

JAN KRYŃSKI

Instytut Geodezji i Kartografii

Warszawa

RELACJE POMIĘDZY SYSTEMAMI NIEBIESKIMI I SYSTEMEM ZIEMSKIM

ZARYS TREŚCI: Przyjęte na mocy Rezolucji B1.3 XXIV Zgromadzenia Generalnego IAU w Manchesterze w 2000 roku definicje Barycentrycznego Niebieskiego Systemu Odniesienia BCRS i Geocentrycznego Niebieskiego Systemu Odniesienia GCRS, które łącznie tworzą system ICRS (Kovalevsky 2002), sformułowane zostały z uwzględnieniem współczesnego formalizmu ogólnej teorii względności. W skład definicji tych systemów wchodzi ich metryki, wyrażone za pomocą tensorów metrycznych oraz czasy współrzędnych, a także wyrażona za pomocą uogólnionej transformacji Lorentza relacja pomiędzy BCRS i GCRS, przedstawiona oddzielnie dla współrzędnych przestrzennych i współrzędnej czasowej. Systemem pośrednim pomiędzy systemami niebieskimi a ziemskim systemem odniesienia jest Pośredni System Odniesienia IRS, którego ruch względem GCRS określony jest za pomocą modelu precesyjno-nutacyjnego IAU2000. Za biegun IRS przyjęty został, określony w Rezolucji B1.7 XXIV Zgromadzenia Generalnego IAU w Manchesterze w 2000 roku, Niebieski Biegun Pośredni CIP, zaś jako punkty początkowe systemu w odniesieniu odpowiednio do GCRS oraz Międzynarodowego Ziemskiego Systemu Odniesienia ITRS przyjęto na mocy Rezolucji B1.8 XXIV Zgromadzenia Generalnego IAU w Manchesterze w 2000 roku Niebieski Efemerydalny Punkt Początkowy CEO oraz Ziemski Efemerydalny Punkt Początkowy TEO, oba umieszczone na równiku CIP. Kąt pomierzony wzdłuż równika CIP pomiędzy wektorami jednostkowymi skierowanymi do CEO i TEO, nazwany Kątem Obrotu Ziemi ERA stanowi, w miejsce stosowanego dotąd czasu gwiazdowego, parametr przejścia od niebieskiego do ziemskiego systemu odniesienia. Wprowadzona została również nowa definicja UT1, jako czasu proporcjonalnego do ERA. Obrócony o kąt ERA system IRS przeprowadzany jest w ITRS poprzez dwa obroty, których parametrami są dostarczane przez IERS współrzędne CIP w systemie ITRS.

1. WPROWADZENIE

Definicje systemów odniesienia są integralnie związane z prawami mechaniki i geometrią przestrzeni, w której te prawa są sformułowane. Prostota formalizmu mechaniki newtonowskiej, łącznie z prawem powszechnego ciążenia, wynika z zastosowania systemów inercjalnych jako systemów odniesienia, bez podania wskazówek umożliwiających praktyczne określenie takich

systemów. W praktyce definiowane są operacyjne inercjalne układy odniesienia, w których składowe ruchu obliczone zgodnie z prawami mechaniki porównywane są z wynikami obserwacji. Dopóki uzyskiwana zgodność mieści się w granicach dokładności obserwacji, dopóty operacyjny układ odniesienia uważany jest za dostatecznie dobre przybliżenie inercjalnego układu odniesienia.

Za realizację systemu inercjalnego uważa się taki układ odniesienia, który nie podlega ani obrotom, ani przyspieszeniom względem odległych od słonecznego układu planetarnego obiektów. Dawniej rolę takich obiektów odgrywały gwiazdy obserwowane w paśmie widzialnym, obecnie zaś – radioźródła z odległych galaktyk.

Niebieskie systemy odniesienia reprezentowane przez Katalogi Fundamentalne FK zdefiniowane były poprzez pozycje i ruchy własne gwiazd oraz mechanikę newtonowską, wyrażone w kartezjańskim układzie współrzędnych (x^1, x^2, x^3) w trójwymiarowej przestrzeni euklidesowej. Geometria tej przestrzeni określona jest formą kwadratową

$$ds^2 = g_{11}(dx^1)^2 + g_{22}(dx^2)^2 + g_{33}(dx^3)^2 \quad (1)$$

Interwał ds w przestrzeni euklidesowej odpowiada odległości pomiędzy dwoma nieskończenie bliskimi punktami w tej przestrzeni. Współczynniki $g_{ii} = 1$ przy $(dx^i)^2$, $(i = 1, 2, 3)$ formy kwadratowej (1) ustalają metrykę przestrzeni. Kierunek osi x^3 układu współrzędnych (x^1, x^2, x^3) , będącego realizacją katalogowego systemu odniesienia FK, zdefiniowany jest jako równoległy do osi średniego równika, zaś kierunek osi x^1 pokrywa się z kierunkiem średniej równonocy wiosennej na epokę katalogu (Capitaine i in. 2000).

Wraz z postępującym w ostatnim półwieczu minionego tysiąclecia rozwojem technik obserwacyjnych i towarzyszących mu wzrostem precyzji obserwacji obiektów niebieskich oraz rejestracji czasu, dotychczas stosowane systemy odniesienia zdefiniowane w przestrzeni euklidesowej okazały się niedostatecznie dokładnie określone. Niedokładności wynikające z definicji podlegającego obrotowi systemu Katalogów Fundamentalnych FK, którego współczesnymi realizacjami były katalogi FK4 i FK5, zaczęły przewyższać malejące wraz z doskonaleniem technologii obserwacyjnej błędy wynikające z obserwacji. Niedoskonałość systemów odniesienia częściowo eliminowano poprzez stosowanie tzw. poprawek relatywistycznych, traktowanych jako zakłócenia newtonowskiego modelu mechaniki (Kovalevsky 2002). W szczególności, z zasady względności wynika, że czas nie jest bezwzględny. Płyne on w różny sposób w różnych systemach odniesienia. Coraz wyraźniej zatem zarysowywała się potrzeba zdefiniowania systemów odniesienia w ujęciu mechaniki relatywistycznej w abstrakcyjnej czterowymiarowej przestrzeni z użyciem układu współrzędnych $(x^0 = ct, x^1, x^2, x^3)$, gdzie c jest prędkością światła w próżni, a t jest czasem współrzędnych. W inercjalnym systemie odniesienia geometrię przestrzeni określa forma kwadratowa:

$$ds^2 = -g_{00}(dx^0)^2 + g_{11}(dx^1)^2 + g_{22}(dx^2)^2 + g_{33}(dx^3)^2 \quad (2)$$

której współczynniki $g_{ii} = 1$ przy $(dx^i)^2$ ($i = 0, 1, 2, 3$) ustalają metrykę przestrzeni. Układ współrzędnych $(x^0 = ct, x^1, x^2, x^3)$ jest układem kartezjańskim. Interwał ds z formalnego matematycznego punktu widzenia można traktować jako odległość dwóch nieskończenie bliskich sobie punktów w abstrakcyjnej przestrzeni czterowymiarowej. Czterowymiarowa geometria określona formą kwadratową (2) przy $g_{ii} = 1$, ($i = 0, 1, 2, 3$) nazywa się geometrią pseudoeuklidesową, w odróżnieniu od geometrii euklidesowej.

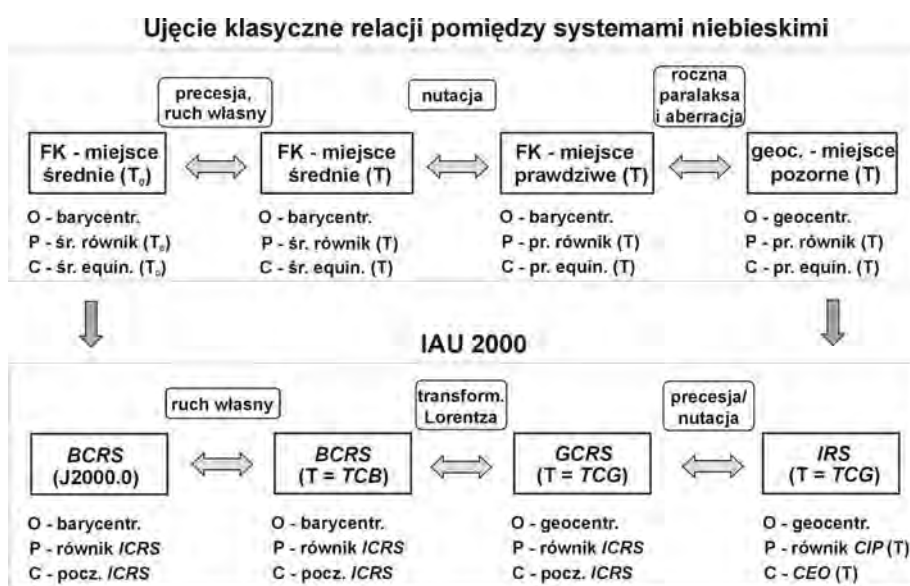
Ponieważ w praktyce definiowalne mogą być jedynie przybliżenia systemów inercjalnych, a nie dokładnie inercjalne systemy – definicja systemu odniesienia powinna odnosić się do nieinercjalnego systemu odniesienia. W nieinercjalnym systemie odniesienia geometria czasoprzestrzeni określona jest przedstawioną przy użyciu konwencji Einsteina (Trajdos-Wróbel 1966) uogólnioną formą kwadratową (Landau i Lifszyc 1980)

$$ds^2 = g_{ik}dx^i dx^k \quad (3)$$

gdzie współczynniki g_{ik} ($i, k = 0, 1, 2, 3$) są pewnymi funkcjami współrzędnych przestrzennych x^1, x^2, x^3 i współrzędnej czasowej x^0 . Układ współrzędnych $(x^0 = ct, x^1, x^2, x^3)$ w nieinercjalnym systemie odniesienia ($g_{ik} \neq 0$ dla $i \neq k$) nie jest już układem kartezjańskim – jest układem krzywoliniowym. Współczynniki g_{ik} formy kwadratowej (3) określają wszystkie własności geometrii w dowolnym krzywoliniowym układzie współrzędnych i ustalają metrykę czasoprzestrzeni. Są one składowymi tensora metrycznego i zachowują tę samą wartość we wszystkich układach współrzędnych. Interwał ds z formalnego punktu widzenia może być traktowany jako odległość dwóch punktów w abstrakcyjnej czterowymiarowej przestrzeni z wprowadzoną przez Minkowskiego geometrią pseudoeuklidesową. Nieinercjalne systemy odniesienia są równoważne pewnym polom sił (Landau i Lifszyc 1980). Stąd własności ruchu w nieinercjalnym systemie odniesienia są takie same jak w systemie inercjalnym w obecności pola grawitacyjnego. Czasoprzestrzeń w obecności pola grawitacyjnego jest czasoprzestrzenią zakrzywioną. Każde pole grawitacyjne powoduje zmianę metryki czasoprzestrzeni, a więc jest określone wielkościami g_{ik} . Własności geometrii czasoprzestrzeni są zatem określone przez zjawiska fizyczne, a nie są niezmiennymi wielkościami przestrzeni i czasu. W polu grawitacyjnym geometria przestrzeni staje się nieeuklidesowa. W dodatku, w przypadku zmienności pola grawitacyjnego metryka przestrzeni staje się dodatkowo zmienna w czasie. Skutkiem tego będzie zmienność w czasie relacji pomiędzy różnymi odległościami geometrycznymi. Fakt ten w sposób istotny rzutuje na pojęcie systemu odniesienia w ogólnej teorii względności.

W określeniu relacji pomiędzy systemami odniesienia zasadniczą rolę odgrywa rodzaj przestrzeni, w której zdefiniowane są systemy oraz zachowa-

nie niezmienności interwału ds między zdarzeniami. Schemat relacji pomiędzy niebieskimi systemami odniesienia w ujęciu klasycznym (na podstawie mechaniki newtonowskiej) oraz w ujęciu zaleconym w 2000 roku przez Międzynarodową Unię Astronomiczną IAU (International Astronomical Union) (na podstawie uogólnionej teorii względności) przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Relacje pomiędzy niebieskimi systemami odniesienia w ujęciu klasycznym oraz w ujęciu zaleconym przez IAU w 2000 roku
 (O – początek systemu, P – płaszczyzna xy systemu definiująca równik i oś obrotu, C – punkt początkowy liczenia rektascensji)

Na rysunku 1 epoka T_0 odpowiada epoce Katalogu Fundamentalnego FK, zaś epoka T jest epoką obserwacji (efemerydy). Transformacja Lorentza przeprowadzająca system **BCRS** (**B**arycentric **C**elestial **R**eference **S**ystem) w **GCRS** (**G**eocentric **C**elestial **R**eference **S**ystem) zawiera efekt paralaksy i aberracji rocznej, efekt grawitacyjnego zakrzywienia światła oraz efekty relatywistyczne.

2. NIEBIESKIE SYSTEMY ODNIESIENIA **BCRS** I **GCRS**

W 1990 roku Grupa Robocza „Systemy Odniesienia” IAU wyraziła potrzebę zdefiniowania w ujęciu ogólnej teorii względności¹ kilku układów współrzędnych ($x^0 = ct, x^1, x^2, x^3$) w czasoprzestrzeni w taki sposób, aby

¹ Pojęcia związane z ogólną teorią względności opisane są szeroko w literaturze, w tym także w języku polskim, np. (Landau i Lifszyc 1980; Schutz 2002).

w każdym układzie współrzędnych o początku w barycentrum dowolnego zbioru mas kwadrat interwału ds między zdarzeniami był wyrażony co najmniej ze stopniem przybliżenia podanym według wzoru:

$$ds^2 = -c^2 d\tau^2 = g_{ik} dx^i dx^k \quad (4)$$

gdzie τ jest czasem własnym (nazywanym również czasem prawdziwym) danego punktu w przestrzeni (czas pomiędzy dwoma zdarzeniami występującymi w tym samym punkcie przestrzeni), zaś współczynniki g_{ik} zdefiniowane są jako:

$$\begin{aligned} g_{00} &= -1 + 2U/c^2 \\ g_{0k} &= g_{i0} = 0 \\ g_{ik} &= 1 + 2U/c^2 \end{aligned} \quad (5)$$

przy czym U jest sumą potencjału grawitacyjnego wspomnianego zbioru mas oraz generowanego przez ciała zewnętrzne względem tego zbioru potencjału pływowego zanikającego w barycentrum (IAU 1991). Zgodnie z pakietem rekomendacji Grupy Roboczej „Systemy Odniesienia”, który został przyjęty i sformułowany w postaci Rezolucji A4 przez XXI Zgromadzenie Generalne IAU w Buenos Aires w 1991 roku (IAU 1992), zaistniała potrzeba zdefiniowania Barycentrycznego Systemu Odniesienia *BRS* (**B**arycentric **R**eference **S**ystem) o początku w środku mas Układu Słonecznego z czasem współrzędnych barycentrycznych *TCB* (**B**arycentric **C**oordinate **T**ime) oraz Geocentrycznego Systemu Odniesienia *GRS* (**G**eocentric **R**eference **S**ystem) o początku w środku mas Ziemi z czasem współrzędnych geocentrycznych *TCG* (**G**eocentric **C**oordinate **T**ime), z zaleceniem, aby układy te nie podlegały obrotom względem zbioru odległych obiektów pozagalaktycznych, aby współrzędne czasowe tych układów były wyprowadzone ze skali czasu realizowanej przez działające na Ziemi zegary atomowe oraz aby jednostkami fizycznymi w tych układach były jednostki SI. Za czas odniesienia dla widomych (pozornych), geocentrycznych efemeryd przyjęto Czas Ziemski *TT* (*Terrestrial Time*) (czas własny systemu geocentrycznego) oraz określono relację między *TCG* i *TT*. Sformułowano również czterowymiarową transformację pomiędzy *TCB* i *TCG*. W celu zachowania ciągłości w pozycjach gwiazd przy zmianie systemu FK5 na nowy barycentryczny system odniesienia dodatkowo zalecono, aby barycentryczny system odniesienia był możliwie bliski równikowi i punktowi równonocy wiosennej FK5 odniesionym do epoki J2000.0, tj. aby podstawowa płaszczyzna tego układu (płaszczyzna x^1x^2 odpowiadająca płaszczyźnie równika niebieskiego w katalogowych układach odniesienia) znalazła się możliwie blisko płaszczyzny średniego równika na epokę J2000.0, a jego punkt początkowy (odpowiednik punktu równonocy wiosennej w katalogowych układach odniesienia, czyli kierunek osi x^1 , od którego odmierzana jest rektascensja) znajdował się blisko dynamicznego ekwinok-

cjum na epokę J2000.0. Podkreślono również, że utworzony system odniesienia ma być dostępny dla astrometrii w zakresie fal radiowych oraz w zakresie widma widzialnego.

Grupa Robocza „Systemy Odniesienia” IAU kontynuowała, we współpracy z Międzynarodową Asocjacją Geodezji IAG (**I**nternational **A**sociation of **G**eodesy), działania w kierunku uściślenia definicji systemów odniesienia. Na wniosek tej Grupy Roboczej XXII Zgromadzenie Generalne IAU w Hadze w 1994 roku, na mocy Rezolucji B5, ustanowiło listę radioźródeł, które mają definiować nowy układ odniesienia. W tej samej rezolucji XXII Zgromadzenie Generalne IAU zaleciło Grupie Roboczej „Systemy Odniesienia” określenie pozycji tych radioźródeł, a także określenie relacji pomiędzy nowym układem odniesienia a układem odniesienia zdefiniowanym na podstawie optycznie wyznaczonych pozycji gwiazd (IAU 1996). Prace nad określeniem pozycji wybranych radioźródeł w układzie odniesienia dopasowanym do układu FK5 zakończono w 1995 roku (IERS 1996a), zaś w 1996 roku zakończono prace nad tworzeniem Katalogu Hipparcos. Układ współrzędnych Katalogu Hipparcos dowiązано do układu odniesienia opartego na radioźródłach z dokładnością ± 0.6 mas na epokę J1991.25 w pozycji oraz ± 0.25 mas/rok w prędkości kątowej.

Nowy niebieski system odniesienia przyjęty został przez XXIII Zgromadzenie Generalne IAU w Kyoto w 1997 roku i na mocy Rezolucji B2 jako Międzynarodowy Niebieski System Odniesienia **ICRS** (**I**nternational **C**elestial **R**eference **S**ystem), od 1 stycznia 1998 roku stał się on obowiązującym niebieskim systemem odniesienia IAU (IAU 1999). Kinematyczną realizacją **ICRS**, przeznaczoną do zastosowań praktycznych, jest Międzynarodowy Niebieski Układ Odniesienia **ICRF** (**I**nternational **C**elestial **R**eference **F**rame). Ta sama rezolucja zatwierdziła Katalog Hipparcos jako podstawową realizację **ICRS** w zakresie widma optycznego. W Rezolucji B3 to samo Zgromadzenie Generalne IAU, stwierdzając niepełność opisu podstaw relatywistycznych niezbędnych do zdefiniowania barycentrycznego i geocentrycznego systemu odniesienia, powołało Mieszany Komitet, składający się z przedstawicieli IAU, BIPM (**B**ureau **I**nternational des **P**oids et **M**esures), IAG, IERS (**I**nternational **E**arth **R**otation **S**ervice) i IUGG (**I**nternational **U**ion of **G**eodesy and **G**eophysics), któremu powierzono opracowanie spójnego systemu definicji i konwencji opisu podstaw relatywistycznych.

ICRF został zdefiniowany z dokładnością około 30 μ as poprzez pozycje 212 definiujących radioźródeł, określone na podstawie obserwacji VLBI (IAU 1996). Konwencjonalny (Umowny) Biegun Odniesienia **CRP** (**C**onventional **R**eference **P**ole) systemu **ICRS** (kierunek prostopadły do podstawowej płaszczyzny układu), choć jest bardzo zbliżony do średniego bieguna na epokę J2000.0, to jednak dokładnie się z nim nie pokrywa. Bieguny te są wzajemnie przesunięte o 17.1 mas w kierunku 0° i 5.1 mas w kierunku 90° . Podobna zgodność zachodzi pomiędzy umownym biegunem **ICRS** i biegunem Katalogu FK5. Ocenia się ją na ± 50 mas. Punkt początkowy liczenia rekta-

scensji w *ICRS*, który określa kierunek osi x^1 tego systemu, jest przesunięty w stosunku do punktu równonocy Katalogu FK5 o 22.9 ± 2.3 mas.

Ostateczne definicje barycentrycznego systemu odniesienia i geocentrycznego systemu odniesienia, którym odpowiednio nadano nazwy Barycentryczny Niebieski System Odniesienia *BCRS* i Geocentryczny Niebieski System Odniesienia *GCRS*, a które łącznie tworzą system *ICRS* (Kovalevsky 2002), sformułowane zostały z uwzględnieniem współczesnego formalizmu ogólnej teorii względności oraz przy użyciu oceny harmonicznej i przyjęte jako obowiązujące w formie Rezolucji B1.3 XXIV Zgromadzenia Generalnego IAU w Manchesterze w 2000 roku (IAU 2001).

Zgodnie z definicją *BCRS*, składowe czasowo-czasowa oraz przestrzenno-przestrzenna barycentrycznej metryki $g_{\mu\nu}$ ze współrzędnymi barycentrycznymi (t, \mathbf{x}) (t = czas współrzędnych barycentrycznych *TCB*) z pojedynczym skalarnym potencjałem $w(t, \mathbf{x})$, który jest uogólnionym potencjałem newtonowskim, i składowa czasowo-przestrzenna z potencjałem wektorowym $w^i(t, \mathbf{x})^2$, mają postać:

$$\begin{aligned} g_{00} &= -1 + c^{-2} 2 w(t, \mathbf{x}) - c^{-4} 2 w(t, \mathbf{x})^2 \\ g_{0i} &= -c^{-3} 4 w^i(t, \mathbf{x}) \\ g_{ij} &= \delta_{ij} [1 + c^{-2} 2 w(t, \mathbf{x})] \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie δ_{ij} (podobnie jak δ^{ij}) jest symbolem Kroneckera (Trajdos-Wróbel 1966). Jako warunek brzegowy przyjęto, że oba potencjały:

$$\begin{aligned} w(t, \mathbf{x}) &= G \int d^3 \mathbf{x}' \frac{\sigma(t, \mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} + c^{-2} 2G \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int d^3 \mathbf{x}' \sigma(t, \mathbf{x}') |\mathbf{x} - \mathbf{x}'| \\ w^i(t, \mathbf{x}) &= G \int d^3 \mathbf{x}' \frac{\sigma^i(t, \mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \end{aligned} \quad (7)$$

zanikają w odległości dalekiej od Układu Słonecznego. G oznacza stałą grawitacyjną, a przez σ i σ^i oznaczono odpowiednio gęstości aktywnych mas grawitacyjnych³ i gęstości ich strumienia (ilość energii przepływającej w jednostce czasu przez jednostkę powierzchni). Podane wyrażenia na potencjały w i w^i określają g_{00} z dokładnością do $O(c^{-5})$, g_{0i} z dokładnością do $O(c^{-5})$

² Własności pola sił w czasoprzestrzeni scharakteryzowane są przez czterowektor, zwany czteropotencjałem. Trzy składowe przestrzenne takiego czterowektora tworzą trójwymiarowy wektor, zwany potencjałem wektorowym pola. Składowa czasowa takiego czterowektora nazywa się potencjałem skalarnym (Landau i Lifszyc 1980).

³ Aktywną masą grawitacyjną lub masą „ciężką” nazywana jest masa określająca wytwarzane przez ciało pole grawitacyjne. Masa grawitacyjna występuje w tensorze metrycznym pola grawitacyjnego (Landau i Lifszyc 1980).

i g_{ij} z dokładnością do $O(c^{-4})$. Wielkości σ i σ^i określone są za pomocą składowych tensora momentu energii materii tworzącej ciała Układu Słonecznego (Kopeikin 1988; Brumberg i Kopeikin 1989; Damour i in. 1991, 1992, 1993; Klioner i Voinov 1993; Damour i in. 1994).

Podobnie, zgodnie z definicją *GCRS*, składowe czasowo-czasowa oraz przestrzenno-przestrzenna geocentrycznej metryki G_{ab} ze współrzędnymi geocentrycznymi (T, \mathbf{X}) ($T =$ czas współrzędnych geocentrycznych *TCG*) z pojedynczym skalarnym potencjałem $W(T, \mathbf{X})$, który jest uogólnionym potencjałem newtonowskim, i składowa czasowo-przestrzenna z potencjałem wektorowym $W^a(T, \mathbf{X})$ mają postać:

$$\begin{aligned} G_{00} &= -1 + c^{-2}2W(T, \mathbf{X}) - c^{-4}2W(T, \mathbf{X})^2 \\ G_{0a} &= -c^{-3}4W^a(T, \mathbf{X}) \\ G_{ab} &= \delta_{ab} [1 + c^{-2}2W(T, \mathbf{X})] \end{aligned} \quad (8)$$

Oba geocentryczne potencjały $W(T, \mathbf{X})$ i $W^a(T, \mathbf{X})$ są odpowiednio sumą potencjałów pochodzących od oddziaływania grawitacyjnego Ziemi W_E i W^a_E oraz potencjałów zewnętrznych W_{ext} i W^a_{ext} wywołanych pływami i efektami inercjalnymi:

$$\begin{aligned} W(T, \mathbf{X}) &= W_E(T, \mathbf{X}) + W_{ext}(T, \mathbf{X}) \\ W^a(T, \mathbf{X}) &= W^a_E(T, \mathbf{X}) + W^a_{ext}(T, \mathbf{X}) \end{aligned} \quad (9)$$

Zakłada się, że zewnętrzne składowe metrycznych potencjałów zanikają w środku mas Ziemi i przyjmują postać szeregu potęgowego o dodatnich potęgach \mathbf{X} . Potencjały W_E i W^a_E są zdefiniowane w ten sam sposób, co potencjały w i w^i , lecz z argumentami obliczanymi w *GCRS* z całkowaniem po całej Ziemi. Rezolucja B1.4 XXIV Zgromadzenia Generalnego IAU w Manchesterze w 2000 roku (IAU 2001) zaleca stosowanie rozwinięcia potencjału postnewtonowskiego Ziemi w *GCRS* na zewnątrz Ziemi w postaci:

$$\begin{aligned} W^E(T, \mathbf{X}) &= \frac{GM^E}{R} \left[1 + \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=0}^{+l} \left(\frac{R^E}{R} \right)^l P_{lm}(\cos\theta) (C^E_{lm}(T) \cos m\varphi + \right. \\ &\quad \left. + S^E_{lm}(T) \sin m\varphi) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

gdzie C^E_{lm} i S^E_{lm} są, z wystarczającą dokładnością, równoważne postnewtonowskim momentom multipolowym (Damour i in. 1991), θ i φ są kątami biegunowymi odpowiadającymi przestrzennym współrzędnym X^a w *GCRS*, M^E oznacza masę Ziemi, R^E jest promieniem równikowym Ziemi, zaś $R = |\mathbf{X}|$. Ta sama rezolucja zaleca, aby potencjał wektorowy na zewnątrz Ziemi, który jest

źródłem efektu Lense-Thirringa⁴, wyrazić w funkcji wektora \mathbf{S}_E całkowitego ziemskiego momentu obrotowego w postaci:

$$W_E^a(T, \mathbf{X}) = -\frac{G}{2} \frac{(\mathbf{X} \times \mathbf{S}_E)^a}{R^3} \quad (11)$$

Potencjały zewnętrzne W_{ext} i W_{ext}^a są wyrażone jako suma odpowiednich potencjałów pływowych W_{tidal} i W_{tidal}^a i potencjałów inercjalnych W_{iner} i W_{iner}^a :

$$W_{ext} = W_{tidal} + W_{iner} \quad (12)$$

$$W_{ext}^a = W_{tidal}^a + W_{iner}^a$$

Potencjał W_{tidal} jest uogólnieniem wyrażenia newtonowskiego opisującego potencjał pływowy (Kopeikin 1988; Brumberg i Kopeikin 1989; Damour i in. 1991, 1992, 1993; Klioner i Voinov 1993; Damour i in. 1994). Potencjały W_{iner} i W_{iner}^a są, liniowymi w X^a , składowymi inercjalnymi. Pierwszy z nich jest określony głównie za pomocą wyrażeń wiążących parametry niesferyczności Ziemi z potencjałem zewnętrznym. W kinematycznie nieobracaającym się $GCRS$, W_{iner}^a opisuje siłę Coriolisa wywołaną głównie przez precesję geodezyjną⁵ (Kovalevsky 2002).

3. RELACJA POMIĘDZY $BCRS$ I $GCRS$

$ICRS$ jest systemem kinematycznym, zdefiniowanym poprzez pozycje odległych obiektów pozagalaktycznych; dodatkowo ruchy własne tych obiektów są znacznie mniejsze aniżeli dokładność obserwacji tych obiektów. W systemie $ICRS$ kierunki do obiektów w odległych galaktykach nie podlegają globalnemu obrotowi względem tych obiektów. Zgodnie z definicją jest on czasoprzestrzennym systemem niezależnym od położenia osi obrotu Ziemi, a także od położenia osi ekliptyki. Czasoprzestrzeń w $ICRS$ określona jest geometrycznie za pomocą tensora metrycznego (oddzielnie dla $BCRS$ i dla $GCRS$) w ujęciu ogólnej teorii względności. $ICRS$ definiuje kinematycznie orientację osi systemów $BCRS$ i $GCRS$ w odniesieniu do radioźródeł zrealizowane przez Międzynarodowy Ziemski Układ Odniesienia $ITRF$ (Internatio-

⁴ Pole grawito-magnetyczne (podobnie jak pole grawito-elektryczne – użyte w celu uproszczenia formalizmu postnewtonowskiej teorii systemów odniesienia) jest źródłem precesji Lense-Thirringa, której wpływ na obserwacje jest rzędu c^{-3} (Kovalevsky 2002). W uogólnionej teorii względności precesja Lense-Thirringa jest precesją płaszczyzny geodezyjnej orbity cząstki materii okrążającej obracającą się masę. Powstaje ona w wyniku nałożenia się obrotu masy centralnej z kątowym momentem orbitalnym cząstki materii.

⁵ Precesja geodezyjna, znana również pod nazwą precesji de Sittera, jest relatywistycznym efektem ruchu środka mas Ziemi wokół barycentrum systemu Ziemia-Księżyc.

nal **Terrestrial Reference Frame**) (Kovalevsky 2002). Osie tych systemów spełniają kinematyczny warunek zerowego wzajemnego obrotu. Oba systemy mają też różne czasy współrzędnych: *TCB* i *TCG*. Odpowiadające sobie osie *BCRS* i *GCRS* są wzajemnie powiązane współczynnikiem skali. Ponadto *BCRS* jest z założenia systemem kinematycznie ustalonym. Nie jest on odniesiony do epoki, która byłaby związana z pozycją osi systemu, jak to ma miejsce w przypadku systemu katalogowego, np. FK5. Pozycje w systemie *ICRS* odgrywają rolę stosowanych dotychczas średnich pozycji katalogowych, odniesionych do średniego równika i średniej równonocy wiosennej na standardową epokę. W wypadku pozycji w *ICRS* epoka we wspomnianym sensie nie ma zastosowania. Zmienność pozycji w systemie *ICRS* spowodowana jest wyłącznie ruchem własnym gwiazd z uwzględnieniem prędkości radialnej. Orientacja geocentrycznego systemu niebieskiego *GCRS*, używanego do transformacji między systemami niebieskim i ziemskim, w stosunku do *BCRS* spełnia kinematyczny warunek braku globalnego obrotu geocentrycznych kierunków do obiektów realizujących *ICRS*. *GCRS* jest zatem nieobracającym się systemem geocentrycznym przeznaczonym do monitorowania parametrów ruchu obrotowego Ziemi. System ten nie podlega globalnej rotacji i nie zależy już od zmian położenia osi obrotu Ziemi, jak to miało miejsce w przypadku FK5.

Relacja pomiędzy systemami *BCRS* i *GCRS* wyrażona jest za pomocą uogólnionej transformacji Lorentza⁶ (Kovalevsky 2002). Rezolucja B1.3 XXIV Zgromadzenia Generalnego IAU w Manchesterze w 2000 roku (IAU 2001) zaleca stosowanie, gdy wymaga tego dokładność obliczeń, pełnej post-newtonowskiej transformacji współrzędnych pomiędzy *BCRS* i *GCRS*, narzuconej przez formę odpowiednich tensorów metrycznych. Dla kinematycznie nieobracającego się *GCRS*, stosując oznaczenia: $T = TCG$, $t = TCB$, $r_E^i \equiv x^i - x_E^i(t)$, z sumowaniem od 1 do 3 względem wzajemnie równych wskaźników, transformacja ta ma postać:

$$T = t - c^{-2}[A(t) + v_E^i r_E^i] + c^{-4}[B(t) + B^i(t)r_E^i + B^{ij}(t)r_E^i r_E^j + C(t, \mathbf{x})] + O(c^{-5}) \quad (13)$$

$$\mathbf{X}^a = \delta_{ai} [r_E^i + c^{-2} \left(\frac{1}{2} v_E^i v_E^j r_E^j + w_{ext}(x_E) r_E^i + r_E^i a^j r_E^j - \frac{1}{2} a^i r_E^2 \right)] + O(c^{-4}) \quad (14)$$

⁶ Transformacja Lorentza jest relatywistycznym przejściem od czasoprzestrzennego systemu inercyjnego do nieinercyjnego (w szczególnym przypadku również do inercyjnego) przy zachowaniu niezmienniczości interwału ds (Landau i Lifszyc 1980).

gdzie:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt}A(t) &= \frac{1}{2}v^2_E + w_{ext}(\mathbf{x}_E) \\
 \frac{d}{dt}B(t) &= -\frac{1}{8}v^4_E - \frac{3}{2}v^2_E w_{ext}(\mathbf{x}_E) + 4v^i_E w^i_{ext}(\mathbf{x}_E) + \frac{1}{2}w^2_{ext}(\mathbf{x}_E) \\
 B^i(t) &= -\frac{1}{2}v^2_E v^i_E + 4w^i_{ext}(\mathbf{x}_E) - 3v^i_E w_{ext}(\mathbf{x}_E) \\
 B^{ij}(t) &= -v^i_E \delta_{aj} Q^a + 2 \frac{\partial}{\partial x^j} w^i_{ext}(\mathbf{x}_E) - v^i_E \frac{\partial}{\partial x^j} w_{ext}(\mathbf{x}_E) + \frac{1}{2} \delta^{ij} \frac{d}{dt} w_{ext}(\mathbf{x}_E) \\
 C(t, \mathbf{x}) &= -\frac{1}{10} r^2_E \left(\frac{d}{dt} a^i_E \cdot r^i_E \right)
 \end{aligned} \tag{15}$$

przy czym x^i_E , v^i_E i a^i_E są składowymi wektorów barycentrycznej pozycji, prędkości i przyspieszenia Ziemi, zaś

$$Q^a = \delta_{ai} \left[\frac{\partial}{\partial x^i} w_{ext}(\mathbf{x}_E) - a^i_E \right] \tag{16}$$

Potencjały zewnętrzne w_{ext} i w^i_{ext} określone są następująco:

$$w_{ext} = \sum_{A \neq E} w_A \quad \text{i} \quad w^i_{ext} = \sum_{A \neq E} w^i_A \tag{17}$$

gdzie E oznacza Ziemię, a w_A i w^i_A są określone poprzez wyrażenia (7) dla w i w^i , z całkowaniem wyłącznie po ciele A (Kopeikin 1988; Brumberg i Kopeikin 1989; Damour i in. 1991, 1992, 1993; Klioner i Voinov 1993; Damour i in. 1994).

Praktycznie, przy przejściu z systemu $BCRS$ do $GCRS$ z zachowaniem dokładności na poziomie 0.1 mas można, zamiast wzorów (13–17), posłużyć się przybliżonymi wzorami, jakie zostały użyte w „Roczniku Astronomicznym” na 2004 rok do obliczenia pozycji pozornych (Kryński i Sękowski 2003). Zaletą uproszczonych wzorów transformacyjnych, poza prostszą ich formą, jest wyraźne rozdzielenie w nich efektów paralaksy rocznej i aberracji rocznej oraz efektów relatywistycznych wywołanych opóźnieniem propagacji światła w polu grawitacyjnym Słońca oraz spowodowanych grawitacyjnym zakrzywieniem światła (efekty te uwzględnia transformacja Lorentza).

Wyrażenia (13) i (15), określające przejście od czasu współrzędnych barycentrycznych TCB do czasu współrzędnych geocentrycznych TCG , można zastąpić przybliżonym (z dokładnością 10^{-14}) wzorem (IERS 1996b):

$$TCB - TCG = L_C \times [JD(TAI) - 2\,443\,144.5] \times 86\,400 + c^2 \mathbf{v}_E(\mathbf{x}_o - \mathbf{x}_E) + P(TAI) \tag{18}$$

którego argumentem jest Międzynarodowy Czas Atomowy *TAI*. Stała $L_C = 1.480\,826\,867\,41 \times 10^{-8}$ (IAU 2001), a \mathbf{x}_o jest wektorem barycentrycznej pozycji obserwatora. Pierwszy wyraz w (18) jest dominujący; na połowę 2004 roku wynosi on $12^s.851$. Ostatni człon – P odnosi się do wyrazów okresowych. Łączna amplituda wyrazów okresowych nie przekracza $0^s.0016$. Człon P można obliczyć, korzystając z numerycznych efemeryd czasu, np. TE405 (IERS 2003). Środkowy człon, zależny od barycentrycznego położenia i prędkości Ziemi oraz obserwatora, przybiera wartości poniżej $1 \mu\text{s}$.

Oznaczając za pomocą współrzędnych równikowych $(\alpha, \delta) \equiv (\alpha_{BCRF}, \delta_{BCRF})$ barycentryczną pozycję gwiazdy w epoce *TCB* (otrzymuje się ją poprawiając pozycję w *ICRF* o wpływ ruchu własnego i prędkości radialnej na interwale odpowiadającym różnicy epok *TCB* i J2000.0), jednostkowy wektor barycentryczny \mathbf{p}_{BCRF} gwiazdy ma postać:

$$\mathbf{p}_{BCRF} = \begin{pmatrix} \cos \delta \cos \alpha \\ \cos \delta \sin \alpha \\ \sin \delta \end{pmatrix} \quad (19)$$

Pierwszym krokiem przeliczenia pozycji z *BCRF* (**B**arycentric **C**elestial **R**eference **F**rame) do *GCRF* (**G**eocentric **C**elestial **R**eference **F**rame) jest uwzględnienie paralaksy rocznej π gwiazdy:

$$\mathbf{p}^{(1)}_{GCRF} = \mathbf{p}_{BCRF} - \pi \mathbf{x}_E \quad (20)$$

gdzie \mathbf{x}_E jest barycentrycznym wektorem środka mas Ziemi.

Poprawienie pozycji gwiazdy w *GCRF* o wpływ grawitacyjnego zakrzywienia światła uzyskuje się uwzględniając poprawkę $\Delta \mathbf{p}_{graw}$

$$\Delta \mathbf{p}_{graw} = \frac{2GM_S}{c^2 E_H} \frac{\mathbf{e}^E_H - (\mathbf{e}_{GCRF} \mathbf{e}^E_H) \mathbf{e}_{GCRF}}{1 + (\mathbf{e}_{GCRF} \mathbf{e}^E_H)} \quad (21)$$

gdzie \mathbf{e}_{GCRF} i \mathbf{e}^E_H są znormalizowanymi wektorami $\mathbf{p}^{(1)}_{GCRF}$ i \mathbf{E}_H : $\mathbf{e}_{GCRF} = \mathbf{p}^{(1)}_{GCRF} / |\mathbf{p}^{(1)}_{GCRF}|$, a $\mathbf{e}^E_H = \mathbf{E}_H / |\mathbf{E}_H|$, przy czym \mathbf{E}_H jest heliocentrycznym wektorem wodzącym środka mas Ziemi, zaś M_S oznacza masę Słońca.

Poprawioną o wpływ grawitacyjnego zakrzywienia światła pozycję gwiazdy w *GCRF* otrzymuje się jako:

$$\mathbf{p}^{(2)}_{GCRF} = \mathbf{e}_{GCRF} + \Delta \mathbf{p}_{graw} \quad (22)$$

Poprawienie pozycji w *GCRF* o wpływ aberracji rocznej prowadzi do wyznaczenia właściwej pozycji \mathbf{p}_{GCRF} gwiazdy w niebieskim układzie geocentrycznym poruszającym się z prędkością \mathbf{V}_E względem inercjalnego systemu odniesienia (Astronomicheskij Ezhegodnik 2003). Pozycję tę oblicza się ze wzoru:

$$\mathbf{p}_{GCRF} = \left[\beta^{-1} \mathbf{p}^{(2)}_{GCRF} + \mathbf{V}_E + \frac{(\mathbf{p}^{(2)}_{GCRF} \mathbf{V}_E) \mathbf{V}_E}{1 + \beta^{-1}} \right] / (1 + \mathbf{p}^{(2)}_{GCRF} \mathbf{V}_E) \quad (23)$$

gdzie wektor \mathbf{V}_E jest liniową funkcją wektora \mathbf{v}_E prędkości środka mas Ziemi względem barycentrum Układu Słonecznego:

$$\mathbf{V}_E = c^{-1} \mathbf{v}_E = 0.005\,775\,5 \mathbf{v}_E \quad (24)$$

którego składowe wyrażone są w jednostkach astronomicznych na dobę oraz

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - V_E^2}} \quad (25)$$

przy czym $V_E = |\mathbf{V}_E|$.

4. POŚREDNI SYSTEM ODNIESIENIA IRS

Pośredni system odniesienia formalnie został wprowadzony w 1984 roku na mocy uchwały XVIII Zgromadzenia Generalnego IAU w Patras w 1982 roku (IAU 1983) jako system przejściowy pomiędzy systemami ziemskim i niebieskim. Wcześniej rolę systemu pośredniego odgrywał system oparty na chwilowej osi obrotu Ziemi, chwilowym południku Greenwich i prawdziwej równonocy wiosennej oraz prawdziwym czasem gwiazdowym, opisującym obrót systemu ziemskiego względem systemu niebieskiego. Wprowadzenie Pośredniego Systemu Odniesienia *IRS* (**I**ntermediate **R**eference **S**ystem), w którego definicji miejsce chwilowego bieguna – określającego kierunek osi z systemu – zajął Niebieski Biegun Efemerydalny *CEP* (**C**elestial **E**phemeris **P**ole) związane było z potrzebą uściślenia opisu relacji pomiędzy systemami niebieskim i ziemskim na skutek wprowadzenia nowego modelu precesji IAU1976 i nowej teorii nutacji IAU1980 oraz bardziej precyzyjnego określenia osi, względem której zdefiniowany jest kąt obrotu Ziemi.

Za oś *CEP* przyjęto oś uśrednionej powierzchni modelu Ziemi o zerowej amplitudzie ruchu swobodnego (Seidelmann 1982). *CEP* pokrywa się ze środkiem quasi-kołowej dobowej trajektorii gwiazd na sferze niebieskiej. Można go uważać za prawdziwy biegun niebieski daty. Położenie *CEP* względem osi systemu Katalogu Fundamentalnego FK4 (a potem FK5) wyrażone jest przy użyciu modelu precesji IAU1976 i teorii nutacji IAU1980. Wymuszony ruch *CEP* względem ziemskiego systemu odniesienia odpowiada ruchowi średniej osi Tisseranda Ziemi (Capitaine 2000). Położenie zaś *CEP* względem osi ziemskiego systemu odniesienia, tzw. Konwencjonalnego (Umownego) Ziemskiego Systemu *CTS* (**C**onventional **T**errestrial **S**ystem) opartego na *CIO* (**C**onventional **I**nternational **O**rigi) (Kryński i Rogowski 2004) wyrażone jest przy użyciu wyznaczanych początkowo przez IPMS, a od 1988 roku przez IERS parametrów x_p i y_p ruchu bieguna.

Z uwagi na rosnącą potrzebę dokładnego zdefiniowania systemów odniesienia, wynikającą z postępu w zakresie wzrostu precyzji obserwacji, a w szczególności potrzebę wyraźnego określenia osi, względem której zdefiniowany jest kąt obrotu Ziemi, a także z uwagi na fakt, że Niebieski Biegun Efemerydalny *CEP* nie uwzględniał zmian dobowych i zmian o wyższej częstotliwości w orientacji Ziemi, podjęte zostały starania w kierunku określenia nowej definicji pośredniego systemu odniesienia. Obowiązująca od 1 stycznia 2003 roku definicja Pośredniego Systemu Odniesienia *IRS*, wykorzystująca pojęcie „Nieobrcającego się Punktu Początkowego” *NRO* na ruchomym równiku (Guinot 1979), przyjęta została przez XXIV Zgromadzenie Generalne IAU w Manchesterze w 2000 roku (IAU 2001). Definicję tę wyrażono w treści kilku rezolucji. Rezolucja B1.7 definiuje kierunek osi z Pośredniego Systemu Odniesienia poprzez Niebieski Biegun Pośredni *CIP* (Celestial Intermediate Pole). Jest to biegun, którego ruch względem *GCRS* jest określony poprzez ruch średniej osi Tisseranda Ziemi (Seidelmann 1982), zawierający okresy dłuższe niż dwa dni. Kierunek *CIP* na epokę J2000.0 jest nieznacznie przesunięty względem kierunku bieguna *GCRS*, w sposób zgodny ze zdefiniowanym w Rezolucji B1.6 modelem precesyjno-nutacyjnym IAU2000A (Dehant i in. 1999). Ruch *CIP* względem *GCRS* realizowany jest poprzez model precesyjno-nutacyjny IAU2000A dla okresów dłuższych niż dwa dni, z dodatkowym uwzględnieniem zależnej od czasu poprawki wyznaczanej przez IERS w oparciu o obserwacje astronomiczno-geodezyjne. Ruch *CIP* względem Międzynarodowego Ziemskiego Systemu Odniesienia *ITRS* (International Terrestrial Reference System) określany jest przez IERS na podstawie odpowiednich obserwacji astronomiczno-geodezyjnych oraz przy użyciu modeli zawierających zmiany o wysokiej częstotliwości. Wyrazy nutacji wymuszonej o okresach krótszych od dwóch dni są zawarte w modelu ruchu *CIP* względem *ITRS* (Kryński 2004).

Rezolucja B1.8 definiuje Niebieski i Ziemi Efemerydalny Punkt Początkowy, które określają kierunek osi x odpowiednio niebieskiego i ziemskiego Pośredniego Systemu Odniesienia oraz podaje niezależną od ruchu orbitalnego Ziemi definicję Kąta Obrotu Ziemi wiążącego oba systemy pośrednie. Jako niebieski początek efemerydalny przyjęto „Nieobrcający się Punkt Początkowy” w *GCRS* i desygnowano ten punkt jako Niebieski Efemerydalny Punkt Początkowy *CEO* (Celestial Ephemeris Origin) na równiku Niebieskiego Bieguna Pośredniego *CIP*. Położenie *CEO* może być obliczone na podstawie modelu IAU2000A precesji i nutacji *CIP* oraz na podstawie obecnych wartości przesunięcia *CIP* względem bieguna *ICRF* na epokę J2000.0 przy użyciu wzorów opracowanych przez (Capitaine i in. 2000). Jako ziemski początek efemerydalny przyjęto „Nieobrcający się Punkt Początkowy” w *ITRS* i desygnowano ten punkt jako Ziemi Efemerydalny Punkt Początkowy *TEO* (Terrestrial Ephemeris Origin) na równiku *CIP*. Położenie *TEO* jedynie w nieznacznym stopniu zależy od ruchu bieguna i może być ekstrapolowane zgodnie z wynikami opracowania (Capitaine i in. 2000), przy

użyciu danych IERS. Kąt pomierzony w płaszczyźnie równika *CIP* pomiędzy wektorami jednostkowymi skierowanymi od osi obrotu Ziemi do *CEO* i *TEO* zdefiniowano jako Kąt Obrotu Ziemi *ERA* (**E**arth **R**otation **A**ngle). Transformacja pomiędzy *ITRS* i *GCRS* jest zatem określona poprzez pozycję *CIP* w *GCRS*, pozycję *CIP* w *ITRS* i Kąt Obrotu Ziemi *ERA*.

5. NOWE DEFINICJE *UTI* I CZASU GWIAZDOWEGO

Rezolucja B1.8 XXIV Zgromadzenia Generalnego IAU w Manchesterze w 2000 roku (IAU 2001) wprowadza nową definicję *UTI* jako czasu liniowo proporcjonalnego do kąta *ERA*:

$$ERA(T_u) = 2\pi(0.779\,057\,273\,2640 + 1.002\,737\,811\,911\,354\,48\,T_u) \quad (26)$$

gdzie:

$$T_u = [JD(UTI) - 2\,451\,545.0] \quad (27)$$

Liniowa zależność pomiędzy Kątem Obrotu Ziemi *ERA* i *UTI* zapewnia ciągłość w fazie i zmienności *UTI* z wartością otrzymaną za pomocą konwencjonalnej zależności między średnim czasem gwiazdowym Greenwich *GMST* (**G**reenwich **M**ean **S**idereal **T**ime) a *UTI*. Spójna z nową definicją *UTI* jest nowa definicja *GMST*:

$$GMST = 0''.014\,506 + ERA + 4612''.157\,399\,66\,t + \\ + 1''.396\,677\,21\,t^2 - 0''.000\,093\,44\,t^3 + 0''.000\,018\,82\,t^4 \quad (28)$$

gdzie:

$$t = [JD(TT) - 2000 \text{ styczeń } 1^d 12^h TT] / 36\,525 \quad (29)$$

przy Czasie Ziemskim *TT* wyrażonym w dniach, zgodnie z Rezolucją C7 XXII Zgromadzenia Generalnego IAU w Hadze w 1994 roku (IAU 1996), która zaleciła, aby epoka J2000.0 była zdefiniowana w środku mas Ziemi i aby wyrażona ona była w skali czasu *TT*, tj. 2000 styczeń 1.5 *TT* = *JD* 2 451 545.0 *TT*.

Prawdziwy czas gwiazdowy Greenwich *GST* (**G**reenwich „**A**pparent” **S**idereal **T**ime) wyraża się wzorem:

$$GST - GMST = \Delta\psi \cos\varepsilon_A + \sum[(C'_{s,0})_k \sin\alpha_k + \\ + (C'_{c,0})_k \cos\alpha_k] - 0''.000\,000\,87\,t \sin\Omega \quad (30)$$

gdzie ε_A jest nachyleniem ekliptyki do równika, poprawionym o zmiany precesyjne zdefiniowane w modelu precesyjno-nutacyjnym IAU2000, $\Delta\psi$ jest „całkowitą” nutacją w długości odniesioną do ekliptyki zadanej epoki, skąd $\Delta\psi \cos\varepsilon_A$ jest klasycznym „równaniem równonocy”. Pozostałe dwa człony po prawej stronie (30) stanowią uzupełnienie „równania równonocy”, zapewniające ciągłość prawdziwego czasu gwiazdowego Greenwich po przejściu na

nową jego definicję oraz spójność z pozostałymi wielkościami systemu IAU2000. Wartości parametrów α_k i Ω oraz współczynników $(C'_{s,0})_k$ i $(C'_{c,0})_k$ podane są w IERS Conventions 2000 (IERS 2003), a także w wersji elektronicznej wraz z pełną numeryczną reprezentacją GST na stronie internetowej <http://maia.usno.mil/ch5tables.html>

Zawarta w nowej definicji UTI jego liniowa zależność od Kąta Obrótu Ziemi ERA świadczy o tym, że obecnie UTI można interpretować jako miarę rzeczywistego ruchu obrotowego Ziemi wokół CIP (nie jak w poprzednio stosowanej definicji wokół chwilowego bieguna lub Niebieskiego Bieguna Efemerydalnego CEP) względem średniego Słońca. Pochodna UTI względem czasu jest proporcjonalna do prędkości kątowej obrotu Ziemi ω . Rolę, jaką odgrywał czas gwiazdowy w transformacji pomiędzy układami ziemskim i niebieskim przejął Kąt Obrótu Ziemi ERA , który w przeciwieństwie do czasu gwiazdowego prawdziwego GST nie jest obciążony wpływem precesji i nutacji. W nowym wyrażeniu na GST (28 i 30) w funkcji czasu kąt ERA wyrażony jest w funkcji UTI (26 i 27), zaś pozostałe człony reprezentujące efekt precesji i nutacji w rektascensji odniesione są do skali Dynamicznego Czasu Barycentrycznego TDB (**B**arycentric **D**ynamical **T**ime) (praktycznie do TT). Zgodnie z nową definicją $GMST$ nie jest już kątem godzinnym średniej równonocy wiosennej na południku Greenwich (Capitaine i in. 2003). Należy zauważyć, że wprowadzanie nowych poprawionych modeli precesyjno-nutacyjnych spowoduje w przyszłości konieczność formułowania nowych wyrażeń dla $GMST$. Także „równanie równonocy” nie prowadzi do prawdziwej rektascensji średniej równonocy. Obecna rola czasu gwiazdowego ogranicza się do umożliwienia zachowania ciągłości w obliczeniach astronomicznych. W szczególności $ERA(J2000.0) = GMST(J2000.0)$, zaś różnica $GST - ERA$ określa rektascensję CEO , a tym samym położenie punktu równonocy wiosennej na równiku CIP .

6. MIĘDZYNARODOWY ZIEMSKI SYSTEM ODNIESIENIA $ITRS$

Ziemski system odniesienia jest kinematycznym systemem przestrzennym obracającym się wraz z Ziemią. W systemie tym pozycje punktów związanych z powierzchnią Ziemi określone są przez współrzędne, które podlegają jedynie małym zmianom w czasie spowodowanym przez efekty geofizyczne (ruchy tektoniczne, deformacje pływowe). Ziemski układ odniesienia określony przez zbiór punktów o precyzyjnie wyznaczonych współrzędnych w systemie współrzędnych powiązanych z ziemskim systemem odniesienia jest realizacją ziemskiego systemu odniesienia. Definicję Konwencjonalnego Ziemskiego Systemu Odniesienia $CTRS$ (**C**onventional **T**errestrial **R**eference **S**ystem) podaje Rezolucja 2 XX Zgromadzenia Generalnego IUGG w Wiedniu w 1991 roku (Geodesist's Handbook 1992). Zgodnie z przyjętą rezolucją, $CTRS$ jest quasi-kartezjańskim systemem zdefiniowanym przez przestrzenny obrót względem nie obracającego się systemu geocentrycznego ($GCRS$ zdefi-

niowany przez IAU). Czasem współrzędnych *CTRS* jest *TCG* – czas współrzędnych *GCRS*. 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). *ITRS* jest systemem geocentrycznym, którego jednostką długości jest metr SI. W myśl postanowień IUGG i IAU (1991 r.) skala systemu *ITRS* jest spójna z czasem współrzędnych geocentrycznych *TCG*. 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. Realizacjami *ITRS* są Międzynarodowe Ziemskie Układy Odniesienia *ITRF*. Do 1993 roku początki układów *ITRF* (włącznie z *ITRF93*) i ich skale wyznaczone były na podstawie wybranych rozwiązań SLR. Układy te zorientowano zgodnie z *BTS87* opartym na parametrach ruchu obrotowego Ziemi BIH (do orientacji *ITRF93* użyto parametrów ruchu obrotowego Ziemi IERS). Zmiany orientacji w *ITRF* w czasie początkowo określano na podstawie modelu ruchu płyt tektonicznych AM0-2 (Minster i Jordan 1978), a od 1991 roku w kolejnych układach zmiany orientacji wyznaczone były na podstawie modeli NNR-NUVEL-1, NNR-NUVEL-1A (Argus i Gordon 1991), z wyjątkiem *ITRF93* (IERS 2003). Począwszy od *ITRF94*, początki układów *ITRF* wyznaczone są jako średnia ważona rozwiązań SLR i GPS, zaś skala układów określana jest jako średnia ważona rozwiązań VLBI, SLR i GPS, poprawiona o 0.7 ppb z uwagi na używanie skali czasu *TT* przez centra analiz zamiast zalecanej przez IAU i IUGG skali czasu *TCG*. Układy te są zorientowane zgodnie z *ITRF92*. Zmiany orientacji określone są na podstawie modelu NNR-NUVEL-1A i wyrażone jako pochodne względem czasu 7 parametrów transformacji (IERS 2003).

Orientacja *ITRF* i zmiany tej orientacji określają równik *ITRF* (a tym samym biegun *ITRF*) oraz południk zerowy *ITRF*.

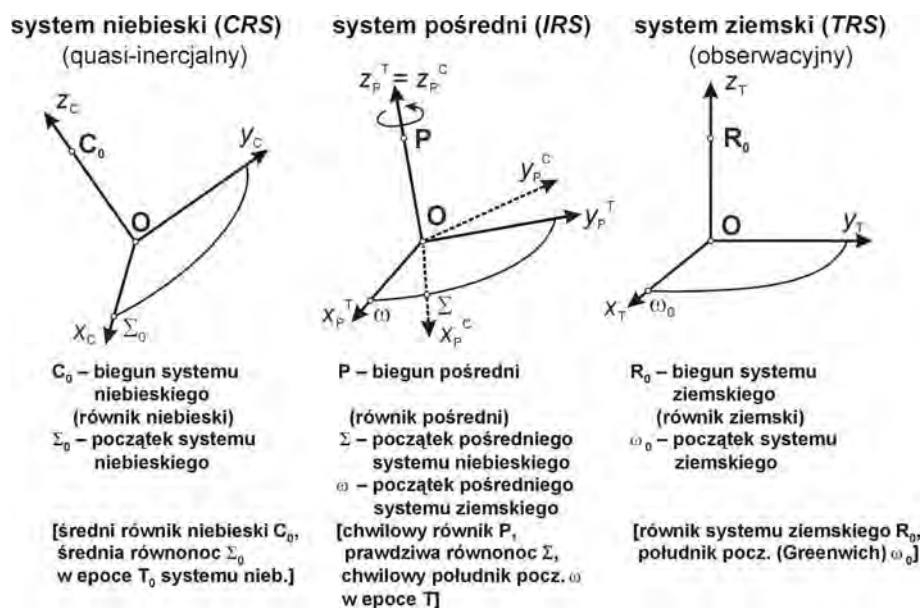
7. RELACJA POMIĘDZY *GCRS* I *ITRS*

Przejście pomiędzy niebieskim (quasi-inercjalnym) systemem odniesienia a ziemskim (obserwacyjnym) systemem odniesienia odbywa się przy zastosowaniu pośredniego systemu odniesienia. Klasyczny schemat definiujący system niebieski *CRS* (**C**elestial **R**eference **S**ystem), system pośredni *IRS* i system ziemski *TRS* (**T**errestrial **R**eference **S**ystem) przedstawiono na rysunku 2.

Zależność pomiędzy wektorem jednostkowym \mathbf{e}_{ITRS} w *ITRS* i jego obrazem \mathbf{e}_{GCRS} w *GCRS* wyraża się przez transformację

$$\mathbf{e}_{GCRS} = Q(t)R(t)W(t) \mathbf{e}_{ITRS} \quad (31)$$

gdzie $W(t)$, $R(t)$ i $Q(t)$ są macierzami transformacji wyrażającymi odpowiednio ruch CIP względem systemu ziemskiego $ITRS$, obrót systemu pośredniego IRS wokół osi CIP oraz ruch CIP względem systemu niebieskiego $GCRS$. Parametr czasowy t jest zdefiniowany wzorem (29).



Rys. 2. Systemy odniesienia niebieski, pośredni i ziemski

Macierze transformacji pomiędzy systemami ziemskim i niebieskim dają się wyrazić w funkcji macierzy obrotowych $R_1(\theta_1)$, $R_2(\theta_2)$ i $R_3(\theta_3)$ reprezentujących obroty odpowiednio wokół osi x , y , z układu o kąty θ_1 , θ_2 , θ_3 (traktowane jako dodatnie w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara w przypadku stosowania układów prawoskrętnych). I tak:

$$\begin{aligned}
 R_1(\theta_1) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ 0 & -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{pmatrix} \\
 R_2(\theta_2) &= \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} \\
 R_3(\theta_3) &= \begin{pmatrix} \cos \theta_3 & \sin \theta_3 & 0 \\ -\sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{32}$$

Macierz $W(t)$ przedstawiona w postaci złożenia macierzy obrotowych R_i ma postać:

$$W(t) = R_3(-s') R_2(x_p) R_1(y_p) \quad (33)$$

gdzie x_p i y_p są współrzędnymi CIP w $ITRS$ na epokę t i są zdefiniowane jako

$$(x_p, y_p) = (x, y)_{IERS} + (\Delta x, \Delta y)_{tidal} + (\Delta x, \Delta y)_{mutation} \quad (34)$$

przy czym $(x, y)_{IERS}$ są współrzędnymi bieguna dostarczonymi przez IERS (dostępne w biuletynach IERS), $(\Delta x, \Delta y)_{tidal}$ są składowymi pływowymi wynikającymi z pływów oceanicznych, zaś $(\Delta x, \Delta y)_{mutation}$ są wyłączonymi z modelu precesyjno-nutacyjnego IAU2000 składowymi nutacjami wymuszonej. Poprawki $(\Delta x, \Delta y)_{tidal}$ z tytułu dobowych i subdobowych efektów ruchu bieguna wywołanych pływami oceanicznymi można obliczyć, korzystając z procedury dostępnej na stronach internetowych IERS: www.iers.org. Wielkości $(\Delta x, \Delta y)_{mutation}$, reprezentujące dobowe i subdobowe wyrazy nutacyjne w ruchu bieguna, można obliczyć, korzystając z parametrów podanych w tabelicy 5.1 IERS Conventions 2003 (IERS 2003). Wielkość s' określa spowodowaną przez ruch CIP względem $ITRS$ zmianę pozycji TEO na równiku CIP zgodnie z wyrażeniem:

$$s'(t) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^t (x_p \dot{y}_p - \dot{x}_p y_p) dt \quad (35)$$

Ponieważ wielkość s' jest bardzo mała (rzędu 0.1 mas/stulecie), można ją wyznaczyć z przybliżonego wzoru:

$$s'(t) = 0.0015(a_c^2/1.2 + a_a^2) \quad (36)$$

gdzie a_c i a_a są średnimi amplitudami (w sekundach łuku) odpowiednio ruchu Chandlera i rocznego w badanym okresie od t_0 do t . Korzystając z aktualnych, średnich amplitud ruchów Chandlera i rocznego $s'(t) = -47 \mu\text{as} \times t$.

Macierz $R(t)$ ma postać:

$$R(t) = R_3(-ERA) \quad (37)$$

gdzie Kąt Obrótu Ziemi ERA oblicza się na podstawie UTC (wyznaczonego z TT) (Kryński 2004) oraz dostarczanych przez IERS poprawek $[UTI - UTC]_{IERS}$ jako liniowa funkcja UTI , zgodnie ze wzorami (26 i 27), przy czym:

$$UTI = UTC + [UTI - UTC]_{IERS} \quad (38)$$

Macierz $Q(t)$ przedstawiona w postaci złożenia macierzy obrotowych R_i ma postać:

$$Q(t) = R_3(-E) R_2(-d) R_3(E) R_3(s) \quad (39)$$

gdzie E i d są współrzędnymi sferycznymi CIP w $GCRS$. Współrzędne kartezjańskie CIP w $GCRS$ mają postać:

$$\begin{aligned} X &= \text{ind} \cos E \\ Y &= \text{ind} \sin E \\ Z &= \text{cos} d \end{aligned} \quad (40)$$

Parametr s jest wielkością określającą spowodowaną przez ruch CIP względem $GCRS$ zmianę położenia CEO na równiku CIP . Z zachowaniem dokładności 1 μs parametr ten wyraża się wzorem (Capitaine i in. 2000):

$$s(t) = -\frac{1}{2} [X(t)Y(t) - X(t_0)Y(t_0)] + \int_{t_0}^t \dot{X}(t)Y(t) dt - ([\sigma_0 N_0] - [\Sigma_0 N_0]) \quad (41)$$

W celu zapewnienia ciągłości 1 stycznia 2003 roku z obliczeniami wykonywanymi przy wykorzystaniu poprzednich procedur precesyjno-nutacyjnych, dla stałej $s_0 = [\sigma_0 N_0] - [\Sigma_0 N_0]$ przyjmuje się wartość +94 μs ($[\sigma_0 N_0]$ odpowiada kątowi pomiędzy σ_0 – pozycją CEO na równiku CIP na epokę J2000.0 i N_0 – węzłem wstępującym równika CIP w równik $GCRS$ na epokę J2000.0, zaś $[\Sigma_0 N_0]$ odpowiada kątowi pomiędzy Σ_0 – kierunkiem osi x , czyli początkiem liczenia rektascensji na równiku $GCRS$ i N_0).

Macierz $Q(t)$ można przedstawić w funkcji współrzędnych X, Y bieguna CIP w $GCRS$ w postaci:

$$Q(t) = \begin{pmatrix} 1 - aX^2 & -aXY & X \\ -aXY & 1 - aY^2 & Y \\ -X & -Y & 1 - a(X^2 + Y^2) \end{pmatrix} R_3(s) \quad (42)$$

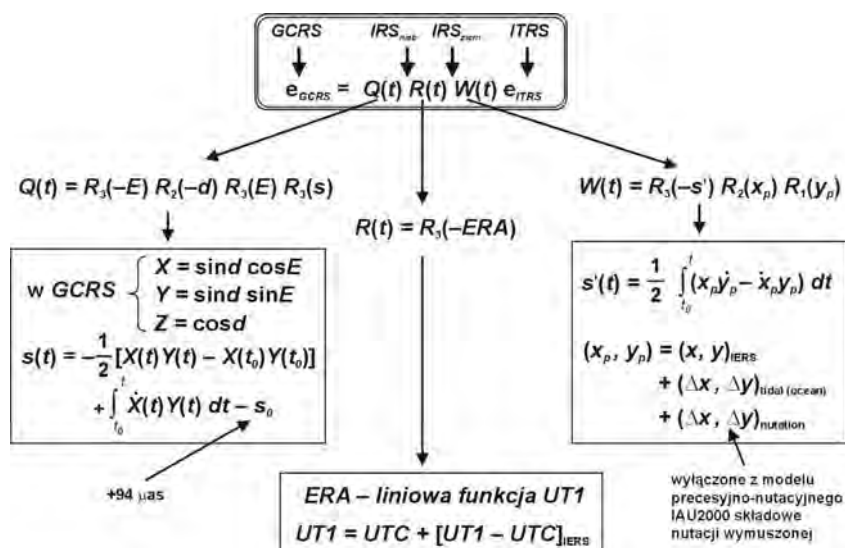
gdzie $a = 1/(1 + \text{cos} d)$ lub z dokładnością 1 μs $a = 1/2 + (X^2 + Y^2)/8$ (Seidelmann i Kovalevsky 2002).

Współrzędne X, Y bieguna CIP w $GCRS$ oparte na modelu precesyjno-nutacyjnym IAU2000 obliczane są ze wzorów:

$$\begin{aligned} X &= -0''.016\ 616\ 99 + 2004''.191\ 742\ 88\ t - 0''.427\ 219\ 05\ t^2 \\ &\quad - 0''.198\ 620\ 54\ t^3 - 0''.000\ 046\ 05\ t^4 + 0''.000\ 005\ 98\ t^5 \\ &\quad + \sum_i [(a_{s,0})_i \sin(ARG) + (a_{c,0})_i \cos(ARG)] \\ &\quad + \sum_i [(a_{s,1})_i t \sin(ARG) + (a_{c,1})_i t \cos(ARG)] \\ &\quad + \sum_i [(a_{s,2})_i t^2 \sin(ARG) + (a_{c,2})_i t^2 \cos(ARG)] + \dots \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned}
 Y = & -0''.006\,950\,78 - 0''.025\,381\,99\,t - 22''.407\,250\,99\,t^2 \\
 & + 0''.001\,842\,28\,t^3 + 0''.001\,113\,06\,t^4 + 0''.000\,000\,99\,t^5 \\
 & + \sum_i [(b_{s,0})_i \sin(ARG) + (b_{c,0})_i \cos(ARG)] \\
 & + \sum_i [(b_{s,1})_i t \sin(ARG) + (b_{c,1})_i t \cos(ARG)] \\
 & + \sum_i [(b_{s,2})_i t^2 \sin(ARG) + (b_{c,2})_i t^2 \cos(ARG)] + \dots
 \end{aligned}
 \tag{46}$$

gdzie parametr t określony jest wzorem (29), a ARG jest funkcją fundamentalnych argumentów teorii nutacji (argumenty Delauney'a). Dla nutacji księżycowo-słonecznej ARG jest funkcją liniową 5 zmiennych: średniej anomalii Księżyca l , średniej anomalii Słońca l' , średniej długości Księżyca pomniejszonej o średnią długość węzła wstępującego Księżyca F , średniej elongacji Księżyca ze Słońca D i średniej długości węzła wstępującego Księżyca Ω . Dla nutacji planetarnej ARG jest funkcją liniową 14 zmiennych, w skład których obok wyżej wymienionych wchodzi dodatkowo długości 8 planet: Merkurego, Wenus, Ziemi, Marsa, Jowisza, Saturna, Urana i Neptuna, a także ogólna precesja w długości (McCarthy i Capitaine 2002). Współczynniki szeregów dla obliczenia współrzędnych X i Y z użyciem modelu IAU2000 dostępne są na stronie internetowej IERS Convention Centre <ftp://maia.usno.navy.mil/conv2000/chapter5/>. Schemat relacji pomiędzy Geocentrycznym Niebieskim Systemem Odniesienia $GCRS$ i Międzynarodowym Ziemskim Systemem Odniesienia $ITRS$ przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat relacji pomiędzy systemami $GCRS$ i $ITRS$

8. PODSUMOWANIE

Przyjęte przez Międzynarodową Unię Astronomiczną IAU w 2000 roku (IAU 2001) oraz Międzynarodową Unię Geodezji i Geofizyki IUGG w 2003 roku (Kryński 2003) i uznane za obowiązujące od 1 stycznia 2003 roku nowe niebieskie systemy odniesienia dostosowane zostały do precyzji współczesnych technik obserwacyjnych (poniżej mikrosekundy łuku). Uchwały obu unii dotyczą definicji nowych niebieskich systemów odniesienia, transformacji między tymi systemami, nowych definicji systemów czasu oraz relacji między systemami czasu.

Zdefiniowany w ramach ogólnej teorii względności kinematyczny Międzynarodowy Niebieski System Odniesienia *ICRS* o stałej, z dokładnością do ruchów własnych definiujących go obiektów pozagalaktycznych, orientacji zastąpił stosowane przez ostatnie stulecia i zdefiniowane w oparciu o mechanikę newtonowską quasi-kartezjańskie systemy katalogów fundamentalnych (wyrażano w nich pozycje średnie), zorientowane za pomocą średniego równika i średniego punktu równonocy wiosennej na zadaną epokę z dokładnością zaledwie na poziomie $0''.01$. System *ICRS* nie jest systemem inercyjnym, gdyż z jednej strony podlega on nieznacznym obrotom wywołanym przez nieznaczące ruchy własne definiujących go obiektów pozagalaktycznych, z drugiej zaś narażony jest na równie nieznaczące przyspieszenia działające na zmieniające swoje położenie barycentrum Układu Słonecznego. Nie podlega on jednak, w przeciwieństwie do systemów katalogów fundamentalnych precesji i nutacji, toteż przy zaniedbaniu wspomnianych obrotów jego osie zachowują stałą orientację w czasie, zbliżoną do zadanej przez średni równik niebieski i średni dynamiczny punkt równonocy na epokę J2000.0. Zaniedbując dodatkowo wspomniane przyspieszenia, można *ICRS* traktować jako system inercyjny.

Używane dotychczas do transformacji niebieskiego systemu odniesienia w ziemski system odniesienia model precesji IAU1976 i teorię nutacji IAU1980 wraz z modelem ruchu bieguna (Niebieskiego Bieguna Efemerydalnego – *CEP*) zastąpiono nowym, bardziej precyzyjnym modelem precesyjno-nutacyjnym IAU2000 oraz spójnym z nim modelem ruchu bieguna (Niebieskiego Bieguna Pośredniego – *CIP*). Miejsce systemu równikowego odniesionego do bieguna *CEP* i punktu równonocy na epokę daty (wyrażano w nim pozycje pozorne) zajął znacznie bardziej precyzyjnie zdefiniowany Pośredni System Odniesienia (*IRS*) odniesiony do bieguna *CIP* i umieszczonego na równiku *CIP* Niebieskiego Efemerydalnego Punktu Początkowego *CEO*. Jako ziemski początek efemerydalny przyjęto „Nieobrcający się Punkt Początkowy” w *ITRS* i desygnowano ten punkt jako Ziemi Efemerydalny Punkt Początkowy *TEO* na równiku *CIP*. Miejsce zależnego od nutacji czasu gwiazdowego prawdziwego *GST*, jako parametru transformacji pomiędzy systemami ziemskim i niebieskim, zajął Kąt Obrotu Ziemi *ERA* związany poprzez funkcję liniową z *UT1*.

PODZIĘKOWANIA

Niniejszą pracę wykonano w ramach badań statutowych Instytutu Geodezji i Kartografii objętych zadaniem S/01 „Problemy geodezji i geodynamiki”. Stanowi ona kontynuację prac autora rozpoczętych w trakcie opracowywania „Rocznika Astronomicznego” na 2004 rok. Wyrazy podziękowania autor kieruje pod adresem prof. Władysława Górala za wykonanie wnikliwej recenzji pracy. Uwagi zawarte w recenzji prof. Władysława Górala zostały wykorzystane przy opracowaniu poprawek i uzupełnień do niniejszej pracy.

BIBLIOGRAFIA

- Argus D.F., Gordon R.G., 1991, *No-Net-Rotation Model of Current Plate Velocities Incorporating Plate Motion Model Nuvel-1*, Geophysical Research Letters, Vol. 18, pp. 2038–2042.
- Arias E.F., Feissel M., Charlot P., Lestrade J.F., 1995, *The celestial system of the International Earth Rotation Service – ICRS*, Astronomy and Astrophysics, Vol. 303, pp. 604.
- Astronomicheskij Ezhegodnik, 2003, *Astronomicheskij Ezhegodnik na 2004 god*, Rosijskaya Akademia Nauk, Institut Prikladnoi Astronomii, Sankt-Peterburg, 2003.
- Brumberg V.A., Kopeikin S.M., 1989, *Relativistic Reference Systems and Motion of Test Bodies in the Vicinity of the Earth*, Nouvo Cimento, Vol. 103B, No 1, pp. 63–98.
- Capitaine N., 2000, *Definition of the Celestial Ephemeris Pole and the Celestial Ephemeris Origin*, in Proceedings of IAU Colloquium 180 “Towards Models and Constants for Sub-Microarcsecond Astrometry”, (eds.) K.J. Johnston, D.D. McCarthy, B. Luzum, G. Kaplan, U.S. Naval Observatory, Washington D.C., pp. 153–163.
- Capitaine N., Guinot B., Souchay J., 1986, *A non-rotating origin on the instantaneous equator: definition, properties and use*, Celestial Mechanics, Vol. 39, pp. 283–307.
- Capitaine N., Guinot B., McCarthy D.D., 2000, *Definition of the Celestial Ephemeris Origin and of UT1 in the International Celestial Reference Frame*, Astronomy and Astrophysics, Vol. 355, pp. 398–405.
- Capitaine N., Wallace P.T., McCarthy D.D., 2003, *Expressions to implement the IAU 2000 definition of UT1*, Astronomy and Astrophysics, Vol. 406, pp. 1135–1149.
- Damour T., Soffel M., Xu C., 1991, *General-relativistic celestial mechanics. I. Method and definition of reference systems*, Physical Review D, Vol. 43, Issue 10, pp. 3273–3307.

- Damour T., Soffel M., Xu C., 1992, *General-relativistic celestial mechanics. II. Translational equations of motion*, Physical Review D, Vol. 45, Issue 4, pp. 1017–1044.
- Damour T., Soffel M., Xu C., 1993, *General-relativistic celestial mechanics. III. Rotational equations of motion*, Physical Review D, Vol. 47, Issue 8, pp. 3124–3135.
- Damour T., Soffel M., Xu C., 1994. *General-relativistic celestial mechanics. IV. Theory of satellite motion*, Physical Review D, Vol. 49, Issue 2, pp. 618–635.
- Dehant V. i in., 1999, *Considerations concerning the non-rigid Earth nutation theory*, Celestial Mechanics, Vol. 72, pp. 245–310.
- Geodesist's Handbook, 1992, *IUGG Resolutions adopted at the XX IUGG General Assembly in Vienna and related to Geodesy*, Bulletin Géodésique, Vol. 66, No 2, pp. 128–129.
- Guinot B., 1979, *Basic Problems in the Kinematics of the Rotation of the Earth*, in D.D. McCarthy, J.D. Pilkington (eds.), Time and the Earth's Rotation, D. Reidel Publ., pp. 7–18.
- IAU, 1982, *Transactions of the International Astronomical Union, XVIIIIB*, (ed.) R.M West, Dodrecht, Kluwer, The Netherlads.
- IAU, 1991, *Proceedings of the 127th Colloquium of the IAU on Reference Systems*, (eds.) J.A. Hughes, A. Smith, G.H. Kaplan, U.S. Naval Observatory, Washington, USA.
- IAU, 1992, *Transactions of the International Astronomical Union, XXIB*, (ed.) J. Bergeron, Dodrecht, Kluwer, The Netherlads.
- IAU, 1996, *Transactions of the International Astronomical Union, XXIIB*, (ed.) I. Appenzeller, Dodrecht, Kluwer, The Netherlads.
- IAU, 1999, *Transactions of the International Astronomical Union, XXIIIB*, (ed.) J. Andersen, Dodrecht, Kluwer, The Netherlads.
- IAU, 2001, *Transactions of the International Astronomical Union, XXIVB*, (ed.) H. Rickman, Dodrecht, Kluwer, The Netherlads.
- IERS, 1996a, *1995 International Earth Rotation Service Report*, Observatoire de Paris, Paris, p. II-19.
- IERS, 1996b, *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.
- Klioner S.A., Voinov A.V., 1993, *Relativistic Theory of Astronomical Reference Systems in Closed Form*, Physical Review D, Vol. 48, Issue 4, pp. 1451–1461.
- Kopeikin S.M., 1988, *Celestial Coordinate Reference Systems in Curved Space-Time*, Celestial Mechanics, Vol. 44, pp. 87–115.
- Kovalevsky J., 2002, *Comparison of "Old" and "New" Concepts: Reference Systems*, Proceedings of the IERS Workshop on the Implementation of

- the New IAU Resolutions, IERS Technical Note No 29, Observatoire de Paris, pp. 31–34.
- Kryński J., 2003, *XXIII Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki w Sapporo*, Geodezja i Kartografia, t. LII, z. 4, pp. 237–254.
- Kryński J., 2004, *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*, red. J. Kryński, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa, (221 pp).
- Kryński J., Rogowski J.B., 2004, *Systemy i układy odniesienia w geodezji, geodynamice i astronomii*, Monographic series of the Institute of Geodesy and Cartography, Nr 10, Warsaw 2004, pp. 11–35 (this issue).
- Landau L.D., Lifszyc E.M., 1980, *Teoria pola*, PWN, Wydanie III, Warszawa.
- McCarthy D.D., Capitaine N., 2002, *Practical Consequences of Resolution B1.6 „IAU2000 Precession-Nutation Model,” Resolution B1.7 „Definition of Celestial Intermediate Pole,” and Resolution B1.8 „Definition and Use of Celestial and Terrestrial Ephemeris Origin”*, Proceedings of the IERS Workshop on the Implementation of the New IAU Resolutions, IERS Technical Note No 29, Observatoire de Paris, pp. 9–18.
- Minster J.B., Jordan T.H., 1978, *Present-day plate motions*, Journal of Geophysical Research, Vol. 83, pp. 5331–5354.
- Schutz B.F., 2002, *Wstęp do ogólnej teorii względności*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2002, 365 pp.
- Seidelmann P.K., 1982, *1980 IAU Nutation: The Final Report of the IAU Working Group on Nutation*, Celestial Mechanics, Vol. 27, pp. 79–106.
- Seidelmann P.K., Kovalevsky J., 2002, *Application of the new concepts and definitions (ICRS, CIP and CEO) in fundamental astronomy*, Astronomy and Astrophysics, Vol. 392, pp. 341–351.
- Trajdos-Wróbel T., 1966, *Matematyka dla inżynierów*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.

JAN KRYŃSKI
Institute of Geodesy and Cartography
Warsaw

RELATIONS BETWEEN CELESTIAL REFERENCE SYSTEMS AND THE TERRESTRIAL REFERENCE SYSTEM

S u m m a r y

Adopted by the XXIV IAU General Assembly in Manchester in 2000, defined in the Resolution B1.3 the Barycentric Celestial Reference System *BCRS* and the Geocentric Celestial Reference System *GCRS* that both form the International Celestial Reference System *ICRS* (Kovalevsky 2002), are formulated on the basis of recent formalism of general relativity. The definitions of the systems contain their metrics expressed by metric tensors as well as time systems. They also contain generalised Lorentz transformation between the *BCRS* and the *GCRS* for time coordinate and spatial coordinates independently. The Intermediate Reference System *IRS* is a system through which transformation between celestial and terrestrial system is performed. The motion of the *IRS* with respect to the *GCRS* is determined by the IAU2000 precession/nutation model. Resolution 1.7 of the XXIV IAU General Assembly in Manchester in 2000 defines the Celestial Intermediate Pole *CIP* that determines the direction of *IRS* z-axis. Ephemeris origin of the *IRS* with respect to the *GCRS* was defined in Resolution B1.8 of that General Assembly as the Celestial Ephemeris Origin *CEO*, and with respect to the International Terrestrial Reference System *ITRS* – the Terrestrial Ephemeris Origin *TEO*, both on the equator of the *CIP*. The angle measured along the equator of the *CIP* between the *TEO* and the *CEO*, positively in the retrograde direction, is called the Earth Rotation Angle *ERA*. It replaces *GST* as a parameter of transformation between the celestial and terrestrial systems. According to new definition of *UT1* it is proportional to the *ERA*. The *IRS* rotated by the *ERA* can further be transformed to the *ITRS* with use of two rotations corresponding to the *CIP* coordinates in the *ITRS* provided by the IERS.