

RT GPS w zastosowaniach inżynierskich

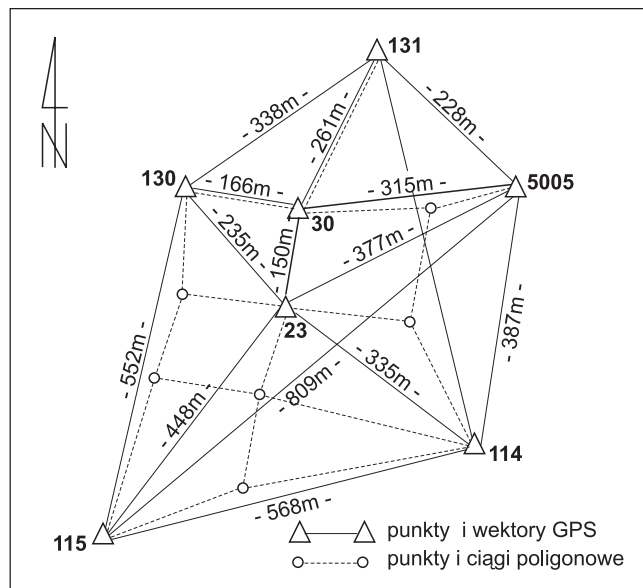
Duże możliwości potwierdzone

JAN GOCAŁ, ANDRZEJ UZNAŃSKI

W zastosowaniach cywilnych wykorzystuje się różne metody prowadzenia obserwacji GPS : statyczną, *rapid static*, *stop and go* oraz kinematyczną. Pomiar w czasie rzeczywistym (RT GPS) dotyczy przede wszystkim metody *stop and go* oraz kinematycznej. Zakład Geodezji Inżynierijnej i Budownictwa Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH już od 1995 r. prowadzi prace badawcze nad wykorzystaniem RT GPS do rozwiązywania różnych problemów inżynierskich.

Po kilkunastu latach stosowania techniki GPS można stwierdzić, że jedynie metoda statyczna została w pełni zaakceptowana przez geodetów praktyków. Powszechnie stosuje się ją do wyznaczania współrzędnych punktów wszelkiego rodzaju podstawowych i szczegółowych osnów geodezyjnych. Dla uzyskania wysokich dokładności zwiększa się czas trwania sesji pomiarowych, stosownie do długości obserwowanych wektorów. Wszelkie obliczenia wykonywane są w trybie *postprocessingu* (w biurze), dlatego nie ma możliwości sprawdzenia w terenie jakości rejestrowanych obserwacji i – dla pewności – często projektuje się za długie sesje pomiarowe.

Metoda statyczna umożliwia osiągnięcie bardzo wysokiej dokładności wyznaczenia współrzędnych punktów i zapewnia jednorodność dokładnościową sieci na dużych obszarach. Ta właściwość jest szczególnie cenna w badaniach przemieszczeń powierzchni terenu oraz w przygotowaniu punktów odniesienia dla pomiarów realizacyjnych. Po twierdzeniem wymienionych



Rys. 1

walorów metody statycznej są wyniki 8 niezależnych pomiarów okresowych, którymi objęto sieć składającą się z 8 punktów odniesienia (rys. 1) założonych dla zbadania stabilności góro-

Numer punktu	Odchylenia standardowe z wyrównania sieci [mm]				Odchylenia standardowe z rozproszenia współrzędnych [mm]			
	σ_x	σ_y	σ_p	σ_z	m_x	m_y	m_p	m_z
23	1,6	1,3	2,0	2,6	1,6	0,6	1,7	6,0
30	1,6	1,4	2,1	2,8	1,5	1,5	2,2	4,8
115	1,6	1,4	2,1	2,6	0,6	0,9	1,1	3,4
130	2,4	1,9	3,1	4,4	1,7	0,7	1,8	6,2
131	1,7	1,5	2,3	3,2	2,6	1,1	2,8	4,1
5005	1,4	1,2	1,9	2,2	0,9	0,8	1,2	3,1
Średnia kwadrat.	1,7	1,5	2,3	3,0	1,6	1,0	1,9	4,4

Tabela 1

tworu na terenie Sandomierza. Wartości odchyień standardowych uzyskanych z kolejnych wyrównań sieci oraz z rozproszenia ośmiokrotnie wyznaczanych współrzędnych punktów zestawiono w tabeli 1.

Na podstawie tych wyników można stwierdzić, że dokładność wyznaczenia współrzędnych punktów kształtuje się na poziomie ± 2 mm dla położenia sytuacyjnego oraz ± 4 mm dla położenia wysokościowego.

Pozostałe z wymienionych na wstępie metod obserwacji nie znalazły szerszego zastosowania w praktyce geodezyjnej. Metody *stop and go* oraz kinematyczna mogły być stosowane tylko do pomiarów inwentaryzacyjnych, w trakcie których dodatkową uciążliwość stanowiła konieczność częstych i czasochłonnych inicjalizacji odbiornika po każdorazowej utracie łączności z satelitami. Głównym ograniczeniem był jednak brak możliwości prowadzenia bieżącej kontroli uzyskiwanych w terenie wyników. Dopiero po wprowadzeniu odbiorników wyposażonych w modemy radiowe można było uzyskiwać współrzędne obserwowanych punktów w czasie rzeczywistym bezpośrednio w terenie.

● **Pomiary satelitarne w czasie rzeczywistym**

Podobnie jak w przypadku pomiarów *stop and go* i kinematycznych wymagających *postprocessingu*, do pomiarów w czasie rzeczywistym używa się co najmniej dwóch odbiorników. Odbiorniki te, w odróżnieniu od poprzednich, muszą być jednak wyposażone w modemy radiowe. Jeden z odbiorników ustawiany jest nad punktem o znanych współrzędnych i odgrywa rolę stacji bazowej (referencyjnej), zaś pozostałe odbiorniki (zwane ruchomymi) są przemieszczane w terenie, jeden niezależnie od drugiego, dokonując rejestracji sygnałów satelitarnych na wszystkich inwentaryzowanych lub tymczasowych punktach. Różnica między poprzednio proponowanymi procedurami a obecną polega na przeniesieniu obliczeń w terenie, gdzie w czasie rzeczywistym następuje określenie współrzędnych punktów z różnicowych pomiarów kodowych i fazowych, prawie w pełni automatycznie, z minimalnym udziałem operatora. Podczas pracy w czasie rzeczywistym stacja bazowa nie tylko odbiera i rejestruje sygnały satelitarne, ale też natychmiast (drogą radiową poprzez modem lub telefon komórkowy) przekazuje do stacji ruchomych wykonane odczyty faz lub ich korekcje. Na poszczególnych stacjach ruchomych dane te uzupełniane są własnymi odczytami faz, umożliwiając prowadzenie na bieżąco całego procesu obliczania wektorów.

Każdy pomiar rozpoczyna się od inicjalizacji odbiornika ruchomego, czyli od wyznaczenia całkowitej liczby cykli fazowych fali pomiędzy anteną satelity a anteną odbiornika. W pomiarach prowadzonych w czasie rzeczywistym do wykonania inicjalizacji potrzebna jest obserwacja 5 tych samych satelitów przez stację bazową i ruchomą, natomiast po wykonaniu inicjalizacji, do wyznaczenia pozycji punktu wystarcza obserwacja 4 satelitów. Inicjalizację można wykonać poprzez wyznaczenie pierwszego wektora z pomiaru statycznego na dowolnym punkcie albo z pomiaru statycznego wykonanego na punkcie o znanych współrzędnych (po ich wprowadzeniu do odbiornika) lub też metodą OTF (*On the Fly*), czyli w ruchu, w czasie około 1 minuty. Inicjalizacja OTF (dokonywana automatycznie) bardzo wyraźnie usprawnia proces pomiarowy, gdyż po każdej przerwie w łączności z wymaganą liczbą satelitów nie trzeba wykonywać inicjalizacji metodą statyczną. Proces inicjalizacji jest śledzony na bieżąco i może być

przerwany po uzyskaniu satysfakcjonującej dokładności rozwiązania nieoznaczoności. Podobnie postępuje się przy wyznaczaniu współrzędnych metodą *stop and go*. Obliczone współrzędne punktu można wyświetlać na ekranie kontrolera wraz z szacowaną dokładnością wyznaczenia współrzędnych w danym momencie procesu obliczeniowego. Po osiągnięciu żądanej dokładności można pomiar zakończyć.

Pomiar w czasie rzeczywistym może dotyczyć wszystkich dotychczas proponowanych metod pomiaru, a więc statycznej, *rapid static*, *stop and go* i kinematycznej, przy czym niezależnie od zastosowanej metody, oprócz obliczania i wyświetlania współrzędnych punktów w terenie, może być prowadzona ciągła rejestracja sygnałów satelitarnych, co umożliwi ponowne wykonanie obliczeń w trybie *postprocessingu*. Ze zrozumiałych względów pozyskiwanie współrzędnych punktów w czasie rzeczywistym jest przydatne praktycznie i zalecane jedynie przy stosowaniu metody *stop and go* i kinematycznej. Metoda kinematyczna oznacza ciągły ruch odbiornika (na przykład zainstalowanego na wózku przemieszczanym po torach kolejowych) i rejestrację współrzędnych po każdej epoce (interwał czasu między kolejnymi obserwacjami). Pomiary w czasie rzeczywistym są szczególnie przydatne w pracach realizacyjnych. Jednak ze względu na możliwość bieżącego kontrolowania uzyskiwanych dokładności wyznaczanych współrzędnych, metoda ta powinna być powszechnie stosowana we wszystkich pomiarach sytuacyjnych, inwentaryzacyjnych, a także przy wyznaczaniu przemieszczeń szybkozmiennych. Uzyskiwane z pomiarów satelitarnych współrzędne w układzie WGS-84 mogą być przeliczane na dowolny układ państwowy lub lokalny.

STUDIUM GEOINFORMACJI

Zakład Geodezji i GIS Politechniki Wrocławskiej

organizuje Studium Podyplomowe z Systemów Informacji Geograficznej, stanowiące pierwszy etap szerokiego programu kształcenia w zakresie Systemów Geoinformacyjnych, budowanego przez środowiska uczelni wrocławskich, władz administracji publicznej oraz firm geoinformacyjnych. Program Studium ukierunkowany jest na bieżące i planowane potrzeby administracji rządowej i samorządowej oraz zakładów przemysłowych w zakresie informatyzacji zarządzania i automatyzacji projektowania. Dwusemestralny program Studium obejmuje najważniejsze zagadnienia z zakresu: systemów map numerycznych, systemów zarządzania bazami danych, systemów zarządzania i planowania produkcji oraz tematyki dotyczącej nowoczesnych systemów informatycznych. W programie Studium uwzględniono również tematy dotyczące standaryzacji i wymiany informacji, strategii wdrażania oraz analiz ekonomicznych inwestycji geoinformacyjnych.

Zgłoszenia na Studium przyjmowane są do 10 marca 2001 r., natomiast pierwsze zajęcia odbędą się 31 marca 2001 r.

Szczegółowe informacje można uzyskać w Zakładzie Geodezji i GIS Politechniki Wrocławskiej
tel.: (071) 320-68-73, 320-68-74
e-mail: studium.gis@ig.pwr.wroc.pl, www.ig.pwr.wroc.pl/studiumGIS

● Pomiary doświadczalne RT GPS

Zakład Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH prowadzi od 1995r. prace badawcze nad wykorzystaniem techniki satelitarnej RT GPS do rozwiązywania różnych problemów inżynierskich. Pomiary doświadczalne prowadzone były przy użyciu zestawu pomiarowego GPS System 300 firmy Leica (dwa sensory SR399E z antenami AT 302, dwa kontrolery CR344 z programem RT-SKI, dwa modemy radiowe typu Sateline 2 ASx, oprogramowanie SKI). Dodatkowe oprogramowanie (obok funkcji COGO) umożliwia rozwiązywanie konkretnych zagadnień inżynierskich (GPS Road Line – tyczenie tras drogowych; GPS Quik Slope – tyczenie linii o zadanym nachyleniu; GPS DTM Stakeout – tyczenie i monitorowanie postępu robót ziemnych). Pomiary doświadczalne prowadzono na wielu obiektach testowych, których parametry geometryczne określano wcześniej z wysoką dokładnością, metodą statyczną GPS lub metodami klasycznymi z użyciem precyzyjnych instrumentów elektronicznych.

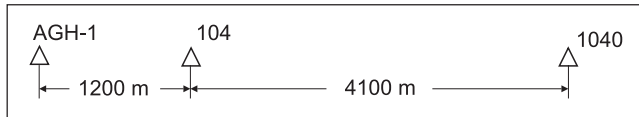
● Tyczenie sytuacyjne

Wyznaczenie przez odbiornik satelitarny współrzędnych punktu bezpośrednio w terenie umożliwia prowadzenie tyczenia lokalizującego. Tyczenie w lokalnym układzie współrzędnych wymaga uprzedniego zdefiniowania parametrów transformacji i wprowadzenia ich do kontrolera systemu pomiarowego. Przed rozpoczęciem tyczenia dokonuje się inicjalizacji odbiornika, podobnie jak w pomiarach sytuacyjnych i inwentaryzacyjnych. Tyczyć można pojedyncze punkty, linie, płaszczyzny, a przy użyciu dodatkowego oprogramowania – również przekroje trasy drogowej i całą trasę drogową w płaszczyźnie poziomej i pionowej. Przy tyczeniu odbiornik bazowy ustawiony jest na punkcie odniesienia o znanych współrzędnych, zaś odbiornik ruchomy jest przemieszczany do kolejnych punktów. Po wybraniu z listy numeru punktu tyczonego na wyświetlaczu kontrolera pojawiają się obliczone różnice między współrzędnymi nominalnymi a współrzędnymi aktualnej pozycji anteny (istnieje też możliwość ich graficznego przedstawienia).

Wstępne testowanie pozycjonowania punktów wykonano na bazie składającej się z trzech punktów (rys. 2), których współrzędne w układzie lokalnym wyznaczono metodą statyczną z dokładnością ± 2 mm. Następnie antenę odbiornika bazowego ustawiono nad punktem AGH-1, zaś antenę drugiego odbiornika ustawiano wielokrotnie na statywach nad punktami 104 i 1040, za każdym razem wykonując centrowanie za pomocą pionowników optycznych. Obserwacje trwały 5-10 epok. Uzyskane zbiory współrzędnych wykorzystano do obliczenia odchyłeń standardowych na podstawie rozproszenia współrzędnych uzyskanych metodą RT i różnic współrzędnych z metody RT i metody statycznej (tabela 2). Pierwsze z wymienionych odchyłeń umieszczono w górnym, a drugie – w dolnym wierszu dotyczącym każdego punktu.

Numer punktu	Odchylenia standardowe [mm]			
	σ_x	σ_y	σ_p	σ_z
104	1,0	1,5	1,8	2,7
	2,0	1,6	2,6	5,9
1040	1,2	2,3	2,6	5,1
	3,5	2,2	4,1	18,2

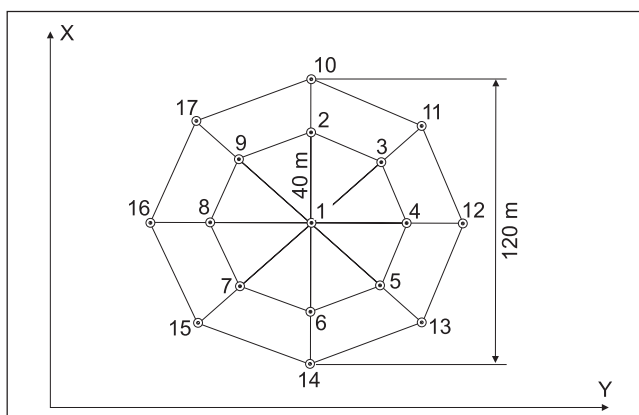
Tabela 2



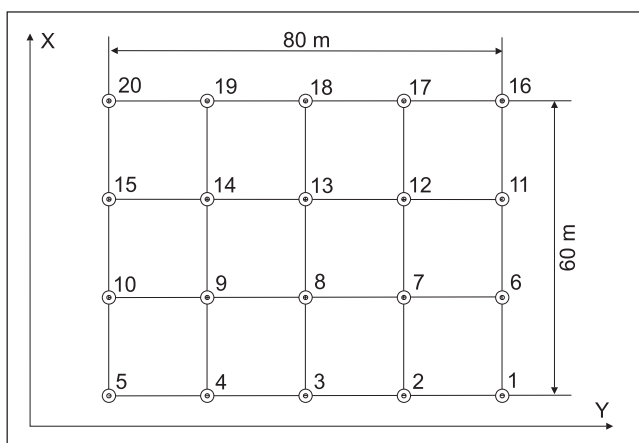
Rys. 2

Przeprowadzony eksperyment nie wykazał zależności między dokładnością wyznaczania współrzędnych a odległością między odbiornikami, zaś obliczone dwiema drogami odchylenia standardowe sytuacyjnego pozycjonowania punktu są zawarte w granicach od 1,8 do 4,1 mm. Należy tu jednak zaznaczyć, że obserwacje w czasie rzeczywistym na obu punktach wykonywano w krótkim interwale czasowym, a więc przy tych samych konstelacjach satelitów i tych samych warunkach obserwacji.

Weryfikację dokładnościową tyczenia metodą RT GPS przedstawiono na przykładzie dwóch obiektów testowych (rys. 3 i 4). Współrzędne utrwalonych w terenie punktów odniesienia wyznaczono metodą statyczną, zaś punktów reprezentujących obiekty – metodą klasyczną (z wykorzystaniem precyzyjnego tachimetru elektronicznego). Dokładność wyznaczenia położenia wymienionych punktów zawarta jest w przedziale 1-2 mm. Otrzymane z wyrównania współrzędne punktów potraktowano jako współrzędne projektowane i wprowadzono je do pamięci kontrolera odbiornika ruchomego, a następnie wykorzystano je w procesie tyczenia. W przypadku pierwszego obiektu stację bazową usytuowano w odległości 200 m od punktu 10 na kierunku 14-10. Anteny odbiornika stacjonarnego i ruchomego ustawiano na statywach, przy czym w tym drugim przypadku antenę przesuwno na spodarce do momentu uzyskania współrzędnych projektowanych. Następnie, korzystając z pionowni-



Rys. 3



Rys. 4

Numer punktu	Odchyłki [mm]		
	Δx	Δy	Δl
1	4,6	0,1	4,6
2	3,4	2,4	4,2
3	1,4	-4,2	4,4
4	3,8	5,2	6,4
5	5,0	-6,5	8,2
6	0,5	3,7	3,8
7	6,8	1,7	7,0
8	4,5	0,2	4,5
9	-8,6	2,3	8,9
10	4,7	3,6	5,9
11	-2,8	7,0	7,5
12	-6,7	-2,0	7,0
13	-8,1	-0,4	8,1
14	2,2	0,0	2,3
15	4,2	5,6	7,0
16	2,5	6,1	6,5
17	0,8	5,1	5,2
Średnia kwadrat.	5 mm	4 mm	6 mm

Tabela 3

ka optycznego, wyznaczano składowe odchylenie punktu wytyczonego metodą RT od punktu utrwalonego wcześniej. Uzyskane odchyłki oraz ich uśrednione wartości zestawiono w tabeli 3.

Zestawione w tabeli 3 wyniki pozwalają stwierdzić, że tyczenie metodą RT GPS można wykonać z dokładnością rzędu ± 6 mm. Jest więc ona gorsza od uzyskanej w pierwszym doświadczeniu, co wytłumaczyć można dłuższym czasem trwania tyczenia oraz wpływami błędów czynności pomocniczych. W tej sytuacji dokonano jeszcze sprawdzenia zgodności kształtu i wymiarów obiektu zrealizowanego za pomocą tachimetru z obiektem zrealizowanym przy użyciu odbiornika GPS. Sprawdzenie polegało na wykonaniu transformacji izometrycznej jednego układu współrzędnych na drugi i obliczeniu średniego błędu dopasowania punktów tyczonych. Uzyskaną dokładność dopasowania charakteryzuje wielkość $\pm 3,9$ mm.

Tyczenie punktów drugiego obiektu (rys. 4) wykonano przy ustawieniu odbiornika bazowego kolejno na punktach odniesienia odległych od obiektu tyczonego o: 400 m, 850 m, 1200m. Tyczenie prowadzono, ustawiając antenę odbiornika ruchomego nad punktem za pomocą tyczki zaopatrzonej w uchwyt służący do zamocowania kontrolera. Wytyczone punkty zaznaczano na głowicy znaku i określano składowe ich odchylenia od znaków pierwszych. Średnie kwadratyczne tych odchyłek obliczone na podstawie odchyłek wszystkich 20 punktów zestawiono w tabeli 4.

Na podstawie wyników zestawionych w tabeli 4 można stwierdzić, że dokładność tyczenia punktów przy ustawieniu anteny na tycze jest nieznacznie niższa niż przy korzystaniu ze statywu, a jednocześnie maleje ona w miarę zwiększania odległości pomiędzy stacją bazową i ruchomą, lecz nie przekracza wielkości ± 10 mm.

Odchyłki [mm]	Odbiorniki bazowe		
	400 m	850 m	1200 m
σ_x	4,3	5,4	5,9
σ_y	4,8	6,4	8,0
σ_p	6,4	8,4	9,9
$\sigma_{p\ sr}$	± 8 mm		

Tabela 4

● Pomiary inwentaryzacyjne

Pomiar szczegółów sytuacyjnych może być obecnie wykonany zarówno metodami klasycznymi, jak i RT GPS. Sygnały satelitarne i obliczone współrzędne rejestrowane w pamięci kontrolera można ponownie wykorzystać do obliczenia współrzędnych punktów w trybie *postprocessingu*. Dla zbadania rzeczywistej dokładności wyznaczenia współrzędnych punktów tyczonych wykonano pomiary doświadczalne na obiekcie testowym „Błonia” (rys. 5). Najpierw, korzystając z metody statycznej GPS i metody klasycznej z użyciem tachimetru, wykonano obserwacje sieci w 4 niezależnych cyklach pomiarowych. Wyniki obserwacji liniowo-kątowych i satelitarnych poddano wyrównaniu, a następnie obliczono współrzędne wszystkich punktów. Do dalszych opracowań wykorzystano uśrednione współrzędne punktów ze wszystkich cykli pomiarowych. Dokładność wyznaczenia ocenia się na ± 2 mm.

Pomiary RT GPS wykonano trzykrotnie przy pełnym ulistnieniu drzew i dwukrotnie po opadnięciu liści. Punktami odniesienia, na których ustawiano stację bazową były: AGH0, 101, 103, 105. Antenę odbiornika ruchomego ustawiano na statywach centrowanych nad punktami obserwowanymi, aby wyeliminować błędy występujące przy korzystaniu z tyczki. W ramach pomiarów wyznaczano łącznie 629 wektorów. Dla 25 (4%) z nich nie udało się rozwiązać nieoznaczoności, a dla 34 (5-6%) prawdopodobieństwo uzyskania poprawnego rozwiązania wyniosło 99,9%.

Na podstawie obszernych materiałów obserwacyjnych uzyskanych na obiekcie testowym „Błonia” przeprowadzono analizę dokładności pozycjonowania punktów RT GPS. Podstawą prowadzonych analiz są:

- współrzędne punktów otrzymane z kilku- lub kilkunastokrotnie powtarzanych pomiarów RT GPS,
- różnice współrzędnych punktów pomiędzy wartościami ustalonymi metodami klasycznymi i wartościami uzyskanymi z kolejnych pomiarów RT GPS.

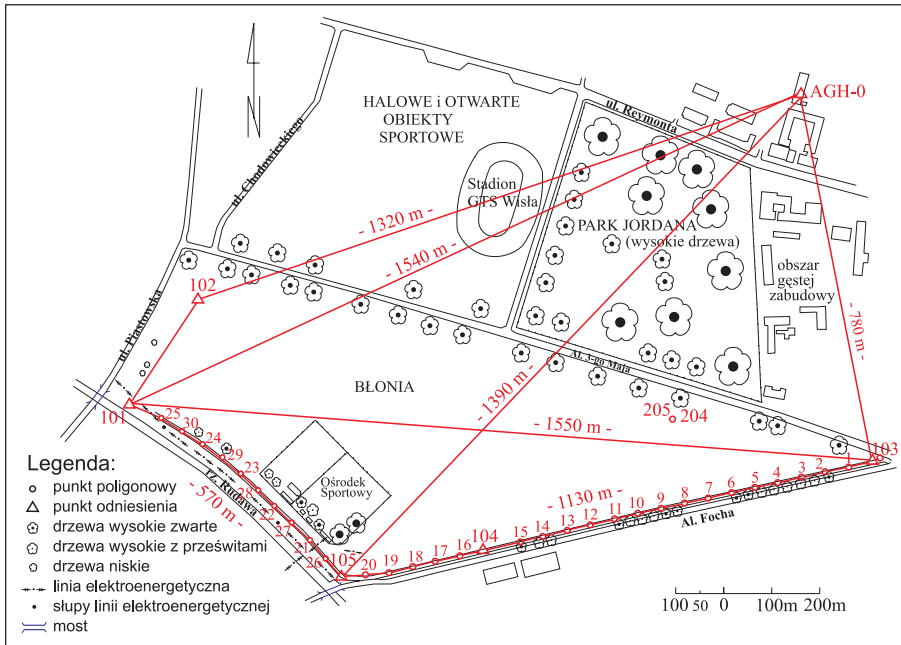
W pierwszym przypadku rozproszenie współrzędnych świadczy o niedokładności wewnętrznej metody satelitarnej, a parametrem określającym tę niedokładność jest odchylenie standar-

Stan drzew	Odchylenia standardowe [mm]		
	Z rozproszenia współrzędnych	Na podstawie różnic $\Delta x, \Delta y$	
		Z uwzględnieniem czynnika systematycznego	Po wyeliminowaniu czynnika systematycznego
Ulistnione	10,3	11,7	10,0
Bez liści	6,4	6,7	6,1

Tabela 5

dowe pojedynczego spostrzeżenia. W drugim przypadku odchyłki $\Delta x, \Delta y$ utworzyły statystyczną próbę prostą oliczebności 35 obserwacji. Takie próby statystyczne zestawiono dla kolejnych punktów odniesienia, a każdą z nich poddano analizie w celu ustalenia, czy w próbie występuje czynnik systematyczny i obliczenia odchylenia standardowych. Analizy prowadzono oddzielnie dla pomiarów wykonywanych przy pełnym ulistnieniu drzew i dla pomiarów prowadzonych przy jego braku. Końcowe zgeneralizowane wyniki analiz zestawiono w tabeli 5.

Ponadto dla pomiarów prowadzonych przy pełnym ulistnieniu drzew wystąpiło wiele obserwacji odstających dla dwóch punktów odniesienia: AGH0 – 11 obserwacji, 105 – 7 obserwacji. W większości tych przypadków odbiornik satelitarne sygnali-



Rys. 5

zował trudności z rozwiązaniem nieoznaczoności. Choć były też przypadki sygnalizowania tych trudności na punktach, na których różnice Δx , Δy były mniejsze od 10 mm.

W podsumowaniu można stwierdzić, że wyznaczenie współrzędnych punktów metodą RT w miejscach występowania przeszkód terenowych obarczone jest ryzykiem popełnienia błędów grubych i systematycznych.

● Wyznaczanie współrzędnych punktów osnów geodezyjnych

Wprawdzie obecnie do wyznaczania współrzędnych punktów osnów geodezyjnych stosuje się jedynie metodę statyczną GPS z *postprocessingiem*, to jednak celowe wydaje się wykorzystanie w tym zakresie także metody RT GPS. Już z porównania współrzędnych wyznaczonych metodą klasyczną i metodą RT GPS wynika, że przy braku ulistnienia drzew istnieje możliwość wyznaczenia współrzędnych punktów z dokładnością rzędu ± 6 mm, przy zachowaniu jednorodności dokładnościowej na znacznym obszarze. W naszych doświadczeniach to stwierdzenie jest zasadne przy odległościach odbiornika bazowego i ruchomego do 1500 m.

W kolejnym doświadczeniu podjęto próbę wyznaczenia współrzędnych punktów usytuowanych wzdłuż 32-kilometrowego odcinka linii kolejowej w bardzo trudnych warunkach terenowych przy występowaniu słupów trakcji elektrycznej oraz wysokich drzew. W wielu miejscach linia kolejowa przebiega w przecinkach leśnych.

Bazę testową stanowią trzypunktowe gniazda usytuowane wzdłuż linii kolejowej w odległościach 2-3 km. Punkty w gniazdach oddalone są od siebie o 200-300 m. Pomiedzy gniazdami założono ciągi poligonowe z punktami utrwalonymi blisko torów w wzajemnych odległościach 200-300 m. Łącznie bazę testową tworzą



Rys. 6

152 punkty. Punkty w gniazdach (o numerach 1-30) mają wyznaczone współrzędne metodą statyczną z dowiązaniem do dwóch punktów osnowy państwowej POLREF.

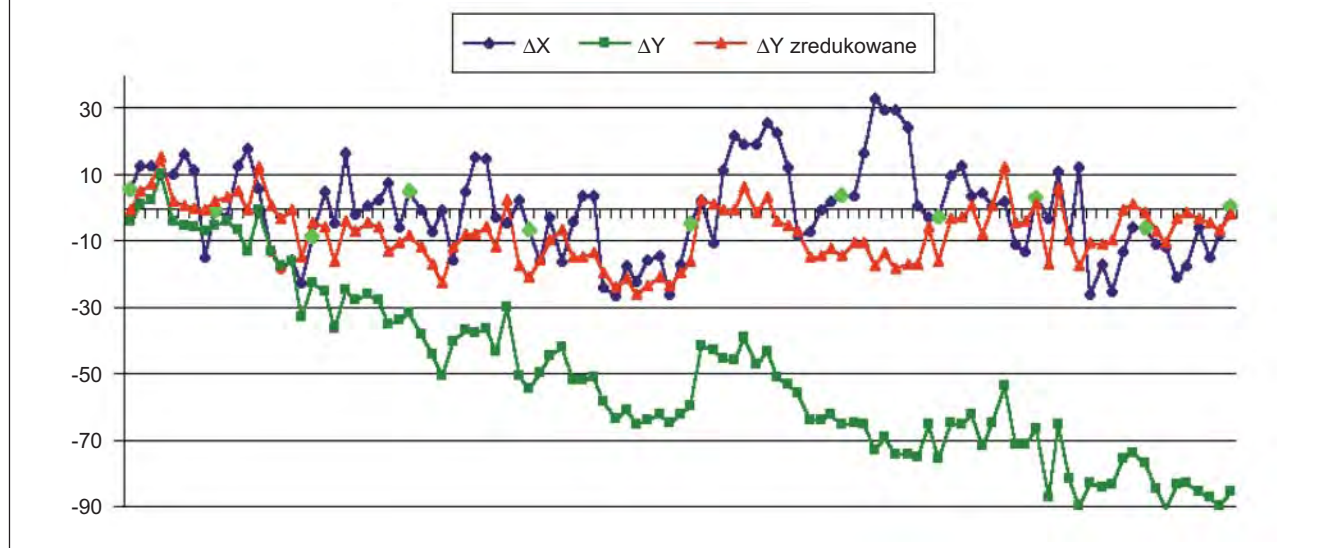
Pomiarami doświadczalnymi metodą RT GPS objęto wszystkie 152 punkty utrwalone wzdłuż linii kolejowej. Obserwacje na tych punktach prowadzono przy użyciu dwóch odbiorników według następującej procedury (rys. 6). Odbiornik A traktowany jako bazy ustawiono na punkcie o znanych współrzędnych w układzie WGS-84. Współrzędne te wprowadzono do pamięci kontrolera. Odbiornik B przemieszczano aż do punktu znajdującego się na granicy łączności radiowej z odbiornikiem A. Wówczas odbiornik przemieszczany B pozostawał na tym punkcie i stawał się odbiornikiem bazowym. Współrzędne odbiornika bazowego przyjmowano z obserwacji metodą RT GPS. Następnie odbiornik A odgrywał rolę odbiornika ruchomego i był ustawiany na kolejnych punktach aż do granicy łączności radio-

Wówczas odbiornik przemieszczany B pozostawał na tym punkcie i stawał się odbiornikiem bazowym. Współrzędne odbiornika bazowego przyjmowano z obserwacji metodą RT GPS. Następnie odbiornik A odgrywał rolę odbiornika ruchomego i był ustawiany na kolejnych punktach aż do granicy łączności radio-

Nr	ΔX [mm]	ΔY [mm]	ΔY_{red} [mm]	ΔH [mm]
1	0	3	0	0
2	-15	2	4	4
3	30	-3	0	-8
4	-7	-4	4	-5
5	-54	-29	-20	41
6	-4	0	10	13
7	-2	-18	-3	25
8	-2	-22	-5	20
9	-7	-31	-14	11
10	5	-32	-8	40
11	12	-42	-17	19
12	-2	-41	-15	32
13	-8	-53	-19	30
14	-15	-50	-15	36
15	-9	-53	-17	34
16	-8	-50	-18	36
17	-4	-49	-7	20
18	12	-46	-2	18
19	6	-68	-16	15
20	8	-66	-14	28
21	5	-66	-12	26
22	-9	-80	-19	23
23	3	-68	-7	28
24	1	-65	-3	18
25	-4	-78	-9	30
26	-6	-78	-9	36
27	-6	-47	-9	16
28	-9	-78	-3	24
29	-10	-80	-3	36
30	-8	-89	-12	26
31	-4	-86	-2	4
32	-17	-90	-5	22
33	11	-90	2	28

Tabela 6

Ekstrema w [mm]: $\Delta Y = [-90,10]$, $\Delta X = [-26,33]$, $\Delta Y_z = [-26,15]$



Rys. 7

wej. Takie postępowanie stosowano na całym 32-kilometrowym odcinku linii, nie korzystając z dodatkowych nawiązań. Punkty znajdujące się w gniazdach mają więc współrzędne wyznaczone metodą statyczną (w trybie *postprocessingu*) i metodą RT GPS. Różnice tych współrzędnych zestawiono w tabeli 6. Przy obliczeniu wartości odchyłeń standardowych nie brano pod uwagę obserwacji wykonanych na punktach 3 i 5 (brak rozwiązania nieoznaczoności w trakcie kontrolnego *postprocessingu*), traktując je jako odstające. Wartości odchyłeń standardowych obliczonych na podstawie pozostałych różnic współrzędnych wynoszą:

$$\sigma_x = \pm 8,2 \text{ mm}, \sigma_y = \pm 10,8 \text{ mm}, \sigma_p = \pm 13,6 \text{ mm}, \sigma_H = \pm 25,0 \text{ mm};$$

zaś po wyeliminowaniu czynnika systematycznego:

$$\sigma'_x = \pm 7,3 \text{ mm}, \sigma'_y = \pm 7,5 \text{ mm}, \sigma'_p = \pm 10,5 \text{ mm}, \sigma'_H = \pm 11,1 \text{ mm}.$$

Uwidocznione wpływy systematyczne ($\mu_x = +3 \text{ mm}$, $\mu_y = +8 \text{ mm}$, $\mu_H = -22 \text{ mm}$) mogą wynikać między innymi z różnych rozwiązań sprzętowo-programowych zastosowanych w pomiarach. Przeprowadzone doświadczenie pokazuje, że współrzędne punktów ciągu o długości 32 km nawiązanego jednopunktowo można przy użyciu metody RT GPS wyznaczyć z dokładnością rzędu $\pm 20\text{-}30 \text{ mm}$.

Na omawianym obiekcie testowym współrzędne punktów pomiędzy pomiarami wyznaczono również metodą poligonową za pomocą tachimetru, z dowiązaniem do punktów o współrzędnych wyznaczonych metodą statyczną GPS. Różnice pomiędzy współrzędnymi punktów uzyskanymi metodą klasyczną i metodą RT GPS przedstawiono w postaci wykresu na rys. 7. Po wyeliminowaniu czynnika systematycznego w różnicach ΔY (wyznaczono współczynniki skali dla opracowania sieci statycznej i z pomiaru RT i „przeskalowano” pomiar RT), wszystkie odchyłki ΔY_{red} mieszczą się w przedziale od -26 mm do $+15 \text{ mm}$, zaś różnice ΔX w przedziale od -26 mm do $+33 \text{ mm}$. Uzyskane wyniki są kolejnym potwierdzeniem dużych możliwości dokładnościowych pozycjonowania punktów metodą RT GPS. W rozwią-

zywaniu wielu zagadnień inżynierskich taka dokładność będzie wystarczająca, zaś koszt pomiaru w porównaniu z kosztem metody statycznej GPS i metod klasycznych będzie znacznie niższy.

Uwagi końcowe

W niniejszym opracowaniu przybliżono jedynie niektóre zastosowania metody RT GPS. W Zakładzie prowadzone są również inne prace nad jej wykorzystaniem do:

- inwentaryzacji torów kolejowych dla potrzeb ich regulacji,
 - wyznaczania szybkozmiennych deformacji budowli wysmukłych,
 - obsługi wznoszenia wielokondygnacyjnych budynków i budowli wieżowych,
 - szybkiego wyznaczania deformacji torów na terenach eksploatacji górniczej,
 - wyznaczania kształtu i obliczania objętości zwałowisk.
- Podjęto również badania nad możliwością zwiększenia dokładności pozycjonowania punktów metodą RT GPS.

Prof. Jan Gocał i dr Andrzej Uznański są pracownikami Zakładu Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH

Literatura:

- Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego Nr 9T12E00610 pt. „Integracja klasycznych i satelitarnych technik pomiarowych w geodezycznej realizacji procesów inwestycyjnych” KBN 1996-1999, kierownik Jan Gocał;*
- Uznański A.**, *Ocena przydatności techniki RTK GPS w zastosowaniach inżynierskich*, Rozprawa doktorska, Kraków, AGH, 1999;
- Gocał J., Uznański A.**, *Ocena dokładności metod RS i RTK w aspekcie ich przydatności w pomiarach realizacyjnych*, AGH Półrocznik Geodezja t. 4, z. 1, 1998;
- Gabrys B., Gorczyca J., Uznański A.**, *Badanie deformacji torów bezстыkowych na terenach eksploatacji górniczej z wykorzystaniem techniki satelitarnej GPS*, AGH Półrocznik Geodezja t. 5, z. 1, 1999;
- Balut A., Strach M.**, *Metoda RT GPS w geodezycznej obsłudze wznoszenia i eksploatacji budowli wieżowych*, AGH Półrocznik Geodezja t. 5, z. 2, 1999;
- Gogoliński W., Uznański A.**, *Badanie geometrii torów kolejowych techniką RTK GPS*, AGH Półrocznik t. 5, z. 1, 1999.