

POZYCJONOWANIE SATELITARNE TECHNIKĄ PPP RTK

Andrzej Uznański

dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, e-mail: auznan@agh.edu.pl

Streszczenie. W toku rozwoju pomiarów satelitarnych pojawiła się technika określana mianem Precise Point Positioning RTK (Real Time Kinematic), która umożliwia precyzyjne wyznaczenie pozycji punktów w czasie rzeczywistym jednym odbiornikiem satelitarnym. Pozycjonowanie tą techniką nie wymaga dostępu do strumieni danych z naziemnych sieci referencyjnych, jak np. w Polsce ASG-EUPOS. Jest to atut szczególnie na obszarach bez zasięgu sieci GSM. Idea tych pomiarów mogłaby się wydawać bardzo atrakcyjną dla wykonawców robót geodezyjnych. W pracy przedstawiono podstawy teoretyczne, akcentując wymagania, atuty i mankamenty tej techniki pomiarowej. Analiza techniki PPP RTK wskazuje na umiarkowane możliwości ich ekonomicznie uzasadnionego zastosowania w praktyce, ale technika niestannie jest rozwijana i w przyszłości może być bardziej konkurencyjna w Polsce.

Słowa kluczowe: RTK, RTN, RTK PPP, Precise Point Positioning, czas konwergencji

1. Wprowadzenie

Od kilku lat w Polsce oferowany jest dostęp do serwisów związanych z najnowszą techniką pozycjonowania satelitarnego w czasie rzeczywistym RTK PPP (Real Time Kinematic Precise Point Positioning). Sama technika PPP ma już długą tradycję [16], ale w praktyce nie była dostępna dla rodzimych użytkowników, a i teraz jest to obszar bardzo niszowy, praktycznie nieistniejący w wykonawstwie geodezyjnym. W Polsce oferowane są w zasadzie dwa serwisy SmartLink [20] oraz CenterPointRTX [21]. Dynamiczny rozwój satelitarnych technik pozycjonowania może jednak spowodować, że RTK PPP stanie się rozwiązaniem pomiarowym o istotnym znaczeniu. Technika posiada niezaprzeczalne atuty, w niektórych sytuacjach będzie najekonomiczniejszą do zastosowania, ale aktualnie jej mankamenty wydają się być istotniejsze na terenie kraju. W pracy starano się wyjść naprzeciw wykonawcom robót geodezyjnych, zainteresowanym wdrażaniem potencjalnie atrakcyjnych, nowych technologii pomiarowych, przedstawiając zalety, wymagania i mankamenty pomiarów RTK PPP.

2. RTK PPP w kontekście pomiarów satelitarnych w czasie rzeczywistym

Satelitarne techniki pomiarowe są bardzo skomplikowane w szczegółach teoretycznych i technicznych, ale sama realizacja pomiarów jest już bardzo prosta.

W poniższych rozważaniach skupiono się na dwóch podstawowych aspektach satelitarnych technik pomiarowych: infrastrukturze naziemnej oraz transmisji danych odbieranych przez odbiornik satelitarny wykonawcy robót geodezyjnych.

Pierwsze precyzyjne komercyjne pomiary satelitarne w czasie rzeczywistym RTK GPS (Real Time Kinematic Global Positioning System) miały miejsce na świecie w 1993 r. [8], a w Polsce w 1996 r. Na polskich torach pierwszy odbiornik satelitarny z funkcją pomiarów RTK GPS pojawił się komercyjnie w 1998 r. na dziesięciokilometrowym odcinku linii kolejowej Chorzów Stary - Radzionków. Wózek pomiarowy został zbudowany na bazie korektora krzywizn firmy Matisa (rys. 1) [14], który zaadoptowano do tego celu. Podstawową ideą pomiarów RTK GPS jest wykorzystanie przez odbiornik ruchomy danych z fizycznej stacji referencyjnej, której antena satelitarna jest ustawiona nad punktem osnowy. Odległość odbiornika ruchomego od stacji referencyjnej wynosiła w latach 90-tych maksymalnie kilkanaście kilometrów, ale znacznie bardziej limitowała ją topografia terenu, najczęściej do kilku kilometrów lub jeszcze mniej. Powodem był zasięg transmisji radiowej danych referencyjnych. Był to istotny mankament tej techniki pomiarowej.



Rys. 1. Pierwszy odbiornik satelitarny RTK GPS na polskich torach

Pomiary RTN (Real Time Network) były kolejnym krokiem w rozwoju satelitarnych technik pomiarowych, który istotnie spopularyzował tę technikę w wykonawstwie geodezyjnym. Dzięki całej sieci stacji referencyjnych dedykowanych pomiarom RTN jako ich naziemna infrastruktura systemowa, wykonawca pomiarów mógł wykonywać je autonomicznie, dysponując tylko jednym odbiornikiem satelitarnym. W Polsce szybki wzrost wykorzystywania pomiarów RTK i RTN

w wykonawstwie geodezyjnym nastąpił od czerwca 2008 r., kiedy to udostępniony został system naziemnych stacji referencyjnych ASG-EUPOS (rys. 2), liczący obecnie na terenie Polski 103 stacje referencyjne plus 24 stacje stowarzyszone, zlokalizowane zagranicą, które umożliwiają poprawne wyznaczanie pozycji na terenach przygranicznych.

O praktycznym znaczeniu pomiarów RTN świadczy fakt, że w Polsce, mimo kosztownej infrastruktury naziemnej, wartej kilkadziesiąt milionów złotych dla systemów ogólnopolskich, oprócz systemu państwowego ASG-EUPOS funkcjonują równoległe 4 prywatne systemy komercyjne: NadowskiNET, Leica SmartNet Polska, TPI NET^{Pro}, VRSnet.pl. Wszystkie systemy udostępniają strumienie danych referencyjnych odpłatnie.



Rys. 2 Lokalizacja stacji referencyjnych systemu ASG-EUPOS {18}

W pomiarach RTN transmisję radiową w paśmie UHF zastąpiono transmisją GSM. Zasięg pomiaru został przedefiniowany z zasięgu anteny nadawczej UHF stacji referencyjnej do zasięgu danej sieci telefonii komórkowej, a nowy algorytm obliczeniowy umożliwił zwiększenie odległości między odbiornikiem a najbliższą stacją referencyjną do kilkudziesięciu kilometrów, w Polsce do ok. 35 km, przy

dokładności pozycjonowania sytuacyjnego zazwyczaj nie niższej niż 3 cm, a dla wysokości przeciętnie poniżej 5 cm.

Pomiary RTK wymagają stacji referencyjnej, czyli w praktyce kolejnego odbiornika wykonawcy pomiarów, którego koszt waha się od kilkunastu tysięcy złotych za odbiornik produkcji chińskiej do kilkudziesięciu tysięcy za odbiornik jednej z wiodących firm na rynku. Pomiary RTN mają jeszcze większe wymagania w postaci nie kolejnego odbiornika a sieci stacji referencyjnych. Wprawdzie nie obciąża to bezpośrednio wykonawcy, ale musi on płacić za dostęp do danych, co przenosi na niego te koszty, rozłożone w czasie, w sposób pośredni. Relatywnie gęsta sieć stacji referencyjnych jest mankamentem generującym znaczny koszt dla tych technik pomiarowych. Dodatkowo realizacja pomiarów RTN wymaga zasięgu operatora telefonii komórkowej GSM. Istnieje bardzo wiele miejsc z brakiem tego zasięgu, co uniemożliwia wykonanie pomiarów RTN.

Mankamenty w postaci infrastruktury naziemnych stacji referencyjnych oraz ograniczonego zasięgu naziemnej transmisji danych referencyjnych zneutralizowała technika RTK PPP. O ile w Polsce jest nieco ponad 100 stacji systemu ASG-EUPOS, o tyle zbliżona liczba stacji referencyjnych jednej z wiodących na rynku RTK PPP firm, obejmuje zasięgiem prawie cały świat, z wyjątkiem rejonów o bardzo małej liczbie użytkowników, jako, że jest to rozwiązanie komercyjne. Pomiary RTK PPP można wykonać jednym odbiornikiem bez korzystania ze strumieni naziemnych danych referencyjnych, które zastąpiono danymi korekcyjnymi z satelitów geostacjonarnych.

3. Technika PPP: pomiary względne vs bezwzględne

Satelitarne techniki pomiarowe czasu rzeczywistego RTK i RTN wymagały odbioru przez odbiornik satelitarne wykonawcy robót geodezyjnych danych referencyjnych z dodatkowego, własnego odbiornika satelitarnego lub rozbudowanej infrastruktury w postaci sieci stacji referencyjnych. Z tego powodu te techniki pomiarowe należą do pomiarów względnych, gdyż pozycja odbiornika ruchomego wykonawcy była wyznaczana względem fizycznych lub wirtualnych stacji referencyjnych. W technice RTK PPP są wykonywane pomiary bezwzględne, tzn. wyznaczona pozycja nie jest odnoszona do współrzędnych żadnego punktu referencyjnego. Ma to istotny wpływ na postać równań obserwacyjnych i algorytm obliczeniowy. Równania dla obserwacji fazowych Φ i kodowych P wyrażają zależności [8]:

$$\Phi_i = \rho + c(dT - dt) + T - I_i + \lambda_i N_i + A_i - a_i + \frac{W_{\Phi} - w_{\Phi}}{\lambda_i} + B_{\Phi,i} - b_{\Phi,i} + M_{\Phi,i} + n_{\Phi,i} \quad (1)$$

$$P_i = \rho + c(dT - dt) + T + I_i + A_i - a_i + B_{P,i} - b_{P,i} + M_{P,i} + n_{P,i} \quad (2)$$

gdzie:

Φ_i - obserwacje fazy na częstotliwości „i” [m],

P_i - obserwacje pseudoodległości na częstotliwości „i”,

- ρ - odległość geometryczna między anteną odbiornika i satelity [m],
 c - prędkość światła [m/s],
 dT - błąd zegara satelity [s],
 dt - błąd zegara odbiornika [m],
 T - opóźnienie troposferyczne skośne [m],
 I_i - opóźnienie jonosferyczne dla częstotliwości „i” [m],
 λ_i - długość fali nośnej częstotliwości «i»,
 N_i - nieoznaczoność liczby cykli fali nośnej częstotliwości «i» [m],
 A_i - łączna wartość korekcji anteny odbiornika PCO i PCV [m],
 a_i - łączna wartość korekcji anteny satelity APC (PCO i PCV) [m],
 W_ϕ - efekt zjawiska „phase wind-up” anteny odbiornika [cykle],
 w_ϕ - efekt zjawiska „phase wind-up” anteny satelity [cykle],
 indeksy odpowiednio dla obserwacji fazy i pseudoodległości,
 $B_{\phi,r}, B_{p,i}$ - błąd systematyczny układów odbiornika dla częstotliwości „i” [m],
 $b_{\phi,r}, b_{p,i}$ - błąd systematyczny układów satelity dla częstotliwości «i» [m],
 $M_{\phi,r}, M_{p,i}$ - efekt wielotorowości dla częstotliwości «i» [m],
 $n_{\phi,r}, n_{p,i}$ - szum obserwacji i inne niemodelowane efekty [m].

W macierzy równań obserwacyjnych A występują cztery rodzaje estymowanych parametrów: współrzędne odbiornika (X, Y, Z), błąd zegara odbiornika dT , składowa mokra zenitalnego opóźnienia jonosferycznego T oraz nieoznaczoność cykli fali nośnej, która nie ma charakteru całkowitego w PPP. Natomiast parametrów, których dotyczą korekcje jest kilkanaście. Pozycjonowanie w czasie rzeczywistym wymaga zastosowania w technice RTK PPP rozszerzonego filtra Kalmana, który minimalizuje szum i umożliwia uzyskanie centymetrowych dokładności.

W pozycjonowaniu względnym powyższe równania fazy i pseudoodległości różnicuje się dwukrotnie, a nawet trzykrotnie, eliminując bądź istotnie ograniczając, wpływ wielu składników tych równań. W pomiarach bezwzględnych wszystkie istotne czynniki muszą być modelowane. Obliczone wartości korekcji muszą być odebrane przez odbiornik wykonawcy robót geodezyjnych, aby mógł on wyznaczyć pozycję z dokładnością pojedynczych centymetrów. Do transmisji danych korekcyjnych naziemnych centrów obliczeniowych wykorzystuje się łączność satelitarną z satelitami geostacjonarnymi. Aktualnie dane korekcyjne udostępniane są też przez łączność GSM. Transmisja danych z satelitów geostacjonarnych istotnie wpływa na poprawę dostępności sygnału dla odbiorników satelitarnych. Technika RTK PPP zakłada pozycjonowanie jednym odbiornikiem bez korzystania z danych referencyjnych, ale muszą być dostępne dane korekcyjne, które zostały przedstawione w kolejnym punkcie pracy. Algorytm obliczeniowy wykorzystuje niezróżnicowane obserwacje fazy odbiornika dwuczęstotliwościowego w tzw. równaniach „iono-free” (punkt 4).

Kluczowym mankamentem techniki RTK PPP jest relatywnie długi czas konwergencji potrzebny po włączeniu odbiornika do otrzymania rozwiązania o maksymalnej możliwej dokładności dla tej techniki. Źródła podają wartości zazwyczaj w przedziale 20 -40 minut.

Dość istotnym mankamentem techniki RTK PPP jest aktualnie jej koszt, kilkukrotnie wyższy niż dostęp do danych referencyjnych dla pomiarów RTK, czy RTN. Subskrypcja roczna serwisu SmartLink to koszt na poziomie 7000 PLN brutto. Koszt serwisu CenterPoint RTX można znaleźć na stronie firmy Trimble i wynosi dla Polski ok. 8500 PLN (2000 euro).

4. Korekcje w pomiarach PPP

Najistotniejszym atutem pomiarów względnych jest eliminowanie lub istotne redukcowanie znaczenia różnych czynników wpływających negatywnie na jakość rozwiązania, gdyż podstawowymi równaniami w algorytmie obliczeniowym są równania podwójnych różnic równań obserwacyjnych. W PPP algorytm obliczeniowy korzysta z nieróżnicowanych równań obserwacyjnych. Z tego powodu, aby uzyskiwać centymetrowe dokładności konieczne jest uwzględnianie modeli wielu efektów i czynników. W tabeli 1 zamieszczono 13 efektów w 4 grupach, które muszą być korygowane w pomiarach PPP wykonywanych odbiornikami dwuczęstotliwościowymi. W tabeli nie zamieszczano różnicowego opóźnienia grupowego, które jest korygowane tylko przy obserwacjach odbiornikami jednoczęstotliwościowymi, gdyż są one bardzo niskowym segmentem na rynku. Porównawczo zestawiono w tabeli także wymagania pomiarów RTK.

Tabela 1. Typy korekcji w pomiarach PPP i RTK

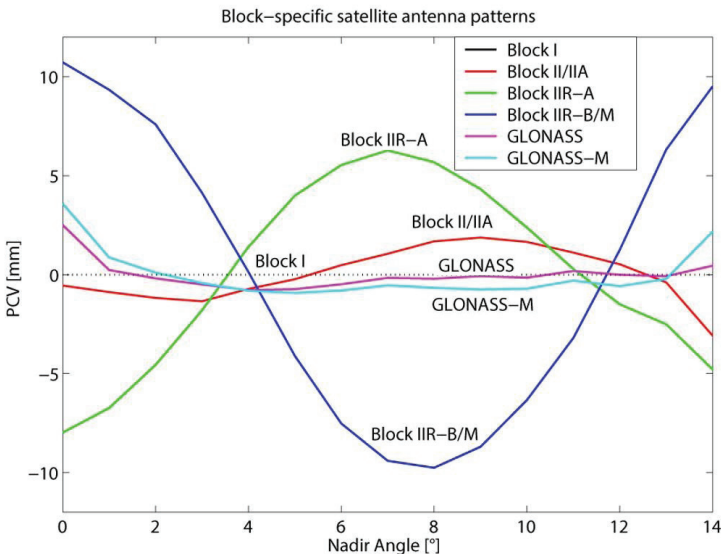
Typ korekcji		PPP	RTK
Satelity	Precyzyjne korekcje zegara satelity	+	-
	Precyzyjne korekcje orbity satelity	+	-
	Antenna Phase Center	+	+
	Poprawki z teorii względności	+	-
	Efekt „phase wind up”	+	-
Odbiornik	PCV i PCO anteny odbiornika GNSS	+	+
	Efekt „phase wind up”	+	-
Modele zjawisk geofizycznych	Pływy skorupy ziemskiej	+	-
	Pływy oceaniczne	+	-
	Ruch bieguna	+	-
	Ruchy płyt tektonicznych	+	-
Modele atmosfery	Opóźnienie jonosferyczne	+	-
	Opóźnienie troposferyczne	+	+

Precyzyjne korekcje zegarów i orbit satelitów są wyznaczane w post-processingu od bardzo wielu lat i coraz dokładniej przez naziemne centra obliczeniowe różnych organizacji. Produkt o finalnej jakości jest dostępny po ok. 2 tygodniach. Pojawienie się techniki RTK PPP wywarło nacisk na szybkie przeprowadzanie obliczeń i udostępnianie ich wyników w czasie rzeczywistym. Przygotowanie oferty komercyjnej dla techniki RTK PPP spowodowało, że dostawcy usług zaczęli wykonywać własne obliczenia w tym zakresie. Strumienie korekt dla orbit i zegarów satelitów są udostępniane co 5 sekund.

Efemerydy pokładowe satelitów są odniesione do centrów fazowych anten w układzie ECEF (Earth Centred - Earth Fixed) [3,13] i żadne dodatkowe korekcje nie są konieczne przy korzystaniu z depechy nawigacyjnej. Precyzyjne orbity i korekcje zegara są odniesione do środka ciężkości satelity, więc konieczne jest uwzględnienie offsetu z tego tytułu (Phase Center Offset). W istocie położenie centrum fazowego anteny satelity APC (Antenna Phase Centrum) definiowane jest dwoma rodzajami wielkości: stałym offsetem PCO (Phase Center Offset) i wzorcem zmian jego położenia w czasie PCV (Phase Center Variations). Wartości PCO uwzględniane są w kombinacji liniowej tzw. iono-free wg zależności:

$$\Delta_{APC} = \frac{f_1^2 \Delta_{APC_L1} - f_2^2 \Delta_{APC_L2}}{f_1^2 - f_2^2} \quad (3)$$

Zależność uwzględnia tylko wyrazy pierwszego rzędu, ale opisujące 99.9% wpływu jonosfery na sygnał satelitarny. Wartości offsetów przybierają znaczne wartości i są podawane w układzie związanym z satelitą, którego kierunki są definiowane za pośrednictwem wektorów jednostkowych (i, j, k). Wektor „k” ze środka ciężkości satelity jest skierowany do środka Ziemi, a wartości offsetu w tym kierunku wynoszą od 0.50 do 2.65 m dla amerykańskich satelitów NAVSTAR GPS oraz od 1.80 do 2.40 m dla satelitów rosyjskich GLONASS [17]. Wektor «j» jest iloczynem wektorowym wektora «k» i wektora jednostkowego z satelity do Słońca. Wektor «i» dopełnia układ prostokątny prawoskrętny. PCV anten satelitów są estymowane z analizy danych zbieranych przez naziemne stacje monitorujące satelity GNSS, bazując na wartościach parametrów kalibracyjnych PCV odbiornika. Z rys. 3 widać, że satelity amerykańskie mają bardziej zmienne położenie centrum fazowego w stosunku do rosyjskich. Wartości PCV satelitów NAVSTAR GPS sięgają 10 mm i w związku z tym muszą być uwzględniane w precyzyjnym pozycjonowaniu.



Rys. 3. PCV anten satelitów różnych bloków [17]

Organizacja IGS (International GNSS Service) udostępnia w czasie rzeczywistym strumienie danych korekcyjnych w ramach serwisu RTS (Real-time Service) z częstotliwością 5^s. Oficjalne produkty tego serwisu dotyczą tylko satelitów NAVSTAR GPS. W fazie eksperymentów jest włączenie rozwiązań dla innych konstelacji satelitów. Rozpoczęto od systemu GLONASS. W strumieniu danych RTCM transmitowanych jest dla pozycjonowania precyzyjnego cały szereg wiadomości dotyczący samych tylko efemeryd (tab. 2).

Tabela 2. Wiadomości formatu RTCM zawierające dane orbit i zegarów dla RTK PPP

RTCM	Typ wiadomości
1019	GPS Broadcast Ephemeris
1020	GLONASS Broadcast Ephemeris
1045	Galileo Broadcast Ephemeris
1057	GPS orbit corrections to Broadcast Ephemeris
1058	GPS clock corrections to Broadcast Ephemeris
1059	GPS code biases
1060	Combined orbit and clock corrections to GPS Broadcast Ephemeris
1061	GPS User Range Accuracy
1062	High-rate GPS clock corrections to Broadcast Ephemeris
1063	GLONASS orbit corrections to Broadcast Ephemeris
1064	GLONASS clock corrections to Broadcast Ephemeris
1065	GLONASS code biases
1066	Combined orbit and clock corrections to GLONASS Broadcast Ephemeris
1067	GLONASS User Range Accuracy
1068	High-rate GLONASS clock corrections to Broadcast Ephemeris

Efekt relatywistyczny związany z teorią względności nazywany jest opóźnieniem propagacji sygnału Shapiro i wprowadza korektę relatywistyczną do odległości geometrycznej. Wartość korekty nie przekracza 2 cm. Z powodu krzywizny czasoprzestrzeni wytworzonej przez pole grawitacyjne, odległość euklidesową satelita - odbiornik należy skorygować o wartość obliczoną ze wzoru [1]:

$$\Delta\rho = \frac{2\mu}{c^2} \ln \frac{\rho^s + \rho_o + \rho_o^s}{\rho^s + \rho_o - \rho_o^s} \quad (4)$$

gdzie:

ρ^s, ρ_o - odległości geocentryczne satelity „s” i odbiornika „o”,

ρ_o^s - odległość satelita - odbiornik,

μ - stała grawitacyjna,

$c = 299\,792\,458$ m/s - prędkość fali elektromagnetycznej.

Efekt zjawiska „zwijania fazy” (ang. phase wind-up) [15] dotyczy tylko obserwacji fazowych w precyzyjnych pomiarach i nie dotyczy obserwacji kodowych. Jest

wynikiem wzajemnej zmiany orientacji anten satelitarnych satelity i odbiornika dla fal spolaryzowanych kołowo (RHCP), spowodowanej obrotem anteny wokół swojej osi. W satelicie ruch ten wynika z konieczności zachowania orientacji paneli baterii słonecznych w kierunku Słońca. Efekt może osiągać wartość kilku centymetrów. W pomiarach względnych, nawet w algorytmach najbardziej zaawansowanych programów efekt zjawiska jest zanedbywany.

W przypadku sprzętu wykonawcy robót geodezyjnych, antena satelitarna jego zestawu pomiarowego również musi mieć wprowadzone korekcje w pomiarach RTK PPP. Analogicznie do anten satelitów będą się one składały ze stałego offsetu przestrzennego PCO i wzorca zmian położenia centrum fazowego PCV. Wartości tych wielkości mogą być wyznaczane jako absolutne, za pomocą specjalnego robota, lub jako względne w terenowej procedurze kalibracyjnej względem anteny referencyjnej. Organizacja IGS publikuje pliki z danymi kalibracyjnymi dla poszczególnych anten. Producenci odbiorników satelitarnych również wyznaczają wartości PCO i PCV wpisując je w oprogramowanie sprzętu pomiarowego.

Modele zjawisk geofizycznych w pozycjonowaniu względnym nie mają zazwyczaj istotnego znaczenia, zważywszy na długości wektorów, z którymi mamy do czynienia w praktyce. W technice PPP konieczne jest ich modelowanie ze względu na wyznaczanie pozycji pojedynczego punktu jednym odbiornikiem satelitarnym.

Skorupa ziemską jest de facto wystarczająco sprężysta, aby reagować na te same siły grawitacyjne, które generują pływy w oceanie. Okresowe przemieszczenia pionowe i poziome spowodowane przez pływy są reprezentowane przez lokalne parametry sprężystości Ziemi tzw. liczby Love h_{nm} oraz Shida l_{nm} , które są sferycznymi harmonicznymi stopnia i rzędu (n, m). Liczba Love dotyczy radialnego przemieszczenia pływowego, a liczba Shida przemieszczenia poprzecznego, które jest mniejsze o ok. rząd wielkości od przemieszczenia radialnego. Zakres wartości liczb Love i Shida wynosi $[0, 1]$. Interpretacja dla skrajnych wartości oznacza odpowiednio brak sprężystości (całkowita sztywność Ziemi) i całkowitą płynność. Dla dokładności na poziomie 5 mm konieczne jest uwzględnienie pływów tylko drugiego stopnia wykorzystując zależność [6]:

$$\Delta \vec{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM} \frac{r^4}{R_j^3} \left\{ [3l_2(\hat{R}_j \cdot \hat{r})] \hat{R}_j + \left[3 \left(\frac{h_2}{2} - l_2 \right) (\hat{R}_j \cdot \hat{r})^2 - \frac{h_2}{2} \right] \hat{r} \right\} + [-0.025m \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot \sin(\theta_g + \lambda)] \cdot \hat{r} \quad (5)$$

Dla dokładności na poziomie 1 mm należy zastosować formuły zawarte w [12].

Pływy oceaniczne są podobne do pływów skorupy ziemskiej, ale o prawie o rząd wielkości mniejsze. W pozycjonowaniu kinematycznym muszą być uwzględniane, ale także w statycznym na obszarach przybrzeżnych dla obserwacji istotnie krótszych niż dobowe. Uzyskanie dokładności pozycjonowania na poziomie centymetrowym wymaga zastosowania w obliczeniach globalnego modelu pływów oceanicznych FES (Finite Element Solution), który może wymagać wsparcia modelami lokalnymi. W funkcji umożliwiającej obliczenie wartości efektu zjawiska

występuje 11 fal pływowych oznaczanych przez $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, M_p, M_m, S_{sa}$. Zazwyczaj największe amplitudy ma fala M_2 i nie przekraczają one 5 cm w kierunku radialnym Ziemi i 2 cm w kierunkach poziomych.

Ruch bieguna, czyli zmiany położenia osi obrotu Ziemi w przestrzeni, są spowodowane drobnymi zmianami potencjału odśrodkowego Ziemi z tytułu przyciągania Słońca i Księżycy. Korzystając ze wspomnianych już liczb Love i Shida drugiego rzędu można sformułować zależności opisujące korekcje chwilowego położenia bieguna względem jego położenia średniego. Wartości dodatnie korekcji są skierowane na północ i wschód. [12]:

$$\Delta\varphi = -9 \cos 2\varphi [(X_p - \bar{X}_p) \cos \lambda - (Y_p - \bar{Y}_p) \sin \lambda] \quad (6)$$

$$\Delta\lambda = 9 \sin \varphi [(X_p - \bar{X}_p) \sin \lambda + (Y_p - \bar{Y}_p) \cos \lambda] \quad (7)$$

$$\Delta h = -33 \sin 2\varphi [(X_p - \bar{X}_p) \cos \lambda - (Y_p - \bar{Y}_p) \sin \lambda] \quad (8)$$

W przeciwieństwie do pływów skorupy ziemskiej i oceanicznych ruch bieguna nie ma okresu dobowego, a związany jest z oscylacjami Chandlera o okresie ok. 430 dni. Ponieważ ruch bieguna może osiągać do 0,8 sekundy łuku, maksymalne przesunięcia bieguna mogą osiągnąć około 25 mm dla wysokości i około 7 mm w kierunkach poziomych.

Pewna liczba poprawek wymienionych w tym punkcie wymaga pozycji Księżycy lub Słońca, które można uzyskać z łatwo dostępnych plików efermyd planetarnych, lub bardziej wygodnie z prostych formuł, ponieważ względna precyzja około 1/1000 jest wystarczająca do obliczenia korekcji z dokładnością do mm.

Konieczność stosowania modeli atmosfery związana jest z przechodzeniem sygnałów radiowych z satelitów przez warstwy o zupełnie różnej naturze, jonosferę i troposferę. W troposferze opóźnienie powodowane jest przez obecność gazów, w tym pary wodnej. W modelu troposfery wyróżnia się składnik mokry i suchy. Składnik mokry jest bardzo trudny do modelowania i dlatego jest jednym z wyznaczanych parametrów. Opóźnienie troposferyczne jest zdefiniowane wzorem [7]:

$$T = \int_{r_s}^{r_A} [n(r) - 1] \operatorname{cosec} \theta(r) dr + \left(\int_{r_s}^{r_A} \operatorname{cosec} \theta(r) dr - \int_{r_s}^{r_A} \operatorname{cosec} \varepsilon(r) dr \right) \quad (9)$$

gdzie

r_s – promień powierzchni Ziemi,

r_A – promień atmosfery neutralnej

θ, ε – kąt refrakcji oraz kąt geometryczny odnoszące się do wysokości horyzontalnej satelity.

W praktyce opóźnienie troposferyczne jest estymowane dla kierunku zenitalnego i przeliczane na dowolny inny kierunek. W kierunku zenit wzór przybierze formę:

$$T = \int_{r_s}^{r_A} [n(r) - 1] dr = 10^{-6} \int_{r_s}^{r_A} N(r) dr \quad (10)$$

Rozwiązanie całek wymaga znajomości wartości parametrów meteorologicznych wzdłuż całej drogi sygnału. Opóźnienie troposferyczne musi być więc modelowane. Ogólna zależność funkcyjna dla opóźnienia troposferycznego w kierunku do dowolnego satelity T_{mi}^p jest wyrażana jako iloczyn zenitalnego opóźnienia troposferycznego oraz funkcji odwzorowawczej μ . Zazwyczaj model wyszczególnia składnik suchy i mokry, traktując troposferę jako mieszaninę dwóch idealnych gazów:

$$T_m^p(t_m) = T_m(t_m) \cdot \mu_{m,dry}^p(E_m^p) + T_m(t_m) \cdot \mu_{m,wet}^p(E_m^p) \quad (11)$$

Funkcja odwzorowawcza wiąże opóźnienie zenitalne z opóźnieniem dla innej wysokości horyzontalnej. Uwzględnia ona zależność wartości opóźnienia troposferycznego od kierunku, z którego płynie sygnał. Taka funkcja zazwyczaj nie zależy od azymutu, ponieważ warstwy atmosfery są przyjmowane przez model jako sferyczne. Najprostszy model funkcji odwzorowawczej ma postać (E_m^p – wysokość horyzontalna satelity):

$$\mu_m^p(E_m^p) = \frac{1}{\sin E_m^p} \quad (12)$$

Wszystkie modele dążą do wyrażenia opóźnienia troposferycznego w postaci funkcji ciśnienia atmosferycznego p [mb], temperatury suchego powietrza [K] oraz cząstkowego ciśnienia pary wodnej e [mb]

$$T_{dry} \approx c_1 \frac{p}{T} \quad (13)$$

$$T_{wet} \approx c_2 \frac{e}{T} + c_3 \frac{e}{T^2} \quad (14)$$

Dokładność modeli troposfery obliczanych przez CODE (Center for Orbit Determination in Europe) oraz USNO (U.S. Naval Observatory) oszacowano w pracy [2] na 4 mm w stosunku do modeli otrzymywanych innymi technikami pomiarowymi (VLBI, DORIS, radiosondy i numeryczne modele pogody). Dokładność opracowania modelu troposfery na podstawie obserwacji GNSS oszacowano na 8 mm.

Z kolei w pracy z 2014 r. [5] precyzję lokalnego modelu troposfery estymowano w dwóch dniach eksperymentu na 1.42 cm i 1.05 cm. Natomiast dokładność wyznaczenia pozycji oszacowano odpowiednio na 9.2 cm i 10.1 cm po 20 minutach konwergencji.

Opóźnienie jonosferyczne jest funkcją gęstości elektronów. Jonosfera jest dla fal radiowych ośrodkiem dyspersyjnym tzn., że współczynnik załamania jest zależny od częstotliwości fali elektromagnetycznej. Modulacja fal może spowodować, że fazowy współczynnik załamania fali będzie mniejszy od jedności, co spowoduje, że prędkość fazowa będzie większa niż prędkość światła w próżni. Nie jest to w sprzeczności ze szczególną teorią względności, znaczy to tylko tyle, że długość fali sygnału w jonosferze jest większa niż w próżni. Rozwinięcie w szereg potęgowy współczynnika załamania w funkcji częstotliwości przy przyjęciu pionowo padającego sygnału i kulistego modelu atmosfery określa funkcja [4]:

$$n_{\phi} = 1 - \frac{f_p^2}{2f^2} \pm \frac{f_p^2 f_g |\cos \theta|}{f^3} - \frac{f_p^4}{8f^4} - \frac{f_p^2 f_g^2}{4f^4} (\sin^2 \theta + 2 \cos^2 \theta) \pm \dots \quad (15)$$

Grupowy współczynnik załamania wyraża wzór:

$$n_g = 1 + \frac{f_p^2}{2f^2} \mp \frac{f_p^2 f_g |\cos \theta|}{f^3} + \frac{3f_p^4}{8f^4} + \frac{3f_p^2 f_g^2}{4f^4} (\sin^2 \theta + 2 \cos^2 \theta) \mp \dots \quad (16)$$

Po zaniebaniu wyrazów wyższych rzędów otrzymamy dla fazy sygnału wzór [9]:

$$I_{m,L}^p = \int_s (n-1) ds \approx -\frac{40.3}{f^2} \int_s N_e ds = -\frac{40.3}{f^2} \text{TEC} \quad (17)$$

oraz analogiczny dla kodu

$$I_{m,P}^p = \int_s (n-1) ds \approx \frac{40.3}{f^2} \int_s N_e ds = \frac{40.3}{f^2} \text{TEC} \quad (18)$$

TEC (Total Electron Content) oznacza zawartość elektronów jonosfery w słupie o powierzchni 1 m^2 między odbiornikiem i satelitą w jednostkach [10^{16} elektronów / m^2]. Typowa wartość TEC wynosi $10^{16} \div 10^{19}$. Przyjęcie maksimum $\text{TEC} = 10^{18}$ [el/ m^2] i zmiana o 1.12% TEC powoduje zmianę jednego cyklu fali w L1 [9]. Wartość TEC jest zależna od wysokości horyzontalnej satelity. Im bliżej horyzontu jest satelita, tym dłuższa jest droga, którą sygnał przebiega przez jonosferę. Parametr VTEC wyznaczany jest w funkcji cyklu słonecznego, dobowych efektów jonosferycznych i szerokości geomagnetycznej. Należy także uwzględnić kąt nachylenia satelity oraz wysokość jonosfery. Do modelowania jonosfery wykorzystuje się wartość TEC dla kierunku pionowego VTEC. Relacja między tymi współczynnikami określona jest wzorem:

$$\text{TEC} = \text{SF} \cdot \text{VTEC} \quad (19)$$

gdzie: SF oznacza funkcję odwzorowawczą (slant factor), która w najprostszym przypadku jest odwrotnością sinusa kąta horyzontalnego satelity (w jednowarstwowym kulistym modelu jonosfery).

Podstawową techniką obliczeniową ograniczania wpływu refrakcji jonosferycznej są wspomniane już równania typu „iono-free”. Z tego powodu odbiorniki dwuczęstotliwościowe mają istotną przewagę nad jednoczęstotliwościowymi, które muszą bazować wyłącznie na modelach trudnej do matematycznego opisanie jonosfery. Jonosfera ma zakłócenia o różnej charakterystyce. Z punktu widzenia RTK PPP istotne są scyntylacje jonosferyczne, czyli szybkie zmiany parametrów sygnałów radiowych (amplitudy, fazy, kąta odbioru i polaryzacji) spowodowane nieregularną aktywnością plazmy jonosferycznej w małych obszarach, nie poddającą się predykcji. Do opisu intensywności tego zjawiska stosowany jest indeks amplitudy scyntylacji S_4 oraz fazy scyntylacji σ_ϕ . Wartość indeksu jest obliczana przez uśrednianie w interwałach minutowych i przyjmuje się, że wartość > 0.3 oznacza słabe scyntylacje, a powyżej 0.6 silne.

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle SI^2 \rangle - \langle SI \rangle^2}{\langle SI \rangle^2} - \frac{100}{S/N_0} \left[1 + \frac{500}{19S/N_0} \right]} \quad (20)$$

$$\sigma = \sqrt{\langle \Phi^2 \rangle - \langle \Phi \rangle^2} \quad (21)$$

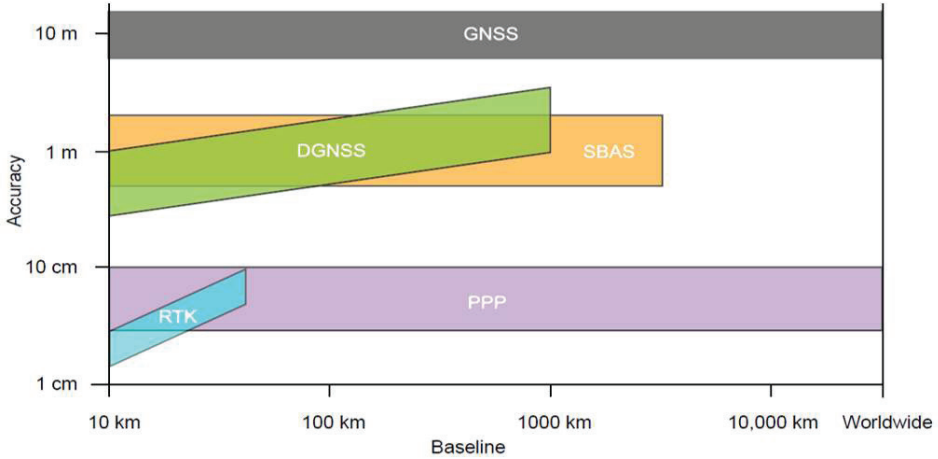
Większość wpływów zjawisk opisanych powyżej jest zaniedbywalna w pomiarach względnych i dla wektorów do 100 km. W technice RTK PPP musi być uwzględniana.

5. Wyniki pomiarów RTK PPP

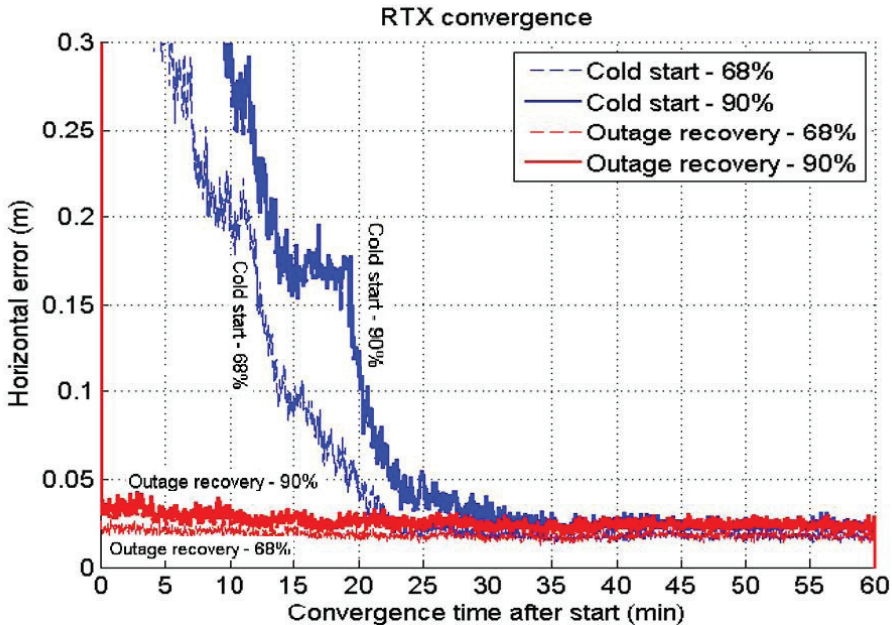
Rozwiązania oferowane komercyjnie dla pomiarów RTK PPP posiadają swoje własne nazwy handlowe, pod którymi często kryje się już rozwiązanie hybrydowe, co może być mylące dla użytkowników w kontekście dokładności rozwiązania RTK PPP. Ideą producentów jest produkt dający wynik najwszechstronniej najkorzystniejszy dla użytkownika. Algorytm w odbiorniku dobiera najlepsze z możliwych w danej chwili rozwiązań - RTK, RTN lub RTK PPP. Rysunek 4 przedstawia porównanie dokładności różnych technik pomiarów satelitarnych w funkcji odległości między odbiornikiem użytkownika a referencyjnymi. Wynika z niego, że technika PPP daje dość stabilne dokładnościowo rozwiązanie na poziomie do decymetra niezależnie od lokalizacji odbiornika na lub nad Ziemią. Można wnioskować, że pod względem dokładności jest równorzędna dla pomiarów RTK przy długościach wektorów od 10 km do ok. 70 km.

Rysunek 4 nie obejmuje czasu pomiaru. W przypadku pomiarów RTK/RTN inicjalizacja trwa zazwyczaj do kilkudziesięciu sekund, a częstotliwość kolejnych pomiarów zależy od taktowania odbiornika i aktualnie może sięgać praktycznie do 20 Hz. Dla pomiarów RTK PPP czas konwergencji, czyli czas potrzebny po włączeniu odbiornika do uzyskania maksymalnej możliwej dla techniki RTK PPP dokładności wynosi przeciętnie 20'-40'. Kolejne pomiary trwają ok. minuty. Produ-

cent jednego z wiodących na rynku rozwiązań o nazwie CenterPoint RTX przedstawił wyniki (rys. 5) przeprowadzonych przez siebie testów w USA [8]. Linie czerwone dotyczą procentowego udziału rozwiązań odbiornika pracującego bez przerwy w przedziale dokładności na poziomie błędu średniego oraz zawierającego 90% rozwiązań. Linie niebieskie analogicznie dla odbiornika, któremu wyłączano wszystkie sygnały satelitarne co godzinę na 3 minuty. Maksymalną dokładność odbiornik uzyskiwał po ok 25 < - 35>. Można ją oszacować na podstawie rysunku na ok. 2 – 3 cm. W pracy podano, że dla 95% wyników błąd pozycji poziomej wyniósł 2.4 cm, a dla wysokości 4.4 cm.



Rys. 4. Porównanie dokładności satelitarnych technik pomiarowych w funkcji ich zasięgu [11]

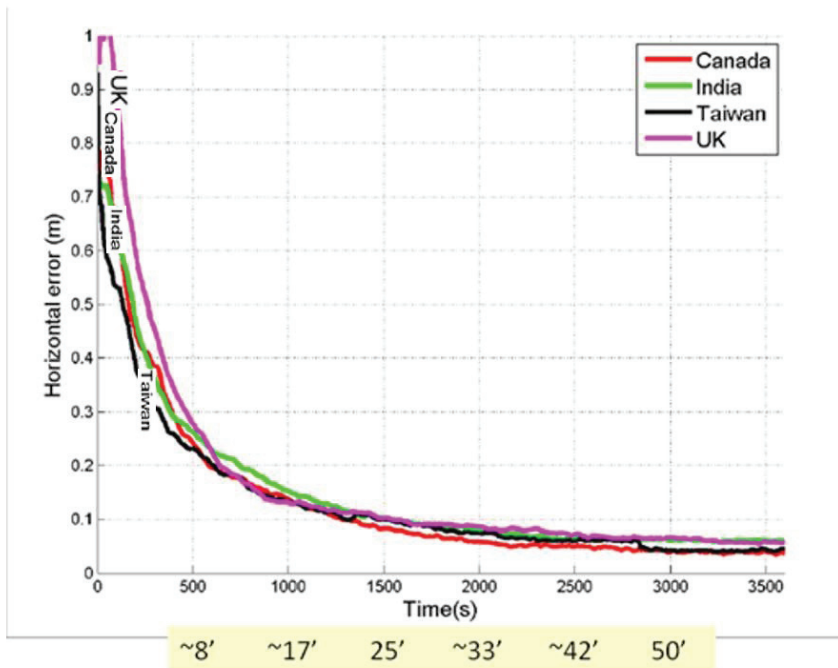


Rys. 5. Konwergencja w pomiarach PPP [8]

Wyniki testów innej firmy funkcjonującej na rynku techniki RTK PPP przedstawia rys. 6 [11]. W tych testach pomiary wykonano w kilku bardzo różnych lokalizacjach, gdyż starano się zbadać wpływ zróżnicowanej aktywności jonosfery na wyniki trzydniowych pomiarów i czas konwergencji. Czasy konwergencji wyniosły odpowiednio: Kanada - 22>, Indie - 25>, Taiwan - 24>, Wielka Brytania - 26>. Z wykresu można wnioskować, że błąd pozycji poziomej osiągnął wartość ok. 1 cm po ok. 25>. Wyniki testów wskazały, że włączenie w rozwiązanie satelitów systemu GLONASS zmniejsza błąd średni kwadratowy dla pozycji poziomej o ok. 1 cm, a dla wysokości istotniej o ok. 2 cm. Dość istotne jest również skrócenie czasu konwergencji. W Kanadzie korzystając tylko z systemu GPS błąd poziomy pozycji rzędu decymetra osiągnano po ok. godzinie, a włączając w rozwiązanie satelity systemu GLONASS już po 20>. Proporcja trzykrotnego skrócenia czasu konwergencji wystąpiła także dla pomiarów w Indiach. Wartości błędów **średnich kwadratowych** przytoczono w tabeli 3. Korekcje były transmitowane z satelity TerraStar-C. W pracy porównano czas konwergencji przy odbiorze danych korekcyjnych z satelity TerraStar-C oraz OmniStar G2, nie odnotowując bardzo istotnych różnic.

Tabela 3. Wartości błędów średnich kwadratowych pozycji wyznaczonych RTK PPP w {cm}

System	błąd pozycji poziomej		błąd wysokości	
	Kanada	Indie	Kanada	Indie
GPS/GLONASS	3.3	5.3	4.9	7.6
GPS	4.4	6.4	6.5	9.7



Rys. 6. Czas konwergencji dla pomiarów w różnych regionach w funkcji błędu poziomego punktu [11]

6. Podsumowanie

Praktyczna dostępność techniki RTK PPP w Polsce pojawiła się relatywnie niedawno. Jest to technika mająca konkurować z pomiarami RTN/RTK. Nie zyskała ona jeszcze szerszej popularności. Podstawowe mankamenty to cena subskrypcji, która jest kilkukrotnie wyższa niż dostęp do serwisu RTN/RTK, długi czas pomiaru pierwszego punktu po włączeniu odbiornika, sięgający kilkudziesięciu minut i dłuższy czas pomiaru kolejnych punktów. W pomiarach RTN/RTK pierwszy punkt można pomierzyć zazwyczaj szybciej niż po upływie minuty od włączenia odbiornika. Do innych istotnych czynników wpływających na brak większej popularności RTK PPP w Polsce jest funkcjonowanie aż 5 systemów naziemnych stacji referencyjnych, w tym 4 o zasięgu ogólnokrajowym. Remisowo dla pomiarów RTN/RTK i RTK PPP wypada praktycznie koszt sprzętu. W obydwu przypadkach wykonawca potrzebuje jednego odbiornika. Aktualnie dokładność wyników pomiarów RTK PPP często będzie niższa niż pomiarów RTN/RTK. Relatywnie pewną wartością jest błąd poniżej 10 cm. Obecnie wydaje się, że błąd pozycji poziomej powinien zawierać się najczęściej w przedziale 3 – 5 cm. Wyniki testów producentów wskazują na możliwość uzyskania lepszej dokładności. Potwierdzenie takiej tezy wymaga niezależnych pomiarów testowych. Atutem techniki RTK PPP jest możliwość wykonywania pomiarów w miejscach, w których nie ma zasięgu operatora telefonii komórkowej. Możliwa jest taka organizacja pracy w terenie, aby minimalizować odczuwalność długiego czasu konwergencji pierwszego pomiaru. Rozwój technik pomiarowych wskazuje, że pomiary RTK PPP mogą być interesującym rozwiązaniem dla wykonawców w przyszłości, szczególnie w przypadku istotnego obniżenia kosztów korzystania z serwisu. Aktualnie dostawcy serwisów RTK PPP udostępniają rozwiązania hybrydowe, łączące prawie niedostrzegalnie dla wykonawcy robót pomiary RTK, RTN i RTK PPP w jedno uzupełniające się, funkcjonalne rozwiązanie.

Praca wykonana w ramach badań statutowych, umowa nr 11.11.150.005

Bibliografia

- [1] Ashby, N., Relativity in the Global Positioning System. Living Rev. Relativity, 6, 2003.
- [2] Ding W., Teferle N., Kazmierski K., Laurichesse D., Yuan Y., An evaluation of real-time troposphere estimation based on GNSS precise point positioning: Real-time GNSS troposphere estimation. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 10.1002/2016JD025727. 2017.
- [3] Department of Defence USA, Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard, 1995.

- [4] Gannniou M.: Genauigkeitssteigerung bei kurzzeit-statischen und kinematischen Satellitenmessungen bis hin zur Echtzeitanwendung. DGK Reihe C, Nr 458, München, 1996
- [5] Junbo S., Chaoqian X., Jiming G., Yang G., Local troposphere augmentation for real-time precise point positioning. *Earth Planets and Space*. 10.1186/1880-5981-66-30, 2014.
- [6] Kouba J., A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products. 2009.
- [7] Langley R.B., Propagation of the GPS Signals. *Lecture Notes in Earth Sciences*, Nr 60, s.103 – 140, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1996.
- [8] Leandro R., Landau H., Nitschke M., Glocker M., Seeger S., Chen X., Deking A., BenTahar M., Zhang F., Ferguson K., Stolz R., Talbot N., Lu G., Allison T., Brandl M., Gomez V., Cao W., Kipka A., RTX Positioning: The Next Generation of cm-accurate Real-Time GNSS Positioning. *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation*, 2011.
- [9] Leick A., GPS Satellite Surveying. John Wiley & Sons, New York – Chichester – Toronto – Brisbane – Singapore, 1995.
- [10] Lingxi L., Donghe Z., Ziming Z., Jia Z., Xiaoyan H., Zhen J., Yongqiang H., A dataset of ionospheric TEC and scintillation index from the Peking University station (2012). *China Scientific Data* Vol. 1, No. 3, 20161. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P. R. China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, P. R. China *e-mail: mzou@nssc.ac.cn.
- [11] NovAtel, Precise Positioning with NovAtel CORRECT Including Performance Analysis. NovAtel White Paper, April 2015
- [12] Petit G., Luzum B.: IERS Conventions. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie Frankfurt am Main. 2010
- [13] Russian Institute of Space Device Engineering: ICD GLONASS CDMA General Edition, 2016
- [14] Uznański A., Ocena przydatności techniki RTK GPS w zastosowaniach inżynierskich. Rozprawa doktorska, Kraków 1999.
- [15] Wu, J., Wu, S., Hajj, G., Bertiguer, W. Lichten, S., Effects of Antenna Orientation on GPS Carrier Phase Measurements. *Manuscripta Geodetica*, 18, 1993.
- [16] Zumberge J. F., Heflin M. B., Jefferson D. C., Watkins M. M., and Webb F. H., Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research*, 102, 1997.
- [17] http://www.aiub.unibe.ch/research/code_analysis_center/satellite_antenna_phase_center_variations/index_eng.html
- [18] http://www.asgeupos.pl/index.php?wpg_type=syst_descr&sub=ref_st
- [19] <http://www.igs.org/products>

-
- [20] <https://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/smart-antennas/leica-viva-gs16/life-beyond-traditional-rtk-satellite-based-precise-point-positioning>
- [21] <https://www.trimble.com/positioning-services/centerpoint-RTX.aspx>