

INSTYTUT GEODEZJI I KARTOGRAFII

SERIA MONOGRAFICZNA NR 11

MARCIN SĘKOWSKI

**WPLYW WYBORU KATALOGU
FUNDAMENTALNEGO
NA WARTOŚCI OBLICZANYCH
POZYCJI POZORNYCH GWIAZD**

Warszawa 2006



Rada Wydawnicza
przy Instytucie Geodezji i Kartografii
Editorial Council
at the Institute of Geodesy and Cartography

Adam Linsenbarth (przewodniczący, chairman),
Andrzej Ciołkosz (zastępca przewodniczącego, deputy chairman),
Teresa Baranowska, Stanisław Białousz (Wydział Geodezji i Kartografii PW),
Wojciech Janusz, Jan R. Olędzki (Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW),
Andrzej Sas-Uhrynowski, Janusz Zieliński (Centrum Badań Kosmicznych),
Hanna Ciołkosz (sekretarz, secretary)

Redaktor naukowy wydawnictwa
Scientific Editor
Adam Linsenbarth

Zastępca redaktora naukowego wydawnictwa
Deputy Scientific Editor
Andrzej Ciołkosz

Zespół redakcyjny
Editorial Staff
Wojciech Janusz
Andrzej Sas-Uhrynowski
Edyta Jurczak

Adres Redakcji
Instytut Geodezji i Kartografii
02-679 Warszawa, ul. Modzelewskiego 27
Address of the Editorial Board:
Institute of Geodesy and Cartography
02-679 Warsaw, Modzelewskiego 27 St.
Poland
e-mail: boi@igik.edu.pl

© Copyright by Instytut Geodezji i Kartografii

ISBN 83-60024-05-7
IGiK, Warszawa 2006 r.
Skład komputerowy i druk: IGiK

SPIS TREŚCI

Słownik skrótów	9
Zarys treści	11
1 Wprowadzenie	12
2 Niebieskie systemy odniesienia	17
2.1 Wprowadzenie	17
2.1.1 Systemy odniesienia	17
2.1.2 Koncepcja niebieskiego systemu odniesienia	18
2.1.3 Konwencjonalny niebieski system odniesienia	19
2.1.4 Układ (system) równikowy	19
2.1.5 Konwencjonalny Niebieski System Odniesienia IAU	20
2.2 „Systemy” katalogowe	22
2.2.1 Realizacje systemów katalogowych FK	24
2.2.2 Katalog FK3	24
2.2.3 Katalog FK4	25
2.2.4 Katalog FK4 Sup	27
2.2.5 Katalog FK5	27
2.3 <i>ICRS</i>	29
2.3.1 <i>ICRF</i>	31
2.3.2 Katalog Hipparcos	32
2.3.3 Katalog FK6	34
3 Pozycja pozorna gwiazdy	38
3.1 Wprowadzenie	38
3.1.1 Precesja, nutacja, ruch bieguna	39
3.1.2 Teorie nutacji, systemy stałych	40
3.2 Pozycja pozorna w systemach katalogowych	43
3.2.1 Definicja bieguna pośredniego	43
3.2.2 Macierz precesji IAU76	45
3.2.3 Wielkości redukcyjne	46
3.2.4 Macierz nutacji IAU1980	48
3.2.5 Algorytm obliczania pozycji pozornej (<i>CEP</i>)	50
3.3 Pozycja pozorna gwiazdy w <i>ICRS</i>	52
3.3.1 Niebieski Biegun Pośredni <i>CIP</i>	53

3.3.2	Koncepcja <i>NRO</i> , Niebieski Efemerydalny Punkt Początkowy <i>CEO</i>	55
3.3.3	Ziemiński Efemerydalny Punkt Początkowy (<i>TEO</i>), Kąt Obrotu Ziemi (<i>ERA</i>)	58
3.3.4	Transformacja <i>ITRS</i> do <i>GCRS</i>	59
3.3.5	Algorytm obliczania pozycji pozornej w <i>IRS</i>	61
4	Porównanie pozycji katalogowych gwiazd	64
4.1	Transformacja danych katalogowych oraz ich błędów	64
4.1.1	Ogólny rachunek błędów	64
4.1.2	Transformacja epoki katalogu	65
4.1.3	Standardowy model ruchu gwiazdy	66
4.1.4	Transformacja epoki katalogu w ujęciu ścisłym	68
4.2	Katalog Hipparcos a katalog FK5	70
4.2.1	Katalog Hipparcos a FK5 — gwiazdy zawarte w RA IGiK	81
4.3	Katalog Hipparcos a katalog FK6	84
5	Analiza pozycji pozornych wybranych gwiazd	89
5.1	Czynniki wpływające na wartości pozycji pozornych gwiazd	89
5.1.1	Wpływ błędów katalogowych pozycji i ruchów własnych	95
5.2	Porównanie i analiza obliczonych pozycji pozornych gwiazd	98
5.2.1	Ogólny wpływ danych katalogowych na pozycje pozorne	98
5.2.2	Wpływ danych katalogowych na pozycje pozorne wybranych gwiazd	100
5.3	Analiza zmienności pozycji pozornych gwiazd w czasie	110
5.4	Pozycje pozorne Syriusza i Biegunowej	122
5.4.1	Syriusz	123
5.4.2	Biegunowa	125
6	Podsumowanie i wnioski	128
	Podziękowanie	131
	Bibliografia	132
	Streszczenie (w języku angielskim)	139

**THE INFLUENCE OF CHOICE OF
FUNDAMENTAL CATALOGUE ON CALCULATED
APPARENT PLACES OF STARS**

TABLE OF CONTENTS

Glossary	9
Abstract (in Polish)	11
1 Introduction	12
2 The celestial reference systems	17
2.1 Introduction	17
2.1.1 The reference systems	17
2.1.2 Concept of a celestial reference system	18
2.1.3 Conventional celestial reference system	19
2.1.4 Equatorial reference frame (system)	19
2.1.5 The Conventional Celestial Reference System of IAU	20
2.2 The catalogue “systems”	22
2.2.1 Realizations of the FK catalogue systems	24
2.2.2 The FK3 catalogue	24
2.2.3 The FK4 catalogue	25
2.2.4 The FK4 Sup catalogue	27
2.2.5 The FK5 catalogue	27
2.3 <i>ICRS</i>	29
2.3.1 <i>ICRF</i>	31
2.3.2 The Hipparcos catalogue	32
2.3.3 The FK6 catalogue	34
3 The apparent place of star	38
3.1 Introduction	38
3.1.1 Precession, nutation and polar motion	39
3.1.2 Theories of nutation and systems of constants	40
3.2 Apparent place in the catalogue systems	43
3.2.1 Definition of an intermediate pole	43
3.2.2 IAU76 precession matrix	45
3.2.3 Besselian numbers	46
3.2.4 IAU80 nutation matrix	48
3.2.5 Algorithm for computing apparent places (<i>CEP</i>)	50

3.3	Apparent place of star in the <i>ICRS</i>	52
3.3.1	Celestial Intermediate Pole <i>CIP</i>	53
3.3.2	The <i>NRO</i> concept, Celestial Ephemeris Origin (<i>CEO</i>)	55
3.3.3	Terrestrial Ephemeris Origin (<i>TEO</i>), Earth Rotation Angle (<i>ERA</i>)	58
3.3.4	<i>ITRS</i> to <i>GCRS</i> transformation	59
3.3.5	Algorithm for computing the apparent places in <i>IRS</i>	61
4	Comparing the catalogue positions of stars	64
4.1	Transformation of the catalogue data and errors	64
4.1.1	General error propagation	64
4.1.2	Epoch transformation	65
4.1.3	The standard model of stellar motion	66
4.1.4	Epoch transformation — rigorous treatment	68
4.2	The Hipparcos catalogue versus the FK5	70
4.2.1	The Hipparcos catalogue versus the FK5 — the RA IGiK stars	81
4.3	The Hipparcos catalogue versus the FK6	84
5	The analysis of the apparent places of selected stars	89
5.1	Factors affecting the apparent places	89
5.1.1	Effect of the errors of catalogue data	95
5.2	Comparing and analysis of computed apparent places	98
5.2.1	General effect of the catalogue data on the apparent places	98
5.2.2	Effect of the catalogue data on the apparent places of selected stars	100
5.3	Analysis of the apparent places' time variations	110
5.4	Apparent places of Sirius and Polaris	122
5.4.1	Sirius	123
5.4.2	Polaris	125
6	Summary and conclusions	128
	Aknowledgements	131
	Bibliography	132
	Summary	139

Recenzent:
Prof. dr hab. Jerzy Rogowski

Słowa kluczowe: Niebieskie systemy odniesienia, niebieskie systemy katalogowe, niebieskie układy odniesienia, ICRS, ICRF, katalogi fundamentalne, FK5, FK6, Katalog Hipparcos, pozycja pozorna gwiazdy, precesja, nutacja, Niebiski Biegun Pośredni, CEP, CIP, Niebieski Efemerydalny Punkt Początkowy, CEO, Kąt Obrotu Ziemi, ERA, Syriusz, Biegunowa

Słownik skrótów

- AGK... — Astronomische Gesellschaft Katalog (seria fundamentalnych katalogów gwiazd)
- BCRF* — Baricentric Celestial Reference Frame (Niebieski Barycentryczny Układ Odniesienia)
- BCRS* — Barycentric Celestial Reference System (Barycentryczny Niebieski System Odniesienia)
- BIH — Bureau International de l'Heure (Międzynarodowe Biuro Czasu)
- CEO* — Celestial Ephemeris Origin (Niebieski Efemerydalny Punkt Początkowy)
- CEP* — Celestial Ephemeris Pole (Efemerydalny Biegun Niebieski)
- CIO* — Conventional International Origin (międzynarodowy umowny średni biegun północny Ziemi)
- CIP* — Celestial Intermediate Pole (Pośredni Biegun Niebieski)
- CRP* — Conventional Reference Pole (Konwencjonalny Biegun Odniesienia)
- CRS* — Celestial Reference System (Niebieski System Odniesienia)
- CTS* — Conventional Terrestrial System (Konwencjonalny System Ziemi)
- ERA* — Earth Rotation Angle (Kąt Obrotu Ziemi)
- ESA — European Space Agency (Europejska Agencja Kosmiczna)
- FC — Fundamental Catalogue (fundamentalny katalog gwiazd), (Auwers, 1879)
- FK... — seria fundamentalnych katalogów gwiazd
- GC — Albany General Catalogue (fundamentalny katalog gwiazd), (Boss, 1937)
- GCRF* — Geocentric Celestial Reference Frame (Geocentryczny Niebieski System Układ)
- GCRS* — Geocentric Celestial Reference System (Geocentryczny Niebieski System Odniesienia)
- GPS — Global Positioning System (Globalny System Nawigacyjny)
- HCRF* — Hipparcos Celestial Reference Frame (Niebieski Układ Odniesienia Katalogu Hipparcos)
- IAG — International Association of Geodesy (Międzynarodowa Asocjacja Geodezji)
- IAU — International Astronomical Union (Międzynarodowa Unia Astronomiczna)
- ICRF* — International Celestial Reference Frame (Międzynarodowy Niebieski Układ Odniesienia)
- ICRS* — International Celestial Reference System (Międzynarodowy Niebieski System Odniesienia)

<i>IERS</i>	— International Earth Rotation and Reference Systems Service (Międzynarodowa Służba Ruchu Obrotowego Ziemi i Systemów Odniesienia)
<i>IRP</i>	— IERS Reference Pole (biegun odniesienia IERS)
<i>IRS</i>	— International Reference Stars (fundamentalny katalog gwiazd)
<i>IRS</i>	— Intermediate Reference System (Pośredni System Odniesienia)
<i>ITRF</i>	— International Terrestrial Reference Frame (Międzynarodowy Ziemi Układ Odniesienia)
<i>ITRS</i>	— International Terrestrial Reference System (Międzynarodowy Ziemi System Odniesienia)
<i>IUGG</i>	— International Union of Geodesy and Geophysics (Międzynarodowa Unia Geodezji i Geofizyki)
<i>JD</i>	— data juliańska odniesiona do czasu ziemskiego (<i>TT</i>)
<i>JPL</i>	— Jet Propulsion Laboratory
<i>NFK</i>	— Neuer Fundamentalkatalog... (fundamentalny katalog gwiazd), (Peters, 1907)
<i>NRO</i>	— Non-Rotating Origin (Nieobracający się Punkt Początkowy)
<i>RA IGiK</i>	— Rocznik Astronomiczny Instytutu Geodezji i Kartografii
<i>TCB</i>	— Temps-Coordonnée Barycentrique (czas współrzędnych barycentrycznych)
<i>TCG</i>	— Temps-Coordonnée Géocentrique (czas współrzędnych geocentrycznych)
<i>TDB</i>	— Barycentryczny Czas Dynamiczny
<i>TEO</i>	— Terrestrial Ephemeris Origin (Ziemi Efemerydalny Punkt Początkowy)
<i>TRS</i>	— Terrestrial Reference System (Ziemi System Odniesienia)
<i>TT</i>	— Terrestrial Time (Czas Ziemi)
<i>UT1</i>	— Universal Time (czas uniwersalny <i>UT1</i>)
<i>VLBI</i>	— Very Long Baseline Interferometry (interferometria długich baz)

ZARYS TREŚCI: Publikacja niniejsza powstała, zainspirowana zmianami definicji i pojęć związanych z niebieskimi systemami i układami odniesienia, wprowadzonymi na mocy rezolucji Międzynarodowej Unii Astronomicznej. Podstawą opracowania jest rozprawa doktorska pod podobnym tytułem, przedstawiona i obroniona przez autora (Sękowski, 2005).

W początkowych rozdziałach pracy przedstawione zostały: historyczne niebieskie systemy odniesienia oparte na katalogach fundamentalnych FK3, FK4, FK5 oraz obowiązujący Międzynarodowy Niebieski System Odniesienia ICRS i jego realizacje (ICRF) oparte na katalogach Hipparcos (HCRF) i FK6 (rozdz. 2). Opisane zostały również zagadnienia związane z pojęciem pozycji pozornej jako takiej, zarówno w systemach katalogowych, jak i w ICRS tj.: macierz precesyjno-nutacyjna, wielkości redukcyjne, Niebieski Biegun Pośredni (IRP), koncepcja nieobracającego się początku (NRO) i Niebieski Efemerydalny Punkt Początkowy (CEO) (rozdz. 3). Przedstawiono też odpowiednie algorytmy obliczeniowe.

W rozdziale 4 przedstawiono omówienie oraz wyniki obliczeń wykonanych w celu porównania, dotychczas stosowanych (FK5) oraz najnowszych danych katalogowych (Hipparcos i FK6).

Najistotniejszą część pracy stanowi rozdział 5, zawierający szczegółową analizę wpływu jaki na wartości pozycji pozornych mają różnice pomiędzy dawniej i obecnie stosowanymi danymi katalogowymi, a także wpływu jaki na wartości tych pozycji mają zmiany modelu precesyjno-nutacyjnego i definicji samego Międzynarodowego Niebieskiego Systemu Odniesienia. W rozdziale tym omówiona została również zmienność czasowa obliczanych wartości pozycji pozornych oraz związane z tym problemy z interpolacją i przedstawianiem ich w formie stabelaryzowanej, w wydawnictwach rocznikowych.

W rozdziale 6 zebrane zostały szczegółowe wnioski wynikające z przedstawionych rozważań i obliczeń, z których najistotniejsze to: stwierdzenie dużych, sięgających nawet kilkuset *mas* systematycznych różnic pomiędzy danymi zawartymi w katalogach FK5 i Hipparcos; wykazanie istnienia względnego obrotu niebieskich systemów odniesienia FK5 i HCRF o wartości około 20 *mas*; oraz wskazanie na błędy danych katalogowych jako na główne źródło błędów wyznaczanych na ich podstawie pozycji pozornych. Przejście od danych katalogowych FK5 do Hipparcos oraz katalogowego niebieskiego systemu odniesienia FK5 do HCRF zapewnia przy tym poprawę dokładności wyznaczania pozycji pozornych o około jeden rząd wielkości.

1. WPROWADZENIE

U podstaw geodezji, geodynamiki i nawigacji leżą zagadnienia związane z tzw. systemami odniesienia umożliwiającymi m. in. określanie położenia punktów na powierzchni Ziemi. Ziemskie systemy odniesienia zawsze, w naturalny sposób, konstruowane były jednak w nawiązaniu do przestrzeni zewnętrznej, w której dużo łatwiej było o stabilne i dobrze zdefiniowane punkty odniesienia. Dawniej, jedynymi punktami odniesienia służącymi do konstrukcji takich systemów były oczywiście gwiazdy. Współcześnie, rozwój technologiczny spowodował, że funkcję tę spełniają również sztuczne satelity Ziemi oraz inne obiekty astronomiczne jak np. radioźródła obserwowane techniką interferometrii długich baz (VLBI). Również wskutek ogromnego postępu technologicznego ostatnich dekad rola i znaczenie dokładnego pozycjonowania, a więc i dokładnych systemów odniesienia, bardzo wzrosła. Nie byłyby bez nich możliwe np. spektakularne sukcesy w dziedzinie podboju kosmosu (sondy międzyplanetarne) lub geodynamiczne badania ruchu kontynentów z pomocą technik satelitarnych GPS.

Definiowanie, określanie i badanie szczegółowych związków pomiędzy niebieskimi i ziemskimi systemami odniesienia należy do zadań współczesnej astrometrii, nie ograniczającej się już wyłącznie do gwiazd obserwowanych w widzialnym zakresie widmowym. Zagadnienia te są też jednym z głównych tematów zainteresowań międzynarodowych instytucji i organizacji naukowych jak Międzynarodowa Unia Astronomiczna (IAU), Międzynarodowa Unia Geodezji i Geofizyki (IUGG), Międzynarodowa Asocjacja Geodezji (IAG) itp.

W przeszłości punktem wyjścia dla pomiarów astrometrycznych oraz geodezyjnych były tzw. niebieskie systemy katalogowe definiowane poprzez pozycje stosunkowo niewielkiej liczby gwiazd, uzyskiwane z precyzyjnych obserwacji astronomicznych. Były to przede wszystkim systemy definiowane serią katalogów fundamentalnych FK, z których ostatni (FK5) przyjęty do stosowania przez Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej w 1988 roku, zawierał 1535 gwiazd. Systemy FK oparte były na równiku niebieskim, określonym przez średnią oś obrotu Ziemi oraz na punkcie początkowym zdefiniowanym położeniem ekliptyki (punktem średniej równonocy wiosennej).

W ostatnich dekadach zaszły ważne zmiany w poznaniu ruchu obrotowego Ziemi — nastąpił ogromny postęp w zakresie osiąganych precyzji i rozdzielczości czasowych obserwacji, jak również w metodach i technologii ich opracowywania. Począwszy od 1980 roku ruch bieguna ziemskie-

go jest monitorowany w sposób ciągły przy użyciu VLBI i dostarczane są aktualne pozycje bieguna w odniesieniu do systemu niebieskiego (Kołaczek, 2004b). Dążąc do zapewnienia spójności pomiędzy coraz precyzyjniejszymi danymi obserwacyjnymi oraz coraz doskonalszymi modelami teoretycznymi a systemem stałych i definicji, XXI Zgromadzenie Generalne IAU (Buenos Aires, 1991) przyjęło pakiet rekomendacji (IAU Transactions, 1992; Kryński, 2004a) specyfikujących nowe niebieskie systemy odniesienia w czterowymiarowej czasoprzestrzeni i związane z nimi skale czasu z uwzględnieniem ogólnej teorii względności. Dodatkowo zalecono aby nowy, barycentryczny system odniesienia był możliwie bliski równikowi i punktowi równonocy wiosennej systemu FK5 odniesionym do epoki J2000.0. Kolejnym krokiem było zdefiniowanie, przez XXIII Zgromadzenie Generalne IAU (Kyoto, 1997), i przyjęcie za obowiązujący od 1 stycznia 1998 roku, nowego Międzynarodowego Niebieskiego Systemu Odniesienia *ICRS* (IAU Transactions, 1999; Kryński, 2004a). Kinematyczną realizacją *ICRS* przeznaczoną do zastosowań praktycznych został zaś Międzynarodowy Niebieski Układ Odniesienia (*ICRF*). Ta sama rezolucja zatwierdziła też nowy, astrometryczny, powstały na bazie obserwacji satelitarnych, Katalog Hipparcos jako podstawową realizację *ICRS* w zakresie widma optycznego.

Wprowadzenie *ICRS*, zdefiniowanego jako system kinematyczny stanowi zdecydowany przełom w dotychczasowej praktyce, zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym. *ICRS* zdefiniowany jest poprzez pozycje odległych obiektów pozagalaktycznych, nie wykazujących ruchów własnych. Zgodnie z definicją jest to czasoprzestrzenny system niezależny od położenia osi obrotu Ziemi oraz od położenia osi ekliptyki. *ICRS* jest więc, z założenia, systemem kinematycznie ustalonym. Nie jest on odniesiony do epoki, która byłaby związana z pozycją osi systemu jak to ma miejsce w przypadku dotychczas stosowanych systemów katalogowych, np. FK5. Pozycje w *ICRS* odgrywają rolę średnich pozycji katalogowych odniesionych do średniego równika i średniej równonocy wiosennej na epokę standardową, lecz w ich wypadku epoka we wspomnianym sensie nie ma zastosowania. Zmienność pozycji w systemie *ICRS* spowodowana jest wyłącznie ruchem własnym gwiazd z uwzględnieniem prędkości radialnej. System ten nie podlega globalnej rotacji i nie zależy już od ruchu Ziemi, jak to miało miejsce w przypadku FK5. *ICRF* jako praktyczna realizacja *ICRS* wyznaczony jest z dokładnością około $30 \mu\text{as}$ poprzez pozycje 212 radioźródeł definiujących, w oparciu o obserwacje VLBI, co jest poprawą o trzy rzędy wielkości w stosunku do poprzednich systemów katalogo-

wych, wyznaczanych z dokładnością milisekundową. Praktyczna realizacja *ICRS* w zakresie widma optycznego — układ odniesienia Katalogu Hipparcos (*HCRF*) (Lindegren i Kovalevsky, 1995) nie jest oczywiście aż tak precyzyjny. Dane katalogowe Hipparcos, uzyskane na drodze obserwacji optycznych z orbity okołoziemskiej, wolne od zakłóceń związanych z atmosferą Ziemi i zniekształceń strefowych, stanowią jednak podobny postęp w stosunku do poprzednich katalogów, sprowadzając rzeczywiste błędy pozycji katalogowych gwiazd z poziomu setek do kilkunastu milisekund. Najnowszy katalog fundamentalny FK6, będący kompilacją danych pozycyjnych Hipparcos i wieloletnich obserwacji ruchów własnych gwiazd jeszcze ten wynik poprawia.

Nowym definicjom dotyczącym niebieskich systemów odniesienia towarzyszą zmiany w definicji ziemskiego systemu odniesienia. Zgodnie z postanowieniami IUGG i IAU wprowadzony został bowiem Międzynarodowy Ziemski System Odniesienia *ITRS*, którego orientacja została zdefiniowana przez orientację BIH 1984.0, zaś zmienność w czasie jest określona poprzez zastosowanie warunku, iż globalna suma poziomych ruchów tektonicznych nie zawiera składowych obrotu. Zmienność *ITRS* monitorowana jest w sposób ciągły przez Międzynarodową Służbę Ruchu Obrotowego Ziemi i Systemów Odniesienia (IERS).

Transformacja pomiędzy ziemskim systemem odniesienia, do którego odnoszą się obserwacje a niebieskim systemem odniesienia (w którym podawane są pozycje gwiazd) tradycyjnie wykonywana jest w trzech zasadniczych etapach. W pierwszym etapie system, w którym wykonywane są obserwacje przeprowadzany jest przy pomocy parametrów opisujących ruch bieguna ziemskiego w tzw. pośredni system odniesienia. Następnym krokiem jest obrót systemu pośredniego wokół osi równika o kąt reprezentujący obrót Ziemi. Obrócony w ten sposób system pośredni staje się geocentrycznym systemem niebieskim, do którego odnoszą się tzw. pozycje pozorne. W ostatnim kroku pośredni system odniesienia przeprowadzany jest w system quasi-inercjalny przy pomocy parametrów opisujących precesję i nutację. W transformacji tej uwzględniane są dodatkowo efekty aberracji i paralaksy rocznej, ruch własny gwiazd i efekty relatywistyczne, jak ugięcie światła w polu grawitacyjnym Słońca.

Definicja pośredniego systemu odniesienia podlegała w przeszłości kilkakrotnym zmianom. Wiązała się z pojęciem chwilowej osi obrotu Ziemi, międzynarodowym umownym biegunem północnym Ziemi *CIO* (*Conventional International Origin*) oraz ostatnio biegunem *CEP* (*Celestial Ephemeris Origin*). Od 1 stycznia 2003, co jest kolejną istotną zmianą, decyzją

XXIV Zgromadzenia Generalnego IAU (Manchester, 2000) (IAU Transactions, 2001; Kryński, 2004a), biegunem pośredniego systemu odniesienia *IRS* (*Intermediate Reference System*) jest Pośredni Biegun Niebieski *CIP* (*Celestial Intermediate Pole*). Zmiana ta spowodowana została koniecznością doprecyzowania definicji i objęcia nią wyników nowoczesnych technik obserwacyjnych śledzących niemierzalne dotychczas efekty ruchu tego bieguna w przestrzeni i względem bryły Ziemi. Jednocześnie z wprowadzeniem nowej definicji bieguna pośredniego oraz nowej opisującej jego ruch w *ICRS* teorii precesyjno-nutacyjnej dokonana została radykalna zmiana polegająca na uniezależnieniu początku systemu pośredniego (kierunku osi x) od ekliptyki. Dotychczasowy punkt początkowy systemu pośredniego jakim był punkt równonocy wiosennej zastąpiony został przez Niebieski Efemerydalny Punkt Początkowy *CEO*, zgodny z koncepcją tzw. nieobracającego się początku, tj. spełniający warunek braku obrotu systemu pośredniego wokół osi z . Zmiana ta wiąże się w konsekwencji z zastąpieniem czasu gwiazdowego, który dotąd był miarą obrotu Ziemi wokół jej osi, przez tzw. Kąt Obrotu Ziemi (*ERA*) oraz z nową definicją czasu uniwersalnego *UT1*, wg której jest on obecnie liniową funkcją *ERA*.

Ewolucja w definicjach systemów i układów odniesienia udokumentowana jest w bogatej literaturze naukowej. Obowiązujące ustalenia i standardy znalazły odbicie w kolejnych uchwałach zgromadzeń generalnych IAU i IUGG. W Polsce sygnalizowane były one w kolejnych wydaniach Rocznika Astronomicznego IGiK. Szczegółowy opis nowych, obowiązujących niebieskich i ziemskich systemów i układów odniesienia oraz ich wzajemnych relacji zamieszczono w wydawnictwie monograficznym IGiK (Kryński, 2004a).

Bardzo duży postęp w zakresie dokładności dostępnych obecnie danych pozycyjnych (Hipparcos) oraz rezolucje IAU (IAU Transactions, 2001; Kryński, 2004a) rekomendujące przejście z dniem 1 stycznia 2003 — również w wydawnictwach rocznikowych i almanachach — z systemu FK5 do *ICRS* oraz do pojęć i definicji związanych z nowym pośrednim systemem odniesienia *CIP/CEO* spowodował, że autor, będąc członkiem zespołu opracowującego Rocznik Astronomiczny IGiK (RA IGiK) (Kryński i Sękowski, 2001–2006) postanowił przeanalizować następujące zagadnienia i problemy:

- charakter i wielkość różnic pomiędzy stosowanymi dotychczas danymi katalogowymi FK5 a nowymi, dostępnymi danymi Hipparcos i FK6,

- wpływ wyboru katalogu gwiazd na wartości wyznaczanych na ich podstawie pozycji pozornych,
- zmienność czasowa pozycji pozornych gwiazd w aspekcie możliwości ich tabelaryzowania i interpolacji — weryfikacja możliwości ich zastosowania w praktyce astrometrycznej przy dokł. $0''.1$ (np. pomiary odchylenia linii pionu) oraz w zadaniach wymagających dokł. $0''.01$ (np. badania zmian kierunku linii pionu metodami stacjonarnymi).

*
* *

Publikacja niniejsza jest, po części, wynikiem wieloletniego zaangażowania autora w prace nad *Rocznikiem Astronomicznym*, wydawanym, w ramach zadań statutowych, przez Instytut Geodezji i Kartografii. Powstała — zainspirowana zmianami definicji i pojęć związanych z niebieskimi systemami i układami odniesienia, wprowadzonymi na mocy rezolucji Międzynarodowej Unii Astronomicznej — na podstawie rozprawy doktorskiej pod podobnym tytułem, przedstawionej i obronionej przez autora (Sękowski, 2005).

Wszystkie obliczenia wykonane zostały w oparciu o programy napisane przez autora specjalnie dla celów niniejszej pracy, bądź w oparciu o programy także napisane przez autora, a wykorzystywane w obliczeniach związanych z opracowaniem aktualnych wydań *Rocznika Astronomicznego* IGiK (Kryński i Sękowski, 2001–2006). Część procedur, w szczególności obliczających wartości parametrów precesyjno-nutacyjnych, ogólnie dostępnych, a będących opracowaniem zespołów IAU bądź IERS zostało włączonych do programów po niezbędnej adaptacji.

2. NIEBIESKIE SYSTEMY ODNIESIENIA

2.1. Wprowadzenie

Ziemia porusza się w przestrzeni, w płaszczyźnie ekliptyki, ruchem obiegowym wokół barycentrum Układu Słonecznego z okresem rocznym oraz wiruje wokół własnej osi z okresem dobowym. Płaszczyzna równika Ziemi wyznaczonego przez jej oś obrotu jest przy tym nachylona pod kątem około $23^{\circ}27'$ do płaszczyzny ekliptyki. Spłaszczenie bryły Ziemi oraz obecność zewnętrznego oddziaływania grawitacyjnego Słońca, Księżyca oraz planet powoduje powolny ruch precesyjny osi obrotu z okresem około 26 tysięcy lat. Zmienność tego oddziaływania w czasie, powodowana głównie ciągłą zmianą wzajemnego położenia Ziemi, Słońca oraz Księżyca powoduje dodatkowo, nakładający się na precesję, ruch nutacyjny osi obrotu Ziemi o okresie około 18.6 lat – zbliżonym do okresu obiegu węzłów orbity Księżyca wzdłuż ekliptyki. Listę tych efektów uzupełniają: zmienność osi rotacji względem samej bryły Ziemi – związana z niezgodnością osi rotacji z osiami głównych momentów bezwładności – oraz niejednostajność prędkości samego ruchu obrotowego.

Precyzyjny opis relacji przestrzennych pomiędzy obiektami – punktami – znajdującymi się na powierzchni Ziemi a punktami na sferze niebieskiej i w otaczającej Ziemię przestrzeni kosmicznej zależy więc przede wszystkim od dokładnego opisu ruchu Ziemi. Warunkiem koniecznym takiego opisu jest zaś ustalenie możliwie mocnego punktu oparcia – systemu odniesienia.

2.1.1. Systemy odniesienia

Pozycja jest pojęciem względnym. Określić pozycję czegokolwiek, zawsze można wyłącznie w odniesieniu do czegoś innego. We współczesnej astrometrii, astronomii geodezyjnej i geodynamice rolę tę spełniają tzw. systemy odniesienia. System odniesienia jest jednak zawsze pojęciem teoretycznym, zastępowanym w praktyce przez układy odniesienia rozumiane jako jego konkretne realizacje. Przez system odniesienia należy rozumieć zbiór zaleceń i ustaleń wraz z opisem modeli niezbędnych do zdefiniowania i określenia zmienności w czasie: początku, skali oraz orientacji osi, w sposób umożliwiający jednoznaczne przypisanie liczbowo określonych wartości – współrzędnych, opisujących w nim położenie i ruch punktów materialnych (Kovalevsky, 2002).

Dla astrometrii i geodynamiki istotne znaczenie mają dwa szczególne systemy: niebieski system odniesienia umożliwiający opis położenia i ruchów

ciał w przestrzeni pozaziemskiej oraz ziemski system odniesienia umożliwiający opis położenia i ruchów punktów na powierzchni Ziemi.

Brak materialnych osi oraz płaszczyzn w systemie odniesienia powoduje konieczność wykorzystania istniejących punktów materialnych, np. gwiazd, jako punktów definiujących (o ustalonych współrzędnych), względem których mierzone będą pozycje innych obiektów. Zbiór punktów definiujących wraz z procedurą wyznaczania współrzędnych obiektów w systemie jest już jego praktyczną realizacją, określaną jako układ odniesienia. Układ odniesienia można więc uznać za ilościowy model struktury systemu. Model ten zależny jest od licznych parametrów, których wartości znane są tylko z określoną dokładnością, przez co układ odniesienia jest zawsze pewną aproksymacją systemu odniesienia.

2.1.2. Koncepcja niebieskiego systemu odniesienia

U podstaw definiowania niebieskiego systemu odniesienia leży intuicyjnie oczywista koncepcja, w myśl której powinien on być systemem inercyjnym, tj. spoczywającym lub poruszającym się jednostajnie i nieobracającym się. Koncepcję tę można zrealizować definiując go na dwa sposoby, jako system dynamiczny lub kinematyczny.

Definicja dynamiczna zakłada, że ciała niebieskie poruszają się w niebieskim systemie odniesienia bez przyspieszeń, zarówno liniowego jak i odśrodkowego oraz przyspieszenia Coriolisa. Jest to definicja ściśle newtonowska, w obliczu praw współczesnej mechaniki – Ogólnej Teorii Względności – opisująca więc wyłącznie systemy lokalne.

W praktyce definicja ta realizowana może być np. przez wybór Układu Słonecznego jako podstawy dla systemu odniesienia – z początkiem systemu w barycentrum. Istotne parametry systemu, jak np. położenie punktu początkowego liczenia rektascensji wyznaczane są wówczas w oparciu rozwiązywania równań ruchu ciał Układu Słonecznego

Definicja kinematyczna zakłada związanie systemu odniesienia z „odległymi” obiektami w przestrzeni kosmicznej nie wykazującymi względnych ruchów własnych i przez to uznawanymi za nie obracające się. Ściślej, obiekty te nie mogą wykazywać systematycznego ruchu względem żadnego „istotnie dużego” obszaru nieba co wyklucza również ich rotację jako zbioru.

Definicja ta, w praktyce, oznacza np. oparcie systemu odniesienia na zbiorze punktów, reprezentowanych przez wybrane odległe obiekty pozagalaktyczne – radioźródła.

2.1.3. Konwencjonalny niebieski system odniesienia

Przyjęcie systemu odniesienia zgodnego z określoną definicją i sparametryzowanie go za pomocą zbioru, przyjętych na mocy umowy – konwencji, wielkości stałych, tworzy konwencjonalny system odniesienia. Mnogość parametrów i fakt, że ich wartości znane są tylko z określoną, skończoną dokładnością, sprawia, że już sam system konwencjonalny jest pewnym przybliżeniem koncepcji zawartej w pierwotnej definicji.

W wypadku definicji dynamicznej i wyboru np. Układu Słonecznego za podstawę systemu odniesienia, parametryzacja ta dotyczy wielkości takich jak: masy planet i ich księżyców, warunki początkowe ich ruchu, a także stałe mechaniki nieba jak: stała precesji rocznej, parametry nutacji i stała aberracji światła.

Definicja kinematyczna i oparcie konwencjonalnego systemu odniesienia na zbiorze wybranych obiektów pozagalaktycznych: kwazarów i radioźródeł nie wymaga tak wielu parametrów. Zasadniczą, arbitralną decyzją rozstrzyganą na mocy konwencji jest wybór punktu początkowego systemu oraz kierunków osi współrzędnych.

2.1.4. Układ (system) równikowy

W przeszłości definicja niebieskiego systemu odniesienia, nie zawierała precyzyjnych założeń o braku rotacji i nieinercjalności, i wiązała go z Ziemią, z jej ruchem, orientacją w przestrzeni i mechaniką całego Układu Słonecznego. Nie było również wyraźnego rozdziału pomiędzy pojęciami systemu i układu. Przykładem tego jest powszechnie stosowany, ugruntowany tradycją, system odniesienia zwany niebieskim układem równikowym (układem równikowym ekwinokcjaldym, drugim układem równikowym lub po prostu układem równikowym). Początkiem tego systemu jest barycentrum Układu Słonecznego. Płaszczyzną główną (płaszczyzną równika niebieskiego) jest płaszczyzna równika ziemskiego, kierunek osi z odpowiada kierunkowi osi obrotu Ziemi. Kierunek osi x wyznaczany jest przez punkt równonocy wiosennej (Υ), będący węzłem zstępującym wokółsłonecznej orbity Ziemi, a oś y stanowi dopełnienie do prawoskrętnego systemu kartezjańskiego. Współrzędne niebieskie w układzie równikowym to tzw. deklinacja i rektascensja czyli odpowiednio: kąt pomiędzy płaszczyzną równika niebieskiego i kierunkiem do danego punktu na sferze niebieskiej, mierzony po kole wielkim przechodzącym przez bieguny niebieskie (południku niebieskim) oraz mierzony w kierunku wschodnim kąt dwuścienny pomiędzy płaszczyzną południka niebieskiego punktu równo-

nocy wiosennej oraz płaszczyznę południka niebieskiego danego punktu sfery niebieskiej.

Układ Równikowy jest ogólną koncepcją, w myśl której niebieski system odniesienia jest systemem dynamicznym określonym na epokę, bezpośrednio związanym z poruszającą się Ziemią i zmienną w czasie, podlegającą oddziaływaniu wszystkich ciał Układu Słonecznego płaszczyznę wokółsłonecznej orbity Ziemi, której przecięcie z płaszczyznę równika wyznacza początek systemu.

Układ Równikowy jest systemem nieinercyjnym. Wskutek ruchu precesyjnego, zgodnie z którym, w okresie około 26 tysięcy lat, oś Ziemi zatacza w przestrzeni stożek wokół bieguna ekliptyki, Układ Równikowy wykonuje zatem powolny obrót względem systemu inercyjnego.

Pełna definicja Układu Równikowego wymaga precyzyjnego określenia pojęć równika ziemskiego oraz osi obrotu Ziemi, z którymi system ten jest bezpośrednio związany.

Obok układu równikowego ekwinokcjalego wyróżnia się także tzw. układ równikowy godzinny (zwany niekiedy pierwszym układem równikowym), którego punktem początkowym jest punkt przecięcia równika niebieskiego z lokalnym południkiem niebieskim (tj. kołem wielkim łączącym bieguny niebieskie oraz lokalny zenit). Rektascensja zastąpiona jest w tym systemie przez tzw. kąt godzinny – kąt dwuścienny pomiędzy płaszczyznę lokalnego południka niebieskiego i płaszczyznę południka, na której znajduje się dany punkt sfery niebieskiej.

2.1.5. Konwencjonalny Niebieski System Odniesienia IAU

Dotychczasowe, stosowane w praktyce do roku 1998, konwencjonalne niebieskie systemy odniesienia, zgodne z ogólnym schematem jakim jest układ równikowy, były systemami dynamicznymi, związanymi z barycentrum Układu Słonecznego. Określone były na podstawie rozwiązań planetarnych równań ruchu i zdefiniowane przez pozycje jasnych gwiazd o dość dokładnie znanych ruchach własnych. Systemy te bazowały na stałych oraz modelach precesji i nutacji, okresowo aktualizowanych przez Międzynarodową Unię Astronomiczną (IAU). Dokładność wyznaczeń stałej precesji w znacznym stopniu zależała jednak m. in. od wartości błędów ruchów własnych gwiazd definiujących system odniesienia (Fricke, 1985; Wang *et al.*, 1993).

Ostatni kompletny zestaw stałych astronomicznych definiujących konwencjonalny niebieski system odniesienia został przyjęty uchwałą Zgromadzenia Generalnego IAU w Grenoble, w 1976 roku jako system stałych

IAU76 (IAU Transactions, 1977; Kryński i Sękowski, 2001–2006). Na kolejnych Zgromadzeniach Generalnych IAU w Montrealu (1979) i Patras (1982) wprowadzono do niego szereg poprawek i, łącznie z modelem precesji IAU76 oraz modelem nutacji IAU80, uznano za obowiązujący od 1 stycznia 1984 r. (IAU Transactions, 1983).

W konfrontacji z osiągnięciami nowych technik obserwacyjnych system stałych astronomicznych IAU76 okazał się wkrótce niedostatecznie dokładny. XXI Zgromadzenie Generalne IAU w Buenos Aires (1991) ustanowiło nowy system (IAU Transactions, 1992; Kryński, 2004a,b). Jednocześnie, w dążeniu do całkowitego zastąpienia dynamicznego niebieskiego systemu odniesienia systemem kinematycznym, na mocy rezolucji A4 przyjęto pakiet 9 spójnych rekomendacji, określających nowe niebieskie systemy współrzędnych w czterowymiarowej czasoprzestrzeni oraz związane z nimi skale czasu, z uwzględnieniem ogólnej teorii względności. W Rekomendacji 1 zalecono zdefiniowanie w ramach ogólnej teorii względności kilku układów współrzędnych $(x_0 = ct, x_1, x_2, x_3)$ w czterowymiarowej czasoprzestrzeni w taki sposób, aby w każdym układzie współrzędnych o początku w barycentrum dowolnego zbioru mas, kwadrat interwału ds^2 między zdarzeniami, był wyrażony co najmniej ze stopniem podanym wg wzoru:

$$ds^2 = -c^2 d\tau^2 = -(1 - 2U/c^2)(dx_0)^2 + (1 + 2U/c^2)[(dx_1)^2 + (dx_2)^2 + (dx_3)^2] \quad (2.1)$$

gdzie $dx_0 = c dt$, t jest współrzędną czasową (czasem współrzędnych), τ jest czasem własnym (nazywanym również czasem prawdziwym) danego punktu w przestrzeni (czas pomiędzy dwoma zdarzeniami występującymi w tym samym punkcie przestrzeni), a U jest sumą potencjału grawitacyjnego tego układu mas oraz generowanego przez ciała zewnętrzne względem układu potencjału pływowego zanikającego w barycentrum. W Rekomendacji 2 zasygnalizowana została potrzeba zdefiniowania barycentrycznego układu współrzędnych o początku w środku mas układu słonecznego z czasem współrzędnych barycentrycznych TCB (Rekom. 3) oraz geocentrycznego układu współrzędnych o początku w środku mas Ziemi z czasem współrzędnych geocentrycznych TCG (Rekom. 3). Rekomendacja zawiera przy tym zalecenie 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. Sformułowano również czterowymiarową transformację pomiędzy TCB i TCG . Za czas odniesienia dla pozornych,

geocentrycznych efemeryd przyjęto czas ziemski TT oraz określono relację między TCG i TT (Rekom. 4). Dodatkowo w Rekomendacji 7 zalecono aby nowy, barycentryczny system odniesienia był możliwie bliski równikowi i punktowi równonocy wiosennej systemu FK5 odniesionym do epoki J2000.0, tj. aby podstawowa płaszczyzna tego systemu (płaszczyzna xy odpowiadająca płaszczyźnie równika niebieskiego w katalogowych systemach odniesienia) znalazła się możliwie blisko płaszczyzny średniego równika na epokę J2000.0, zaś punkt początkowy liczenia rektascensji (odpowiednik punktu równonocy wiosennej w katalogowych układach odniesienia, czyli kierunek osi x znalazł się możliwie blisko dynamicznej równonocy wiosennej na epokę J2000.0. W tej samej rezolucji podkreślono, że utworzony system ma być dostępny dla astrometrii w zakresie fal radiowych i widma widzialnego.

XXIII Zgromadzenie Generalne IAU w Kyoto (1997) przyjęło nową, kinematyczną definicję konwencjonalnego Niebieskiego Systemu Odniesienia (International Celestial Reference System, *ICRS*) opartą na obserwacjach VLBI odległych radioźródeł, za formalnie obowiązującą od 1 stycznia 1998 r. (IAU Transactions, 1999, Rezolucja B2). W dziedzinie astrometrii optycznej, za nowy, obowiązujący, konwencjonalny Niebieski Układ Odniesienia uznano realizację *ICRS* opartą na wynikach uzyskanych z satelitarnej misji astrometrycznej Hipparcos. Układ ten nosi nazwę Hipparcos Celestial Reference Frame (*HCRF*).

2.2. „Systemy” katalogowe — quasi-inercjalne układy odniesienia

Praktyczną realizację *systemów odniesienia* stanowią *układy odniesienia* tworzone poprzez nadanie współrzędnych (wyznaczonych w danym systemie) pewnej liczbie punktów definiujących. Współrzędne tych punktów, definiując *układ odniesienia*, są następnie podstawą do określania współrzędnych innych obiektów w tym układzie. W wypadku systemów niebieskich punktami definiującymi układy odniesienia są w naturalny sposób gwiazdy. Zbiory takich gwiazd, w odpowiedni sposób do tego celu wybranych, tworzą tzw. katalogi fundamentalne. Pojęcie katalogu fundamentalnego tradycyjnie związane jest z pojęciem systemu odniesienia – przede wszystkim dlatego, że powstawanie kolejnych katalogów serii FK (np. FK4 i FK5) szło zwykle w parze z kolejnymi definicjami systemów odniesienia określanych tą samą nazwą. Zgodnie z przyjętą obecnie terminologią katalogi fundamentalne definiują jednak *niebieskie układy odniesienia*, będące tylko konkretnymi realizacjami systemów. W wypadku naj-

nowszych katalogów fundamentalnych jakimi są katalogi Hipparcos oraz FK6 definiują one układy odniesienia *HCRF* i FK6 będące realizacjami tego samego systemu – *ICRS*.

Pojęcie katalogu fundamentalnego również przeszło swego rodzaju ewolucję. W przeszłości powstało bardzo wiele katalogów astrometrycznych, których celem było dostarczenie jak najdokładniejszych pozycji oraz ruchów własnych gwiazd. W szczególności były to różne katalogi lokalne, powstające na użytek i na bazie obserwacji wykonywanych w poszczególnych obserwatoriach. Przykładem jest tu seria katalogów W10, W25, W150,... opracowanych na podstawie obserwacji 6-cio calowym instrumentem przejściowym w U. S. Naval Observatory w latach 1911–1971. Pierwszy katalog z tej z serii powstał w 1927 r. z obserwacji wykonanych w latach 1911–1918. Inną grupę stanowiły strefowe katalogi fotograficzne, np. seria katalogów AGK1 (Astronomische Gesellschaft Katalog, 1898–1910), a następnie AGK2, AGK3 obejmujących północną część sfery niebieskiej. Weryfikacja tych katalogów wymagała stworzenia katalogu gwiazd referencyjnych. Początkowo terminem „katalog fundamentalny” określano więc katalog gwiazd referencyjnych, powstały na podstawie obserwacji absolutnych współrzędnych równikowych gwiazd (rektascensji i deklinacji) za pomocą jednego, tego samego instrumentu, bez odnoszenia się do wcześniej wyznaczonych współrzędnych tych gwiazd (Fricke, 1985). Rektascensje gwiazd były przy tym wyznaczane przez porównanie z równoległymi obserwacjami ciał Układu Słonecznego (głównie Słońca), których efemerydy były podstawą definicji systemu odniesienia (Walter i Sovers, 2000). Obecnie katalogi takie określane są raczej jako *katalogi absolutne* podczas gdy określenie katalog fundamentalny rozszerzone zostało również na katalogi powstałe z kompilacji danych zawartych we wcześniej opracowanych katalogach przy założeniu ich redukcji do tego samego systemu odniesienia.

Pierwszym spośród katalogów gwiazd referencyjnych był Fundamental Catalogue (FC) (Auwers, 1879). Katalog ten zapoczątkował serię katalogów FK.

Oprócz katalogów serii FK, powstały też inne katalogi fundamentalne. Jednym z nich, obejmujący całą sferę niebieską, był powstały równolegle z trzecim katalogiem serii FK (FK3), The General Catalogue (*Albany General Catalogue*, GC) (Boss, 1937). Katalog ten zawierał pozycje i ruchy własne 33 342 gwiazd jaśniejszych od 7 wielkości gwiazdowej oraz kilku tysięcy gwiazd słabszych, o dobrze wyznaczonych ruchach własnych. Pozycje i ruchy własne gwiazd w katalogu GC uzyskane były na podstawie

analizy wielu katalogów o epokach od 1755 do 1930, jak również z pojedynczych obserwacji z tego samego okresu. W porównaniu z FK3 katalog ten wykazywał większe błędy wartości ruchów własnych (Fricke *et al.*, 1963).

Idea zwiększenia liczby gwiazd referencyjnych w stosunku do ich liczby zawartej w FK3 oraz poprawienia dokładności ich pozycji była podstawą powstania katalogu N30 (Morgan, 1952). Katalog ten został pierwotnie stworzony na potrzeby redukcji i interpretacji obserwacji planet, szczególnie tych wykonanych w XIX wieku. W czasie gdy powstawał, jedynymi dostępnymi katalogami fundamentalnymi były GC i FK3, określone na epokę 1900.0, których dokładność, w przeciągu ponad 50 lat, wskutek niedokładności ruchów własnych, uległa degradacji.

2.2.1. Realizacje systemów katalogowych FK

Seria katalogów fundamentalnych FK została zapoczątkowana przez A. Auwersa na początku XIX w. katalogiem fundamentalnym Fundamental Catalogue (FC) (Auwers, 1879). Katalog ten powstał w celu zapewnienia układu odniesienia dla strefowego katalogu fotograficznego AGK1 i obejmował gwiazdy nieba północnego o deklinacji powyżej -10° . Katalog FC zawierał pozycje i ruchy własne 539 gwiazd. W redukcji danych obserwacyjnych stosowana była stała precesji wyznaczona przez F. Struvego. Kolejnym, powstałym poprzez rozszerzenie o gwiazdy nieba południowego oraz poprawienie zarówno pozycji jak i ruchów własnych zawartych katalogu FC, był katalog NFK (Peters, 1907). Zawierał on 925 gwiazd fundamentalnych, których pozycje i ruchy własne uzyskano z opracowań obserwacji z lat 1745–1900. System katalogu opierał się na stałej precesji wyznaczonej przez S. Newcomba.

2.2.2. Katalog FK3

Katalog FK3 (Kopff, 1937, 1938) powstał w wyniku realizacji, przyjętego w 1924 roku, programu weryfikacji strefowych katalogów fotograficznych. Katalog zawiera pozycje i ruchy własne 1535 gwiazd, odniesione do epoki 1925.0 i 1950.0, w tym, w I części, 873 gwiazdy z katalogu NFK oraz, w II części, 662 gwiazdy uzupełniające, dodane w celu zwiększenia liczby gwiazd referencyjnych i ich bardziej równomiernego rozmieszczenia w różnych częściach nieba. Jednocześnie — w stosunku do NFK — wyłączono z katalogu 52 gwiazdy podwójne. Pozycje gwiazd katalogu FK3 bazują na obserwacjach absolutnych wykonywanych po roku 1900. Ich średnia epoka, zależnie od strefy sfery niebieskiej waha się w przedziale 1912–1915. Ruchy

własne gwiazd zostały wyznaczone w oparciu o istniejące w tym czasie dane katalogowe na epoki od 1845 do 1930. Opracowanie systemu FK3 oparto na analizie ponad 70 katalogów powstałych do 1930 r. Poprawkę punktu równonocy względem systemu NFK przyjęto równą 0.048 s (wg Kahrstedta), wobec 0.050 s odpowiadającej obserwacjom Słońca i wielkich planet wg teorii Newcomba (Kopff, 1937). Średnia różnica rektascensji, dla 222 gwiazd, pomiędzy poprawionym w ten sposób systemem NFK a systemem opartym na teorii Newcomba wynosiła 0.002 s . Przy określaniu poprawek deklinacji gwiazd, oprócz analizy dostępnych katalogów, wykonano dodatkowe obserwacje Słońca i wielkich planet, które wykorzystywano do opracowania poprawek nachylenia równika poszczególnych katalogów — średnia poprawka wyniosła $+0''.2$.

2.2.3. Katalog FK4

Od chwili opracowania katalogu FK3 wykonane zostały liczne obserwacje gwiazd fundamentalnych — zarówno absolutne jak i różnicowe. Wielka liczba tych obserwacji stworzyła więc potrzebę rewizji katalogu FK3. W 1952 r. Zgromadzenie Generalne IAU w Rzymie podjęło uchwałę o rozpoczęciu prac nad nowym systemem fundamentalnym FK4, który miał stać się odniesieniem dla fotograficznych katalogów strefowych (AGK3) jak również dla wyznaczeń długości i szerokości realizowanych w ramach Międzynarodowego Roku Geofizycznego (1957–1958). Zadania postawione nowym systemom fundamentalnym określono jako: a) podniesienie dokładności położenia i ruchów własnych gwiazd; b) opracowanie nowego systemu fundamentalnego; c) zwiększenie liczby gwiazd określonych w systemie fundamentalnym. Ze względów praktycznych zadanie to podzielone zostało na dwie części. Systematyczna i szczegółowa rewizja FK3 (do FK4) objęła 1535 gwiazd zawartych w katalogu (Fricke *et al.*, 1963). Jednocześnie, opracowany został suplement do katalogu (FK4 Sup) zawierający 1987 gwiazd, równomiernie rozmieszczonych na sferze niebieskiej (Fricke, 1963).

W opracowaniu katalogu FK4 (Fricke *et al.*, 1963) uwzględniono 72 katalogi powstałe później niż katalog FK3. Dane z tych katalogów zostały przeliczone w systemie FK3 do wspólnej epoki w oparciu o stałe precesji Newcomba i porównane z danymi katalogu FK3. Obok różnic $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$ (*kat.* – FK3) uwzględniane były także różnice od średnich strefowych $\Delta\alpha_\alpha$, $\Delta\alpha_\delta$, $\Delta\delta_\alpha$, $\Delta\delta_\delta$. Rozważanie tych różnic podyktowane było faktem, że część katalogów zawierała dane absolutne tylko w jednej składowej. Wszystkie systematyczne różnice zostały usunięte, a następnie z

wyrównania pozycji wspomnianych katalogów gwiazd otrzymano indywidualne poprawki dla wszystkich gwiazd, wszystkich wykorzystanych katalogów, w stosunku do katalogu FK3. Wagowanie równań normalnych poprawek zależne było od błędów średnich pozycji i ruchów własnych każdej z gwiazd w katalogu FK3. Do określenia parametrów rotacji systemu katalogu FK4 względem poprzedniego oparto się na danych z wszystkich katalogów absolutnych z okresu 1845–1956, włącznie z katalogami użytymi przy opracowaniu systemu FK3. System deklinacji FK4 — wyznaczenie poprawki równikowej — oparto na danych pochodzących z 42 katalogów absolutnych, uwzględniających obserwacje Słońca i wielkich planet, opracowanych w latach 1846–1956. Wyprowadzona z obserwacji obiektów systemu słonecznego poprawka nachylenia równika dla poszczególnych katalogów, w kombinacji z systematycznymi różnicami katalogów z FK3 pozwalała określić poprawkę równika danego katalogu do FK3. Poprawkom tym przypisane zostały różne wagi, zależnie od epoki katalogu. W wyniku uzyskano poprawkę nachylenia równika katalogu FK3 wynoszącą: $\Delta\delta(T) = -0''.17 (\pm 0''.021) - 0''.097 (\pm 0''.098) \times (T - 1928.4)$, gdzie T wyrażane jest w stuleciach juliańskich. Poprawka ekwinokcjum systemu FK4, w wyniku przeglądu danych obserwacyjnych, pozostała niezmienną w stosunku do poprzedniej wartości $0''.050$ przyjętej dla systemu FK3. System rektascensji FK4 otrzymano z obserwacji absolutnych z 48 katalogów, opracowanych o okresie 1918–1956 na średnie epoki¹⁾ 1934–36 — zależnie od strefy nieba. Poprawki systematyczne ruchów własnych opracowano na bazie instrumentalnych systemów obserwatoriów w Waszyngtonie (Wash Six-inch, Wash Nine-inch), Pułkowie i Kapsztadzie. Porównanie uzyskanego katalogu ze współczesnymi mu szeregami obserwacji, wykazało niewielkie systematyczne różnice w rektascensji i ruchach własnych w rektascensji zależnie od wielkości gwiazdowych. Średnie błędy systemu rektascensji i systemu deklinacji znacznie różnią się w różnych częściach nieba i dla nieba północnego, dla średnich epok, odpowiednio 1935 i 1925, osiągają średnie wartości:

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha} \cos \delta &= \pm 0.003 \text{ s} & \sigma_{\mu\alpha} &= \pm 0.010 \text{ s/stulecie} \\ \sigma_{\delta} &= \pm 0''.017 & \sigma_{\mu\delta} &= \pm 0.07 \text{ ''/stulecie} \end{aligned}$$

¹⁾ Przez średnią epokę katalogu rozumie się średnią epokę obserwacji służących do wyznaczeń pozycji katalogowych gwiazd — w odróżnieniu od epoki katalogu, będącej epoką, w której wszystkie pozycje katalogowe gwiazd są ostatecznie wyrażone.

Dla gwiazd nieba południowego wartości te są nieco większe. Błędy te nie zawierają błędów pozycji i ruchów własnych poszczególnych gwiazd wewnątrz systemu FK4, które dla epok katalogu FK4 (1950.0 i 1975.0) wynoszą dla α , δ , μ_α , μ_δ odpowiednio:

$$\begin{aligned}\sigma_\alpha \cos \delta &= \pm 0.001 \div \pm 0.002 \text{ s} & \sigma_{\mu_\alpha} &= \pm 0.005 \div \pm 0.012 \text{ s/stulecie} \\ \sigma_\delta &= \pm 0.02 \div \pm 0''.03 & \sigma_{\mu_\delta} &= \pm 0.10 \div \pm 0.15 \text{ ''/stulecie}\end{aligned}$$

Błędy współrzędnych dla gwiazd nieba południowego są również nieco większe.

2.2.4. Katalog FK4 Sup

Opracowanie katalogu uzupełniającego FK4 Sup (Fricke, 1963) bazowało na zbiorze 1987 gwiazd, których głównym źródłem był katalog N30 oraz, w części, katalog GC. Pozycje gwiazd na epokę 1950.0 w systemie N30 zostały zredukowane do systemu FK3, następnie cały zbiór danych został przeliczony do równonocy i epoki 1950.0 systemu FK4. Ponieważ żadna z gwiazd katalogu uzupełniającego nie została wykorzystana przy opracowaniu systemu FK4 i żadne poprawki do danych obserwacyjnych nie były stosowane dlatego FK4 Sup nie może być uważany za katalog fundamentalny.

2.2.5. Katalog FK5

Potrzeba opracowania kolejnej wersji katalogu fundamentalnego ujawniła się wkrótce po opublikowaniu katalogu FK4, który wykazywał kilka istotnych wad. W szczególności: a) duże błędy systematyczne w rekta-scensji; b) błędy przypadkowe pozycji średnich i ruchów własnych gwiazd nieba południowego dochodzące do $0''.18$ w epoce 1975; c) niewielka liczba i stosunkowo duża jasność gwiazd; d) zależny od czasu błąd punktu równonocy wiosennej; e) pojawienie się poprawionego równania precesji ogólnej (system stałych IAU76) i konieczność uwzględnienia go w nowym katalogu fundamentalnym (Fricke *et al.*, 1988). Zmiany wprowadzone przy przejściu od FK4 do FK5, dokonane w celu usunięcia tych wad, odpowiadały przejściu od FK3 do FK4.

Katalog FK5 składa się z dwóch części opublikowanych osobno. Część pierwsza (Fricke *et al.*, 1988) zawiera pozycje i ruchy własne na epokę B1950.0 i J2000.0 1535 gwiazd, włączonych już poprzednio do katalogów

FK3 i FK4. Część druga FK5 Extension (Fricke *et al.*, 1991) zawiera średnie pozycje i ruchy własne na epokę J2000.0, 3117 nowych gwiazd fundamentalnych, z zakresu 5.5 – 9.5 wielkości gwiazdowej, wybranych z katalogów FK4 Sup oraz IRS (*International Reference Stars*) ze szczególnym uwzględnieniem obserwacji ich w przeszłości. Podobnie jak w wypadku gwiazd z katalogu FK4 Sup, FK5 Extension grupuje gwiazdy, których pozycje wyrażono w systemie FK5, ale które nie należały do zbioru definiującego system. Pozycje zawarte w katalogu FK5 Extension charakteryzują się także dużo mniejszą dokładnością.

Analiza absolutnych obserwacji Słońca, planet, planetoid, okultacji Księżyca oraz ruchów własnych FK4 wykazała, że punkt zerowy (początek liczenia) rektascensji systemu FK4 różnił się od średniego punktu równonocy. Poprawka z tym związana zgodna była ze wzorem: $E(T) = 0.035 + 0.085(T - 1950)$ s. Na epokę katalogu FK4 (1950.0) wartość tej poprawki wynosiła dla α i μ_α odpowiednio: 0.035 s i 0.085 s/stulecie. Jednocześnie dostępne obserwacje nie wykazywały znaczących korekcyj do położenia równika. Ruchy własne gwiazd zależą istotnie od modelu precesji przyjętego podczas tworzenia katalogu. Katalog FK5 został oparty o system stałych astronomicznych IAU76 (IAU Transactions, 1977). Po wyznaczeniu systematycznych i indywidualnych różnic FK4 – FK5 w oparciu o równik B1950.0 i stałe precesji Newcomba, nowy model precesji został wprowadzony w transformacji od epoki B1950.0 do J2000.0.

System katalogu FK5 został określony na podstawie 85 absolutnych i quasi-absolutnych katalogów o epokach późniejszych niż 1900, powstałych na bazie obserwacji z lat 1900–1980. System powstał poprzez wyznaczenie poprawek Kat – FK4, obliczonych na średnią epokę danego katalogu, następnie zredukowanych do punktu zerowego FK4. Wyznaczenia poprawek ekwinokcjum i równika były przy tym prowadzone jako oddzielne zadania. Średnie błędy systemu katalogu FK5 dla α , δ , μ_α , μ_δ oszacowane z rozbieżności pomiędzy katalogami a średnią wyniosły przy tym (dla nieba północnego) odpowiednio (Fricke *et al.*, 1988):

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha \cos \delta &= \pm 0.001 \text{ s} & \sigma_{\mu_\alpha} \cos \delta &= \pm 0.004 \text{ s/stulecie} \\ \sigma_\delta &= \pm 0''.01 & \sigma_{\mu_\delta} &= \pm 0.05 ''/stulecie \end{aligned}$$

Dla nieba południowego wartości te były niewiele większe.

W katalogu FK5 średnie indywidualne błędy pozycji i ruchów własnych gwiazd wyznaczono w procesie wyrównania. Dla nieba północnego błędy

te, nie zawierające średnich błędów systemu wynoszą przeciętnie:

$$\begin{aligned}\sigma_{\alpha} \cos \delta &= \pm 0.0009 \text{ s} & \sigma_{\mu\alpha} \cos \delta &= \pm 0.0037 \text{ s/stulecie} \\ \sigma_{\delta} &= \pm 0''.019 & \sigma_{\mu\delta} &= \pm 0.064 ''/stulecie\end{aligned}$$

Dla nieba południowego odpowiednio:

$$\begin{aligned}\sigma_{\alpha} \cos \delta &= \pm 0.0016 \text{ s} & \sigma_{\mu\alpha} \cos \delta &= \pm 0.0067 \text{ s/stulecie} \\ \sigma_{\delta} &= \pm 0''.032 & \sigma_{\mu\delta} &= \pm 0.107 ''/stulecie\end{aligned}$$

Lokalne różnice pozycji i ruchów własnych FK4 – FK5, bez uwzględnienia poprawki ekwinokcjum FK4 i jego pozornego ruchu, mają charakter systematyczny i zależnie od strefy sfery niebieskiej osiągają wartości do kilkunastu *mas*.

2.3. Międzynarodowy Niebieski System Odniesienia (*ICRS*)

Konieczność ciągłej kontroli stałości osi niebieskiego systemu odniesienia oraz poprawiania współrzędnych obiektów w tym systemie, spowodowała, że Międzynarodowa Służba Ruchu Obrotowego Ziemi i Systemów Odniesienia (IERS) opracowywała, corocznie, w latach 1989–1995, realizacje niebieskiego systemu odniesienia (Pozagalaktycznego Niebieskiego Systemu Odniesienia IERS) określane skrótem *ICRF*, oznaczającym w tym wypadku: IERS Celestial Reference Frame. W realizacjach tych określano pozycje systematycznie rosnącej liczby radioźródeł — od 23 w 1989 r. do 212 w 1995 r. Porównania pomiędzy kolejnymi realizacjami systemu wykazywały ich zbieżność, prowadząc do względnej zgodności parametrów wzajemnej orientacji osi systemów na poziomie 0.1 *mas* i 0.02 *mas* (McCarthy i Petit, 2003). IERS zaproponowała wówczas przyjęcie systemu niebieskiego realizowanego przez ostatnią z wersji *ICRF* (z roku 1995) jako Międzynarodowy Niebieski System Odniesienia (*ICRS*) (Arias *et al.*, 1995). Zostało to przyjęte i formalnie uchwalone w Rezolucji B2 XXIII Zgromadzenia Generalnego IAU (IAU Transactions, 1999; Kryński, 2004a). *ICRS* stał się więc od 1 stycznia 1998 roku obowiązującym konwencjonalnym niebieskim systemem odniesienia. Ta sama rezolucja zatwierdziła Katalog Hipparcos jako podstawową realizację *ICRS* w zakresie widma optycznego. Uchwalona trzy lata później przez XXIV Zgromadzenie Generalne IAU Rezolucja B1.3 (IAU Transactions, 2001) określa ponadto dopasowaną do wyższych wymagań dokładnościowych oraz do współczesnego formalizmu ogólnej teorii względności definicję *ICRS*, wprowadzając Barycentryczny

Niebieski System Odniesienia (*BCRS*) oraz Geocentryczny Niebieski System Odniesienia (*GCRS*), a także transformacje między tymi systemami.

ICRS jest systemem kinematycznym, ponieważ jest zdefiniowany poprzez pozycje odległych obiektów pozagalaktycznych; dodatkowo ruchy własne tych obiektów są znacznie mniejsze aniżeli dokładność ich obserwacji. 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 ekliptyki i punktu równonocy wiosennej, który dotychczas ustalał położenie osi x systemu. Czasoprzestrzeń w *ICRS* określona jest geometrycznie za pomocą tensora metrycznego (oddzielnie dla *BCRS* i dla *GCRS*) w ujęciu ogólnej teorii względności. *ICRS* definiuje orientację osi systemów *BCRS* i *GCRS* — osie tych systemów spełniają kinematyczny warunek zerowego wzajemnego obrotu. Oba systemy mają też różne czasy współrzędnych: *TCB* i *TCG*. Odpowiadające sobie osie systemów *BCRS* i *GCRS* są wzajemnie powiązane współczynnikiem skali (Kryński, 2004b).

Umowny biegun *ICRS*, nazwany Konwencjonalnym Biegunem Odniesienia (Conventional Reference Pole, *CRP*) czyli kierunek prostopadły do podstawowej płaszczyzny układu — płaszczyzny xy , choć jest bardzo zbliżony do średniego bieguna na epokę J2000.0 to jednak dokładnie się z nim nie pokrywa. W wypadku zastosowania poprawionego modelu precesji i nutacji IERS(1996) bieguny te są wzajemnie przesunięte o $+17.1\text{ mas}$ w kierunku 12^h i $+5.0\text{ mas}$ w kierunku 18^h . W wypadku zastosowania modelu precesyjno-nutacyjnego MHB2000 (Mathews *et al.*, 2002), ostatecznie zaakceptowanego przez XXIV ZG IAU w Manchesterze (2000) jako oficjalny łączny model precesji i nutacji, zalecony do stosowania w obliczeniach (IAU Transactions, 2001; Kryński, 2004a, Rez. B1.6), niezgodność bieguna *CRP* oraz średniego bieguna na epokę J2000.0 wynosi $+16.6\text{ mas}$ w kierunku 12^h i $+6.8\text{ mas}$ w kierunku 18^h . Podobna zgodność zachodzi pomiędzy umownym biegunem *ICRS* i biegunem systemu FK5. Ocenia się ją na 50 mas . Punkt początkowy liczenia rektascensji w *ICRS*, który określa kierunek osi x tego systemu, przesunięty jest w stosunku do punktu równonocy katalogu FK5 o $22.9 \pm 2.3\text{ mas}$.

BCRS jest systemem inercjalnym; 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 FK5.

GCRS jest nieobrcającym się systemem geocentrycznym przeznaczonym do monitorowania parametrów ruchu obrotowego Ziemi. System ten nie podlega globalnej rotacji i nie zależy od ruchu Ziemi, jak to miało miejsce w przypadku systemów dynamicznych, np. systemu katalogu FK5. 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*.

2.3.1. *ICRF* — realizacja inercjalnego systemu odniesienia

Przeznaczoną do zastosowań praktycznych realizacją *ICRS* jest Międzynarodowy Niebieski Układ Odniesienia (*ICRF* — International Celestial Reference Frame). Pierwsza realizacja *ICRF* była opracowana w 1995 r. w wyniku analizy dostępnych obserwacji VLBI. System realizowany przez zbiór pozycji otrzymanych z tej analizy został następnie przyjęty przez IAU jako definicja systemu *ICRS*.

ICRF jest zdefiniowany z dokładnością około $30 \mu\text{as}$ poprzez pozycje 212 definiujących obiektów pozagalaktycznych — radioźródeł (głównie kwazarów, radioźródeł typu BL Lac i kilku aktywnych galaktyk /AGN/), których pozycje określone zostały w oparciu o radiointerferometryczne obserwacje VLBI. Obiekty te podzielone są na podzbiory obiektów „definiujących”, „kandydujących” oraz „pozostałych”. Do grupy obiektów definiujących należą te, dla których istnieje duża liczba obserwacji, w odpowiednio długim okresie czasu; są to obiekty, na których oparte są osie systemu *ICRS*. Obiekty o niewystarczającej liczbie obserwacji lub obserwowane w krótszym okresie, kwalifikowane są jako przewidywane do włączenia do zbioru obiektów definiujących system w przyszłości. Do grupy pozostałych, należą obiekty o nienajlepiej wyznaczonych pozycjach, przydatnych jednak w ustalaniu związków pomiędzy różnymi układami (McCarthy i Petit, 2003).

W oparciu o obserwacje VLBI dostępne do kwietnia 1999 r. opracowane zostało również rozszerzenie układu, oznaczone jako *ICRF-Ext.1* (IERS, 1999). Pozycje i błędy radioźródeł definiujących pozostały niezmienione w stosunku do pierwotnej realizacji *ICRF*. Całkowita liczba obiektów zawarta w rozszerzonym katalogu wynosi 667.

Najbardziej precyzyjną techniką obserwacyjną kwazarów, wykorzystywaną do utrzymywania, niebieskiego układu odniesienia jest technika VLBI. Technika ta, ze względu na koszt aparatury i prowadzenia obserwacji, nie jest dostępna powszechnie. Nawiązanie *ICRF* do głównych układów wyko-

rzystywanych w praktyce realizowane jest więc za pośrednictwem Niebieskiego Układu Odniesienia Hipparcos (*HCRF*), Międzynarodowego Ziemskiego Układu Odniesienia (*ITRF*) oraz efemeryd ciał Układu Słonecznego JPL (DE405/LE405).

Pozycje w układzie *ICRF* odgrywają rolę stosowanych dotychczas średnich pozycji katalogowych odniesionych do średniego równika i średniej równonocy wiosennej na epokę standardową, lecz w ich wypadku epoka we wspomnianym sensie nie ma zastosowania. Zmienność pozycji w systemie *ICRS* spowodowana jest wyłącznie ruchem własnym gwiazd z uwzględnieniem prędkości radialnej.

2.3.2. Katalog Hipparcos

Katalog Hipparcos (ESA, 1997) powstał w wyniku obserwacji pozyskanych za pomocą astrometrycznego satelity o tej samej nazwie. Misja Hipparcos, będąca częścią programu naukowego Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA), zapoczątkowana wyniesieniem satelity na orbitę 8 sierpnia 1989, była pierwszą satelitarną misją astrometryczną. Zrealizowana została w okresie listopad 1989 – marzec 1993. Jej głównym celem było pozyskanie danych o pozycjach, ruchach własnych i absolutnych paralaksach trygonometrycznych ponad 100 tys. gwiazd, na poziomie 2 mas oraz precyzyjnych danych fotometrycznych, na potrzeby nowego katalogu gwiazd fundamentalnych. Celem dodatkowym misji było ponadto zebranie danych astrometrycznych i fotometrycznych o mniejszej dokładności dla około 1 mln. gwiazd. Dane te miały być następnie opracowane i opublikowane w odrębnym Katalogu Tycho. Oba założone cele misji zostały zrealizowane. Katalog Hipparcos, będący jej głównym wynikiem, zawiera ostatecznie 118 218 gwiazd, dla których podano pozycje, ruchy własne i paralaksy trygonometryczne z precyzją 1 mas , na epokę J1991.25. Katalog ten zawiera także szczegółowe dane dla znacznej liczby gwiazd wielokrotnych (ESA, 1997).

Dane obserwacyjne dla katalogów Hipparcos i Tycho pozyskiwane były całkowicie niezależnie, za pomocą różnych instrumentów. Również opracowanie i późniejsza publikacja katalogów przebiegały niezależnie, prowadzone przez różne zespoły.

Obserwacje, które były podstawą powstania Katalogu Hipparcos polegały na pomiarze względnych pozycji par gwiazd; były wykonywane za pomocą dwóch sprzężonych, optycznych teleskopów pokładowych o polu widzenia około 1° każdy, ustawionych pod kątem 58° względem siebie. Program obserwacyjny zapewniał pokrycie obserwacjami całej sfery nie-

biekskiej ze średnią gęstością około 3 gwiazd na stopień kwadratowy. Każda z gwiazd, w przeciągu trzyletniego okresu obserwacyjnego, obserwowana była w około 100–150 epokach i w około 25–60 różnych ustawieniach teleskopów. W wyniku opracowania danych astrometrycznych dla każdej z gwiazd otrzymano 5 parametrów: dwie składowe pozycyjne, dwie składowe ruchu własnego i paralaksę trygonometryczną, łącznie z ich błędami średnimi i współczynnikami korelacji. Udało się również opracować dane obserwacyjne wielu gwiazd wielokrotnych.

Pozycje i ruchy własne gwiazd w Katalogu Hipparcos wyrażone są w Międzynarodowym Niebieskim Systemie Odniesienia (*ICRS*), a ściślej jego odmianie Barycentrycznym Niebieskim Systemie Odniesienia (*BCRS*), zgodnym z konwencjonalnym systemem równikowym ze średnim punktem równonocy i średnim równikiem na epokę J2000.0 realizowanym przez system katalogu FK5. W celu powiązania systemu katalogowego Hipparcos z *BCRS* niezbędne było odnalezienie obiektów mających pozycje i ruchy własne wyrażone w obu systemach. Niestety, żadne z radioźródeł definiujących *ICRS* nie jest wystarczająco jasne w dziedzinie optycznej. Powiązania obydwu systemów dokonano więc za pomocą późniejszych obserwacji naziemnych. Szacunkowa niezgodność osi systemów oraz tempo ich rotacji wzajemnej wynoszą odpowiednio 0.6 mas i 0.25 mas/rok (ESA, 1997).

Porównując katalogi Hipparcos oraz Tycho z innymi, poprzednimi katalogami astrometrycznymi trzeba mieć na uwadze, że:

- pozycje i ruchy własne gwiazd odniesione są do epoki J1991.25 (*TT*)
 - bardzo bliskiej średniej epoki wszystkich obserwacji;
- Międzynarodowy Niebieski System Odniesienia (*ICRS*) realizowany przez Katalog Hipparcos zastępuje system katalogu FK5 w dziedzinie optycznej. Definicja *ICRS* gwarantuje natomiast brak nieciągłości, większej, niż wynikająca z dokładności określenia systemu FK5, przy przejściu od średniej równonocy i równika J2000.0 (FK5) do *ICRS*. Z punktu widzenia astrometrii optycznej Katalogi Hipparcos i Tycho można więc traktować jako udoskonalenie systemu FK5, zachowujące globalną orientację systemu ale eliminujące lokalne błędy pozycji gwiazd;
- dzięki temu, że paralaksy uzyskane zostały w tym samym procesie redukcji danych obserwacyjnych co pozycje i ruchy własne gwiazd, dane pozycyjne są ściśle barycentryczne.

- na poziomie dokładności osiągniętych w Katalogu Hipparcos efekty wynikające z ogólnej teorii względności nie są zaniedbywalne. W ujęciu relatywistycznym obserwowane kierunki są kierunkami w „łorentzowskim” układzie poruszającym się razem z obserwatorem. W celu odniesienia obserwowanych kierunków do gwiazd, w różnych epokach, do prostego układu geometrycznego z początkiem w barycentrum, lokalne efekty związane z ruchem obserwatora (aberracja światła) oraz krzywizną przestrzeni (ugięcie światła w polu grawitacyjnym Słońca) zostały usunięte poprzez transformację od lokalnego układu satelity Hipparcos do układu barycentrycznego;
- aberracja światła została wyznaczona z barycentrycznego ruchu satelity Hipparcos, z użyciem pełnego formalizmu teorii względności, z uwzględnieniem geocentrycznego ruchu satelity i orbitalnego ruchu Ziemi z dokładnością do 0.2 m/s . Grawitacyjne ugięcie światła obliczono w metryce heliocentrycznej. Podejście to zgodne jest z rekomendacjami IAU;
- ruchy własne gwiazd Katalogu Hipparcos zostały opracowane na podstawie obserwacji kilkuletnich, zatem około dziesięciokrotnie krótszych, niż w wypadku tradycyjnych katalogów. Mają więc charakter chwilowy w porównaniu z uśrednionymi wartościami otrzymywanymi dotychczas. Dla wielu niezidentyfikowanych gwiazd wielokrotnych może to powodować występowanie rozbieżności pomiędzy nowymi i dawnymi wartościami ruchów własnych. Część gwiazd podwójnych, dla których efekt nieliniowości ruchu był na tyle silny, że mógł być zaobserwowany w trakcie misji Hipparcos, zostało opracowanych i skatalogowanych w odpowiednim załączniku.

Tablica 2.1 na stronie 35 zawiera zestawienie podstawowych danych o Katalogu Hipparcos (ESA, 1997):

2.3.3. Katalog FK6

Szósty katalog fundamentalny z serii FK (FK6) (Wielen *et al.*, 1999a, 2000a) powstał z połączenia danych Katalogu Hipparcos (ESA, 1997) oraz danych katalogu fundamentalnego FK5 (Fricke *et al.*, 1988). Katalog Hipparcos opracowano w oparciu o dane obserwacyjne satelitarnej misji astrometrycznej Hipparcos, Europejskiej Agencji Kosmicznej ESA, pozyskane w latach 1989–1993. Dane zawarte w katalogu FK5 pochodzą z opracowań obserwacji naziemnych prowadzonych na przestrzeni ostatnich 200

Tabela 2.1. Zestawienie podstawowych danych o Katalogu Hipparcos

Okres w jakim wykonano obserwacje	1989.85 – 1993.21
Epoka katalogu	J1991.25
System odniesienia	<i>ICRS</i>
Zgodność osi z <i>ICRS</i>	$\pm 0.6 \text{ mas}$
Rotacja w stosunku do układu inercjalnego	$\pm 0.25 \text{ mas/rok}$
Liczba gwiazd	118 218
Liczba danych astrometrycznych	117 955
Liczba danych fotometrycznych	118 204
Średnia gęstość pokrycia nieba	$\approx 3 \text{ stopień}^{-2}$
Próg jasności obserwowanych gwiazd	$V \approx 12.4 \text{ mag}$
Dane kompletne dla gwiazd jaśniejszych niż	$V = 7.3 - 9.0 \text{ mag}$
Dokładność pozycji, J1991.25 (α/δ ; $Hp < 9 \text{ mag}$)	$0.77/0.64 \text{ mas}$
Dokładność paralaks ($Hp < 9 \text{ mag}$)	0.97 mas
Dokładność ruchów własnych (μ_α/μ_δ ; $Hp < 9 \text{ mag}$)	$0.88/0.74 \text{ mas/rok}$
10% (każdego z 5 parametrów) lepsze niż	$0.47 \div 0.66 \text{ mas}$
Odległość określona lepiej niż 10% ($\sigma_\pi/\pi < 0.1$)	20853
Odległość określona lepiej niż 20% ($\sigma_\pi/\pi < 0.2$)	49399
Wnioskowany stosunek błędu prawdziwego do standardowego	$\approx 1.0 \div 1.2$
Szacowany astrometryczny błąd standardowy	$< 0.1 \text{ mas}$
Średnia dokładność fotometryczna (dla $Hp < 9 \text{ mag}$)	0.0015 mag
Średnia liczba obserwacji fotometrycznych na gwiazdę	110
Całkowita liczba obserwacji fotometrycznych Hp	$\approx 13 \times 10^6$
Liczba gwiazd zmiennych lub podejrzewanych o zmienność	11597 (8237 nowe)
Zmienne okresowe	2712 (970 nowe)
Cefeidy	273 (2 nowe)
RR Lyrae	186 (9 nowe)
δ Scuti i SX Phoenicis	108 (35 nowe)
Podwójne zaćmieniowe (np. EA, EB, EW,...)	917 (343 nowe)
Inne (np. M, SR, RV Tau,...)	1238 (576 nowe)
Nieokresowe i nieznane (np. RCrB, γ Cas, Z And)	5542 (4145 nowe)
Nie badane (w tym mikrozmiennie)	3343 (3122 nowe)
Liczba systemów wielokrotnych	23882
Systemy w wyznaczonych parametrach (dodatek C)	12195 (2996 nowe)
Systemy orbitalne (dodatek O)	235
Podwójne astrometryczne (dodatek G i V)	2910
Podejrzane wielokrotne (dodatek X)	8542

lat. Tworzenie katalogu FK6 polegało na połączeniu danych najnowszych z obserwacjami dawnymi, skompilowanymi w jednym opracowaniu jakim był katalog FK5 — nie robiono więc szczegółowych porównań i redukcji setek katalogów pozycyjnych z Katalogiem Hipparcos (ma to być celem ewentualnego projektu FK7).

Głównym celem stworzenia katalogu FK6 było dostarczenie pozycji i ruchów własnych gwiazd wyznaczonych z maksymalną dostępną współcześnie dokładnością. Wykorzystując bogaty zbiór danych obserwacyjnych z przeszłości starano się poprawić dokładność pozycji i ruchów własnych osiągnięte w opracowaniu Katalogu Hipparcos. Dla wielu gwiazd było to możliwe z kilku powodów: a) bardzo długie naziemne serie obserwacyjne dają możliwość wyznaczenia ruchów własnych z większą dokładnością niż trzyletnie obserwacje satelitarne; b) z powodu krótkiego okresu obserwacji Katalog Hipparcos zawiera „chwilowe” ruchy własne; c) w wypadku jasnych gwiazd wielokrotnych, niezidentyfikowanych jako wielokrotne, ruchy własne zawarte w Katalogu Hipparcos obciążone są nieznanyymi, ale możliwymi do oszacowania, błędami związanymi z nieliniowością ruchu dominującego, jasnego składnika (*cosmic error*) (Wielen, 1997). Porównanie dokładnych, „chwilowych” pozycji Katalogu Hipparcos z uśrednionymi pozycjami FK5 umożliwia więc poprawę dokładności wyznaczanych ruchów własnych.

Katalog FK6 podzielony został na cztery części, z których wydano dotychczas I i III. Dwie pierwsze części bazują na danych z podstawowej części katalogu FK5. Część I (FK6(I)) zawiera gwiazdy pojedyncze lub takie, które mogą być traktowane jako pojedyncze, tj. niewykazujące w dostępnych danych obserwacyjnych cech układów podwójnych lub wielokrotnych. W opracowaniu tej części uwzględniona została wyłącznie systematyczna różnica pomiędzy układami FK5 i *HCRF* — wzajemny obrót obu układów. Część II zawierać będzie pozostałe gwiazdy — znane i podejrzewane gwiazdy podwójne i wielokrotne, identyfikowane jako takie w FK5, Katalogu Hipparcos lub obu katalogach jednocześnie. W opracowaniu tej części konieczne będzie indywidualne, wstępne skorygowanie pozycji katalogowych FK5 oraz Hipparcos poszczególnych gwiazd. Części III i IV bazują na danych z uzupełniającego katalogu FK5 Extension i podobnie jak w wypadku części I i II odnoszą się, odpowiednio, do gwiazd pojedynczych i pozostałych.

FK6(I) zawiera 878 gwiazd, z czego 340 stanowią tzw. gwiazdy astrometrycznie doskonałe, tj. spełniające dodatkowe statystyczne kryteria dotyczące ruchów własnych i ich błędów, świadczące o minimalnych róż-

nicach między „chwilowymi” ruchami własnymi zawartymi w Katalogu Hipparcos oraz „średnimi” ruchami własnymi zawartymi w katalogu FK5.

Katalog FK6 zawiera trzy zestawy danych pozycyjnych. Poza podstawowym, klasycznym rozwiązaniem określanym jako rozwiązanie SI (*Single star mode*), traktującym wszystkie zawarte w nim gwiazdy jako pojedyncze, FK6 zawiera również dwa rozwiązania uwzględniające możliwość istnienia w zbiorze, niezidentyfikowanych jako takie, gwiazd podwójnych, wprowadzających do „chwilowych” pozycji Katalogu Hipparcos, wspomniany wyżej, błąd zwany „błędem kosmicznym” (*cosmic error*) (Wielen, 1997). Są to, oparte na podejściu statystycznym, tzw. rozwiązania predykcji krótko- i długoterminowej STP i LTP (*Short Term Prediction* i *Long Term Prediction*). Nie zwiększają one dokładności danych dla poszczególnych gwiazd, w odniesieniu do rozwiązania SI. Powodują jednak zmniejszenie średniego błędu ruchów własnych całego zbioru, rozumianego jako odchylenie standardowe błędów ruchów własnych poszczególnych gwiazd.

Przeciętny średni błąd ruchów własnych FK6(I) w rozwiązaniu SI (0.35 mas/rok) jest około dwukrotnie mniejszy od odpowiedniego, przeciętnego średniego błędu ruchów własnych tych samych gwiazd zawartych w Katalogu Hipparcos (0.67 mas/rok). W rozwiązaniu LTP różnica ta jest nawet czterokrotna: 0.50 mas/rok — FK6(I), 2.21 mas/rok — Hipparcos, gdzie przeciętny średni błąd ruchów własnych Katalogu Hipparcos powiększony został o szacowany na poziomie 2.13 mas/rok przeciętny błąd kosmiczny.

FK6(III) zawiera 3272 gwiazd, z czego 1928 stanowią gwiazdy astrometrycznie doskonałe. Porównanie przeciętnego błędu ruchów własnych gwiazd zawartych w FK6(III) i (tych samych gwiazd) w Katalogu Hipparcos to odpowiednio: 0.59 mas/rok i 0.79 mas/rok w rozwiązaniu SI, 0.70 mas/rok i 0.79 mas/rok w rozwiązaniu STP oraz 0.93 mas/rok i 1.83 mas/rok w rozwiązaniu LTP.

3. POZYCJA POZORNA GWIAZDY

3.1. Wprowadzenie

Poza obiektywnym położeniem w przestrzeni, obserwowana pozycja gwiazdy, wyrażona poprzez jej współrzędne niebieskie: rektascensję i deklinację, zależy od: a) wyboru niebieskiego systemu odniesienia, b) parametrów ruchu tego systemu w stosunku do gwiazd, c) efektów związanych z ruchem znajdującego się na Ziemi obserwatora.

Na drodze od pozycji katalogowych wyrażonych w niebieskim systemie odniesienia do pozycji obserwowanych w ziemskim lokalnym systemie odniesienia (horyzontalny), tradycyjnie wyróżnia się trzy określenia niebieskich pozycji gwiazd: pozycje średnie (katalogowe), pozycje prawdziwe oraz pozycje pozorne (widome).

Pozycje średnie odniesione są do tzw. średniego równika i średniego początku danego niebieskiego systemu katalogowego. W przeszłości były to systemy różnych katalogów fundamentalnych, głównie z serii FK: FK4 (praktycznie do roku 1988), a następnie, FK5 (formalnie od 1984). Od 1 stycznia 2003, zgodnie z rezolucją IAU (IAU Transactions, 2001; Kryński, 2004a), jest to system Katalogu Hipparcos. Zgodnie z obowiązującą obecnie konwencją, pozycja oznaczona parą współrzędnych: rektascensja α i deklinacja δ bez żadnego kwalifikatora oznacza katalogową pozycję w *ICRF*, pozycje odnoszone do systemów katalogowych wymagają oznaczenia, np. dla Katalogu Hipparcos $(\alpha, \delta)_{HIP}$ (Seidemann i Kovalevsky, 2002). Pozycja średnia wyrażana jest na epokę katalogu lub dowolną epokę, np. epokę obserwacji. Uwzględnia ona ruchy własne gwiazd, a w wypadku niebieskich systemów dynamicznych, których początkiem jest punkt równonocy wiosennej, a oś równika średniego wykonuje ruch precesyjny, również ruch samego systemu odniesienia.

Pozycja prawdziwa opisuje położenia gwiazd w systemie pośrednim w odniesieniu do tzw. równika pośredniego i południka pośredniego, z uwzględnieniem efektów geometrycznych związanych z ruchem katalogowego systemu odniesienia (precesja i nutacja osi równika średniego) oraz przejściem od systemu barycentrycznego do geocentrycznego. Definicja pośredniego systemu odniesienia, a co za tym idzie, równika pośredniego i południka pośredniego podlegała w przeszłości kilkakrotnym zmianom na mocy konwencji międzynarodowych (Kryński, 2004c).

Pozycja pozorna (widoma) gwiazdy jest jej pozycją obserwowaną (z Ziemi bez atmosfery) w geocentrycznym pośrednim systemie odniesienia. Pozycja ta uwzględnia efekty pozornego przemieszczenia gwiazdy na sfe-

rze niebieskiej spowodowanego ruchem związanego z Ziemią obserwatora (aberracja roczna światła) oraz ugięciem światła w polu grawitacyjnym Słońca.

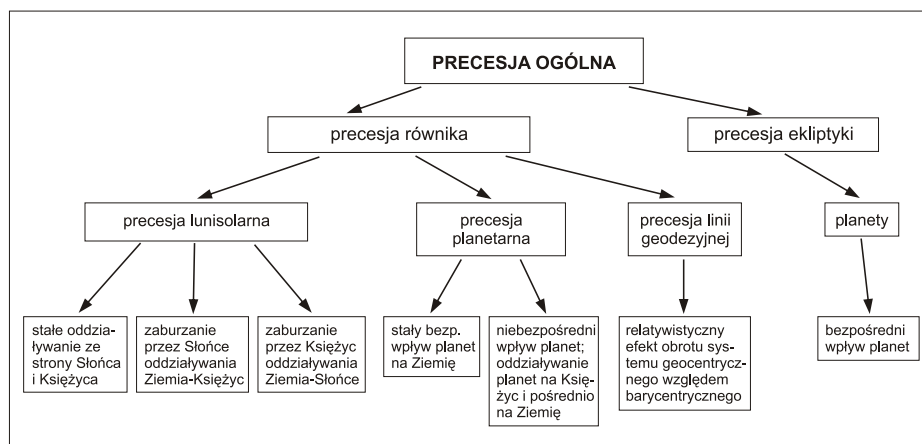
Ewentualne dalsze transformacje pozycji pozornej służą przejściu od systemu pośredniego do systemu obserwacyjnego (lokalnego) — z uwzględnieniem aberracji dobowej i ruchu obrotowego Ziemi oraz efektów lokalnych.

Przed 1 stycznia 2003 pozycje gwiazd opisywane były w odniesieniu do niebieskich systemów katalogowych, zdefiniowanych dynamicznie, z początkiem liczenia rektascensji w wyznaczanym na podstawie obserwacji położenia ciał Układu Słonecznego punkcie równonocy wiosennej. Systemy te określane były na epokę, a ich osie, w szczególności oś z — oś średniego bieguna — zmieniały swe położenie podlegając precesji. Kluczową rolę w procedurze obliczania pozycji pozornych gwiazd, a więc przejściu od pozycji średnich — katalogowych (wyrażonych na daną epokę) — do prawdziwych, odgrywały więc parametry i modele precesji oraz nutacji. Wprowadzenie od 1 stycznia 2003, do praktyki, zdefiniowanego kinematycznie systemu *ICRS* wiąże się z uściśleniem tych pojęć, połączeniem ich w jedną spójną teorię oraz, w pewnym sensie, uproszczeniem procedury obliczania pozycji pozornych.

3.1.1. Precesja, nutacja oraz ruch bieguna

Związany sztywno z Ziemią, ziemski system odniesienia, wykonuje, względem niebieskiego systemu odniesienia związanego z zewnętrzną przestrzenią, skomplikowany ruch. Przyczynami tego ruchu są przede wszystkim: oddziaływanie grawitacyjne Księżyca i, w mniejszym stopniu Słońca i planet, na równikowe wybrzuszenie Ziemi oraz deformacje bryły Ziemi i niezgodność jej osi obrotu z osiami jej głównych momentów bezwładności.

Długookresowy ruch osi obrotu Ziemi wokół osi przechodzącej przez biegun ekliptyki spowodowany przez momenty sił wywoływane oddziaływaniem grawitacyjnym Księżyca i Słońca oraz ruchem orbitalnym Ziemi, określany jest terminem precesji lunisolarnej. Dodatkowo, oddziaływanie grawitacyjne planet powodujące powolną zmianę położenia płaszczyzny ekliptyki (rotację osi ekliptyki wokół, powoli przemieszczającej się, osi średniej) nosi nazwę precesji planetarnej. Zjawiska te, określane łącznie jako precesja ogólna (rys. 3.1), skutkują przesuwaniem się punktu równonocy ruchem prostym i (obecnie) zmniejszaniem kąta nachylenia ekliptyki do równika. Krótkookresowy ruch osi obrotu Ziemi względem niebieskiego systemu odniesienia określany jest mianem nutacji. Wyróżnia się przy



Rysunek 3.1. Czynniki powodujące precesję osi obrotu Ziemi (na podstawie (Dehant i Capitaine, 1997))

tym tzw. nutację wymuszoną, będącą efektem oddziaływania zewnętrznych momentów sił oraz nutację swobodną, powodowaną przez procesy wewnętrzne. Zarówno precesja jak i nutacja wpływają na obserwowane pozycje ciał niebieskich względem pośredniego systemu odniesienia.

Przez ruch bieguna rozumie się ruch chwilowej osi obrotu Ziemi względem jej skorupy. Ruch ten powoduje zmienność współrzędnych astronomicznych obserwatoriów (długości i szerokości astronomicznej).

Wysokość ciała niebieskiego — gwiazdy, w momencie jej górowania podlega jednoczesnemu wpływowi nutacji oraz ruchu bieguna, możliwe jest jednak obserwacyjne oddzielenie tych efektów (z wyjątkiem składowych o okresach krótszych niż kilka dni). Z punktu widzenia znajdującego się na powierzchni Ziemi obserwatora, nutacja powoduje zmianę położenia bieguna niebieskiego na tle otaczających gwiazd, podczas gdy ruch bieguna ma wpływ na azymut astronomiczny. Zmienność nutacji dla obserwatora, przejawia się więc odchyleniami od quasi-kołowego, dziennego ruchu gwiazd, podczas gdy zmienność ruchu bieguna przejawia się zmiennością odległości zenitalnej bieguna (Kołaczek, 2004b).

3.1.2. Teorie nutacji, systemy astronomicznych stałych fundamentalnych

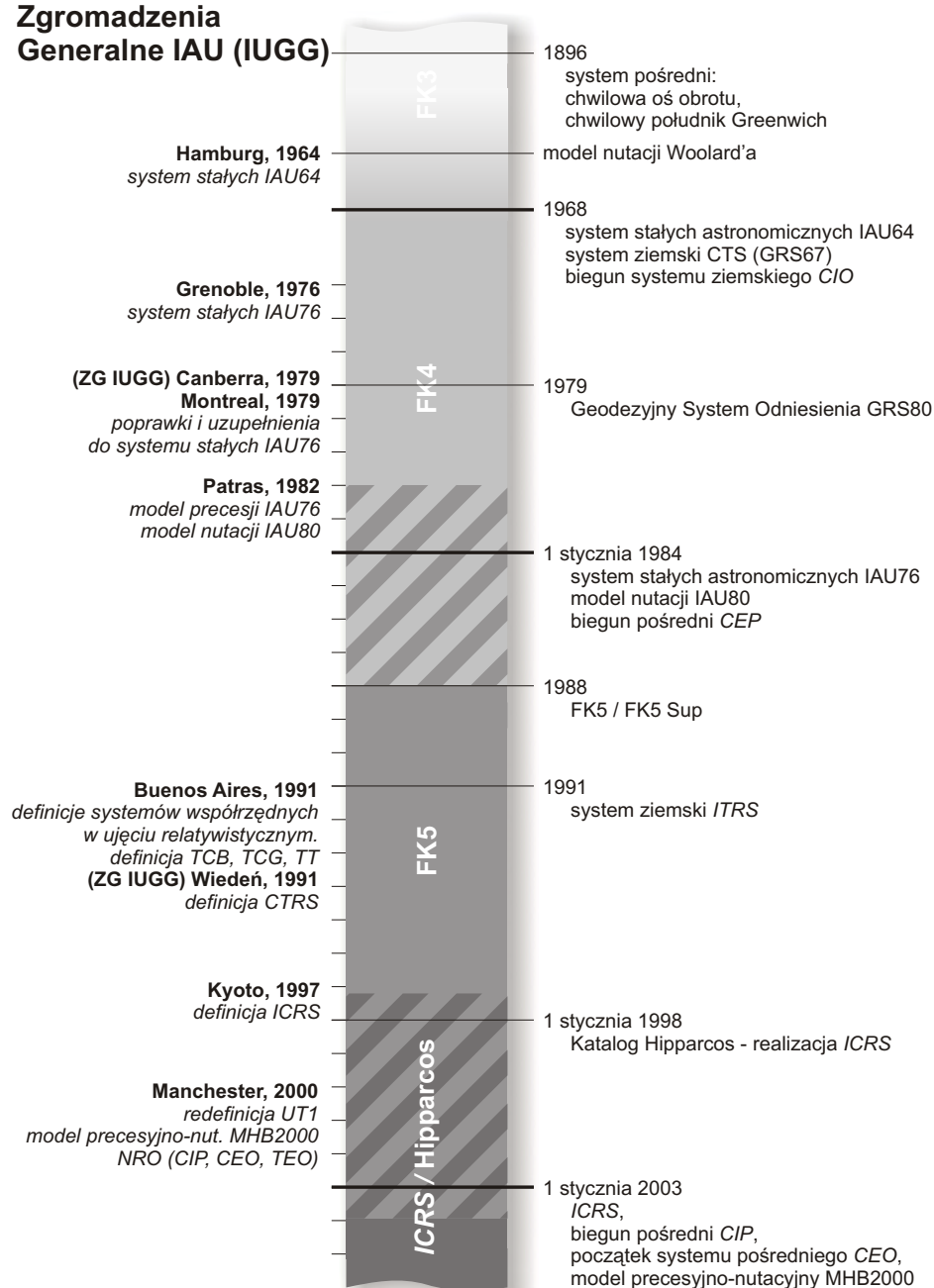
Do 1984 roku, równikowi pośredniego systemu odniesienia odpowiadał ziemski równik chwilowy, którego osią była chwilowa oś obrotu Ziemi,

zaś początek systemu wyznaczał chwilowy południk Greenwich. Przejście od systemu katalogowego do systemu pośredniego (od bieguna równika średniego do bieguna chwilowego) realizowane było w oparciu o system fundamentalnych stałych astronomicznych oraz modele precesji i nutacji odniesione do osi chwilowej.

Pierwszymi, międzynarodowo przyjętymi, były: system stałych astronomicznych, model precesji oraz model nutacji, opracowane, zgodnie z rezolucjami Konferencji Paryskiej z 1896 r. przez Newcomba, na podstawie teorii Oppolzera (Newcomb, 1898). W myśl tej teorii nutacja zdefiniowana była jako ruch chwilowej osi obrotu Ziemi względem, ustalonego w przestrzeni, systemu odniesienia związanego z gwiazdami. Ruch bieguna, rozumiany jako ruch osi chwilowej względem osi figury Ziemi, tj. osi jednego z jej głównych momentów bezwładności, określany był terminem „dobowej (dynamicznej) zmienności szerokości geograficznej” lub „nutacji dziennej”. Model nutacji Newcomba zawierał ograniczoną liczbę wyrazów o precyzji 3 miejsc dziesiętnych w sekundach łuku, i z czasem, gdy wymagania dotyczące dokładności wyznaczanych pozycji gwiazd rosły, stał się niewystarczający. Zgodnie z rekomendacjami VII ZG IAU z 1948 r. w Zürichu, a następnie VIII ZG IAU z 1952 r. w Rzymie, z początkiem roku 1960 wprowadzono do praktyki udoskonalony model nutacji opracowany w 1953 roku przez Woolarda (Woolard, 1953a,b), uzupełniony następnie, zgodnie z rezolucją XII ZG IAU przez nowy system astronomicznych stałych fundamentalnych. Model nutacji Woolarda odnosił się również do osi chwilowej, a u jego podstaw leżało założenie o sztywności bryły Ziemi. Model ten zawierał 56 wyrazów o amplitudach nie mniejszych od 0.2 mas . Stała nutacji była stałą empiryczną niezwiązaną z pozostałymi, przyjętymi stałymi astronomicznymi. Składowa quasi-dobowa nutacji wymuszonej, traktowana jako składowa ruchu bieguna ziemskiego, nie była w modelu uwzględniona (Seidelmann, 1982).

Rozwój teorii oraz technik obserwacyjnych spowodował konieczność rewizji tych założeń. Główną słabością teorii nutacyjnej Woolarda było oparcie jej na modelu Ziemi sztywnej. Stwierdzono również (Jeffreys, 1963; Atkinson, 1973, 1975), że chwilowa oś obrotu Ziemi — zdefiniowana przez model nutacyjny — wykonywała obrót, z okresem quasi-dobowym, w stosunku do osi systemu sztywno związanego z Ziemią. W precyzyjnych obserwacjach efekt ten nie był zaniedbywalny, co spowodowało przyjęcie przez XVI ZG IAU w Grenoble (1976), rekomendacji o konieczności redefinicji bieguna odniesienia (bieguna pośredniego), utożsamianego dotąd z chwilową osią obrotu Ziemi. Dane obserwacyjne wykazały jednak, iż mimo

Zgromadzenia Generalne IAU (IUGG)



Rysunek 3.2. Chronologia wprowadzania zmian podstawowych pojęć związanych z pośrednim systemem odniesienia

redefinicji bieguna odniesienia, przy zachowaniu dotychczasowego modelu nutacji, biegun systemu ziemskiego nadal przejawiałby ruch względem bieguna odniesienia. Konieczna więc była rewizja całej teorii nutacji.

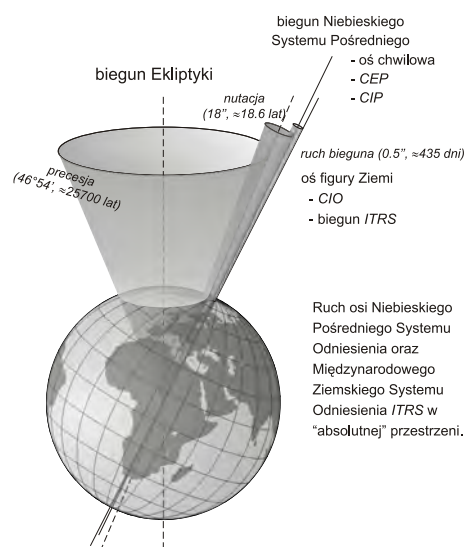
W 1982 r., na mocy rezolucji XVIII ZG IAU w Patras (IAU Transactions, 1983), zaakceptowana została nowa, przyjęta wcześniej przez Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki (IUGG) (Canberra, 1979), teoria nutacji Ziemi niesztynnej (Wahr, 1981). Teoria ta oznaczona jako teoria nutacji IAU80 została wprowadzona do praktyki — razem z przyjętym wcześniej (Grenoble, 1976), a następnie uzupełnionym (Montreal, 1979) nowym Systemem Fundamentalnych Stałych Astronomicznych IAU76 (IAU Transactions, 1977, 1980) oraz katalogiem gwiazd fundamentalnych FK5 — jako obowiązująca od 1 stycznia 1984 r.

3.2. Pozycja pozorna obliczana w oparciu o systemy katalogowe

3.2.1. Definicja bieguna pośredniego — biegun osi chwilowej, niebieski biegun efemerydalny *CEP*

Zarówno model precesji IAU76 jak i teoria nutacji IAU80 odnoszą się do umownego, precyzyjnie zdefiniowanego, tzw. niebieskiego bieguna efemerydalnego *CEP*, zrywając z dotychczasową koncepcją modelowania ruchu chwilowej osi obrotu Ziemi i wiążąc oś z pośredniego systemu odniesienia z osią bieguna *CEP*. Wyprzedzając nieco treść niniejszego rozdziału rys. 3.3 przedstawia historię zmian definicji osi z pośredniego systemu odniesienia do chwili obecnej, gdzie *CEP* zastąpione zostało już przez tzw. niebieski biegun pośredni *CIP*. *CIP* szerzej omówiono w rozdziale 3.3.1.

Dla zapewnienia transformacji pomiędzy związanym sztywno z Ziemią ziemskim systemem odniesienia, a związanym z zewnętrzną przestrzenią systemem niebieskim, wybór systemu pośredniego nie ma kluczowego znaczenia i podlega przyjętej konwencji. W przeszłości oś z systemu pośredniego wiązana była głównie z



Rysunek 3.3. Definicje osi Pośredniego oraz Ziemskiego Systemu Odniesienia

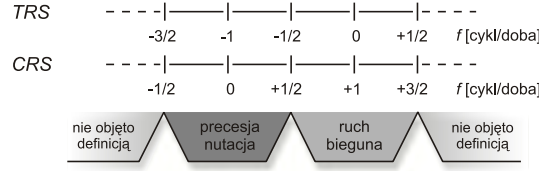
chwilową oś obrotu Ziemi (Newcomb, 1898; Woolard, 1953a). Jak wspomniano w rozdziale 3.1.1, obserwacyjne oddzielenie efektów związanych z nutacją osi chwilowej oraz jej ruchem względem bryły Ziemi, możliwe jest z ograniczeniem do składowych o okresach nie krótszych niż kilka dni. Początkowo, zarówno modele nutacji, konstruowane w oparciu o teorie dynamiczne, jak i obserwacyjne modele ruchu bieguna zawierały wyłącznie składowe długookresowe. Rozwój technik obserwacyjnych umożliwiających dokonywanie precyzyjnych obserwacji z coraz lepszą rozdzielczością czasową, spowodował konieczność redefinicji bieguna odniesienia — osi systemu pośredniego. Oprócz chwilowej osi obrotu, rolę tę, w naturalny sposób mogły pełnić: oś momentu pędu, oś figury Ziemi (oś największego głównego momentu bezwładności) oraz zaproponowana w modelu nutacyjnym Wahra (Wahr, 1981; Seidelmann, 1982), tzw. oś B — „średniej powierzchni geograficznej” niesztynnej Ziemi. Oś średniej powierzchni geograficznej (zwana też osią figury średniej zewnętrznej powierzchni Tisseranda) jest osią figury średniej powierzchni modelu Ziemi, w którym nie występują ruchy swobodne obserwatorów. Biegunowi związanemu właśnie z tą ostatnią osią zgodnie z propozycją Grupy Roboczej ds. Nutacji IAU (Seidelmann, 1982) nadano nazwę *CEP* (*Celestial Ephemeris Pole*).

CEP jako biegun pośredniego systemu odniesienia, został pojęciowo zdefiniowany w taki sposób aby, przy wykorzystaniu modelu niesztynnej Ziemi, jego ruch zarówno względem ustalonego w przestrzeni systemu odniesienia związanego z gwiazdami, jak i ziemskiego systemu odniesienia, sztywno związanego z obracającą się Ziemią, „nie wykazywał ruchów z okresem quasi-dobowym”.

W innym ujęciu *CEP* został określony także jako „centrum quasi-kołowego ruchu gwiazd na sferze niebieskiej”.

Faktyczną definicją *CEP* była jego realizacja za pomocą modelu nutacji IAU80. *CEP* rozdzielał ruch bieguna ziemskiego systemu odniesienia *TRS* na dwie części. Część niebieska dotyczyła ruchu *CEP* względem niebieskiego systemu odniesienia *CRS*, z uwzględnieniem wszystkich wyrazów długookresowych (precesja i nutacja wymuszona), i zawierała wyrazy o okresach dłuższych od 2 dób (o częstotliwościach pomiędzy -0.5 i $+0.5$ cykli na dobę gwiazdową). Część ziemską dotyczyła ruchu *CEP* względem ziemskiego systemu odniesienia, również z uwzględnieniem wszystkich wyrazów długookresowych (ruch bieguna) o okresach dłuższych od 2 dób. Jednocześnie, wszystkie składniki ruchu o okresach spoza przedziału $[-3/2, +1/2]$ obserwowane w systemie ziemskim, czyli spoza przedziału $[-1/2, +3/2]$ obserwowane w systemie niebieskim, pozostawały poza

przyjętą konwencją (rys. 3.4). Definicja *CEP* uwzględniała więc wyłącznie część wyrazów długookresowych (Capitaine, 2000).



Rysunek 3.4. Definicja bieguna pośredniego *CEP*

CEP bliższy jest „biegunowi obserwowanemu” — astrometrycznie bądź za pomocą technik geodezji satelitarnej — niż chwilowej osi rotacji Ziemi, jednak przyjęcie *CEP* jako bieguna pośredniego uprościło obliczenia przewidywalnej części ruchu bieguna.

3.2.2. Macierz precesji w systemie stałych astronomicznych IAU76

Macierz precesji $\mathcal{P}$ jest złożeniem trzech elementarnych macierzy obrotowych (AJ):

$$\mathcal{P} = \mathbf{R}_3(-z_A)\mathbf{R}_2(-\theta_A)\mathbf{R}_3(-\zeta_A) \quad (3.1)$$

gdzie

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_1(\alpha) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} & \mathbf{R}_2(\alpha) &= \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \\ \mathbf{R}_3(\alpha) &= \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.2)$$

W przeliczeniach od średniego równika i średniego punktu równonocy wiosennej epoki J2000.0 do średniego równika oraz punktu równonocy daty, wyrażenia na kąty z_A , θ_A oraz ζ_A przyjmują postać (Lieske *et al.*, 1977; McCarthy, 1996):

$$\begin{aligned} z_A &= 2306''.2181 t + 1''.09468 t^2 + 0''.018203 t^3 \\ \theta_A &= 2004''.3109 t - 0''.42665 t^2 - 0''.041833 t^3 \\ \zeta_A &= 2306''.2181 t + 0''.30188 t^2 + 0''.017998 t^3 \end{aligned} \quad (3.3)$$

gdzie $t = (JD - 2451545.0)/36525$ jest interwałem czasu liczonym w stuleciach juliańskich od epoki J2000.0.

Zgodnie z obowiązującym w latach 1984–2003 systemem astronomicznych stałych fundamentalnych IAU76 formuły na przeliczanie pozycji średnich gwiazd, z epoki katalogu na epokę t , mają postać:

$$\mathbf{p} = \mathcal{P}(\mathbf{p}_0 + \mathbf{m}_0 t), \quad \mathbf{m} = \mathcal{P}\mathbf{m}_0 \quad (3.4)$$

gdzie $\mathbf{p}$, $\mathbf{m}$ — wektory położenia i prędkości gwiazdy, $\mathbf{p}_0$, $\mathbf{m}_0$ — wektory położenia i prędkości gwiazdy w epoce katalogu, $\mathcal{P}$ — macierz precesji, t — interwał czasu w stuleciach ($t = (JD - J2000.0)/36525$), a składowe wektorów położenia i prędkości gwiazdy opisywane są wzorami:

$$\begin{aligned} p_x &= \cos \delta \cos \alpha & m_x &= -\mu_\alpha \cos \delta \sin \alpha - \mu_\delta \sin \delta \cos \alpha + k\pi_0 V_0 p_x \\ p_y &= \cos \delta \sin \alpha & m_y &= \mu_\alpha \cos \delta \cos \alpha - \mu_\delta \sin \delta \sin \alpha + k\pi_0 V_0 p_y \\ p_z &= \sin \delta & m_z &= \mu_\delta \cos \delta + k\pi_0 V_0 p_z \end{aligned} \quad (3.5)$$

gdzie α , δ — pozycja katalogowa gwiazdy, μ_α , μ_δ — ruch własny w *radianach/stulecie*, V_0 — prędkość radialna w *km/s*, π_0 — paralaksa w *radianach*, k — współczynnik skalujący ($k = 21.094\,502\text{ km/s} \cdot \text{stulecie/s}$)

3.2.3. Obliczanie pozycji pozornej z wykorzystaniem wielkości redukcyjnych

Klasyczną metodą służącą do obliczania miejsc pozornych gwiazd w zastosowaniach praktycznych jest wykorzystanie tzw. wielkości redukcyjnych (Kryński i Sękowski, 2001–2006). Wielkości redukcyjne stanowią zbiór, tabelaryzowanych w wydawnictwach rocznikowych, współczynników liczbowych, otrzymywanych na podstawie astronomicznych stałych fundamentalnych oraz w oparciu o przejęte modele precesji i nutacji. Wielkości redukcyjne pozwalają na obliczanie pozycji pozornych gwiazd z ich pozycji średnich, poprzez proste działania arytmetyczne — sumowanie kolejnych poprawek odpowiadających zmianom pozycji ze względu na precesję, nutację, aberrację roczną, ruchy własne oraz paralaksę. W celu zminimalizowania wpływu składników drugiego rzędu, obliczenia z wykorzystaniem wielkości redukcyjnych prowadzi się wychodząc ze współrzędnych średnich na epokę połowy roku. Pozycje średnie na połowę roku są często również tabelaryzowane w rocznikach astronomicznych.

W obliczeniach z wykorzystaniem wielkości redukcyjnych stosuje się ogólny wzór na pozycję pozorną gwiazdy:

$$\begin{aligned}\alpha_{app} &= \alpha_0 + (A + A')a + (B + B')b + Cc + Dd + E + \mu_\alpha \tau + I_\alpha \tan^2 \delta_0 \\ \delta_{app} &= \delta_0 + (A + A')a' + (B + B')b' + Cc' + Dd' + \mu_\delta \tau + I_\delta \tan \delta_0\end{aligned}\quad (3.6)$$

gdzie α_0, δ_0 to miejsca średnie gwiazdy na środek roku.

Wielkości redukcyjne $A + A', B + B'$ i E służące uwzględnieniu nutacji całkowitej oraz precesji za część roku, obliczane są ze wzorów:

$$\begin{aligned}(A + A') &= n\tau + (\Delta\psi + d\psi) \sin \varepsilon & A' &= d\psi \sin \varepsilon \\ (B + B') &= -(\Delta\varepsilon + d\varepsilon) & B' &= -d\varepsilon \\ E &= \frac{q_1}{p_1}(\Delta\psi + d\psi)\end{aligned}\quad (3.7)$$

w tym wielkości A' i B' to składniki zawierające krótkookresowe składowe nutacji.

Wielkości redukcyjne C i D związane z aberracją roczną dane są wzorami:

$$\begin{aligned}C &= 1191''28616\dot{Y} \\ D &= -1191''28616\dot{X}\end{aligned}\quad (3.8)$$

gdzie $\dot{X}$ i $\dot{Y}$ są składowymi prędkościami orbitalnej Ziemi w jednostkach astronomicznych na dobę.

Stałe redukcyjne $a, a', b, b', c, c', d, d'$ związane są ze współrzędnymi gwiazdy poprzez związki:

$$\begin{aligned}a &= \frac{1}{15} \left(\frac{m}{n} + \tan \delta_0 \sin \alpha_0 \right) & a' &= \cos \alpha_0 \\ b &= \frac{1}{15} \tan \delta_0 \cos \alpha_0 & b' &= -\sin \alpha_0 \\ c &= \frac{1}{15} \sec \delta_0 \cos \alpha_0 & c' &= \tan \varepsilon \cos \delta_0 - \sin \delta_0 \sin \alpha_0 \\ d &= \frac{1}{15} \sec \delta_0 \sin \alpha_0 & d' &= \sin \delta \cos \alpha\end{aligned}\quad (3.9)$$

Składniki $I_\alpha \tan^2 \delta_0$ oraz $I_\delta \tan \delta_0$ są wyrazami drugiego rzędu, istotnymi przy obliczaniu pozycji gwiazd znacznie oddalonych od równika. Składniki te dane są zależnościami:

$$I_\alpha = \frac{1}{15} PQ \sin 1'' \quad I_\delta = -\frac{1}{2} P^2 \sin 1'' \quad (3.10)$$

gdzie

$$\begin{aligned} P &= (A + D) \sin \alpha_0 + (B + C) \cos \alpha_0 \\ Q &= (A - D) \cos \alpha_0 - (B - C) \sin \alpha_0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

W powyższych wzorach przyjęte zostały następujące oznaczenia:

τ — ułamek roku liczony od daty do środka roku
 ε — prawdziwe nachylenie ekliptyki
 p_1 — roczna precesja księżycowo-słoneczna
 q_1 — roczna precesja planetarna
 m — roczna precesja w rektascensji
 n — roczna precesja w deklinacji
 $\Delta\psi$ — długookresowa część nutacji w długości
 $d\psi$ — krótkookresowa część nutacji w długości
 $\Delta\varepsilon$ — długookresowa część nutacji w nachyleniu
 $d\varepsilon$ — krótkookresowa część nutacji w nachyleniu

3.2.4. Macierz nutacji IAU1980

Podobnie jak było to w przypadku macierzy precesji (rozdz. 3.2.2) macierz nutacji jest złożeniem trzech elementarnych macierzy obrotowych:

$$\mathcal{N} = \mathbf{R}_1(-\varepsilon_0 - \Delta\varepsilon - d\varepsilon) \mathbf{R}_3(-\Delta\psi - d\psi) \mathbf{R}_1(\varepsilon_0) \quad (3.12)$$

gdzie ε_0 jest średnim nachyleniem ekliptyki, $\Delta\varepsilon$, $d\varepsilon$, $\Delta\psi$, $d\psi$ odpowiednio długo- i krótkookresowe składowe nutacji w nachyleniu i długości.

W systemie stałych astronomicznych IAU76 wartość ε_0 wyznacza się ze wzoru (Lieske *et al.*, 1977; McCarthy, 1996):

$$\varepsilon_0 = 84381''.448 - 46''.8150 t - 0''.00059 t^2 + 0''.001813 t^3 \quad (3.13)$$

gdzie $t = (JD - 2451545.0)/36525$ jest interwałem czasu liczonym w stuleciach juliańskich od epoki J2000.0.

Wartości $\Delta\psi$, $\Delta\varepsilon$, $d\psi$, $d\varepsilon$, zgodnie z modelem nutacji IAU80 (Wahr, 1981; Seidelmann, 1982), oblicza się jako szeregi sinusów i cosinusów argumentów fundamentalnych l , l' , F , D , Ω wyrażonych w systemie FK5 na epokę J2000.0 — odpowiednio sumy długo- i krótkookresowych składników. Na ogólną liczbę 106, teoria IAU80 opisuje 30 długookresowych składników nutacji (o okresach większych niż 100 dób) i 76 składników krótkookresowych — o okresach nieprzekraczających 35 dób.

$$\begin{aligned}
\Delta\psi &= \sum_{i=1}^{30} (A_i + A'_i t) \sin(\text{ARG}), & \Delta\varepsilon &= \sum_{i=1}^{30} (B_i + B'_i t) \cos(\text{ARG}) \\
d\psi &= \sum_{i=31}^{106} (A_i + A'_i t) \sin(\text{ARG}), & d\varepsilon &= \sum_{i=31}^{106} (B_i + B'_i t) \cos(\text{ARG})
\end{aligned} \tag{3.14}$$

gdzie

$$\text{ARG} = \sum_{i=1}^5 N_i F_i$$

$N_i, (i = 1, \dots, 5)$ są liczbami całkowitymi, a $F_i, (i = 1, \dots, 5) \equiv (l, l', F, D, \Omega)$. Wartości argumentów fundamentalnych oblicza się przy tym wg wzorów (Seidelmann, 1982) (por. wzory 3.16):

$$\begin{aligned}
l &= 134^\circ 57' 46''.733 + (1325^r + 198^\circ 52' 02''.633) t + \\
&\quad + 31''.310 t^2 + 0''.064 t^3 \\
l' &= 357^\circ 31' 39''.804 + (99^r + 359^\circ 03' 01''.224) t + \\
&\quad + 0''.577 t^2 + 0''.012 t^3 \\
F &= 93^\circ 16' 18''.877 + (1342^r + 82^\circ 01' 03''.137) t + \\
&\quad - 13''.257 t^2 + 0.011 t^3 \\
D &= 297^\circ 51' 01''.307 + (1236^r + 307^\circ 06' 41''.328) t + \\
&\quad - 6''.891 t^2 + 0''.019 t^3 \\
\Omega &= 125^\circ 02' 40''.280 - (5^r + 134^\circ 08' 10''.539) t + \\
&\quad + 7''.455 t^2 + 0.008 t^3
\end{aligned} \tag{3.15}$$

gdzie

- $1^r = 360^\circ = 1296000''$,
- t – interwał czasu w stuleciach juliańskich ($t = (JD - J2000.0)/36525$),
- l – średnia anomalia Księżyca,
- l' – średnia anomalia Słońca,
- F – różnica długości ekliptycznej Księżyca i węzła wstępującego orbity Księżyca — średni argument szerokości ekliptycznej Księżyca,
- D – średnia elongacja słoneczna Księżyca,
- Ω – średnia długość ekliptyczna węzła wstępującego orbity Księżyca.

Bardziej dokładne wzory na parametry fundamentalne nutacji oparte o nowszą teorię ruchu Księżyca mają następującą postać (McCarthy, 1996):

$$\begin{aligned}
l &= 134^\circ.96340251 + 1717915923''2178 t + 31''8792 t^2 + \\
&\quad + 0''051635 t^3 - 0''00024470 t^4 \\
l' &= 357^\circ.52910918 + 129596581''0481 t - 0''5532 t^2 + \\
&\quad + 0''000136 t^3 - 0''00001149 t^4 \\
F &= 93^\circ.27209062 + 1739527262''8478 t - 12''7512 t^2 + \\
&\quad - 0''001037 t^3 + 0''00000417 t^4 \\
D &= 297^\circ.85019547 + 1602961601''2090 t - 6''3706 t^2 + \\
&\quad + 0''006593 t^3 - 0''00003169 t^4 \\
\Omega &= 125^\circ.04455501 - 6962890''2665 t + 7''4722 t^2 + \\
&\quad + 0''007702 t^3 - 0''00005939 t^4
\end{aligned} \tag{3.16}$$

3.2.5. Algorytm obliczania pozycji pozornej: precesja IAU76, nutacja IAU80, aberracja, paralaksa, efekty relatywistyczne

Procedura obliczania pozycji pozornej gwiazd, w formie w jakiej została przyjęta przez IAU (IAU Transactions, 1977, 1980), oparta jest na danych katalogowych gwiazd w systemie FK5, na epokę J2000.0. Ściśle, pozycja pozorna wyznaczana jest na moment t w skali Barycentrycznego Czasu Dynamicznego TDB , jednak ze względu na znikomą różnicę skal czasu TDB i Czasu Ziemijskiego TT oraz brak wpływu takiego założenia na wynik obliczeń, dopuszczalne jest przyjęcie $TDB = TT$. Procedura obliczania pozycji pozornej przebiega w następujących krokach (Sękowski, 2004):

1. Obliczenie wektorów barycentrycznego położenia $\mathbf{q}$ oraz ruchu własnego $\mathbf{m}$ gwiazdy, danych wzorami (inna postać wzorów 3.5):

$$\begin{aligned}
q_x &= \cos \alpha_0 \cos \delta_0 \\
q_y &= \sin \alpha_0 \cos \delta_0 \\
q_z &= \sin \delta_0 \\
m_x &= -\mu_\alpha \cos \delta_0 \sin \alpha_0 - \mu_\delta \sin \delta_0 \cos \alpha_0 + \pi_0 V_R \cos \delta_0 \cos \alpha_0 \\
m_y &= \mu_\alpha \cos \delta_0 \cos \alpha_0 - \mu_\delta \sin \delta_0 \sin \alpha_0 + \pi_0 V_R \cos \delta_0 \sin \alpha_0 \\
m_z &= -\mu_\delta \cos \delta_0 + \pi_0 V_R \sin \delta_0
\end{aligned} \tag{3.17}$$

gdzie α_0, δ_0 to pozycje katalogowe gwiazdy w systemie FK5 na epokę J2000.0, ruchy własne μ_α, μ_δ i paralaksa π wyrażone są w radianach, a prędkość radialna gwiazdy V_R , w jednostkach astronomicznych na stulecie.

2. Obliczenie geocentrycznego wektora położenia gwiazdy w momencie t z uwzględnieniem jej ruchu własnego oraz paralaksy rocznej,

$$\mathbf{P} = \mathbf{q} + t \cdot \mathbf{m} + \pi \cdot \mathbf{E}_B \quad (3.18)$$

gdzie $\mathbf{q}, \mathbf{m}$ — wektory położenia i ruchu własnego gwiazdy, $t = (JD - J2000.0)/36525$, π — paralaksa roczna gwiazdy w radianach, a $\mathbf{E}_B$ — wektor barycentrycznego położenia Ziemi w jednostkach astronomicznych.

3. Uwzględnienie relatywistycznego efektu grawitacyjnego ugięcia światła,

$$\mathbf{p}_1 = \mathbf{p} + \frac{2\mu(\mathbf{e} - (\mathbf{p}\mathbf{e})\mathbf{p})}{c^2 E_H (1 + \mathbf{p}\mathbf{e})} \quad (3.19)$$

gdzie $\mu/c^2 = 9.87 \cdot 10^{-9} \text{ j.a.}$, $E_H = |\mathbf{E}_H|$ — odległość Ziemi od Słońca, $\mathbf{p}$ — wersor geocentrycznego położenia gwiazdy, $\mathbf{e}$ — wersor heliocentrycznego położenia Ziemi,

$$\mathbf{p} = \frac{\mathbf{P}}{|\mathbf{P}|} \quad \mathbf{e} = \frac{\mathbf{E}_H}{|\mathbf{E}_H|} \quad (3.20)$$

4. Uwzględnienie aberracji rocznej światła (ujęcie relatywistyczne)

$$\mathbf{p}_2 = \left(\beta^{-1} \mathbf{p}_1 + \mathbf{V} + \frac{(\mathbf{p}_1 \mathbf{V}) \mathbf{V}}{1 + \beta^{-1}} \right) / (1 + \mathbf{p}_1 \mathbf{V}) \quad (3.21)$$

gdzie $\mathbf{V} = \dot{\mathbf{E}}_B/c = 0.0057755 \dot{\mathbf{E}}_B$; $\beta = (1 - V^2)^{-1/2}$; c — prędkość światła.

5. Uwzględnienie precesji i nutacji bieguna niebieskiego systemu odniesienia FK5 od epoki J2000.0 do równika i punktu równonocy daty,

$$\mathbf{p}_3 = \mathcal{R} \mathbf{p}_2 \quad (3.22)$$

gdzie, $\mathcal{R} = \mathcal{P} \mathcal{N}$ łączna macierz precesyjno-nutacyjna; $\mathcal{P}$ — macierz precesji IAU76, $\mathcal{N}$ — macierz nutacji IAU80

6. Pozycje pozorne dane są wzorami ($\mathbf{p}_3 = [x_3, y_3, z_3]^T$):

$$\alpha_{app} = \arctan \left(\frac{y_3}{x_3} \right) \quad \delta_{app} = \arcsin z_3 \quad (3.23)$$

3.3. Pozycja pozorna gwiazdy w *ICRS*

W latach 1991–2001 Międzynarodowa Unia Astronomiczna, dążąc do zapewnienia zgodności pomiędzy coraz szybciej rozwijającymi się technikami obserwacyjnymi a istniejącymi pojęciami i definicjami w zakresie systemów odniesienia, dokonała w nich zasadniczych zmian. Na mocy rezolucji ZG IAU w Kyoto, w 1997 r. wprowadzono, zdefiniowany kinematycznie, związany ze zbiorem nie wykazujących ruchów własnych odległych radioźródeł, Międzynarodowy Niebieski System Odniesienia (*ICRS*) (IAU Transactions, 1999; Kryński, 2004a, Rezolucja B2). Poprzednie, katalogowe, niebieskie systemy odniesienia definiowane były dynamicznie w oparciu o pojęcie równika niebieskiego, z początkiem w punkcie równonocy wiosennej — punktem przecięcia równika niebieskiego i ekliptyki. Powodowało to liczne trudności, w szczególności związane z realizacją punktu równonocy, określanego na podstawie różnych definicji katalogowych oraz dynamicznych. Ponadto konstrukcja systemów katalogowych powodowała, że realizowane na ich podstawie układy odniesienia podlegały rotacji. *ICRS* zdefiniowano jako system kinematyczny. Nie zależy on ani od położenia osi rotacji Ziemi ani od położenia osi ekliptyki, które stały się obecnie przedmiotem obserwacji w *ICRS*. Punkt początkowy *ICRS* został zdefiniowany jako możliwie bliski średniemu punktowi równonocy FK5 na epokę J2000.0. Osiągnięta zgodność początku *ICRS* z początkiem, stosowanych obecnie najczęściej, efemeryd planetarnych i słonecznych DE405 jest na poziomie 1 *mas* (Seidelmann i Kovalevsky, 2002).

W 2000 r. IAU wprowadziła: Barycentryczny Niebieski System Odniesienia (*BCRS*) oraz Geocentryczny Niebieski System Odniesienia (*GCRS*) (IAU Transactions, 2001). Systemy te zdefiniowane zostały zgodnie z zasadami ogólnej teorii względności, z określeniem ich tensorów metrycznych i ogólnej transformacji Lorentza uwzględniającej przyspieszenie systemu geocentrycznego w stosunku do barycentrum oraz efekt potencjału grawitacyjnego. Pomiędzy *BCRS* i *GCRS* nie występuje względna rotacja, ale mają one różne skale oraz różne współrzędne czasowe, odpowiednio *TCB* i *TCG* (Kryński, 2004b). *ICRS* jest rozumiany jako definicja orientacji osi obu tych systemów.

Praktyczną realizacją *ICRS* jest Międzynarodowy Niebieski Układ Odniesienia *ICRF* (International Celestial Reference Frame). Współrzędnymi w *ICRF* są rektascensja i deklinacja, przy czym, jeśli nie zachodzi szczególna sytuacja tego wymagająca, w oznaczeniach (α , δ) współrzędnych *ICRF* nie stosuje się żadnych dodatkowych indeksów. Są to współrzędne barycentryczne, a ponieważ system *ICRS* nie obraca się, współrzędne

w układzie *ICRF* nie są związane z żadną epoką. Pozycje *ICRF* pełnią podobną rolę do roli pozycji średnich odniesionych do średniego równika i średniej równonocy na daną epokę w dotychczasowych układach katalogowych. Podobnie więc jak to było dotychczas, pozycje *ICRF* wyznacza się poprzez usunięcie z bezpośrednich obserwacji: efektów refrakcji atmosferycznej, aberracji dobowej, ruchu bieguna, a następnie zastosowanie transformacji od „ziemskiego” pośredniego systemu odniesienia do *ICRF* uwzględniającej ruch precesyjno-nutacyjny, paralaksę i aberrację roczną oraz efekt grawitacyjnego ugięcia światła.

Pomimo tego, że *ICRF* jako układ odniesienia nie jest związany z żadną epoką, wyrażone w nim pozycje gwiazd nie są całkowicie niezienne; większość gwiazd wykazuje ruch własny. Powoduje to konieczność określenia epoki w jakiej wykonywane były obserwacje oraz redukcji tych pozycji do wspólnej epoki katalogu. W szczególności dotyczy to katalogów gwiazd. Przykładem jest Katalog Hipparcos, będący realizacją *ICRS* w zakresie widma optycznego, którego przyjętą epoką, na którą zredukowano pozycje poprzez uwzględnienie ruchów własnych gwiazd, jest epoka J1991.25.

Większość obserwacji wykonywana jest z Ziemi, jest więc odniesiona do *GCRS*. Ruch obiegowy *GCRS*, którego osie są ustalone w przestrzeni, wokół barycentrum, powoduje powstanie relatywistycznego efektu zwanego precesją i nutacją linii geodezyjnej, osiągającego wartość $\psi_G = 19.19 - 0.153 \sin l - 0.002 \sin 2l \text{ mas/rok}$, gdzie l jest średnią anomalią Słońca (Fukushima, 1991). Nutacja linii geodezyjnej nie jest związana w żaden sposób z tradycyjnym rozumieniem pojęcia nutacji. Mimo to uwzględnienie tego efektu włącza się zwykle do modelu precesyjno-nutacyjnego wykorzystywanego w transformacji pośredniego systemu odniesienia do *ICRS*.

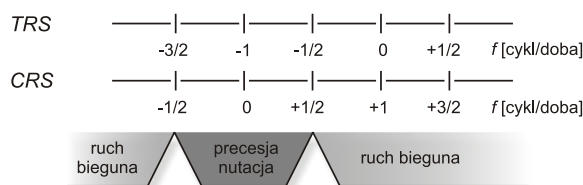
3.3.1. Niebieski Biegun Pośredni *CIP*

Jak wspomniano w rozdziale 3.2.1 zgodnie z modelem nutacji IAU80 rolę niebieskiego bieguna pośredniego pełnił Efemerydalny Biegun Niebieski *CEP*, którego definicja pomijała wyrazy o okresach krótszych niż 2 doby. Rozwój metod obserwacyjnych oraz możliwości teoretycznego modelowania, a także potrzeba szybkiej i dokładnej predykcji położenia bieguna podyktowana rozwojem precyzyjnych, nawigacyjnych systemów pozycjonowania, spowodowały konieczność rewizji definicji bieguna pośredniego. Potrzeba zmian dotyczyła uwzględnienia, możliwych do modelowania, krótkookresowych składników nutacji i ruchu bieguna oraz wykorzystania nowych metod obserwacji o rozdzielczości subdobowej. Należało zmienić definicję bieguna pośredniego w taki sposób aby:

- istniała możliwość dokładniejszego modelowania ruchu bieguna w niebieskim systemie odniesienia,
- związać biegun z precyzyjną i jasną koncepcją, uniezależniając go od ewentualnych, przyszłych udoskonaleń modelu,
- biegun mógł być realizowany z dowolną dokładnością — zależną tylko od modelu,
- uwzględniona była krótkookresowa zmienność ruchu bieguna,
- zmiana definicji powodowała jak najmniej zmian w praktycznym stosowaniu przez użytkowników.

Zaproponowana została także nowa nazwa dla bieguna pośredniego zdefiniowanego w oparciu o powyższe założenia: Celestial Intermediate Pole (*CIP*).

W konsekwencji *CIP* zdefiniowany został jako „biegun systemu pośredniego (pomiędzy *GCRS* i *ITRS*)”, którego ruch w odniesieniu do *GCRS* powodowany jest głównie przez zewnętrzne w stosunku do Ziemi momenty sił, z ograniczeniem do wyrazów o okresie większym niż 2 dni” (Capitaine, 2002). Zgodnie z tą definicją do nutacji bieguna *CIP* zaliczają się wszystkie okołodobowe składowe ruchu wstecznego w *ITRS*, a także wszystkie składowe nutacji wymuszonej o okresach dłuższych niż 2 dni oraz nutacja swobodna jądra Ziemi. Definicja *CIP* jest zgodna dotychczasową definicją *CEP* na poziomie milisekund łuku, doprecyzowuje ją natomiast dla wyrazów o amplitudach submilisekundowych (rys. 3.5).



Rysunek 3.5. Definicja Pośredniego Bieguna Niebieskiego *CIP*

W związku z nową definicją Pośredniego Bieguna Niebieskiego *CIP* stworzony został również nowy model precesji i nutacji wymuszonej MHB2000 (Dehant *et al.*, 1999; Mathews *et al.*, 2002), opisujący ruch *CIP* względem bieguna *GCRS* i uwzględniający składowe o okresach dłuższych niż dwa

dni. Model ten, dla dalszego zwiększenia dokładności, dodatkowo uzupełniają poprawki kompensujące, wyznaczone przez IERS na podstawie obserwacji. MHB2000 jest modelem Ziemi nieszttywnej, poprawiającym dotychczasową teorię nutacji IAU1980 poprzez uwzględnienie efektów związanych z nieelastycznością płaszcza Ziemi, pływami oceanicznymi, a także oddziaływaniami elektromagnetycznymi pomiędzy stałym jądrem wewnętrznym i płynnym jądrem zewnętrznym, płynnym jądrem zewnętrznym i płaszczem oraz związanych z tym, dotychczas nie uwzględnianych, efektów nieliniowych.

Zgodnie z rezolucjami B1.6 i B1.7 XXIV ZG IAU z 2000 roku (IAU Transactions, 2001; Kryński, 2004a) *CIP* oraz model precesyjno-nutacyjny MHB2000 wraz ze związanymi z nimi wartościami tempa zmian precesji i nachylenia ekliptyki, zostały przyjęte jako obowiązujące od 1 stycznia 2003 r. Obok modelu precesyjno-nutacyjnego MHB2000 w pełnej wersji, przyjętego pod nazwą IAU2000A, zapewniającego dokładność położenia Pośredniego Bieguna Niebieskiego *CIP* w *GCRS* na poziomie 0.2 mas przyjęto także jego skróconą wersję (IAU2000B) o dokładności 1 mas .

3.3.2. Koncepcja *NRO*, Niebieski Efemerydalny Punkt Początkowy *CEO*

Ruch osi obrotu Ziemi w przestrzeni można przedstawić, w systemie geocentrycznym, za pomocą macierzy transformacji (macierzy obrotu) pomiędzy systemem odniesienia sztywno związanym z Ziemią (*TRS*) i niebieskim systemem odniesienia związanym z gwiazdami (*CRS*). Konstrukcja tej macierzy z formalnego punktu widzenia wymaga zaledwie trzech parametrów (kąty Eulera), które mogłyby być wyznaczone z obserwacji astronomicznych.

Poza bezwzględny położeniem Ziemi w stosunku do gwiazd, w badaniach dynamicznych niezbędne jest również odniesienie do chwilowej osi obrotu lub innej, wybranej na mocy konwencji, osi związanej z dynamiką ruchu obrotowego jak np. oś momentu pędu lub oś figury Ziemi. Ustalenie położenia tej osi wymaga podania dodatkowych dwóch parametrów. Ponieważ tradycyjnie oś ta pełni rolę osi z pośredniego systemu odniesienia, są to oznaczane zwykle przez X , Y współrzędne Pośredniego Bieguna Niebieskiego na daną datę, w systemie niebieskim (FK5, *ICRS*), lub oznaczane przez x_p , y_p współrzędne tego bieguna w systemie ziemskim (*CTS*, *ITRS*).

Pełna definicja pośredniego systemu odniesienia wymaga także wskazania początku systemu — punktu początkowego liczenia rektascensji.

Tradycyjnie rolę tę pełnił punkt równonocy wiosennej daty stanowiąc, ponieważ jego położenie zmienia się w czasie, kolejny, szósty parametr do wyznaczenia. Wybór punktu równonocy jako punktu początkowego, podobnie jak w wypadku osi systemu pośredniego, oparty był na konwencji. Punkt równonocy wiosennej jako punkt przecięcia chwilowego równika z płaszczyzną chwilowej ekliptyki nie jest jednak związany w żaden sposób z ruchem Ziemi w geocentrycznym systemie niebieskim. Konieczność wyznaczenia jego położenia, jako szóstego parametru transformacji, była więc źródłem dodatkowych błędów w realizacji układu pośredniego związanych z wyznaczaniem położenia ekliptyki.

Koncepcja „nieobracającego się początku” *NRO* (*Non Rotating Origin*) zaproponowana przez Guinot (Guinot, 1979), dostarczyła znacznie lepsze rozwiązanie problemu punktu początkowego dla systemu pośredniego. *NRO* jako punkt początkowy σ związany jest wyłącznie z parametrami ruchu systemu pośredniego w *CRS*. Kinematyczna definicja *NRO* opiera się na założeniu, aby pośredni system odniesienia $[Oxyz]$, którego biegun przemieszcza się w *CRS*, nie wykazywał rotacji względem *CRS* wokół osi z .

Aby opisać zmianę położenia punktu początkowego systemu pośredniego zgodnego z definicją *NRO*, przy przejściu od epoki t_0 do epoki t , wprowadza się wielkość s daną wzorem (Capitaine *et al.*, 1986):

$$s = (\widehat{\sigma N} - \widehat{\Sigma_0 N}) - (\widehat{\sigma_0 N_0} - \widehat{\Sigma_0 N_0}) \quad (3.24)$$

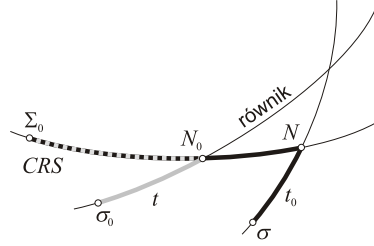
gdzie $\widehat{\sigma N}$ oraz $\widehat{\sigma_0 N_0}$ są odpowiednio łukami mierzonymi w epokach t i t_0 wzdłuż równika systemu pośredniego od punktów początkowych σ i σ_0 do punktów N i N_0 – punktów przecięcia równika systemu pośredniego z równikiem *CRS*. $\widehat{\Sigma_0 N}$ i $\widehat{\Sigma_0 N_0}$ są zaś odpowiednio łukami mierzonymi w epoce t i t_0 wzdłuż równika *CRS* od punktu początkowego Σ_0 do N i N_0 (rys. 3.6).

Założenie o braku rotacji systemu pośredniego wokół osi z pozwala wyznaczyć ścisły związek pomiędzy σ a współrzędnymi sferycznymi E i d bieguna systemu pośredniego w *CRS* (rys. 3.7).

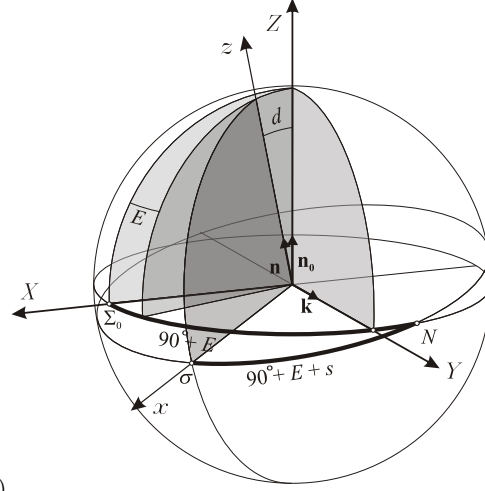
Korzystając z wzoru opisującego wektor prędkości kątowej systemu pośredniego względem *CRS*:

$$\boldsymbol{\Omega} = \dot{E}\mathbf{n}_0 - (\dot{E} + \dot{s})\mathbf{n} + \dot{d}\mathbf{k} \quad (3.25)$$

(gdzie $\boldsymbol{\Omega}$ — wektor prędkości kątowej systemu pośredniego względem *CRS*, $\mathbf{n}$, $\mathbf{k}$ — odpowiednio, wersory osi Z i Y *CRS*, a $\mathbf{n}_0$ — wersor osi



Rysunek 3.6. Zmiana położenia punktu początkowego systemu pośredniego. Definicja wielkości s .
 $s = (\widehat{\sigma N} - \widehat{\Sigma_0 N}) - (\widehat{\sigma_0 N_0} - \widehat{\Sigma_0 N_0})$



Rysunek 3.7. $\Omega = \dot{E}\mathbf{n}_0 - (\dot{E} + \dot{s})\mathbf{n} + \dot{d}\mathbf{k}$
 (przy założeniu: $\widehat{\sigma_0 N_0} - \widehat{\Sigma_0 N_0} = 0$)

z systemu pośredniego) oraz z założenia o zerowaniu się składowej z tego wektora otrzymuje się:

$$\Omega \mathbf{n} = \dot{E} \cos d - \dot{E} - \dot{s} = \dot{E}(\cos d - 1) - \dot{s} = 0 \quad (3.26)$$

skąd następnie:

$$s = \int_{t_0}^t (\cos d - 1) \dot{E} dt - (\widehat{\sigma_0 N_0} - \widehat{\Sigma_0 N_0}) \quad (3.27)$$

Inną postacią tego wzoru jest (Capitaine *et al.*, 1986):

$$s = - \int_{t_0}^t \frac{X\dot{Y} - Y\dot{X}}{1 + Z} dt - (\widehat{\sigma_0 N_0} - \widehat{\Sigma_0 N_0}) \quad (3.28)$$

gdzie X , Y , Z — są współrzędnymi pośredniego bieguna niebieskiego w niebieskim systemie odniesienia ($X = \sin d \cos E$, $Y = \sin d \sin E$, $Z = \cos d$).

Zgodnie z rezolucją B1.8 XXIV Zgromadzenia Generalnego IAU (IAU Transactions, 2001) jako początek „niebieskiego” Pośredniego Systemu Odniesienia ($IRS_{NIEBIESKI}$ — *Intermediate Reference System*) został przyjęty, zgodny z koncepcją NRO, tzw. Niebieski Efemerydalny Punkt

Początkowy *CEO* (*Celestial Ephemeris Origin*). *CEO* określony na równiku Pośredniego Bieguna Niebieskiego *CIP*, zastąpił tym samym dotychczas stosowany punkt równonocy wiosennej. Opierając się na, przyjętym przez to samo ZG IAU, modelu precesyjno-nutacyjnym IAU2000A możliwe jest także wyrażenie wielkości s w postaci rozwinięcia w szereg zawierający część potęgową oraz trygonometryczną uwzględniającą fundamentalne argumenty nutacji (Capitaine *et al.*, 2000, 2003b):

$$s(t) = -XY/2 + \sum_{i=0} s_i t^i + \sum_{i=0} \sum_k ((C_{S,i})_k \sin \alpha_k + (C_{C,i})_k \cos \alpha_k) \cdot t^i \quad (3.29)$$

3.3.3. Ziemski Efemerydalny Punkt Początkowy *TEO*, Kąt Obrotu Ziemi (*ERA*)

Koncepcja Nieobrcającego się Punktu Początkowego *NRO* znajduje szczególne zastosowanie w opisie ruchu obrotowego Ziemi oraz definicji czasu uniwersalnego. Zgodnie z uchwałą Zgromadzenia Generalnego Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki (IUGG) w Wiedniu, z 1991 r. (IAG, 1992) jako ziemski system odniesienia został przyjęty Międzynarodowy Ziemski System Odniesienia *ITRS*. *NRO* w *ITRS* realizowany jest w taki sam sposób jak ma to miejsce w wypadku *CEO* w *GCRS*, a punkt ten określany jest jako tzw. Ziemski Efemerydalny Punkt Początkowy *TEO* (Terrestrial Ephemeris Origin). *TEO* jest więc punktem początkowym „ziemskiego” Pośredniego Systemu Odniesienia (*IRS_{ZIEMSKI}*) na równiku *CIP*, spełniającym warunek *NRO* w *ITRS*. Ruch bieguna *CIP* opisywany jest w *ITRS* za pomocą parametrów ruchu bieguna — współrzędnych bieguna *CIP* w *ITRS* — oznaczanych jako x_p , y_p , i wyznaczanych w sposób ciągły przez IERS na podstawie obserwacji. Położenie i ruch *TEO* na równiku *CIP* określa się za pomocą wielkości s' będącej odpowiednikiem odnoszącej się do *CEO* wielkości s (wzór 3.28), danej wzorem:

$$s' = -\frac{1}{2} \int_{t_0}^t (y_p \dot{x}_p - x_p \dot{y}_p) dt \quad (3.30)$$

(składowa z_p przyjęta jest w tym wypadku jako równa 1, co przy wartościach x_p i y_p nie ma istotnego wpływu na wartość s').

Rezolucja B1.8 przyjęta przez XXIV Zgromadzenie Generalne IAU (IAU Transactions, 2001) zaleca aby transformacja pomiędzy Międzynarodowym Ziemskim Systemem Odniesienia (*ITRS*) a Geocentrycznym Niebieskim Systemem Odniesienia (*GCRS*) była określona poprzez położenie Pośredniego Bieguna Niebieskiego (*CIP*) w *ITRS*, poprzez położenie *CIP*

w *GCRS* oraz poprzez tzw. Kąt Obrotu Ziemi *ERA* (*Earth Rotation Angle*). *ERA*, oznaczany jest zwykle przez θ zdefiniowany został jako kąt liczony w kierunku wstecznym wzdłuż równika *CIP* pomiędzy *CEO* oraz *TEO*. Z definicji *NRO* wynika, że pochodna czasowa tak określonego *ERA* jest ściśle równa prędkości kątowej obrotu *ITRS* względem *GCRS* wokół osi bieguna *CIP*.

Jednocześnie ta sama rezolucja ZG IAU przyjęła nową definicję czasu uniwersalnego *UT1* jako liniowo proporcjonalnego do θ .

Zgodnie z przyjętymi ustaleniami, θ jako kąt godzinny *TEO* (liczony od *CEO* wzdłuż równika *CIP*) stanowi odpowiednik czasu gwiazdowego, ale związany jest wyłącznie z ruchem obrotowym Ziemi (wokół osi bieguna *CIP*). Czas gwiazdowy jako kąt godzinny punktu równonocy oprócz ruchu obrotowego związany był również z ruchem obiegowym Ziemi — ruchem ekliptyki.

3.3.4. Transformacja *ITRS* do *GCRS* — precesja/nutacja IAU2000

Jak już wspomniano w rozdziale 3.3.3 transformacja pomiędzy *ITRS* a *GCRS*, zgodnie z rezolucją IAU, określona jest poprzez położenie bieguna *CIP* w *ITRS*, poprzez położenie bieguna *CIP* w *GCRS* oraz poprzez *ERA*. Transformacja ta jest złożeniem trzech podstawowych obrotów $\mathcal{Q}(t)$, $\mathcal{R}(t)$ oraz $\mathcal{W}(t)$ i zapisywana jest formułą (McCarthy i Petit, 2003):

$$\mathbf{e}_{GCRS} = \mathcal{Q}(t) \cdot \mathcal{R}(t) \cdot \mathcal{W}(t) \cdot \mathbf{e}_{ITRS} \quad (3.31)$$

gdzie

$\mathcal{Q}(t)$ jest macierzą przejścia od *GCRS* do „niebieskiego” pośredniego systemu odniesienia (tj. pośredniego systemu odniesienia bieguna *CIP* z punktem początkowym *CEO*) — uwzględniającą precesyjno-nutacyjny ruch *CIP* w *GCRS*,

$\mathcal{R}(t)$ jest macierzą obrotową Ziemi wokół osi bieguna *CIP*, przeprowadzającą „niebieski” pośredni system odniesienia w „ziemski” pośredni system odniesienia,

$\mathcal{W}(t)$ jest macierzą przejścia od „ziemskiego” pośredniego systemu odniesienia do *ITRS* — uwzględniającą ruch bieguna *CIP* w *ITRS*.

Macierze te związane są następującymi zależnościami z parametrami opisującymi położenie bieguna *CIP*:

$$\mathcal{Q}(t) = \mathbf{R}_3(-E) \cdot \mathbf{R}_2(-d) \cdot \mathbf{R}_3(E) \cdot \mathbf{R}_3(s) \quad (3.32)$$

$$\mathcal{R}(t) = \mathbf{R}_3(-\theta) \quad (3.33)$$

$$\mathcal{W}(t) = \mathbf{R}_3(-s') \cdot \mathbf{R}_1(y_p) \cdot \mathbf{R}_3(x_p) \quad (3.34)$$

gdzie

x_p, y_p są wyznaczanymi z obserwacji przez IERS współrzędnymi bieguna *CIP* w *ITRS*,

E, d są współrzędnymi sferycznymi *CIP* w *GCRS* (rys. 3.7),

s, s' są wielkościami ustalającymi położenie *CEO* i *TEO* na równiku *CIP*,

$\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3$ są macierzami obrotów elementarnych odpowiednio wokół osi x, y i z (wzory 3.2),

W zadaniu obliczenia pozycji pozornej wykorzystywana jest wyłącznie macierz precesyjno-nutacyjna $\mathcal{Q}(t)$ przeprowadzająca Geocentryczny Niebieski System Odniesienia *GCRS* w *IRS*, będącym systemem, w którym wyrażane są pozycje prawdziwe. Zastępując sferyczne współrzędne bieguna *CIP* w *GCRS* przez współrzędne X, Y ($X = \sin d \cos E$, $Y = \sin d \sin E$) oraz mnożąc odpowiednie macierze obrotów elementarnych, wzór 3.32 można przedstawić również w postaci:

$$\mathcal{Q}(t) = \begin{pmatrix} 1 - aX^2 & -aXY & X \\ -aXY & 1 - aY^2 & Y \\ -X & -Y & 1 - a(X^2 + Y^2) \end{pmatrix} \cdot \mathbf{R}_3(s) \quad (3.35)$$

gdzie

$$a = \frac{1}{(1 + \cos d)} \approx \frac{1}{2} + \frac{1}{8}(X^2 + Y^2) \quad (3.36)$$

Zgodnie z wzorami 3.28 i 3.29 obecna we wzorze 3.35 wielkość s wyraża się również jako funkcja współrzędnych X i Y .

Wartości X oraz Y obliczane są jako sumy, zależnych od czasu, reprezentujących składnik precesyjny, wielomianów oraz reprezentujących składnik nutacyjny, szeregów zawierających część potęgową i trygonometryczną (McCarthy i Petit, 2003). Współczynniki wielomianów oraz rozwinięć szeregów, wyznaczone w oparciu o przyjęty przez XXIV ZG IAU w 2000 r. model precesyjno-nutacyjny IAU2000A (Capitaine *et al.*, 2003a), dostępne są w stabelaryzowanej postaci, jako dodatek do IERS Conventions 2003 (tab. 5.2a i 5.2b) (<ftp://main.usno.navy.mil/conv2000/chapter5>).

3.3.5. Algorytm obliczania pozycji pozornej w IRS

Proces obliczenia pozycji pozornej gwiazdy w Pośrednim Systemie Odniesienia bieguna *CIP*, na podstawie znanej barycentrycznej pozycji gwiazdy w *ICRF* (Hipparcos) wykonywany jest w kolejnych etapach: 1) przeliczenie czasów, 2) przejście z *ICRF* (Hipparcos) do *BCRF* poprzez uwzględnienie ruchu własnego gwiazdy (łącznie z uwzględnieniem prędkości radialnej), 3) przejście z *BCRF* do *GCRF* poprzez uwzględnienie paralaksy rocznej gwiazdy 4) poprawienie pozycji w *GCRF* o wpływ grawitacyjnego ugięcia światła, 5) poprawienie pozycji w *GCRF* o wpływ aberracji rocznej, 6) przejście do systemu pośredniego *CIP* poprzez uwzględnienie efektu precesyjno-nutacyjnego.

1. Czas *TCG* można obliczyć z czasu *TCB* na podstawie zależności (McCarthy i Petit, 2003; Seidelmann i Kovalevsky, 2002):

$$TCB - TCG = L_C \times (JD - 2\,443\,144.5) \times 86\,400 + c^{-2} \mathbf{v}_e(\mathbf{x} - \mathbf{x}_e) + P \quad (3.37)$$

gdzie $L_C = 1.480\,826\,8457 \times 10^{-8}$, $1 + L_C$ — współczynnik proporcjonalności skal TCG/TCB , $\mathbf{x}_e$, $\mathbf{v}_e$ — odpowiednio, barycentryczne wektory pozycji i prędkości Ziemi, $\mathbf{x}$ — barycentryczny wektor położenia obserwatora, P — składniki okresowe.

Pierwszy wyraz we wzorze 3.37 jest dominujący i np. na połowę 2006 roku jego wartość wynosi 13.785 s. Ostatni człon P odnoszący się do wyrazów okresowych nie przekracza 0.0016 s. Człon środkowy, zależny od barycentrycznego położenia i prędkości Ziemi oraz obserwatora przybiera wartości poniżej 1 s.

Mając *TCG* można obliczyć *TT* korzystając z zależności (Seidelmann i Kovalevsky, 2002):

$$TCG - TT = L_G \times (JD - 2\,443\,144.5) \times 86\,400 \quad (3.38)$$

gdzie $L_G = 6.969\,290\,134 \times 10^{-10}$ — stała definiująca.

Na połowę roku 2006 różnica *TCG* i *TT* wynosi 0.649 s.

2. Przejście z *ICRF* (Hipparcos) do *BCRF* poprzez uwzględnienie ruchu własnego gwiazdy. Jednostkowy wektor barycentryczny $\mathbf{p}_{ICRF}$ gwiazdy tworzony jest na podstawie barycentrycznej pozycji $(\alpha, \delta) =$

$(\alpha_{HIP}, \delta_{HIP})$ gwiazdy z Katalogu Hipparcos (Sękowski, 2004):

$$\mathbf{p}_{ICRF} = \begin{pmatrix} \cos \delta_0 \cos \alpha_0 \\ \cos \delta_0 \sin \alpha_0 \\ \sin \delta_0 \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

Barycentryczny wektor $\mathbf{m}_{ICRF}$ ruchu własnego gwiazdy ma postać:

$$\mathbf{m}_{ICRF} = \begin{pmatrix} -\mu_{\alpha 0} \cos \delta_0 \sin \alpha_0 - \mu_{\delta 0} \sin \delta_0 \cos \alpha_0 + V_R \pi \cos \delta_0 \cos \alpha_0 \\ \mu_{\alpha 0} \cos \delta_0 \cos \alpha_0 - \mu_{\delta 0} \sin \delta_0 \sin \alpha_0 + V_R \pi \cos \delta_0 \sin \alpha_0 \\ -\mu_{\delta 0} \cos \delta_0 + V_R \pi \sin \delta_0 \end{pmatrix} \quad (3.40)$$

gdzie $\mu_{\alpha 0}$ i $\mu_{\delta 0}$ oznaczają ruchy własne gwiazdy na stulecie juliańskie, prędkość radialna V_R wyrażona jest w jednostkach astronomicznych na stulecie juliańskie zaś paralaksa roczna π wyrażona jest w radianach.

Wektor pozycji barycentrycznej $\mathbf{p}_{BCRF}$ gwiazdy w $BCRF$ otrzymuje się z zależności

$$\mathbf{p}_{BCRF} = \mathbf{p}_{ICRF} + t \cdot \mathbf{m}_{ICRF} \quad (3.41)$$

gdzie $t = (JD_{TCB} - 2\,451\,545.0)/36\,525$.

3. Przejście z $BCRF$ do $GCRF$ dokonuje się poprzez uwzględnienie paralaksy rocznej

$$\mathbf{p}_{GCRF} = \mathbf{p}_{BCRF} - \pi \mathbf{E}_B \quad (3.42)$$

gdzie $\mathbf{E}_B$ jest barycentrycznym wektorem pozycji Ziemi.

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

$$\Delta \mathbf{p}_{graw} = \frac{2GM}{c^2 E_H} \cdot \frac{\mathbf{e}_H^E - (\mathbf{e}_{GCRF}^p \mathbf{e}_H^E) \mathbf{e}_{GCRF}^p}{1 + (\mathbf{e}_{GCRF}^p \mathbf{e}_H^E)} \quad (3.43)$$

gdzie $\mathbf{e}_{GCRF}^p$ i $\mathbf{e}_H^E$ są znormalizowanymi wektorami $\mathbf{p}_{GCRF}$ i $\mathbf{E}_H$ ($\mathbf{e}_{GCRF}^p = \mathbf{p}_{GCRF}/|\mathbf{p}_{GCRF}|$, a $\mathbf{e}_H^E = \mathbf{E}_H/|\mathbf{E}_H|$). Wektor $\mathbf{E}_H$ jest heliocentrycznym wektorem wodzącym środka mas Ziemi.

$$\mathbf{p}'_{GCRF} = \mathbf{e}_{GCRF}^p + \Delta \mathbf{p}_{graw} \quad (3.44)$$

4. Poprawienie pozycji w $GCRF$ o wpływ aberracji rocznej prowadzi do wyznaczenia właściwej pozycji $\mathbf{p}_{GCRF}''$ gwiazdy w układzie geocentrycznym poruszającym się z prędkością $\mathbf{V}$ względem prawdziwego systemu odniesienia. Pozycję tę oblicza się ze wzoru:

$$\mathbf{p}_{GCRF}'' = \left(\beta^{-1} \mathbf{p}_{GCRF}' + \mathbf{V} + \frac{(\mathbf{p}_{GCRF}' \mathbf{V}) \mathbf{V}}{1 + \beta^{-1}} \right) / (1 + \mathbf{p}_{GCRF}' \mathbf{V}) \quad (3.45)$$

gdzie wektor $\mathbf{V}$ jest liniową funkcją wektora $\mathbf{E}_B$ prędkości środka mas Ziemi względem barycentrum układu słonecznego,

$$\mathbf{V} = \dot{\mathbf{E}}_B / c = 0.005\,775\,5 \cdot \dot{\mathbf{E}}_B \quad (3.46)$$

zaś $\beta = (1 - V^2)^{-1/2}$, przy czym $V = |\mathbf{V}|$.

5. Przejście z $GCRF$ do systemu pośredniego, w którym określona jest pozycja pozorna gwiazdy odbywa się poprzez uwzględnienie efektu precesyjno-nutacyjnego

$$\mathbf{p}_{IRS} = \mathcal{Q}^T \mathbf{p}_{GCRF}'' \quad (3.47)$$

gdzie $\mathcal{Q}$ jest macierzą precesyjno-nutacyjną.

Pozycję pozorną α_{app} , δ_{app} gwiazdy otrzymuje się ostatecznie ze współrzędnych kartezjańskich wektora $\mathbf{p}_{IRS} = [x_{IRS}, y_{IRS}, z_{IRS}]^T$

$$\alpha_{app} = \arctan \left(\frac{y_{IRS}}{x_{IRS}} \right) \quad \delta_{app} = \arcsin z_{IRS} \quad (3.48)$$

4. PORÓWNANIE POZYCJI KATALOGOWYCH GWIAZD

4.1. Transformacja danych katalogowych oraz ich błędów

4.1.1. Ogólny rachunek błędów

Opracowanie astrometrycznych danych obserwacyjnych prowadzi do otrzymania wektora parametrów pozycyjnych $\mathbf{a}$ o rozmiarze $1 \times n$ wraz z odpowiadającą mu macierzą wariancyjno-kowariancyjną $\mathbf{C}(n \times n)$.

Ze statystycznego punktu widzenia $\mathbf{a}$ i $\mathbf{C}$ stanowią rozwiązanie dla zastosowanego modelu tylko przy założeniu estymacji liniowej oraz normalnego (gaussowskiego) rozkładu błędów. W wypadku danych otrzymanych z astrometrycznej misji satelitarnej Hipparcos analiza danych obserwacyjnych rzadko jednak była w zgodzie z tym założeniem. W szczególności rozkład błędów prawie nigdy nie był rozkładem gaussowskim. Najbardziej widoczną konsekwencją tego jest możliwość istnienia błędów o rozkładzie dyskretnym, które w najbardziej niekorzystnym wypadku mogą powodować błędy pozycji o wartości rzędu sekundy łuku, podczas gdy formalny błąd standardowy pozostaje nadal na poziomie milisekund (ESA, 1997). W celu oznaczenia jakości i ewentualnego odnotowania danych budzących wątpliwości, w Katalogu Hipparcos wprowadzone zostały więc dodatkowe indeksy statystyczne. Mimo powyższego oraz mimo faktu, że w praktyce nie jest możliwa pełna charakterystyka jakości poszczególnych danych, w zdecydowanej większości przypadków wartości parametrów pozycyjnych $\mathbf{a}$ oraz $\mathbf{C}$ zawarte w Katalogu Hipparcos są bardzo dobrym przybliżeniem wartości rzeczywistych.

W wypadku dowolnej transformacji wektora parametrów $\mathbf{a}$ zgodnie z formułą (ESA, 1997):

$$\hat{\mathbf{a}} = f(\mathbf{a}) \quad (4.1)$$

małe błędy parametrów transformowane są w następujący sposób:

$$\Delta \hat{a}_i = \sum_j \frac{\partial f_i}{\partial a_j} \Delta a_j \quad (4.2)$$

tj. w zapisie macierzowym:

$$\Delta \hat{\mathbf{a}} = \mathbf{J}_f \Delta \mathbf{a} \quad (4.3)$$

gdzie $\mathbf{J}_f$ jest jacobianem transformacji f

$$[\mathbf{J}]_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial a_j} \quad (4.4)$$

Przyjmując, że $\Delta \mathbf{a}$ jest różnicą pomiędzy prawdziwą wartością wektora parametrów i jego wartością estymowaną oraz że wartość oczekiwana $E(\Delta \mathbf{a}) = 0$, a $\mathbf{C} = E(\Delta \mathbf{a} \Delta \mathbf{a}^T)$, zgodnie z wzorem 4.3 wartość oczekiwana estymatora jest również równa 0, a

$$\hat{\mathbf{C}} = \mathbf{J}_f \mathbf{C} \mathbf{J}_f^T \quad (4.5)$$

Wzór 4.5 jest podstawowym wzorem propagacji błędów stosowanym w transformacji parametrów pozycyjnych gwiazdy.

4.1.2. Transformacja epoki katalogu

Transformacja współrzędnych niebieskich, od epoki katalogowej do epoki zadanej, w najprostszym ujęciu wyraża się wzorami:

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_0 + (T - T_0) \mu_{\alpha*0} \sec \delta_0 \\ \delta &= \delta_0 + (T - T_0) \mu_{\delta_0} \end{aligned} \quad (4.6)$$

gdzie α , δ oraz $\mu_{\alpha*}$, μ_{δ} to odpowiednio rektascensja i deklinacja oraz odpowiadające im ruchy własne, T_0 — epoka katalogu, T — epoka zadana, a $\sec \delta_0$ — czynnik kompensujący obecność $\cos \delta_0$ w wielkości $\mu_{\alpha*0}$.

Mimo, że nie jest to najlepszy model ruchu gwiazd na sferze niebieskiej — opisuje on ruch po spirali zbiegającej w kierunku jednego z biegunów niebieskich, podczas gdy rzeczywisty ruch gwiazd odbywa się po łukach kół wielkich — błędy wynikające z jego stosowania są na ogół nieznaczne i osiągają duże wartości wyłącznie w wypadku gwiazd położonych blisko biegunów lub bardzo długich interwałów pomiędzy epokami. Równania 4.6 nie powinny być jednak używane w zastosowaniach ogólnych, chociaż są na ogół całkowicie wystarczające we wstępnym szacowaniu zarówno parametrów pozycyjnych jak i ich błędów na zadaną epokę.

Niewielkie zmiany ruchów własnych oraz paralaksy są w modelu pomijane przez co pełen wektor parametrów pozycyjnych gwiazdy oraz odpowiadający transformacji jacobian (wzór 4.4) można przedstawić w postaci:

$$\begin{aligned} a_1 &= \Delta \alpha_* = \Delta \alpha \cos \delta_0 = t \times \mu_{\alpha*0} \\ a_2 &= \Delta \delta = t \times \mu_{\delta_0} \\ a_3 &= \pi_0 \\ a_4 &= \mu_{\alpha*0} \\ a_5 &= \mu_{\delta_0} \end{aligned} \quad (4.7)$$

oraz

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & t \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

gdzie $t = T - T_0$.

Błędy pozycji na epokę T , na podstawie z wzoru 4.5 wyrażają się wzorami:

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha*}^2 &= [\sigma_{\alpha*}^2 + 2t\rho_{\alpha*}^{\mu_{\alpha*}}\sigma_{\alpha*}\sigma_{\mu_{\alpha*}} + t^2\sigma_{\alpha*}^2]_0 \\ \sigma_{\delta}^2 &= [\sigma_{\delta}^2 + 2t\rho_{\delta}^{\mu_{\delta}}\sigma_{\delta}\sigma_{\mu_{\delta}} + t^2\sigma_{\delta}^2]_0 \end{aligned} \quad (4.9)$$

gdzie $\sigma_{\alpha*}$, σ_{δ} , $\sigma_{\mu_{\alpha*}}$, $\sigma_{\mu_{\delta}}$ to, odpowiednio, błędy pozycji i ruchu własnego gwiazdy w rektascensji i deklinacji, a $\rho_{\alpha*}^{\mu_{\alpha*}}$ i $\rho_{\delta}^{\mu_{\delta}}$ to współczynniki korelacji pozycji i ruchu własnego, odpowiednio, w rektascensji i deklinacji, w epoce katalogu.

4.1.3. Standardowy model ruchu gwiazdy

W epoce odniesienia T_0 położenie i ruch gwiazdy opisywane są przez 6 parametrów pozycyjnych. Są to:

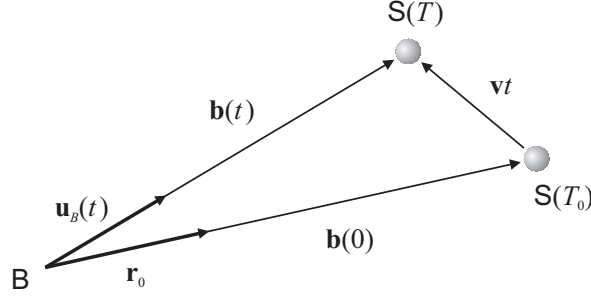
- kierunek w barycentrycznym układzie odniesienia — rektascensja α_0 i deklinacja δ_0 ,
- paralaksa roczna π_0 (będąca miarą odległości do gwiazdy — $[parsek] \approx 1000/\pi_0 [mas]$)
- zmiany kierunku w układzie barycentrycznym — ruch własny w rektascensji $\mu_{\alpha*0} = \mu_{\alpha0} \cos \delta$ i ruch własny w deklinacji $\mu_{\delta0}$
- prędkość radialna V_{R0}

Pozycję gwiazdy w $BCRS$ można przedstawić za pomocą jednostkowego wektora $\mathbf{r}_0$:

$$\mathbf{r}_0 = \begin{pmatrix} \cos \delta_0 \cos \alpha_0 \\ \cos \delta_0 \sin \alpha_0 \\ \sin \delta_0 \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Barycentryczny wektor gwiazdy w chwili $t = T - T_0$ dany jest wówczas wzorem:

$$\mathbf{b}(t) = \mathbf{b}(0) + \mathbf{v}t \quad (4.11)$$



Rysunek 4.1. Definicja barycentrycznego wersora kierunku $\mathbf{u}_B(t)$ gwiazdy poruszającej się w przestrzeni z jednostajną prędkością

gdzie $\mathbf{b}(0) = \mathbf{r}_0 A / \pi_0$ (A — jednostka astronomiczna) jest wektorem barycentrycznej pozycji gwiazdy na epokę katalogu, a $\mathbf{v}$ jest stałą prędkością przestrzenną gwiazdy (rys. 4.1). Barycentryczny znormalizowany wektor kierunkowy gwiazdy na epokę T dany jest wzorem $\mathbf{u}_B(t) = \|\mathbf{b}(t)\| = \|\mathbf{b}(0) + \mathbf{v}t\|$ ²⁾, występowanie paralaksy w mianowniku wyrażenia na $\mathbf{b}(0)$ powoduje jednak, że (dla uniknięcia osobliwości w wypadku $\pi = 0$) lepszą formą tego wzoru jest (ESA, 1997):

$$\mathbf{u}_B(t) = \left\| |\mathbf{b}(0)| \cdot (\mathbf{r}_0 + \mathbf{v}|\mathbf{b}(0)|^{-1}t) \right\| = \|\mathbf{r}_0 + \mathbf{v}(\pi_0/A)t\| \quad (4.12)$$

Czynnik normalizujący jest w tym wypadku bardzo bliski jedności.

Wektor ruchu własnego w płaszczyźnie prostopadłej do $\mathbf{r}_0$ dany jest wzorem:

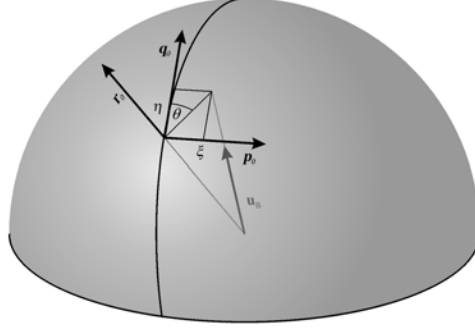
$$\boldsymbol{\mu}_0 = \mathbf{p}_0 \mu_{\alpha*0} + \mathbf{q}_0 \mu_{\delta 0} \quad (4.13)$$

gdzie $\mathbf{p}_0$ i $\mathbf{q}_0$ to wersory w płaszczyźnie prostopadłej do $\mathbf{r}_0$ (rys. 4.2).

$$\mathbf{p}_0 = \begin{pmatrix} -\sin \alpha_0 \\ \cos \alpha_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{q}_0 = \begin{pmatrix} -\sin \delta_0 \cos \alpha_0 \\ -\sin \delta_0 \sin \alpha_0 \\ \cos \delta_0 \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

Trzy ortogonalne wersory $[\mathbf{p}_0, \mathbf{q}_0, \mathbf{r}_0]$ zwane są „triadą normalną”.

²⁾ operacja $\|\cdot\|$ oznacza tu normalizację wektora



Rysunek 4.2. Ortogonalne wersory $\mathbf{p}_0$ i $\mathbf{q}_0$ rozpinające płaszczyznę prostopadłą do $\mathbf{r}_0$ zorientowane są, odpowiednio w lokalnych kierunkach $+\alpha$ i $+\delta$. (η, ξ) są lokalnymi, prostokątnymi współrzędnymi rzutu barycentrycznego wersora $\mathbf{u}_B(t)$ gwiazdy na płaszczyznę prostopadłą do $\mathbf{r}_0$

Zapisując całkowity wektor prędkości gwiazdy w przestrzeni jako $\mathbf{v} = \mu_0 A / \pi_0 + \mathbf{r}_0 V_{R0}$, równanie 4.12 przyjmuje postać:

$$\mathbf{u}_B(t) = \|\mathbf{r}_0 + (\mathbf{p}_0 \mu_{\alpha*0} + \mathbf{q}_0 \mu_{\delta 0} + \mathbf{r}_0 \zeta_0)t\| = \|\mathbf{r}_0(1 + \zeta_0)t + \mu_0 t\| \quad (4.15)$$

gdzie

$$\zeta_0 = V_{R0} \pi_0 / A \quad (4.16)$$

jest względną zmianą odległości do gwiazdy na rok.

4.1.4. Transformacja epoki katalogu w ujęciu ścisłym

W ścisłym ujęciu transformacja parametrów pozycyjnych (w tym współrzędnych niebieskich) od epoki katalogu do epoki zadanej, oparta jest na przedstawionym w rozdziale 4.1.3 standardowym modelu ruchu gwiazdy. Ponieważ podstawowym założeniem tego modelu jest stałość prędkości gwiazdy w trójwymiarowej przestrzeni, w systemie *BCRS*, uwzględnić należy wszystkie 6 parametrów pozycyjnych, tj. α , δ , $\mu_{\alpha*}$, μ_{δ} , π_0 oraz prędkość radialną V_R gwiazdy. Wektor parametrów pozycyjnych $\mathbf{a}$ jest w tym wypadku wektorem o 6 składowych, a odpowiadająca mu macierz wariancyjno-kowariancyjna $\mathbf{C}$ ma wymiar 6×6 .

Ze względów praktycznych prędkość radialna V_{R0} reprezentowana jest (zgodnie z wzorem 4.16) przez wielkość $\zeta_0 = V_{R0} \pi_0 / A$ [*mas/rok*], gdzie V_{R0} — prędkość radialna w [*km/s*], π_0 — paralaksa [*mas*], $A = 4.740\,470\,446$

— jednostka astronomiczna w jednostkach $[km \text{ rok}/s]$. Transformacja wersora pozycji barycentrycznej, a co za tym idzie, współrzędnych niebieskich α i δ dana jest wzorem 4.15.

Zgodnie z wcześniejszym wzorem 4.12:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_B(t) &= \mathbf{b}(t)|\mathbf{b}(t)|^{-1} = (\mathbf{b}(0) + \mathbf{v}t) |\mathbf{b}(t)|^{-1} = \\ &= |\mathbf{b}(0)| |\mathbf{b}(t)|^{-1} (\mathbf{r}_0 + \mathbf{v}|\mathbf{b}(0)|^{-1}t) \end{aligned} \quad (4.17)$$

Wprowadzając czynnik normalizujący:

$$\begin{aligned} f &= |\mathbf{b}(0)| |\mathbf{b}(t)|^{-1} = |\mathbf{r}_0(1 + \zeta_0 t) + \boldsymbol{\mu}_0 t|^{-1} = \\ &= [1 + 2\zeta_0 t + (\mu_0^2 + \zeta_0^2)t^2]^{-1/2} \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} |\mathbf{r}_0(1 + \zeta_0 t) + \boldsymbol{\mu}_0 t| &= \\ &= \left((\mathbf{r}_0(1 + \zeta_0 t) + \boldsymbol{\mu}_0 t) (\mathbf{r}_0(1 + \zeta_0 t) + \boldsymbol{\mu}_0 t) \right)^{1/2} = \\ &= \left((1 + \zeta_0 t)^2 + \mu_0^2 t^2 \right)^{1/2} = \\ &= \left(1 + 2\zeta_0 t + \zeta_0^2 t^2 + \mu_0^2 t^2 \right)^{1/2} = \\ &= \left(1 + 2\zeta_0 t + (\zeta_0^2 + \mu_0^2)t^2 \right)^{1/2} \end{aligned}$$

wzór 4.15 można również przedstawić w postaci:

$$\mathbf{u}_B(t) = [\mathbf{r}_0(1 + \zeta_0 t) + \boldsymbol{\mu}_0 t] \times f \quad (4.19)$$

gdzie $t = T - T_0$, $\zeta_0 = V_{R0}\pi_0/A$, $\mathbf{r}_0$ — pierwszy wersor triady normalnej (wzór 4.10), $\boldsymbol{\mu}_0$ — wektor ruchu własnego gwiazdy ($|\boldsymbol{\mu}_0|^2 = \mu_0^2 = \mu_{\alpha*0}^2 + \mu_{\delta 0}^2$) rozpięty na dwóch pozostałych wersorach triady normalnej (wzór 4.13).

Ponieważ czynnik f spełnia również zależność $f = |\mathbf{b}(0)| |\mathbf{b}(t)|^{-1}$, gdzie $\mathbf{b}(0)$ i $\mathbf{b}(t)$ są wektorami barycentrycznymi gwiazdy w epoce T_0 i T , transformacja paralaksy gwiazdy przy przejściu od T_0 do T dana jest wzorem:

$$\pi = \pi_0 f \quad (4.20)$$

Różniczkowanie równania (wzór 4.17) pozwala na wyznaczenie równań transformacji ruchu własnego gwiazdy:

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{d\mathbf{u}_B}{dt} = [\boldsymbol{\mu}_0(1 + \zeta_0 t) - \mathbf{r}_0\mu_0^2 t] \times f^3 \quad (4.21)$$

przy czym transformację prędkości radialnej opisuje się wzorem:

$$\zeta = \frac{db}{dt} \frac{\pi}{A} = [\zeta_0 + (\mu_0^2 + \zeta_0^2)t] \times f^2 \quad (4.22)$$

W epoce katalogu, barycentryczny znormalizowany wektor gwiazdy $\mathbf{u}_0 = \mathbf{u}_B(t = 0)$ równy jest pierwszemu wersorowi triady normalnej $\mathbf{r}_0$ (wzór 4.10), natomiast wektor ruchu własnego gwiazdy $\boldsymbol{\mu}_0$ rozpięty jest na dwóch pozostałych wersorach triady normalnej zgodnie z wzorem 4.14.

Współrzędne α i δ na epokę T otrzymuje się ze składowych wersora $\mathbf{u}_B(t)$ wg wzorów:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{u_1}{u_2}\right) \quad \delta = \arctan\left(\frac{u_3}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2}}\right) \quad (4.23)$$

Wartości składowych ruchu własnego otrzymuje się ze składowych wektora ruchu $\boldsymbol{\mu}$ poprzez ich rzutowanie na kierunki wersorów triady normalnej tj.:

$$\mu_{\alpha*} = \mathbf{p}^T \boldsymbol{\mu} \quad \mu_{\delta} = \mathbf{q}^T \boldsymbol{\mu} \quad (4.24)$$

gdzie $\mathbf{p}$ i $\mathbf{q}$ dane są wzorami 4.14 w odniesieniu do α i δ na epokę T .

Przedstawiony, oparty na standardowym modelu ruchu gwiazdy, algorytm transformacji parametrów pozycyjnych od epoki T_0 do epoki T jest ścisły i odwracalny. Zastosowanie więc tych samych równań transformacji przy przejściu od epoki T do katalogowej epoki T_0 odtworzy pierwotne, katalogowe parametry pozycyjne gwiazdy. Algorytm ten został zaimplementowany w pakiecie procedur Celestia 2000 będących częścią Katalogu Hipparcos (dostępnych m. in. pod adresem: <http://cdsweb.u-strasbg.fr/viz-bin/ftp-index?ftp/cats/more/HIP/cdroms/src>).

4.2. Katalog Hipparcos a katalog FK5 – niebieskie układy odniesienia *HCRF* i FK5

Przedstawiony już w rozdziale 2.3.2 Katalog Hipparcos zawiera dane astrometryczne 118 218 gwiazd. Są to przede wszystkim pozycje, ruchy własne i paralaksy trygonometryczne gwiazd wraz ze współczynnikami odpowiadających im macierzy wariancyjno-kowariancyjnych, określającymi błędy wyznaczenia poszczególnych wielkości. Podkreślenia wymaga fakt, że Katalog Hipparcos jest pierwszym katalogiem zawierającym paralaksy gwiazd obserwowane oraz opracowane łącznie z ich pozycjami i ruchami

własnymi, co sprawia, że współrzędne gwiazd w nim zawarte są współrzędnymi ściśle barycentrycznymi. Pięć parametrów pozycyjnych zamieszczonych w katalogu opisuje chwilowe położenie i ruch gwiazdy względem Barycentrycznego Niebieskiego Układu Odniesienia (*BCRF*) w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku obserwacji. Szósty parametr, niezbędny do pełnego opisu — prędkość radialna — otrzymywany w wyniku obserwacji widm nie jest w katalogu uwzględniony.

Dane zawarte w Katalogu Hipparcos określone są na epokę bardzo bliską średniej epoce obserwacji wykorzystanych przy jego tworzeniu tj. J1991.25. Porównanie ich z danymi z innych katalogów (np. FK5) wymaga więc określenia odpowiedniej procedury transformacji. Do przeliczania pozycji oraz ruchów własnych gwiazd przyjęto tę samą procedurę jaką wykorzystywano w opracowaniu danych obserwacyjnych misji Hipparcos w celu sprowadzenia ich do wspólnej epoki J1991.25. Procedura ta opiera się na tzw. „standardowym modelu ruchu gwiazdy” (rozdz. 4.1.3), zakładającym jednostajność i prostoliniowość ruchu gwiazdy w przestrzeni. We wszystkich porównaniach danych katalogowych Hipparcos i FK5 w różnych epokach — wykonanych przez autora i prezentowanych w tym rozdziale — nieodpowiadających epokom katalogów, ta sama procedura transformacji stosowana była dla danych z obu katalogów.

Katalog Hipparcos realizuje Międzynarodowy Niebieski Układ Odniesienia (*ICRF*) w zakresie widma optycznego. Realizacja ta, określana także jako Hipparcos Celestial Reference Frame (*HCRF*), zastępuje stosowany dotychczas, oparty na średnim równiku niebieskim i dynamicznym punkcie równonocy na epokę J2000.0, układ (system) katalogu FK5. Porównanie danych katalogowych Hipparcos i FK5 daje zatem możliwość określenia relacji pomiędzy systemami *ICRF* i FK5.

Wszystkie gwiazdy zawarte w katalogu FK5 zawarte są również w Katalogu Hipparcos. Daje to możliwość bezpośredniego porównania odpowiednich pozycji i ruchów własnych gwiazd w obu katalogach. Opis relacji pomiędzy układem FK5 oraz *HCRF* jest utrudniony przede wszystkim stosunkowo niewielką liczbą gwiazd zawartą w katalogu FK5 (1535). Trudności te powiększa dodatkowo złożona charakterystyka systematycznych, strefowych niejednorodności pozycji FK5, istnienie w katalogu FK5 zależności pozycji od jasności oraz typu widmowego gwiazdy (tzw. równanie jasności oraz równanie barwy), a także zaburzający efekt ruchu własnego niezidentyfikowanych gwiazd podwójnych.

Przyjmując oznaczenia (α_F , δ_F) dla barycentrycznych współrzędnych katalogowych FK5 oraz (α_H , δ_H) dla barycentrycznych współrzędnych

Hipparcos, w tej samej epoce, oraz zakładając względny, wzajemny obrót obu układów, różnicę współrzędnych w przybliżeniu małych kątów wyrazić można wzorami:

$$(\alpha_F - \alpha_H) \cos \delta = -\varepsilon_{0x} \sin \delta \cos \alpha - \varepsilon_{0y} \sin \delta \sin \alpha + \varepsilon_{0z} \cos \delta \quad (4.25a)$$

$$\delta_F - \delta_H = \varepsilon_{0x} \sin \alpha - \varepsilon_{0y} \cos \alpha \quad (4.25b)$$

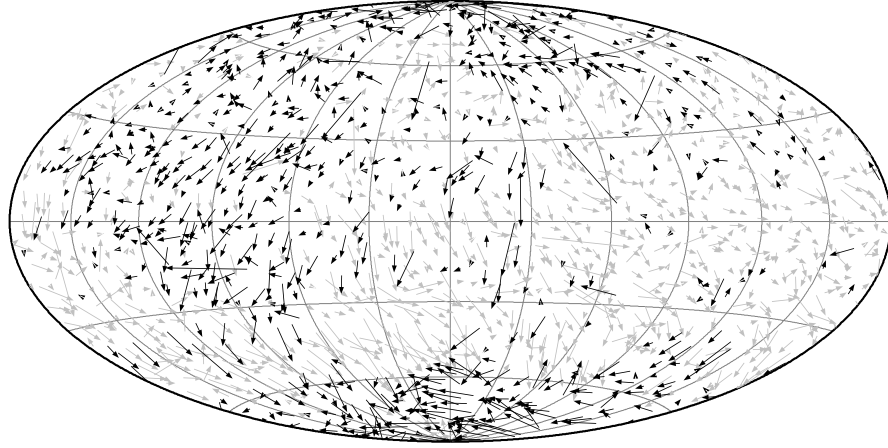
gdzie wektor parametrów obrotowych pozycji $\boldsymbol{\varepsilon}_0 = (\varepsilon_{0x}, \varepsilon_{0y}, \varepsilon_{0z})$ jest wektorem względnego obrotu układów (Lindgren i Kovalevsky, 1995). Różnice w ruchu własnym gwiazd opisywane są zaś, odpowiednio, przez:

$$\begin{aligned} (\mu_{\alpha*0})_F - (\mu_{\alpha*0})_H &= -\omega_x \sin \delta \cos \alpha - \omega_y \sin \delta \sin \alpha + \omega_z \cos \delta \\ (\mu_\delta)_F - (\mu_\delta)_H &= \omega_x \sin \alpha - \omega_y \cos \alpha \end{aligned} \quad (4.26)$$

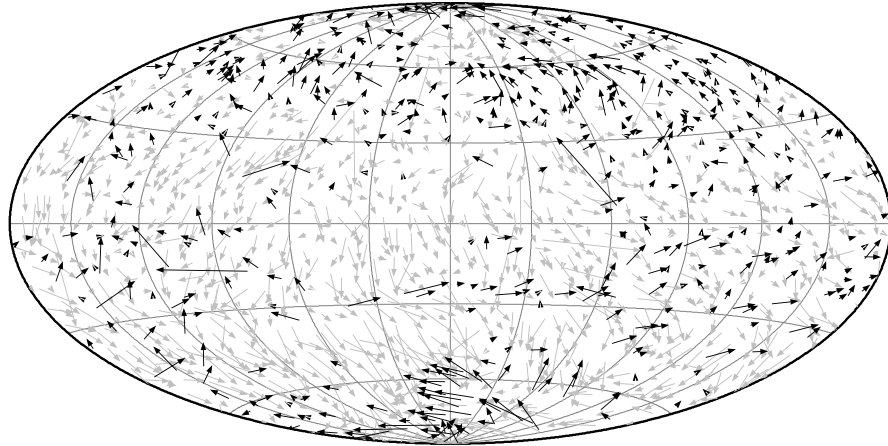
gdzie $\boldsymbol{\omega}_0 = (\omega_{0x}, \omega_{0y}, \omega_{0z})$ jest wektorem parametrów obrotowych ruchów własnych.

Parametry względnego obrotu, $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ oraz $\boldsymbol{\omega}_0$, układów, otrzymuje się na podstawie różnic pomiędzy danymi katalogowymi FK5 i Hipparcos za pomocą metody najmniejszych kwadratów. Wynik wyznaczenia tych parametrów, w oparciu o pełen zbiór gwiazd zawartych jednocześnie w obu katalogach, jest jednak silnie zaburzony przez wpływ błędów lokalnych. Różnice współrzędnych spowodowane strefowymi błędami systematycznymi w wypadku FK5 osiągają bowiem wartość do 150 *mas*. Rysunki 4.3 oraz 4.4 przedstawiają wynik bezpośredniego porównania pozycji katalogowych FK5 oraz Hipparcos z wyróżnieniem przemieszczeń odpowiednio w rektascensji i deklinacji. Wyraźnie widoczne są obszary nieba, w których różnice odpowiednich współrzędnych katalogowych mają charakter systematyczny (przybierają, wyróżnione, dodatnie lub ujemne wartości).

W celu uwzględnienia efektów strefowych, parametry $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ i $\boldsymbol{\omega}_0$ wyznaczone były z zastosowaniem rozkładu pola wektorów $[(\alpha_F - \alpha_H) \cos \delta, \delta_F - \delta_H]$ i $[(\mu_{\alpha*})_F - (\mu_{\alpha*})_H, (\mu_\delta)_F - (\mu_\delta)_H]$ na wektorowe szeregi harmoniczne, ze składowymi pierwszego stopnia reprezentującymi globalny względny obrót układów realizowanych przez katalogi FK5 i Hipparcos oraz składowymi wyższych stopni reprezentującymi różnice lokalne (ESA, 1997; Mignard i Fréschlé, 2000; Schwan, 2001a). Zastosowanie tej metody pozwoliło na wyznaczenie następujących wartości parametrów globalnego, względnego obrotu układów FK5 i *HCRF* na epokę J1991.25 (ESA, 1997, rozdz. 1.5.7):



Rysunek 4.3. Przemieszczenia gwiazd FK5 – Hipparcos (epoka J2000.0) oraz ich rozkład na sferze niebieskiej. Wyróżniono przemieszczenia w rektascensji ($\Delta\alpha$) z ustalonym znakiem. Wyraźnie widoczne są obszary, w których różnice $\Delta\alpha_*$ mają systematycznie dodatnie (ciemniejsze) i ujemne (jaśniejsze) wartości. W strefie równikowej wektory przedstawiono w skali $\approx 1\text{ cm} : 400\text{ mas}$ (por. rys. 4.7c)



Rysunek 4.4. Przemieszczenia gwiazd FK5 – Hipparcos (epoka J2000.0) oraz ich rozkład na sferze niebieskiej. Wyróżniono przemieszczenia w deklinacji ($\Delta\delta$) z ustalonym znakiem. Wyraźnie widoczne są obszary, w których różnice $\Delta\delta$ mają systematycznie dodatnie (ciemniejsze) i ujemne (jaśniejsze) wartości. W strefie równikowej wektory przedstawiono w skali $\approx 1\text{ cm} : 400\text{ mas}$ (por. rys. 4.8c)

$$\begin{array}{ll}
\varepsilon_{0x} = -18.8 \pm 2.3 \text{ mas} & \omega_x = -0.10 \pm 0.10 \text{ mas/rok} \\
\varepsilon_{0y} = -12.3 \pm 2.3 \text{ mas} & \omega_y = +0.43 \pm 0.10 \text{ mas/rok} \\
\varepsilon_{0z} = +16.8 \pm 2.3 \text{ mas} & \omega_z = +0.88 \pm 0.10 \text{ mas/rok}
\end{array}$$

Wynik ten oparty jest na różnicach danych katalogowych wszystkich 1535 gwiazd katalogu FK5. Eliminacja gwiazd, o których dziś, na podstawie danych misji Hipparcos, wiadomo, że stanowią układy podwójne, bądź są o to podejrzewane, nie prowadzi do znacząco różnych wyników (trzecia kolumna tabeli 4.1). Podobne obliczenia wykonane w oparciu o pozycje gwiazd wybranych ze względu na ich jasność dają zaś wyniki nieco odmienne, z jednej strony ilustrując wpływ „równania jasności” na pozycje katalogowe FK5, z drugiej, pokazując problemy z jakimi wiąże się precyzyjna definicja relacji pomiędzy systemami (ESA, 1997, rozdz. 1.5.7).

Dokładna analiza porównawcza danych pozycyjnych zawartych w katalogach FK5 i Hipparcos wiąże się również z wyborem wspólnej epoki w jakiej dane są porównywane i do jakiej należy je ewentualnie zredukować. Średnią epoką katalogu FK5³⁾ jest J1949.4. Jest to epoka uśredniona po wszystkich zawartych w katalogu gwiazdach oraz obydwu współrzędnych (α , δ). Średnie epoki dla współrzędnych (α , δ) różnią się jednak znacznie i wynoszą odpowiednio J1955.0 i J1945.0. Dodatkowo epoki poszczególnych gwiazd (średnie epoki w jakich wykonywane były wyznaczenia ich parametrów pozycyjnych) różnią się między sobą w przedziale około 50 lat i w systematyczny sposób zależą od pozycji gwiazdy oraz jej wielkości gwiazdowej (Schwan, 2001a). Średnią epoką Katalogu Hipparcos jest J1991.25, przy czym z uwagi na stosunkowo krótki czas trwania misji Hipparcos (3 i pół roku) oraz jej charakter (jednoczesny pomiar wszystkich parametrów pozycyjnych z jednorodnym pokryciem całego nieba), jest ona znacznie bliższa indywidualnym epokom wyznaczeń parametrów poszczególnych gwiazd. Epoki indywidualne nie wykazują, przy tym, znaczących, systematycznych zależności strefowych.

Tabela 4.1 zawiera zestawienie parametrów względnego globalnego obrotu systemów FK5 i Hipparcos wyznaczone przez porównanie danych wyselekcjonowanych gwiazd (w obu wypadkach odrzuconych zostało kilkadziesiąt gwiazd podwójnych), zredukowanych do epoki J1949.4 katalogu FK5 (Schwan, 2001a) oraz do epoki J1991.25 Katalogu Hipparcos (Mignard i Froeschlé, 2000).

³⁾ Por. przypis na stronie 26.

Tabela 4.1. Zestawienie parametrów względnego obrotu układów FK5 i Hipparcos

	J1949.4 ^a	J1949.4 ^b	J1991.25 ^c	J2000.0 ^c
$\varepsilon_x [mas]$	-3.01	-4.75	-17.3	-19.9
$\varepsilon_y [mas]$	-41.00	-39.41	-14.3	-9.1
$\varepsilon_z [mas]$	-19.12	-12.50	+16.8	+22.9
$\omega_x [mas/rok]$	-0.34	-0.30	-0.30	
$\omega_y [mas/rok]$	+0.74	+0.60	+0.60	
$\omega_z [mas/rok]$	+0.89	+0.70	+0.70	

^a (Schwan, 2001a)^b zredukowany do epoki 1949.4 wynik z 3 kolumny tabeli (Schwan, 2001a)^c (Mignard i Fröeschlé, 2000)

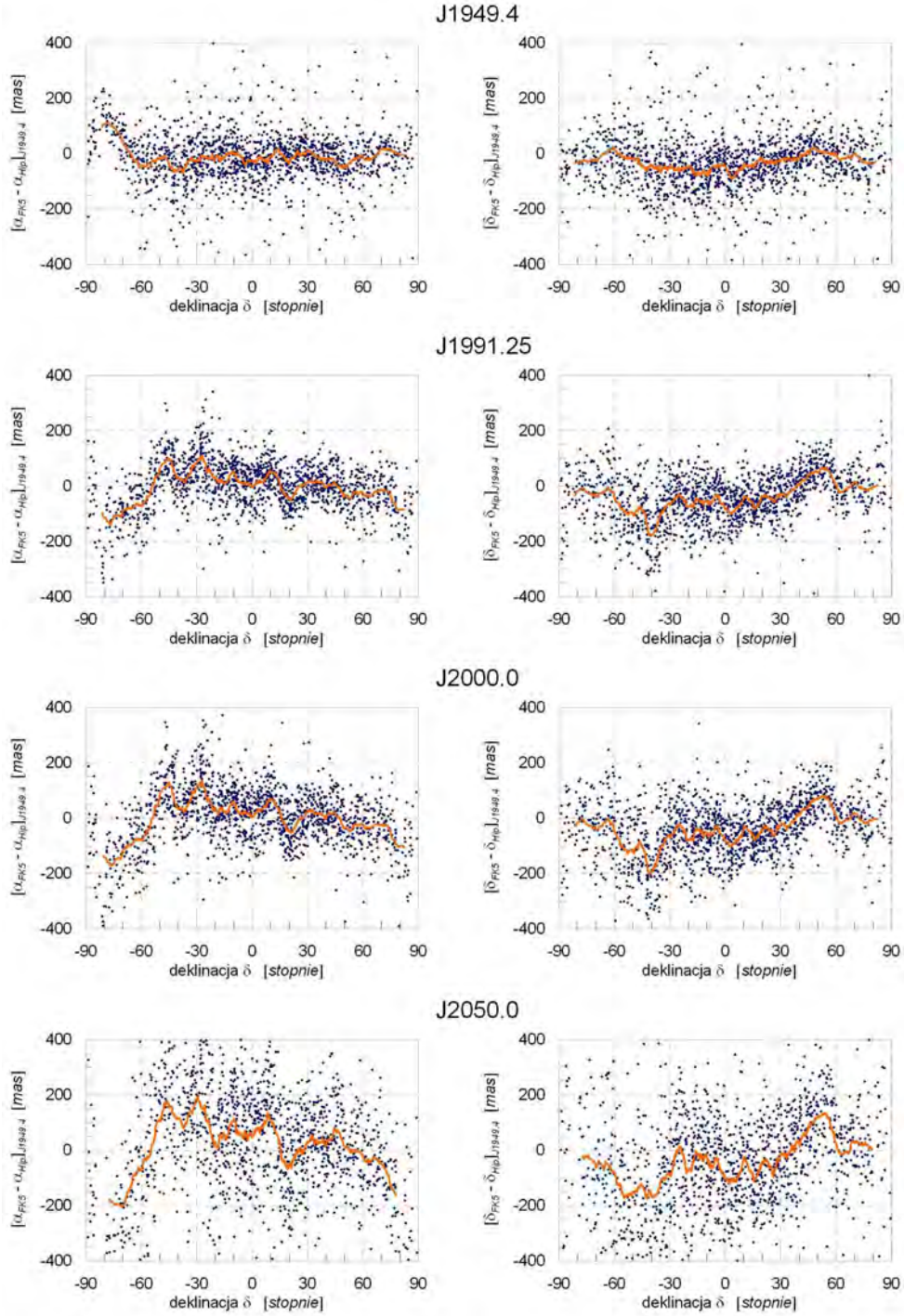
Na wykresach ze str. 76 i 77 przedstawione zostały różnice w rektascensji $(\Delta\alpha_*)_{F-H}$ i deklinacji $(\Delta\delta)_{F-H}$ odpowiednio vs δ (rys. 4.5) oraz vs α (rys. 4.6), w średnich epokach katalogów: J1949.4, J1991.25, w epoce standardowej J2000.0 oraz w wybranej epoce przyszłej J2050.0. Punkty na wykresach odpowiadają różnicom odpowiednich współrzędnych FK5 i Hipparcos dla poszczególnych gwiazd; linia ciągła przedstawia przebieg średniej ruchomej, wyznaczanej na przedziale 50 gwiazd. Wartości całkowitych średnich różnic pozycji $((\Delta\alpha_*)^2 + (\Delta\delta)^2)^{1/2}$ w poszczególnych epokach wynoszą odpowiednio: $110 \pm 89 mas$, $114 \pm 70 mas$, $133 \pm 83 mas$, $213 \pm 138 mas$. Analiza wykresów prowadzi do następujących wniosków:

- a) Rozrzuty różnic, zarówno deklinacji jak i rektascensji gwiazd nieba południowego są wyraźnie większe od tych dla gwiazd nieba północnego. Występuje widoczna zależność $(\Delta\alpha_*)_{F-H}$ i $(\Delta\delta)_{F-H}$ od deklinacji (rys. 4.5).

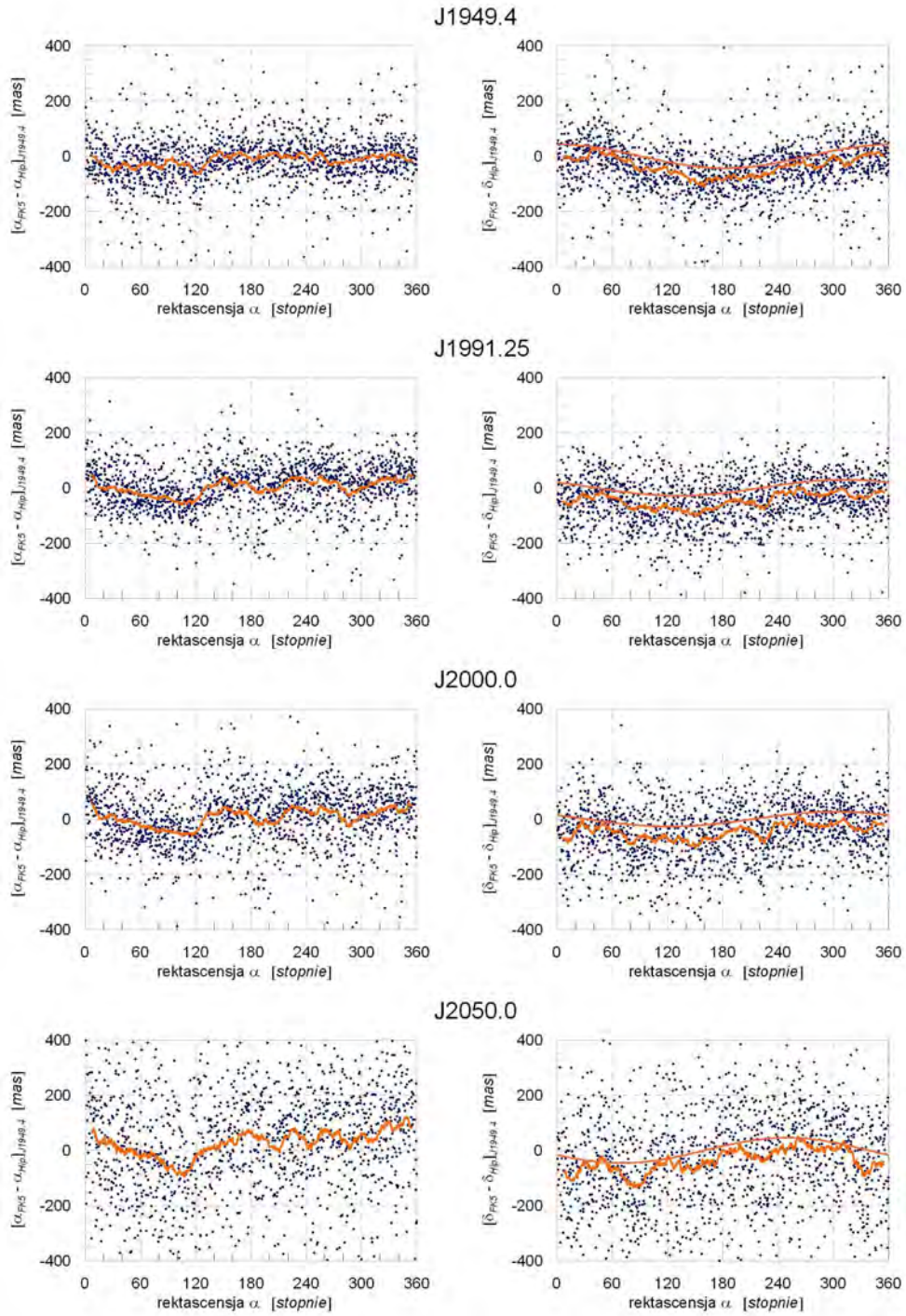
Większe rozrzuty różnic dla gwiazd nieba południowego wynikają z niejednorodności obserwacji służących do opracowania katalogu FK5 — materiał obserwacyjny pochodzący z południowej części nieba był znacznie uboższy.

- b) Nie ma wyraźnej zależności rozrzutów różnic $(\Delta\alpha_*)_{F-H}$ i $(\Delta\delta)_{F-H}$ od rektascensji — wykresy z rys. 4.6 przedstawiają mniej więcej podobne rozrzuty różnic dla wszystkich wartości α .

Nieznaczne „wygięcie” linii średniej ruchomej $(\Delta\delta)_{F-H}$ vs α widoczne zwłaszcza dla epoki J1949.4 spowodowane jest przede wszystkim względnym obrotem układów odniesienia. Ciągłą, regularną linią



Rysunek 4.5. Różnice $(\Delta\alpha_*)_{F-H}$ i $(\Delta\delta)_{F-H}$ vs δ . Ciągłą linią zaznaczono średnie ruchome



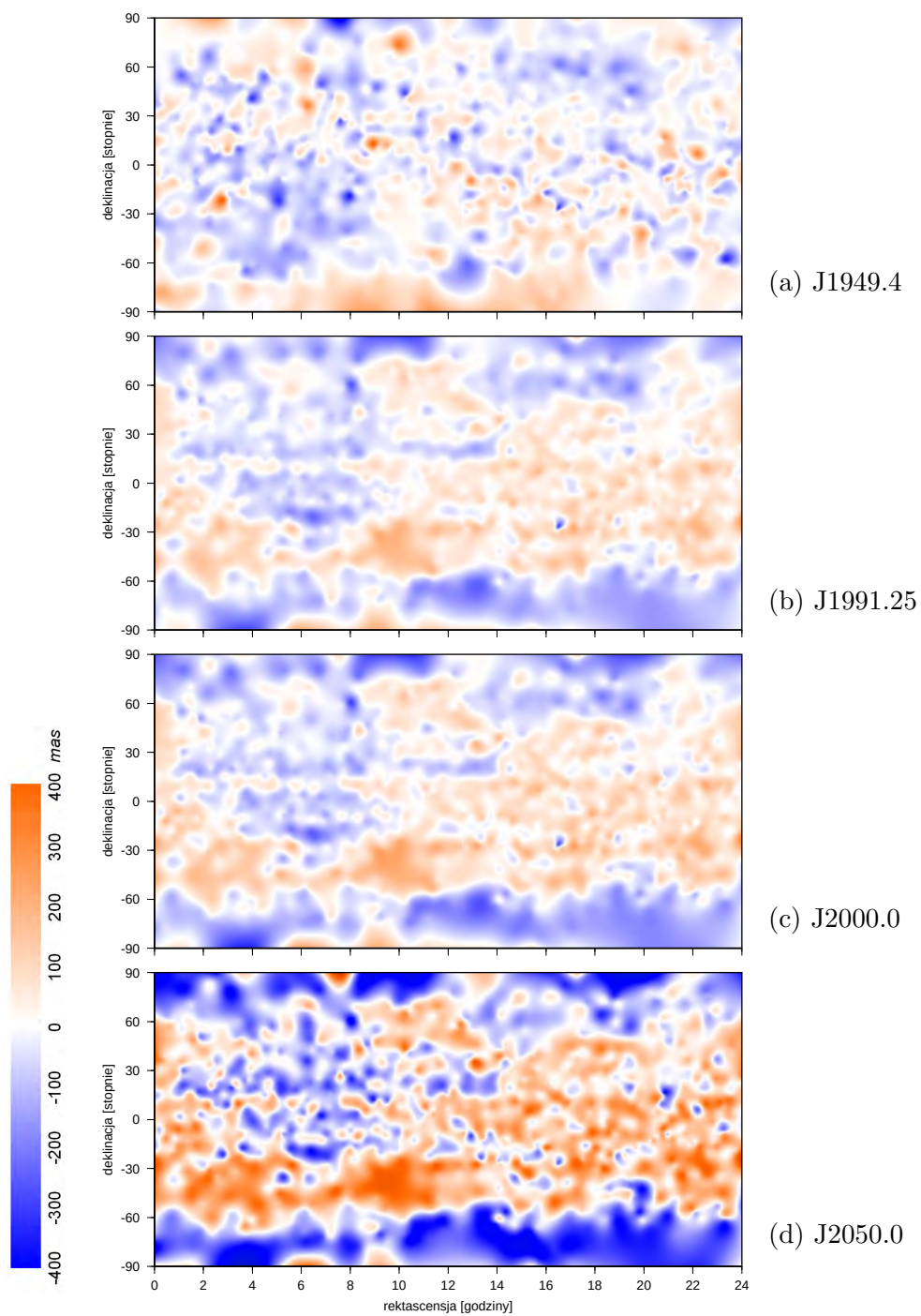
Rysunek 4.6. Różnice $(\Delta\alpha_*)_{F-H}$ i $(\Delta\delta)_{F-H}$ vs α . Ciągłą linią zaznaczono średnie ruchome oraz linie wpasowania zależności 4.25b

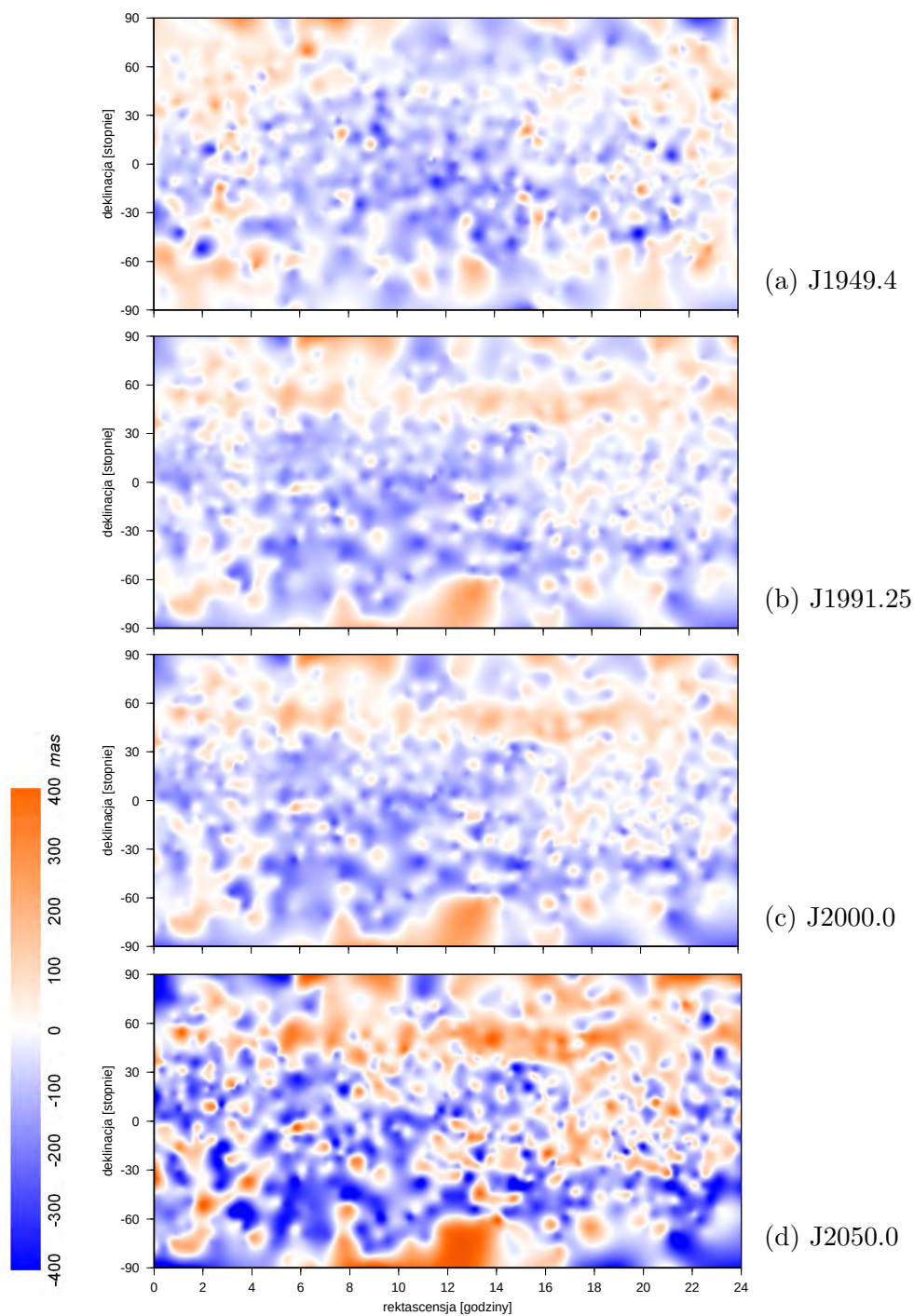
(na rys. 4.6) zaznaczono dodatkowo, wpasowaną metodą najmniejszych kwadratów, zależność $(\Delta\delta)_{F-H}$ od α (wzór 4.25b). Parametry $(\varepsilon_x, \varepsilon_y)$ wyznaczone w wyniku tych wpasowań dla J1949.4, J1991.25 i J2000.0, odpowiednio: $(+1.6\text{ mas}, -42.9\text{ mas})$, $(-21.6\text{ mas}, -19.4\text{ mas})$ i $(-22.6\text{ mas}, -14.2\text{ mas})$, mimo ich zgrubnego charakteru (wykresy przedstawiają nieprzefiltrowane dane katalogowe, a dopasowanie nie uwzględnia efektów lokalnych) są bardzo podobne do podanych w tabeli 4.1.

- c) Najmniejsze wartości średnich różnic pozycji $(110 \pm 89\text{ mas})$, a przy tym najbardziej „płaska” linia średniej ruchomej, występują dla epoki J1949.4, tj. dla średniej epoki katalogu FK5.
- d) Najmniejsze rozrzuty wartości różnic w stosunku do średniej ruchomej, a także najmniejsze odchylenie standardowe dla wszystkich średnich różnic pozycji $(\pm 70\text{ mas})$ występują dla epoki J1991.25, tj. dla epoki Katalogu Hipparcos.

Takie rozłożenie rozrzutów w obydwu wypadkach spowodowane jest stosunkowo niską dokładnością pozycji przy, jednocześnie, stosunkowo wysokiej dokładności ruchów własnych zawartych w katalogu FK5, i odwrotnie, wysoką dokładnością pozycji przy stosunkowo małej dokładności ruchów własnych Katalogu Hipparcos. Dodatkowo błędy pozycji FK5 mają głównie charakter lokalny i systematyczny, natomiast błędy ruchów własnych Hipparcos, w znacznie większym stopniu, są błędami przypadkowymi. Powoduje to, że w transformacji pozycji Hipparcos od epoki J1991.25 do epoki J1949.4 największy wpływ na wyniki mają przypadkowe błędy ruchów własnych, dając w uśrednieniu po gwiazdach o podobnej deklinacji dość dobrą zgodność z analogicznie uśrednionymi pozycjami FK5, przy stosunkowo dużym, przypadkowym, a więc symetrycznym względem tej średniej rozrzucie wyników dla poszczególnych gwiazd. Jednocześnie na wyniki transformacji pozycji FK5 do epoki 1991.25 dominujący wpływ mają lokalne, systematyczne błędy pozycji zawartych w tym katalogu, które kumulując się dają znacznie większe rozbieżności średnich różnic pozycji FK5 – Hipparcos, jednak z lepszym skupieniem rozrzutów wyników dla poszczególnych gwiazd wokół średniej.

- e) Zarówno rys. 4.5 jak i rys. 4.6 wyraźnie pokazują systematyczne pogarszanie się relacji pomiędzy pozycjami katalogów FK5 i Hipparcos wraz ze wzrostem epoki.

Rysunek 4.7. Mapy różnic $(\Delta\alpha_*)_{F-H}$

Rysunek 4.8. Mapy różnic $(\Delta\delta)_{F-H}$

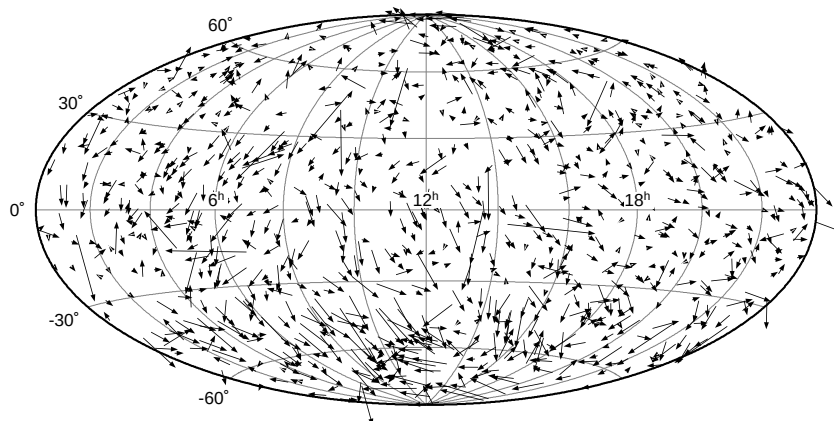
Jest to ilustracja „starzenia się” katalogów. Kumulacja błędów, zarówno pozycji jak i ruchów własnych gwiazd, powoduje, że pozycje astrometryczne na kolejne epoki, obarczone są coraz większymi błędami. Szczególnie dobitnie widać to na rys. 4.5 dla epoki J2050.0 gdzie oprócz „szumu” związanego z kumulacją błędów pozycji poszczególnych gwiazd wyraźnie widoczne jest zwiększanie się różnic wywołane lokalnymi błędami systematycznymi (głównie katalogu FK5). Ten sam efekt widoczny jest jeszcze lepiej na rys. 4.7 i 4.8 przedstawiających „mapy” różnic rektascensji $(\Delta\alpha_*)_{F-H}$ oraz deklinacji $(\Delta\delta)_{F-H}$ w kolejnych epokach. Widać na nich zarówno wzrostową tendencję zmian jak i bardzo silne lokalne zróżnicowanie.

4.2.1. Katalog Hipparcos a FK5 — gwiazdy zawarte w Roczniku Astronomicznym Instytutu Geodezji i Kartografii

Rocznik Astronomiczny IGIK (Kryński i Sękowski, 2001–2006) zawiera tablice miejsc średnich 949 gwiazd wybranych z katalogu FK5. Zbiór zawiera 475 gwiazd północnej półkuli niebieskiej (w tym 460 gwiazd o deklinacji nie większej niż 80° i 15 gwiazd bliskobiegunowych) oraz 474 gwiazdy południowej półkuli niebieskiej (w tym 5 bliskobiegunowych o deklinacji mniejszej niż -80°). Gwiazdy te wybrane zostały spośród najjaśniejszych w katalogu — ich jasności nie przekraczają 6 wielkości gwiazdowej (przy czym jasności gwiazd o deklinacjach zawartych w granicach od -80° do $+80^\circ$ nie przekraczają $5^m.7$) — przy jednoczesnym zachowaniu możliwie równomiernego ich rozłożenia na sferze niebieskiej. Rys. 4.9 przedstawia rozmieszczenie gwiazd wraz z zaznaczeniem całkowitego przemieszczenia pozycji FK5 – Hipparcos.

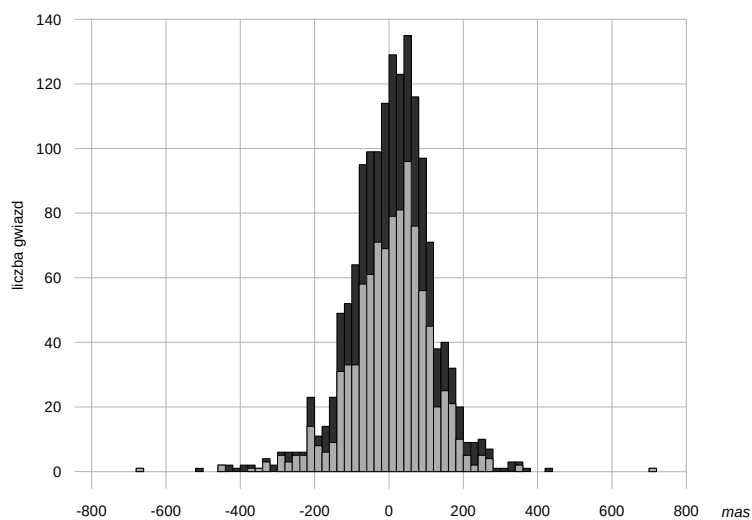
Rocznik Astronomiczny IGIK zawiera ponadto tablice pozycji pozornych 61 gwiazd (48 gwiazd nieba północnego i 8 gwiazd nieba południowego, o deklinacjach w przedziale $\pm 80^\circ$, oraz 5 północnych gwiazd bliskobiegunowych) — stanowią one podzbiór zbioru gwiazd, dla których podawane są pozycje średnie.

Wybór gwiazd najjaśniejszych, uzasadniony był oczywistymi względami praktycznymi — dane zawarte w Roczniku musiały dotyczyć przede wszystkim gwiazd nadających się do polowych obserwacji optycznych, wykorzystywanych w astronomiczno-geodezyjnych pracach terenowych. Mogłoby to stwarzać sytuację, w której wybór ten dotyczyłby gwiazd szczególnie obarczonych systematycznymi błędami związanymi z tzw. równaniem jasności. Porównanie histogramów różnic $(\Delta\alpha_*)_{F-H}$ oraz $(\Delta\delta)_{F-H}$

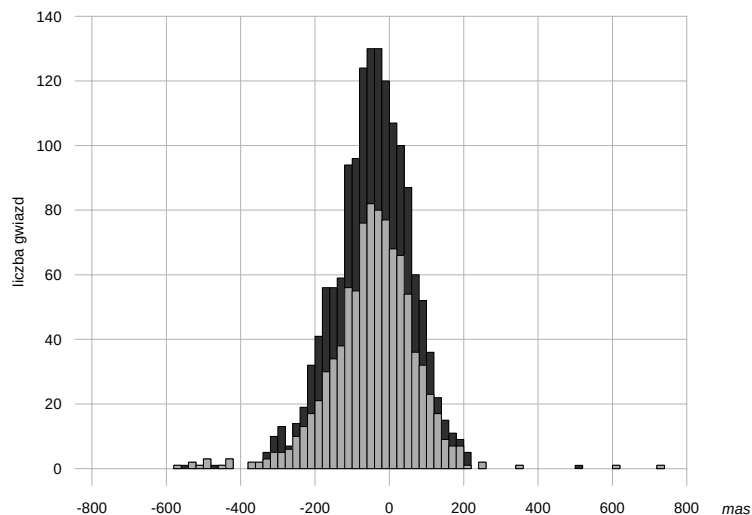


Rysunek 4.9. Rozmieszczenie na sferze niebieskiej gwiazd zawartych w RA IGiK z zaznaczeniem całkowitego przemieszczenia pozycji FK5 – Hipparcos

w epoce J2000.0 dla gwiazd wykorzystywanych w Roczniku z histogramami tych różnic dla pełnego katalogu FK5 wskazuje jednak na ich duże podobieństwo (rys. rys. 4.10 i 4.11). Wykorzystanie danych zawartych w Roczniku obarczone jest więc porównywalnym „ryzykiem” jakie związane jest użyciem pełnych danych katalogowych FK5. W wypadku zbioru

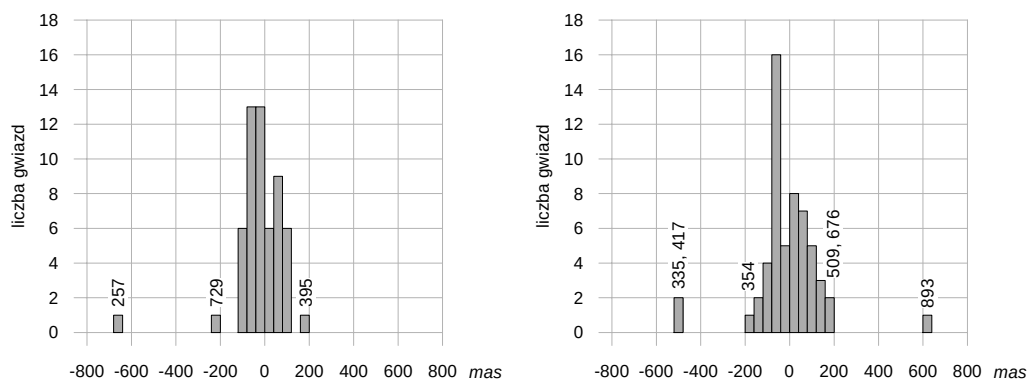


Rysunek 4.10. Histogramy różnic $(\Delta\alpha_*)_{F-H}$ — ciemniejszy oraz $(\Delta\alpha_*)_{F-H}^{RA}$ — jaśniejszy



Rysunek 4.11. Histogramy różnic $(\Delta\delta)_{F-H}$ — ciemniejszy oraz $(\Delta\delta)_{F-H}^{RA}$ — jaśniejszy

gwiazd wykorzystywanego w tablicach pozycji pozornych RA IGiK (Kryński i Sękowski, 2001–2006) analogiczny histogram (rys. 4.12) uwidacznia obecność w zbiorze kilku gwiazd, których współrzędne wykazują większe niż pozostałe odchyłki od odpowiednich pozycji *HCRF*, co stwarza konieczność jego weryfikacji i ewentualnej korekty.



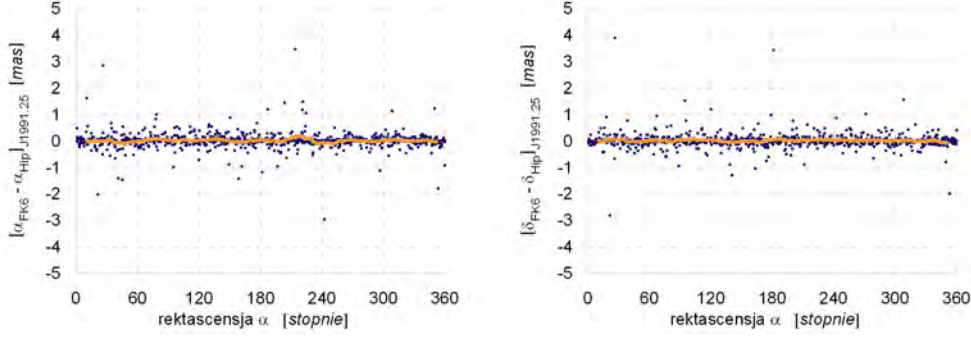
Rysunek 4.12. Histogramy różnic $(\Delta\alpha_*)_{F-H}^{RA}$ (lewy) oraz $(\Delta\delta)_{F-H}^{RA}$ (prawy) dla gwiazd zawartych w tablicach miejsc pozornych w RA IGiK. Podano numery katalogowe FK5 gwiazd, dla których odchyłki przekraczają wartość 150 mas

4.3. Katalog Hipparcos a katalog FK6

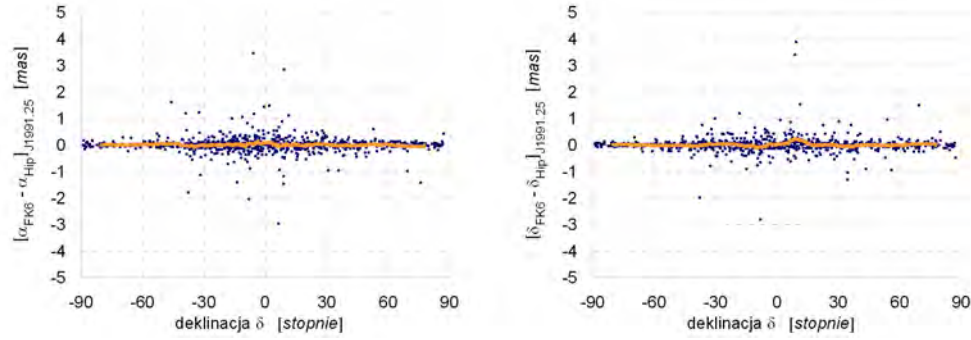
Katalog FK6 powstał z kompilacji danych zawartych w katalogach FK5 i Hipparcos. Pozycje oraz ruchy własne FK6 wyznaczone zostały jako średnie ważone pozycje FK5 i Hipparcos, z wagami wyznaczonymi indywidualnie dla każdej z gwiazd, w oparciu o średnie błędy pozycji i ruchów własnych oraz przy założeniu wyzerowania współczynnika korelacji pomiędzy odpowiednimi parametrami pozycyjnymi ($\rho_{\alpha\mu}$ i $\rho_{\delta\mu}$) (Wielen *et al.*, 1999b). Część I katalogu (FK6(I)) zawiera 878 spośród 1535 gwiazd podstawowego zbioru FK5, znajdujących się również w Katalogu Hipparcos (rozdz. 2.3.3). Ograniczenie to jest konsekwencją przyjętego sposobu opracowania danych. Spośród gwiazd FK5 są to bowiem wszystkie, których pozycje nadają się do bezpośredniego przetworzenia — bez konieczności stosowania wstępnych przeliczeń związanych z redukcją pozycji gwiazd wielokrotnych. Zbiór ten zawiera więc przede wszystkim gwiazdy pojedyncze oraz gwiazdy podwójne i wielokrotne niezidentyfikowane jako takie za pomocą dostępnych danych obserwacyjnych. Znajduje się w nim także niewielka liczba gwiazd podwójnych spektralnych i zaćmieniowych, dla których nie wyznaczono żadnych parametrów orbit. Pozostałe gwiazdy FK5 znajdują się w opracowywanej obecnie części FK6(II).

Z założenia przyjętego przy konstrukcji FK6, pozycje gwiazd zawarte w tym katalogu są pozycjami w systemie *ICRS* (*HCRF*) i nie wykazują systematycznych odchylek od pozycji zawartych w Katalogu Hipparcos. Bezpośrednie porównanie pozycji katalogowych FK6 oraz Hipparcos w epoce J1991.25 pokazuje, że wartości różnic tych pozycji są bardzo małe — zgodność jest na poziomie kilku *mas*. Wykresy różnic przedstawione są na rys. 4.13 oraz 4.14. Pozycje wszystkich gwiazd zawartych w katalogu FK6 zostały w tym wypadku przeliczone w sposób ścisły od epoki J2000.0 FK6 do epoki J1991.25 Katalogu Hipparcos, z wykorzystaniem wartości ruchów własnych rozwiązania SI.

Wykonane także przez autora, dla wszystkich gwiazd zawartych w katalogu FK6, porównanie pozycji katalogowych FK6 i Hipparcos w epoce J2000.0 dokładnie odtwarza różnice $(\Delta\alpha_*)_{F-H}$ i $(\Delta\delta)_{F-H}$ oraz $(\Delta\mu_{\alpha*})_{F-H}$ i $(\Delta\mu_{\delta})_{F-H}$ podane, odpowiednio, w kolumnach 25, 29, 33 i 38 katalogu FK6 (rys. 4.15 oraz 4.16). Zaznaczone na wykresach linie średniej ruchomej oscylują w granicach kilku milisekund wokół zerowej wartości różnic $(\Delta\alpha_*)_{F-H}$ i $(\Delta\delta)_{F-H}$, jednocześnie jednak indywidualne wartości tych różnic wahają się w znacznie większym zakresie. W przeważającej większości mieszczą się one w granicach ± 20 *mas*, ukazując rzeczywistą miarę względnych błędów pozycji zawartych w katalogu FK6 oraz Hip-



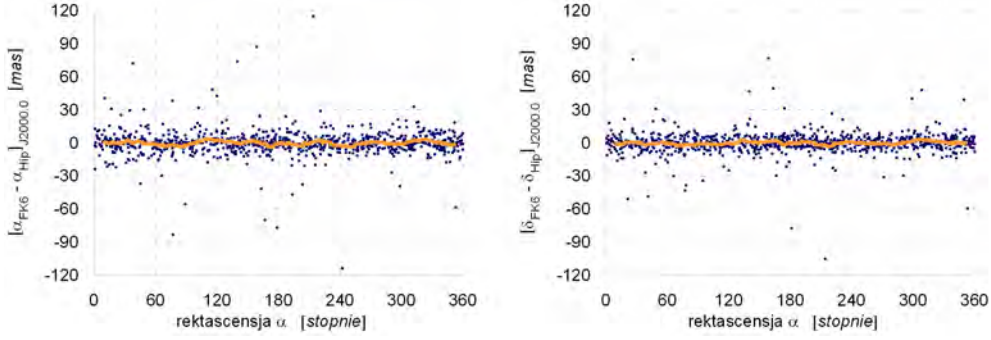
Rysunek 4.13. Różnice pozycji katalogowych FK6(I)SI – Hipparcos w epoce J1991.25 ($(\Delta\alpha_*)_{F-H}$ i $(\Delta\delta)_{F-H}$ vs α)



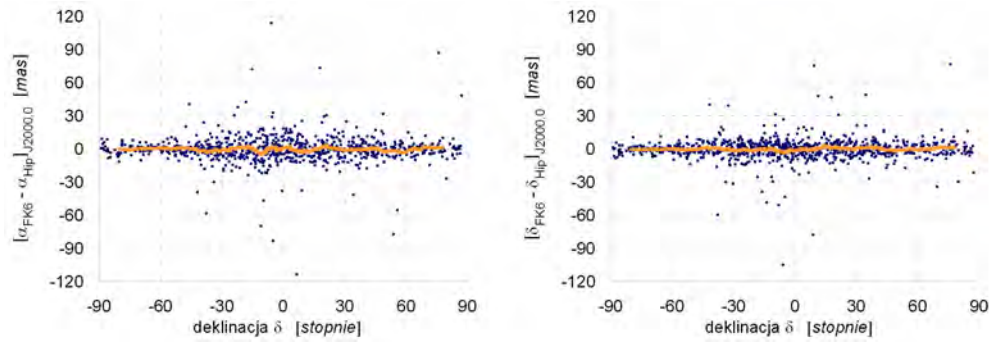
Rysunek 4.14. Różnice pozycji katalogowych FK6(I)SI – Hipparcos w epoce J1991.25 ($(\Delta\alpha_*)_{F-H}$ i $(\Delta\delta)_{F-H}$ vs δ)

parcos w epoce J2000.0. Rysunki 4.17 oraz 4.18 przedstawiają dodatkowo odpowiadające wykresom 4.15 i 4.16 mapy różnic $(\Delta\delta)_{FK6(I)SI-HIP}$ i $(\Delta\alpha_*)_{FK6(I)SI-HIP}$ w epoce J2000.0, pokazując ich rozkład przestrzenny (dla porównania pozostawiono tę samą skalę odcieni co na rys. rys. 4.7 i 4.8). Wyraźnie widoczne „ogniska” szczególnie dużych dodatnich lub ujemnych wartości wskazywać mogą na ewentualne błędy ruchów własnych poszczególnych gwiazd w katalogu FK5 lub Hipparcos, a co za tym idzie FK6.

Narastanie różnic pomiędzy pozycjami zawartymi w katalogach FK6(I) i Hipparcos spowodowane jest oczywiście przede wszystkim niezgodnością odpowiednich ruchów własnych gwiazd. Miarą wiarygodności otrzymywanych wyników jest przy tym ocena wewnętrznej zgodności danych kata-

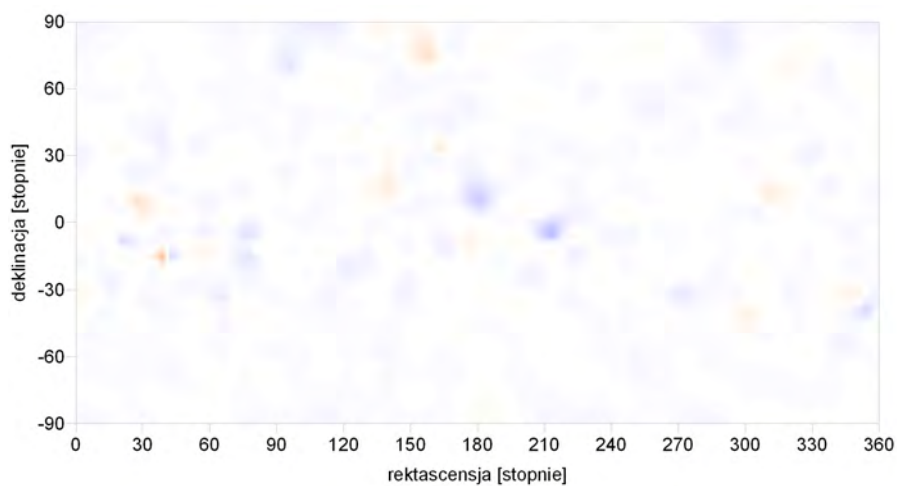


Rysunek 4.15. Różnice pozycji katalogowych FK6(I)SI – Hipparcos w epoce J2000.0
 $(\Delta\alpha_*)_{F-H}$ i $(\Delta\delta)_{F-H}$ vs α

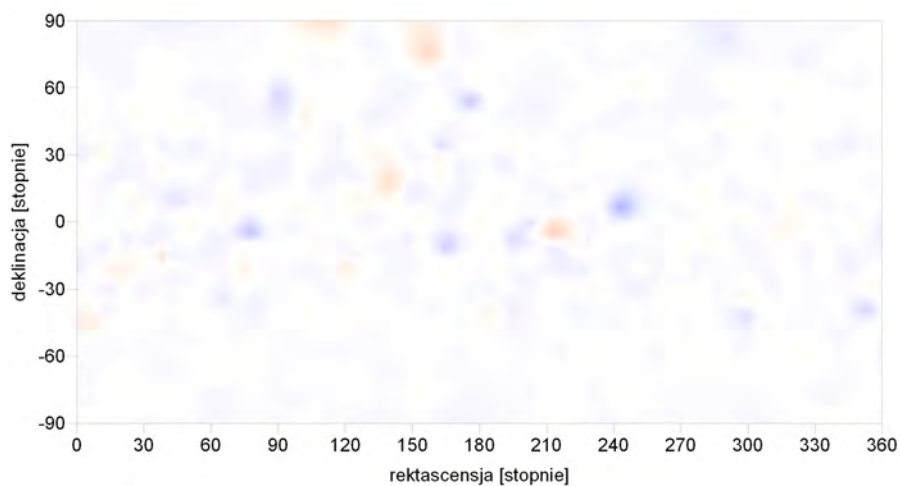


Rysunek 4.16. Różnice pozycji katalogowych FK6(I)SI – Hipparcos w epoce J2000.0
 $(\Delta\alpha_*)_{F-H}$ i $(\Delta\delta)_{F-H}$ vs δ

logowych. Wszystkie przedstawione w tym rozdziale wykresy wykonane zostały w oparciu o dane podstawowego rozwiązania FK6(I) SI. Katalog FK6(I), obok rozwiązania SI, zawiera także dwa dodatkowe rozwiązania tzw. predykcji krótko- i długoterminowej (STP) i (LTP) (rozdz. 2.3.3) uwzględniające w sposób statystyczny istnienie w zbiorze niezidentyfikowanych gwiazd podwójnych. Rozwiązania te w porównaniu z Katalogiem Hipparcos charakteryzują się znacznie mniejszymi wartościami błędów, zwłaszcza ruchów własnych, co ma wpływ na wiarygodność pozycji w różnych, mniej lub bardziej odległych do standardowej, epokach oraz dla różnych zbiorów gwiazd. W tabeli 4.2 zestawione zostały wartości błędów pozycji oraz ruchów własnych w poszczególnych rozwiązaniach odpowiednio dla FK6(I) i Hipparcos. Wewnętrzna zgodność danych katalogowych



Rysunek 4.17. Mapa różnic deklinacji FK6(I)SI – Hipparcos
 $(\Delta\delta)_{F-H}$ w epoce J2000.0



Rysunek 4.18. Mapa różnic rektascensji FK6(I)SI – Hipparcos
 $(\Delta\alpha_*)_{F-H}$ w epoce J2000.0

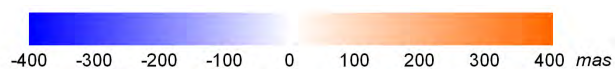


Tabela 4.2. Zestawienie błędów pozycji i błędów ruchów własnych katalogów FK6 i Hipparcos (Wielen *et al.*, 1999a)

	SI		STP		LTP	
błąd średni [<i>mas</i>]	σ_α	σ_δ	σ_α	σ_δ	σ_α	σ_δ
Hipparcos						
przypadkowy	0.60	0.47	0.60	0.47	0.60	0.47
kosmiczny	—	—	—	—	12.45	12.45
całkowity	0.60	0.47	0.60	0.47	12.46	12.46
FK6(I)						
przypadkowy	0.60	0.47	0.60	0.47	9.99	10.63
błąd średni [<i>mas/rok</i>]	σ_{μ_α}	σ_{μ_δ}	σ_{μ_α}	σ_{μ_δ}	σ_{μ_α}	σ_{μ_δ}
Hipparcos						
przypadkowy	0.75	0.58	0.75	0.58	0.75	0.58
kosmiczny	—	—	—	—	2.10	2.10
całkowity	0.75	0.58	0.75	0.58	2.23	2.18
FK6(I)						
przypadkowy	0.36	0.34	0.67	0.55	0.50	0.49

FK6(I), mierzona wartościami tych błędów, przewyższa dokładność Katalogu Hipparcos, gdzie na błędy ruchów własnych nakłada się tzw. „błąd kosmiczny” (rozdz. 2.3.3), wyeliminowany w rozwiązaniu FK6(I) LTP. Zgodnie z treścią tabeli 4.2 rozwiązaniem najbliższym „surowym” danym zawartym w Katalogu Hipparcos jest FK6(I) STP (*Short Term Prediction*). Rozwiązanie to zalecane jest do stosowania na równi ze standardowymi danymi z Katalogu Hipparcos (Wielen *et al.*, 1999a) dla epok „nieodległych” od średniej epoki katalogu J1991.25, przy czym, określenie „nieodległe” oznacza w tym wypadku okresy nie większe niż 5–6 lat. Rozwiązanie LTP (*Long Term Prediction*) jest rozwiązaniem dającym najbardziej wiarygodne wyniki dla epok „odległych”, co w tym z kolei wypadku oznacza epoki dalsze niż J2030.0 (dokładniejsze omówienie narastania błędów katalogowych zawarto w rozdz. 5.1.1). Rozwiązanie SI, będące rozwiązaniem dla gwiazd pojedynczych, zalecane jest do stosowania, niezależnie od epoki, dla tzw. gwiazd astrometrycznie doskonałych (rozdz. 2.3.3).

5. ANALIZA POZYCJI POZORNYCH WYBRANYCH GWIAZD

Wartości oraz dokładność pozycji pozornych gwiazd, publikowanych w wydawnictwach rocznikowych (Kryński i Sękowski, 2001–2006; APFS) i wykorzystywanych w precyzyjnych pomiarach opartych o obserwacje astronomiczne, zależą przede wszystkim od: a) wartości i dokładności danych katalogowych na podstawie których zostały wyznaczone, w tym także niebieskiego systemu odniesienia, w jakim te dane katalogowe są wyrażone, oraz b) algorytmu transformacji pomiędzy niebieskim systemem odniesienia katalogu a niebieskim systemem pośrednim, w którym wyrażane są pozycje pozorne. Za część tego algorytmu uważać przy tym należy wykorzystywane w obliczeniach stałe astronomiczne oraz modele precesji i nutacji.

Na podstawie przedstawionego w rozdziałach 4.2 i 4.3 porównania danych katalogowych FK5 oraz Hipparcos i FK6 można stwierdzić, że właśnie dane katalogowe będą miały dominujący wpływ na wartości wyznaczanych pozycji pozornych gwiazd. Różnice wynikające z nierównoległości osi systemów odniesienia FK5 i *ICRS* (a właściwie jego realizacji, w zakresie widma optycznego, *HCRF*), osięgające wartości około 20 *mas* są bowiem o ponad rząd wielkości mniejsze niż różnice pomiędzy pozycjami katalogowymi FK5 i odpowiednio Hipparcos oraz FK6 dla poszczególnych gwiazd. Także zmiana algorytmu obliczeniowego polegająca na zastąpieniu od 2003 roku — zgodnie z rekomendacją IAU — stałych precesji IAU76 oraz modelu nutacji IAU80 nowym, łącznym modelem precesyjno-nutacyjnym IAU2000 jest z tego punktu widzenia zmianą nie mającą praktycznie żadnego wpływu na wartości obliczonych pozycji pozornych.

5.1. Czynniki wpływające na wartości pozycji pozornych gwiazd

Algorytm obliczania pozycji pozornych gwiazd — transformacji pozycji wyrażonych w systemie katalogu fundamentalnego do pozycji wyrażonych w pośrednim systemie odniesienia — składa się z szeregu kroków uwzględniających poszczególne elementy tej transformacji. Są to kolejno (rozdz. 3.2.5 i 3.3.5):

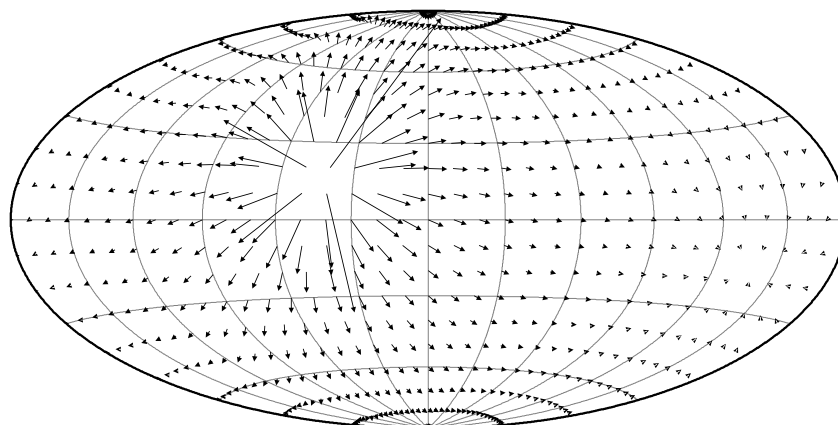
- przejście od pozycji w systemie katalogowym do pozycji w Barycentrycznym Niebieskim Układzie Odniesienia (*BCRF*) poprzez uwzględnienie ruchu własnego gwiazdy (łącznie z uwzględnieniem jej prędkości radialnej),

- przejście od *BCRF* do Geocentrycznego Niebieskiego Układu Odniesienia (*GCRF*) — formalnie za pomocą ścisłej transformacji Lorentza — w praktyce zaś (co pozostaje bez widocznego wpływu na dokładność wyniku), uwzględniając wartość paralaksy rocznej gwiazdy, aberracji rocznej, a także efekt grawitacyjnego ugięcia światła,
- przejście od *GCRF* do pośredniego systemu odniesienia poprzez uwzględnienie precesji oraz nutacji.

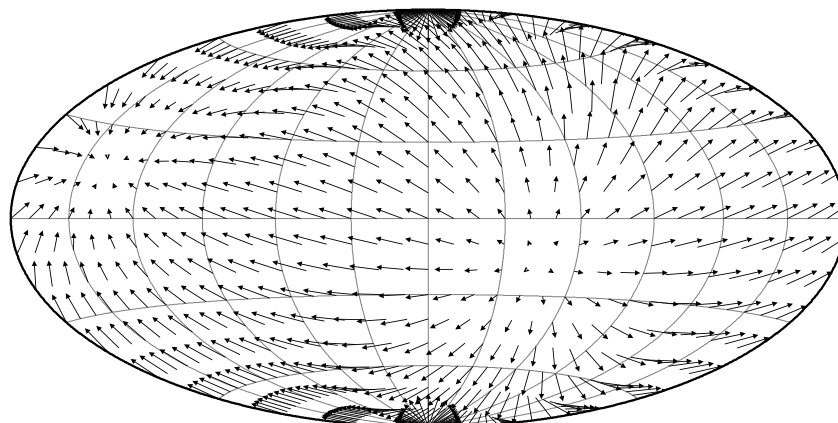
Zależność pozycji pozornych gwiazd od wejściowych pozycji katalogowych uwidacznia się oczywiście głównie w dwóch pierwszych krokach przeliczenia. Analizę tej zależności dla zbioru wybranych gwiazd zawiera rozdz. 5.2.

Wpływ dwóch kolejnych kroków algorytmu ma charakter systematycznych poprawek — zależnych od epoki, na którą wyznaczane są pozycje pozorne. Pomimo, że wartości tych systematycznych poprawek bardzo silnie zależą również od położenia gwiazdy na sferze niebieskiej, zależności te mają charakter „przestrzennie wolnozmienny” i stosunkowo niewielkie różnice pomiędzy pozycjami gwiazd zawartymi w różnych katalogach — „przemieszczenia” wynikające z uaktualnienia pozycji katalogowych — nie mają na nie żadnego widocznego wpływu. Wartości tych poprawek i związana z nimi zmiana ostatecznej wartości pozycji pozornej jest też bardzo różna. Zmiana pozycji pozornej wywołana grawitacyjnym ugięciem światła, dla gwiazd znajdujących się w pobliżu ekliptyki, w momencie bliskiego przejścia Słońca osiąga w skrajnym wypadku wartość kilkuset *mas*. Na rys. 5.1 przedstawiona została mapa przemieszczeń jakim podlegają pozycje pozorne gwiazd w związku z tym efektem dla przykładowej epoki J2005.6. Zmiana pozycji pozornej wywołana ruchem obiegowym Ziemi — aberracja roczna światła — osiąga natomiast wartość około 20 sekund łuku. Rysunek 5.2 przedstawia podobną do poprzedniej mapę przemieszczeń pozycji pozornych związanych z aberracją roczną.

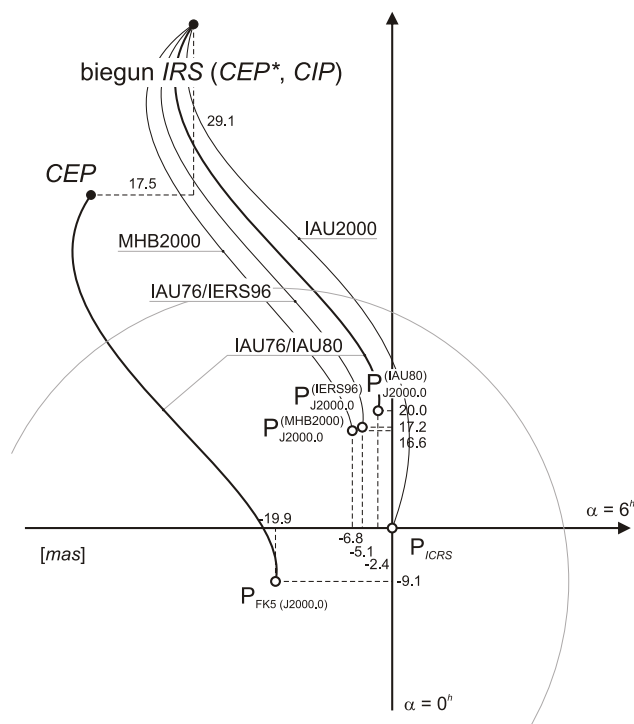
Ostatni krok algorytmu wiąże jakość pozycji pozornych z przyjętą definicją niebieskiego systemu odniesienia oraz jakością stosowanego modelu precesyjno-nutacyjnego definiującego pośredni system odniesienia. Wpływ modelu precesyjno-nutacyjnego na pozycje pozorne, podobnie jak w wypadku aberracji rocznej i ugięcia grawitacyjnego, ma charakter, zależnych od epoki, systematycznych poprawek, związanych z obrotem od systemu niebieskiego w jakim wyrażone są dane katalogowe gwiazd do systemu pośredniego. Zmiany pozycji pozornych związane są w tym wypadku z dokładnością odtwarzania przez model położenia osi z pośredniego sys-



Rysunek 5.1. Zmiana pozycji pozornych gwiazd na sferze niebieskiej na skutek ugięcia światła w polu grawitacyjnym Słońca. Epoka J2005.6. Największe widoczne zmiany osiągają wartość około 100 mas , jednak przy samym brzegu tarczy słonecznej pozorne przemieszczenie gwiazdy może dochodzić do $1''$ (Kaplan *et al.*, 1989)



Rysunek 5.2. Zmiana pozycji pozornych gwiazd na sferze niebieskiej związana z wokółsłonecznym ruchem obiegowym Ziemi — aberracją roczną światła. Epoka J2005.6. Największe zmiany osiągają wartość około $20''$. (Skala rysunku jest około 1000-krotnie mniejsza w stosunku do rys. 5.1)



Rysunek 5.3. Położenie bieguna FK5 oraz średniego bieguna J2000.0 wyznaczonego zgodnie z modelem precesji i teorią nutacji, odpowiednio: IAU76/IAU80, IERS96, MHB2000 oraz IAU2000 (Feissel i Mignard, 1998; Mathews *et al.*, 2002; Kołaczek, 2004a; IERS, 2000) względem bieguna ICRS. Zaznaczono również elipsę błędu bieguna systemu FK5: 50 mas (Fricke *et al.*, 1988). Błąd wyznaczenia bieguna ICRS wynosi 0.1 mas

temu odniesienia w danym niebieskim systemie odniesienia oraz z wzajemnym, względnym położeniem biegunów różnych niebieskich systemów odniesienia. Dla zilustrowania tego wpływu na rysunku 5.3 przedstawiono wzajemne położenie bieguna ICRS, bieguna systemu FK5 oraz średniego bieguna J2000.0 otrzymanego przez zastosowanie odpowiednio: modelu precesyjno-nutacyjnego IAU76/IAU80, modelu IERS96 (McCarthy, 1996) oraz najnowszego modelu MHB2000, będącego podstawą przyjętego przez IAU modelu IAU2000. Położenie średnich biegunów J2000.0 odpowiadających różnym modelom precesyjno-nutacyjnym jest skutkiem różnej jakości tych modeli, a także nieco innej, przyjętej w nich definicji nutacji. W ramce na stronie 93 przedstawione są obliczone wartości nutacyjnych macierzy obrotu IAU80, IERS96 i IAU2000. Macierze nutacji

Macierz obrotu o wpływ nutacji na epokę J2000.0, ...

...otrzymana na podstawie teorii nutacji IAU80 (przekształcenie pozycji w systemie FK5 do systemu pośredniego *CEP*, obowiązujące do 2003 r., oznaczone na rys. 5.3 grubszą linią):

$$\mathcal{N}_{\text{IAU80}} = \begin{pmatrix} 0.999999998 & 0.000061932 & 0.000026851 \\ -0.000061933 & 0.999999998 & 0.000027991 \\ -0.000026849 & -0.000027993 & 0.999999999 \end{pmatrix}$$

...otrzymana na podstawie teorii nutacji IERS96, z uwzględnieniem przemieszczenia bieguna J2000.0 w *ICRS* (-17.2 mas , 5.1 mas):

$$\mathcal{N}_{\text{IERS96}} = \begin{pmatrix} 0.999999998 & 0.000062157 & 0.000026948 \\ -0.000062157 & 0.999999998 & 0.000028003 \\ -0.000026946 & -0.000028005 & 0.999999999 \end{pmatrix}$$

...otrzymana na podstawie teorii precesyjno-nutacyjnej IAU2000, z uwzględnieniem przemieszczenia bieguna J2000.0 w *ICRS* (-16.6 mas , 6.8 mas):

$$\mathcal{N}_{\text{IAU2000}} = \begin{pmatrix} 0.999999998 & 0.000061900 & 0.000026948 \\ -0.000061901 & 0.999999998 & 0.000028003 \\ -0.000026946 & -0.000028005 & 0.999999999 \end{pmatrix}$$

Złożenie obrotów $\mathcal{N}_{\text{IERS96}}^T \times \mathcal{N}_{\text{IAU2000}}$ wykazujące zgodność bieguna pośredniego *CEP** (opisywanego przez teorię nutacji IERS96) oraz *CIP*:

$$\mathcal{N}_{\text{IERS96}}^T \times \mathcal{N}_{\text{IAU2000}} = \begin{pmatrix} 1.000000000 & -0.000000257 & 0.000000000 \\ 0.000000257 & 1.000000000 & 0.000000000 \\ 0.000000000 & 0.000000000 & 1.000000000 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_x = 0.0 \text{ mas}, \quad \varepsilon_y = 0.0 \text{ mas}, \quad \varepsilon_z = 53.0 \text{ mas}$$

Złożenie obrotów $\mathcal{N}_{\text{IAU80}}^T \times \mathcal{N}_{\text{IAU2000}}$ pokazujące położenie średniego bieguna *CEP* (opisywanego przez teorię nutacji IAU80) w *ICRS*:

$$\mathcal{N}_{\text{IAU80}}^T \times \mathcal{N}_{\text{IAU2000}} = \begin{pmatrix} 1.000000000 & -0.000000032 & 0.000000097 \\ 0.000000032 & 1.000000000 & 0.000000012 \\ -0.000000097 & -0.000000012 & 1.000000000 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_x = -2.4 \text{ mas}, \quad \varepsilon_y = 20.0 \text{ mas}, \quad \varepsilon_z = 6.7 \text{ mas}$$

IERS96 oraz IAU2000 uwzględniają przy tym przesunięcie bieguna średniego J2000.0 względem *ICRS*, co pozwala na sprawdzenie ich wzajemnej

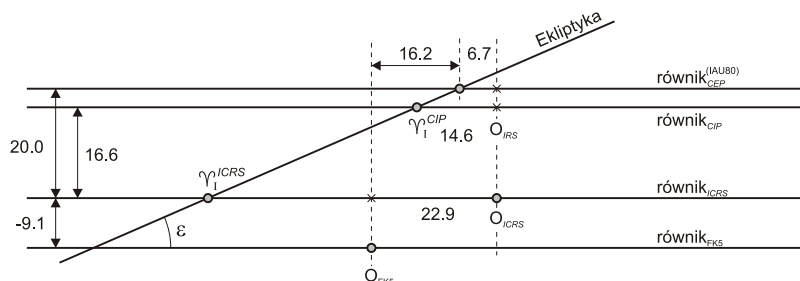
zgodności oraz wyznaczenie analogicznego przemieszczenia dla macierzy nutacyjnej IAU80. W przykładzie porównanie to wykonano przez złożenie obrotów $\mathcal{N}_{\text{IERS96}}^T \times \mathcal{N}_{\text{IAU2000}}$ i $\mathcal{N}_{\text{IAU80}}^T \times \mathcal{N}_{\text{IAU2000}}$ uzyskując potwierdzenie zgodności macierzy nutacji IERS96 i IAU2000 ($\varepsilon_x = 0.0 \text{ mas}$, $\varepsilon_y = 0.0 \text{ mas}$) na poziomie $0.1 \mu\text{as}$ oraz wyznaczając przemieszczenie bieguna J2000.0, modelu precesji i nutacji IAU76/IAU80, w stosunku do *ICRS* o wartościach $\varepsilon_x = -2.4 \text{ mas}$, $\varepsilon_y = 20.0 \text{ mas}$.

Różnica pomiędzy położeniem biegunów *ICRS* i FK5 wynosząca 9.1 mas w kierunku 0^h oraz 19.9 mas w kierunku 18^h (Mignard i Fröeschlé, 2000), (rozdz. 4.2), powiększona dodatkowo o wartość stałego przesunięcia średniego bieguna J2000.0 modelu precesji i nutacji IAU76/IAU80 w stosunku do bieguna *ICRS* powodują, w epoce J2000.0, łączną względną różnicę w położeniu bieguna systemu pośredniego *CEP*, realizowanego poprzez model precesji IAU76 i teorię nutacji IAU80, oraz *CIP*, realizowanego poprzez model precesyjno-nutacyjny IAU2000, o wartości 29.1 mas w kierunku 0^h oraz 17.5 mas w kierunku 18^h .

Dodatkowa poprawka związana jest z widocznym w obliczeniu względnym obrotem wokół osi z . Względny obrót macierzy $\mathcal{N}_{\text{IERS96}}$ i $\mathcal{N}_{\text{IAU2000}}$ wynoszący aż 53 mas jest swego rodzaju artefaktem mającym swe źródło w uwzględnieniu, w macierzy precesyjno-nutacyjnej IAU2000, przemieszczenia związanego z rektascensją średniego dynamicznego punktu równonocy w *GCRS* o wartości -14.6 mas (Chapront *et al.*, 2002) i kumulacją wpływu obrotów związanych z przemieszczeniem bieguna macierzy IERS96. W odróżnieniu od macierzy IAU2000, macierz nutacyjna IERS96 uwzględnia bowiem wyłącznie stałe poprawki do położenia bieguna. W wypadku względnego obrotu macierzy $\mathcal{N}_{\text{IAU80}}$ i $\mathcal{N}_{\text{IAU2000}}$ ujawnia się natomiast rzeczywista różnica w rektascensji (ε_z) o wartości 6.7 mas . Nieuwzględnianie przemieszczenia bieguna podczas obliczania macierzy nutacyjnej IAU80 nie zaburza w tym wypadku wartości ε_z .

Na rysunku 5.4 przedstawiono względne położenie punktów początkowych liczenia rektascensji w systemie FK5, w *IRS* na równiku *CIP* oraz *CEP*_(IAU80) względem punktu początkowego *ICRS*. Łączna różnica w położeniu punktów początkowych liczenia rektascensji w systemie FK5 i *IRS* (na równiku *CIP*), stanowiąca systematyczną poprawkę do pozycji pozornych na epokę J2000.0 wynosi 16.2 mas .

Podsumowując, różnice w położeniu biegunów systemów pośrednich oraz położeniu punktów początkowych liczenia rektascensji (rys. rys. 5.3, 5.4) powodują, że pozycje pozorne na epokę J2000.0 obliczane w systemie pośrednim związanym z biegunem *CEP*_(IAU80), w oparciu o model precesji



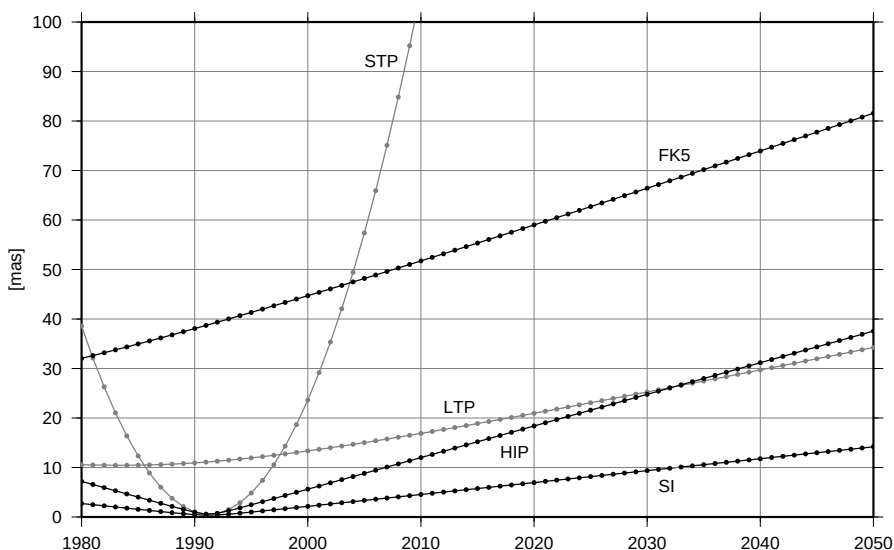
Rysunek 5.4. Położenie punktu początkowego liczenia rektascensji systemu FK5, punktu początkowego „niebieskiego” Pośredniego Systemu Odniesienia na równiku CIP wyznaczonego zgodnie z modelem precesyjno-nutacyjnym IAU2000 oraz na równiku CEP wyznaczonego zgodnie z teorią nutacji IAU80, względem punktu początkowego $ICRS$ na epokę J2000.0 (IERS, 2000). Nie pokazany na rysunku błąd wyznaczenia O_{FK5} wynosi $80\ mas$ (Fricke *et al.*, 1988) i przekracza granice rysunku. Wszystkie wartości liczbowe podane są w mas

i nutacji IAU76/IAU80, w porównaniu z pozycjami pozornymi wyrażonymi w IRS (z biegunem CIP), obliczanych z użyciem modelu IAU2000 są „przesunięte” (w sensie elementarnych obrotów) odpowiednio o:

$$\varepsilon_x = 17.5 \quad \varepsilon_y = 29.1 \quad \varepsilon_z = 16.2 \quad (5.1)$$

5.1.1. Wpływ błędów katalogowych pozycji i ruchów własnych

Dokładność danych pozycyjnych zawartych w katalogach fundamentalnych FK5, Hipparcos oraz FK6 określona jest przez zawarte w nich błędy pozycji i ruchów własnych gwiazd. Błędy te (wyznaczone statystycznie) określają wewnętrzną zgodność zebranych i opracowanych w tych katalogach danych obserwacyjnych. Nakładają się na nie jednak także, znacznie większe co do wartości, systematyczne błędy strefowe ujawniające się dopiero na drodze porównania z danymi z innych katalogów. W wypadku katalogu FK5 błędy te (rozdz. 4.2) przekraczają kilkakrotnie wartości błędów pozycji podane w tym katalogu. W wypadku katalogów Hipparcos i FK6 stworzonych w oparciu o najnowsze, satelitarne obserwacje astrometryczne i stanowiących obecnie zbiór danych odniesienia, głównym, i jedynym parametrem określającym jakość zawartych w tych katalogach danych są jednak zamieszczone tam błędy pozycji i ruchów własnych (tj. wartości odchyleń standardowych poszczególnych parametrów pozycyjnych, a



Rysunek 5.5. Średni całkowity błąd pozycji katalogowej w zależności od epoki, dla różnych katalogów fundamentalnych (Katalog Hipparcos, FK6(I)SI, FK6(I)LTP, FK6(I)STP, FK5)

w wypadku Katalogu Hipparcos również pozostałych elementów macierzy wariancyjno-kowariancyjnej).

Wartość całkowitego średniego błędu pozycji katalogowej gwiazdy w danej epoce, w przypadku Katalogu Hipparcos oraz rozwiązań FK6(I)SI i FK6(I)LTP, wyrażona w funkcji epoki oraz odpowiednich błędów na epokę katalogową (indywidualną dla każdej gwiazdy), dana jest następującym wzorem:

$$\varepsilon_x^2(t) = \varepsilon_x^2(T_x) + \varepsilon_{\mu_x}^2(T_x) \cdot (t - T_x)^2 \quad (5.2)$$

gdzie indeks x zastępuje oznaczenia α oraz δ . W wypadku rozwiązania FK6(I)STP opartego na statystycznym podejściu do opracowywanych danych obserwacyjnych i uwzględniającego obecność tzw. błędu kosmicznego, wzór ten uzupełnia dodatkowo składnik zależny od $(t - T_x)^4$ (Wielen *et al.*, 1999a).

Na rys. 5.5 przedstawione zostały wykresy uśrednionych całkowitych błędów pozycji katalogowych Hipparcos, FK6(I) (SI, LTP i STP) oraz FK5 w funkcji epoki. Średnie obliczone zostały w oparciu o zbiór 878 gwiazd — wszystkich z katalogu FK6(I) i zawartych jednocześnie w ka-

talogach Hipparcos oraz FK5⁴⁾. Wykresy te powstały więc w oparciu o dane ograniczonej liczby tych samych gwiazd. Ograniczenie liczby gwiazd FK5 oraz szczególnie Katalogu Hipparcos nie ma jednak w tym wypadku większego wpływu na uśrednione wartości błędów, a tym samym na postać odpowiadającego im wykresu.

Wszystkie przedstawione wykresy wyraźnie pokazują oczywisty trend wzrostowy dla wartości błędów pozycji katalogowych w miarę oddalania się od średniej epoki katalogu (epoki rozwiązania). W wypadku Katalogu Hipparcos, a także FK6(I)SI i FK6(I)STP epoką tą jest w przybliżeniu epoka J1991.2. W wypadku FK6(I)LTP epoką tą jest epoka J1980.49, natomiast w wypadku FK5 epoka J1950.0. Odmienne zachowanie się średnich błędów danych katalogowych FK6(I)STP oraz FK6(I)LTP ma swoje źródło w sposobie opracowania danych obserwacyjnych, zakładającym istnienie błędów związanych z nieujawnioną obecnością w zbiorze gwiazd wielokrotnych i potrzebą statystycznej eliminacji wpływu tego zjawiska na błędy pozycji, odpowiednio w krótkich i długich okresach.

Na wykresach widać bardzo dobrą jakość danych Hipparcos oraz rozwiązań FK6(I)SI i FK6(I)STP dla epok bliskich J1991.25. Widać też bardzo szybko spadającą jakość rozwiązania FK6(I)STP w miarę oddalania się od tej epoki. Okres „przydatności” pozycji zawartych w rozwiązaniu FK6(I)STP określony jest na co najwyżej ± 5 lat od epoki J1991.25 (Wielen *et al.*, 1999a). Nieco gorsza jest też, chociaż spada wolniej niż jest to w wypadku danych Hipparcos, jakość danych rozwiązania FK6(I)LTP. Na skutek procesu narastania błędów pozycji katalogowych, dane rozwiązania FK6(I)LTP dla epok większych niż J2031.0 będą jednak obciążone mniejszym błędem całkowitym niż dane Katalogu Hipparcos. Głównym źródłem są tu mniejsze błędy ruchów własnych gwiazd w katalogu FK6 w stosunku do odpowiednich błędów z Katalogu Hipparcos, a więc w konsekwencji wolniejsze „starzenie się” danych katalogu FK6.

Najmniejsze wartości błędów w całym zakresie epok przejawia rozwiązanie FK6(I)SI. Podobnie jak dla danych Katalogu Hipparcos minimalne wartości tych błędów przypadają w epoce J1991.25 ale spadek jakości pozycji jest w tym wypadku wolniejszy. Podobnie jak w wypadku FK6(I)LTP powodem tego są małe błędy ruchów własnych FK6(I)SI. Z czasem róż-

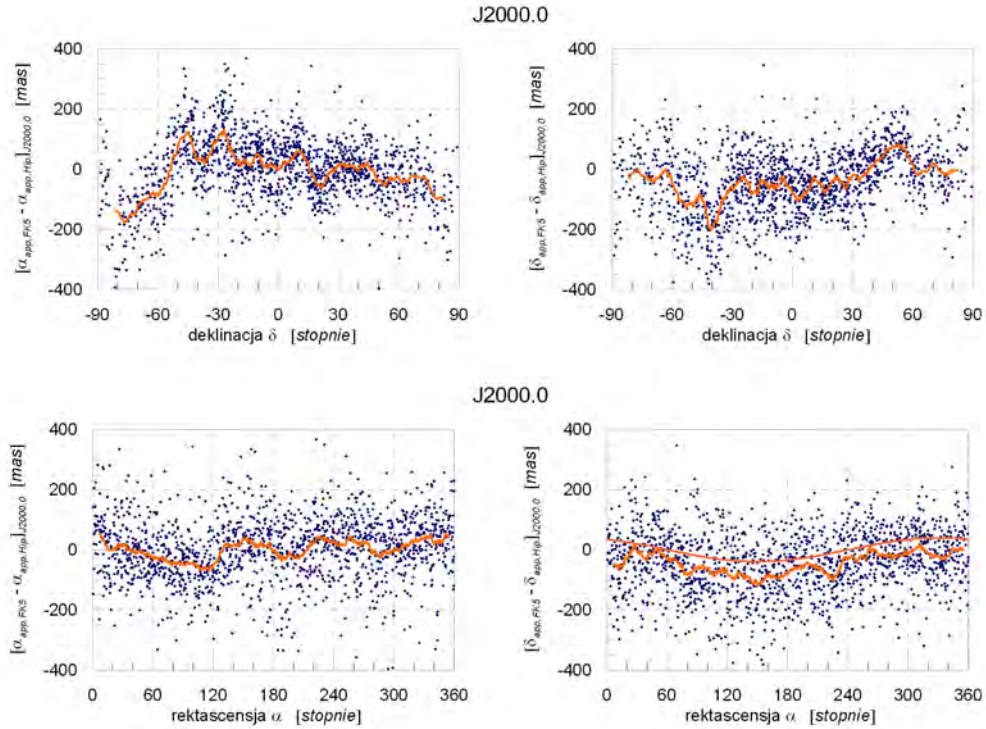
⁴⁾ Dane o błędach pozycji poszczególnych gwiazd zaczerpnięte zostały z katalogu FK6(I) — oprócz błędów pozycji poszczególnych rozwiązań w katalogu FK6 zawarto również odpowiednie błędy pozycji z Katalogu Hipparcos oraz uwolnione od składnika systematycznego błędy pozycji FK5.

nica jakości danych FK6(I)SI w stosunku do danych Katalogu Hipparcos będzie więc wzrastać na korzyść danych FK6.

5.2. Porównanie i analiza obliczonych pozycji pozornych gwiazd

5.2.1. Ogólny wpływ danych katalogowych na pozycje pozorne

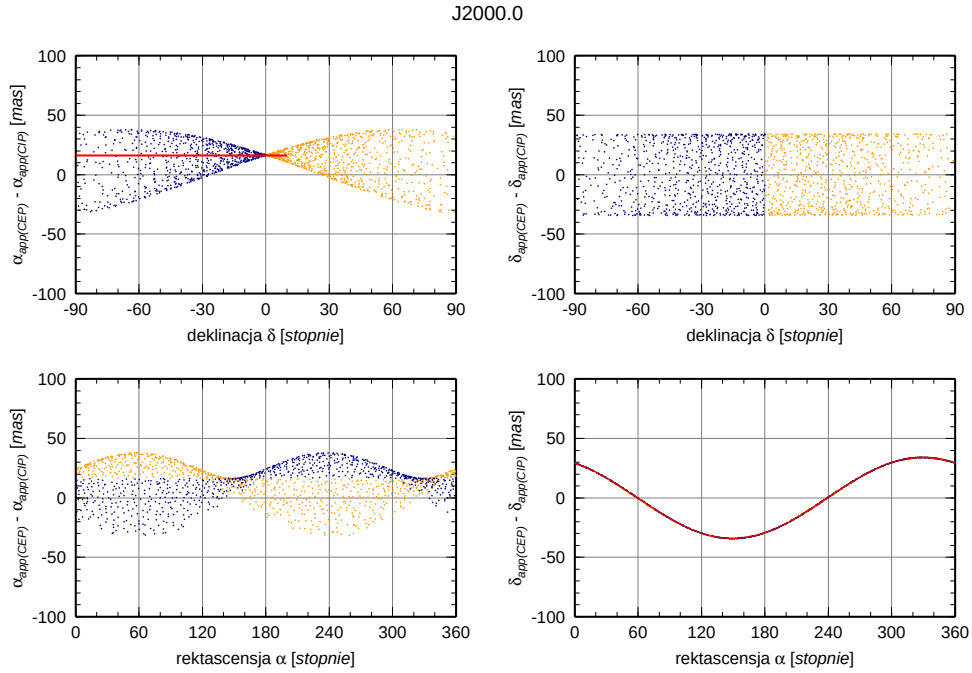
Wśród czynników, przedstawionych w rozdziale 5.1, mających wpływ na obliczane pozycje pozorne gwiazd dominujący wpływ mają błędy pozycji katalogowych, osiągające w wypadku katalogu FK5 wartości kilkuset *mas* (rozdz. 4.2). W celu zilustrowania tego faktu obliczone zostały pozycje pozorne wszystkich 1536 gwiazd zawartych w katalogu FK5, należących również do zbioru gwiazd Katalogu Hipparcos. Pozycje te, obliczone na epokę J2000.0, dla dwóch zbiorów danych wejściowych: w systemie FK5 oraz *HCRF* oraz z wykorzystaniem modelu precesji i nutacji, odpowied-



Rysunek 5.6. Różnice $(\Delta\alpha_*)_{F-H}^{app}$ oraz $\Delta\delta_{F-H}^{app}$ vs δ i α . Ciągłymi liniami zaznaczono średnie ruchome oraz linię wpasowania zależności 4.25b

nio: IAU76/IAU80 i IAU2000, zostały następnie porównane. Na rysunku 5.6 przedstawione zostały wykresy różnic $\Delta\alpha_{F-H}^{app} \cdot \cos \delta$ i $\Delta\delta_{F-H}^{app}$ vs α i δ . Wykresy te są bardzo podobne do wykresów porównujących „surowe” dane katalogowe FK5 oraz Hipparcos przedstawione w rozdz. 4.2, na stronach 76÷77 co świadczy o niedominującym wpływie samego przeliczenia od pozycji katalogowych do pozornych na otrzymane różnice.

Większość czynników mających charakter systematycznych poprawek jak np. aberracja roczna światła redukuje się w odejmowaniu i nie ma wpływu na rozkład punktów na wykresach. Widoczny wpływ ma natomiast względny obrót systemów pośrednich: związanego z biegunem *CEP* (IAU76/IAU80) oraz związanego z biegunem *CIP* (IAU2000). Wykorzystanie zależności 4.25b z rozdz. 4.2 przez wpasowanie jej, za pomocą metody najmniejszych kwadratów, w odpowiedni wykres różnic, pozwala na otrzymanie wartości $\varepsilon_x = 19.7 \text{ mas}$ i $\varepsilon_y = 34.1 \text{ mas}$ co jest w zasadzie w



Rysunek 5.7. Różnice $(\Delta\alpha_*)_{F-F*}^{app}$ oraz $\Delta\delta_{F-F*}^{app}$ vs δ i α . Kolorem niebieskim zaznaczono gwiazdy nieba północnego, pomarańczowym gwiazdy południowe. Czerwoną linią zaznaczono wartość ε_z (wzór 4.25a dla $\delta = 0$) oraz wpasowanie zależności 4.25b

zgodzie ze spodziewanymi wartościami (5.1) tych parametrów, wyznaczonymi w rozdz. 5.1: 17.5 *mas* i 29.1 *mas*. Podobnie jak rozdz. 4.2, niepełna zgodność tych wartości ma swe główne źródło w nieuwzględnieniu strefowych błędów systematycznych danych katalogowych FK5.

Do tych samych wniosków prowadzi porównanie pozycji pozornych dla pełnego zbioru 1536 gwiazd FK5, obliczonych z wykorzystaniem danych katalogowych w systemie FK5, w obowiązującym do 1 stycznia 2003 r. systemie pośrednim *CEP* (IAU76/IUA80) oraz obliczonych z wykorzystaniem tych samych danych, przetransformowanych do układu *HCRF*, w przyjętym obecnie systemie pośrednim *IRS* (*CIP*, IAU2000). Rysunek 5.7 przedstawia analogiczne do poprzednich różnice otrzymanych pozycji pozornych gwiazd. Wobec braku różnic wartości wyjściowych danych katalogowych na wykresach uwidacznia się wyłącznie wpływ czynników związanych z procesem przejścia od systemu FK5 do *HCRF* oraz od współrzędnych katalogowych do współrzędnych pozornych. Widoczny jest praktycznie wyłącznie wpływ nierównoległości osi biegunowych *CEP* i *CIP*. Szczególnie dobitnie widać to na wykresie $(\Delta\delta)_{F-F*}^{app}$ vs α . Odczytanie parametrów obrotu z tego wykresu, przez wpasowanie równania 4.25b, daje w wyniku: $\varepsilon_x = 17.4$ *mas* i $\varepsilon_y = 29.3$ *mas*, co pozostaje w bardzo dobrej zgodności z wartościami (5.1) parametrów względnego obrotu obu systemów pośrednich. Również odczytanie, z wykresu $(\Delta\alpha_*)_{F-F*}^{app}$ vs δ (wzór 4.25a dla $\delta = 0$), wartości $\varepsilon_z = 16.5$ *mas* bardzo dobrze odpowiada teoretycznej wartości ε_z ze strony 95.

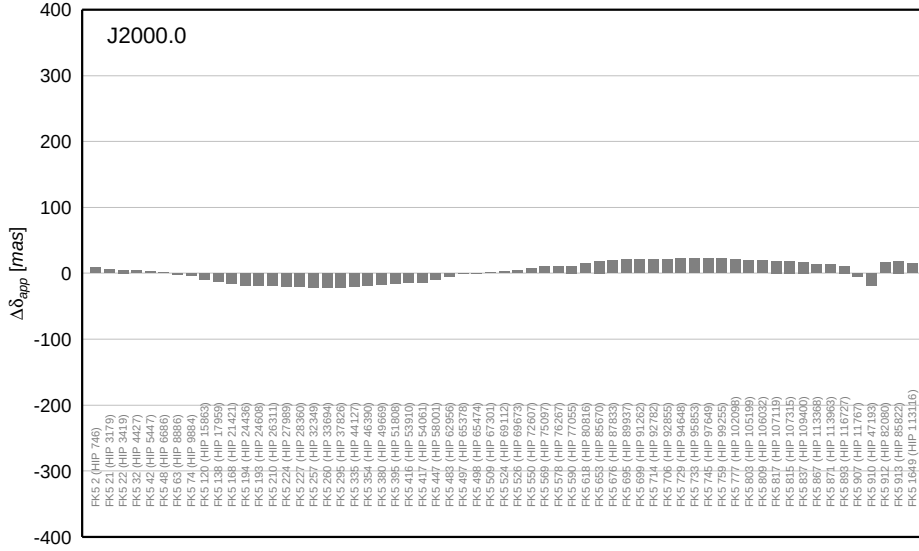
5.2.2. Wpływ danych katalogowych na pozycje pozorne wybranych gwiazd

W celu przeanalizowania wpływu wyboru katalogu gwiazd na pozycje pozorne w kontekście ich tablicowania w wydawnictwach rocznikowych, wybrano 61 jasnych gwiazd ($m_V < 5^m$), których pozycje pozorne publikowane są corocznie w Roczniku Astronomicznym IGiK (Kryński i Sękowski, 2001–2006). Jasne gwiazdy, z oczywistych względów, wykorzystywane są najczęściej w praktyce, a ich pozycje pozorne publikowane są w rocznikach. Spośród wybranych gwiazd 5 to tzw. północne gwiazdy bliskobiegunowe, tj. gwiazdy o deklinacjach przekraczających 80° . Spośród pozostałych 56-ciu 48 to gwiazdy północnej półkuli nieba, a 8 — gwiazdy południowe. Wszystkie gwiazdy należą do podstawowego zbioru katalogu FK5 oraz obejmującego go Katalogu Hipparcos, a 27 (w tym 3 bliskobiegunowe) znajdują się również w podstawowym zbiorze katalogu FK6(I).

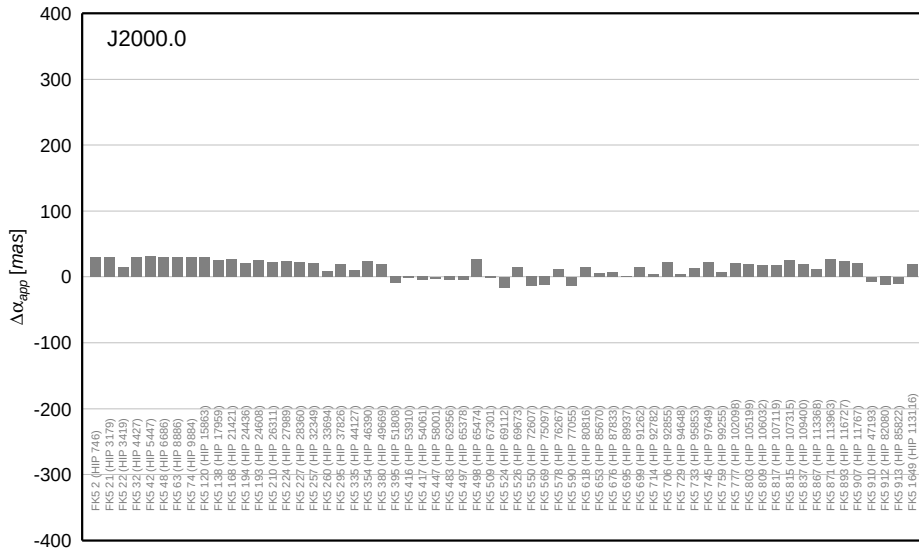
Dla wybranych gwiazd obliczone zostały pozycje pozorne na standardową epokę J2000.0 oraz dodatkowo J2010.0. Obliczenia wykonane zostały zgodnie ze strategią stosowaną przed wprowadzeniem przez IAU najnowszych zmian i zaleceń, tj. w systemie FK5, w oparciu o dane katalogowe FK5 oraz system stałych IAU76 i teorię nutacji IAU80 (rozdz. 3.2.5). Następnie, obliczone zostały również pozycje pozorne tych samych gwiazd w pośrednim systemie odniesienia, zgodnie z najnowszą, rekomendowaną przez IAU strategią, w oparciu o wyrażone w *ICRS* (*HCRF*) dane katalogowe Hipparcos i FK6 oraz najnowszy model precesyjno-nutacyjny IAU2000 (rozdz. 3.3.5). Pozycje te wyznaczone zostały przy tym w oparciu o dotychczasowy paradygmat, definiujący pośredni system odniesienia przy użyciu pojęcia punktu równonocy wiosennej. Wyniki otrzymane w oparciu o nowy paradygmat wprowadzający pojęcie Niebieskiego Efemerydalnego Punktu Początkowego *CEO* nie różnią się bowiem niczym poza stałym przesunięciem w rektascensji o wartość rektascensji *CEO* (lub odwrotnie, o wartość „rektascensji” punktu równonocy liczonej od *CEO*).

Na zamieszczonych wykresach przedstawione zostały, obliczone dla wszystkich wybranych gwiazd, różnice współrzędnych pozornych $\Delta\delta_{app}$ i $\Delta\alpha_{app}$, tj.

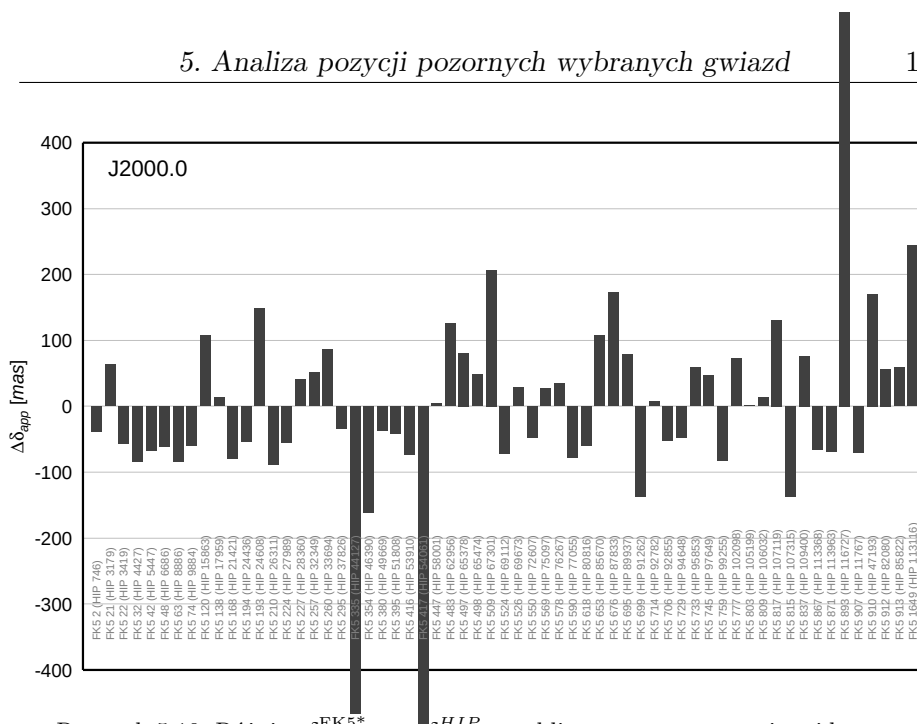
- 1) Różnice $\delta_{app(CEP)}^{FK5} - \delta_{app(CIP)}^{FK5*}$, $\alpha_{app(CEP)}^{FK5} - \alpha_{app(CIP)}^{FK5*}$ pozycji pozornych w pośrednich systemach odniesienia biegunów *CEP* i *CIP*, obliczone w oparciu o dane katalogowe FK5 (system FK5) oraz FK5* (dane w systemie FK5 przetransformowane do *HCRF*) (rys. rys. 5.8, 5.9). Różnice te osiągają wartości około $\pm 30 mas$ i są spowodowane łącznym efektem transformacji od dotychczasowego Niebieskiego Systemu Odniesienia FK5 do *HCRF* oraz redukcji niezgodności osi bieguna *CEP* oraz *CIP* (5.1 str. 95).
- 2) Różnice $\delta_{app(CIP)}^{FK5*} - \delta_{app(CIP)}^{HIP}$, $\alpha_{app(CIP)}^{FK5*} - \alpha_{app(CIP)}^{HIP}$ pozycji pozornych w pośrednim systemie odniesienia bieguna *CIP*, obliczone w oparciu o dane FK5* oraz dane katalogowe Hipparcos (rys. rys. 5.10, 5.11). Różnice odzwierciedlają bardzo duże niezgodności pomiędzy współrzędnymi katalogowymi FK5 i Hipparcos, przekraczające niekiedy $400 mas$ (por. rys. 4.12).
- 3) Różnice $\delta_{app(CEP)}^{FK5} - \delta_{app(CIP)}^{HIP}$, $\alpha_{app(CEP)}^{FK5} - \alpha_{app(CIP)}^{HIP}$ pozycji pozornych w pośrednich systemach odniesienia biegunów *CEP* i *CIP*, obliczone w oparciu o dane katalogowe, odpowiednio, FK5 i Hipparcos (rys. rys. 5.12, 5.13). Różnice stanowią łączny efekt transformacji niebieskiego systemu odniesienia ($FK5 \rightarrow HCRF$), zmiany modelu prece-



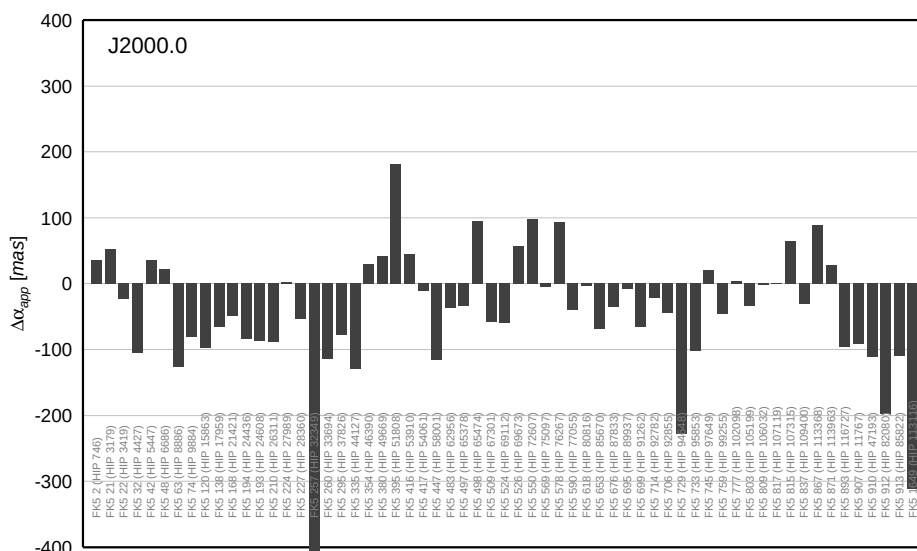
Rysunek 5.8. Różnice $\delta_{app(CEP)}^{FK5} - \delta_{app(CIP)}^{FK5*}$ spowodowane łącznym efektem transformacji $FK5 \rightarrow HCRF$ oraz redukcji niezgodności osi bieguna $CEP \rightarrow CIP$. Gwiazdy (za wyjątkiem 5 gwiazd okołobiegunowych po prawej stronie wykresu) uporządkowane są wg numerów katalogu FK5, co odpowiada porządkowi wg wzrastającej rektascensji i tłumaczy podobieństwo wykresu do teoretycznej zależności $\Delta\delta$ vs α (str. 99)



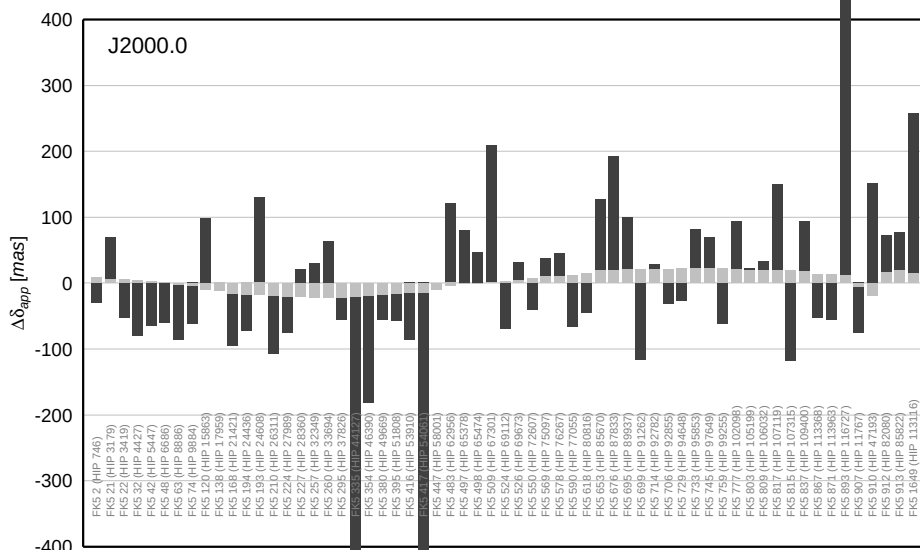
Rysunek 5.9. Różnice $\alpha_{app(CEP)}^{FK5} - \alpha_{app(CIP)}^{FK5*}$ spowodowane łącznym efektem transformacji $FK5 \rightarrow HCRF$ oraz redukcji niezgodności osi bieguna $CEP \rightarrow CIP$. Widoczna jest przewaga różnic dodatnich



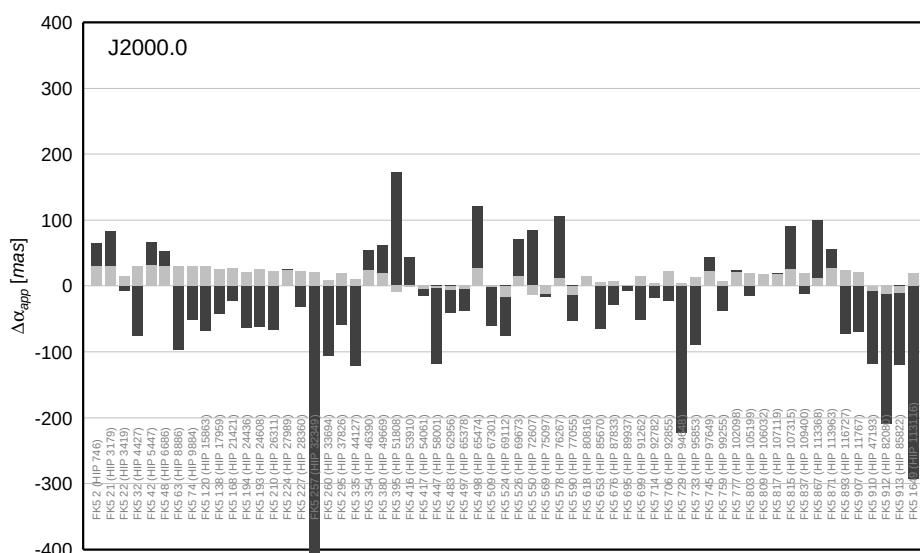
Rysunek 5.10. Różnice $\delta_{app(CIP)}^{FK5*} - \delta_{app(CIP)}^{HIP}$ obliczone z zastosowaniem identycznej procedury wykorzystującej macierz precesyjno-nutacyjną IAU2000 dla danych katalogowych FK5* (dane w systemie FK5 przeliczone do *HCRF*) i Hipparcos. Głównym źródłem odchylek są względne błędy danych katalogowych FK5 i Hipparcos



Rysunek 5.11. Różnice $\alpha_{app(CIP)}^{FK5*} - \alpha_{app(CIP)}^{HIP}$, obliczone z zastosowaniem identycznej procedury wykorzystującej macierz precesyjno-nutacyjną IAU2000 dla danych katalogowych FK5* (dane w systemie FK5 przeliczone do *HCRF*) i Hipparcos. Głównym źródłem odchylek są względne błędy danych katalogowych FK5 i Hipparcos



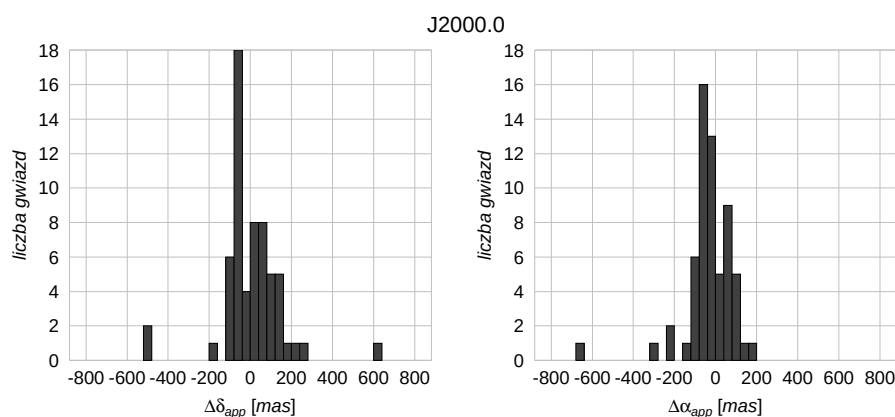
Rysunek 5.12. Całkowite różnice $\delta_{app}^{FK5}(CEP) - \delta_{app}^{HIP}(CIP)$ uwzględniające wpływ zmiany systemu odniesienia (FK5→Hipparcos), redukcji niezgodności osi bieguna $CEP_{80} \rightarrow CIP$ oraz błędy pozycji katalogowych gwiazd



Rysunek 5.13. Całkowite różnice $\alpha_{app}^{FK5}(CEP) - \alpha_{app}^{HIP}(CIP)$ uwzględniające wpływ zmiany systemu odniesienia (FK5→Hipparcos), redukcji niezgodności osi bieguna $CEP_{80} \rightarrow CIP$ oraz błędy pozycji katalogowych gwiazd

syjno-nutacyjnego ($CEP \rightarrow CIP$) oraz niezgodności pozycji katalogowych FK5 i Hipparcos.

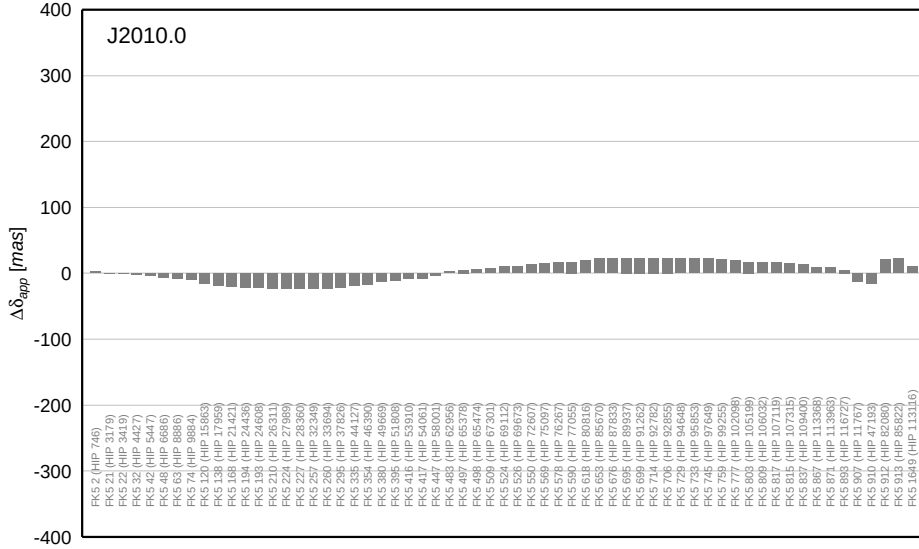
Wykresy 5.8–5.13 pokazują proporcje z jakimi poszczególne czynniki wpływają na pozycje pozorne gwiazd. Błędy pozycji katalogowych mają około 20-krotnie większy wpływ na wyniki niż zmiany spowodowane wprowadzeniem udoskonalonego modelu precesyjno-nutacyjnego. Wpływ błędów danych katalogowych widoczny jest również na histogramie 5.14 przedstawiającym liczbę gwiazd o różnicach odpowiednich współrzędnych znajdujących się w danym przedziale wartości. Histogram ten w swoim kształcie niewiele odbiega od histogramu 4.12 z rozdz. 4.2.1 przedstawiającego podobne różnice dla danych katalogowych FK5 oraz Hipparcos.



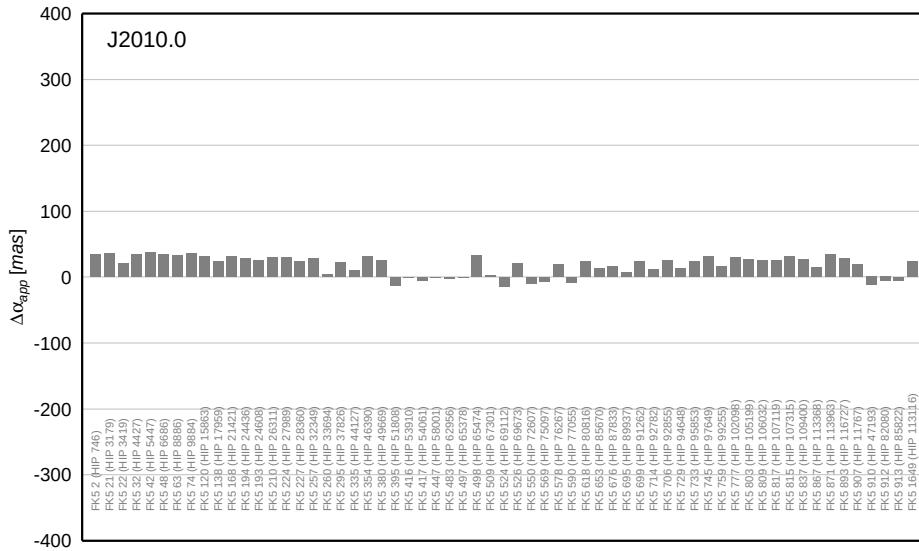
Rysunek 5.14. Histogram całkowitych różnic pozycji pozornych $\delta_{app(CEP)}^{FK5} - \delta_{app(CIP)}^{FK5*}$ oraz $\delta_{app(CEP)}^{FK5} - \delta_{app(CIP)}^{FK5*}$ (por. rys. 4.12)

Dodatkowo, na rys. 5.15–5.20 przedstawiono analogiczne różnice obliczone na wybraną epokę J2010.0. Porównanie odpowiednich różnic współrzędnych pomiędzy epoką standardową J2000.0 i epoką J2010.0 wskazuje na rosnący w czasie wpływ czynnika związanego z błędami katalogowymi, przy mniej więcej stałym maksymalnym wpływie obrotu między systemami. Wynik ten jest potwierdzeniem opisanej w rozdz. 4.2 degradacji danych katalogowych w czasie, związanego z błędami wyznaczenia ruchów własnych gwiazd.

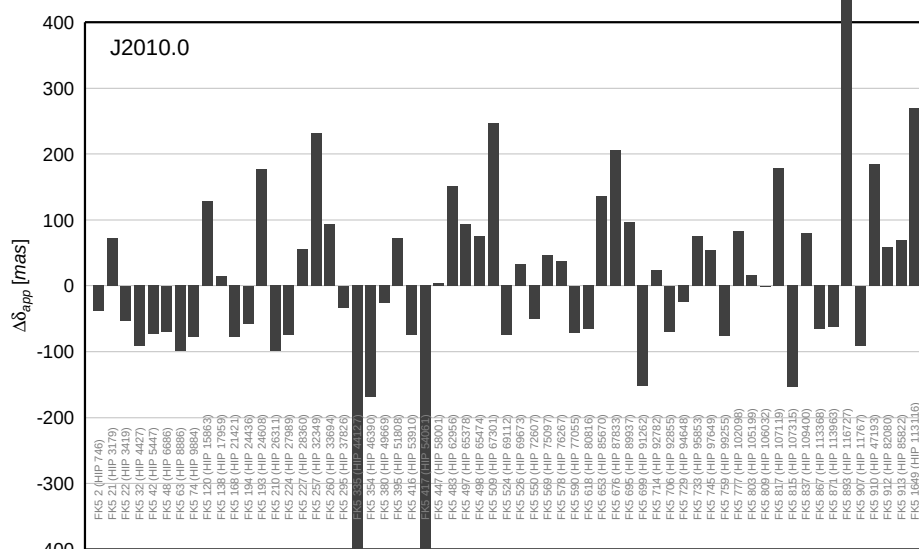
Dla epoki J2010.0 jeszcze bardziej niż dla epoki standardowej J2000.0 widoczny jest wpływ błędów danych katalogowych; widoczny jest również wzrost tego błędu z czasem. Analogiczny do histogramu 5.14 histogram



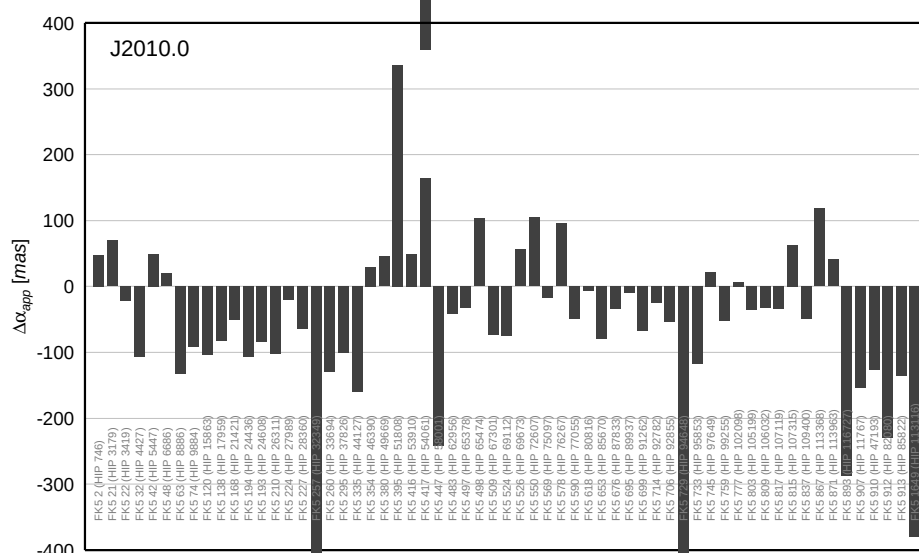
Rysunek 5.15. Różnice $\delta_{app(CEP)}^{FK5} - \delta_{app(CIP)}^{FK5*}$ spowodowane łącznym efektem transformacji $FK5 \rightarrow HCRF$ oraz redukcji niezgodności osi bieguna $CEP_{80} \rightarrow CIP$. Gwiazdy (za wyjątkiem 5 gwiazd okołobiegunowych po prawej stronie wykresu) uporządkowane są wg numerów katalogu FK5, co odpowiada porządkowi wg wzrastającej rektascensji i tłumaczy podobieństwo wykresu do teoretycznej zależności $\Delta\delta$ vs α (str. 99) (por. rys. 5.8)



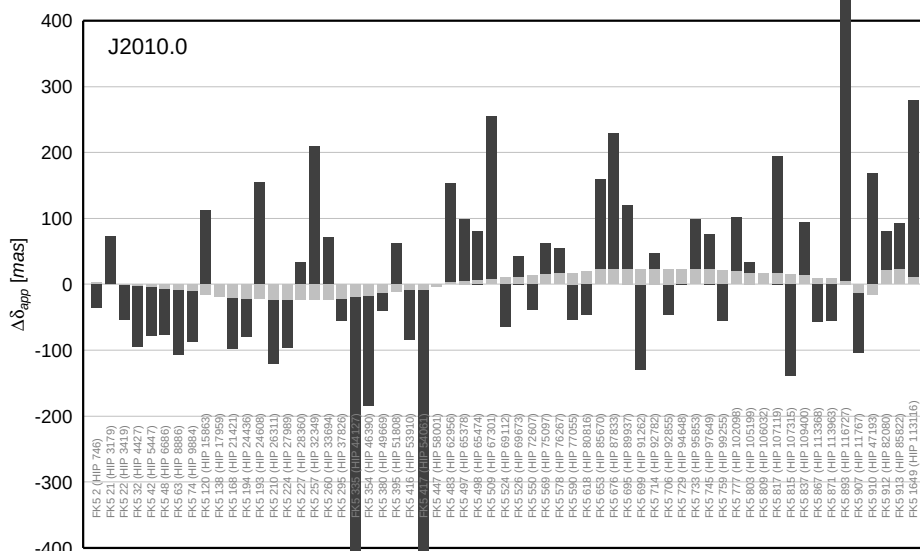
Rysunek 5.16. Różnice $\alpha_{app(CEP)}^{FK5} - \alpha_{app(CIP)}^{FK5*}$ spowodowane łącznym efektem transformacji $FK5 \rightarrow HCRF$ oraz redukcji niezgodności osi bieguna $CEP_{80} \rightarrow CIP$. Widoczna jest przewaga różnic dodatnich (por. rys. 5.9)



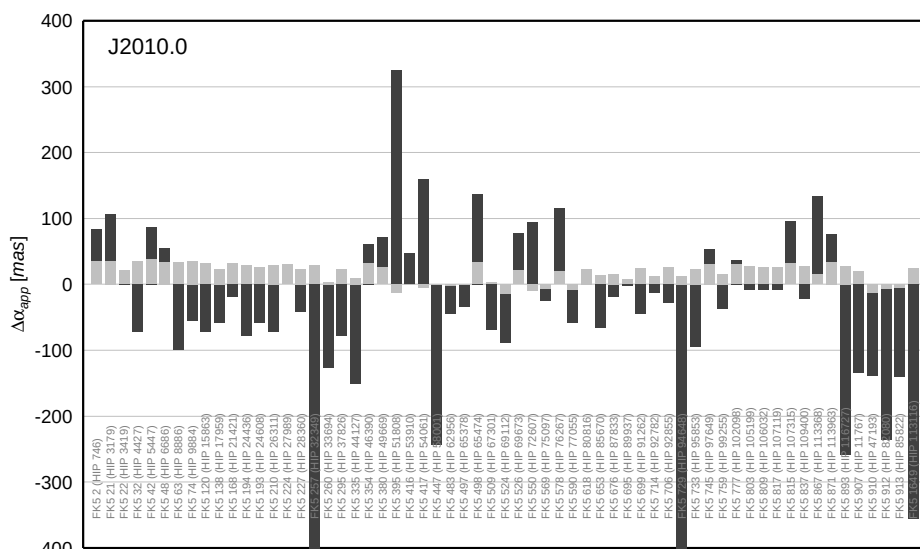
Rysunek 5.17. Różnice $\delta_{app}^{FK5}(CIP) - \delta_{app}^{HIP}(CIP)$, których głównym źródłem są względne błędy danych katalogowych FK5 i Hipparcos (por. rys. 5.10)



Rysunek 5.18. Różnice $\alpha_{app}^{FK5}(CIP) - \alpha_{app}^{HIP}(CIP)$, których głównym źródłem są względne błędy danych katalogowych FK5 i Hipparcos (por. rys. 5.11)

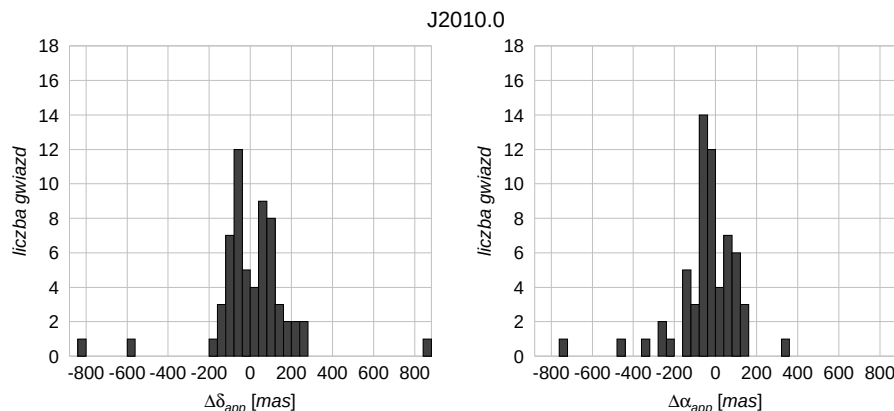


Rysunek 5.19. Całkowite różnice $\delta_{app(CEP)}^{FK5} - \delta_{app(CIP)}^{HIP}$ uwzględniające wpływ zmiany systemu odniesienia (FK5→Hipparcos), redukcji niezgodności osi bieguna $CEP_{80} \rightarrow CIP$ oraz błędy pozycji katalogowych gwiazd (por. rys. 5.12)



Rysunek 5.20. Całkowite różnice $\alpha_{app(CEP)}^{FK5} - \alpha_{app(CIP)}^{HIP}$ uwzględniające wpływ zmiany systemu odniesienia (FK5→Hipparcos), redukcji niezgodności osi bieguna $CEP_{80} \rightarrow CIP$ oraz błędy pozycji katalogowych gwiazd (por. rys. 5.13)

5.21 w swoim kształcie niewiele, chociaż wyraźnie od niego odbiega — widać przyrost liczby gwiazd o większych różnicach współrzędnych.



Rysunek 5.21. Histogram całkowitych różnic pozycji pozornych $\delta_{app(CEP)}^{FK5} - \delta_{app(CIP)}^{FK5*}$ oraz $\delta_{app(CEP)}^{FK5} - \delta_{app(CIP)}^{FK5*}$ (por. rys. 4.12)

Na podstawie wykonanych obliczeń i przedstawionych wykresów można stwierdzić, że co najmniej kilka spośród gwiazd zawartych w zbiorze testowym (pokrywającym się ze zbiorem gwiazd zawartych w tablicach miejsc pozornych Rocznika Astronomicznego IGiK (Kryński i Sękowski, 2001–2006)) wykazuje szczególnie duże różnice współrzędnych pozornych przy przejściu od danych katalogu FK5 do Katalogu Hipparcos oraz zastosowaniu, rekomendowanego przez IAU, modelu precesyjno-nutacyjnego IAU2000. Jest to przede wszystkim wynikiem dużych błędów systematycznych jakimi obarczone są pozycje katalogowe FK5 tych gwiazd w porównaniu z najnowszymi wyznaczeniami zawartymi w Katalogu Hipparcos. Zgodnie z najnowszymi danymi, w wypadku niektórych z nich stwierdzono także, że są to gwiazdy zmienne lub należące do układów wielokrotnych. Zostało to zaznaczone w odpowiednich rubrykach Katalogu Hipparcos.

Tablica 5.1 zawiera wartości różnic pozycji pozornych analizowanych gwiazd, dla których przekraczają one 150 mas w epoce J2000.0 lub J2010.0. Wszystkie gwiazdy (za wyjątkiem FK5 335), dla których różnice pozycji na epokę J2000.0 osiągają 500 mas w Katalogu Hipparcos oznaczone są jako wielokrotne. Niemal wszystkie gwiazdy zawarte w tabeli oznaczone są tam jako wykazujące jakiś typ zmienności, co oznacza, że nie spełniają kryteriów stawianych gwiazdom wykorzystywanym w celach astrometrycznych.

Tabela 5.1. Różnice $\Delta\delta$ i $\Delta\alpha$ [mas] przekraczające 150 mas

FK5	HIP	J2000.0			J2010.0			Var/Mult ^b
		$\Delta\alpha$	$\Delta\delta$	$\Delta\sigma^a$	$\Delta\alpha$	$\Delta\delta$	$\Delta\sigma^a$	
893	116727	-72.9	609.5	613.8	-259.3	846.4	885.2	G
417	54061	-15.4	-498.8	499.0	159.6	-811.4	826.9	A D C
257	32349	-664.9	29.9	665.6	-730.8	209.1	760.1	2 + U O
335	44127	-120.3	-486.0	500.6	-150.7	-597.6	616.3	
729	94648	-223.5	-26.2	225.0	-456.3	-1.3	456.3	G
1649	113116	-292.3	258.0	389.9	-355.7	278.9	452.0	
395	51808	172.8	-57.3	182.0	324.0	61.8	329.8	C
509	67301	-60.3	207.9	216.5	-69.7	254.7	264.1	1 M
912	82080	-209.5	72.7	221.7	-235.8	79.3	248.8	1 * P V
447	58001	-118.4	-5.2	118.5	-243.1	0.4	243.1	1 M
676	87833	-27.8	192.8	194.8	-18.7	229.3	230.0	1 M
910	47193	-117.8	151.1	191.6	-138.2	169.2	218.5	
817	107119	19.3	149.5	150.8	-8.7	194.6	194.7	C
354	46390	54.4	-180.2	188.2	61.3	-184.7	194.6	1 M
653	85670	-64.5	126.3	141.8	-65.7	158.5	171.6	1 M
907	11767	-69.8	-75.7	103.0	-134.6	-103.4	169.7	1 P
815	107315	90.1	-118.2	148.6	95.9	-137.9	168.0	1 U
913	85822	-119.7	77.1	142.4	-140.3	92.1	167.9	C
193	24608	-61.6	130.5	144.3	-57.9	154.7	165.2	1 + U O
483	62956	-41.2	121.5	128.3	-43.7	153.6	159.7	1 P
498	65474	121.2	46.3	129.8	137.1	80.7	159.1	1 P

^a $\Delta\sigma^2 = \Delta\delta^2 + \Delta\alpha^2$ ^b kolumna 1 — oznaczenie zmienności (1: $< 0.06\ mag$, 2: $0.06 - 0.6\ mag$, 3: $> 0.6\ mag$); 2 — dane katalogowe Hipparcos odnoszone do: A-Z składnika systemu wielokrotnego, * środka jasności, + środka masy; 3 — typ zmienności (C brak, D wielokrotna, M mikrozmienna, P okresowa, R barwowa, U nieokreślona); 4 — rodzaj rozwiązania dla systemów wielokrotnych; (ESA, 1997)

5.3. Analiza zmienności pozycji pozornych gwiazd w czasie

Pozycje pozorne gwiazd zmieniają się w czasie. W praktyce, w publikacjach rocznikowych i almanachach, są więc tabelaryzowane na zadany moment z interwałem umożliwiającym interpolację wartości bez znaczącej utraty dokładności. Zwykle momentem tym jest moment górowania gwiazdy w południku Greenwich, a interwałem, krok dobowy lub 10-dniowy.

Za zmienność pozornego położenia gwiazdy, w mniejszym lub większym stopniu, odpowiadają wszystkie składniki procesu obliczeniowego.

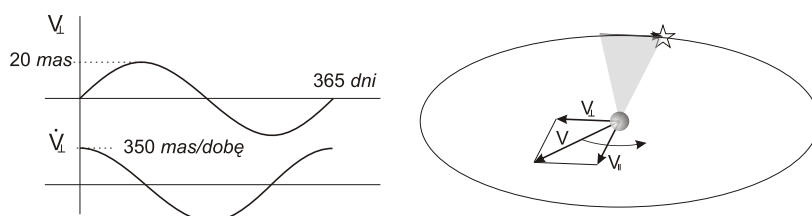
Dla interpolacji stabelaryzowanych danych najistotniejsze są jednak te, które powodują zmiany o dużej amplitudzie w krótkich okresach czasu. Wpływ np. precesji na pozycje pozorne można z tego punktu widzenia traktować jako stałą jednostajną zmianę wartości współrzędnych, w tempie około $46''.1$ rocznie w rektascensji i około $20''.0$ rocznie w deklinacji. Pozwala to na stosowanie interpolacji liniowej praktycznie w każdym przedziale, przy zachowaniu dużej dokładności. Inaczej jest z pozostałymi składnikami obliczeń.

Effekt aberracji rocznej światła, opisywany jest wzorami (str. 47):

$$\begin{aligned}\Delta\alpha_* &= 1191''.28616 (\dot{Y} \cos \alpha_0 - \dot{X} \sin \alpha_0) \\ \Delta\delta &= 1191''.28616 (\dot{Y} (\tan \varepsilon \cos \delta_0 - \sin \delta_0 \sin \alpha_0) - \dot{X} \sin \delta_0 \sin \alpha_0)\end{aligned}\quad (5.3)$$

gdzie $\dot{X}$ i $\dot{Y}$ to kartezjańskie składowe wektora prędkości Ziemi w jednostkach astronomicznych na dobę.

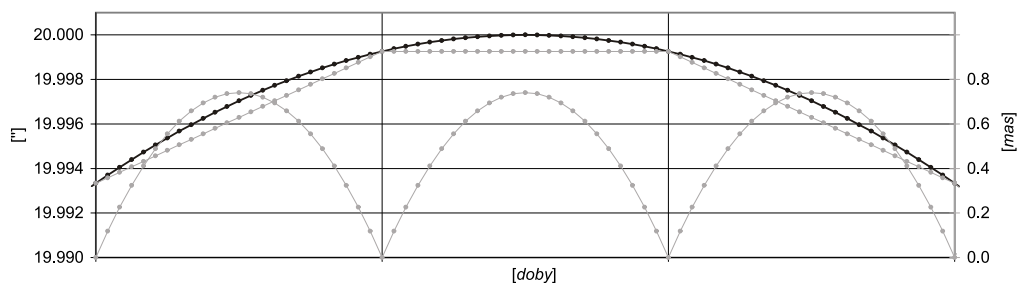
Wyrażony jest on w postaci liniowej zależności $\Delta\alpha_*$ i $\Delta\delta$ od $\dot{X}$ i $\dot{Y}$ oraz sinusoidalnej zależności od czasu (α_0 , δ_0 oraz ε dla danej gwiazdy są stałe), o maksymalnej amplitudzie odpowiadającej wartości stałej aberracji $\approx 20''.5$ (rys. 5.22).



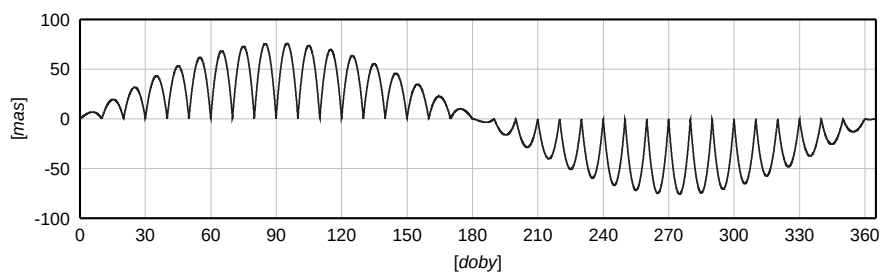
Rysunek 5.22. Aberracja roczna światła

Wynikające z tej zależności tempo zmian pozycji pozornej osiąga bardzo duże wartości — maksymalnie około 350 mas na dobę. Bardziej istotnym w tym wypadku jest jednak fakt, że w ciągu pojedynczej doby jest to zmienność niewiele odbiegająca od liniowej. W skrajnym wypadku, w obszarze największej krzywizny, błędy interpolacji liniowej na interwale dobowym nie przekraczają 1 mas (rys. 5.23).

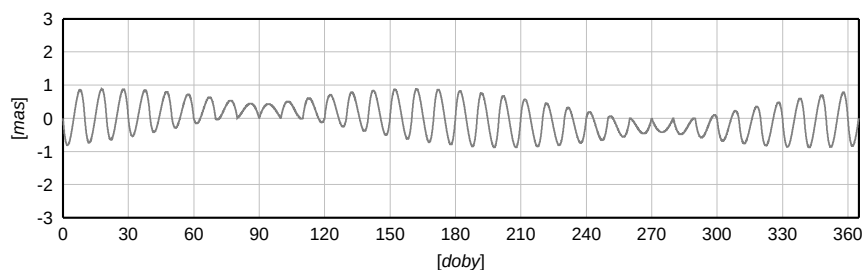
Nieco gorzej jest oczywiście w wypadku interwałów 10-dniowych, błędy interpolacji liniowej mogą osiągać wówczas wartości $70 — 80 \text{ mas}$ (rys. 5.24), stwarzając konieczność stosowania interpolacji kwadratowej, zapewniającej zgodność na poziomie 1 mas (rys. 5.25).



Rysunek 5.23. Aberracja roczna światła oraz jej liniowa interpolacja w przedziałach dobowych. Pokazano także wykres błędów interpolacji, którego dotyczy skala z prawej strony rysunku



Rysunek 5.24. Błędy interpolacji liniowej, aberracji rocznej, na przedziałach 10-dniowych. Umowna skala pozioma obejmuje okres roku



Rysunek 5.25. Błędy kwadratowej interpolacji Bessela, aberracji rocznej, na przedziałach 10-dniowych. Umowna skala pozioma obejmuje okres roku

Grawitacyjne ugięcie światła jest również czynnikiem mogącym powodować dość znaczne przemieszczenia pozycji pozornych gwiazd, w skrajnych wypadkach osiągające wartość nawet około 1 sekundy łuku (rys. 5.1). Dotyczy to jednak wyłącznie gwiazd znajdujących się w danym momencie

bardzo blisko brzegu tarczy słonecznej, zatem „widocznych” w dzień i nie mających znaczenia w praktyce obserwacyjnej. Poza obszarem bezpośredniego sąsiedztwa ze Słońcem przemieszczenia związane z grawitacyjnym ugięciem światła mają bardzo małe wartości (rzędu kilku *mas*), a tempo zmian tych wartości jest, nawet w wypadku 10-dniowych interwałów, całkowicie pomijalne.

W najbardziej złożony sposób na zmienność pozycji pozornych gwiazd wpływa ruch nutacyjny bieguna pośredniego systemu odniesienia. Zarówno w teorii nutacji IAU80 jak i IAU2000 wartości nutacji w długości ($\Delta\psi$) oraz w nachyleniu ($\Delta\epsilon$) opisuje się jako szereg wyrazów okresowych — sum, odpowiednio skalowanych sinusów i cosinusów tzw. argumentów fundamentalnych: średniej anomalii Księżyca (l), średniej anomalii Słońca (l'), średniej długości ekliptycznej węzła wstępującego orbity Księżyca (Ω) itp⁵⁾. Dla interpolacji tablicowanych pozycji pozornych gwiazd największe znaczenie ma oczywiście amplituda wyrazów krótkookresowych tych szeregów. Teoria nutacji IAU80 (rozdz. 3.2.4) opisywana jest przez 106 wyrazów okresowych z czego 76 stanowią składniki tzw. nutacji krótkookresowej o okresach nieprzekraczających 50 dób. Teoria nutacji IAU2000, w pełnym rozwinięciu, tj. w wariantcie IAU2000A⁶⁾ zapewniającym dokładność 0.2 *mas* opisywana jest przez 678 wyrazów lunisolarnych, w tym 552 krótkookresowe (≤ 50 dób) oraz 687 długookresowych wyrazów planetarnych. W uproszczonym wariantcie IAU2000B⁷⁾ zapewniającym dokładność 1 *mas* jest to tylko 77 wyrazów, z czego 52 to składniki krótkookresowe. Tablica 5.2 przedstawia wartości współczynników, amplitud oraz okresów pierwszych kilkudziesięciu wyrazów, których amplitudy przekraczają 1 *mas*. Widać z niej, że dominującym wyrazem nutacji w długości jest składnik o okresie 6798.4 doby (18.6 roku), którego amplituda osiąga 17''2. Jest to jednocześnie dominujący wyraz nutacji w nachyleniu — amplituda przekracza w tym wypadku 9''2. Ponieważ amplituda tego wyrazu znacznie przewyższa wartości pozostałych składników szeregu, pozwala to oszacować długookresową zmienność nutacji właśnie na tym poziomie. Dynamika zmian tego składnika wynosi przy tym 15.9 *mas/d* w długości oraz 8.5 *mas/d* w szerokości. Pośród składników długookresowych nutacji, tak

⁵⁾ Teoria IAU2000 obok szeregów dla $\Delta\psi$ i $\Delta\epsilon$ podaje również rozwinięcia dla wielkości X i Y — współrzędnych bieguna *IRS* w *GCRS* — mogących również posłużyć do obliczenia nutacyjnej macierzy obrotu. Wielkości X i Y opisywane są analogicznie przez odpowiednie szeregi parametrów fundamentalnych.

⁶⁾ <ftp://maia.usno.navy.mil/conv2000/chapter5/IAU2000A.f>

⁷⁾ <ftp://maia.usno.navy.mil/conv2000/chapter5/IAU2000B.f>

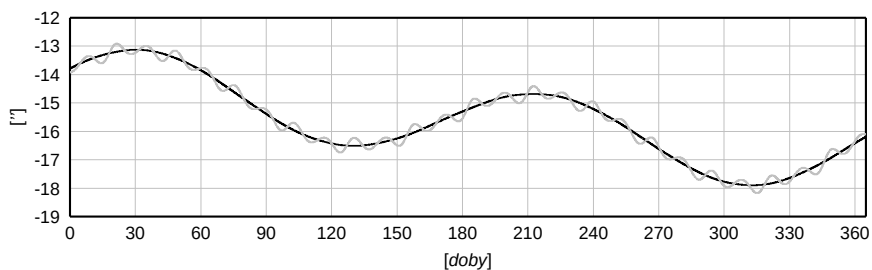
[illegible]

w długości jak i nachyleniu, największą dynamiką zmian charakteryzują się składniki o okresach, kolejno: 186.2, 6798.4, 121.7 i 365.3 doby, dynamika ich zmienności to odpowiednio (długość/nachylenie): 45.3/19.7, 15.9/8.5, 2.7/1.2 i 2.5/0.1 *mas/d*. Najbardziej dynamiczny składnik (186.2) wyznacza praktyczny okres zmienności nutacji długookresowej w aspekcie ewentualnej interpolacji.

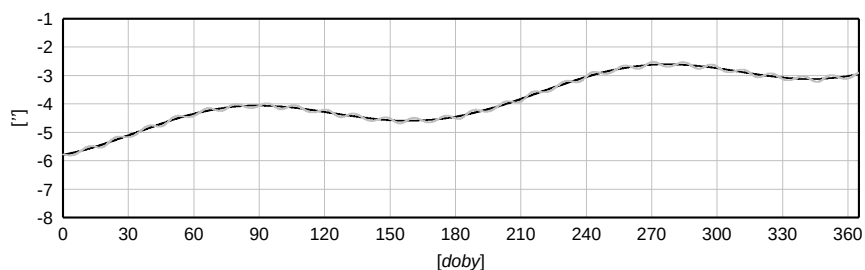
Amplitudy wyrazów krótkookresowych osiągają znacznie mniejsze wartości. Kilka z nich o największych amplitudach osiąga, np. dla $d\psi$, odpowiednio: 207.5, 71.1, 38.7, 30.1 *mas*. Oznacza to jednak krótkookresową zmienność $d\psi$ o łącznej amplitudzie nawet około 300 *mas*. Wyrazy nutacji krótkookresowej charakteryzują się przy tym znacznie większą dynamiką zmienności. Najbardziej dynamicznym składnikiem nutacji krótkookresowej, określającym również jej praktyczną okresowość w kontekście ewentualnej interpolacji, jest składnik o okresie 13.7 doby, którego dynamika zmienności osiąga wartości 104.7 *mas/d* i 45.0 *mas/d* odpowiednio w długości i nachyleniu.

Na rysunkach 5.26–5.27 przedstawione zostały wykresy (obliczonej zgodnie z teorią IAU2000A) całkowitej i długookresowej nutacji w długości oraz całkowitej i długookresowej nutacji w nachyleniu. Na rysunku 5.28 natomiast, krótkookresowej nutacji w długości i nachyleniu. Wykresy te pozwalają oszacować długość interwału ewentualnej interpolacji tabelaryzowanych pozycji pozornych gwiazd. Niewielka dynamika zmienności wyrazów nutacji długookresowej powoduje, co widać także na przedstawionych wykresach, że interwał 10-dniowy powinien być wystarczający dla stosowania interpolacji wielomianowej. Pozostaje natomiast pytanie o wymagany stopień wielomianu interpolacyjnego i osiąganą tą drogą dokładność pozycji pozornych. Z kolei, duża dynamika zmienności wyrazów nutacji krótkookresowej (rys. 5.28) wyklucza możliwość interpolacji wielomianowej w podobnym, 10-dniowym interwale.

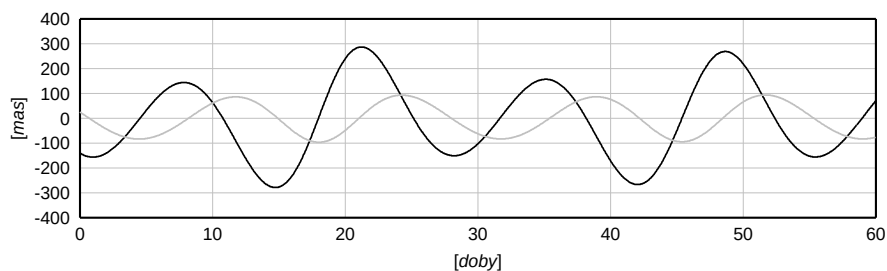
W celu ilościowego oszacowania błędów interpolacji, na rysunku 5.29 pokazana została liniowa i kwadratowa interpolacja Bessela w przedziale 10-dniowym, 182.6 dobowego wyrazu nutacji długookresowej, o amplitudzie 1''317, charakteryzującego się największą, wśród wyrazów długookresowych, dynamiką zmienności (45.3 *mas/d*). Na kolejnych rysunkach (5.30) przedstawiona jest zaś podobna interpolacja w przedziale jednodniowym, najszybciej zmieniającego się wyrazu nutacji krótkookresowej (13.7 *d*), o amplitudzie 227.6 *mas* i dynamice 104.7 *mas/d*. Z wykresów wyraźnie wynika, że dla zapewnienia dokładności interpolowanych wartości na poziomie 1 *mas* konieczne jest stosowanie, podobnie jak w



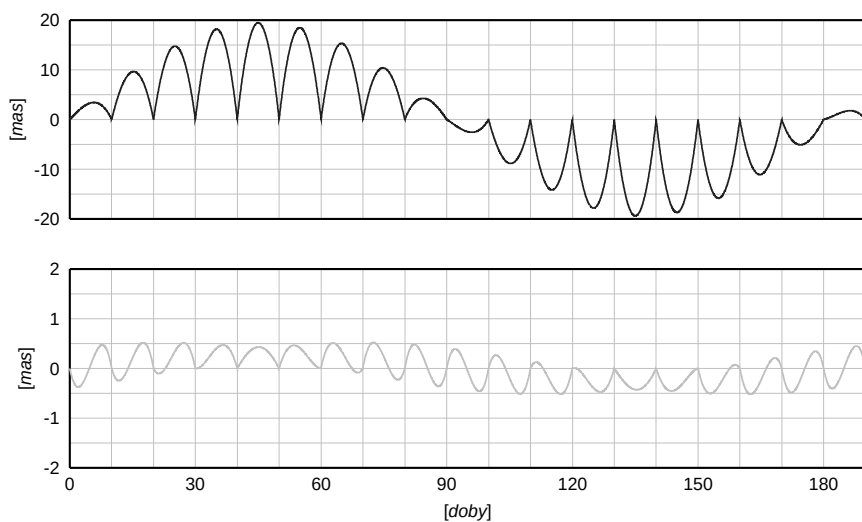
Rysunek 5.26. Wartości długookresowej nutacji w długości ($\Delta\psi$ — wyrazy o okresach > 50 dni; linia ciemniejsza) oraz nutacji całkowitej (linia jaśniejsza). Skala pozioma obejmuje okres 1 roku (J2000.0–J2001.0)



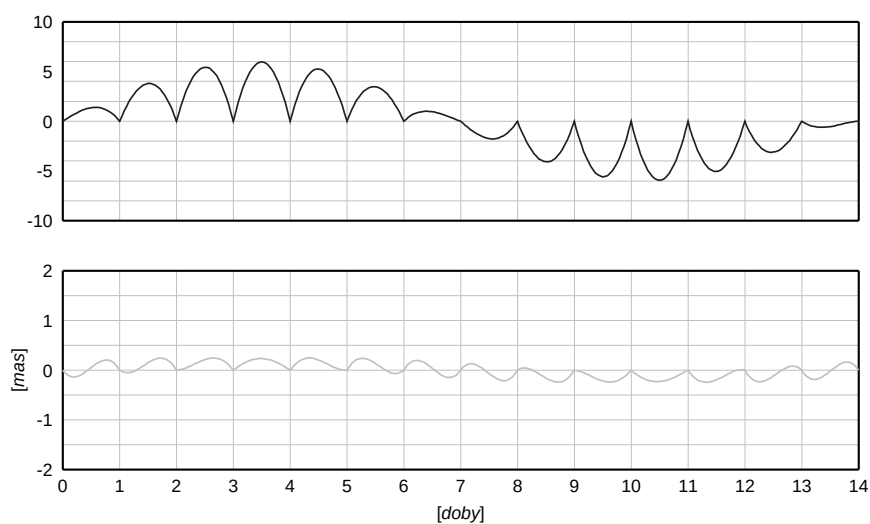
Rysunek 5.27. Wartości długookresowej nutacji w nachyleniu ($\Delta\epsilon$ — wyrazy o okresach > 50 dni; linia ciemniejsza) oraz nutacji całkowitej (linia jaśniejsza). Skala pozioma obejmuje okres 1 roku (J2000.0–J2001.0). Skala pionowa odpowiada skali rys. 5.26



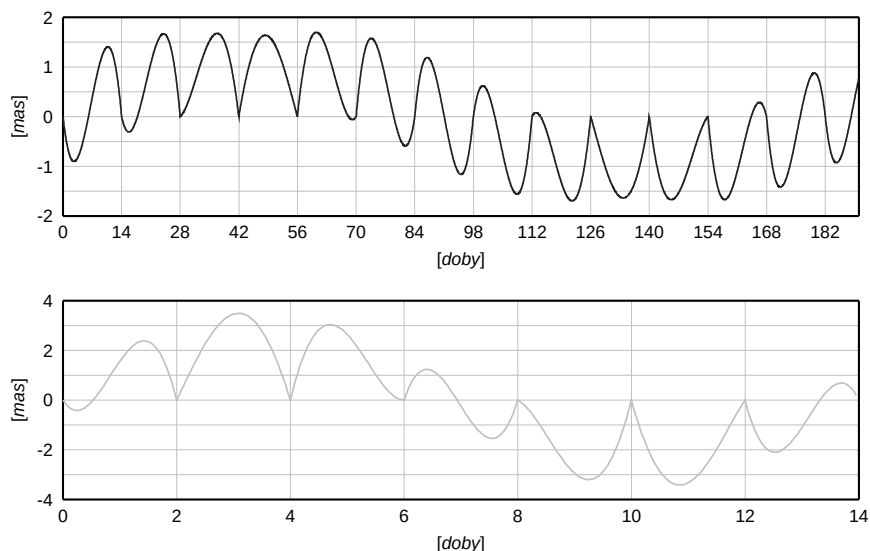
Rysunek 5.28. Wartości krótkookresowej nutacji w długości ($d\psi$) (linia ciemniejsza) oraz krótkookresowej nutacji w nachyleniu ($d\epsilon$) (linia jaśniejsza). Wyrazy o okresach < 50 dni. Skala pozioma obejmuje okres dwóch miesięcy



Rysunek 5.29. Błędy liniowej (wykres górny) i kwadratowej (wykres dolny) interpolacji Bessela najszybciej zmieniającej się długookresowej składowej nutacji, w przedziałach 10–dobowych. Skala pozioma odpowiada pełnemu okresowi składowej 182.6 dób



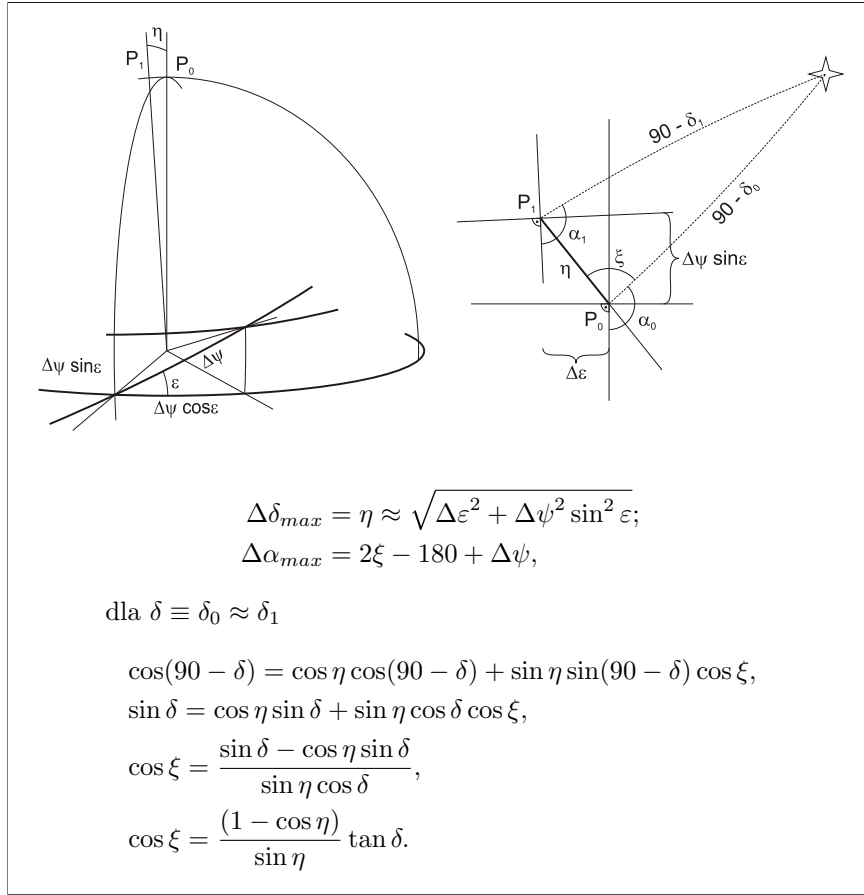
Rysunek 5.30. Błędy liniowej (wykres górny) i kwadratowej (wykres dolny) interpolacji Bessela najszybciej zmieniającej się krótkookresowej składowej nutacji, w przedziałach 1–dobowych. Skala pozioma odpowiada pełnemu okresowi składowej 13.7 dób



Rysunek 5.31. Błędy kwadratowej interpolacji Bessela najszybciej zmieniających się składowych nutacji długo- (wykres górny) i krótkookresowej (wykres dolny), w przedziałach odpowiednio: 14-dobowym i 2-dobowym

wypadku aberracji rocznej interpolacji kwadratowej, a nawet niewielkie zwiększenie interwału: powyżej 10 dni dla nutacji długookresowej i powyżej 1 doby dla nutacji krótkookresowej, powoduje szybkie pogarszanie się jakości interpolowanych wartości. W wypadku interwałów 14-dobowego i 2-dobowego poziom błędów interpolacji kwadratowej wynosi odpowiednio: 1.7 i 3.5 *mas* (rys. 5.31). Błędy interpolacji liniowej w tych interwałach (nie pokazane na wykresach) osiągają zaś wartości, odpowiednio: 34 i 23 *mas*.

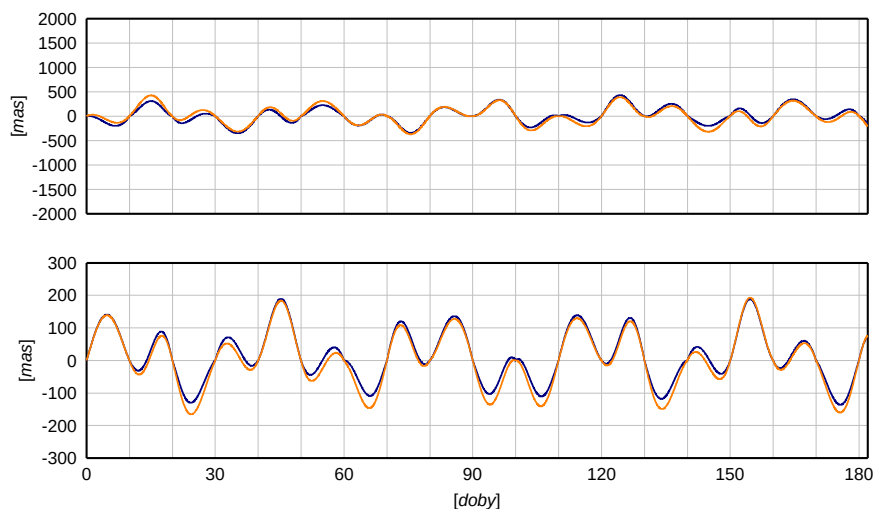
Przedstawiona analiza dotyczy dominujących, w znaczeniu dynamiki zmienności, składników zarówno długo- jak i krótkookresowych wyrazów nutacji. Jakość interpolacji całkowitej nutacji będącej złożeniem wielu wyrazów może jeszcze jednak nieco odbiegać od oszacowanej na wykresach. Interpolacja pozycji pozornych gwiazd pociąga za sobą dodatkową trudność związaną z ich nieliniową zależnością od parametrów nutacyjnych. Zmiany współrzędnych spowodowane nutacją zależą od położenia gwiazdy na sferze niebieskiej i mogą być dużo większe niż wartości samych składowych nutacji. Maksymalna zmiana deklinacji, wywołana nutacją bieguna dana jest wzorem $\Delta\delta_{max} = \eta \approx \sqrt{\Delta\varepsilon^2 + \Delta\psi^2 \sin^2 \varepsilon}$ (ramka ze str. 119). Dotyczy ona gwiazd znajdujących się w danym momencie na kole wiel-



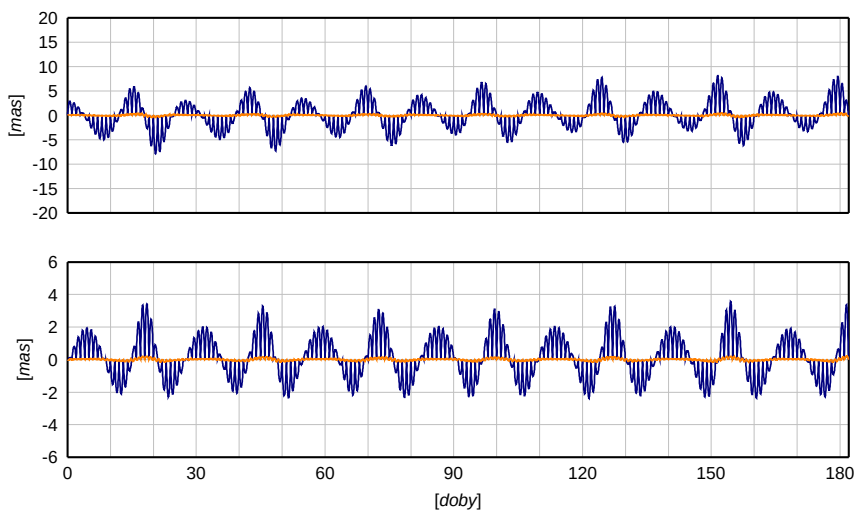
kim przechodzącym jednocześnie przez biegun średni i prawdziwy. Zmiana rektascensji gwiazd leżących na równiku niebieskim równa jest $\Delta\psi \cos \varepsilon$, jednak jej wartość rośnie proporcjonalnie do tangensa deklinacji gwiazdy, zgodnie z wzorem: $\Delta\alpha_{max} \approx 2\xi - 180 + \Delta\psi$, gdzie $\cos \xi \approx \frac{(1 - \cos \eta)}{\sin \eta} \tan \delta$.

Na rysunkach 5.32–5.35 przedstawione zostały wykresy błędów liniowej i kwadratowej interpolacji rektascensji i deklinacji pozornej dwóch „gwiazd” o założonych współrzędnych katalogowych, odpowiednio $\alpha_0 = 90^\circ$, $\delta_0 = 0^\circ$ i $\alpha_0 = 90^\circ$, $\delta_0 = 85^\circ$. W obu wypadkach błędy te wyznaczone zostały przy zastosowaniu interpolacji Bessela w interwałach 10-dobowym i jednodobowym.

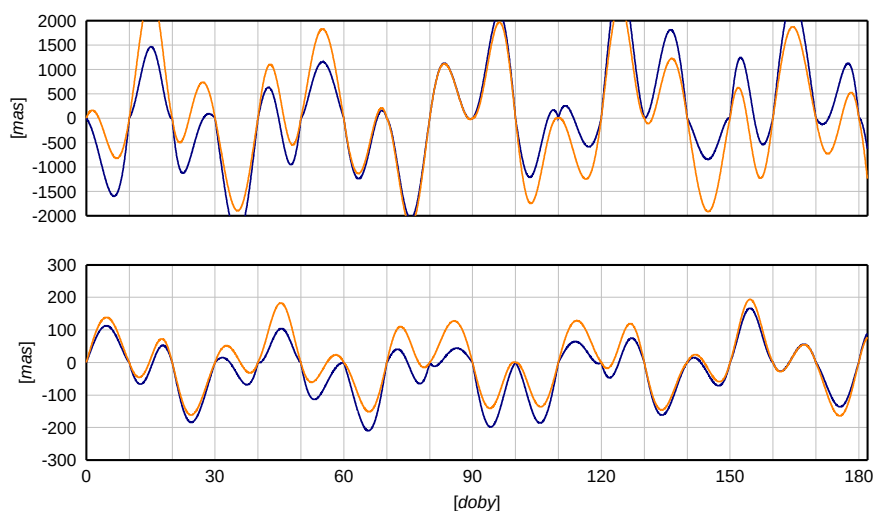
Widać wyraźnie, że interpolacja w przedziale 10-dobowym dla „pełnych” pozycji pozornych — obliczonych z wykorzystaniem wszystkich wy-



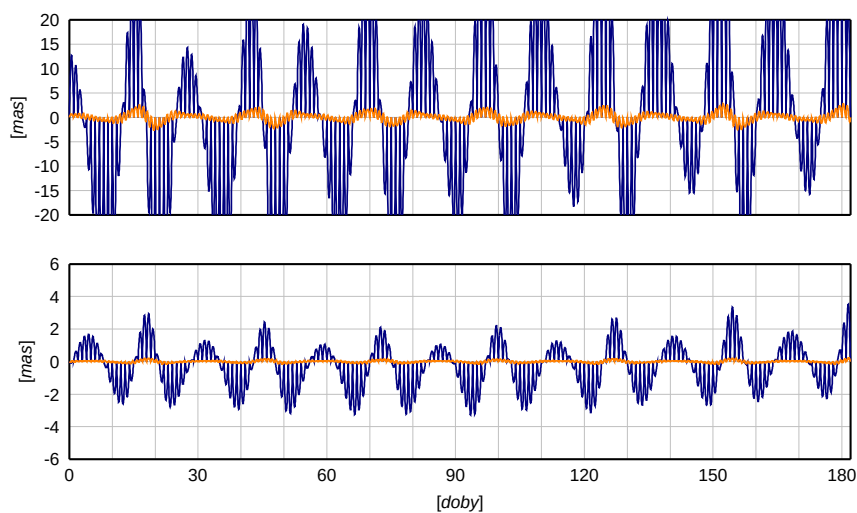
Rysunek 5.32. Błędy liniowej (niebieska linia) i kwadratowej (pomarańczowa linia) interpolacji Bessela rektascensji (wykres górny) i deklinacji (wykres dolny), gwiazdy o wsp. katalogowych $\alpha_0 = 90^\circ$, $\delta_0 = 0^\circ$, w przedziałach 10-dniowych. Skala pozioma obejmuje okres 182.6 dób (najszybciej zmiennej składowej długookresowej)



Rysunek 5.33. Błędy liniowej (niebieska linia) i kwadratowej (pomarańczowa linia) interpolacji Bessela rektascensji (wykres górny) i deklinacji (wykres dolny), gwiazdy o wsp. katalogowych $\alpha_0 = 90^\circ$, $\delta_0 = 0^\circ$, w przedziałach dobowych. Skala pozioma obejmuje okres 182.6 dób (najszybciej zmiennej składowej długookresowej)



Rysunek 5.34. Błędy liniowej (niebieska linia) i kwadratowej (pomarańczowa linia) interpolacji Bessela rektascensji (wykres górny) i deklinacji (wykres dolny), gwiazdy bliskobiegunowej o wsp. katalogowych $\alpha_0 = 90^\circ$, $\delta_0 = 85^\circ$, w przedziałach 10-dniowych. Skala pozioma obejmuje okres 182.6 dób (najszybciej zmiennej składowej długookresowej)



Rysunek 5.35. Błędy liniowej (niebieska linia) i kwadratowej (pomarańczowa linia) interpolacji Bessela rektascensji (wykres górny) i deklinacji (wykres dolny), gwiazdy bliskobiegunowej o wsp. katalogowych $\alpha_0 = 90^\circ$, $\delta_0 = 85^\circ$, w przedziałach dobowych. Skala pozioma obejmuje okres 182.6 dób (najszybciej zmiennej składowej długookresowej)

razów nutacji — obarczona jest bardzo dużymi błędami, dochodzącymi nawet w wypadku gwiazdy leżącej na równiku do kilkuset *mas*. Spowodowane to jest pokazaną już na rys. 5.28 dużą dynamiką zmienności wyrazów nutacji krótkookresowej niemożliwą do interpolacji w takim interwale. Jednocześnie rys. 5.33 pokazuje, że zastosowanie interpolacji o interwale jednodobowym znakomicie poprawia jej jakość. Interpolacja kwadratowa daje błędy poniżej 1 *mas*, a liniowa poniżej 8 *mas* tak w rektascensji jak i deklinacji.

W wypadku gwiazdy bliskobiegunowej (rys. rys. 5.34, 5.35) sytuacja ta ulega znacznemu pogorszeniu. Błędy interpolacji rektascensji, zarówno liniowej jak i kwadratowej, w interwałach 10-dobowych osiągają wartość kilku sekund. Interpolacja rektascensji w interwałach jednodobowych również ulega pogorszeniu, chociaż błędy interpolacji kwadratowej pozostają nadal na niskim poziomie około 2 *mas*. Sytuacja ta wynika oczywiście, z pokazanej wcześniej, zależności zmiany rektascensji gwiazdy ($\Delta\alpha$) od wartości nutacji w długości ($\Delta\psi$), skalowanej tangensem deklinacji gwiazdy.

5.4. Pozycje pozorne Syriusza i Biegunowej

W praktyce astrometrycznej szczególne znaczenie mają pozycje pozorne α UMi (*Polaris*) oraz α CMa (*Sirius*). Pierwsza z nich jest gwiazdą położoną obecnie najbliżej średniego bieguna niebieskiego (ściśle: bieguna pośredniego systemu odniesienia), widoczną nieuzbrojonym okiem, druga zaś najjaśniejszą spośród wszystkich gwiazd widocznych na niebie. W obliczeniach i tablicowaniu pozycji pozornych obu tych gwiazd dodatkowym problemem, obok już wymienionych w poprzednim rozdziale, jest fakt, że są to gwiazdy będące składnikami układów wielokrotnych i jako takie wykazują okresową zmienność pozycji związaną z orbitalnym ruchem wokół środków mas tych układów.

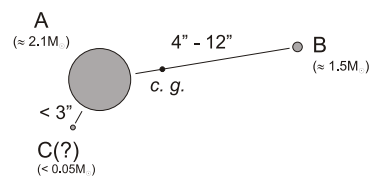
Pozycje katalogowe układów wielokrotnych, w tym Syriusza i Polarnej (Biegunowej), dotyczą środka mas tych układów, zaś pozycje poszczególnych składników, w tym składników najjaśniejszych (α CMa A oraz α UMi AP) otrzymuje się w wyniku redukcji pozycji katalogowych w oparciu o podane dodatkowo parametry orbitalne. Pozycje pozorne publikowane w wydawnictwach rocznikowych odnoszą się natomiast na ogół do składników najjaśniejszych bądź tzw. środka jasności, będącego uśrednionym centrum obrazu fotograficznego układu.

Redukcja od pozycji *c.g.* (*centrum gravitatis*) do pozycji jaśniejszego składnika jest więc w tym wypadku częścią procesu obliczeniowego od pozycji katalogowej do pozycji pozornej. Stwarza to konieczność uwzględnie-

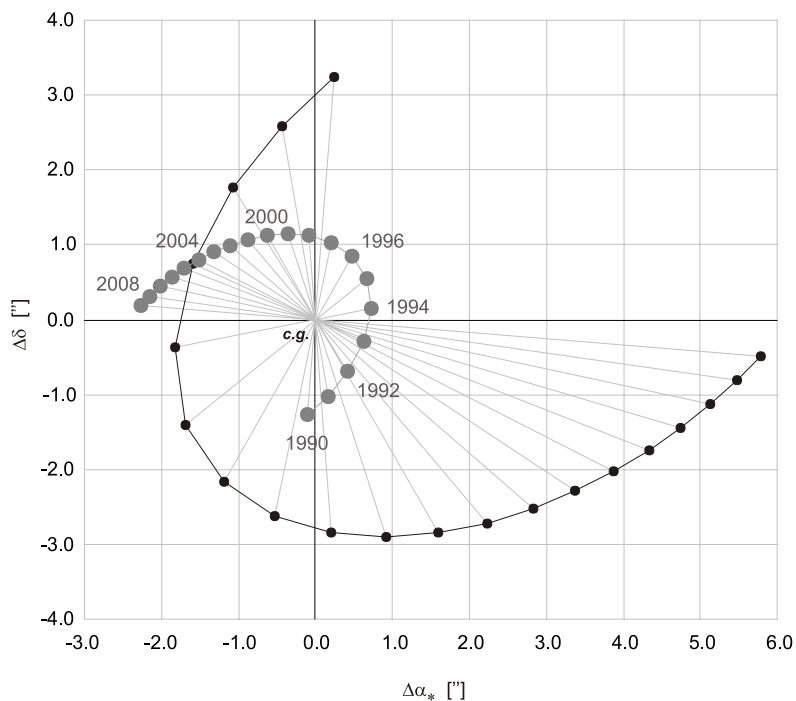
nia zmienności związanej z ruchem orbitalnym w szacunkach dotyczących warunków interpolacji pozycji na daną epokę.

5.4.1. Syriusz

Syriusz (α *Canis Majoris*, FK 257, HIP 32349) jest znanym od dawna układem wielokrotnym, w którym dominującą rolę odgrywają dwa najjaśniejsze, oddalone od siebie o maks. około $11''.2$, składniki. Okres obiegu składnika α CMa A wokół środka mas wynosi 50.09 lat, natomiast stosunek mas głównych składników $\mu = \frac{M_A}{M_A + M_B} = 0.282$ (Bos, 1960). Podejrzewane, choć dotychczas niepotwierdzone obserwacyjnie, jest istnienie jeszcze jednego, trzeciego składni-



Rysunek 5.36. Układ wielokrotny α CMa



Rysunek 5.37. Zmiana położenia głównych składników (A i B) układu wielokrotnego α CMa względem środka mas układu. Okres obiegu około 50 lat

ka układu (rys. 5.36), którego obecność miałyby tłumaczyć zaburzenia we wzajemnym, orbitalnym ruchu składników A i B (Benest i Duvent, 1995). Zaburzenia te, o okresowości około 6.4 lat, osiągają wartość 50 *mas* i mogłyby być powodowane obecnością małowasywnej ($< 0.05 M_{\odot}$) — zatem bardzo słabej (15–20 mag) i skrajnie trudnej do obserwacji ze względu na sąsiedztwo bardzo jasnego składnika α CMa A — gwiazdy, obiegającej po dość ciasnej orbicie składnik A.

Na rysunku 5.37 przedstawiono zmiany położenia głównych składników (A i B) układu α CMa względem wspólnego środka mas. Rysunek ten powstał w oparciu o wartości podane przez van den Bosa (Bos, 1960) zawarte w tabeli 5.3. Roczna zmiana pozycji składnika A względem środka mas układu wynosi kilkaset *mas* w każdej ze współrzędnych, co w zgrubnym oszacowaniu (strzałka łuku ξ : $\Delta x = 1''0 \times (1 - \cos \frac{1}{2}\xi)$, dla $\xi \approx 20^\circ$) daje maksymalny błąd interpolacji liniowej na interwale jednego roku około 15 *mas*.

Tabela 5.3. Kąt pozycyjny i separacja składników α CMa A i B oraz odpowiadające im poprawki A – c.g. $\Delta\alpha$ i $\Delta\delta$ wg Voleta i van den Bosa (Volet, 1931; Bos, 1960)

epoka	Ch. Volet				W. H. van den Bos			
	PA [°]	SEP ['']	$\Delta\alpha$ [s]	$\Delta\delta$ ['']	PA [°]	SEP ['']	$\Delta\alpha$ [s]	$\Delta\delta$ ['']
1990	0.04	4.235	-0.0001	-1.194	4.52	4.536	-0.0067	-1.275
1991	343.00	3.361	0.0185	-0.906	350.28	3.664	0.0116	-1.018
1992	315.83	2.700	0.0354	-0.546	327.82	2.907	0.0291	-0.694
1994	246.77	2.933	0.0507	0.326	259.10	2.713	0.0501	0.145
1995	222.50	3.377	0.0429	0.702	231.29	3.138	0.0460	0.553
1996	203.24	3.691	0.0274	0.956	209.81	3.485	0.0326	0.853
1997	186.58	3.924	0.0085	1.099	191.69	3.737	0.0142	1.032
1998	171.76	4.158	-0.0112	1.160	175.77	3.978	-0.0055	1.119
1999	158.63	4.436	-0.0304	1.165	161.79	4.260	-0.0250	1.141
2000	147.19	4.769	-0.0486	1.130	149.69	4.597	-0.0436	1.119
2001	137.34	5.148	-0.0656	1.068	139.36	4.983	-0.0610	1.066
2002	128.89	5.562	-0.0814	0.985	130.57	5.403	-0.0772	0.991
2003	121.65	5.996	-0.0960	0.887	123.07	5.845	-0.0921	0.899
2004	115.39	6.440	-0.1094	0.779	116.65	6.296	-0.1058	0.796
2005	109.94	6.884	-0.1217	0.662	111.08	6.746	-0.1183	0.684
2006	105.15	7.322	-0.1329	0.540	106.21	7.190	-0.1298	0.566
2007	100.89	7.749	-0.1431	0.413	101.89	7.621	-0.1402	0.443
2008	97.08	8.161	-0.1523	0.284	98.03	8.036	-0.1496	0.317
2009	93.62	8.554	-0.1605	0.152	94.55	8.433	-0.1580	0.189

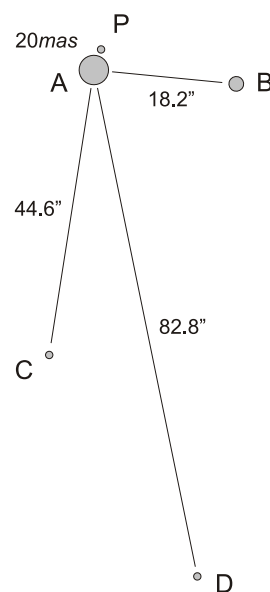
Tablica 5.3 zawiera, dla porównania, dwa zestawy danych, względnych pozycji składników — nowsze wg van den Bosa (1960) oraz starsze, ale nadal używane w niektórych wydawnictwach rocznikowych (APFS; AJ), wg Voleta (1931). Widać, że poprawki do pozycji, zależnie do przyjętego rozwiązania, różnią się znacznie. Różnice te dochodzić mogą nawet do 100 *mas*. Sprawia to, że błędy ewentualnej interpolacji, są całkowicie drugorzędne wobec niedokładności wprowadzanych przez niedoskonałość wyznaczeń parametrów orbitalnych składników układu. Oznacza to także, że ostateczne pozycje pozorne jaśniejszego składnika Syriusza (α CMa A), obliczane poprzez dodanie interpolowanych liniowo dla danego roku poprawek $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$, obarczone są błędem o maksymalnej wartości rzędu kilkudziesięciu *mas*, związanym z modelowaniem jego ruchu orbitalnego.

5.4.2. Biegunowa

Biegunowa (Polaris, α *Ursae Minoris*, FK 907, HIP 11767) jest jedną z najczęściej i najdokładniej obserwowanych gwiazd, przede wszystkim ze względu na swoje położenie w bezpośrednim sąsiedztwie bieguna pośredniego systemu odniesienia. Jest to jednak, z punktu widzenia astrometrii, gwiazda daleka od doskonałości. Biegunowa stanowi układ wielokrotny, składający się ze składnika głównego — ciasnej pary α UMi A, α UMi P (podwójna spektralna), składnika α UMi B (Wielen *et al.*, 2000b) oraz dwóch odległych składników α UMi C i α UMi D (rys. 5.38). Główny składnik α UMi A jest przy tym gwiazdą zmienną, pulsującą — cefeidą — o okresie zmienności około 4 dób i amplitudzie jasności około 0^m.05.

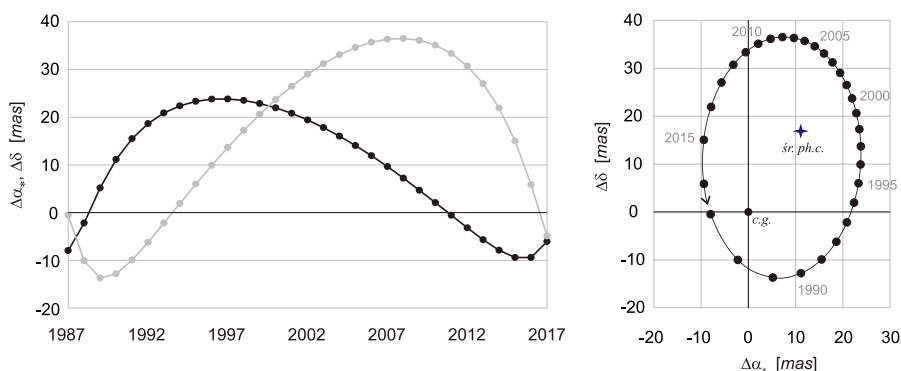
Do niedawna fakt, że jest to gwiazda wielokrotna był zarówno w obserwacjach jak i w katalogach pozycyjnych, np. FK5 (Fricke *et al.*, 1988, 1991), zaniedbywany. Było to uzasadnione ograniczoną dokładnością obserwacji za pomocą kół południkowych. Obecne, precyzyjne obserwacje satelitarne (Hipparcos) wymusiły uwzględnienie wielokrotnej natury Biegunowej w wyznaczaniu pozycji katalogowych składnika α UMi A.

Najważniejszym czynnikiem powodującym zmianę położenia α UMi A (ściśle: środka jasności pary A–P) jest obecność składnika α UMi B. Skład-



Rysunek 5.38. Układ wielokrotny α UMi

niki C i D, odległe i małomasywne nie odgrywają tu większej roli. Okres obiegu składników AP i B wokół wspólnego środka mas wynosi około 29.5 lat,



Rysunek 5.39. Zmiany współrzędnych $\Delta\alpha_*$ (linia ciemniejsza), $\Delta\delta$ (linia jaśniejsza) oraz trajektoria ruchu orbitalnego α UMi AP względem *c.g.* (Wielen *et al.*, 2000b)

Tabela 5.4. Wartości $\Delta\alpha_*$, $\Delta\delta$ α UMi AP – *c.g.* oraz ich roczne zmiany (Wielen *et al.*, 2000b)

epoka	$\Delta\alpha_*$ [mas]	$\Delta\delta$ [mas]	$\Delta\Delta\alpha_*$ [mas]	$\Delta\Delta\delta$ [mas]	epoka	$\Delta\alpha_*$ [mas]	$\Delta\delta$ [mas]	$\Delta\Delta\alpha_*$ [mas]	$\Delta\Delta\delta$ [mas]
1987.00	-7.97	-0.50			2002.00	19.43	29.02		
1988.00	-2.18	-10.08	5.790	-9.580	2003.00	17.83	31.23	-1.600	2.210
1989.00	5.19	-13.71	7.370	-3.630	2004.00	16.03	33.10	-1.800	1.870
1990.00	11.15	-12.81	5.960	0.900	2005.00	14.06	34.60	-1.970	1.500
1991.00	15.51	-9.93	4.360	2.880	2006.00	11.92	35.69	-2.140	1.090
1992.00	18.65	-6.23	3.140	3.700	2007.00	9.64	36.35	-2.280	0.660
1993.00	20.88	-2.20	2.230	4.030	2008.00	7.22	36.52	-2.420	0.170
1994.00	22.39	1.91	1.510	4.110	2009.00	4.70	36.13	-2.520	-0.390
1995.00	23.33	5.97	0.940	4.060	2010.00	2.10	35.12	-2.600	-1.010
1996.00	23.78	9.91	0.450	3.940	2011.00	-0.55	33.36	-2.650	-1.760
1997.00	23.83	13.69	0.050	3.780	2012.00	-3.17	30.73	-2.620	-2.630
1998.00	23.51	17.26	-0.320	3.570	2013.00	-5.68	27.02	-2.510	-3.710
1999.00	22.89	20.60	-0.620	3.340	2014.00	-7.89	21.92	-2.210	-5.100
2000.00	21.98	23.69	-0.910	3.090	2015.00	-9.42	15.03	-1.530	-6.890
2001.00	20.82	26.50	-1.160	2.810	2016.00	-9.40	5.86	0.020	-9.170
2002.00	19.43	29.02	-1.390	2.520	2017.00	-6.08	-4.90	3.320	-10.760

a amplituda zmian pozycji składnika α UMi AP wskutek tego ruchu osiąga wartości około ± 25 mas, w każdej ze współrzędnych.

Na rysunku 5.39 przedstawiono wykresy poprawek α UMi AP – *c.g.* oraz trajektorię ruchu orbitalnego α UMi AP względem środka mas, zaś w tablicy 5.4 wartości tych poprawek i ich roczne zmiany. Roczne zmiany poprawek α UMi AP – *c.g.* nie są duże, praktycznie nie przekraczają 10 mas, co sprawia, że szacunkowy, całkowity błąd interpolacji liniowej na interwale jednego roku mieści się w granicach 2 mas, jest więc porównywalny ze średnim błędem wyznaczenia wartości samych poprawek wynoszącym około 3 mas (Wielen *et al.*, 2000b).

Ostateczne pozycje pozorne środka jasności α UMi AP, obliczane poprzez dodanie interpolowanych liniowo dla danego roku poprawek $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$, obarczone są więc z tego powodu dodatkowym błędem o maksymalnej wartości około 3 mas. Nieuwzględnianie dotychczas (przed powstaniem katalogu Hipparcos) podwójnej natury Biegunowej wprowadzało natomiast systematyczny błąd jej pozycji katalogowej oraz wyznaczanej na jej podstawie pozycji pozornej o wartości kilkunastu mas. Różnica *c.g.* – *śr. ph.c.* wynosi w rektascensji i deklinacji odpowiednio 11 mas i 17 mas.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W trakcie badań wzajemnych relacji pomiędzy stosowanymi dotychczas danymi katalogowymi FK5 a nowymi danymi zawartymi w katalogach Hipparcos i FK6 przeprowadzono szereg obliczeń i porównań przedstawionych w rozdz. 4. Na podstawie otrzymanych wyników sformułować można kilka zasadniczych wniosków:

- Mimo niewielkich średnich błędów pozycji w katalogu FK5 (na poziomie kilkunastu *mas*), uzyskanych na drodze wyrównania dużego zbioru danych obserwacyjnych, pozycje te charakteryzują się zaskakująco dużymi strefowymi i indywidualnymi błędami systematycznymi. Różnice pozycji pomiędzy katalogami FK5 a Hipparcos dla poszczególnych gwiazd osiągają bowiem wartości nawet kilkuset *mas*. Różnice pozycji gwiazd południowej półkuli nieba są, przy tym, wyraźnie większe od różnic pozycji gwiazd półkuli północnej, co wynika z niejednorodności obserwacji służących do opracowania katalogu FK5.
- Istnieje wyraźny względny obrót układów odniesienia realizowanych przez ww. katalogi, o wartości około 20 *mas*. Obrót ten, opisywany w cytowanej w pracy literaturze, został potwierdzony także prezentowanymi obliczeniami własnymi.
- Najmniejsza średnia wartość różnic pozycji gwiazd z katalogów FK5 i Hipparcos (110 ± 89 *mas*), osiągnięta jest w *średniej epoce* katalogu FK5 (J1949.4). Najmniejszy rozrzut wokół średniej wartości (± 70 *mas*) osiągany jest zaś w epoce Katalogu Hipparcos (1991.25). Rozkład i charakterystyka różnic, pomimo większej dokładności pozycji zawartych w Katalogu Hipparcos, potwierdza więc obecny w literaturze pogląd o przewadze wartości ruchów własnych gwiazd zawartych w FK5, w konsekwencji zaś, o konieczności prowadzenia prac nad włączeniem ogromnej liczby wieloletnich obserwacji naziemnych do poprawiania ruchów własnych gwiazd otrzymanych z astrometrycznych misji satelitarnych. Realizacją tego poglądu jest tworzony obecnie najnowszy katalog fundamentalny — FK6.
- Katalogi pozycyjne „starzeją” się. Na skutek niedokładności danych pozycyjnych — przede wszystkim ruchów własnych zawartych w katalogach, przydatność zawartych w nich danych z czasem maleje. Fakt ten, został w pracy również potwierdzony przez porównanie i prezentację różnic pozycji katalogowych Hipparcos i różnych roz-

wiązań pozycji w katalogu FK6. Jakość pozycji FK6, jako katalogu o zminimalizowanych błędach ruchów własnych, będzie z czasem ($\geq J2031.0$) przewyższała jakość danych Katalogu Hipparcos. Katalog FK6, tym bardziej, wydaje się być właściwym do stosowania w praktyce astrometrycznej.

Analiza czynników mających wpływ na wartości pozycji pozornych gwiazd, w tym przede wszystkim analiza wpływu na te wartości, wyjściowych danych katalogowych FK5 bądź Hipparcos, zawarta w rozdz. 5, prowadzi do dwóch zasadniczych wniosków:

- Błędy pozycji katalogowych, z racji wartości jakie osiągają, są jednym z głównych czynników wpływających na wartości pozycji pozornych gwiazd obliczanych i prezentowanych w wydawnictwach rocznikowych. Ujawnione przez bezpośrednie porównanie z danymi Hipparcos rzeczywiste błędy danych katalogowych FK5 (rzędu 100 *mas*) przewyższają wielokrotnie błędy mające inne źródła, jak: niedokładność definicji systemu odniesienia, niedoskonałość modelu precesji i teorii nutacji, czy błędy związane z przybliżonym bądź ścisłym uwzględnieniem ruchu własnego gwiazd lub efektu aberracji rocznej.
- Przejście w obliczeniach pozycji pozornych od danych katalogowych FK5 do danych Katalogu Hipparcos bądź FK6 powoduje automatyczną poprawę jakości uzyskiwanych wyników o co najmniej rząd wielkości. Jednoczesne z tą zmianą, przejście od systemu FK5 do *ICRS* oraz od pośredniego systemu odniesienia bieguna *CEP* do pośredniego systemu odniesienia bieguna *CIP*, tj. zastąpienie w obliczeniach modelu precesji IAU76 oraz teorii nutacji IAU80, nową teorią precesyjno-nutacyjną IAU2000 powoduje, że błędy katalogowe pozostają w dalszym ciągu dominującym czynnikiem mającym wpływ na jakość pozycji pozornych gwiazd. Istotną rolę zaczyna również jednak odgrywać sposób prezentacji danych, tj. interwał z jakim są tablicowane oraz metoda ich interpolacji.

Wnioskiem pozostającym w ścisłym związku z powyższymi, a wynikającym z analizy czasowej zmienności pozycji pozornych jest stwierdzenie poprawności stosowanych dotąd w wydawnictwach rocznikowych interwałów w jakich są one tablicowane. Interwały dobowe są wystarczające zarówno w interpolacji danych pozornych gwiazd bliskobiegunowych jak i, tym bardziej, dla interpolacji pozycji gwiazd o mniejszych deklinacjach.

Interpolacja kwadratowa Bessela zapewnia we wszystkich tych przypadkach zgodność na poziomie poniżej 2 *mas*. Interpolacja liniowa powoduje natomiast błędy osiągające dla gwiazd bliskobiegunowych wartości około 30 *mas*, co i tak jest wartością niewiele przekraczającą spodziewane błędy wyjściowych danych katalogowych Hipparcos czy FK6.

Interpolacja w interwałach 10-dniowych nie wprowadza znaczących (> 30 *mas*) błędów tylko w wypadku stosowania jej do pozycji pozornych liczonych z pominięciem nutacji krótkookresowej. Jak pokazano w rozdziale 5.3 zmiana pozycji pozornej wynikająca z uwzględniania bądź nie, krótkookresowych składowych nutacji może osiągać znaczne wartości (ponad 300 *mas*). Wartości te są porównywalne z systematycznymi, strefowymi błędami dotychczas stosowanych pozycji katalogowych (FK5) dla wielu gwiazd przekraczającymi nawet 300 *mas*; w dotychczasowej praktyce nie miały więc one tak istotnego znaczenia. Nieuwzględnianie składowych nutacji krótkookresowej powoduje natomiast drastyczne obniżenie dokładności pozycji pozornej opartej na nowych danych katalogowych Hipparcos i FK6. Chcąc zachować błędy pozycji pozornych na minimalnym, możliwym do osiągnięcia poziomie konieczne jest więc stosowanie tablicowania w krótszym interwale, np. dobowym, lub zapewnienie możliwości uzupełniania pozycji pozornych, obliczanych z wykorzystaniem wyłącznie składowych długookresowych nutacji, o wpływ nutacji krótkookresowej w oparciu o wielkości redukcyjne.

Uzupełniającym wnioskiem jest również stwierdzenie, że w obliczeniach pozycji pozornych konieczne jest uwzględnianie, dotychczas pomijanego faktu, że część gwiazd zawartych w katalogach stanowią układy wielokrotne, których ruch orbitalny jest źródłem systematycznych błędów pozycji. W wypadku Biegunowej błędy te mogą osiągać wartość około 40 *mas*.

W ostatecznej konkluzji można stwierdzić, że możliwości zastosowania, tablicowanych w wydawnictwach rocznikowych, pozycji pozornych w praktyce astrometrycznej, o wymaganej dokładności 0".1 a tym bardziej 0".01, wskutek niedokładności używanych wcześniej katalogów pozycyjnych pojawiły się dopiero z wprowadzeniem Katalogu Hipparcos oraz przejściem od systemu FK5 do *ICRS*.

Podziękowanie

Autor wyraża podziękowanie Panu Prof. Janowi Kryńskiemu, promotorowi pracy doktorskiej będącej podstawą niniejszej publikacji, za cierpliwą pomoc w opracowaniu tematu. Dziękuję również Prof. Prof. Jerzemu Rogowskiemu i Władysławowi Góralowi — recenzentom pracy doktorskiej, za wnikliwość i wysiłek włożony w opracowanie uwag krytycznych. Wszystkie sugestie formułowane w rozmowach oraz uwagi krytyczne zawarte w recenzjach zostały uwzględnione podczas przygotowania tej publikacji.

BIBLIOGRAFIA

- (AJ) Astronomiĉeskij Jeżegodnik; 1922–2005; Institut Prikladnoj Astronomii Rossijskoj Akademii Nauk, Sankt Peterburg.
- (APFS) Apparent Places of Fundamental Stars; 1941–2005; Astronomisches Rechen–Institut, Heidelberg.
- Arias, E.F.; Charlot, P.; Feissel, M.; Lestrade, J.F.; 1995; *The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service (ICRS)*, Astron. & Astroph. **303**, pp. 604–608.
- Atkinson, R.d'E.; 1973; *On the „dynamical variations” of latitude and time*, Astron. J., **78**, pp. 147–151.
- Atkinson, R.d'E.; 1975; *On the earth axis of rotation and figure*, Mon. Not. Royal. Astr. Soc., **79**, pp. 381–386.
- Auwers, A.; 1879; *Fundamental–Katalog für die Zonen–Beobachtungen am Nördlichen Himmel*, Publ. Astron. Gesell., XIV7.
- Benest, D.; Duvent, J.L. 1995; *Is Sirius a triple star?*, Astron. & Astroph. **299**, pp. 621–628.
- van den Bos, W.H.; 1960; *The orbit of Sirius*, ADS 5423, Journal des observateurs, **43**, pp. 145–151.
- Boss, B.; 1937; *General Catalogue of 33342 Stars for the Epoch 1950*, Publ. Carnegie Inst., Washington, 468, 5 vols.
- Capitaine, N.; 2000; *Definition of the Celestial Epehmeris Pole and the Celestial Ephemeris Origin*, Proceedings of IAU Colloquium 180, ed. K.J. Johnston, D.D. McCarthy, B.J. Luzum, G.H. Kaplan., pp. 153–163.
- Capitaine, N.; 2002; *Comparison of ”Old” and ”New” Concepts: The Celestial Intermediate Pole and Earth Orientation Parameters*, Proceedings of the IERS Workshop on the Implementation of the New IAU Resolutions, IERS Technical Note No. 29, eds. Capitaine, N. et al., pp. 35–44.
- Capitaine, N.; Guinot, B.; Souchay, J.; 1986; *A non–rotating origin on the instantenous equator, definition, properties and use*, Celest. Mech., **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*, *Astron. & Astroph.*, **355**, pp. 398–405.
- Capitaine, N.; Chapront, J.; Lambert, S.; Wallace, P.T.; 2003a; *Expressions for the Celestial Intermediate Pole and Celestial Ephemeris Origin consistent with the IAU 2000A precession–nutation model*, *Astron. & Astroph.*, **400**, pp. 1145–1154.
- Capitaine, N.; Wallace, P.T.; McCarthy, D.D.; 2003b; *Expressions to implement the IAU 2000 definition of UT1*, *Astron. & Astroph.*, **406**, pp. 1135–1149.
- Chapront, J.; Chapront-Touzé, M.; Francou, G.; 2002; *A new determination of lunar orbital parameters, precession constant and tidal acceleration from LLR measurements*, *Astron. & Astroph.*, **387**, pp. 700–709.
- Dehant, V.; Capitaine, N.; 1997; *On the precession constant: values and constraints on the dynamical ellipticity; link with Oppolzer terms and tilt–over–mode*, *Celest. Mech. & Dyn. Astron.*, **65**, pp. 439–458.
- Dehant, V.; Arias, F.; Bizouard, Ch.; Bretagnon, P.; Brzeziński, A.; Buffett, B.; Capitaine, N.; Defraigne, P.; de Viron, O.; Feissel, M.; Fliegel, H.; Forte, A.; Gambis, D.; Gentino, J.; Gross, R.; Herring, T.; Kinoshita, H.; Klioner, S.; Mathews, P.M.; McCarthy, D.; Moisson, X.; Petrov, S.; Ponte, R.M.; Roosbeek, F.; Salstein, D.; Schuh, H.; Seidelmann, K.; Soffel, M.; Souchay, J.; Vondrak, J.; Wahr, J.M.; Wallace, P.; Weber, R.; Williams, J.; Yatskiv, Y.; Zharov, V.; Zhu, S.Y.; 1999; *Considerations Concerning the Non–Rigid Earth Nutation Theory*, *Celest. Mech. & Dyn. Astron.*, **72**.
- ESA (European Space Agency); 1997; *The Hipparcos and Tycho Catalogues*, ESA SP–1200.
- Feissel, M.; Mignard, F.; 1998; *The adoption of ICRS on 1 January 1998: meaning and consequences*, *Astron. & Astroph.*, **331**, pp. 33–36.
- Fricke, W.; Kopff, A.; we współpracy z Gliese, W.; Gondolatsch, F.; Lederle, T.; Nowacki, H.; Strobel, W.; Stumpff, P.; 1963; *Fourth Fundamental Catalogue (FK4)*, *Veröff. Astron. Rechen–Inst. Heidelberg*, 10, 144 pp.
- Fricke, W.; 1963; *Preliminary Supplement to the Fourth Fundamental Catalogue (FK4 Sup)*, *Veröff. Astron. Rechen–Inst., Heidelberg*, 11, 47 pp.

- Fricke, W.; 1985; *Fundamental catalogues, past, present and future*, Celest. Mech., **36**, pp. 207–239.
- Fricke, W.; Schwan, H.; Lederle, T. we współpracy z Bastian, U.; Bien, R.; Burkhardt, G.; du Mont, B.; Hering, R.; Järhling, R.; Jahreiß, H.; Röser, S.; Schwerdtfeger, H.M.; Walter, H.G.; 1988; Fifth Fundamental Catalogue (FK5). Part I. The Basic Fundamental Stars, Veröff. Astron. Rechen–Inst. Heidelberg, 32, 106 pp.
- Fricke, W.; Schwan, H.; Corbin, T. we współpracy z Bastian, U.; Bien, R.; Cole, C.; Jackson, E.; Järhling, R.; Jahreiß, H.; Lederle, T.; Röser, S.; 1991; Fifth Fundamental Catalogue (FK5). Part II. The FK5 Extension — New Fundamental Stars, Veröff. Astron. Rechen–Inst. Heidelberg, 33, 143 pp.
- Fukushima, T. 1991; *Geodesic nutation*, Astron. & Astroph., **244**, pp. L11–L12.
- Guinot, B.; 1979; *Basic problems in the kinematics of the rotation of the Earth* Time and the Earth's rotation, Proceedings of the Eighty-second Symposium, San Fernando, Spain, May 8–12, 1978. (A79-53001 24–89) Dordrecht, D. Reidel Publishing Co. 19. pp. 7–18.
- IAU; 1977; Transactions of the IAU Vol. XVI B; D. Reidel, Dordrecht, The Netherlands.
- IAU; 1980; Transactions of the IAU Vol. XVII B, D. Reidel, Dordrecht, The Netherlands.
- IAU; 1983; Transactions of the IAU Vol. XVIII B; D. Reidel, Dordrecht, The Netherlands.
- IAU; 1992; Transactions of the IAU Vol. XXI B, Proceedings of the Twenty-First General Assembly, Buenos Aires, Argentina, July 23 – August 1, 1991; ed. J. Bergeron, Kluwer Academic Publishers.
- IAU; 1999; Transactions of the IAU Vol. XXIII B, Proceedings of the Twenty-Third General Assembly, Kyoto, Japan, August 18–30, 1997; ed. J. Andersen, Kluwer Academic Publishers.
- IAU; 2001; Transactions of the IAU Vol. XXIV B, Proceedings of the Twenty-Fourth General Assembly, Manchester, UK, August 7–18, 2000; ed. H. Rickman, Astronomical Society of the Pacific.

- IERS; 1999; 1998 IERS Annual Report, Observatoire de Paris, Paris.
- IERS; 2001; IERS Annual Report 2000, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- IAG; 1991; The Geodesist's Handbook 1992, Bull. Géod. Vol. 66, **2**, Springer, International, pp. 128–135.
- Jeffreys, H.; 1963; w Nutation and forced motion of the Earth's pole, E.P. Fedorov, Pergamon Press, Ltd.
- Kaplan, G.H.; Hughes, J.A.; Seidelmann, P.K.; Smith, C.A.; Yallop, B.D.; 1989; *Mean and apparent place computations in the IAU system. Apparent, topocentric, and astrometric places of planet and stars*, Astron. J., **97**, pp. 1197–1210.
- Kołaczek, B.; 2004a; *Niebieskie fundamentalne systemy odniesienia i ich realizacje*, Nowe obowiązujące niebieskie i ziemskie systemy i układy odniesienia, ed. J. Kryński, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa, Seria monograficzna **10**, pp. 69–84.
- Kołaczek, B.; 2004b; *Monitorowanie i charakterystyka zmian ruchu obrotowego Ziemi*, Nowe obowiązujące niebieskie i ziemskie systemy i układy odniesienia, ed. J. Kryński, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa, Seria monograficzna **10**, pp. 163–195.
- Kopff, A.; 1937; Dritter Fundamentalkatalog des Berliner Astronomischen Jahrbuchs: I. Die Auwers-Sterne für die Epochen 1925 und 1950, Veröff. Astron. Rechen-Institut Berlin-Dahlem, 54, 117 pp.
- Kopff, A.; 1938; Dritter Fundamentalkatalog des Berliner Astronomischen Jahrbuchs: II. Die Zusatzsterne für die Epoche 1950, Abh. Preuß. Akad. Wiss. Phys.-math. Kl., 3.
- Kovalevsky, J.; 2002; *Modern Astrometry*, 2nd ed., Springer-Verlag, 375 pp.
- Kryński, J. (ed.); 2004a; *Nowe obowiązujące niebieskie i ziemskie systemy i układy odniesienia*, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa, Seria monograficzna **10**, 276 pp.
- Kryński, J.; 2004b; *Relacje pomiędzy systemami niebieskimi i systemem ziemskim*, Nowe obowiązujące niebieskie i ziemskie systemy i układy

- odniesienia, ed. J. Kryński, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa, Seria monograficzna **10**, pp. 85–110.
- Kryński, J.; 2004c; *Nowe skale czasu i idea pośredniego systemu odniesienia*, Nowe obowiązujące niebieskie i ziemskie systemy i układy odniesienia, ed. J. Kryński, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa, Seria monograficzna **10**, pp. 111–144.
- Kryński, J.; Sękowski, M.; wyd. 2001–2006; *Rocznik Astronomiczny IGiK (1945–2006)*, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa.
- Lieske, J.H.; Lederle, T.; Fricke, W.; Morando, B.; 1977; *Expressions for the precession quantities based upon the IAU (1976) system of astronomical constants*, *Astron. & Astroph.*, **58**, pp. 1–16.
- Lindgren, L.; Kovalevsky, J.; 1995; *Linking the Hipparcos Catalogue to the extragalactic reference system*, *Astron. & Astroph.*, **304**, pp. 189–201.
- Lindgren, L.; Röser, S.; Schrijver, H.; Lattanzi, M.G.; van Leeuwen, F.; Perryman, M.A.C.; Bernacca, P.L.; Falin, J.L.; Froeschlé, M.; Kovalevsky, J.; Lenhardt, H.; Mignard, F.; 1995; *A comparison of ground-based positions and proper motions with provisional Hipparcos results*, *Astron. & Astroph.*, **304**, pp. 44–51.
- Mathews, P.M.; Herring, T.A.; Buffet, B.A.; 2002; *Modeling of nutation and precession: Effects of electromagnetic coupling*, *J. Geophys. Res.*, **107** B4, ETG 3-1–3-26.
- McCarthy, D.D.; 1996; *IERS Conventions*, IERS Technical Note 21, 95 pp.
- McCarthy, D.D.; Petit, G. (eds.); 2003; *IERS Conventions*, IERS Technical Note 32, 127 pp.
- Morgan H.R.; 1952; *Catalog of 5268 Standard Stars for the Equinox and Epoch 1950.0 Based on the Normal System N30*, *Astron. Papers Amer. Ephemeris 13, Part III*, Washington.
- Mignard, F.; Froeschlé, M.; 2000; *Global and local bias in the FK5 from the Hipparcos data*, *Astron. & Astroph.*, **354**, pp. 732–739.
- Newcomb, S.; 1898; *Bull. Astr.*, **15**, pp. 241–246.
- Peters J.; 1907; *Neuer Fundamentalkatalog des Berliner Astronomischen Jahrbuchs nach den Grundlagen von A. Auwers, für die Epochen 1875 und 1900*, Veröff. Königl. Astron. Rechen-Institut, Berlin, 33.

- Schwan, H.; 2001a; *An analytical representation of the systematic differences Hipparcos–FK5*, *Astron. & Astroph.*, **367**, pp. 1078–1086.
- Schwan, H.; 2001b; *Systematic relations between the Hipparcos catalogue and major (fundamental) catalogues of the 20th century (Paper I)*, *Astron. & Astroph.*, **373**, pp. 1099–1109.
- Schwan, H.; 2002; *Systematic relations between the Hipparcos catalogue and major (fundamental) catalogues of the 20th century (Paper II)*, *Astron. & Astroph.*, **387**, pp. 1123–1134.
- Seidelmann, P.K.; 1982; *1980 IAU theory of nutation: the final report of the IAU working group on nutation*, *Celest. Mech.*, **27**, pp. 79–106.
- Seidelmann, P.K.; Kovalevsky, J.; 2002; *Application of the new concepts and definitions (ICRS, CIP and CEO) in fundamental astronomy*, *Astron. & Astroph.*, **392**, pp. 341–351.
- Sękowski, M.; 2004; *Rocznik Astronomiczny IGiK wobec najnowszych rezolucji IAU*, Nowe obowiązujące niebieskie i ziemskie systemy i układy odniesienia, ed. J. Kryński, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa, Seria monograficzna **10**, pp. 197–216.
- Sękowski, M.; 2005; *Wpływ wyboru katalogu gwiazd na wartości obliczanych pozycji pozornych*, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa, Rozprawa doktorska, 129 pp.
- Volet, Ch.; 1931; *Application de la méthode des moindres carrées au calcul des orbites d'étoiles doubles*, *Bull. Astron.*, **7**, pp. 13–31.
- Wahr, J.M.; 1981; *The forced nutations of an elliptical, rotating, elastic and oceanless earth*, *Geophys. J. Royal Astron. Soc.*, **64**, pp. 705–727.
- Walter, H.G.; Sovers, O.J.; 2000; *Astrometry of Fundamental Catalogues*, Springer–Verlag, 231 pp.
- Wang, S.; Xu, T.; Lu, P.; 1993; *„Proper motions” of extragalactic sources and the precession constant*, *Developments in Astrometry and Their Impact on Astrophysics and Geodynamics*, I.I. Mueller i B. Kołaczek (eds.), pp. 387–390, *Proceedings of the 156th IAU Symposium*.
- Wielen, R.; 1997; *Principles of statistical astrometry*, *Astron. & Astroph.*, **325**, pp. 367–382.

- Wielen, R.; Schwan, H.; Dettbarn, C.; Lenhardt, H.; Jahreiß, H.; Jhrling, R.; 1999a; Sixth Catalogue of Fundamental Stars (FK6) Part I Basic Fundamental Stars with Direct Solutions; Veröff. Astron. Rechen–Inst., Heidelberg, 35, 209 pp.
- Wielen, R.; Lenhardt, H.; Schwan, H.; Dettbarn, C.; 1999b; *The combination of ground–based astrometric compilation catalogues with the HIPPARCOS Catalogue*, Astron. & Astroph., **347**, pp. 1046–1054.
- Wielen, R.; Schwan, H.; Dettbarn, C.; Lenhardt, H.; Jahreiß, H.; Jhrling, R.; Khalisi, E.; 2000a; Sixth Catalogue of Fundamental Stars (FK6) Part III Additional Fundamental Stars with Direct Solutions; Veröff. Astron. Rechen–Inst., Heidelberg, 37, 310 pp.
- Wielen, R.; Jahreiß, H.; Dettbarn, C.; Lenhardt, H.; Schwan, H.; 2000b; *Polaris: astrometric orbit, position, and proper motion*, Astron. & Astroph., **360**, pp. 399–410.
- Woolard, E.W.; 1953a; *A redevelopment of the theory of nutation*, Astronomical Journal, **58**, pp. 1–3.
- Woolard, E.W.; 1953b; *Theory of the rotation of the earth around its center of mass*, American Ephemeris Nautical Almanac, vol. 15.

**THE INFLUENCE OF CHOICE OF
FUNDAMENTAL CATALOGUE ON CALCULATED
APPARENT PLACES OF STARS**

S u m m a r y

The paper has been inspired with changes of the concepts and definitions concerning celestial reference systems and frames approved and recommended by recent resolutions of the General Assembly of the International Astronomical Union. The paper is based in the doctor thesis defended by the author (Sękowski, 2005).

In two first sections there are presented: celestial reference systems based on fundamental catalogues of FK3, FK4, FK5, and contemporary, recommended by IAU International Celestial Reference System (*ICRS*), as well as its realizations (*ICRF*) based on the Hipparcos (*HCRF*) and FK6 catalogues (sec. 2). There is also described an apparent place as such, both in the context of catalogue systems and in *ICRS* including the subjects of: precession-nutation matrix, Besselian Numbers, Intermediate Reference Pole (*IRP*), and the concept of non-rotating origin (*NRO*) and Celestial Ephemeris Origin (*CEO*) (sec. 3). The respective computation algorithms are presented too.

Section 4 presents an extensive discussion of the results of computations made to compare the FK5 catalogue data with the contemporary Hipparcos and FK6 catalogue data.

Section 5, the most essential one, covers the subject of detailed analysis of the effect of fundamental catalogue data and the differences between the old and contemporary catalogue data on the values of calculated apparent places of stars. The effect of changes of precession-nutation model and definition of the celestial reference system is analysed too. The section contains also an analysis of time variability of the calculated apparent places and specifies the problems of interpolation and presentation of calculated data in a tabulated form used in the astronomic almanacs.

The last section 6 completes detailed results and conclusions drawn from the analyses and computations performed. These are: a conclusion of presence of large, reaching some hundreds of *mas*, systematic differences between the FK5 and Hipparcos catalogue data; showing the relative rotation of about 20 *mas* between FK5 and *HCRF* catalogue celestial reference frames; and pointing out the catalogue errors as the major source of the errors of calculated apparent places. Still, the switch from the

FK5 to Hipparcos catalogue data and from FK5 to *HCRF* catalogue celestial reference frame gives an improvement in calculated apparent places accuracy by an order of magnitude.