



Odbiorniki GNSS w praktyce inżynierskiej

Wpływ typu anteny na jakość pomiarów GNSS

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

*Ośrodek Systemów Bezpieczeństwa, Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

**Ośrodek Systemów Mobilnych, Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

Streszczenie: W trzecim z serii artykułów przedstawiono wyniki badań stacjonarnych sześciu jednakowych odbiorników odbierających w tym samym czasie sygnały GNSS za pomocą anten różnych typów. Badania wykonano z wykorzystaniem płyt ewaluacyjnych wyposażonych w nowoczesne, jednoczęstotliwościowe odbiorniki GNSS skonfigurowane do pracy w trybie „wyłącznie GPS”. W trakcie badań wykonano trzy sesje pomiarowe w środowiskach o zróżnicowanym stopniu utrudnienia odbioru sygnałów GNSS. Uzyskane wyniki wskazują, że w aplikacjach przeznaczonych na rynek masowy wykorzystujących tanie odbiorniki GNSS właściwy dobór anteny może istotnie poprawić jakość i funkcjonalność produktu.

Słowa kluczowe: GPS, GNSS, antena, zakłócenia wielodrogowości sygnału, patch, choke ring, stealth, badania stacjonarne, błąd wyznaczania pozycji 2DRMS

Warunki pracy odbiornika sygnału radiowego w znacznym stopniu zależą od parametrów anteny (charakterystyka promieniowania, dopasowanie impedancyjne) oraz jakości elementów składających się na pozostałą część toru antenowego. Dotyczy to również odbiorników GNSS, gdzie właściwie dopasowana do wymagań aplikacji antena jest bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na uzyskiwane wskazania rozwiązania nawigacyjnego, a ściślej definiując, na pozycję geograficzną centrum fazowego podłączonej do odbiornika anteny.

Oprócz aspektów wynikających z czysto elektromagnetycznych parametrów anten (tj. kształt charakterystyk promieniowania, zys energetyczny, dopasowanie polaryzacyjne), projektant aplikacji wykorzystujących odbiorniki GNSS musi uwzględnić również szereg innych czynników, przede wszystkim tych specyficznych dla systemów nawigacji satelitarnej (m.in. zapewnienie antenie dobrej widoczności niebosłonu) równie istotnie wpływających na jakość pracy całego urządzenia.

W typowych zastosowaniach mobilnych należy sobie odpowiedzieć na trzy pytania:

- w jakim położeniu będzie najczęściej znajdowała się antena (np. czy będzie umiejscowiona w określonej konfiguracji, np. na relatywnie dużej, metalowej powierzchni,

skierowana ku górze, czy też jej orientacja w przestrzeni może być zupełnie dowolna),

- w jakich warunkach będzie pracować (np. spodziewane maksymalne prędkości i dynamika ich zmian) oraz jakie są związane z nimi ograniczenia determinujące jej kształt (np. dobra opływowość strug powietrza),
- wymiary fizyczne, odporność na warunki środowiskowe (praca w szerokim zakresie temperatur, przy dużej wilgotności, w środowisku agresywnym, przy narażeniu na promieniowanie UV, co określa wymagania odnoszące się do obudowy anteny, a także jej szczelności), szczególnie istotne dla anten np. do zastosowań w lotnictwie czy w żegludze morskiej.

W najbardziej wymagających aplikacjach stacjonarnych, jakimi są stacje referencyjne (do zastosowań geodezji satelitarnej, stacje precyzyjnego pomiaru czasu) szczególnie istotne wydają się być zupełnie inne aspekty:

- stabilność centrum fazowego anteny,
- stopień eliminacji zakłóceń związanych z wielodrogowością sygnału,
- wpływ długości toru antenowego (przy ultraprecyzyjnych pomiarach czasu wykorzystywanych do synchronizacji systemów).

1. Podstawowy podział anten GNSS

1.1. Podział ze względu na rodzaj charakterystyki promieniowania

Jak każda antena, anteny stosowane w systemach GNSS mają określone *charakterystyki promieniowania* (zdolność do odbierania sygnałów z różnym skutkiem, w zależności od kierunku, z którego nadchodzi fala elektromagnetyczna).

Charakterystyka promieniowania anteny jest polem skalarnym w przestrzeni dwuwymiarowej (argumenty φ – kąt azymutu, θ – kąt elewacji). Ma postać zamkniętej powierzchni w układzie współrzędnych, w którego środku znajduje się antena, określoną równaniem we współrzędnych sferycznych φ, θ, r . W tej reprezentacji φ i θ są zmiennymi niezależnymi, natomiast r określona jest przez wartość charakterystyki promieniowania tejże anteny dla danych φ i θ .

W praktyce inżynierskiej rzadko podaje się charakterystyki w przedstawionej formie (wyjątkiem są dane w postaci

numerycznej znajdujące się w opracowanych dla konkretnego modelu anteny plikach komputerowych) ze względu na brak możliwości ich graficznego przedstawienia na płaszczyźnie dwuwymiarowej z dostateczną dokładnością i w sposób jednoznaczny. Z tego powodu w dokumentacji podaje się zazwyczaj przekroje charakterystyk promieniowania w dwóch ortogonalnych względem siebie płaszczyznach. W przypadku anten o liniowej polaryzacji charakterystyki określa się zazwyczaj w płaszczyznach pola elektrycznego E (płaszczyźnie, w której „zamykają się” linie pola elektrycznego) oraz pola magnetycznego H (płaszczyźnie, w której „zamykają się” linie pola magnetycznego) określane jako płaszczyzny pola magnetycznego H. Płaszczyzny te są wzajemnie ortogonalne.

Ze względu na przyjętą w systemach GNSS kołową polaryzację anten, nie można określić płaszczyzn promieniowania jako E i H. Mimo to również w odniesieniu do tego typu anten ich charakterystyki prezentuje się jako dwuwymiarowe przekroje. Zazwyczaj przyjmuje się płaszczyzny, na których przecięciu znajduje się maksimum promieniowania anteny (wszak w większości zastosowań kierunek ten interesuje nas najbardziej).

W antenach systemów GNSS, w kontekście możliwych zakłóceń powstałych w wyniku zjawiska wielodrogowości sygnału radiowego, należy zwrócić uwagę na charakterystykę anteny dla kierunków, z których nie nadchodzi do anteny fala bezpośrednio z satelity, lecz po uprzednim odbiciu od okolicznych przeszkód. Ten niuans jest wyznacznikiem jakości anteny. Projektując antenę przeznaczoną do odbiorników GNSS, nie maksymalizuje się jej zysku (do czego jedyną drogą prowadzi poprzez zawężenie charakterystyki promieniowania), lecz stara się, aby charakterystyka dla kątów elewacji powyżej określonej wartości (np. 5°) była możliwie równomierna, natomiast poniżej tego kąta, możliwie szybko jej wartość malała.

Wobec powyższego, według podziału anten GNSS ze względu na charakterystykę promieniowania wyróżniamy proste i tanie anteny stosowane w urządzeniach przenośnych, oraz anteny stacjonarne, w których poza elementem czynnym (promiennikiem) znajduje się struktura współosiowych cylindrycznych dławików ćwierćfalowych (tzw. *choke rings*) zapewniających duże tłumienie sygnałów nadchodzących do anteny z kierunków leżących poniżej granicznego kąta elewacji.

1.2. Podział ze względu na konstrukcję mechaniczną

W niektórych rodzajach aplikacji projektantowi zależy przede wszystkim na tym, aby odebrać sygnały GNSS i tym samym wyznaczyć pozycję nawet z relatywnie dużym błędem, nie dbając o jakość sygnału. Taka sytuacja ma miejsce w nawigacji samochodowej, gdzie wykorzystując potencjalnie duże możliwości obliczeniowe procesora nawigacji pozwalające na zastosowanie odpowiedniego algorytmu filtrowania oraz dostępność dobrej jakości podkładu mapowego, można pozycję „przykleić” (ang. *map matching*) do mapy, dając użytkownikowi złudzenie precyzyjnego wskazania. Tutaj system antenowy jest prostszy i wykorzystuje się zwykle anteny typu „patch” (określane

jako anteny mikropaskowe, tj. zbudowane w technologii linii mikropaskowych) wlutowane bezpośrednio w płytę PCB blisko chipsetu GNSS. Swoim rozmiarem i kształtem przypominają znaczek pocztowy. Koszt takich anten oscyluje w granicach kilkunastu PLN.

Przeciwieństwem podanego przykładu są stacje referencyjne, w których odbiornik GNSS znajduje się w pomieszczeniach o ustabilizowanych warunkach środowiskowych, i zazwyczaj oddalony jest o wiele metrów od anteny. Antenę łączy się z odbiornikiem za pomocą kabla współosiowego, wnoszącego stałe opóźnienie sygnału w zmieniających się warunkach środowiskowych oraz charakteryzującego się brakiem dyspersji. W celu poprawy odstępu sygnału do szumu stosuje się wzmacniacze niskoszumne umiejscawiane przy antenie, co do jakości których również stawiane są restrykcyjne wymagania. Tor antenowy musi być bardzo dobrze dopasowany impedancyjnie, aby powstające w nim odbicia nie zdegradowały jakości odebranego sygnału. Spełnienie powyższych kryteriów wiąże się zazwyczaj z koniecznością stosowania bardzo drogich i zaawansowanych technicznie rozwiązań, w których same anteny mają z reguły stosunkowo duże gabaryty (masa rzędu 8 kg), a ich koszt zaczyna się od kilkunastu tysięcy PLN za sztukę.

Rozwiązaniem pośrednim są anteny dedykowane do precyzyjnych, ale nie tak wymagających jak stacje referencyjne zastosowań, np. do prac terenowych wykorzystujących geodezję satelitarną. Cechują się relatywnie dobrymi parametrami, dużą odpornością na czynniki atmosferyczne i mechaniczne, a ich wymiary pozwalają na swobodne montowanie na zestawach przenoszonych przez jednego człowieka.

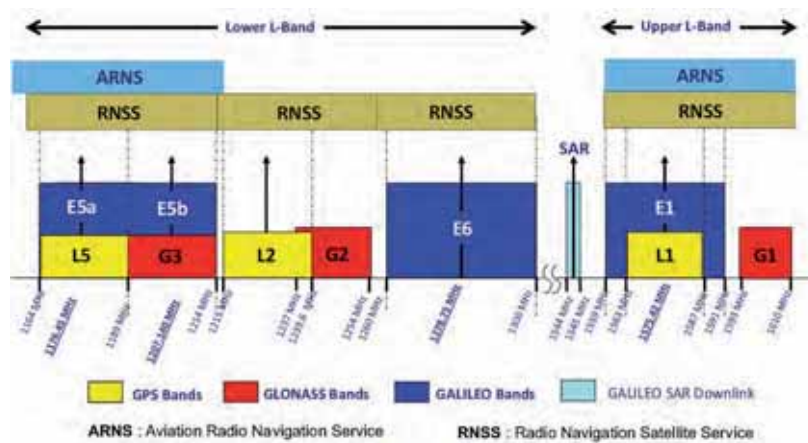
Osobną kategorię stanowią anteny do zastosowań specjalnych, np. w lotnictwie, służbie morskiej czy wojsku. Są to anteny o przeciętnych parametrach i wymiarach. Ich wysoka cena związana jest z koniecznością uzyskania przez producenta stosownych certyfikatów pozwalających na stosowanie ich w rozwiązaniach specjalnych, oraz ze specyficznej budowy pozwalającej na ich montaż np. na samolotach. Anteny tego typu mają specjalnie uszczelnioną konstrukcję i największą odporność na niekorzystne warunki środowiskowe.

Aplikacje stacjonarne, np. stacje referencyjne, wykorzystują anteny GNSS umocowane z reguły na dachach budynków. Powoduje to, że anteny narażane są na istotne wahania temperatury otoczenia, szczególnie w okresie letnim, gdzie intensywne promieniowanie słoneczne powoduje znaczne podwyższenie temperatury otoczenia. Z drugiej strony, w okresie jesienno-zimowym, anteny muszą być zabezpieczone przed opadami deszczu i zaleganiem śniegu. Wymusza to stosowanie kopuł ochronnych (ang. *radome* – połączenie słów *radar* i *dome*) wykonanych z materiałów minimalnie tłumiących promieniowanie mikrofalowe.

W aplikacjach mobilnych najważniejsza jest wytrzymałość mechaniczna na drgania oraz upadki. Profesjonalni producenci anten podają odpowiednie parametry i normy, wymagania których spełniają ich produkty w zakresie odporności na wibracje, szok mechaniczny itp.

1.3. Podział ze względu na przenoszone pasma częstotliwości

Globalne Systemy Nawigacji Satelitarnej (GNSS) działają w paśmie L, zdefiniowanym przez Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny ITU (International Telecommunication Union) jako zakres promieniowania mikrofalowego o częstotliwościach od 1 GHz do 2 GHz (długość fali 30–15 cm).



Rys. 1. Pasma częstotliwości wykorzystywane przez GNSS [9]

Fig. 1. Frequency bands used by GNSS [9]

Producenci anten oferują modele jedno- i wielopasmowe, ale podstawowym pasmem wykorzystywanym przez niemal wszystkie odbiorniki GNSS jest pasmo L1. Jest to pasmo częstotliwości wykorzystywane do transmisji m.in. cywilnego kodu C/A systemu GPS, dlatego każdy odbiornik GNSS powinien być wyposażony w antenę umożliwiającą poprawny odbiór sygnałów GNSS co najmniej w tym paśmie.

Drugim co do popularności pasmem używanym przez bardziej zaawansowane odbiorniki GPS jest pasmo L2. Transmitowany jest nim kod wojskowy, jednak wiele cywilnych, wieloczęstotliwościowych odbiorników wykorzystuje pewną specyficzną właściwość [2] propagacji sygnału przez atmosferę, która daje znaczącą poprawę jakości wskazań uzyskiwanych z odbiornika wykorzystującego sygnały GNSS odbierane również z tego pasma.

Najnowsze generacje satelitów GPS, dopiero co wprowadzanych na orbitę, wykorzystują również trzecie pasmo L5, traktowane jako pasmo do wykorzystania w aplikacjach „Safety of Life”.

Odbiorniki systemów GALILEO oraz GLONASS wykorzystują bardzo zbliżone pasma częstotliwości do systemu GPS. Najbardziej popularne typy anten mają na tyle szerokie pasmo 3 dB (tj. pasmo wokół danej częstotliwości środkowej, w obrębie którego zysk anteny nie spada bardziej niż o 3 dB), że można je stosować do odbioru dowolnego systemu GNSS bez zauważalnej różnicy w mocy odbieranego sygnału. Uzyskuje się wtedy możliwość pełnego wykorzystania odbiorników wielosystemowych, znacząco poprawiając jakość ich wskazań nawet w trudnych warunkach odbioru sygnałów GNSS.

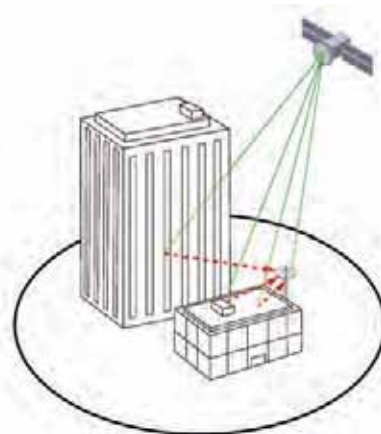
1.4. Podział ze względu na sposób zasilania

Dostępne na rynku anteny GNSS to w większości anteny aktywne – anteny z wbudowanym niskoszumnym wzmacniaczem w.cz. kompensującym straty sygnału w trakcie przesyłania kablem antenowym. Anteny tego typu wymagają zasilania za pomocą podłączonej żyły gorącej kabla antenowego do źródła prądu DC (o napięciu rzędu kilku, maksymalnie kilkunastu voltów) z użyciem odpowiedniego separatora sygnału w.cz./DC.

Dla aplikacji, w których antenę można instalować bezpośrednio przy chipsecie GNSS, stosuje się najczęściej pasywne anteny typu patch, nie wymagające zasilania. Przeznaczenie aplikacji tego typu zawęża się jednak tylko do rozwiązań typu „hand-held”, a więc telefonów komórkowych, nawigacji turystycznych czy samochodowych, i nie jest stosowane w aplikacjach profesjonalnych.

2. Kluczowe parametry anten przeznaczonych do aplikacji precyzyjnych

Omówione dalej aspekty dotyczą aplikacji wymagających najbardziej precyzyjnych wskazań pozycji i czasu, w których stosowane są zaawansowane odbiorniki wieloczęstotliwościowe. W badaniach opisanych w artykule użyto tanich odbiorników jednoczęstotliwościowych (w paśmie L1), które są przeznaczone do wykorzystania raczej na rynku masowym niż w aplikacjach profesjonalnych. Jednak wspólnym problemem dla odbiorników z obydwu obszarów rynku, istotnym z punktu widzenia warunków ich pracy, jest niekorzystne zjawisko wielodrogowości sygnału, jakie szczególnie obserwuje się w miejscach silnie zurbanizowanych. Jego wpływ może zostać ograniczony poprzez użycie anten o specyficznej konstrukcji.

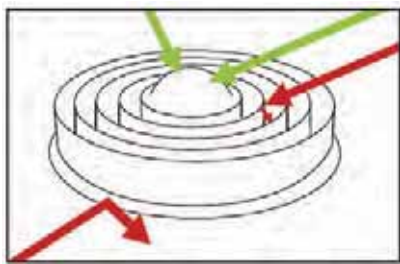


Rys. 2. Powstawanie zjawiska wielodrogowości odbieranego sygnału GNSS [7]

Fig. 2. Multipath effect in GNSS signals reception [7]

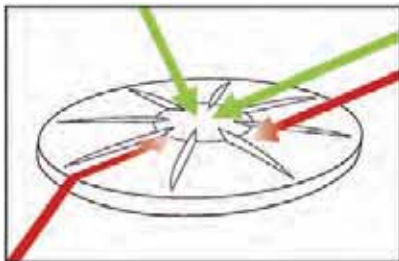
2.1. Techniki ograniczające wpływ zakłóceń związanych z wielodrogowością sygnału GNSS

Najczęstszym mechanizmem powodującym zakłócenia, wpływającym na jakość określania pozycji, jest zjawisko wielodrogowości sygnału GNSS, jaki dociera do anteny. Idealne warunki pracy odbiornika są wówczas, gdy sygnały odbierane przez jego antenę dochodzą bezpośrednio z satelitów GNSS. Jest to sytuacja wyidealizowana, gdyż w naturalnym środowisku do anten docierają również sygnały odbite. Z uwagi na fakt, że pomiar GNSS to pomiar stadiometryczny [2], każdy sygnał przychodzący do anteny niebezpośrednio od satelity powoduje istotne zwiększenie błędu określenia pozycji.



Rys. 3. Eliminacja niepożądanych sygnałów w antenie typu Choke Ring [7]

Fig. 3. Elimination of undesirable signals in Choke Ring type antenna [7]



Rys. 4. Pochłanianie niepożądanych sygnałów w antenie wykorzystującej technologię „stealth” [7]

Fig. 4. Consumption of undesirable signals in “stealth” type antenna [7]

W odbiornikach, szczególnie najbardziej zaawansowanych, stosowane są liczne techniki wykrywania i eliminowania sygnałów zakłócających (np. uwzględnianie tylko sygnału, który został odebrany najwcześniej), jednak kluczowym czynnikiem poprawiającym jakość sygnału jest odpowiednia charakterystyka anteny GNSS ograniczająca zjawisko wielodrogowości sygnału (ang. *mitigation of multipath effect*), uzyskana dzięki jej specyficznej konstrukcji oraz zastosowaniu odpowiednich materiałów. Anteny tego typu są jednak bardzo drogie i mają relatywnie spore gabaryty, stąd też stosowane są w zasadzie tylko i wyłącznie do aplikacji wymagających ultraprecyzyjnych pomiarów (np. stacje referencyjne GNSS).

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano dwie profesjonalne anteny o specyficznej konstrukcji osłabiającej wpływ zjawiska wielodrogowości sygnału:

- Leica AR25,
 - Trimble Zephyr Geodetic,
- w których stosowane są dwie różne techniki osłabiania wpływu wielodrogowości sygnału, odpowiednio:
- Choke Ring z elementami Dorne-Margolin,
 - bazujące na technologii materiałów typu „stealth”.

Konstrukcja tych anten, z poglądowym zaznaczeniem użytych technik mitygacji sygnałów odbitych, została przedstawiona na rys. 3 i 4.

2.1.1. Technika mitygacji sygnałów odbitych w antenach typu choke-ring

W antenie typu choke-ring do ukształtowania charakterystyki, która cechuje się dużym tłumieniem sygnałów dochodzących do niej pod małymi a także ujemnymi kątami elewacji stosuje się dławiki ćwierćfalowe zrealizowane w postaci wydrążonych w metalowym korpusie współosiowych pierścieni, o głębokości równej $\frac{1}{4}$ długości fali odpowiadającej częstotliwości pracy anteny. Dławiki tej konstrukcji uniemożliwiają przepływ prądu w.c. w poprzek ich grzbietów (zwarcie na dnie transformowane jest na rozwarcie na wysokości grzbietów), dzięki czemu element czynny anteny jest „odizolowany” od reszty konstrukcji, w szczególności od ścianek bocznych i spodu anteny na których to indukują się prądy pochodzące od fali elektromagnetycznej dochodzącej do anteny pod małymi, a także ujemnymi kątami elewacji.

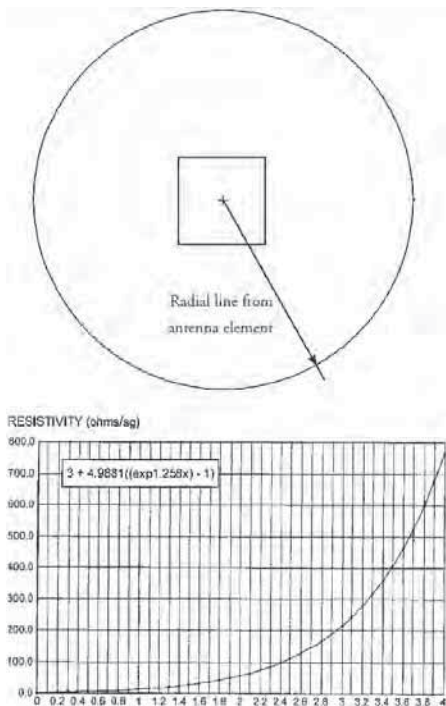
2.1.2. Technika mitygacji sygnałów odbitych w antenach stosujących technologię materiałów pochłaniających energię w.c. („stealth technology”)

W antenie tego typu tłumienie sygnałów nadchodzących do anteny pod małymi oraz ujemnymi kątami elewacji uzyskano dzięki zastosowaniu jako płaszczyzny masy materiału, którego rezystancja powierzchniowa rośnie wraz z odległością od środka anteny, w którym umieszczony jest element aktywny. Dzięki temu energia związana z prądem zaindukowanym w płaszczyźnie masy (szczególnie na jej spodniej części pochodząca od fali odbitej od ziemi) zostaje pochłonięta. Na rys. 5 przedstawiono wykres zależności rezystancji powierzchniowej płaszczyzny masy anteny w funkcji odległości od jej środka. Taki rozkład optymalizuje właściwości anteny ze względu na tłumienie sygnałów odbitych od umiejscowionych nisko względem miejsca zamontowania anteny przeszkód mających wpływ na powstawanie zjawiska wielodrogowości sygnału GNSS.

2.1.3. Centrum fazowe anteny i jego stabilność

Aktualnie dostępne techniki wyznaczania pozycji przy pomocy odbiorników GNSS dają na tyle dużą dokładność (rzędu milimetrów), że bardzo istotna dla poprawności wykonania pomiaru jest znajomość położenia centrum fazowego anteny względem jej konstrukcji mechanicznej.

Centrum fazowe anteny to miejsce (punkt), względem którego wypromieniowana przez antenę fala elektroma-



Rys. 5. Wykres zmian rezystywności w funkcji odległości od środka anteny [6]

Fig. 5. Chart presenting resistivity as a function of a radial line from antenna element [6]

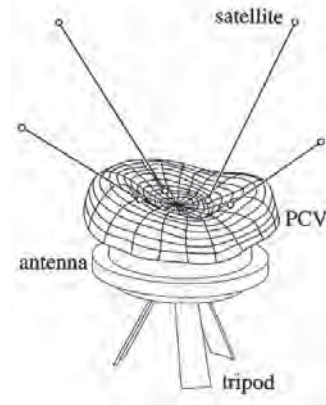
gnetyczna propaguje sferycznie. Mimo że definicja dotyczy przypadku, w którym antena wypromieniowuje falę elektromagnetyczną, pojęcie centrum fazowego najczęściej utożsamiane jest z antenami odbiorczymi systemów GNSS. Centrum fazowe anteny jest więc punktem, dla którego faktycznie wyznaczana jest pozycja geograficzna.

Z uwagi na fakt, że punkt centrum fazowego anteny zwykle nie pokrywa się z jej centrum mechanicznym, użytkownik zamierzający bardzo dokładnie wyznaczyć pozycję musi uwzględnić w pomiarach odpowiednie przesunięcie. Wartości definiujące to przesunięcie można odczytać w notach katalogowych anten.

Znaczny wpływ na dokładność pomiarów w aplikacjach wymagających największej precyzji mają dwa czynniki:

- stabilność centrum fazowego w zależności od kąta padania fali elektromagnetycznej na antenę (rys. 6),
- przesunięcie centrów fazowych dla różnych pasm odbieranych częstotliwości L1/L2/L5.

Pierwszy czynnik wynika z faktu, że w przypadku wypromieniowania fali elektromagnetycznej przez taką antenę, płaszczyzna stałej fazy nie tworzyłaby sfery, której środek określałby jednoznacznie centrum fazowe anteny. W tej sytuacji każdy wycinek płaszczyzny stałej fazy posiada określony środek krzywizny, który znajduje się w różnych punktach dla różnych kątów azymutu i elewacji. Wobec tego położenie centrum fazowego anteny jest funkcją kątów φ i θ . Anteny profesjonalne mają specjalnie zaprojektowaną konstrukcję minimalizującą tę zmienność.



Rys. 6. Niestabilność centrum fazowego anteny GNSS [8]

Fig. 6. Phase Center Variation (PCV) of GNSS antenna [8]

Drugim z czynników zakłócających pomiary w aplikacjach wymagających najwyższych precyzji jest zmienność położenia centrum fazowego anteny w zależności od długości padającej na nią fali. Jest to istotne w przypadku wykorzystania odbiorników wieloczęstotliwościowych, niebędących jednak przedmiotem niniejszych badań.

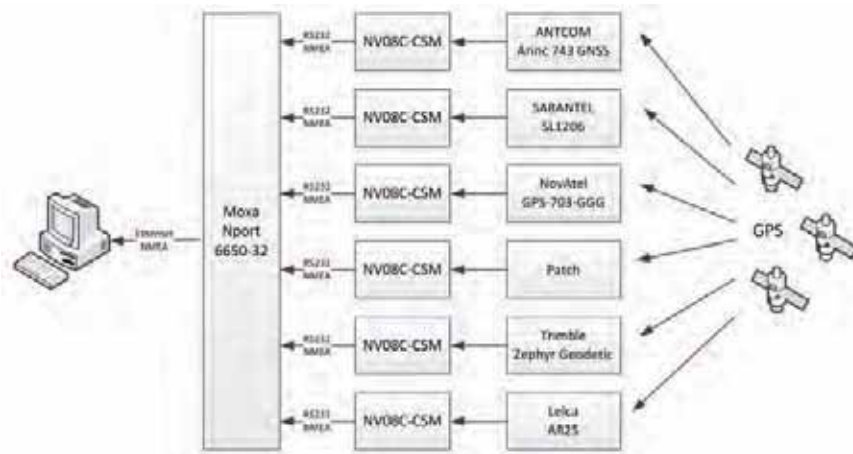
2.2. Zmienny czas propagacji sygnału dla różnych pasm GNSS

W profesjonalnych systemach synchronizacji czasu wykorzystujących odbiorniki GNSS istotne są nawet najmniejsze fluktuacje czasu propagacji sygnału na różnych pasmach. Wynikają one z różnych prędkości propagacji fali elektromagnetycznej przechodzącej przez atmosferę (szczególnie przez jej górną i najgrubszą warstwę – jonosferę) oraz z uwarunkowań związanych z samym torem antenowym. O ile pierwszy czynnik jest zjawiskiem możliwym do automatycznego skompensowania (wyliczone są tzw. poprawki jonosferyczne umożliwiające wyeliminowanie z pomiaru jednego z głównych czynników wpływających na błąd określania pozycji), o tyle drugi ma charakter lokalny, wynikający z jakości urządzeń. Niektórzy producenci anten podają parametr *L1–L2 Differential Propagation Delay*, zdefiniowany jako różnica czasu propagacji sygnału odbieranego na różnych pasmach GNSS. Może on osiągać wartości rzędu pojedynczych ns, co może mieć zauważalny wpływ na pracę odbiorników wieloczęstotliwościowych, dla specyficznych aplikacji związanych z synchronizacją czasową systemów.

2.3. Tłumienie przód-tył

Jest to parametr określany jako *Front-Back Ratio* i jest wyrażany zazwyczaj w dB. Określany jest jako różnica (w skali decybelowej) zysku energetycznego dla sygnału odbieranego z kierunku maksimum charakterystyki znajdującego się zazwyczaj w zenicie względem anteny (kąt elewacji $+90^\circ$) do zysku energetycznego dla kierunku przeciwnego (zazwyczaj kąt elewacji -90°).

Parametr *Front-Back Ratio* określa stopień odporności anteny na sygnały odbite od powierzchni poniżej anteny. Podczas projektowania anteny producenci dążą do jego maksymalizacji.



Rys. 7. Układ pomiarowy zastosowany w przeprowadzonych badaniach

Fig. 7. Measuring system used in performed researches

Thumieniu sygnału odbitego od powierzchni w sąsiedztwie anteny sprzyja również odwrócenie polaryzacji fali podczas odbicia. Sygnały przychodzące bezpośrednio od satelitów GNSS mają polaryzację kołową prawoskrętną (RHCP). Po jednokrotnym odbiciu polaryzacja fali elektromagnetycznej się odwraca (na LHCP).

3. Układ pomiarowy

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem opracowanych w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP dwóch płyt testowych, zawierających po trzy sztuki jednakowych jednoczesotliwościowych odbiorników GNSS przedstawionych na rys. 8.

Jako odbiorniki wykorzystano chipsety GNSS firmy NVS GNSS, model NV08C-CSM z najnowszym dostępnym w czasie badań firmwarem, tj. w wersji 0206.

Konstrukcja płyty testowej została opracowana specjalnie z myślą o zapewnieniu możliwie jednakowych warunków dla wszystkich osadzonych na nich chipsetów GNSS:

- użyto jednakowych odbiorników GNSS, pochodzących z tej samej serii produkcyjnej,
- projekt PCB zawiera identyczną, powieloną topologię ścieżek dla każdego z odbiorników,
- wszystkie zastosowane pomocnicze elementy pasywne pochodzą z serii o podwyższonych parametrach tolerancji ich wykonania,

dzięki czemu zapewniono porównywalne warunki pracy dla każdego z układów.

Przeprowadzone wcześniej testy „zerowe”, to jest odbiór rzeczywistych sygnałów GNSS z użyciem splittera antenowego i porównanie wskazywanych pozycji wykazały, że wzajemna niesymetryczność wskazań odbiorników, jaka mimo to istnieje, jest w stosunku do uzyskiwanych dokładności pomiarów niska i może zostać na potrzeby niniejszych badań pominięta.

W trakcie każdej z trzech sesji badań zapewniono dla wszystkich odbiorników identyczny moment załączenia zasilania, dodatkowo każdorazowo odczekano z rozpoczęciem zapisu wyników pomiarów około 20 min na

pełną inicjalizację odbiorników, dając tym samym porównywalne szanse na odbiór pełnej informacji o efemerydach satelitów.

Biorąc pod uwagę fakt, że obecnie najpopularniejszymi z półki produktów „low-cost”, jednocześnie stosotliwościowymi odbiornikami GNSS wciąż pozostają odbiorniki „tylko GPS”, zdecydowano się na programowe ograniczenie funkcjonalności użytych odbiorników do odbioru sygnałów tylko z tej konstelacji. Istotnie wpłynęło to na jakość określania pozycji, szczególnie w sytuacji trudnego dla odbioru sygnałów GNSS środowiska, w jakim został posadowiony układ pomiarowy, powodując zmniejszenie ilości odbieranych sygnałów, a przez to degradację wskazań w tych warunkach.

Do układu pomiarowego przedstawionego na rys. 7 zostały dołączone anteny:

Do układu pomiarowego przedstawionego na rys. 7 zostały dołączone anteny:

- ANTCOM Arinc 743 GNSS – antena stosowana w lotnictwie,
- SARANTEL SL1206 – antena stosowana w niektórych modelach nawigacji turystycznych,
- NovAtel GPS-703-GGG – antena stosowana w terenowych pracach geodezyjnych,
- antena typu „Patch” – popularny model taniej anteny ogólnego przeznaczenia, stosowanej szeroko na rynku urządzeń „low-cost”,
- Trimble Zephyr Geodetic – antena do zastosowań w precyzyjnych pracach geodezyjnych,
- Leica AR25 – antena do zastosowań w stacjach referencyjnych,

będące na wyposażeniu Laboratorium Techniki Satelitarnej PIAP.

Pierwsze pięć z nich zostało regularnie rozmieszczonych na specjalnie zaprojektowanym statywie, umieszczonym na trójnogu pomiarowym. Antena Leica AR25, ze względu na swoje wymiary i ciężar, została zamocowana na osobnym statywie fotograficznym i była każdorazowo odpowiednio rozłokowywana, pracując w porównywalnych warunkach.

Na szczególną uwagę zasługuje popularna, aktywna, prosta antena typu „patch”, najczęściej sprzedawana jako opcja poprawiająca dostępność sygnałów GNSS i będąca alternatywą do wbudowanych w samochodowe nawiga-



Rys. 8. Zdjęcie płyt testowych z odbiornikami GNSS zastosowanych w przeprowadzonych badaniach

Fig. 8. Picture of evaluation boards equipped with GNSS receivers used in performed researches



Rys. 9. Zdjęcie układu pomiarowego z zestawem anten w czasie sesji pomiarowej nr I

Fig. 9. Picture of measuring system connected to the set of antennas during measuring session no. I

cje anten. Antena oznaczona jest jako GPS MA-GPS-06, niemniej jest to oznaczenie brandowane dla polskiego importera anten tego typu i o podobnych parametrach można znaleźć na rynku bardzo dużo. Antena była najtańszą z anten użytych w badaniach, jako jedyna była wyposażona w niedemontowalny, około 4 m kabel w.cz. klasy RG174 o wyraźnie słabszych parametrach elektrycznych niż kable użyte do podłączenia pozostałych anten do odbiorników. W związku z tym testowany odbiornik mógł spodziewać się wyraźnie najslabszego sygnału GNSS.

4. Oprogramowanie

Do opracowania wyników badań zastosowano przygotowane w Laboratorium Technik Satelitarnych PIAP dedykowane oprogramowanie w środowisku MATLAB, dzięki czemu zautomatyzowano żmudne prace nad surowymi danymi.

Zrealizowano trzy sesje pomiarowe trwające łącznie trzy pełne doby gwiazdowe, każda po ponad 86 000 s. Wybrany okres trwania pomiarów umożliwił sprawdzenie jakości pracy odbiorników w trakcie kompletnego obrotu konstelacji GPS na niebie, pozwalając na uniezależnienie wyników pomiarów od wpływu aktualnej geometrii satelitów GPS na pracę odbiorników.

Przyjęto częstotliwość raportowania odbiorników GNSS równą 1 s, do dalszej analizy zebrano łącznie około 14 mln ramek NMEA zajmujących blisko 770 MB przestrzeni na dysku.

W wyniku analizy zebranych danych pozyskano ponad 1 550 000 rekordów zawierających pełną informację z każdego z odbiorników, które w dalszej kolejności zostały zaimportowane i przetworzone w drodze postprocessingu w środowisku MATLAB.

5. Stanowiska pomiarowe

W celu przekrojowego zilustrowania wpływu rodzaju anteny na jakość pracy odbiornika GNSS przeprowa-

dzono trzy sesje pomiarowe, każdorazowo zestaw pomiarowy został ulokowany w miejscu o zróżnicowanym stopniu trudności odbioru sygnałów GNSS:

- średnio trudne – sesja nr I – na trawniku po środku placu między trójkondygnacyjnymi budynkami, oddalonymi od siebie o około 30 m. Od strony północnej, jak i południowej, nieboskłon był przysłonięty w różnym stopniu łącznikiem między budynkami oraz wysokimi drzewami i budynkiem marketu budowlanego,
- bardzo trudne – sesja nr II – sytuacja jw., ale zestaw pomiarowy został dosunięty do ściany budynku,
- doskonale – sesja nr III – zestaw został wyniesiony na dach budynku, co zapewniło nieograniczoną widoczność nieboskłonu.

Na rys. 10 przedstawiono zdjęcie satelitarne fragmentu siedziby Instytutu z zaznaczonymi stanowiskami pomiarowymi.



Rys. 10. Położenie stanowisk pomiarowych na terenie PIAP

Fig. 10. Locations of measuring system in PIAP

6. Wyniki pomiarów

6.1. Dostępność sygnału GNSS

Kluczowym czynnikiem wpływającym na jakość wskazywanych przez odbiorniki pozycji geograficznych jest dostępność sygnałów nadawanych przez satelity GNSS. O ile zwiększanie liczby dostępnych sygnałów ponad określony próg nie wnosi wiele dla poprawy wskazań, o tyle spadek liczby odbieranych sygnałów poniżej 4 sprawia, że odbiornik jest zmuszany do przyjęcia określonych założeń związanych z aktualnym jego położeniem, istotnie wpływających na jakość jego pracy. Opisana sytuacja może być szczególnie widoczna w aplikacjach mobilnych. Jeszcze większy spadek liczby odbieranych sygnałów GNSS sprawia, że wypada on z trybu określania pozycji na podstawie rzeczywistych pomiarów pseudoodległości i przechodzi w tryb *dead-reckoning*.

W tab. 1 zestawiono liczby dostępnych sygnałów GNSS w trakcie wykonanych sesji pomiarowych.

6.1.1. Sesja pomiarowa nr I i nr II

Szczególnie trudne warunki do odbioru sygnałów GNSS zostały zadane w trakcie drugiej sesji pomiarowej, gdzie stanowisko pomiarowe zostało praktycznie dosunięte do wysokiej ściany jednego z budynków Instytutu. Ściana ta przesłaniała nieboskłon od strony południowo-wschodniej. Sygnały były też odbijane przez ścianę sąsiedniego budynku po przeciwnej stronie placu, znajdującego się około 30 m od stanowiska pomiarowego, co dodatkowo powodowało powstanie zjawiska wielodrogowości. Sytuacja ta została zilustrowana na rys. 11.

Liczba odbieranych sygnałów satelitarnych dla odbiornika z anteną SARANTEL SL1206 w sesji nr I (na środku placu) oraz w sesji nr II (przy ścianie) spadała do 3, co powodowało wyraźnie zauważalną degradację jakości jego



Rys. 11. Stanowisko pomiarowe w trakcie sesji II

Fig. 11. Measuring system during session no. II

Tab. 1. Tabela prezentująca dostępność sygnałów GNSS

Tab. 1. Table showing GNSS signal availability

Antena	Minimalna liczba dostępnych satelitów	Maksymalna liczba dostępnych satelitów	Średnia liczba dostępnych satelitów	Odchylenie standardowe liczby satelitów
Stanowisko pomiędzy budynkami				
ANTCOM Arinc 743 GNSS	5	14	8,83	1,66
SARANTEL SL1206	3	12	7,80	1,55
NovAtel GPS-703-GGG	4	14	8,56	1,60
Patch	5	14	8,93	1,64
Trimble Zephyr Geodetic	5	13	8,72	1,58
Leica AR25	4	14	8,69	1,67
Stanowisko blisko ściany budynku				
ANTCOM Arinc 743 GNSS	4	13	8,58	1,74
SARANTEL SL1206	3	11	5,96	1,42
NovAtel GPS-703-GGG	4	12	8,33	1,64
Patch	4	14	8,83	1,77
Trimble Zephyr Geodetic	3	13	8,43	1,67
Leica AR25	4	13	8,60	1,66
Stanowisko na dachu budynku				
ANTCOM Arinc 743 GNSS	7	14	10,23	1,72
SARANTEL SL1206	6	14	10,10	1,69
NovAtel GPS-703-GGG	7	14	10,23	1,71
Patch	7	14	10,24	1,73
Trimble Zephyr Geodetic	7	14	10,22	1,71
Leica AR25	7	14	10,23	1,72



Rys. 12. Stanowisko pomiarowe w trakcie sesji III

Fig. 12. Measuring system during session no. III

wskazań, skutkującą powstawaniem „skoków” pozycji nawet o setki metrów. Po opracowaniu wyników badań, na uzyskanym wykresie można zauważyć, że w określonych chwilach czasowych wskazywane przez jeden z odbiorników pozycje geograficzne miały tendencje do ustabilizowanego ruchu w wybranym kierunku. W rzeczywistości wszystkie badania były badaniami stacjonarnymi, a opisane powyżej zachowanie się odbiornika wynikało z utrudnionej dostępności sygnałów GNSS.

Podobnie, maksymalna liczba jednocześnie odbieranych sygnałów GNSS była w tym odbiorniku o co najmniej 1 mniejsza niż dla odbiorników podłączonych do pozostałych anten. Przełożyło się to na wyraźnie mniejszą średnią liczbę śledzonych satelitów.

Odbiorniki podłączone do pozostałych anten, zarówno w pierwszej, jak i w drugiej sesji pomiarowej, wskazywały zbliżone liczby śledzonych satelitów GNSS. Ich liczba w trakcie sesji pomiarowej oscylowała w granicach 4–14.

6.1.2. Sesja pomiarowa nr III

Ostatnia sesja pomiarowa – wykonana w doskonałych dla odbioru sygnałów GNSS warunkach potwierdziła, że

w takiej sytuacji w odbiornikach przeznaczonych nawet na rynek masowy liczba śledzonych satelitów w małym stopniu zależy od rodzaju i konstrukcji anteny.

Stanowisko pomiarowe zostało rozlokowane na dachu budynku (rys. 12).

Nieograniczona przez przeszkody widoczność nieboskłonu sprawiła, że odbiorniki bez większych przeszkód miały dostęp do wystarczającej liczby sygnałów z satelitów GNSS (min. 6, max. 14). Zgodnie z oczekiwaniami pozwoliło to na osiągnięcie bardzo dobrej jakości wskazań.

6.2. Ważność ramek NMEA w sesjach pomiarowych

Dostępność sygnału GNSS zasadniczo wpływa na jakość wskazywanych pozycji. Często zdarza się, że odbiornik GNSS, mimo braku widoczności wystarczającej liczby satelitów, oblicza i wystawia dla użytkownika współ-

```
$GPGGA,161633.00,5211.6235,N,02055.2746,E,1,14,00.6,
117.0,M,39.1,M,,*53
$GPRMC,161633.00,A,5211.6235,N,02055.2746,E,00.00,
359.4,050913,,A*5B
$GPGSV,5,1,18,01,12,274,44,03,60,198,52,06,49,169,51,11,
31,283,50*7A
$GPGSV,5,2,18,14,23,137,46,15,07,027,44,16,06,200,36,18,
34,059,49*7B
$GPGSV,5,3,18,19,70,269,50,21,11,092,41,22,66,086,50,27,
61,175,51*72
$GPGSV,5,4,18,28,10,335,44,32,05,219,35,33,21,223,00,37,
30,179,00*7F
$GPGSV,5,5,18,39,30,174,00,40,22,139,00*74
$GLGSV,1,1,00*65
$GPGSA,A,3,27,16,06,18,11,15,01,28,32,03,19,
21,01.0,00.6,00.8*06
$PORZDA,001.0*3D
```

Lst. 1. Przykładowy zbiór ramek NMEA

Lst. 1. Example set of the NMEA frames

Tab. 2. Tabela prezentująca udział ważnych ramek NMEA

Tab. 2. Table showing share of valid NMEA frames

Antena	Procentowy udział ważnych ramek NMEA spośród wszystkich dostępnych, na stanowisku:		
	Środek placu	Blisko ściany	Dach budynku
ANTCOM Arinc 743 GNSS	99,98	99,78	100,00
SARANTEL SL1206	99,96	79,63	99,98
NovAtel GPS-703-GGG	99,90	99,76	100,00
Patch	99,85	99,82	100,00
Trimble Zephyr Geodetic	99,97	99,76	100,00
Leica AR25	99,92	99,49	100,00

rzędne pozycji. Nie powinny być one brane pod uwagę, gdy zależy nam na dokładności pomiaru. W przeciwnym razie użytkownik musi pogodzić się z pewnymi ograniczeniami.

Po przeprowadzeniu badań, ze zgromadzonych logów NMEA wybrano do dalszych analiz rekordy danych zgodnie z założeniem, że czas trwania każdej sesji należy ograniczyć do doby gwiazdowej.

Sprawdzono również, czy w zgromadzonych logach NMEA liczba wpisów odpowiada czasowi trwania pomiaru. W przyjętym scenariuszu badań (1 pełna ramka NMEA co 1 sekundę), liczba wpisów powinna równać się długości czasu trwania sesji pomiarowej, wyrażonemu w sekundach. W ten sposób określono, że każdy z odbiorników w trakcie wszystkich sesji pomiarowych generował poprawnie ramki NMEA i żadna z nich nie została utracona, bądź pominięta w dalszych analizach, oraz że nie wystąpiły w tym czasie przerwy w zasilaniu.

Sprawdzono również status każdego rozwiązania nawigacyjnego przez weryfikację pola *Fix Status* w ramce GGA. Pole to zaznaczone zostało w listingu kolorem czerwonym. Z dalszych analiz odrzucono wszystkie ramki ze statusem równym 0 (wskazania w danej sekundzie należy traktować jako nieważne) oraz ze statusem równym 6 (tryb *dead reckoning* wskazujący na estymację niektórych parametrów na skutek braku odbioru rzeczywistego sygnału GNSS). Do dalszych analiz pozostawiono ramki ze statusem równym 1, co oznacza ważność zawartych w nich danych. Wyniki weryfikacji przedstawiono w tab. 2.

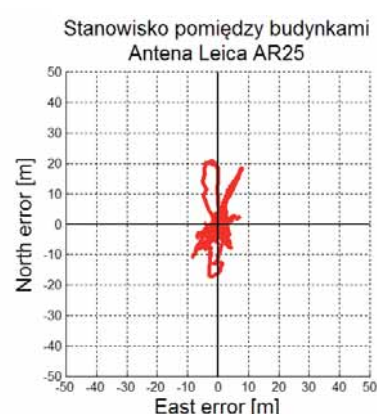
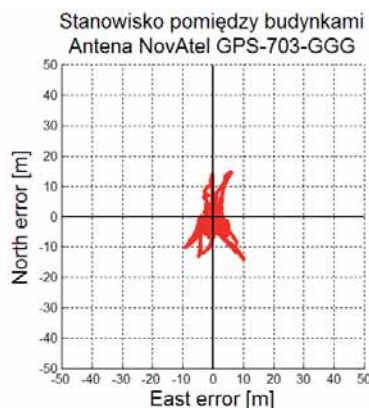
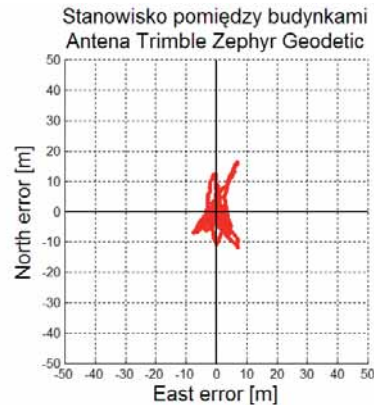
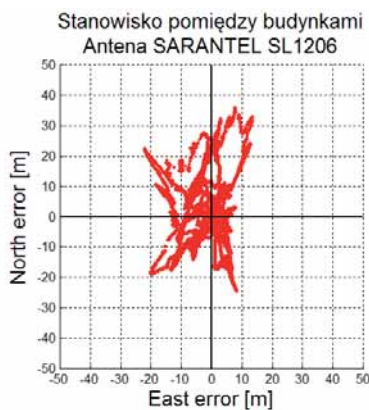
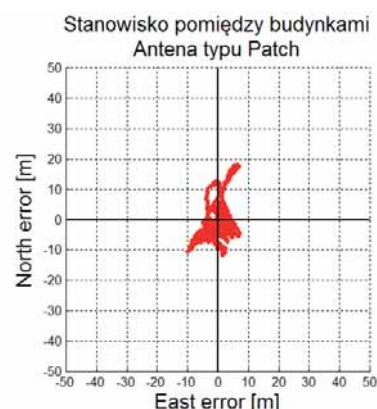
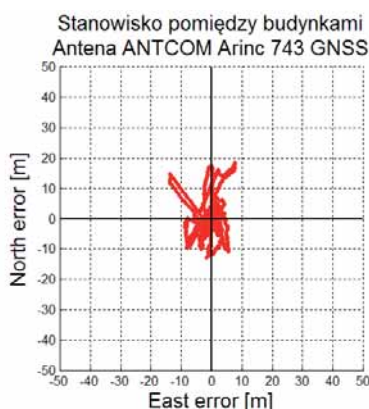
Należy zwrócić uwagę, że dla wszystkich sesji pomiarowych uzyskano prawie 100 % ważność generowanych przez odbiorniki danych NMEA, z wyjątkiem odbiornika z anteną SARANTEL SL1206, który w najtrudniejszych warunkach osiągnął bardzo niski udział ramek ważnych w stosunku do długości trwania całej sesji pomiarowej. Wyniósł on tylko około 80 %. Oznacza to, że łącznie przez blisko 5 h w ciągu doby wskazania z tego odbiornika powinny zostać przez aplikację użytkownika odrzucane.

6.3. Błędy pomiarowe pozycji na płaszczyźnie

W tab. 3 zestawiono opracowane wyniki pomiarów dla wszystkich sesji pomiarowych.

6.3.1. Analiza wyników sesji pomiarowej nr 1

Warunki do odbioru sygnałów GNSS podczas tej sesji były średnio trudne. Stanowisko pomiarowe rozmieszczone na środku placu o wymiarach 55 m × 30 m otoczone było ze wszystkich stron budynkami. Taka lokalizacja stanowiska pomiarowego spowodowała, że bezpośredni, niezakłócony odbiór sygnałów bezpośrednio z satelitów GNSS był możliwy tylko w centralnym wycinku nieboskłonu. Korelacja liczby oraz lokalizacji na nieboskłonie (kąt azymutu i elewacji z logów



NMEA) satelitów GNSS użytych do rozwiązania nawigacyjnego z układem budynków w miejscu pomiaru świadczy o tym, że niektóre sygnały GNSS dochodziły również na skutek odbić od sąsiadujących obiektów (m.in. były odbierane sygnały z satelitów znajdujących się również „za budynkami”, co nie byłoby możliwe bez refrakcji i odbić fali elektromagnetycznej).

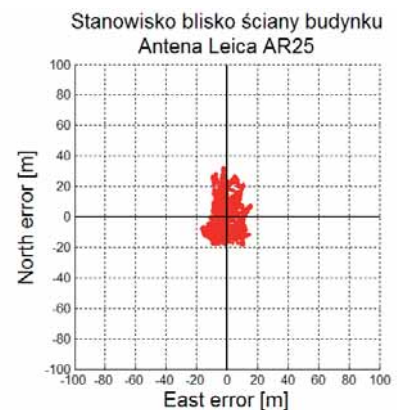
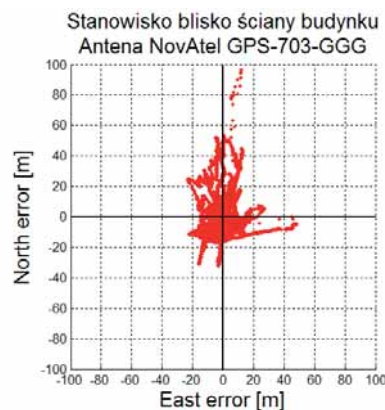
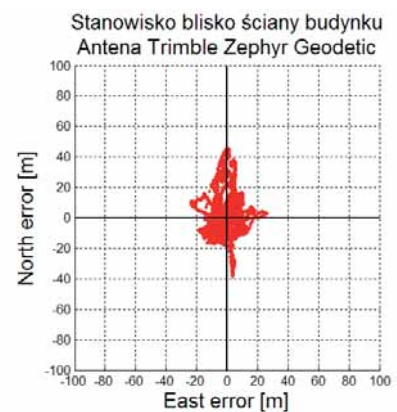
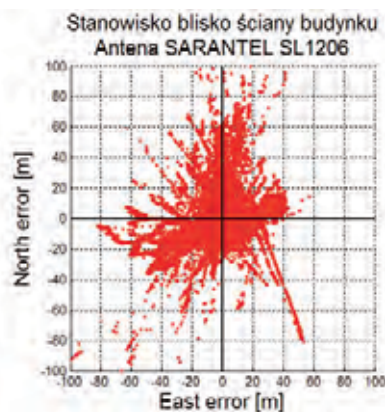
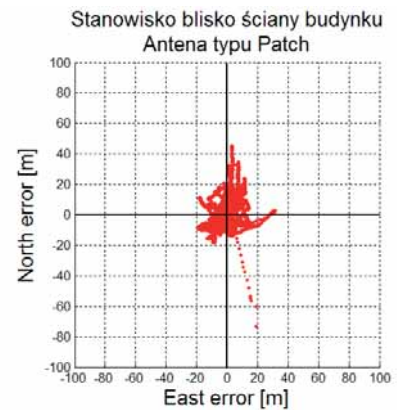
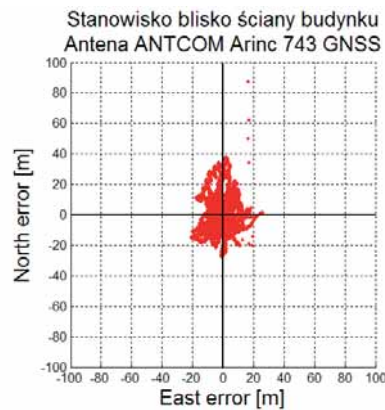
Wartości odchylenia standardowego dla składowej (komponentu) Easting oscylowały od poniżej 3 m do blisko 5 m. Dla składowej Northing, wahały się w granicach od 3,8 m do 7,8 m, a dla składowej Up odpowiednio od 7 m do 12 m. Najlepsze wyniki, wyraźnie różniące się od pozostałych anten odnotował odbiornik z anteną SARANTEL SL1206, a najlepsze odbiornik z anteną Trimble Zephyr Geodetic.

Zawężając analizę błędów wyliczonych dla kompletu wskazań w ramach sesji pomiarowej nr I tylko do błędu 2DRMS (jako najbardziej reprezentatywnego do oceny odbiornika w typowych zastosowaniach inżynierskich), wszystkie mierzone odbiorniki wskazywały pozycję na płaszczyźnie z tym błędem na poziomie 9–12 m za wyjątkiem odbiornika podłączonego do anteny SARANTEL SL1206, gdzie wyliczony błąd 2DRMS był na poziomie ponad 18 m. W tej klasie odbiorników jest to mimo wszystko błąd wskazań na całkowicie akceptowalnym poziomie.

Położenie obliczonych przez każdy odbiornik pozycji zostało przedstawione na wykresach na poprzedniej stronie.

6.3.2. Analiza wyników sesji pomiarowej nr II

Sesja pomiarowa nr II była realizowana w szczególnie trudnych warunkach, w których blisko połowa nieboskłonu od strony południowo-wschodniej była całkowicie przysłonięta przez ścianę budynku trójkondygnacyjnego, a po przeciwnej stronie trawnika, w odległości około 30 m znajdowała się taka sama ściana sąsiedniego budynku. Dodatkowe zakłócenia odbioru powodowały znajdujące się w bezpośredniej bliskości stanowiska pomiarowego metalowe elementy okratowania okien na parterze budynku (rys. 11).



Skutkiem opisanego usytuowania anten jest drastyczne, wielokrotne pogorszenie wyników uzyskiwanych przez wszystkie odbiorniki. Pomimo relatywnie niewielkiego przesunięcia stanowiska pomiarowego (tylko ok. 13 m przy zachowaniu tej samej wysokości) względem lokalizacji wybranej dla sesji pomiarowej nr I, widać znaczący wzrost wartości odchylenia standardowego dla każdej ze składowych błędów:

- Easting: od 6,6 m do 20,4 m,
- Northing: od 9,2 m do 18,4 m,
- Up: od 8,4 m do 18,6 m.

Wyraźnie najslabiej wypada w tym zestawieniu ponownie odbiornik z anteną SARANTEL SL1206. Należy zauważyć, że odbiornik z najtańszą z użytych w przeprowadzanych badaniach anteną typu „patch” dał wyraźnie lepsze wyniki dla odchylenia standardowego składowych

Northing i Up niż pozostałe odbiorniki. Przełożyło się to bezpośrednio na błędy pomiaru wyliczone dla całej sesji pomiarowej. Błąd 2DRMS zawierał się w granicach 23,7 m (odbiornik z anteną typu „patch”) do 54,9 m (odbiornik z anteną SARANTEL SL1206).

Maksymalny rozrzut chwilowych wskazań odbiorników względem ich wartości średniej może przyjmować wartości od kilkunastu do 300–400 m. Taka sytuacja ma miejsce w przypadku niewystarczającej liczby sygnałów pochodzących od różnych satelitów GNSS, gdzie odbiornik przechodzi w tryb „dead reckoning”, a wskazania pogarszają się z każdą sekundą od momentu przejścia w ten tryb. Najgorsze rezultaty w tej serii pomiarowej odnotowano dla odbiornika z anteną SARANTEL SL1206, a najlepsze z anteną Leica AR25.

Wykresy obok prezentują zarejestrowane pozycje dla każdego z odbiorników w serii pomiarowej nr II.

Uwaga 1:

Nastąpiła zmiana skali wykresów prezentujących wyniki sesji pomiarowej nr II względem sesji pomiarowej nr I.

Uwaga 2:

Naniesienie pełnego wykresu dla odbiornika z anteną SARANTEL SL1206 zmniejszyło czytelność wykresów dla pozostałych odbiorników. Zakres osi został celowo ograniczony do 200 m w każdym kierunku.

6.3.3. Analiza wyników sesji pomiarowej nr III

W doskonałych warunkach dla odbioru sygnałów GNSS, jakie miały miejsce w trakcie sesji pomiarowej nr III, zaobserwowano bardzo dobre wyniki pracy wszystkich odbiorników, chociaż również tutaj najslabiej wypadł ten współpracujący z anteną SARANTEL SL1206. Wszystkie pozostałe odbiorniki wskazywały swoje pozycje w obszarze, dla którego odchylenie standardowe dla dowolnego z komponentów było poniżej 1,1 m.

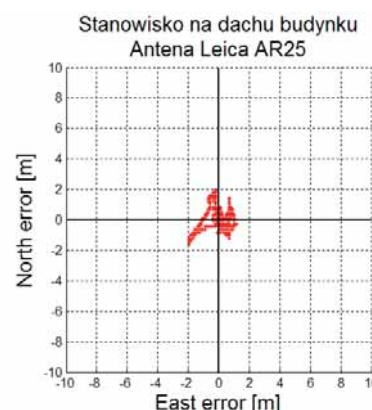
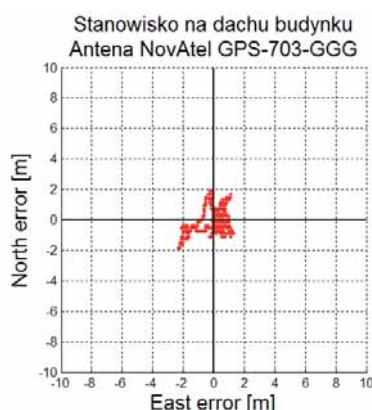
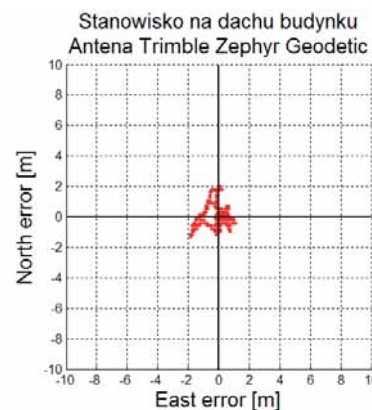
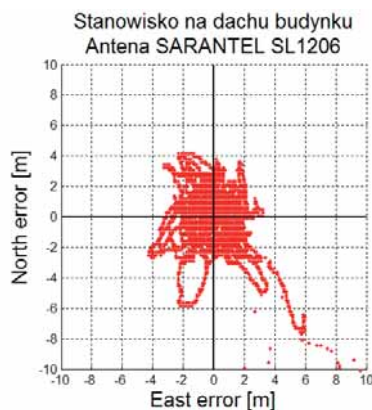
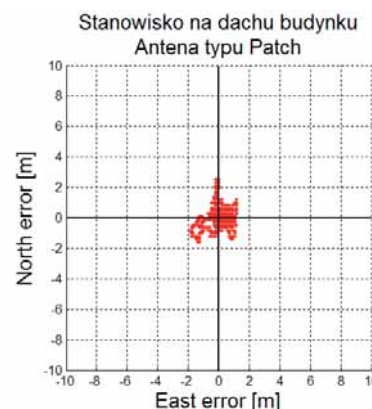
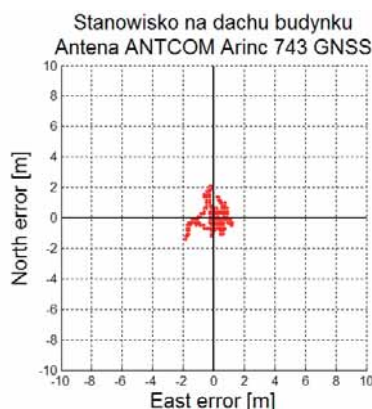
Analogiczna sytuacja ma miejsce przy analizie błędów wskazań, np. błąd 2DRMS wypadł dla wszyst-

kich 5 odbiorników poniżej 2 m. Dla odbiornika z anteną SARANTEL SL1206, wyniósł on 4,4 m.

Wskazywane przez odbiorniki pozycje podczas całej sesji pomiarowej były zbliżone do siebie i bardzo skupione wokół wartości średniej. Dla najbardziej zaawansowanych technologicznie anten (Leica, Trimble, NovAtel) można zaobserwować jednorodność wskazań.

Gdyby nie incydentalne pogorszenia jakości ich wskazań, uzyskane wyniki byłyby obarczone jeszcze mniejszym błędem. Zarejestrowane przez każdy z odbiorników w trakcie trwania tej sesji pomiarowej pozycje zostały przedstawione na kolejnych wykresach.

Wyniki badań sesji pomiarowej nr III są bardzo zbliżone do wyników badań jednego z odbiorników [3].



Tab. 3. Tabela z wynikami obliczeń błędów**Tab. 3.** Table showing errors calculation

Antena	Odchylenie standardowe dla składowej: [m]			Wartość błędu wyliczonego dla całej serii pomiarowej: [m]			
	Easting	Northing	Up	RMS	2DRMS	CEP	SEP
Stanowisko pomiędzy budynkami							
ANTCOM Arinc 743 GNSS	2,76	5,13	8,92	5,83	11,66	4,58	8,77
SARANTEL SL1206	4,84	7,79	11,92	9,17	18,34	7,36	12,71
NovAtel GPS-703-GGG	2,28	4,04	6,95	4,64	9,28	3,67	6,90
Patch	2,87	5,03	10,12	5,79	11,57	4,59	9,38
Trimble Zephyr Geodetic	2,07	3,82	7,38	4,34	8,69	3,42	6,92
Leica AR25	2,39	4,96	9,69	5,50	11,01	4,26	8,95
Stanowisko blisko ściany budynku							
ANTCOM Arinc 743 GNSS	7,87	11,81	11,67	14,20	28,39	11,48	16,17
SARANTEL SL1206	20,36	18,42	18,56	27,46	54,91	22,77	29,49
NovAtel GPS-703-GGG	8,27	13,39	12,24	15,74	31,48	12,61	17,50
Patch	7,46	9,17	8,38	11,82	23,65	9,74	12,87
Trimble Zephyr Geodetic	7,77	11,88	11,95	14,20	28,40	11,46	16,31
Leica AR25	6,55	10,45	9,57	12,33	24,66	9,90	13,71
Stanowisko na dachu budynku							
ANTCOM Arinc 743 GNSS	0,66	0,68	1,00	0,94	1,88	0,78	1,20
SARANTEL SL1206	1,39	1,70	2,42	2,19	4,39	1,81	2,83
NovAtel GPS-703-GGG	0,67	0,75	1,00	1,00	2,00	0,83	1,24
Patch	0,62	0,76	1,09	0,98	1,97	0,81	1,27
Trimble Zephyr Geodetic	0,64	0,66	1,08	0,92	1,83	0,76	1,22
Leica AR25	0,67	0,71	1,00	0,98	1,96	0,81	1,23

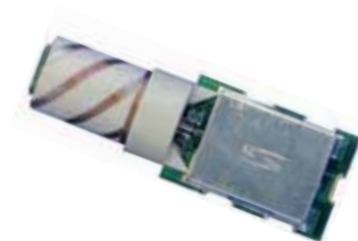
7. Wnioski

7.1. Przyczyny niskiej jakości pracy odbiornika z anteną SARANTEL SL1206

We wszystkich sesjach pomiarowych najslabiej wypadł odbiornik podłączony do anteny SARANTEL SL1206. Wynika to zapewne z kształtu charakterystyki promieniowania tej anteny, która w określonych warunkach pracy może jej dać znaczną przewagę, ale w tym badaniu była dla niej obciążeniem.

Antena ta, jako jedyna wśród badanych, jest anteną o konstrukcji helikalnej, jej budowa została przedstawiona na rys. 13. Dla porównania konstrukcji (rys. 14) zaprezentowano wygląd typowej anteny typu „patch”.

Antena SARANTEL SL1206 w typowej dla zastosowań w systemach GNSS orientacji w przestrzeni (tj. antena skierowana określoną przez producenta powierzchnią pionowo „do góry”) ma relatywnie słabe parametry użytkowe.



Rys. 13. Zdjęcie anteny helikalnej SARANTEL SL1206 (zdjęcie ze zdjętą pokrywą ochronną)

Fig. 13. Picture of helix antenna SARANTEL SL1206 (without radome)

Minimalne i maksymalne zarejestrowane odległości obliczonej pozycji od jej wartości średniej, odpowiednio dla składowej:

Easting [m]			Northing [m]			Up [m]		
Min.	Max.	Max. rozpiętość	Min.	Max.	Max. rozpiętość	Min.	Max.	Max. rozpiętość
-13,8	7,7	21,4	-12,9	18,6	31,5	-13,1	24,9	38,0
-22,2	13,4	35,6	-24,5	36,0	60,5	-26,9	39,7	66,6
-9,3	9,9	19,3	-14,1	14,6	28,7	-18,7	20,7	39,3
-10,3	7,1	17,4	-11,7	18,3	30,0	-16,3	36,6	52,9
-7,6	7,1	14,7	-11,7	16,5	28,2	-11,6	24,2	35,8
-8,4	8,0	16,4	-17,1	20,9	38,0	-14,1	31,3	45,4
-20,9	25,9	46,7	-27,5	259,2	286,7	-84,4	42,2	126,5
-152,6	224,5	377,0	-222,7	358,7	581,4	-59,6	47,0	106,6
-23,4	48,7	72,1	-32,4	96,6	129,1	-50,1	64,5	114,6
-19,6	31,7	51,3	-73,1	45,6	118,7	-23,8	27,8	51,6
-23,6	26,0	49,6	-38,5	45,5	84,0	-22,6	42,9	65,5
-16,7	15,8	32,5	-18,7	32,5	51,2	-26,7	29,4	56,1
-1,9	1,2	3,1	-1,4	2,1	3,5	-1,8	2,8	4,6
-4,3	9,6	13,9	-30,3	4,2	34,5	-5,0	9,0	14,0
-2,3	1,3	3,6	-1,8	1,9	3,7	-2,3	3,4	5,7
-1,9	1,1	3,1	-1,6	2,5	4,1	-2,0	5,3	7,3
-1,9	1,1	3,0	-1,3	2,0	3,3	-1,6	3,3	4,9
-1,9	1,1	3,1	-1,6	2,0	3,5	-1,7	4,5	6,2



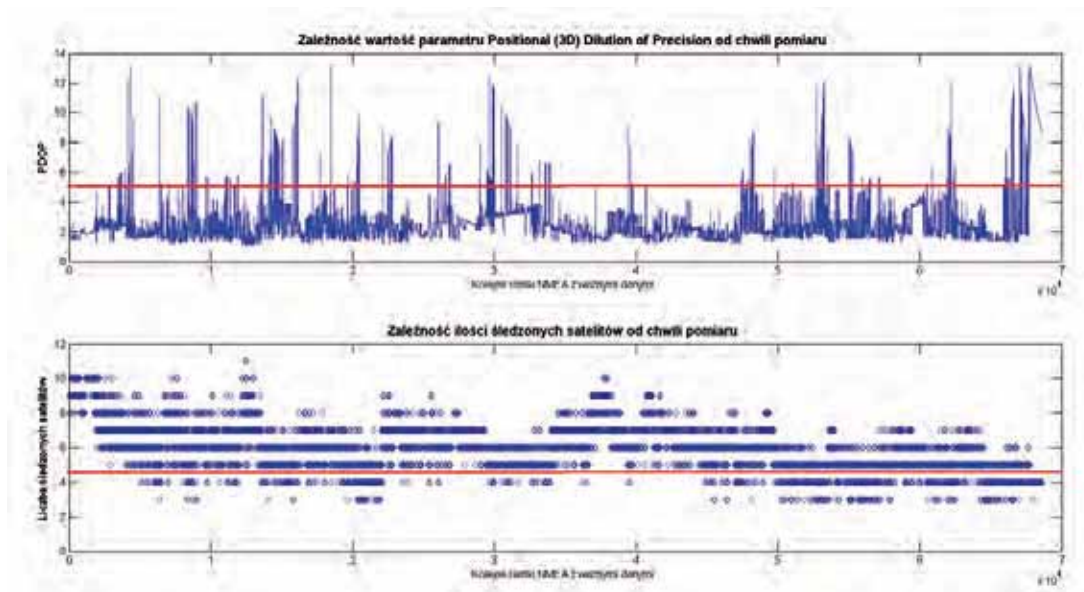
Rys. 14. Zdjęcie przykładowej pasywnej ceramicznej anteny GPS typu „patch” (zdjęcie bez pokrywy ochronnej)

Fig. 14. Picture of typical passive ceramic GPS patch antenna (without radome)

Nie jest wykluczone, że w innych orientacjach (np. antena skierowana „w bok”), co często ma miejsce podczas eksploatacji nawigacji mobilnych, anteny tego typu będą pracowały lepiej od anten wykonanych w innej technologii.

7.2. Wielkość maksymalnego rozrzutu wskazywanych pozycji wokół wartości średniej

Ciekawe obserwacje daje analiza maksymalnego rozrzutu (odległości) zmierzonej pozycji od jej wartości średniej. Wynika on bardziej z chwilowej, pewnej niestabilności w pracy odbiornika na skutek np. zmiany konstelacji śledzonych satelitów, a nawet niezamierzonej reinicjalizacji odbiornika, niż z ogólnej wydajności zestawu antena-odbiornik. Sytuacja znacznej rozbieżności następujących po sobie wskazań może wynikać ze zmiany położenia (wstąpienia lub zstąpienia) satelity poniżej minimalnego kąta elewacji przy którym odbiornik uwzględni lub też tego nie robi sygnały od konkretnego satelity.



Rys. 15. Wykres zależności wartości parametru PDOP od liczby dostępnych sygnałów GNSS

Fig. 15. PDOP value dependency of GNSS signal availability

Sytuację taką można wykryć, analizując wykres zmian jednego z parametrów NMEA przekazywanego w ramach: GGA i GSA – parametru DOP (ang. *Dilution of Precision*) [2] określającego zjawisko rozmycia precyzji pomiaru oraz jak bardzo korzystnie ze względu na warunki pomiaru są rozmieszczone satelity na niebie.

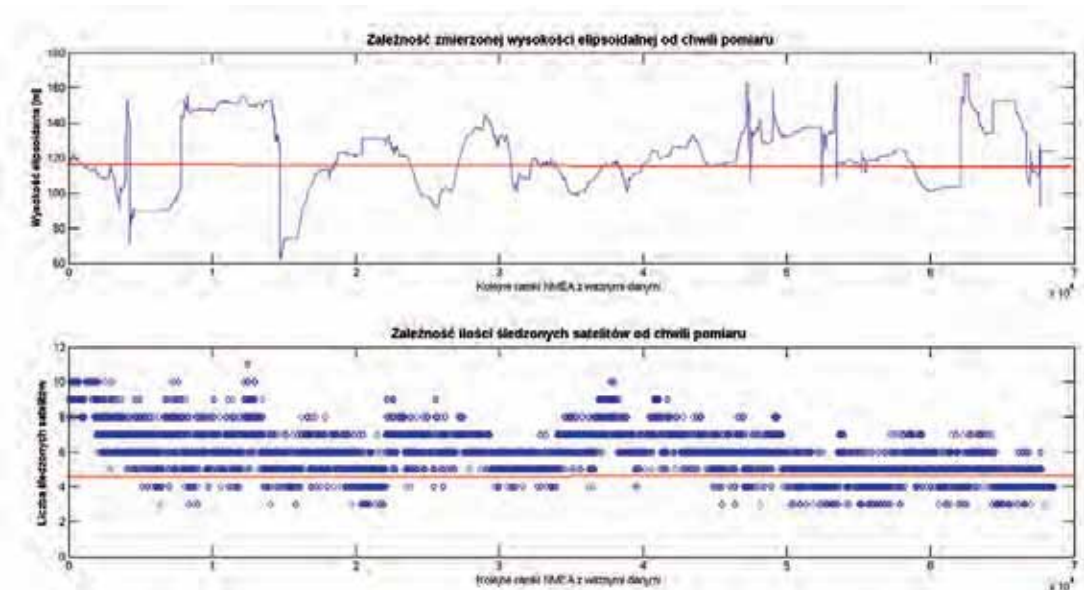
W celu przeprowadzenia dokładniejszej analizy należy zwrócić uwagę na trzy składowe parametru DOP: PDOP, HDOP i VDOP, informujące o jakości układu satelitów dla określenia odpowiednio: pozycji 3D, pozycji na płaszczyźnie, wysokości w miejscu pomiaru. Zostały one zaznaczone na listingu z przykładowym zbiorem ramek kolorem zielonym.

Ponieważ parametr DOP jest ściśle związany z aktualną konfiguracją geometryczną satelitów GNSS na nieboskłonie względem położenia odbiornika, każda

jego zmiana wpływa pośrednio na dokładność mierzonej pozycji. Obowiązuje zasada, że im mniejsza wartość tego parametru, tym lepiej (za dobry przyjmuje się poziom < 5).

Każda skokowa zmiana o znacznej wartości dowolnego parametru może świadczyć o wybraniu innego zestawu satelitów, na podstawie których zostało określone rozwiązanie nawigacyjne.

Na rys. 15 przedstawiono dwa wykresy w jednakowej skali czasu, które ilustrują wartość zmian parametru PDOP dla odbiornika z anteną SARANTEL SL1206 w funkcji czasu trwania sesji pomiarowej dla stanowiska pomiarowego w miejscu szczególnie trudnym – przy ścianie budynku.



Rys. 16. Zależność wartości parametru PDOP od liczby dostępnych sygnałów GNSS

Fig. 16. PDOP value dependency of GNSS signal availability

W praktyce wartości $PDOP > 5$ występują, gdy odbiornik wyznacza pozycję na podstawie bardzo niskiej liczby sygnałów od satelitów GNSS, a wyniki jego pracy są obciążone znacznymi błędami wzrastającymi wraz z rosnącym parametrem PDOP.

Na górnym wykresie zaznaczono czerwoną linią wartość $PDOP = 5$, na dolnym wykresie wszystkie punkty poniżej czerwonej linii dotyczą sytuacji, gdy odbiornik pracuje z 4 lub 3 satelitami. Można zaobserwować korelację parametru PDOP z liczbą dostępnych satelitów GNSS.

Należy również nadmienić, że w zależności od konfiguracji odbiorników GNSS liczba obserwowanych satelitów nie jest jednoznaczna z liczbą satelitów, od których sygnały będą brane pod uwagę do wyznaczenia rozwiązania nawigacyjnego. Informację na ten temat można uzyskać z porównania stosownych pól w ramach GGA, GSA i GSV.

7.3. Pomiar wysokości elipsoidalnej

Określenie wysokości elipsoidalnej (odległości mierzonego punktu od elipsoidy odniesienia WGS84, używanej przez GPS) jest obciążone większym błędem, niż ma to miejsce dla współrzędnych geograficznych na płaszczyźnie. Wynika to ze złego uwarunkowania numerycznego formuły określającej wysokość elipsoidalną na podstawie pseudoodległości od satelitów (gdyby istniała możliwość odbioru sygnałów GNSS od satelitów znajdujących się również na drugiej półkuli, wynik byłby o wiele dokładniejszy).

Na rys. 16 przedstawiono wykres wskazywanej wysokości w czasie najtrudniejszej sesji pomiarowej dla odbiornika z anteną SARANTEL SL1206. Można zaobserwować bardzo duże fluktuacje wskazywanej wysokości, co związane jest z ubogim zestawem dostępnych sygnałów GNSS.

Na górnym wykresie (rys. 16) czerwoną linią zaznaczono rzeczywistą wysokość stanowiska pomiarowego w tej sesji pomiarowej. Uwidacznia się na nim korelacja pomiędzy błędem wyznaczania wysokości elipsoidalnej i dostępnością satelitów GNSS.

8. Podsumowanie

W badaniach zastosowano odbiorniki podłączone do zestawu anten o zróżnicowanej konstrukcji i wielkości, różnym przeznaczeniu oraz znacząco różniących się cenami.

W celu przekrojowego sprawdzenia wpływu rodzaju i konstrukcji anteny na jakość określania pozycji, przyjęto konfiguracje pomiarowe, które w normalnych aplikacjach są rzadko spotykane, ze względu na cenę anteny czy jej gabaryty. Uzyskano dzięki temu praktyczną wiedzę oraz porównanie dające inżynierom pogląd, jak rodzaj anteny wpływa na dokładność pomiaru w typowej aplikacji urządzeń GNSS.

Najtańszą z badanych antenę typu patch można kupić już za kilkadziesiąt PLN. Najdroższa Leica AR25 to koszt rzędu 25 000 PLN.

Przygotowany układ pomiarowy bazował na tanich (poniżej 100 PLN/szt.) odbiornikach jednoczęstotliwościowych, o intencjonalnie ograniczonej funkcjonalności. Odbiorniki pracowały w trybie „stand-alone”, co oznacza, że rozwiązania nawigacyjne były wyznaczone wyłącznie na podsta-

wie odebranych sygnałów GNSS bez wsparcia metodami różnicowymi DGPS. Wybór ten podyktowany był faktem, że odbiorniki te stanowią największy segment rynku i są najczęściej stosowane w popularnych aplikacjach.

Jednoczęstotliwościowa praca odbiorników, w dodatku bez stosowania poprawek różnicowych powoduje, że osiągnięte dokładności (a precyzyjniej – błędy pomiarowe) są na tyle wysokie (rzędu pojedynczych metrów), że nawet zastosowanie najtańszej anteny w badanym zestawie nie spowodowało znaczącego spadku jakości pomiarów.

Zastosowanie anten o zaawansowanej konstrukcji i bardzo dobrych parametrach jest ekonomicznie uzasadnione w aplikacjach z odbiornikami wieloczęstotliwościowymi i wielosystemowymi, umożliwiając w sprzyjających warunkach uzyskanie dokładności submetrycznych, bez zaangażowania techniki DGPS. Korzystając z dostępu do poprawek różnicowych w tego typu odbiornikach możliwe jest uzyskanie dokładności milimetrycznych (on-line) lub jeszcze lepszych (w dłuższym czasie i przy zastosowaniu postprocessingu). Wówczas takie aspekty, jak stabilność centrum fazowego czy odporność na zakłócenia związane z wielodrogowością sygnału wydają się uzasadniać wielokrotnie wyższe nakłady, jakie należy ponieść na zakup zaawansowanej anteny. Stosując do badań proste odbiorniki GNSS, specyficzne cechy tego typu anten nie mają szansy być w pełni wykorzystane, ale dzięki temu uzyskano interesujące dane porównawcze.

Warto zauważyć, jak wielki wpływ na dokładność wskazań odbiorników ma lokalizacja anteny względem przeszkód terenowych. Relatywnie niewielkie przesunięcie zestawu pomiarowego w kierunku ściany budynku spowodowało niewspółmierny wzrost błędów pomiarowych, niezależnie od rodzaju użytej anteny. Wymusza to na projektancie systemu odpowiednią lokalizację anteny, zapewniającą jej jak największą widoczność otwartego nieboskłonu.

Zastosowanie anteny o nieoptymalnie dobranej do warunków pracy charakterystyce lub niewłaściwych parametrach będzie istotnie degradowało jakość generowanych



Rys. 17. Porównanie otrzymanych pozycji geograficznych dla odbiorników z anteną SARANTEL SL1206 (kolor czerwony) i anteną typu „patch” (kolor żółty)

Fig. 17. Comparison of geographical positions conducted by receiver connected to: SARANTEL SL1206 (marked red) and patch (marked yellow) antennas

wyników rozwiązania nawigacyjnego. Czytelną wizualizacją istoty przedstawionego problemu jest wykres zarejestrowanych pozycji odbiorników z anteną SARANTEL SL1206 (kolor czerwony) oraz z anteną typu „patch” (kolor żółty) z drugiej sesji pomiarowej, nałożonych na zdjęcie satelitarne (Google Map) przy użyciu programu RTKLIB (autor Tomoji Takasu). Pozycje (rys. 17) zostały zarejestrowane podczas tej samej sesji pomiarowej w tej samej lokalizacji.

Bibliografia

1. Seeber G., *Satellite geodesy: foundations, methods and applications*, Walter de Gruyter, Berlin, New York 2003.
2. Perski A., Wieczyński A., Bożek K., Kapelko S., Pawłowski S., *Odbiorniki GNSS w praktyce inżynierskiej. Wprowadzenie do systemów GNSS*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, 3/2013, 103–111.
3. Perski A., Wieczyński A., Baczyńska M., Bożek K., Kapelko S., Pawłowski S., *Odbiorniki GNSS w praktyce inżynierskiej. Badania stacjonarne*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, 4/2013, 64–77.
4. Inside GNSS, Gibbons Media and Research, LLC.
5. GPS World, North Coast Media LLC.
6. Krantz E., Riley S., *GPS Antenna Design and Performance Advancements: The Trimble Zephyr*, Trimble GPS Engineering and Construction Group, Sunnyvale, California, USA, P. Large, Trimble Integrated Surveying Group, Westminster, Colorado, USA.
7. *GNSS geodetic antennas*, Trimble Navigation Ltd, 2008.
8. Hofmann-Wallendorf B., Lichtenegger H., Wasle E., *GNSS – Global Navigation Satellite Systems*, Springer-Verlag Wien PCO, 2008.
9. ESA navipedia. ■

GNSS receivers in engineering practice Impact of antenna type on quality of GNSS measurements

Abstract: In the third article of a series we present the results of our researches performed in stationary conditions. We also give some explanations and guidelines about the most important features, classification and parameters of GNSS antennas and its influence on GNSS receiver's performance. Phase Center Variation (PCV) and multipath effect mitigation techniques are briefly described. In performed researches, six exactly the same models of GNSS receivers worked at the same time with different models of antennas. The study was performed with the use of specially prepared evaluation boards, which were equipped with modern single frequency GNSS receivers configured to operate as a GPS only mode. Three test sessions, each in different environments of varying difficulty for receiving GNSS signals were carried out. The results show that also for applications using cheap GNSS receivers and aimed to the mass market, the proper selection of antennas can significantly improve the quality and functionality of the products.

Keywords: GPS, GNSS, multipath error, measuring error 2DRMS, patch, choke-ring, antenna, stationary test, position scatter

Artykuł recenzowany, nadany 09.09.2013, przyjęty do druku 01.10.2013.

mgr inż. Arkadiusz Perski

W Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP od 2001 r. 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. Autor i współautor wielu aplikacji systemów satelitarnych w zakresie monitorowania i wspomagania transportu, ochrony granic, działań antyterrorystycznych.

e-mail: 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 nawigację w systemach mobilnych, zagadnienia komunikacji satelitarnej oraz metody kryptograficzne.

e-mail: MariaBaczynska@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 r. 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 r. 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

