



Связь радио и оптической небесных систем отсчета

З. М. Малкин

malkin@gao.spb.ru

Мотивация

Через несколько лет ожидается появление оптической небесной системы отсчета, полученной по наблюдениям космического аппарата Gaia в 2014-2019+ гг., **GCRF (Gaia Celestial Reference Frame)** положений звезд и внегалактических объектов, внутренне согласованный на микросекундном уровне точности.

К этому же времени запланирован выход новой версии небесной радио-системы отсчета **ICRF (International Celestial Reference Frame)** близкой точности, создаваемой на основе обработки РСДБ-наблюдений с 1979 г.

Обе системы отсчета ICRF и GCRF должны быть реализациями единой небесной системы координат **ICRS**.

Поэтому стоит вопрос о согласовании систем ICRF и GCRF на микросекундном уровне точности.

Радио - ICRF-3

- ~4000 радиоисточников с суб-мсд ошибкой (от ~20 мксд).
- Каталоги в разных диапазонах:
 - X/S (2.2/8.2 ГГц, 4000+ р/и),
 - K (24 ГГц , 500+ р/и),
 - X/Ka (8/32 ГГц , 600+ р/и),
 - (?) Q (43 ГГц).
- Стабильность ориентации: 10 мксд.

Проблемы

- Структура радиоисточников (часто переменная!); зависит от длины волны, включая несовпадение центроидов радиояркости на разных длинах волн (core-shift effect, до 100 мксд).
- Атмосферные ошибки (тропосфера, ионосфера).
- Нелинейное движение станций.
- (=> ?) Систематические разности между каталогами в разных диапазонах.
 - (обсуждались на Journées 2014)

- Запущен 19.12.2013
- Старт научной программы 18.07.2014
- Программа рассчитана на 5 лет, возможно продление
- 225×10^9 астрометрических наблюдений, $2 < G < 20.7$
- координаты $\sim 10^9$ объектов, в т.ч. $\sim 500,000$ квазаров и АЯГ
- ожидаемая точность координат (точечных!) объектов:
8 мксд ($m=13$), 100 мксд ($m=18$), 470 мксд ($m=20$)

(Prusti, 2015; Mignard, 2015; Bruijne, 2015)

Проблемы

- структура оптических изображений квазаров (host galaxy) и радиогалактик
- яркие галактики ($m < \sim 16$) не могут эффективно наблюдаться

Задачи

1. Определение ориентации ICRF-GCRF на определенную эпоху, например J2000.0 или средняя эпоха наблюдений GCRF.
2. Определение взаимного вращения ICRF-GCRF.

HIPPARCOS (Kovalevsky et al., 1997):

"the coordinate axes defined by the published catalogue are believed to be aligned with the extragalactic radio frame to within ± 0.6 mas at the epoch 1991.25, and non-rotating with respect to distant extragalactic objects to within ± 0.25 mas/yr".

Стоит задача улучшить эти точности в несколько раз (на порядок?!) для связи ICRF-GCRF.

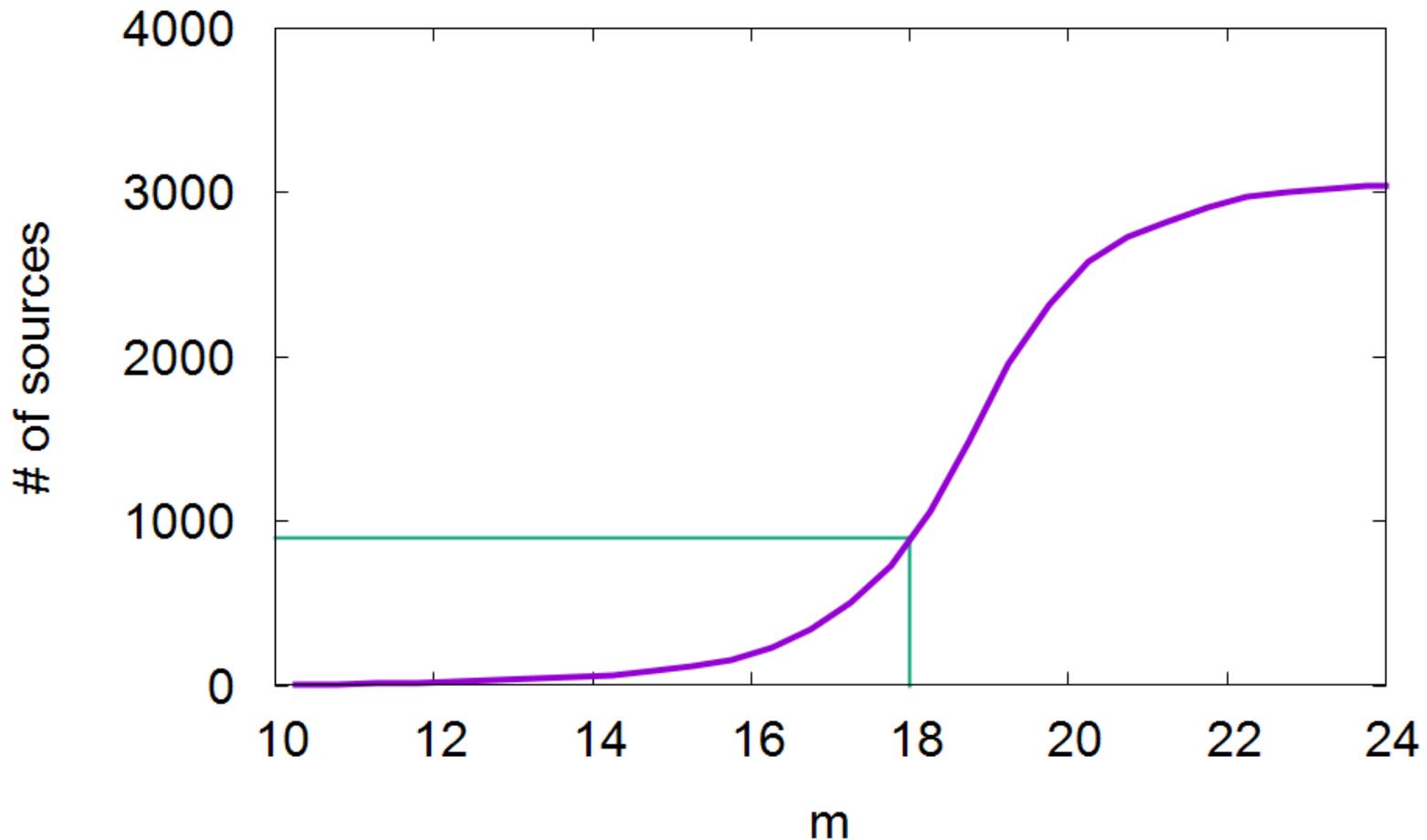
Направления работы

1. Позиционные оптические наблюдения радиоисточников ICRF.
2. Фотометрические оптические наблюдения радиоисточников ICRF.
3. Усиленные РСДБ-наблюдения избранных оптически-ярких и компактных радиоисточников.
4. Банки данных оптических и радио изображений.

Исходные данные

1. Наблюдения в оптике и радио избранных общих объектов. Критерии выбора: оптическая и радио яркость, отсутствие значительной структуры в радио диапазоне.
2. Дополнительные данные больших каталогов для уточнения собственных движений общих объектов.

Распределение источников ICRF2 по m



Общее число астрометрических радиоисточников в несколько раз больше, чем содержится в ICRF (см. Петров, каталог RFC), так же в несколько раз больше число оптически ярких радиоисточников (см. Малкин, каталог OCARS). Но применение дополнительных критериев (структура) снижает выбор также в несколько раз (*Bourda, et al., 2008-2015*).

Оптические позиционные наблюдения

В первую очередь, известны работы USNO:

Несколько наблюдательных программ в 1997-2004 гг.; определены оптические положения 413 объектов (АЯГ) по всему небу; исследованы ошибки и их влияние на параметры ориентации радио-оптика; сделан пессимистический вывод, что параметры связи не могут быть определены лучше 0.5 мсд без существенного увеличения числа общих объектов (Zacharias & Zacharias, AJ, 2014)

URAT1: 228 млн объектов, $R=3-18.5$, типичная ошибка координат 10-30 мсд, ошибка собственных движений 5-7 мсд/год для 188+ млн объектов (Zacharias et al., 2015)

НО: только северное небо $\delta > -15$

Оптические фотометрические наблюдения

Taris et al., 2013, 2015

Четыре телескопа: Франция (2), Чили, Австралия

V и *R* фотометрия

Изображения:

оценка компактности, морфологический индекс

Начата программа наблюдений источников OCARS

Bourda et al., 2008-2015

- Выбор оптически ярких радиоисточников (в т.ч. дополнительно к ICRF.
- Тестовые РСДБ-наблюдения (EVN) для определения их пригодности для астрометрии.
- Изучение структуры источников, включая специальные наблюдения и отсеивание объектов со сложной структурой.
- Астрометрические РСДБ-наблюдения (IVS и др.) для определения точных координат и включения в ICRF.

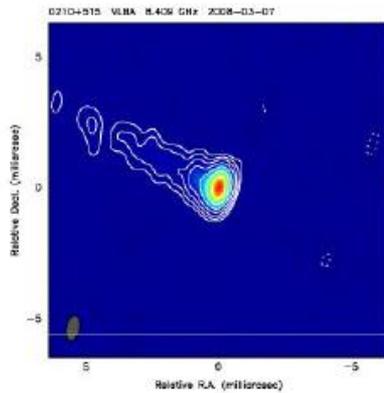
Цель: получить несколько сотен источников равномерно распределенных по небу и пригодных для высокоточных позиционных наблюдений в радио и оптике.

На сегодня отобрано ~400 источников для связи ICRF-GCRF.

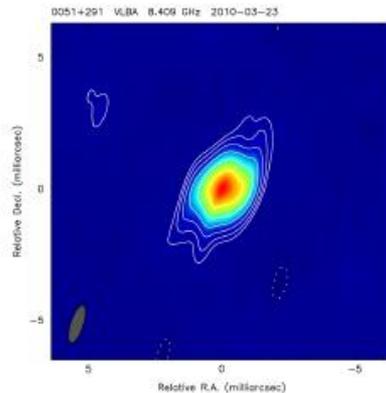
РСДБ-наблюдения избранных р/и

Examples of VLBI maps for « bad » sources

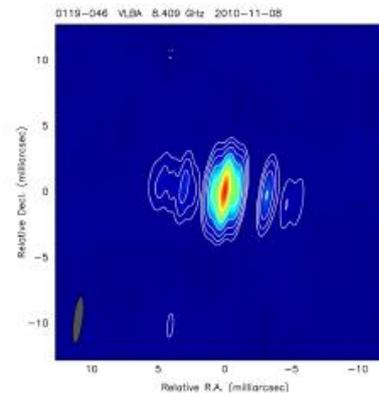
GC030



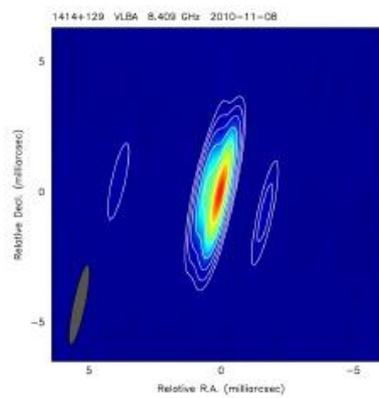
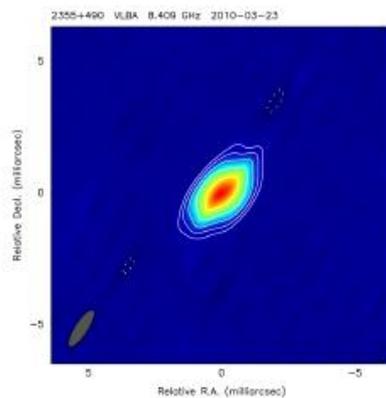
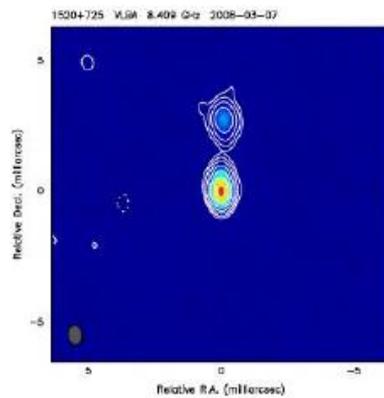
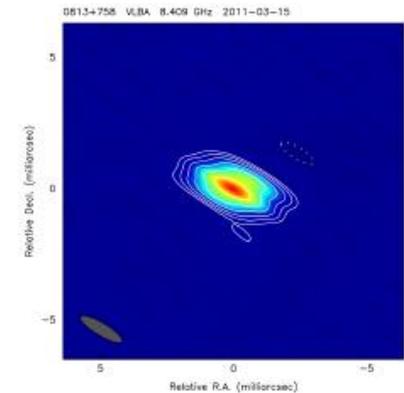
GC034A



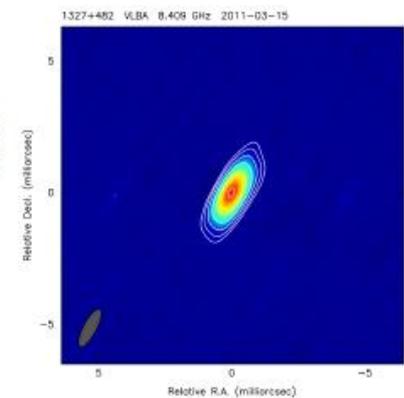
GC034BCD



GC034EF



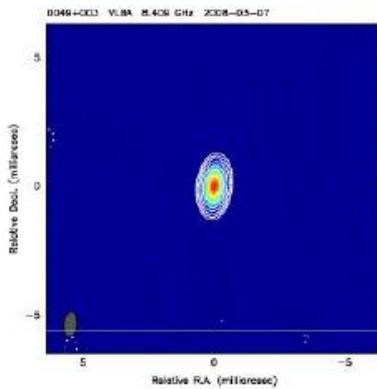
~10 mas



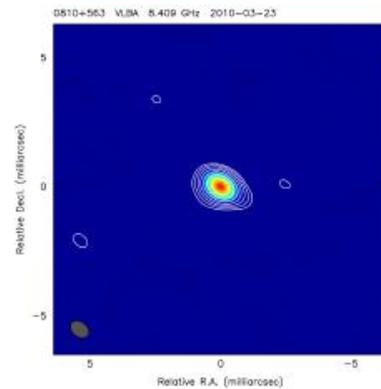
РСДБ-наблюдения избранных р/и

Examples of VLBI maps for « good » sources

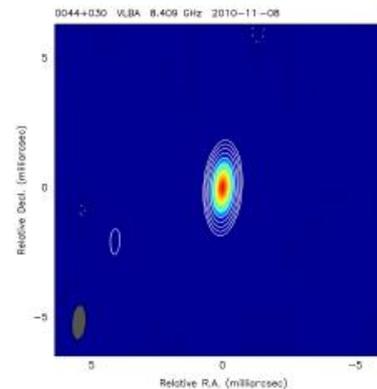
GC030



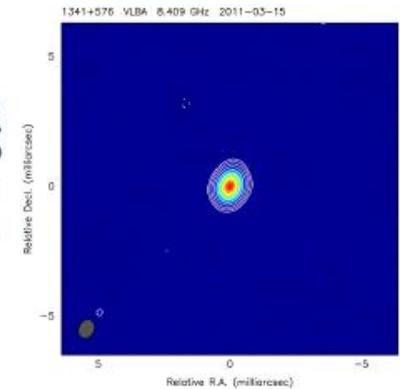
GC034A



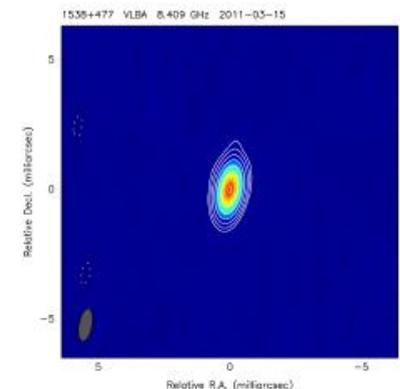
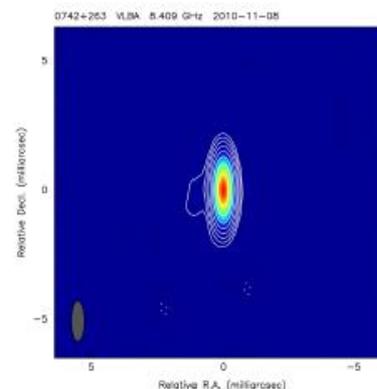
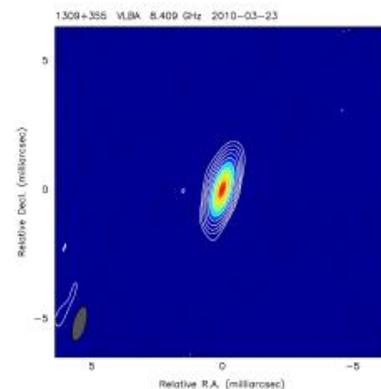
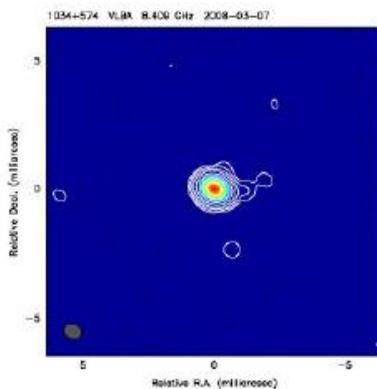
GC034BCD



GC034EF



~10 mas



■ Радио:

RRFID (Radio Reference Frame Image Database), USNO, *Fey et al.*
(~ 1400 карт 400 p/и ?)

BVID (Bordeaux VLBI Image Database), *Charlot et al*
(~ 4500 карт 1200 p/и)

RFC, *Petrov*
(~ 40,000 карт 6500 p/и)

■ Оптика:

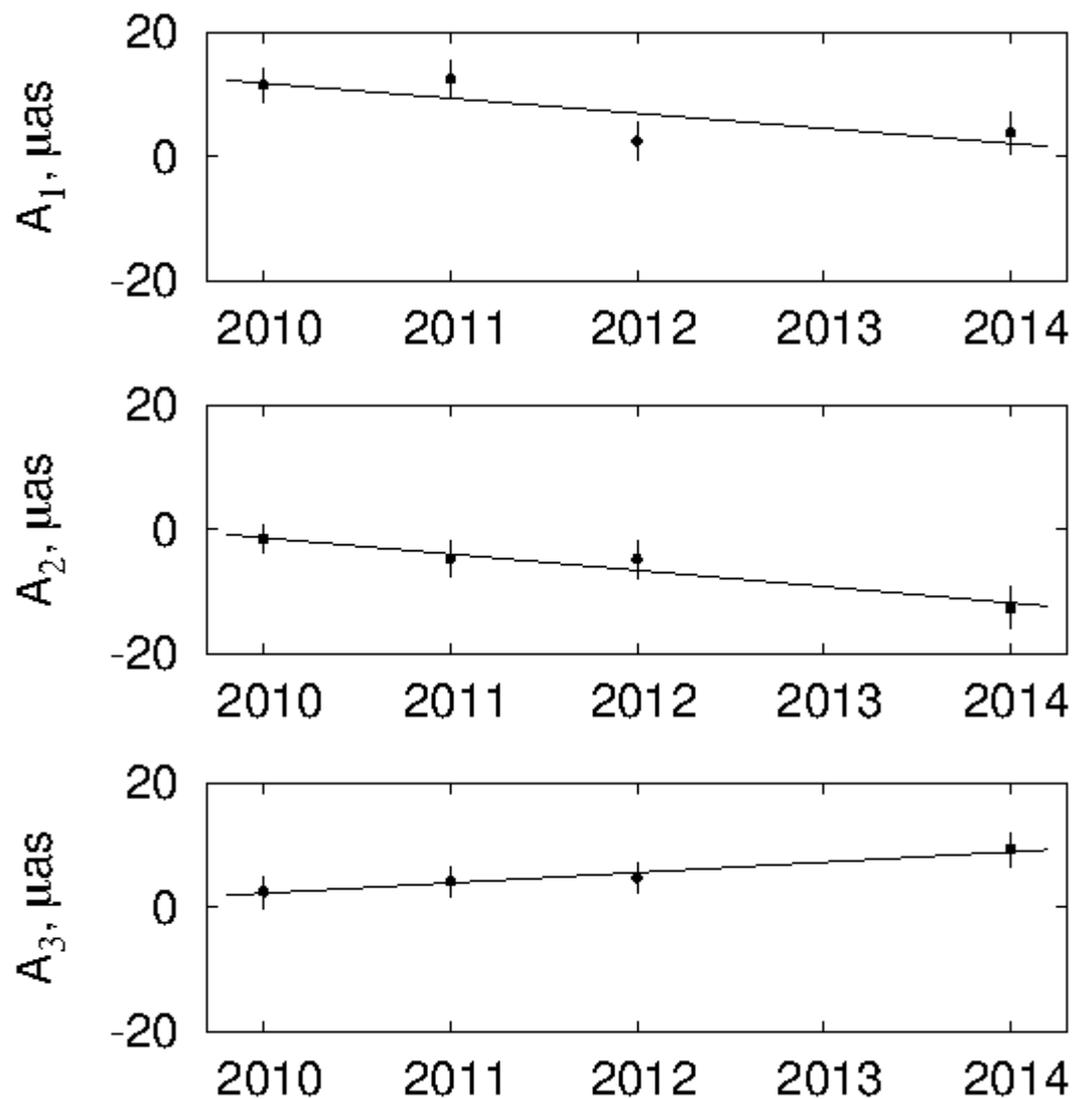
Complete Bank of Optical Images of the ICRF, *Andrei et al. 2015*
(300,000+ карт)

Известные проблемы связи радио-оптика

- Взаимная идентификация объектов в ICRF и GCRF.
- Кратные радиоисточники, BBH (binary black hole).
- Гравитационные линзы.
- Несовпадение центров излучения в радио и оптике; до 10 мсд (Zacharias & Zacharias, 2014); Orosz & Frey (2013) приводят примеры разности положений в радио и оптике до 170 мсд; Camargo et al. 2011) дают 80 мсд.
- Систематика радиокаталогов; зональные ошибки.
- Вращение ICRF.

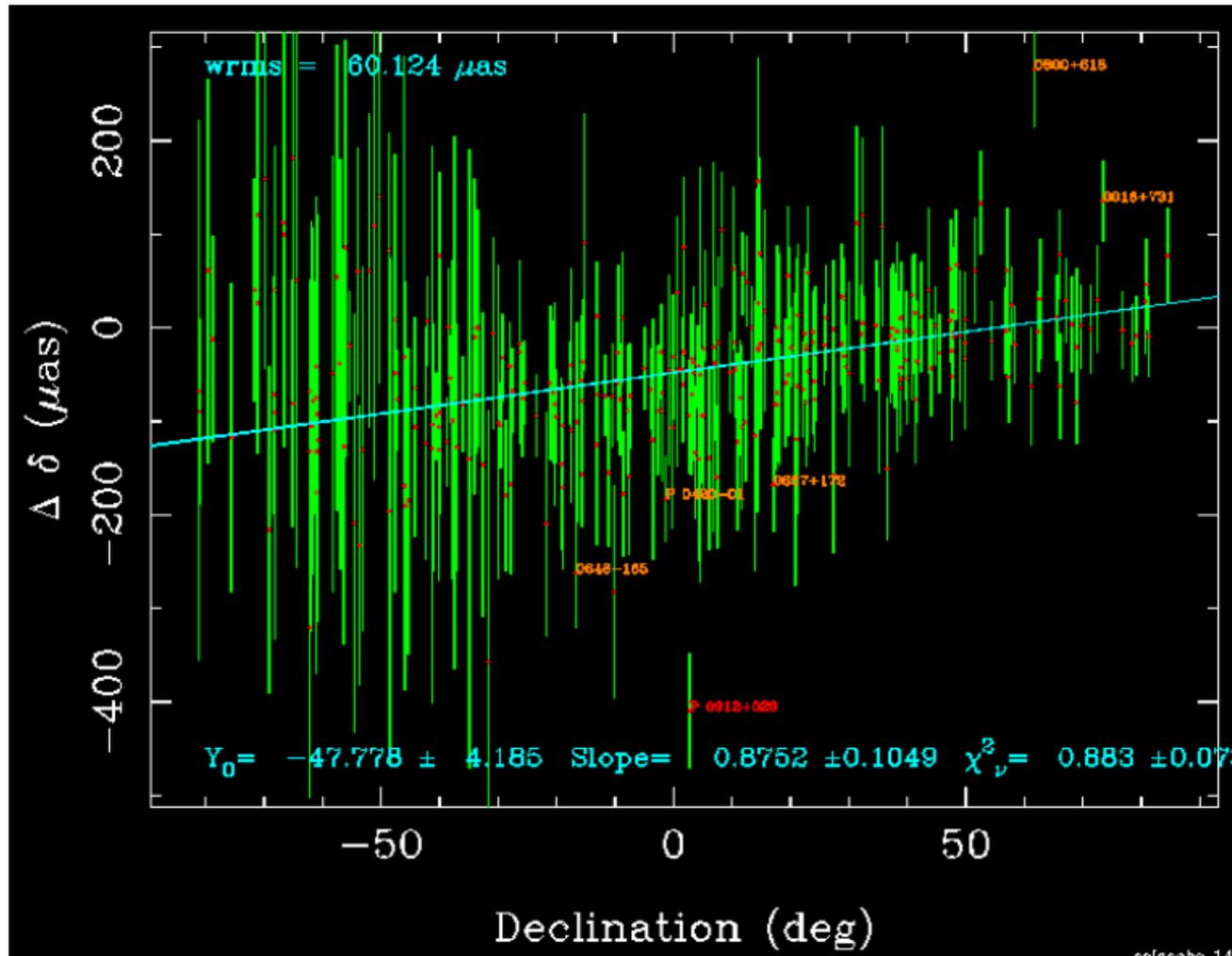
(см. также Makarov, 2015; Roland & Lambert, 2015)

Вращение каталогов GSFC относительно ICRF2



Ошибки ICRF

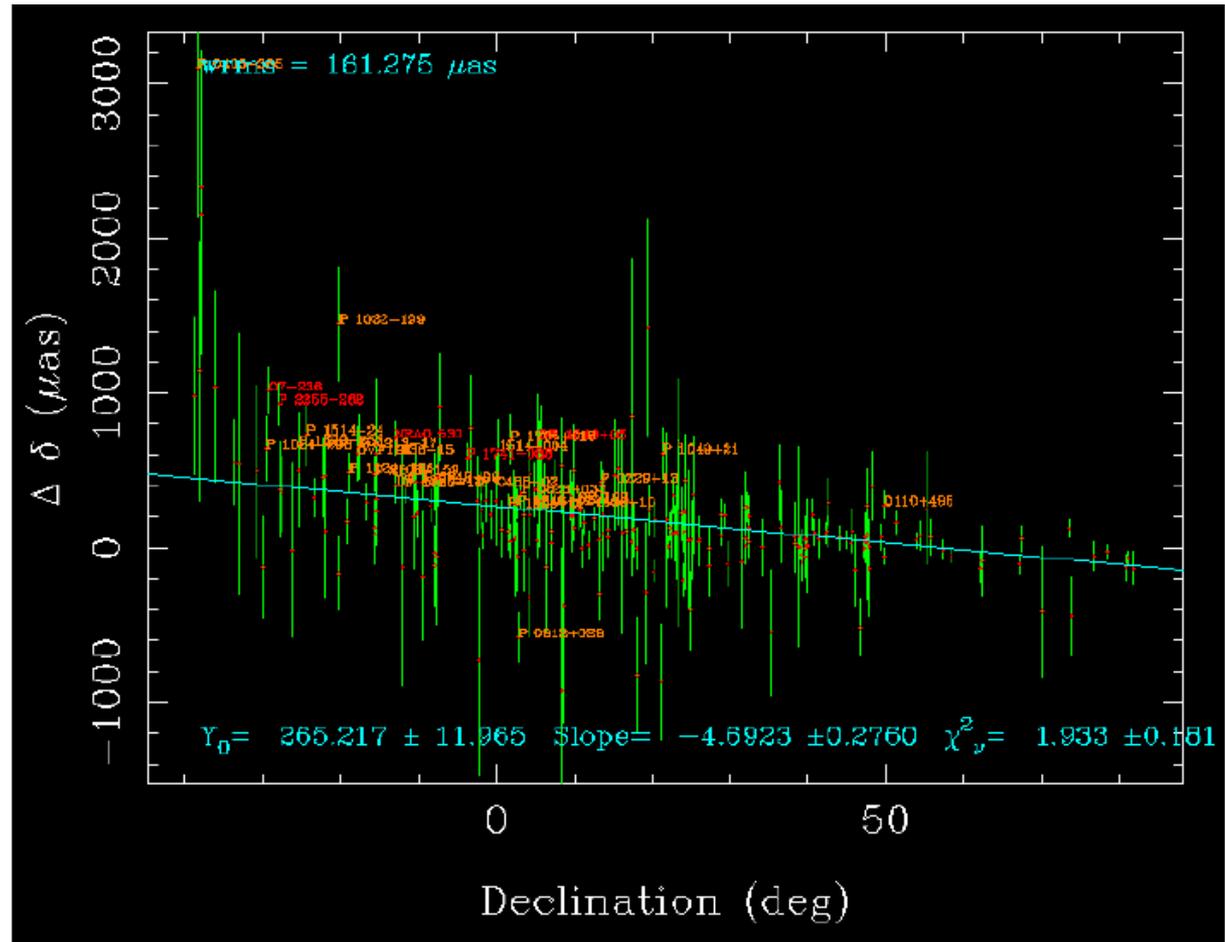
S/X zonal errors: ICRF2-Def vs. Recent S/X



Ошибки ICRF

Lack of direct
Dual-band ion
Calibrations
and
Lack of any
Station in south

Leads to poor
 ΔDec vs. Dec
Zonal stability:
500 μas tilt

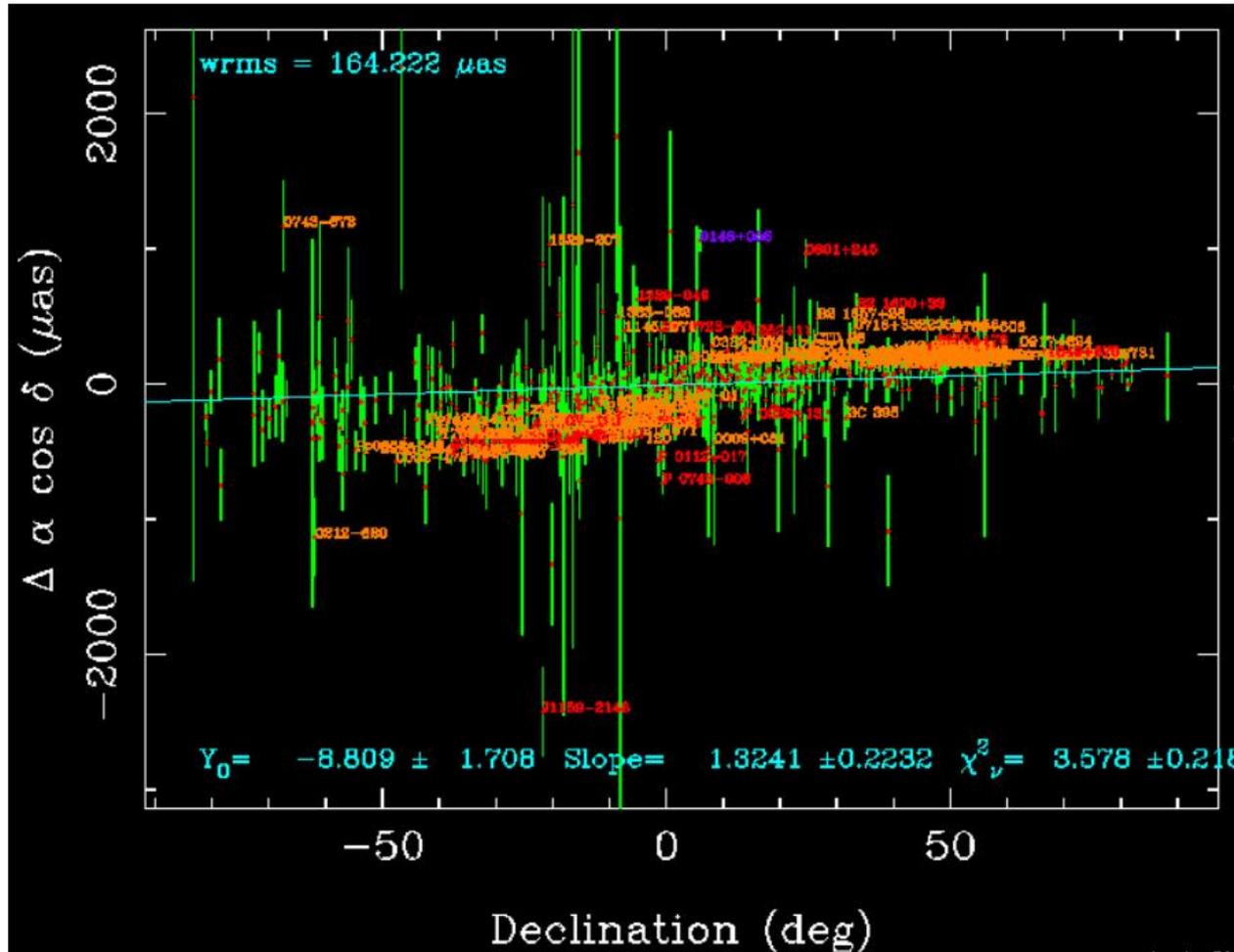


K(1.2cm) Declinations vs. S/X ICRF2 (current IAU standard)

Ошибки ICRF



XKa vs. SX: Zonal errors



Zacharias et al., ...-2015

URAT - VLBI

SDSS - VLBI

DARN (detrimental, astrophysical, random noise) study

Makarov et al., ...-2015

PanSTARRS - WISE - VLBI

Заключение

- Сочетание различных методов связи ICRF и GCRF должно обеспечить наиболее точно их взаимную ориентацию и вращение. Принимая во внимание намного более высокую точность ожидаемых радио и оптической систем, можно надеяться достигнуть точности параметров связи ICRF-GCRF в 5-10 раз лучше, чем в случае ICRF-HIPPARCOS. Но для реализации этого потенциала необходимы большие дополнительные теоретические и наблюдательные усилия.
- С точки зрения фундаментальной астрометрии нужна единая многодиапазонная ICRF, реализующая ICRS на (суб-)мсд уровне точности в оптике, радио (разные диапазоны), ИК, ...

Спасибо за внимание!