

LUBOMIR W. BARAN, STANISŁAW OSZCZAK, JANUSZ B. ZIELIŃSKI

Wykorzystanie technik kosmicznych w geodezji i nawigacji w Polsce

Wstęp

W 2007 roku minęło 50 lat od nadzwyczaj ważnego wydarzenia w historii nauki i techniki, jakim było umieszczenie na okołoziemskiej orbicie pierwszego sztucznego satelity – Sputnika o numerze 1. Mimo że start pierwszego Sputnika, a potem starty następných satelitów radzieckich i amerykańskich stanowiły efekt współzawodnictwa technicznego między dwoma, wrogimi wówczas, blokami militarnymi i były często wykorzystywane w celach propagandowych, to obecnie, po ponad 50 latach pokojowego stosowania efektów badań kosmicznych, nie można mieć wątpliwości, że data 4 października 1957 roku słusznie uznawana jest za początek tzw. ery kosmicznej.

Współzawodniczące między sobą dwa wielkie mocarstwa bardzo szybko zrozumiały, że badania kosmiczne nie mogą być prowadzone w izolacji i że rozwój tych badań nie jest możliwy bez szerokiej międzynarodowej współpracy. Widowym przejawem ugruntowania się takiej świadomości było utworzenie światowej sieci stacji śledzących sztuczne satelity Ziemi. Stacje te rozmieszczone na terytorium wielu krajów, na wszystkich kontynentach, prowadziły obserwacje zarówno satelitów radzieckich, jak i amerykańskich. Stacje takie powstawały głównie przy naukowych placówkach geodezyjnych, geofizycznych i w obserwatoriach astronomicznych. Geodezja bowiem, obok geofizyki i astronomii, była jedną z pierwszych dyscyplin naukowych, która dostrzegła w technice kosmicznej poważne perspektywy rozwoju badań naszej planety oraz otaczającej ją okołoziemskiej przestrzeni. W Polsce, na przełomie lat 50. i 60., utworzono 11 stacji obserwacji sztucznych satelitów Ziemi.

Z punktu widzenia możliwości współczesnych technik pomiarowych, dokładności pierwszych obserwacji radiowych, a zwłaszcza obserwacji wizualnych sztucznych satelitów, tych sprzed 50 lat, były niewielkie. Dość powiedzieć, że wykorzystując obserwacje wizualne z wielu stacji i stosując złożoną procedurę obliczeniową, można było wyznaczyć położenie punktu na powierzchni Ziemi z dokładnością rzędu 100 m. Porównując tę wartość z obecnie uzyskiwanymi dokładnościami, wyrażającymi się w pojedynczych milimetrach, trudno uwierzyć, że „stare” metody obserwacyjne mogą mieć jakikolwiek związek z uzyskiwaną obecnie precyzją wyznaczeń położenia punktów. A jednak związek

taki istnieje. Wyniki pierwszych obserwacji, umożliwiając weryfikację teorii ruchu sztucznych satelitów, stanowiły swojego rodzaju krok startowy w trwającym nadal procesie iteracyjnym doskonalenia tej teorii. Obecny stan rozwoju teorii pozwala np. na wyznaczenie chwilowego położenia obiektu, odległego od nas o ponad 20 000 km z precyzją rzędu 10 cm. Przy takiej precyzji określania położenia punktów na orbicie, a tym bardziej przy kilkumilimetrowych dokładnościach wyznaczania pozycji na powierzchni Ziemi, coraz większego znaczenia nabiera problem doskonalenia ziemskiego systemu odniesienia oraz jego powiązania z systemem niebieskim. Ustalenie definicji oraz praktyczna realizacja obu wymienionych systemów odniesienia stanowi obecnie fundamentalne zadanie zarówno geodezji, jak i astronomii.

Układy odniesienia

Aby móc organizować sobie życie w czterowymiarowej czasoprzestrzeni, którą dała nam do dyspozycji natura, musimy ustawicznie lokalizować wszelkiego rodzaju obiekty, naturalne czy też sztucznie wytworzone, tak w przestrzeni, jak i w czasie. Geodezja zajmuje się wyznaczaniem pozycji obiektów nieruchomych, bądź pozornie nieruchomych, nawigacja odpowiedzialna jest za wyznaczanie pozycji ciał w ruchu. Dla wyznaczenia pozycji czegokolwiek potrzebny jest układ odniesienia. Dlatego pierwszym zadaniem geodezji, niezbędnym także dla nawigacji, jest wyznaczenie układu odniesienia.

Pojęcie układu odniesienia, jakie znamy z fizyki, komplikuje się w zastosowaniu do dynamicznego ciała, jakim jest Ziemia i precyzyjne definicje są stale przedmiotem teoretycznych dyskusji (Kryński, Rogowski 2004). Chodzi jednak zawsze o przypisanie punktowi współrzędnych przestrzennych i czasu, umożliwiających jego lokalizację względem innych punktów i całego układu.

Do atrybutów układu odniesienia, poza początkiem układu, skalą, orientacją i zmiennością w czasie, należą także: dokładność, dostępność, jednorodność.

Jeszcze niedawno do realizacji celów praktycznych stosowane były głównie lokalne układy odniesienia, ograniczone najwyżej do obszaru jednego kraju. Nawet czas był odmierzany przez jeden zegar, ustawiany na środku miasta; stanowił on wzorzec do wyznaczania czasu w tym mieście. Globalnymi systemami i układami odniesienia interesowali się głównie przedstawiciele nauki.

Dzięki technikom kosmicznym sytuacja ta uległa radykalnej zmianie. Globalny układ odniesienia jest obecnie w powszechnym użyciu i jego utrzymywanie stanowi ważny zakres interdyscyplinarnych badań. Postęp technologiczny i stawiane wymagania dokładnościowe wywołują konieczność ciągłego doskonalenia definicji oraz modeli fizycznych i matematycznych. Definicje te dotyczą:

- jednostek miar, a więc są związane z metrologią,
- ruchu Ziemi w przestrzeni – mają więc związek z astronomią,

- procesów na powierzchni i we wnętrzu Ziemi, co jest przedmiotem badań nauk o Ziemi.

Charakter niniejszego artykułu nie pozwala na szczegółową prezentację stosowanych definicji oraz modeli. O złożoności problematyki może świadczyć przykład ustalania początku globalnego układu ziemskiego. Teoretycznie pokrywa się on ze środkiem mas Ziemi. Oczywiście nie mamy bezpośredniego dostępu do tego punktu. O jego położeniu w stosunku do punktów na powierzchni Ziemi wnioskujemy na podstawie obserwacji ruchu sztucznych satelitów, który to ruch jest funkcją pola grawitacyjnego Ziemi. Tak więc do określenia początku układu odniesienia konieczny jest matematyczny model tego pola. Pole grawitacyjne jest jednak znane z ograniczoną dokładnością. Poprawienie tej dokładności jest jednym z ważnych zadań współczesnej geodezji.

Funkcją pola grawitacyjnego jest także kształt Ziemi, rozumiany jako kształt zerowej powierzchni poziomej (poziom morza), zwanej geoidą. Przyjęty sposób wyznaczania wysokości punktów na powierzchni Ziemi, liczonej od poziomu morza, wymaga znajomości kształtu geoidy. Pole grawitacyjne ma związek z rozkładem mas Ziemi, które ulegają zmianom np. zmianom sezonowym. Są one powodem zmian pola grawitacyjnego oraz kształtu geoidy. Wykrywanie i monitorowanie tych zmian to kolejne ważne zadanie geodezji.

Nie mniej złożony charakter ma definicja osi globalnego układu odniesienia. Dążąc do nadania układowi stabilności, przyjmujemy, że jedna z jego osi pokrywa się z osią obrotu Ziemi. Ta oś także nie jest stała. Zmienia ona swój kierunek, zarówno w przestrzeni zewnętrznej, jak też w bryle Ziemi. Wyznaczanie tych zmian, a także zmian prędkości obrotu Ziemi jest ważnym obszarem badań, wiążących geodezję z astronomią (Brzeziński, 2004; Kołaczek, 1989, 1993).

Jeszcze do niedawna miarę upływu czasu stanowił obrót Ziemi dookoła jej osi, czego pozostałością jest podział doby na 86 400 sekund. Obecnie sekunda jest definiowana na podstawie bardziej stabilnego wzorca. Jest nim częstotliwość własna atomu cezu 133. Przedmiotem badań stało się w związku z tym monitorowanie rzeczywistej prędkości obrotu Ziemi w stosunku do upływu tak zdefiniowanego czasu atomowego (Kryński, 2004).

Skala globalnego układu odniesienia zależy od definicji jednostki długości, która jest związana z prędkością światła. Aby przenieść tę jednostkę na obszar globu, znów konieczne jest zastosowanie sztucznych satelitów, a więc i w tym przypadku konieczne jest uwzględnienie pola grawitacyjnego.

Przed rozpoczęciem ery kosmicznej praktycznie nie było możliwe zapewnienie dostępności i jednorodności układu odniesienia w skali globalnej. Tradycyjne metody naziemnych pomiarów geodezyjnych były tak złożone, a przy tym kosztowne, że zapewnienie tych samych wartości parametrów układu w różnych krajach, nie mówiąc o różnych kontynentach, było niewykonalne. Wprowadzenie technik satelitarnych umożliwiło

rozwiązanie tego problemu. Doskonale widać to na przykładzie czasu. Posiadacz odbiornika GPS, znajdujący się w dowolnym miejscu na globie ziemskim, ma dostęp do jednolitej skali czasu, z dokładnością rzędu mikrosekundy.

Osiągnięcie obecnego poziomu dokładności wyznaczania pozycji i czasu w jednolitym globalnym układzie odniesienia następuje w ślad za rozwojem teorii oraz powstawaniem nowych satelitarnych technologii pomiarowych. W ciągu lat wprowadzane były coraz to nowe techniki. Obecnie najważniejszym narzędziem geodezji satelitarnej jest system GPS. Globalny System Pozycjonowania – GPS (*Global Positioning System*) został utworzony przez Departament Obrony USA. Pełną operacyjność uzyskał w 1995 roku. Do systemu należy obecnie (sierpień 2006) 29 satelitów, rozmieszczonych na sześciu prawie kołowych orbitach, na wysokości około 20 200 km. Płaszczyzny orbit satelitów są nachylone do płaszczyzny równika pod kątem 55° . Każdy satelita systemu okrąża Ziemię dwa razy w ciągu doby. Dokładność autonomicznego wyznaczenia pozycji wynosi 10-15 m w poziomie i ok. 15-20 m w składowej pionowej.

Z inicjatywy Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki oraz Międzynarodowej Unii Astronomicznej zostały utworzone specjalne instytucje badawcze, zajmujące się monitorowaniem i analizą zjawisk związanych z globalnym układem odniesienia. Najważniejsza rola przypada w tym zakresie Międzynarodowej Służbie Ruchu Obrotowego Ziemi i Systemów Odniesienia – IERS (*International Earth Rotation and Reference System Service*). IERS zajmuje się analizą danych dostarczanych przez międzynarodowe służby obserwacyjne, wykorzystujące następujące techniki kosmiczne:

- laserowe pomiary odległości do satelity – SLR (*Satellite Laser Ranging*),
- laserowe pomiary odległości do Księżyca – LLR (*Lunar Laser Ranging*),
- globalne nawigacyjne systemy pozycjonowania – GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), do których należą: amerykański GPS, rosyjski GLONASS i europejski Galileo (w stadium tworzenia),
- francuski system kontroli orbit satelitów – DORIS (*Doppler Orbitography by Radio-positioning Integrated on Satellite*).

Ważnym wynikiem analiz prowadzonych przez IERS są publikacje parametrów definiujących Międzynarodowy Ziemi System Odniesienia – ITRS (*International Terrestrial Reference System*) oraz Międzynarodowy Ziemi Układ Odniesienia – ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), a także relacje między ITRS a Międzynarodowym Niebieskim Systemem Odniesienia – ICRS (*International Celestial Reference System*).

IERS, wbrew temu, co sugeruje nazwa – „Service”, jest instytucją badawczą, działającą w ramach upoważnień Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki oraz Międzynarodowej Unii Astronomicznej.

Z inicjatywy Międzynarodowej Asocjacji Geodezji formę podobnych „służb” przybrały międzynarodowe struktury badawcze, zajmujące się zarówno prowadzeniem obser-

wacji za pomocą poszczególnych technik kosmicznych, które stosuje IERS, jak też wykorzystaniem wyników tych obserwacji do celów naukowych oraz do realizacji różnorodnych zadań praktycznych. Do „służb” tego rodzaju należą:

- IGS – *International GNSS Service*,
- ILRS – *International Laser Ranging Service*,
- IDS – *International DORIS Service*,
- IVS – *International VLBI Service*.

Międzynarodowa Służba Ruchu Obrotowego Ziemi i Systemów Odniesienia w swoich opracowaniach wyznacza zarówno parametry ruchu obrotowego, jak też zmiany położenia stacji prowadzących obserwacje. Pozwala to śledzić ruch pojedynczych punktów, albo całych bloków, w stosunku do zdefiniowanego układu odniesienia. Dzięki temu można obserwować i badać deformacje całego globu ziemskiego, jak też jego części, aż do niewielkich regionów aktywnych geodynamicznie, jak np. rejon Morza Śródziemnego czy rejon Półwyspu Arabskiego. Tą drogą uzyskano empiryczne potwierdzenie hipotezy dotyczącej tektoniki płyt. Przewidywała ona, jak wiadomo, przemieszczanie się kontynentów. Obecnie ruchy kontynentów potrafimy mierzyć z bardzo wysoką precyzją. Wiemy już np., że kontynent amerykański oddala się od Europy z prędkością 10-15 mm w ciągu roku. Wiemy też, jakie są przemieszczenia względne innych kontynentów.

Ważną rolę w geodezji i nawigacji, a także w wielu innych dziedzinach nauki i techniki spełnia Międzynarodowa Służba Czasu, koordynowana w latach 1972-1988 przez Międzynarodowe Biuro Czasu – BIH (*Bureau International de l'Heure*), a od 1988 roku przez Międzynarodowe Biuro Wag i Miar – BIPM (*Bureau International des Poids et Mesures*). Służba ta bazuje – na znajdujących się w różnych krajach – laboratoriach czasu, wyposażonych w zegary atomowe. Laboratoria te porównują między sobą własne skale czasu, wykorzystując do tego celu technikę satelitarną. Wypadkowa wskazań ponad 200 zsynchronizowanych w ten sposób zegarów atomowych tworzy tzw. Międzynarodowy Czas Atomowy – TAI (*Temps Atomique International*) (Kołaczek, 1989).

Niezależnie od międzynarodowej skali czasu – TAI, w powszechnym użyciu, zwłaszcza w geodezji i nawigacji, jest obecnie czas GPS – GPST (*GPS Time*). Podstawą skali tego czasu są atomowe zegary pokładowe, umieszczone na satelitach GPS, oraz zegary atomowe US Naval Observatory. Różnica między Międzynarodowym Czasem Atomowym (TAI) a czasem GPS wynosi

$$\text{TAI} - \text{GPST} = 19 \text{ s} + C_0,$$

gdzie C_0 jest zmienną w czasie poprawką rzędu 10 ns, wynikającą z korzystania w obu systemach z różnych zegarów atomowych (Kryński, 2004).

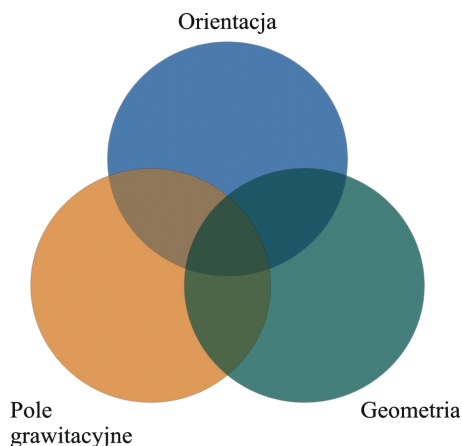
Badanie pola grawitacyjnego Ziemi nie przybrało jeszcze tak zorganizowanej formy jak badanie jej ruchu obrotowego oraz służba czasu. Już jednak pierwsze lata obecnego wieku zapowiadają prawdziwy przełom w tym zakresie, dzięki nowym satelitarnym tech-

nikom pomiarowym. Pierwszy etap wprowadzania owych nowych technik nastąpił w 2000 roku, po rozpoczęciu misji CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload*), a kolejny drugi etap – w 2002 roku, w związku z rozpoczęciem misji GRACE (*Gravity Recovery and Climat Experiment*). Obie te misje, a zwłaszcza misja GRACE, całkowicie zrewolucjonizowały metodykę badań pola grawitacyjnego Ziemi. Sprawily one, że tworzone obecnie modele geopotencjału – modele nowej generacji – są o rząd, a nawet o dwa rzędy dokładniejsze od tych, które powstały przed 2000 rokiem. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że o ile modele tworzone metodami klasycznymi wymagały korzystania z długich serii obserwacji nawet kilkudziesięciu satelitów poruszających się po różnych orbitach, o tyle w przypadku tworzenia modeli nowej generacji stosowane są wyniki obserwacji tylko jednego satelity (CHAMP), lub pary satelitów poruszających się po prawie tej samej orbicie (GRACE). W śledzeniu ruchu tych satelitów ważną rolę odgrywa globalny system pozycjonowania GPS. Dzięki umieszczeniu na pokładach satelitów zarówno CHAMP, jak i GRACE odbiorników GPS, śledzenie ich ruchu odbywa się z bezprecedensową dokładnością rzędu kilku centymetrów (Zieliński, 2004).

Porównanie miesięcznych rozwiązań modeli geopotencjału umożliwia badanie zmian pola grawitacyjnego w czasie, powodowanych przemieszczaniem się mas w wyniku zachodzących na globie procesów geofizycznych i klimatologicznych. Na podstawie dotychczas uzyskanych wyników stwierdzono sezonowość zmian pola grawitacyjnego, a także znaczną ich korelację z danymi hydrologicznymi. Wyznaczona amplituda rocznego cyklu zmian wysokości geoidy wynosi ok. 8 mm.

Obecnie prowadzone są prace nad łącznym wykorzystaniem danych z misji CHAMP/GRACE, pomiarów altimetrycznych oraz naziemnych pomiarów grawimetrycznych i mareograficznych do tworzenia jednorodnego globalnego modelu pola grawitacyjnego o dużej rozdzielczości i wysokiej dokładności. Taki model stanowiłby nowy globalny układ odniesienia przy tworzeniu modeli regionalnych, obejmujących np. obszar kontynentu lub obszar jednego kraju. Warto podkreślić, że wspomniana satelitarna technika pomiarowa – altimetria, pozwalająca śledzić zmiany kształtu oceanów, przybrała już charakter regularnej, globalnej służby. W trakcie przygotowań jest jeszcze jedna misja badania pola grawitacyjnego, wykorzystująca zupełnie nową technikę – gradiometrię – o kryptonimie GOCE. Jej realizacja posunie dokładność wyznaczenia modelu pola grawitacyjnego jeszcze o jeden krok naprzód (Zieliński et al. 2005).

Wytyczaniu i realizacji nowych projektów związanych z doskonaleniem układów odniesienia służby – zainicjowany przez Międzynarodową Asocjację Geodezji – program GGOS (*Global Geodetic Observing System*). Jego celem jest doskonalenie narzędzi i metod wyznaczania trzech fundamentalnych elementów układu odniesienia, tj. geometrii Ziemi, jej pola grawitacyjnego oraz ruchu obrotowego, a także ich zmian w czasie (ryc. 1).



Ryc. 1. Schemat pojęciowy elementów składowych układu odniesienia

Ważnym problemem do rozwiązania jest zapewnienie kompatybilności różnego rodzaju danych pomiarowych, jednorodności modeli i zasad wagowania oraz oceny dokładności rozwiązań.

Wkład Polski w tworzenie i uaktualnianie globalnego układu odniesienia wyraża się zarówno przez pracę obserwatoriów, jak też przez prace analityczne i teoretyczne. Do liczącej ok. 400 stacji światowej sieci Międzynarodowej Służby GNSS (IGS) zostały włączone trzy polskie obserwatoria:

- Obserwatorium Astrogeodynamiczne Centrum Badań Kosmicznych PAN w Borowcu,
- Obserwatorium Astronomiczno-Geodezyjne Politechniki Warszawskiej w Józefosławiu,
- Obserwatorium Satelitarne Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w LamkóWKu.

Obserwatorium Astrogeodynamiczne CBK PAN w Borowcu w ramach służby ILRS uczestniczy również w prowadzeniu laserowych pomiarów odległości do satelitów. Polska stacja mareograficzna Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej oraz CBK PAN we Władysławowie bierze udział w realizacji międzynarodowego programu badania zmian poziomu morza.

Dość znaczący udział w tworzeniu światowej skali czasu mają polskie laboratoria czasu. Obecnie działa w naszym kraju sieć 10 laboratoriów wyposażonych we wzorce atomowe. Ich koordynacją zajmuje się Główny Urząd Miar oraz CBK PAN. Polska sieć laboratoriów jest połączona za pomocą najnowszego systemu transmisji czasu z laboratoriami zachodnimi, koordynowanymi przez BIPM. Dzięki temu rozwiązaniu sieciowemu waga polskiego wkładu w światową skalę czasu jest porównywalna z wkładem krajów dysponujących wysoko zaawansowaną techniką, takich jak Niemcy i Francja. Precyzyjne odbiorniki sygnałów czasu GPS, konstruowane w CBK PAN, są przedmiotem eksportu do wielu laboratoriów zagranicznych.

Polskie zespoły badawcze wnoszą duży wkład w rozwój teorii układów odniesienia, a zwłaszcza w rozwój teorii ruchu obrotowego Ziemi. Zmiany ruchu bieguna mają sze-

roki zakres widmowy, od zmian wiekowych, dekadowych, poprzez sezonowe, subsezonowe, aż do szybkich oscylacji o okresach kilku godzin. Wykorzystanie do badań parametrów ruchu obrotowego Ziemi nowych technik satelitarnych oraz radiointerferometrii bardzo długich baz – VLBI umożliwiło wzrost dokładności ich wyznaczeń prawie o dwa rzędy wielkości. Pozwala to na wyznaczanie subsezonowych i szybkich oscylacji w ruchu obrotowym Ziemi oraz na badanie czasowych zmian wszystkich oscylacji i ich interpretację geofizyczną, czym zajmują się zespoły badawcze CBK PAN (Kołaczek, 1993; Kołaczek i Nastula, 2004; Kosek i Kołaczek, 1997).

Dużym międzynarodowym uznaniem cieszą się także prace teoretyczne z zakresu parametryzacji ruchu obrotowego Ziemi i modyfikacji równań tego ruchu. Dotyczą one w szczególności metody dekompozycji dwóch grup parametrów opisujących ruch bieguna oraz nutację, ścisłych formuł transformacji między ziemskim i niebieskim układem współrzędnych, a także udokładnienia klasycznego równania ruchu obrotowego Ziemi (Brzeziński, 2001; Brzeziński i Capitaine, 1993; Brzeziński, 2004; Brzeziński i in., 2004; Brzeziński i Kosek, 2004). Miarą międzynarodowego uznania wyników tych prac, które wniosły wkład w powstanie nowej teorii nutacji, jest przyznanie przez Unię Europejską w 2003 roku zespołowej Nagrody Kartezjusza. W gronie laureatów tej nagrody znalazł się prof. Aleksander Brzeziński z Centrum Badań Kosmicznych PAN.

Satelitarne sieci geodezyjne

Jak wiadomo, po to aby graficzna prezentacja pewnego obszaru Ziemi nie była zwykłym rysunkiem, lecz mapą, konieczne jest wyznaczenie, w określonym układzie odniesienia, położenia wszystkich szczegółów terenowych znajdujących się na tym obszarze. Fizyczną realizacją takiego układu jest zbiór wzajemnie powiązanych punktów, których położenie zostało wyznaczone z możliwie najwyższą dokładnością, za pomocą pomiarów geodezyjnych, astronomicznych i grawimetrycznych. Zbiór takich punktów tworzy sieć geodezyjną.

Do tworzenia sieci geodezyjnych stosowane były różne metody i różne technologie. Jedną z najbardziej znanych była metoda triangulacji. Metoda ta, zaproponowana przez holenderskiego geodetę Sneliusa w pierwszej połowie XVII wieku, przetrwała trzy stulecia i była stosowana w praktyce jeszcze w latach osiemdziesiątych XX wieku. W miarę postępu technologicznego pomiary kątów w sieciach triangulacyjnych były uzupełniane o pomiary długości boków za pomocą dalmierzy elektronicznych, a począwszy od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku, do zwiększenia dokładności sieci zaczęto wykorzystywać, w ograniczonym zakresie, pomiary satelitarne (obserwacje fotograficzne, pomiary dopplerowskie). Ten ostatni fakt nie wpłynął jednak na zmianę charakteru sieci geodezyjnych. W dalszym ciągu pozostawały one sieciami lokalnymi, ograniczonymi do obszaru jednego kraju lub co najwyżej kontynentu. Położenie punktów sieci w stosunku

do układu odniesienia określone było za pomocą dwóch współrzędnych, związanych z przyjętą tzw. elipsoidą odniesienia. Można zatem powiedzieć, że klasyczne sieci geodezyjne były lokalnymi sieciami dwuwymiarowymi. Każdemu punktowi takiej sieci lokalnej można wprawdzie przyporządkować trzecią wielkość, wyrażającą jego wysokość nad powierzchnią geoidy, ale wielkość ta nie ma bezpośredniego związku z układem odniesienia, względem którego zostało określone położenie punktów.

Epokowa rola technik satelitarnych w rozwoju geodezji polega na tym, że umożliwiły one zastąpienie lokalnych sieci dwuwymiarowych globalnymi sieciami trójwymiarowymi.

Wyniki ostatniego opracowania dwuwymiarowej sieci europejskiej (bez państw byłego bloku radzieckiego) zostały przedstawione na XIX Zgromadzeniu Ogólnym Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki w Vancouver w 1987 roku. Na podstawie tych wyników został utworzony europejski dwuwymiarowy układ odniesienia ED 87 (European Datum 1987). Układ ten nie znalazł już jednak zastosowania w praktyce (Baran, 1992). W czasie tego samego Zgromadzenia Ogólnego Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki w Vancouver postanowiono bowiem powołać specjalną podkomisję w ramach struktury organizacyjnej Międzynarodowej Asocjacji Geodezji (*International Association of Geodesy* – IAG), której zadaniem było utworzenie nowego trójwymiarowego układu odniesienia dla kontynentu europejskiego (*European Reference Frame* – EUREF). Podstawę do utworzenia tego układu miały stanowić wyniki wymienianych już wcześniej obserwacji satelitarnych: LLR (*Lunar Laser Ranging*), SLR (*Satellite Laser Ranging*), a także rezultaty pomiarów obiektów kosmicznych – kwazarów (technika *Very Long Baseline Interferometry* – VLBI). Wymienione techniki pomiarowe umożliwiały uzyskiwanie dokładności w określaniu pozycji rzędu 1-3 cm, przy odległościach między punktami rzędu 5000 km.

W końcu lat 80. obserwacje laserowe były prowadzone przez około 70 stacji, rozmieszczonych na różnych kontynentach. Jedną z nich była stacja Centrum Badań Kosmicznych PAN w Borowcu k. Poznania. Istniało również 20 stacji stosujących technikę VLBI. Jak wspomniano w poprzednim rozdziale, systematyczne obserwacje prowadzone przez stacje laserowe i stacje VLBI, w ramach Międzynarodowej Służby Ruchu Obrotowego Ziemi (*International Earth Rotation Service* – IERS), służyły zarówno do monitorowania ruchu obrotowego, jak też do precyzyjnego wyznaczania współrzędnych wszystkich stacji. Współrzędne te były określane w globalnym geocentrycznym układzie odniesienia ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*).

Położenia poszczególnych stacji światowej sieci IERS wskutek ruchu płyt kontynentalnych są zmienne w czasie i dlatego też ich współrzędne są odnoszone do określonej epoki. Na przykład, ITRF-89 oznacza, że geocentryczne współrzędne punktów sieci IERS zostały obliczone w układzie odniesienia związanym z epoką 1989.0. Zgodnie z postanowieniami Podkomisji EUREF oraz profesjonalnej organizacji CERCO (*Comité*

Europén de Responsables de la Cartographie Officielle) właśnie wymieniona wersja realizacji międzynarodowego systemu odniesienia ITRS (*International Terrestrial Reference System*), tj. ITRS-89, stanowiła podstawę do utworzenia europejskiego systemu odniesienia ETRS (*European Terrestrial Reference System*). Fizyczną realizacją tego systemu są współrzędne 35 europejskich stacji laserowych i VLBI, uczestniczących w globalnym rozwiązaniu ITRF na epokę 1989.0. Układ ETRF-89 jest zatem podzbiorem globalnego rozwiązania ITRF-89.

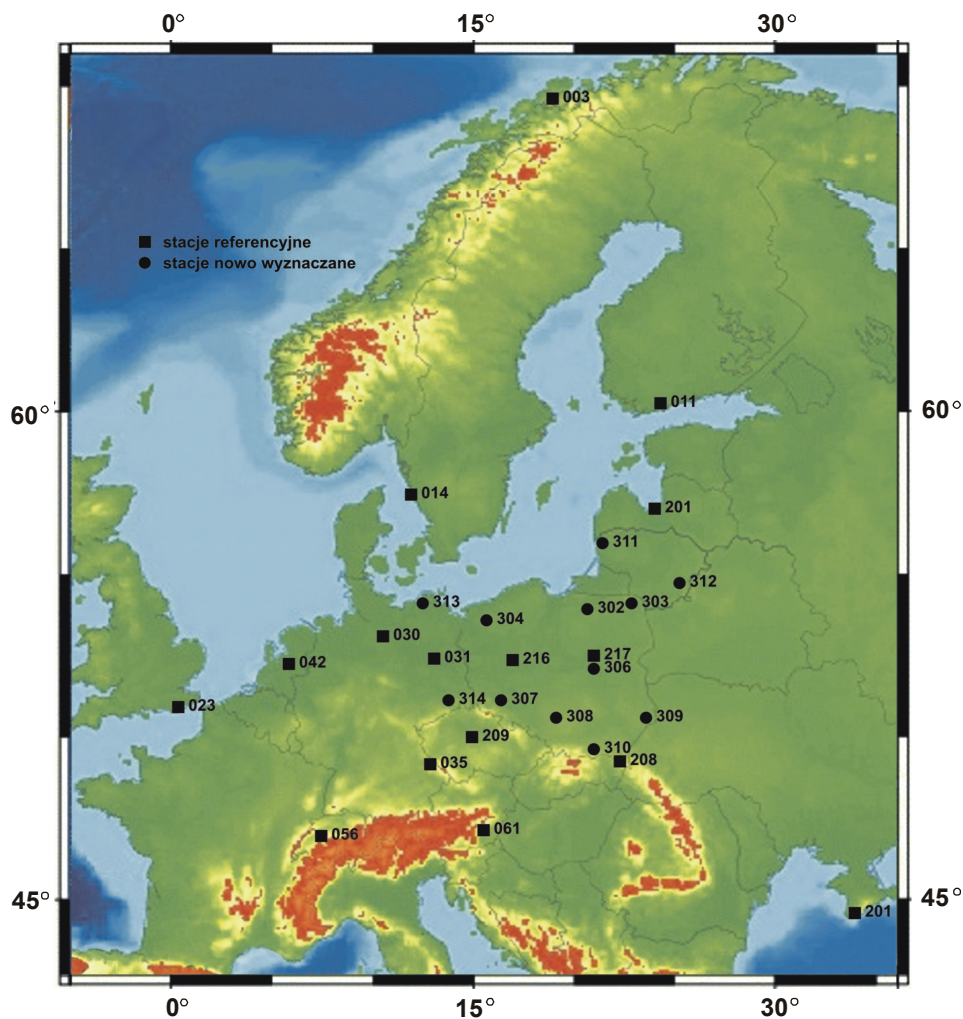
Z powodu ruchu płyt kontynentalnych współrzędne punktów w układzie ETRF-89, sztywno związanym z kontynentem europejskim, zmieniają się względem układu ITRF z prędkością rzędu 1-3 cm/rok. Wzajemne relacje między punktami położonymi na stabilnej części kontynentu europejskiego nie ulegają zmianom, co jest bardzo ważne z punktu widzenia zastosowań praktycznych.

Liczba 35 stacji na obszarze Europy Zachodniej, definiujących układ ETRF-89, okazała się zbyt mała w stosunku do potrzeb, wynikających np. z zasad transformacji współrzędnych z obowiązujących dotąd układów państwowych do nowego europejskiego układu odniesienia. W związku z tym już w 1988 roku zostały rozpoczęte prace przez Podkomisję EUREF oraz CERCO nad zwiększeniem liczby punktów definiujących układ ETRF-89. Mimo braku jeszcze wówczas pełnej konstelacji satelitów globalnego systemu pozycjonowania GPS, do wyznaczania położenia nowych punktów postanowiono jednak zastosować technologię opartą na wykorzystaniu obserwacji obiektów tego systemu. W dalszym ciągu stosowano także pomiary laserowe oraz technikę VLBI na podstawie obserwacji kwazarów dokonywanych z mobilnych platform pomiarowych. W wyniku tych pomiarów w 1989 roku na obszarze Europy Zachodniej powstała trójwymiarowa sieć EUREF, licząca 89 punktów. Wzajemne odległości między punktami sieci wynosiły 300-500 km, a błąd wzajemnego położenia punktów został oceniony na 1-2 cm.

Tworzenie sieci EUREF zbiegło się w czasie z historycznymi zmianami politycznymi i ekonomicznymi w krajach Europy Środkowej i Wschodniej. Pozwoliło to na stopniowe rozszerzanie sieci EUREF, przez zakładanie nowych punktów i organizowanie specjalnych kampanii pomiarowych na terytoriach poszczególnych państw lub grup państw. Jeszcze w 1990 roku nastąpiło dołączenie do sieci EUREF Grenlandii, Islandii i Spitsbergenu, a w 1991 roku, w wyniku kampanii EUREF-EAST, sieć europejska została rozszerzona o nowe punkty na terytorium Czech, Słowacji i Węgier.

Starania Polski o przystąpienie do projektu EUREF rozpoczęły się w 1990 roku, z inicjatywy Komitetu Geodezji PAN. Specjalny raport, opracowany przez Sekcję Sieci Geodezyjnych tego Komitetu, zatytułowany *O potrzebie i zasadach założenia zintegrowanej podstawowej sieci geodezyjnej Polski w układzie EUREF*, stał się podstawą do opracowania projektu lokalizacji 11 punktów polskiej części sieci EUREF (ryc. 2). Organizacja pomiarów i opracowanie wyników zostały powierzone Zakładowi Geodezji Plane-

tarnej Centrum Badań Kosmicznych PAN. Właściwa kampania obserwacyjna GPS odbyła się w dniach 4-8 lipca 1992 roku. Wraz z 11 punktami na terytorium Polski w kampanii uczestniczyło 19 stacji i obserwatoriów z innych krajów europejskich, zapewniając w ten sposób dowiązanie sieci EUREF-POL do istniejącej już sieci EUREF (Baran i Zieliński, 1992, 1993; Baran, 1994).



Ryc. 2. Kampania obserwacyjna GPS związana z zakładaniem sieci EUREF-POL '92

Do opracowania wyników kampanii EUREF-POL zastosowano program Bernese, który powstał w Instytucie Astronomii Uniwersytetu w Bernie. Uzyskano następujące przeciętne wartości średnich błędów współrzędnych punktów:

- w kierunku osi N (osi skierowanej ku północy) 0,008 m,

- w kierunku osi E (osi skierowanej ku wschodowi) 0,015 m,
- w kierunku osi U (osi prostopadłej do płaszczyzny NE) 0,030 m.

Warto podkreślić, że istotny wkład w utworzenie sieci EUREF-POL wnieśli geodeci z byłego Instytutu Geodezji Stosowanej (*Institut für Angewandte Geodäsie*) we Frankfurcie nad Menem, udostępniając Polsce własną aparaturę pomiarową i dzieląc się doświadczeniami z zakresu metodyki opracowywania wyników obserwacji GPS.

Równoległe z procedurą zatwierdzania wyników opracowania sieci EUREF-POL przez międzynarodowy zespół ekspertów, już w 1994 roku przystąpiono do zagęszczania tej sieci. W wyniku trzech kampanii obserwacyjnych, przeprowadzonych w latach 1994-1995 własnymi siłami polskich instytucji naukowych i przedsiębiorstw geodezyjnych, została utworzona sieć złożona z 348 punktów, równomiernie rozmieszczonych na obszarze kraju (sieć POLREF). Dowiązano ją do 11 punktów sieci EUREF-POL. Wzajemne odległości między punktami sieci POLREF wynoszą około 30-35 km, a realne dokładności wyznaczenia współrzędnych jej punktów w globalnym trójwymiarowym układzie odniesienia są rzędu pojedynczych centymetrów. Łączny czas trwania wszystkich trzech kampanii obserwacyjnych przy zakładaniu sieci POLREF wyniósł około dwóch miesięcy. Wykonano w tym czasie około 5 700 000 obserwacji, które posłużyły do wyznaczenia współrzędnych punktów. Specjalnie zaprojektowana stabilizacja punktów sieci umożliwia wykonywanie na nich nie tylko obserwacji satelitarnych, ale także pomiarów niwelacyjnych i grawimetrycznych.

Warto podkreślić, że sieć POLREF, łącznie z 11 punktami sieci EUREF-POL, zastąpiła dotychczasową sieć astronomiczno-geodezyjną (SAG), liczącą ok. 550 punktów. Względę historyczne sprawiły, że zakładanie sieci astronomiczno-geodezyjnej, przy użyciu klasycznych technik pomiarowych, na obecnym obszarze naszego kraju trwało ponad 50 lat. Najstarsze wyniki pomiarów, wykorzystane przy wyznaczeniu współrzędnych punktów SAG, pochodzą z 1899 roku. Zostały one wykonane na punktach byłej triangulacji wschodniopruskiej, znajdujących się obecnie na obszarze Warmii i Mazur. Dokładności wyznaczenia współrzędnych punktów klasycznej sieci astronomiczno-geodezyjnej kilkakrotnie ustępują dokładnościom współrzędnych punktów satelitarnej sieci POLREF, której założenie – jak stwierdzono to już wcześniej – trwało tylko ok. dwóch miesięcy.

Gęstość punktów sieci POLREF umożliwia dowiązywanie do nich tzw. geodezyjnych osnów szczegółowych, niezbędnych przy realizacji wielu zadań inżynierskich.

Utworzone w latach 1992-1995 sieci satelitarne EUREF-POL i POLREF można określić mianem „sieci pasywnych”. Punkty tych sieci mają trwałą stabilizację w terenie, a ich dokładne współrzędne, w trójwymiarowym układzie ETRF-89 (EUREF 89), uprawniony użytkownik może uzyskać w ośrodkach dokumentacji geodezyjno-kartograficznej i wykorzystać je do własnych celów. Już jednak w pierwszej połowie lat dziewięćdzie-

siątych ubiegłego wieku w Europie i w Polsce powstała idea zastępowania satelitarnych „sieci pasywnych” „sieciami aktywnymi”. Na punktach takich sieci obserwacje satelitów należących do globalnych systemów pozycjonowania (GPS, GLONASS, a wkrótce także Galileo) mają być prowadzone nieprzerwanie w ciągu 24 godzin. Wśród celów przyświecających tworzeniu krajowych sieci (systemów) stacji permanentnych GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) należy wymienić:

- umożliwienie użytkownikowi dysponującemu pojedynczym odbiornikiem satelitarnym wyznaczenia pozycji z wymaganą dokładnością, w dowolnym rejonie kraju, w czasie prawie rzeczywistym,
- dowiązanie pomiarów do układu ETRF 89, bez konieczności wykonywania pomiarów na punktach satelitarnej „sieci pasywnej”,
- uzyskanie danych do monitorowania regionalnych i lokalnych procesów geodynamicznych,
- uzyskanie danych do regionalnego i lokalnego modelowania jonosfery oraz badania zawartości pary wodnej w troposferze.

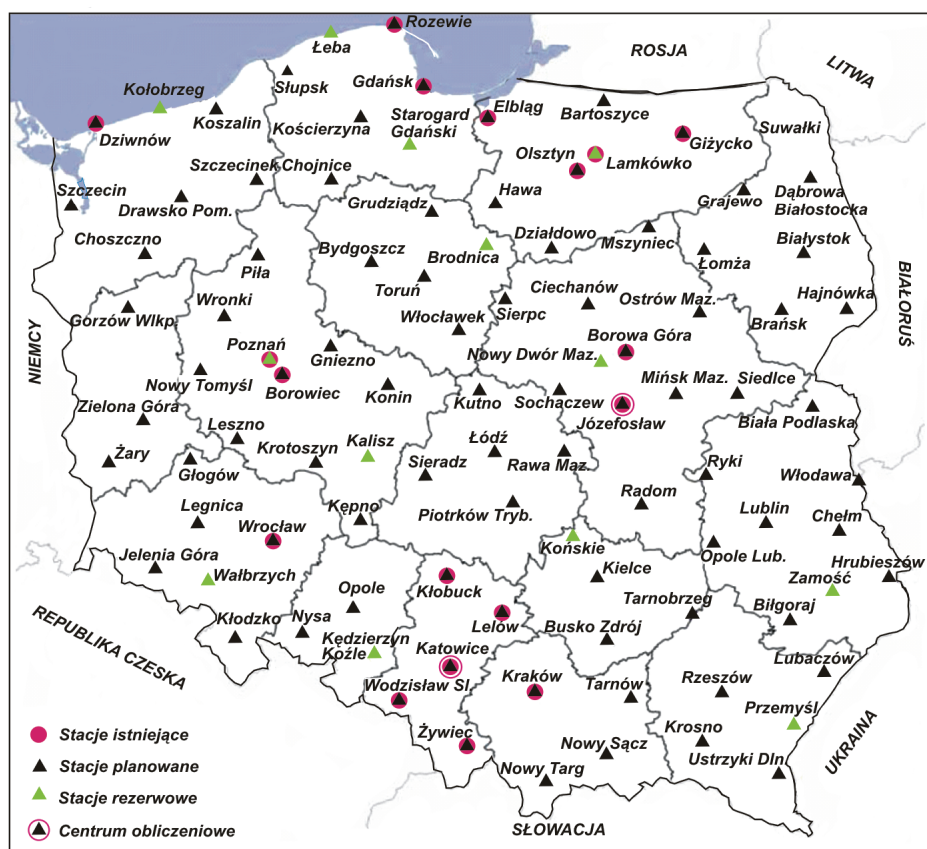
Wymienione cele nie uwzględniają wielu innych różnorodnych zadań, np. z zakresu nawigacji morskiej, lotniczej i lądowej, jakie mogą być realizowane za pomocą systemu stacji permanentnych GNSS.

Pierwsza koncepcja utworzenia sieci permanentnych stacji GNSS w Polsce powstała w 1995 roku (Baran i Zieliński, 1998). Została ona przedstawiona w opracowaniu zatytułowanym „*Ekspertyza dotycząca celowości i zasad tworzenia w Polsce sieci permanentnych stacji GPS*”. Opracowanie to powstało w wyniku wspólnej inicjatywy Komisji Geodezji Satelitarnej Komitetu Badań Kosmicznych i Satelitarnych PAN oraz Sekcji Sieci Geodezyjnych Komitetu Geodezji PAN. Po przeanalizowaniu różnych aspektów sieci stacji permanentnych przyjęto założenie, że powinna ona być siecią wielofunkcyjną, dostosowaną nie tylko do potrzeb geodezyjnych. Odległości między stacjami powinny wynosić ok. 50 km, co w praktyce oznaczałoby, że ich lokalizacja pokrywałaby się z siedzibami powiatów.

Uwzględniając sytuację ekonomiczną kraju, przyjęto założenie, że permanentna wielofunkcyjna sieć satelitarna będzie tworzona w kilku etapach. W pierwszym etapie powinna ona powstać na obszarze wybranych aglomeracji (Warszawa, Łódź, Gdańsk) oraz na obszarach intensywnej działalności wydobywczej (Górny Śląsk, Lubiąsko-Głogowski Okręg Miedziowy). Zgodnie z postulatem zawartym w „Ekspertyzie” została utworzona sześciopunktowa sieć na obszarze Śląska. Powstała również trzypunktowa sieć na obszarze Trójmiasta.

W roku 2000, z inicjatywy Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii, powstało nowe dwutomowe opracowanie *Techniczno-ekonomiczne uwarunkowania wykonalności Geodezyjnego Systemu Stacji Permanentnych GPS (CORS-PL) dla potrzeb krajowej służby*

geodezyjnej i kartograficznej. Współautorami opracowania są członkowie obu wymienianych już gremiów, tj. Komisji Geodezji Satelitarnej Komitetu Badań Kosmicznych i Satelitarnych PAN oraz Sekcji Sieci Geodezyjnych Komitetu Geodezji PAN. Opracowanie to zawiera wstępny projekt geodezyjnego systemu stacji permanentnych GNSS w Polsce. Projekt przewiduje, że krajowa sieć stacji permanentnych będzie liczyła 60 punktów (Baran, 2001). W jej skład wejdą – funkcjonujące już na obszarze kraju – stacje, które uczestniczą w programie światowym – IGS (*International GNSS Service*) oraz europejskim – EPN (*EUREF Permanent Network*), a także stacje sieci lokalnych.



Ryc. 3. Polski fragment sieci EUPOS

Realna perspektywa praktycznej realizacji projektu Geodezyjnego Systemu Stacji Permanentnych w Polsce zarysowała się w 2002 roku, kiedy to z inicjatywy Europejskiej Akademii ds. Środowiska Miejskiego (*The European Academy of the Urban Environment*) przystąpiono do opracowania projektu utworzenia europejskiej sieci stacji referencyjnych EUPOS (*European Position Determination System*). W pracach Komite-

tu Sterującego EUPOS od początku aktywny udział bierze prof. Janusz Śledziński z Politechniki Warszawskiej (Śledziński, 2004, 2005).

Wielofunkcyjny system stacji referencyjnych dla Europy – EUPOS będzie liczył ponad 850 punktów, rozmieszczonych na obszarze państw Europy Środkowej oraz europejskiej części Rosji. Odległości między stacjami wyniosą 70-80 km. Liczba punktów polskiej części sieci EUPOS, poza stacjami zaprojektowanymi we wspomnianym opracowaniu z 2000 roku, będzie liczyła 26 dodatkowych stacji (ryc. 3). Zwiększenie liczby stacji permanentnych stało się możliwe dzięki uzyskaniu środków z Unii Europejskiej na realizację tego ważnego dla naszej części Europy przedsięwzięcia.

Liczba różnorodnych możliwych zastosowań GPS – jak stwierdził to w jednym ze swoich opracowań prof. J. Śledziński – jest nieograniczona i zależna tylko od wyobraźni i inwencji użytkownika. Na podstawie dokonanej analizy stwierdzono, że sieć EUPOS od zaraz może znaleźć zastosowanie, co najmniej w 37 obszarach działalności gospodarczej i życia społecznego w naszym kraju.

Nawigacja satelitarna

Nawigacja satelitarna jest ściśle związana z rozwojem Globalnych Nawigacyjnych Systemów Satelitarnych – GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*). Wśród funkcjonujących obecnie systemów należy wyróżnić systemy autonomiczne oraz różnicowe, typu DGPS (*Differential Global Positioning System*). Zadaniem systemów różnicowych jest wspomaganie systemów autonomicznych. Autonomiczność systemu oznacza, że pozwala on wyznaczyć położenie punktu na powierzchni Ziemi, bądź w przestrzeni okołozemskiej, w dowolnym momencie, bez konieczności korzystania z wyników obserwacji wykonanych w tym samym momencie przez stacje referencyjne, tj. stacje definiujące układ odniesienia. Do systemów autonomicznych należą oprócz opisanego wcześniej GPS, także rosyjski GLONASS oraz powstający europejski Galileo.

Globalny Nawigacyjny System Satelitarny – *GLONASS (Global Navigation Satellite System)* jest systemem militarnym Federacji Rosyjskiej. Obecnie mogą z niego korzystać również instytucje cywilne. Pełną operacyjność system uzyskał już w 1996 roku. Konstelacja jego satelitów liczyła wówczas 24 obiekty. Ze względu na problemy polityczne i ekonomiczne Rosji w drugiej połowie lat 90., liczba czynnych satelitów systemu spadła do 8. Obecnie system jest intensywnie uzupełniany o nowe satelity charakteryzujące się dłuższym „czasem życia”. W grudniu 2006 roku konstelacja satelitów liczyła 15 obiektów. Są one rozmieszczone na trzech orbitach, na wysokości ok. 19 100 km. Płaszczyzny orbit są nachylone do płaszczyzny równika pod kątem 64,8°. Dokładność wyznaczenia pozycji jest rzędu 60 m w poziomie i 70 m w składowej pionowej.

Tworzony obecnie przez Unię Europejską globalny system cywilny Galileo będzie liczył 30 satelitów, obiegających Ziemię na wysokości 23 200 km. Satelity zostaną roz-

mieszczone na trzech orbitach. Płaszczyzny orbit będą nachylone do płaszczyzny równika pod kątem 56° . Oczekuje się, że system umożliwi uzyskanie dokładności autonomicznego wyznaczenia pozycji rzędu 4 m w poziomie i 8 m w składowej pionowej. Pierwszy eksperymentalny satelita GIOVE-A został umieszczony na orbicie 28 grudnia 2005 roku. Osiągnięcie pełnej operacyjności systemu spodziewane jest w 2012 roku. System Galileo będzie kompatybilny z systemami GPS, GLONASS i EGNOS.

Europejski cywilny satelitarny system nawigacyjny EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), podobnie jak amerykański WAAS (*Wide Area Augmentation System*) i japoński MSAS (*Multi-functional Satellite Augmentation System*) należą do nawigacyjnych systemów różnicowych. Umożliwiają one nawet 10-krotne zwiększenie dokładności pozycjonowania i nawigacji w stosunku do wartości uzyskiwanych za pomocą autonomicznych systemów nawigacyjnych. Tak znaczny wzrost dokładności jest możliwy dzięki wykorzystaniu satelitów geostacjonarnych do teletransmisji poprawek. Poprawki te pozwalają na korygowanie wartości współrzędnych punktu, wyznaczanych za pomocą GPS lub GLONASS. Dokładność wyznaczania pozycji za pomocą systemu EGNOS wynosi około 2 m w poziomie i ok. 4 m w składowej pionowej. System EGNOS składa się z 34 stacji referencyjnych RIMS (*Ranging Integrity Monitoring Stations*), rozmieszczonych na terytorium Europy i Afryki. Przesyłają one w trybie on-line dane obserwacyjne, przy użyciu naziemnych łączy telekomunikacyjnych, do centralnych stacji kontrolnych. Stacje te poprzez trzy satelity geostacjonarne: AOR-E, Artemis, IOR-W, przesyłają poprawki korygujące pozycję użytkownika.

Warto podkreślić, że dzięki włączeniu się polskich zespołów naukowych do tworzenia systemu EGNOS, jedna ze stacji RIMS, monitorujących system, została utworzona i pomyślnie funkcjonuje w Centrum Badań Kosmicznych PAN w Warszawie. System ma uzyskać status pełnej operacyjności w 2007 roku (Zieliński, 2005).

Tworzone obecnie regionalne i krajowe wielofunkcyjne satelitarne systemy stacji permanentnych umożliwiają osiągnięcie wysokich dokładności pozycjonowania i nawigacji w czasie rzeczywistym. Przy użyciu metody DGPS, nowoczesnych technologii GPRS teletransmisji danych do użytkownika i tanich odbiorników satelitarnych można osiągnąć dokładność rzędu 0,5-2 m, natomiast przy wykorzystaniu metody RTK (*Real Time Kinematic*) – dokładność rzędu 1-3 cm. Tak wysoka dokładność, uzyskiwana w czasie rzeczywistym, pozwala na precyzyjne sterowanie automatami, robotami i maszynami w otwartym terenie, w tym np. sterowanie maszynami drogowymi przy budowie autostrad i przy regulacji torów kolejowych, na precyzyjne operowanie maszynami rolniczymi, a także na wykorzystanie funkcji autopilota przy lądowaniu samolotu.

W Polsce, z inicjatywy Urzędu Morskiego w Gdyni, pierwsze permanentne stacje DGPS dla potrzeb nawigacji morskiej powstały już w 1995 roku, przy latarniach morskich w Rozewiu i w Dziwnowie. Dzięki ciągłej transmisji na falach średnich poprawek

DGPS, stanowią one podstawową osłonę nawigacyjną południowej części Bałtyku. Potrzebom nawigacji morskiej, a także nawigacji lądowej i geodezji służy system stacji referencyjnych na obszarze Trójmiasta, utworzony w 2000 roku przez Instytut Geodezji Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Stacje zlokalizowano na terenie urzędów miejskich Gdańska, Sopotu i Gdyni (Ciećko i in., 2003b). System był wykorzystywany między innymi przy realizacji projektu pilotażowego, dotyczącego obsługi zdarzeń drogowych na obszarze miasta Gdańska.

Prace teoretyczne dotyczące doskonalenia technologii wyznaczania pozycji w czasie rzeczywistym koncentrowały się głównie na metodyce zapewnienia wysokiej dokładności i wiarygodności poprawkom przesyłanym użytkownikom systemów satelitarnych (Bakuła, 2003a, 2003b; Wielgosz i in., 2004, 2005).

Od 2004 roku w Polsce rozwijane są intensywne badania dotyczące zdalnej transmisji danych od stacji referencyjnych DGPS/RTK do użytkowników, przy pomocy Internetu oraz przy wykorzystaniu pakietowej transmisji danych telefonii komórkowej GSM/GPRS. W Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, w Instytucie Geodezji i Kartografii w Warszawie, w Politechnice Warszawskiej oraz na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim (UWM) w Olsztynie zostały opracowane i są testowane różne warianty zastosowań systemów transmisji danych.

Uruchomiony w 2004 roku, przez Katedrę Geodezji Satelitarnej i Nawigacji UWM w Olsztynie, system transmisji danych GSM/GPRS składa się z czterech stacji referencyjnych DGPS/RTK, w regionie warmińsko-mazurskim, połączonych internetowym, szyfrowanym łączem z głównym serwerem systemu. Serwer ten zbiera i przetwarza dane obserwacyjne ze wszystkich stacji referencyjnych, zarządza tymi danymi i przesyła je, w czasie rzeczywistym, do – będących w ruchu – użytkowników systemu. Utworzony system został pomyślnie zastosowany w regionie Warmii i Mazur do badań, testowania i oceny jakości metod pomiarowych przy użyciu różnych typów odbiorników satelitarnych, w szczególności do wyznaczania powierzchni działek rolnych w systemie IACS – dopłat obszarowych dokonywanych przez Komisję Unii Europejskiej. Przy wykorzystaniu stacji referencyjnej w Giżycku wykonano zintegrowane satelitarne i batymetryczne pomiary jeziora Śniardwy. Na podstawie danych pomiarowych opracowano i wydano drukiem, pierwszą w historii, dokładną mapę tego największego jeziora w Polsce (Popielarczyk i Oszczak, 2003, 2006). Ponadto system satelitarnego pozycjonowania, monitoringu i nawigacji jest wykorzystywany z powodzeniem przez drużyny Wodnego Ochotniczego Pogotowia Ratunkowego na Wielkich Jeziorach Mazurskich, przez Centrum Ratownictwa w Wyższej Szkole Policji w Szczytnie, a także przez rzesze żeglarzy i turystów w tym regionie.

Zespoły badawcze Katedry Geodezji Satelitarnej i Nawigacji UWM w Olsztynie, wspólnie z partnerami zagranicznymi, uczestniczą w realizacji projektów Komisji Unii

Europejskiej, spośród których wymienić należy pomiary satelitarne stanowisk archeologicznych w Pompejach, we Włoszech (Manzoni i in., 2004), badanie i testowanie systemu EGNOS w krajach centralnej Europy (Ciećko i in., 2003a), udział w realizacji projektów 6. Programu Ramowego w zakresie promocji i demonstracji możliwości zastosowań nawigacji satelitarnej, promocji i wdrażania metod satelitarnych w rolnictwie, nauczania i upowszechniania technologii satelitarnych w krajach centralnej Europy.

W Instytucie Geodezji UWM w Olsztynie prowadzone są badania nad opracowaniem regionalnych i lokalnych modeli jonosfery, o dużej rozdzielczości czasowej i przestrzennej. Modele te są wykorzystywane do wyznaczania poprawek do obserwacji, uwzględniających opóźnienia sygnału radiowego w jonosferze (Baran i in., 1997; Krankowski, 2004, Krankowski i Shagimuratov, 2006). Badania te mają istotne znaczenie dla poprawienia dokładności satelitarnego pozycjonowania (Wielgosz i in., 2004, 2005).

W Instytucie Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej Politechniki Warszawskiej w ramach realizacji pilotażowego projektu EUREF-IP opracowano algorytmy i programy komputerowe, umożliwiające stabilną i łatwą obsługę użytkowników korzystających z danych w formacie RTCM, przy wyznaczaniu pozycji techniką RTK. W realizacji projektu EUREF-IP udział brał także resortowy Instytut Geodezji i Kartografii, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie oraz Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie.

Wysoką aktywność badawczą i wdrożeniową w zakresie nawigacji morskiej wykazują zespoły Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni oraz Akademii Morskiej w Szczecinie. W Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni została opracowana metodyka badań podstawowych parametrów systemu nawigacyjnego: dokładności, dostępności, ciągłości oraz wiarygodności (Specht, 2003). Inne osiągnięcia uczelni morskich obejmują opracowanie satelitarnego systemu nawigacji na torach wodnych, w portach, zastosowanie technik DGPS/RTK do pomiarów batymetrycznych wód przybrzeżnych oraz monitoring i ochrony linii brzegowej.

W zakresie satelitarnej nawigacji lotniczej aktywną działalność badawczą i dydaktyczną prowadzi Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych w Dęblinie. Prowadzone tam badania dotyczą wyznaczania dokładnej trajektorii lotu samolotów śmigłowych i odrzutowych, kalibracji systemów radarowych używanych do kontroli lotów nad terytorium Polski, a także opracowania niezawodnych metod precyzyjnego podejścia i lądowania samolotu (Grzegorzewski, 2005).

Uzasadnione nadzieje na rozwój zastosowań technik satelitarnych w nawigacji morskiej, lotniczej i lądowej wiązane są – o czym wspomniano już wcześniej – z utworzeniem na obszarze Polski systemu wielofunkcyjnych stacji referencyjnych EUPOS. Realizacja tego europejskiego systemu w Polsce została rozpoczęta w 2006 roku.

Literatura

- Bakuła M. (a) *DGPS with the Use of Two Reference Stations*. European Geophysical Society, XXVI General Assembly, 6-11 April, Nice, France, „Reports on Geodesy” nr 1 (64), 2003, s. 257-263.
- Bakuła M. (b) *A Mathematical Model of DGPS Corrections*. Proceeding of the 7th Bilateral Geodetic Meeting Italy-Poland, 22-24 May 2003, Bressanone, South Tirol, Italy, „Reports on Geodesy” nr 2 (65), 2003, s. 85-88.
- Baran W.; *Systemy dwuwymiarowe oraz trójwymiarowy europejski system odniesienia EUREF*. „Geodezja i Kartografia”, t. XLI, z. 3-4, 1992, s. 253-258.
- Baran W. *New National System of Geodetic Coordinates in Poland*. „Geodezja i Kartografia” t. XLIII, z. 1, 1994, s. 41-49.
- Baran L.W. *Geodezyjny system stacji permanentnych GPS w Polsce*. Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, 2001, t. XLVIII, zeszyt 102, s. 55-70.
- Baran W., Zieliński J. B. *Design and Preparation of the EUREF-92 GPS Campaign in Poland, Report on the Symposium of the IAG Subcommittee for the European Reference Frame (EUREF), held in Berne, 4-6 March 1992*. Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Astronomisch-Geodätische Arbeiten, Heft nr 52, München, 1992, s. 233-235.
- Baran L. W., Zieliński J. B. *Status Report on Participation of Poland in Creation of European Reference Frame – EUREF, Report on the Symposium of the IAG Subcommittee for the European Reference Frame (EUREF), held in Budapest, 17-19 May 1993*. Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Astronomisch-Geodätische Arbeiten, Heft nr 53, München, 1993, s. 160-163.
- Baran L. W., Zieliński J. B. *Active GPS stations as a new generation of the geodetic network*. „Geodezja i Kartografia”, t. XLVII, z. 1-2, 1998, s. 33-40.
- Baran L. W., Shagimuratov I. I., Tepenitzina N. J.; *The Use of GPS for Ionospheric Studies. Artificial Satellites*, „Journal of Planetary Geodesy” t. 32, nr 1, Warszawa 1997, s. 49-60.
- Brzezinski A., Capitaine N. *The use of the precise observations of the Celestial Ephemeris Pole in the analysis of geophysical excitation of Earth rotation*. „Journal of Geophysical Research”, t. 98, 1998, s. 6667-6675.
- Brzezinski A. *Diurnal and Subdiurnal terms of nutations; a simple theoretical model for a non-rigid Earth*. Proc. Journées 2000 Systemes de Reference Spatio-Temporels, (ed.) N. Capitaine, Paris Observatory, 2001, s. 243-251.
- Brzezinski A.; *Nowy model precesyjno-nutacyjny*. Seria monograficzna Instytutu Geodezji i Kartografii, Nr 10, Warszawa 2004, s. 145-161.
- Brzezinski A., Kosek W. *Free core nutation: stochastic modeling versus predictability*. Proc. Journées Systemes de Reference Spatio-Temporels (eds.) A. Finkelstein, N. Capitaine, 2004, s. 99-106.
- Brzezinski A., Ponte R. M., Ali A. H. *Non-tidal oceanic excitation of nutation and diurnal, semi-diurnal polar motion revisited*. „Journal of Geophysical Research – Solid Earth” t. 109, 2004.
- Ciecko A., Oszczak S., Popielarczyk D. et al. (a) *Kinematic Positioning Using EGNOS System Test Bed (ESTB) in Central European Countries in 2000*. EGS-AGU-EUG Joint Assembly, 6-11 April 2003, Nice, France, „Reports on Geodesy” nr 1 (64), 2003, s. 247-255.
- Ciecko A., Oszczak B., Oszczak S. (b) *Determination of Accuracy and Coverage of Permanent Reference Station DGPS/RTK in Gdynia*. Proceedings of the 7th Bilateral Geodetic Meeting

- Italy-Poland, 22-24 May 2003, Bressanone, Italy, „Reports on Geodesy” nr 2 (65), 2003, s. 45-51.
- Grzegorzewski M. *Navigation an Aircraft by Means of Position Potential on Three Dimensional Space*. Annual of Navigation, nr 9, 220, Polish Academy of Sciences, Polish Navigation Forum, s. 1-108.
- Kołaczek B. *Observational Determination of the Earth's Rotation*. Gravity and Low-Frequency Geodynamics, (ed) R. Teisseyre, PWN Warszawa, Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo, 1989, s. 295-361.
- Kołaczek B. *Variation of Short Periodical Oscillations of Earth Rotation*. IUA Symposium nr 156, Developments in Astrometry and Their Impact on Astrophysics and Geodynamics, (eds.) I. I. Mueller, B. Kolaczek, 1993, s. 291-296.
- Kołaczek B. *Monitorowanie i charakterystyka zmian ruchu obrotowego Ziemi*. Seria monograficzna Instytutu Geodezji i Kartografii, nr 10, Warszawa 2004, s. 163-195.
- Kołaczek B., Nastula J.; *Impact of the addition of the ocean to the atmospheric excitation of polar motion on variability of spectra and correlation with polar motion*. Proc. Journees 2003 Systemes de Reference Spatio-Temporels, (eds.) A. Finkelstein, N. Capitine, 22-25 September 2003, Institute of Applied Astronomy RAS, St. Petersburg, Russia, 2004, s. 150-155.
- Kosek W., Kołaczek B. *Semi-Chandler and Semiannual Oscillations of Polar Motion*. „Geophysical Research Letters” t. 24, nr 17, 1997, s. 2235-2238.
- Krankowski A. *Variability of Total Electron Content at European Latitudes*. Artificial Satellites, „Journal of Planetary Geodesy” t. 39, nr 2, 2004, s. 205-213.
- Krankowski A., Shagimuratov I. I.; *Impact of TEC fluctuations In the Antarctic ionosphere on GPS positioning accuracy*. Artificial Satellites, „Journal of Planetary Geodesy” t. 41, nr 1, 2006, s. 43-56.
- Kryński J. *Nowe skale czasu i idea pośredniego systemu odniesienia*. Seria monograficzna Instytutu Geodezji i Kartografii, Nr 10, Warszawa 2004, s. 111-144.
- Kryński J., Rogowski J. B. *Systemy i układy odniesienia w geodezji, geodynamice i astronomii*. Seria monograficzna Instytutu Geodezji i Kartografii Nr 10, s. 11-35, Warszawa 2004.
- Manzoni G., Inchingolo D., Manzoni M. et al. *GPS/EGNOS positioning of archeological site in Pompeii*. EGU (European Geosciences Union) 1st General Assembly, 25-30 April 2004, Nice, France, „Reports on Geodesy”, nr 2 (69), 2004, s. 335-340.
- Popielarczyk D., Oszczak S. *Time Correlation of GPS Horizontal Position and Depth Data in Inland Bathymetric Survey*. Proceedings of the 7th Bilateral Geodetic Meeting Italy-Poland, Bressanone, Italy 22-24 May 2003, „Reports on Geodesy” nr 2 (65), 2003, s. 95-98.
- Popielarczyk D., Oszczak S. *Application of Integrated Satellite DGPS/CORS Navigation and Hydrographic Systems for Safe Sailing on Great Mazurian Lakes In Poland*. ION NTM 2006, 18-24 January 2006, Monterey, CA, USA Conference Proceedings, s. 188-194.
- Specht C. *Availability, Reliability and Continuity Model of Differential GPS Transmission*. Annual of Navigation, Nr 5, 2003, Polish Academy of Sciences, Polish Navigation Forum, s. 1-85.
- Śledziński J. *EUPOS – European Position Determination System*, „Reports on Geodesy” IG & GA WUT, nr 2(69), 2004, s. 141-148.
- Śledziński J. *Establishment of Polish part of the European network of satellite reference stations EUPOS*. „Reports on Geodesy” IG & GA WUT, nr 2(73), 2005, s. 199-210.
- Wielgosz P., Baran L. W., Shagimuratov I. I., Aleshnikova M. V. *Latitudinal Variations of TEC over Europe Obtained from GPS Observations*. „Annales Geophysicae” t. 22, 2004, s. 405-415.

- Wielgosz P., Kashani I., Grejner-Brzezinska D. A. *Analysis of Long-Range Network RTK during Severe Ionospheric Storm*. „Journal of Geodesy” t. 79, nr 9, 2005, s. 524-531.
- Zieliński J.B. *Badania figury Ziemi w XXI wieku* Prace IGiK, t. 50, nr 107, 2004, s. 65-78.
- Zieliński J.B. *Galileo in Poland* „Academia” nr 2 (6), 2005, s. 16-19.
- Zieliński J.B., J.K. Łatka, M. Kuźmicz-Cieślak *Upward Continuation of Gravity Gradients for Validation of the GOCE Measurements*. „Artificial Satellites” t. 60, nr 4, 2005, s. 229-250.

Application of satellite techniques in geodesy and navigation in Poland

Contemporary geodesy is of global dimension. The reference frame is defined as the geocentric system with parameters related to the entire Earth body, e.g. the axis of rotation, and global geoid. The unified time scale is determined for the whole Earth territory as well. International services using different satellite techniques are engaged in the determination of this frame. Particularly important is the Global Positioning System GPS, which is the most important geodetic tool nowadays. In Poland a number of geodetic observatories are working in the frame of the international networks, Polish scientific groups contribute to the advancement of science in this domain. For the practical applications we are using the local networks that again are constructed with satellite techniques. In Europe the regional network EUREF exists while its part EUREF-POL and densification POLREF are in Poland. The modern network ASG-EUPOS is under construction. The GPS technique is used for surveying and navigation and for the positioning in motion, which is in-between the preceding traditional methods. Differential augmentation methods are designed to improve GPS signals such as DGPS and EGNOS. The new European satellite navigation system Galileo is in development. Poland is a member and co-owner of this system. A number of Polish research institutions are working on new methods of the practical application of GNSS.

Key words: geodesy, reference frame, Global Positioning System – GPS, satellite techniques, satellite navigation, Galileo navigation system

