

Andrzej Uznański*

METODY WYZNACZANIA POZYCJI TECHNIKĄ RTK GPS**

1. Wstęp

Wyznaczenie pozycji absolutnej centrum fazowego anteny GPS na podstawie obserwacji kodowych było pierwszym krokiem w satelitarnych metodach wyznaczania współrzędnych punktów. Transmisja danych ze stacji referencyjnej zawierających w pierwszych rozwiązaniach różnice jej współrzędnych nawigacyjnych i precyzyjnie wyznaczonych wprowadziła DGPS. Kolejnym krokiem było opracowanie statycznych oraz kinematycznych metod różnicowych (względnych), w których niezbędnym etapem w obliczeniu współrzędnych punktu jest *postprocessing* obserwacji kodowych i fazowych w ramach opracowania kameralnego. Wykonywanie obok pomiarów inwentaryzacyjnych także pomiarów realizacyjnych umożliwiła dopiero technika RTK GPS wprowadzająca w satelitarne metody pozycjonowania precyzyjnego jednokierunkową łączność modemową odbiorników GPS. Jej podstawowym mankamentem jest realny zasięg ograniczony z jednej strony przez wymóg łączności modemowej stacji referencyjnej i odbiornika ruchomego do zazwyczaj kilku kilometrów oraz z drugiej strony przez grupę czynników obniżających dokładność wyznaczania pozycji zależnych od odległości między stacją referencyjną i odbiornikiem ruchomym. Istotnym problemem jest też jakość wyników otrzymywanych z tak krótkiego pomiaru, czy nawet z pojedynczego rozwiązania. Rozwój techniki RTK GPS zmierza w kierunku przezwyciężenia jej mankamentów wynikających z powyższych przyczyn i zmierza w kierunku tworzenia sieci stacji permanentnych z serwisem RTK.

2. Dane ze stacji referencyjnej

Istnieją trzy metody precyzyjnego wyznaczania pozycji w trybie RTK na podstawie danych transmitowanych bezpośrednio ze stacji odniesienia.

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

** Praca wykonana w ramach badań statutowych (umowa nr 11.11.150.312)

1) Jedna stacja referencyjna (ang. *Single-Reference RTK*).

Odbiornik ruchomy wyznacza współrzędne punktu na podstawie sygnałów odebranych przez jego anteny: satelitarnych przez antenę GPS oraz sygnałów ze stacji referencyjnej przez antenę modemową lub telefon komórkowy (ang. *single baseline method*).

2) Wiele stacji referencyjnych (ang. *Multi-Reference RTK*).

Nad co najmniej dwoma punktami osnowy ustawione są anteny odbiorników GPS pełniących funkcje stacji referencyjnych i wykorzystujących do transmisji różne częstotliwości. Odbiornik ruchomy wyznacza pozycje swojej anteny kolejno w odniesieniu do poszczególnych stacji poprzez zmianę kanału, otrzymując w wyniku pozycję uśrednioną. Możliwe jest także nadawanie danych przez różne stacje referencyjne na jednej częstotliwości z wykorzystaniem do transmisji różnych momentów czasu w epoce pomiarowej (ang. *time slicing*). Korzystanie z więcej niż jednej stacji referencyjnej (ang. *Multi-Reference RTK*) będzie miało na celu zwiększenie dokładności, pewności co do jakości obliczonych współrzędnych oraz w pewnym sensie zakresu odległości między stacjami referencyjnymi i odbiornikiem ruchomym, bez istotnego obniżenia dokładności wyznaczanych współrzędnych punktów.

Multi-Reference RTK sprowadza się do wielokrotnego powtórzenia niezależnych rozwiązań pojedynczego wektora (ang. *single baseline method*) i otrzymania w wyniku współrzędnych uśrednionych. Ich jakość będzie silnie zleżała od jednorodności dokładnościowej współrzędnych stacji referencyjnych, w odniesieniu do których wyznaczona została pozycja uśredniona punktu.

3) Sieć stacji referencyjnych (ang. *Network RTK*).

Sieć tworzą co najmniej trzy odbiorniki GPS. Generalnie istnieją dwie techniki uwzględnienia danych z sieci stacji referencyjnych przy precyzyjnym wyznaczaniu współrzędnych. FKP to niemiecki akronim od *Flächen-Korrektur-Parameter* (ang. *area correction parametr*), a VRS angielski akronim oznaczający *Virtual Reference Station*. W obydwu przypadkach mamy do czynienia z powierzchniowymi systemami dystrybucji poprawek RTK/DGPS. Możliwa jest też transmisja przez stacje referencyjne oryginalnych danych, które zostały przez nie odebrane z satelitów (ang. *raw data broadcasting*).

Istnieje także możliwość pośredniego wykorzystywania obserwacji stacji referencyjnych, np. za pośrednictwem protokołu Ntrip w EUREF-IP.

3. Sieci stacji referencyjnych Network RTK

Network RTK jest pojęciem określającym sieć permanentnych stacji referencyjnych z serwisem RTK. Formalnie prace nad Network RTK zapoczątkowało w 1993 r. powołanie specjalnej grupy przez IAG (ang. *International Association of Geodesy*). Miała ona na celu rozwijanie systemu RTK zdolnego do wyznaczania pozycji z centymetrową dokładnością dla wektorów między odbiornikiem ruchomym i najbliższą stacją referencyjną o długościach rzędu kilkudziesięciu kilometrów, o dokładności równoważnej pomiarom *single baseline method RTK* dla odległości do 10 km, wynikającej z wpływu refrakcji jonosferycznej.

Sieci stacji referencyjnych pokrywają swoim zasięgiem określony obszar, stąd określenie „systemy powierzchniowe”. Działanie sieci stacji referencyjnych, z punktu widzenia użytkownika, polega na wyznaczaniu i dystrybucji określonych „parametrów” umożliwiających osiągnięcie przez odbiornik ruchomy dokładności centymetrowej.

Zasięg sieci nie jest określony przez zasięg odbioru „parametrów”, jak to jest w *Single-Reference RTK*, lecz przez powierzchnię, dla której wyznaczane „parametry” pozwalają na uzyskanie centymetrowej dokładności wyznaczania pozycji. Generalnie wskazana jest interpolacja „parametrów”, choć możliwa jest także ich ekstrapolacja (wynika z pozycji odbiornika ruchomego względem obszaru wyznaczonego przez wektory pomiędzy stacjami leżącymi na jego obrzeżach). Rodzaj „parametrów” zależy od zastosowanego rozwiązania: w FKP będą to współczynniki określane jako parametry korekcji powierzchniowych, a w VRS także i przede wszystkim obserwacje stacji wirtualnej.

Gęstość rozmieszczenia stacji referencyjnych musi umożliwiać modelowanie błędów systematycznych zależnych od odległości między odbiornikami GPS z dokładnością pozwalającą na zaniechanie poprawek do tych błędów w kontekście rozwiązania parametrów nieoznaczoności. Generalnie określa się długości wektorów między stacjami na 30÷100 km.

Błędy zależne od odległości między odbiornikiem referencyjnym i ruchomym modelowane w sieciach stacji referencyjnych to: błąd orbity satelitów o maksymalnej wartości ± 1 m, refrakcja troposferyczna z wpływem o maksymalnej wartości ± 12 m oraz refrakcja jonosferyczna z wpływem o maksymalnej wartości ± 24 m. Wartości maksymalnych błędów z tytułu poszczególnych czynników podano według [1], przy założeniu odległości między stacją referencyjną i odbiornikiem ruchomym do 300 km oraz różnicy wysokości między odbiornikami GPS do 2 km.

4. Parametry korekcji powierzchniowych FKP

Koncepcję parametrów (współczynników) korekcji powierzchniowych FKP (niem. *Flächen-Korrektur-Parameter*) opracowała niemiecka firma Geo++. FKP dostarczają odbiornikowi ruchomemu informacji pozwalających mu na interpolację liniową błędów zależnych od odległości między odbiornikiem referencyjnym i ruchomym. Współczynniki FKP są określone oddzielnie dla błędów zależnych od odległości między odbiornikami GPS o charakterze dyspersyjnym (refrakcja jonosferyczna) i niedyspersyjnym (refrakcja troposferyczna i błędy orbit satelitów) przy rozróżnieniu kierunków północ – południe oraz wschód – zachód.

Ogólna postać równania wielomianu poprawek powierzchniowych ma postać

$$\delta_{FKP}(t) = A_{\phi}(t)(\phi - \phi_R) + A_{\lambda}(t)(\lambda - \lambda_R) \quad (1)$$

Indeks R odnosi się do współrzędnych stacji referencyjnej, współrzędne nieindeksowane dotyczą odbiornika ruchomego, a współczynniki A w funkcji czasu oznaczają parametry FKP, a ich rozwinięcie daje w rezultacie zależności [8] odpowiednio dla sygnału zawierającego wpływy niedyspersyjne (indeks 0) oraz dyspersyjne (indeks I):

$$\delta r_0 = 6,37 N_0 (\phi - \phi_R) + E_0 (\lambda - \lambda_R) \cos(\phi_R) \quad (2)$$

$$\delta r_1 = 6,37H(N_1(\varphi - \varphi_R) + E_1(\lambda - \lambda_R) \cos(\varphi_R)) \quad (3)$$

gdzie H jest określone poniższym wzorem [8], w którym E oznacza wysokość horyzontalną satelity

$$H = 1 + 16 \left(0,53 - \frac{E}{\pi} \right)^3 \quad (4)$$

Pseudoodległość R_k skorygowaną o wpływ błędów zależnych od odległości obliczoną z pomiarów fazowych określa ogólna zależność

$$R_k = R - \delta r \quad (5)$$

Jest oczywiste, że wpływ błędów niedispersyjnych nie zależy od częstotliwości fali elektromagnetycznej, natomiast dla refrakcji jonosferycznej uwzględniany jest współczynnik 120/154 dla częstotliwości L1 oraz odwrotny dla częstotliwości L2.

Wartości parametrów FKP odnoszą się do pozycji rzeczywistej stacji referencyjnej i opisują gradient dla wpływu określanych nimi błędów, czyli FKP nie zawierają absolutnego wpływu np. refrakcji troposferycznej lecz jej poziomy gradient w obserwacjach. Reprezentacja modelu FKP jest zależna od chwilowych i przestrzennych zmian czynników ujmowanych w modelu, przy czym istnieje możliwość określenia zakresu modelu w celu redukcji ilości odbieranych danych.

Współczynniki FKP obliczane dla każdego satelity i zredukowane o odległości stacja referencyjna – satelity są transmitowane w RTCM 20/21, a współczynniki FKP do interpolacji liniowej błędów pozycji odbiornika ruchomego zależnych od odległości poprzez dostosowaną do tego celu RTCM 59 w interwałach co najmniej co 10s. Standard RTCM 2.3 ogranicza możliwości co do rodzaju transmitowanych korekcji i wymusza korekcje w przestrzeni obserwacji, czyli stosowania zmodyfikowanych obserwacji satelitarnych.

W przypadku parametrów korekcji powierzchniowych na podjęcie decyzji o kompleksowym modelu korekcji odbiornik ruchomy nie ma żadnego wpływu. Z FKP mogą być wyznaczone obserwacje VRS, gdyż wszystkie konieczne informacje są zawarte w strumieniu danych, co pozwala na indywidualne wyznaczenie korekcji dla danej pozycji odbiornika ruchomego.

5. Wirtualne stacje referencyjne VRS

Pojęcie VRS i koncepcja metody wyznaczania pozycji techniką RTK GPS wywodzi się z firmy Trimble. W sieciach stacji referencyjnych odległości między sąsiednimi stacjami są rzędu kilkudziesięciu kilometrów (przeciętnie 30÷50 km), a zdarza się, że przekraczają 50 km. W rezultacie długość wektora między najbliższą stacją referencyjną i odbiornikiem ruchomym jest zbyt duża dla uzyskania centymetrowej dokładności wyznaczenia współrzędnych w pomiarze RTK ze względu na krótki czas obserwacji.

Krótszy wektor między odbiornikami GPS można uzyskać, instalując na czas pomiaru tymczasową stację referencyjną na obszarze mierzonym, w pobliżu odbiornika ruchomego.

Tymczasowa stacja referencyjna może zostać zastąpiona wirtualną stacją referencyjną (VRS), która fizycznie nie istnieje, ale odbiornik ruchomy otrzymuje dane wygenerowane przez MCS (ang. *Master Control Station*) danej sieci dla odbiornika, który znajdowałby się w miejscu VRS. Format transmisji danych to CMR/CMR+ lub RTCM 20/21 albo RTCM 18/19. Zazwyczaj pozycja stacji VRS jest tożsama ze współrzędnymi z rozwiązania nawigacyjnego uzyskanego przez odbiornik ruchomy i przesłanego do rzeczywistej stacji referencyjnej danej sieci w postaci łańcucha GGA (ang. *Global Positioning System Fix Data*) formatu NMEA. Konieczna jest więc komunikacja dwukierunkowa. Na tej podstawie tworzone są obserwacje VRS indywidualnie dla danego odbiornika ruchomego, które mogą być obliczane z obserwacji wszystkich lub otaczających ją rzeczywistych stacji referencyjnych sieci. VRS może być zlokalizowana dowolnie, ale jej odległość od odbiornika ruchomego nie powinna przekraczać kilku kilometrów. Wymagana jest praca stacji referencyjnych w czasie rzeczywistym, nieustannie, dla wszystkich satelitów przy minimalnej wysokości horyzontalnej obniżonej do kilku stopni. Tylko wówczas wiadomości o korekcjach sieci RTK mogą być generowane z wystarczającą dokładnością po rozwiązaniu nieoznaczoności początkowej całkowitej liczby cykli fali nośnej dla wszystkich stacji referencyjnych sieci. Współrzędne odbiornika ruchomego są wyznaczane w trybie *single baseline* względem VRS. W pomiarach RTK na dużych obszarach, zwłaszcza przy realizacji obiektów o charakterze liniowym (drogi, szlaki kolejowe itp.) konieczne jest uwzględnienie zmieniającej się pozycji odbiornika ruchomego. Taki tryb pracy VRS określany jest jako *semi-kinematic VRS*.

W celu obliczenia obserwacji VRS przeprowadzany jest *pre-processing* obserwacji rzeczywistych stacji referencyjnych mający na celu rozwiązanie parametrów nieoznaczoności w obserwacjach stacji sieci oraz

interpolację błędów zależnych od odległości. Algorytmy interpolacyjne są stosowane oddzielnie dla wpływów dyspersyjnych jonosfery i geometrycznych troposfery i błędów orbit satelitów. Obserwacje VRS są obliczane z uwzględnieniem FKP.

Firma Geo++, która opracowała FKP, proponuje alternatywne wobec VRS rozwiązanie o nazwie PRS (ang. *Pseudoreference Station*). Przyjęcie współrzędnych nawigacyjnych odbiornika ruchomego jako pozycji VRS tworzy bardzo krótkie wektory, z rozwiązaniem którym oprogramowanie może mieć problemy. W PRS pozycja wirtualnej stacji referencyjnej jest przyjmowana w odległości rzędu 2 km od odbiornika ruchomego, co jest wartością bardzo często spotykaną w *Single-Reference RTK*.

6. Protokół Ntrip

Ruchomy odbiornik GPS ma możliwość wyznaczania współrzędnych punktów w oparciu o dane uzyskane z stacji referencyjnych za pośrednictwem protokołu Ntrip w EUREF-IP. Projekt Ntrip oznaczający *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol* został zainicjowany przez niemiecki *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie* w kooperacji z uniwersytetem w Dortmundzie. Jest to protokół bazujący na *Hyper Text Transfer Protocol* HTTP/1.1, uzupełniony o strumień danych GNSS (ang. *Global Navigation Satellite System*) dostępny przez Internet i sieci mobilne IP (ang. *Internet Protocol*) zarówno w postaci korekcji różnicowych, jak i oryginalnych danych.

Równoczesny przewodowy i bezprzewodowy odbiór danych jest możliwy przez wielu użytkowników za pośrednictwem komputerów stacjonarnych, laptopów, urządzeń typu PDA (ang. *Personal Digital Assistant*), odbiorników GPS podłączonych bezpośrednio do komputera. W przypadku komunikacji bezprzewodowej może zostać wykorzystana satelitarna transmisja danych oraz naziemna: AM, FM, VHF, a także Mobile IP Networks oznaczające: telefonię komórkową GSM, GPRS (ang. *General Packet Radio Service*), EDGE (ang. *Enhanced Data rates for GSM Evolution*), UMTS (ang. *Universal Mobile Telecommunications System*).

Ntrip jest przeznaczony do dystrybucji danych z sieci EUREF EPN, ale dystrybuowane są też dane z innych sieci stacji referencyjnych. Strumienie danych dostępne w Ntrip m.in. dla odbiorników GPS, GLONASS, EGNOS, WAAS itp. mogą zawierać:

- korekcje RTCM dla DGPS oraz RTK;
- korekcje RTCA (ang. *Radio Technical Commission for Aeronautics*) dla EGNOS&WAAS;
- oryginalne dane obserwacyjne;
- *orbity ultra-rapid* w formacie SP3;
- obserwacje w formacie RINEX.

Możliwe jest także równoczesne korzystanie z danych GIS. Liczba transmitowanych danych wynosi odpowiednio: dla DGPS – 0,5 kbitów/s, dla RTK – 5 kbitów/s; dla Internet Radio, telekonferencji itp. do 128 kbitów/s.

Praktycznie Ntrip złożony jest z następujących komponentów:

- *NtripSources* (czyli stacje referencyjne), które generują strumienie danych GNSS;
- *NtripServers*, które dystrybuują dane z *NtripSources* w formacie Ntrip;
- *NtripCaster*, serwer HTTP i zarazem główny komponent systemu odbioru, powielania i rozdzielania danych (ang. *HTTP Splitter Server*), umożliwia dostęp do danych z jednego źródła dla wielu użytkowników; którego podstawą jest oprogramowanie ICECAST Internet Radio (ang. *GNU General Public License*) pierwotnie przeznaczone do transmisji danych MP3 z prędkością 32 kbit/s – 128 kbit/s na komputerach PC i laptopach;
- *NtripClients* (ruchome odbiorniki GPS), z dostępem do strumieni danych z żądanej stacji referencyjnych (ang. *NtripSources*) poprzez serwer HTTP (ang. *NtripCaster*).

Transmisja danych odbywa się przez port szeregowy lub przez port IP. Większość danych ma ograniczony dostęp, wymagający rejestracji u operatora sieci. Dane są transmitowane przez standardowy port 80, dzięki czemu można uniknąć problemów z oprogramowaniem typu firewall i serwerami proxy sieci LAN. Korzystając z *Mobile Internet Service Provider* (ISP), może wystąpić konieczność odbioru danych przez port 2101 zamiast 80.

7. Podsumowanie

Dla przezwyciężenia ograniczeń pomiarów RTK GPS tworzone są sieci stacji referencyjnych, w których odległości między odbiornikami GPS wynoszą przeciętnie 30÷50 km. Niezależnie od metody wykorzystanej do obliczenia pozycji odbiornika ruchomego w pomiarze RTK GPS, współrzędne są wyznaczone poprzez obliczenie składowych wektora

(ang. *single baseline method*) między stacją referencyjną (rzeczywistą RS lub wirtualną VRS) i odbiornikiem ruchomym w odniesieniu do współrzędnych stacji referencyjnej.

Wykorzystanie danych z kilku stacji referencyjnych w *Multi-Reference RTK* da w wyniku pozycję uśrednioną z powtarzanego niezależnie pomiaru *Single-Reference RTK* na podstawie tego samego typu danych uzyskanych tą samą drogą. W przypadku korekcy FKP odbiornik ruchomy oprócz danych z rzeczywistej stacji referencyjnej będzie musiał także uwzględnić w obliczeniach swojej pozycji parametry korekcy powierzchniowych. W przypadku VRS zostaną obliczone obserwacje dla nieistniejącej stacji referencyjnej uwzględniające także korekcy FKP.

Zwiększenie odległości między odbiornikami GPS do kilkudziesięciu kilometrów wymusza z kolei rozwój techniki związanej z dostarczaniem danych ze stacji referencyjnych do odbiorników ruchomych. Niezbędne stają się telefony komórkowe z pakietową transmisją danych GPRS, a bardzo przydatny Internet wraz z protokołem Ntrip.

Pomiary eksperymentalne wykonane w różnych miejscach na świecie wskazują na możliwość wyznaczenia pozycji przez odbiornik ruchomy w czasie rzeczywistym z dokładnością pojedynczych centymetrów dla wektorów o długościach rzędu kilkudziesięciu kilometrów.

Literatura

- [1] Euler H.-J., Keenan C.R., Zebhauser B.E., Wübbena G.: *Study of a Simplified Approach in Utilizing Information from Permanent Reference Station Arrays*. International Technical Meeting, ION GPS-01, September 11–14 2001, Salt Lake City
- [2] Higgins M.B.: *Australia's Changing Surveying Infrastructure from Marks in the Ground to Virtual Reference Stations*. FIG XXII International Congress, April 19–26 2003, Washington, D.C. USA
- [3] <http://igs/ifag.de>
- [4] Landau H., Vollath U., Chen X.: *Virtual Reference Station Systems*. Journal of Global Positioning Systems, vol. 1, No. 2, 2002, 137–143
- [5] Leica: Technical Reference Manual 5.0.0en. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland 2004
- [6] Wanninger L.: *Virtual Reference Stations for Centimeter-Level Kinematic Positioning*. Proc. of ION GPS 2002, Portland, 1400–1407
- [7] Wübbena G., Bagge A., Schmitz M.: *RTK Networks based on Geo++ GNSMART – Concepts, Implementation, Results*. International Technical Meeting, ION GPS-01, September 11–14 2001, Salt Lake City
- [8] Wübbena G., Bagge A.: *RTCM Message Type 59-FKP for transmission of FKP*. Geo++ White Paper, 2002, <http://www.geopp.de>