

AUTOREFERAT

DR INŻ. JACEK PAZIEWSKI

OLSZTYN 2017

Spis treści

1. IMIĘ I NAZWISKO	3
2. POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE	3
3. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH	3
4. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA WYNIKAJĄCEGO Z ART. 16 UST.2 USTAWY Z DNIA 14 MARCA 2003 R. O STOPNIACH NAUKOWYCH I TYTULE NAUKOWYM ORAZ O STOPNIACH I TYTULE W ZAKRESIE SZTUKI (DZ. U. 2016 R. POZ. 882 ZE ZM.)	4
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego	4
4.2. Spis publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe.....	4
4.3. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich możliwego wykorzystania.....	6
4.3.1. Wprowadzenie i uzasadnienie badań	6
4.3.2. Rozwój algorytmów wielosystemowego i wieloczęstotliwościowego pozycjonowania GNSS (publikacje 1.B.1, 1.B.2, 1.B.3, 1.B.7, 1.B.8).....	8
4.3.3. Opracowanie nowych metod pozycjonowania wieloodbiornikowego (publikacja 1.B.4) 21	
4.3.4. Badania związane z opracowaniem nowych metod zmniejszających niekorzystny wpływ refrakcji jonosferycznej na pozycjonowanie GNSS (publikacje 1.B.5, 1.B.6)	24
4.3.5. Podsumowanie.....	31
4.3.6. Literatura	32
5. OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO - BADAWCZYCH	35
6. PODSUMOWANIE DOROBKU I OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH, POPULARYZATORSKICH, ORGANIZACYJNYCH I DYDAKTYCZNYCH	40

1. IMIĘ I NAZWISKO

Jacek Daniel Paziewski

2. POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE

1. **Tytuł zawodowy inżynier** w zakresie geodezji i kartografii nadany przez Radę Wydziału Geodezji i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie dn. 26.06.2006 r.

Praca inżynierska nt.: „*Analiza metod wyznaczania przemieszczeń pionowych*”, Promotor: prof. dr hab. inż. Waldemar Kamiński,

2. **Tytuł zawodowy magister inżynier** w zakresie geodezji i kartografii nadany przez Radę Wydziału Geodezji i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie dn. 12.03.2008 r.

Praca magisterska nt.: „*Badanie deformacji terenu z wykorzystaniem satelitarnej technologii GPS*”, Promotor: dr inż. Radosław Baryła

3. **Stopień naukowy doktora nauk technicznych** w dyscyplinie geodezja i kartografia w zakresie geodezji satelitarnej nadany dn. 9.10.2012 r. przez Radę Wydziału Geodezji i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

Tytuł rozprawy doktorskiej: „*Nowe algorytmy do precyzyjnego wyznaczania pozycji z wykorzystaniem sygnałów europejskich systemów satelitarnych Galileo i EGNOS*”

Promotor rozprawy doktorskiej: dr hab. inż. Paweł Wielgosz, prof. UWM

Recenzenci rozprawy doktorskiej:

1. prof. dr hab. inż. Jarosław Bosy, prof. zw. (Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu)
2. prof. dr hab. inż. Stanisław Oszczak, prof. zw. (Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych Dęblin)

3. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH

01.01.2013- Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej na stanowisku adiunkta (obecnie Wydział Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa.

Jacek Paziewski

4. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA WYNIKAJĄCEGO Z ART. 16 UST.2 USTAWY Z DNIA 14 MARCA 2003 R. O STOPNIACH NAUKOWYCH I TYTULE NAUKOWYM ORAZ O STOPNIACH I TYTULE W ZAKRESIE SZTUKI (DZ. U. 2016 R. POZ. 882 ZE ZM.).

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Rozprawę habilitacyjną pt.: *„Doskonalenie metod precyzyjnego wyznaczania pozycji opartych o wielosystemowe obserwacje GNSS”* stanowi cykl publikacji naukowych powiązanych tematycznie.

Przedstawiony poniżej cykl publikacji dotyczy szczegółowych zagadnień w zakresie wykorzystania satelitarnych systemów globalnego pozycjonowania i stanowi osiągnięcie naukowe wynikające z art. 16 ust.2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Wspólnym mianownikiem przedstawionego cyklu publikacji jest wykorzystanie wielosystemowych obserwacji GNSS do precyzyjnego względnego wyznaczania pozycji. Przedstawione badania dotyczą zarówno rozwoju oryginalnych metod integracji obserwacji wielosystemowych jak również badań nad algorytmami względnego pozycjonowania i ich właściwościami.

4.2. Spis publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

W Tabeli 1 przedstawiono spis pozycji stanowiących cykl publikacji powiązanych tematycznie wraz z udziałem procentowym wnioskodawcy w ich przygotowaniu. Wszystkie publikacje znajdują się na liście A MNiSW – są indeksowane przez JCR. Podano: oznaczenie porządkowe zgodne z wykazem dorobku (załącznik nr 3), Impact Factor czasopisma, liczbę punktów czasopisma wg MNiSW z roku opublikowania, udział procentowy wnioskodawcy w przygotowaniu pracy. Szczegółowy opis wkładu wnioskodawcy w przygotowanie poszczególnych publikacji przedstawiono w załączniku nr 3.

Tabela 1 Spis publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe.

Ozn. publ.	Publikacja	Liczba punktów czasop.	Impact Factor czasop.	Udział wnioskodawcy
1.B.1	Paziewski J , Wielgosz P, 2014, Assessment of GPS + Galileo and multi-frequency Galileo single-epoch precise positioning with network corrections, <i>GPS Solutions</i> , Vol. 18(4), 571-579, DOI 10.1007/s10291-013-0355-3	30	2.918	80%
1.B.2	Paziewski J , Wielgosz P, 2015, Accounting for Galileo-GPS inter-system biases in precise satellite positioning, <i>Journal of Geodesy</i> , Vol. 89(1), 81-93, DOI 10.1007/s00190-014-0763-3	40	2.486	80%
1.B.3	Paziewski J , Sieradzki R, Wielgosz P, 2015, Selected properties of GPS and Galileo-IOV receiver intersystem biases in multi-GNSS data processing, <i>Measurement Science and Technology</i> , Vol. 26(9), 095008, DOI:10.1088/0957-0233/26/9/095008	30	1.433	50%
1.B.4	Paziewski J , 2015, Precise GNSS single epoch positioning with multiple receiver configuration for medium-length baselines: methodology and performance analysis, <i>Measurement Science and Technology</i> , Vol. 26(3), 035002, DOI:10.1088/0957-0233/26/3/035002	30	1.433	100%
1.B.5	Paziewski J , 2016, Study on desirable ionospheric corrections accuracy for network-RTK positioning and its impact on time-to-fix and probability of successful single-epoch ambiguity resolution, <i>Advances in Space Research</i> , Vol. 57(4), 1098-1111, DOI 10.1016/j.asr.2015.12.024	20	1.401	100%
1.B.6	Sieradzki R, Paziewski J , 2016, Study on reliable GNSS positioning with intense TEC fluctuations at high latitude, <i>GPS Solutions</i> , Vol. 20(3), 553-563, DOI 10.1007/s10291-015-0466-0	35	4.061	50%
1.B.7	Paziewski J , Wielgosz P, 2017, Investigation of some selected strategies for multi-GNSS instantaneous RTK positioning, <i>Advances in Space Research</i> , Vol. 59(1), 12-23, DOI 10.1016/j.asr.2016.08.034	20	1.401	80%
1.B.8	Paziewski J , Sieradzki R, 2017, Integrated GPS+BDS instantaneous medium baseline RTK positioning: signal analysis, methodology and performance assessment, <i>Advances in Space Research</i> , DOI 10.1016/j.asr.2017.04.016	20	1.401	60%

4.3. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich możliwego wykorzystania

4.3.1. Wprowadzenie i uzasadnienie badań

Od początku aktywności naukowej w głównym nurcie moich zainteresowań badawczych znajdował się rozwój nowych algorytmów i metod opracowania obserwacji GNSS (*Global Navigation Satellite System*) służących wyznaczeniu precyzyjnej pozycji i jej zastosowaniu w dziedzinie geodezji i kartografii. Dlatego też temu zagadnieniu poświęcony jest omawiany cykl publikacji.

Wykorzystanie systemów GNSS dawno już wykroczyło poza ramy ich pierwotnego przeznaczenia, jakim była nawigacja. Obecnie systemy GNSS znajdują szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach nauki, gospodarki i życia takich jak geodezja i kartografia, badania geodynamiczne i geofizyczne, meteorologia, badania przestrzeni kosmicznej, transport, inżynieria lądowa, metrologia, górnictwo i geologia, systemy informacji geograficznej, lotnictwo, bezpieczeństwo, telekomunikacja, rolnictwo i wiele innych gdzie informacja o położeniu przestrzennym lub czasie jest kluczowa. Osiągnięcie tak szerokiego spektrum zastosowań systemów GNSS możliwe było między innymi dzięki rozwojowi nowych metod oraz algorytmów opracowania sygnałów umożliwiających poprawę czterech podstawowych parametrów pracy systemu nawigacyjnego takich jak ciągłość, dostępność, wiarygodność i dokładność. W mojej dotychczasowej pracy badawczej starałem się **udoskonalić istniejące oraz opracować nowe algorytmy precyzyjnego pozycjonowania względnego oraz absolutnego opartego o sygnały z wielu systemów GNSS**, które umożliwiłyby poprawę wyżej wymienionych parametrów ze szczególnym naciskiem na wiarygodności i dokładności otrzymanej pozycji, co wydaje się najistotniejsze w świetle zastosowań geodezyjnych. Innym istotnym celem jest dążenie do skrócenia wymaganej długości sesji obserwacyjnej - nawet do pojedynczej epoki oraz zwiększenie dopuszczalnej odległości pomiędzy odbiornikiem wyznaczanym a stacjami referencyjnymi (wydłużenie wektorów) we względnym satelitarnym pozycjonowaniu. W rozwiązaniu z pojedynczej epoki obserwacyjnej – chwilowym (ang. *instantaneous*) nie wykorzystuje się akumulowanej informacji o parametrach z rozwiązania poprzednich epok, co utrudnia wiarygodne rozwiązanie. Jednocześnie metoda jest odporna na występowanie utraconych cykli obserwacji fazowych. Jak wskazują dotychczasowe światowe badania w tym zakresie poprawę dokładności, wiarygodności i szybkość wyznaczenia pozycji opartej o systemy GNSS można otrzymać na wiele sposobów. Jednymi z nich jest wykorzystanie rezultatów badań w obszarach stanowiących szczegółowe zagadnienia badawcze niniejszego cyklu publikacji, których wspólnym mianownikiem jest doskonalenie metod precyzyjnego pozycjonowania GNSS:

- opracowanie metod integracji sygnałów pochodzących z nowych systemów GNSS - pozycjonowanie wielosystemowe i wieloczęstotliwościowe (Publikacje **1.B.1**, **1.B.2**, **1.B.3**, **1.B.7**, **1.B.8**).

W tym zakresie opracowałem nowe algorytmy integracji obserwacji wielosystemowych i wieloczęstotliwościowych oraz przeanalizowałem ich właściwości porównując z metodami dotychczas stosowanymi. W publikacji (**1.B.1**) przedstawiłem wyniki własnych początkowych badań w zakresie integracji obserwacji systemów Galileo i GPS w modelu matematycznym precyzyjnego pozycjonowania względnego oraz pozycjonowania opartego na wielu częstotliwościach. W publikacji dokonałem również porównania rezultatów zastosowania nowych podejść w stosunku do rozwiązania standardowego opartego na dwuczęstotliwościowych obserwacjach GPS.

Publikacje (**1.B.2**) i (**1.B.3**) poświęcono jednemu z głównych problemów występujących w przypadku ścisłej integracji obserwacji wielosystemowych, jakim jest modelowanie międzysystemowych opóźnień sprzętowych odbiorników GNSS. Opracowałem model pozycjonowania względnego zakładający ścisłą integrację obserwacji pochodzących z różnych systemów GNSS wykorzystujących wspólne częstotliwości, metodę estymacji ww. opóźnień oraz przeprowadziłem analizę ich stabilności krótko- i długookresowej.

Publikację (**1.B.7**) poświęcono analizie teorii i praktycznemu porównaniu rezultatów pozycjonowania RTK opartego o wybrane metody integracji wielosystemowych obserwacji GNSS. Publikacja (**1.B.8**) dotyczyła wykorzystania opracowanego modelu matematycznego precyzyjnego pozycjonowania względnego z pojedynczej epoki obserwacyjnej przy wykorzystaniu obserwacji systemu GPS oraz rozwijanego obecnie systemu BDS dla średniej długości wektorów.

Wykorzystanie opracowanych algorytmów integracji wielosystemowych i wieloczęstotliwościowych obserwacji pozwoliło na poprawę dokładności wyznaczenia pozycji, skrócenie długości sesji obserwacyjnej nawet do pojedynczej epoki – pozycjonowanie chwilowe, jak również wydłużenie dopuszczalnej długości wektorów w pozycjonowaniu względnym (**1.B.1**, **1.B.2**, **1.B.3**, **1.B.7**, **1.B.8**).

- opracowanie nowych metod wieloodbiornikowego pozycjonowania GNSS (Publikacja **1.B.4**)

Pozycjonowanie wieloodbiornikowe ma na celu wyznaczenie współrzędnych lub/i parametrów orientacji obiektu w oparciu o wiele ruchomych odbiorników użytkownika znajdujących się na wspólnej sztywnej konstrukcji. Znane wzajemne położenie anten odbiorników umożliwia wykorzystanie dodatkowych informacji w celu poprawy dokładności, wiarygodności i szybkości rozwiązania. Opierając się na tym założeniu opracowałem nową metodę oraz model matematyczny precyzyjnego pozycjonowania

kinematycznego na podstawie obserwacji z pojedynczej epoki obserwacyjnej wykorzystując związki występujące pomiędzy obserwacjami i parametrami modelu dla wielu anten odbiorników zamontowanych na wspólnej sztywnej platformie o znanej wzajemnej geometrii rozmieszczenia. Wykorzystanie opracowanych algorytmów pozwala na poprawę rezultatów względnego pozycjonowania satelitarne w dziedzinie rozwiązania nieoznaczoności obserwacji fazowych. Przy wykorzystaniu oryginalnego algorytmu zaobserwowano wzrost udziału sesji z prawidłowo rozwiązanymi nieoznaczonościami w stosunku do klasycznego rozwiązania z pojedynczym odbiornikiem użytkownika (**1.B.4**).

- badania wpływu błędów spowodowanych propagacją sygnału GNSS w jonosferze oraz rozwój metod ich eliminacji w precyzyjnym pozycjonowaniu (Publikacje **1.B.5**, **1.B.6**).

Powyższemu zagadnieniu szczegółowemu poświęcono dwie z publikacji stanowiących niniejszy cykl. Pierwsza publikacja poświęcona została badaniom nad właściwościami poprawek jonosferycznych otrzymanych z rozwiązania sieciowego w pozycjonowaniu GNSS-RTK. W szczególności określiłem ich dokładność dla różnych stanów aktywności jonosfery na przykładzie polskiej permanentnej sieci ASG-EUPOS. Dodatkowo przeprowadziłem analizę dotyczącą wpływu dokładności poprawek na długość sesji obserwacyjnej wymaganą do prawidłowego rozwiązania nieoznaczoności (*Time To Fix*). Następnie określiłem pożądaną dokładność poprawek jonosferycznych umożliwiającą wiarygodne pozycjonowanie na podstawie obserwacji z jednej epoki - pozycjonowanie chwilowe (**1.B.5**). W kolejnej publikacji rozszerzono badania w kierunku opracowania oryginalnych metod eliminacji wpływu zaburzeń jonosferycznych (**1.B.6**). Opracowałem we współpracy nowe algorytmy eliminacji wpływu silnych zaburzeń jonosferycznych na precyzyjne względne pozycjonowanie GNSS. Zastosowanie oryginalnego algorytmu pozwoliło na znaczną poprawę skuteczności procesu rozwiązania nieoznaczoności w warunkach występowania zaburzeń jonosferycznych (**1.B.6**).

4.3.2. Rozwój algorytmów wielosystemowego i wieloczęstotliwościowego pozycjonowania GNSS (publikacje 1.B.1, 1.B.2, 1.B.3, 1.B.7, 1.B.8)

Opierając się na tezie, iż jedną z głównych metod poprawy rezultatów pozycjonowania satelitarne jest wykorzystanie większej liczby sygnałów, dużą wagę przywiązano do opracowania nowych algorytmów pozycjonowania wielosystemowego i wieloczęstotliwościowego. Wraz z dynamicznym rozwojem nowych globalnych systemów nawigacji satelitarnej pojawiła się możliwość, a zarazem konieczność, opracowania nowych metod umożliwiających łączne wykorzystanie sygnałów z nowych systemów jak Galileo i

BDS oraz modernizowanych – GPS w pozycjonowaniu. Badania nad integracją obserwacji pochodzących z wielu systemów GNSS są obecnie chętnie podejmowane przez środowisko naukowe, co znajduje swe odzwierciedlenie w licznych publikacjach w czasopiśmie o szerokim obiegu międzynarodowym. Zgodnie z wynikami oczekuje się, iż łączne wykorzystanie sygnałów wielosystemowych będzie prowadzić w rezultacie do wzrostu dokładności, wiarygodności i dostępności wyznaczenia precyzyjnej względnej pozycji, jak również skrócenia czasu inicjalizacji oraz wydłużenia dystansu pomiędzy stacjami referencyjnymi, a odbiornikiem użytkownika (Verhagen 2002, Zhang 2003, Julien i in. 2004, Odijk i in. 2012, Paziewski i Wielgosz 2014 – **1.B.1**, Shi i in. 2013, Chu i Yang 2014).

W pierwszym etapie moje badania skupiały się na ocenie możliwości poprawy rezultatów pozycjonowania przy wykorzystaniu przyszłej pełnej konstelacji satelitów systemu Galileo oraz zmodernizowanego systemu GPS (**1.B.1**). Modernizacja systemu GPS skutkuje zwiększeniem liczby sygnałów transmitowanych na istniejących (L1, L2) oraz nowych częstotliwościach (L5). Będący w trakcie rozwoju system Galileo oferuje zaś bardzo nowoczesne sygnały na kilku częstotliwościach: E1, E5a, E5b, E5AltBOC(E5a+E5b) i E6. Zastosowanie większej niż standardowa obecnie liczba dwóch częstotliwości jest korzystne z punktu widzenia modelowania opóźnienia jonosferycznego, co jest kluczowe w prawidłowym rozwiązaniu nieoznaczoności obserwacji fazowych. Dwie wspólne w obu systemach częstotliwości (1 575.420 MHz dla L1/GPS i E1/Galileo, oraz 1 176.450 MHz dla L5/GPS i E5a/Galileo) umożliwiają również tworzenie podwójnie zróżnicowanych obserwacji pomiędzy systemami, na których oparty jest model względnego pozycjonowania satelitarne. To prowadzi do ścisłej integracji przy uwzględnieniu różnic w systemach czasu, układach współrzędnych oraz opóźnieniach sprzętowych.

Biorąc pod uwagę dekorelację opóźnień jonosferycznych i troposferycznych wraz ze wzrostem długości wektora w pozycjonowaniu względnym, zastosowana metodologia powinna brać pod uwagę skuteczną eliminację ww. błędów. Jednym ze skuteczniejszych sposobów jest zastosowanie opartego na geometrii pomiaru (ang. *geometry-based*) modelu tzw. wagowanej jonosfery i troposfery (ang. *ionosphere and troposphere weighted model*). Model ten rozwijany przez szereg grup badawczych (Bock i in. 1986, Teunissen 1997, Paziewski i Wielgosz 2014 – **1.B.1**, Paziewski 2016 – **1.B.5**, Próchniewicz i in. 2017) zakłada parametryzację podwójnie zróżnicowanych opóźnień jonosferycznych oraz zenitalnych opóźnień troposferycznych. Pierwotnie wykorzystywany był jedynie dla dwuczęstotliwościowych obserwacji systemu GPS. W pracy (**1.B.1**) opracowano model matematyczny dostosowany do wieloczęstotliwościowych zintegrowanych obserwacji systemów GPS i Galileo wraz z praktyczną implementacją w autorskim oprogramowaniu. Model ten wymaga wsparcia wyznaczenia pozycji odbiornika ruchomego zewnętrznymi poprawkami jonosferycznymi generowanymi z rozwiązania sieci stacji referencyjnych. Etap ten oparłem na zastosowaniu kombinacji liniowej *geometry-free* (1), (Schaer 1999), którą dostosowałem do zbieżnych w systemach GPS i Galileo częstotliwości L1/E1 i L5/E5a w

celu obliczenia opóźnień podwójnie zróżnicowanych, a następnie ich dekorelacji do wartości absolutnych wraz z interpolacją dla pozycji użytkownika.

$$\varphi_{kl,GF}^{ij} = \lambda_1 \varphi_{kl,1}^{ij} - \lambda_2 \varphi_{kl,2}^{ij} = - \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2} \right) I_{kl}^{ij} + \lambda_1 N_{kl,1}^{ij} - \lambda_2 N_{kl,2}^{ij} \quad (1)$$

gdzie: indeksy i oraz j odnoszą się do satelitów, indeksy k oraz l identyfikują stacje, φ_{GF} jest obserwacją fazową utworzoną z kombinacji liniowej *geometry-free*, φ_1 , oraz φ_2 są obserwacjami fazowymi, λ_1 i λ_2 to długości fali dla zastosowanych częstotliwości f_1 oraz f_2 , I odnosi się do opóźnienia jonosferycznego, a N_1 oraz N_2 to nieoznaczoności obserwacji fazowych dla zastosowanych częstotliwości.

Zgeneralizowany model matematyczny *ionosphere and troposphere weighted* dla wielosystemowych i wieloczęstotliwościowych obserwacji GPS i Galileo można przedstawić za pomocą poniższych zlinearyzowanych równań obserwacyjnych. Model zakłada wykorzystanie, co najmniej dwóch częstotliwości z dowolnej ich liczby n .

$$\lambda_n \varphi_{kl,n}^{ij} - \rho_{kl}^{ij} - (\alpha_k^i ZTD_k - \alpha_k^j ZTD_k - \alpha_l^i ZTD_l + \alpha_l^j ZTD_l) + I_{kl,1}^{ij} \frac{f_1^2}{f_n^2} - \lambda_n N_{kl,n}^{ij} = 0 \quad (2)$$

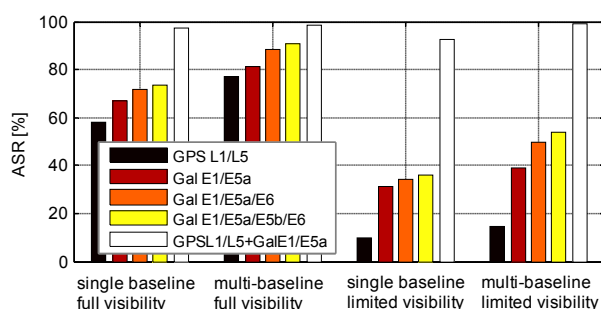
$$P_{kl,n}^{ij} - \rho_{kl}^{ij} - (\alpha_k^i ZTD_k - \alpha_k^j ZTD_k - \alpha_l^i ZTD_l + \alpha_l^j ZTD_l) - I_{kl,1}^{ij} \frac{f_1^2}{f_n^2} = 0 \quad (3)$$

gdzie: P jest pseudoodległością z pomiaru kodowego, ρ to odległość geometryczna pomiędzy satelitą a odbiornikiem, α to współczynnik funkcji odwzorowującej opóźnienie troposferyczne, ZTD (ang. *zenith tropospheric delay*) odnosi się do zenitalnego opóźnienia troposferycznego.

Rozwiązanie modelu przeprowadzane jest w trój etapowej procedurze. W pierwszym kroku estymowane są parametry modelu otrzymując niecałkowitoliczbowe wartości nieoznaczoności (tzw. rozwiązanie *float*). Następnie całkowitoliczbowość nieoznaczoności jest uzyskiwana korzystając z wybranego algorytmu, którym w przypadku tych badań był algorytm Lambda (Teunissen 1995). Następnie po procesie walidacji rozwiązania nieoznaczoności wybranym testem (Wang 1998), parametry te są traktowane, jako znane i wykorzystane do ponownego przeliczenia pozostałych niewiadomych w modelu. Do estymacji parametrów modelu zaadaptowano metodę najmniejszych kwadratów z ograniczeniami nakładanymi na wartości a priori wybranych parametrów (Xu 2007). W przypadku opracowania dłuższych sesji obserwacyjnych, model rozwiązywany był sekwencyjnie, a parametry zależne od epoki obserwacyjnej (jak np. współrzędne kinematyczne odbiornika) były odpowiednio eliminowane po każdej epoce z równań normalnych.

Wykorzystując model matematyczny względnego pozycjonowania GPS+Galileo (2-3) wspartego sieciowymi poprawkami generowanymi z rozwiązania sieci stacji referencyjnych

(na podstawie 1) przeprowadzono praktyczne testy dotyczące jakości pozycjonowania wielosystemowego oraz wieloczęstotliwościowego na podstawie analizy rozwiązań chwilowych w dziedzinie współrzędnych oraz nieoznaczoności (**1.B.1**). Eksperyment oparto na wielostacijnym rozwiązaniu przy wykorzystaniu trzech wektorów o długościach ponad 100 km. Obserwacje satelitarne dla pełnej konstelacji systemu Galileo oraz zmodernizowanego GPS pozyskano przy wykorzystaniu sprzętowego symulatora sygnałów GNSS firmy Spirent oraz odbiorników Septentrio. Należy podkreślić, iż tak opracowana strategia umożliwiła wiarygodne rozwiązanie już z pojedynczej epoki obserwacyjnej (pozycjonowanie chwilowe). Analizując dla założonych strategii obliczeniowych parametr charakteryzujący skuteczność rozwiązania nieoznaczoności obserwacji fazowych, jakim jest udział procentowy epok z prawidłowo rozwiązanymi nieoznaczonościami (Rys. 1), można oczekiwać, iż wielosystemowe pozycjonowanie RTK średniego i dalekiego zasięgu przy wykorzystaniu w pełni operacyjnych systemów GPS+Galileo przyniesie zdecydowaną poprawę rezultatów pozycjonowania w stosunku do rozwiązania opartego na pojedynczym systemie. Co więcej korzyść z wykorzystania obserwacji wielosystemowych jest większa niż samo zwiększenie liczby częstotliwości w ramach tego samego systemu (przy zachowaniu liczby satelitów).



Rys. 1 Udział procentowy epok z prawidłowo rozwiązanymi nieoznaczonościami dla założonych strategii obliczeniowych (źródło: 1.B.1).

Osiągnięte szczegółowe cele naukowe przedstawione w publikacji (**1.B.1**):

- określenie możliwości poprawy rezultatów precyzyjnego pozycjonowania RTK z pojedynczej epoki obserwacyjnej na podstawie wykorzystania sygnałów przyszłej pełnej konstelacji systemu Galileo i zmodernizowanego systemu GPS;
- opracowanie metody estymacji sieciowych poprawek jonosferycznych RTK na podstawie łącznego opracowania obserwacji GPS + Galileo i wykorzystania częstotliwości L5;
- opracowanie modelu oraz ocena jakości pozycjonowania wieloczęstotliwościowego opartego wyłącznie na konstelacji Galileo.

Oprócz opracowania odpowiedniego modelu matematycznego pozycjonowania istotne w integracji obserwacji wielosystemowych są: właściwe określenie modelu

stochastycznego biorącego pod uwagę różnice w dokładności sygnałów oraz uwzględnienie różnic w opóźnieniach sprzętowych. Podczas wstępnych badań dotyczących integracji obserwacji multi-GNSS w precyzyjnym pozycjonowaniu względnym (**1.B.1**) zaobserwowano **istotny wpływ różnic w opóźnieniach sprzętowych odbiorników dla sygnałów pochodzących z różnych systemów GNSS**. Zagadnienie to poddano to szerszej analizie w kolejnych publikacjach (**1.B.2**) oraz (**1.B.3**).

Obecnie integracja obserwacji pochodzących z odrębnych systemów GNSS najczęściej polega na wykorzystaniu zmodyfikowanego modelu matematycznego opartego na geometrii pomiaru zakładającego wykorzystanie odrębnych satelitów referencyjnych dla każdego z systemów GNSS. To podejście określane jest jako luźna integracja i jest stosowane gdy wykorzystywane są sygnały na różnych częstotliwościach dla każdego z systemów. Zagadnienie luźnej integracji obserwacji GPS+BDS było podejmowane min. w pracach Deng i in. (2014) oraz He i in. (2014) oraz Paziewski i Wielgosz 2016 - **1.B.7**. Z drugiej jednak strony, wspólne częstotliwości w różnych systemach GNSS, jak np. L1/E1 and L5/E5a w systemach GPS i Galileo, stwarzają możliwość tworzenia międzysystemowych podwójnie zróżnicowanych obserwacji, które to są podstawowymi obserwacjami wykorzystywanymi w modelu pozycjonowania względnego. Konsekwencją takiego podejścia jest stosowanie jednego satelity referencyjnego dla wszystkich systemów GNSS. Strategia ta określana jest, jako ścisła integracja (Julien i in. 2004, Paziewski i Wielgosz 2014 - **1.B.1**). Jej zastosowanie wzmacnia wiarygodność rozwiązania we względnym pozycjonowaniu, lecz z drugiej strony wymaga uwzględnienia różnic w opóźnieniach sprzętowych odbiorników dla poszczególnych systemów GNSS (*receiver Inter System Bias - ISB*) (Odijk i Teunissen 2013, Paziewski i Wielgosz 2015 - **1.B.2**, Paziewski i in. 2015 - **1.B.3**, Odijk i in 2017), gdyż ich wpływ nie jest eliminowany poprzez tworzenie podwójnie zróżnicowanych obserwacji. Międzysystemowe różnicowe opóźnienia sprzętowe ISB odbiorników dla obserwacji fazowych ($\delta_{kl}^{(G-E)}$) oraz kodowych ($d_{kl}^{(G-E)}$) są różnicą opóźnień sprzętowych dwóch odbiorników (k, j) dla poszczególnych systemów (G - GPS, E - Galileo). Przyjmują również różne wartości dla każdej ze wspólnych częstotliwości.

$$\delta_{kl}^{(G-E)} = \delta_{kl}^{(G)} - \delta_{kl}^{(E)} = \delta_l^{(E)} - \delta_k^{(E)} - \delta_l^{(G)} + \delta_k^{(G)} \quad (4)$$

$$d_{kl}^{(G-E)} = d_{kl}^{(G)} - d_{kl}^{(E)} = d_l^{(E)} - d_k^{(E)} - d_l^{(G)} + d_k^{(G)} \quad (5)$$

W pracy (**1.B.2**) zaproponowałem autorską metodą wyznaczania fazowych oraz kodowych międzysystemowych różnicowych opóźnień sprzętowych wykorzystując obserwacje z odbiorników znajdujących się na zerowej bądź krótkiej bazie. Zmodyfikowany w tym celu model matematyczny pozycjonowania względnego zakłada parametryzację różnic w opóźnieniach sprzętowych pary odbiorników dla sygnałów pochodzących z dwóch systemów satelitarnych. Opracowany model zakłada estymację ułamkowej części

międzysystemowych opóźnień sprzętowych obserwacji fazowych korzystając z nakładanych warunków na parametry w modelu wyrównawczym. Pozostała całkowita część powyższego parametru jest łączona z nieoznaczonościami obserwacji fazowych i tworzy nowy wyznaczany parametr (\bar{N}_{kl}^{GE}). Odseparowanie powyższych dwóch parametrów jest utrudnione ze względu na ich wzajemną wysoką korelację.

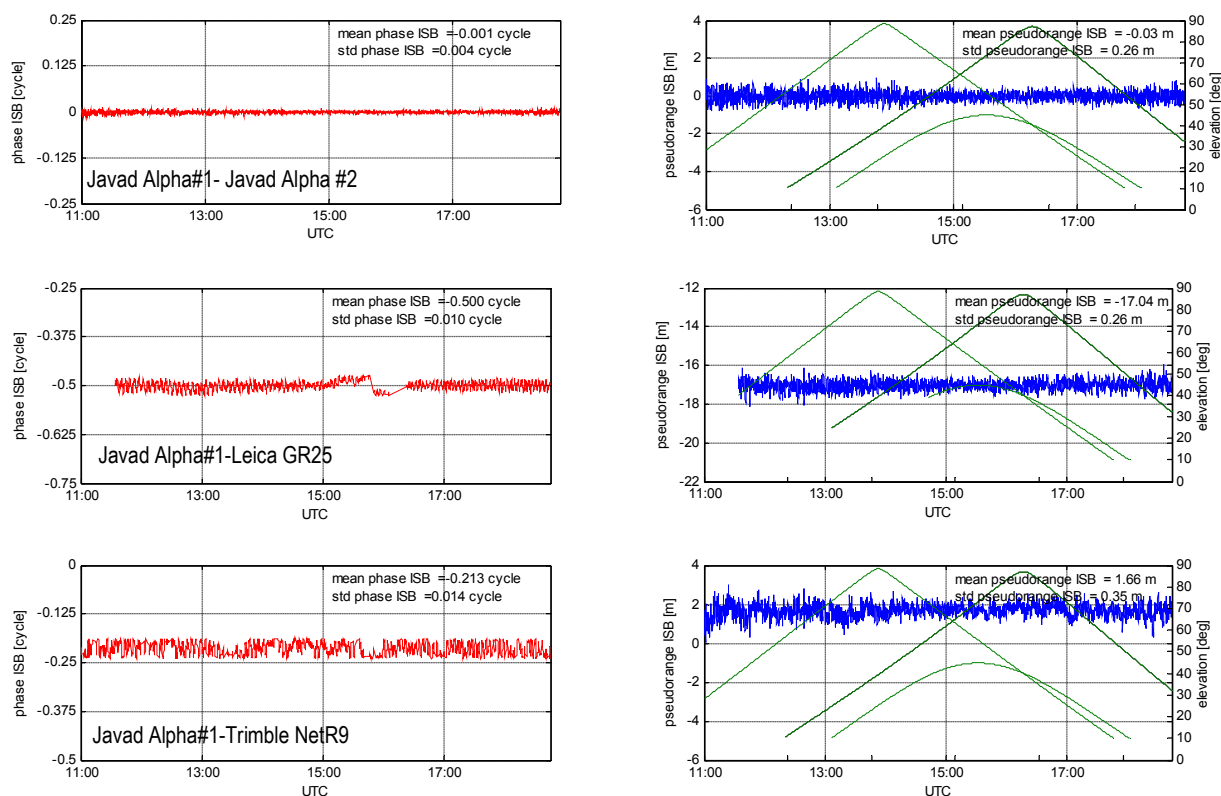
$$\phi_{kl}^{GE} = \varrho_{kl}^{GE} + \lambda \bar{N}_{kl}^{GE} + \bar{\delta}_{kl}^{(G-E)} + \epsilon_{kl,\phi}^{GE} \quad (6)$$

$$P_{kl}^{GE} = \varrho_{kl}^{GE} + d_{kl}^{(G-E)} + \epsilon_{kl,P}^{GE} \quad (7)$$

gdzie: \bar{N}_{kl}^{GE} to suma nieoznaczoności obserwacji fazowych oraz całkowitej liczby cykli fazy międzysystemowych opóźnień sprzętowych odbiorników.

Na podstawie opracowanego modelu matematycznego przeprowadzono praktyczne badania nad wyznaczaniem wartości międzysystemowych opóźnień sprzętowych dla różnych par odbiorników. Na podstawie otrzymanych szeregów czasowych fazowych i kodowych ISB przeprowadzono analizy dotyczące krótko- i długookresowej stabilności ww. parametrów, co było podstawą do postawienia i udowodnienia tezy o ich stałości w czasie. Dotychczasowe badania prowadzone przez środowisko naukowe zakładały wyznaczanie nowych wartości ISB na każdą epokę obserwacyjną (Odijk i Teunissen 2013). W pracy (Paziewski i Wielgosz 2015 – **1.B.2**) stosując zaproponowane podejście przeanalizowałem możliwość estymacji tych parametrów zarówno, jako zmiennych w czasie jak i stałych dla całej sesji obserwacyjnej. Zaobserwowano, iż dla pary odbiorników tego samego typu wartości międzysystemowych opóźnień sprzętowych zarówno dla obserwacji fazowych jak i kodowych całkowicie się eliminują (Rys. 2). Z tego względu w przypadku ścisłej integracji obserwacji multi-GNSS dla wektora składającego się z pary takich samych odbiorników nie ma konieczności modelowania ww. opóźnień. Jednakże w przypadku wykorzystania odbiorników różnego typu, wartości różnic opóźnień są istotne osiągając w niektórych przypadkach nawet ~17 metrów dla obserwacji kodowych i 0.7 cyklu części ułamkowej obserwacji fazowych, co skutkuje koniecznością ich eliminacji przed lub w procesie opracowania obserwacji. Wartości te są również inne dla każdej z wykorzystanych częstotliwości systemów GNSS. Wyniki dotyczące długookresowej stabilności ww. opóźnień sprzętowych przedstawione w pracach (**1.B.2**, **1.B.3**) udowodniły również postawioną tezę, iż możliwe jest ich wcześniejsze wyznaczenie dla pary odbiorników na bazie kalibracyjnej (zerowej bądź krótkiej) i na tej podstawie wprowadzenie poprawek do późniejszych obserwacji GNSS. Podejście takie jest zbliżone do założeń kalibracji i wykorzystania względnych modeli centrów fazowych anten odbiorników. Podobnie jak w przypadku anten, można założyć wybrany odbiornik jako referencyjny i względem niego wyznaczać różnice międzysystemowych opóźnień sprzętowych dla kolejnych kombinacji odbiorników. Tak wyznaczone wartości służą jako poprawki do obserwacji fazowych i kodowych w

regularnym pozycjonowaniu wykorzystującym ścisłą integrację obserwacji wielosystemowych. Takie rozwiązanie znacznie wzmacnia model pozycjonowania, co ma istotny wpływ na szybkość i wiarygodność rozwiązania nieoznaczoności obserwacji fazowych, a w konsekwencji również na dokładność wyznaczonych współrzędnych.



Rys. 2 Wartości fazowych i kodowych międzysystemowych opóźnień sprzętowych dla wybranych par odbiorników (źródło 1.B.2).

Szczegółowe badania ujawniły również obecność, w niektórych sytuacjach, nieznacznych krótkookresowych oscylacji w szeregach czasowych dla międzysystemowych opóźnień sprzętowych obserwacji fazowych (1.B.2). Z tego względu zjawisko to poddano szczegółowej analizie w publikacji (1.B.3). Przeprowadzono badania dotyczące wyznaczania wartości ISB przy wykorzystaniu wszystkich dostępnych wówczas, oraz wybranych pojedynczych satelitów systemu Galileo w celu detekcji źródła pochodzenia oscylacji. Badania wskazały, iż występowanie ww. oscylacji powiązane było z wykorzystaniem sygnałów pochodzących z dwóch satelitów IOV (*In-Orbit-Validation*) systemu Galileo: PRN 11 i PRN 12. Na podstawie przeprowadzonej analizy czasowo-częstotliwościowej szeregów czasowych fazowych ISB zaobserwowano, iż oscylacje o zbliżonej amplitudzie i częstotliwości obecne są również w samych surowych obserwacjach fazowych. Zauważono, iż obserwacje z satelitów PRN 11 i PRN 12 obarczone są oscylacjami o różnej amplitudzie i częstotliwości, co przy wykorzystaniu obu satelitów do wyznaczania fazowych ISB generowało oscylacje tego parametru będące złożeniem dwóch wpływów.

Amplitudy wykrytych oscylacji na poziomie $\sim 0.01-0.02$ cyklu nie mają znaczącego wpływu na wyznaczone średnie wartości ISB. Oscylacje obecne w innych parametrach modelu pozycjonowania zostały zaobserwowane również przez inne grupy badawcze (Borio i in. 2016) gdzie wskazano na wewnętrzne algorytmy łączenia częstotliwości wykorzystywane przez zegary satelitów Galileo, jako źródło wynikowych oscylacji obserwacji fazowych i konsekwentnie parametrów modeli opartych na tych sygnałach.

W publikacji **(1.B.2)** przeprowadziłem również praktyczne porównanie rezultatów dwóch opracowanych metod zakładających różne podejście do modelowania międzysystemowych opóźnień sprzętowych w ścisłej integracji obserwacji GPS+Galileo na podstawie wyników pozycjonowania szybkiego statycznego. W pierwszym podejściu wartości różnic międzysystemowych opóźnień sprzętowych odbiorników estymowano łącznie z pozostałymi parametrami korzystając z modelu matematycznego przedstawionego w równaniach (6-7). W drugiej strategii wykorzystano wyznaczone wcześniej na bazie kalibracyjnej różnice opóźnień sprzętowych do poprawienia obserwacji fazowych i kodowych. Wtedy model matematyczny pozycjonowania względnego można uprościć i przedstawić jak w równaniach (8-9). Należy zaznaczyć, iż obserwacje fazowe poprawione zostały jedynie o wartość ułamkową fazowych różnic opóźnień sprzętowych. Z tego względu obserwacje cały czas obarczone są wpływem części całkowitej, która to ostatecznie estymowana jest łącznie z nieoznaczonościami, jako jeden parametr (\bar{N}_{kl}^{GE}). Tak wyznaczone nieoznaczoności należy traktować, jako obarczone błędem systematycznym, jednakże nie wpływającym w żadnym razie na wyznaczenie współrzędnych odbiornika, jak wykazano **(1.B.2)**.

$$\bar{\phi}_{kl}^{GE} = \varrho_{kl}^{GE} + \lambda \bar{N}_{kl}^{GE} + \epsilon_{kl,\phi}^{GE} \quad (8)$$

$$\bar{P}_{kl}^{GE} = \varrho_{kl}^{GE} + \epsilon_{kl,P}^{GE} \quad (9)$$

gdzie: $\bar{\phi}_{kl}^{GE}$ – podwójnie zróżnicowanie obserwacji fazowe poprawione o część ułamkową międzysystemowych opóźnień sprzętowych, \bar{P}_{kl}^{GE} – podwójnie zróżnicowanie obserwacji kodowe poprawione o wpływ międzysystemowych opóźnień sprzętowych.

Obliczenia przeprowadzono dla dwóch krótkich wektorów, a więc pomijając wpływ opóźnień troposferycznych i jonosferycznych. Wyniki wskazały jednoznacznie, iż poprawienie obserwacji fazowych i kodowych o wyznaczone wcześniej (skalibrowane) międzysystemowe opóźnienia sprzętowe daje w rezultacie lepsze wyniki pod względem czasu potrzebnego na prawidłowe rozwiązanie nieoznaczoności obserwacji fazowych (*time-to-fix*) i wiarygodności tego procesu, niż parametryzowanie opóźnień w modelu pozycjonowania.

Cele szczegółowe osiągnięte w publikacjach (1.B.2) oraz (1.B.3):

- opracowanie metodologii wyznaczenia międzysystemowych opóźnień sprzętowych odbiorników GNSS;
- praktyczne zastosowanie opracowanej metodologii do wyznaczania opóźnień sprzętowych dla systemów GPS i Galileo-IOV i różnych par odbiorników;
- opracowanie metody wykorzystania skalibrowanych wcześniej wartości opóźnień sprzętowych w pozycjonowaniu względnym;
- badania nad długo- oraz krótkookresową stabilnością międzysystemowych opóźnień sprzętowych na podstawie obserwacji GPS i Galileo-IOV.

Mając na uwadze, iż opracowane i przedstawione w publikacjach (1.B.2, 1.B.3) strategie integracji obserwacji wielosystemowych były wykorzystywane dla krótkich baz, kolejnym etapem moich badań w zakresie rozwoju metod pozycjonowania multi-GNSS było **opracowanie oraz analiza wybranych strategii integracji obserwacji wielosystemowych oraz praktyczne porównanie rezultatów pozycjonowania dla średniej długości wektorów** wykorzystując zmodyfikowany model wagowanej jonosfery i troposfery. Wyniki tych badań przedstawiono w publikacjach (Paziewski i Wielgosz 2016 – 1.B.7, Paziewski i Sieradzki 2017-1.B.8) będących częścią niniejszego cyklu.

W publikacji (1.B.7) przeanalizowałem i przedstawiłem szczegółowo modele matematyczne względnego pozycjonowania wspomnianych wcześniej dwóch podejść do łącznego opracowania obserwacji wielosystemowych: ścisłej i luźnej integracji. Powyższe modele zmodyfikowano w celu uwzględnienia parametryzacji opóźnień jonosferycznych i troposferycznych, co umożliwia ich zastosowanie dla średniej długości wektorów. Jak wspomniano wcześniej, w przypadku występowania w integrowanych systemach wspólnych częstotliwości, istnieje możliwość wykorzystania jednego wspólnego satelity referencyjnego dla wszystkich konstelacji w modelu względnego pozycjonowania. Założenie takie prowadzi do tworzenia podwójnie zróżnicowanych obserwacji fazowych i kodowych w ramach danego systemu GNSS (*intra system*) – kiedy satelita referencyjny i kolejny należą do tego samego systemu, oraz pomiędzy systemami (*inter system*) – kiedy te satelity pochodzą z różnych konstelacji. Podejście ścisłej integracji wymaga uwzględnienia różnic w opóźnieniach sprzętowych odbiorników dla podwójnie zróżnicowanych obserwacji pomiędzy systemami, których modelowanie i charakterystykę omówiono szczegółowo w publikacjach (1.B.2, 1.B.3). Modyfikacja modelu wagowanej jonosfery i troposfery pod kątem ścisłej integracji obserwacji multi-GNSS prowadzi do otrzymania poniższych równań obserwacyjnych (dla obserwacji pomiędzy systemami):

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 \varphi_{kl,f_1}^{m_G i_E} - \rho_{kl}^{m_G i_E} - \left(\alpha_k^{m_G} ZTD_k - \alpha_k^{i_E} ZTD_k - \alpha_l^{m_G} ZTD_l + \alpha_l^{i_E} ZTD_l \right) + I_{kl}^{m_G i_E} - \lambda_1 \bar{N}_{kl,f_1}^{m_G i_E} - \bar{\delta}_{kl,f_1}^{(G-E)} = 0 \\ P_{kl,f_1}^{m_G i_E} - \rho_{kl}^{m_G i_E} - \left(\alpha_k^{m_G} ZTD_k - \alpha_k^{i_E} ZTD_k - \alpha_l^{m_G} ZTD_l + \alpha_l^{i_E} ZTD_l \right) - I_{kl}^{m_G i_E} - d_{kl,f_1}^{(G-E)} = 0 \\ \lambda_2 \varphi_{kl,f_2}^{m_G i_E} - \rho_{kl}^{m_G i_E} - \left(\alpha_k^{m_G} ZTD_k - \alpha_k^{i_E} ZTD_k - \alpha_l^{m_G} ZTD_l + \alpha_l^{i_E} ZTD_l \right) + I_{kl}^{m_G i_E} (f_1^2 / f_2^2) - \lambda_2 \bar{N}_{kl,f_2}^{m_G i_E} - \bar{\delta}_{kl,f_2}^{(G-E)} = 0 \\ P_{kl,f_2}^{m_G i_E} - \rho_{kl}^{m_G i_E} - \left(\alpha_k^{m_G} ZTD_k - \alpha_k^{i_E} ZTD_k - \alpha_l^{m_G} ZTD_l + \alpha_l^{i_E} ZTD_l \right) - I_{kl}^{m_G i_E} (f_1^2 / f_2^2) - d_{kl,f_2}^{(G-E)} = 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

Opracowany model uwzględnia parametryzację kodowych $d_{kl,f_1}^{(G-E)}$ oraz ułamkowej części fazowych $\bar{\delta}_{kl,f_1}^{(G-E)}$ międzysystemowych opóźnień sprzętowych dla każdej z wykorzystanych częstotliwości oraz dla każdego wektora w przypadku pozycjonowania wielostacyjnego (wielowektorowego). Taki model posiada znaczą liczbę skorelowanych parametrów, co utrudnia jego wiarygodne rozwiązanie. Poprawienie obserwacji o wcześniej skalibrowane wartości kodowych ISB ($d_{kl,f_1}^{(G-E)}$) i ułamkowych części fazowych ISB ($\bar{\delta}_{kl,f_1}^{(G-E)}$) (11-14) prowadzi do zmniejszenia liczby parametrów modelu, a więc jego wzmocnienia:

$$\tilde{\varphi}_{kl,f_1}^{m_G i_E} = \varphi_{kl,f_1}^{m_G i_E} + \bar{\delta}_{kl,f_1}^{(G-E)} \quad (11)$$

$$\tilde{P}_{kl,f_1}^{m_G i_E} = P_{kl,f_1}^{m_G i_E} + d_{kl,f_1}^{(G-E)} \quad (12)$$

$$\tilde{\varphi}_{kl,f_2}^{m_G i_E} = \varphi_{kl,f_2}^{m_G i_E} + \bar{\delta}_{kl,f_2}^{(G-E)} \quad (13)$$

$$\tilde{P}_{kl,f_2}^{m_G i_E} = P_{kl,f_2}^{m_G i_E} + d_{kl,f_2}^{(G-E)} \quad (14)$$

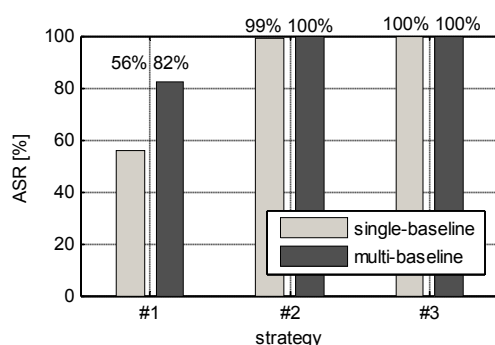
Ostatecznie równania dla obserwacji różnicowanych pomiędzy systemami (*inter system*) i ściśle zintegrowanego modelu wagowanej jonosfery i troposfery mogą być pozbawione parametrów ISB i przedstawione jak poniżej uwzględniając estymację dla każdej częstotliwości nieoznaczoności obciążonych systematycznym błędem części całkowitej fazowego ISB ($\bar{N}_{kl,f_1}^{m_G i_E}$, $\bar{N}_{kl,f_2}^{m_G i_E}$):

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 \tilde{\varphi}_{kl,f_1}^{m_G i_E} - \rho_{kl}^{m_G i_E} - \left(\alpha_k^{m_G} ZTD_k - \alpha_k^{i_E} ZTD_k - \alpha_l^{m_G} ZTD_l + \alpha_l^{i_E} ZTD_l \right) + I_{kl}^{m_G i_E} - \lambda_1 \bar{N}_{kl,f_1}^{m_G i_E} = 0 \\ \tilde{P}_{kl,f_1}^{m_G i_E} - \rho_{kl}^{m_G i_E} - \left(\alpha_k^{m_G} ZTD_k - \alpha_k^{i_E} ZTD_k - \alpha_l^{m_G} ZTD_l + \alpha_l^{i_E} ZTD_l \right) - I_{kl}^{m_G i_E} = 0 \\ \lambda_2 \tilde{\varphi}_{kl,f_2}^{m_G i_E} - \rho_{kl}^{m_G i_E} - \left(\alpha_k^{m_G} ZTD_k - \alpha_k^{i_E} ZTD_k - \alpha_l^{m_G} ZTD_l + \alpha_l^{i_E} ZTD_l \right) + I_{kl}^{m_G i_E} (f_1^2 / f_2^2) - \lambda_2 \bar{N}_{kl,f_2}^{m_G i_E} = 0 \\ \tilde{P}_{kl,f_2}^{m_G i_E} - \rho_{kl}^{m_G i_E} - \left(\alpha_k^{m_G} ZTD_k - \alpha_k^{i_E} ZTD_k - \alpha_l^{m_G} ZTD_l + \alpha_l^{i_E} ZTD_l \right) - I_{kl}^{m_G i_E} (f_1^2 / f_2^2) = 0 \end{array} \right. \quad (15)$$

W przypadku zaś metody luźnej integracji zakładane jest wykorzystanie niezależnych satelitów referencyjnych dla każdej konstelacji. Podejście takie prowadzi do

tworzenia podwójnie zróżnicowanych obserwacji wyłącznie w ramach sygnałów z danego systemu GNSS (*intra system*), (2-3), a więc jest wolne od różnic w opóźnieniach sprzętowych odbiorników. Z drugiej jednak strony wykorzystanie niezależnych satelitów referencyjnych dla każdej konstelacji prowadzi do zmniejszenia liczby potencjalnych podwójnie zróżnicowanych obserwacji w stosunku do modelu ścisłej integracji. Zaletą tzw. luźnej integracji jest możliwość wykorzystania w jednym modelu obserwacji fazowych na różnych w każdym systemie częstotliwościach.

Praktyczne badania, nad jakością precyzyjnego pozycjonowania multi-GNSS z wykorzystaniem przedstawionych powyżej strategii oparto na obserwacjach GPS i Galileo L1/E1 & L5/E5a pozyskanych ze sprzętowego symulatora sygnałów GNSS firmy Spirent oraz geodezyjnych odbiorników Javad i Septentrio. Taki zabieg umożliwił przeprowadzenia testów dla systemów o pełnej konstelacji satelitów. Badania przeprowadzono dla rozwiązania chwilowego (jednoepokowego) i wektorów o długościach dochodzących do kilkudziesięciu kilometrów. Założenia eksperymentu wymagały właściwego modelowania opóźnień jonosferycznych i troposferycznych. W przypadku opóźnienia troposferycznego wykorzystano a priori globalny model opóźnienia troposferycznego oraz estymowano rezyduálną część zenitalnego opóźnienia troposferycznego. Opóźnienie jonosferyczne eliminowano poprzez estymację podwójnie zróżnicowanych opóźnień jonosferycznych. Założone strategie obliczeniowe zakładały wykorzystanie metody luźnej integracji dla obserwacji GPS i Galileo oraz ścisłej integracji obserwacji GPS+Galileo poprawionych o wyznaczone wcześniej wartości międzysystemowych opóźnień sprzętowych odbiorników. Rozwiązania te odniesiono do wyników wykorzystania pojedynczego systemu, w tym przypadku GPS. Wyniki wskazały na wyraźną poprawę rezultatów w dziedzinie rozwiązania nieoznaczoności w przypadku zastosowania obserwacji wielosystemowych w stosunku do rozwiązania opartego na pojedynczym systemie (Rys. 3). Zaobserwowano również poprawę dokładności współrzędnych dla rozwiązania z niecałkowitoliczbowymi wartościami nieoznaczoności (rozwiązanie *float*). Po prawidłowym rozwiązaniu nieoznaczoności dokładność współrzędnych była na zbliżonym poziomie, co uniezależnia ją od zastosowanej strategii. Badania wykazały zbliżoną, wysoką skuteczność obu podejść do integracji obserwacji wielosystemowych w precyzyjnym względnym pozycjonowaniu satelitarnym zakładając jednak, że w przypadku ścisłej integracji wprowadzono poprawki do obserwacji ze względu na międzysystemowe opóźnienia sprzętowe odbiorników.



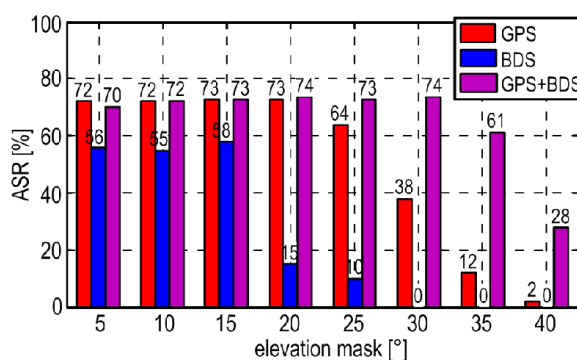
Rys. 3 Udział sesji z prawidłowo rozwiązanymi nieoznaczonościami (*ambiguity success rate*); system GPS - #1, ścisła integracja GPS+Galileo ze znanymi wartościami ISB - #2, luźna integracja GPS+Galileo - #3, w rozwiązaniu pojedynczego wektora i wielostacyjnym (źródło 1.B.7).

Opracowane modele integracji wielosystemowych obserwacji GNSS wykorzystano również do **badania nad zastosowaniem rzeczywistych obserwacji pochodzących z chińskiego systemu nawigacji satelitarnej BDS w precyzyjnym względnym pozycjonowaniu chwilowym** (instantaneous RTK). Rezultaty badań przedstawiono w publikacji (1.B.8) stanowiącej część niniejszego cyklu. W pracy skupiłem się na przedstawieniu metodologii integracji obserwacji – optymalnego modelu stochastycznego i matematycznego oraz analizie uzyskanych rezultatów pozycjonowania w dziedzinie nieoznaczoności oraz współrzędnych. Rezultaty łącznego dwuczęstotliwościowego rozwiązania GPS+BDS odniesiono do wyników rozwiązania opartego na pojedynczym systemie GPS oraz BDS wykorzystując podejście wielostacyjne (wielowektorowe). Wykorzystany model matematyczny zakładał parametryzację opóźnień troposferycznych i jonosferycznych.

Badania przeprowadziłem wykorzystując podejście rozwiązania chwilowego – z pojedynczej epoki obserwacyjnej przy wykorzystaniu średniej długości wektorów - dochodzących do kilkudziesięciu kilometrów i dwuczęstotliwościowych obserwacji GPS (L1/L2) oraz BDS (B1/B2) pozyskanych ze stacji na terenie Chin, co zapewniało możliwie największą liczbę śledzonych satelitów systemu BDS. W pozycjonowaniu chwilowym wiarygodne rozwiązanie nieoznaczoności obserwacji fazowych jest trudniejsze niż w przypadku typowego rozwiązania sesji statycznej bądź kinematycznej. Z drugiej jednak strony rozwiązanie takie jest odporne na utracone cykle obserwacji fazowych i nie wymaga inicjalizacji jak metoda OTF-RTK. W eksperymencie nie wykorzystywano zewnętrznych poprawek jonosferycznych, a jedynie założono ich parametryzację. Taki model określany jest często mianem *ionosphere float* (Odiijk 2002).

Wyniki wskazały na istotną przewagę pozycjonowania wielosystemowego nad jednosystemowym w skuteczności prawidłowego rozwiązania nieoznaczoności szczególnie w przypadku utrudnionych warunków obserwacyjnych – występowania zasłon terenowych (Rys. 4). Jednakże przy względnie wysokiej liczbie obserwowanych satelitów dla pojedynczych systemów, nie zaobserwowano aż tak istotnej poprawy. Badania ujawniły również gorsze rezultaty pozycjonowania opartego wyłącznie na obserwacjach BDS w

odniesieniu do wykorzystania obserwacji GPS, co można wiązać z niższą obecnie liczbą satelitów w konstelacji systemu BDS oraz większym wpływem efektu wielotorowości na obserwacje pochodzące z tych satelitów BDS, które znajdują się na orbicie geostacjonarnej. Podobnie istotne różnice pomiędzy rozwiązaniami GPS vs. BDS vs. GPS+BDS zaobserwowano w dziedzinie współrzędnych, a w szczególności dokładności rozwiązania pozycji z niecałkowitoliczbowymi wartościami nieoznaczoności (*float*). Dokładność tego rozwiązania ma niebagatelny wpływ na prawidłowość wyznaczenia całkowitoliczbowych nieoznaczoności. Ostatecznie dokładność rozwiązania z całkowitoliczbowymi nieoznaczonościami była zbliżona niezależnie od wykorzystywanych systemów GNSS. Można oczekiwać na podstawie wcześniejszych badań (1.B.1), iż dalszą poprawę w dziedzinie rozwiązania nieoznaczoności (wskaźnik sukcesu rozwiązania nieoznaczoności) można otrzymać poprzez wsparcie rozwiązania poprawkami jonosferycznymi.



Rys. 4 Udział sesji z prawidłowo rozwiązanymi nieoznaczonościami - *ambiguity success rate* system GPS - #1, BDS - #2, GPS+BDS - #3 przy symulacji występowania różnych zasłon terenowych - kąt obcięcia horyzontu od 5° do 40° (źródło 1.B.8).

Cele osiągnięte w publikacjach (1.B.7) i (1.B.8):

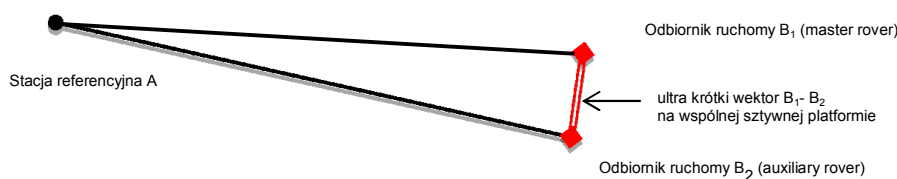
- opracowanie modeli ścisłej i luźnej integracji w pozycjonowaniu względnym z uwzględnieniem parametryzacji opóźnień troposferycznych i jonosferycznych;
- dostosowanie modelu luźnej integracji dla obserwacji GPS+BDS i średniej długości wektorów;
- praktyczne porównanie rezultatów pozycjonowania RTK z pojedynczej epoki obserwacyjnej dla wybranych modeli integracji wykorzystując symulowane obserwacje systemów GPS i Galileo oraz rzeczywiste sygnały GPS+BDS.

4.3.3. Opracowanie nowych metod pozycjonowania wieloodbiornikowego (publikacja 1.B.4)

Inną sposobem poprawy rezultatów precyzyjnego pozycjonowania GNSS jest **opracowanie nowych metod pozycjonowania wykorzystujących zależności pomiędzy obserwacjami i parametrami modelu matematycznego**. Związki takie można odnaleźć między innymi w przypadku dysponowania wieloma odbiornikami użytkownika umieszczonymi na wspólnej sztywnej platformie, co jest wykorzystane np. w wyznaczaniu orientacji przestrzennej obiektów w nawigacji (Moon i Verhagen 2006, Buist i in. 2009, Chen i Qin 2012, Nadarajah i in. 2014), ale może równocześnie posłużyć do poprawy wiarygodności rozwiązania oraz skrócenia długości sesji obserwacyjnej nawet do pojedynczej epoki.

Znane i stałe wzajemne położenie anten odbiorników ruchomych stwarza możliwość wykorzystania związków geometrycznych takich jak znane odległości oraz kąty pomiędzy antenami w samym procesie rozwiązania nieoznaczoności (Buist 2007, Wang i in 2009, Teunissen 2010, Giorgi i in 2012, Nadarajah i in 2014) bądź też w jego walidacji (Bakuła 2013). Inna grupa metod wykorzystuje wzajemne znane położenie anten odbiorników ruchomych do poprawienia dokładności rozwiązania RTK z rzeczywistymi wartościami nieoznaczoności (rozwiązanie *float*) bądź też metody *Precise Point Positioning* - PPP (Teunissen 2012). Innym podejściem zaproponowanym przeze mnie w pracy stanowiącej część cyklu (1.B.4) jest **posłużenie się związkami pomiędzy parametrami modelu** takimi jak np. nieoznaczoności **oraz ich właściwościami** takimi jak zbliżone wartości parametryzowanych opóźnień troposferycznych i jonosferycznych dla bliskich odbiorników. Związki takie można wykorzystać do tworzenia dodatkowych równań warunkowych. Ponadto można modyfikować sam model matematyczny jak to zostało przedstawione w pracy (1.B.4) stanowiącej część niniejszego monotematycznego cyklu. Takie rozwiązanie bezpośrednio wpływa na poprawę dokładności pozycji przybliżonej z niecałkowitoliczbowymi nieoznaczonościami (rozwiązanie *float*) oraz modelowania opóźnień atmosferycznych, a w konsekwencji na skuteczność procesu rozwiązania całkowitoliczbowości nieoznaczoności.

Koncepcja oparta jest na założeniu, iż stosunkowo łatwo jest rozwiązać nieoznaczoności w modelu opartym na bardzo krótkim wektorze gdzie następuje znaczna redukcja błędów propagacji sygnału w atmosferze. Nieoznaczoności te następnie mogą być wykorzystane jako znane w procesie rozwiązania długiego wektora łączącego odbiornik ruchomy oraz stację referencyjną. Na rysunku 5 przedstawiono schemat dwóch odbiorników użytkownika zamontowanych na znanej krótkiej i stałej bazie (o długości np. kilku metrów) oraz stacji referencyjnej oddalonej o znaczną odległość (kilkadziesiąt kilometrów).



Rys. 5 Konfiguracja dwóch odbiorników ruchomych na wspólnej platformie oraz stacji referencyjnej (źródło 1.B.4).

Zaproponowane podejście oparte jest na dwuetapowym rozwiązaniu. W pierwszej kolejności rozwiązywany jest wektor łączący dwa odbiorniki ruchome użytkownika przyjmując przybliżone współrzędne jednego z nich, jako znane. W kolejnym etapie pozycja obu (lub więcej) odbiorników ruchomych użytkownika jest wyznaczana w nawiązaniu do oddalonej jednej lub kilku stacji referencyjnych. W drugim etapie wykorzystywana jest reparametryzacja nieoznaczoności wprowadzając znane wartości nieoznaczoności z ultra krótkiego wektora łączącego odbiorniki użytkownika. Na podstawie reguły zerowej sumy nieoznaczoności w trójkącie (Lachapelle i in. 1994, Xu 2000) możemy utworzyć równanie:

$$N_{B_1B_2}^{ij} = N_{AB_1}^{ij} - N_{AB_2}^{ij} \quad (16)$$

W rozwiązaniu opartym na dwóch długich wektorach otrzymujemy dwa zestawy nieoznaczoności, po jednym dla każdego z wektorów. Wykorzystując powyższe równanie oraz znane wartości nieoznaczoności na krótkim wektorze możemy zredukować liczbę nieoznaczoności a więc niewiadomych w modelu. Nieoznaczoności jednego z długich wektorów (np. A-B₂) są przedstawiane jako funkcja nieoznaczoności drugiego wektora, co prowadzi do zmniejszenia liczby wyznaczanych nieoznaczoności (zmniejszenia liczby parametrów):

$$N_{AB_2}^{ij} = N_{AB_1}^{ij} - N_{B_1B_2}^{ij} \quad (17)$$

Bliskość dwóch odbiorników ruchomych użytkownika prowadzi również do zbliżonej, a w praktyce identycznej, wartości podwójnie zróżnicowanych opóźnień atmosferycznych dla wektorów łączących stację referencyjną oraz odbiorniki ruchome (wektory A-B₁ i A-B₂). Właściwości te możemy wykorzystać do modyfikacji i redukcji liczby niewiadomych opóźnień jonosferycznych i troposferycznych w modelu w modelu wagowanej jonosfery i troposfery. Zgodnie z założeniami oryginalnego modelu niewiadome rezydualne podwójnie zróżnicowane opóźnienia jonosferyczne są parametryzowane dla każdego wektora w sieci ($I_{A-B_1}^{ij}$), ($I_{A-B_2}^{ij}$). W zaproponowanym przeze mnie zmodyfikowanym modelu estymowany jest jeden zestaw podwójnie zróżnicowanych opóźnień jonosferycznych dla obu wektorów łączących stację referencyjną i odbiorniki ruchome przyjmując założenie:

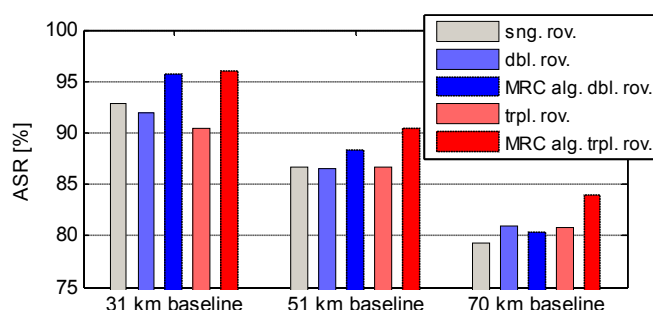
$$I_{A-B_1}^{ij} \cong I_{A-B_2}^{ij} = I_{A-B}^{ij} \quad (18)$$

Podobna sytuacja występuje w przypadku estymacji rezydualnego zenitalnego opóźnienia troposferycznego (*ZTD* – *Zenith Tropospheric Delay*). Generalnie parametr ten estymowany jest niezależnie dla każdej stacji (odbiornika). W przypadku stacji kolokowanych możemy odnieść jeden, ten sam, parametr dla obu stacji (Rów. 19) oraz wykorzystać te same wartości współczynników funkcji mapujących te opóźnienie (Rów. 20). Takie zabiegi skutkują redukcją liczby niewiadomych, a w konsekwencji wzmocnieniem modelu matematycznego przedstawionego szczegółowo w publikacji (1.B.4).

$$ZTD_{B_1} \cong ZTD_{B_2} = ZTD_B \quad (19)$$

$$\alpha_{B_1}^i \cong \alpha_{B_2}^i = \alpha_B^i \quad (20)$$

Skuteczność zaproponowanej metody przetestowałem w praktyce dla wektorów o trzech długościach (31 km, 51 km i 70 km) łączących pojedynczą stację referencyjną oraz dwa lub trzy odbiorniki użytkownika na wspólnej platformie wg schematu (Rys. 5). Wyniki odniosłem do standardowego rozwiązania z pojedynczym odbiornikiem użytkownika. Wszystkie strategie zakładały rozwiązanie z pojedynczej epoki obserwacyjnej. Analizowano poprawę rezultatów pozycjonowania w dziedzinie współrzędnych oraz nieoznaczoności. Ocenianymi parametrami były uśrednione odchyłki pozycji względem pozycji referencyjnej, obliczone na tej podstawie odchylenia standardowe oraz udział procentowy sesji, a więc w tym przypadku epok, z prawidłowo rozwiązanymi nieoznaczonościami (*Ambiguity Success Rate*, Rys. 6).



Rys. 6 Udział sesji z prawidłowo rozwiązanymi nieoznaczonościami dla poszczególnych strategii - *ambiguity resolution success rate* (źródło 1.B.4).

Osiągnięte wyniki wskazały na wyraźną poprawę rezultatów względnego pozycjonowania przy wykorzystaniu zaproponowanego algorytmu. W przypadku wszystkich długości wektorów udział procentowy sesji prawidłowo rozwiązanych już w pierwszej epoce obserwacyjnej wzrósł o ok. 5% w odniesieniu do standardowego rozwiązania z pojedynczym wektorem (1.B.4). Należy również zaznaczyć, iż poprawa ta nie ma związku li tylko ze zwiększeniem liczby obserwacji poprzez zastosowanie większej liczby odbiorników użytkownika. Stosując to ostatnie założenie bez wykorzystania

zaproponowanego algorytmu nie otrzymano poprawy rozwiązania w dziedzinie nieoznaczoności (Rys. 6).

Cel osiągnięty w publikacji (1.B.4):

- opracowanie oraz przeprowadzenie walidacji nowego modelu matematycznego względnego pozycjonowania średniego zasięgu z wykorzystaniem konfiguracji wielu kolokowanych odbiorników użytkownika.

4.3.4. Badania związane z opracowaniem nowych metod zmniejszających niekorzystny wpływ refrakcji jonosferycznej na pozycjonowanie GNSS (publikacje 1.B.5, 1.B.6)

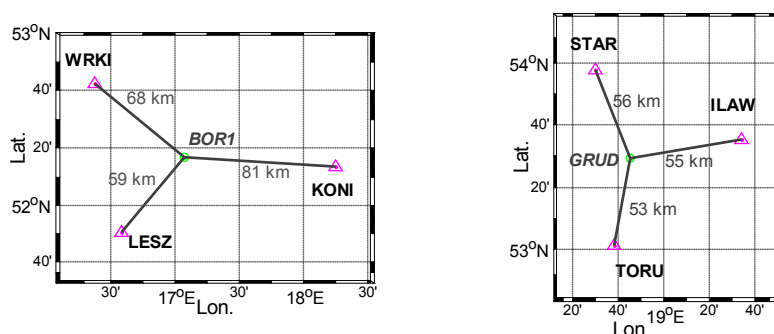
Refrakcja jonosferyczna jest uważana za najistotniejsze źródło błędów w pozycjonowaniu GNSS, mające szczególny wpływ na rozwiązanie nieoznaczoności. Jednocześnie jonosfera ma tę właściwość, iż jest ośrodkiem dyspersyjnym dla częstotliwości wykorzystywanych w systemach satelitarnego pozycjonowania. Fakt ten został wykorzystany poprzez implementację więcej niż jednej częstotliwości w tych systemach, co pozwala na wykorzystanie GNSS do badania stanu jonosfery. Z powyższych względów środowisko naukowe prowadzi intensywne badania zarówno nad nowymi metodami eliminacji wpływu opóźnienia jonosferycznego jak również zastosowaniem obserwacji GNSS do badania samej jonosfery (Kintner 2007, Sieradzki 2015). W mojej dotychczasowej pracy naukowej prowadziłem badania głównie w pierwszym z powyższych zakresów rozwijając metodę pozycjonowania Network RTK, gdzie poprawki jonosferyczne generowane przez sieć stacji referencyjnych w największym stopniu wpływają na skuteczność i prawidłowość rozwiązania nieoznaczoności a w konsekwencji na finalną dokładność i wiarygodność pozycji.

Efektywny sposób eliminacji wpływu stanu jonosfery w pozycjonowaniu GNSS może być przeprowadzony w dwójnasób tj.: poprzez zastosowanie odpowiednich algorytmów opracowania sygnałów, bądź też dostarczenie zewnętrznych poprawek jonosferycznych. Dwie prace z niniejszego cyklu publikacji poświęciłem są odpowiednio rozwojowi oryginalnej metody eliminacji wpływu zaburzeń jonosferycznych (1.B.6) jak i badaniom nad właściwościami i charakterystyką dokładnościową poprawek jonosferycznych generowanych przez sieć stacji referencyjnych (1.B.5).

Wysoka skuteczność eliminacji opóźnienia jonosferycznego jest szczególnie istotna w chwilowym kinematycznym pozycjonowaniu względnym (*instantaneous RTK*). W publikacji (1.B.5) podjąłem się zadania określenia empirycznie **dokładności poprawek jonosferycznych generowanych przez sieć stacji permanentnych i ich wpływu na długość sesji obserwacyjnej potrzebnej do prawidłowego rozwiązania nieoznaczoności** i otrzymania wiarygodnej pozycji w rozwiązaniu Network RTK. Co więcej **określono pożądaną dokładność tych poprawek umożliwiającą rozwiązanie**

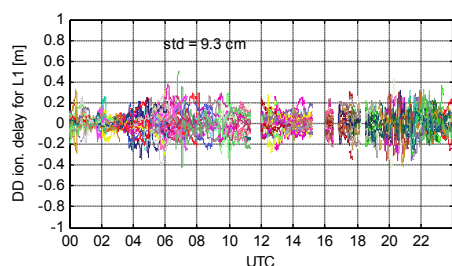
chwilowe z pojedynczej epoki obserwacyjnej dla wektorów o długościach dochodzących do ~ 100 km. Przeprowadzona analiza dokładności poprawek jonosferycznych generowanych przez sieć stacji referencyjnych dla różnych stanów jonosfery może być również wykorzystana do definicji modelu stochastycznego w przypadku parametryzacji rezydualnych opóźnień jonosferycznych w modelu wagowanej jonosfery.

Eksperyment przedstawiony w publikacji (1.B.5) oparty był na analizie wartości podwójnie zróżnicowanych opóźnień jonosferycznych dla wybranych wektorów tworzących lokalną sieć składającą się z pojedynczej stacji wyznaczonej oraz 3 stacji referencyjnych (Rys. 7) utworzonej w ramach permanentnej sieci ASG-EUPOS (Bosy i in 2007, Kudrys i Krzyżek 2011). Obliczenia przeprowadzono dla trzech dni charakteryzujących się odmiennymi warunkami stanu jonosfery włączając okresy o podwyższonej aktywności.

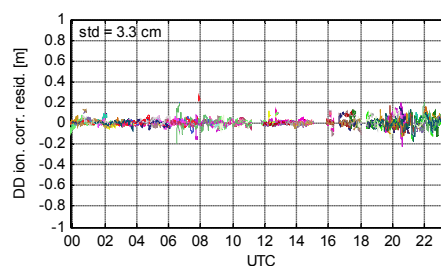


Rys. 7 Konfiguracja stacji referencyjnych oraz odbiornika ruchomego dla dwóch testowych obiektów, C- lokalna sieć w centralnej części ASG-EUPOS, P – w północnej (źródło 1.B.5).

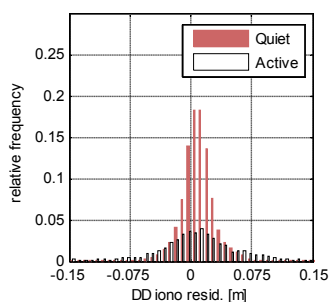
Dokładności poprawek jonosferycznych interpolowanych z rozwiązania stacji referencyjnych określono poprzez analizę rozkładu rezydów stanowiących różnice pomiędzy prawdziwymi podwójnie zróżnicowanymi opóźnieniami jonosferycznymi otrzymanymi z zależności (1), a wartościami interpolowanymi dla poszczególnych wektorów łączących stację wyznaczaną oraz stacje referencyjne. Sposób wyznaczenia i interpolacji poprawek jonosferycznych dla obserwacji GNSS opisano szerzej w publikacji (1.B.1). Rys. 8 przedstawia przykładowy szereg czasowy podwójnie zróżnicowanych opóźnień jonosferycznych otrzymanych z kombinacji *geometry-free* dla lokalnej sieci centralnej (Rys. 7, lewy panel). Wartości te mogą być traktowane jako prawdziwe przy założeniu wykorzystania prawidłowych wartości całkowitych nieoznaczoności. Rys. 9 przedstawia rezydua poprawek jonosferycznych. W badaniach określono szereg cech rozkładu rezydów poprawek jonosferycznych charakteryzujących jego położenie, rozproszenie oraz kształt, takich jak miara koncentracji (kurtozę), średnią odchyłkę, kwantyl rzędu 95% oraz odchylenie standardowe. Wartości te określono oddzielnie dla okresów zaburzonych i o niższej aktywności jonosfery.



Rys. 8 Szereg czasowy podwójnie zróżnicowanych opóźnień jonosferycznych dla podsięci centralnej i 168 dnia roku 2013. CEST=UTC+2h. (źródło 1.B.5)



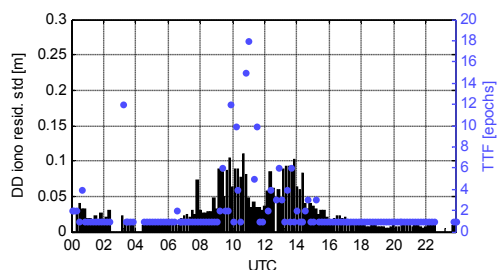
Rys. 9 Szereg czasowy rezyduów poprawek jonosferycznych dla podsięci centralnej i 168 dnia roku 2013. CEST=UTC+2h. (źródło 1.B.5)



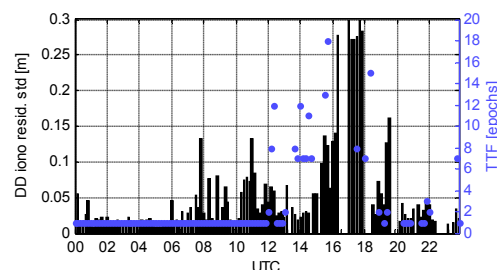
Rys. 10 Histogram rezyduów poprawek jonosferycznych dla lokalnej sieci centralnej i dnia 168 roku 2013. (źródło 1.B.5)

Wyniki wskazały na istotne zróżnicowanie rozkładu rezyduów poprawek, a więc i ich dokładności pomiędzy okresami spokojnej i aktywnej jonosfery, co potwierdza silną zależność od stanu jonosfery. Dla okresów niższej aktywności otrzymano wartości odchyłeń standardowych na poziomie 1.5-3.9 cm i leptokurtyczny rozkład rezyduów poprawek jonosferycznych (Rys. 10). W przypadku analizowanych okresów o podwyższonej aktywności jonosferycznej wartości odchyłeń standardowych poprawek jonosferycznych zawierały się w zakresie 4.1 - 16.3 cm i charakteryzowały się platokurtycznym rozkładem (Rys. 10).

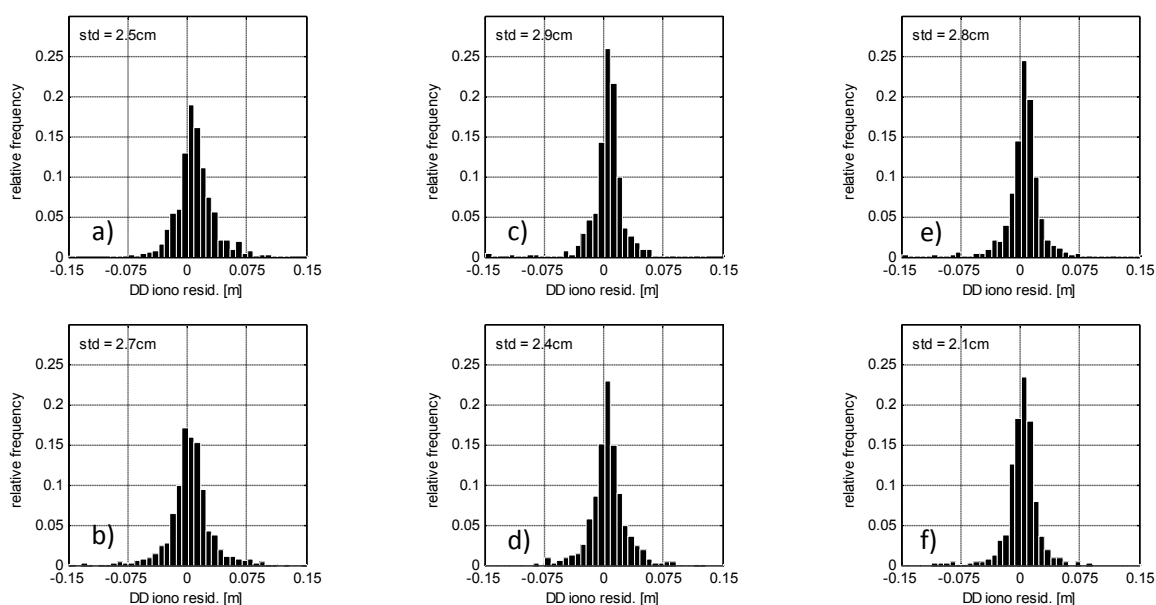
Mając na uwadze powyższe właściwości przeprowadzono uzupełniającą analizę wpływu dokładności poprawek jonosferycznych na długość sesji obserwacyjnej wymaganej do prawidłowego rozwiązania nieoznaczoności (*Time-To-Fix*) w rozwiązaniu RTK-OTF. Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono dla wybranych dni o średniej (353 DOY) i wysokiej (76 DOY) aktywności jonosfery wartości odchyłeń standardowych poprawek jonosferycznych oraz korespondujące z nimi wartości *Time-To-Fix* otrzymane dla wielowektorowego rozwiązania RTK-OTF. Co łatwo zaobserwować opracowane algorytmy oraz autorskie oprogramowanie umożliwiły w dużym zakresie otrzymanie rozwiązania już z pojedynczej epoki obserwacyjnej przy dokładności poprawek jonosferycznych na poziomie kilku centymetrów. Pogorszenie dokładności poprawek części dyspersyjnej atmosfery skutkowało wydłużeniem czasu inicjalizacji (1.B.5).



Rys. 11 Time-to-fix oraz odchylenie standardowe poprawek jonosferycznych dla lokalnej sieci centralnej i dnia 353 roku 2013. CET=UTC+1h. (źródło 1.B.5)



Rys. 12 Time-to-fix oraz odchylenie standardowe poprawek jonosferycznych dla lokalnej sieci centralnej i dnia 76 roku 2013. CET=UTC+1h. (źródło 1.B.5)



Rys. 13 Histogramy rezyduów podwójnie zróżnicowanych poprawek jonosferycznych dla rozwiązań chwilowych z pojedynczej epoki obserwacyjnej z prawidłowymi nieoznaczonościami. a) C 168/13; b) P 168/13; c) C 353/13; d) P 353/13; e) C 76/15; f) P 76/15. (źródło 1.B.5)

Biorąc pod uwagę powyższe zależności w artykule (1.B.5) poddano weryfikacji hipotezę, iż możliwe jest określenie pożądanej dokładności poprawek jonosferycznych, która umożliwiłaby z wysokim stopniem prawdopodobieństwa otrzymanie prawidłowego rozwiązania RTK już w pierwszej epoce obserwacyjnej. W tym celu wykonano analizę rozkładu rezyduów poprawek jonosferycznych odpowiadających wyłącznie sesjom, w których prawidłowe rozwiązanie otrzymano w pierwszej epoce (Rys. 13). Realizując powyższe założenia otrzymano wyniki wskazujące na słuszność założonej hipotezy, gdyż rozkłady rezyduów poprawek jonosferycznych odpowiadające sesjom z prawidłowym rozwiązaniem w pierwszej epoce są zbliżone do siebie niezależnie od położenia sieci, jak i aktywności jonosfery. Dla wszystkich sesji i sieci otrzymano odchylenia standardowe poprawek jonosferycznych na zbliżonym poziomie (2.1-2.9 cm), kwantyle rzędu 95% w

zakresie 4.2-6.4 cm z rozkładami leptokurtycznymi (kurtoza > 4.6). Biorąc pod uwagę zbliżony rozkład poprawek i opisujące je miary statystyczne możemy wyciągnąć wnioski, iż pomyślnie pozycjonowanie z pojedynczej epoki obserwacyjnej jest bardziej zależne od skuteczności procesu eliminacji opóźnienia jonosferycznego (wartości rezydualnych opóźnienia) niż od samej absolutnej wartości opóźnień. Na podstawie zbliżonych kwantyli rzędu 95% możemy konkludować, iż pożądana dokładność poprawek jonosferycznych w pozycjonowaniu chwilowym RTK nie powinna być niższa niż 1/3 długości fali L1 (**1.B.5**).

Innym sposobem eliminacji niekorzystnego wpływu refrakcji jonosferycznej może być sam odpowiedni sposób opracowania obserwacji bez wykorzystania zewnętrznych źródeł korekt takich jak mapy jonosfery czy poprawki generowane przez sieć stacji referencyjnych. Dotychczas powszechnie stosowanym sposobem było wykorzystanie kombinacji liniowej *ionosphere-free* eliminującej wpływ opóźnienia jonosferycznego pierwszego rzędu, która jednakże charakteryzuje się większym poziomem szumu oraz powoduje utrudnione, wręcz niemożliwe rozwiązanie całkowitoliczbowości nieoznaczoności ze względu na bardzo niewielką długość fali. Otwartym problemem pozostaje dodatkowo eliminacja wpływu różno-skalowych zaburzeń jonosferycznych, które to nie są skutecznie opisywane przez globalne czy regionalne mapy jonosfery ze względu na ich niewystarczającą rozdzielczość czasowo-przestrzenną oraz czy też eliminowane przez poprawki jonosferyczne w rozwiązaniu Network-RTK ze względu na trudność w ich wiarygodnym generowaniu oraz interpolacji do pozycji użytkownika (2.A.6, 2.A.8).

Prowadząc badania w zakresie rozwoju nowych algorytmów opracowania obserwacji GNSS opracowałem we współpracy nowatorskie podejście mające na celu eliminację wpływu zaburzeń jonosferycznych we względnym pozycjonowaniu satelitarnym (**1.B.6**). Nowy algorytm oparty jest na korekcji obserwacji satelitarnych korzystając z założeń formuły zmiany wartości TEC (*Rate of TEC ROT*). Wykorzystując kombinację liniową *geometry-free* (21) jesteśmy w stanie wyznaczyć zmienność opóźnienia jonosferycznego na drodze satelita-odbiornik pomiędzy dwoma epokami.

$$L_{k,4,t_i}^m = L_{k,1,t_i}^m - L_{k,2,t_i}^m = \lambda_1 \varphi_{k,1,t_i}^m - \lambda_2 \varphi_{k,2,t_i}^m \quad (21)$$

gdzie: λ_1 i λ_2 odnoszą się do długości fali, φ_1 i φ_2 są obserwacjami fazowymi w cyklach dla satelity m zebranymi przez stację k w epoce i .

Kombinacja liniowa L_4 zawiera tylko opóźnienie jonosferyczne sygnału L_4 , $I_{k,4,t_i}^m$ oraz nieoznaczoności $N_{k,1,t_i}^m$ i $N_{k,2,t_i}^m$ dla odpowiednich dwóch wykorzystanych częstotliwości $L1$ i $L2$:

$$L_{k,4,t_i}^m = I_{k,4,t_i}^m + \lambda_1 N_{k,1,t_i}^m - \lambda_2 N_{k,2,t_i}^m \quad (22)$$

gdzie: $I_{k,4,t_i}^m$ stanowi różnicę opóźnień jonosferycznych na zastosowanych częstotliwościach:

$$I_{k,4,t_i}^m = -I_{k,1,t_i}^m + I_{k,2,t_i}^m = -I_{k,1,t_i}^m + \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{k,1,t_i}^m \quad (23)$$

Tworząc różnicę obserwacji dla kombinacji liniowej L_4 pomiędzy kolejnymi epokami i oraz j , oznaczoną jako \widetilde{ROT}_k^m , otrzymujemy zmianę opóźnienia jonosferycznego pomiędzy epokami zakładając, iż nie wystąpił przeskok fazy (*cycle-slip*) a więc nieoznaczoności są stałe:

$$\widetilde{ROT}_{k,t_{ji}}^m = L_{k,4,t_j}^m - L_{k,4,t_i}^m = I_{k,4,t_j}^m + \lambda_1 N_{k,1}^m - \lambda_2 N_{k,2}^m - (I_{k,4,t_i}^m + \lambda_1 N_{k,1}^m - \lambda_2 N_{k,2}^m) = \Delta I_{k,4,t_{ji}}^m \quad (24)$$

Powyższe równanie wykorzystywane jest powszechnie do wyznaczania względnych fluktuacji TEC w jednostkach TECU/min. Dla celów eliminacji zaburzeń jonosferycznych w pozycjonowaniu przedstawiono równanie w jednostkach długości. Tak otrzymana zmiana opóźnienia jonosferycznego dla kombinacji *geometry-free* jest następnie przeliczona dla częstotliwości fali wykorzystanych w pozycjonowaniu (na przykładzie częstotliwości L1 systemu GPS):

$$\Delta I_{k,1,t_{ji}}^m = \Delta I_{k,4,t_{ji}}^m / \xi_4 \quad (25)$$

gdzie ξ_4 otrzymujemy z zależności:

$$\xi_4 = (f_2^2 - f_1^2) / f_2^2 \quad (26)$$

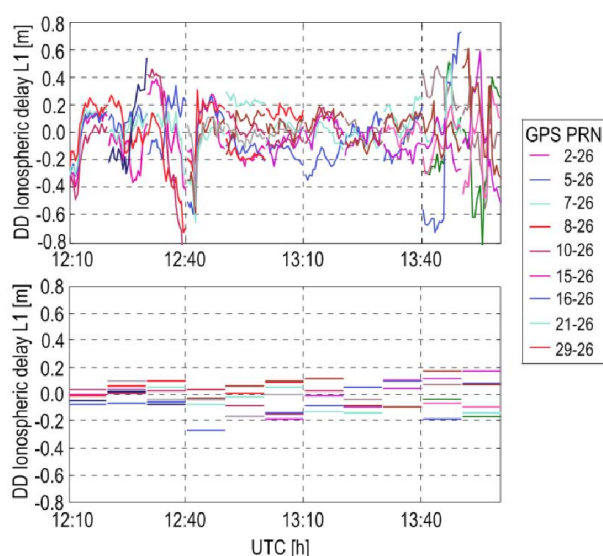
Wprowadzając tak obliczoną zmianę opóźnienia jonosferycznego pomiędzy dwoma epokami do oryginalnych obserwacji fazowych i kodowych otrzymujemy poprawione obserwacje o stałą wartość opóźnienia jonosferycznego - obarczone wpływem opóźnienia jonosferycznego tylko z epoki pierwszej.

$$\tilde{L}_{k,1,t_i}^m = L_{k,1,t_i}^m + \Delta I_{k,1,t_{ji}}^m \quad (27)$$

$$\tilde{P}_{k,1,t_i}^m = P_{k,1,t_i}^m + \Delta I_{k,1,t_{ji}}^m \quad (28)$$

W konsekwencji zmodyfikowane obserwacje fazowe i kodowe dla kolejnych epok pozbawione są zmienności opóźnienia jonosferycznego i przyjmują stałą wartość dla całego łuku obserwacyjnego równą wartości opóźnienia z pierwszej referencyjnej epoki. Aplikacja korekcji (25) umożliwia dodatkowo modyfikację modelu matematycznego wagowanej jonosfery w pozycjonowaniu względnym. W oryginalnym modelu wagowanej jonosfery parametry podwójnie zróżnicowanych opóźnień jonosferycznych estymowane są dla każdej podwójnej różnicy obserwacji niezależnie na każdą epokę obserwacyjną. Z tego względu model posiada bardzo dużą liczbę niewiadomych. Po zastosowaniu opracowanego algorytmu korekcji, opóźnienie jonosferyczne estymowane jest jako stały parametr dla całego łuku obserwacji, co zmniejsza liczbę niewiadomych.

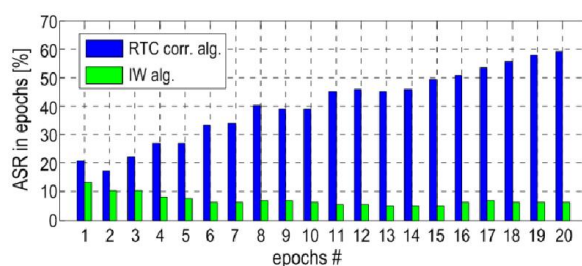
Na Rys. 14 przedstawiono efekt zastosowania korekcji dla podwójnie zróżnicowanych obserwacji fazowych utworzonych dla wektora TREO-LYNS o długości 59 km pomiędzy stacjami na Grenlandii podczas występowania znacznych fluktuacji jonosfery dnia 17.03.2013. Panel górny przedstawia prawdziwe wartości podwójnie zróżnicowanych opóźnień jonosferycznych otrzymanych z kombinacji *geometry-free*, panel dolny przedstawia te same wartości po zastosowaniu korekcji w sesjach o długości 10 minut. Można z łatwością zauważyć, iż korekcje umożliwiły redukcję opóźnień jonosferycznych do stałej wartości, a więc w konsekwencji eliminację ich zmienności (**1.B.6**).



Rys.14 Podwójnie zróżnicowane opóźnienia jonosferyczne otrzymanych z kombinacji *geometry-free* (panel górny), panel dolny przedstawia te same wartości po zastosowaniu korekcji w sesjach o długości 10 minut. (źródło 1.B.6)

Wykorzystanie tak zaproponowanych poprawek do obserwacji wraz z modyfikacją modelu matematycznego zostało praktycznie przetestowane we względnym pozycjonowaniu statycznym dla krótkich 10 minutowych sesji (ang. *rapid-static*) w warunkach występowania zaburzeń jonosferycznych oraz dla okresu spokojnej jonosfery (06.08.2009 r.) dla stacji na obszarze Grenlandii i wektorów o długościach dochodzących do 122 km (**1.B.6**). Podczas okresu spokojnego skuteczność procesu rozwiązania nieoznaczoności dla zaproponowanego algorytmu i zmodyfikowanego modelu matematycznego była praktycznie identyczna dochodząc do poziomu 93% prawidłowo rozwiązanych sesji. Z drugiej jednak strony podczas okresu silnie zaburzonego oryginalny model wagowanej jonosfery osiągnął niezadowalające rezultaty pod względem skuteczności rozwiązania nieoznaczoności i udział sesji prawidłowo rozwiązanych osiągnął wartość jedynie ~6%. Dla tego okresu aplikacja zaproponowanego podejścia skutkowałą prawie dziesięciokrotną poprawą (do poziomu 59 %). Co więcej w przypadku zastosowania zaproponowanego algorytmu wraz z modyfikacją modelu matematycznego w rozwiązaniu

skumulowanym, wzrost prawidłowo rozwiązanych sesji był wprost proporcjonalny do długości sesji obserwacyjnej. W przypadku standardowego modelu wagowanej jonosfery nie uzyskano poprawy wskaźnika sukcesu rozwiązania nieoznaczoności *Ambiguity Success Rate* wraz z wydłużeniem sesji (**1.B.6**).



Rys.15 Udział sesji z prawidłowo rozwiązanymi nieoznaczonościami (*Ambiguity success rate*) w funkcji długości sesji obserwacyjnej podczas dnia o zaburzonej jonosferze i standardowego modelu wagowanej jonosfery (*IW –ionosphere weighted*) oraz zaproponowanego podejścia eliminującego wpływ fluktuacji opóźnień jonosferycznych (*RTC – Rate of TEC algorithm corrections*). (źródło 1.B.6)

Cele osiągnięte w publikacjach (**1.B.5**) i (**1.B.6**):

- określenie dokładności poprawek jonosferycznych generowanych przez sieć stacji permanentnych i ich wpływu na długość sesji obserwacyjnej potrzebnej do prawidłowego rozwiązania nieoznaczoności w pozycjonowaniu GNSS-RTK;
- określenie pożądanego dokładności poprawek jonosferycznych w metodzie Network RTK umożliwiającej wiarygodne pozycjonowanie z jednej epoki obserwacyjnej;
- opracowanie we współpracy algorytmu eliminacji wpływu silnych zaburzeń jonosferycznych na precyzyjne względne pozycjonowanie GNSS.

4.3.5. Podsumowanie

W niniejszym cyklu publikacji przedstawiono główne rezultaty własnych badań w zakresie rozwoju metod precyzyjnego pozycjonowania wykorzystujących wielosystemowe obserwacje GNSS. Omówione zagadnienia są ściśle związane z kierunkami badań aktualnie podejmowanymi przez międzynarodowe środowisko naukowe. W pracach stanowiących cykl publikacji przedstawiono zarówno oryginalne metody i algorytmy wraz z rezultatami ich wykorzystania jak i wyniki analiz i badań nad właściwościami tych metod. Opracowane algorytmy mogą zostać zaimplementowane w oprogramowaniu wewnętrznym odbiorników GNSS, w komercyjnych pakietach programów, jak też automatycznych systemach do opracowania obserwacji GNSS. Do najważniejszych osiągnięć naukowych przedstawionych w cyklu publikacji należy zaliczyć:

1. Osiągnięcia związane z rozwojem metod integracji obserwacji multi-GNSS:

- a. Opracowanie nowych algorytmów ścisłej integracji wielosystemowych i wieloczęstotliwościowych obserwacji GNSS w pozycjonowaniu względnym;
- b. Opracowanie metody kalibracji międzysystemowych opóźnień sprzętowych odbiorników obecnych w przypadku ścisłej integracji obserwacji wielosystemowych;
- c. Charakterystyka i analiza krótko- i długookresowej stabilności międzysystemowych opóźnień sprzętowych odbiorników;
- d. Analiza rezultatów pozycjonowania RTK z pojedynczej epoki obserwacyjnej opartego o opracowane metody integracji wielosystemowych obserwacji GPS, Galileo i BDS.

2. Osiągnięcia związane z rozwojem nowych modeli matematycznych i metod pozycjonowania GNSS wieloodbiornikowego:

- a. Opracowanie nowej metody precyzyjnego pozycjonowania kinematycznego z wykorzystaniem konfiguracji wielu kolokowanych odbiorników użytkownika.

3. Osiągnięcia związane z badaniami w zakresie wpływu błędów propagacji sygnału GNSS w jonosferze i rozwoju metod ich eliminacji:

- a. Analiza dokładności poprawek jonosferycznych otrzymanych z rozwiązania sieciowego i ich wpływu na długość sesji obserwacyjnej potrzebnej do prawidłowego rozwiązania nieoznaczoności w pozycjonowaniu GNSS-RTK;
- b. Określenie pożądanej dokładności poprawek jonosferycznych w metodzie Network RTK umożliwiającej wiarygodne pozycjonowanie na podstawie obserwacji z jednej epoki obserwacyjnej;
- c. Współautorstwo algorytmu eliminacji wpływu silnych zaburzeń jonosferycznych na precyzyjne względne pozycjonowanie GNSS.

4.3.6. Literatura

- Bakuła M, 2013, Study of Reliable Rapid and Ultrarapid Static GNSS Surveying for Determination of the Coordinates of Control Points in Obstructed Conditions, *J Surv Eng-ASCE* 139(4) pp 188-193,
- Bock Y, Gourevitch SA, Counselman CC, King RW and Abbot RI, 1986, Interferometric analysis of GPS phase observations, *Manuscripta Geodaetica*, 11:282-288
- Borio D Gioia C Mitchison N, 2016, Identifying a low-frequency oscillation in Galileo IOV pseudorange rates *GPS Solut* 20(3), pp 363–372

- Bosy J, Graszka W, Leończyk M, 2007, ASG-EUPOS - a multifunctional precise satellite positioning system in Poland, *European Journal of Navigation*, Vol. 5 No. 4, pp. 30-34
- Buist PJ, Teunissen PJG, Giorgi G, Verhagen S, 2009, Multiplatform Instantaneous GNSS Ambiguity Resolution for Triple- and Quadruple-Antenna Configurations with Constraints, *International Journal of Navigation and Observation* Vol. 2009, Article ID 565426
- Buist PJ, 2007, The Baseline Constrained LAMBDA Method for Single Epoch, Single Frequency Attitude Determination Applications, In *Proceedings of the 20th ION International Meeting*, Forth Worth, TX, 2007
- Chen W, Qin H, 2012, New method for single epoch, single frequency land vehicle attitude determination using low-end GPS receiver, *GPS Solut* 16(3), pp 329-338
- Chu FY, Yang M, 2014, GPS/Galileo long baseline computation: method and performance analyses. *GPS Solut* 18(2), pp 263-272
- Deng C, Tang W, Liu J, Sh, C, 2014, Reliable single-epoch ambiguity resolution for short baselines using combined GPS/Beidou system, *GPS Solut* 18(3), pp 375-386
- Giorgi G, Teunissen PJG, Verhagen S, Buist P, 2012, Instantaneous Ambiguity Resolution in Global-Navigation Satellite-System-Based Attitude Determination Applications: A Multivariate Constrained Approach, *Journal of Guidance, Control and Dynamics* 35(1), pp 51-67
- He H, Li J, Yang Y, Xu J, Guo H, Wang, A, 2014, Performance assessment of single- and dual-frequency Beidou/GPS single-epoch kinematic positioning, *GPS Solut* 18(3), pp 393-403
- Hernández-Pajares M, Wielgosz P, Paziewski J, Krypiak-Gregorczyk A, Krukowska M, Stepniak K, Kapłon J, Hadaś T, Sosnica K, Bosy J, Orus-Perez R, Monte-Moreno E, Yang H, Garcia-Rigo A, Olivares-Pulido G, 2017, Direct MSTID mitigation in precise GPS processing, *Radio Science*, 52(3), pp 321-337
- Julien O, Cannon ME, Alves P, et al, 2004, Triple frequency ambiguity resolution using GPS/Galileo, *Eur J Navig* 2(2), pp 51-56
- Kintner PM, Ledvina BM, de Paula ER, 2007, GPS and ionospheric scintillations, *Space Weather*, 5 p. S09003
- Kudrys J, Krzyżek R, 2011, Analysis of coordinates time series obtained using the NAWGEO service of the ASG-EUPOS system, *Geomatics and Environmental Engineering*, vol. 5 no. 4, p. 39-46.
- Lachapelle G, Sun, H, Cannon ME, Lu G, 1994, Precise Aircraft-to-Aircraft Positioning Using a Multiple Receiver Configuration, In *Proceedings: National Technical Meeting*, Institute of Navigation, San Diego, 24-26 January 1994
- Moon Y and Verhagen S, 2006, Integer Ambiguity Estimation and Validation in Attitude Determination Environments, In: *Proceedings ION GNSS 19th International Technical Meeting for Satellite Division*, 26-29 Sep 2006, Forth Worth TX
- Nadarajah N, Paffenholz J-A, Teunissen PJG, 2014, Integrated GNSS Attitude Determination and Positioning for Direct Geo-Referencing, *Sensors* 14, pp 12715-12734; doi:10.3390/s140712715
- Odiijk, D., 2002, Fast Precise GPS Positioning in the Presence of Ionospheric Delays. Rozprawa doktorska. Delft University of Technology
- Odiijk D, Teunissen PJG, Huisman L, 2012, First results of mixed GPS + GIOVE single-frequency RTK in Australia. *J Spat Sci* 57(1), pp 3-18

- Odijski D, Teunissen PJG, 2013, Characterization of between-receiver GPS-Galileo inter-system biases and their effect on mixed ambiguity resolution. *GPS Solut* 17(4), pp 521–533
- Odijski D, Nadarajah N, Zaminpardaz S, et al, 2017, GPS, Galileo, QZSS and IRNSS differential ISBs: estimation and application. *GPS Solut* 21(2), pp 439–450
- Próchniewicz, D, Szpunar R, Walo J, 2017, A new study of describing the reliability of GNSS Network RTK positioning with the use of quality indicators. *Measurement Science and Technology* 2017:28(1), pp. 015012
- Schaer S, 1999, Mapping and predicting Earth's Ionosphere using Global Positioning System, PhD Dissertation, Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland
- Shi C, Zhao Q, Hu Z, Liu J, 2013, Precise relative positioning using real tracking data from COMPASS GEO and IGSO satellites. *GPS Solut* 17(1), pp 103-119
- Sieradzki R, 2015, An analysis of selected aspects of irregularities oval monitoring using GNSS observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 129, pp 87-98
- Sieradzki R, Paziewski J, 2015, MSTIDs impact on GNSS observations and its mitigation in rapid static positioning at medium baselines, *Annals of Geophysics*, 58(6), A0661
- Teunissen PJG, 1995, The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation. *J Geod* 70(1-2), pp 65–82
- Teunissen PJG, 1997, The geometry-free GPS ambiguity search space with a weighted ionosphere. *J Geod* 71(6), pp 370-383
- Teunissen PJG, 2010, Integer least-squares theory for the GNSS compass, *J Geod* 84(7), pp 433-447
- Teunissen PJG, 2012, A-PPP: Array-Aided Precise Point Positioning with Global Navigation Satellite Systems, *IEEE T Signal Proces*, 60(6), pp 2870-2881
- Wang J, Stewart M, Tsakiri M, 1998, A discrimination test procedure for ambiguity resolution on-the-fly, *J Geod* 72(11), 644–653
- Wang B, Miao L, Wang S, Shen J, 2009, A constrained LAMBDA method for GPS attitude determination, *GPS Solut* 13(2), pp 97–107
- Verhagen S, 2002, Performance Analysis of GPS, Galileo and Integrated GPS-Galileo. Proc of ION-GPS-2002, Institute of Navigation, September, Portland, pp. 2208 – 2215
- Xu G, 2000, A concept of precise kinematic positioning and flight-state monitoring from the AGMASCO practice, *Earth Planets Space*, 52, 831–835
- Xu G, 2007, GPS: Theory, Algorithms and Applications 2nd ed., Berlin Heidelberg Springer-Verlag
- Zhang W, Cannon ME, Julien O, et al, 2003, Investigation of combined GPS/Galileo cascading ambiguity resolution schemes. In: proceedings of ION GPS/GNSS-2003, Institute of Navigation, Portland, USA, pp 2599-2610

5. OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO - BADAWCZYCH

5.1. Komentarz do prac badawczych spoza tematyki dotyczącej cyklu publikacji powiązanych tematycznie

Moja pozostała działalność naukowa po uzyskaniu stopnia doktora znajdująca swe odzwierciedlenie w publikacjach niewłączonych do cyklu publikacji skupiała się wokół czterech poniższych obszarów badawczych:

- Badania nad modelowaniem, eliminacją i wpływem zaburzeń jonosferycznych w precyzyjnym pozycjonowaniu satelitarnym.

Początkowo analizowano dokładność globalnego modelu oraz regionalnych map jonosfery opracowanych w Instytucie Geodezji Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (2.A.1, 2.E.3) by następnie skupić się nad charakterystyką wpływu oraz metodami eliminacji średnioskalowych zaburzeń jonosferycznych (*Medium Scale Travelling Ionospheric Disturbances*) w precyzyjnym względnym pozycjonowaniu kinematycznym oraz statycznym (2.E.6, 2.A.6, 2.A.8). Zagadnienia te badane były również w ramach realizacji projektów badawczych finansowanych min. przez Europejską Agencję Kosmiczną oraz NCN (2.J.5, 2.J.6). Kolejne badania prowadzone w ramach realizacji projektów badawczych dotyczyły określenia wpływu wyższych rzędów opóźnienia jonosferycznego na względne satelitarne pozycjonowanie (2.J.7). Obecne i planowane badania podejmowane przeze mnie w ramach kierowanego projektu naukowego dotyczą analizy różnoskalowych zaburzeń jonosferycznych na podstawie opracowania wielosystemowych obserwacji GNSS (2.J.9).

- Rozwój algorytmów i oprogramowania do precyzyjnego pozycjonowania absolutnego (*Precise Point Positioning - PPP*) oraz względnego (*Real Time Kinematics - RTK*) oraz automatycznego systemu opracowania obserwacji GNSS.

Jako jedno z moich głównych osiągnięć naukowo badawczych uważam rozwój autorskiego oprogramowania do opracowania obserwacji GNSS. Oprogramowanie umożliwia wyznaczenie precyzyjnej pozycji korzystając z wielosystemowych oraz wieloczęstotliwościowych obserwacji GNSS (GPS+Galileo+BDS+SBAS) korzystając z różnych metod pozycjonowania absolutnego oraz względnego. Oryginalne algorytmy oraz oprogramowanie posłużyły do przygotowania szeregu publikacji włączonych do jednotematycznego cyklu stanowiącego osiągnięcie naukowe omówione w sekcji 4 jak i stanowiących pozostałe osiągnięcia dotyczące szczegółowych zagadnień w opracowaniu obserwacji GNSS (2.A.1, 2.A.2, 2.A.3, 2.A.4, 2.A.6, 2.E.5). Autorskie algorytmy oraz oprogramowanie stanowiły podstawę automatycznego systemu opracowania kinematycznych i statycznych obserwacji GNSS (2.E.1, 2.E.4) rozwijanego w ramach

realizacji projektów naukowych finansowanych zarówno przez NCN (2.J.4) którego byłem był kierownikiem jak i NCBiR (2.J.3) w którym uczestniczyłem jako wykonawca.

- Badania nad eliminacją wpływu opóźnienia troposferycznego w precyzyjnym pozycjonowaniu satelitarnym.

W ramach prowadzonych badań analizowałem zarówno skuteczność i dokładność wybranych metod modelowania opóźnienia troposferycznego w pozycjonowaniu kinematycznym oraz szybkim statycznym jak również doskonałem optymalną strategię modelowania opóźnienia troposferycznego w opracowaniu precyzyjnych lokalnych sieci GNSS (2.A.4, 2.A.5).

- Rozwój optymalnej strategii opracowania obserwacji satelitarnych w precyzyjnych sieciach lokalnych oraz praktyczne wykorzystanie technologii GNSS do badań deformacji i przemieszczeń obiektów budowlanych i terenu.

Prowadziłem teoretyczne i praktyczne badania w zakresie zastosowania pomiarów GNSS do badań przemieszczeń terenu i obiektów budowlanych oraz w zakresie integracji satelitarnych i klasycznych pomiarów geodezyjnych w precyzyjnej niwelacji (2.A.5, 2.E.2, 2.A.7). Powstałe w ramach ww. prac strategie opracowania obserwacji w precyzyjnych lokalnych sieciach GNSS były w praktyce wykorzystywane w pracach badawczych na rzecz podmiotów gospodarczych min. kopalni węgla.

Moje kolejne aktywności dotyczyły opracowania oraz implementacji w autorskim oprogramowaniu algorytmów mających na celu precyzyjną detekcję i charakterystykę dynamicznych zmian położenia punktów badanych. Doskonalona metoda umożliwia opracowanie wysokoczęstotliwościowych (np. 50 Hz) obserwacji satelitarnych i wykrywanie dynamicznych przemieszczeń anteny GNSS na poziomie pojedynczych milimetrów, co może znaleźć zastosowanie np. w badaniach konstrukcji budowlanych. Opracowane algorytmy umożliwiały detekcję wysokoczęstotliwościowych przemieszczeń zarówno w trybie pozycjonowania względnego jak i absolutnego wykorzystując wielosystemowe obserwacje GNSS (2.E.7).

5.2. Publikacje z listy A Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego indeksowane przez JCR

Podano *Impact Factor* z roku opublikowania, liczbę punktów wg MNiSW. Szczegółowy wkład wnioskodawcy przedstawiono w Załączniku 3. Publikacje niewłączone do cyklu stanowiącego osiągnięcie naukowe po uzyskaniu stopnia naukowego doktora.

- [2.A.1] Krypiak-Gregorczyk A., Wielgosz P., Gościewski D., **Paziewski J.**, 2013, Validation of approximation techniques for local total electron content mapping, **Acta Geodynamica et Geomaterialia**, v. 10, No. 3(171), 2013 (Impact Factor 0.667, 10p)
- [2.A.2] Cellmer S., **Paziewski J.**, Wielgosz P., 2013, Fast and precise positioning using MAFA method and new GPS and Galileo signals, **Acta Geodynamica et Geomaterialia**, v. 10, No. 4(172), pp 393-400 DOI: 10.13168/AGG.2013.0038. (Impact Factor 0.667, 10p)
- [2.A.3] **Paziewski J.**, Wielgosz P., Krukowska M., 2013, Application of SBAS pseudorange and carries phase signals to precise instantaneous single-frequency positioning, **Acta Geodynamica et Geomaterialia**, v. 10, No. 4(172), pp. 421-430. (Impact Factor 0.667 10p)
- [2.A.4] Wielgosz P., Krukowska M., **Paziewski J.**, Krypiak-Gregorczyk A., Stępnia K., Kapłon J., Sierny J., Hadaś T., Bosy J., 2013, Performance of ZTD models derived in near real-time from GBAS and meteorological data in GPS fast-static positioning, **Measurement Science and Technology** 24 doi:10.1088/0957-0233/24/12/125802 (Impact Factor 1.352, 35p)
- [2.A.5] Baryła R, **Paziewski J**, Wielgosz P, Stępnia K, Krukowska M, 2014, Accuracy assessment of the ground deformation monitoring with the use of GPS local network: open pit mine Koźmin case study, **Acta Geodynamica et Geomaterialia**, Vol. 11, No. 4 (176), DOI: 10.13168/AGG.2014.0013 (Impact Factor 0.389 20p)
- [2.A.6] Sieradzki R, **Paziewski J**, 2015, MSTIDs impact on GNSS observations and its mitigation in rapid static positioning at medium baselines, **Annals of Geophysics**, 58, 6, 2015, A0661; doi:10.4401/ag-6891 (Impact Factor 0.679 20p)
- [2.A.7] Stępnia K, Baryła R, **Paziewski J**, Gołaszewski P, Wielgosz P, Kurpinski G, Osada E, 2017, Validation of regional geoid models for Poland: Lower Silesia case study, **Acta Geodynamica et Geomaterialia** Vol. 14, No. 1 (185), 93–100, 2017 DOI: 10.13168/AGG.2016.0031 (Impact Factor 0.699 20p)
- [2.A.8] Hernández-Pajares M, Wielgosz P, **Paziewski J**, Krypiak-Gregorczyk A, Krukowska M, Stępnia K, Kapłon J, Hadaś T, Sońnica K, Bosy J, Orus-Perez R, Monte-Moreno E, Yang H, García-Rigo A, Olivares-Pulido G, 2017, Direct MSTID mitigation in precise GPS processing, **Radio Science**, DOI: 10.1002/2016RS006159 (Impact Factor 1.581, 20p)

Publikacje z listy A przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora nauk technicznych:

- [2.A.9] Wielgosz P, Cellmer S, Rzepecka Z, **Paziewski J**, Grejner-Brzezinska D, 2011, Troposphere modeling for precise GPS rapid static positioning in mountainous areas, **Measurement Science and Technology**, Volume 22, Number 4, April 2011. (Impact Factor 1.494 32p)

- [2.A.10] Wielgosz P, **Paziewski** J, Baryła R, 2011, On constraining zenith tropospheric delays in processing of local GPS networks with Bernese software, **Survey Review** 43, No 323. pp. 472-483 (Impact Factor 0.277, 20p)
- [2.A.11] Wielgosz P, **Paziewski** J, Krankowski A, Kroszczyński K, Figurski M, 2012, Results of the application of tropospheric corrections from different troposphere models for precise GPS rapid static positioning, **Acta Geophysica** vol. 60, no. 4, pp. 1236-1257 (Impact Factor 0.91, 20p)

5.3. Publikacje naukowe z listy B MNiSW, rozdziały monografii, materiały pokonferencyjne

Podano liczbę punktów czasopisma z roku opublikowania. Szczegółowy wkład wnioskodawcy przedstawiono w Załączniku 3. Publikacje niewłączone do cyklu stanowiącego osiągnięcie naukowe po uzyskaniu stopnia naukowego doktora.

- [2.E.1] **Paziewski** J., Stępnia K., 2014, New On-line System for Automatic Postprocessing of Fast-static and Kinematic GNSS Data, The 9th International Conference "Environmental Engineering" Selected Papers 22-23 May 2014, Vilnius, Lithuania, <http://dx.doi.org/10.3846/enviro.2014.235> (10p). *Materiały pokonferencyjne indeksowane w bazie Web of Science.*
- [2.E.2] Baryła R., **Paziewski** J., 2014, The Concept of the GNSS Control Network Densification with Precise Leveling for Ground Deformation Monitoring, The 9th International Conference "Environmental Engineering" Selected Papers 22-23 May 2014, Vilnius, Lithuania, <http://dx.doi.org/10.3846/enviro.2014.187> (10p). *Materiały pokonferencyjne indeksowane w bazie Web of Science.*
- [2.E.3] Stępnia K., Wielgosz P., **Paziewski** J., 2014, Accuracy analysis of the Klobuchar ionosphere model transmitted by the GPS system, The 9th International Conference "Environmental Engineering" Selected Papers 22-23 May 2014, Vilnius, Lithuania, <http://dx.doi.org/10.3846/enviro.2014.246> (10p). *Materiały pokonferencyjne indeksowane w bazie Web of Science.*
- [2.E.4] **Paziewski** J, Krukowska M, Wielgosz P, 2014, Preliminary results on performance of new ultra-fast static positioning module – POZGEO-2 in areas outside the ASG-EUPOS network, *Geodesy and Cartography*, Vol. 63, No 1, 2014, pp. 101-109, DOI: 10.2478/geocart-2014-0008 (8p). *Czasopismo z "listy B" MNiSW.*
- [2.E.5] **Paziewski** J, Krukowska M, 2014, Ultra szybkie statyczne pozycjonowanie GNSS z zastosowaniem systemów GPS i Galileo, *Biuletyn WAT* Vol. LXIII, nr 2 (5p). *Czasopismo z "listy B" MNiSW.*
- [2.E.6] Krukowska M, **Paziewski** J, Stępnia K, 2014, Medium Scale Traveling Ionospheric Disturbances detection over Poland by real-time monitoring service, *Logistyka*, Nr 4/2014 (10p). *Czasopismo z "listy B" MNiSW.*
- [2.E.7] Małyszko L, Kowalska E, **Paziewski** J, Rutkiewicz A, Sieradzki R, 2016, Monitoring of structural vibration using GNSS and accelerometer data - preliminary tests, Chapter 6 in

Małyszko L & Tarczewski R (Eds.) Lightweight Structures in Civil Engineering - LSCE 2016 Contemporary Problems. Olsztyn, pp. 37-42 (5p). *Rozdział w monografii.*

Monografie, publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych innych niż znajdujące się w bazie, o której mowa w pkt II A opublikowane przed otrzymaniem stopnia naukowego doktora nauk technicznych:

- [2.E.8] Baryła R, Oszczak S, **Paziewski** J, Wielgosz P, 2009 Analiza deformacji terenu na obszarze Starego i Głównego Miasta Gdańska wyznaczonych za pomocą techniki GPS – wyniki z pięciu kampanii pomiarowych, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Konferencje No. 129(54), Wrocław. (2p). Materiały pokonferencyjne.
- [2.E.9] Baryła R, Wielgosz P, **Paziewski** J, Błaszczuk S, 2011, Principles of ground deformation monitoring at open pit mine with use of GPS technology: KWB “Adamów” in Turek case study, Reports on Geodesy No 1(90). (6p). *Czasopismo z listy B MNiSW*
- [2.E.10] Baryła R, **Paziewski** J, 2012, Główne założenia technologii badania deformacji terenu na podstawie satelitarnych pomiarów GPS sieci kontrolnej, Biuletyn WAT 2/2012 pp. 39-57 (9p). *Czasopismo z listy B MNiSW*
- [2.E.11] Stępnia K, Wielgosz P, **Paziewski** J, 2012 Badania dokładności pozycjonowania techniką PPP w zależności od długości sesji obserwacyjnej oraz wykorzystanych systemów pozycjonowania satelitarnego., Biuletyn WAT, Biuletyn WAT nr 1/2012 (9p). *Czasopismo z listy B MNiSW.*

6. PODSUMOWANIE DOROBKU I OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH, POPULARYZATORSKICH, ORGANIZACYJNYCH I DYDAKTYCZNYCH

Poniżej przedstawiono wybrane wskaźniki dotyczące osiągnięć naukowych, popularyzatorskich, organizacyjnych i dydaktycznych. Szczegółowy wykaz osiągnięć przedstawia Załącznik nr 3.

Tabela 2 Zestawienie wskaźników dotyczących osiągnięć naukowo-badawczych.

L.p.	Wskaźnik	Wartość
1.	Autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w czasopismach znajdujących się w bazie <i>Journal Citation Reports</i> (JCR)	
	<ul style="list-style-type: none"> • po uzyskaniu stopnia naukowego doktora • przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora 	16 3
2.	Autorstwo lub współautorstwo monografii, publikacji naukowych w czasopismach międzynarodowych lub krajowych:	
	<ul style="list-style-type: none"> • Rozdziały w monografii (po uzyskaniu stopnia naukowego doktora) • Publikacje naukowe w czasopismach nieposiadających współczynnika wpływu <i>Impact Factor</i> 	1
	<ul style="list-style-type: none"> ○ po uzyskaniu stopnia naukowego doktora ○ przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora 	3 4
	• Publikacje w materiałach z konferencji międzynarodowych uwzględnionych w uznanej bazie publikacji o zasięgu międzynarodowym (WoS) (po uzyskaniu stopnia naukowego doktora)	3
3.	Sumaryczny <i>Impact Factor</i> publikacji naukowych tworzących <u>monotematyczny cykl</u> według listy <i>Journal Citation Reports</i> (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania	16.534
4.	Sumaryczny <i>Impact Factor</i> publikacji naukowych <u>po uzyskaniu stopnia naukowego doktora</u> według listy <i>Journal Citation Reports</i> (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania	23.235
5.	Sumaryczny <i>Impact Factor</i> <u>wszystkich publikacji</u> naukowych według listy <i>Journal Citation Reports</i> (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania	25.916
6.	Liczba cytowań według bazy Web of Science	134
7.	Indeks Hirscha według bazy Web of Science	7
8.	Liczba punktów publikacji <u>tworzących monotematyczny cykl</u> zgodnie z rokiem opublikowania (udział wnioskodawcy)	166.5
9.	Liczba punktów publikacji <u>po uzyskaniu stopnia naukowego doktora</u> zgodnie z rokiem opublikowania (udział wnioskodawcy)	232.3
10.	Liczba punktów <u>wszystkich publikacji</u> zgodnie z rokiem opublikowania (udział wnioskodawcy)	258.9
11.	Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach	
	<ul style="list-style-type: none"> • Kierowanie • Udział jako wykonawca 	2 7
12.	Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową	5
13.	Liczba referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych	
	<ul style="list-style-type: none"> • po uzyskaniu stopnia naukowego doktora • przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora 	51 32

Tabela 3 Zestawienie wskaźników dotyczących dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego oraz współpracy krajowej i międzynarodowej.

Lp.	Wskaźnik	Wartość
1.	Udział w komitetach organizacyjnych i naukowych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych	2
2.	Prowadzenie sesji podczas międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych	1
3.	Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	2
4.	Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych i branżowych	4
Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych:		
5.	• Czasopisma z listy JCR (posiadające <i>Impact Factor</i>)	42
	• Czasopisma spoza listy JCR	6
	• Materiały konferencyjne (WoS)	7
	• łącznie	Σ 55
Zagraniczne staże naukowe		
6.	• Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora	1
	• Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora	3
7.	Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego	1
8.	Promotor prac dyplomowych: magisterskich i inżynierskich	11

Tabela 4 Nagrody i wyróżnienia za działalność naukową.

Ozn.	Nagrody i wyróżnienia za działalność naukową
1.	Dyplom Rektora Uniwersytetu Warmińsko – Mazurskiego w Olsztynie za osiągnięcia w dziedzinie naukowej, (04.07.2012r.).
2.	Nagroda indywidualna I stopnia Rektora Uniwersytetu Warmińsko – Mazurskiego w Olsztynie za osiągnięcia w dziedzinie naukowej, (01.12.2015 r.).
3.	Nagroda Dziekana Wydziału Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa w postaci dofinansowania prac naukowych z największą liczbą punktów opublikowanych w czasopismach z listy A, (4.05.2016 r.).
4.	Nagroda zespołowa I stopnia Rektora Uniwersytetu Warmińsko – Mazurskiego w Olsztynie za osiągnięcia w dziedzinie naukowej, (01.12.2016 r.).
5.	Wybór na jednego z dziesięciu najlepszych recenzentów czasopisma <i>Advances in Space Research</i> w roku 2016 (<i>Top 10 Reviewers for ASR in 2016</i>). Czasopismo jest indeksowane przez JCR, Impact Factor 1.401, liczba punktów wg. MNI SW 20, (04.2017 r.).

Tabela 5 Recenzowanie publikacji w czasopismach naukowych (aktualny *Impact Factor* czasopisma, liczba recenzowanych artykułów danym czasopiśmie):

L.p.	Czasopismo	<i>Impact Factor</i> czasopisma	Liczba recenzji w czasopiśmie
1.	Measurement Science and Technology	1.585	11
2.	Advances in Space Research	1.401	9
3.	Sensors	2.964	6
4.	Journal of Geodesy	2.949	4
5.	Survey Review	0.929	2
6.	GPS Solutions	4.061	2
7.	Journal of Space Weather and Space Climate	2.446	1
8.	Radar Sonar and Navigation	1.509	1
9.	Meteorology and Atmospheric Physics	1.159	1
10.	Journal of Surveying Engineering	1.667	1
11.	International Journal of Geo-Information	1.502	1
12.	Acta Geodaetica et Geophysica	0.794	1
13.	Acta Geodynamica et Geomaterialia	0.699	1
14.	Open Geosciences	0.475	1
15.	Journal of Applied Geodesy		1
16.	Geodesy and Cartography		2
17.	Reports on Geodesy and Geoinformatics		1
18.	Artificial Satellites		2
19.	International Association of Geodesy Proceedings - materiały pokonferencyjne indeksowane w bazie WoS		4
20.	Environmental Engineering Selected Papers - materiały pokonferencyjne indeksowane w bazie WoS		3
			Σ 55

Tabela 6 Członkostwo w krajowych i międzynarodowych organizacjach naukowych oraz radach wydawniczych czasopism naukowych:

L.p.	
1.	Członek komitetu wydawniczego (<i>Editorial Board Member</i>) czasopisma <i>Measurement Science and Technology</i> , (lista A, <i>Impact Factor</i> 1.585, l. punktów wg. MNiSW 30), (od 2016).
2.	Edytor w czasopiśmie naukowym <i>Journal of Geodetic Science</i> , (od 2014).
3.	Członek Europejskiej Unii Nauk o Ziemi (<i>European Geoscience Union</i>), (od 2010).
4.	Członek grupy roboczej 4.4.1 " <i>Biases in Multi-GNSS data processing</i> " w ramach komisji "Pozycjonowanie i aplikacje" Międzynarodowej Asocjacji Geodezji (<i>International Association of Geodesy</i>), (od 2015).
5.	Członek grupy roboczej (<i>Working Group 1 - Advanced Processing Techniques</i>) akcji COST (<i>European Cooperation in Science and Technology</i>) GNSS4SWEC (<i>GNSS for Severe Weather and Climate</i>), (2015-2017).
6.	Członek Stowarzyszenia Geodetów Polskich, (od 2014).

Web of Science

Search | Search Results | My Tools | Search History | Marked List

Citation report for 21 results from Web of Science Core Collection between 1945 and 2017 **Go**

You searched for: **AUTHOR:** (paziewski j) [...More](#)

This report reflects citations to source items indexed within Web of Science Core Collection. Perform a Cited Reference Search to include citations to items not indexed within Web of Science Core Collection.

Export Data: **Save to Text File**

Total Publications
21



h-index
7

Average citations per item
6,38

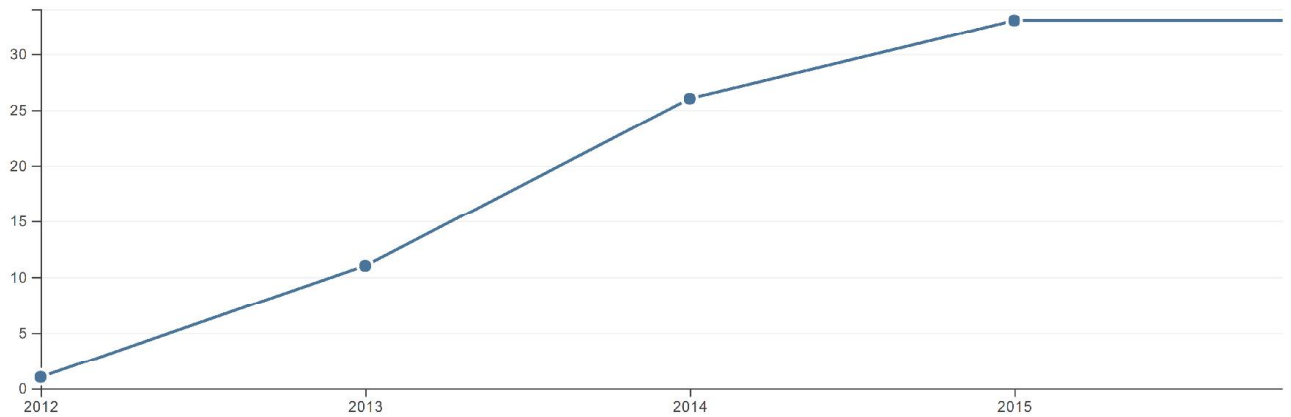
Sum of Times Cited
134

Without self citations
75

Citing articles
74

Without self citations
57

Sum of Times Cited per Year



Sort by: Times Cited -- highest to lowest

Page 1 of 3

	2013	2014	2015	2016	2017	Total	Average Citations per Year
--	------	------	------	------	------	-------	----------------------------

Use the checkboxes to remove individual items from this Citation Report

or restrict to items published between 1945 and 2017 **Go**

	2013	2014	2015	2016	2017	Total	Average Citations per Year
<input type="checkbox"/> 1. Accounting for Galileo-GPS inter-system biases in precise satellite positioning By: Paziewski, Jacek; Wielgosz, Pawel JOURNAL OF GEODESY Volume: 89 Issue: 1 Pages: 81-93 Published: JAN 2015	11	26	33	33	30	134	22.33
<input type="checkbox"/> 2. ON CONSTRAINING ZENITH TROPOSPHERIC DELAYS IN PROCESSING OF LOCAL GPS NETWORKS WITH BERNESE SOFTWARE By: Wielgosz, P.; Paziewski, J.; Baryla, R.	4	5	5	0	1	15	2.14

<input type="checkbox"/>	3.	Assessment of GPS plus Galileo and multi-frequency Galileo single-epoch precise positioning with network corrections	0	1	6	4	3	14	3.50
		By: Paziewski, Jacek; Wielgosz, Pawel GPS SOLUTIONS Volume: 18 Issue: 4 Pages: 571-579 Published: OCT 2014							
<input type="checkbox"/>	4.	Troposphere modeling for precise GPS rapid static positioning in mountainous areas	4	4	1	2	2	14	2.00
		By: Wielgosz, P.; Cellmer, S.; Rzepecka, Z.; et al. MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY Volume: 22 Issue: 4 Article Number: 045101 Published: APR 2011							
<input type="checkbox"/>	5.	Results of the application of tropospheric corrections from different troposphere models for precise GPS rapid static positioning	2	4	3	1	0	10	1.67
		By: Wielgosz, Pawel; Paziewski, Jacek; Krankowski, Andrzej; et al. ACTA GEOPHYSICA Volume: 60 Issue: 4 Pages: 1236-1257 Published: AUG 2012							
<input type="checkbox"/>	6.	FAST AND PRECISE POSITIONING USING MAFA METHOD AND NEW GPS AND GALILEO SIGNALS	0	3	3	1	1	8	1.60
		By: Cellmer, Slawomir; Paziewski, Jacek; Wielgosz, Pawel ACTA GEODYNAMICA ET GEOMATERIALIA Volume: 10 Issue: 4 Pages: 393-400 Published: 2013							
<input type="checkbox"/>	7.	VALIDATION OF APPROXIMATION TECHNIQUES FOR LOCAL TOTAL ELECTRON CONTENT MAPPING	0	3	1	2	2	8	1.60
		By: Krypiak-Gregorczyk, Anna; Wielgosz, Pawel; Gosciwski, Dariusz; et al. ACTA GEODYNAMICA ET GEOMATERIALIA Volume: 10 Issue: 3 Pages: 275-283 Published: 2013							
<input type="checkbox"/>	8.	Study on desirable ionospheric corrections accuracy for network-RTK positioning and its impact on time-to-fix and probability of successful single-epoch ambiguity resolution	0	0	1	1	5	7	3.50
		By: Paziewski, Jacek ADVANCES IN SPACE RESEARCH Volume: 57 Issue: 4 Pages: 1098-1111 Published: FEB 15 2016							
<input type="checkbox"/>	9.	Selected properties of GPS and Galileo-IOV receiver intersystem biases in multi-GNSS data processing	0	0	1	3	3	7	2.33
		By: Paziewski, Jacek; Sieradzki, Rafal; Wielgosz, Pawel MEASUREMENT SCIENCE and TECHNOLOGY Volume: 26 Issue: 9 Article Number: 095008 Published: SEP 2015							
<input type="checkbox"/>	10.	Precise GNSS single epoch positioning with multiple receiver configuration for medium-length baselines: methodology and performance analysis	0	0	3	3	1	7	2.33
		By: Paziewski, Jacek MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY Volume: 26 Issue: 3 Article Number: 035002 Published: MAR 2015							

Select Page



Save to Text File



Sort by: Times Cited -- highest to lowest

Page 1 of 3

21 records matched your query of the 64,533,613 in the data limits you selected.
Key: = Structure available.

Web of Science

Search Search Results My Tools Search History Marked List

Citation report for 21 results from Web of Science Core Collection between 1945 and 2017

You searched for: AUTHOR: (paziewski j) ...More

This report reflects citations to source items indexed within Web of Science Core Collection. Perform a Cited Reference Search to include citations to items not indexed within Web of Science Core Collection.

Export Data:

Total Publications **21**



h-index **7**
Average citations per item **6,38**

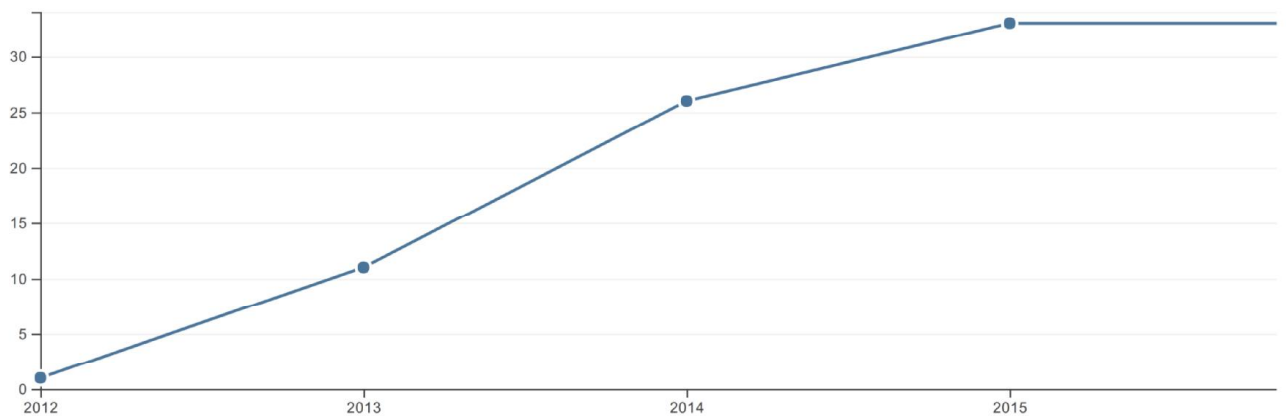
Sum of Times Cited **134**

Without self citations **75**

Citing articles **74**

Without self citations **57**

Sum of Times Cited per Year



Sort by: Times Cited – highest to lowest

Page 2 of 3

	2013	2014	2015	2016	2017	Total	Average Citations per Year
Use the checkboxes to remove individual items from this Citation Report							
<input type="checkbox"/>	11	26	33	33	30	134	22.33
or restrict to items published between 1945 and 2017 <input type="button" value="Go"/>							
<input type="checkbox"/> 11. Performance of ZTD models derived in near real-time from GBAS and meteorological data in GPS fast-static positioning	0	1	1	3	2	7	1.40
By: Wielgosz, P.; Krukowska, M.; Paziewski, J.; et al. MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY Volume: 24 Issue: 12 Article Number: 125802 Published: DEC 2013							
<input type="checkbox"/> 12. APPLICATION OF SBAS PSEUDORANGE AND CARRIER PHASE SIGNALS TO PRECISE INSTANTANEOUS SINGLE-FREQUENCY POSITIONING	1	5	1	0	0	7	1.40
By: Paziewski, Jacek; Wielgosz, Pawel; Krukowska, Marta							

- | | | |
|--------------------------|---|-------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <p>13. Study on reliable GNSS positioning with intense TEC fluctuations at high latitudes</p> <p>By: Sieradzki, Rafal; Paziewski, Jacek
 GPS SOLUTIONS Volume: 20 Issue: 3 Pages: 553-563 Published: JUL 2016</p> | <p>0 0 1 2 1 4 2.00</p> |
| <input type="checkbox"/> | <p>14. ACCURACY ASSESSMENT OF THE GROUND DEFORMATION MONITORING WITH THE USE OF GPS LOCAL NETWORK: OPEN PIT MINE KOZMIN CASE STUDY</p> <p>By: Baryla, Radoslaw; Paziewski, Jacek; Wielgosz, Pawel; et al.
 ACTA GEODYNAMICA ET GEOMATERIALIA Volume: 11 Issue: 4 Pages: 317-324 Published: 2014</p> | <p>0 0 2 2 0 4 1.00</p> |
| <input type="checkbox"/> | <p>15. Investigation of some selected strategies for multi-GNSS instantaneous RTK positioning</p> <p>By: Paziewski, Jacek; Wielgosz, Pawel
 ADVANCES IN SPACE RESEARCH Volume: 59 Issue: 1 Pages: 12-23 Published: JAN 1 2017</p> | <p>0 0 0 0 2 2 2.00</p> |
| <input type="checkbox"/> | <p>16. MSTIDs impact on GNSS observations and its mitigation in rapid static positioning at medium baselines</p> <p>By: Sieradzki, Rafal; Paziewski, Jacek
 ANNALS OF GEOPHYSICS Volume: 58 Issue: 6 Article Number: A0661 Published: 2015</p> | <p>0 0 0 1 1 2 0.67</p> |
| <input type="checkbox"/> | <p>17. Direct MSTID mitigation in precise GPS processing</p> <p>By: Hernandez-Pajares, Manuel; Wielgosz, Pawel; Paziewski, Jacek; et al.
 RADIO SCIENCE Volume: 52 Issue: 3 Pages: 321-337 Published: MAR 2017</p> | <p>0 0 0 0 0 0 0.00</p> |
| <input type="checkbox"/> | <p>18. VALIDATION OF REGIONAL GEOID MODELS FOR POLAND: LOWER SILESIA CASE STUDY</p> <p>By: Stepniak, Katarzyna; Baryla, Radoslaw; Paziewski, Jacek; et al.
 ACTA GEODYNAMICA ET GEOMATERIALIA Volume: 14 Issue: 1 Pages: 93-100 Published: 2017</p> | <p>0 0 0 0 0 0 0.00</p> |
| <input type="checkbox"/> | <p>19. The Concept of the GNSSControl Network Densification with Precise Leveling for Ground Deformation Monitoring</p> <p>By: Baryla, Radoslaw; Paziewski, Jacek
 Edited by: Cygas, D; Tollazzi, T
 Conference: 9th International Conference on Environmental Engineering (ICEE)
 Location: Vilnius, LITHUANIA Date: MAY 22-23, 2014
 Sponsor(s): Vilnius Gediminas Tech Univ; Lithuanian Acad Sci; Acad Sustainable Dev; Federat European Heating & Air Conditioning Assoc; Int Federat Surveyors; Baltic Road Assoc; Int Associ Publ Transport; Int Acad Ecolog & Life Protect Sci; Lithuanian Water Suppliers Assoc; European Spatial Planning Observat Network
 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ENVIRONMENTAL ENGINEERING (9TH ICEE) - SELECTED PAPERS Published: 2014</p> | <p>0 0 0 0 0 0 0.00</p> |
| <input type="checkbox"/> | <p>20. New On-line System for Automatic Postprocessing of Fast-static and Kinematic GNSS Data</p> <p>By: Paziewski, Jacek; Stepniak, Katarzyna
 Edited by: Cygas, D; Tollazzi, T
 Conference: 9th International Conference on Environmental Engineering (ICEE)
 Location: Vilnius, LITHUANIA Date: MAY 22-23, 2014
 Sponsor(s): Vilnius Gediminas Tech Univ; Lithuanian Acad Sci; Acad Sustainable Dev; Federat European Heating & Air Conditioning Assoc; Int Federat Surveyors; Baltic Road Assoc; Int Associ Publ Transport; Int Acad Ecolog & Life Protect Sci; Lithuanian Water Suppliers Assoc; European Spatial Planning Observat Network
 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ENVIRONMENTAL ENGINEERING (9TH ICEE) - SELECTED PAPERS Published: 2014</p> | <p>0 0 0 0 0 0 0.00</p> |

Select Page   

Sort by:

Page of 3

Web of Science

Search | Search Results | My Tools | Search History | Marked List

Citation report for 21 results from Web of Science Core Collection between 1945 and 2017 **Go**

You searched for: **AUTHOR:** (paziewski j) [...More](#)

This report reflects citations to source items indexed within Web of Science Core Collection. Perform a Cited Reference Search to include citations to items not indexed within Web of Science Core Collection.

Export Data: **Save to Text File**

Total Publications
21



h-index
7

Average citations per item
6,38

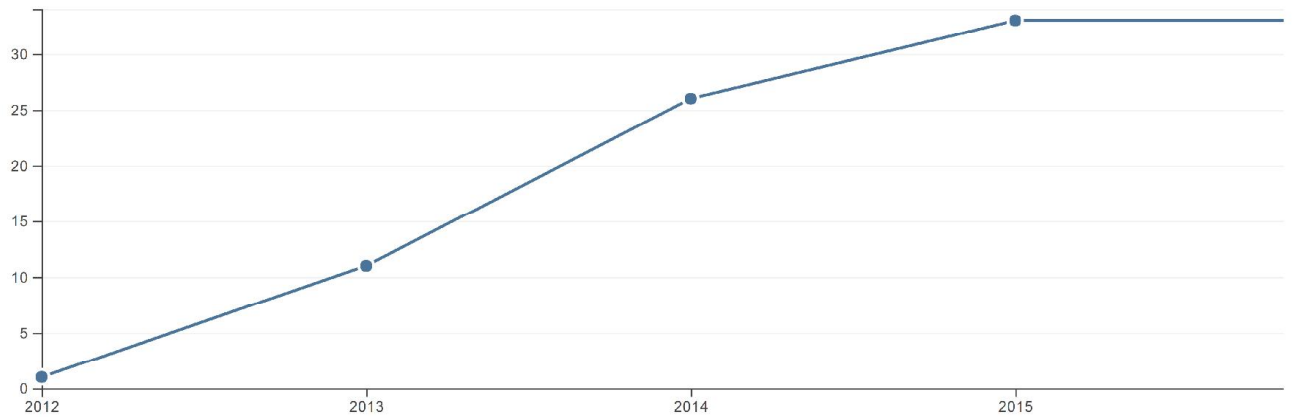
Sum of Times Cited
134

Without self citations
75

Citing articles
74

Without self citations
57

Sum of Times Cited per Year



Sort by: Times Cited -- highest to lowest

Page 3 of 3

	2013	2014	2015	2016	2017	Total	Average Citations per Year
--	------	------	------	------	------	-------	----------------------------

Use the checkboxes to remove individual items from this Citation Report

or restrict to items published between 1945 and 2017 **Go**

<input type="checkbox"/>	21.	Accuracy analysis of the Klobuchar ionosphere model transmitted by the GPS system	0	0	0	0	0	0.00
--------------------------	-----	--	---	---	---	---	---	------

By: Stepniak, Katarzyna; Wielgosz, Pawel; Paziewski, Jacek
 Edited by: Cygas, D; Tollazzi, T
 Conference: 9th International Conference on Environmental Engineering (ICEE)
 Location: Vilnius, LITHUANIA Date: MAY 22-23, 2014
 Sponsor(s): Vilnius Gediminas Tech Univ; Lithuanian Acad Sci; Acad Sustainable Dev; Federat European Heating & Air Conditioning Assoc; Int Federat Surveyors; Baltic Road Assoc; Int Associ Publ Transport; Int Acad Ecolog & Life Protect Sci; Lithuanian Water Suppliers Assoc; European Spatial Planning Observat Network

Select Page



Save to Text File

Sort by: Times Cited – highest to lowest

Page of 3

21 records matched your query of the 64,533,613 in the data limits you selected.
Key: = Structure available.

2 out of 3 records