

# Odbiorniki GNSS w praktyce inżynierskiej

## Wprowadzenie do systemów GNSS

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

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

**Streszczenie:** W pierwszym z serii artykułów przedstawiono zarys zasady działania oraz wybrane pojęcia związane z tematyką Globalnych Systemów Nawigacji Satelitarnej (ang. *Global Navigation Satellite System* – GNSS) a następnie krótkie zestawienie podstawowych parametrów w kontekście tanich odbiorników przeznaczonych do integracji we własnych aplikacjach. Przedstawiono przegląd istotnych parametrów i funkcjonalności dostępnych na rynku odbiorników ze wskazaniem potencjalnych „pułapek”, jakie mogą czyhać na projektanta. Autorzy w kolejnych artykułach dokonają przeglądu dostępnych na rynku odbiorników typu „OEM low-cost” oraz przedstawiają wyniki przeprowadzonych badań stacjonarnych oraz mobilnych dla różnych aplikacji.

**Słowa kluczowe:** GPS, GLONASS, GALILEO, EGNOS, nawigacja, błędy pomiarowe

Z końcem 2012 r. dostępne dla użytkownika są tylko dwa globalne i w pełni operacyjne systemy nawigacji satelitarnej: amerykański **GPS** (ang. *Global Positioning System*) oraz rosyjski **GLONASS** (ros. *Globalnaja Nawigacjonnaja Sputnikowaja Sistema*). Wyczekiwane, szczególnie przez europejskich konsumentów, uruchomienie europejskiego systemu nawigacji satelitarnej **GALILEO** jest ciągle przekładane – przewiduje się osiągnięcie jego pełnej, globalnej operacyjności (z zakładanym kompletem satelitów na orbitach) dopiero na lata 2018–2019. Są to tylko prognozy, a biorąc pod uwagę doskwierający również w branży kosmicznej kryzys finansowy, a także dotychczasowe problemy z wdrożeniem systemu, to z dużym prawdopodobieństwem można spodziewać się kolejnych przesunięć pełnego uruchomienia systemu. Chiński system nawigacji satelitarnej **Beidou** („Wielka Niedźwiedzica”) jak dotąd ma tylko znaczenie regionalne (teren Azji centralnej oraz region zachodniego Pacyfiku), chociaż chińskie aspiracje sięgają wyżej – planuje się przekształcenie Beidou w system globalny o nazwie **Compass**.

Warto wspomnieć, że rozwijane są również inne regionalne systemy nawigacji satelitarnej, np. indyjski **IRNSS** (ang. *Indian Regional Navigational Satellite System*).

Osobną kategorią, często błędnie interpretowaną jako alternatywne np. do systemu GPS są systemy wspo-

magające **SBAS** (ang. *Satellite-Based Augmentation System*), takie jak europejski **EGNOS** (ang. *European Geostationary Navigation Overlay Service*) czy bliźniaczy amerykański **WAAS** (ang. *Wide Area Augmentation System*). Wykorzystanie ich pozwala w zasadzie tylko zwiększyć dokładność wskazań odbiorników GPS (na terenie Polski poprawa nie jest spektakularna) oraz szybciej poinformować użytkownika systemu o poważnej awarii lub utracie deklarowanych parametrów, niż gdyby to miało miejsce autonomicznie, bez odbioru sygnałów SBAS.



**Rys. 1.** Projektowane i działające systemy SBAS oraz zasięg ich działania

**Fig. 1.** Planned and operating SBAS systems and their coverage

Na rys. 1 przedstawiono orientacyjne obszary Ziemi, dla których funkcjonują dedykowane systemy augmentacyjne SBAS.

## 1. Wprowadzenie

Podstawy teoretyczne działania GNSS są szczegółowo opisane w licznej literaturze, dlatego w artykule skupiono się wyłącznie na subiektywnym wyborze najistotniejszych aspektów z punktu widzenia praktyki inżynierskiej. Wśród wielu dostępnych opracowań brak jest związanej syntezy najważniejszych zagadnień, opracowanej pod kątem konkretnych wymagań użytkownika przemysłowego.

W trakcie prac projektowych, bazując na wymaganiach użytkownika, projektant traktuje odbiornik GNSS jako typowy układ scalony o określonej funkcjonalności i parametrach, które w mniejszym lub większym stopniu

są mu znane. Najczęściej jednak posiadana wiedza ograniczona jest do znajomości tylko najbardziej ogólnych informacji bez zagłębiania się w szczegóły związane działaniem systemu i jest to zupełnie naturalne.

Autorzy, dokonując subiektywnego przeglądu najbardziej istotnych od strony aplikacyjnej zagadnień, wskazują miejsca szczególnie ważne, które potencjalnie mogą stać się źródłem problemów eksploatacyjnych.

W kolejnych artykułach autorzy przedstawią wyniki badań statycznych i mobilnych dla serii popularnych odbiorników GNSS pracujących w różnych konfiguracjach. Zostaną również zaprezentowane praktyczne wskazówki nt. możliwości użycia kilku alternatywnych systemów zwiększających dokładność określania pozycji.

## 2. Wyznaczanie pozycji w systemach stadiometrycznych

Zarówno GPS jak i GLONASS są systemami stadiometrycznymi, tj. systemami, w których pozycja odbiornika wyznaczana jest na podstawie znajomości punktu przecięcia się sfer o znanych promieniach. Promienie te są wyznaczane na podstawie czasu propagacji sygnału. Pozycja środków sfer wyznaczana jest we wspólnym układzie odniesienia na podstawie parametrów transmitowanych przez satelity w specjalnych depezbach nawigacyjnych.

Do wyznaczenia pozycji obiektu w przestrzennym układzie współrzędnych wymagane jest (zgodnie z definicją) określenie odległości obiektu tylko od trzech znanych punktów. Z inżynierskiego punktu widzenia realizacja pomiaru czasu na wymaganym poziomie dokładności w odbiorniku (czyli przy pomocy zegarów atomowych tej samej klasy, co używane w satelitach) jest w teorii możliwa, ale praktycznie nierealizowalna ze względów zarówno ekonomicznych, jak i zbyt dużych wymiarów gabarytowych takiego odbiornika. Stąd też w odbiornikach stosuje się proste i tanie zegary zbudowane na oscylatorach kwarcowych. O ile odbiornik w depezbę nawigacyjnej otrzymuje dokładną informację o błędzie zegarów atomowych umieszczonych na satelitach i może to uwzględnić w dalszych obliczeniach, o tyle dalekie od doskonałości wskazanie zegara kwarcowego na odbiorniku generuje nieznaną z góry błąd, który bezpośrednio przekłada się na błędy określania pozycji. Rozwiązaniem tego problemu jest wykorzystanie do obliczeń wartości jeszcze jednej odległości od satelity, co pozwala oszacować błąd zegara odbiornika i finalnie precyzyjnie określić nieznaną z góry położenie odbiornika. A zatem podczas uruchamiania odbiornika

typu kodowego (zasada działania oparta na analizie przesunięcia dwóch kodów: odebranego i repliki wygenerowanej w odbiorniku), wymagana jest na tyle dobra widoczność nieba, aby odbiornik w tym czasie mógł w sposób nieprzerwany odbierać sygnały od co najmniej czterech satelitów.

## 3. GPS, GLONASS, EGNOS – najważniejsze różnice

### 3.1. GPS a GLONASS

#### 3.1.1. Parametry orbit

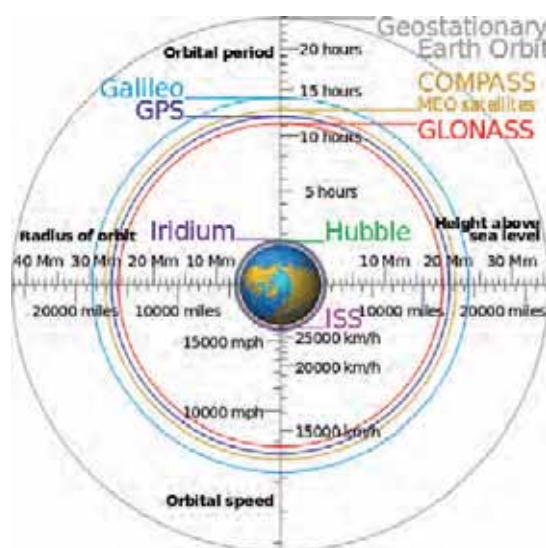
Najważniejsze różnice systemów GNSS w kontekście parametrów orbit przedstawiono poglądowo na rys. 2. Zachowano przy tym odpowiednie proporcje.

Każdy satelita GPS wykonuje dwa pełne okrążenia po swojej orbicie w ciągu doby gwiazdowej (równej około 23 h 56 min 4 s). Doba gwiazdowa jest to czas równy okresowi w jakim obraca się Ziemia dookoła własnej osi względem gwiazd. Jest on krótszy niż używana w życiu codziennym doba słoneczna, co wynika z wpływu ruchu orbitalnego Ziemi wokół Słońca.

Reasumując, każdego dnia użytkownik w danej lokalizacji będzie widział niemal dokładnie taką samą konstelację satelitów GPS, ale będzie ona występowała ok. 4 minuty wcześniej niż dnia poprzedniego (w praktyce mogą wystąpić również nieznaczne zakłócenia ruchu orbitalnego satelitów).

Z praktycznego punktu widzenia może mieć to wpływ na jakość określenia pozycji, gdyż najtrudniejsze do eliminacji, a istotne jeśli chodzi o wielkości, są błędy określenia odległości wynikające z odbić/ugięcia sygnału (ang. *multipath errors*) o przeszkody terenowe takie jak wysokie budynki, maszty. Z uwagi na opisaną powyżej cykliczność będą się one regularnie powtarzać.

Parametry orbit satelitów konstelacji GLONASS zostały tak dobrane, że każdy satelita dokonuje w ciągu 8 dób gwiazdowych pełne 17 obrotów na swojej orbicie. Jeśli chodzi o inklinację orbit satelitów GPS i GLONASS, to są to odpowiednio: 55° i 64,8°. Inklinacja w systemach GNSS jest to kąt między płaszczyzną orbity a płaszczyzną równika Ziemi. W praktyce większy kąt zapewnia lepsze ułożenie geometryczne konstelacji satelitów widziane przez obserwatora na Ziemi na wyższych szerokościach geograficznych na półkuli północnej i południowej, co poprawia jakość określania pozycji (zespół tzw. parametrów **DOP** – ang. *Dilution of Precision*). Zaprojektowanie dla systemu GLONASS orbit o większej inklinacji było intencjonalne i podyktowane zapewnieniem lepszej dostępności sygnałów GLONASS również na północnych rubieżach ZSRR, a później Rosji.



Rys. 2. Parametry orbit systemów GNSS

Fig. 2. Parameters of GNSS

### 1.1.1. Ruch satelitów po orbitach

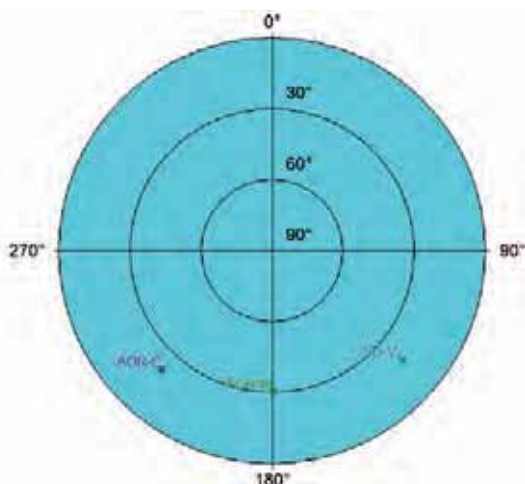
Na podstawie znajomości parametrów orbity oraz praw Keplera można wyznaczyć prędkość satelity GPS poruszającego się na orbicie. Wynosi ona około 4 km/s względem środka Ziemi. Jednak z uwagi na fakt, że cała konstelacja satelitów GPS porusza się zgodnie z kierunkiem ruchu Ziemi, to z punktu widzenia obserwatora znajdującego się na jej powierzchni, satelity GPS poruszają się znacznie wolniej, około 1 km/s. Ruch satelity z taką prędkością daje już zauważalne zmiany częstotliwości sygnału odbieranego przez odbiornik (związane z prawem Dopplera), co z kolei wpływa na proces inicjalizacji odbiornika (określany często z ang. jako *acquisition process*), powodując jego wydłużenie.

## 3.2. EGNOS

W przeciwieństwie do systemów GPS i GLONASS, satelity systemu EGNOS są rozmieszczone na orbicie geostacjonarnej.

Pod koniec 2012 roku można było odbierać sygnały na terenie Polski z 3 satelitów EGNOS, przy czym użyteczną dla typowego użytkownika informację nadają tylko satelity oznaczone jako Inmarsat-3-F2/AOR-E (15,5° W) oraz Inmarsat-F-F2 (25° E). W odbiornikach GNSS wspierających odbiór SBAS są one widziane jako satelity oznaczone odpowiednio: PRN #120 i PRN #126. Trzeci z satelitów EGNOS: Artemis (21,5° E), widziany jako PRN #124 nadaje od 22 marca 2012 r. tylko sygnały testowe.

Niestety, umiejscowienie satelitów EGNOS na orbicie geostacjonarnej powoduje, że na terenie Polski są one widoczne nisko nad horyzontem. Nawet niewielkie budynki czy inne przeszkody terenowe mogą w znacznym stopniu utrudnić, a nawet uniemożliwić odbiór sygnałów nadawanych przez satelity SBAS.



**Rys. 3.** Rozmieszczenie satelitów EGNOS widziane przez użytkownika na terenie Warszawy

**Fig. 3.** Distribution of EGNOS satellites visible to the user in Warsaw

Zewnętrzny okrąg na rys. 3 to linia horyzontu obserwatora, kolejne wewnętrzne okręgi wskazują na kąt elewacji (wysokość topocentryczną) 30° i 60°. Miejsce przecięcia osi układu to zenit nieboskłonu widziany w miejscu obserwacji.

W takich sytuacjach alternatywą może być stosowanie innego niż satelitarny kanał transmisyjny dla poprawek SBAS, np. z wykorzystaniem Internetu – co oferuje usługa **EGNOS SISNeT**. Pomimo że od ponad dziesięciu lat SISNeT jest w fazie pełnej operacyjności, to nie cieszy się znaczną popularnością.

Projektanci SBAS, szczęśliwie dla użytkownika, zaprojektowali te systemy w sposób umożliwiający odbiór sygnałów przez odbiornik bez konieczności stosowania dodatkowych urządzeń. Dodatkowym ułatwieniem jest zgodność parametrów systemów przeznaczonych dla różnych obszarów świata, tak więc odbiornik wspierający europejski EGNOS będzie także wspierał np. amerykański WAAS.

W zasadzie wszystkie obecnie dostępne na rynku odbiorniki GNSS oferują taką funkcjonalność, niemniej trzeba być ostrożnym i z rozmysłem decydować o włączeniu sygnałów SBAS do procesu wyznaczania pozycji. Więcej na ten temat zostanie przedstawione również w kolejnych artykułach tej serii.

### 3.3. Stosowane kody oraz częstotliwości

Aktualnie satelity konstelacji GPS wykorzystują dwie podstawowe częstotliwości, na których transmitowane są depeze nawigacyjne. Są to pasma częstotliwości oznaczone jako L1 (częstotliwość środkowa: 1575,42 MHz) oraz L2 (1227,60 MHz). Dla aplikacji typu „Safety of Life” przewiduje się kolejne modernizacje satelitów pozwalające na transmisję sygnałów na dodatkowym paśmie częstotliwości L5 (1176,45 MHz).

Dzięki temu, że zakodowane sygnały na wszystkich używanych częstotliwościach są ze sobą bardzo dobrze zsynchronizowane w czasie, istnieje możliwość wyznaczenia stosownej poprawki jonosferycznej uwzględniającej zmienne opóźnienie przejścia sygnału przez jonosferę. Taka metoda wyznaczania poprawki daje znacznie lepsze rezultaty niż stosowanie opracowanych modeli jonosfery. Inną alternatywą jest korzystanie z sygnałów EGNOS. Odbiorniki wieloczęstotliwościowe (L1/L2 lub L1/L2/L5) są zatem w tym względzie zdecydowanie lepsze niż tanie i popularne odbiorniki odbierające tylko sygnały w paśmie L1, niestety również wiele droższe.

Z uwagi na fakt, że system GLONASS wykorzystuje inny niż GPS sposób modulacji sygnałów (FDMA vs. CDMA), schemat używanych częstotliwości jest nieco inny. Podstawowe pasma częstotliwości systemu GLONASS to: L1 (1602 MHz) oraz L2 (1246 MHz). Przewiduje się jednak stopniową unifikację części systemu GLONASS dostępnej dla użytkownika cywilnego z systemem GPS (faza projektowa ma się rozpocząć w latach 2013–2015), co pozwoli uprościć architekturę odbiorników wielosystemowych.

Jako ciekawostkę można dodać, że właściciel systemu GPS ma możliwość natychmiastowego wykrywania, lokalizacji i raportowania wybuchów nuklearnych w atmosferze i w bliskim kosmosie. Wykorzystuje się do tego zainstalowane na satelitach detektory pracujące w paśmie L3 (1381,05 MHz), a globalna dystrybucja satelitów GPS daje podgląd bieżącej sytuacji w praktycznie dowolnym zakątku świata.

Podstawowym kodem używanym w depezach nawigacyjnych GPS jest kod C/A (ang. *Coarse-Acquisition*). Struktura kodu jest ogólnie znana, a obecnym jego prze-

znaczeniem jest określanie pozycji i czasu przez odbiorniki z segmentu cywilnego. Jego specjalnie dobrana charakterystyka umożliwia określanie pozycji z gorszą dokładnością niż z wykorzystaniem kodu wojskowego P(Y), chociaż odbiorniki wojskowe odbierają również kod C/A, gdyż jest to im niezbędne do wstępnego określenia zgrubnej pozycji. Stopniowo wprowadzany jest również nowy kod cywilny oznaczony jako L2C, a od 2014 r. również L1C.

System GLONASS wykorzystuje dwa kody: kod standardowej precyzji (SP) oraz kod określanej jako utajony wysokiej precyzji (HP).

### 3.4. Systemy odniesienia

Aspektem, na który użytkownik w swoich aplikacjach powinien zwrócić szczególną uwagę jest fakt użycia różnych systemów (układów) odniesienia stosowanych natywnie w GPS i w GLONASS.

Układ odniesienia to zbiór parametrów i ich fizyczna realizacja, opisujących kształt Ziemi (tj. przyjęcie parametrów dla elipsoidy odniesienia) jak również właściwości jej pola grawitacyjnego. GPS wykorzystuje system odniesienia „World Geodetic System 1984” (WGS-84), natomiast GLONASS system PZ-90. Różnica w typowych aplikacjach nie będzie istotna, gdyż długość wektora (stanowiącego różnicę między systemami) oceniana jest w niektórych źródłach na mniej niż wartość błędu określania pozycji. Jednak w aplikacjach wymagających szczególnej precyzji (co nie jest domeną odbiorników „low-cost”, które są przedmiotem opisu w niniejszej serii) może się to okazać decydujące.

To, co jest istotne z punktu widzenia typowego użytkownika przemysłowego, to zwrócenie uwagi na odpowiednie skonfigurowanie parametrów pracy odbiornika w sposób, dzięki któremu obliczone pozycje będą wyrażone w odniesieniu do oczekiwanego systemu odniesienia.

### 3.5. Dostępność sygnałów w otoczeniu wysokich przeszkód

Środowisko wielkomiastowe jest szczególnie nieprzyjazne dla procesu wyznaczania pozycji w odbiornikach GNSS. Szczególnie wyraźnie widać to w momencie inicjalizacji odbiornika, który od dawna nie był włączony, lub też od momentu ostatniego włączenia przemieścił się na znaczny dystans. Faza inicjalizacji wymaga nieprzerwanej widoczności sygnału w celu odebrania depeszy nawigacyjnej od przynajmniej czterech satelitów. Wystarczy na chwilę tylko zablokować odbiór sygnałów, aby znacząco utrudnić inicjalizację odbiornika. Taka sytuacja może się często zdarzać, jeśli odbiornik pracuje w okolicach wysokich budynków (zakłócenia transmisji związane z refrakcją sygnału lub wyjściem satelity z pola widzenia odbiornika), lub przesłaniania widoczności nieboskłonu (co typowo zdarza się w sytuacji, gdy odbiornik jest w ruchu).

Powyższe zakłócenia skutkują wydłużeniem czasu startu określanego parametrem **TTF** (ang. *Time To First Fix*). Z chwilą gdy odbiornik ustali dokładny czas, odbierze komplet informacji na temat precyzyjnych efermyd satelitów widocznych w danym miejscu i czasie oraz określi swoją pozycję, odporność na wymienione wyżej

zakłócenia wzrasta. Odbiornik przechodzi wtedy w tryb śledzenia satelitów (ang. *tracking process*).

Częściowym rozwiązaniem powyższych niedogodności może być użycie odbiorników wyposażonych w funkcję **A-GPS** (ang. *Assisted-GPS*), która wykorzystując infrastrukturę naziemną (np. sieć telefonii komórkowej) dostarczy kanałem np. GPRS wymagane informacje ułatwiające „start” odbiornika. Jest to opcja bardzo często spotykana w telefonach komórkowych wyposażonych w odbiorniki GNSS.

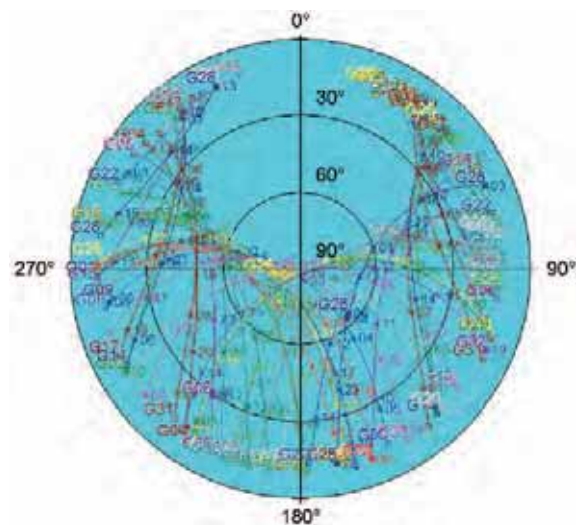
Zasadne zatem wydaje się być stosowanie wielosystemowych odbiorników GNSS. Im więcej dostępnych w trudnej lokalizacji satelitów, tym łatwiej i tym dokładniej można określić pozycję.

Należy zwrócić uwagę na jeden ważny od strony realizacyjnej fakt: na typowych dla Polski szerokościach geograficznych najbardziej „uczęszczanym” przez satelity GNSS obszarem nieba jest fragment południowego nieboskłonu.

Wynika to z założonej inklinacji orbit GNSS (55° dla GPS i 64,8° dla GLONASS) i skutkuje tym, że powyżej tych szerokości geograficznych trajektorie satelitów będących najbliżej obserwatora nie będą nigdy przecinały jego pozycji od strony północnej.

Określenie czasu propagacji sygnałów z satelitów znajdujących się nisko nad horyzontem jest obciążone większymi błędami, co wynika z faktu, że nim zostaną odebrane, muszą przejść przez „grubszą” warstwę atmosfery. Na skutek tego trudniej jest określić jej wpływ na czas propagacji. Pewnym rozwiązaniem jest wykluczanie z rozwiązania nawigacyjnego sygnałów pochodzących od satelitów znajdujących się poniżej określonej wysokości kąta elewacji (wysokości topocentrycznej), np. 5–10 pomimo że są one dostępne dla odbiornika.

Parametr definiujący wysokość topocentryczną nad horyzontem, poniżej której satelity będą wykluczane z rozwiązania, nosi nazwę „Elevation Mask”. Zobrazowane jest to na rys. 4, gdzie wyraźnie widać, że trajektorie „nasłuchiowanych” przez odbiornik satelitów nigdy nie schodzą do poziomu horyzontu, są „odcinane” na 10°.



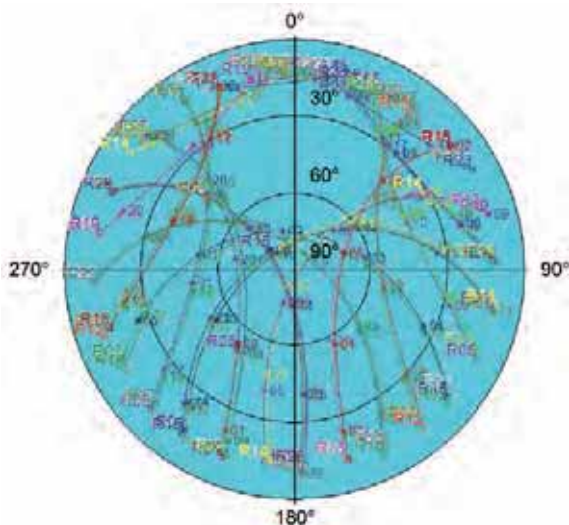
Rys. 4. Trajektorie satelitów GPS widziane w Rozewiu w okresie 24 h

Fig. 4. Trajectories of GPS satellites at Rozewie through 24 h observation period

Reasumując, dobierając na terytorium Europy miejsce pod antenę GNSS bardziej istotne jest zapewnienie dobrej widoczności nieboskłonu od strony południowej niż północnej.

### 3.6. Wpływ geometrii konstelacji satelitów na błędy określania pozycji

Inny, ważny aspekt to algorytm wyboru konkretnego zestawu satelitów (wykorzystywanych do obliczania rozwiązania nawigacyjnego), uwzględniający ich geometryczne rozmieszczenie na nieboskłonie i wpływający na wartość DOP. Warto dodać, że jest to parametr aktualny dla każdego systemu GNSS, nie tylko GPS czy GLONASS.



Rys. 5. Trajektoria satelitów GLONASS widziana w Rozewiu w okresie 24 h

Fig. 5. Trajectories of GLONASS satellites at Rozewiu through 24 h observation period

Jego wartości są niemianowane, rozróżnia się kilka typów parametru DOP, takich jak **PDOP**, **HDOP** i **VDOP** (odpowiednio odnoszące się do jakości pozycji w 3D, pozycji widzianej na płaszczyźnie oraz w ujęciu pionowym), a im mniejsza jest obliczona przez odbiornik ich wartość, tym lepiej. Obliczone wartości są wprost podawane dla użytkownika jako część komunikatu \$GxGSA w formacie NMEA0183 i mogą stanowić miarę jakości parametrów rozwiązania nawigacyjnego.

Najbardziej korzystna, jeśli chodzi o błędy wynikające z geometrycznego rozmieszczenia na niebie satelitów jest sytuacja, w której odbiornik oblicza pozycję na podstawie trzech równomiernie rozmieszczonych nisko nad horyzontem satelitów oraz czwartego znajdującego się w zenicie. Odbiorniki starają się samodzielnie wybrać optymalny zestaw z aktualnie im dostępnych satelitów, niemniej niektóre odbiorniki pozwalają również na wybranie do obliczania pozycji sygnałów od konkretnych satelitów.

Bezpośrednim skutkiem wpływu układu geometrycznego satelitów na jakość pozycji jest większy błąd określania wysokości elipsoidalnej (tj. odległości od elipsoidy odniesienia w danym punkcie) niż długości czy szerokości geograficznej. Wynika to z tego, że odbiornik może

odbierać sygnały tylko z satelitów znajdujących się nad nim, ale już nie pod nim, co byłoby bardzo korzystne.

Wykorzystanie wielosystemowych odbiorników GNSS ma jeszcze inną, choć drobną, zaletę w kontekście budżetu błędów wynikających z niekorzystnej geometrii konstelacji GNSS. Dla porównania na rys. 5 przedstawiono 24-godzinną trajektorię systemu GLONASS w tej samej lokalizacji w Rozewiu. Wyraźnie widać tutaj, że sytuacja jest korzystniejsza, gdyż obserwator będzie miał szansę odbioru sygnałów GNSS z kilku satelitów GLONASS znajdujących się w zenicie lub nawet bardziej na północ niż jego pozycja, co nie będzie możliwe w sytuacji użycia wyłącznie konstelacji GPS.

Przy doskonałej widoczności nieboskłonu warto jednak przemyśleć konieczność użycia systemu GLONASS. Ma on znacznie gorsze parametry dokładności określania pozycji, jeśli porównamy go do GPS, co może pogarszać wynikową dokładność określania pozycji.

Wyniki badań porównawczych zostaną zaprezentowane w kolejnych artykułach z tego cyklu.

## 4. Istotne parametry odbiorników GNSS

Poniżej autorzy dokonali subiektywnego wyboru najbardziej istotnych parametrów odbiorników, przed analizą których staje każdy projektant aplikacji. Do zestawu parametrów wybrano tylko te najważniejsze z punktu widzenia wieloletniej praktyki inżynierskiej, a zamieszczone sugestie są wynikiem zebranych doświadczeń podczas prac w projektach międzynarodowych, w których uczestniczyli pracownicy Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów PIAP.

### 4.1. Wspierane systemy GNSS

Minimalne kryterium wyboru to obsługa systemu GPS wraz z wyłączalną opcją wsparcia przez odpowiedni dla danego obszaru system SBAS (WAAS/EGNOS/MSAS).

W sytuacji, gdy rozważany jest odbiornik wielosystemowy, należy zwrócić uwagę na kilka spraw:

- wsparcie przez SBAS jest realizowane tylko dla systemu GPS – nie istnieje obecnie w pełni operacyjny, satelitarny system dystrybucji poprawek dla GLONASS (choć jest projektowany w tym celu rosyjski system SDCM),
- oprogramowanie wewnętrzne odbiornika nie zawsze pozwala na jednoczesne korzystanie ze wszystkich systemów (np. razem GPS+GLONASS),
- użycie sygnałów z wielu systemów jednocześnie wydaje się słuszne tylko w ściśle określonych warunkach środowiskowych, w których przyjdzie najczęściej pracować projektowanej aplikacji,
- warto rozważyć użycie odbiornika GALILEO-ready, gdyż platformy sprzętowe obecnie już na to pozwalają, a stosowny firmware zostanie udostępniony przez producentów z chwilą pełnego uruchomienia systemu GALILEO.

Na koniec uwaga ogólna: przy wyborze odbiornika warto wybrać układ umożliwiający aktualizację oprogramowania firmware przy pomocy komunikacji z użyciem tylko zwykłego portu szeregowego bez konieczności ingerencji na czas aktualizacji w konfigurację sprzętową odbiornika. Aktualizacje firmware są publikowane regularnie na

stronach producentów odbiorników w formie odpowiednio przygotowanych plików binarnych.

#### 4.2. Fizyczne porty danych

Do standardu należy wyposażenie odbiornika w przynajmniej jeden sprzętowy port szeregowy RS-232 wraz z opcjonalnym innym portem, jak USB czy SPI. Warto zwrócić uwagę na rozwiązania z dwoma niezależnie konfigurowalnymi portami RS-232, co może być przydatne, jeśli projektant zechce poprawić jakość pozycji poprzez użycie np. DGPS (ang. *Differential GPS*), np. serwisu KODGIS z ogólnopolskiej sieci Aktywna Sieć Geodezyjna EUPOS (ASG EUPOS).

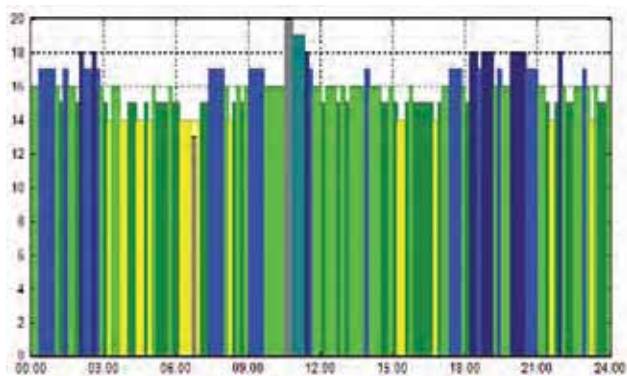
W zasadzie każdy nowoczesny odbiornik wyposażony jest w przydatne wyjście „1 PPS” (CMOS), które może posłużyć do precyzyjnej synchronizacji czasowej innych układów. Niektóre odbiorniki mają również dodatkowe wyjście „Timepulse” z programowo regulowanym w zakresie np. do 1 kHz sygnałem.

#### 4.3. Liczba śledzonych kanałów

Im więcej równoległe śledzonych kanałów, tym lepiej, gdyż oznacza to, że odbiornik jest zdolny do śledzenia jednocześnie większej liczby satelitów.

Obecne odbiorniki typu „low-cost” umożliwiają śledzenie minimum 12–16 kanałów, chociaż spotyka się również odbiorniki „zintegrowane”, potrafiące jednocześnie analizować dane z 32 kanałów.

Na rys. 6 przedstawiono symulację widoczności satelitów konstelacji GPS i GLONASS nad Warszawą w dniu 6 grudnia 2012 r. przy parametrze „Elevation Mask” ustawionym na 10°.



Rys. 6. Symulacja liczby widocznych satelitów GPS i GLONASS nad Warszawą w dniu 06 grudnia 2012 r.

Fig. 6. Simulation of the number of visible GPS and GLONASS

Jak widać, aby skorzystać z dobrodziejstw pełnej konstelacji dostępnej w tym terminie, należy mieć odbiornik minimum dwudziestokanałowy.

Wraz z rozbudową systemów GNSS liczba satelitów umieszczonych na orbitach będzie się zwiększać, więc warto już teraz pomyśleć o rozwiązaniach co najmniej kilkudziesięciokanałowych.

#### 4.4. Liczba dostępnych korelatorów

Niektórzy producenci odbiorników deklarują w notach katalogowych liczbę użytych korelatorów, co w pewnym

sensie może wskazywać na stopień zaawansowania technologicznego układu, szczególnie istotnego w procesie inicjalizacji pomiarów.

W trakcie „zimnego” startu odbiornika GNSS nie jest mu znana ani jego pozycja geograficzna, ani bieżący czas. Nie może zatem ustalić nawet pobieżnie, jakiego zestawu satelitów może się w danym momencie spodziewać. Wymaga to zatem zsynchronizowania się odbiornika z sekwencjami kodowymi C/A transmitowanymi przez satelity znajdujące się aktualnie w zasięgu odbioru. Dodatkowym problemem jest fakt, że satelity poruszają się ze znacznymi prędkościami względem obserwatora naziemnego, co powoduje zmiany częstotliwości obserwowane przez odbiornik. Konkludując, układy korelatorów w odbiorniku próbują uchwycić odbierane sygnały GNSS, uwzględniając zmiany wynikające z przesunięcia kodu dla danego satelity względem jego repliki odtworzonej w odbiorniku (co reprezentuje czas propagacji sygnału) oraz zmian częstotliwości (wynikającej z ruchu ze znacznymi prędkościami względem odbiornika).

Powstaje zatem pewien „obszar poszukiwań” w domenie czasu i częstotliwości dla różnych kodów C/A przypisanych do każdego satelity. Oczywiście, zdekodowanie nawet jednej pełnej ramki od jednego satelity znacznie ułatwia dalsze poszukiwania.

Większa liczba korelatorów na pokładzie układu oznacza zmniejszenie jednostkowego obszaru poszukiwań kodu C/A, co w konsekwencji prowadzi do skrócenia czasu wyznaczenia pierwszej pozycji.

Postęp w dziedzinie rozwoju elektroniki jest tutaj szczególnie widoczny, gdyż nowoczesne odbiorniki GNSS dosłownie deklasują te starszej konstrukcji.

#### 4.5. Funkcjonalność A-GPS

Wersja usługi Assisted-GPS realizowanej bezpośrednio przez odbiornik znacząco skraca czas do wyznaczenia pierwszej pozycji, ale niestety wymaga załadowania z zewnętrznego źródła do odbiornika zestawu informacji „startowych”, które pomogą mu z grubsza określić położenie, aktualny czas oraz zestaw satelitów, jakiego może się spodziewać. W aplikacjach stacjonarnych, gdzie dostępne jest permanentne połączenie internetowe, można pokusić się o implementację dedykowanych rozwiązań, stosunkowo długoterminowych, które działają podobnie do klasycznego A-GPS (np. Blox AssistNow).

#### 4.6. Funkcjonalność RAIM

RAIM (ang. *Receiver Autonomous Integrity Monitoring*) pozwala wykryć zakłócenia systemu GNSS pochodzące od konkretnego satelity i mające wpływ na obliczaną pozycję odbiornika. Wykorzystywana jest istniejąca w tym przypadku nadmiarowość zmierzonych odległości od satelitów do odbiornika, co pozwala na sprawdzenie wielu ich kombinacji, które przy prawidłowej funkcjonalności GNSS powinny dawać bardzo zbliżone rezultaty dla tej samej pozycji anteny odbiornika. W przypadku, gdy użycie sygnału od wadliwego satelity daje nieprawidłowe wskazanie obliczonej pozycji, odbiornik z RAIM może wykluczyć go automatycznie z zestawu analizowanych sygnałów GNSS.

## 4.7. Funkcjonalność DGPS

W przypadku, gdy dysponujemy źródłem aktualnych dla danej lokalizacji poprawek kodowych (typowo dla odbiorników z półki „low-cost”), można je wykorzystać do zwiększenia dokładności wskazań GNSS. Poprawki te są z reguły automatycznie wykrywane przez odbiornik, dzięki czemu przechodzi on w tryb różnicowy dając dokładniejsze wskazania. Informacja o stanie pracy odbiornika jest również zamieszczana w ramach NMEA0183

## 4.8. Miary dokładności odbiorników

W praktyce inżynierskiej bardzo często spotykamy się z podstawowym pytaniem: który odbiornik jest dokładniejszy?

Powinny na nie odpowiedzieć noty katalogowe danych odbiorników. Niestety, producenci często podają deklarowane wartości błędów dla różnych definicji określenia błędu. Prawidłowa interpretacja tych definicji jest wymagana, aby ocenić dokładność określenia pozycji i tym samym przydatność danego odbiornika pracującego w konkretnym reżimie stosownie do wymogów konkretnej aplikacji.

Może się tak zdarzyć, że odbiornik o dokładności, dla której wartość błędu wyrażona w RMS ma określoną wartość, jest dokładniejszy niż odbiornik, którego dokładność obciążona jest błędem o wartości mniejszej, ale wyrażonej w CEP.

Sytuacja komplikuje się jeszcze o tyle, że natura systemów GNSS powoduje, iż błędy wyznaczenia szerokości i długości geograficznej w układzie globalnym sprowadzone do układu lokalnego mają różne wartości dla komponentu północ-południe niż dla komponentu wschód-zachód (ich rzeczywisty rozkład przypomina elipsę).

Najczęściej spotykaną definicją błędów w kontekście GNSS jest błąd **CEP** (ang. *Circular Error Probable*), który mówi o długości promienia okręgu o środku w miejscu posadowienia anteny, w którym to znajdzie się 50 % wyznaczonych na płaszczyźnie pozycji.

---

Wartość tego błędu może w praktyce okazać się bardzo niemiarodajna, gdyż co prawda mamy 50 % prawdopodobieństwo wyznaczenia pozycji wewnątrz określonego okręgu, ale z drugiej strony nic nie wiemy o pozostałych 50 % wyznaczonych pozycji, które mogą znajdować się również wielokrotnie dalej.

---

Lepszą informację o dokładności układu uzyskamy znając wartości błędu **DRMS** (ang. *Distance Root Mean Square*), gdyż definiuje on dokładność średniokwadratową (dla rozkładu błędu zbliżonego do rozkładu normalnego odpowiada to 63–68 % wyznaczonych pozycji), czy też **2DRMS** (ang. *Twice the Distance Root Mean Square*) – dla 95–98 % wyznaczonych pozycji.

Jak już wspomniano, składowa wysokość jest określana przez systemy GNSS z największym błędem. Dlatego wszystkie miary błędów uwzględniające trzeci wymiar mają wyraźnie wyższe wartości niż ma to miejsce dla płaszczyzny. Najczęściej spotykane definicje błędów 3D to:

- **MRSE** (ang. *Mean Radial Spherical Error*), mówiący o promieniu sfery dla ok. 61 % prawdopodobieństwa

określenia w niej pozycji (w przypadku błędu o rozkładzie zbliżonym do rozkładu normalnego),

- **SEP** (ang. *Spherical Error Probable*), z 50 % prawdopodobieństwem określone pozycje znajdują się wewnątrz sfery.

Reasumując, jeżeli noty katalogowe mówią, że trzy odbiorniki mają taką samą wartość błędu na płaszczyźnie wyrażoną w metrach, ale każda z nich wyraża ten błąd odpowiednio dla CEP, DRMS, 2DRMS, to trzeci odbiornik jest z nich najbardziej dokładny.

---

Należy rozróżnić pojęcie dokładności od pojęcia precyzji. Używane są często zamiennie, ale oznaczają co innego. Bardziej zainteresowanych Czytelników autorzy odsyłają do artykułu „Accuracy versus Precision. A Primer on GPS Truth” zamieszczonego w numerze 05/2010 miesięcznika GPS World.

---

To, co najistotniejsze w kontekście deklarowanych w notach katalogowych dokładności odbiorników, można określić jednym zdaniem: są prawdziwe ale w warunkach idealnych, raczej rzadko spotykanych w rzeczywistości.

Przygotowane starannie noty mają adnotacje, w których – przykładowo – producent informuje, że prezentowane wartości zostały zmierzone przy widoczności nieba pozbawionej przeszkód terenowych, z profesjonalną anteną o charakterystyce redukującej szkodliwe odbicia sygnału, czy też przy wystarczająco silnym sygnale dla każdego z obserwowanych satelitów.

Ich spełnienie wymaga przygotowania specjalnego stanowiska testowego, najlepiej na dachu budynku przewyższającego wszystkie inne budynki w najbliższym jego otoczeniu oraz użycia anteny o specjalnej charakterystyce pozwalającej na znaczące tłumienie sygnałów odbitych od pobliskich obiektów (tzw. anten typu „choke-ring”). Anteny takie ważą 5–10 kg, mają średnicę rzędu 40 cm oraz kosztują kilka tysięcy EUR, tak więc należą one do segmentu rynku przeznaczonego dla innych odbiorników GNSS niż prezentowane w tej serii artykułów.

Jak przedstawiono powyżej, bardzo trudno jest znaleźć takie warunki odbioru sygnałów GNSS w typowych aplikacjach, dlatego też można śmiało wnioskować:

- w realnych warunkach należy spodziewać się o wiele gorszych parametrów niż zadeklarowane przez producenta,
- rzeczywiste warunki użytkowania powodują silnie losowe zmiany dokładności określanych pozycji,
- rodzaj użytej anteny ma istotny wpływ na rzeczywiste parametry odbiorników.

## 4.9. Formaty danych wyjściowych

Wyróżnić można tutaj dwa rodzaje formatów: zunifikowany format danych określony standardem NMEA 0183 oraz formaty natywne, zdefiniowane niezależnie przez danego producenta odbiornika.

### 4.9.1. Protokół NMEA 0183

Standard NMEA 0183 definiuje format wszystkich ramek danych (wiadomości o predefiniowanym formacie i strukturze), jakie odbiornik GNSS może wysyłać do aplikacji

użytkownika. Są to ciągi znaków ASCII, o z góry ustalonej strukturze, pozwalające użytkownikowi bezpośrednio odczytywać wszystkie niezbędne informacje, jak np. pozycja geograficzna, czas/data, prędkość itp. Na przestrzeni ostatnich 20 lat format wielokrotnie ewoluował, jednak zostały zachowane w nim w niezminionej formie wszystkie najbardziej uniwersalne ramki wiadomości.

Pewne problemy mogą pojawiać się w sytuacji użycia odbiorników wielosystemowych, dla których tzw. „NMEA talker”, czyli prefiks każdej wiadomości domyślnie zmienia się w zależności od tego, w jakiej aktualnie konfiguracji odbiornik pracuje. Dla systemu GPS przewidziano prefiks wiadomości \$GP, dla GLONASS – \$GL, dla GALILEO – \$GA czy też finalnie \$GN, kiedy to pozycja ustalana jest na podstawie informacji z wielu systemów naraz. Może to powodować problemy z kompatybilnością oprogramowania, szczególnie wśród starszych jego wersji, gdyż ramki danych mogą w tej sytuacji być zupełnie nierozpoznawane.

#### 4.9.2. Protokoły natywne

Każdy z producentów opracował swój własny protokół natywny, oferujący rozszerzony zakres transmitowanych informacji. Ponadto, transmisja z wykorzystaniem własnego protokołu daje dostęp do wielu dodatkowych parametrów konfiguracyjnych, jak również umożliwia transfer danych z wielokrotnie większą prędkością w porównaniu do NMEA0183, gdzie domyślne ustawienia to 4800 bps 8-n-1.

#### 4.10. Częstotliwość określania pozycji

Współczesne odbiorniki oferują tzw. „update rate” co najmniej na poziomie jednego zestawu ramek na sekundę. W niektórych sytuacjach, szczególnie w aplikacjach mobilnych może okazać się to zbyt małą wartością. Z drugiej jednak strony, w aplikacjach zasilanych bateryjnie możliwość ustawienia rzadszego, cyklicznego raportowania (czy też raportowania „na żądanie”) jest wręcz wymagana.

Warto wiedzieć, że odbiorniki w trakcie procesu akwizycji sygnału satelitów (inicjalizowania pomiarów), zużywają najwięcej energii, później złożoność obliczeniowa wewnętrznych algorytmów jest mniejsza oraz możliwe jest wyłączenie części wewnętrznych modułów odbiornika. Finalnie spada też pobór energii.

#### 4.11. Parametr TTFF – Time To First Fix

Jest to bardzo istotny parametr dla kryteriów wyboru właściwego dla danej aplikacji układu GNSS, gdyż definiuje on czas potrzebny odbiornikowi do określenia pierwszej pozycji. Można tutaj wskazać trzy scenariusze, dla których wartość TTFF zmienia się radykalnie, zaprezentowane w kolejności od najdłuższego do najkrótszego:

- *Cold start/Factory start* – to najbardziej niekorzystny scenariusz, w którym zakłada się, że odbiornik jest pozbawiony jakichkolwiek informacji o czasie, pozycji, konstelacji satelitów i dostępnych informacji o ich orbitach;
- *Warm start/Normal start* – odbiornik ma w miarę dokładną informację o bieżącym czasie (maksymalny błąd rzędu kilkunastu sekund); zakłada też, że jego pozycja nie różni się bardziej niż o 100–200 km od ostatnio zmierzonej, a prędkość jego ruchu nie jest znaczna oraz, że nie upłynęło więcej niż kilka godzin

od ostatniej aktualizacji pozycji, a więc informacje o konstelacji satelitów są w miarę aktualne;

- *Hot start* – odbiornik ma wszystkie niezbędne informacje, jest to w zasadzie czas niezbędny do odświeżenia informacji o aktualnej pozycji.

Wartość TTFF, szczególnie dla scenariusza *Cold Start* może zostać znacząco zredukowana z użyciem usługi A-GPS.

#### 4.12. Pozostałe parametry

Większość producentów podaje również cały szereg innych parametrów, jak czułość układu dla różnych scenariuszy, wartości maksymalnych prędkości, wysokości czy przyspieszenia w jakich odbiornik będzie pracował. Są to jednak wartości albo zbliżone dla wszystkich producentów albo nieistotne z punktu widzenia typowych aplikacji, w których zastosowania mają tanie odbiorniki przeznaczone dla rynku masowego, co powoduje, że ich analiza nie jest krytyczna z punktu widzenia projektanta takich aplikacji.

### 5. Podsumowanie

W artykule starano się przedstawić najbardziej istotne informacje mogące być wskazówkami dla selekcji najlepszego układu dla danej aplikacji. Subiektywny wybór zagadnień oraz autorska ocena istoty przedstawionych parametrów i funkcjonalności jest tylko pewną formą pomocy i nie zwalnia Czytelnika przed pogłębieniem wiedzy w temacie we własnym zakresie.

W następnych artykułach z tej serii ukazać się wyniki badań stacjonarnych i mobilnych dla kilku konfiguracji odbiorników GNSS przeprowadzone dla różnych scenariuszy zbliżonych do rzeczywistości spotykanej w praktyce inżynierskiej.

Na koniec niniejszej serii zostaną również omówione metody poprawy dokładności odbiorników z wykorzystaniem darmowych jak i płatnych narzędzi oraz usług.

#### Bibliografia

1. Kupper A., *Location-based services. Fundamental and operation*, John Wiley & Sons, Ltd, 2005, West Sussex 2005.
2. El-Rabbany A., *Introduction to GPS, The Global Positioning System*, Artech House Mobile Communication Series, Norwood, 2002.
3. *User Guide for EGNOS application developers*, ESA, ED. 1.1, 07/30/2009
4. Inside GNSS, January/February 2012
5. GPS World, May 2012
6. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org). ■

#### GNSS receivers in engineering practice Introduction to Global Navigation Satellite Systems

**Abstract:** In this article, the first of a series, we have outlined the principles of operation and selected concepts related to the theme of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and a brief compendium of the basic parameters of low-cost GNSS receivers available for integration into typical applications. The article begins



with an easy-to-read and non-technical description of the most basic principles of operation and limitations of GNSS systems so that the reader can familiarise themselves with these concepts. This is followed by a brief overview of the relevant parameters and functionality of GNSS receivers currently available on the market along with some of the potential 'pitfalls' which might be waiting for application designers. The authors in subsequent articles in this series will review 'low-cost OEM' receivers currently available on the market and will present the results of both stationary and mobile testing for different applications.

**Keywords:** GPS, GLONASS, GALILEO, EGNOS, measuring errors, low-cost GNSS receivers

---

**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*



**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*



**mgr inż. Konrad Bożek**

Absolwent Wydziału Elektroniki i Techniki Informatycznych 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*



**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*



**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*

