

JAN KRYŃSKI

Instytut Geodezji i Kartografii

Warszawa

JERZY B. ROGOWSKI

Instytut Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej

Politechniki Warszawskiej

SYSTEMY I UKŁADY ODNIESIENIA W GEODEZJI, GEODYNAMICE I ASTRONOMII

ZARYS TREŚCI: Do wypełnienia podstawowych zadań geodezji niezbędny jest odpowiednio zdefiniowany ziemski system odniesienia oraz jego realizacja dostosowana do precyzji geodezyjnych technik pomiarowych. System ziemski w naturalny sposób odniesiony jest do kierunku osi obrotu Ziemi. Do wyznaczenia dokładnego położenia osi obrotu Ziemi wymagane są obserwacje obiektów pozaziemskich. Położenie obiektów pozaziemskich określane jest w niebieskim systemie odniesienia. Konieczne zatem jest korzystanie w geodezji z niebieskich systemów odniesienia. Niezbędne jest w tym celu określenie relacji pomiędzy niebieskim i ziemskim systemem odniesienia. W szczególności niezbędne jest stałe monitorowanie parametrów ruchu obrotowego Ziemi. Współcześnie oba systemy odniesienia – niebieski i ziemski – stosowane są przy wykorzystaniu globalnych satelitarnych i kosmicznych technik pomiarowych oraz monitorowaniu zmian geometrycznej i fizycznej struktury Ziemi.

W pracy podano definicje systemu odniesienia, układu odniesienia i układu współrzędnych wraz z przykładami oraz definicją kinematycznego systemu odniesienia. W przekroju historycznym przedstawiono powstawanie i doskonalenie ziemskich systemów i układów odniesienia. Podobnie przedstawiono rys historyczny rozwoju niebieskich systemów odniesienia, począwszy od systemu Katalogu Fundamentalnego FK3. Nakreślone zostały ogólne zasady przejścia pomiędzy niebieskim systemem odniesienia i ziemskim systemem odniesienia przy wykorzystaniu modelu precesji i nutacji, czasu gwiazdowego oraz parametrów ruchu bieguna. Szczególną uwagę zwrócono na problemy związane z wyznaczaniem pozycji chwilowego bieguna. Istotną rolę w utrzymywaniu kinematycznego ziemskiego systemu odniesienia odgrywa przy opracowywaniu obserwacji uwzględnienie deformacji skorupy ziemskiej. Podano główne źródła deformacji skorupy ziemskiej wraz z oszacowaniem ich wpływu na zmianę współrzędnych stacji obserwacyjnych. W podsumowaniu omówiono najważniejsze kierunki zmian w definicjach i realizacjach ziemskich i niebieskich systemów odniesienia.

1. O KONIECZNOŚCI STOSOWANIA DWÓCH SYSTEMÓW ODNIESIENIA (ZIEMSKIEGO I NIEBIESKIEGO)

Tradycyjnie do podstawowych zadań geodezji zalicza się wyznaczanie kształtu i rozmiarów Ziemi oraz wyznaczanie w jednolitym układzie współrzędnych pozycji punktów odpowiednio gęsto rozłożonych na powierzchni Ziemi. Naturalną cechą układu odniesienia, który umożliwia w najprostszy sposób rozwiązywać zadania geodezyjne, a jednocześnie upraszczać opis złożonych zagadnień geodynamicznych, jest sztywne jego związanie z Ziemią. Z kolei, ruch obrotowy Ziemi wokół osi fizycznie w naturalny sposób narzuca, aby podstawowa oś ziemskiego układu odniesienia pokrywała się z osią obrotu Ziemi. Dokładność, z jaką powinien być określony układ odniesienia, pozostaje w ścisłej relacji z precyzją stosowanych technik obserwacyjnych. Do dokładnego określenia położenia osi obrotu wymagane są obserwacje obiektów pozaziemskich (gwiazdy, satelity). Zapotrzebowanie na takie obserwacje leżało u podstaw rozwoju astronomii geodezyjnej, a następnie geodezji satelitarnej i kosmicznej. Pozycje obiektów pozaziemskich, jako niepodlegających ruchowi obrotowemu Ziemi, wyznacza się w niebieskim układzie odniesienia, który stanowi przybliżenie układu inercjalnego. Konieczność zatem stosowania w geodezji niebieskiego układu odniesienia wiąże się z potrzebą dokładnego określenia relacji pomiędzy układami niebieskim i ziemskim, umożliwiającą nie tylko określenie położenia osi obrotu Ziemi w odpowiednio zdefiniowanym quasi-inercjalnym układzie niebieskim, ale także opisujące obrót Ziemi wokół osi, a tym samym obrót układu ziemskiego względem układu niebieskiego.

Wśród przykładów wykorzystywania obserwacji astronomicznych w geodezji na pierwszym miejscu można wymienić zadanie związane z określeniem orientacji elipsoidy odniesienia. Obserwowane na tzw. punktach Laplace'a azymuty A i długości astronomiczne λ umożliwiały zorientowanie elipsoidy odniesienia tak, aby jej oś obrotu była równoległa do osi obrotu Ziemi. Równoległość obu osi obrotu spełniona była poprzez użycie warunku Laplace'a (Heiskanen i Moritz 1967):

$$A - \alpha = (\lambda - \lambda_0) \sin \varphi \quad (1)$$

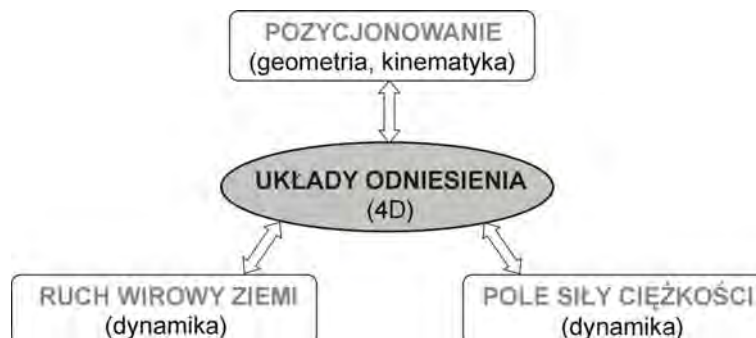
w procesie wyrównania osnowy triangulacyjnej. Wielkości α , λ i φ – oznaczają odpowiednio azymut, długość i szerokość geodezyjną.

Znajomość długości i szerokości astronomicznej umożliwia określenie kierunku linii pionu, a tym samym kierunku wektora przyspieszenia siły ciężkości oraz określenie odchylenia pionu. Jest to szczególnie ważne dla klasycznych pomiarów geodezyjnych, gdyż znajomość odchylenia pionu umożliwia sprowadzenie obserwacji wykonanych w lokalnym układzie instrumentu do ziemskiego układu globalnego. Ma to również istotne znaczenie dla modelowania pola siły ciężkości, zważywszy na fakt, że pomiary grawimetryczne

dostarczają wyłącznie informacji o długości wektora przyspieszenia siły ciężkości, nie zaś o jego kierunku.

Szczególne zainteresowanie układami niebieskimi w geodezji wynika z obserwowalnej zmienności w czasie położenia osi obrotu Ziemi zarówno względem gwiazd (układu niebieskiego) (Brzeziński 2004), jak i bryły Ziemi (Rogowski i Figurski 2004) oraz z niejednostajności jej obrotu (Kołaczek 2004b). Położenie osi obrotu Ziemi określa chwilowe położenie układu ziemskiego względem układu niebieskiego i dodatkowo związane jest z definicją astronomicznych systemów czasu. Monitorowaniem ruchu obrotowego Ziemi zajmują się międzynarodowe służby skupiające rozsięte po całej Ziemi obserwatoria, w tym kilka obserwatoriów w Polsce, w których prowadzone są permanentne obserwacje.

Korzystanie z niebieskich systemów odniesienia leży u podstaw nowoczesnych globalnych kosmicznych i satelitarnych technik pomiarowych: interferometrii długich baz VLBI (Very Long Baseline Interferometry), laserowych pomiarów satelitarnych SLR (Satellite Laser Ranging), laserowych pomiarów do Księżyca LLR (Lunar Laser Ranging), satelitarnych pomiarów dopplerowskich – obecnie DORIS (Doppler Orbit Determination and Radio Positioning Integrated on Satellite), a co najważniejsze powszechnie stosowanych globalnych systemów pozycjonowania – NAVSTAR GPS (Navigation System with Time and Ranging – Global Positioning System), GLONASS (Global Navigation Satellite System) i w niedalekiej przyszłości GALILEO. Dzięki odpowiednio dokładnie określonym systemom odniesienia obserwacje wykonywane przy użyciu tych technik umożliwiają monitorowanie geometrycznej i fizycznej struktury Ziemi oraz dynamiki procesów zachodzących na powierzchni i we wnętrzu Ziemi. Kluczowa rola układów odniesienia w geodezji (rys. 1) leży u podstaw wiodącego obecnie projektu Międzynarodowej Asocjacji Geodezji IAG (International Association of Geodesy) – Globalnego Zintegrowanego Geodezyjnego i Geodynamicznego Systemu Obserwacyjnego GIGGOS (Rummel 2000).



Rys. 1. Kluczowa rola układów odniesienia w geodezji

2. DEFINICJE SYSTEMU ODNIESIENIA, UKŁADU ODNIESIENIA I UKŁADU WSPÓLRZĘDNYCH

Praktyczne problemy związane z utrzymaniem układu odniesienia, tak aby niezależnie od epoki można było w nim równie dokładnie określić położenie punktu, w szczególności aby zachować zgodność opracowania jednokowo dokładnych pomiarów pozycji fizycznie tego samego punktu, wykonane w różnych epokach, stwarzają konieczność rozróżnienia układu odniesienia od systemu odniesienia i układu współrzędnych.

System odniesienia (*reference system*) stanowi zbiór zaleceń i ustaleń wraz z opisem modeli niezbędnych do zdefiniowania początku, skali (metryki) i orientacji osi oraz ich zmienności w czasie.

Układ odniesienia (*reference frame*) stanowi praktyczną realizację systemu odniesienia. Na układ odniesienia składają się wyznaczone z obserwacji wartości parametrów opisujących początek układu, skalę (metrykę) i orientację osi oraz ich zmienności w czasie.

Układ współrzędnych (*coordinate system*) określa jednoznacznie sposób przyporządkowania zbioru wartości liczbowych – współrzędnych punktu – położeniu punktu względem układu odniesienia.

Pojęcia systemu odniesienia, układu odniesienia i układu współrzędnych bywają często utożsamiane. Przytoczone powyżej definicje bywają niekiedy parami, bądź wszystkie na raz łączone, najczęściej pod nazwą układu współrzędnych. Rozdział tych pojęć ma zasadnicze znaczenie w fizyce stosowanej, do której zalicza się problematyka niebieskich i ziemskich systemów odniesienia realizowanych w oparciu o obserwacje i modele zjawisk fizycznych. W szczególności nieścisłości terminologiczne związane z tymi pojęciami pojawiają się często w opracowaniach w języku polskim. Dla ilustracji różnic pomiędzy systemem odniesienia, układem odniesienia i układem współrzędnych można posłużyć się następującymi przykładami.

Tradycyjnie niebieski system odniesienia definiowano w przestrzeni trójwymiarowej. Początek i kierunki osi kartezjańskiego układu prawoskrętnego były definiowane na epokę (a zatem ustalone w czasie) poprzez płaszczyznę równika oraz kierunek do punktu równonocy wiosennej. Wynikały one z modelu mechaniki newtonowskiej Układu Słonecznego. W definicji tej pomijano jako oczywiste, iż dla zdefiniowanej przestrzeni stosowana była metryka euklidesowa.

Realizacją niebieskiego systemu odniesienia był katalog fundamentalny. Obserwacje astronomiczne gwiazd opracowane łącznie z danymi z poprzednich katalogów fundamentalnych na epokę, zgodnie z ustaleniami i modelami określonymi w definicji niebieskiego systemu odniesienia, dostarczały parametrów niebieskiego układu odniesienia w postaci pozycji gwiazd na epokę oraz kierunków osi kartezjańskiego układu a także położenie jego początku.

Pozycje gwiazd katalogu fundamentalnego – niebieskiego układu odniesienia – można wyrazić w różnych układach współrzędnych, np. współrzędne równikowe ekwinokcjalne, współrzędne równikowe godzinne, współrzędne horyzontalne, współrzędne ekliptyczne, a nawet współrzędne kartezjańskie (gdy dane są paralaksy gwiazd).

Pojęcie ziemskiego systemu odniesienia pojawiło się znacznie później niż niebieskiego systemu odniesienia. Ani obserwacje astronomiczne, ani też naziemne obserwacje geodezyjne i grawimetryczne nie umożliwiały dostatecznie dokładnego określenia środka mas Ziemi, z którym powinien się pokrywać początek ziemskiego systemu odniesienia. Od początku XX w. do opracowywania obserwacji astronomicznych korzystano z „ziemskiego układu odniesienia” określonego przez biegun *CIO* (**C**onventional **I**nternational **O**rigi**n**) i południk początkowy określony przez międzynarodową służbę czasu. W pracach geodezyjnych korzystano od pierwszych dziesięcioleci XIX w. z tzw. geodezyjnego systemu odniesienia (*geodetic datum*). Podstawowa oś tego systemu zdefiniowana była jako równoległa do osi obrotu Ziemi. Początek geodezyjnego systemu odniesienia był zdefiniowany jako środek geometryczny elipsoidy obrotowej o osi obrotu pokrywającej się z podstawową osią tego systemu i dopasowanej do geoidy w obszarze pokrytym siecią triangulacyjną. Był to zatem system niegeocentryczny i istotną rolę w jego definicji odgrywała elipsoida obrotowa – nazywana elipsoidą odniesienia – z jej parametrami.

Realizacje geodezyjnych systemów odniesienia, np. Pułkowo'42, ED50 (**E**uropean **D**atum **1950**), NAD27 (**N**orth **A**merican **D**atum **1927**), dla których przyjęte zostały konkretne elipsoidy odniesienia o ustalonych parametrach, zaś pozostałe parametry wyznaczono z obserwacji, pełnią rolę geodezyjnych układów odniesienia.

Pozycje punktów w geodezyjnym układzie odniesienia zazwyczaj wyraża się w tzw. układzie współrzędnych geodezyjnych (elipsoidalnych): szerokość i długość geodezyjna. Do celów mapowania stosuje się odpowiednie odwzorowanie kartograficzne, które parze współrzędnych geodezyjnych jednoznacznie przypisuje parę współrzędnych płaskich – zazwyczaj w kartezjańskim układzie współrzędnych.

Definicje współczesnych ziemskich i niebieskich systemów i układów odniesienia zostaną podane w dalszej części pracy.

3. UKŁAD ODNIESIENIA JAKO REALIZACJA SYSTEMU ZA POŚREDNICTWEM WSPÓLRZĘDNYCH PUNKTÓW DEFINIUJĄCYCH UKŁAD

Układ odniesienia będący realizacją konkretnego **statycznego** systemu zdefiniowany jest poprzez współrzędne punktów. Wybór punktów realizujących system wraz ze współrzędnymi tych punktów definiuje statyczny układ

odniesienia. Jednoznaczność określenia kierunków osi układu odniesienia, w przypadku większej niż niezbędna liczby definiujących go punktów, otrzymuje się poprzez dodatkowe użycie warunku najmniejszych kwadratów.

Kinematyczny układ odniesienia zdefiniowany jest przez współrzędne punktów realizujących system odniesienia oraz zmiany w czasie współrzędnych tych punktów (prędkości). Tylko punkty o odpowiednio dokładnie wyznaczonych wektorach prędkości – co jest związane z ciągłym monitorowaniem ich pozycji w odpowiednio długim okresie czasu – mogą być zaliczone do punktów realizujących kinematyczny układ odniesienia. W przypadku niebieskiego systemu odniesienia – punktami definiującymi układ kinematyczny mogą być obiekty niebieskie (gwiazdy lub kwazary) o dobrze wyznaczonej pozycji i o dokładnie wyznaczonym ruchu własnym. W przypadku zaś ziemskiego systemu odniesienia – jako punkty definiujące układ kinematyczny przyjmowane są stacje, na których w okresie co najmniej kilku lat wykonywane były permanentne obserwacje o wysokiej jakości.

Układy odniesienia mogą być również zdefiniowane dynamicznie. Definicja dynamiczna układu oparta jest na równaniach ruchu ciał Układu Słonecznego, z ewentualnym uwzględnieniem sztucznych satelitów Ziemi, których argumentem jest czas dynamiczny (Kryński 2004b).

4. RYS HISTORYCZNY ROZWOJU ZIEMSKICH SYSTEMÓW I UKŁADÓW ODNIESIENIA

W przeszłości tradycyjne układy geodezyjne były regionalną, statyczną realizacją ziemskiego systemu odniesienia, dokonywaną za pośrednictwem punktów tworzących osnowy geodezyjne. Orientację tych układów w odniesieniu do osi obrotu Ziemi i południka początkowego określano w oparciu o pomiary astronomiczne na odpowiednio dobranych punktach osnowy. Położenie osi obrotu Ziemi oraz południka początkowego określano w odniesieniu do niebieskiego systemu odniesienia, którego realizacją były fundamentalne katalogi gwiazd. Błędy obserwacji astronomicznych szacowane na poziomie dziesiątych części sekundy łuku umożliwiły powiązanie układów kontynentalnych z dokładnością co najwyżej kilkunastu metrów. Uwzględnienie zmienności w czasie położenia osi obrotu względem bryły Ziemi – zasygnalizowanej w oparciu o rozważania teoretyczne przez Eulera w 1765 roku, a następnie zaobserwowanej w drugiej połowie XIX w. – oraz zmienności prędkości obrotowej Ziemi związanej z astronomicznymi systemami czasu odegrało istotną rolę w zmniejszeniu błędów przejścia od układu niebieskiego do ziemskiego, a jednocześnie w poprawieniu orientacji osnow geodezyjnych i dokładności ich wzajemnych powiązań. Stało się to możliwe dzięki prowadzonej nieprzerwanie od ponad 100 lat międzynarodowej służby wyznaczania parametrów ruchu obrotowego Ziemi: ILS (**I**nternational **L**atitude **S**ervice), IPMS (**I**nternational **P**olar **M**otion **S**ervice), BIH (**B**ureau **I**nternational de

l'Heure), IERS (**I**nternational **E**arth **R**otation **S**ervice), BIPM (**B**ureau **I**nternational des **P**oids et **M**esures).

Zaczątki tworzenia ziemskiego układu odniesienia przypadają na przełom XIX i XX w. W wyniku działań podjętych przez założoną z inicjatywy Helmerta w 1887 roku międzynarodową organizację Internationale Erdmessung – poprzedniczkę Międzynarodowej Asocjacji Geodezji IAG – wyznaczono parametry kilku globalnych elipsoid ziemskich, np. elipsoidy Helmerta 1906, elipsoidy Hayforda 1910, 1924 (Angus-Lepan 1984). Potrzeba stworzenia ziemskiego układu odniesienia, który umożliwiłby powiązanie w jeden system – geodezyjnych układów kontynentalnych, np. **E**uropean **D**atum (ED), **N**orth **A**merican **D**atum (NAD) i **T**okyo **D**atum (TD), i zaspokojenie oczekiwań gwałtownie rozwijającej się nawigacji, w szczególności w lotnictwie, stała się nagląca w latach 1950. Prace podjęte przez Departament Obrony (DoD) USA w kooperacji z naukowymi ośrodkami krajowymi i organizacjami międzynarodowymi zaowocowały utworzeniem ziemskiego systemu odniesienia DoD pod nazwą **D**oD **W**orld **G**eodetic **S**ystem **1960** (w skrócie WGS60). System ten powstał na bazie łącznego opracowania danych z sieci kontynentalnych z danymi grawimetrycznymi i astronomiczno-geodezyjnymi oraz danymi z kanadyjskich pomiarów przy użyciu wprowadzonych podczas II wojny światowej systemów nawigacyjnych **H**IRAN (**H**igh **R**anging **S**ystem) i **S**HORAN (**S**hort **R**ange **A**ir **N**avigation).

Umieszczenie na orbitach okołoziemskich pierwszych sztucznych satelitów wiąże się z powstaniem załazków nowych, globalnych systemów obserwacyjnych. Kilkumetrowe początkowo dokładności pozycji wyznaczanej z fotograficznych, laserowych i dopplerowskich obserwacji sztucznych satelitów Ziemi umożliwiły znacznie dokładniejsze, aniżeli przy użyciu obserwacji astronomicznych, powiązanie kontynentalnych sieci geodezyjnych. Od początku lat 60. dla celów cywilnych i militarnych zaczęły na bazie pomiarów satelitarnych powstawać światowe sieci geodezyjne. Należy do nich sieć stacji założonych przez **S**mithsonian **A**strophysical **O**bservatory (SAO), których współrzędne odniesione do średniego bieguna 1900–1905 i średniej długości Obserwatorium Morskiego USA określały kolejno układy odniesienia **S**tandard **E**arth **I**, **S**tandard **E**arth **II** i **S**tandard **E**arth **III** (Veis 1966). Jednocześnie prowadzone były prace nad doskonaleniem WGS60. W 1967 roku, w wyniku działań Komitetu WGS reprezentowanego przez przedstawicieli armii, marynarki i lotnictwa USA, w oparciu o łączne opracowanie dostępnych naziemnych obserwacji geodezyjnych z obserwacjami satelitarnymi, wprowadzono na potrzeby DoD **W**orld **G**eodetic **S**ystem **1966** (WGS66). W tym samym roku Międzynarodowa Unia Astronomiczna IAU (**I**nternational **A**stronomical **U**nion) w porozumieniu z Międzynarodową Unią Geodezji i Geofizyki IUGG (**I**nternational **U**nion of **G**eodesy and **G**eophysics) zdefiniowała system od-

niesienia oparty o średnią oś obrotu Ziemi¹ określoną przez tzw. Międzynarodowy Konwencjonalny (Umowny) Początek *CIO*, odpowiadający średniemu z lat 1900–1905 położeniu bieguna północnego, oraz związaną ze średnią osią obrotu i zdefiniowaną przez BIH płaszczyznę południka początkowego, równoległą do średniego południka Greenwich. System ten został uznany jako międzynarodowy ziemski system odniesienia, tzw. Konwencjonalny (Umowny) System Ziemski *CTS* (**C**onventional **T**errestrial **S**ystem). W tym samym roku IAG zatwierdziła Geodezyjny System Odniesienia *GRS67* (**G**eodetic **R**eference **S**ystem 1967), w którym zdefiniowane zostały podstawowe stałe geometryczne i fizyczne podlegającej ruchowi obrotowemu Ziemi oraz podana została nowa formuła opisująca normalne przyspieszenie siły ciężkości wraz z wartościami definiujących ją parametrów. Ekwipotencjalną elipsoidę odniesienia *GRS67* zorientowano zgodnie z *CTS*.

Pierwszym globalnym systemem nawigacyjnym, stworzonym jako dzieło myśli, technologii i rąk ludzkich, był amerykański system dopplerowski *TRANSIT* (**T**ime **R**anging and **S**equential – **N**avy **N**avigation **S**atellite **S**ystem, *NNSS*), który jako system wojskowy uzyskał zdolność operacyjną w 1964 roku, a od 1967 roku został udostępniony do użytku cywilnego. Uzyskiwane na podstawie geodezyjnych pomiarów dopplerowskich dokładności pozycji na poziomie metra, a z czasem osiągające poziom kilku decymetrów, oraz jednocześnie konieczność dokładnego wyznaczania orbit satelitów tego systemu zainicjowały rozpoczęcie działań w kierunku opracowania dokładniej zdefiniowanego ziemskiego systemu odniesienia. System taki pod nazwą *WGS72* (**W**orld **G**eodetic **S**ystem 1972) powstał w 1972 roku. W 1980 roku na mocy uchwały Zgromadzenia Generalnego *IUGG* (*IAG* 1980) system odniesienia *GRS67* zastąpiony został nowym Geodezyjnym Systemem Odniesienia *GRS80* (**G**eodetic **R**eference **S**ystem 1980), który różni się od poprzedniego wielkościami geometrycznych i fizycznych parametrów geocentrycznej elipsoidy ekwipotencjalnej (Moritz 1984).

Na początku lat 80. z uwagi na postęp technologiczny i towarzyszący mu wzrost dokładności i czasowo-przestrzennej rozdzielczości obserwacji satelitarnych, pojawiła się nagła potrzeba zdefiniowania nowego globalnego systemu obserwacyjnego w miejsce dotychczasowego *WGS72*. Do zdefiniowania systemu nazwanego *WGS84* (**W**orld **G**eodetic **S**ystem 1984) posłużono się parametrami *GRS80* oraz satelitarnymi obserwacjami dopplerowskimi i laserowymi, a także obserwacjami *VLBI*. System *WGS84* używany jest jako system odniesienia dla *GPS*.

¹ Średnia oś obrotu Ziemi zdefiniowana jest jako „średnia oś powierzchni geograficznej” Ziemi, wpasowana w sensie najmniejszych kwadratów na podstawie ciągu czasowego pozycji 5 obserwatoriów uczestniczących w Międzynarodowej Służbie Szerokości *ILS*. Zakłada się, że *CIO* pokrywa się w przybliżeniu ze średnim biegunem (średnim położeniem osi obrotu Ziemi) z okresu 1900–1905 (Seidelmann 1982).

Istotną rolę w tworzeniu nowoczesnego Konwencjonalnego (Umownego) Systemu Ziemskiego *CTS* odegrała realizacja międzynarodowego projektu *MERIT* (**M**onitoring of the **E**arth **R**otation and **I**ntercomparison of **T**echniques) ustanowionego na mocy rezolucji IAU i IUGG w 1979 roku (Kołaczek 1989). Doświadczenia zdobyte w trakcie kampanii obserwacyjnej *MERIT* w latach 1983–1984 oraz przy opracowaniu zgromadzonych różnymi technikami obserwacji posłużyły do sformułowania nowych definicji ziemskiego systemu odniesienia.

Konwencjonalny (Umowny) Ziemi System Odniesienia *CTRS* (**C**onventional **T**errestrial **R**eference **S**ystem), zgodnie z Rezolucją 2 XX Zgromadzenia Generalnego IUGG w Wiedniu w 1991 roku (IAG 1992), jest quasi-kartezjańskim systemem zdefiniowanym przez przestrzenny obrót względem nie obracającego się systemu geocentrycznego (*GCRS* – zdefiniowany przez IAU (Kryński 2004a)). Czasem współrzędnych *CTRS* jest *TCG* – czas współrzędnych *GCRS* (Kryński 2004b). Początkiem *CTRS* jest środek mas Ziemi z uwzględnieniem oceanów i atmosfery. *CTRS* nie podlega globalnemu, residualnemu obrotowi względem ruchów poziomych na powierzchni Ziemi. Monitorowanemu przez IERS systemowi *CTRS* nadano nazwę Międzynarodowego Ziemskiego Systemu Odniesienia *ITRS* (**I**nternational **T**errestrial **R**eference **S**ystem). Jest to system geocentryczny, którego jednostką długości jest metr (SI). W myśl postanowień IUGG i IAU (1991) skala systemu jest spójna z czasem współrzędnych geocentrycznych *TCG* (Kryński 2004b). Orientacja *ITRS* jest zgodna z orientacją BIH 1984.0, zaś jej zmienność w czasie jest określona poprzez zastosowanie warunku, iż globalna suma poziomych ruchów tektonicznych nie zawiera składowych obrotu. *ITRS* jest pierwszym ziemskim **systemem kinematycznym**. Realizacjami *ITRS* są międzynarodowe ziemskie układy odniesienia *ITRF* (**I**nternational **T**errestrial **R**eference **F**rame). Poszczególne rozwiązania *ITRF* (*ITRF88*, *ITRF89*,..., *ITRF96*, *ITRF97* i *ITRF2000*) są opracowywane przez ośrodki obliczeniowe IERS w oparciu o obserwacje VLBI, LLR, SLR, GPS i DORIS. Każde kolejne rozwiązanie *ITRF* zawiera pozycje i prędkości stacji oraz pełną macierz kowariancji (IERS 2003). Rozwój sieci *ITRF* (5-krotny wzrost liczby stacji i poprawa ich przestrzennego rozkładu), poprawa precyzji wyznaczenia pozycji i prędkości stacji dzięki zwiększaniu materiału obserwacyjnego i ulepszeniu strategii i metod opracowania obserwacji powodują znaczącą poprawę w kolejnych rozwiązaniach *ITRF*. Parametry transformacji pomiędzy układami *ITRF* wyznaczone są przez IERS i publikowane w IERS Conventions. Listę ważniejszych zdarzeń związanych z rozwojem ziemskich systemów odniesienia przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Ważniejsze zdarzenia związane z rozwojem ziemskich systemów odniesienia

Rok	Zdarzenie
1899	Powołanie przez IAG Międzynarodowej Służby Szerokości (ILS)
1900	Rozpoczęcie wykonywania obserwacji przez ILS
1912	Powołanie Międzynarodowego Biura Czasu (BIH)
1962	Powołanie Międzynarodowej Służby Ruchów Bieguna (IPMS)
1966	Wprowadzenie ziemskiego układu odniesienia Standard Earth III
1967	Zdefiniowanie początku konwencjonalnego (umownego) ziemskiego układu odniesienia <i>CIO</i>
1967	Przyjęcie przez IUGG geodezyjnego systemu odniesienia GRS67
1968	Wprowadzenie systemu pozycji bieguna i czasu <i>UT</i> dystrybuowanego przez BIH – układ odniesienia BIH
1972	Wprowadzenie ziemskiego systemu odniesienia WGS72
1973	Wprowadzenie satelitarnych obserwacji dopplerowskich do wyznaczeń pozycji bieguna prowadzonych przez BIH początek końca ery obserwacji astrometrycznych
1979	Przyjęcie przez IUGG geodezyjnego systemu odniesienia GRS80
1979	Wprowadzenie obserwacji laserowych satelity LAGEOS i LLR do wyznaczeń pozycji bieguna i <i>UT</i>
1980	Początek kampanii MERIT (<i>Monitoring of the Earth Rotation and Intercomparison of the Techniques</i>)
1983–1984	Właściwa kampania MERIT
1984	Wprowadzenie ziemskiego systemu odniesienia WGS84 i BIH (BTS84)
1984	Wprowadzenie ziemskiego systemu odniesienia BIH (BTS84) (<i>po raz pierwszy zastosowano model prędkości AM0-2</i>)
1989	Rozpoczęcie pracy przez służbę International Earth Rotation Service (IERS) (<i>od 2004 r. International Earth Rotation and Reference Systems Service</i>) wykorzystującą obserwacje laserowe i VLBI do wyznaczenia parametrów ruchu obrotowego Ziemi
1991	Zdefiniowanie przez IUGG konwencjonalnego (umownego) ziemskiego systemu odniesienia <i>CTRS</i> . Monitorowanemu przez IERS systemowi <i>CTRS</i> nadano nazwę Międzynarodowego Ziemskiego Systemu Odniesienia <i>ITRS</i>
1993	Powołanie International GPS Service (IGS)
1994	Wprowadzenie obserwacji DORIS do wyznaczeń pozycji bieguna

5. RYS HISTORYCZNY ROZWOJU NIEBIESKICH SYSTEMÓW I UKŁADÓW ODNIESIENIA

Gwiazdy, jako obiekty obserwacji astrometrycznych, wraz z katalogami ich pozycji odgrywały przez tysiąclecia rolę globalnego systemu obserwacyjnego. Historia katalogów gwiazd jest bardzo długa i sięga około 150 roku przed narodzeniem Chrystusa, kiedy Hipparch po dokonaniu kilku podstawo-

wych odkryć, takich jak odkrycie zjawiska precesji, zmieniającej w widoczny sposób długości ekliptyczne gwiazd, utworzył swój własny katalog w układzie ekliptycznym. Kontynuatorem prac Hipparcha był Klaudiusz Ptolemeusz (ok. 150 r. n.e.). Prace Ptolemeusza znane są pod nazwą *Almagest* i publikowane w wielu językach do chwili obecnej (Fricke 1985). Wprowadzone przez Ptolemeusza pojęcie sfery gwiazd stałych przetrwało ponad 1500 lat. W średniowieczu powstała „astronomia grawitacyjna”, której prekursorami byli Kopernik i Galileusz, a następnie Newton i Kepler. Duży wkład w zbadanie zjawiska precesji miał Euler, który przedstawił mechanizm jej działania w postaci formalnego opisu przyciągania Ziemi przez Słońce i Księżyc. W 1718 roku Halley wykazał, że gwiazdy przemieszczają się względem siebie. Zjawisko to opisał również Cassini, ale dopiero Tobiasz Mayer w Göttingen i Bradley z Meskelyne w Greenwich wyznaczyli ruchy własne 60 gwiazd. Z obserwacji wykonanych w latach 1750–1765 przez Bradley’a powstał katalog 3000 gwiazd o dokładności pozycji około 2". Bradley’owi nie udało się wyznaczyć paralaks gwiazd, odkrył natomiast zjawisko aberracji i nutacji. Obserwacje Bradley’a opracował ponownie Bessel i opublikował je w 1818 roku w „*Fundamenta Astronomiae*”. Położenie punktu równonocy i położenie równika (nachylenie do ekliptyki) zostało wyznaczone przez Bessela z obserwacji Słońca i 36 jasnych gwiazd zodiakalnych, wykonanych w południku miejscowym.

Dalszy postęp w zakresie dokładności wyznaczania pozycji gwiazd nastąpił w wyniku opracowania przez Newcomba nowego modelu precesji (Newcomb 1898) i rozpoczęcia wyznaczeń pozycji bieguna ziemskiego przez ILS (Kończak 2004a). W 1936 roku zakończono prace nad Katalogiem Fundamentalnym FK-3 (Kopff 1937). Katalog ten, dzięki porozumieniu międzynarodowemu (decyzja Zgromadzenia Generalnego IAU w 1938 roku) został przyjęty jako pierwszy konwencjonalny (umowny) niebieski układ odniesienia.

Prace nad kolejnym katalogiem fundamentalnym – FK4 były prowadzone zgodnie z rekomendacją IAU z 1952 roku (IAU 1954). Katalog FK4 powstał jako wynik rewizji katalogu FK3, w której wykorzystano 72 nowoczesne katalogi obserwacji gwiazd oraz obserwacje Słońca, planet: Merkury, Wenus, Mars, Jowisz i planetoid takich jak: Ceres, Pallas, Juno i Vesta (Fricke i Kopff 1963). W tym czasie, w celu usunięcia wpływu ruchu punktu równonocy, podjęto próbę wykorzystania obserwacji obiektów pozagalaktycznych, prowadzonych metodami fotograficznymi.

Ostatnim katalogiem fundamentalnym, jaki powstał z kompilacji katalogów wykonanych metodami optycznymi prowadzonymi z powierzchni Ziemi, jest katalog FK5 (Fricke i in. 1988). Opracowanie tego katalogu było wynikiem rezolucji uchwalonej przez XV Zgromadzenie Generalne IAU w Sydney w 1973 roku (IAU 1974). Podstawą opracowania katalogu FK5 był katalog FK4, z którego wzięto 1535 gwiazd fundamentalnych i poprawiono ich pozycje i ruchy własne. Wyeliminowano błąd położenia punktu równono-

cy katalogu FK4 i wprowadzono nową stałą precesji z modelu precesji IAU1976 (Duncomb i in. 1977).

Kolejnym krokiem w dziedzinie poprawienia dokładności katalogów był katalog Hipparcos, który powstał na podstawie obserwacji astrometrycznych wykonanych w ramach misji satelity Hipparcos (Perryman i in. 1997). System odniesienia katalogu Hipparcos jest zgodny z systemem *ICRS* (Kołaczek 2004a; Kryński 2004a), którego realizacja – *ICRF* (International Celestial Reference Frame) odbywa się za pośrednictwem wybranych radioźródeł, obserwowanych techniką VLBI z dokładnością ± 0.6 mas, a ruchy własne realizują układ inercjalny z dokładnością ± 0.25 mas/rok. Układ odniesienia *ICRF*, realizowany przez pozycje radioźródeł, połączony jest z układem realizowanym technikami optycznymi poprzez mające swoje odpowiedniki optyczne radioźródła.

W wyniku kompilacji katalogów FK5 i Hipparcos powstał katalog FK6, w którym pozycje gwiazd są dokładniejsze aniżeli w FK5, a ruchy własne co najmniej równie dokładne jak w FK5 (Kołaczek 2004a).

Postęp w zakresie dokładności katalogów gwiazd i definiowanych przez nie niebieskich układów odniesienia podano w tabeli 2.

Tabela 2. Dokładności historycznych katalogów gwiazd i definiowanych przez nie niebieskich układów odniesienia

Nazwa katalogu/ /Twórca katalogu	Rok wydania	Dokładność ["]	Dokładność w długości łuku południka na powierzchni Ziemi [m]
Ptolemeusz	~150	± 500	15 400
Tycho Brahe	1600	100	3 080
Heweliusz	1680	18	555
Bradley	1750	2	62
Bessel	1825	0.7	22
FK3	1936	0.5	15
FK4	1963	0.05	1.5
FK5	1988	0.019	0.6
Hipparcos	1996	0.0007	0.02
FK6	1999	0.0007	0.02

System katalogu fundamentalnego zdefiniowany jest poprzez:

- pozycje wybranych gwiazd,
- ruchy własne wybranych gwiazd,
- przyjęty układ wielkości precesyjnych i określa układ odniesienia za pośrednictwem kinematycznie lub dynamicznie wyznaczonych:
 - średniego równika na epokę katalogu,
 - średniej równonocy na epokę katalogu.

Podstawowe cechy najważniejszych katalogów fundamentalnych, używanych na przestrzeni ostatnich 70 lat, podano w tabeli 3.

Tabela 3. Podstawowe cechy katalogów fundamentalnych. Epoki podane bez nawiasów oznaczają epoki katalogów

Nazwa katalogu	Rok wydania	Epoka	System odniesienia	Nowe elementy
FK3	1936	B1950	średni równik, średnia równonoc (B1950.0)	
FK3 – revised	1957	B1950	średni równik, średnia równonoc (B1950.0)	korekcje indywidualne współrzędnych gwiazd
FK4	1963	B1950 B1975	średni równik, średnia równonoc (B1950.0, B1975.0)	więcej gwiazd, dokładniejsze pozycje i ruchy własne
Problemy: • narastający w funkcji czasu błąd pozycji punktu równonocy (<i>znacząco odbiega od dynamicznego</i>) • konieczność poprawienia modelu precesji				
FK5	1988	J2000	średni równik, średnia równonoc (J2000.0)	nowy model precesji IAU1976
Hipparcos	1996	(J1991.25)	równik i początek efemerydalny ICRS 2000, stałe IAU1976	obserwacje z misji kosmicznej HIPPARCOS (1989–1993)
FK6	1999–	(J2000)	równik i początek efemerydalny ICRS 2000	kombinacja FK5 i Hipparcos

Od roku 1997 obowiązującym niebieskim systemem odniesienia jest Międzynarodowy Niebieski System Odniesienia *ICRS*, zaś dla obiektów obserwowanych w paśmie widzialnym – *HCRS* (**H**ipparcos **C**elestial **R**eference **S**ystem).

6. TRANSFORMACJA POMIĘDZY NIEBIESKIM A ZIEMSKIM SYSTEMEM ODNIESIENIA – PRECESJA, NUTACJA, RUCH BIEGUNA, CZAS (KĄT OBROTU ZIEMI)

Transformacja pomiędzy ziemskim systemem odniesienia (do niego odnoszą się obserwacje) a niebieskim systemem odniesienia (system quasi-inercjalny, w którym podawane są pozycje gwiazd) tradycyjnie wykonywana jest w trzech zasadniczych krokach. W pierwszym kroku **system obserwacyjny**, zdefiniowany przez „równik obserwacyjny” i „zerowy południk obserwacyjny”, przeprowadzany jest za pomocą parametrów opisujących ruch bieguna w **system pośredni**, zdefiniowany przez „równik pośredni” i „zerowy południk pośredni”. Następnym krokiem jest **obrót** systemu pośredniego wo-

kół osi „równika pośredniego” o kąt reprezentujący obrót Ziemi wokół własnej osi. Obrócony w ten sposób system pośredni staje się geocentrycznym systemem niebieskim, do którego odnoszą się tzw. miejsca pozorne. W ostatnim kroku system pośredni (a dokładnie utworzony w poprzednim kroku geocentryczny system niebieski) przeprowadzany jest w **system quasi-inercjalny** za pomocą parametrów opisujących precesję i nutację. W transformacji uwzględniane są dodatkowo efekty aberracji i paralaksy, ruch własny gwiazd i efekty relatywistyczne.

System obserwacyjny to system geocentryczny zdefiniowany poprzez rzeczywisty **kierunek linii pionu**, przyjmowany za niezmienny w czasie względem układu ziemskiego oraz kierunek **średniej osi obrotu Ziemi** (w odniesieniu do układu ziemskiego), z którym pokrywa się oś z ziemskiego układu odniesienia.

System pośredni to system geocentryczny, który zdefiniowany był poprzez rzeczywisty **kierunek linii pionu**, przyjmowany za niezmienny w czasie względem układu ziemskiego oraz kierunek **prawdziwej osi obrotu Ziemi** (w odniesieniu do układu ziemskiego), z którym pokrywa się oś z chwilowego układu ziemskiego.

System quasi-inercjalny to system barycentryczny (wcześniej heliocentryczny), który zdefiniowany był na epokę (epoka katalogu fundamentalnego) poprzez **średni równik** (w sensie nutacji), który określa kierunek osi z układu niebieskiego oraz **średni punkt równonocy wiosennej**, który określa kierunek osi x niebieskiego układu odniesienia.

Oznaczając za pomocą współrzędnych równikowych (α, δ) barycentryczną pozycję gwiazdy w danym systemie odniesienia, jednostkowy wektor \mathbf{e} pozycji gwiazdy w tym systemie ma postać:

$$\mathbf{e} = \begin{pmatrix} \cos \delta \cos \alpha \\ \cos \delta \sin \alpha \\ \sin \delta \end{pmatrix} \quad (2)$$

Transformacje pomiędzy poszczególnymi systemami zostaną przedstawione w postaci relacji pomiędzy jednostkowym wektorem wodzącym gwiazdy w jednym systemie i obrazem tego wektora (również wektorem jednostkowym) w drugim systemie.

System obserwacyjny => system pośredni

Zależność pomiędzy systemem obserwacyjnym i systemem pośrednim wyraża się przez transformację:

$$\mathbf{e}_{\text{POSR}}(t) = R_2(x_p(t)) R_1(y_p(t)) \mathbf{e}_{\text{OBS}} \quad (3)$$

gdzie: \mathbf{e}_{POSR} , \mathbf{e}_{OBS} – wektory jednostkowe w układach kartezjańskich systemów pośredniego (ziemskiego) i obserwacyjnego,

x_p, y_p – **współrzędne chwilowego biegunu** na epokę t ,
 R_1, R_2 – macierze obrotowe odpowiednio wokół osi x i y .

System pośredni (ziemski) => system pośredni (niebieski)

Zależność pomiędzy systemem pośrednim (ziemskim) i systemem pośrednim (niebieskim) wyraża się przez transformację:

$$\mathbf{e}_{\text{POSRniebieski}}(t) = R_3(-\theta) \mathbf{e}_{\text{POSRziemski}} \quad (4)$$

gdzie: $\mathbf{e}_{\text{POSRniebieski}}$, $\mathbf{e}_{\text{POSRziemski}}$ – wektory jednostkowe w układach kartezjańskich systemów pośrednich niebieskiego i ziemskiego,

θ – **prawdziwy czas gwiazdowy** na epokę t ,

R_3 – macierz obrotowa wokół osi z .

System pośredni (niebieski) => system quasi-inercjalny

Zależność pomiędzy systemem pośrednim (niebieskim) i systemem quasi-inercjalnym wyraża się przez transformację:

$$\mathbf{e}_{\text{QI}}(t) = P(t)N(t) \mathbf{e}_{\text{POSRniebieski}} \quad (5)$$

gdzie: \mathbf{e}_{QI} , $\mathbf{e}_{\text{POSRniebieski}}$ – wektory jednostkowe w układach kartezjańskich systemów quasi-inercjalnego i pośredniego niebieskiego,

$P(t)$, $N(t)$ – odpowiednio **macierze precesji i nutacji** na epokę t .

Macierze $P(t)$ i $N(t)$ wyrażone za pomocą macierzy obrotowych mają postać:

$$P(t) = R_3(\zeta_A(t)) R_2(-\theta_A(t)) R_3(z_A(t)) \quad (6)$$

$$N(t) = R_1(-\varepsilon_A(t)) R_3(\Delta\psi(t)) R_1(\varepsilon_A(t) + \Delta\varepsilon(t)) \quad (7)$$

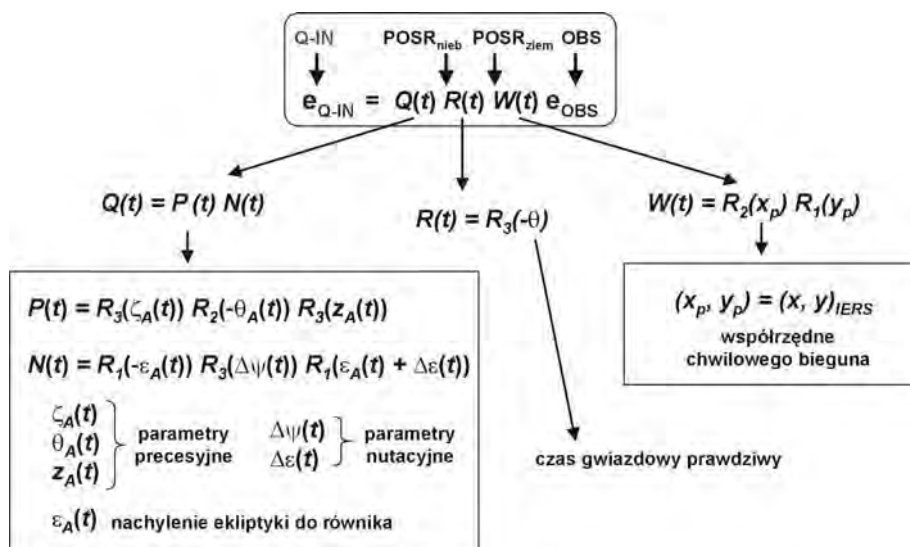
gdzie: $\zeta_A(t)$, $\theta_A(t)$, $z_A(t)$ – parametry precesyjne,

$\varepsilon_A(t)$ – nachylenie ekliptyki do równika,

$\Delta\psi(t)$, $\Delta\varepsilon(t)$ – parametry nutacyjne odpowiadającej nutacji w długości i w nachyleniu ekliptyki do równika.

Wzory umożliwiające obliczenie parametrów precesyjnych dla modelu IAU1976 podane są w IERS Conventions 1996 (IERS 1996). Schemat transformacji pomiędzy ziemskim systemem odniesienia a niebieskim systemem odniesienia przedstawiono na rysunku 2.

Opis transformacji pomiędzy ziemskim systemem odniesienia a niebieskim systemem odniesienia, z uwzględnieniem współczesnych definicji tych systemów, relacji zachodzących pomiędzy systemami i nowych systemów czasu, podano w pracach (Kryński 2004a; Kryński i Sękowski 2003).



Rys. 2. Schemat transformacji pomiędzy ziemskim systemem odniesienia (OBS) a niebieskim systemem odniesienia (Q-IN)

7. DOKŁADNOŚĆ MONITOROWANIA RUCHU BIEGUNA

Parametry ruchu obrotowego Ziemi, które opisują ruch bieguna oraz prędkość kątową obrotu Ziemi wokół osi, są zmienne w czasie i wymagają ciągłego monitorowania (Kołaczek 2004b). Systematyczne monitorowanie ruchu bieguna rozpoczęto w 1899 roku w ramach powołanej przez Międzynarodową Asocjację Geodezji IAG – Międzynarodowej Służby Bieguna ILS. Położenie chwilowego bieguna wyznaczano w oparciu o obserwacje astrometryczne prowadzone początkowo w 5 obserwatoriach astronomicznych usytuowanych na równoleżniku 39 na półkuli północnej – z dokładnością około 1 m i rozdzielczością czasową 0.05 roku, tj. około 18 dni. Obecnie, po ponad 100 latach monitorowania położenia bieguna, jego pozycję wyznacza się z dokładnością 2–3 mm z rozdzielczością 0.5 dnia, a praktycznie również w czasie rzeczywistym.

Znaczący postęp w dokładności i zwiększeniu rozdzielczości czasowej określania położenia bieguna nastąpił w latach 1972–1988. W okresie tym do wyznaczania pozycji bieguna i prędkości kątownej obrotu Ziemi włączono – obok kontynuowanych obserwacji astrometrycznych – obserwacje otrzymywane przy użyciu rozwijających się nowych kosmicznych i satelitarnych technik pomiarowych. Wprowadzenie nowych technik obserwacyjnych umożliwiło poprawienie dokładności i rozdzielczości czasowej określenia pozycji bieguna odpowiednio od 30 cm i 18 dni do 10 cm i 5 dni.

Obecnie pozycje bieguna opracowywane przez IERS na podstawie łączenia rozwiązań VLBI, SLR, DORIS i GPS wyznaczane są z dokładnością 2 mm z rozdzielczością czasową 1 doby.

8. ROLA ODCHYLEŃ PIONU W REALIZACJI UKŁADÓW ODNIESIENIA

Rola odchyłeń pionu we współczesnej geodezji nie jest w pełni doceniana. Wiąże się ona bowiem z prowadzeniem kłopotliwych i trudnych do pełnego zautomatyzowania obserwacji astronomicznych. Znajomość odchyłeń pionu, niezbędna w dobie zakładania osnów geodezyjnych metodami tradycyjnymi i zagęszczania ziemskiego układu odniesienia, odgrywa współcześnie nieco mniejszą rolę. Tym niemniej znajomość kierunku pionu stanowiąca podstawę orientacji lokalnego układu współrzędnych jest nadal istotna w geodezji i astronomii.

Odchylenie pionu θ (kąt pomiędzy kierunkiem normalnej do elipsoidy odniesienia a kierunkiem pionu) można określić przy pomocy zależności:

$$\theta = \arccos(\mathbf{e}_a \cdot \mathbf{e}_g) \quad (8)$$

gdzie: \mathbf{e}_g , \mathbf{e}_a – wektory jednostkowe odpowiednio normalnej do elipsoidy i kierunku pionu, których składowe wyrażone są w funkcji odpowiednio współrzędnych geodezyjnych φ , λ i astronomicznych Φ , A :

$$\mathbf{e}_g = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \lambda \\ \cos \varphi \sin \lambda \\ \sin \varphi \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e}_a = \begin{bmatrix} \cos \Phi \cos A \\ \cos \Phi \sin A \\ \sin \Phi \end{bmatrix} \quad (9)$$

Odchylenia pionu mogą być również przedstawione poprzez dwie składowe: ζ – w południku i η – pierwszym wertykale (Heiskanen i Moritz 1967):

$$\begin{aligned} \zeta &= \Phi - \varphi \\ \eta &= (A - \lambda) \cos \Phi \end{aligned} \quad (10)$$

Istnieją przynajmniej trzy problemy, do których rozwiązania niezbędna jest znajomość kierunku pionu określona przez znajomość wartości jego odchyłeń:

1. Zapewnienie równoległości małej półosi elipsoidy odniesienia i płaszczyzny zerowego południka układu geodezyjnego do osi z i płaszczyzny południka zerowego umownego ziemskiego układu odniesienia (obecnie *ITRF*) następowało poprzez stosowanie do redukcji azymutów astronomicznych równania Laplace'a (1).
2. Określenie położenia środka elipsoidy względem środka mas Ziemi w rozwiązaniach tradycyjnych poprzez warunki tzw. przyłożenia elipsoidy do geoidy.

3. Określenie odstępów geoidy od elipsoidy niezbędnych do powiązania systemu wysokościowego z systemem współrzędnych geodezyjnych.

Równoległość osi umownego ziemskiego układu odniesienia do osi układu współrzędnych geodezyjnych spełniona była w rozwiązaniach tradycyjnych poprzez użycie warunku Laplace'a (1) w procesie wyrównania osnowy triangulacyjnej. Obserwacje astronomiczne niezbędne do zastosowania równania Laplace'a w procesie orientacji elipsoidy odniesienia muszą być zredukowane do ziemskiego umownego układu odniesienia. W procesie tej redukcji potrzebna jest znajomość parametrów ruchu obrotowego Ziemi w postaci współrzędnych bieguna chwilowego (x_p, y_p) oraz czasu w postaci różnicy $UTI - UTC$. Dokładność orientacji tą metodą wynika z możliwych do osiągnięcia średnich błędów pomiarów astronomicznych, które szacuje się na $\pm 0''.3$ i ich błędów systematycznych osiągających podobne wartości. Do tych błędów należy dołączyć, w przypadku obserwacji archiwalnych z okresu poprzedzającego powołanie IERS, zarówno przypadkowe, jak i systematyczne błędy parametrów ruchu obrotowego Ziemi. Powodowało to, że nierównoległość osi układu geodezyjnego i obecnie stosowanego ziemskiego układu odniesienia wynosi niespełna jedną sekundę łuku dla układu współrzędnych „1942” (Rogowski i Figurski 2004).

Położenie środka elipsoidy odniesienia w rozwiązaniach tradycyjnych określone jest dodatkowo przez tzw. warunki przyłożenia elipsoidy do geoidy. Polegają one na przyjęciu w punkcie przyłożenia wartości odchyleń pionu równych np.:

$$\zeta = 0, \quad \eta = 0, \quad N = 0 \quad (11)$$

gdzie: N – odstęp geoidy od elipsoidy.

Ważnym elementem w procesie realizacji ziemskiego układu odniesienia odgrywają odstęp geoidy od elipsoidy. Wiążą one bowiem geodezyjny układ odniesienia (*geodetic datum*) z układem wysokościowym stosowanym w niwelacji. Jednym ze sposobów pozwalających określić wartości odstępów N geoidy od elipsoidy, a dokładnie ich różnic, jest niwelacja astronomiczno-geodezyjna, podczas której obliczane są różnice odstępów geoidy od elipsoidy dla sąsiednich punktów astronomicznych sieci geodezyjnej. Do ich wyznaczenia konieczna jest znajomość składowych odchyleń pionu w wertykale łączącym oba punkty. Niwelacja astronomiczno-geodezyjna umożliwia wyznaczenie jedynie różnic odstępów; przyjęcie w punkcie początkowym (punkcie przyłożenia) wartości $N = 0$ może powodować przesunięcie położenia elipsoidy w stosunku do środka mas Ziemi. Wartość przesunięcia dla układu „1942” (odniesionego do elipsoidy Krasowskiego) wynosi około 168 m (Rogowski i Figurski 2004). Błędy składowych wektora translacji wynoszą ± 0.4 m, zaś omawianych wcześniej obrotów $\pm 0''.01$.

9. DEFORMACJE SKORUPY ZIEMSKIEJ I ICH WPLYW NA OBSERWACJE

Wprowadzenie kinematycznych definicji systemów odniesienia wiąże się z koniecznością monitorowania zmiennego w czasie położenia punktów określających praktyczną realizację tych systemów – układów odniesienia. Konieczność ciągłego monitorowania położenia stacji dotyczy przede wszystkim ziemskiego układu odniesienia. Chwilowe położenie stacji obserwacyjnych na powierzchni Ziemi, a tym samym współrzędne stacji w globalnym ziemskim układzie odniesienia, podlegają zmianom w czasie, wywołanym deformacjami skorupy ziemskiej. Schemat wyszczególniający źródła i rodzaje deformacji skorupy ziemskiej oraz ich wpływ na pozycje stacji przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Źródła i rodzaje deformacji skorupy ziemskiej i ich wpływ na pozycje stacji

Podane na rysunku 3 oszacowania pochodzących z różnych źródeł deformacji stanowią wartościową informację wyjściową do ilościowej oceny ziemskiego systemu odniesienia, a także wskazówkę określającą, jakie dodatkowe dane należy gromadzić na stacjach realizujących ziemski układ odniesienia i jakie efekty powinny być uwzględniane w realizacji ziemskiego układu kinematycznego. Oszacowania te mogą również być wykorzystane przy interpretacji wyników badań geodynamicznych, a także przez użytkowników globalnych systemów pozycjonowania do pełniejszej oceny dokładności wyznaczanych pozycji.

10. POTRZEBY MODERNIZACJI NIEBIESKIEGO I ZIEMSKIEGO SYSTEMU ODNIESIENIA, OPISY I DEFINICJE TYCH SYSTEMÓW, WPROWADZENIE NOWYCH SYSTEMÓW CZASU I UDOSKONALENIE MODELI TRANSFORMACJI

Z uwagi na wzrost precyzji obserwacji wynikający z doskonalenia istniejących (np. VLBI oraz skale czasu i systemy transmisji czasu) i wprowadzenia nowych technologii obserwacyjnych (np. satelitarne systemy nawigacyjne) pojawiła się nagła potrzeba wprowadzenia nowych systemów odniesienia i bardziej precyzyjnego zdefiniowania relacji pomiędzy systemami odniesienia. Międzynarodowa Unia Astronomiczna IAU oraz Międzynarodowa Unia Geodezji i Geofizyki IUGG zainicjowały działania w kierunku opracowania podstaw teoretycznych definicji systemów odniesienia odpowiadających współczesnym wymaganiom dokładności. W ramach obu unii powołane zostały współpracujące wzajemnie grupy robocze, których działania na przestrzeni ostatniego ćwierćwiecza materializowały się we wprowadzaniu kolejnych udoskonaleń w definicjach systemów odniesienia i realizacji tych systemów.

W pierwszym rzędzie pojawiła się potrzeba nowej definicji niebieskiego systemu odniesienia. W miejsce używanych dotychczas naprzemiennie definicji dynamicznych i kinematycznych niebieskich systemów odniesienia IAU postanowiła wprowadzić precyzyjnie i jednoznacznie zdefiniowany kinematyczny niebieski system odniesienia. Co więcej, pojawiła się potrzeba zmiany podstaw teoretycznych definicji niebieskiego systemu odniesienia. W miejsce mechaniki newtonowskiej stosowanej dotychczas w definiowaniu niebieskiego systemu odniesienia IAU zaleciła mechanikę relatywistyczną. Jednocześnie wysokie wymagania dokładnościowe stawiane nowoczesnej definicji niebieskiego systemu odniesienia wiązały się z koniecznością niezależenia jej od precesji. Położenie nowego niebieskiego systemu odniesienia powinno być zatem kinematycznie ustalone względem systemu inercjalnego, a nie, jak dotychczas, określone na epokę, w odniesieniu do średniego równika i średniej równonocy, jak to ma miejsce w systemach katalogów fundamentalnych, np. FK5 (Kończak 2004a; Kryński 2004a).

Pojawiła się również potrzeba istotnych modernizacji w definicji ziemskiego systemu odniesienia. Miejsce statycznego ziemskiego systemu odniesienia zajęły systemy kinematyczne. W wyniku działań zainicjowanych przez IUGG określono podstawy teoretyczne kinematycznego ziemskiego systemu odniesienia oraz stworzono bazę do jego realizacji (Rogowski i Figurski 2004).

Wraz z wprowadzaniem nowych definicji niebieskiego i ziemskiego systemu odniesienia konieczne są spójne z tymi definicjami zmiany w definicji pośredniego systemu odniesienia, zmiany w opisie relacji pomiędzy systemami odniesienia oraz udoskonalenie definicji systemów czasu.

Z uwagi na potrzebę dokładnej orientacji systemu pośredniego względem systemu niebieskiego rozpoczęto działania w kierunku doskonalenia modeli opisujących precesję i nutację. Model precesji i teoria nutacji opisują ruch podstawowej osi pośredniego systemu odniesienia względem niebieskiego systemu odniesienia. W dotychczasowym modelu precesji i teorii nutacji podstawową osią pośredniego systemu odniesienia była chwilowa oś obrotu Ziemi. Wyniki badań teoretycznych (Guinot 1979) wykazały, że aby uzyskać wymagane dokładności transformacji systemu niebieskiego do systemu ziemskiego, należy system pośredni odnieść nie do chwilowej osi obrotu Ziemi, lecz do osi, której chwilowe położenie względem niebieskiego systemu odniesienia dawałoby się bardziej precyzyjnie opisać modelem precesyjno-nutacyjnym, a jednocześnie jej ruch w odniesieniu do systemu ziemskiego byłby przewidywalny dokładniej i z większą rozdzielczością czasową (Brzeziński 2004). W ten sposób miejsce chwilowego bieguna określającego kierunek osi podstawowej pośredniego systemu odniesienia zajął początkowo Niebieski Biegun Efemerydalny *CEP*, a następnie Niebieski Biegun Pośredni *CIP* – oba bardzo bliskie chwilowemu biegunowi. Zastąpienie chwilowego bieguna najpierw biegunem *CEP*, a następnie biegunem *CIP* wiąże się z koniecznością wprowadzenia zasadniczych zmian w definicjach uzupełniających orientację pośredniego systemu odniesienia względem zarówno systemu niebieskiego, jak i systemu ziemskiego. Nowej definicji osi podstawowej systemu pośredniego towarzyszyć musi nowa definicja początku liczenia rektascensji. Miejsce punktu równonocy wiosennej, pełniącego rolę takiego początku, zajmuje początek efemerydalny systemu niebieskiego *CEO*, miejsce zaś chwilowego południka Greenwich – początek efemerydalny systemu ziemskiego *TEO*. Dalszą konsekwencją zmian w definicji systemu pośredniego jest modyfikacja teorii ruchu bieguna – opisującej zmienność położenia systemu pośredniego względem systemu ziemskiego, z zachowaniem spójności ze zmodyfikowanym modelem precesji i teorią nutacji. Zgodnie ze zmodyfikowaną teorią ruchu bieguna oraz nową teorią precesyjno-nutacyjną wyznaczone będą dostarczane przez IERS parametry przeprowadzające odpowiednio system ziemski w system pośredni (ziemski) oraz system pośredni (niebieski) w system niebieski (quasi-inercjalny). Zmianie ulega również parametr transformacji przeprowadzającej system pośredni (ziemski) w system pośredni (niebieski). Tradycyjnie parametrem tym był odniesiony do punktu równonocy wiosennej czas gwiazdowy prawdziwy. Zgodnie ze zmodyfikowaną definicją pośredniego systemu odniesienia miejsce czasu gwiazdowego prawdziwego zajmie tzw. Kąt Obrotu Ziemi *ERA*, określający położenie *TEO* względem *CEO* w płaszczyźnie równika systemu pośredniego (Kryński 2004a, 2004b).

Zdefiniowanie niebieskich systemów odniesienia w oparciu o uogólnioną teorię względności wiąże się z koniecznością wprowadzenia nowych systemów czasu, tzw. czasu współrzędnych oraz z uściśleniem definicji do-

tychczas stosowanych systemów czasu, a także relacji pomiędzy tymi systemami (Kryński 2004b).

11. PODSUMOWANIE

Współczesne ziemski i niebieski układy odniesienia dzięki postępowi w zakresie technik obserwacyjnych oraz postępowi w zakresie modelowania zjawisk geofizycznych zachodzących zarówno w bryle Ziemi i jej otoczeniu (hydrosferze i atmosferze) umożliwiły podniesienie dokładności wyznaczenia pozycji na powierzchni Ziemi w ciągu ostatniego stulecia o cztery rzędy. Możliwe stało się także utworzenie z dokładnością 1–2 cm kinematycznego układu współrzędnych ziemskich. Powstające kolejne służby monitorujące Ziemię jako planetę i jej zachowanie w przestrzeni pozwolą zapewne w przyszłości na zrealizowanie układu współrzędnych ziemskich z dokładnością o rząd wyższą.

PODZIĘKOWANIA

Niniejszą pracę wykonano we współpracy Instytutu Geodezji i Kartografii (w ramach badań statutowych IGiK objętych zadaniem „Problemy geodezji i geodynamiki”) i Instytutu Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej Politechniki Warszawskiej (w ramach badań statutowych Instytutu Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej Politechniki Warszawskiej). Stanowi ona także kontynuację prac prowadzonych w IGiK, rozpoczętych w trakcie opracowywania Rocznika Astronomicznego na 2004 rok.

BIBLIOGRAFIA

- Angus-Lepan P., 1984, *A note on the history of the International Association of geodesy*, The Geodesist's Handbook 1984, Bulletin Géodésique, Vol. 58, No 3, Paris, pp. 224–242.
- Brzeziński A., 2004, *Nowy model precesyjno-nutacyjny*, Monographic series of the Institute of Geodesy and Cartography, No 10, Warsaw 2004 pp. 145–161 (this issue).
- Duncombe R.L., Fricke W., Seidelmann P.K., Wilkins G.A., 1977, *System of Astronomical Constants 1976*, Transactions of the International Astronomical Union, Vol. XVII, pp. 52–67.
- Fricke W., 1985, *Fundamental Catalogues, Past, Present and Future*, Celestial Mechanics, Vol. 36, D. Reidel Publishing Company, pp. 207–239.
- Fricke W., Kopff A., 1963, *Fourth Fundamental Catalogue (FK4)*, Veröffentlichungen Astronomisches Rechen-Institut Heidelberg, No 10, Verlag G. Braun, Karlsruhe, 144 pp.

- Fricke W., Schwan H., Lederle T., 1988, *Fifth Fundamental Catalogue (FK5). Part I. The Basic Fundamental Stars*, Veröffentlichungen Astronomisches Rechen-Institut Heidelberg, No 32, Verlag G. Braun, Karlsruhe, 106 pp.
- Guinot B., 1979, *Basic Problems in the Kinematics of the Rotation of the Earth*, in D.D. McCarthy and J.D. Pilkington (eds.), *Time and the Earth's Rotation*, D. Reidel Publ., pp. 7–18.
- Heiskanen W.A., Moritz H., 1967, *Physical Geodesy*, W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- IAG, 1971, *Geodetic Reference System 1967*, Publ. Spéc. No 3 du Bulletin Géodésique, Paris, pp. 6–70.
- IAG, 1980, *The Geodesist's Handbook 1980*, Bulletin Géodésique, Vol. 54, No 3, Paris, pp. 369–406.
- IAG, 1992, *The Geodesist's Handbook 1992*, Bulletin Géodésique, Vol. 66, No 2, Springer, International, pp. 128–135.
- IAU, 1954, *Transactions of the International Astronomical Union*, Vol. VIII, pp. 68.
- IAU, 1974, *Transactions of the International Astronomical Union*, Vol. XVb, pp. 82–84.
- IERS, 1996, *IERS Conventions (1996)*, IERS Technical Note 21, (ed.) D.D. McCarthy, July 1996, Observatoire de Paris, Paris.
- IERS, 2003, *IERS Conventions (2003)*, IERS Technical Note 32, (eds.) D.D. McCarthy, G. Petit, November 2003, Observatoire de Paris, Paris.
- Kopff A., 1937, *Dritter Fundamentalkatalog (FK3) des Berliner Astronomischen Jahrbuchs*.
- Kołaczek B., 1989, *Observational Determination of the Earth's Rotation, Gravity and Low-Frequency Geodynamics*, (ed.) R. Teisseyre, PWN Warszawa, Elsevier Amsterdam–Oxford–New York–Tokyo, pp. 295–361.
- Kołaczek B., 2004a, *Niebieskie fundamentalne systemy odniesienia i ich realizacje*, Monographic series of the Institute of Geodesy and Cartography, No 10, Warsaw 2004, pp. 69–84 (this issue).
- Kołaczek B., 2004b, *Monitorowanie i charakterystyka zmian ruchu obrotowego Ziemi*, Monographic series of the Institute of Geodesy and Cartography, No 10, Warsaw 2004, pp. 163–195 (this issue).
- Kryński J., 2004a, *Relacje pomiędzy systemami niebieskimi i systemem ziemskim*, Monographic series of the Institute of Geodesy and Cartography, No 10, Warsaw 2004, pp. 85–110 (this issue).
- Kryński J., 2004b, *Nowe skale czasu i idea pośredniego systemu odniesienia*, Monographic series of the Institute of Geodesy and Cartography, Nr 10, Warsaw 2004, pp. 111–144 (this issue).
- Kryński J., Sękowski M., 2003, *Rocznik Astronomiczny na rok 2004*, (ed.) J. Kryński, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa, (221 pp).

- Moritz H., 1984, *Geodetic Reference System 1980*, The Geodesist's Handbook 1984, Bulletin Géodésique, Vol. 58, No 3.
- Newcomb S., 1898, *Astronomical Paper* Washington, Vol. 8, Part 1.
- Perryman M.A.C., Lindegren L., Kovalevsky J. i inni, 1997, *The Hipparcos Catalogue, Letter to the Editor*, Astronomy and Astrophysics, Vol. 323, pp. 49–52.
- Rogowski J.B., Figurski M., 2004, *Ziemskie systemy i układy odniesienia oraz ich realizacje*, Monographic series of the Institute of Geodesy and Cartography, No 10, Warsaw 2004, pp. 37–68 (this issue).
- Rummel R., 2000, *Global Integrated Geodetic and Geodynamic Observing System (GIGGOS)*, (eds.) R. Rummel, H. Drewes, W. Bosh, H. Hornik, Towards an Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS), Proceedings of IAG section II Symposium, Munich, 5-9 October 1998, IAG Symposia, Vol. 120, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 2000, pp. 253–260.
- Seidelmann P.K., 1982, *1980 IAU Theory of Nutation, the Final Report of the IAU Working Group for Nutation*, Celestial Mechanics, Vol. 27, pp. 79–106.
- Veis G., 1966, *Theory and methods*, Geodetic parameters for a 1966 Smithsonian Institution Standard Earth, (eds.) C.A. Lundquist and G. Veis, Research in Space Science SAO Special Report No 200, Smithsonian Institution Astrophysical Observatory, Cambridge, Massachusetts.

JAN KRYŃSKI

Institute of Geodesy and Cartography

Warsaw

JERZY B. ROGOWSKI

Institute of Geodesy and Geodetic Astronomy

Warsaw University of Technology

REFERENCE SYSTEMS AND FRAMES IN GEODESY, GEODYNAMICS AND ASTRONOMY

S u m m a r y

A consistent definition of reference systems and their realizations as well as their mutual interrelations that are adequate to positioning systems, are fundamental for geodesy, geodynamics astronomy and navigation. A terrestrial reference system is in a natural way referred to the spin axis of the Earth. Precise determination of that axis requires observations of extraterrestrial objects. Positions of those objects are primarily determined in a celestial reference frame that is a quasi-inertial one, i.e. does not rotate and accelerate with respect to the celestial objects, distant from solar system. Therefore both terrestrial and celestial systems are used in geodesy. It is thus necessary to determine the mutual relationship between those systems. In particular, permanent monitoring of Earth rotation is required. Recently both celestial and terrestrial reference systems are used in global positioning systems and space positioning techniques as well as in monitoring variations of geometry and physical structure of the Earth.

Definitions of reference system, reference frame and coordinate system together with the definition of a kinematic reference system and examples are given in the paper. A review of terrestrial reference systems and terrestrial reference frames, starting from the first concepts is given. Similarly, a review of celestial reference systems, starting from FK3 is presented. Major steps of transformation between celestial and terrestrial reference systems with use of precession and nutation models, sidereal time and polar motion parameters are discussed. A special attention is paid to the problems of determination of the instantaneous pole. Substantial role in maintaining a kinematic terrestrial reference system played by considering crustal deformations of the Earth is underlined. Major sources of crustal deformations are specified together with the estimation of their effect on variations of coordinates of tracking stations. Main changes in definitions and realizations of celestial and terrestrial reference systems are also discussed.

