

ГЛАВНАЯ (ПУЛКОВСКАЯ) АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Лопез Юлия Робертовна

**Исследование систематических разностей каталогов
координат радиоисточников и построение сводного
каталога**

01.03.01 — Астрометрия и небесная механика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Малкин Зиновий Меерович

Санкт-Петербург – 2018

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Обзор фундаментальных небесных систем координат и их практических реализаций.	19
1.1 Обзор фундаментальных систем отсчета, представленных оптическими каталогами и методов их построения.	19
1.1.1 Сравнение каталогов:	22
1.1.2 Метод Броше	27
1.1.3 Применение функций Лежандра–Фурье	29
1.1.4 Нахождение максимального члена разложения	31
1.2 Обзор фундаментальных систем отсчета, представленных каталогами РСДБ, и методов их построения	32
1.2.1 Метод РСДБ	32
1.2.2 Международная служба РСДБ	35
1.2.3 Каталоги положений радиоисточников	37
1.2.4 Модели применяемые IERS для сравнения каталогов	38
1.2.5 Международная небесная система координат (ICRS)	42
1.2.6 Международная небесная система отсчета (ICRF)	42
1.2.7 Расширения ICRF Ext. 1 и ICRF Ext. 2	43
1.2.8 ICRF2	44
1.2.9 Некоторые проблемы ICRF	48
Глава 2. Систематические разности положений радиоисточников в РСДБ–каталогах.	52
2.1 Влияние корреляционной информации на определение ориентации между различными РСДБ–каталогами	56
2.2 Систематические разности между РСДБ–каталогами.	63

2.2.1	Эволюция разностей координат каталогов и ICRF2 . . .	66
2.2.2	Разности координат каталогов 2016г.	68
2.3	Применение моделей представления систематических разностей к РСДБ–каталогам.	70
Глава 3.	Улучшение ICRF в случайном и систематическом отношении.	82
3.1	Улучшение ICRF в случайном отношении. Пулковские каталоги PulC01.	82
3.2	Улучшение ICRF в систематическом отношении. Пулковские каталоги PulC02	88
3.3	Оценки точности комбинированных решений	93
Глава 4.	Вычисление структурной задержки радиоисточников по данным геодезических РСДБ–наблюдений.	96
4.1	Обработка наблюдений по программе CONT14 радиоисточника 0014+813	100
4.2	Математическая модель вычисления структурной задержки .	103
4.3	Результаты моделирования наблюдений 0014+813	106
4.4	Применение модели структурной задержки для вычисления поправок к суточным координатам радиоисточника 0014+813	110
Заключение	114
Литература	117

Введение

Высокоточная реализация небесной системы координат необходима для решения разнообразных фундаментальных и прикладных научных задач: изучения строения и эволюции вселенной, определения положения различных объектов на Земле и в космосе, наземной и космической навигации, определения параметров вращения Земли и других задач координатно–временного обеспечения. Построение опорных систем координат на небесной сфере, а также изучение их стабильности во времени и пространстве, является фундаментальной задачей астрометрии. Практически в астрометрии используются квазиинерциальные системы координат, оси которых не имеют вращения. Такие системы называются «фундаментальными системами координат», а их практические реализации в виде каталогов координат небесных объектов — «фундаментальными системами отсчета» или «фундаментальными каталогами». Исторически, ко второй половине XX века, сложилось несколько реализаций квазиинерциальной небесной системы отсчета:

- звездная фундаментальная — FK5, построенная по данным наземных оптических наблюдений звезд [1],
- космическая система HCRF, построенная по данным оптических наблюдений с космического аппарата Hipparcos [2],
- система ICRF, базирующаяся на координатах внегалактических радиоисточников, полученных по данным РСДБ–наблюдений [3], [4].

Они существенно отличаются методами измерений и точностью каталогов. Наилучшей реализацией квазиинерциальной системы на текущее время является система, задаваемая координатами внегалактических радиоисточников по данным РСДБ–наблюдений (радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами) [5], [6]). Развитие оптической системы в настоящее

время базируется на наблюдениях космического телескопа Gaia [7], первый релиз данных с которого состоялся в 2016г. [8].

Начиная с публикации первого звездного фундаментального каталога (FK) в 1879 году и вплоть до 1998 года, принятыми реализациями фундаментальной системы служили оптические каталоги школы А. Ауверса [9]. Последний фундаментальный каталог серии FK — (FK6) является уже комбинацией наземных наблюдений (каталог FK5) и космического астрометрического проекта Hipparcos [2], [37]. С 1998 года, по решению Международного Астрономического Союза (МАС/IAU) введена новая небесная система координат ICRS (International Celestial Reference System), практическая реализация которой — каталог координат внегалактических радиоисточников ICRF (International Celestial Reference Frame), полученный из обработки 1.6 миллиона наблюдений методом РСДБ [3], [4]. Каталог ICRF содержал 608 источников, а его система задавалась координатами 212 определяющих (“defining”) источников. Медианная ошибка координат в каталоге ICRF составляет 0.65 мс. дуги для всех источников и 0.45 мс. дуги для определяющих источников. Помимо официально принятого каталога в качестве ICRF, центры обработки РСДБ-наблюдений один – два раза в год получают собственные (индивидуальные) каталоги координат радиоисточников с использованием всех накопившихся к этому моменту наблюдений.

Со временем увеличившийся объем наблюдений и значительный прогресс в анализе РСДБ-данных привели к необходимости пересмотра каталога ICRF. В 2005 году был инициирован совместный международный проект IAU, IVS и IERS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, International Earth Rotation and Reference Systems Service соответственно) по созданию новой реализации небесной системы координат — ICRF2. Основные исследования в рамках данного проекта для выбора

оптимальной концепции построения новой небесной системы координат осуществлялись по следующим направлениям: исследование стабильности радиоисточников и выбор оптимального списка опорных источников; отбор исходных данных; исследование ошибок обработки; получение и исследование индивидуальных каталогов в систематическом и случайном отношении [10], [13]. Автор диссертации принимала активное участие в данном проекте. Проведенное автором сравнение ICRF с представленными в рамках проекта индивидуальными РСДБ-каталогами показало, что к тому времени каталог ICRF накопил большие систематические ошибки с амплитудой около 0.2 мс. дуги и сложной структурой [10], [11].

В то же время, опыт классической астрометрии демонстрирует, что существенного повышения точности опорной небесной системы отсчета можно добиться путем создания сводных каталогов. Уже первый опыт создания сводного каталога координат радиоисточников в ГАО РАН, представленный в рамках проекта по улучшению ICRF, показал его высокую эффективность [10].

В 2009 году, в результате работы международной группы по ICRF2, Генеральной ассамблеей МАС была принята вторая версия международной небесной системы отсчета (ICRF2) [12], [13]. Несмотря на обсуждение выбора концепции будущей ICRF2 на встречах рабочей группы как сводного решения, в качестве небесной системы отсчета ICRF2, был принят каталог, полученный так же как каталог ICRF в Центре космических полетов им. Годдарда НАСА (GSFC). Для каталога ICRF2 было использовано уже 6.5 миллионов наблюдений за 1979–2009 гг. В результате каталог ICRF2 содержит 3414 источников, в том числе 295 определяющих, с медианной ошибкой положений 0.63 мс. дуги для всех источников, 0.19 мс. дуги без 2187 источников программы VCS (VLBA Calibrator Survey), наблюдавшихся в одной – двух сессиях и имеющих по

этой причине существенно худшую точность, чем источники регулярных радиоастрометрических программ) и 0.07 мс. дуги для 295 определяющих источников. Наиболее важным преимуществом ICRF2 перед ICRF стало значительное уменьшение его систематических ошибок [12], [13]. Хотя каталог ICRF2 показал ряд существенных преимуществ по сравнению с ICRF, к настоящему времени выяснилось, что и он имеет ряд существенных недостатков, таких как: нестабильность радиоисточников и как следствие этого — значимая «структурная задержка» (дополнительное запаздывание сигнала, регистрируемое интерферометром) [15], [14], [16], возрастающая систематика разностей индивидуальных каталогов с ICRF2 [17], и пр., работа над устранением которых активно ведется мировым радиоастрометрическим сообществом.

Проведенное автором сравнение в 2013 году текущих индивидуальных каталогов с ICRF2 показало, что уже спустя 3 года опорная система была отягощена систематическими ошибками на уровне 15–20 мкс. дуги [18].

Актуальность: Актуальность предлагаемой диссертационной работы заключается в необходимости дальнейшего улучшения международной небесной опорной системы ICRF. Данная задача имеет основополагающее значение в фундаментальной и прикладной астрономии. В настоящее время существуют различные взгляды на методы построения и улучшения ICRF. В этой связи представляется важным дальнейшая разработка объективных методов оценки качества индивидуальных РСДБ–каталогов и совершенствования методов построения следующих версий ICRF. Работа по сравнению РСДБ–каталогов, получаемых в различных центрах РСДБ–анализа, ведущаяся в Пулковской обсерватории (ГАО РАН), позволяет быстро и эффективно выявить возможные систематические проблемы в опорной системе координат, а построение сводного каталога позволяет получить усредненную и наиболее обоснованную

оценку систематических ошибок ICRF и улучшить её в случайном и систематическом отношении.

Цель работы. Основная цель работы состоит в исследовании систематических разностей каталогов координат радиоисточников и повышении точности ICRF путем построения сводного каталога координат радиоисточников. Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Применение строгих аналитических методов представления систематических разностей к РСДБ–каталогам и их сравнение.
2. Исследование влияния корреляционной информации в РСДБ–каталогах на результаты определения их взаимной ориентации.
3. Построение сводных каталогов PulC01 и PulC02, являющихся улучшением опорной системы отсчета в случайном и систематическом отношении соответственно.
4. Разработка нового метода вычисления структурной задержки по данным геодезических РСДБ–наблюдений, и оценка её влияния на координаты радиоисточников.

Научная новизна: работы заключается в следующем:

1. Впервые проведено детальное сравнение различных методов представления систематических разностей РСДБ–каталогов.
2. Впервые применена методика сравнения РСДБ–каталогов, основанная на строгом полном разложении систематических разностей каталогов по ортогональным функциям.
3. Впервые проведено исследование связи модели вращения с аналитической моделью разложения шести и четырех параметров, применяемых IERS.

4. Впервые проведено детальное изучение систематических ошибок каталогов координат радиоисточников; обнаружены значительные систематические ошибки ICRF и ICRF2.
5. Проведено наиболее детальное исследование влияния корреляционной информации на параметры ориентации систем координат;
6. Предложен и успешно опробован новый метод вычисления и учета структурной задержки по остаточным невязкам наблюдений без привлечения дополнительной картографической информации.

Научная и практическая значимость:

- Анализ систематических ошибок каталога ICRF показал несостоятельность принятой авторами первой версии ICRF идеологии фиксации координат определяющих источников.
- Регулярное ежегодное сравнение современных РСДБ–каталогов и получение сводного каталога координат радиоисточников позволяет оперативно следить за возможным ухудшением ICRF со временем и определять целесообразность создания новой версии системы.
- Использование сводного каталога при обработке РСДБ–наблюдений в Пулковском центре изучения ПВЗ и опорных систем координат позволило существенно увеличить точность результатов определения углов нутации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования систематических разностей каталогов координат радиоисточников. Выявлены значимые систематические ошибки каталога ICRF/ICRF2. Обнаружена увеличивающаяся со временем систематика РСДБ–каталогов.
2. Результаты исследования и применения методов аналитического представления систематических разностей каталогов координат радиоисточников.

3. Результаты исследования и численные оценки влияния корреляционной информации в каталогах на результаты определения взаимной ориентации систем координат, представленных РСДБ–каталогами.
4. Сводные каталоги координат радиоисточников ГАО РАН 2009 и 2016 годов.
5. Результаты разработки и практического применения нового метода вычисления структурной задержки протяженных радиоисточников по данным геодезических РСДБ–наблюдений.

Степень достоверности результатов проведенных исследований: Достоверность научных результатов и выводов, полученных в работе, подтверждается применением строгих математических методов, ранее апробированных при составлении фундаментальных каталогов звезд, сравнением с данными аналогичных исследований других авторов, а также независимым анализом Пулковского сводного каталога в Главной астрономической обсерватории НАН Украины [74]. Полученные на первом этапе работы оценки систематических ошибок ICRF были впоследствии подтверждены результатами сравнения ICRF2 и ICRF. Предложенный метод определения и учета структурной задержки практически испытан и подтвержден в университете Тасмании, Австралия [24].

Апробация работы: Результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

1. Международный симпозиум “Astronomy 2005 — Current status and prospect“, Москва, Россия, 01–07 июня 2005г.
2. Международная конференция “Journees 2005“, Варшава, Польша, 19–21 сентября 2005г.

3. XXVIth IAU General Assembly, Прага, Чехия, 14–25 августа 2006г.
4. 18th EVGA Meeting, Вена, Австрия, 12–13 апреля 2007 г.
5. Международная конференция “Journées 2007“, Мейдон, Франция, 11–15 октября 2007г.
6. 5th IVS General Meeting, Санкт-Петербург, Россия, 03–06 марта 2008г.
7. 10th Finnish-Russian symposium, Орилампи, Финляндия, 01–05 сентября 2008г.
8. 28th General Assembly of the IAU, Пекин, КНР, 20–31 августа 2012 г.
9. Всероссийская астрометрическая конференция, Санкт-Петербург, Россия, 01–05 октября 2012г.
10. XII Finnish-Russian Radio Astronomy Symposium, Ламми, Финляндия, 15–18 октября 2012г.
11. IAG Scientific Assembly, Потсдам, Германия, 2–6 сентября 2013г.
12. XIII Finnish-Russian Radio Astronomy Symposium, Санкт-Петербург, Россия, 25–29 мая 2015г.
13. 23rd European VLBI Group for Geodesy and Astrometry Working Meeting, Гёттерборг, Швеция, 14–19 мая 2017г.
14. Всероссийская астрономическая конференция «Астрономия: познание без границ», Ялта, Россия, 17–22 сентября 2017г.

Основная часть исследований, описанных в диссертации, была получена автором в рамках международной кооперативной работы по созданию ICRF2, и которая в 2009 г. была признана достижением Научного совета по астрономии РАН и отмечена в отчете РАН как достижение Российской академии наук.

Публикации по теме диссертации: Материалы диссертации опубликованы в 16 работах, из них 6 статей — в рецензируемых изданиях,

рекомендованных ВАК, 4 работы — в сборниках трудов конференций, 6 — работ в других изданиях.

1. Sokolova J., Malkin Z. On comparison and combination of catalogues of radio source positions. // *Astron. Astrophys.* 2007. Vol. 474, №. 2. P. 665–670.
2. Соколова Ю.Р., Малкин З.М. О влиянии учета корреляционной информации на параметры взаимной ориентации небесных систем отсчета. // *Вестник СПбГУ.* 2013. Сер. 1. №. 4. С. 146–151.
3. Соколова Ю.Р., Малкин З.М. Пулковский сводный каталог координат радиоисточников PUL 2013 // *Письма в Астрон. журн.* 2014. т. 40, №. 5. С. 306–315.
4. Fey A.L., Gordon D., Jacobs C.S., Ma C., , Sokolova J., et al. The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry // *Astron. J.* 2015. Vol. 150. №. 2. id. 58. pp. 16.
5. Sokolova J., Malkin Z. On impact of the correlation information on the orientation parameters between celestial reference frames. // In: *IAG 150 Years*, C. Rizos, P. Willis (eds.), IAG Symposia. Springer. 2016. Vol. 143. P. 41–44.
6. Титов О. А., Лопез Ю.Р. Двухкомпонентная структура источника 0014+813 по РСДБ-наблюдениям по программе CONT14 // *Письма в Астрон. журн.* 2018. т. 44, №.3. С. 163-172.
7. Sokolova J. Influence of the radiosources instability on the nutation offset estimation // *Proceedings of the Journees 2005 conference.* 2005. С. 125–126
8. Malkin Z., Sokolova J., Bajkova A. PUL VLBI Analysis Center Report 2006. // In: *IVS 2006 Annual Report*, Eds. D. Behrend, K. D. Baver, NASA/TP-2007-214151. 2007. P. 228–230.

9. Sokolova J., Malkin Z. Comparison and Combination of CRF Catalogues. In: Measuring the Future, Proc. Fifth IVS General Meeting, A. Finkelstein, D. Behrend (Eds.) 2008. P. 275–278
10. Ma C., Arias E.F., Malkin Z.M.,..., Sokolova J.R. et al. The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry. // IERS Technical Note 2009. №. 35. A.L. Fey, D. Gordon, C.S. Jacobs (Eds.), Verlag des Bundesamts fuer Kartographie und Geodaesie, Frankfurt am Main.
11. Malkin Z., Sokolova J. Pulkovo IVS Analysis Center (PUL) 2012 Annual Report // In: IVS 2012 Annual Report, Eds. Behrend D., Baver K.D., Armstrong K.L. NASA/TP-2013-217511. 2013. P. 305–308.
12. Sokolova J., Malkin Z. Impact of Covariance Information on the Orientation Parameters Between Radio Source Position Catalogs // In: IVS 2012 General Meeting Proc., ed. Behrend D., Baver K.D. NASA/CP-2012-217504. 2012. P. 339–341.
13. Titov O., Lopez Y., McCallum L. Two-component structure of the radio source 0014+813 using CONT14 geodetic VLBI observations. // EVGA Proc., ed. R. Haas and G. Elgered. 2017. P. 190-194.
14. Malkin Z., Skurikhina E., Melnikov A., Gubanov V., Kurdubov S., Sokolova Ju. et al. IAA VLBI Analysis Center Report 2004 // In: IVS 2004 Annual Report, Eds. Behrend D., Baver K.D., Vandenberg N.R. NASA/TP-2005-212772. 2005. P. 215–218.
15. Malkin Z., Skurikhina E., Melnikov A., Gubanov V., Kurdubov S., Sokolova Ju. et al. IAA VLBI Analysis Center Report 2005 // In: IVS 2005 Annual Report, Eds. Behrend D., Baver K.D. NASA/TP-2006-214136. 2006. P. 241–244.
16. Sokolova Ju., Malkin Z. Systematic errors and combination of individual CRF solutions in the framework of the international pilot project

for the next ICRF // XXVIth IAU General Assembly. 2007. arXiv:astro-ph/0703194.

Личный вклад автора: содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в проведенные исследования. В статьях 1, 3–4, 6–9, 11, 16 автор произвела все вычисления по сравнению и комбинации каталогов и приняла равное участие в обсуждении полученных результатов с научным руководителем д.ф.-м.н. З. Малкиным. В статьях 12, 13 научная работа проводилась совместно с к.ф.-м.н. О. Титовым, вклад авторов в работу равнозначный.

Объем и структура работы: Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 126 страниц, включая 61 рисунок и 20 таблиц. Список литературы содержит 85 наименований.

В **Главе 1** «Обзор фундаментальных небесных систем координат и их практических реализаций» приведен обзор основных фундаментальных небесных систем отсчета и методов их построения. Кратко представлен метод РСДБ, структура международной службы РСДБ (IVS), процедура получения координат радиоисточников по данным РСДБ–наблюдений. Дана информация по официальным небесным системам отсчета по данным РСДБ–наблюдений: каталогу ICRF, первому и второму его расширению (ICRF Ext.1, Ext.2), ICRF2 и их проблемах.

Основной акцент главы сделан на обзоре методов получения и представления систематических разностей координат радиоисточников в каталогах, таких как: методы, применяемые IERS (модель вращения, модель вращения с деформацией) [19], методы, применяемые в оптической астрономии (табличный и аналитические методы – разложение по сферическим функциям (метод Броше) [20], разложение по функциям Лежандра–Фурье [21]).

В **Главе 2** «Систематические разности положений радиоисточников в РСДБ–каталогах» подробно рассмотрено сравнение каталогов координат радиоисточников, изучение систематических разностей координат каталогов с применением моделей представления систематических разностей, приведенных в главе 1.

Сравнение каталогов 2005г. показало наличие значительных систематических разностей всех исходных каталогов по отношению к системе ICRF [10]. Похожая картина наблюдается и в случае сравнения индивидуальных РСДБ–каталогов 2012 и 2016 годов с ICRF2 [18]. Эволюция разностей координат индивидуальных РСДБ–каталогов с ICRF2 выявило растущую систематику, причины которой пока не ясны. Причем систематические различия всех РСДБ–каталогов 2016 года с ICRF2 практически одинаковые, что может говорить о наличии систематических ошибок самой системы ICRF2.

К полученным разностям индивидуальных РСДБ–каталогов были применены модели представления систематических разностей, представленные в главе 1. Наилучшее представление систематических разностей для всех РСДБ–каталогов показало разложение по сферическим функциям. Основные гармоники для разностей каталогов 2016г. и ICRF2 $\Delta\alpha \cos \delta$ – тессеральные, а для разностей $\Delta\delta$ – зональные. Показана несостоятельность применения моделей, используемых в IERS.

Также было проведено исследование влияния корреляционной информации в каталогах на их ориентацию, которое выявило, что разница в углах поворота, вычисленных с учетом и без учета корреляций между прямым восхождением и склонением, публикуемых в современных РСДБ–каталогах, не является статистически значимой. В то же время использование полных корреляционных матриц оказывает существенное влияние на параметры ориентации систем, при этом разница в полученных

значениях углов поворота может превышать 20 мкс. дуги (μas). Таким образом, представляется важным учитывать полную корреляционную информацию при сравнении каталогов положений радиоисточников. Для этого необходимо ввести в практику публикацию каталогов с полной ковариационной матрицей.

Глава 3 «Улучшение ICRF в случайном и систематическом отношении» посвящена получению сводных каталогов PulC01 (улучшение опорной системы в случайном отношении) и PulC02 (уточнение в случайном и в систематическом отношении). Каждый индивидуальный РСДБ–каталог является своей собственной системой отсчета, обладающей своим собственным набором случайных и систематических ошибок, связанных с особенностями программных систем, различными моделями применяемых редукций, выбранной стратегией обработки и т.д. Для ослабления влияния этих ошибок целесообразно построение сводного каталога.

Сравнение сводного Пулковского каталога 2007г. с ICRF показало, что: разности между сводным решением и индивидуальными каталогами в 2.5 раза меньше, чем между сводным решением и ICRF [10]. Это говорит о том, что данная опорная система отсчета была отягощена значительными систематическими ошибками и подвержена сильному «устареванию»; Сравнение сводного каталога с ICRF2 показало, что сводный каталог оказался намного ближе к ICRF2, чем предыдущая дополненная версия ICRF — ICRF Ext.2. Применение полученного сводного каталога к обработке РСДБ–наблюдений показало улучшение точности оценки углов нутации. Пулковский сводный каталог был использован как основной в работе IVS центра ГАО РАН вплоть до выхода ICRF2 [10].

Глава 4 «Вычисление структурной задержки радиоисточников по данным геодезических РСДБ–наблюдений» посвящена новому методу вычисления структурной задержки по остаточным невязкам. Большое

количество радиисточников на миллисекундном масштабе имеют сложную переменную структуру, что приводит к астрометрической нестабильности координат опорных объектов на уровне 0.1 – 1 мс дуги. Дополнительное запаздывание сигнала, регистрируемое простым двухэлементным интерферометром («структурная задержка»), вызванное неточечностью и несимметричностью распределения радиояркости источника, устанавливает ограничение не только на точность небесной системы координат, но также влияет и на определение параметров вращения Земли (в основном, углов нутации) [14], [15], [16]. Задача о вычислении и учете структурной задержки до сих пор остается одной из актуальных задач современной РСДБ-астрометрии.

Совместно с О. Титовым [23], [24] была предпринята первая попытка вычисления структурной задержки по остаточным невязкам без привлечения дополнительной картографической информации. Разработанный метод основан на применении двухкомпонентной модели Charlot (1990) [14]., учитывая обнаруженный характер представления систематики — зависимость от позиционного угла A , который отсчитывается от ядра радиисточника и определяет направление вектора базы по отношению к Северному полюсу Мира. Апробация метода была осуществлена для радиисточника 0014+813, интенсивно наблюдавшегося в ходе программы CONT'14 [55]. Данное исследование показало, что смещение оценок координат, вызванное неучтенным влиянием структурной задержки, может достигать 0.1 мс дуги. Результат апробации разработанного метода по учету структурной задержки показал его состоятельность и необходимость скорейшего развития и применения.

Благодарности Автор считает своим долгом выразить благодарность своему научному руководителю, доктору ф.-м.н., Малкину Э.М. за помощь в выборе темы исследования, полезные советы, внимание и поддержку на

протяжении всех этапов работы; доктору ф.-м.н., профессору Витязеву В.В. и кандидату доктору ф.-м.н. Титову О.А. за консультации и ценные замечания.

Глава 1. Обзор фундаментальных небесных систем координат и их практических реализаций.

Задание небесной системы координат, т.е. определение её основных плоскостей и осей отсчета возможно двумя способами: *кинематическим* и *динамическим*. Кинематическое задание системы координат базируется на определении координат небесных объектов, которые считаются постоянными (реализация инерциальной системы координат) или искаженными лишь случайными ошибками — квазиинерциальная система, в среднем не имеющая вращения. Такие системы в астрометрии называются «фундаментальными системами координат», а их практические реализации в виде каталогов координат небесных объектов — «фундаментальными системами отсчета» или «фундаментальными каталогами».

1.1. Обзор фундаментальных систем отсчета, представленных оптическими каталогами и методов их построения.

Фундаментальные каталоги в классической оптической астрометрии есть результат уравнивания рядов наблюдательных абсолютных каталогов (полученных независимо от каких-либо прежних каталогов на конкретных оптических инструментах) и обладающих гораздо большей точностью по сравнению с наблюдательными каталогами [6].

Основной задачей фундаментального каталога в классической астрометрии является практическая реализация пространственно–временной системы отсчета (CRF) в барицентре солнечной системы, оси которой ориентированы в пространстве определенным образом. С помощью принятых редукций и набора астрономических постоянных, принятых и

публикуемых МАС (Международный Астрономический Союз, или IAU в международной литературе), возможно воспроизведение фундаментальной системы на любую эпоху для любой точки пространства [6].

Основной задачей при составлении классических наземных сводных звездных каталогов является анализ результатов сравнения каталогов в систематическом и случайном отношении. Это включает:

1. Изучение систематических разностей каталогов и оценок случайных составляющих.
2. Выработка принципа назначения весов индивидуальным каталогам при их объединении.
3. Оценка степени воспроизведения сводным каталогом заданной фундаментальной системы.



Портрет Артура Юлиус
Георг Фридрих фон
Ауверса, 1900

Фундаментальные оптические системы обязаны своим появлением трём астрономическим школам, создавшим серии фундаментальных каталогов (далее FK/ФК). К числу таких относятся каталоги А. Ауверса [9] — для создания каталогов звёзд 9–10 звёздной величины, С. Ньюкома — для определения астрономических постоянных и улучшения теории движения больших планет [26] и Л. Босса — для изучения нашей звёздной системы [27].

Первый каталог серии FK, содержащий 539 ярких звёзд северного полушария и 83 звезды южного, был опубликован в 1879 году немецким астрономом, членом Берлинской АН, почетным членом Петербургской и Парижской Академии Наук — А. Ауверсом в 1879 [9], [28], [29], [30]. Вторым каталогом NFK (*Neuer Fundamental Katalog*)

этой серии, составленный Дж. Петерсоном в 1907г., включал координаты и собственные движения 925 звезд [31]. Позже, в следствии плохой точности определения собственных движений, каталог NFK был пересмотрен и расширен и в 1938 был опубликован А. Копфом новый — третий каталог серии FK3, содержащий 1587 звёзд [32], [33].

Каталог FK4 (*Vierte Fundamental Katalog*) школы Ауверса, принятый Международным астрономическим союзом (МАС) в 1964 году в качестве международной опорной системы координат для астрономических ежегодников и геодезических исследований, был опубликован Фрике и Копфом в 1963 году в Гейдельберге и содержал уточнённые данные о 1535 ярких звёзд для всего неба [34], [35].

Пятый каталог серии — FK5 (*Fünfte Fundamental Katalog*), опубликованный в 1988 году, содержал уточненные положения и собственные движения 1535 звезд, входивших в предыдущие каталоги (FK3 и FK4), приведенные на эпоху J2000.0 [1]. В 1991 году вышло дополнение, содержащее 3117 дополнительных звёзд [36]. Следует отметить, что все вышеперечисленные каталоги содержат данные, полученные только из наземных наблюдений.

Последний фундаментальный каталог серии FK — FK6 (*Sixth Catalogue of Fundamental Stars*) является комбинацией наземных наблюдений (каталог FK5) и космического астрометрического проекта Hipparcos [2], вышедший в двух частях FK6(I), FK6(III) [37]. Первая часть FK6 содержит 878 фундаментальных звёзд, 340 из которых считаются «астрометрически-превосходными» (т.е. их мгновенные собственные движения и средние отличаются весьма незначительно). Вторая часть FK6 содержит 3272 звезды, из которых «астрометрически превосходными» считаются 1828. Средняя ошибка собственных движений каталога составляет 0.35 мс. дуги/год, что почти в два раза меньше, чем у каталога Hipparcos [2].

Помимо фундаментальных сводных каталогов, большое значение имели вторичные опорные системы — сводные каталоги положений звезд, основная задача которых заключалась в распространении существующей фундаментальной системы на достаточное число звезд, отобранных для решения определенных прикладных и научных задач [29], [30]. Наиболее известные из них: AGK3 [38], SAO [39], PPM [40]. Также были созданы сводные каталоги специального назначения: «Каталог 1098 стандартных часовых и зодиакальных звезд» Саймона Ньюкомба [26], применявшийся в Американских Эфемеридах; «Общий каталог» (GC) Босса [27], а также ряд других каталогов, имеющих важное значение для решения практических задач.

1.1.1. Сравнение каталогов:

Координаты, опорного источника в каталоге $X = \{\alpha, \delta\}$ можно представить в виде:

$$X = x_0 + \varepsilon \quad (1.1)$$

где, x_0 — точные значения, ε — ошибка координат, которую в свою очередь можно разделить на две компоненты: ошибку *систематическую* и *случайную* ($\varepsilon_{\text{сист.}}$, $\varepsilon_{\text{случ.}}$).

Традиционно в астрометрии *случайной ошибкой* ($\varepsilon_{\text{случ.}}$) называют такую компоненту общей ошибки ε , которая не коррелирует ни с одним из устойчивых признаков источника. Предполагают, что случайные ошибки распределены по нормальному закону, и, таким образом величина ошибки $\varepsilon_{\text{случ.}}$ характеризуется среднеквадратичной ошибкой (σ) одного измерения. *Систематической ошибкой* ($\varepsilon_{\text{сист.}}$) называют такую компоненту общей ошибки ε , которая показывает определенную зависимость от устойчивых признаков источника, например, положения на небесной

сфере, звездной величины, спектрального класса и т.д. В классической звездной астрометрии используется следующая (табличная) структура систематических ошибок:

$$\begin{aligned}
 \Delta\alpha &= \Delta Np_\alpha + \Delta\alpha_\delta + \Delta\alpha_\alpha + \Delta\alpha_m + \dots \\
 \Delta\delta &= \Delta Np_\delta + \Delta\delta_\delta + \Delta\delta_\alpha + \Delta\delta_m + \dots \\
 \Delta\mu &= \Delta\mu_\alpha + \Delta\mu_\delta + \Delta\mu_m + \dots , \\
 \Delta\mu' &= \Delta\mu'_\alpha + \Delta\mu'_\delta + \Delta\mu'_m + \dots .
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$

где Np_α , Np_δ — ошибки нуль-пунктов прямых восхождений и склонений источников; $\Delta\alpha_\delta$, $\Delta\delta_\delta$, $\Delta\mu_\alpha$, $\Delta\mu'_\alpha$ — периодические компоненты, а $\Delta\alpha_\alpha$, $\Delta\delta_\alpha$, $\Delta\mu_\delta$, $\Delta\mu'_\delta$ — непериодические компоненты; $\Delta\alpha_m$, $\Delta\delta_m$ — ошибки «уравнения яркости» [41], [6]. Для радиоастрометрических каталогов систематическая часть не включает ошибок собственных движений, а также зависимости от радиояркости (по аналогии с «уравнением яркости» для оптических источников).

Информация в двух каталогах (двух реализациях небесной системы координат $X_1\{\alpha_1, \delta_1\}$ и $X_2\{\alpha_2, \delta_2\}$, координаты которых приведены к одной эпохе) может быть представлена как:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= x_0 + \varepsilon_{\text{сист. 1}} + \varepsilon_{\text{случ. 1}} , \\
 X_2 &= x_0 + \varepsilon_{\text{сист. 2}} + \varepsilon_{\text{случ. 2}} .
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

Тогда индивидуальные разности ΔX_{12} будут представлены следующим образом:

$$\Delta X_{12} = \Delta\varepsilon_{\text{сист.}} + \Delta\varepsilon_{\text{случ.}}
 \tag{1.4}$$

Выделив систематическую часть $\Delta\varepsilon_{\text{сист.}}$ (с помощью различных методов низкочастотной фильтрации (сглаживания) индивидуальных разностей $\{F(\Delta X_{12})\}$ с целью подавления случайной составляющей $\varepsilon_{\text{случ.}}$), т.е. фактически определив границу разделения систематической и случайной

составляющих, возможно приведение одной системы каталога $(x_0 + \varepsilon_{\text{сист.}})$ в другую:

$$\begin{aligned} CK_2 &\rightarrow CK_1 : X_1 = X_2 + \Delta\varepsilon_{\text{сист.}} , \\ CK_1 &\rightarrow CK_2 : X_2 = X_1 - \Delta\varepsilon_{\text{сист.}} . \end{aligned} \tag{1.5}$$

Изучение систематических разностей каталогов является основным этапом сравнения астрометрических каталогов, без которого невозможно ни приведение каталогов к заданной системе, ни последующее сравнение каталогов в систематическом отношении с целью улучшения опорной системы координат.

Далее будет дан обзор основных методов представления систематических разностей, применяемых в классической астрометрии. Все существующие методы представления систематических разностей можно разделить на: *классический (табличный)* и *аналитический*.

Классический метод нахождения систематических разностей между каталогами предусматривает усреднение разностей координат звезд в выбранных интервалах по α и δ с последующим сглаживанием полученных результатов [6], [30], [41]. Разности координат звезд, приведенных к единому нуль-пункту, расщепляются на несколько компонент и представляются в виде:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \Delta\alpha_\delta + \Delta\alpha_\alpha + \Delta\alpha_m , \\ \Delta\delta &= \Delta\delta_\delta + \Delta\delta_\alpha . \end{aligned} \tag{1.6}$$

Каждое последующее слагаемое в (1.6) находится после исключения предыдущего. Такой способ был применен при построении некоторых оптических сводных каталогов, например, таких как AGK3R, SRS, КСЗ [38], [41]. Классические методы получения систематических разностей использовались в астрометрии вплоть до создания фундаментального каталога FK4 [34]. Однако начиная с каталога FK5 [1], основным методом

определения систематических разностей становится аналитический.

Сутью аналитического метода является определение коэффициентов разложения систематической части исходных разностей по выбранной системе базисных функций. Первые попытки применения аналитического метода относятся к работе американских ученых Босса и Моргана (каталоги GC и N30) [27], [42]. В 1966 году Броше [20] предложил использовать для аналитического представления систематических разностей разложение по сферическим функциям. С тех пор являющееся наиболее известным и популярным аналитическим методом.

Принципиальное преимущество аналитического метода над табличным заключается в зависимости систематических разностей только от выбранного уровня значимости разделения случайной и систематической компоненты, т.е. сводится к выбору базисных функций (Y_j) и задаче о нахождении максимального члена разложения (g), в то время как табличный метод во многом зависит от выбора площадок усреднения, оператора сглаживания, его весов и т.д. [6].

Исходным материалом в аналитическом методе (также как и в табличном) являются индивидуальные разности координат N общих источников двух каталогов :

$$\Delta_i = f(\alpha_i, \delta_i, m_i) = \left\{ \begin{array}{l} \Delta\alpha_i \cos \delta_i, \\ \Delta\delta_i, \end{array} \right\}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (1.7)$$

Общий вид представление индивидуальных разностей имеет вид:

$$f(\alpha, \delta, m) = \sum_{j=0}^g b_j Y_j(\alpha, \delta, m) + \varepsilon. \quad (1.8)$$

в котором выбор максимального члена разложения (g) определяет границу разделения систематической и случайной компонентами. Определение

этой границы, т.е. выбор максимального члена разложения (g) является отдельной важной задачей, для решения которой крайне желательно, чтобы коэффициенты разложения определялись независимо друг от друга. Это возможно достичь выбором базисных функций (Y_j), в качестве которых подбирают произведения таких классических ортогональных полиномов, чтобы каждый из них зависел только от одной из переменных и обладал свойством ортогональности на промежутках:

$$0 \leq \alpha \leq P_i, \quad -P_i/2 \leq \delta \leq P_i/2, \quad -\infty \leq m \leq \infty.$$

Для решения проблемы нарушения ортогональности в реальной ситуации вследствие неравномерности распределения звезд, неполноты каталогов по зонам склонения и пр., коэффициенты разложения определяются в искусственном базисе, полученном из исходного с помощью процедуры Грама–Шмидта. В случае современных РСДБ–каталогов, возможно допущение об ортогональности базисных функции без применения процедуры ортогонализации благодаря сравнительно однородному распределению источников по небесной сфере. При выборе системы базисных функций, как правило, стремятся к тому, чтобы систематическая часть разности координат разлагалась по выбранной системе базисных функций в ряд, достаточно быстро сходящийся в каждой точке небесной сферы.

Кроме метода Броше [20] существует множество вариаций данного подхода, обусловленных выбором базисных функций адаптированных под конкретные задачи и тип источников. Следует упомянуть наиболее значимые вариации: система Лежандра–Фурье [36], Лежандр–Фурье–Эрмит [21], модифицированный метод Броше [43], подход Швана [22].

1.1.2. Метод Броше

В методе Броше [20] базисные функции Y_j имеют вид:

$$Y_j = K_j(\alpha, \delta), \quad (1.9)$$

где сферические функции задаются выражением:

$$K_j(\alpha, \delta) = \begin{cases} P_{n_0}(\delta) & k = 0, l = 1 \\ P_{nk}(\delta) \sin k\alpha, & k \neq 0, l = 0 \\ P_{nk}(\delta) \cos k\alpha, & k \neq 0, l = 1, \end{cases} \quad (1.10)$$

Здесь k — номер гармоники. $P_{n_0}(\delta)$ — полиномы Лежандра, $P_{nk}(\delta)$ — присоединенные функции Лежандра, которые вычисляются по формуле:

$$P_{nk}(\delta) = \cos^k \delta \left[\sin^p \delta + \sum_{\mu=1}^{[p/2]} \frac{(-1)^\mu \prod_{\nu=0}^{2\mu-1} (p - \nu)}{\prod_{\nu=1}^{\mu} 2\nu(2n - 2\nu + 1)} \sin^{p-2\mu} \delta \right]. \quad (1.11)$$

где $p = n - k$, $[p/2]$ — целая часть от деления $p/2$, а индекс j связан с индексами n, k, l соотношением:

$$\begin{aligned} j &= n^2 + 2k + l - 1. \\ n &= [\sqrt{j}], \quad k = [(j - n^2 + 1)/2], \\ l &= j - n^2 - 2k + 1. \end{aligned}$$

В таблице 1.1 приведены аналитическое представление первых членов разложения ($Y_j = K_{nkl}$).

Сферические функции подразделяются на зональные, секторальные и тессеральные (мозаичные) в зависимости от линий на сфере, которыми разграничены области с различными знаками гармоник. Значимость тех или иных гармоник связана с видом систематических разностей.

И в конкретных случаях позволяет определить физический смысл систематических разностей, если он есть. Рис. 1.1 демонстрирует три вида гармоник сферических функций с различными индексами разложения k, n, l .

Таблица 1.1: Аналитическое представление членов разложения K_{nkl}

$Y_j = K_{nkl}$	Индексы	
	n, k, l	j
1	001	0
$\sin(\delta)$	101	1
$\cos(\delta) \sin(\alpha)$	110	2
$\cos(\delta) \cos(\alpha)$	111	3
$\sin^2(\delta) - 1/3$	201	4
$\cos(\delta) \sin(\delta) \sin(\alpha)$	210	5
$\cos(\delta) \sin(\delta) \cos(\alpha)$	211	6
$\cos^2(\delta) \sin(2\alpha)$	220	7
$\cos^2(\delta) \cos(2\alpha)$	221	8

Таблица 1.2: Связь индексов n, k, l и члена разложения (j)

...					
k=3, l=1				(16)	
k=3, l=0				(15)	
k=2, l=1			(9)	(14)	
k=2, l=0			(8)	(13)	
k=1, l=1		(4)	(7)	(12)	
k=1, l=0		(3)	(6)	(11)	
k=0, l=1	(1)	(2)	(5)	(10)	
n	0	1	2	3	...

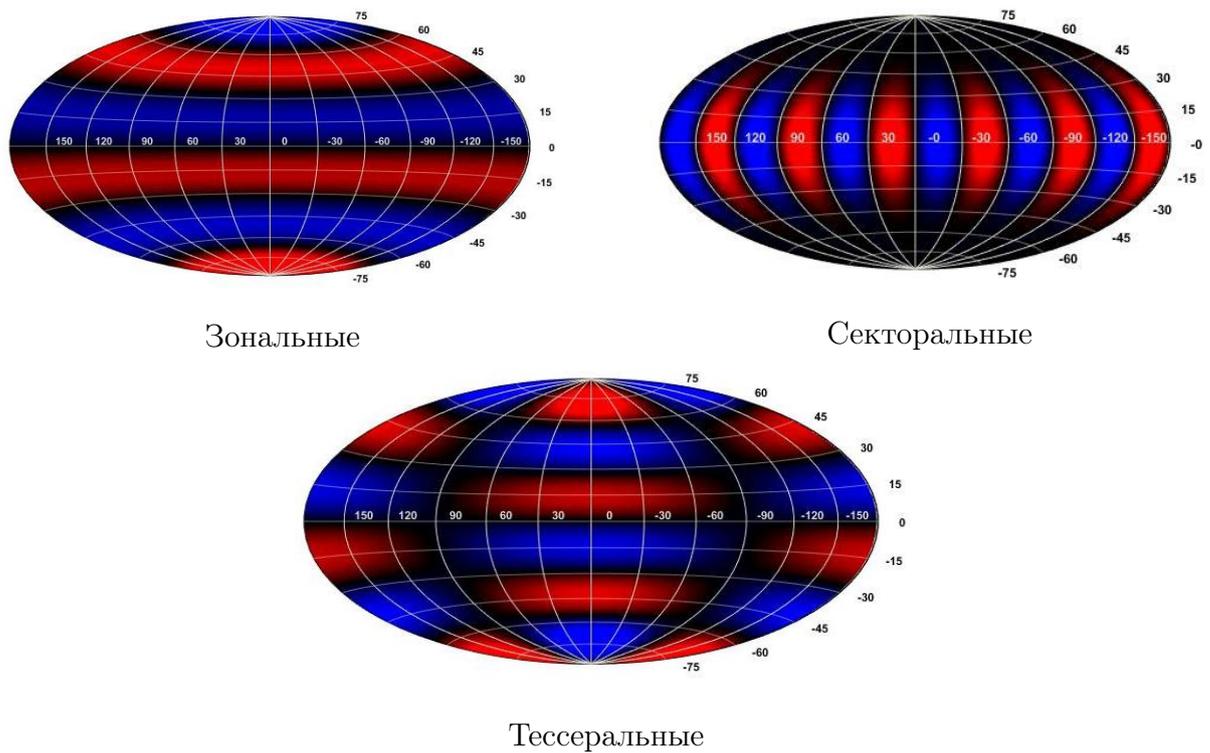


Рис. 1.1: Три вида гармоник сферических функций: Зональные ($k0n5l1$), Секторальные ($k6n6l0$), Тессеральные ($k1n6l1$)

1.1.3. Применение функций Лежандра–Фурье

В 1978 Бин и др. [36] заменили сферические функции новыми базисными функциями по схеме «Лежандр–Фурье» с целью более точной аппроксимации систематических разностей в полярных зонах склонения. Данный базис, дополненный полиномами Эрмита для учета уравнения яркости, использовался при составлении фундаментального каталога (FK5) [1]. В данной диссертации были использованы базисные функции по схеме «Лежандр–Фурье»:

$$f(\alpha, \delta) = \sum_{nkl} b_{nkl} Y_{nkl}(\alpha, \delta, m) + \varepsilon, \quad (1.12)$$

где базисные функции Y_{nkl} задаются выражением:

$$Y_{pnkl} = R_{pnkl} L_n(\bar{\delta}) F_{kl}(\alpha). \quad (1.13)$$

Функции Лежандра вычисляются согласно рекуррентному соотношению:

$$L_{n+1}(\bar{\delta}) = \frac{2n+1}{n+1} \bar{\delta} L_n(\bar{\delta}) - \frac{n}{n+1} L_{n-1}(\bar{\delta}) \quad (1.14)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, L_0 = 1, L_1 = \bar{\delta}, \bar{\delta} = \sin(\delta)$$

Функции Фурье определяются как:

$$F_{kl}(\alpha) = \begin{cases} 1, & k = 0, l = -1 \\ \cos lk\alpha, & k \neq 0, l = +1 \\ \sin(-lk\alpha), & k \neq 0, l = -1 \end{cases} \quad (1.15)$$

а базисные функции нормируются с помощью множителя:

$$R_{pnkl} = \sqrt{2n+1} \begin{cases} 1, & k = 0 \\ \sqrt{2} & k \neq 0 \end{cases} \quad (1.16)$$

Следует отметить, что при $n = 0$ и $k = 0, 1$ представление 1.13 для систематических разностей по склонению есть:

$$f(\alpha, \delta) = b_{00-1} + b_{011} \cos \alpha + b_{01-1} \sin \alpha \quad (1.17)$$

Таким образом, для $\Delta\delta$ разложение по функциям «Лежандра–Фурье», в отличие от метода «Броше», явным образом включает в себя члены, отвечающие за поворот системы координат. В нашей работе [10] разложение по функциям «Лежандр–Фурье» дало лучшее приближение, хотя и близкое к разложению по сферическим функциям (табл. 2.8 в главе 2). Однако, как показано в работах [44] – [47], при анализе систематических разностей целесообразно использование сферических функций (1.10).

1.1.4. Нахождение максимального члена разложения

Определение границы разделения случайной и систематической составляющей разностей координат ($\varepsilon_{\text{сист.}}, \varepsilon_{\text{случ.}}$), т.е. выбор максимального члена разложения, является ключевой проблемой в задаче сравнения и приведения каталогов координат источников. Решение этой проблемы производится на основе статистических критериев. В астрометрической практике обычно используют F–критерий (критерий Фишера), основанный на сравнении двух независимых оценок дисперсии [20], и γ –критерий, сутью которого является проверка гипотезы о независимости остатков разложения в ряд [48]. В данной работе для выбора максимального члена разложения был использован статистический критерий Фишера.

Статистический критерий F–критерий Фишера, основан на сравнении выборочных дисперсий двух и более вариационных рядов:

$$S_X^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, S_Y^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2. \quad (1.18)$$

где S_X^2, S_Y^2 — выборочные оценки дисперсий σ_X^2, σ_Y^2 , а \bar{x}, \bar{y} — выборочные средние.

Тест проводится путем сравнения эмпирического значения с критическим значением распределения Фишера при заданном уровне значимости (α) и соответствующих чисел степеней свободы для числителя и знаменателя.

$$F = \frac{S_X^2}{S_Y^2} \sim F(m-1, n-1), \quad (1.19)$$

1.2. Обзор фундаментальных систем отсчета, представленных каталогами РСДБ, и методов их построения

Прорыв в точности позиционной астрономии стал возможен благодаря развитию радиоастрометрических методов наблюдений в ходе и после второй мировой войны [5] и открытию нового класса астрономических объектов — квазаров (в 1963г.), которые долгое время считались компактными объектами, с медленно изменяющейся структурой и, следовательно, являлись идеальными кандидатами для установления квазиинерциальной системы отсчета. К 1990 годам точность определения координат радиоисточников превысила точность оптической системы координат, официально придя ей на смену в 1998г. [3].

1.2.1. Метод РСДБ

Первый простой радиоинтерферометр был сконструирован Райлом и Ванбергом в 1946 году, представляющий собой радиоаналог оптического интерферометра Майкельсона [49]. В 1965 году советские ученые Л. И. Матвеевко, Н. С. Кардашев и Г. Б. Шоломицкий предложили регистрировать данные на каждой антенне интерферометра независимо, и далее совместно их обрабатывать, что позволило разнести антенны на сколь угодно большие расстояния [50]. Данный метод, получивший название «радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой» (РСДБ, в международных публикациях известна как VLBI — Very long Baseline Interferometer), был впервые апробирован в США в 1967 году и стал успешно использоваться с начала 1970-х годов. Регулярные суточные РСДБ-наблюдения начали проводиться в 1979г. в двух полосах (2.2–2.6 ГГц — S и 8.2–8.9 ГГц — X) [5]. Эти наблюдения заложили основу современных радиоастрометрических каталогов.

Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой до настоящего времени является одной из самых уникальных и точных наблюдательных методик, результаты наблюдений которой позволяют решать различные проблемы астрометрии, геодезии, геодинамики и астрофизики. Точные координаты станций, определенные методами космической геодезии (РСДБ, SLR/LLR и GNSS) задают Международную земную систему координат (ITRS). Точные координаты внегалактических радиоисточников (в основном, квазаров), полученные в ходе обработки данных РСДБ-наблюдений, задают Международную небесную систему отсчета (ICRS). Связь систем ICRS и ITRS определяется пятью параметрами вращения Земли (ЕОП/ПВЗ): прецессия-нутація, поправки к координатам полюса и разности UT1–UTC [51]. Техника РСДБ — единственный на данный момент метод, с помощью которого возможно создание опорной небесной системы отсчета (CRF). Также РСДБ используется для установления связи между ICRS и ITRS, что делает её особенно уникальной.



Рис. 1.2: Принцип РСДБ-наблюдений, Изображение John Hazen

В суточной сессии РСДБ-наблюдений участвуют от 3 до 20 радиотелескопов, удаленных друг от друга на расстояние до 12 тысяч километров. Такая сеть в течение 24 часов проводит наблюдения выборки квазаров (от 10–15 источников в начале 80-х годов до 300 в настоящее время). Шумовой сигнал от каждого источника записывается в течение 1–3 минут совместно с метками времени высокоточного водородного стандарта одновременно на нескольких станциях. Наблюдения проводятся в двух частотных диапазонах: в S-полосе (2.3 ГГц) и X-полосе (8.4 ГГц). Это позволяет внести коррекции

за скорость распространения волн в ионосфере, зависящую от частоты наблюдений. Для вторичной обработки используются только данные в X-полосе. По окончании наблюдений, вся информация поступает в центр корреляционной обработки, где с помощью корреляторов вычисляются групповая временная задержка сигнала (τ_{group}) и частота интерференции (f_{interf}) как производные фазы корреляционной функции сигналов для каждой базы пары антенн (Φ) по отношению к циклической частоте наблюдений (w) и скорости изменения фазы $\tau_{group} = \frac{d\Phi}{dw}$, $f_{interf} = \frac{d\Phi}{dt}$. На практике, геометрическая задержка определяется с учетом эффектов общей и специальной теории относительности в геоцентрической системе координат — ($\vec{b} \cdot \vec{s} = -c(\tau_g + \Delta\tau)$) [52]. Полное аналитическое выражение для геометрической задержки в геоцентрической системе координат публикуется в IERS Conventions (<http://www.iers.org/>). Подробнее о модели задержки и параметрах, принятых в конвенции см. IERS Conventions, 2010 [51].

На этапе вторичной обработки РСДБ–наблюдений, осуществляемой центрами анализа РСДБ (в англоязычной литературе IVS analysis centres), предвычисленная с помощью редуцированных вычислений на основе принятых моделей задержка сравнивается с наблюдаемой — формируются разности «О–С» (Observatum – Calculatum) [5]. Для каждого наблюдения разность «О–С» можно представить, как некоторое разложение по малым параметрам, представляющих собой малые поправки Δp_i (которые уточняются из наблюдений) к принятым значениям параметров модели p_i :

$$O - C = \sum_i^N \frac{\partial \tau_c}{\partial p_i} \Delta p_i \quad (1.20)$$

В матричном виде условные выражение (1.20) будет представлено как:

$$Ax + w = h \quad (1.21)$$

где x — вектор параметров (Δp_i), A — матрица частных производных для указанных параметров ($A = [a_{ij}]$, $a_{ij} = \partial \tau_c / \partial p_i$), w — вектор ошибок наблюдений, h — вектор наблюдений (О–С) [53].

Для обращения матриц нормальных уравнений применяют дополнительные условия (констрейнты). В РСДБ земная система координат (TRS) задается с точностью до поворота и сдвига всей сети (дополнительные условия NNR/NTT No-net-Rotation/No-net-translation), небесная система координат (CRS) — с точностью до поворота всей системы NNR. В случае небесной СК, констрейнты NNR фиксируют оси, задаваемые координатами источников в опорном каталоге (ICRF/ICRF2 — часть 1.2.6). «Жесткое» фиксирование осей (оси опорной СК и полученной в ходе обработки РСДБ–наблюдений будут практически совпадать) осуществляется с помощью условий с малой допустимой дисперсией. В случае «мягкой» фиксации осей, с использованием условий с большей допустимой дисперсией, поправки к координатам опорных источников окажутся больше. В настоящее время идут дискуссии по выбору дополнительных условий (констрейнт). Негласно, большинство центров РСДБ–анализа используют «мягкие» условия NNR, ввиду того что на современном уровне точности многие источники имеют значимые видимые движения как случайные так и систематические, что приводит к нарушению ортогонализации осей. И, делая выбор между преемственностью осей координат и более точной системой, чаще склоняются ко второму [54].

1.2.2. Международная служба РСДБ

Метод РСДБ (VLBI), представляющий собой большой международный проект, сложен технически и организационно, и помимо «локальных» трудностей (каждая станция должна быть оснащена

современными высокоточными приемниками, системами регистрации и хранения данных, а также стандартами частоты и времени и многим другим) антенны радиointерферометра, находящиеся в разных странах должны работать точно и слаженно, согласно международным программам наблюдений. Это не было бы возможно без появления международной координирующей организации.

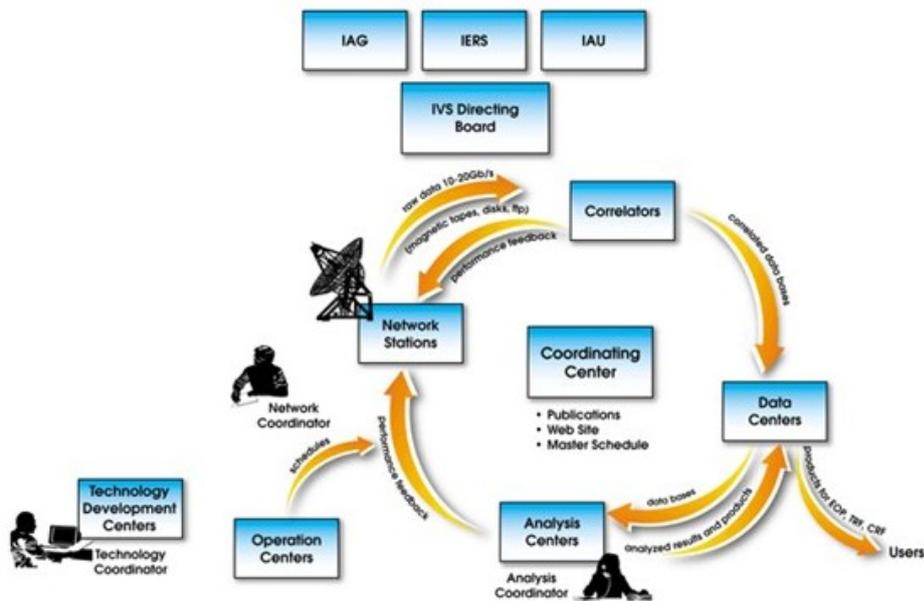


Рис. 1.3: Организация и взаимодействие различных подразделений IVS, рис. представлен на сайте организации.

Ранее, основная координация осуществлялась в США группой Годдарского Центра (GSFC) под руководством Нэнси Ванденберг (Nancy R. Vandenberg), которая впоследствии стала главным инициатором создания Международной Службы РСДБ (IVS) [5]. В 1998 году комиссией при Международной Ассоциации Геодезии (IAG) было решено создать международную координирующую организацию РСДБ-наблюдений. В 1999 году такая организация, получившая название “International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS)” начала свою работу. В настоящее время

IVS координирует работу более чем 80 учреждений в более чем 18 странах (<http://ivscc.gsfc.nasa.gov/>) [55]. Структура и взаимодействие центров IVS схематически представлено на рис. 1.3. Подробнее о работе IVS можно прочитать на сайте — <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/about/org/>

1.2.3. Каталоги положений радиоисточников

В 1987 решением МАС была учреждена новая служба IERS (Международная служба вращения земли / International Earth Rotation Service, сейчас International Earth Rotation and Reference Systems Service). Метод сравнения и комбинации индивидуальных РСДБ-каталогов различных IVS центров, применяемый IERS, использовался вплоть до 1995 года [56], [19]. Комбинация сводилась к сравнению каталогов и усреднению положений радиоисточников в каталогах разных IVS центров. Каждый такой исходный каталог был построен с использованием общих моделей и редукций, согласно резолюциям IERS. Координаты источников в исходных каталогах использовались для определения ориентации сводного каталога к индивидуальному.

Ориентация осей k каталогов определялась тремя углами поворота A_1 , A_2 и A_3 вокруг осей декартовой системы координат x , y , z :

$$\begin{aligned} A_1^i \sin \delta_{ij} \cos \alpha_{ij} + A_2^i \sin \delta_{ij} \sin \alpha_{ij} - A_3^i &= (\alpha_{ij} - \alpha_{cj}) \cos \delta_{ij}, \\ -A_1^i \sin \alpha_{ij} + A_2^i \cos \alpha_{ij} &= \delta_{ij} - \delta_{cj} \end{aligned} \quad (1.22)$$

где j — номер объекта, i — номер каталога.

Для решения системы (1.22) накладывались следующие условия (констрейнты):

$$\sum_{i=1}^k w_i A_s(i) = 0, s = 1, 2, 3. \quad (1.23)$$

Сводный каталог определялся как средняя система систематических поправок индивидуальных каталогов. В последствии, к системе (1.22) были добавлены параметры деформации (подробнее об этом в части 1.2.4). В 1994г. сводный каталог IERS включал 531 радиоисточник, 209 из которых были определены с довольно высокой точностью [56].

В 90е года конкуренцию классическому методу получения фундаментального каталога стал составлять «наблюдательный метод» [6]. В отличие от классического метода, наблюдательный работал с оригинальными РСДБ–наблюдениями, полученными с записывающих устройств MARKII (III). Все наблюдения были сделаны в период с 1979г. по 1993г. на стандартных частотах 2.3 ГГц и 8.4 ГГц. Результатом первичной обработки (корреляции) является групповая задержка и частота, из которых в ходе вторичной обработки методом МНК получают координаты источников, станций, ПВЗ и др. (часть 1.2.1). Первые такие каталоги координат радиоисточников были получены в 1995г. [57], известные как RORF (radio/optical reference frame). Изначально каталог RORF включал 600 радиоисточников, однако в финальной версии было оставлено 436 источника каталога, удовлетворяющие условию – с.к.о. положений < 3 мс. дуги (mas).

1.2.4. Модели применяемые IERS для сравнения каталогов

Данные методы (модели представления систематических разностей) были разработаны, в связи с тем, что строгие аналитические методы не могли быть применены к первым РСДБ–каталогам, содержащим малое количество источников (200–500). Позднее количество радиоисточников в каталогах увеличивалось, сейчас это около 3000–5000 источников в каталоге, однако перехода на строгие методы сравнения каталогов

официально так и не произошло.

Модель Вращения (3 параметра)

Пусть имеются две индивидуальные системы отсчета $X_1, Y_1, Z_1(\alpha_1, \delta_1)$ и $X_2, Y_2, Z_2(\alpha_2, \delta_2)$. Система (α_2, δ_2) образуется из системы (α_1, δ_1) путем вращения вокруг осей (X_1, Y_1, Z_1) на углы A_1, A_2, A_3 . Таким образом, для преобразования координат (1.5) вектора (X, Y, Z) из одной системы отсчета в другую мы можем записать (для малых углов поворота, которые для современных каталогов координат радиоисточников не превышают долей миллисекунды дуги):

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & A_3 & -A_2 \\ -A_3 & 1 & A_1 \\ A_2 & -A_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix}. \quad (1.24)$$

Учитывая, что

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \delta \\ \sin \alpha \cos \delta \\ \sin \delta \end{pmatrix}, \quad (1.25)$$

и переходя к разностям координат радиоисточника в двух каталогах $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ и $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2$, получим окончательные уравнения:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha \cos \delta &= A_1 \cos \alpha \sin \delta + A_2 \sin \alpha \sin \delta - A_3 \cos \delta \\ \Delta\delta &= -A_1 \sin \alpha + A_2 \cos \alpha. \end{aligned} \quad (1.26)$$

Набор таких уравнений (1.26) для всех или избранных общих источников в двух каталогах решается методом наименьших квадратов (МНК) для определения углов взаимной ориентации A_1, A_2 и A_3 двух систем отсчета, задаваемых сравниваемыми каталогами. При этом, как показано в нашем исследовании [58], [59] и Якобса [60], при решении этой системы важно

учитывать корреляции между координатами источников (подробнее об этом в части 2.1).

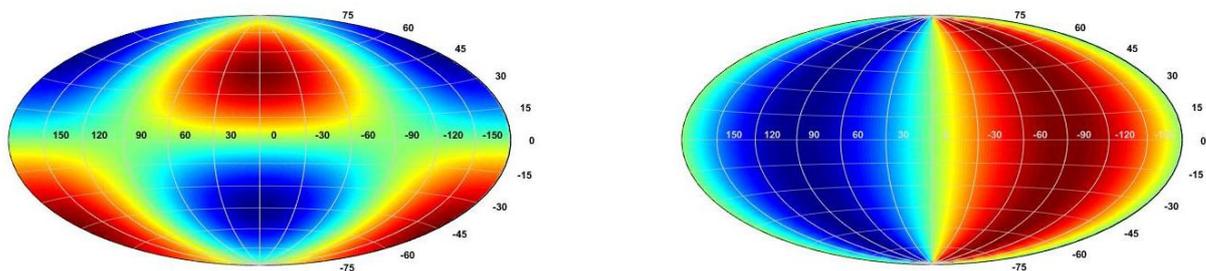


Рис. 1.4: Графическое представление угла A_1 модели (1.26) ($\Delta\alpha \cos \delta$ – слева и $\Delta\delta$ – справа)

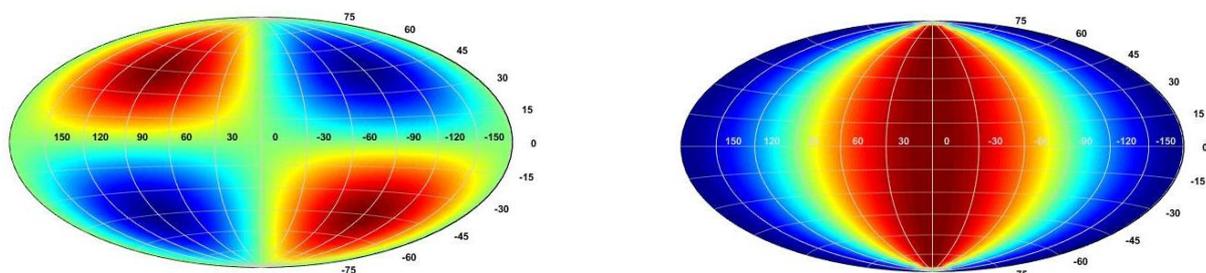


Рис. 1.5: Графическое представление угла A_2 модели (1.26) ($\Delta\alpha \cos \delta$ – слева и $\Delta\delta$ – справа)

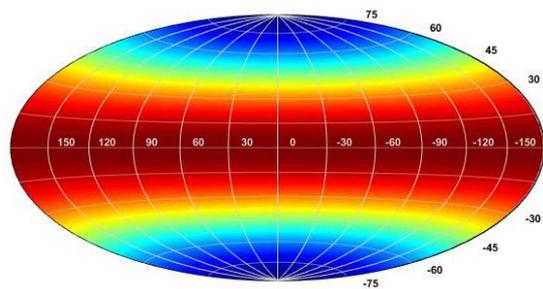


Рис. 1.6: Графическое представление угла A_3 модели (1.26) ($\Delta\alpha \cos \delta$)

Для визуального представления углов взаимной ориентации A_1 , A_2 и A_3 , модель (1.26) была применена на тестовой равномерной сетке координат (α, δ) . Рассматриваемому углу назначалось величина = 10мкс., значения остальных, не рассматриваемых углов, бралось нулевым (рис. 1.4 – 1.6).

Существенным недостатком модели (1.26) является то, что в решении подразумевается, что $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ состоят только из вращательных компонент

и шума, в то время, как систематические разности могут содержать и не вращательные компоненты, которые могут внести искажения в определение параметров поворота [47].

Модель Вращения с Деформацией (6/4 параметра)

Ввиду сложной систематики разностей координат в РСДБ-каталогах, с 1995г. центром IERS для сравнения каталогов использовалась модель (1.27), в которой различия координат представлены поворотом (1.26) и деформацией, где D_α, D_δ — наклоны по α и δ соответственно, и B_δ — сдвиг по δ [61].

$$\begin{aligned} \Delta\alpha \cos \delta &= A_1 \cos \alpha \sin \delta + A_2 \sin \alpha \sin \delta - A_3 \cos \delta + D_\alpha \delta \cos \delta \\ \Delta\delta &= -A_1 \sin \alpha + A_2 \cos \alpha + D_\delta \delta + B_\delta. \end{aligned} \quad (1.27)$$

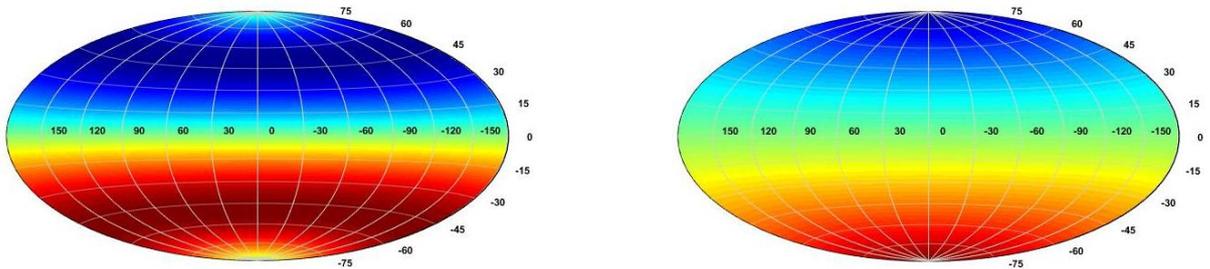


Рис. 1.7: Графическое представление параметров наклона D_α (слева), D_δ (справа) модели (1.27)

Впоследствии IERS вернулась к использованию модели четырех параметров [62]:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha \cos \delta &= A_1 \cos \alpha \sin \delta + A_2 \sin \alpha \sin \delta - A_3 \cos \delta, \\ \Delta\delta &= -A_1 \sin \alpha + A_2 \cos \alpha + dz. \end{aligned} \quad (1.28)$$

где dz (в англоязычной литературе или B_δ) — параметр деформации.

1.2.5. Международная небесная система координат (ICRS)

В соответствии с резолюцией 23 Генеральной Ассамблеи Международного Астрономического Союза (МАС) в Киото (1997) с 1.01.1998 в качестве официальной реализацией инерциальной небесной системы отсчета была принята новая система, получившая название ICRS (International Celestial Reference System), полностью сменив оптическую систему координат, представленную фундаментальным каталогом FK5 [63] – [4]. Основные принципы определения ICRS:

- Начало координат квазиинерциальной системы ICRS является барицентр Солнечной системы,
- координаты источников определяются на эпоху J2000,
- направление полярной оси задается принятой моделью прецессии-нутаии,
- начало R.A. (прямых восхождений) задается фиксированными координатами квазара 3C 273B каталога FK5, приведенные на эпоху J2000.0 для связи оптической и радио систем координат.

Распространением принятой системы координат ICRS на яркие звёзды являются: каталог HIPPARCOS [2], содержащий 118218 звёзд; каталог Tycho/Tycho-2 [69], содержащий 1058332/2.5 млн. звезд. Согласование оптических наблюдений звёзд и радионаблюдений квазаров осуществлено по результатам наблюдений ряда радиозвезд в оптическом диапазоне длин волн.

1.2.6. Международная небесная система отсчета (ICRF)

В качестве практической реализации ICRS был принят каталог координат радиоисточников ICRF (International Celestial Reference Frame),

полученный в 1996 г. в результате обработки ~ 1.6 миллиона РСДБ-наблюдений, выполненных с 1979 по 1995 гг., с помощью пакета программ CALC/SOLVE в Годдардском центре космических полетов (GSFC) [3], [4].

Все источники, вошедшие в каталог ICRF, были условно разделены на три группы:

- Группа «опорных» 212 источников (“defining“), определяющие положение осей системы. Основное требование к которым — «стабильность». Присутствие в группе источников, на которые накладываются NNR-констрейнты, даже малого числа нестабильных источников может повлечь за собой сдвиги всей полученной небесной СК.
- Во вторую группу вошли 294 источника, так называемые «кандидаты» (“candidate“) в первую группу, которые еще не имели достаточного количества наблюдений.
- К третьей группе отнесли 102 неустойчивых источника (“other“), включенные для заполнения пустых областей.

Таким образом, полный каталог ICRF состоял из 608 квазаров (Рис. 1.8). Медианная ошибка координат в каталоге ICRF составила 0.65 мс. дуги для всех источников и 0.45 мс. дуги для определяющих источников.

1.2.7. Расширения ICRF Ext. 1 и ICRF Ext. 2

В 1998 и 2004 годах были выпущены два дополнения к каталогу ICRF, включающие новые наблюдения и источники — ICRF Ext.1 и ICRF Ext.2. В ICRF Ext.1 вошли 59 новых источников, координаты которых получены по ~ 600 тыс. наблюдений в период с 1995 по 1999 года [12]. В ICRF Ext.2 добавлены 105 новых источников и около 1.2 миллиона новых наблюдений [64] (Рис. 1.9). Координаты некоторых источников из

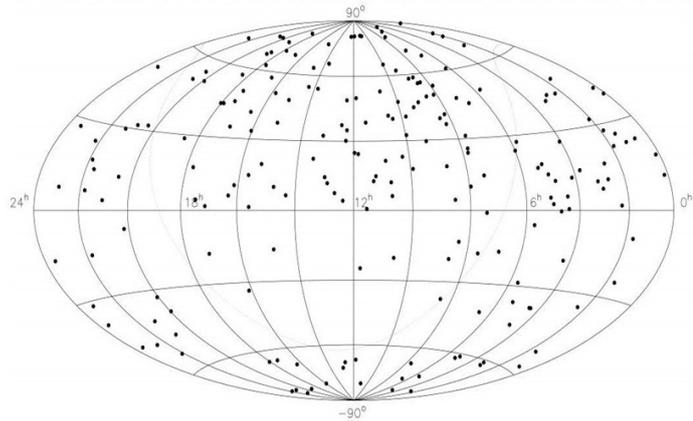


Рис. 1.8: Распределение радиоисточников ICRF

категорий “candidate“ и “other“ были пересмотрены. Однако источники основной группы сохранили свои изначальные координаты для сохранения привязки между каталогами, т.е. не пересматривались с 1995 года.

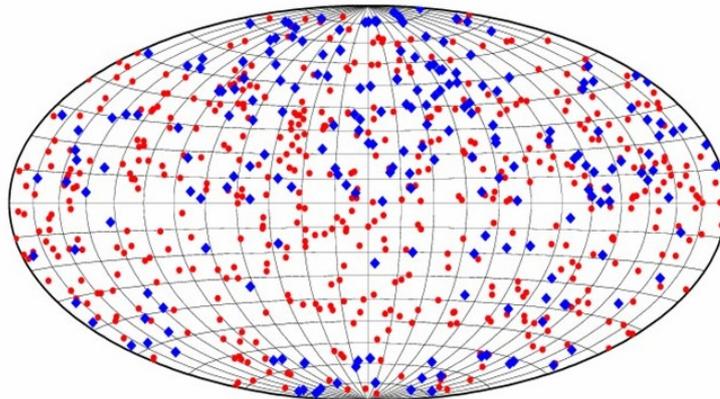


Рис. 1.9: Распределение радиоисточников ICRF Ext. 2 [64]. Опорные – синим, остальные – красным.

1.2.8. ICRF2

В последующее десятилетия увеличившийся объем наблюдений и значительный прогресс в анализе РСДБ–данных привели к необходимости пересмотра существующей реализации небесной системы координат. И

в 2005 году был инициирован совместный международный проект IVS, IAU и IERS по созданию новой реализации небесной системы координат — ICRF2. В рамках проекта ICRF2 были созданы две рабочие группы. Первая рабочая группа IAU осуществляла общую координацию работ по ICRF2, вторая группа “IVS WG ICRF2” была призвана провести вычисление каталога ICRF2, включая все подготовительные исследования [11]. Основные исследования в рамках данного проекта осуществлялись по следующим направлениям: исследование стабильности радиоисточников и выбор оптимального списка опорных источников; отбор исходных данных; исследование ошибок обработки; получение и исследование индивидуальных каталогов в систематическом и случайном отношении, для выбора оптимальной концепции построения новой небесной системы координат [10], [13]. В таблице 1.3 приведены основные участники рабочей группы “IVS WG ICRF2” и сферы их исследований в проекте.

В результате работы группы в 2009 году была создана и принята Генеральной ассамблеей IAU вторая версия радиоастрометрической небесной системы отсчета ICRF2 [13].

Несмотря на обсуждение выбора концепции будущей ICRF2 на встречах рабочей группы как сводного решения, в качестве небесной системы отсчета ICRF2, был принят каталог, полученный так же как каталог ICRF в Центре космических полетов им. Годдарда (GSFC). Оба каталога (ICRF и ICRF2) были построены по схожей методике – в два этапа. На первом вычислялся каталог координат радиоисточников в промежуточной системе в отношении ориентации (оба раза такой каталог вычислялся в Центре космических полетов им. Годдарда НАСА, США). На втором этапе этот каталог приводился в систему ICRS путем его вращения с помощью значений углов поворота A_1 , A_2 и A_3 (1.26), вычисленных по специально отобраным опорным (“defining”) источникам. В случае

Таблица 1.3: Участники рабочей группы и их вклад. Кат. - получение индивидуальных реализаций CRF, Рб – временные ряды координат источников, Стк. - изучение структуры источников, А.К. - анализ и сравнение индивидуальных каталогов, А.Р. – анализ рядов координат, Тр. – изучение параметров трансформации, Комб. – построение сводного каталога.

Центр	Основные участники	Сфера исследований						
		К.	Р.	Стр.	А.К.	А.Р.	Тр.	Комб.
GSFC, США	Ch. Ma, J. Gibson, D. Gordon, L. Petrov	X	X	X	X	X		
USNO, США	A. Fey, R. Gaume	X	X	X		X		
BKG, Германия	A. Nothnagel				X			
DGFI, Германия	V. Tesmer	X	X					
OPAR, Франция	A.-M.Gontier, S. Lambert F. Arias	X	X		X	X	X	
ОВ, Франция	P. Charlot, J. Souchay			X				
ГАО, Россия	З. Малкин, Ю. Соколова				X	X		X
ГАИШ, Россия	В. Жаров		X			X		
ИПА, Россия	С. Курдубов, Е. Скурихина	X	X			X		
МАО, Украина	С. Болотин, Я.Яцкив	X	X		X			X
JPL, США	O. Sovers, C. Jacobs	X			X			
AUS, Австралия	О. Титов	X	X					
SHAN, Китай	G. Wang	X	X					

ICRF, окончательный каталог был получен в системе каталога IERS95 с использованием 133 общих источников. Каталог ICRF2 был приведен в систему ICRF с использованием 138 общих источников.

Каталог ICRF2 содержит координаты 3414 источников (что почти в 5 раз больше, чем было в ICRF), полученных из обработки около 6.5 миллиона наблюдений за 1979–2009 гг. Группа опорных источников “defining“ ICRF2 была пересмотрена и расширена до 295 определяющих источников, 138 из которых входили в “defining“ ICRF. Таким образом одно из основных преимуществ ICRF2 по сравнению с ICRF в том, что помимо значительного роста наблюдений и их точности, возросла стабильность и распределение опорной группы источников стало более равномерным. Медианная ошибка положений в ICRF2 — 0.63 мс. дуги для всех источников и 0.07 мс. дуги для опорных источников. Надо заметить, что увеличение средней ошибки координат всех источников ICRF2 по сравнению с ICRF произошло из-за включения 2197 источников программы VCS (VLBA Calibrator Survey), наблюдавшихся в одной – двух сессиях и имеющих по этой причине существенно худшую точность, чем источники регулярных радиоастрометрических программ [13]. Без этих источников медианная ошибка координат ICRF2 составляет 0.19 мс. дуги. Но даже более важным преимуществом ICRF2 перед ICRF стало значительное уменьшение его систематических ошибок, что будет обсуждаться ниже.

В настоящее время ведутся активные работы по улучшению текущей версии ICRF (ICRF2), и предположительно в 2018 году планируется выпустить новую версию ICRF — ICRF3, основные планируемые улучшения которой предположительно следующие:

- Увеличение общего числа источников до 4000+ (один на 10 кв. гр.)
- Улучшение случайной и систематической точности координат.
- Улучшение распределения источников и ошибок координат по небу.

1.2.9. Некоторые проблемы ICRF

Принятая небесная система отсчета ICRF2 не лишена некоторых недостатков, работа над устранением которых активно ведется мировым радиоастрометрическим сообществом. Основные из них:

1. Неравномерное распределение.

Следует отметить, что обе системы (ICRF, ITRF) имеют явное северное преобладание [5], (Рис. 1.8). Это вызвано гораздо большим количеством РСДБ-станций в северном полушарии, и как следствие неоднородность в количестве радиоисточников с длительной наблюдательной историей в южном и северном полушарии, что сказывается на точности определения системы отсчета.

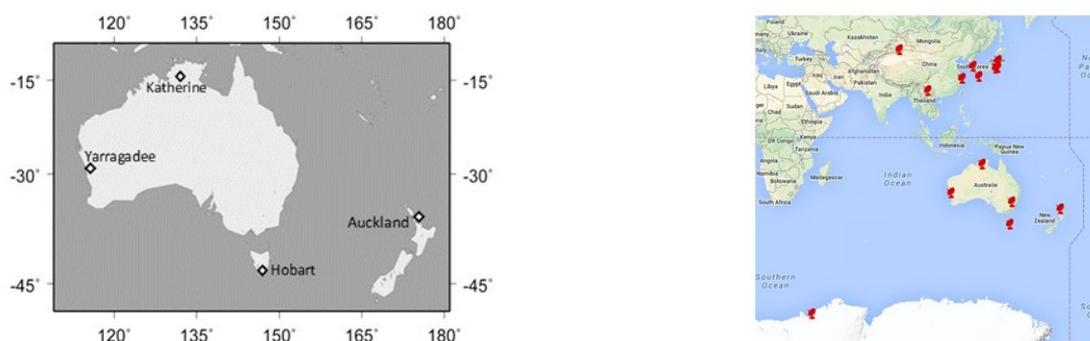


Рис. 1.10: Австралийско (AuScore) – Новозеландская РСДБ-сеть [66] (слева), AOV РСДБ-сеть южного полушария — Asia-Oceania Group for Geodesy and Astrometry (AOV), состоящая из 17 телескопов 5 стран Тихоокеанской группы (справа).

Для решения этой проблемы в последние годы ведется активное развитие радиоинтерферометрии в южном полушарии (Рис. 1.10). Согласно предварительный плану на ближайшие 5 лет (к выходу в 2018 году ICRF3) развития РСДБ в океанском регионе, в частности РСДБ-сети малых антенн “AuScore” [65], [66] намечено: около 136 сессий в год для наблюдений на всех трех антеннах “AuScore“, сотрудничество с Новой Зеландией и Южной

Африкой по расширению сети для астрометрических сессий.

2. Изменение структуры радиоисточников.

С развитием радиоинтерферометрии, моделей и методов обработки РСДБ–наблюдений стало понятно, что достаточно большое количество радиоисточников имеют сложную структуру на миллисекундном масштабе дуги, которая в большинстве случаев оказывается переменной на шкале времени от нескольких месяцев до нескольких лет. Это приводит к астрометрической нестабильности координат опорных объектов на уровне 0.1–1 мс. дуги, а также влияет на определение ПВЗ (в основном нутации) [14], [15], [16]. Подробнее об этом в главе 4.

3. Возрастающая систематика по склонению.

С примерно 2013г. каталоги радиоисточников демонстрируют возрастающую систематику по склонению, возможно связанную, с активными наблюдениями южных станций — Австрало–НовоЗеландской сети, начавшихся в 2013г. Вопрос связана ли данная систематика плохой точностью определения координат в южном полушарии опорной ICRF2, с геометрией сети или инструментальными ошибками южных станций пока открыт [17] (подробнее об этом в части 2.2.1 главы 2).

4. Систематические разности, связанные с методом обработки.

Поскольку индивидуальные каталоги координат радиоисточников строятся с помощью различных пакетов программ обработки, но по одним и тем же наблюдениям, то точность каждого каталога определяется в первую очередь выбором стратегии оценивания и использованным методом обработки (Табл. 1.4). И хотя все методы представляют различные модификации метода наименьших квадратов, результаты

Таблица 1.4: Центры Анализа РСДБ–данных, пакеты обработки и методы оценивания.

Центр	Код	Программное обеспечение	Метод оценивания	Страна
Центр наук о Земле	AUS	OCCAM	СКК	Австралия
Венский технический университет	IGG	VieVs	СМНК	Австрия
Исследовательский центр наук о Земле	GFZ	VieVs	СМНК	Германия
Государственное агентство по картографии и геодезии	BKG	CALC/SOLVE	СМНК	Германия
Институт геодезических исследований	DGFI	OCCAM	СМНК	Германия
Центр космической геодезии	CGS	CALC/SOLVE	СМНК	Италия
Парижская обсерватория	OPA	CALC/SOLVE	СМНК	Франция
Институт Прикладной Астрономии	IAA	QUASAR	СКК	Россия
Центр космических полетов им. Годдарда НАСА	GSFC	CALC/SOLVE	СМНК	США
Лаборатория реактивного движения НАСА	JPL	MODEST		США
Морская обсерватория	USNO	CALC/SOLVE	СМНК	США
Главная астрономическая обсерватория Украины	MAO	SteelBreeze	ИФ	Украина
Шанхайская обсерватория	SHA	CALC/SOLVE	СМНК	КНР

иногда значительно различаются, что связано с выбором стратегии оценивания: селекции наблюдательных данных, выбора редуционных моделей, наложения констрейнт и пр.

В Таблице 1.4 представлены центры анализа РСДБ–данных, некоторые из центров появились сравнительно недавно (GFZ), некоторые приостановили свою работу (DGFI). В таблице указаны: научная организация к которой относится центр, краткое название центра (которое в дальнейшем будет использоваться в диссертации), программное обеспечение, используемое при составлении каталогов, метод оценивания в программном обеспечении, и последнее страна IVS центра. В методе оценивания обозначения: СКК — среднеквадратичная коллокация, СМНК — сегментированный метод наименьших квадратов, ИФ — информационный фильтр с извлечением квадратного корня.

5. Расширение ICRF на новые длины волн

Принятая небесная система отсчета ICRF2 установлена исключительно по наблюдениям в S/X полосе, в то время как различные исследования показывают, что с переходом на более высокие частоты наблюдений источники представляются более компактными и протяженные компоненты структур становятся невидимыми. Однако наблюдения на высоких частотах имеют свои сложности, такие как: чувствительность к метеопараметрам, оснащение станций новыми дорогостоящими приемниками, уменьшение потока на высоких частотах. В данное время задача о переходе на более высокие частоты диапазона К (22–24 ГГц), Ка (32 ГГц), окончательно не решена, хотя работы в этом направлении ведутся [67], [68] и др.

Глава 2. Систематические разности положений радиоисточников в РСДБ–каталогах.

В предыдущей главе был дан обзор моделей представления систематических разностей с помощью сферических функций (часть 1.1.2 – 1.1.3), и моделей применяемых IERS (часть 1.2.4). Рассмотрим связь этих методов.

Пусть есть некоторое аналитическое представление систематических разностей с помощью ортогональных функций:

$$\begin{aligned}\Delta\alpha \cos \delta &= \sum_{j=0}^g b_j Y_j(\alpha, \delta) + \varepsilon. \\ \Delta\delta &= \sum_{j=0}^g b'_j Y_j(\alpha, \delta) + \varepsilon'.\end{aligned}\tag{2.1}$$

и аналогичное представление по модели вращения (1.26).

$$\begin{aligned}A_1 \cos \alpha \sin \delta + A_2 \sin \alpha \sin \delta - A_3 \cos \delta &= \sum_{i=1}^3 A_i \varphi_i(\alpha, \delta). \\ -A_1 \sin \alpha + A_2 \cos \alpha &= \sum_{i=1}^2 A_i \psi_i(\alpha, \delta).\end{aligned}\tag{2.2}$$

Тогда связь модели вращения с аналитической моделью разложения представляется формулой:

$$\begin{aligned}\sum_j b_j Y_j(\alpha, \delta, m) &= \sum_{i=1}^3 A_i \varphi_i(\alpha, \delta), \\ \sum_j b'_j Y_j(\alpha, \delta, m) &= \sum_{i=1}^2 A_i \psi_i(\alpha, \delta).\end{aligned}\tag{2.3}$$

где b_j, b'_j — коэффициенты аналитической модели разложения, A_j — коэффициенты модели вращения [47].

Решение (2.3) может быть получено из условий [47]:

$$\int_0^{2\pi} d\alpha \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left[\sum_j b_j Y_j(\alpha, \delta, \mu) - \sum_{i=1}^3 A_i \varphi_i(\alpha, \delta) \right]^2 \cos \delta d\delta = \min, \quad (2.4)$$

$$\int_0^{2\pi} d\alpha \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left[\sum_j b'_j Y_j(\alpha, \delta, \mu) - \sum_{i=1}^2 A_i \psi_i(\alpha, \delta) \right]^2 \cos \delta d\delta = \min.$$

В зависимости от того как решается уравнение (2.3), можно получить параметры вращения A_i как функции коэффициентов b_j, b'_j и наоборот, соответственно. Оба решения представлены в работе В.В. Витязева [47]. В таблицах 2.1, 2.2 приведена связь между параметрами поворота модели (1.26) и сферическими гармониками разложения (1.10). Рис. 2.1 – 2.3 демонстрируют гармоники сферических функций, соответствующие углам вращения. Аналогично представляется связь разложения по сферическим функциям и моделями (1.27), (1.28). Рис. 2.4 – 2.3 демонстрируют гармоники сферических функций, соответствующие наклонам D_α, D_δ .

Таблица 2.1: Сферические функции, определяющие углы вращения и параметры деформации в систематических разностях $\Delta\alpha \cos \delta$

k=1	l=1		A_1		A_1		A_1
k=1	l=0		A_2		A_2		A_2
k=0,l=1	A_3	D_α	A_3	D_α	A_3	D_α	A_3
n	0	1	2	3	4	5	6

Таблица 2.2: Сферические функции, определяющие углы вращения и параметры деформации в систематических разностях $\Delta\delta$

k=1	l=1	A_2		A_2		A_2	
k=1	l=0	A_1		A_1		A_1	
k=0,l=1	B_δ	D_δ		D_δ		D_δ	
n	0	1	2	3	4	5	6

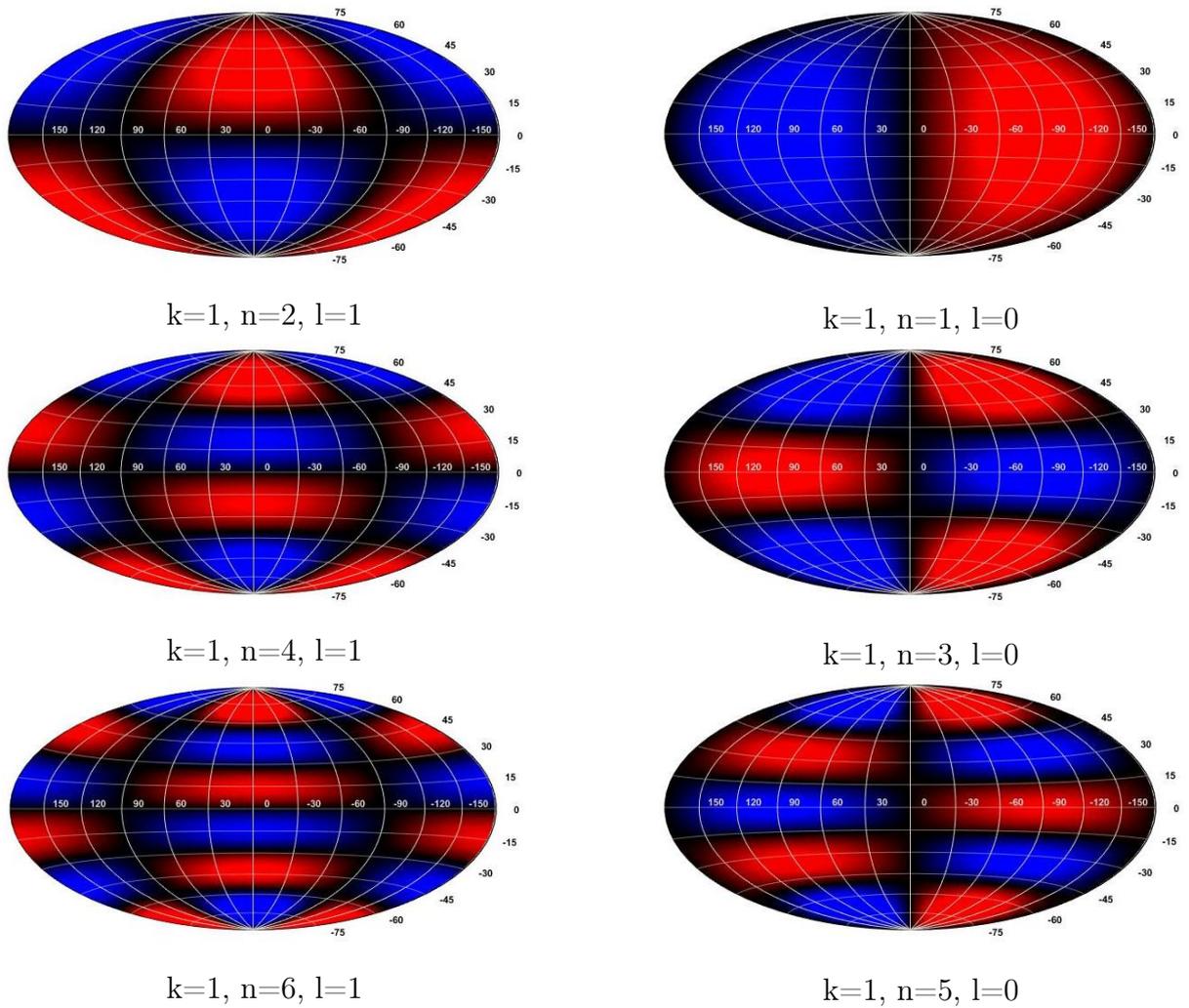
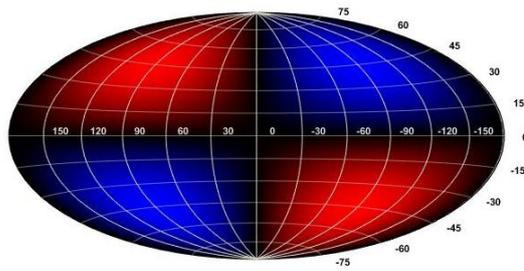


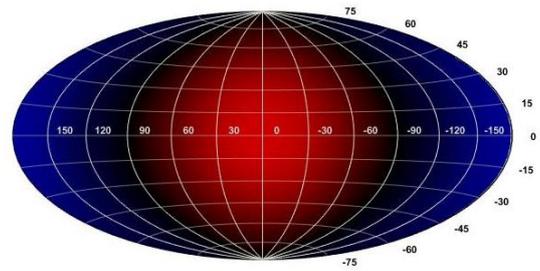
Рис. 2.1: Графическое представление гармоник сферических функций, представляющие угол вращения A_1 модели (1.26) ($\Delta\alpha \cos \delta$ — слева и $\Delta\delta$ — справа)

Если коэффициенты разложения систематических разностей удовлетворяют тестам вращения, описанными в [47], то b_j, b'_j состоят только из вращательных компонент. Если коэффициенты разложения систематических разностей не удовлетворяют тестам вращения, как указано в работе [47], то:

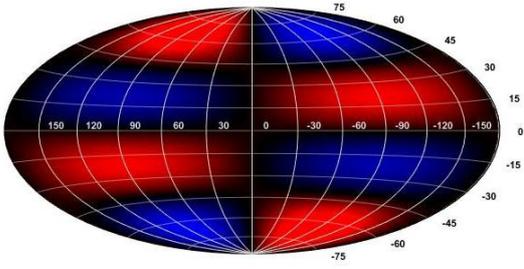
- Систематические разности не содержат вращения;
- Систематические разности содержат вращение, но оно замывается членами (квазивращательными компонентами), коррелирующими с вращательными компонентами.



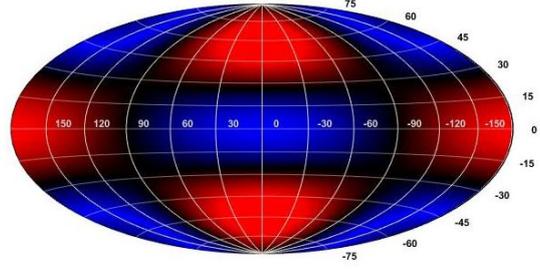
$$k=1, n=2, l=0$$



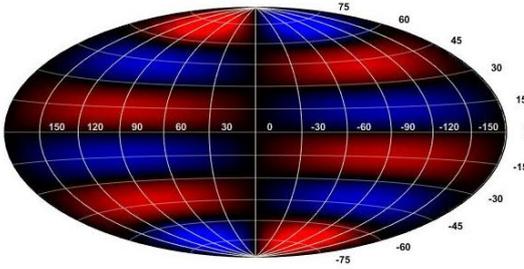
$$k=1, n=1, l=1$$



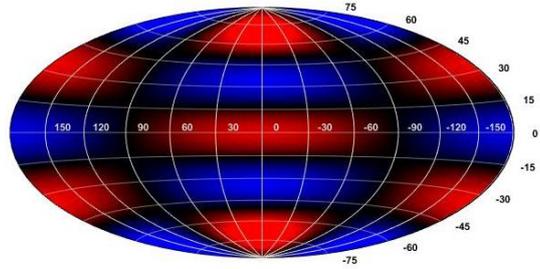
$$k=1, n=4, l=0$$



$$k=1, n=3, l=1$$

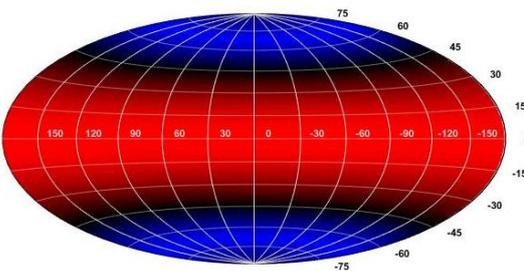


$$k=1, n=6, l=0$$

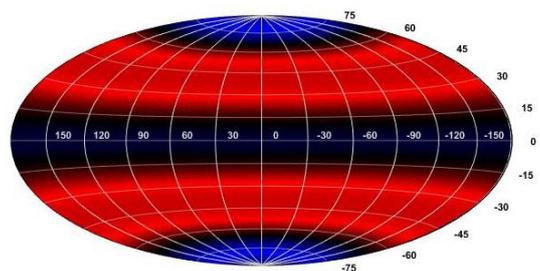


$$k=1, n=5, l=1$$

Рис. 2.2: Графическое представление гармоник сферических функций, представляющие угол вращения A_2 модели (1.26), $\Delta\alpha \cos \delta$ (слева) и $\Delta\delta$ (справа)



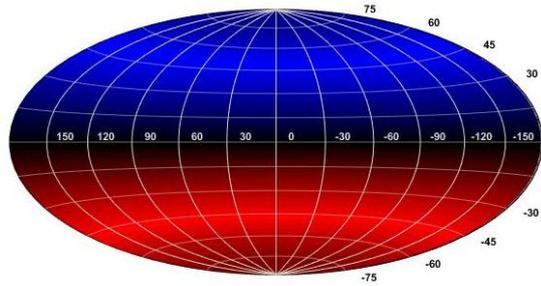
$$k=0, n=2, l=1$$



$$k=0, n=4, l=1$$

Рис. 2.3: Графическое представление гармоник сферических функций, представляющие угол вращения A_3 модели (1.26) $\Delta\alpha \cos \delta$

Как показало наше исследование [10], [18], углы поворота, полученные по модели (1.26) и (1.28) совпадают на уровне ошибок для большинства



$$k=0, n=1, l=1$$

Рис. 2.4: Графическое представление гармоник сферических функций, представляющую наклоны D_α , D_δ (1.27)

разностей координат каталогов, что говорит о том, что эти модели имеют схожую точность определения углов поворота (часть 2.3).

Следует отметить, что несмотря на то, что в ходе уравнивания на опорные источники накладываются условия вида No-Net-Rotation (NNR) (подробнее в части 1.2.1), которые должны исключить поворот между различными реализациями CRF, тем не менее, некоторые углы поворота могут оказаться значимыми (табл. 2.4 в части 2.1) [10], [18]. Одно из возможных объяснений этого эффекта — недостаточное отделение случайного шума и неврацательных систематических компонент в моделях IERS (рис. 2.12 в части 2.3), так же это может быть вызвано использованием мягких дополнительных условий (констрейнт) в ходе глобального решения, или влиянием корреляционной информации на параметры ориентации систем координат [58], [59].

2.1. Влияние корреляционной информации на определение ориентации между различными РСДБ-каталогами

Традиционно в задаче нахождения взаимной ориентации двух систем отсчета принимались во внимание только ошибки координат источников. Корреляции между ними не учитывались, хотя они

могут быть велики, особенно в случае малого числа наблюдений на ограниченной сети станций. Сравнительно недавно Якобс в работе [60] показал, что учет этих корреляций оказывает существенное влияние на определяемые углы взаимной ориентации систем отсчета, задаваемые сравниваемыми каталогами. При этом, исследовалось влияние учета полной корреляционной матрицы каталога. К сожалению, каталоги, использовавшиеся в работе Якобса [60], отсутствуют в открытом доступе, также, как и отсутствуют другие официальные версии каталогов с полной корреляционной матрицей в базе данных Международной службы РСДБ (IVS).

Каталоги, регулярно публикуемые в базе данных IVS, приводятся в сходных форматах ICRF или IERS и содержат помимо ошибок координат радиоисточников также корреляции между прямым восхождением и склонением (RA/DE) для каждого источника. Таким образом становится возможным включить в обработку не только диагональную ковариационную матрицу (т.е. только ошибки координат источников), но также двухдиагональную:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{\alpha_1}^2 & cov(\delta_1, \alpha_1) & cov(\alpha_2, \alpha_1) & cov(\delta_2, \alpha_1) & \dots \\ & \sigma_{\delta_1}^2 & cov(\alpha_2, \delta_1) & cov(\delta_2, \delta_1) & \dots \\ & & \sigma_{\alpha_2}^2 & cov(\delta_2, \alpha_2) & \dots \\ & & & \sigma_{\delta_2}^2 & \dots \\ & & & & \dots \\ & & & & \dots \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Данное исследование учета двухдиагональной ковариационной матрицы представляет интерес по двум причинам:

- Для анализа доступно большое число каталогов.
- Этот вариант не исследовался в [60], поэтому представляется важным

изучить его как промежуточный вариант между учетом только диагональной и полной матрицы.

Кроме каталогов, официально представленных в IVS, в процессе выполнения этой работы по нашей просьбе Хана Красна (Hanna Krásná, Венский технический университет) и Дэн МакМиллан (Dan MacMillan, Годдардский центр НАСА) предоставили версии их каталогов в формате SINEX, которые содержат полную ковариационную матрицу. Таким образом, появилась возможность провести более детальное исследование влияния учета корреляционной информации на определение углов взаимной ориентации между каталогами радиисточников, результаты которого представлены в этой части диссертации и в [58], [59].

Тестовые вычисления были проведены с девятью индивидуальными каталогами, полученными в восьми центрах анализа РСДБ-наблюдений. Список использованных каталогов для данного исследования приведен в табл. 2.3. Первые три буквы названия каталога обозначают центр анализа (расшифровка кодов представлена в таблице 1.4 части 1.2.9). Каталоги AUS, VKG, CGS, OPA, GSF2012 были взяты из баз данных IVS и Интернет-ресурсов центров анализа, каталоги GSF2011, IGG и USN были любезно предоставлены авторами. В случае каталога USN использовались только координаты источников, полученные в ходе глобального решения, (т.е. источники, координаты которых оценивались по отдельным сессиям, в обработку не включались). Основным каталогом сравнения в большинстве тестов был каталог ICRF2. К сожалению, данный каталог доступен только в формате ICRF, т.е. не содержит полной ковариационной информации.

Для каждого каталога (α_k, δ_k) таблицы 2.3 были вычислены углы взаимного поворота A_1, A_2, A_3 (1.26) (часть 1.2.4) между k каталогом и ICRF2 с применением трех способов учета корреляций между координатами источников:

Таблица 2.3: Индивидуальные каталоги

Каталог	Программное обеспечение	Период наблюдений	Количество источников	Формат каталога
aus2012b	Occam	1980 – 2012	2892	ICRF
bkg2011a	Calc/Solve	1984 – 2011	3214	ICRF
cgs2012a	Calc/Solve	1980 – 2011	842	ICRF
gsf2011a	Calc/Solve	1979 – 2011	1340	SINEX
gsf2012a	Calc/Solve	1979 – 2012	3708	ICRF
igg2012b	VieVS	1984 – 2012	860	SINEX
opa2012a	Calc/Solve	1979 – 2012	3482	ICRF
sha2012b	Calc/Solve	1979 – 2012	3470	ICRF
usn2012a	Calc/Solve	1979 – 2012	793	ICRF

1. использование нулевых корреляций (диагональная корреляционная матрица),
2. использование RA/DE корреляций (двухдиагональная корреляционная матрица),
3. и использование полной корреляционной матрицы.

При этом решается следующая задача МНК:

$$\mathbf{B}\mathbf{x} + \varepsilon = \mathbf{l}, \quad (2.6)$$

где \mathbf{B} — матрица коэффициентов условных уравнений (1.26) размерностью $2n \times 3$, $\mathbf{x}' = (A_1, A_2, A_3)$, ε — вектор ошибок длиной $2n$, $\mathbf{l}' = (\Delta\alpha_1 \cos \delta_1, \Delta\delta_1, \dots, \Delta\alpha_n \cos \delta_n, \Delta\delta_n)$ — вектор правых частей длиной $2n$, n — число общих источников в двух каталогах, штрихами обозначены транспонированные матрицы.

Кроме того, имеется ковариационная матрица разности каталогов:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_1 + \mathbf{Q}_2, \quad (2.7)$$

где \mathbf{Q}_1 и \mathbf{Q}_2 — подматрицы размерностью $2n \times 2n$ ковариационных матриц двух каталогов, соответствующие общим источникам. Каждая из них может быть диагональной, если учитываются только ошибки координат (корреляции между ними полагаются нулевыми), двухдиагональной, при учете только корреляций RA/DE, или полной.

Строго говоря, равенство (2.7) справедливо, если каталоги являются независимыми. Однако определение корреляций между координатами источников в различных каталогах задача нетривиальная и пока не имеет удовлетворительного решения. Возможный новый подход к этой проблеме обсуждался в [70].

Оценка вектора x в 2.6 имеет вид:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{B}'\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{B}'\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{1}. \quad (2.8)$$

Для шести каталогов, доступных только в формате ICRF, можно провести сравнение только первых двух вариантов. Результаты вычислений приведены в табл. 2.4.

При сравнении каталогов gsf2011a и igg2012b с ICRF2 возможно применение трех способов учета корреляций: нулевые корреляции, RA/DE корреляции для обоих каталогов, а также использование полной корреляционной матрицы для индивидуальных каталогов и RA/DE корреляций для ICRF2. Результаты приведены в табл. 2.5.

Наконец, при сравнении каталогов gsf2011a и igg2012b возможно применение полных корреляционных матриц для обоих каталогов. Результаты этого теста, наряду с первыми двумя вариантами учета корреляций, приведены в табл. 2.6.

Полученные результаты показывают, что разница в углах поворота, посчитанных с учетом и без учета корреляций между прямым восхождением и склонением (RA/DE), может достигать до нескольких мкс. дуги, хотя

Таблица 2.4: Параметры ориентации между индивидуальными системами отсчета и ICRF2 без учета корреляций (первая строка) и с учетом корреляций RA/DE для обоих каталогов (вторая строка), мкс. дуги. Под именами каталогов приведено число общих источников в сравниваемых каталогах

Каталог	A1	A2	A3
aus2012b	-26.5 ± 4.5	2.1 ± 4.6	1.7 ± 4.0
936	-26.5 ± 4.5	2.3 ± 4.5	2.5 ± 3.9
bkg2011a	25.6 ± 3.1	17.0 ± 3.1	-10.5 ± 2.7
936	25.5 ± 3.0	17.1 ± 3.1	-12.9 ± 2.6
cgs2012a	11.9 ± 3.5	-1.1 ± 3.5	-13.0 ± 3.1
795	12.0 ± 3.5	-0.2 ± 5.5	-18.2 ± 3.0
gsf2012a	-0.9 ± 2.3	6.0 ± 2.3	-4.9 ± 2.0
936	-1.0 ± 2.3	5.8 ± 2.3	-3.7 ± 2.0
opa2012a	-4.7 ± 2.1	10.8 ± 2.1	-10.0 ± 1.8
936	-5.0 ± 2.1	10.9 ± 2.1	-10.5 ± 1.8
sha2012b	-4.4 ± 2.2	2.3 ± 2.2	-5.2 ± 1.9
936	-4.4 ± 2.1	2.4 ± 2.2	-5.1 ± 1.9
usn2012a	-2.5 ± 2.6	10.5 ± 2.6	-6.5 ± 2.3
780	-2.9 ± 2.6	10.7 ± 2.6	-5.6 ± 2.3

и находится практически во всех случаях на уровне меньше 1σ , т.е. не является статистически значимой. В то же время использование полных корреляционных матриц оказывает существенное влияние на результаты. Разница в полученных значениях углов поворота может превышать $20 \mu\text{as}$ (табл. 2.6), что независимо подтверждает результаты [60], полученные на материале других каталогов. Можно также ожидать, что учет полной

Таблица 2.5: Параметры ориентации между индивидуальными системами отсчета и ICRF2 без учета корреляций (первая строка); с учетом корреляций RA/DE для обоих каталогов (вторая строка) и с учетом полной корреляционной матрицы для индивидуальных каталогов и двухдиагональной матрицы для ICRF2 (третья строка), мкс. дуги. Под именами каталогов приведено число общих источников в сравниваемых каталогах

Каталог	A1	A2	A3
gsf2011a	-9.2 ± 2.3	3.5 ± 2.3	2.2 ± 2.0
1171	-9.3 ± 2.3	3.7 ± 2.3	2.0 ± 1.9
	-4.4 ± 3.1	2.8 ± 3.1	0.3 ± 2.3
igg2012b	13.3 ± 3.0	11.3 ± 3.0	-1.1 ± 2.4
856	13.2 ± 3.0	11.5 ± 3.0	-0.8 ± 2.3
	2.6 ± 4.1	7.0 ± 4.3	-0.9 ± 2.4

Таблица 2.6: Параметры ориентации между индивидуальными системами отсчета без учета корреляций (первая строка) с учетом корреляций RA/DE для обоих каталогов (вторая строка) и с учетом полных корреляционных матриц для обоих каталогов (третья строка), мкс. дуги. Под именами каталогов приведено число общих источников в сравниваемых каталогах

Каталоги	A1	A2	A3
gsf2011a	-24.0 ± 2.1	-5.4 ± 2.2	6.0 ± 1.1
igg2012b	-23.9 ± 2.1	-5.2 ± 2.2	5.7 ± 1.1
854	-0.6 ± 2.5	3.4 ± 3.5	0.7 ± 1.2

корреляционной информации окажется существенным не только при определении взаимной ориентации систем отсчета, но и при разложении разностей координат в каталогах по ортогональным функциям. Это требует

отдельного большого исследования, которое предполагается сделать в дальнейшем.

Таким образом, представляется важным учитывать полную корреляционную информацию при сравнении каталогов положений радиоисточников. Разумеется, это возможно только в том случае, если все каталоги будут публиковаться с полной ковариационной матрицей.

Полученные выводы могут представлять интерес и для определения взаимной ориентации других систем отсчета, задаваемых каталогами положений небесных или земных объектов.

2.2. Систематические разности между РСДБ–каталогами.

Обычно исследование систематических разностей между каталогами проводится по некоторому набору опорных источников, выбор которых в той или иной степени влияет на окончательный результат.

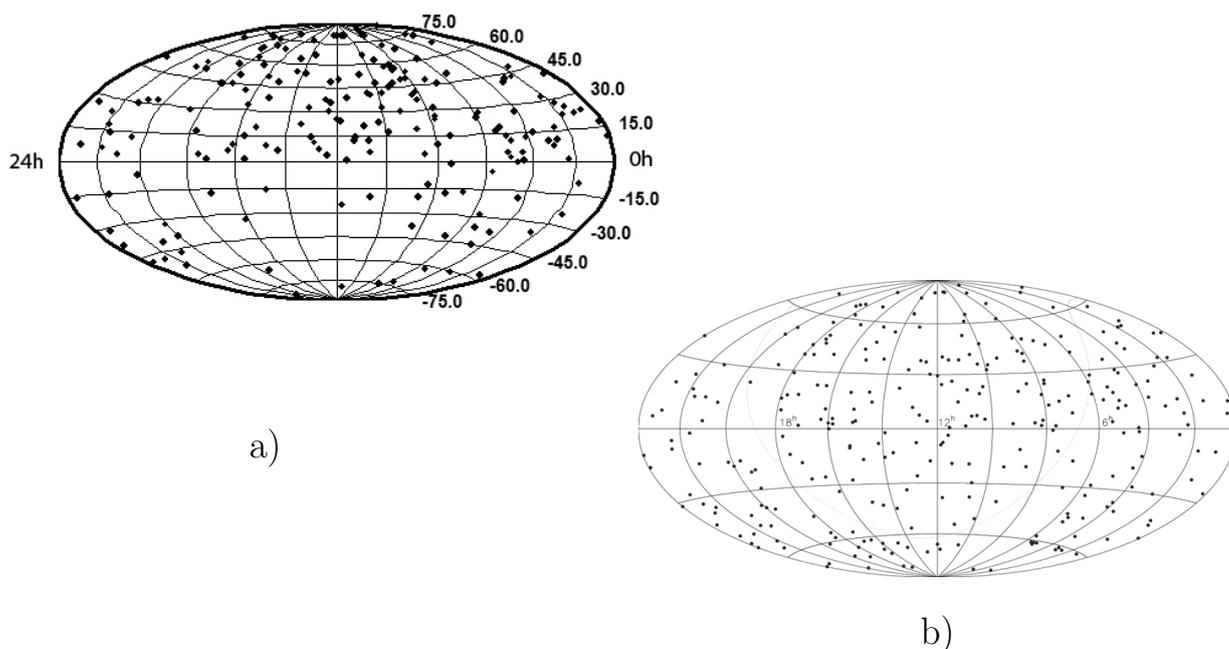


Рис. 2.5: Распределение общих опорных радиоисточников : а) 196 из списка Фейсель [71], б) 295 опорных (“defining“) [13]

В представленных в этой диссертации исследованиях в качестве такого набора опорных источников всегда выбирались общие источники, присутствующие во всех каталогах и имеющие не менее 15 наблюдений в не менее 2х сессиях. Наиболее часто в качестве опорных источников выступали общие источники для всех каталогов из группы “defining”. Так в исследовании каталогов 2005г и первой версии ICRF с дополнением Ext.2 был использован набор из 196 определяющих источников (список Фейсель [71], [16]), общих для всех индивидуальных каталогов, а в исследовании каталогов 2016 года — набор из 295 определяющих источников ICRF2 [13], также общих для всех индивидуальных каталогов. Распределение этих источников по небесной сфере показано на рис. 2.5. На рис. 2.6 – 2.7 приведены средние значения взвешенных среднеквадратические исходных разностей координат различных каталогов (*wrms*, *weighted root-mean square*), которые вычислялось по формуле:

$$wrms = \left(\frac{\varepsilon^T Q_w^{-1} \varepsilon}{e^T Q_w^{-1} e} \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

где e — вектор, составленный из единиц, Q_w — ковариационная матрица, ε — вектор остаточных невязок [53]. Ковариационная матрица Q_w может быть диагональной, если авторы каталога приводят только ошибки координат источников; двухдиагональной, если приводятся также корреляции между прямым восхождением и склонением каждого источника (наиболее часто используемый формат для центров IVS), или полной.

Из рис. 2.6 видно, что каталоги, полученные с использованием пакета CALC/SOLVE, имеют схожие и наименьшие отклонения в координатах источников от опорной системы ICRF Ext.2, что, скорее всего, объясняется тем, что оригинальная версия каталога ICRF Ext.2 была построена с использованием пакета CALC/SOLVE, наиболее

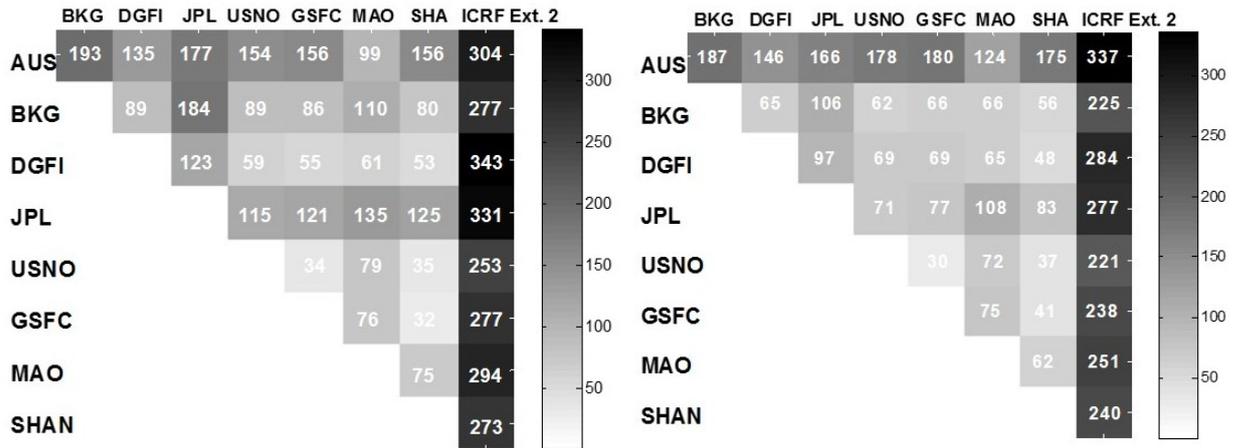


Рис. 2.6: wrms разностей между исходными каталогами по 196 общим опорным источникам в мкс.дуги. Слева — $\Delta\alpha$, справа — $\Delta\delta$ (по данным каталогов на 2005г. Табл. 1.4) (Sokolova Y., Malkin Z., 2007) [10]

популярного из современных пакетов обработки РСДБ-наблюдений. Большие отклонения каталогов AUS и DGFI, использующимися один пакет обработки OCCAM, могут быть обусловлены различиями в методе оценивания (AUS — среднеквадратическая коллокация; DGFI — метод наименьших квадратов), а также существенным различием в количестве обработанных наблюдений. Большие значения взвешенных wrms разностей всех представленных каталогов с ICRF Ext.2 свидетельствует о систематических различиях всех исходных каталогов с официальной системой [10]. Сглаженные исходные разности каталогов 2005г. и ICRF-Ext.2 совместно с аппроксимацией различными моделями представления систематических разностей приведены на рис. 2.16 в части 2.3. Похожая картина в случае сравнения индивидуальных реализаций CRF на 2012г. (рис. 2.7) [18]. Большие значения wrms разностей всех каталогов с ICRF2 свидетельствует о систематических различиях исходных каталогов с официальной системой ICRF2, из-за того что за 3 года с момента официального выхода ICRF2 было получено около 1.5 млн новых наблюдений, позволивших уточнить положения многих источников.

	BKG	CGS	GSFC	IGG	OPA	SHAN	USNO	ICRF 2
AUS	58.6	70.7	45.4	54.1	47.4	46.1	44.6	80.4
BKG		37.3	36.5	41.1	29.9	33.5	37.7	53.6
CGS			55.6	57.2	45.2	49.9	55.4	65.1
GSFC				38.2	21.2	17.4	16.4	48.3
IGG					38.4	37.5	37.3	49.6
OPA						17.8	21.5	44.8
SHAN							18.6	42.8
USNO								48.0

Рис. 2.7: wrms разностей между каталогами 2011 – 2012гг и ICRF2 в мкс.дуги.

2.2.1. Эволюция разностей координат каталогов и ICRF2

В данном разделе будет показана эволюция разностей координат каталогов с ICRF2 на примере каталогов центра GSFC, демонстрирующая возрастающую систематику по склонению, причины которой пока не ясны. Похожая картина наблюдается у всех рассмотренных каталогов центров РСДБ-анализа (рис. 2.9, рис. 2.10). На рис. 2.8 показана эволюция вида разностей GSFC и ICRF2 в одном масштабе. Для демонстрации исходных разностей проводилось их экспоненциальное весовое сглаживание/интерполяция (метод Гаусса) по сфере. В качестве весов брались случайные ошибки координат источников, представленных в каталогах.

Таблица 2.7 демонстрирует значительное возрастание wrms разностей каталогов GSFC с ICRF2. Основной рост систематических ошибок приходится на 2013 – 2014гг. На рис. 2.9 представлены разности $\Delta\delta$ для всех рассматриваемых каталогов 2016г. График демонстрирует заметное систематическое смещение до 300 мкс. дуги, особенно в южном полушарии. Однако, с чем связана возрастающая зональная систематика, пока не ясно.

Американскими коллегами высказывается предположение, что

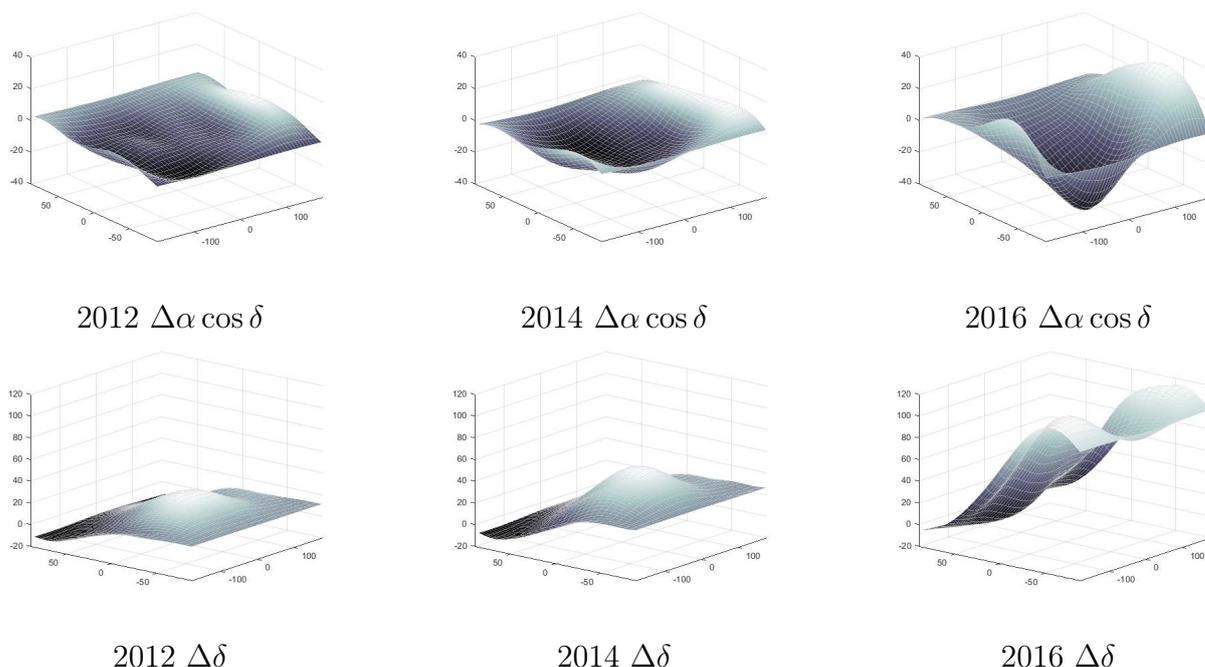


Рис. 2.8: Сглаженные исходные разности каталогов GSFC и ICRF2. $\Delta\alpha$ (вверху) и $\Delta\delta$ (внизу) в мкс. дуги.

данная систематика может быть связана с активными наблюдениями южных станций — Австрало–НовоЗеландской сети, начавшихся в 2013г. (часть 1.2.9). Исследование проведенное в центре GSFC показало, что при исключении наблюдений станций Kath12 или Hobb12 зональная систематика уменьшается, но не исчезает совсем [17].

Таблица 2.7: Wrms разностей каталогов GSFC–ICRF2 для 274 “defining“ источников, общих для всех разностей, ед.:мкс. дуги

Год	2011	2012	2014	2015	2016
wrms	48.02	50.10	57.02	75.03	82.00

В настоящее время, вопрос, вызвана ли данная систематика с плохой точностью определения координат в южном полушарии опорной ICRF2, или с геометрией сети или с инструментальными ошибками южных станций, или иной причиной пока открыт.

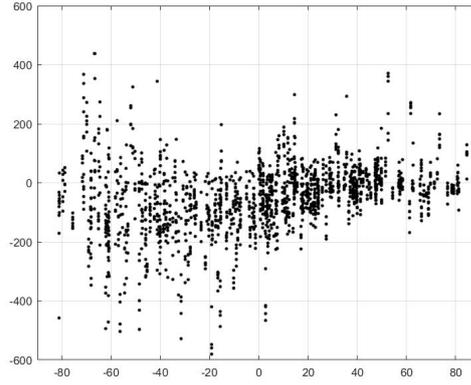
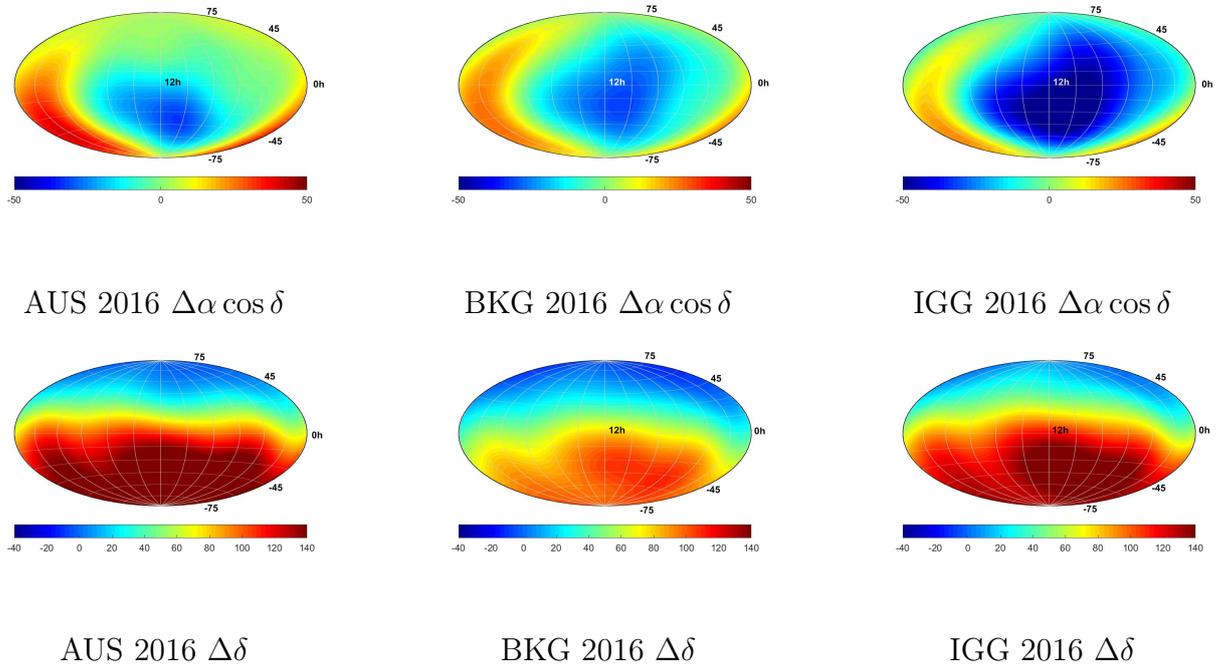


Рис. 2.9: Исходные разности всех каталогов 2016г. и ICRF2 по оси x — Склонение, по у — $\Delta\delta$ в мс. дуги

2.2.2. Разности координат каталогов 2016г.

На рис 2.10 представлены сглаженные по сфере исходные разности индивидуальных каталогов 2016г и ICRF2.



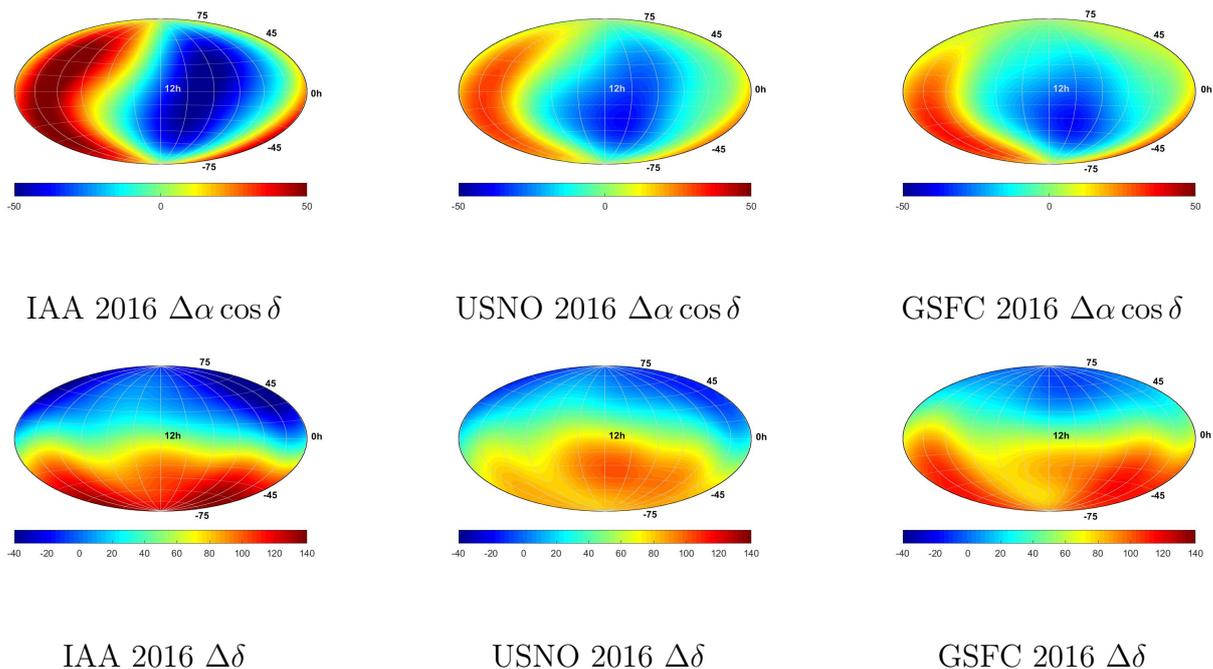


Рис. 2.10: Сглаженные по сфере исходные разности координат источников в каталогах 2016г. и ICRF2, ед. мкс.

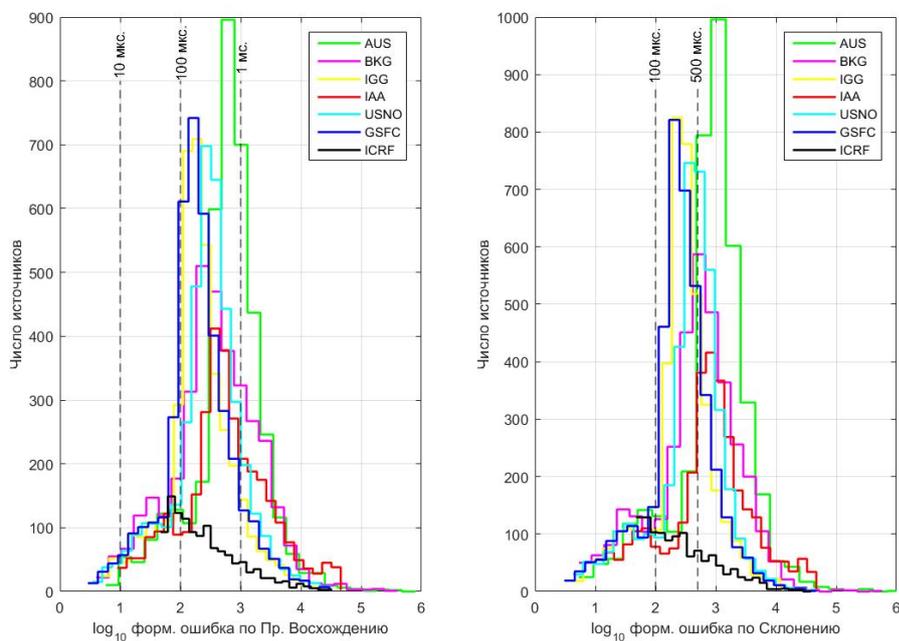


Рис. 2.11: Гистограммы распределения формальных ошибок по прямому восхождению (справа) и склонению (слева), ед. мкс. дуги.

На рис 2.11 представлены распределения формальных ошибок индивидуальных каталогов 2016г. Формальные ошибки у решений различных центров отличаются, что связано в первую очередь с выбором дополнительных условий (констрейнтов). И чем мягче используемые констрейнты тем больше формальные ошибки координат источников [54].

2.3. Применение моделей представления систематических разностей к РСДБ–каталогам.

Рис. 2.12 демонстрируют аппроксимации на примере систематических разностей некоторых каталогов 2016г. с ICRF2 с помощью модели IERS 3х, 4х и 6ти параметров соответственно (1.26), (1.28) и (1.27). Значения по горизонтальным осям — в градусах, по вертикальной оси — в мкс. дуги.

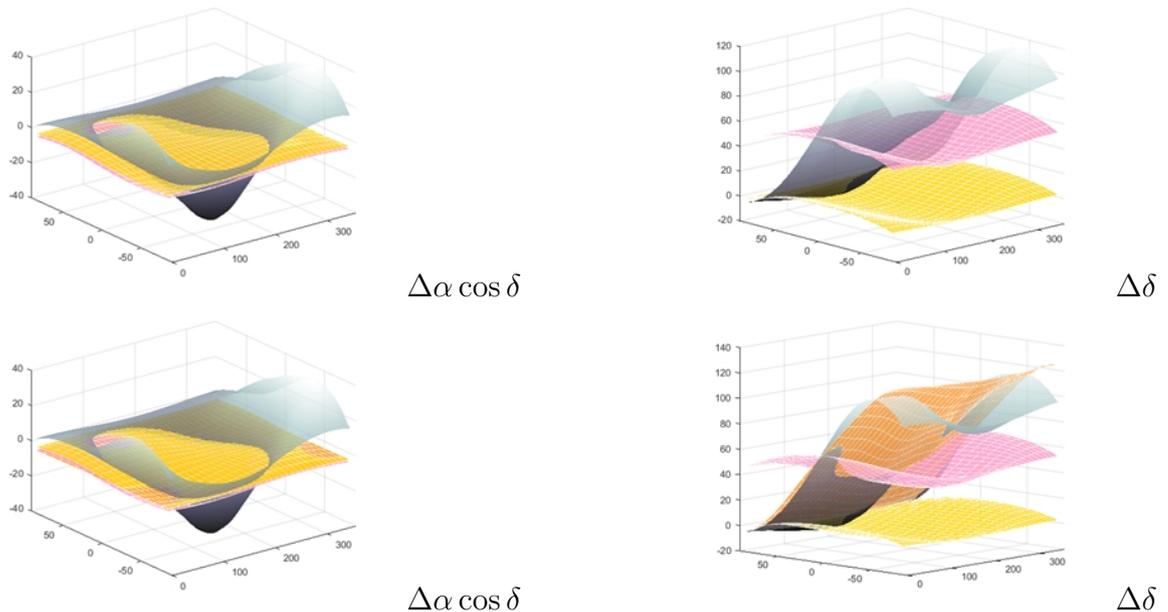


Рис. 2.12: Сглаженные разности каталога GSF(2016)-ICRF2 по 295 опорным источникам — серым, аппроксимация по модели (1.26) — желтым, (1.28) — розовым, (1.27) — оранжевым.

Данные результаты для каталогов 2016г. показывают, что из всех моделей, предложенных IERS наиболее точно аппроксимирует

систематические разности координат вида $\Delta\delta$ модель шести параметров (1.27), однако более сложную систематику даже для разностей вида $\Delta\delta$ модель (1.27) не способна представить на должном уровне. Систематику по $\Delta\alpha \cos \delta$ ни одна из моделей IERS оказалась не способна аппроксимировать на достаточном уровне.

Аппроксимация с помощью сферических функций модели Броше (1.10) при разном количестве членов разложения (g) показана на примере разностей каталогов GSFC(2016)–ICRF2 (рис. 2.13). На рис. 2.14 графически показана значимость коэффициентов разложения — $|b_j|/\sigma(b_j)$, позволяющая определить значимые сферические гармоники разложения для данных разностей.

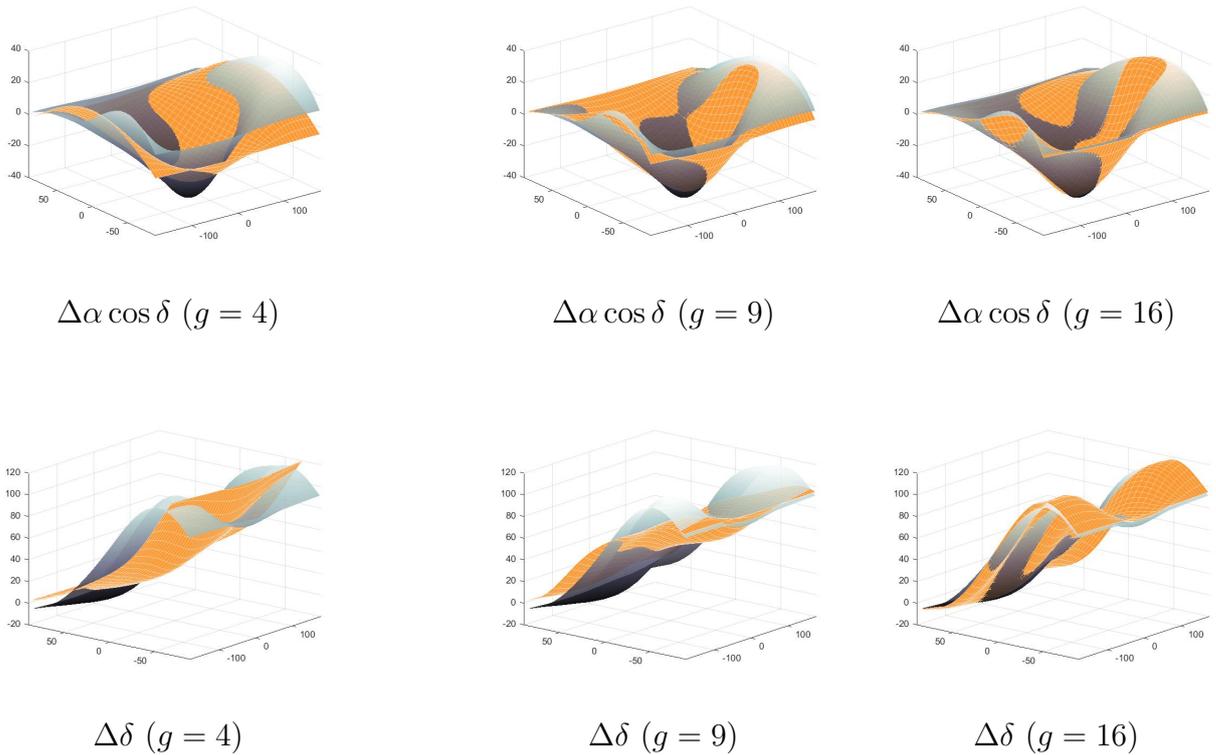


Рис. 2.13: Сглаженные разности каталогов GSFC 2016г. и ICRF2 по 295 опорным источникам — серым, аппроксимация сферическими функциями — оранжевым

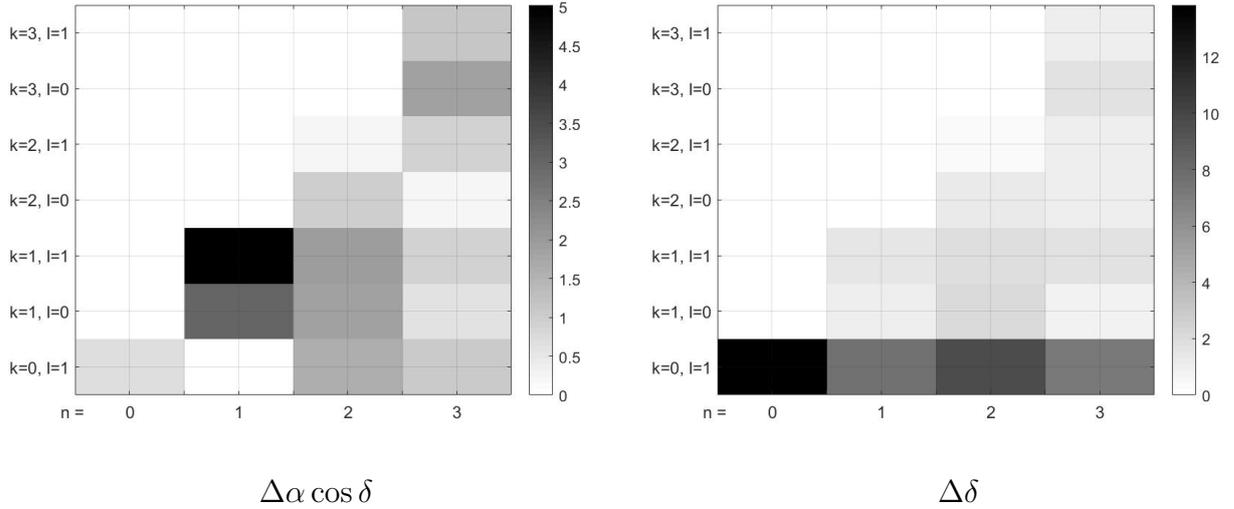


Рис. 2.14: Значимость коэффициентов b_j разложения по сферическим функциям при количестве членов разложения $g = 16$.

Из сравнения рис. 2.14 с таблицами 2.1, 2.2 можно сделать следующие ВЫВОДЫ:

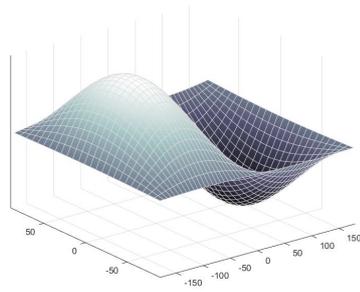
Разности $\Delta\alpha \cos \delta$ —

- самые мощные сферические гармоники при $[n = 1, k = 1, l = 0]$, $[n = 1, k = 1, l = 1]$ (тессеральные) не соответствуют углам вращения и не входят в модель 6ти постоянных;
- менее мощные гармоники в систематических разностях при $[n = 2, k = 0, l = 1]$, $[n = 2, k = 1, l = 0]$, $[k = 2, n = 1, l = 1]$ соответствуют углам вращения A_3, A_2, A_1 соответственно.

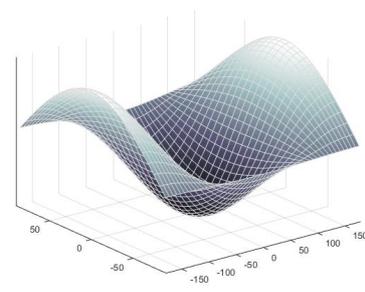
Разности $\Delta\delta$ —

- самая мощная гармоника при $[n = 0, k = 0, l = 1]$ (зональная), соответствующая сдвигу экваторов (B_δ);
- гармоники $[n = 1, k = 0, l = 1]$, $[n = 3, k = 0, l = 1]$ соответствуют параметру наклона (D_δ);
- очень мощная гармоника $[n = 2, k = 0, l = 1]$ — наклон, не имеет интерпретации в рамках модели 6 постоянных.

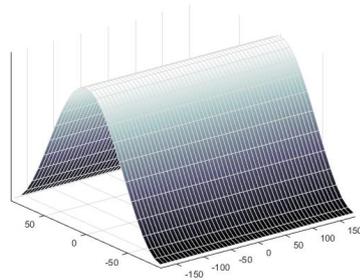
Графическое представление данных гармоник приведено на рис. 2.15.



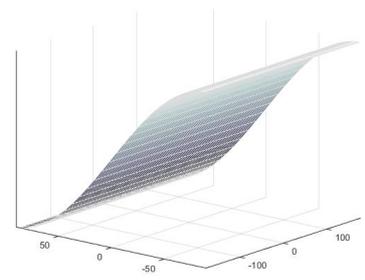
$$[k = 1, n = 1, l = 0]$$



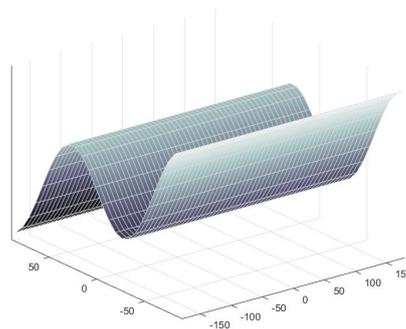
$$[k = 1, n = 1, l = 1]$$



$$[k = 0, n = 2, l = 1]$$



$$[k = 0, n = 1, l = 1]$$



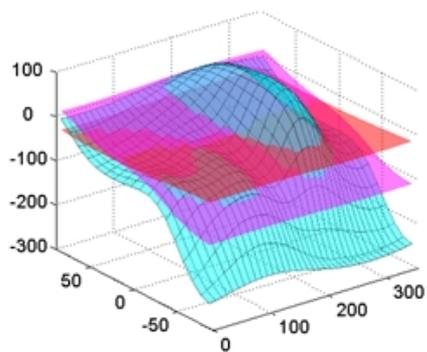
$$[k = 0, n = 3, l = 1]$$

Рис. 2.15: Основные сферические гармоники разложения для разностей GSFC(2016)–ICRF2.

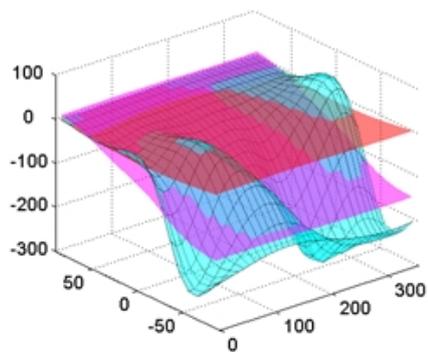
Рис. 2.16 демонстрируют аппроксимации систематических разностей индивидуальных каталогов 2005г. с ICRF-Ext.2 (черные линии) с помощью трех аналитических моделей (три поверхности) — (1.26), (1.27), (1.13). Значения по горизонтальным

-  - Исходные разности
-  - Модель вращения
-  - Вращение с деформацией
-  - Разложение по ортогональным функциям

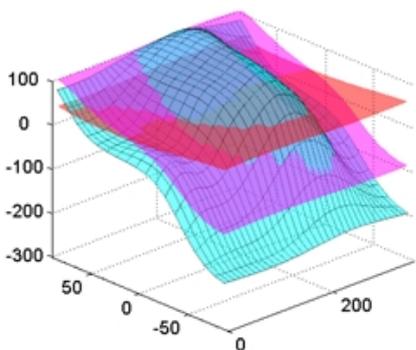
осям — в градусах, по вертикальной оси — в мкс. дуги. Слева приведены данные по $\Delta\alpha$, справа по $\Delta\delta$. Поверхности для модели Броше не приведены, поскольку они практически совпадают с моделью Лежандра-Фурье.



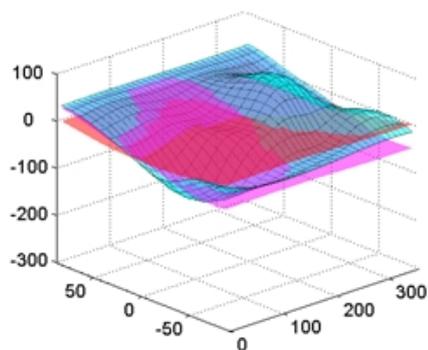
AUS $\Delta\alpha$



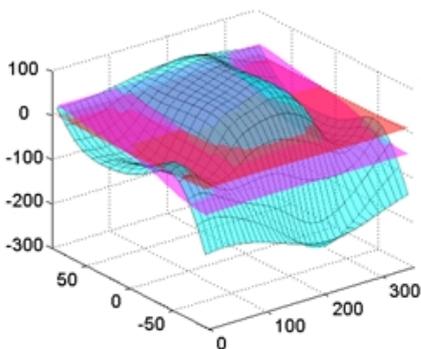
$\Delta\delta$



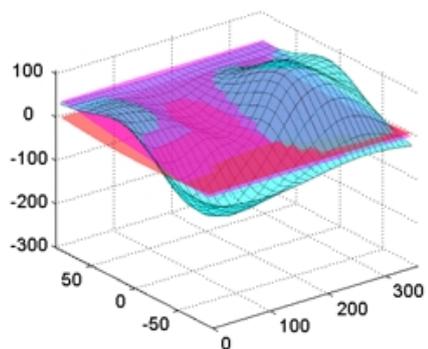
BKG $\Delta\alpha$



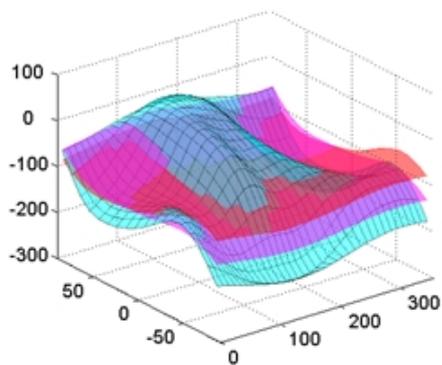
$\Delta\delta$



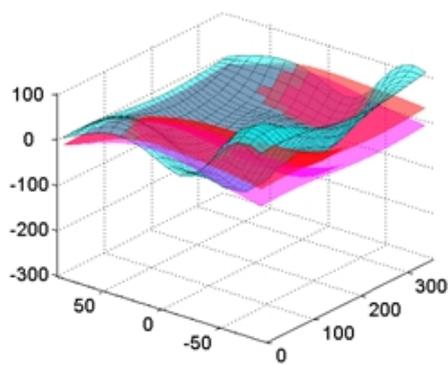
DGFI $\Delta\alpha$



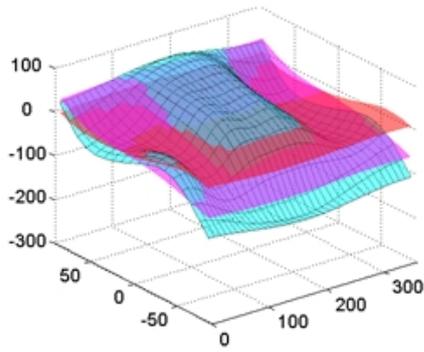
$\Delta\delta$



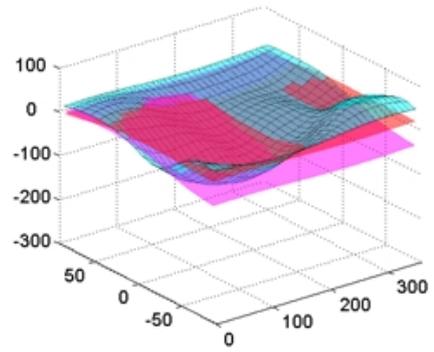
JPL $\Delta\alpha$



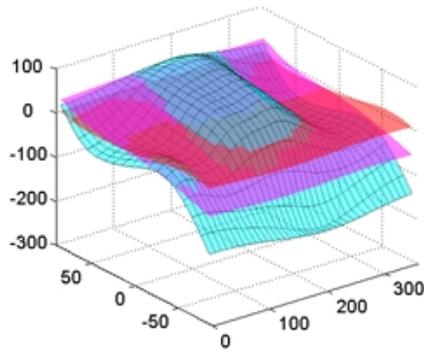
$\Delta\delta$



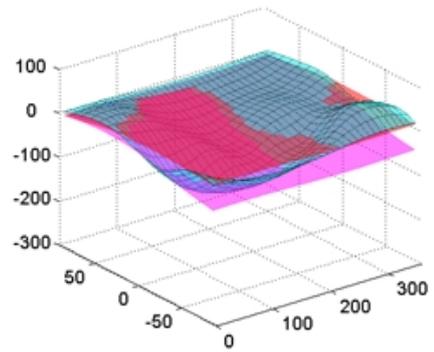
USNO $\Delta\alpha$



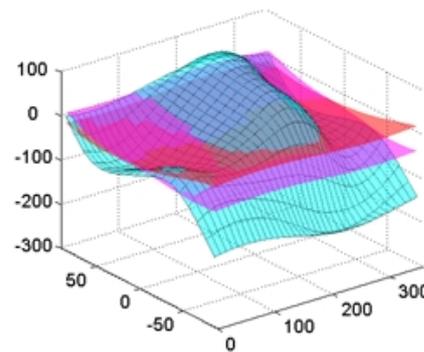
$\Delta\delta$



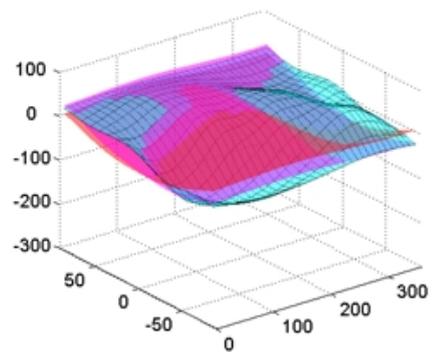
GSFC $\Delta\alpha$



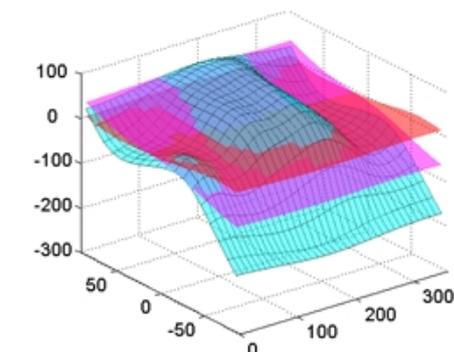
$\Delta\delta$



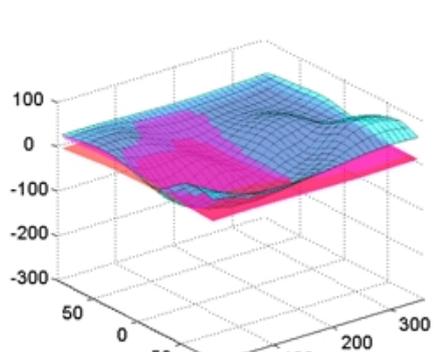
MAO $\Delta\alpha$



$\Delta\delta$



SHAN



$\Delta\delta$

$\Delta\alpha$

Рис. 2.16: Сглаженные разности каталогов 2005г.–ICRF Ext.2 по 196 опорным источникам.

Таблица 2.8: Wrms для 196 общих источников каталогов 2005г. и ICRF Ext.2 до и после аппроксимации в мкс. дуги.

$\Delta\alpha$	AUS	BKG	DGFI	JPL	USNO	GSFC	MAO	SHA
Исходные	304	277	343	331	253	277	294	273
Вращение	301	271	342	308	249	274	286	271
Вращение с деформацией	299	265	342	308	247	273	285	270
Броше	170	177	237	238	172	191	203	193
Лежандр - Фурье	110	127	167	174	124	146	156	147
$\Delta\delta$								
Исходные	337	225	284	277	221	238	251	240
Вращение	337	225	284	273	221	238	251	240
Вращение с деформацией	333	224	283	273	221	237	251	239
Броше	180	159	178	182	152	158	169	166
Лежандр - Фурье	111	115	116	131	109	111	136	117

В таблице 2.8 приведены взвешенные среднеквадратические значения разностей (2.9) между используемыми в данной работе индивидуальными каталогами 2005г. и официально принятой версии ICRF на время исследования — ICRF Ext.2 (первая строка каждой секции таблицы) и остаточных разностей после исключения систематических ошибок, определенных указанными моделями: «Вращение» (1.26), Модель «Вращение с деформацией» (1.27), «Броше» — разложение по сферическим функциям (1.10), «Лежандр–Фурье» — разложение по функциям Лежандра–Фурье (1.13). Подобное исследование с введенными модификациями было повторено для каталогов 2012г. [18] и 2016г.

Рис. 2.17 демонстрируют аппроксимации систематических разностей индивидуальных каталогов 2016г. с ICRF2 (черные линии) с помощью трех аналитических моделей (три поверхности) — (1.26), (1.27), (1.10).

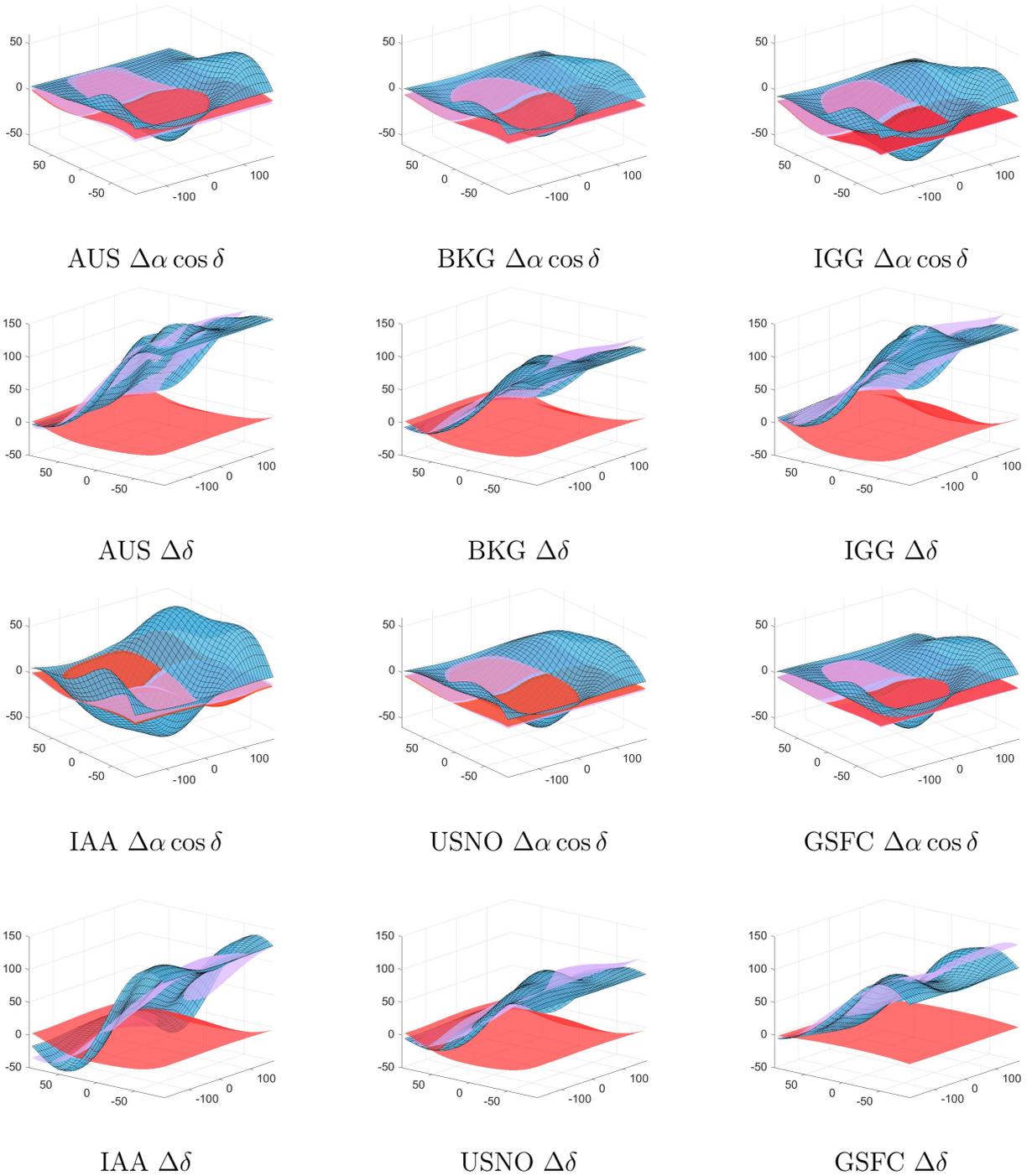
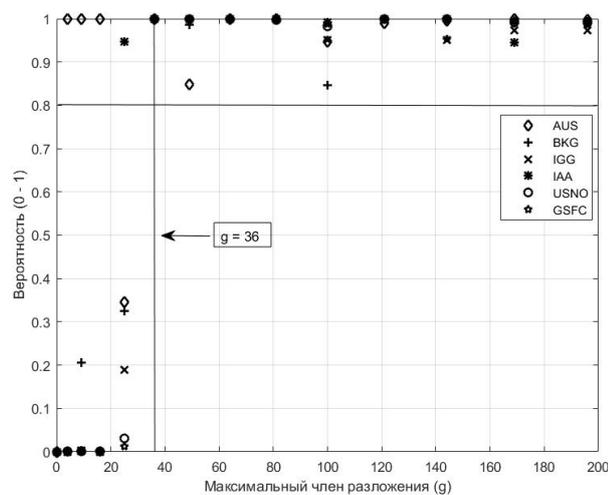
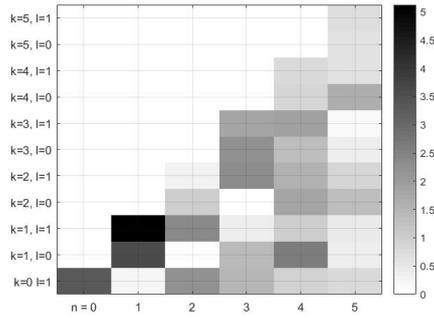


Рис. 2.17: Аппроксимация систематических разностей каталогов 2016г. с ICRF2 (черные линии) тремя аналитическими моделями (1.26) — красным, (1.27) — розовым, (1.10) — голубым. По 295 опорным источникам. Значения по горизонтальным осям — в градусах, по вертикальным — мкс. дуги.

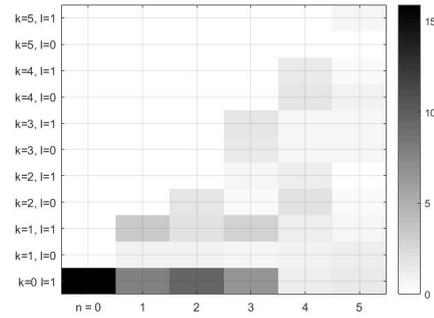
Для определения максимального члена разложения разностей координат радиосисточников мы использовали статистический критерий

Фишера (часть 1.1.4). В данной работе применялся способ проверки гипотез с помощью р-значения $p(F)$ — вероятностью того, что случайная величина с данным распределением Фишера превысит данное критическое значение статистики. Если $p(F)$ меньше уровня значимости α , то нулевая гипотеза отвергается (разложение по $n + 1$ членам статистически имеет место быть), в противном случае принимается. Так для всех каталогов максимальный член разложения был взят, равный 36ти членам разложения (рис. 2.18).

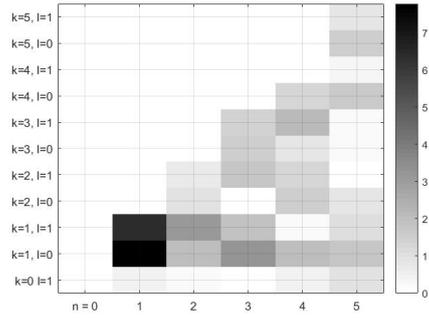




IGG



IAA



GSGC

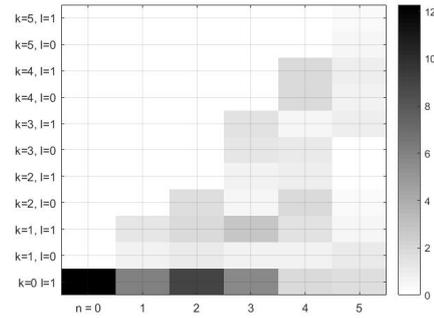
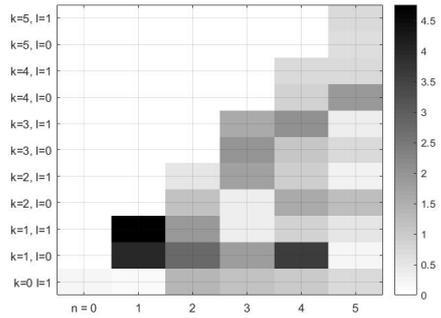
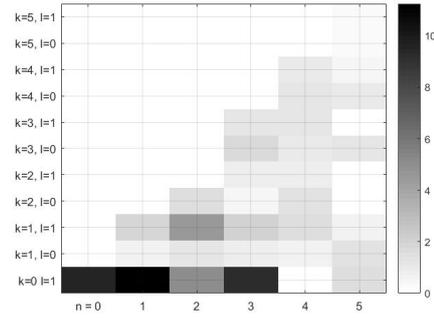


Рис. 2.19: Значимость коэффициентов b_j разложения по сферическим функциям при количестве членов разложения $g = 36$. $\Delta\alpha \cos \delta$ (слева) и $\Delta\delta$ (справа)

Видно, что основные общие гармоники для всех каталогов по 36 членам разложению по $\Delta\alpha \cos \delta$ тессеральные при $[n = 1, k = 1, l = 0]$, $[n = 1, k = 1, l = 1]$. Из сравнения рис. 2.19 с таблицами 2.1, 2.2 можно сделать следующие выводы:

Для разностей по $\Delta\alpha \cos \delta$ —

- самые мощные сферические гармоники при $[n = 1, k = 1, l = 0]$, $[n = 1, k = 1, l = 1]$ не соответствуют углам вращения и не входят в модели IERS;

- Для разностей каталога IGG(2016)–ICRF2 дополнительно определилась гармоника при $[n = 0, k = 0, l = 1]$, представляющая угол поворота A_3 .
- Для разностей каталога GSFC(2016)–ICRF2 присутствуют так же мощные гармоники $[n = 4, k = 1, l = 0]$ и $[n = 2, k = 1, l = 0]$, представляющие угол поворота A_2 .
- менее мощные гармоники в систематических разностях, определившиеся для разных каталогов при $[n = 2, k = 0, l = 1]$, $[n = 2, k = 1, l = 0]$, $[n = 2, k = 2, l = 1]$ соответствуют углам вращения A_3, A_2, A_1 соответственно.

Для разностей $\Delta\delta$ — преобладают зональные гармоники,

- самая мощная гармоника при $[n = 0, k = 0, l = 1]$ соответствует сдвигу (B_δ);
- гармоники $[n = 1, k = 0, l = 1]$, $[n = 3, k = 0, l = 1]$ соответствуют параметру наклона (D_δ);
- мощная гармоника $[n = 2, k = 0, l = 1]$ — наклон, не имеющий интерпретации в рамках моделей IERS.

Графическое представление данных гармоник было приведено выше на рис. 2.15.

Остаточные невязки аппроксимации на примере каталогов 2016г. IGG, IAA, GSFC приведены на рис. 2.20.



IGG

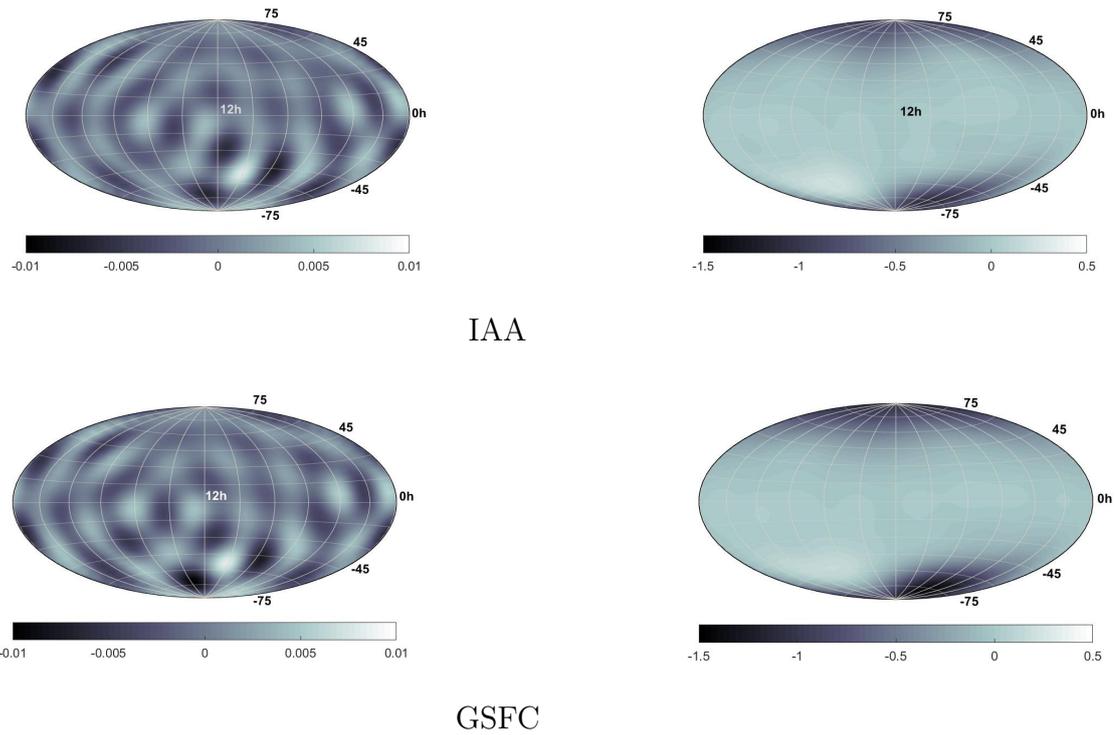


Рис. 2.20: Сглаженные остаточные невязки аппроксимации с помощью сферических функций с максимальным членом разложения $(g)=36$ ед.: мкс. дуги. ($\Delta\alpha \cos \delta$ (слева) и $\Delta\delta$ (справа))

Таблица 2.9: w_{rms} разностей по 295 общим источникам каталогов 2016г. и ICRF2 до (исходные) и после аппроксимации тремя моделями IERS: (1.26, 1.28, 1.27) и с помощью разложения по сф. функциям (1.10) соответственно.

Модель	AUS	BKG	IGG	IAA	USNO	GSFC
Исходные	107.03	81.6	98.8	89.5	79.9	82.6
Вращение	106.47	80.7	96.1	87.1	78.7	82.3
Вращение с деформацией (4)	96.54	75.6	84.7	85.4	74.5	76.0
Вращение с деформацией (6)	86.15	69.6	76.4	76.8	69.6	70.5
Сф.функции	71.26	63.2	67.6	62.5	61.8	62.5

Из проведенного анализа методов представления систематических разностей для РСДБ–каталогов координат источников, оптимальным видится метод разложения по сферическим функциям (1.10), описанный в главе 1, часть 1.1.2 [20].

Глава 3. Улучшение ICRF в случайном и систематическом отношении.

В предыдущих главах обсуждалось, что официальная версия ICRF и каталоги, предоставляемые различными центрами анализа РСДБ-наблюдений, строятся разными пакетами программ по одним и тем же наблюдениям. Хотя при вычислении этих каталогов применяется ограничение на привязку к ICRF (к осям), каждый индивидуальный РСДБ-каталог является своей собственной системой отсчета, обладающей своим собственным набором случайных и систематических ошибок, связанных с особенностями программных систем, различными моделями применяемых редуций, выбранной стратегией обработки и т.д. Для ослабления влияния этих ошибок целесообразно построение сводного каталога.

3.1. Улучшение ICRF в случайном отношении. Пулковские каталоги PulC01.

После выбора оптимального метода представления систематических разностей проводится улучшение опорной системы отсчета в случайном отношении. Для этого все исходные каталоги должны быть приведены к единой опорной системе по следующей формуле:

$$CRF_k \xrightarrow{\sum_{j=0}^g b_j^k Y_j^k} CRF_k^{ICRF}. \quad (3.1)$$

где CRF_k — исходная (индивидуальная) реализация CRF, CRF_k^{ICRF} — данная реализация в опорной системе ICRF, актуальная на время исследования.

Систематические разности между каждым исходным каталогом и ICRF вычислялись по общим опорным источникам группы “defining“ (196

общих источников каталогов 2005г. и ICRF Ext.2 [10]; 274 общих источников каталогов 2011–2012гг. и ICRF2 [18], 295 общих каталогов 2016г. и ICRF2). Условием включения источника в сводный каталог было присутствие как минимум в двух индивидуальных каталогах.

Полученная система Y^k использовалась для приведения в систему ICRF всех источников исходного каталога. Отметим также, что в целях последующего нахождения средней системы использовалось одно и то же число членов разложения (g) для всех индивидуальных каталогов CRF_k .

Следующий этап вычисление средневзвешенной системы координат источников в опорной системе $f(\alpha, \delta)^{c1}$:

$$\alpha_i^{c1} = \frac{\sum_k \alpha_i^k P_{\alpha i}^k}{\sum_k P_{\alpha i}^k}, \quad \delta_i^{c1} = \frac{\sum_k \delta_i^k P_{\delta i}^k}{\sum_k P_{\delta i}^k} \quad (3.2)$$

где α, δ — приведенные координаты каталога в опорную систему по выбранному методу, $P_{\alpha i}^k, P_{\delta i}^k$ — веса координат i — источника в k -ом индивидуальном каталоге.

Полученные таким образом каталоги являются средневзвешенной системой индивидуальных каталогов в опорной системе отсчета.

Каталог Pul(2007)C01 состоял из 968 радиоисточников, 196 из которых относились к группе “defining“ и воспроизводил систему ICRF на уровне 10 мкс. дуги. На рис. 3.1 показано что, разности между сводным решением и индивидуальными каталогами в 2.5 раза меньше, чем между сводным решением и официальной опорной системой 2007г. (ICRF Ext.2), что говорит о том, что данная опорная система отсчета была отягощена значительными систематическими ошибками и подвержена сильному «устареванию» по сравнению с её современными индивидуальными реализациями, т.е. требовала незамедлительного пересмотра [10], что и было сделано в 2009 году (часть 1.2.8).

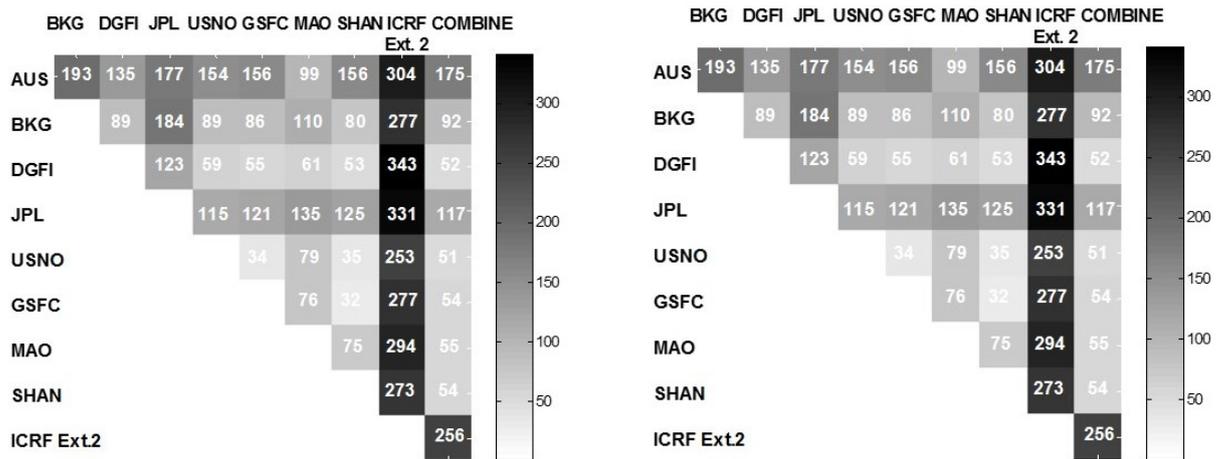


Рис. 3.1: wrms разностей между исходными каталогами, приведенными к системе ICRF Ext.2 и сводным каталогом в системе ICRF Ext.2 для 196 общих источников (Слева $\Delta\alpha$, справа $\Delta\delta$), в мкс.дуги (Sokolova Y., Malkin Z., 2007) [10].

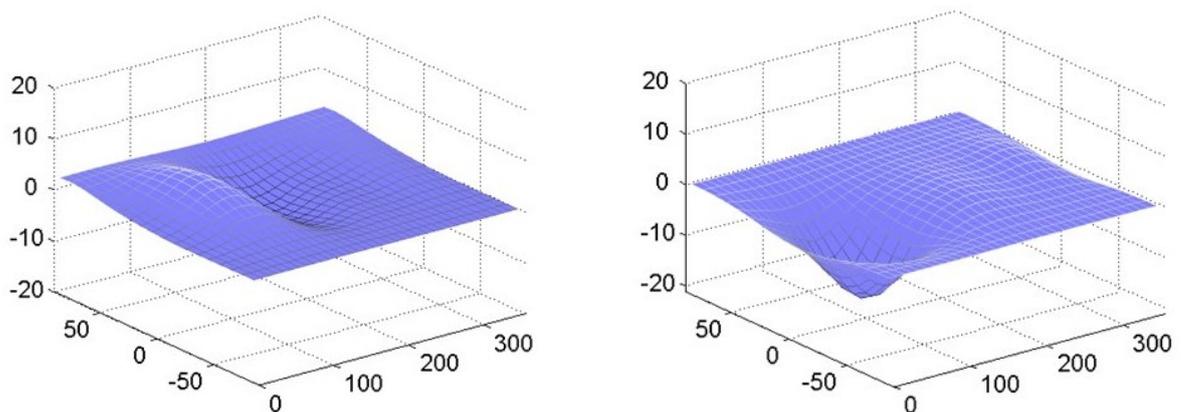


Рис. 3.2: Сглаженные разности между Pul(2007)C01 и ICRF Ext.2, по 196 опорным источникам (Слева $\Delta\alpha$, справа $\Delta\delta$), в мкс.дуги (Sokolova Y., Malkin Z., 2007) [10].

В 2013 году сводный каталог Pul(2013) был получен на основе анализа и комбинации восьми РСДБ–каталогов 2012–2013гг. различных центров РСДБ–анализа, и включал в себя координаты 2793 радиоисточников. Для его вычисления были исследованы и использованы методы построения сводных каталогов. Вследствие малости полученных углов вращения, в качестве наилучшего метода представления систематических разностей был выбран метод Броше [20]. Сравнение сводного каталога Pul(2013)

с ICRF2 показало, что на 2013 год ICRF2 уже обладало значимыми систематическими ошибками на уровне 15–20 мкс дуги. Наиболее вероятной причиной этих ошибок могли быть недостаточно надежные наблюдения ряда радиоисточников на момент составления ICRF2 (за 3 года, прошедших с 2009 года, было получено около 1.5 млн новых наблюдений, которые позволили уточнить положения многих источников) [18].

В 2017г. был получен новый сводный каталог Pul(2016)C01:

- Использованные каталоги центров IVS — AUS, BKG, IGG, IAA, USNO, GSFC (2016).
- Метод представления систематических разностей — разложение по сферическим функциям с числом разложения $g = 36$, согласно критерию Фишера. Коэффициенты разложения получены по 295 “defining” источникам.
- Критерий включения источников — более, чем в двух каталогах. Каталог включает в себя 4165 радиоисточника, 295 из которых “defining”. Распределение источников каталога приведено на Рис. 3.3.
- Ошибки в сводном каталоге — комбинированные по исходным каталогам. Распределение формальных ошибок приведено на Рис. 3.4
- Число наблюдений/сессий — наибольшее из всех входящих каталогов. Распределение наблюдений приведено на Рис. 3.5, рис. 3.6.

На рис. 3.7 представлены сглаженные разности каталогов, приведенные в систему ICRF2, и сводного каталога Pul(2016)C01. На рис. 3.8 — сглаженные разности ICRF2 и сводного каталога Pul(2016)C01.

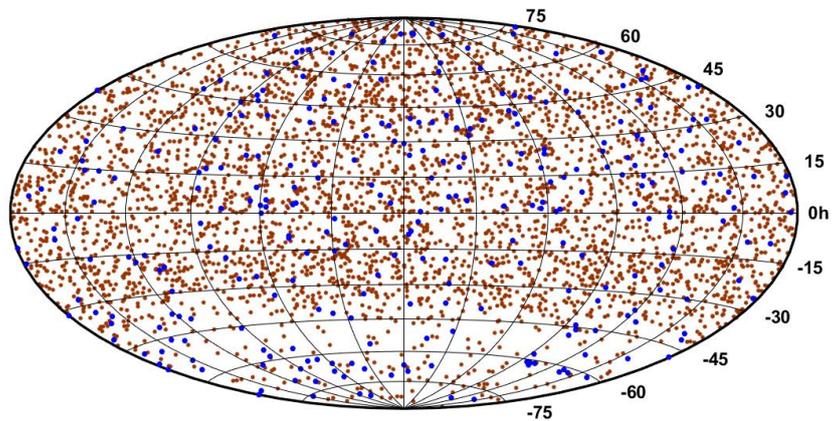


Рис. 3.3: Распределение 4165 источников каталога Pul(2016) по сфере, синим — 212 “defining”

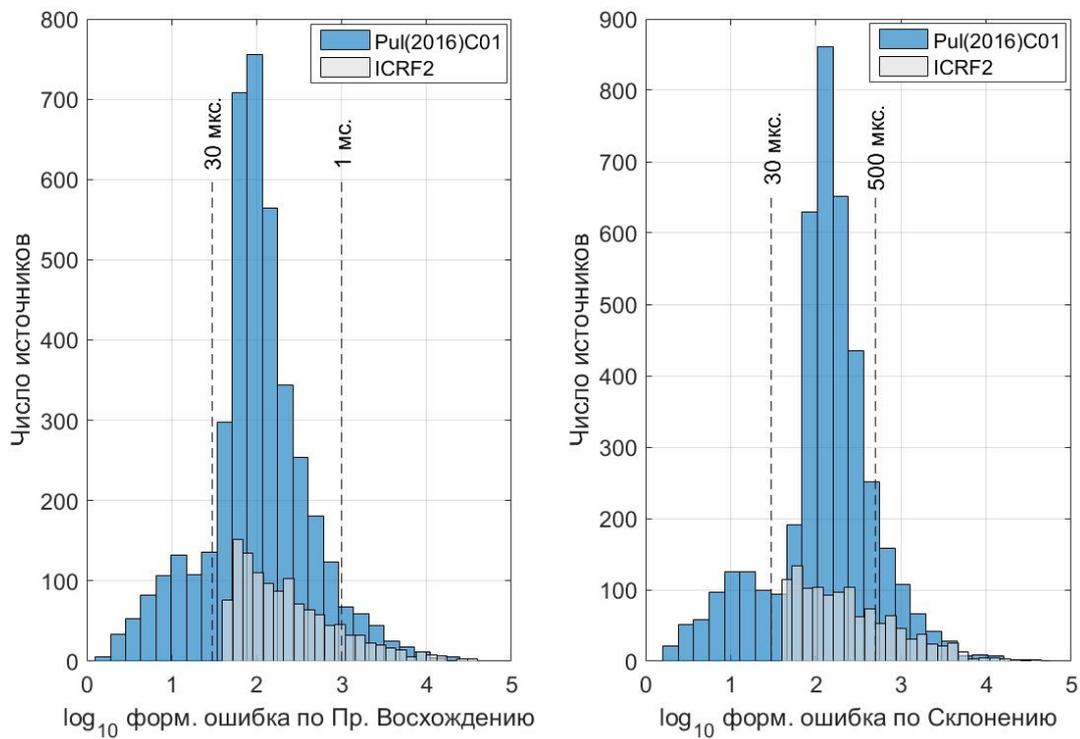


Рис. 3.4: Гистограмма распределения формальных ошибок каталога Pul(2016) — синим, ICRF2 — серым.

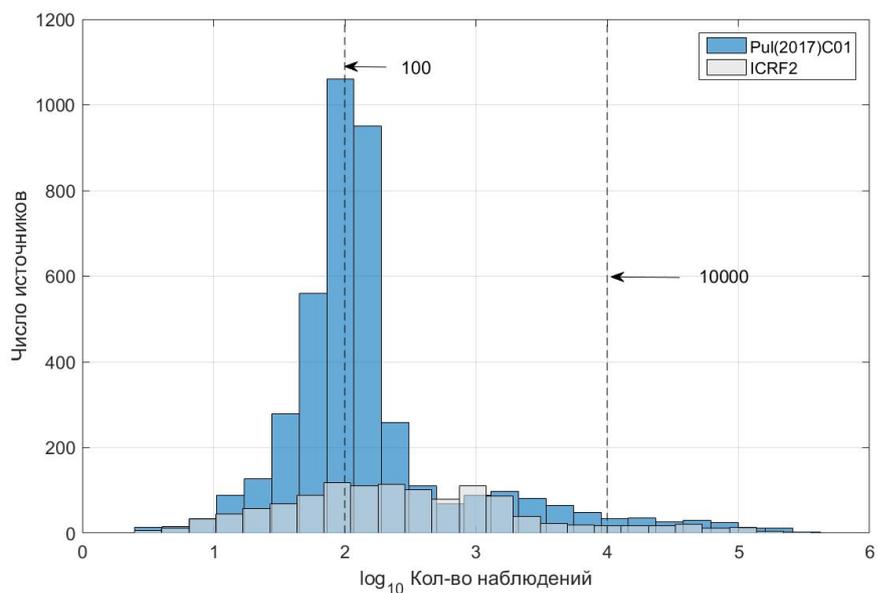


Рис. 3.5: Гистограмма распределение количества наблюдений каталога Pul(2016) — синим, ICRF2 — серым.

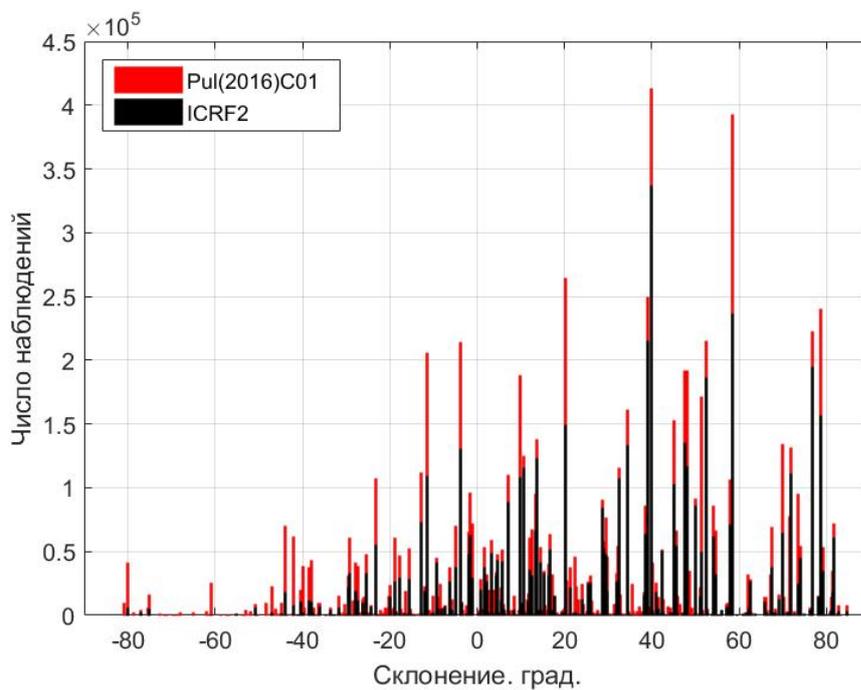


Рис. 3.6: Распределение количества наблюдений каталога по склонению Pul(2016) — красным, ICRF2 — черным.

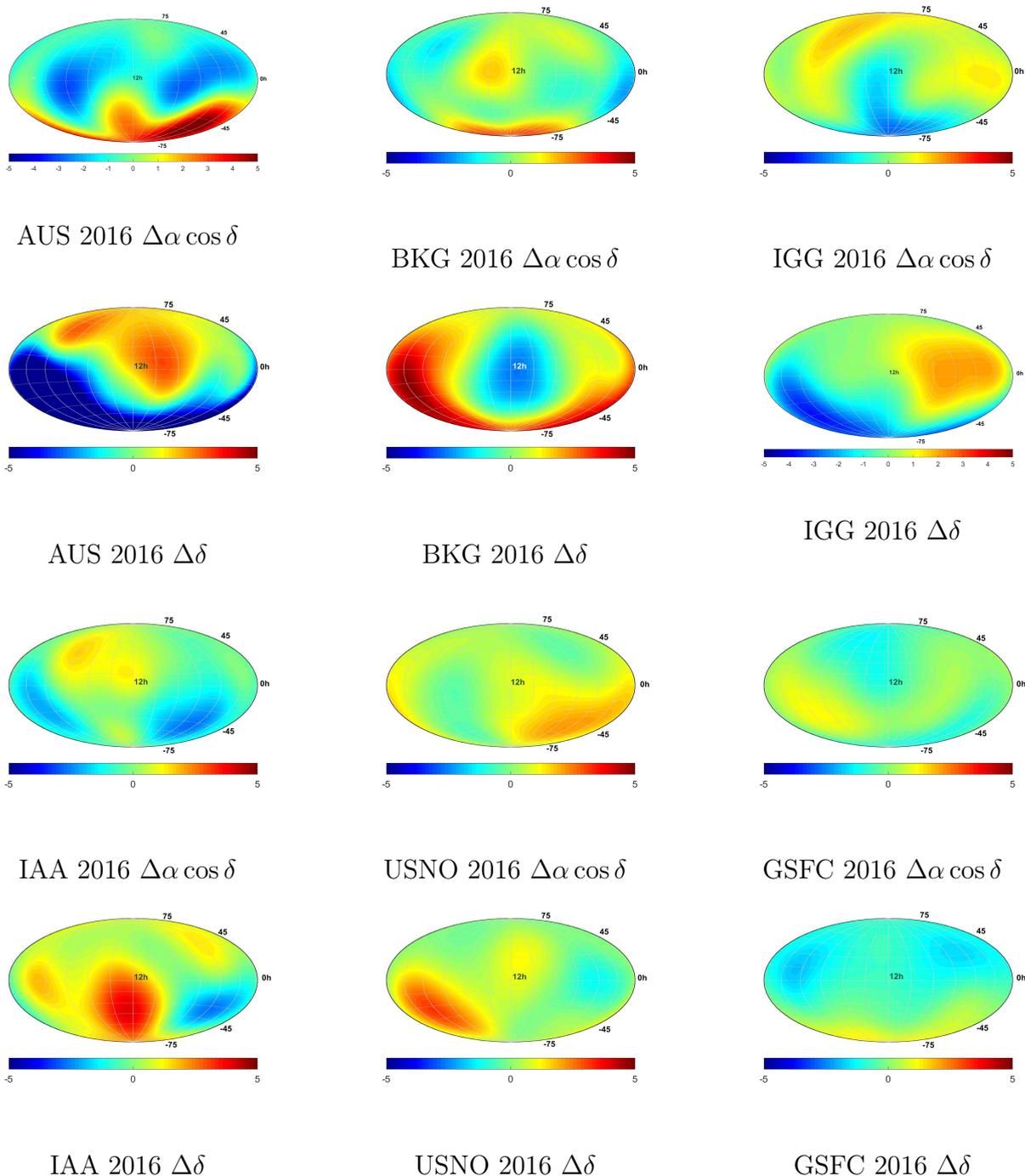


Рис. 3.7: Сглаженные по сфере разности координат каталогов в системе ICRF2 и Pul(2016)C01, ед. мкс.

3.2. Улучшение ICRF в систематическом отношении. Пулковские каталоги PulC02

Завершающий шаг в построении сводного каталога — улучшение опорной системы (ICRF/ICRF2) в систематическом отношении. Для

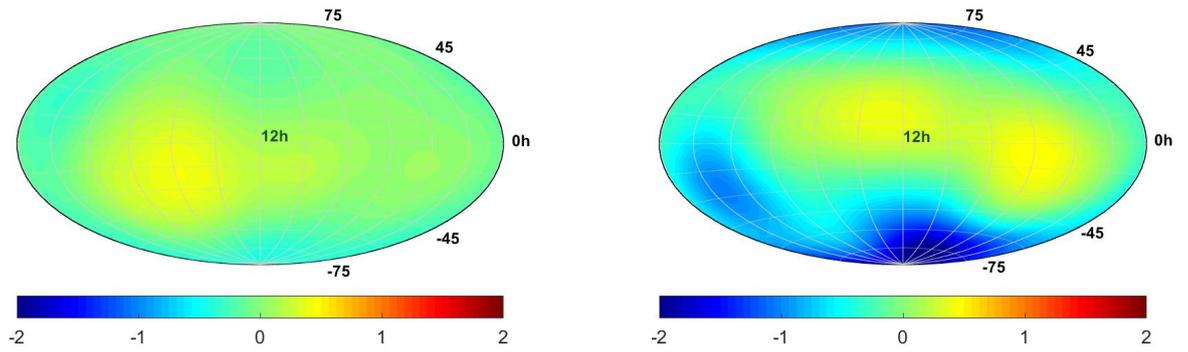


Рис. 3.8: Сглаженные по сфере разности координат источников Pul(2016)C01 и ICRF2 ($\Delta\alpha \cos \delta$ — слева и $\Delta\delta$ — справа), ед. мкс. дуги

этого была вычислена средняя система из аппроксимирующих функций по выбранному методу представления систематических разностей, для каждого каталога. На первом шаге используется следующая формула:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\alpha'_i \\ \Delta\delta'_i \end{Bmatrix} = \frac{1}{M} \sum_m \sum_j b_j^{im} K_j^{im}(\alpha_i^m, \delta_i^m) \quad (3.3)$$

Построенная таким образом система сравнивалась с индивидуальными системами на сетке $10^\circ(\alpha)$ на $5^\circ(\delta)$, определялось среднеквадратическое отклонение (RMS) каждой индивидуальной системы от средней. Полученные значения RMS определяли вес каждого из индивидуальных каталогов для последующей итерации. Окончательные веса каталогов, усредненные по небесной сфере, приведены в табл. 3.1 и табл. 3.2. Такое усреднение приведено только для иллюстрации, так как при построении сводного каталога для различных ячеек использовались свои веса, которые, как правило, близки между собой для каждого исходного каталога.

Таблица 3.1: Усредненные веса индивидуальных каталогов при построении сводной системы 2005г.

Каталог	AUS	BKG	DGFI	GSFC	JPL	MAO	SHAN	USNO
Вес по α	0.271	0.713	0.485	2.073	0.215	0.588	1.104	2.160
Вес по δ	0.277	1.073	0.617	1.854	0.500	0.641	1.560	1.870

Таблица 3.2: Усредненные веса индивидуальных каталогов при построении сводной системы 2016г.

Каталог	AUS	BKG	IGG	IAA	USNO	GSFC
Вес по α	0.51	0.78	0.59	0.40	1.00	0.78
Вес по δ	0.48	1.00	0.74	0.55	0.77	0.77

На второй итерации, определив веса на сетках в первой итерации, вычисляется взвешенная средняя система аппроксимирующих функций $\{\Delta\alpha_i'', \Delta\delta_i''\}$. Далее, полученная взвешенная средняя система добавляется к сводному каталогу в системе ICRF/ICRF2.

$$\begin{aligned}\alpha_i^{c2} &= \alpha_i^{c1} + \Delta\alpha_i'', \\ \delta_i^{c2} &= \delta_i^{c1} + \Delta\delta_i''.\end{aligned}\tag{3.4}$$

Результатом (3.4) является окончательный каталог версии PULC02, полученный из каталога версии PULC01 путем учета средней системы исходных каталогов. Таким образом, каталог PULC02 является уточнением опорной системы отсчета (ICRF/ICRF2) как в случайном, так и в систематическом отношении.

На рис. 3.9 приведены Wrms разностей между исходными каталогами и сводным каталогом Pul(2007)C02 для 196 общих источников. Сравнение полученного сводного каталога с каталогом ICRF Ext.2 в систематическом отношении показано на рис. 3.10. Сравнение Pul(2007)C02 с исходными каталогами показано на рис. 3.11.

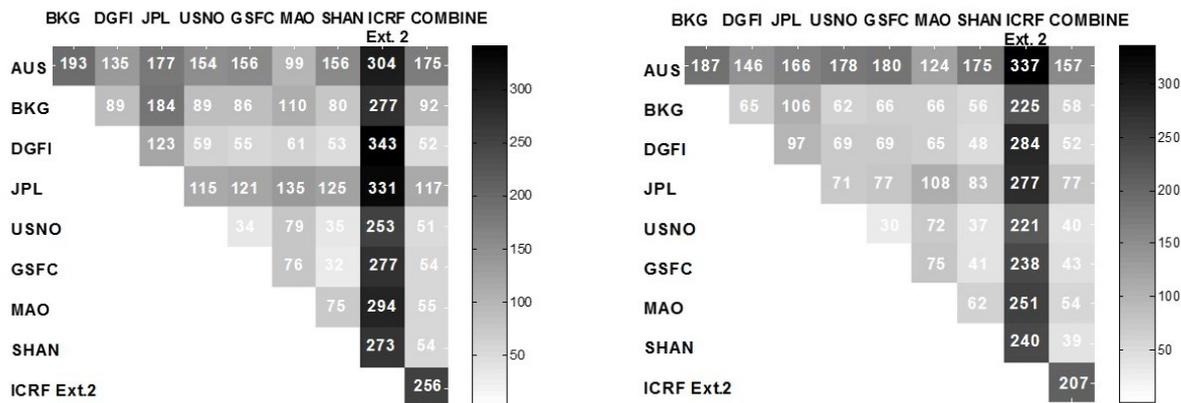


Рис. 3.9: wgmс разностей между исходными каталогами и сводным каталогом Pul(2007)C02 для 196 общих источников (Слева $\Delta\alpha$, справа $\Delta\delta$), в мкс.дуги (Sokolova Y., Malkin Z., 2007) [10].

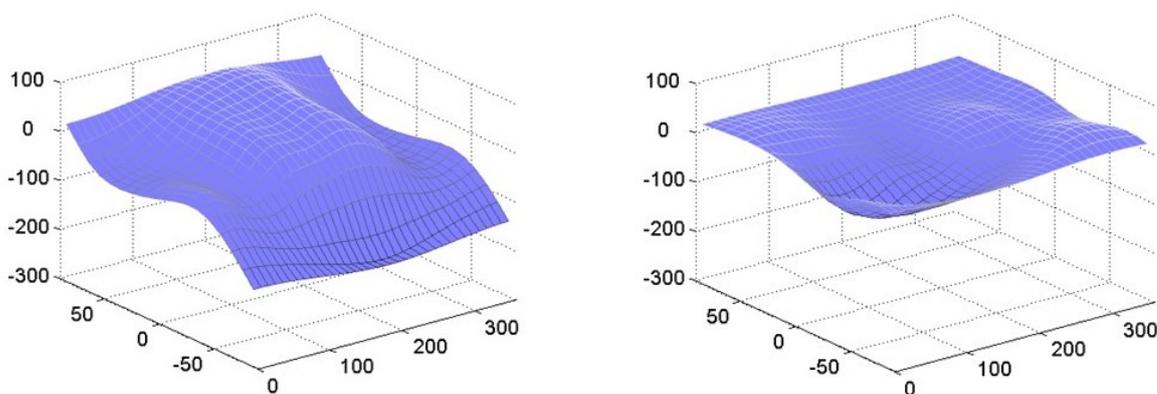


Рис. 3.10: Сглаженные разности между Pul(2007)C02 и ICRF Ext.2, по 196 опорным источникам (Слева $\Delta\alpha$, справа $\Delta\delta$), в мс.дуги (Sokolova Y., Malkin Z., 2007) [10].

Результаты сравнения показывают, что каталог ICRF Ext.2, который являлся последней реализацией ICRF на 2005 год [64], не лишен значительных систематических ошибок.

В рамках проекта ICRF2, два IVS центра проводили исследования по построению сводного решения: центр ГАО РАН (Соколова, Малкин) и УН РАН (Яцкив, Курьянова). В таблице 3.3 приведены параметры модели (1.27) между сводными решениями ГАО РАН [10] и УН РАН (2005г.) [74], которые свидетельствуют, что эти решения находятся практически в единой системе.

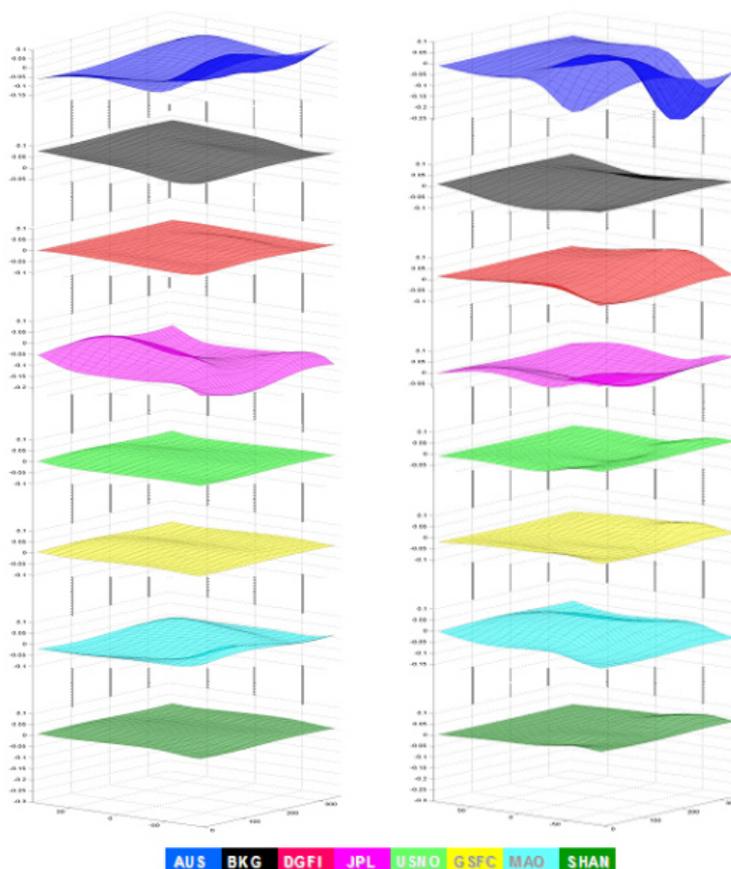


Рис. 3.11: Сглаженные разности между Pul(2007)C02 и индивидуальными каталогами 2005г., по 196 опорным источникам (Слева $\Delta\alpha$, справа $\Delta\delta$), в мс.дуги (Sokolova Y., Malkin Z., 2007) [10]

Таблица 3.3: Параметры модели (1.27) между сводным каталогом ГАО РАН – PUL(2007)C02 и сводным каталогом УН РАН – GAOUA в мкс.дуги и мкс.дуги/град [74]

$A1$	$=$	$0 \pm 7,$	D_α	$=$	0 ± 0
$A2$	$=$	$0 \pm 7,$	D_δ	$=$	0 ± 0
$A3$	$=$	$-1 \pm 9,$	B_δ	$=$	-2 ± 7

Сравнение Pul(2016)C02 с исходными каталогами показано на примере каталогов BKG, IGG, USNO (Рис. 3.12) и на Рис. 3.13 разности с ICRF2.

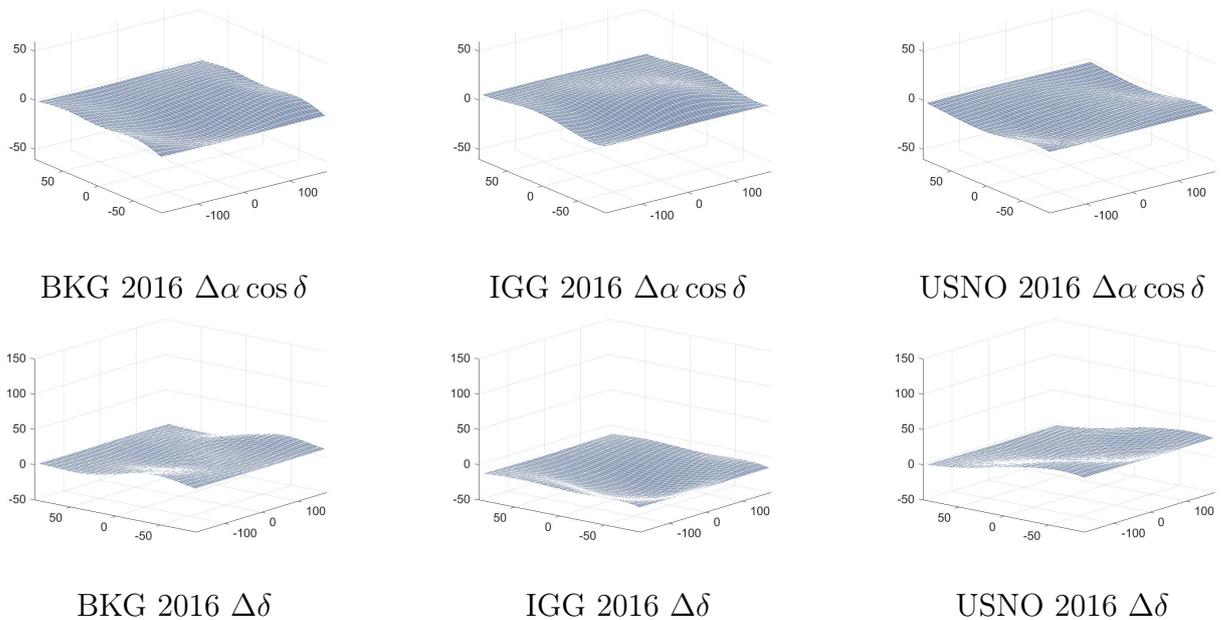


Рис. 3.12: Сглаженные по сфере разности координат каталогов в системе ICRF2 и Pul(2016)C01, ед. мкс.

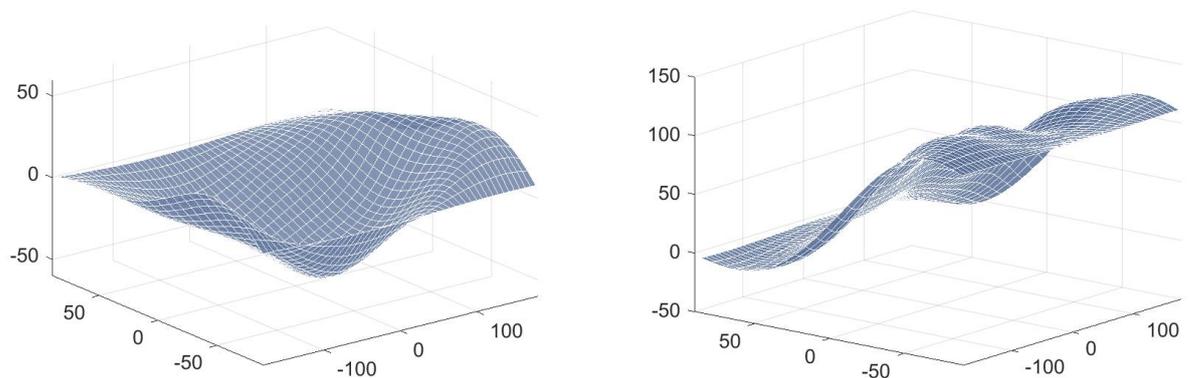


Рис. 3.13: Сглаженные по сфере разности координат источников Pul(2016)C02 и ICRF2 ($\Delta\alpha \cos \delta$ — слева и $\Delta\delta$ — справа), ед. мкс.

3.3. Оценки точности комбинированных решений

Представляется важным оценить фактическую точность полученного сводного каталога (также это относится к любой другой реализации CRF). К сожалению, существующие методы сравнения каталогов позволяют нам исследовать только разности координат между каталогами.

В 2009г. с выходом следующей версии ICRF2, стало возможно

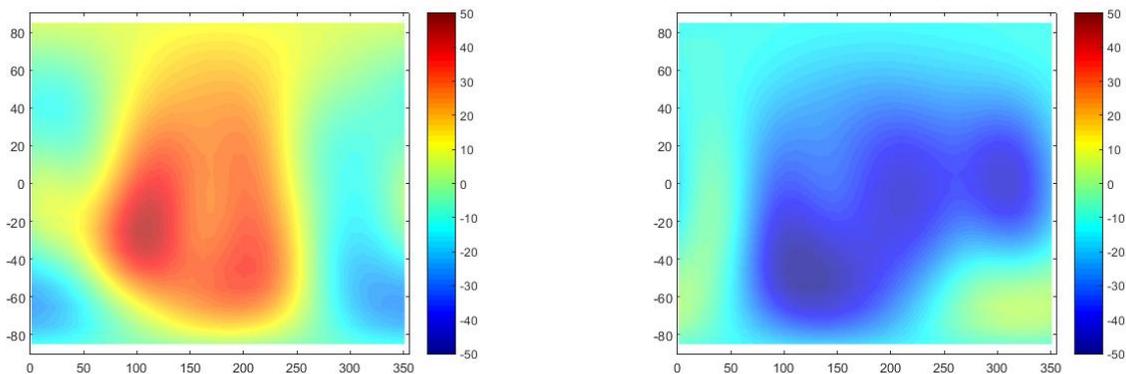


Рис. 3.14: Сглаженные разности между ICRF Ext.2 и ICRF2, по общим опорным источникам (Слева $\Delta\alpha$, справа $\Delta\delta$), в мкс.дуги.

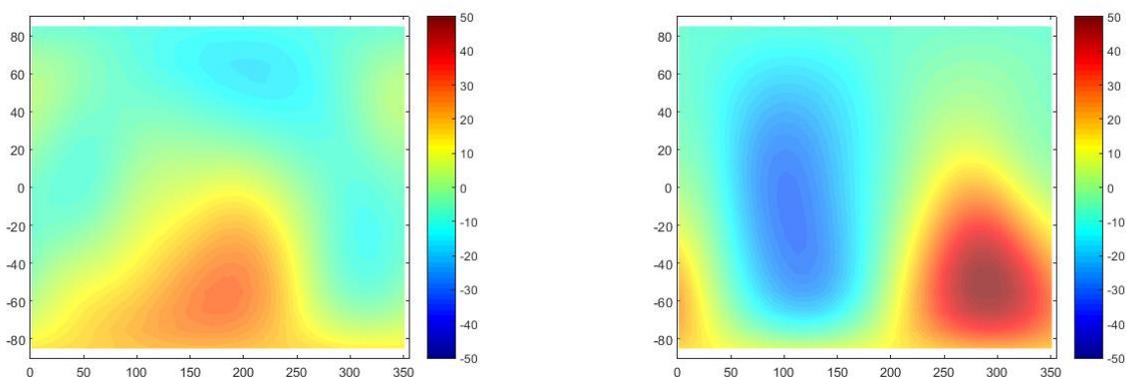


Рис. 3.15: Сглаженные разности между Pul(2007)C02 и ICRF2, по общим опорным источникам (Слева $\Delta\alpha$, справа $\Delta\delta$), в мкс.дуги.

сравнение сводного Пулковского каталога 2007г. с официальной опорной системой 2009г. Пулковский сводный каталог 2007г. оказался намного ближе к ICRF2 чем предыдущая дополненная версия ICRF — ICRF Ext.2 рис. 3.14, 3.15.

Для независимой проверки качества полученного сводного каталога были вычислены два ряда определения смещения небесного полюса (углов нутации) по программам IVS R1 и R4, специально предназначенным для высокоточного определения параметров вращения Земли, за период 2002–2006гг. (всего 451 суточная серия наблюдений), один с каталогом ICRF Ext.2, другой с полученным сводным каталогом. По каждому ряду было

вычислено среднеквадратическое значение разности с моделью нутации IAU2000A с учетом свободной нутации ядра по модели [75]. Результаты сравнения приведены в табл. 3.4, данные которой показывают повышение точности определения нутации при применении сводного каталога.

Таблица 3.4: Wrms разностей между двумя рядами координат небесного полюса, мкс. дуги.

Каталог	X_c	Y_c
ICRF Ext.2	104	102
Сводный 2007г.	98	99

Применение полученного сводного каталога к обработке РСДБ-наблюдений показало улучшение точности оценки углов нутации. Таким образом, уже первая версия сводного каталога координат радиоисточников показала перспективность данного подхода к улучшению ICRF. Данный каталог был использован как основной в работе IVS центра ГАО РАН вплоть до выхода ICRF2.

Глава 4. Вычисление структурной задержки радиоисточников по данным геодезических РСДБ–наблюдений.

Одной из проблем построения небесной системы координат является «структурная задержка» — дополнительное запаздывание сигнала, регистрируемое простым двухэлементным интерферометром из-за того, что типичный радиоисточник в S/X диапазонах, в отличие от звезд, не является точечным объектом, а имеют сложную структуру на миллисекундном масштабе дуги, которая в большинстве случаев оказывается переменной на шкале времени от нескольких месяцев до нескольких лет, что приводит к астрометрической нестабильности координат опорных объектов на уровне 0.1–1 мс. (напр. [76], [77], [78]).

По результатам Дэна Макмилана [15] (Рис. 4.1) многие радиоисточники имеют значимые видимые собственные движения: у 580 источников точность определения собственных движений составляет 0.5 мкс. дуги/год, но для 50–60 объектов их собственные движения отличаются от нуля более чем на 3σ .

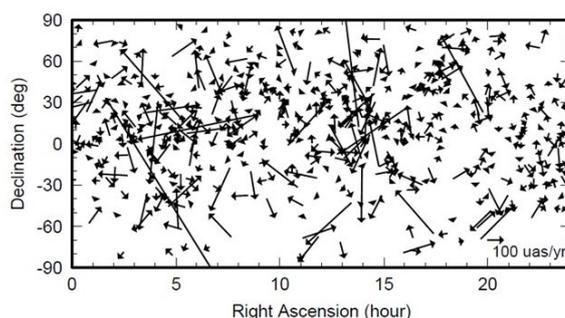


Рис. 4.1: Видимые «собственные движения» радиоисточников [15]

Вызванная неточностью и несимметричностью распределения радиояркости источника, структурная задержка устанавливает ограничение не только на точность небесной системы координат, но также влияет и на определение параметров вращения Земли (в основном, углов нутации). На рис. 4.2 – 4.6 представлены примеры «нестабильных» радиоисточников, с изменяющейся структурой.

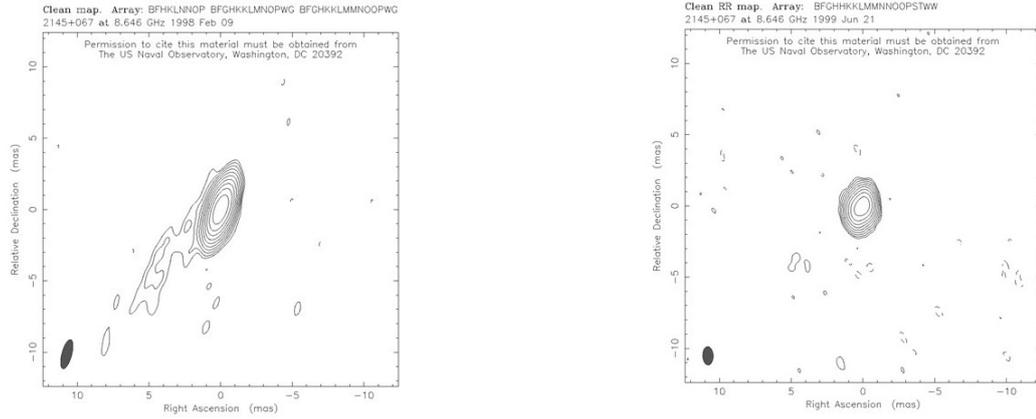


Рис. 4.2: Радиоизображение источника 2145+067 на 09.02.1998 (слева) и 21.06.1999 (справа) по данным Reference Frame Image Database (RRFID) USNO.

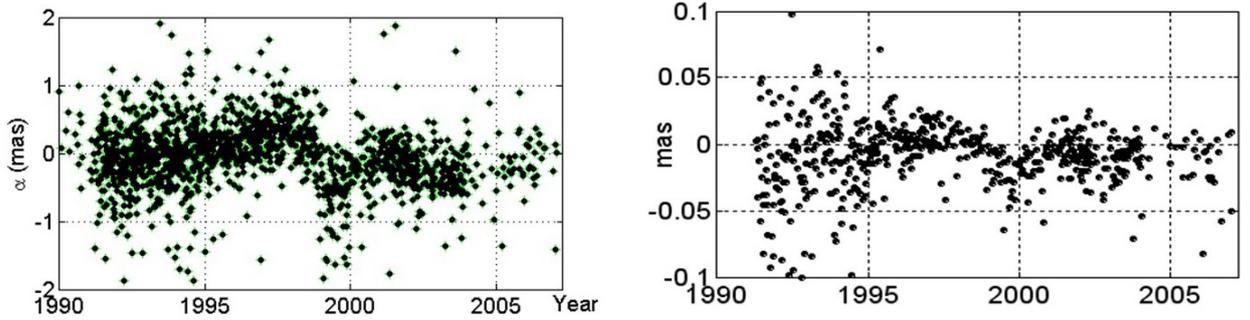


Рис. 4.3: Вариации в положении радиоисточника 2145+067 — слева, вариации в нутации (dpsi) — справа. (Соколова Ю., 2008) [16]

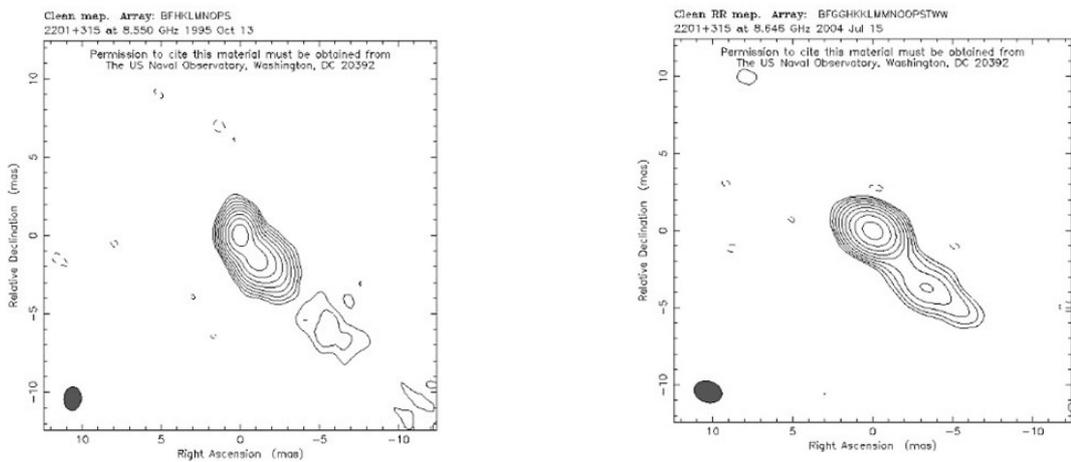


Рис. 4.4: Радиоизображение источника 2201+315 на 13.10.1995 (слева) и 15.07.2004 (справа) по данным Reference Frame Image Database (RRFID) USNO.

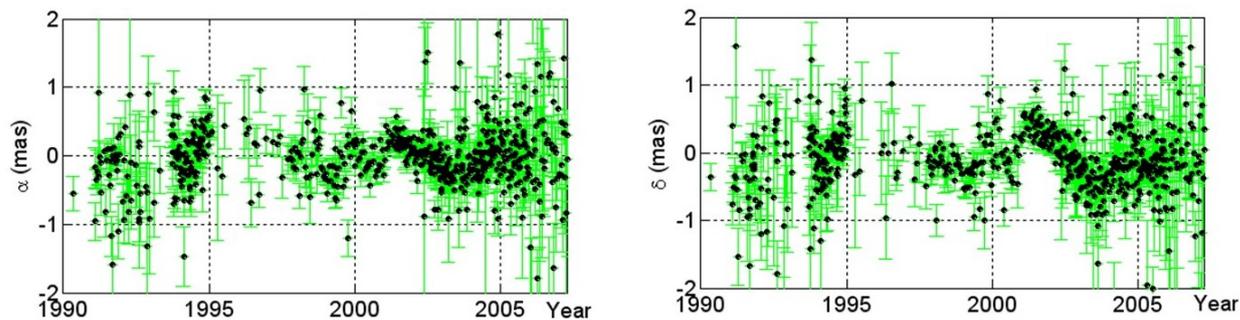


Рис. 4.5: Вариации в положении радиоисточника 2201+315 (Соколова Ю., 2008) [16]

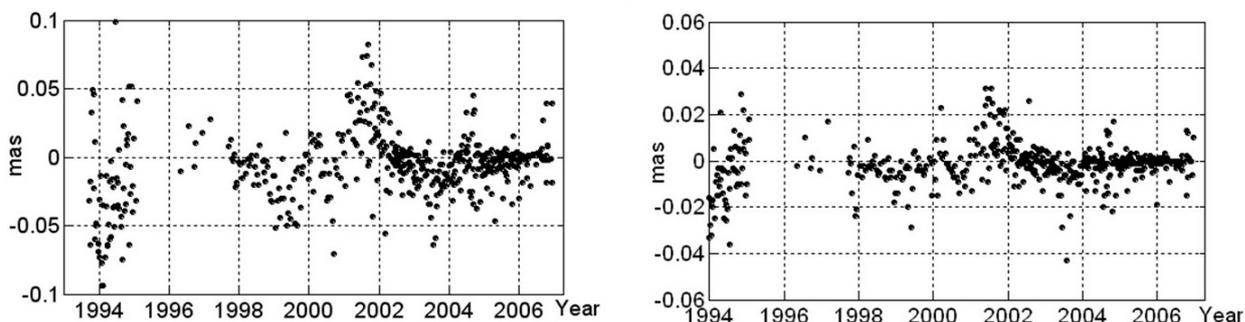


Рис. 4.6: Вариации в нутации (dpsi – слева, deps – справа) (Соколова Ю., 2008) [16]

Таким образом одной из значимых проблем в построении высокоточной небесной системы координат является учет структурной задержки. Традиционно, структурная задержка вычисляется на основе фазовой задержки, построенной по имеющимся в наличии радиокартам опорных объектов. Попытки моделировать такие эффекты начались еще в 80-е годы [14], однако заметного продвижения в решении данной проблемы до сих пор не произошло. Причина заключается в том, что для построения радиокарт объектов используются астрофизические РСДБ-наблюдения [14], [79], [80], [81]. При этом один и тот же объект должен наблюдаться на большой сети антенн в течение нескольких часов для хорошего заполнения uv -плоскости и построения детального изображения. Такие радиокарты должны быть получены для большого количества объектов с небольшим интервалом времени, желательно, каждую неделю. Последнее требование

связано с тем, что большинство радиоисточников меняют структуру достаточно быстро, а результат применения метода очень чувствителен к вариациям радиояркости. К сожалению, имеющиеся возможности не позволяют строить подробные радиокарты так часто. Что касается самих геодезических РСДБ–наблюдений, то они не подходят для построения точных радиоизображений из-за недостаточно плотного заполнения uv –плоскости.

Сравнительно недавно Ху и др. (2016) [82] предложили для определения структурной задержки использовать метод замкнутых треугольников (“closure delay”). Этот метод использует непосредственно геодезические РСДБ–наблюдения, без привлечения астрофизической информации. Однако для вычисления структурной задержки нужно сложить задержки, полученные на трех связанных базах, что по техническим причинам не всегда возможно. Поэтому потенциал применения этого метода для решения указанной проблемы пока не очень понятен.

В качестве альтернативного подхода Шарло [14] предлагал использовать остаточные невязки, которые так же вычисляются непосредственно из геодезических РСДБ–наблюдений после глобального уравнивания, однако, это предложение до сих пор оставалось без внимания. В данной работе совместно с О. Титовым [23], [24] предпринята первая попытка вычисления структурной задержки по остаточным невязкам, полученным без дополнительной картографической информации и без применения условия замкнутых треугольников.

4.1. Обработка наблюдений по программе CONT14 радиоисточника 0014+813

Для протяженных радиоисточников структурная задержка может быть настолько большой (до 500 пс), что остаточные невязки, как будет показано ниже, имеют ярко выраженную систематическую составляющую, заметно превышающую случайные ошибки. Эта систематика может быть смоделирована с помощью четырех параметров: угловое разделение компонент, взаимная ориентация относительно направления на полюс, отношение потоков и разница спектральных индексов [14]. Эта модель была применена для радиоисточника 0014+813, интенсивно наблюдавшегося в ходе программы CONT'14 с 6 по 20 мая 2014 года [55]. Причины такого выбора следующие:

1. Кампания CONT'14 (рис. 4.7) была специально организована для получения параметров вращения Земли с высокой точностью. Поэтому влияние случайных ошибок, а также неучтенных систематических факторов, заметно меньше, чем для обычных геодезических РСДБ-наблюдений.
2. 0014+813 — один из наиболее мощных квазаров во Вселенной [83].
3. Благодаря большому склонению, 0014+813 наблюдался в ходе CONT14 практически круглосуточно (то есть при любой ориентации вектора базы) почти на всех базах северного полушария.
4. Известно, что 0014+813 на частоте 1.6 ГГц имеет мощный джет, ориентированный по направлению «север–юг» с узлами на расстоянии примерно 5 мс. и 10 мс. дуги от ядра [83]. При наблюдениях на частоте 8.4 ГГц наблюдается джет на угловом расстоянии 5 мс. дуги [84]. Анализ временного ряда суточных оценок склонения этого объекта на частоте 8.4 ГГц позволяет обнаружить большие вариации

с амплитудой до 1 мс. дуги [78]. Астрометрические результаты за 1993–2010 годы показывают, что радиоисточник 0014+813 сначала смещался к северу, а с 2002 года — к югу (рис. 4.8). Изменения прямого восхождения на том же интервале времени были крайне незначительны. Очевидно, данные вариации связаны с изменениями структуры объекта, поэтому следует ожидать, что структурная задержка в первую очередь повлияет именно на изменение склонения радиоисточника.

- После 2010 года этот объект почти не наблюдался в регулярных программах IVS из-за астрометрической нестабильности, поэтому наблюдения в ходе кампании CONT14 особенно интересны для дальнейшей обработки.



Рис. 4.7: Станции участвующие в CONT14

Обработка наблюдений проводилась на пакете программ ОССАМ 6.3 [85], табл.1.4. Как правило, остаточные невязки, полученные после обработки РСДБ–наблюдений, рассматриваются как функция от момента наблюдений. В качестве примера на рис. 4.9 приведены невязки для 0014+813 на двухнедельном интервале (CONT14), вычисленные для двух баз северного полушария. На основании таких графиков принято считать, что остаточные невязки носят случайный характер, и какая-то значимая систематика отсутствует.

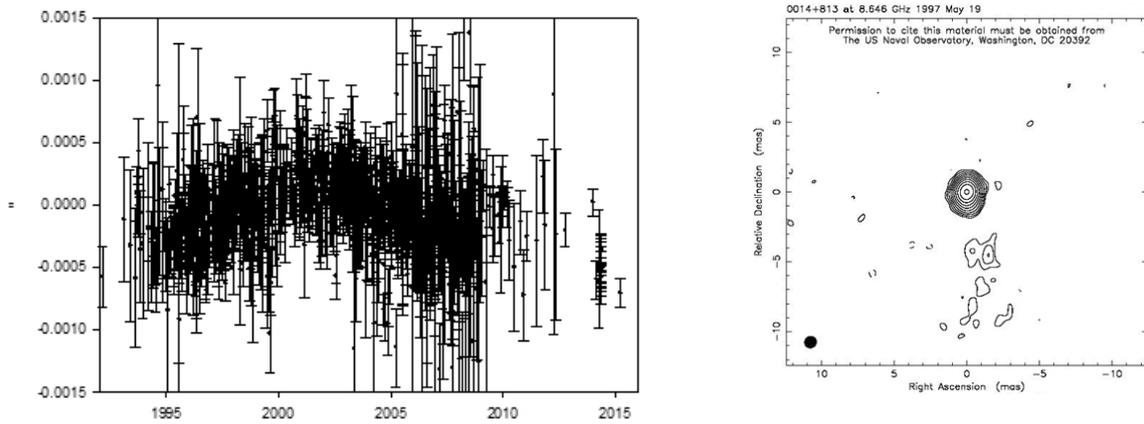


Рис. 4.8: Изменения склонения радиоисточника 0014+813 с 1993 по 2015 по данным геодезических РСДБ-наблюдений (слева), ед.: arcsec. Радиоизображение источника 2145+067 на 19.05.1997 по данным Reference Frame Image Database (RRFID) USNO (справа)

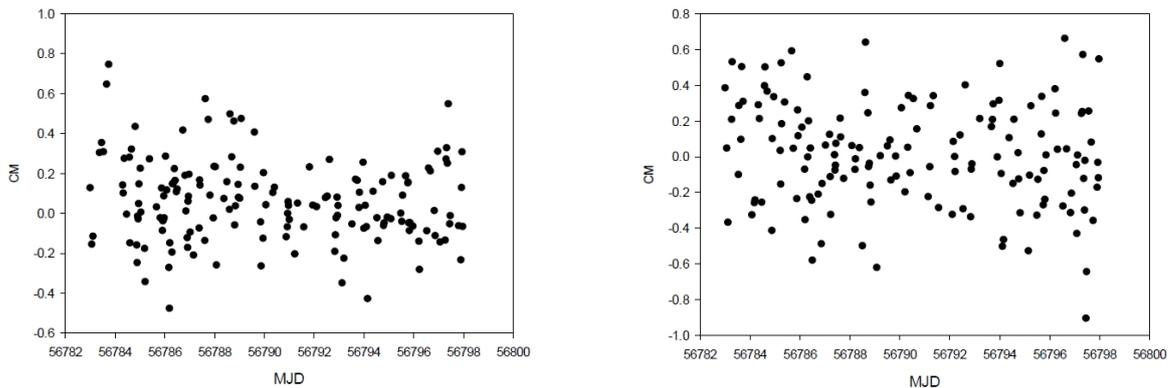


Рис. 4.9: Невязки для баз Wettzell – Westford (слева) и Tsukub32 – Kokee (справа) в зависимости от времени (MJD — модифицированная Юлианская дата), полученные по программе CONT'14.

С точки зрения элементарной геометрии, ключевым параметром следует считать не момент наблюдений, а позиционный угол A , который отсчитывается от ядра радиоисточника и определяет направление вектора базы по отношению к Северному полюсу Мира (рис. 4.11). Из-за суточного вращения Земли угол A меняется со временем. Для определения ориентации

джета относительно ядра введем угол β (рис. 4.11). В один и тот же момент времени все базы, образуемые станциями РСДБ–сети, имеют разную ориентацию относительно джета. Как будет показано далее, обнаружить систематические эффекты на графиках невязок можно, если вместо аргумента использовать не моменты времени, а значения угла A (Рис. 4.10).

Оказалось, что для баз с длиной 5000км и больше из остаточных невязок можно выделить сигнал, причем этот сигнал становится более заметным с увеличением длины базы. По-видимому это связано с тем, что на коротких базах не удастся разделить мелкие детали структуры объекта (рис. 4.10). Не учитывая структурную задержку в редукциях обработки РСДБ–наблюдений, следует ожидать некие систематические эффекты в остаточных невязках.

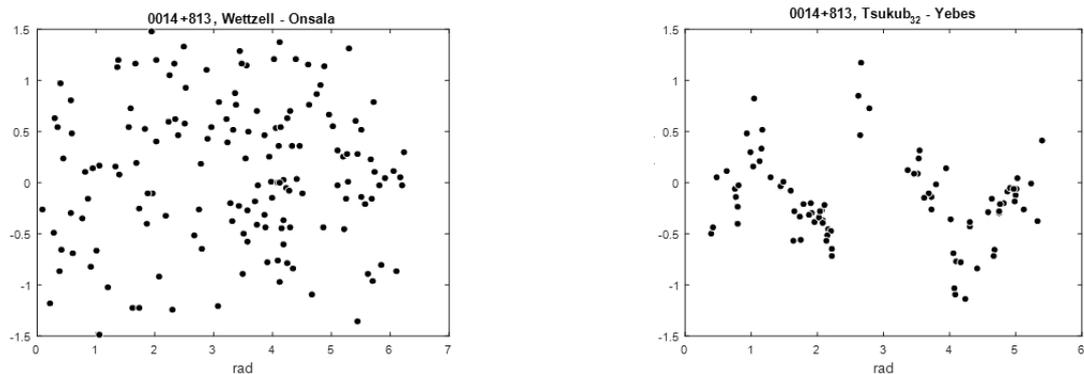


Рис. 4.10: Невязки для баз Wettzell-Onsala 920км. (слева) и Tsukub32-Yebes 9.511км. (справа) в зависимости от угла A .

4.2. Математическая модель вычисления структурной задержки

Рассмотрим сферический треугольник, образованный вектором базы, направлением на радиисточник и направлением на Северный полюс мира (рис. 4.11). Используя известные отношения из раздела сферической тригонометрии, найдем выражения для $\cos \psi$:

$$\begin{aligned} \cos \psi &= \cos \varphi \cos(90 - \delta) + \sin \varphi \cos(90 - \delta) \cos A =, \\ &= \cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \cos A. \end{aligned} \quad (4.1)$$

и $\sin A$:

$$\sin A = \frac{\sin(\alpha_{bas} - \alpha_{rs})}{\sin \varphi} \sin \psi \quad (4.2)$$

где α_{bas} и α_{rs} — прямые восхождения базы и радиосточника соответственно.

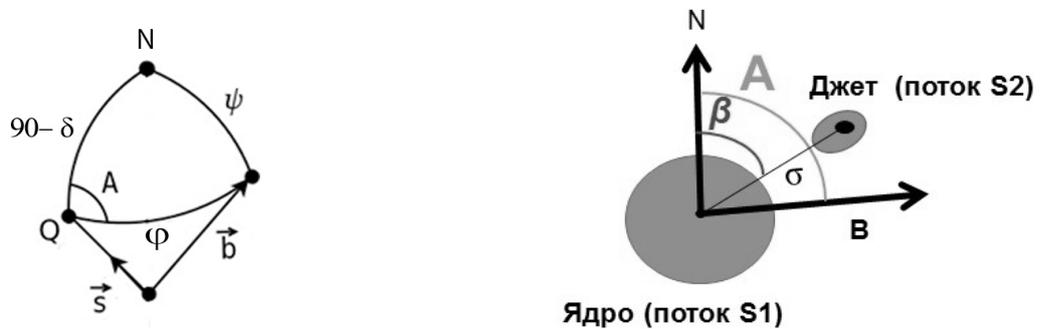


Рис. 4.11: Связь структуры источника и структурной задержки по данным РСДБ-наблюдений. Углы (θ , φ и $90 - \delta$), образуют грани сферического треугольника, заданного положением радиосточником (Q), направлением вектора базы (b) и положением Северным полюсом мира (N) в барицентрической системе координат. Переменный сферический угол при ядре радиосточника определяет направление проекции вектора базы B по отношению к направлению на Северный полюс мира N . Направление джета по отношению к ядру задается углом β , не зависящим от времени. Вектор проекции базы в течение суток меняется от 0° до 360° , два раза в сутки становясь коллинеарен направлению «ядро – джет». При этом угол A принимает значения β и $-\beta$, соответственно. Угол σ — угловое расстояние между ядром и джетом.

Предполагая, что остаточные невязки отягощены структурной задержкой, и, зная систематическое поведение остаточных невязок, мы можем математически смоделировать τ_{str} , подбирая параметры таким образом, чтобы как можно более точно описать найденную систематику.

Учитывая математический характер представления обнаруженной систематики (зависимость от угла A , рис. 4.13), предположим, что его причиной может являться структурная задержка радиоисточника в рамках двухкомпонентной модели [14]:

$$\tau_1 = \frac{2\pi K(1-K)}{w(1+K)} \frac{[1 - \cos(2\pi R)]R}{K^2 + 2K \cos(2\pi R) + 1} \quad (4.3)$$

и

$$\tau_2 = \frac{\Delta\alpha K}{w} \frac{\sin(2\pi R)}{K^2 + 2K \cos(2\pi R) + 1} \quad (4.4)$$

где K — отношение потоков двух компонент (рис. 4.11):

$$K = \frac{S_2}{S_1} \quad (4.5)$$

R — отношение между пространственным разделением компонент и проекции базы интерферометра на направление «ядро-джета».

$$R = \frac{B}{\lambda} \sigma_{12} \cos \beta \sin \varphi \quad (4.6)$$

w — частота интерференции, и $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$, где α_1, α_2 — спектральные индексы двух компонент, обусловленные физическими механизмами радиоизлучения ядра и джета. λ — длина волны, угол β — азимут направления джета (рис. 4.11). Угол A в течение суточной сессии меняется в широком диапазоне из-за вращения Земли.

Фазовый центр, определяющий астрометрическое положение радиоисточника, расположен между двумя компонентами, разделенными на угол σ_{12} , так что $\sigma_{12} = \sigma_{10} + \sigma_{20}$, где σ_{10}, σ_{20} — угловые расстояния между фазовым центром и компонентами #1 и #2 соответственно. Поскольку фазовый центр никак не отмечен на небе, эти два угловых расстояния вводятся математически [14]:

$$\sigma_{10} = \frac{S_2}{S_1 + S_2} \sigma_{12} \quad (4.7)$$

Затем они могут вычислены с использованием параметра K (4.5) по формуле:

$$\sigma_{10} = \frac{K}{K_1 + K_2} \sigma_{12} \quad (4.8)$$

Важно заметить, что параметр $\Delta\alpha$ может принимать как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от того, какая физическая компонента (ядро или джет) выбрана в качестве первой (#1), поскольку порядок назначения компонент априорно неизвестен. Замена порядка приводит к обращению трех параметров модели $(K, \beta, \Delta\alpha)$, в то время как четвертый параметр, R — инвариантен относительно этой операции. Таким образом, в самом общем виде модель структурной задержки описывается четырьмя параметрами $(R, K, \beta$ и $\Delta\alpha = \alpha_1 - -\alpha_2)$.

4.3. Результаты моделирования наблюдений 0014+813

Остаточные невязки аппроксимировались с помощью уравнений (4.3) и (4.4) перебором всех четырех параметров в пределах (R от 0.3 до 3.0 с шагом 0.15, K от 0.1 до 0.9 с шагом 0.05, фаза β от 60° до 240° с шагом 12 и $\Delta\alpha$ от -1 до -5 с шагом 0.133), чтобы для каждой базы найти численно такую комбинацию $(R, K, \beta, \Delta\alpha)$, при которой среднеквадратическая ошибка окажется минимальной. Пример полученных параметров в таблицах 4.1, 4.2 для коротких и длинных баз соответственно.

Оказалось, что остаточные невязки для наиболее длинных баз выглядят как набор отрезков (Рис. 4.12), и их успешное моделирование невозможно без учета разности спектральных индексов (4.4).

Таблица 4.1: Индивидуальные комбинации параметров моделирования на примере некоторых коротких баз.

Пар-ры:	Wettzell	Wettzell	Wettzell	Matera
	- Onsala60	- Matera	- Yebes40M	- Yebes40M
$B(\text{км.})$	920	990	1575	1667
R	2.70	1.65	1.65	1.35
K	0.10	0.10	0.20	0.20
$\beta(\text{град.})$	84	168	192	156
$\Delta\alpha$	-1.0	-2.1	-1.0	-1.0
$\sigma_{12}(\text{мс.})$	0.25	0.15	0.28	0.23
rms(см.)	0.92	0.78	0.74	0.54
N	174	168	187	174

Таблица 4.2: Индивидуальные комбинации параметров моделирования на примере некоторых длинных баз.

Parameters	Wettzell	Tsukub32	Onsala60	Wettzell
	- Westford	- Kokee	- Westford	- Kokee
$B(\text{км})$	5998	5755	5601	10357
R	0.60	0.60	0.60	0.45
K	0.40	0.40	0.45	0.65
$\beta(\text{град})$	168	180	168	180
$\Delta\alpha$	-2.5	-5.0	-2.2	-3.9
$\sigma_{12}(\text{мс})$	0.17	0.17	0.19	0.18
rms(см)	0.24	0.30	0.33	0.32
N	163	150	173	91

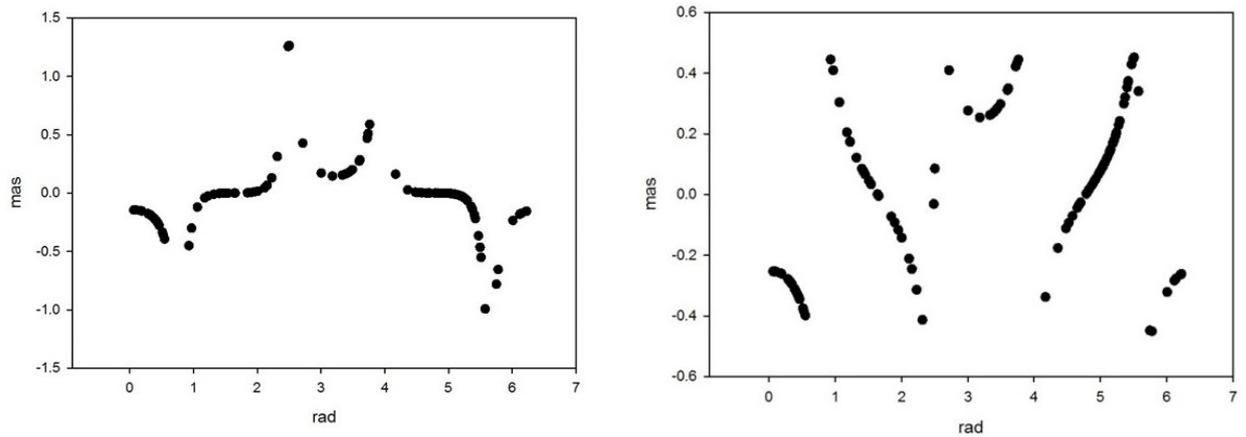


Рис. 4.12: Аппроксимация остаточных невязок по модели с использованием модели (4.3) — слева, 4.4 — справа) для базы Westford – Zelenchuk.

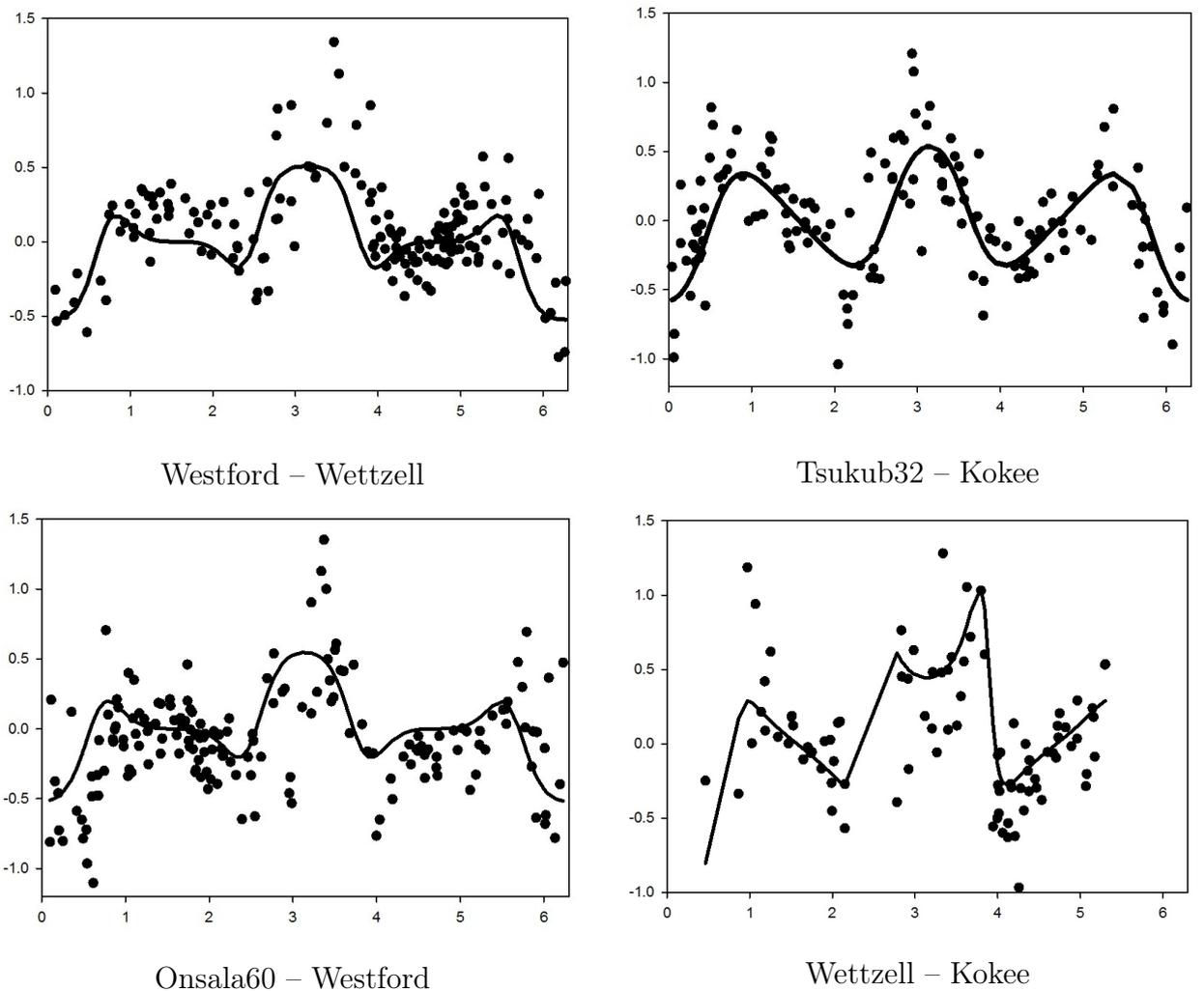


Рис. 4.13: Аппроксимация остаточных невязок на примере некоторых РСДБ-баз, по осям: y — см, x — угол A (радианы)

На рис. 4.13 приведены модельные кривые структурной задержки для некоторых баз, вычисленные по формулам (4.3) и (4.4) для четырех баз. Для самых длинных баз оценки $\Delta\alpha$ достигают -5, так как при использовании меньших по модулю значений $\Delta\alpha$, точность аппроксимации значительно ухудшается. Это означает, что введение в модель ненулевого, и при этом достаточно большого спектрального индекса, оказывается неизбежным шагом, безотносительного того, вызвано это природой наблюдаемого радиоисточника или же инструментальными эффектами.

Анализ полученных параметров показал, что параметр R медленно уменьшается с длиной базы, параметр K медленно растет, но несмотря на это их комбинация не показывает заметного линейного тренда. Наблюдаются только случайные вариации вокруг значения 0.15 мс с формальной точностью 0.03 мс. Таким образом, среднее значение σ_{10} , скорее всего, является реалистичной оценкой углового расстояния между компонентой #1 (более яркой) и фазовым центром радиоисточника 0014+813. Среднее разделение между компонентами #1 and #2 оценено в 0.5 мс. дуги, что приводит к оценке углового разделения между второй компонентой и фазовым центром примерно равной 0.35 мс., и среднему значению параметра $K = 0.4$. Направление вектора джета от компоненты #1 к компоненте #1 равно 175° , отсчитывая от направления на Северный полюс мира.

Также интересно определить, какая из компонент радиоисточника является ядром, а какая — джетом. Из литературы известно, что ядра радиоисточников имеют большую оптическую толщину с положительными спектральными индексами, до +2.5, в то время как джеты, содержащие высоко энергичные электроны с синхротронным механизмом излучения, являются оптически тонкими со спектральными индексами до -2.5. Это означает, что разность спектральных индексов $\Delta\alpha$ помогает отождествить

природу обеих компонент даже без построения радиокарты. В целом можно заключить, что для частоты 8.4 ГГц радиоисточник 0014+813 может быть представлен в виде двух компонент, разделенных угловым расстоянием 0.5 мс. дуги, и ориентированных по направлению «север–юг». Северный компонент является джетом, а южный — ядром объекта. По более ранним РСДБ–наблюдениям на сети VLBA [84] ориентация ядра и джета получается противоположная (северный компонент является ядром, а южный — джетом), но угловое разделение компонент при этом равно 5 мс. дуги. Возможно, это связано с тем, что 0014+813 имеет более сложную радиоструктуру из нескольких компонент, в частности, один джет расположен в 5 мс. к югу от ядра, а второй в 0.5 мс. к северу от ядра. Этот результат требует уточнения с помощью наблюдений на более высоких частотах.

4.4. Применение модели структурной задержки для вычисления поправок к суточным координатам радиоисточника 0014+813

В этой части приводятся результаты сравнение временных рядов координат радиоисточника 0014+813, полученные двумя способами: без учета структурной задержки и с применением модели (4.3) и (4.4) с полученными параметрами $R, K, \beta, \Delta\alpha$.

Рис. 4.14 представляет суточные оценки поправок к координатам радиоисточника 0014+813 (исходные координаты взяты из каталога ICRF2). Поправки к прямому восхождению объекта малы и колеблются вокруг нулевого значения, в то время как поправки по склонению меняются в пределах от -0.4 до -0.7 мс. дуги со средним значением -0.513 мс. дуги.

Результат применения модели структурной задержки к координатам 0014+813 представлен на рис. 4.15 и табл 4.3. Поправки к прямому

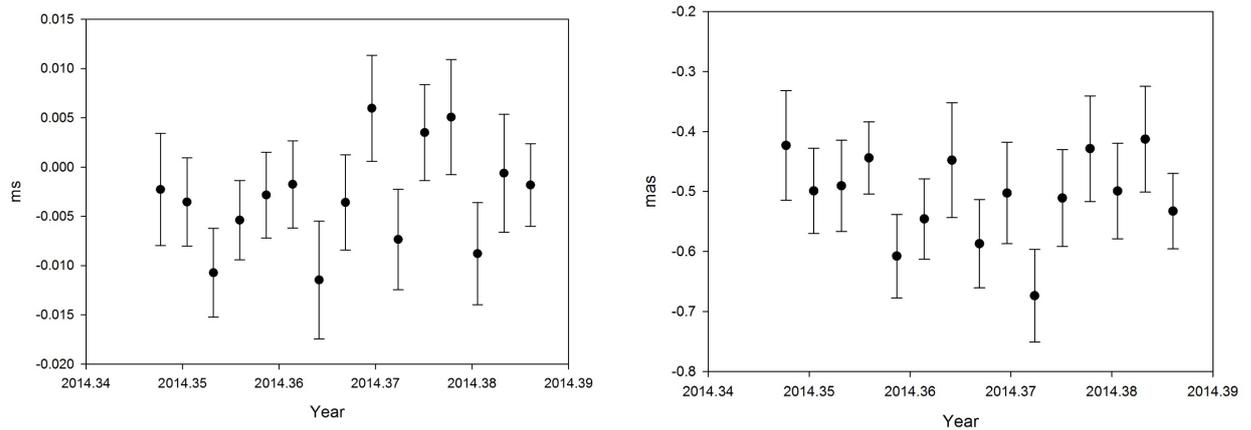


Рис. 4.14: Поправки к координатам радиоисточника 0014+813 по прямому восхождению (слева) и по склонению (справа) для каждой серии программы CONT14 без применения модели структурной задержки.

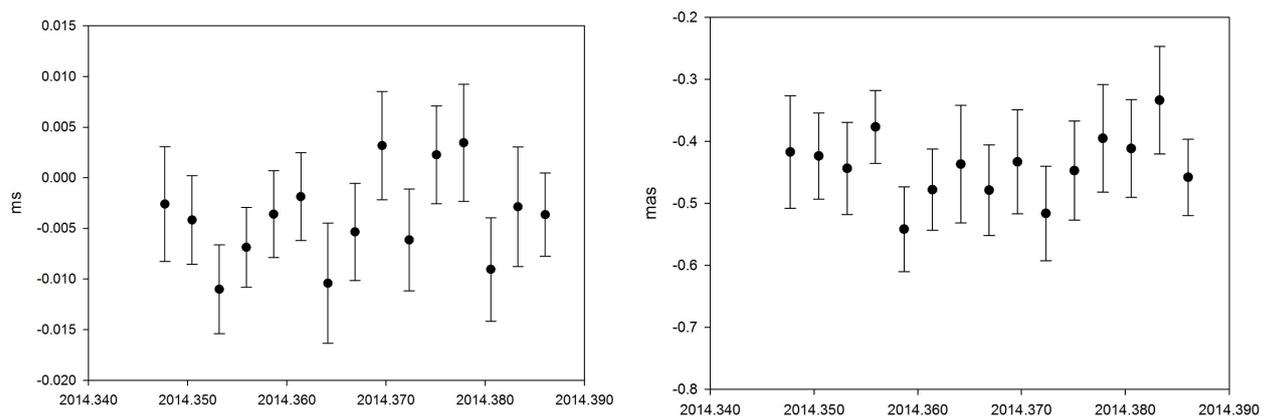


Рис. 4.15: Поправки к координатам радиоисточника 0014+813 по прямому восхождению (слева) и по склонению (справа) для каждой серии программы CONT14, полученные с применением модели структурной задержки.

восхождению практически не изменились, а среднее значение поправок склонения стало равно -0.442 мс. дуги. При этом уменьшились как формальная ошибка средней оценки (с 0.018 до 0.013 мс. дуги), так и разброс всех 15 точек выборки (0.069 и 0.053 мс. дуги, соответственно).

Индивидуальные разности для каждой пары суточных оценок по склонению варьируются от 0 до $+0.16$ мс. дуги, при этом больше половины

Таблица 4.3: Сравнение координат радиоисточника 0014+813, полученных двумя способами: 1) без применения модели структурной задержки; 2) с применением этой модели.

Решения	Без структурной задержки	Со структурной задержкой
Ср. значение поправки по RA, (мксек.)	-3.1 ± 1.2	-4.2 ± 1.1
Ср. значение поправки по DE, (мс.)	-0.513 ± 0.018	-0.442 ± 0.013
Wrms отклонение от среднего по RA, (мксек. времени)	4.7	4.1
Wrms отклонение от среднего по DE, (мкс. дуги)	69	53

из 15 разностей располагаются в диапазоне от +0.06 до +0.08 мс. дуги. Таким образом, можно заключить, что средний сдвиг по склонению равен 0.071 мс. дуги, и эта оценка достаточно стабильна для всех индивидуальных серий. Среднеквадратические ошибки средних значений поправок по склонению равны 0.018 мс. и 0.013 мс. (до и после применения модели структурной задержки, соответственно), поэтому комбинированная ошибка двух рядов равна примерно 0.022 мс. Отношение среднего сдвига к комбинированной ошибке превышает 3σ , поэтому смещение склонения радиоисточника 0014+813 в результате применения модели структурной задержки можно считать статистически достоверным. Изменение оценки по прямому восхождению оказалось статистически незначимым.

Таким образом можно заключить, что структурная задержка при определенных условиях может оказаться основным источником

систематических ошибок при уравнивании РСДБ-наблюдений, а смещение оценок координат, вызванное неучтенным влиянием структурной задержки, может достигать 0.1 мс. дуги.

При этом важно, для поиска систематических сигналов в остаточных невязках рассматривать невязки в зависимости от позиционного угла A , а не от момента наблюдений. Структурную задержку можно промоделировать с помощью модели Шарло (1990) [14], включающую четыре параметра (уравнения 4.3), (4.4). Исследование на примере наблюдений источника 0014+813 в ходе кампании CONT14 показало, что амплитуда систематических эффектов в невязках может достигать 3 см. (100 пс), хотя не исключены и более сильные сигналы для иных источников. И наконец, разброс параметров от базы к базе может быть достаточно большим, что, в частности, может быть обусловлено неопределенностью происхождения разности структурных индексов ядра и джета.

Предложенный метод определения и учета структурной задержки был впоследствии практически испытан и подтвержден в университете Тасмании, Австралия [24].

Заключение

Основные результаты работы:

- Впервые применена методика сравнения РСДБ–каталогов, основанная на строгом полном разложении систематических разностей каталогов по сферическим функциям.
- Проведено сравнение РСДБ–каталогов 2005г., 2013г. и 2016г. Сравнение каталогов радиоисточников (реализаций небесной системы координат) 2005 года, вычисленных в восьми центрах анализа РСДБ–данных, показало значительные систематические различия всех исходных каталогов по отношению к официальной на то время системе ICRF [10]. Кроме того, анализ систематических ошибок каталога ICRF показал несостоятельность принятой авторами первой версии ICRF идеологии фиксации координат определяющих источников. Похожая картина наблюдается в случае сравнения каталогов 2012г. с ICRF2 [18]. Исследование эволюции разностей координат РСДБ–каталогов с ICRF2 выявило растущую систематику по склонению, причины которой пока не ясны. На 2016 год данная систематика присутствует у всех рассмотренных индивидуальных РСДБ–каталогов.
- Расширено исследование, проведенное д.ф.-м.н. В.В. Витязевым [47], о связи модели вращения с аналитической моделью разложения. Дополнение включает связь моделей шести и четырех параметров, применяемых IERS, с аналитической моделью разложения по сферическим функциям.
- К исходным разностям индивидуальных РСДБ–каталогов с опорной системой были применены различные модели представления систематических разностей: модели, применяемые IERS, разложение по сферическим функциям (метод Броше) и функциям Лежандр-

Фурье. Наилучшую точность представления систематических разностей показало разложение по сферическим функциям. Для разностей каталогов 2016г. с ICRF2 были выявлены следующие гармоники:

- В разностях $\Delta\alpha \cos \delta$ — основные самые мощные общие гармоники для всех каталогов по 36 членам разложения — тессеральные $[n = 1, k = 1, l = 0], [n = 1, k = 1, l = 1]$. Эти сферические гармоники не соответствуют углам вращения и не входят в модель шести постоянных IERS;
- В разностях $\Delta\delta$ — преобладают зональные гармоники. Самая мощная гармоника при $[n = 0, k = 0, l = 1]$ — соответствует сдвигу (B_δ) в модели IERS; гармоники $[n = 1, k = 0, l = 1], [n = 3, k = 0, l = 1]$ соответствуют параметру наклона (D_δ); мощная гармоника $[n = 2, k = 0, l = 1]$ — наклон, не имеет интерпретации в рамках модели шести постоянных.
- Проведено исследование влияния корреляционной информации на определение ориентации между различными РСДБ–каталогами. Результаты показали, что разница в углах поворота, вычисленных с учетом и без учета корреляций между прямым восхождением и склонением, может достигать до нескольких мкс. дуги, хотя и находится практически во всех случаях на уровне меньше 1σ , т.е. не является статистически значимой. В то же время использование полных корреляционных матриц оказывает существенное влияние на результаты. Разница в полученных значениях углов поворота может превышать $20 \mu\text{as}$ (табл. 2.6). Таким образом, представляется важным учитывать полную корреляционную информацию при сравнении каталогов положений радиоисточников. Разумеется, это возможно

только в том случае, если все каталоги будут публиковаться с полной ковариационной матрицей. Полученные выводы могут представлять интерес и для определения взаимной ориентации других систем отсчета, задаваемых каталогами положений небесных или земных объектов.

- Получены сводные каталоги PulC01 — улучшение опорной системы в случайном отношении и PulC02 — уточнение опорной системы отсчета как в случайном, так и в систематическом отношении. Сравнение сводного Пулковского каталога 2007 года с ICRF2 показало, что Пулковский сводный каталог оказался намного ближе к ICRF2 чем предыдущая дополненная версия ICRF — ICRF Ext.2, а применение полученного сводного каталога к обработке РСДБ-наблюдений показало существенное улучшение точности оценки углов нутации. Полученный сводный каталог был использован как основной в работе IVS центра ГАО РАН вплоть до выхода ICRF2. [10].
- Разработан и применен метод определения и учета структурной задержки по остаточным невязкам, полученным без дополнительной картографической информации, альтернативный и обладающий существенным практическим преимуществом, методу замкнутых треугольников [82]. Апробация метода была осуществлена для радиоисточника 0014+813, интенсивно наблюдавшегося в ходе программы CONT'14 [55]. Результат апробации показал состоятельность данного метода, и необходимость его скорейшего развития и применения [23], [24].

Литература

1. *Fricke W., Schwan H., and Lederle T.* Fifth fundamental Catalogue (FK5), Part I: The basic fundamental stars // Veroff. Astron. Rechen Inst. Heidelberg, – 1988. – №. 32.
2. *Perryman M.A.C., Lindegren L., Kovalevsky J., Hog E., Bastian U., Bernacca P.L., Creze M., Donati F., Grenon M., Grewing M., van Leeuwen F., van der Marel H., Mignard F., Murray C.A., Le Poole R.S., Schrijver H., Turon C., Arenou F., Froeschle M., Petersen C.S.* The Hipparcos Catalogue // Astron. Astrophys. – 1997. – V. 323 – P. L49–L52.
3. *Ma C., Arias E., et al.* The International Celestial Reference Frame based on VLBI Observations of Extragalactic Radio Sources // Astron. J. – 1998. – V. 116 – P. 516–546.
4. *Feissel M., Mignard F.* The adoption of ICRS on 1 January 1998: meaning and consequences // Astron. Astrophys. – 1998. – V. 331 – P. 33–36.
5. *Sovers J. et. al.* Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results // Rev. Mod. Phys. – 1998. – 70, 1393.
6. *Walter H., Sovers O.* Astrometry of fundamental catalogues: the evolution from optical to radio reference frames // edited by Hans G. Walter and Ojars J. Sovers. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. – 2000.
7. *Gaia Collaboration, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, A. G. A. Brown, A. Vallenari, C. Babusiaux, C. A. L. Bailer-Jones, U. Bastian, M. Biermann, D. W. Evans et al.* The Gaia mission // Astron. Astrophys. – 2016 – V. 595 – p. 36.
8. *Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H.J. de Bruijne, F. Mignard, R. Drimmel, C. Babusiaux, C. A.L. Bailer-Jones, U. Bastian et al.* Gaia Data Release 1 - Summary of the astrometric, photo-

- metric, and survey properties // *Astron. Astrophys.* – 2016 – V. 595 – P. 1–23.
9. *Auwers A.* Fundamental-Katalog für die Zonen-Beobachtungen am Nordlichen Himmel // *Publ. Astron. Gesellschaft*, – 1879. – XIV.
 10. *Sokolova Ju., Malkin Z.* On comparison and combination of catalogues of radio source positions // *Astron. Astrophys.* – 2007. – V. 474 – P.665–670.
 11. *Malkin Z.* ICRF – современное состояние и ближайшие перспективы // *Известия ГАО РАН* – 2009. – №. 219. – вып. 4. – С. 189–194.
 12. *C. Ma, E.F. Arias, G. Bianco, D.A. Boboltz, S.L. Bolotin, P. Charlot, G. Engelhardt, A.L. Fey, R.A. Gaume, A.-M. Gontier, R. Heinkelmann, C.S. Jacobs, S. Kurdubov, S.B. Lambert, Z.M. Malkin, A. Nothnagel, L. Petrov, E. Skurikhina, J.R. Sokolova, J. Souchay, O.J. Sovers, V. Tesmer, O.A. Titov, G. Wang, V.E. Zharov, C. Barache, S. Boeckmann, A. Collioud, J.M. Gipson, D. Gordon, S.O. Lytvyn, D.S. MacMillan, R. Ojha.* The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry // *IERS Technical Note No. 35* – 2009 – pp. 204.
 13. *Fey A., Gordon D., Jacobs C., ,Sokolova J. et al.* The second realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry // *Astron. J.* – 2015. – V. 150. – id. 58.– №. 2. - pp. 16.
 14. *Charlot P.* Radio-source structure in astrometric and geodetic very long baseline interferometry // *Astron. J.* – 1990. – V. 99 – P. 1309–1326.
 15. *MacMillan D.S.* Quasar apparent proper motions observed by geodetic VLBI networks. In *Future Directions in High Resolution Astronomy* // *The 10th Anniversary of the VLBA* (eds. Romney, J. D. and Reid, M. J.) – 2003. – <http://www.arXiv:astrop-ph/0309826v1>.

16. *Sokolova Y.* Influence of the radiosources instability on the nutation offset estimation // Proceedings of the Journées 2005 conference. – 2008. – P. 125–126.
17. *Ch. Ma, D. MacMillan, et al.* Aspects of ICRF-3 // IVS 2016 General Meeting Proceedings – 2016. – P. 270–274.
18. *Соколова Ю.Р., Малкин З.М.* Пулковский сводный каталог координат радиоисточников PUL 2013 // Письма в Астрон. журн. – 2014. – т. 40. – №. 5. – С. 306–315.
19. *Arias E., Feissel M., Lestrade J.* Comparison of VLBI celestial reference frames // Astron. and Astrophys. – 1988 – V. 199. – P. 357–363.
20. *Brosche P.* Representation of systematic differences in positions and proper motions of stars by spherical harmonics // Veroff. Astron. Rechen-Inst., Heidelberg. – 1966. – №. 17. – P. 1–27.
21. *Valbousque A.* Simplification des calculs pour représenter les différences systématiques entre deux catalogues de positions stellaires // Astron. and Astrophys. – 1975. – V. 45. – P. 5–18.
22. *Schwan H.* An analytical representation of the systematic differences HIPPARCOS-FK5 // Astron. and Astrophys. – 2001. – V. 367. – №. 3. – P. 1078–1086.
23. *О. Титов, Ю. Лопез* Двухкомпонентная структура источника 0014+813 по РСДБ наблюдениям по программе CONT14 // Письма в Астрон. журн., – 2018. – т. 44. – №. 3. – С. 163–172.
24. *Titov O., Lopez Y., McCallum L.* Two-component structure of the radio source 0014+813 using CONT14 geodetic VLBI observations // EVGA proceedings (ed. R. Haas and G. Elgered.) – 2017. – P. 190–194.
25. *Behrend D., et al.* IVS 2014 General Meeting Proceedings, (Ed. D. Behrend, K.D. Baver and K. L. Armstrong), Science Press, Beijing, China, – 2014. – pp. 196.

26. *Newcomb S.* Catalogue of 1098 Standard Clock and Zodiacal Stars – 1898.
27. *Boss B.* General Catalog of 33342 Stars for the Epoch 1950. 0 // Carnegie Institution of Washington, Publ. – 1937. – №. 486.
28. *Auwers A.* Mittlere Orter von 83 sudlichen Sternen fur 1875,0 // Publ. d. Astron. Gesellschaft – 1883. – XVII.
29. *Подобед В. В., Нестеров В. В.* Общая астрометрия // М. – 1975. – pp. 551.
30. *Подобед В. В.* Фундаментальная астрометрия // М. – 1968. – pp. 452.
31. *Peters J.* Fundamentalkatalog des Berliner Astronomischen Jahrbuchs nach den Grundlagen von A. Auwers, fur die Epochen 1875 und 1900, // Veroff. Konigl. Astron. Rechen-Institut Berlin – 1907. – №. 33. – pp. 551.
32. *Kopff A.* Dritter Fundamental katalog des Berliner Astronomischen Jahrbuchs // Veroff. des Astr. Inst. zu Berlin-Dahlem – 1937. – №35.
33. *Kopff A.* Dritter Fundamental katalog des Berliner Astronomischen Jahrbuchs II // Teil: Die Zusatzsterne, Abh.d. Preuss. Ak. Wiss., math.-naturwiss. – 1938. – K1. – №. 3.
34. *Fricke W., Kopff A. et al.* Fourth Fundamental catalog (FK4) // Veroff. Astron. Rechen Inst. Heidelberg, – 1963. – №. 10.
35. *Fricke et al.* Preliminary Supplement to the FK4 (FK4 Sup) // Veroff. Astron. Rechen Inst. Heidelberg, – 1963. – №. 11.
36. *Bien R., Fricke W., Lederle T., Schwan H.* Methods for the Comparison of Systems of Star Positions to be applied in the Construction of the FK5 // Veroff. Astron. Rechen Inst. Heidelberg, – 1978. – №. 29.
37. *Wielen R., Schwan H. et al.* Sixth Catalogue of Fundamental Stars (FK6), Part I // Veroff. Astron. Rechen-Inst., Heidelberg – 1999. – P. 209.
38. *Smith, C., Scott, F.* AGK3R // Publ. USNO, Second Series – 1971. – V. XXVII.

39. *Smithsonian Astrophysical Observatory Staff* Star Catalog: Positions and Proper Motions of 258,997 Stars for the Epoch and Equinox of 1950.0 // Publications of the Smithsonian Institution of Washington, D.C. – 1966. – V. 4 – №. 4652 (переиздан в 1971).
40. *Roeser, S., Bastian, U.* // Veroff. Astron. Rechen-Inst., Heidelberg – 1991. – Vols. I and II.
41. *Зверев М.С.* Фундаментальная астрометрия // Успехи астрон. наук. – 1950. – т.5 – С. 3-110.
42. *Morgan H.* Catalog of 5268 standard stars, 1950.0, based on the Normal System N30 // Astron. Papers. – 1952. – V. 13 – P. 110–321.
43. *Vityazev V.* Brosche's method for representing systematic differences in positions and proper motions of stars // Astrometric Techniques, ed. H. K. Eichhorn and R. J. Leacock – 1986. – P. 87–94.
44. *Губанов В.С., Титов О.В.* Ковариационный анализ фундаментальных каталогов // Кинематика и физика неб. тел. – 1993. – т.9. – №. 1. – С. 56–66.
45. *Gubanov V., Titov O.* Apriori estimates of the FK5 covariance functions // evelopments in Astrometry and their Impacts on Astrophysics and Geodynamics, IAU, ed. Muller and Kolaczek – 1993. – P. 397–401.
46. *Titov O., Volkov E.* Systematic differences FK5–FK4: optimal representation // ААрТр – 1995 – V. 9. – P. 27–42.
47. *Vityazev V.* The ROTOR: a new method to derive rotation between two reference frames // Astron. and Astrophys. – 1994. – Trans. 4. – P. 195–218.
48. *Яцкив и др.* Сравнение различных методов изучения разностей положений и собственных движений звезд // Современные проблемы позиционной астрометрии. М., Изд-во Моск. ун-та. – 1975. – С. 43–59.
49. *Ryle M., Vonberg D.* // Nature – 1946. – V. 158 – Issue 4010. – P. 339–340.

50. Матвеевко Л.И., Кардашев Н.С., Шоломицкий Г.Б. О радиоинтерферометре с большой базой // Изв. высших учебных заведений – 1965. – т. 8. – №. 4. – с. 651.
51. *IERS Conventions* IERS Technical Note – 2010. – №. 36.
52. Жаров В.Е. Сферическая астрономия // Фрязино – 2006. – С. 407–420.
53. Тутов О.А. Математические методы обработки наблюдений // С.-Пб.: СПбГУ. – 2001.
54. *IERS Annual Report* – 2015. – P. 103–121.
55. Behrend D., Armstrong K.L. (Eds.): International VLBI Service for Geodesy and Astrometry and Astrometry 2014 Annual Report // NASA/TP-2015-217532 – 2014. – P. 210–212.
56. *IERS Implementation of the IERS Celestial Reference Frame*, IERS Annual Report 1993 // Observatoire de Paris – 1994. – II–23–II–41.
57. Johnston K. J., et al. A Radio Reference Frame // *Astron. J.* – 1995. – V. 110. – pp. 880.
58. Соколова Ю.Р., Малкин З.М. О влиянии учета корреляционной информации на параметры взаимной ориентации небесных систем отсчета // Вестник СПбГУ. – 2013. – т. 1. – №. 4. – С.146–151.
59. Sokolova Y., Malkin Z. On impact of the correlation information on the orientation parameters between celestial reference frames // In: IAG 150 Years, C. Rizos, P. Willis (eds.), IAG Symposia. – 2016.- – V. 143.- – P. 41–44.
60. Jacobs C.S., Heflin M.B., Lanyi G.E., et al. // IVS 2010 General Meeting Proc. Eds. D. Behrend, K. D. Baver. NASA/CP-2010-215864. – 2010 – P. 305-309.
61. Arias, E., Bouquillon S. Representation of the International Celestial Reference System (ICRS) by different sets of selected radio sources // *Astron. Astrophys.* – 2004. – V. 422. – P.1105–1108.

62. *Lambert S., Gontier A.* On radio source selection to define a stable celestial frame // *Astron. Astrophys.* – 2009. – V. 493. – №. 1. – P.317–323.
63. *Arias E., Charlot P., Feissel M., Lestrade J.* The Extragalactic Reference System of the International Earth Rotation Service, ICRS // *Astron. Astrophys.* – 1995. – P. 604–608.
64. *Fey, A., Ma, C., Arias, E., et al.* The second extension of the international celestial reference frame // *Astron. J.* – 2004. – V. 127. – №. 6. – P. 3587–3608.
65. *Lovell J.* The AuScope VLBI Array // *IVS 2012 General Meeting Proceedings* – 2012. – P. 176–180.
66. *Тумов О.А.* Результаты работы Австралийской сети малых радиотелескопов (Auscope) в 2011–2013 гг // презентация на семинаре Института Прикладной Астрономии РАН – 2013.
67. *Jacobs C.S., et al.* X/Ka VLBI frame’s role in multi-wavelength studies // *Proc. Journees 2011: Astrometry, Geodynamics and Solar System Dynamics*, Eds. A. Finkelstein and N. Capitaine – 2011. – P. 90–91.
68. *Lanyi et al.* // The Celestial Reference Frame at 24 and 43 GHz. I. Astrometry, *Astron. J.*, – 2010. – Vol. 139. – №. 3. – P. 1695-1712.
69. *Hog E., Fabricius C., Makarov V.V., Urban S., Corbin T., Wycoff G., Bastian U., Schwekendiek P., Wicenec A.* The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars // *Astronomy and Astrophysics.* – 2000. – V. 355. – P. L27.
70. *Malkin Z.* On assessment of stochastic errors of radio source position catalogues // *IAU XXVIII General Assembly, JD7*, poster JD-7-3-1364, – 2012. – Beijing, China, 27–29 Aug 2012.
71. *Feissel-Vernier, M., Ma, C., Gontier, A.-M., Barache, C.* Analysis strategy issues for the maintenance of the ICRF axes // *Astron. Astrophys.* – 2006. – V. 452. – P. 1107–1112.

72. *Витязев В.В.* Анализ астрометрических каталогов с помощью сферических функций // Изд-во Санкт-Петербургского университета. – 2017 – с. 220.
73. *Курьянова А.Н., Яцкив Я.С.* Сводный каталог положений внегалактических радиоисточников RSC (GAO UA) 91 C 01 // Кинемат. и физ. неб. тел. – 1993. – т. 9. – №. 2. – С. 15-25.
74. *Yatskiv Y., Malkin Z.* Next ICRF: Single global solution versus combination // Presentation at Journees 2007 Systemes de Reference Spatio-temporels, Paris, France, 17–19 Sep 2007.
75. *Malkin Z.* // Proc. Journees 2003: Astrometry, Geodynamics and Solar System Dynamics: from milliarcseconds to microarcseconds, Eds. A. Finkelstein and N. Capitaine – 2004. – P. 24–31.
76. *A. Fey, M. Eubanks and K. Kingham* The Proper Motion of 4C39.25 // Astron. J. – 1997.– V. 114. – P. 2284–2291.
77. *A. Alberdi, J. Gomez, J. Marcaide, et al.* Witnessing the interaction between a moving and a stationary component // Astron. Astrophys. – 2000. – Vol. 361. – P. 529–534.
78. *Тумов О.А.* Видимые движения радиоисточников по данным геодезических РСДБ-наблюдений // Письма в Астрономический Журнал – 2016. – V. 33. – №. 7. – С. 542–549.
79. *Thomas J.* An analysis of source structure effects in radio interferometry measurements // JPL publication , JPL, Pasadena, California Dec 15 – 1980. – P. 80–84.
80. *Sovers, O. J., Charlot, P., Fey, A. L., et al.* Structure correction in modelling VLBI delays for RDV data // in IVS 2002 General Meeting Proceedings, ed. N. R. Vandenberg, K. D. Baver (Japan) – 2002. – P. 243–247.

81. *Tornatore V., Charlot P.* The impact of radio source structure on European geodetic VLBI measurements // J. Geod. – 2007. – V. 81. – P. 469–478.
82. *Hu M., Heinkelmann R. et al.* The source structure of 0642+449 detected from the CONT14 observations // Astron. Journ. – 2016. – V. 152. – №. 5. – pp. 11.
83. *H. Hirabayashi, H. Hirose, and H. Kobayashi* Overview and initial results of the very long baseline interferometry space observatory programme // Science – 1998.– V. 281. – Issue 5384. – P. 1825–1829.
84. *A. Fey and P. Charlot* VLBA observations of radio reference frame sources. II. Astrometric suitability based on observed structure // Astroph. J. Suppl. – 1997. – V. 111. – P. 95–142.
85. *Titov O., Tesmer, V., Boehm, J.* OCCAM v. 6.0 Software for VLBI data analysis // IVS for Geodesy and Astrometry General Meeting Proceedings – 2004. – P. 267–271.