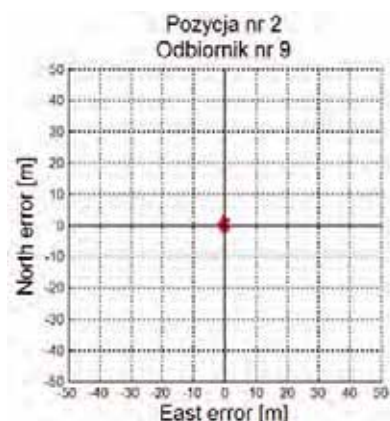
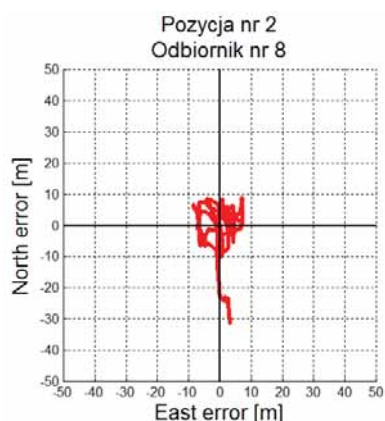
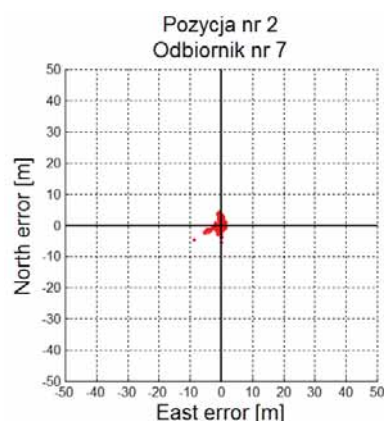
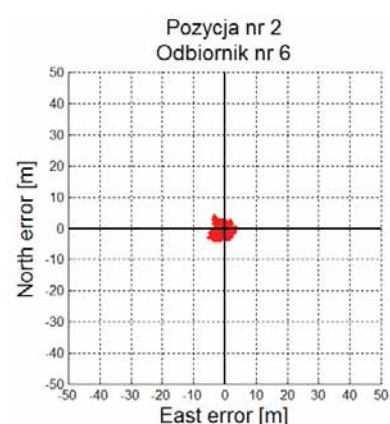
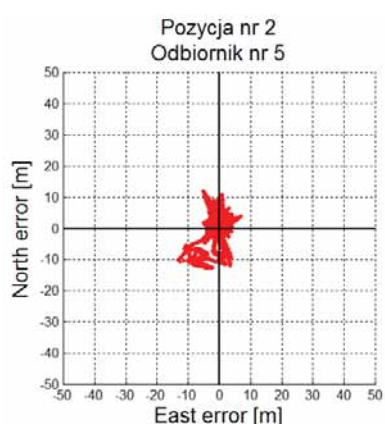
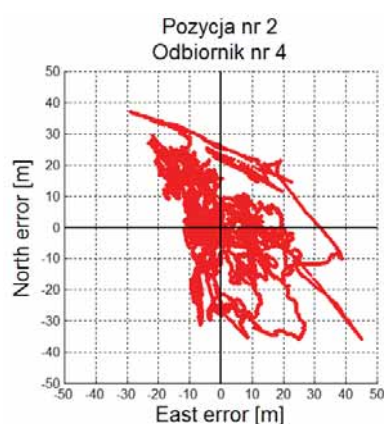
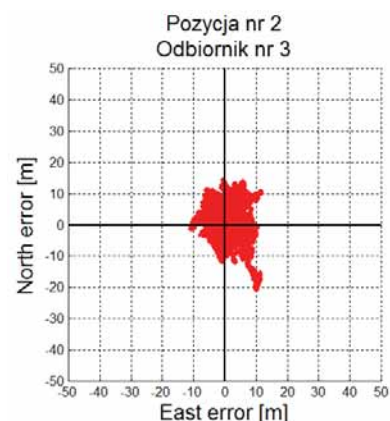
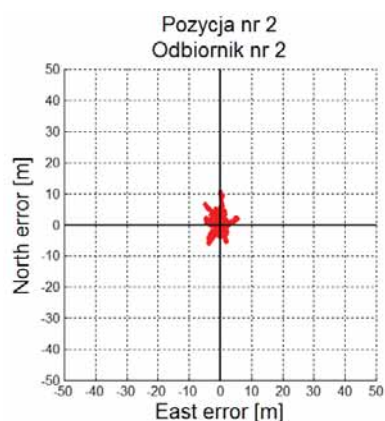
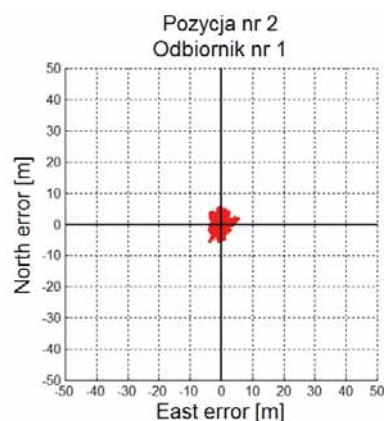
## 6.1. Wykresy dla scenariusza I



### Scenariusz I - warunki szczególnie korzystne dla odbioru sygnałów GNSS

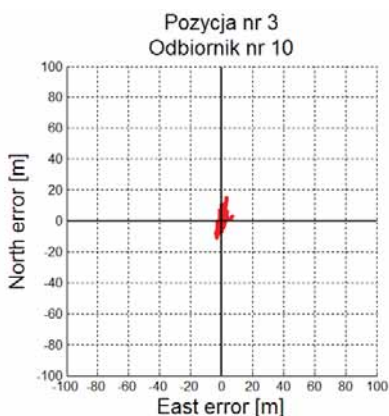
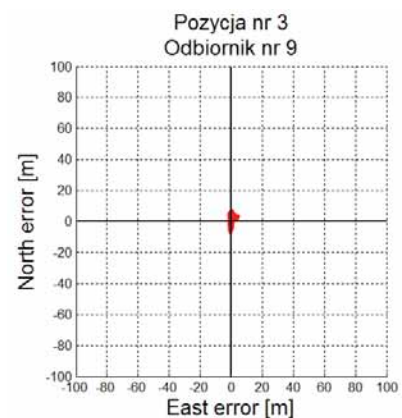
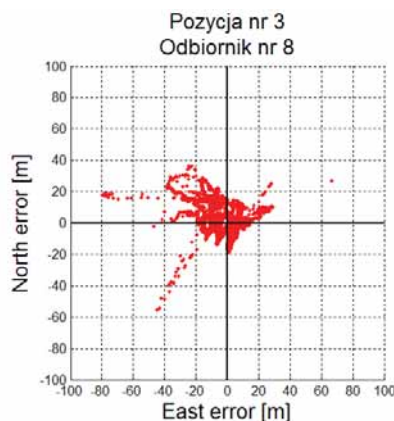
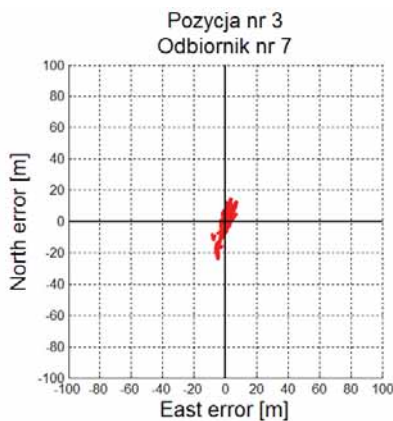
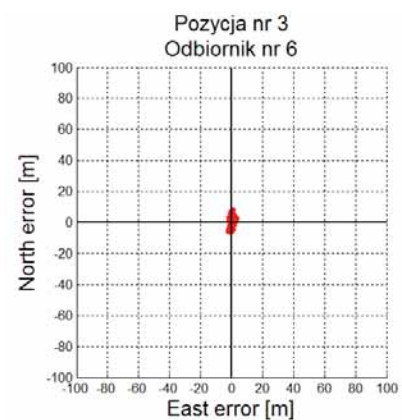
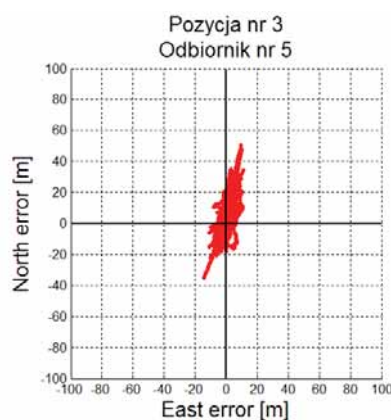
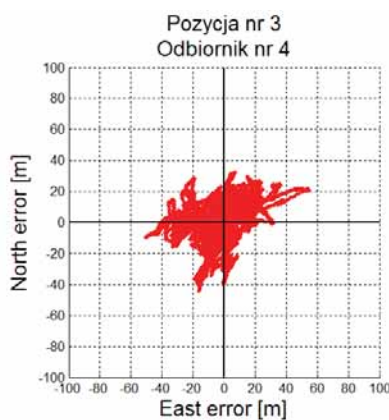
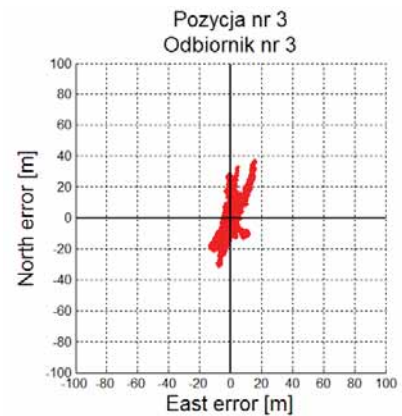
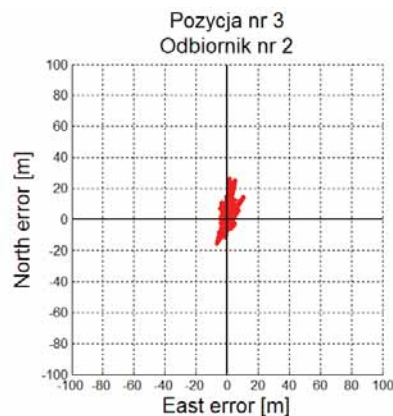
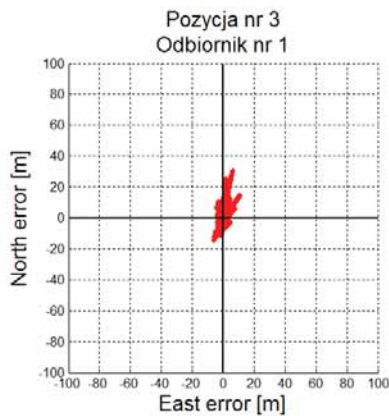
Odbiorniki numer: 1 (uBlox - GPS), 2 (uBlox z GPS + EGNOS), 7 (NVS - GPS), 9 (NV - GPS + GLONASS) i 10 (NVS - GPS + EGNOS) wyznaczają pozycje na płaszczyźnie z bardzo dobrą dokładnością i precyzją. Pozycje zebrane w trakcie całego okresu pomiarowego są ściśle skupione i leżą bardzo blisko pozycji referencyjnej. W porównaniu z powyższymi, odbiorniki numer: 3 (Garmin - GPS), 5 (ORCAM - GPS) i 6 (SkyTraq - GPS) prezentują słabszą precyzję ale wciąż dobrą dokładność. Odbiorniki numer: 4 (uBlox - GLONASS) oraz 8 (NVS - GLONASS) zdecydowanie odstają od pozostałych. Precyzja wskazań jest wielokrotnie gorsza od poprzedników, a w określonych chwilach czasowych widać również „wędrowkę” wskazań po ścieżkach znacznie oddalonych od punktu referencyjnego, co może powodować zupełnie błędną pracę aplikacji nawigacyjnych wykorzystujących odbiorniki w tak określonej ich konfiguracji.

## 6.2. Wykresy dla scenariusza II

**Scenariusz II - warunki średnio trudne**

Odbiornik numer 9 (NVS - GPS + GLONASS) prezentuje najlepszą precyzję i dokładność wskazań. Ustępują mu nieznacznie odbiorniki numer 7 (NVS - GPS) i 10 (NVS - GPS + EGNOS), chociaż dla odbiornika numer 7 daje się zauważyć znaczną zwiększoną wartość maksymalnego rozrzutu zmierzonych pozycji. Utrudniony odbiór sygnałów GNSS zaczyna mieć istotny wpływ na jakość określanych pozycji w pozostałych odbiornikach. Widać to szczególnie w najsłabszym dla tego scenariusza odbiorniku numer 4 (uBlox - GLONASS). Przez pewien okres czasu odbiorniki były w stanie odbierać sygnały tylko od 3 satelitów GLONASS, co spowodowało znaczną degradację jakości jego wskazań.

### 6.3. Wykresy dla scenariusza III



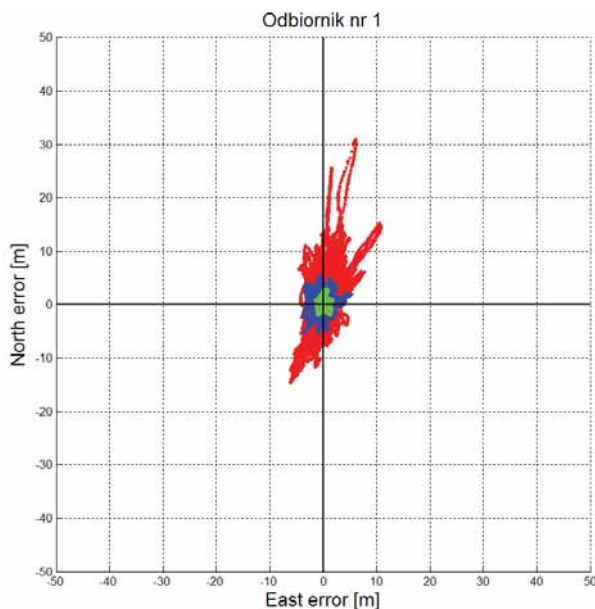
#### Scenariusz III - warunki bardzo trudne

Ze szczególnie utrudnionym odbiorem sygnałów GNSS najlepiej poradził sobie odbiornik numer 9 (NVS - GPS + GLONASS). Obliczane przez niego pozycje miały najlepszą dokładność i precyzję. Warty zauważenia jest również fakt, że komponent  $U_p$  jego wskazań był świetnie wyznaczany, co w rezultacie dałoby mu również deklasującą pozostałe odbiorniki pozycję w rankingu jakości określania wskazań dla przestrzeni. Na takie jego zachowanie może mieć wpływ zdecydowanie najlepsza zdolność wykorzystania sygnałów GNSS - w najtrudniejszym momencie odbierał sygnały z co najmniej 9 satelitów, gdzie dla pozostałych odbiorników była to liczba z przedziału 3 do 5. Najślabiej wypadł tutaj odbiornik numer 4 (uBlox - GLONASS), który jako jedyny (w krótkim przedziale czasu) miał w ogóle problem z wyznaczeniem pozycji.

Należy jednak podkreślić, że scenariusz III wymuszał pracę odbiorników w szczególnie trudnym środowisku, rzadko spotykanym w typowych aplikacjach dla tego segmentu odbiorników.

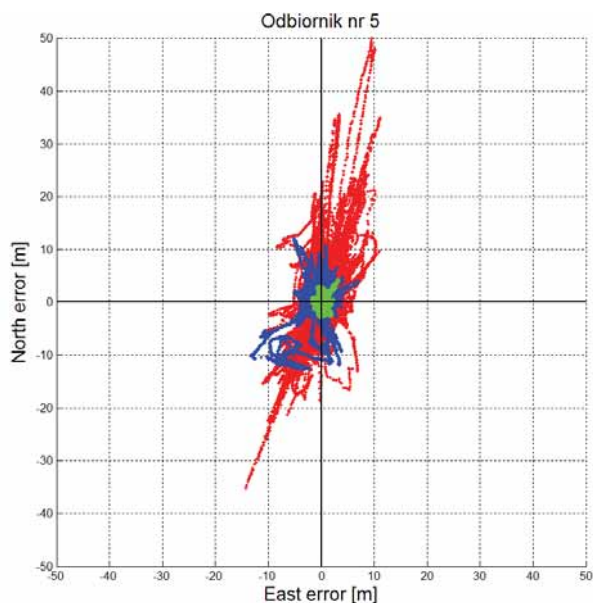
## 7. Wnioski

Bazując na praktyce inżynierskiej autorzy szczegółowo zwrócą uwagę na ważne aspekty, które mogą okazać się istotne dla projektantów urządzeń wyposażonych w odbiorniki GNSS.



**Rys. 5.** Wspólny wykres dla wyznaczonych pozycji odbiornika nowszej generacji dla 3 scenariuszy pomiarowych

**Fig. 5.** Composite chart of determined positions for newer generation receiver for 3 scenarios



**Rys. 6.** Wspólny wykres dla wyznaczonych pozycji odbiornika starszej generacji dla 3 scenariuszy pomiarowych

**Fig. 6.** Composite chart of determined positions for older generation receiver for 3 scenarios

### 7.1. Degradacja jakości wskazań wraz z pogorszeniem widoczności nieboskłonu a generacja układu

Na rys. 5 naniesiono na wspólny wykres wskazania jednego z lepszych w przeprowadzonym teście odbiorników GNSS. Jest to odbiornik nowszej generacji. Kolorem czerwonym oznaczono wskazania dla najmniej korzystnej pozycji anteny, niebieskim wskazania dla średnio korzystnej pozycji, a zielonym dla pozycji najkorzystniejszej.

Widać tutaj korelację między lokalizacją anteny a jakością wskazań dla tego samego odbiornika pracującego z identycznymi ustawieniami, jednak nie jest ona tak wyraźna jak dla starszego układu (odbiornik 5), co zostało analogicznie zaprezentowane na rys. 6.

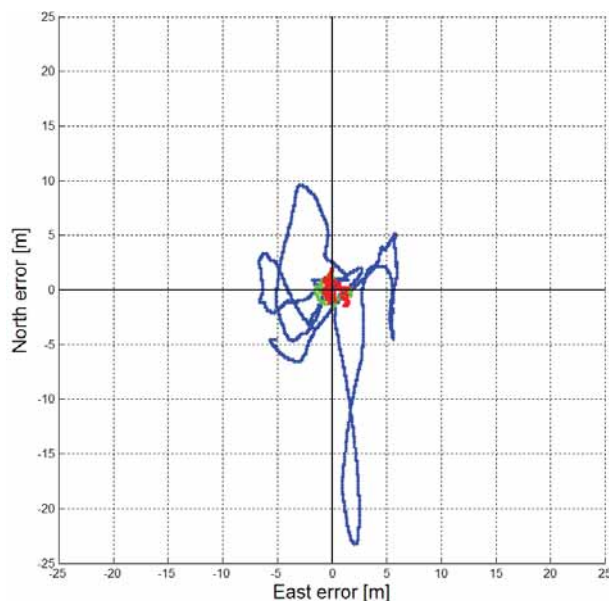
Ciągły postęp w rozwoju technologii odbiorników GNSS sprawia, że z każdym rokiem parametry nowo opracowywanych układów są znacznie lepsze. Bazując na przedstawionych wynikach obserwacji autorzy uważają, że raczej nie warto inwestować w układy starszej generacji, nieznacznie tylko ustępujące ceną najnowszym.

### 7.2. Wykorzystanie sygnałów GLONASS

Obecnie wskazania odbiorników bazujące tylko na sygnałach systemu GLONASS są dużo gorsze niż wskazania odbiorników wyłącznie z systemem GPS.

Na rys. 7 przedstawiono wykresy dla najkorzystniejszego położenia anteny, zarejestrowane dla tego samego modelu odbiornika GNSS (odbiorniki 7–9), pracującego w trzech trybach:

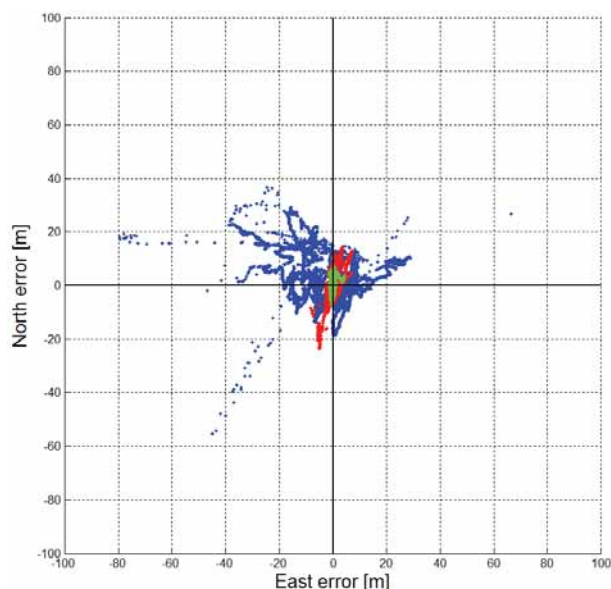
- GPS kolor czerwony,
- GLONASS kolor niebieski,
- GPS+GLONASS kolor zielony.



**Rys. 7.** Wykres wyznaczonych pozycji dla 3 odbiorników pracujących z różnymi systemami GNSS dla scenariusza I

**Fig. 7.** Chart with indicated positions for 3 receivers working with 3 different GNSS systems for scenario I

Dla tego scenariusza obydwa systemy (GPS vs. GLO-NASS) dzieli wyraźna przepaść. Błąd DRMS dla odbiornika GLONASS jest prawie 7-krotnie większy niż dla odbiornika GPS i ponad 5-krotnie większy dla odbiornika z kombinacją GPS+GLONASS. Sytuacja poprawia się, jeśli dokonamy analogicznego porównania dla najmniej korzystnej pozycji anteny (rys. 8).



**Rys. 8.** Wykres wyznaczonych pozycji dla 3 odbiorników pracujących z różnymi systemami GNSS dla scenariusza III

**Fig. 8.** Chart with indicated positions for 3 receivers working with 3 different GNSS systems for scenario III

Największa poprawa jakości wskazań następuje, gdy dla lokalizacji anteny w trudnych warunkach wykorzystamy dwa systemy jednocześnie. Pozycje określone przez odbiornik wielosystemowy mają zdecydowanie mniejszy błąd DRMS, jak również skrajne wartości Easting i Northing znajdują się znacznie bliżej wartości referencyjnej. Kolosalna jest także zmiana skrajnych wartości Up, która dla odbiornika wielosystemowego jest prawie 19-krotnie mniejsza niż dla odbiornika najsłabszego w tym scenariuszu.

Jest to zatem wyraźna przesłanka, aby przygotować projekty własnych aplikacji do wykorzystania odbiorników GNSS w prawdziwym znaczeniu tego skrótu, czyli odbiorników w pełni wielosystemowych.

### 7.3. Wartości maksymalnych różnic dla zmierzonych współrzędnych Easting i Northing

Warto zwrócić uwagę na porównanie maksymalnych różnic dla współrzędnych Easting i Northing (wynikających z „rozrzucenia” obliczonych pozycji wokół pozycji referencyjnej) z wartością błędu CEP.

Przedstawione wartości błędów CEP/DRMS/2DRMS zostały wyznaczone dla stosunkowo dużej liczby zarejestrowanych pozycji (ponad 86 000), dzięki czemu chwilowe i jednostkowe zakłócenia, nawet o dużych wartościach, nie miały istotnego wpływu na ich wyniki.

W praktyce inżynierskiej oczekuje się jednak również, aby obok dużej dokładności układu GNSS, której miarą jest uśredniona wartość błędu wyznaczenia pozycji, wskazywane pozycje jak najmniej różniły się między sobą, czyli były najbardziej precyzyjne (miarą precyzji jest rozrzut wyznaczonych pozycji wokół ich wartości uśrednionej).

Jest to zarazem parametr stosunkowo istotny w wielu popularnych aplikacjach, np. w samochodowych nawigacjach. Z punktu widzenia użytkownika nawigacji samochodowej, nie ma zupełnie znaczenia, jeśli deklarowany błąd CEP jest na poziomie 2,5 m (scenariusz III, odbiornik nr 6) albo 3,6 m (scenariusz III, odbiornik nr 1), gdyż jest to wielkość porównywalna z wielkością samochodu. Krytycznym za to jest maksymalny rozrzut, jakiego się może spodziewać – dla wspomnianych dwóch odbiorników, wartości maksymalnej różnicy dla współrzędnej Northing wynoszą odpowiednio 8,5 m oraz 30,9 m. Blisko 31 m przesunięcia może skutkować np. zmianą kierunku na autostradzie czy na zjeździe z estakady na skrzyżowaniu bezkolizyjnym widzianą przez nawigację samochodową, a finalnie bezpodstawnym przeliczeniem trasy, co wpływa na komfort użytkowania nawigacji samochodowej, a nawet na bezpieczeństwo podróży.

### 7.4. Utrata odbioru sygnałów EGNOS

Scenariusz III przewidywał ustawienie anteny między wysokimi przeszkodami od strony południowej i północnej. Zgodnie z opisem zamieszczonym w pierwszym artykule tej serii, satelity EGNOS transmitujące poprawki dla systemu GPS są widziane na terytorium Polski nisko nad południowym horyzontem, wskutek czego nawet stosunkowo niewysokie przeszkody znajdujące się na tym kierunku całkowicie blokują ich odbiór.

Taka sytuacja miała miejsce w trakcie badań prowadzonych dla scenariusza III, co potwierdzają zgodne wyniki wskazań dla par odbiorników nr 1 i 2 oraz 8 i 10. Niezależnie, czy odbiorniki były lub nie były skonfigurowane do odbioru poprawek EGNOS, uzyskane rezultaty pomiarów są zbliżone.

---

Przy wykorzystaniu poprawek transmitowanych przez systemy SBAS należy zwrócić uwagę, aby odbierany system SBAS przeznaczony był dla właściwego obszaru geograficznego. Jeśli odbiornik GPS zostanie skonfigurowany do akceptowania poprawek od dowolnego systemu SBAS, to może się zdarzyć, że będą na danym obszarze odbierane również sygnały od systemów dedykowanych innemu kontynentowi – w Polsce, relatywnie wysoko nad horyzontem widoczne są również satelity indyjskiego systemu augmentacyjnego GAGAN – PRN127 i PRN128, transmitujące aktualnie sygnały testowe (grudzień 2012).

---

### 7.5. Wskaźnik „Fix Quality Indicator”

Poważnym błędem przy korzystaniu z danych pozyskanych z odbiorników GNSS (a często popełnianym) jest pomijanie specjalnego wskaźnika (tj. wartości

numerycznej określonego pola komunikatu NMEA, np. w komunikacie \$GxGGA) mówiącego o ich „jakości”.

Przykładowo, w formacie wiadomości \$GxGGA pole nr 6 może przyjmować zwyczajowo wartości od 0 do 6, gdzie każdej z tych wartości przyporządkowany jest odgórnie status wysyłanych przez odbiornik danych o pozycji. Z uwagi na fakt, że omawiane odbiorniki GNSS należy sklasyfikować jako produkty „low-cost”, znaczenie mają 4 wartości pola nr 6 w wiadomości \$GxGGA (tab. 6).

**Tab. 6.** Tabela z zestawieniem znaczeń wskaźnika „Fix Quality Indicator” w komunikacie \$GxGGA

**Tab. 6.** Table showing a list of typical meanings of „Fix Quality Indicator” in \$GxGGA message.

| Wartość wskaźnika | Znaczenie wskaźnika                                   |
|-------------------|-------------------------------------------------------|
| 0                 | Fix not available or invalid                          |
| 1                 | Position fix valid, autonomous mode                   |
| 2                 | Position fix valid, differential mode                 |
| 6                 | Estimated data (extrapolation, „dead reckoning mode”) |

Jeżeli w polu tym widnieje wartość 0, należy z całą stanowczością pominąć w analizie wszystkie transmitowane w ramach NMEA dane dla danego okresu pomiarowego.

Dyskusyjne wydaje się być również korzystanie z informacji oflagowanych wartością 6. W takim przypadku odbiornik nie oblicza parametrów nawigacyjnych w oparciu o pełną i aktualną informację pozyskaną z sygnałów GNSS, przyjmuje natomiast pewne założenia (np. niezmienną wysokość lub stały co do kierunku i modułu wektor prędkości), dzięki którym nawet przy braku wystarczającej widoczności nieboskłonu możliwe jest wyznaczanie kolejnych danych nawigacyjnych.

## 8. Podsumowanie

Przy idealnych warunkach do odbioru sygnałów GNSS (scenariusz I) wszystkie testowane odbiorniki wykazały zbliżone parametry, na porównywalnym świetnym i w pełni akceptowalnym dla tej półki cenowej poziomie. Należy nadmienić, że dla tego scenariusza zostało wykorzystane specjalne miejsce przygotowane do badań GNSS wykonywanych w PIAP od wielu już lat. Ponadto, do badań została celowo użyta antena precyzyjna, o specjalnej budowie – gwarantującej doskonałe parametry (m.in. dużą stabilność centrum fazowego w funkcji kąta padania fali elektromagnetycznej), w tym odpowiednią charakterystykę promieniowania minimalizującą wpływ szkodliwych sygnałów odbitych. Dzięki temu możliwe było zbadanie jakości samych odbiorników, z pominięciem zakłóceń wynikających ze słabych parametrów instalacji antenowej. Należy jednak zaznaczyć, że koszt takiej anteny liczony jest w tysiącach złotych.

W typowych zastosowaniach odbiorników GNSS z segmentu „low-cost” (spotykanych w telefonach czy w nawi-

gacjach samochodowych) wykorzystuje się tanie, pasywne anteny o nieoptymalizowanej charakterystyce, co będzie miało istotny wpływ na jakość odbieranych sygnałów GNSS a w rezultacie na większe błędy. Często również samo miejsce używania odbiorników (np. wewnątrz samochodu – metalowa klatka!) dodatkowo wpływa niekorzystnie na ich pracę.

Reasumując, dla scenariusza I, po odrzuceniu odbiorników „tylko-GLONASS”, brak jest wyraźnego lidera.

W scenariuszu II można zauważyć przewagę układów nowoczesnych (NVS, u-Blox) nad pozostałymi.

Scenariusz III odkrywa potęgę układów wielosystemowych. W pierwszej części tej serii wspomniano, że istnieją układy wielosystemowe, ale jednocześnie można korzystać np. tylko z GPS (ew. GPS+EGNOS) lub tylko z GLONASS. Taka sytuacja ma miejsce w odbiornikach LEA-6N produkowanych przez u-Blox. Choć mają one świetne parametry, wyraźnie brakuje możliwości jednoczesnego użytkowania wielu systemów na raz. Pozytywnie wyróżnia się tutaj NVS ze swoimi odbiornikami serii NV08C-CSM. Jest to de facto „kombajn” łączący dwa niezależne odbiorniki GNSS (GPS i GLONASS), z własną jednostką integrującą wskazania obu systemów do jednego strumienia danych. Przewaga tego odbiornika nad innymi jest spora, chociaż również bardzo dobre parametry osiągnął odbiornik SkyTraq Venus634LPx. Pomimo że ma już swoich wielosystemowych następców, wypada nadal bardzo konkurencyjnie.

Zalety wykorzystania sygnałów z wielu konstelacji GNSS szczególnie uwydatniają się w trudnych do odbioru lokalizacjach. Jeden z testowanych odbiorników był odbiornikiem w pełni wielosystemowym, tj. odbiornikiem który był w stanie odbierać i przetwarzać w rozwiązaniu nawigacyjnym sygnały z wielu konstelacji jednocześnie. Dzięki temu, minimalna ilość odbieranych przez niego sygnałów GNSS dla takiego scenariusza była równa 9, wartość średnia to aż 15 a wartość maksymalna to 21. Wpłynęło to bardzo pozytywnie na jakość wskazywanych przez niego pozycji.

Dla porównania, analogiczne wartości dla odbiorników jednosystemowych kształtowały się na poziomie odpowiednio: wartość minimalna 3.4, wartość średnia 7.8 a wartość maksymalna to 12. Szczególnie istotna jest zawsze minimalna ilość odbieranych sygnałów GNSS, gdyż w zależności od przyjętej konfiguracji odbiornik wraz z pogarszającymi się warunkami stara się przejść w tryb ekstrapolacji (tzw. „dead reckoning”). I właśnie te momenty pracy odbiornika najbardziej degradują jego ogólną jakość, chociaż producent układu nie ma na nich wpływu.

Zdaniem autorów, pozostałe zadeklarowane przez producentów parametry są raczej zbliżone dla układów tej samej generacji lub nie są one szczególnie istotne w zastosowaniach stacjonarnych. Do najistotniejszych należy przede wszystkim parametr TTFF (Time to First Fix) definiujący upływający czas od włączenia odbiornika do określenia pierwszej pozycji. Jest to parametr szczególnie istotny w rozwiązaniach mobilnych.

## 9. Następne badania

Wykonane testy stacjonarne zostały ograniczone tylko do zbadania wybranych parametrów odbiorników GNSS. Skupiono się na analizie błędów wyznaczonych dla płaszczyzny, niemniej jednak zamieszczono w tabelach również wyniki analizy dla błędów w przestrzeni (SEP), tj. uwzględniających współrzędną Up.

W dalszej kolejności planuje się przeprowadzenie badań mobilnych z wykorzystaniem tej samej platformy testowej dla różnych warunków środowiskowych (otwarty teren/wysoka miejska zabudowa/obszary zalesione). Przewiduje się określenie jakości ich pracy w zupełnie innym środowisku – dynamicznie zmieniających się warunkach odbioru sygnałów GNSS.

Wyniki prac badawczych zostaną zaprezentowane w następnym artykule serii.

### Bibliografia

1. Drake S.P., *Converting GPS Coordinates (BLh) to NavigationCoordinates (ENU)*, Surveillance Systems Division, Electronics and Surveillance Research Laboratory, Edinburgh, South Australia, 2002.
2. Siouris G.M., *Aerospace Avionics System. A Modern Synthesis*, Air Force Institute of Technology, Academic Press Inc, 1993.
3. *GPS Position Accuracy Measures*, APN-029 Rev 1, Novatel 2003.
4. Seeber G., *Satellite geodesy: foundations, methods and applications*, Walter de Gruyter, Berlin, New York 2003
5. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org).
6. Materiały informacyjne producentów oraz noty katalogowe odbiorników od u-Blox, NVS Technologies AG, Orcam, SkyTraq, Garmin. ■

### GNSS receivers in engineering practice Stationary test

**Abstract:** In the second article of a series we present the results of our researches into different configurations of a set of 10, low-cost GNSS receivers. Firstly, we give definitions of basic factors which determine the accuracy of GNSS receivers and have also discussed the measurements scenarios used in the study. The study was conducted at three measuring locations by adjusting it in such a way that their performance could be checked under both very good and very poor conditions GNSS signals reception conditions. The results show a strong correlation between environmental conditions and errors in indicated positions reported by the equipments. The study analyzed the effect of different receiver configurations on the accuracy and precision of measurements.

**Keywords:** GPS, GLONASS, EGNOS, measuring errors, stationary test, CEP, DRMS, 2DRMS, ENU, position scatter

#### mgr inż. Arkadiusz Perski

W PIAP od 2001 roku. Zajmuje się realizacją międzynarodowych projektów badawczych w obszarach nawigacji oraz komunikacji satelitarnej. Swoje zainteresowania naukowe koncentruje wokół tematyki Globalnych Systemów Nawigacji Satelitarnej oraz ich zastosowań w wybranych obszarach techniki.

e-mail: [ArkadiuszPerski@piap.pl](mailto:ArkadiuszPerski@piap.pl)



#### dr inż. Artur Wieczyński

Kierownik Laboratorium Techniki Satelitarnej PIAP, koordynator i uczestnik wielu międzynarodowych projektów badawczych w dziedzinie komunikacji satelitarnej, sterowania, monitorowania i nawigacji.

e-mail: [ArturWieczynski@piap.pl](mailto:ArturWieczynski@piap.pl)



#### Maria Baczyńska

Studiowała informatykę oraz robotykę na Politechnice Warszawskiej. Obecnie jest zatrudniona w Laboratorium Techniki Satelitarnej w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP. Jej naukowe i zawodowe zainteresowania obejmują problemy nawigacji w systemach mobilnych, zagadnienia komunikacji satelitarnej oraz metody kryptograficzne.

e-mail: [mbaczynska@piap.pl](mailto:mbaczynska@piap.pl)



#### mgr inż. Konrad Bożek

Absolwent Wydziału Elektroniki i Techniki Informacyjnych Politechniki Warszawskiej w specjalności Radiokomunikacja i Radiolokacja. Od 2003 r. pracownik PIAP, twórca wielu rozwiązań z obszaru radiokomunikacji i techniki antenowej implementowanych w systemach mobilnych..

e-mail: [KonradBozek@piap.pl](mailto:KonradBozek@piap.pl)



#### mgr inż. Sławomir Kapelko

Ukończył Wydział Elektroniki Politechniki Warszawskiej, w PIAP zatrudniony od 2003 roku. Elektronik, programista, projektant systemów wbudowanych. Jego zainteresowania to szeroko pojęta robotyka. Autor wielu opracowań platform mobilnych do zastosowań cywilnych i specjalnych, wykorzystywanych m.in. w badaniach GNSS.

e-mail: [SlawomirKapelko@piap.pl](mailto:SlawomirKapelko@piap.pl)



#### mgr inż. Sebastian Pawłowski

Pracownik PIAP od 2001 roku. Od wielu lat prowadzi i uczestniczy w projektach związanych z robotyką mobilną do zastosowań antyterrorystycznych i militarnych. Swoje zainteresowania skupia między innymi wokół budowy platform badawczych dla systemów GNSS.

e-mail: [SebastianPawlowski@piap.pl](mailto:SebastianPawlowski@piap.pl)

