

**WPŁYW ODLEGŁOŚCI
OD STACJI REFERENCYJNEJ ASG-EUPOS
NA DOKŁADNOŚĆ KARTOWANIA TERENOWEGO
ODBIORNIKIEM GPS KLASY GIS***

**THE INFLUENCE OF DISTANCE
FROM THE REFERENCE ASG-EUPOS STATION
ON THE ACCURACY
OF GIS CLASS GPS FIELD MAPPING**

Łukasz Beluch

Uniwersytet Jagielloński, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej,
Zakład Systemów Informacji Geograficznej, Kartografii i Teledetekcji

Słowa kluczowe: dokładność kartowania terenowego, postprocessing GPS, pomiary GIS, RTKlib, ASG-EUPOS

Keywords: field mapping accuracy, postprocessing GPS, GIS measurements, RTKlib, ASG-EUPOS

Wprowadzenie

W naukach przyrodniczych jedną z metod pozyskiwania danych przestrzennych o środowisku jest kartowanie terenowe (Bartkowski, 1977). Do niedawna kartowanie terenowe wykonywane było głównie tradycyjnymi metodami pomiarowymi, takimi jak: przymiar wstępowy, węgielnica, teodolit, czy dalmierz optyczny. Wraz z rozwojem technik satelitarnych, a zarazem spadkiem cen odbiorników do nawigacji satelitarnej, coraz powszechniejsze staje się kartowanie z zastosowaniem systemów globalnego pozycjonowania GPS (*Global Positioning System*) (Antosiewicz, Wężyk, 2005).

Najbardziej popularne odbiorniki GPS, jednocześnie najtańsze, używają kodu *Course Acquisition* (C/A), który nadawany jest na częstotliwości L1 równej 1575,42 MHz, są to tzw. odbiorniki kodowe, w przeciwieństwie do bardziej dokładnych odbiorników fazowych. Za

*Przedstawiona w artykule praca została częściowo sfinansowana w ramach badań statutowych Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego w roku 2013.

pomocą kodu C/A odbiornik jest w stanie oszacować odległości systemu do określonego satelity, a ściślej pseudoodległość (ang. *Pseudorange*). Kod ten ulega jednak zakłóceniu przez wiele czynników, z których najważniejsze to opóźnienie jonosferyczne i troposferyczne, związane z przejściem sygnału przez warstwy atmosfery ziemskiej. Przekłada się to znacząco na spadek dokładności pozycjonowania, tak więc odbiornik w trybie autonomicznym określa współrzędne z dokładnością od kilku do kilkunastu metrów, w zależności m.in. od miejsca pomiaru, pory dnia i klasy odbiornika. Aby zwiększyć dokładność coraz częściej używa się odbiorników kodowych mogących pracować w trybie DGPS (*Differential GPS*), albo umożliwiających wykonanie po pomiarze *post-processing* danych. Metoda różnicowa oparta jest na dwóch odbiornikach, odbiorniku bazowym (ang. *Base*), oraz odbiorniku ruchomym (ang. *Rover*). Antenę odbiornika bazowego umieszcza się nad punktem o znanych współrzędnych, antenę odbiornika ruchomego umieszcza się nad obiektami, które użytkownik chce skartować. Dzięki temu, że odbiornik bazowy zna swoją pozycję, może on obliczyć poprawki do pseudoodległości dla poszczególnych satelitów, wynikające między innymi z opóźnienia jonosferycznego i troposferycznego, a następnie przesłać je do odbiornika ruchomego. W przypadku, gdy odbiornik ruchomy nie jest w stanie odbierać poprawek transmitowanych przez odbiornik bazowy, użytkownik po zakończonym pomiarze może kameralnie zrobić *post-processing* danych, pobierając obserwacje zarówno z odbiornika ruchomego, jak i bazowego, uzyskując zazwyczaj błąd pozycjonowania poniżej 1 m.

Ograniczeniem dla metody różnicowej jest odległość pomiędzy odbiornikami. Wraz z jej wzrostem zmieniają się lokalne warunki troposfery i jonosfery oraz azymuty i wysokości topocentryczne satelitów. Odbiornik na stacji referencyjnej pracuje w innej konstelacji systemu niż odbiornik ruchomy (część satelitów widoczna przez odbiornik ruchomy może być poniżej horyzontu w miejscu obserwacji odbiornika referencyjnego) dlatego w rozwiązaniu muszą być wykorzystywane tylko satelity widoczne z obu stanowisk (Monteiro i in., 2005; Pérez-Ruiz i in., 2010; Nejat, Kiamehr, 2013). Aby zmniejszyć odległość do najbliższej stacji referencyjnej w wielu krajach powstały sieci stacji pokrywające całe państwo, w których poprawki są interpolowane dla miejsca pomiaru użytkownika (Specht, Skóra, 2009). W Polsce przykładem takiej sieci jest Aktywna Sieć Geodezyjna ASG-EUPOS (Brach, 2010; Krzeszowski, Bosy, 2011).

W literaturze dużo miejsca poświęca się zagadnieniom dokładności w przypadku dokładnych (z dokładnością milimetrową) pomiarów fazowych wykorzystywanych w geodezji i inżynierii. Na potrzeby kartowania terenowego do badań przyrodniczych takie dokładności najczęściej nie są potrzebne. Często pomiary decymetrowe są całkowicie akceptowalne. Sporo jest prac dotyczących kartowania w środowisku leśnym, w których autorzy używali odbiorników kodowych działających w trybie autonomicznym (Brach, Stereńczak, 2006), albo wykorzystywali poprawki sieciowe (Brach, 2012; Galán i in., 2011; Klimánek, 2010). Można też znaleźć prace dotyczące dokładności pomiarów różnicowych z wykorzystaniem systemów wielkoobszarowych jak: EGNOS (Oszczak i in., 2010; Ciećko i in., 2011; Skorkowski, Topór-Kaminski, 2012) lub lokalnych jak ASG-EUPOS (Bakuła, 2010). Autorzy ci dowodzą, że stosowanie tych systemów poprawia dokładność pozycjonowania, trzeba jednak znajdować się w obszarze ich działania. Niewielu natomiast badaczy podjęło problem wpływu odległości od stacji referencyjnej na dokładność pomiarów kodowych. Monteiro i in. (2005) prowadzili badania w czerwcu 2003 roku w Portugalii. Stwierdzili oni, że dokładność poprawek DGPS zależy od dwóch czynników: dekorelacji w czasie – ponieważ zmieniają się warunki pomiaru, oraz dekorelacji wraz ze wzrostem odległości. Czynniki wpływa-

jące na dekorelację w czasie zmieniają się stosunkowo wolno, dlatego błąd z tego tytułu jest niewielki, po 4 minutach wynosi on około 0,5–1,0 m. Według Monteiro i in. (2005) błąd z tytułu dekorelacji wraz ze wzrostem odległości do stacji referencyjnej wynosi mniej więcej 0,22 m/100 km na poziomie ufności 1σ . Z kolei McKessock (2007) w swoich badaniach w Kanadzie stwierdził, że błąd wyznaczenia pozycji przy użyciu danych referencyjnych ze stacji oddalonej o 430 km wynosi $1,0 \text{ m} \pm 0,7$ na poziomie ufności 2σ .

Rozważając zagadnienie dokładności pomiarów różnicowych GPS nasuwają się dwa pytania: 1) czy odległość od takiej stacji wpływa na dokładność wyników pomiaru; 2) czy mając dostęp do sieci stacji takiej jak ASG-EUPOS jest sensowne wykorzystywanie klasycznego rozwiązania w postaci jednej stacji referencyjnej. Zapewne pierwsze pytanie jest mniej istotne w Polsce i krajach sąsiednich, gdyż sieć stacji dla pomiarów kodowych jest tu bardzo gęsta (największa odległość do najbliższej stacji na terenie Polski nie przekracza 55 km). Często jednak badania przyrodnicze wykonuje się w obszarach niezamieszkałych przez człowieka, gdzie najbliższa stacja referencyjna może znajdować się kilkaset kilometrów od miejsca pomiaru. Również trzeba mieć na uwadze, że część programów do *post-processingu* pomiarów kodowych nie pozwala na wykorzystanie w obliczeniach więcej niż jednej stacji referencyjnej.

Celem pracy jest więc zbadanie, jak zmienia się błąd pomiaru kodowego poddanego *post-processingowi* w zależności od odległości od stacji referencyjnej, z której pochodzą dane. Realizacja celu pracy pozwoli odpowiedzieć na powyżej postawione dwa pytania. Przesłanką podjęcia badań był brak prac badających ten temat bardziej szczegółowo, z wykorzystaniem sieci stacji referencyjnych zlokalizowanych wokół miejsca pomiaru. Wspomniane powyżej prace Monteiro i in. (2005) oraz McKessocka (2007) zbyt uogólniają to zagadnienie, bazując na pomiarach dla kilku stacji położonych w jednej linii.

Opis badań

Do badań kameralnych autor wykorzystał dane pomiarowe zarejestrowane w formacie RINEX przez 50 stacji systemu ASG-EUPOS i udostępnione za pomocą serwisu POZGEO-D. Ograniczenie do 50 stacji systemu (spośród dostępnych około 100 stacji systemu) przyjęto ze względu na czasochłonność obliczeń. Stacje zostały wybrane w taki sposób, aby były one w przybliżeniu równomiernie rozmieszczone na obszarze Polski. Ich szczegółowy wykaz znajduje się w tabeli 2 zamieszczonej w rozdziale "Wyniki". Przyjęto założenie, że obserwacje ze stacji LODZ (Łódź) zostaną oznaczone jako *Rover*, czyli tak, jakby był tam umieszczony odbiornik ruchomy, dla którego wyznaczane są współrzędne; natomiast każdą z 49 stacji systemu traktowano jako stację bazową (*Base*). Powodem, dla którego wybrano stację LODZ była jej lokalizacja w centrum obszaru badań. Obserwacje ograniczono do obserwacji kodowych na częstotliwości L1, z wykorzystaniem satelitów systemu GPS. Tak przyjęte kryteria są tożsame ze specyfikacją techniczną większości odbiorników GPS klasy GIS, dostępnych na polskim rynku. W badaniu wykorzystano trzy serie danych z pięciu kolejnych dni października 2012 r. oraz kwietnia i października 2013 roku, tj:

- 18 października 2012 r., obserwacje z przedziału czasu 12:00:00-12:00:30 UTC;
- 19 października 2012 r., obserwacje z przedziału czasu 11:56:00-11:56:30 UTC;
- 20 października 2012 r., obserwacje z przedziału czasu 11:52:00-11:52:30 UTC;
- 21 października 2012 r., obserwacje z przedziału czasu 11:48:00-11:48:30 UTC;

22 października 2012 r., obserwacje z przedziału czasu 11:44:00-11:44:30 UTC;
 16 kwietnia 2013 r., obserwacje z przedziału czasu 12:00:00-12:00:30 UTC;
 17 kwietnia 2013 r., obserwacje z przedziału czasu 11:56:00-11:56:30 UTC;
 18 kwietnia 2013 r., obserwacje z przedziału czasu 11:52:00-11:52:30 UTC;
 19 kwietnia 2013 r., obserwacje z przedziału czasu 11:48:00-11:48:30 UTC;
 20 kwietnia 2013 r., obserwacje z przedziału czasu 11:44:00-11:44:30 UTC;
 13 października 2013 r., obserwacje z przedziału czasu 12:00:00-12:00:30 UTC;
 14 października 2013 r., obserwacje z przedziału czasu 11:56:00-11:56:30 UTC;
 15 października 2013 r., obserwacje z przedziału czasu 11:52:00-11:52:30 UTC;
 16 października 2013 r., obserwacje z przedziału czasu 11:48:00-11:48:30 UTC;
 17 października 2013 r., obserwacje z przedziału czasu 11:44:00-11:44:30 UTC.

Dzięki zastosowaniu w kolejnych dniach 4-minutowego przesunięcia w czasie poszczególnych serii pomiarów, dane użyte do obliczeń posiadają taką samą konstelację satelitów. Wynika to z faktu, że okres obiegu satelity GPS wokół Ziemi wynosi pół doby gwiazdowej, czyli po 23 h 56 m (w uproszczeniu) konstelacja nad danym punktem będzie taka sama. Ponadto, konstelacja pomiędzy seriami również jest porównywalna, ponieważ powtarza się ona o tej samej godzinie co około 180 dni (dlatego wykorzystano serie z października i kwietnia). W obliczeniach użyto obserwacje z przedziałów 30-sekundowych, o interwale pomiaru 1 sekunda. Taki przedział przyjęto arbitralnie, porównując otrzymane wyniki dla przedziałów 10 s, 30 s i 60 s z dnia 18 października 2012 r. Stwierdzono, iż wydłużenie czasu pomiaru nie przekłada się znacząco na dokładność, natomiast nie ma uzasadnienia z praktycznego punktu widzenia, bowiem użytkownikowi zależy na tym, aby pomiar był dokładny, ale również szybki i sprawny. W przypadku serii pierwszej warunki pogodowe na całym obszarze badań były porównywalne. Nad Polską dominowała wyżowa pogoda z bezchmurnym niebem i stosunkowo wysoką jak na październik temperaturą powietrza (około +18°C). Podczas pomiaru kwietniowego przez obszar Polski przechodziły z zachodu na wschód dwa fronty atmosferyczne wywołujące pierwsze wiosenne burze. Temperatura powietrza przekroczyła +20°C. Połowa października 2013 r. charakteryzowała się dość zmienną pogodą. Nad Polską przechodziły liczne fronty atmosferyczne przynoszące przelotne opady deszczu i jesienne mgły. Temperatura powietrza nie przekraczała +16°C (www.wetterzentrale.de). We wszystkich dniach wartości indeksu jonosferycznego I95 oscylowały w granicach średniej aktywności (www.asgeupos.pl).

Post-processing danych wykonano w darmowym programie RTKlib (Takasu, 2010), korzystając z modułu do *post-processingu* RTKPost w wersji 2.4.2 z zastosowaniem ustawień przedstawionych w tabeli 1. Obliczenia wykonywano z wykorzystaniem plików w formacie RINEX, każdorazowo osobno do kolejnej stacji systemu, a więc w danym rozwiązaniu wykorzystano tylko jedną stację bazową. W kolejnym kroku dokonano uśrednienia pozycji z 30 interwałów 1-sekundowych, obliczając średnią arytmetyczną, osobno dla składowej połu-

Tabela 1. Zastosowane ustawienia dla programu RTKlib

| Positioning mode | DGPS/DGNSS | Rec Dynamics/ Earth Tides Correction | OFF/OFF |
|-----------------------------------|------------|--------------------------------------|--------------|
| Frequencies | L1 | Ionosphere Correction | Broadcast |
| Solution Type | Forward | Troposphere Correction | Saastamoinen |
| Elevation Mask(°) SNR Mask (dbHz) | 10/10 | Satellite Ephemeris/ Clock | Broadcast |

dnikowej, równoleżnikowej i wysokości oraz porównano ją z rzeczywistymi współrzędnymi stacji LODZ, podając różnicę położenia wyliczonego punktu względem rzeczywistego położenia, zarówno dla kierunku południkowego i równoleżnikowego oraz wysokości.

Tak wyliczony błąd pomiaru był następnie zapisywany w arkuszu kalkulacyjnym programu Microsoft Excel, w którym każdy wiersz posiadał ponadto przypisane współrzędne stacji ASG-EUPOS, przeliczone do układu PL-1992.

Na podstawie błędów składowych dla kierunków równoleżnikowego i południkowego, wyznaczono błąd wypadkowy wykorzystując wzór:

$$\Delta XY = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$$

W kolejnym kroku dokonano importu danych z arkusza kalkulacyjnego do programu Esri ArcMap 10.1, tworząc punktową warstwę danych, gdzie każdy punkt reprezentuje położenie rzeczywistej stacji systemu, a w jego atrybutach zapisane są błędy wyznaczenia współrzędnych stacji LODZ, pochodzące z *post-processingu* z wykorzystaniem tej rzeczywistej stacji referencyjnej. Na podstawie tak zgromadzonych danych, dla wszystkich 49 stacji interpolowano błąd wyznaczenia pozycji stacji LODZ w zależności od miejsca pomiaru, wykorzystując do tego metodę *Ordinary Kriging*. W ramach badań, dokonano także interpolacji z odwrotnymi założeniami obliczeniowymi, kiedy stacja LODZ była stacją bazową, a pozostałe stacje stacjami ruchomymi. Wyniki z obu wariantów są zbliżone do siebie, dlatego przedstawiono tylko jedno rozwiązanie.

Wyniki

Błąd narasta wraz ze wzrostem odległości od stacji referencyjnej, jednak to narastanie nie jest liniowe i jest zależne od tego, w jakiej części Polski zlokalizowana została stacja referencyjna oraz z jakiej serii pomiarowej pochodzą dane. Dla błędu ΔXY w płaszczyźnie poziomej wartości błędów dla pomiarów z października 2012 roku są mniejsze przy wykorzystaniu obserwacji ze stacji KONI, PITR, SIDZ, KLDZ, OPLE (rys. 1). W przypadku pomiarów z kwietnia 2013 roku najmniejsze wartości błędu położenia otrzymano przy użyciu obserwacji ze stacji KUTN, WAT1, DZIA, ILAW, CHOJ zlokalizowanych na północ od stacji LODZ (rys. 2). Dla października 2013 roku największą dokładność wyznaczenia położenia stacji LODZ osiągnięto używając do obliczeń obserwacji ze stacji PITR, RADM, KLCE, TABG położonych na południe od stacji LODZ oraz stacji WAT1, DZIA, TORU, ILAW, BART, GDAN, WLAD leżących na północ (rys. 3). We wszystkich opisanych wyżej przypadkach, błąd ΔXY położenia stacji LODZ, uśredniony z pięciu dni, nie przekroczył 0,2 m (tab. 2).

Ciekawą zgodność można zauważyć analizując wektory błędów. Azymuty wektorów w kolejnych dniach danej serii pomiarowej różnią się bardzo nieznacznie, w większości przypadków stosunkowo podobna jest też wartość błędu, a zwrot wektorów błędów zwrócony jest w stronę stacji LODZ, co należy interpretować w ten sposób, że wektor łączący odbiornik bazowy z odbiornikiem na stacji LODZ w rzeczywistości jest krótszy o wartość błędu, niż wynika to z obliczeń. Prawidłowość ta jest szczególnie widoczna dla dużych błędów przekraczających 0,5 m, choć zdarzają się od niej wyjątki, których przykładem mogą być wektory na stacjach ZYWI i HRUB w październiku 2012 r. (rys. 1). W przypadku niewielkich wartości błędu, dla obszarów opisanych w akapicie pierwszym, ta prawidłowość

wość nie jest już tak wyraźna i zdarzają się błędy, których zwrot jest przeciwny do stacji LODZ (na przykład wektory na stacji TORU, ILAW dla października 2013 r. – rys. 3).

Najbardziej zmienna pogoda występowała w trzeciej serii pomiarowej. Można zauważyć, że długości wektorów błędów dla obliczeń z danej stacji bazowej w tej serii są najbardziej zróżnicowane, w przeciwieństwie do serii pierwszej, gdzie długość wektorów jest podobna, co może wynikać ze stabilnej wyżowej pogody nad obszarem Polski w październiku 2012 r. Tylko w jednym przypadku (w kwietniu 2013 r.) średni błąd ΔXY nieznacznie przekroczył wartość 1 m, natomiast w pozostałych przypadkach był poniżej tej wartości.

Błąd ΔZ związany z wysokością we wszystkich seriach pomiarowych był znacznie większy niż błąd ΔXY , wynosił średnio ponad 0,7 m. Można stwierdzić korelację wartości tego błędu z wartościami błędu ΔXY (rys. 4). Dla serii z października 2012 r. wartość błędu ΔZ jest najniższa na Śląsku, podobnie jak błędy ΔXY , jednak współczynnik korelacji wynosi tylko 0,12. Największa korelacja występuje w serii kwietniowej (współczynnik korelacji 0,5) ale już w serii z października 2013 r. korelacja pomiędzy ΔZ i ΔXY nie występuje (współczynnik korelacji 0,02). W przypadku obu pomiarów październikowych otrzymano tylko wartości dodatnie błędu ΔZ (z wyjątkiem stacji HOZD) natomiast w przypadku pomiarów kwietniowych tylko wartości ujemne, co jest zaskakujące. Wartości błędu ΔZ wzrastają ze wzrostem odległości od stacji bazowej, wzrost ten nie jest jednak równomierny. Zdarza się, że największa dokładność osiągnięta była, gdy korzystano w obliczeniach ze stacji bazowych, które nie leżą najbliżej stacji LODZ. Dla serii z października 2012 r. były to stacje górnośląskie, w październiku 2013 r. stacje wielkopolskie i stacja HOZD.

Dla porównania, błędy pomiarów autonomicznych dla stacji LODZ odpowiednio dla pierwszej, drugiej i trzeciej serii pomiarowej wynoszą: $\Delta XY=0,97$ m, $\Delta Z=4,83$ m, $\Delta XY=1,04$ m, $\Delta Z=3,12$ m, $\Delta XY=1,38$ m, $\Delta Z=3,17$ m (tab. 2).

Tabela 2. Uśrednione wartości błędów wyznaczenia położenia stacji LODZ w poszczególnych seriach

| Nr | Stacja ref. | 13-17października 2012 | | | | 16-20 kwietnia 2013 | | | | 18-22 października 2013 | | | |
|----|-------------|------------------------|------------|-------------|------------|---------------------|------------|-------------|------------|-------------------------|------------|-------------|------------|
| | | średni błąd [m] | | | | | | | | | | | |
| | | ΔY | ΔX | ΔXY | ΔZ | ΔY | ΔX | ΔXY | ΔZ | ΔY | ΔX | ΔXY | ΔZ |
| 1 | BART | 0,21 | -0,62 | 0,65 | 0,65 | -0,18 | 0,03 | 0,18 | -0,53 | -0,10 | 0,12 | 0,15 | 0,76 |
| 2 | BPDL | -0,35 | -0,23 | 0,42 | 1,28 | -0,08 | 0,06 | 0,10 | -0,36 | -0,08 | 0,24 | 0,25 | 0,85 |
| 3 | CHNO | 0,37 | -0,48 | 0,61 | 1,09 | 0,28 | -0,15 | 0,32 | -0,19 | 0,23 | -0,32 | 0,40 | 0,71 |
| 4 | CHOJ | 0,08 | -0,56 | 0,57 | 1,29 | 0,09 | 0,01 | 0,09 | -0,58 | 0,19 | 0,02 | 0,19 | 0,91 |
| 5 | DZIA | -0,15 | -0,51 | 0,53 | 1,14 | 0,08 | -0,02 | 0,08 | -0,43 | -0,06 | 0,11 | 0,13 | 0,23 |
| 6 | GDAN | 0,22 | -0,59 | 0,63 | 1,05 | 0,25 | -0,05 | 0,25 | -0,78 | 0,12 | 0,13 | 0,18 | 1,08 |
| 7 | GOLE | 0,42 | -0,51 | 0,66 | 1,02 | 0,28 | 0,02 | 0,28 | -0,74 | 0,40 | 0,11 | 0,42 | 0,85 |
| 8 | HAJN | -0,37 | -0,19 | 0,42 | 1,10 | -0,24 | 0,06 | 0,24 | -0,63 | -0,27 | 0,24 | 0,36 | 0,80 |
| 9 | HOZD | -0,52 | 0,28 | 0,59 | 1,05 | -0,58 | 0,49 | 0,76 | -0,99 | -0,29 | 0,28 | 0,41 | -0,32 |
| 10 | HRUB | -0,53 | -0,41 | 0,67 | 1,18 | -0,40 | 0,20 | 0,44 | -0,65 | -0,28 | 0,30 | 0,41 | 0,62 |
| 11 | ILAW | -0,06 | -0,59 | 0,59 | 0,86 | -0,02 | -0,03 | 0,03 | -0,57 | 0,01 | 0,14 | 0,14 | 0,75 |
| 12 | JLGR | 0,04 | -0,22 | 0,23 | 1,40 | 0,31 | 0,23 | 0,38 | -1,09 | 0,31 | 0,34 | 0,47 | 0,40 |
| 13 | KAMI | 0,22 | -0,59 | 0,63 | 1,06 | 0,35 | -0,04 | 0,35 | -0,70 | 0,60 | 0,13 | 0,62 | 1,01 |
| 14 | KLCE | -0,20 | 0,02 | 0,20 | 0,50 | -0,11 | 0,21 | 0,24 | -0,69 | -0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,75 |

cd. tabeli 2

| Nr | Stacja ref. | 13-17października 2012 | | | | 16-20 kwietnia 2013 | | | | 18-22 października 2013 | | | |
|--|-------------|------------------------|------------|-------------|------------|---------------------|------------|-------------|------------|-------------------------|------------|-------------|------------|
| | | średni błąd [m] | | | | | | | | | | | |
| | | ΔY | ΔX | ΔXY | ΔZ | ΔY | ΔX | ΔXY | ΔZ | ΔY | ΔX | ΔXY | ΔZ |
| 15 | KLDZ | 0,09 | 0,01 | 0,09 | 1,06 | -0,13 | 0,54 | 0,55 | -0,69 | 0,32 | 0,65 | 0,73 | 0,74 |
| 16 | KLOB | -0,11 | -0,29 | 0,31 | 0,52 | -0,09 | 0,39 | 0,40 | -0,86 | -0,01 | 0,15 | 0,15 | 0,44 |
| 17 | KONI | 0,06 | -0,15 | 0,17 | 0,90 | 0,01 | 0,16 | 0,16 | -0,84 | 0,14 | 0,09 | 0,16 | 0,36 |
| 18 | KOSZ | 0,35 | -0,58 | 0,68 | 1,23 | 0,23 | -0,10 | 0,25 | -0,44 | 0,18 | 0,05 | 0,19 | 0,76 |
| 19 | KRA1 | -0,19 | 0,31 | 0,36 | 1,10 | -0,14 | 0,50 | 0,52 | -0,68 | -0,10 | 0,13 | 0,17 | 0,53 |
| 20 | KUTN | -0,02 | -0,22 | 0,22 | 0,99 | -0,09 | 0,11 | 0,14 | -0,77 | 0,08 | 0,25 | 0,26 | 0,50 |
| 21 | LESZ | 0,28 | -0,11 | 0,30 | 1,19 | 0,38 | 0,28 | 0,47 | -1,17 | 0,24 | 0,35 | 0,42 | 0,50 |
| 22 | LUBL | -0,26 | -0,19 | 0,32 | 0,67 | -0,22 | 0,14 | 0,26 | -0,82 | -0,04 | 0,14 | 0,15 | 0,68 |
| 23 | MIES | 0,21 | -0,61 | 0,64 | 1,53 | 0,07 | 0,09 | 0,11 | -0,53 | 0,29 | 0,11 | 0,31 | 0,38 |
| 24 | MLCN | -0,24 | -0,08 | 0,26 | 0,96 | -0,31 | 0,69 | 0,76 | -1,57 | 0,01 | 0,15 | 0,16 | 0,53 |
| 25 | MYSZ | -0,14 | -0,58 | 0,59 | 1,09 | -0,11 | -0,03 | 0,12 | -0,58 | -0,26 | 0,05 | 0,27 | 0,67 |
| 26 | NWTG | 0,08 | -0,11 | 0,14 | 1,25 | -0,42 | 0,94 | 1,02 | -0,83 | -0,23 | 0,24 | 0,34 | 1,54 |
| 27 | OPL | -0,06 | -0,05 | 0,07 | 0,98 | 0,18 | 0,52 | 0,55 | -1,71 | 0,22 | 0,33 | 0,40 | 0,12 |
| 28 | OSMZ | -0,25 | -0,57 | 0,62 | 0,73 | -0,21 | -0,22 | 0,30 | -0,67 | -0,17 | 0,15 | 0,23 | 0,74 |
| 29 | PIIR | 0,04 | 0,14 | 0,15 | 0,78 | -0,29 | 0,14 | 0,32 | -0,76 | -0,01 | -0,08 | 0,09 | 0,36 |
| 30 | POZN | 0,53 | -0,26 | 0,59 | 1,09 | 0,34 | 0,38 | 0,51 | -0,51 | 0,41 | 0,20 | 0,45 | 0,60 |
| 31 | PPIL | 0,21 | -0,53 | 0,57 | 1,03 | 0,18 | -0,01 | 0,18 | -0,89 | 0,27 | 0,04 | 0,27 | 0,61 |
| 32 | RADM | -0,31 | -0,04 | 0,31 | 0,91 | -0,17 | 0,30 | 0,35 | -0,66 | -0,11 | 0,13 | 0,17 | 0,38 |
| 33 | REDZ | 0,17 | -0,71 | 0,73 | 1,04 | 0,19 | -0,25 | 0,32 | -0,28 | 0,18 | -0,16 | 0,25 | 1,13 |
| 34 | SIDZ | 0,03 | -0,11 | 0,11 | 0,70 | 0,01 | 0,09 | 0,09 | -0,77 | 0,06 | 0,19 | 0,20 | 0,60 |
| 35 | SIED | -0,38 | -0,38 | 0,54 | 0,93 | -0,32 | 0,15 | 0,36 | -0,53 | -0,21 | 0,18 | 0,27 | 0,98 |
| 36 | SOKL | -0,36 | -0,58 | 0,68 | 0,68 | -0,31 | -0,08 | 0,32 | -0,50 | -0,29 | 0,01 | 0,29 | 0,71 |
| 37 | SWIB | 0,42 | -0,38 | 0,56 | 0,74 | 0,28 | 0,09 | 0,30 | -0,96 | 0,27 | 0,26 | 0,37 | 0,61 |
| 38 | SWKI | -0,39 | -0,69 | 0,79 | 1,18 | -0,41 | -0,23 | 0,47 | -0,38 | -0,30 | 0,09 | 0,31 | 0,71 |
| 39 | TABG | -0,37 | -0,10 | 0,38 | 1,22 | -0,17 | 0,25 | 0,30 | -0,45 | -0,08 | 0,07 | 0,11 | 0,85 |
| 40 | TORU | 0,07 | -0,36 | 0,36 | 0,93 | 0,10 | 0,27 | 0,29 | -0,74 | 0,11 | 0,13 | 0,17 | 0,52 |
| 41 | TRNW | -0,20 | 0,03 | 0,21 | 1,09 | -0,19 | 0,47 | 0,51 | -0,83 | -0,07 | 0,33 | 0,34 | 0,79 |
| 42 | USDL | -0,50 | 0,11 | 0,51 | 1,12 | -0,26 | 0,48 | 0,55 | -1,18 | -0,25 | 0,24 | 0,35 | 0,78 |
| 43 | WATI | -0,09 | -0,58 | 0,58 | 0,93 | 0,04 | 0,00 | 0,04 | -0,24 | -0,14 | 0,09 | 0,17 | 0,39 |
| 44 | WLAD | 0,00 | -0,78 | 0,78 | 1,07 | 0,08 | -0,23 | 0,25 | -0,34 | 0,10 | -0,02 | 0,10 | 0,89 |
| 45 | WLDW | -0,63 | -0,18 | 0,66 | 0,61 | -0,46 | 0,25 | 0,53 | -0,79 | -0,54 | 0,11 | 0,55 | 0,71 |
| 46 | WODZ | -0,21 | 0,10 | 0,23 | 0,65 | -0,01 | 0,26 | 0,26 | -1,16 | 0,00 | 0,30 | 0,30 | 0,63 |
| 47 | WROC | 0,25 | -0,12 | 0,27 | 0,86 | 0,22 | 0,23 | 0,32 | -0,84 | 0,19 | 0,24 | 0,30 | 0,19 |
| 48 | ZARY | 0,05 | -0,29 | 0,30 | 1,50 | 0,41 | 0,47 | 0,62 | -1,25 | 0,38 | 0,37 | 0,53 | 0,45 |
| 49 | ZYWI | -0,32 | -0,19 | 0,38 | 1,12 | -0,06 | 0,40 | 0,40 | -0,99 | 0,24 | 0,46 | 0,51 | 0,41 |
| Pomiar autonomiczny dla stacji w Łodzi | | | | | | | | | | | | | |
| 50 | LODZ | 0,96 | -0,19 | 0,97 | 4,83 | 0,40 | 0,96 | 1,04 | -3,12 | 1,26 | 0,57 | 1,39 | 3,17 |

Dyskusja

Odległość od stacji referencyjnej ma istotny wpływ na dokładność pomiaru różnicowego odbiornikiem GPS, jednak badania przeprowadzone przez autora dowodzą, że błąd *post-processingu* nie powinno się wyrażać zależnością liniową od odległości, gdyż jest on różny dla różnych obszarów Polski w poszczególnych seriach czasowych, pomimo takiej samej odległości od stacji bazowej. Przy interpretowaniu wyników tej pracy należy uwzględnić to, że dane ze stacji LODZ pochodzą z profesjonalnej klasy odbiornika GPS wyposażonego w antenę redukującą wielotorowość (*multipath*) i efekt cienia (*shadowing*). W praktyce odbiorniki GPS klasy GIS często osiągają wyniki o mniejszej dokładności, ponieważ urządzenia te wyposażone są w jednoczesotliwościowe anteny, wykonane w niższym reżimie technologicznym, które narażone są na te zjawiska. Pomiary są także wykonywane przy różnej topografii terenu. Ma to decydujący wpływ na błędy wielotorowości i efektu cienia. Ponadto, odbiorniki klasy GIS przeważnie nie są wyposażone w dodatkowe rozwiązania programistyczne redukujące wpływ wspomnianych zjawisk. Całkowity błąd wyznaczenia położenia jest więc wypadkową między innymi błędów związanych z propagacją sygnału w atmosferze ziemskiej (błąd jonosferyczny, błąd troposferyczny) oraz błędów wielotorowości i efektu cienia. Pierwszą grupę błędów da się w znacznej mierze zredukować za pomocą pomiarów różnicowych. Błędy drugiej grupy można ograniczać przez rozwiązania techniczne w samych antenach odbiorników, ale są one dużo trudniejsze do oszacowania. Niemniej jednak wyeliminowanie lub znaczne ograniczenie błędów pierwszej grupy, dzięki zastosowaniu *post-processingu* spowoduje, że wypadkowy błąd wyznaczenia położenia przez odbiornik zmniejszy się. W pracy celowo autor wykorzystał dane ze stacji systemu ASG-EUPOS, ponieważ w ten sposób do minimum zostały ograniczone błędy wielotorowości i efektu cienia, co pozwala skupić się tylko na błędzie związanym z dekorrelacją poprawek różnicowych w zależności od odległości, a ten błąd jest niezależny od klasy technologicznej odbiornika jakim wykonano pomiar, więc uzyskane w badaniach wyniki – jakkolwiek na odbiorniku wyższej klasy – mają praktyczne znaczenie też dla odbiorników klasy niższej (klasy GIS).

Zarówno badania Monteiro i in. (2005) oraz McKessock (2007) ograniczały się do kilku stacji referencyjnych. W przypadku Monteiro i in. (2005) dodatkowo użyte zostały stacje położone południkowo, co wynika z południkowej rozciągłości Portugalii. Przeprowadzone przez autora badania wskazują, że zagadnienie jest bardziej złożone i wymaga licznych powtórzeń, a także zbadania korelacji z warunkami meteorologicznymi podczas pomiaru na stacjach ASG-EUPOS lub ogólnym stanem jonosfery i troposfery nad obszarem badań. Problem ten wymaga zebrania odpowiednich danych oraz znacznych nakładów pracy na ich analizę i może być interesującym kierunkiem dalszych badań. Na podstawie trzech analizowanych serii pomiarowych można wstępnie przyjąć, że jakkolwiek pogoda ma wpływ na dokładność pomiaru, to jednak pomiary różnicowe cechuje pewna stabilność. Zmiany kierunków wektorów w poszczególnych dniach są niewielkie, nawet pomiędzy poszczególnymi seriami te różnice nie są duże. W większym stopniu zmienia się wartość błędu. Szczególnie widać to w przypadku serii z października 2013 r., w której zmienne warunki pogodowe mogły się przyczynić do znacznego zróżnicowania długości wektorów błędów pomiędzy kolejnymi dniami serii. W przypadku błędu ΔZ mocno zastanawiające jest, dlaczego błędy z wiosny i jesieni mają przeciwny znak. Można postawić hipotezę, że różnice stanu atmosfery w różnych porach roku mają wpływ na pomiar.

Post-processing pomiarów kodowych GPS warto przeprowadzać po kartowaniu terenowym, nawet jeżeli stacja referencyjna położona jest w znacznej odległości. Prezentowane badania dowodzą, że nawet stacja referencyjna położona 300 km od miejsca pomiaru warta jest uwzględnienia przy *post-processingu*, przyczynia się bowiem do wzrostu dokładności współrzędnych. Przykładowo błędy ΔXY i ΔZ pomiarów autonomicznych 18 kwietnia 2013 r. wynosiły odpowiednio 1,42 m i 3,25 m, natomiast po *post-processingu* w oparciu o stację USDL (Ustrzyki Dolne) 0,45 m i 1,28 m. Generalnie *post-processing* przyczynił się do znacznej poprawy dokładności, zwłaszcza w przypadku pomiaru wysokości w porównaniu do pomiarów autonomicznych. Należy zauważyć, że pomiar wysokości przeważnie obciążony jest większym błędem.

Wykorzystanie do *post-processingu* tylko jednej stacji referencyjnej jest wystarczającym rozwiązaniem dla pomiarów kodowych, bowiem przekłada się na znaczną poprawę dokładności pomiaru. Takie rozwiązanie jest znacznie prostsze dla użytkownika, niż korzystanie z wielu stacji referencyjnych, nie wymaga też zakupu specjalistycznego oprogramowania, ponieważ w takim wypadku zupełnie wystarczające jest wykorzystane w pracy, darmowe oprogramowanie RTKlib. Należy mieć również na uwadze, że w najbliższym czasie zostaną wprowadzone opłaty za dostęp do stacji systemu ASG-EUPOS i pobranie dodatkowych obserwacji ze stacji systemu będzie oznaczało dodatkowy koszt (www.mac.bip.gov.pl).

Zdaniem autora, warto promować różnicowe metody pomiarów kodowych, szczególnie w kręgach, w których obecnie używa się pomiarów autonomicznych (geografowie, archeolodzy, geofizycy, biologowie, leśnicy). Często osoby te dysponują już odbiornikami rejestrującymi surowe obserwacje niezbędne do wykonania *post-processingu*, nie są jednak świadome możliwości oraz korzyści, jakie daje pomiar różnicowy. Wyniki potwierdzają, że w porównaniu do autonomicznego wyznaczenia położenia stacji LODZ, zastosowanie pomiaru różnicowego znacznie podniosło dokładność wyznaczenia współrzędnych stacji (tab. 2). Zasadne jest również używanie pomiarów różnicowych w badaniach prowadzonych na obszarach o znacznie rzadszej sieci stacji referencyjnych, na zbliżonej do Polski i niższej szerokości geograficznej. Jedynie w obszarach podbiegunowych, gdzie odbiór sygnału systemu GPS jest utrudniony, należałoby przeprowadzić podobne badania, aby właściwie ocenić korzyści pomiaru różnicowego.

Wnioski

Przyjmowanie, że błąd narasta liniowo wraz ze wzrostem odległości od stacji referencyjnej, jest w świetle uzyskanych wyników niepoprawne. W większości przypadków, poza nielicznymi wyjątkami, błąd narasta wraz z odległością, ale relacja błąd-odległość nie ma charakteru liniowego i zależy też od kierunku do stacji referencyjnej, a także innych warunków pomiaru, związanych ze stanem atmosfery.

Dokładność *post-processingu* jest stosunkowo wysoka i użycie danych nawet z jednej stacji oddalonej o kilkaset kilometrów zwiększa dokładność różnicowego pomiaru kodowego GPS w porównaniu z pomiarami autonomicznymi. Różnicowe pomiary kodowe z powodzeniem mogą znaleźć zastosowanie wśród polskich badaczy pracujących w krajach o gorszej infrastrukturze geodezyjnej albo na obszarach słabo zaludnionych.

Literatura

- Antosiewicz M., Wężyk P., 2005: GPS w zarządzaniu informacją o środowisku. *Roczniki Geomatyki* t. 3, z. 3: 125-133, PTIP, Warszawa. ISSN 1731 5522.
- Bakula M., 2010: Network code DGPS positioning and reliable estimation of position accuracy. *Survey Review* 42(315): 82-91. ISSN: 0039-6265 (Print), 1752-2706 (On line).
- Bartkowski T., 1977: Metody badań geografii fizycznej. PWN, Warszawa.
- Brach M., 2010: Zastosowanie sieci ASG-EUPOS w Leśnictwie. *Roczniki Geomatyki*, t. 8 z. 7(43): 21-29, PTIP, Warszawa. ISSN 1731 5522.
- Brach M., 2012. Analiza dokładności wyznaczania współrzędnych wybranymi odbiornikami GNSS w środowisku leśnym. *Sywan* 156(1): 47-56. ISSN 0039-7660.
- Brach M., Stereńczak, K., 2006: Wykorzystanie GPS i dalmierza laserowego w praktyce leśnej. *Roczniki Geomatyki* t. 4, z. 4: 67-74, PTIP, Warszawa. ISSN 1731 5522.
- Ciećko A., Grunwald G., Kaźmierczak R., Oszczak S., Grzegorzewski M., Ćwiklak J., 2011: Wykorzystanie oprogramowania RTKlib do badania dokładności systemu EGNOS. *Logistyka-Nauka* 6(12). ISSN 1231-5478.
- Galán C.O., Rodriguez- Pérez J.R., Martínez Torres J., García Nieto P.J., 2011: Analysis of the influence of forest environments on the accuracy of GPS measurements by using genetic algorithms. *Mathematical and Computer Modelling* 54(7-8): 1829-1834. ISSN: 1387-3954 (Print), 1744-5051 (On line).
- Klimánek M., 2010: Analysis of the accuracy of GPS Trimble JUNO ST measurement in the conditions of forest canopy. *Journal of Forest Science*, 2010(2): 84–91. ISSN 1212-4834 (Print), 1805-935X (On line).
- Krzyszowski K., Bosy J., 2011: ASG-EUPOS w terenach przygranicznych. *Acta Scientiarum Polonorum*, 10(1): 33-41. ISSN 1644-0730 (Print), 1898-9594 (On line).
- McKessock G., 2007: A Comparison of Local and Wide Area GNSS Differential Corrections Disseminated Using the Network Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP). *Geodesy and Geomatics Engineering Technical*, (249). ISSN 1365-8816 (Print), 1362-3087 (On line).
- Monteiro L.S., Moore T., Hill C., 2005: What is the accuracy of DGPS? *Journal of Navigation*, 58(2): 207-225. ISSN 0373-4633 (Print), 1469-7785 (On line).
- Nejat D., Kiamehr R., 2013: An investigation on accuracy of DGPS network-based positioning in mountainous regions, a case study in Alborz network. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 48(1): 39-51. ISSN 2213-5812 (Print), 2213-5820 (On line).
- Oszczak B., Wardziejewski, M., Klockowski T., 2010: Analiza dokładności pozycjonowania przy użyciu systemu EGNOS i serwisów ASG-EUPOS w aspekcie możliwości wykorzystania w transporcie drogowym. *Logistyka* 6. ISSN 1231-5478.
- Pérez-Ruiz M., Carballido J., Aguera J., Gil J. A., 2010: Assessing GNSS correction signals for assisted guidance systems in agricultural vehicles. *Precision Agriculture*, 12(5): 639-652. ISSN 1385-2256 (Print), 1573-1618 (On line).
- Skorkowski A., Topór-Kaminski T., 2012: Analysis of EGNOS-Augmented GPS Receiver Positioning Accuracy. *Acta Physica Polonica-Series*, 122(5): 821-825. A ISSN 0587-4246 (Print), 1898-794X (On line), B ISSN 0587-4254 (Print), 1509-5770 (On line).
- Specht C., Skóra M., 2009: Analiza porównawcza wybranych aktywnych sieci geodezyjnych. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, r. 50, nr 3(178): 39-54. ISSN 0860-889X.
- Takasu T., 2010: Real-time PPP with RTKLIB and IGS real-time satellite orbit and clock, IGS Workshop 2010, Newcastle upon Tyne, England, June 28-July 2, 2010.
- www.mac.bip.gov.pl/prawo-i-prace-legislacyjne/projekt-zalozen-projektu-ustawy-o-zmianie-ustawy-prawo-geodezyjne-i-kartograficzne.html Dostęp 03.03.2014 r.
- www.system.asgeupos.pl Dostęp 20 grudnia 2013 r.
- www.wetterzentrale.de Dostęp 20 lutego 2014 r.

Streszczenie

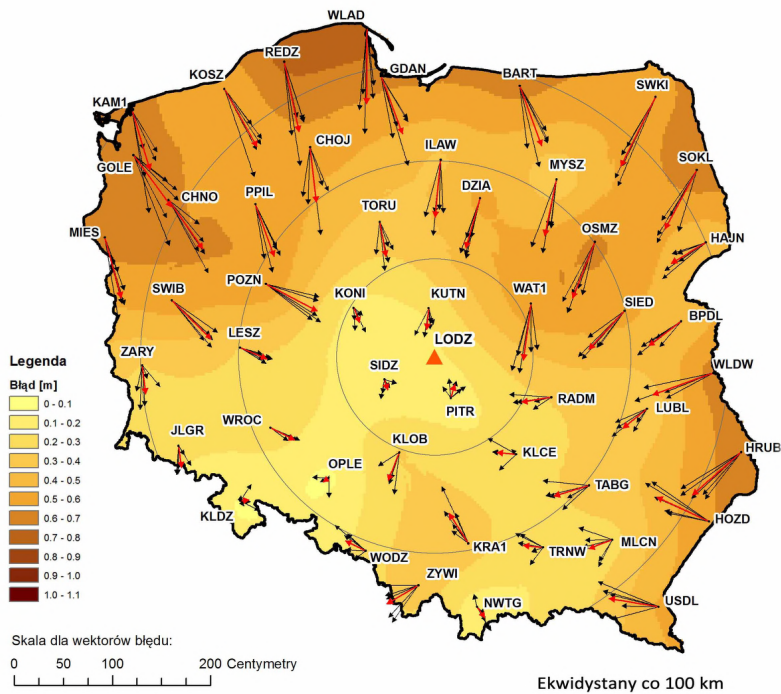
W ostatnich latach coraz częściej do kartowania używa się odbiorników GPS. Oprócz odbiorników geodezyjnych, o dużej dokładności, wyodrębnić można odbiorniki klasy GIS charakteryzujące się pracą tylko na częstotliwości L1 w trybie kodowym, umożliwiające jednak wykonanie post-processingu danych w celu zwiększenia dokładności pomiaru. Dokładność pomiaru z post-processingiem maleje wraz ze wzrostem odległości od stacji referencyjnej. Autor na podstawie obserwacji z 50 stacji systemu ASG-EUPOS zbadał tę zależność wykorzystując obserwacje kodowe na częstotliwości L1. Stację LODZ potraktowano jako odbiornik ruchomy, natomiast pozostałe stacje jako referencyjne. Wykonano post-processing w oparciu o każdą stację osobno. Do obliczeń użyto bezpłatnego oprogramowania RTKlib. Wyniki potwierdzają spadek dokładności wraz ze wzrostem odległości, jednak nie jest to zależność liniowa. Generalnie badania dowodzą, że uśredniony błąd w najdalszym miejscu od stacji LODZ, oddalonym o ok. 350 km nie przekroczył 100 cm w poziomie i 170 cm w pionie.

Abstract

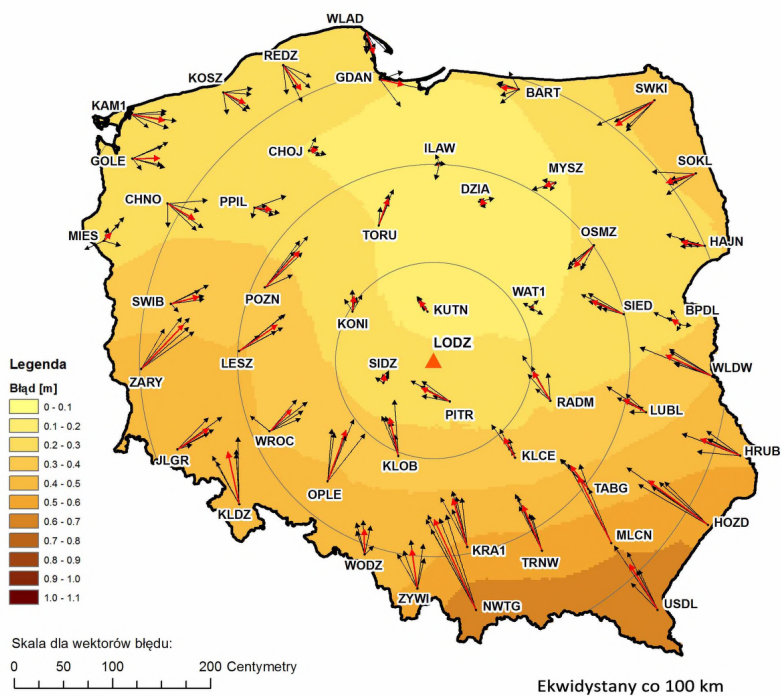
There has been a significant increase in using GPS receivers in mapping during the last few years. Aside from high precision GPS receivers there are also GIS class receivers that work on L1 frequency in the code mode and enable performing post processing of data. The post processing accuracy decreases as the distance to the reference station increases. Based on observations from 50 ASG-EUPOS stations the author analyzed this phenomenon using code mode observations on L1 frequency. The LODZ station was considered to be a rover while the rest of stations were treated as reference stations. The post processing was performed separately for every single station using freeware software RTKlib. The results confirmed the initial assumption: the accuracy decreases as the distances increase without being a linear relationship, though. In general, the survey proves that average error in the furthest spot (350km from LODZ station) is no greater than 100 cm horizontally and 170 cm vertically.

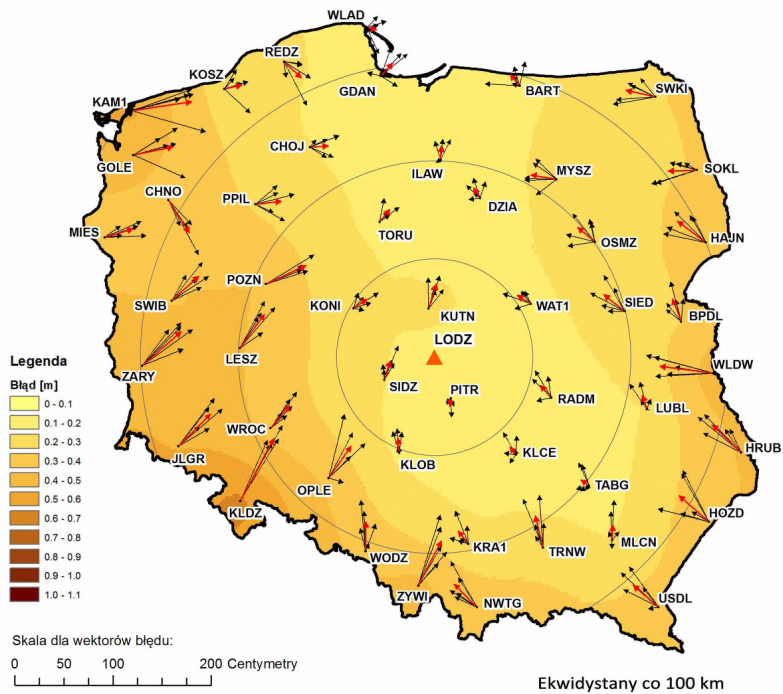
mgr inż. Łukasz Beluch
lbeluch@gis.geo.uj.edu.pl

Rysunek 1. Błąd ΔXY wyznaczenia położenia stacji LODZ w październiku 2012 r.; wektor w kolorze czerwonym przedstawia średni błąd z pięciu dni

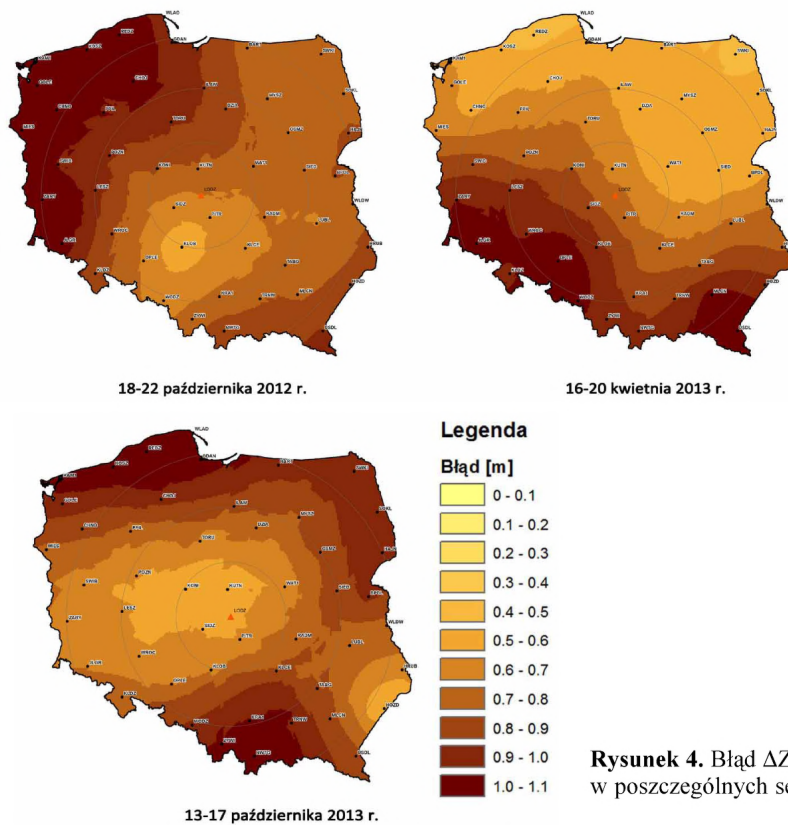


Rysunek 2. Błąd ΔXY wyznaczenia położenia stacji LODZ w kwietniu 2013 r.; wektor w kolorze czerwonym przedstawia średni błąd z pięciu dni





Rysunek 3. Błąd ΔXY wyznaczenia położenia stacji LODZ w październiku 2013 r.; wektor w kolorze czerwonym przedstawia średni błąd z pięciu dni



Rysunek 4. Błąd ΔZ w poszczególnych seriach pomiarowych