

Analiza porównawcza metod sieciowych satelitarnych pomiarów kinematycznych czasu rzeczywistego

Andrzej Uznański 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Kraków

Streszczenie: Sieciowe satelitarne pomiary kinematyczne czasu rzeczywistego NRTK są aktualnie najchętniej wykorzystywaną techniką pomiarową w geodezji z racji bezkonkurencyjnej efektywności i satysfakcjonującej dokładności wyników pomiarów w szerokim spektrum zastosowań geodezyjnych. W pracy poddano analizie porównawczej wszystkie metody pozycjonowania satelitarnego w sieciowych pomiarach kinematycznych czasu rzeczywistego NRTK: VRS, FKP i MAC. Przedstawiono ideę obliczania danych referencyjnych każdej z metod, akcentując różnice w stosunku do pozostałych. Wpływ różnic wynikających z podstaw teoretycznych i algorytmów obliczeniowych na wyniki pomiarów poddano weryfikacji praktycznej, analizując wyniki pomiarów testowych. Wnioski sformułowano na podstawie 3345 pomiarów współrzędnych punktu bazy testowej wykonanych w ciągu 5 dni.

Słowa kluczowe: RTK, NRTK, RTN, VRS, FKP, MAC

COMPARATIVE ANALYSIS OF NETWORK METHODS OF SATELLITE REAL-TIME KINEMATIC MEASUREMENTS

Abstract: Network satellite kinematic real-time measurements NRTK are currently the most frequently used measurement technique in geodesy due to unrivaled efficiency and satisfactory accuracy of measurement results in a wide range of geodetic applications. The paper presents a comparative analysis of all satellite positioning methods with satellite real-time kinematic network measurements: VRS, FKP and MAC. The idea of calculating the reference data of each method was presented, emphasizing the difference in relation to the others. The impact of differences resulting from the theoretical basis and calculation algorithms on the measurement results was subjected to practical verification by analyzing the results of test measurements. Conclusions were formulated on the basis of 3345 measurements of the coordinates of the test base point made over 5 days.

Keywords: RTK, NRTK, RTN, VRS, FKP, MAC

https://doi.org/10.7494/978-83-67427-37-1_10

1. Wstęp

Wyznaczanie współrzędnych z wykorzystaniem satelitarnych technik pomiarowych w geodezji rozwija się intensywnie od kilku dekad, a swój początek miało w nawigacji. Aktualnie pozycja nawigacyjna odbiornika satelitarnego charakteryzuje się przeciętną dokładnością na poziomie pojedynczych metrów, ale możliwe są wahania w zakresie nawet kilkunastu metrów. Pozycjonowanie satelitarne w geodezji może osiągnąć dokładność pojedynczych milimetrów. Zważywszy, że satelity nawigacyjne poruszają się po orbitach MEO (*Medium Earth Orbit*), czyli w odległościach rzędu 20 000 km od powierzchni Ziemi, można uznać to za ogromne osiągnięcie techniczne. Wyznaczanie współrzędnych punktów w geodezji technikami satelitarnymi obecnie realizowane jest najczęściej jedną z dwóch metod:

- statyczną,
- sieciową kinematyczną czasu rzeczywistego.

Pomiary statyczne są czasochłonne, wymagają zastosowania kilku zestawów pomiarowych, ale umożliwiają osiąganie najwyższych dokładności spośród wszystkich satelitarnych technik pomiarowych i są wykorzystywane do wyznaczania dokładnych współrzędnych punktów osnów geodezyjnych. Z kolei sieciowe pomiary kinematyczne czasu rzeczywistego NRTK (*Network Real Time Kinematic*) są bardzo ekonomiczną metodą pomiarową, za pomocą której pomiar można wykonać jednym odbiornikiem w kilka sekund i chociaż ustępują pod względem dokładności pomiarom statycznym, to pozycjonowanie z dokładnością rzędu do 3 cm dla współrzędnych poziomych i do 5 cm dla wysokości jest satysfakcjonujące w praktyce dla bardzo szerokiego spektrum pomiarów geodezyjnych. Taki poziom dokładności pozycjonowania satelitarnego NRTK podawany jest na stronach właścicieli sieci stacji referencyjnych: ASG-EUPOS¹, sieci regionalnej NadowskiNET², komercyjnych sieci ogólnopolskich VRSNet.pl³ i TPINETpro⁴. W sytuacji gdy zależy nam na szybkim pomiarze z szansą na nieco większą dokładność, od 5 mm do 2 cm (Uznański 2009), można zastosować kinematyczne pomiary satelitarne czasu rzeczywistego RTK (*Real Time Kinematic*). Wymagają one jednak dwóch zestawów pomiarowych, z których jeden pełni funkcję referencyjną. Z tego powodu w praktyce geodezyjnej najchętniej wykorzystywane są sieciowe kinematyczne pomiary czasu rzeczywistego NRTK.

¹ https://www.asgeupos.pl/index.php?wpg_type=serv&sub=gen [dostęp: 15.06.2023].

² <http://nadowski.pl/nadowski-net/czym-nadowski-net/> [dostęp: 15.06.2023].

³ http://vrsnet.pl/uslugi_dokladosci.html [dostęp: 15.06.2023].

⁴ <https://tpinet.pl/opis-systemu> [dostęp: 15.06.2023].

2. Pomiary RTK i NRTK

Metoda kinematycznych pomiarów satelitarnych czasu rzeczywistego RTK została opracowana, aby umożliwić geodezyjne pomiary realizacyjne, gdyż metoda statyczna nadaje się tylko do pomiarów inwentaryzacyjnych (Fotopoulos i Cannon 2001). Ideę realizacji pomiarów RTK zaczerpnięto z metody DGPS (*Differential Global Positioning System*), która umożliwia pozycjonowanie generalnie z dokładnością submetrową. W pomiarach RTK udało się osiągnąć średnią dokładność pozycjonowania od 1 cm do 2 cm dzięki dwóm kluczowym zmianom: wykorzystaniu obserwacji fazy sygnałów satelitarnych i dzięki zastosowaniu algorytmu wykorzystującego filtr Kalmana, który umożliwia opracowanie danych zmieniających się dynamicznie. Sama idea pomiarów RTK polega w istocie na wyznaczeniu pozycji jednego zestawu pomiarowego, tzw. odbiornika ruchomego ROV (*ROVer*), względem drugiego zestawu pomiarowego, tzw. stacji referencyjnej lub bazowej, której antena satelitarna jest ustawiona nad punktem osnowy geodezyjnej. Wykonanie obliczeń pozycji anteny satelitarnej odbiornika ruchomego w czasie rzeczywistym jest możliwe dzięki wykorzystaniu modemów UHF w każdym zestawie pomiarowym. Modem UHF stacji referencyjnej transmituje dane referencyjne, które odbiera i przetwarza wraz z własnymi obserwacjami satelitarnymi na swoją pozycję odbiornik ruchomy. Dane referencyjne transmitowane przez odbiornik referencyjny to współrzędne punktu osnowy geodezyjnej, nad którym ustawiona została jego antena satelitarna, oraz obserwacje kodu i fazy sygnałów satelitarnych odebranych przez odbiornik referencyjny lub korekcje tych obserwacji. Podstawowym problemem, który pojawił się w tej metodzie pomiarowej, był spadek dokładności obliczenia pozycji odbiornika ruchomego wraz ze wzrostem jego odległości od stacji referencyjnej. Głównymi przyczynami były wpływ refrakcji jonosferycznej i troposferycznej oraz błędy orbit satelitów nawigacyjnych. Ograniczeniem dla dokładnego i niezawodnego pozycjonowania satelitarnego okazała się odległość między odbiornikami rzędu kilkunastu kilometrów, przy czym wartość ta zależy od warunków realizacji pomiarów, zarówno atmosferycznych (wpływ jonosfery i troposfery), jak i topograficznych (przesłonięcia horyzontu wokół odbiornika satelitarnego i obiekty odbijające fale elektromagnetyczne). Maksymalna odległość między stacją referencyjną i odbiornikiem ruchomym była dość istotnym ograniczeniem w praktyce. Rozpoczęto więc prace nad opracowaniem metody pomiarowej o dokładności równorzędnej dokładności pomiarów RTK, ale przy odległościach między stacją referencyjną a odbiornikiem ruchomym rzędu kilkudziesięciu kilometrów. Odległości te najczęściej wahają się w przedziale 70–100 km, ale są zależne od aktywności jonosfery na danym obszarze i mogą być krótsze. Takie odległości pozwalały już myśleć o ekonomicznej budowie naziemnych sieci stacji referencyjnych, od których nowo powstała metoda przyjęła swoją nazwę, jako sieciowe kinematyczne

pomiary czasu rzeczywistego Network RTK (Rizos 2002) lub RTN (*Real Time Network*). Formalnie prace nad Network RTK zapoczątkowało powołanie w 1993 roku specjalnej grupy roboczej przez IAG (International Association of Geodesy). Efektem niezależnie prowadzonych prac było opracowanie trzech metod pomiarów NRTK, w kolejności chronologicznej:

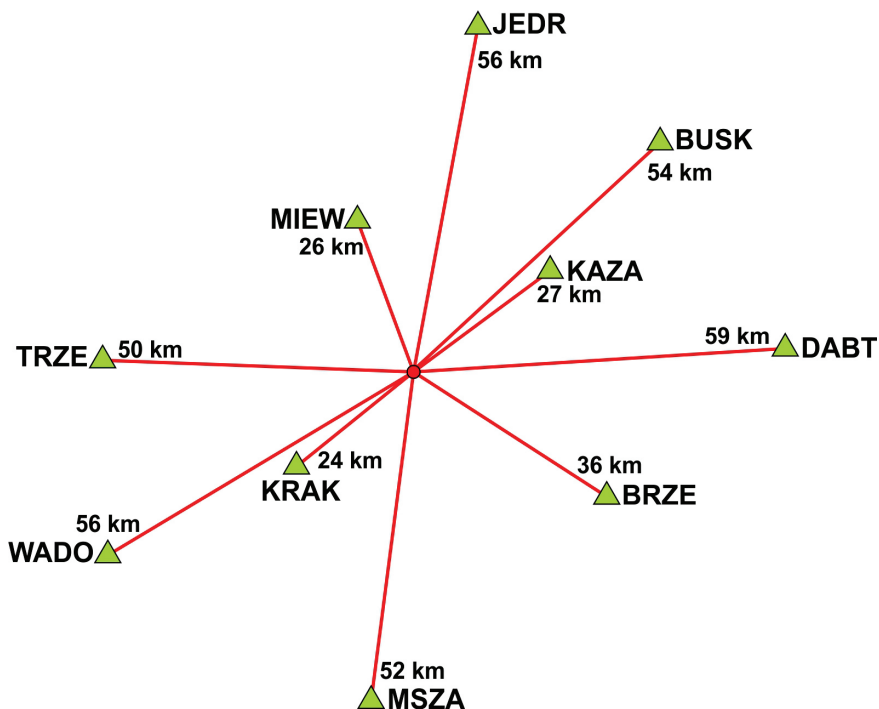
- VRS (*Virtual Reference Station*), czyli wirtualna stacja referencyjna firmy Terrasat GmbH H. Landau (Landau i in. 2002, Vollath i in. 2002, Wanninger 2002, Schrock 2010); metoda wdrożona przez firmę Trimble, amerykańskiego producenta geodezyjnych instrumentów pomiarowych;
- FKP (*Flächen Korrektur Parameter*), czyli parametry korekcji powierzchniowej; metoda opracowana przez firmę Geo++ GmbH G. Wübben, a wdrażana przez firmę Leica AG, szwajcarskiego producenta geodezyjnych instrumentów pomiarowych (Wübbena i in. 1996, 2001, 2002);
- MAC (*Master Auxiliary Concept*), czyli koncepcja stacji pomocniczych opracowana i wdrażana przez firmę Leica AG (Euler i in. 2001, Brown i in. 2006).

Każda z tych metod wymaga istnienia naziemnej sieci stacji referencyjnych. W Polsce do dziś powstało sześć niezależnych sieci stacji referencyjnych – jedna państwowa utworzona przez GUGiK (ASG-EUPOS), pozostałe prywatne, założone przez sprzedawców instrumentów geodezyjnych: Leica (SmartNet), Instrumenty Geodezyjne Tadeusz Nadowski sp. j. (sieć regionalna NadowskiNET), spółkę firmy Geotronics (VRSNet.pl), TPI (TPINetPro) oraz sprzedawcę chińskich odbiorników satelitarnych Art-Geo (najmłodsza sieć RtkNet). Poglądową lokalizację stacji referencyjnych sieci NadowskiNET w promieniu do 60 km od miejsca pomiarów przedstawiono na rysunku 1 wraz z podaniem odległości do nich w kilometrach.

We wszystkich metodach NRTK wykorzystuje się algorytmy interpolacyjne do obliczania danych referencyjnych. Jest to podstawowy krok w algorytmie generowania danych referencyjnych dla odbiornika ruchomego, w którym są interpolowane błędy zależne od odległości między stacją referencyjną a odbiornikiem ruchomym. W pomiarach NRTK wykorzystuje się różne metody interpolacyjne, do których należą m.in. (Dai i in. 2001, Wei i in. 2006): model kombinacji liniowej, metoda interpolacji liniowej, metoda interpolacji liniowej opartej na odległościach, model powierzchni niższego rzędu oraz kolokacja metodą najmniejszych kwadratów.

Łączność między centrum zarządzającym daną siecią stacji referencyjnych a odbiornikami ruchomymi użytkowników zrealizowana została za pośrednictwem protokołu Ntrip (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) (RTCM 2004, 2011). W pomiarach RTK komunikacja radiowa jest jednokierunkowa, tzn. stacja referencyjna nadaje, a odbiornik ruchomy odbiera. W pomiarach NRTK komunikacja musi być w praktyce dwukierunkowa, niezależnie od teorii metody pomiarowej. Otrzymanie danych referencyjnych przez odbiornik ruchomy musi być poprzedzone przesłaniem

przez niego jego współrzędnych nawigacyjnych, które każdy odbiornik satelitarny może wyznaczyć autonomicznie. Połączenie odbiornika ruchomego z casterem protokołu Ntrip (Lenz 2004) może zostać zrealizowane przez dowolną usługę transmisji danych sieci komórkowej, wystarczająca jest nawet usługa GPRS. Do łączności na tym etapie wykorzystywany jest protokół NMEA (National Marine Electronics Association), a współrzędne nawigacyjne są przesyłane w wiadomości GGA (*Global Positioning System Fix Dat*) tego protokołu. Dzięki znajomości lokalizacji odbiornika ruchomego oprogramowanie serwera w centrum zarządzającym daną siecią może wybrać kilka najbliższych mu stacji referencyjnych sieci, z których obserwacje są wykorzystywane do interpolacji błędów zależnych od odległości. Teoretyczna minimalna liczba stacji referencyjnych w metodach NRTK wynosi 3, ale w praktyce wykorzystywane są dane z większej liczby stacji referencyjnych. W metodzie MAC najczęściej liczba wykorzystanych stacji waha się między 5 a 7, a zależy od lokalizacji stacji referencyjnych danej sieci względem aktualnej pozycji odbiornika ruchomego. Możliwość ustalenia liczby stacji biorących udział w rozwiązaniu sieciowym zapewnił utworzony szczegółowy plik szablonu raportu z kontrolera CS20. W przypadku metod VRS i FKP odbiornik nie ma informacji o liczbie stacji referencyjnych biorących udział w rozwiązaniu, raport zawsze podaje jedną stację, do której odnoszą się dane referencyjne.



Rys. 1. Lokalizacje stacji referencyjnych sieci NadowskiNET w promieniu do 60 km od miejsca pomiarów testowych

3. Metoda VRS

Opracowywane metody pomiarów NRTK miały niwelować podstawowy mankament pomiarów RTK, czyli spadek dokładności pozycjonowania wraz ze zwiększaniem się odległości odbiornika ruchomego od stacji referencyjnej. Zasadę działania metody wirtualnej stacji referencyjnej VRS można zwięźle przedstawić jako zastąpienie odległej fizycznej stacji referencyjnej w pomiarach RTK bliską odbiornikowi ruchomemu wirtualną stacją referencyjną. W ten sposób jest eliminowany problem spadku dokładności pozycjonowania spowodowany dużą odległością odbiornika ruchomego ROV od stacji referencyjnej (REF). Lokalizacja tej stacji wirtualnej jest ustalana na podstawie rozwiązania nawigacyjnego odbiornika ruchomego. Swoje współrzędne nawigacyjne odbiornik ruchomy przesyła w wiadomości GGA protokołu NMEA do centrum zarządzającego (CZ) daną siecią stacji referencyjnych i są one przyjmowane przez oprogramowanie serwera CZ, jako współrzędne wirtualnej stacji referencyjnej. Niestety współrzędne nawigacyjne przesłane protokołem NMEA różnią się od współrzędnych z rozwiązania RTK w zakresie od zaledwie kilku decymetrów do kilku metrów. W wykonanych pomiarach odległość VRS – odbiornik ruchomy nie przekraczała 10 m.

Tak drastyczne skrócenie odległości między REF i ROV skutkuje silną korelacją błędów. Opracowano więc rozwiązanie o nazwie PRS (*Pseudo Reference Station*), w którym przyjmuje się lokalizację stacji referencyjnej w odległości 2–5 km od pozycji odbiornika ruchomego. Oprogramowanie serwera centrum zarządzającego daną siecią stacji referencyjnych, odbierając współrzędne nawigacyjne odbiornika ROV, selekcjonuje kilka najbliższych mu stacji referencyjnych sieci (teoretyczne minimum to trzy stacje REF) tak, aby odbiornik ROV znalazł się między nimi i możliwa była interpolacja obserwacji wirtualnych, czyli takich, które zarejestrowałby odbiornik fizyczny, gdyby znajdował się w lokalizacji określonej współrzędnymi z wiadomości GGA protokołu NMEA odbiornika ROV. Z zasady działania metody VRS wynika, że dla każdego żądania danych referencyjnych przez odbiornik ruchomy muszą być one wygenerowane dla niego indywidualnie, gdyż dane referencyjne związane są z przesłanymi współrzędnymi nawigacyjnymi odbiornika ROV. W związku z tym liczba użytkowników sieci wpływa na obciążenie serwera tej sieci. W aspekcie algorytmu obliczeniowego mamy do czynienia nadal z rozwiązaniem analogicznym do RTK, czyli rozwiązaniem pojedynczego wektora w odniesieniu do jednej stacji referencyjnej (*single baseline method*) (Leica Geosystems 2005, Kim i Langley 2008, Paziewski i Wielgosz 2013). W efekcie nie są wymagane zmiany w oprogramowaniu odbiorników satelitarnych w stosunku do metody RTK. Błędy zależne od odległości obliczane są dla każdej pary satelitów i dla każdej pary stacja główna (*master station*, czyli stacja referencyjna najbliższa odbiornikowi ruchomemu) – stacja referencyjna sieci. Wygenerowanie obserwacji wirtualnych

następuje według określonego schematu (Wei i in. 2006). Na podstawie współrzędnych satelitów i współrzędnych wirtualnej stacji referencyjnej VRS obliczane są odległości ρ między satelitami i VRS, podobnie między MS (najbliższa fizyczna stacja referencyjna) i satelitami:

$$\Delta\rho_{VRS-MS}^j = \rho_{MS}^j - \rho_{VRS}^j \quad (1)$$

Równanie pojedynczej różnicy (*single difference*) obserwacji fazy Φ dla MS ma postać (i dotyczy dwóch satelitów o indeksach i, j):

$$\Delta\Phi_{MS}^{i,j} = \frac{1}{\lambda} \left(\Delta\rho_{MS}^{i,j} - \Delta I_{MS}^{i,j} + \Delta T_{MS}^{i,j} \right) - \Delta N_{MS}^{i,j} \quad (2)$$

gdzie

λ – długość fali sygnału satelitarnego,

I – refrakcja jonosferyczna,

T – refrakcja troposferyczna,

N – nieoznaczoność pomiarów fazowych,

Δ – różnica wartości obliczona na podstawie obserwacji satelitów o indeksach i oraz j .

Analogicznie powstaje równanie dla VRS:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{VRS}^{i,j} &= \frac{1}{\lambda} \left(\Delta\rho_{VRS}^{i,j} - \Delta I_{VRS}^{i,j} + \Delta T_{VRS}^{i,j} \right) - \Delta N_{VRS}^{i,j} = \\ &= \frac{1}{\lambda} \left(\Delta\rho_{MS}^{i,j} + \nabla\Delta\rho_{VRS-MS}^{i,j} - \Delta I_{MS}^{i,j} + \Delta T_{MS}^{i,j} \right) - \Delta N_{MS}^{i,j} \end{aligned} \quad (3)$$

Z podwójnego różnicowania (*double difference*, symbol $\nabla\Delta$) równań obserwacyjnych otrzymuje się równania:

$$\begin{aligned} \nabla\Delta\Phi_{VRS-MS}^{i,j} &= \Delta\Phi_{MS}^{i,j} - \Delta\Phi_{VRS}^{i,j} = \\ &= \frac{1}{\lambda} \left(\nabla\Delta\rho_{VRS-MS}^{i,j} - \nabla\Delta I_{VRS-MS}^{i,j} + \nabla\Delta T_{VRS-MS}^{i,j} \right) - \nabla\Delta N_{VRS-MS}^{i,j} \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie:

$$\nabla\Delta\rho_{VRS-MS}^{i,j} = \left(\rho_{MS}^i - \rho_{VRS}^i \right) - \left(\rho_{MS}^j - \rho_{VRS}^j \right) \quad (5)$$

Ostatecznie w równaniach obserwacyjnych VRS do obserwacji MS dodawane są winterpolowane wartości błędów zależnych od odległości ujmujące wpływ składnika dyspersyjnego i geometrycznego w obserwacjach fazy Φ i kodu P :

$$\Phi_{VRS-MS}^j = \Phi_{MS}^j + \frac{\left(\Delta\rho_{VRS-MS}^j - \delta\Delta r_{VRS-MS_{DYS}}^j + \delta\Delta r_{VRS-MS_{GEOM}}^j + \Delta T_{VRS-MS}^j \right)}{\lambda} \quad (6)$$

$$P_{VRS-MS}^j = P_{MS}^j + \Delta\rho_{VRS-MS}^j + \delta\Delta r_{VRS-MS_{DYS}}^j - \delta\Delta r_{VRS-MS_{GEOM}}^j + \Delta T_{VRS-MS}^j \quad (7)$$

Od strony formalnoprawnej w niektórych krajach pojawiał się problem z pozycjonowaniem metodą VRS (Leica Geosystems 2005), gdyż punkt nawiązania pomiaru nie istniał i nie można było sprawdzić wyników pomiarów oraz wykonać pomiarów kontrolnych z jego wykorzystaniem.

4. Metoda FKP

Metoda parametrów korekcji powierzchniowych FKP nie generuje danych indywidualnie dla każdego odbiornika ROV. W związku z tym w tej metodzie teoretycznie możliwa byłaby nawet komunikacja jednokierunkowa, bez transmisji GGA NMEA. W praktyce jednak konieczna jest komunikacja dwukierunkowa, aby odbiornik ROV otrzymał sieciowe dane referencyjne obliczone dla stacji referencyjnej, która znajduje się najbliżej niego, a tym samym dane, które dla niego będą najdokładniejsze.

W metodzie FKP odbiornik ROV otrzymuje parametry płaszczyzny, która opisuje wpływ błędów zależnych od odległości na dokładność wyznaczonej pozycji, przy założeniu ich liniowych zmian, co w praktyce jest wystarczająco dokładnym założeniem.

W geometrii równanie płaszczyzny π przechodzącej przez punkt $P(x_0, y_0, z_0)$ oraz prostopadłej do niezerowego wektora $n = (A, B, C)$ ma postać:

$$\pi: A(x - x_0) + B(y - y_0) + C(z - z_0) = 0 \quad (8)$$

Ogólna postać równania wielomianu poprawek powierzchniowych (geometrycznych i *iono-free*) w metodzie FKP ma poniższą postać (trzeci składnik sumy nie występuje, gdyż płaszczyzna korekcji FKP jest równoległa do elipsoidy WGS-84):

$$\delta_{FKP}(t) = A_\varphi(t) \cdot (\varphi - \varphi_R) + A_\lambda(t) \cdot (\lambda - \lambda_R) \quad (9)$$

gdzie:

- φ_R, λ_R – współrzędne geograficzne stacji REF (WGS-84 [rad]),
- φ, λ – współrzędne geograficzne odbiornika ROV (WGS-84 [rad]),
- A_φ, A_λ – współczynniki wielomianu FKP.

Natomiast wpływ błędów zależnych od odległości REF-ROV w metodzie FKP dla sygnału „geometrycznego” (uwzględniającego wpływ troposfery i błędów orbit satelitów) oraz sygnału „jonosferycznego” (uwzględniającego wpływ refrakcji jonosferycznej) określają wzory (Wübbena i Bagge 2002, Dabove i in. 2012):

$$\delta r_0 = 6,37(N_0(\varphi - \varphi_R) + N_0(\lambda - \lambda_R)\cos(\varphi_R)) \quad (10)$$

$$\delta r_I = 6,37H(N_I(\varphi - \varphi_R) + N_I(\lambda - \lambda_R)\cos(\varphi_R)) \quad (11)$$

gdzie:

$$H = 1 + 16 \left(0,53 - \frac{E}{\pi} \right)^3 \quad (12)$$

δr_0 – wpływ błędów zależnych od odległości, komponent związany z wpływem troposfery i błędami orbit satelitów,

δr_I – wpływ błędów zależnych od odległości, komponent związany z wpływem jonosfery,

E – wysokość horyzontalna satelity,

N_0 – FKP w kierunku północ-południe dla sygnału geometrycznego [ppm],

E_0 – FKP w kierunku wschód-zachód dla sygnału geometrycznego [ppm],

N_I – FKP w kierunku północ-południe dla sygnału zawierającego wpływ jonosfery,

E_I – FKP w kierunku wschód-zachód dla sygnału zawierającego wpływ jonosfery.

Wpływ błędów zależnych od odległości w metodzie FKP dla częstotliwości L1 i L2 można obliczyć z zależności (Wübbena i Bagge 2002), w których można znaleźć prostą analogię do podstawowych wzorów mających na celu eliminację wpływu jonosfery z obserwacji satelitarnych (Strang i Borre 1997, s. 490, wzór 15.13):

$$\delta r_1 = \delta r_0 + (120/154)\delta r_I \quad (13)$$

$$\delta r_2 = \delta r_0 + (154/120)\delta r_I \quad (14)$$

Pseudoodległość skorygowaną ze względu na błędy zależne od odległości R_k określa poniższa zależność, w której R to pseudoodległość obliczona z obserwacji fazy fali nośnej:

$$R_k = R - \delta r \quad (15)$$

Parametry FKP są obliczane dla każdej stacji referencyjnej indywidualnie, a do odbiornika ruchomego przesyłane są te, które obliczono dla stacji referencyjnej jemu najbliższej. Wzory w metodzie FKP definiują płaszczyznę (parametryzacja liniowa).

Płaszczyzna ta jest równoległa do elipsoidy WGS-84 na wysokości równej wysokości danej stacji referencyjnej. Parametry modelu FKP nie opisują wpływu refrakcji troposferycznej czy jonosferycznej na obserwacje, lecz jej poziomy gradient w obserwacjach, czyli opisują pole wektorowe wskazujące kierunek najszybszych wzrostów wartości pola skalarnego w poszczególnych punktach. Jako mankament metody FKP najczęściej wymieniana jest konieczność podjęcia decyzji o kompleksowym modelu korekcji, na który nie ma wpływu odbiornik ruchomy (Euler i in. 2001, Landau i in. 2003).

5. Koncepcja MAC

Koncepcja stacji pomocniczych MAC jest metodą standaryzowaną przez RTCM (Radio Technical Commission for Maritime) w wersjach 3.x tego protokołu (RTCM 2022). Podstawową różnicą w algorytmie obliczeniowym w porównaniu z dwiema przedstawionymi wcześniej metodami jest bezpośrednio wykorzystanie współrzędnych fizycznej stacji referencyjnej sieci w pozycjonowaniu odbiornika ROV (Leica Geosystems 2005). Kilka sąsiednich stacji referencyjnych danej sieci pełni funkcje pomocnicze w algorytmie interpolacji błędów zależnych od odległości REF-ROV.

W metodzie MAC kluczowe jest użycie oryginalnych obserwacji głównej stacji REF (najbliższej odbiornikowi ruchomemu) oraz zredukowanych informacji ze stacji pomocniczych. Podstawą obliczeń są równania pojedynczych różnic równań obserwacyjnych satelity (indeks górny j) i odbiorników (indeksy dolne k oraz m) według poniższego wzoru w obserwacji fazy Φ na częstotliwości L1; analogiczne równanie układane są w przypadku częstotliwości L2 (Euler i in. 2001):

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{k,m,1}^j(t) = & \Delta\rho_{k,m}^j + \Delta\delta r_{k,m}^j(t) + c \cdot \Delta dt_{k,m,1} + \\ & + \Delta T_{k,m}^j(t) - \frac{\Delta I_{k,m}^j(t)}{f_1^2} + \frac{c}{f_1} \cdot \Delta N_{k,m,1}^j + \Delta\epsilon_1 \end{aligned} \quad (16)$$

gdzie:

$\rho_{k,m}^j$ – odległość geometryczna uwzględniająca PCV (*Phase Centre Variations*) między ARP (*Antenna Reference Point*) odbiornika ruchomego a satelitą j ,

$\delta r_{k,m}^j$ – błąd orbity pokładowej,

$dt_{k,m}$ – błąd zegara odbiornika satelitarnego,

$T_{k,m}^j$ – refrakcja troposferyczna,

$I_{k,m}^j$ – refrakcja jonosferyczna,

- N – nieoznaczoność obserwacji fazy sygnału satelitarnego,
- t – epoka pomiaru,
- c – prędkość światła,
- f – częstotliwość (we wzorze f_1 , gdyż równanie dla częstotliwości L1),
- ϵ – błędy losowe,
- Δ – wartość różnicy wielkości według indeksów zamieszczonych przy niej.

Dla stacji pomocniczych w metodzie MAC układane są równania korekcji względem stacji głównej, gdzie s to odległość stacja główna – stacja pomocnicza (Φ – obserwacje fazy):

$$\delta\Delta\Phi_{k,m,1}^j(t) = \Delta s_{k,m}^j(t) - \Delta\Phi_{k,m,1}^j(t) + c \cdot \Delta dt_{k,m,1} + \frac{c}{f_1} \cdot \Delta N_{k,m,1}^j \quad (17)$$

W celu redukcji liczby danych (szybko- i wolnozmiennie składniki wzoru) transmitowanych do odbiornika ruchomego powyższe równanie dzieli się na dwa równania dotyczące komponentu dyspersyjnego, związanego z szybkozmiennym wpływem jonosfery, i geometrycznego, związanego z wolniej zmiennym wpływem troposfery i błędów orbit satelitów:

$$\delta\Delta\Phi_{k,m}^{j,dysp} = \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \cdot \delta\Delta\Phi_{k,m,1}^j - \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \cdot \delta\Delta\Phi_{k,m,2}^j \quad (18)$$

$$\delta\Delta\Phi_{k,m}^{j,geom} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \delta\Delta\Phi_{k,m,1}^j - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \delta\Delta\Phi_{k,m,2}^j \quad (19)$$

gdzie f_1 i f_2 to częstotliwości sygnałów satelitarnych, odpowiednio fal L1 i L2

W aspekcie algorytmu obliczeniowego metody MAC kluczowe jest pojęcie wspólnego poziomu nieoznaczoności, które oznacza, że wszystkie nieoznaczoności pomiarów fazy sygnałów satelitarnych zostały rozwiązane w odniesieniu do jednego satelity referencyjnego, którego sygnał jest odbierany przez wszystkie stacje referencyjne danej sieci. Jeśli któraś ze stacji referencyjnych sieci przestaje odbierać sygnał z aktualnego satelity referencyjnego, to musi on zostać zastąpiony innym, co następuje w prosty sposób wyjaśniony poniższą relacją, w której N oznacza nieoznaczoność pomiarów fazowych w podwójnych różnicach obserwacji pomiarów odbiornikami A oraz B sygnałów satelitów i oraz j , a opisana zmiana następuje z satelity i na satelitę k :

$$N_{AB}^{ij} \rightarrow N_{AB}^{kj} = N_{AB}^{ij} - N_{AB}^{ik} = \left(N_{AB}^i - N_{AB}^j\right) - \left(N_{AB}^i - N_{AB}^k\right) = N_{AB}^{kj} \quad (20)$$

W metodzie MAC odbiornik satelitarny sam może wybrać metodę interpolacji wpływu błędów zależnych od odległości. W metodach VRS i FKP odbiornik ROV otrzymuje dane już po interpolacji. Do danych referencyjnych w tej metodzie należą: współrzędne stacji głównej, obserwacje stacji głównej, korekcje obliczone dla stacji głównej, różnice współrzędnych stacja główna – stacje pomocnicze, różnice korekcji stacja główna – stacje pomocnicze. Z tego powodu metoda wymaga transmisji największej liczby danych w stosunku do metod VRS i FKP.

6. Analiza porównawcza wyników pomiarów z użyciem różnych metod NRTK

Metody pomiarów NRTK w teorii różnią się między sobą istotnie. Wszystkie bazują jednak na algorytmach interpolacji, głównie liniowej (Dai i in. 2001, Wei i in. 2006, Próchniewicz 2011). Możliwe są też odstępstwa od liniowości modelu interpolacyjnego. W algorytmie pochodnej cząstkowej wykorzystywany jest model liniowy w interpolacji wpływu błędów zależnych od odległości w przypadku współrzędnych poziomych, a pochodne drugiego rzędu są stosowane tylko w przypadku interpolacji wysokości, aby uwzględnić jej nieliniowe zmiany (Fotopoulos i Cannon 2001).

W pracy zbadano to, co w praktyce jest najistotniejsze, czyli realny wpływ wybranej metody NRTK na jakość wyników, a zatem na dokładność współrzędnych pomierzonego punktu. Analizę oparto na różnicach dokładnych współrzędnych referencyjnych punktów bazy testowej i współrzędnych z pomiarów metodami NRTK wykonanych w dniach 7–9 czerwca oraz 4 i 7 lipca 2017 roku. Współrzędne referencyjne punktów bazy testowej obliczono łącznie na podstawie pięciu dwunastogodzinnych sesji statycznych nawiązanych do jednej z sieci działających w Polsce (NadowskiNET). Charakterystykę jakości współrzędnych referencyjnych zamieszczono w tabeli 1. Punkty mierzone nawiązano do stacji referencyjnych przedstawionych na rysunku 1. Rejestracje obserwacji i obliczenia prowadzono z wykorzystaniem sygnałów satelitarnych z satelitów znajdujących się powyżej 10° nad horyzontem. Wykonano obliczenia wariantowo, wykorzystując wszystkie dostępne w oprogramowaniu komercyjnym modele atmosferyczne (jonosfery i troposfery). Ostatecznie, z powodu długiego czasu trwania obserwacji, przyjęto modele obliczone przez oprogramowanie na podstawie zarejestrowanych obserwacji. Użyto efemeryd precyzyjnych. W wyrównaniu wykonanym na elipsoidzie zastosowano standardowe wartości parametrów dla testów statystycznych: poziom istotności 5%, moc testu 80%. Po wyrównaniu współrzędne przetransformowano do układu państwowego PL-2000. Takich samych parametrów transformacji użyto do transformowania współrzędnych z pomiarów NRTK.

Tabela 1

Parametry charakteryzujące jakość współrzędnych referencyjnych punktów testowych

Statystyka	Odchylenie standardowe [mm]			Niezwadność [mm]		
	y	x	h	y	x	h
Min.	0,3	0,4	1,7	-0,4	-0,9	1,4
Max.	0,5	0,8	2,7	-0,5	0,9	2,0
Odch. standard.	0,1	0,1	0,3	0,3	0,6	0,2
Średnia	0,4	0,6	2,3	0,1	0,1	1,8

Na potrzeby analiz wyniki pomiarów satelitarnych przetransformowano do układu państwowego PL-2000 (x, y), który ma znaczenie inżynierskie w przeciwieństwie do układu WGS-84. W analizach przyjęto współrzędne referencyjne jako bezbłędne, także współrzędne wysokości z racji istotnie niższej dokładności ich wyznaczania w pomiarach satelitarnych.

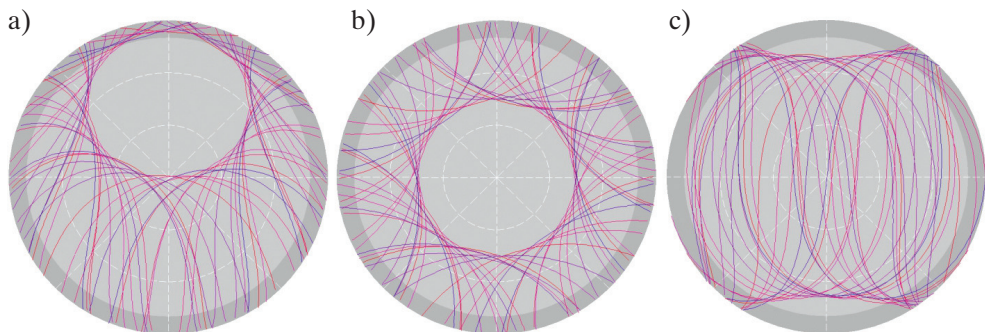
Testowe pomiary NRTK wykonywano przez 5 dni w seriach generalnie po 30 pomiarów daną metodą z reinicjalizowaniem odbiornika po każdym pomiarze. Procedura pomiarowa zakładała wyznaczanie każdej kolejnej pozycji punktu bazy testowej z wykorzystaniem innej metody NRTK w celu zapewnienia jak najbardziej zbliżonych warunków atmosferycznych dla realizacji pomiarów. Jeśli nawet byłyby one zmienne, to zmienność ta dotyczyłaby każdej z metod praktycznie tak samo. W trakcie pomiarów nie miało miejsce żadne nagłe załamanie pogody. W sumie wyznaczono 3345 pozycji punktu testowego wszystkimi metodami NRTK, uzyskując liczebności pomiarów dla poszczególnych metod: VRS 1279, FKP 1116 i MAC 950. Pomiary testowe miały posłużyć różnym rodzajom analiz, wykonywano m.in. także pomiary RTK i pomiary z różnymi ustawieniami konfiguracyjnymi odbiornika. Z tego powodu liczebności próbek w poszczególnych metodach nie są równe, gdyż nie zrezygnowano z żadnej serii pomiarowej, która mogła być porównana, tylko po to, aby wyrównać liczebność próbek w poszczególnych metodach NRTK.

Analizę wykonano dla każdej współrzędnej oddzielnie ze względu na wyraźnie zróżnicowaną dokładność wyznaczania poszczególnych współrzędnych wynikającą z budowy samego systemu nawigacji satelitarnej i budowy anteny satelitarnej. Generalizując, przyjmuje się, że wysokości w pomiarach satelitarnych są wyznaczane około dwukrotnie mniej dokładnie z powodu tzw. obciążenia horyzontu w płaszczyźnie pionowej do około 160° . Pierwsze ograniczenie zakresu kąta odbioru sygnałów satelitarnych przez antenę odbiornika satelitarnego do 180° wynika z jej budowy, w której element odbiorczy umieszczony jest na płycie metalicznej (*ground plane*) chroniącej go przed

sygnałami odbitymi. Kolejne zawężenie tego kąta wynika z eliminacji sygnałów z satelitów znajdujących się poniżej 10° nad horyzontem anteny z powodu potencjalnie dużych zakłóceń wywołanych przez refrakcje troposferyczną i jonosferyczną, czyli w płaszczyźnie pionowej sygnał satelitarny jest odbierany przez antenę satelitarną z wycinka kąta pełnego o kącie rozwarcia 160° z 360° . W płaszczyźnie poziomej ograniczenie zakresu kąta odbieranych sygnałów satelitarnych zależne jest od szerokości geograficznej wykonywanych pomiarów i wynika z nachylenia orbit satelitów względem równika. Na rysunku 2 przedstawiono poglądowo dobowe trajektorie satelitów dla trzech charakterystycznych lokalizacji:

- 1) AGH ($\varphi = 50^\circ 03' 57''$, $\lambda = 19^\circ 55' 13''$), czyli szerokości geograficznej zbliżonej do miejsca wykonywania pomiarów,
- 2) punktu o współrzędnych ($\varphi = 90^\circ 00' 00''$, $\lambda = 0^\circ 00' 00''$), czyli bieguna,
- 3) równika ($\varphi = 0^\circ 00' 00''$, $\lambda = 0^\circ 00' 00''$).

Z rysunku wynika, że dla szerokości geograficznych Polski oś X (w geodezji pionowa) i Y mają zróżnicowaną charakterystykę pod względem trajektorii satelitów nawigacyjnych. Dla poziomej osi Y występuje symetria, natomiast dla osi X występuje od północy martwa strefa o kącie rozwarcia około 45° . W wynikach pomiarów testowych zauważalna jest powtarzalna niższa dokładność wyznaczania współrzędnej x niż y .



Rys. 2. Dobowe trajektorie satelitów dla:
a) AGH; b) bieguna; c) równika

W tabeli 2 zestawiono statystyki opisowe dla wszystkich pomiarów NRTK oraz grupowanych metodą pomiarów NRTK. W celu zwiększenia czytelności danych wiersze, które należy bezpośrednio porównywać, oznaczono albo pogrubioną czcionką, albo zwykłą.

Analiza wartości średniej różnicy współrzędnych punktów wskazuje, że wybrana metoda pomiarów NRTK nie ma żadnego praktycznego znaczenia dla współrzędnych sytuacyjnych. W przypadku wysokości średnie różnice współrzędnych są wprawdzie wy-

rażniejsze, maksymalna między VRS i MAC wynosi 5 mm, czyli 33%, co może wydawać się wartością istotną, ale wysokości mają w pomiarach NRTK dwukrotnie większy zakres zmienności, więc wartość ta w tym kontekście nie jest bardzo istotna. Tę tezę potwierdza wartość odchylenia standardowego σ , które jest miarą zmienności wielkości mierzonej. Odchylenie standardowe wysokości sięga w wynikach pomiarów prawie 2 cm. Wartości średnich pokrywają się z medianami lub są do nich zbliżone. O znaczeniu różnic wartości średnich świadczy też rozstęp wyników, na podstawie których zostały obliczone. Rozstęp, ujmujący także wartości najbardziej odstające od średniej wyników pomiarów, ale o relatywnie niewielkiej częstotliwości występowania, dostarcza informacji, w jakim przedziale wartości błędów mogą znaleźć się wyniki pomiarów NRTK. Na podstawie analizy tego parametru można potwierdzić, że najmniej dokładnie i najmniej niezawodnie wyznaczane są wysokości, w przypadku których rozstęp wyniósł 14 cm, czyli był prawie dwuipółkrotnie większy niż dla współrzędnej y . Można zatem stwierdzić, że wybór metody NRTK nie ma praktycznego znaczenia dla osiągniętych wyników pomiarów. Niemniej wartości uśrednione są zgeneralizowanym obrazem próbek pomiarowej. Uszczegółowiono więc analizę danymi z tabeli 3, w której zamieszczono wartości kwartyli i percentyli 10 i 90.

Tabela 2

Statystyki opisowe wyników pomiarów różnymi metodami NRTK [m]

Współrzędna	Metoda	Średnia	σ	Mediana	Min.	Max.	Rozstęp
dy	wszystkie	-0,001	0,007	-0,001	-0,031	0,028	0,059
dx	wszystkie	-0,012	0,012	-0,013	-0,069	0,028	0,097
dh	wszystkie	0,012	0,018	0,012	-0,043	0,097	0,140
dy	VRS	-0,001	0,006	-0,001	-0,022	0,019	0,041
dy	MAC	-0,001	0,008	0,000	-0,031	0,028	0,059
dy	FKP	-0,001	0,007	-0,001	-0,019	0,024	0,044
dx	VRS	-0,012	0,009	-0,013	-0,035	0,017	0,052
dx	MAC	-0,011	0,013	-0,011	-0,069	0,028	0,097
dx	FKP	-0,013	0,013	-0,014	-0,051	0,026	0,077
dh	VRS	0,010	0,019	0,007	-0,043	0,080	0,123
dh	MAC	0,015	0,018	0,013	-0,028	0,080	0,108
dh	FKP	0,013	0,015	0,013	-0,043	0,097	0,140

Z analizy bardziej szczegółowych danych zestawionych w tabeli 3 również wynika, że nie można wskazać istotnych różnic w wynikach różnymi metodami pomiarów NRTK.

Tabela 3
Kwartyły i percentyle dla wyników pomiarów różnymi metodami NRTK [m]

Współrzędna	Metoda	Dolny kwartył	Górny kwartył	Percentyl 10	Percentyl 90	Rozstęp	Rozstęp kwartylny
dy	wszystkie	-0,005	0,004	-0,010	0,007	0,059	0,009
dx	wszystkie	-0,018	-0,004	-0,026	0,003	0,097	0,014
dh	wszystkie	0,001	0,022	-0,009	0,034	0,140	0,021
dy	VRS	-0,005	0,003	-0,010	0,007	0,041	0,008
dy	MAC	-0,005	0,003	-0,011	0,007	0,059	0,008
dy	FKP	-0,005	0,004	-0,009	0,008	0,044	0,010
dx	VRS	-0,018	-0,006	-0,023	-0,001	0,052	0,012
dx	MAC	-0,017	-0,002	-0,024	0,005	0,097	0,014
dx	FKP	-0,021	-0,003	-0,029	0,003	0,077	0,018
dh	VRS	-0,003	0,020	-0,012	0,035	0,123	0,022
dh	MAC	0,004	0,023	-0,006	0,040	0,108	0,020
dh	FKP	0,003	0,023	-0,006	0,031	0,140	0,019

Kolejnym sposobem weryfikacji znaczenia wartości różnic współrzędnych punktów była analiza ze zmienną grupującą w postaci dnia pomiarów, gdyż pomiary wykonywano przez 5 dni. Ze względu na wielkość tabeli danych z dwoma zmiennymi grupującymi w tabeli 4 zamieszczono tylko fragment dotyczący wysokości, gdyż w przypadku wysokości odnotowano największą różnicę wartości między metodami. Wartości średnich, odchyłeń standardowych i innych statystyk opisowych współrzędnych x , y generalnie pokrywały się z wartościami przedstawionymi w tabelach 2 i 3, nie wnosząc żadnych istotnych nowych informacji do analiz. W metodzie FKP wartość średniej wysokości między dniami zmieniała się o maksymalnie 11 mm, w metodzie MAC wartość ta wyniosła 21 mm, a w metodzie VRS 11 mm. Odchylenia standardowe σ charakteryzujące zmienność różnic wysokości również różnią się znacząco, w zakresie od 10 mm do 17 mm. Z analizy danych wynika, że różnice wyników pomiarów daną metodą NRTK w kolejnych dniach testów mogą być znacznie większe niż uzyskane różnice między metodami NRTK obliczone bez podziału na dni.

Dokładność pomiarów NRTK określana jest powszechnie w zakresie 1–3 cm dla współrzędnych sytuacyjnych x , y oraz 1–5 cm dla wysokości. Również na tej podstawie różniące się nawet o kilka milimetrów wartości średnich różnic wysokości obliczonych poszczególnymi metodami NRTK nie pozwalają na istotne zróżnicowanie jakości wyni-

ków w zależności od wybranej metody pomiarów NRTK, gdyż charakteryzują się one niższą dokładnością. Niemniej wyniki pomiarów testowych przeanalizowano pod kątem poprawności powszechnie przyjętej dokładności wyników pomiarów NRTK. Dla współrzędnej y wystąpiły trzy wartości różnicy współrzędnej większe niż 3 cm (w próbie 3345 pomiarów), czyli 0,1%, a w przedziałach [3 cm, 2 cm] oraz [-3 cm, -2 cm] było tylko 40 pomiarów, czyli 1,2%. Dla współrzędnej x różnice współrzędnych powyżej [-3 cm, +3 cm] wystąpiły 177 razy, co stanowi 5,3%. Jest to zauważalny spadek przeciętnej dokładności wyznaczenia tej współrzędnej w stosunku do współrzędnej y , który potwierdzają konsekwentnie także inne statystyki opisowe. Dla wysokości liczba różnic współrzędnych powyżej 5 cm wyniosła 112, co stanowi 3,3%. Poza przedziałem analogicznym jak dla współrzędnych sytuacyjnych, czyli [-3 cm, +3 cm], znalazło się 14,6% różnic współrzędnych, co wskazuje na niższą dokładność wyznaczania wysokości w pomiarach NRTK niż współrzędnych sytuacyjnych. Ponadto rozstęp danych jednoznacznie wskazuje na istotnie większy rozrzut wyników dla wysokości – wyniósł on 14,0 cm. W przypadku współrzędnej y rozstęp w różnicach współrzędnych wyniósł 5,9 cm, a dla współrzędnej x ten parametr osiągnął wartość 9,7 cm, czyli był istotnie większy niż dla różnic współrzędnych y oraz istotnie mniejszy niż dla różnic wysokości.

Tabela 4

Statystyki opisowe różnic wysokości pomiarów NRTK dla kolejnych dni testów [m]

Współrzędna	Dzień	Strumień	Średnia	σ	Mediana	Min.	Max.
h	2	FKP	0,008	0,018	0,007	-0,043	0,097
	3	FKP	0,016	0,008	0,016	-0,006	0,038
	4	FKP	0,015	0,011	0,015	-0,011	0,048
	5	FKP	0,019	0,013	0,021	-0,013	0,048
	1	MAC	0,027	0,023	0,028	-0,027	0,080
	3	MAC	0,012	0,011	0,013	-0,017	0,049
	4	MAC	0,009	0,016	0,012	-0,028	0,059
	5	MAC	0,007	0,008	0,008	-0,023	0,018
	1	VRS	0,011	0,026	0,007	-0,043	0,080
	2	VRS	0,012	0,009	0,015	-0,009	0,023
	3	VRS	0,015	0,015	0,011	-0,013	0,079
	4	VRS	0,006	0,015	0,005	-0,035	0,050
	5	VRS	0,004	0,012	0,002	-0,025	0,035

7. Podsumowanie

Rozwój satelitarnych technik pomiarowych w geodezji doprowadził do opracowania metod sieciowych pomiarów kinematycznych NRTK. Stały się one aktualnie najchętniej wybieraną metodą pomiarową, gdyż można je wykonać jednoosobowo, bardzo szybko, a jakość wyników umożliwia ich wykorzystanie do szerokiego spektrum pomiarów geodezyjnych. Niemniej dokładność pozycjonowania NRTK jest najbardziej problematyczną kwestią i najsłabiej rozpoznawaną przez korzystających z tej techniki pomiarowej. Bardzo prosta i szybka obsługa zestawu pomiarowego występuje w bardzo zaawansowanym technicznie, technologicznie i algorytmicznie rozwiązaniu pomiarowym. W geodezji wykorzystywane są satelitarne techniki pomiarowe, których podstawą jest pozycjonowanie względne, czyli pozycja tzw. odbiornika ruchomego wyznaczana jest względem innego lub innych odbiorników, których anteny satelitarne ustawione są nad punktami osnowy geodezyjnej. Kluczowe znaczenie ma korelacja błędów. W praktyce oznacza ona, że mogą występować różnice współrzędnych o charakterze systematycznym w wynikach wykonywanych w odstępach czasowych pomiarów tych samych punktów.

Wszystkie metody NRTK korzystają z identycznej architektury systemu do generowania sieciowych danych referencyjnych dla odbiorników ruchomych, na którą składa się sieć naziemnych stacji referencyjnych, łączność z wykorzystaniem protokołu Ntrip oraz interpolacja liniowa błędów zależnych od odległości między stacją referencyjną oraz odbiornikiem ruchomym.

W odniesieniu do analizy porównawczej metod pomiarów NRTK: VRS, FKP i MAC, mimo istotnych różnic w ich koncepcjach i algorytmach, na podstawie opracowania wyników 3345 pomiarów testowych wykonanych w ciągu 5 dni nie można wskazać istotnych różnic w dokładności pozycjonowania którąś z tych metod. Uzasadnione jest stwierdzenie o ich równoważności, gdyż wartości różnic współrzędnych uzyskanych daną metodą NRTK w różnych dniach były większe niż różnice współrzędnych uzyskanych poszczególnymi metodami z wszystkich dni pomiarów testowych. Procedurę przeprowadzania testów opracowano tak, aby możliwe było wiarygodne porównywanie wyników pomiarów, na które bardzo istotny wpływ mają warunki atmosferyczne. Z tego powodu pomiary wykonywano natychmiast po sobie, aby założenie identycznych warunków ich realizacji było jak najbardziej prawdziwe. W trakcie pomiarów w żadnym dniu nie nastąpiły gwałtowne zmiany pogody, które mogłyby wpłynąć na wyniki. Pogoda była stabilna i słoneczna. Z akademickiego punktu widzenia interesujące wyniki pomiarów i analiz mogłoby przynieść wykonanie pomiarów w gwałtownie zmiennych warunkach atmosferycznych, z burzami w okolicy. Wykonywane w ramach innych badań pomiary testowe w trakcie burzy odległej o co najmniej kilkadziesiąt kilo-

metrów były po pierwsze bardzo trudne do przeprowadzenia z powodu poważnych problemów z transmisją danych przez sieć GSM, aż w końcu do jej zupełnej utraty, a po drugie – przyniosły systematyczne różnice wysokości punktów, które udało się pomierzyć w tych warunkach, o wartościach około 18 cm. Trudno określić, czy niestabilne warunki atmosferyczne spowodowałyby zróżnicowanie wyników w zależności od metod pomiarów NRTK, czy po prostu wszystkie miałyby duży rozrzut pozycji. Niemniej pierwszorzędnym problemem technicznym w takich warunkach byłoby utrzymanie dostępu do danych referencyjnych przez sieć operatora GSM.

Wszystkie metody zgodnie potwierdziły zróżnicowanie dokładności wyznaczania poszczególnych współrzędnych x , y , h w pomiarach NRTK.

W praktyce najczęściej wybierana przez geodetów jest metoda VRS, najrzadziej metoda FKP, która nawet nie jest udostępniana we wszystkich sieciach referencyjnych w Polsce, a jest to metoda, która najmniej obciąża obliczeniowo serwer centrum zarządzającego siecią. O dostępności metod NRTK decyduje administrator sieci stacji referencyjnych. Oprogramowanie do zarządzania sieciami referencyjnymi i generowania sieciowych danych referencyjnych pochodzi najczęściej od jednego z trzech potentatów na rynku, firm Trimble, Leica lub Topcon. To również jest czynnik wpływający na dostępność metod NRTK, których algorytmy są autorstwa konkurujących ze sobą na rynku firm.

Literatura

- Brown N., Geisler I., Troyer L., 2006, *RTK rover performance using the Master-Auxiliary Concept*, Journal of Global Positioning Systems, vol. 5, no. 1–2, s. 135–144.
- Dabove P., De Agostino M., Manzano A., 2012, *Achievable Positioning Accuracies in a Network of GNSS Reference Stations*, [w:] Jin S. (ed.), *Global Navigation Satellite Systems: Signal, Theory and Applications*, IntechOpen, London, s. 189–214. <https://doi.org/10.5772/28666>.
- Dai L., Han S., Wang J., Rizos Ch., 2001, *A Study on GPS/GLONASS Multiple Reference Station Techniques for Precise Real-Time Carrier Phase-Based Positioning*, [w:] *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Salt Lake City, UT, September 2001*, s. 392–403.
- Euler H.-J., Keenan R., Zebhauser B., Wübbena G., 2001, *Study of a simplified approach in utilizing information from permanent reference station arrays*, [w:] *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Salt Lake City, UT, September 2001*, s. 379–391.
- Fotopoulos G., Cannon M., 2001, *An overview of multi-reference station methods for cm-level positioning*, GPS Solutions, vol. 4(3), s. 1–10. <https://doi.org/10.1007/PL00012849>.

- Kim D., Langley R., 2008, *Improving Long-Range RTK: Getting a Better Handle on the Biases*, GPS World, <https://gge.ext.unb.ca/Resources/gpsworld.march08.pdf> [dostęp: 22.07.2023].
- Landau H., Vollath U., Chen X., 2002, *Virtual reference station systems*, Journal of Global Positioning Systems, vol. 1, no. 2, s. 137–143.
- Landau H., Vollath U., Chen X., 2003, *Virtual Reference Stations versus Broadcast Solutions in Network RTK – Advantages and Limitations*, GNSS Conference, Graz, Austria.
- Leica Geosystems, 2005, *Take it to the max! – An introduction to the philosophy behind Leica Geosystems’, SpiderNET revolutionary network RTK software and algorithms*, White Paper.
- Lenz E., 2004, *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) – Application and Benefit in Modern Surveying Systems*, [w:] *FIG Working Week 2004, Athens, Greece, May 22-27.2004*, s. 1–11.
- Paziewski J., Wielgosz P., 2013, *Assessment of GPS + Galileo and multi-frequency Galileo single-epoch precise positioning with network corrections*, GPS Solutions, vol. 18(4), s. 571–594. <https://doi.org/10.1007/s10291-013-0355-3>.
- Próchniewicz D., 2011, *A study on mitigation of the distance-dependent biases in the network RTK technique*, Reports on Geodesy, vol. 90, 2011, s. 397–407.
- Rizos C., 2002, *Network RTK research and implementation – A geodetic perspective*, Journal of Global Positioning Systems, vol. 1, no. 2, s. 144–150.
- RTCM, 2004, *RTCM 10410.0 Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip)*, Arlington, Virginia, USA.
- RTCM, 2011, *RTCM 10410.1 Standard for Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip) Version 2.0 with Amendment 2*, Arlington, Virginia, USA.
- RTCM, 2022, *RTCM 10403.3, Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services – Version 3 + Amendment 3*, Arlington, Virginia, USA.
- Schrock G., 2010, *The Birthplace of VRS*, The American Surveyor, <https://amerisurv.com/2010/04/10/the-birthplace-of-vrs/> [dostęp: 1.06.2023].
- Strang G., Borre K., 1997, *Linear Algebra, Geodesy and GPS*, Wellesley-Cambridge Press, Cambridge.
- Uznański A., 2009, *Estymacja precyzji i dokładności wyników RTN w odniesieniu do sieci ASG-EUPOS*, Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej. Oddział w Krakowie, z. 149, Seria: Materiały Konferencyjne, nr 91, s. 595–610.
- Vollath U., Landau H., Chen X., Doucet K., Pagels C., 2002, *Network RTK versus single base RTK – Understanding the error characteristics*, [w:] *Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2002)*, Portland, OR, September 2002, s. 2774–2781.

- Wanninger L., 2002, Virtual Reference Stations for Centimeter-Level Kinematic Positioning, [w:] *Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2002)*, Portland, OR, September 2002, s. 1400–1407.
- Wei E., Chai H & An Z., Liu J., 2006, *VRS Virtual Observations Generation Algorithm*, Journal of Global Positioning Systems, vol. 5, no. 1–2, s. 76–81.
- Wübbena G., Bagge A., 2002, *RTCM Message Type 59-FKP for transmission of FKP*, Geo++, White Paper, <http://www.geopp.com/pdf/geopp-rtcm-fkp59.pdf> [dostęp: 1.06.2023].
- Wübbena G., Bagge A., Seeber G., Böder V., Hankemeier P., 1996, *Reducing distance dependent errors for real-time precise DGPS applications by establishing reference station networks*, [w:] *Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1996)*, Kansas City, MO, September 1996, s. 1845–1852.
- Wübbena G., Bagge A., Schmitz M., 2001, *RTK Networks based on Geo++® GNSMART – Concepts, Implementation, Results*, [w:] *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001)*, Salt Lake City, UT, September 2001, s. 368–378.