

Учёт структуры радиоисточника при обработке геодезических РСДБ-наблюдений на примере источника 0014+813

© С. Л. Курдубов, А. Б. Сербин

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Данная статья посвящена исследованию возможности учёта структуры радиоисточника при обработке данных РСДБ-наблюдений. Определяемая по РСДБ-наблюдениям групповая задержка сигнала от внегалактических радиоисточников между двумя удалёнными радиотелескопами является суммой задержек, обусловленных различными эффектами, в том числе структурой радиоисточника. Многие из источников, входящих в Международную небесную систему отсчёта (ICRF), имеют пространственно-протяжённую структуру, поэтому структурную задержку необходимо учитывать при обработке результатов РСДБ-наблюдений. Однако на практике моделирование структурной задержки сталкивается со многими проблемами, одной из которых является изменчивость структуры источника.

Метод исследования основан на построении численной модели структурной задержки с использованием формул, приведённых в статье Патрика Шарло. В качестве входных данных использовались FITS-файлы, содержащие карты радиояркости из базы данных за 2018–2019 гг. (http://astrogeo.org/vlbi_images/) и невязки, полученные в результате обработки данных суточных РСДБ-наблюдений на корреляторе DiFX за тот же период времени. При расчётах использовались не пиксели карты радиояркости, содержащейся в FITS-файле, а функции Гаусса, аппроксимирующие карту радиояркости, содержащиеся в том же FITS-файле. Написанная программа позволяет моделировать карты радиояркости путём отбора наиболее ярких структурных элементов карты источника, учёт которых максимально уменьшает СКО невязок.

В начале работы была написана программа вычисления структурной задержки сигнала в зависимости от всемирного времени. Для тестирования программы было выполнено сравнение полученной зависимости для радиоисточника NRAO140 (0333+321) с данными из оригинальной статьи. Далее с использованием этой программы были вычислены ионосферно-свободные комбинации структурных задержек в зависимости от звёздного времени. При сравнении полученных задержек для источника 0014+813 с невязками, полученными коррелятором DiFX, была обнаружена схожесть их зависимостей от звёздного времени. Так же были вычислены СКО невязок после вычитания из них ионосферно-свободных комбинаций структурных задержек. Было показано, что учёт всех гауссиан модели радиоисточника не приводит к значительному уменьшению СКО для большинства FITS-файлов. Поэтому в программу был добавлен специальный блок, по определённому алгоритму отбирающий гауссианы, учёт которых наилучшим образом уменьшает СКО невязок. Применение данного алгоритма привело к существенному уменьшению СКО невязок при использовании всех FITS-файлов.

Ключевые слова: РСДБ, внегалактический радиоисточник, задержка сигнала от радиоисточника, структурная задержка, карта радиояркости, ионосферно-свободная комбинация задержек, функция Гаусса.

Контакты для связи: Сербин Арсений Борисович (ab.serbin@iaaras.ru).

Для цитирования: Курдубов С. Л., Сербин А. Б. Учёт структуры радиоисточника при обработке геодезических РСДБ-наблюдений на примере источника 0014+813 // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 66. С. 18–28.
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.66.18-28>

Accounting for the Structure of a Radio Source in the Processing of Geodetic VLBI Observations Using the 0014+813 Source as an Example

S. L. Kurdubov, A. B. Serbin

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

This article is devoted to studying the possibilities of taking into account the structure of a radio source when processing VLBI observation data. The group delay of a signal from extragalactic radio sources between two remote radio telescopes, determined from VLBI observations, is the sum of delays due to various effects, including the structural structure of the radio source. Many of the sources included in the International Celestial Reference Frame (ICRF) have a spatially extended structure, so the structural delay must be taken into account when processing the results of VLBI observations. However, in the example of structural structure modeling, there are problems, one of which is the variability of the source structure.

The research method is based on constructing a numerical model of the structural delay using the formulas given in the article by Patrick Charlot. As input data, we used FITS files containing radio brightness maps from the <http://>

astrogeo.org/vlbi_images/ database for 2018–2019 and residuals obtained as a result of processing daily VLBI observation data on the DiFX correlator for the same period of time. In the calculations, we used not the pixels of the radio brightness map contained in the FITS file, but Gaussian functions that approximate the radio brightness map contained in the same FITS file. The written program allows you to simulate radio brightness maps by selecting the brightest structural elements of the source map, taking into account which minimizes the standard deviation of the residuals.

At the beginning of the work, a program was written to calculate the structural delay of the signal depending on universal time. To test the program, the obtained dependence for the radio source NRAO140 (0333+321) was compared with the data from the original article. Next, using this program, ionospheric-free combinations of structural delays were calculated depending on sidereal time. When comparing the obtained delays for source 0014+813 with the residuals obtained by the DiFX correlator, the similarity of their dependences on sidereal time was discovered. The standard deviations of the residuals were also calculated after subtracting from them the ionospheric-free combinations of structural delays. It was shown that taking into account all Gaussians of the radio source model does not lead to a significant reduction in the standard deviation for most FITS files. Therefore, a special block was added to the program, using a certain algorithm to select Gaussians, taking into account which best reduces the standard deviation of the residuals. The use of this algorithm led to a significant reduction in the standard deviation of residuals when using all FITS files.

Keywords: extragalactic radio source, radio source signal delay, group delay, structural delay, radio brightness map, VLBI, ionospheric-free delay combination, Gaussian function.

Contacts: Arseniy B. Serbin (ab.serbin@iaaras.ru).

For citation: Kurdubov S. L., Serbin A. B. Accounting for the structure of a radio source in the processing of geodetic VLBI observations using the 0014+813 source as an example // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 66. P. 18–28. <https://doi.org/10.32876/AplAstron.66.18-28>

Введение

Многие из радиоисточников, задействованных в реализации Международной небесной системы отсчета (ICRF), имеют пространственно-протяжённую структуру (Xu et al., 2019), поэтому структурную задержку необходимо учитывать при обработке РСДБ-наблюдений. Однако при моделировании структурной задержки на практике возникают такие проблемы, как временная изменчивость и частотная зависимость структуры источника (Charlot, 2002). Поэтому, несмотря на то что формулы, моделирующие структурную задержку, были выведены более 30 лет назад (Charlot, 1990), при обработке РСДБ-наблюдений они не используются, и структурная задержка продолжает вносить искажения в параметры, определяемые при помощи РСДБ. Это значит, что учёт структурной задержки остаётся актуальной проблемой.

В данной работе исследована возможность учёта структуры источника по картам радиояркости путём нахождения наименее изменчивых частей источника. Для этого использовались остаточные невязки задержек, полученные после уравнивания геодезических РСДБ-наблюдений. Существенный вклад структурной задержки в остаточные невязки был доказан ранее. Так, в статье (Anderson, Xu, 2018, с. 168–170) проводился анализ остаточных невязок, полученных в ходе кампании РСДБ-наблюдений CONT14. Анализ показал, что для квазаров с высоким структурным индексом зависимость невязок от угла поворота базы более выражена, чем для квазаров с низким структурным индексом. Это говорит о том, что структура источника вносит в них существенный вклад. Возможность использовать остаточные невязки для определения структурной задержки уже

рассматривалась ранее. Так, в статье (Titov, Lopez, 2018) они использовались для построения двухкомпонентной модели источника 0014+813, которая позволяет максимально уменьшить СКО невязок за вычетом структурной задержки.

Для дальнейших расчётов был выбран квазар 0014+813, так как он является одним из ярчайших квазаров во Вселенной (Kühr, et al., 1983; Ghisellini et al., 2009). Вместе с тем известно, что квазар 0014+813 обладает протяжённой структурой. Так, на частоте 1.6 ГГц вдоль направления север – юг, наблюдается джет с узлами на расстоянии 5 и 10 мс дуги от ядра (Hirabayashi et al., 1998). На частоте 8.4 ГГц также наблюдается джет, простирающийся от ядра на расстояние 5 мс дуги вдоль направления север – юг (Fey, Charlot, 1997). Кроме того, благодаря большому склонению источник 0014+813 может наблюдаться круглосуточно практически на всех базах Северного полушария.

В качестве исходных данных использовались карты радиояркости из базы данных (http://astrogeo.org/vlbi_images/) и невязки, полученные в ходе обработки результатов ежесуточных РСДБ-наблюдений, проводимых с целью определения поправок к всемирному времени. В ходе этих наблюдений определяются значения групповой задержки, далее для тех же моментов времени вычисляются модельные значения групповой задержки, затем из решения параметрических уравнений методом наименьших квадратов определяются поправки к всемирному времени (Губанов, 1997), а также получаются невязки задержек.

Невязки, полученные за 2018 и 2019 годы для базы «Зеленчукская — Бадарь», были сгруппированы по наблюдаемым радиоисточникам, затем для каждого источника были построены зависимости этих невязок от звёздного времени. В этих за-

висимостях были обнаружены систематические отклонения, обладающие зеркальной симметрией при сдвиге на 12 ч. Это может объясняться влиянием структуры источника, так как ее вклад в групповую задержку не учитывался при определении поправок к всемирному времени.

Моделирование структурной задержки

Для вычисления структурной задержки были использованы формулы, приведённые в (Charlot, 1990); согласно им выражение для структурной задержки τ_s имеет следующий вид:

$$\tau_s(\omega) = \frac{1}{c}(\vec{B} \cdot \vec{OP}_0) + \frac{\left(Z_s \frac{\partial Z_c}{\partial \omega} - Z_c \frac{\partial Z_s}{\partial \omega} \right)}{Z_c^2 + Z_s^2}, \quad (1)$$

где \vec{B} — вектор базы, \vec{OP}_0 — единичный вектор в направлении точки P_0 (центр радиояркости источника) из точки O (центр Земли), а Z_s и Z_c имеют вид:

$$Z_s = \iint I(P, \omega, t) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \vec{B} \cdot \vec{OP}\right) d\Omega, \quad (2)$$

$$Z_c = \iint I(P, \omega, t) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \vec{B} \cdot \vec{OP}\right) d\Omega, \quad (3)$$

и $I(P, \omega, t)$ — функция распределения яркости, \vec{OP} — единичный вектор в направлении точки P (точка на изображении источника, отличная от центра), Ω — телесный угол, $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ — круговая частота принимаемого излучения.

Для модели, представляющей распределённый в пространстве источник, в качестве совокупности двумерных функций Гаусса с максимумом в точке P_k , Z_s и Z_c представляются в виде:

$$Z_s = \sum_{k=1}^n \left[S_k e^{-2\pi^2(a_k^2 U_k^2 + b_k^2 V_k^2)} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \vec{B} \cdot \vec{OP}_k\right) \right], \quad (4)$$

$$Z_c = \sum_{k=1}^n \left[S_k e^{-2\pi^2(a_k^2 U_k^2 + b_k^2 V_k^2)} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \vec{B} \cdot \vec{OP}_k\right) \right], \quad (5)$$

где

$$a_k = \frac{FWHM_k(\text{major axis})}{2\sqrt{2 \ln(2)}},$$

$$b_k = \frac{FWHM_k(\text{minor axis})}{2\sqrt{2 \ln(2)}},$$

$$U_k = u \cdot \sin(\psi_k) + v \cdot \cos(\psi_k),$$

$$V_k = -u \cdot \cos(\psi_k) + v \cdot \sin(\psi_k),$$

$$U_k = u \cdot \sin(\psi_k) + v \cdot \cos(\psi_k).$$

Здесь $FWHM_k(\text{minor axis})$ и $FWHM_k(\text{major axis})$ — полная ширина на уровне половины высоты k -й функции Гаусса вдоль малой и больших осей соответственно, ψ_k — угол, между большой осью и направлением Север — Юг, отсчитывается от направления на север против часовой стрелки, u и v — проекции вектора базы на плоскость неба по направлениям Восток — Запад и Север — Юг, выраженные в количестве длин волн.

Программа для вычисления структурной задержки

На основе формул, изложенных в предыдущем разделе, была написана программа, вычисляющая зависимость структурной задержки от всемирного времени UT.

Для тестирования программы выполнено сравнение структурной задержки для радиисточника NRAO140 (0333+321) с данными из оригинальной статьи, приведенными для интервала между 9 и 14 часами. В статье производился расчёт для частоты 5 ГГц по изображениям, полученным по наблюдениям за 1983 год. Поэтому из базы данных радио-изображений (<http://astrogeo.org/vlbi-images/>) для анализа была взята карта радиоярко-

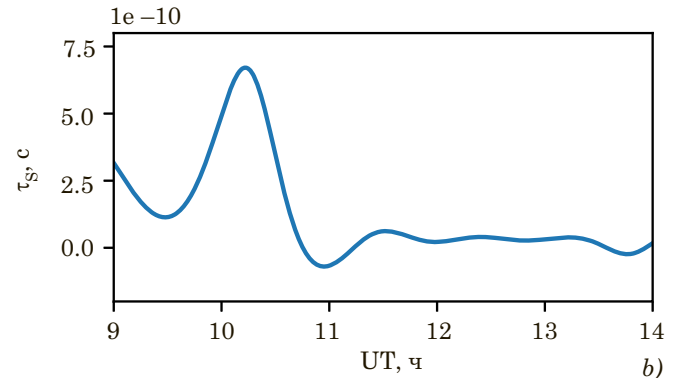
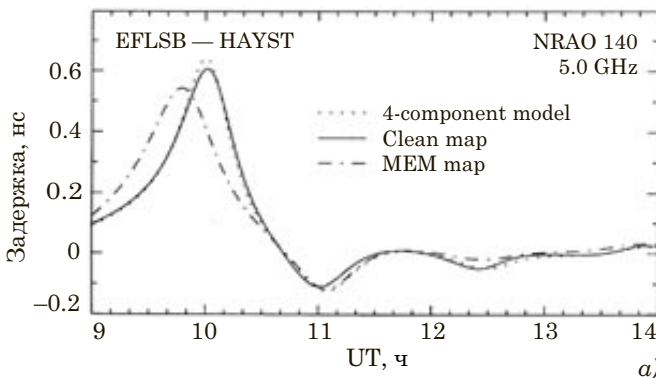


Рис. 1. Структурная задержка для базы EFLSB-HAYST: а) из статьи (Charlot, 1990) и б) построенная в программе

сти с максимально близкой частотой к исходным изображениям (4.9 ГГц) и за дату 05.06.1996, которая наиболее близка к интервалу наблюдений. При расчётах использовались гауссианы, аппроксимирующие изображение источника, находящиеся в том же FITS-файле, что и карта радиояркости источника. Было получено хорошее согласие между графиком из статьи (Charlot, 1990) и результатами вычисления с использованием программы (для базы Эффлсберг-Хайстек), что видно из графиков на рис. 1а и 1б. Различие в районе 9 ч может объясняться тем, что в статье Шарло рассматривались карты, полученные в 1983 г., а график на рис. 1б был построен по изображению за 1996 г., т.е. полученному спустя 13 лет, и структура источника за этот период могла измениться (Charlot, 2002).

Исходные данные

В качестве исходных данных использовались карты радиояркости источников (FITS-файлы) и значения остаточных невязок, полученных после уравнивания геодезических РСДБ-наблюдений.

FITS-файлы, содержащие карты радиояркости

Из базы данных (http://astrogeo.org/vlbi_images/) брались FITS-файлы, содержащие карты радиояркости за 2018–2019 гг., т.е. за тот же интервал времени, для которого были получены невязки. При расчётах использовались не пиксели карты радиояркости, а функции Гаусса, аппроксимирующие карту радиояркости. Эти гауссианы содержатся в том же FITS-файле, что и сама карта.

Невязки

Использовались невязки, полученные в ходе обработки сессий ежесуточных часовых РСДБ-наблюдений, проведенных на 13-метровых антеннах РСДБ-комплекса «Квazar-КВО» с целью определения всемирного времени в период 2018–2019 гг. Наблюдения проводились на базе «Зеленчукская — Бадары» в интервале частот 2.1639–2.6759 ГГц для S-диапазона и 8.0796–8.5916 ГГц для X-диапазона.

В ходе обработки с целью исключения влияния ионосферы используется ионосферно-свободная комбинация задержек, которая для двух частот f_1 и f_2 согласно (Sanz Subirana, 2013, с. 115) имеет вид:

$$\tau_{\text{iono-free}} = \frac{\tau_1 f_1^2 - \tau_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (6)$$

где частота f_1 принадлежит S-диапазону частот, а f_2 — X-диапазону радиочастот, τ_1 и τ_2 — соответствующие данным частотам задержки.

Из обработки каждой часовой серии наблюдений определяются всемирное время (UT1), тропо-

сферная задержка сигнала для каждой станции ($TROP_1$, $TROP_2$) и параметр рассинхронизации часов станций ($t_A - t_B$). Вектор поправок к определяемым параметрам ΔX согласно (Губанов, 1997) имеет вид:

$$\Delta X = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot (O - C), \quad (7)$$

где A — матрица частных производных вычисленной задержки по искомым параметрам, O — вектор наблюдаемых значений задержек, C — вектор вычисленных значений задержек.

После нахождения ΔX вычислялся вектор невязок $r = O - C - A \cdot \Delta X$. Затем невязки, полученные за 2018 и 2019 гг., были сгруппированы по источникам, после чего для них были построены зависимости от звёздного времени.

Поскольку наблюдения проводились по среднему солнечному времени, а зависимости анализировались по шкале звёздного времени, благодаря ежесуточному сдвигу шкал времени в течение 2 лет происходит достаточно равномерное заполнение данными всего 24-часового интервала звёздного времени.

Для дальнейших расчётов использовался радиоисточник 0014+813, так как он является одним из наиболее ярких квазаров во Вселенной (Ghisellini et al., 2009) и обладает протяженной структурой (Hirabayashi et al., 1998; Fey, Charlot, 1997). Для этого квазара было проведено 1017 наблюдений за 2018–2019 гг.

Для этого источника было обнаружено, что в зависимости невязок от звёздного времени прослеживаются систематические отклонения, имеющие зеркальную симметрию при сдвиге на 12 ч (смена минимума на максимум), что видно на графике на рис. 2. Данная симметрия может быть объяснена присутствием в невязках r структурной задержки, так как она не учитывалась при вычислении теоретических значений задержки, и поэтому проявилась в невязках.

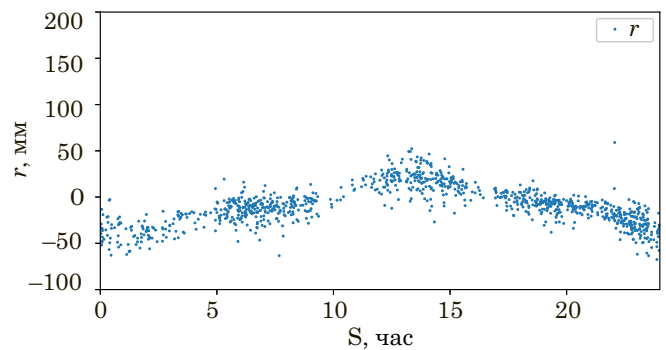


Рис. 2. Зависимость невязок r , полученных для источника 0014+813 (J0017+8135) за 2018 и 2019 гг., от звёздного времени S

Сравнение остаточных невязок и ионосферно-свободных комбинаций структурных задержек для источника 0014+813

Описанные в предыдущем разделе невязки r являются продуктом двухлетних наблюдений и в них должна проявляться наиболее стабильная часть источника. Поэтому можно сравнить их со структурными задержками, вычисленными по картам радиояркости за тот же период, что и невязки, т. е. за 2018–2019 гг. Для сравнения на рис. 3а поверх графиков с невязками r для источника 0014+813 были построены графики ионосферно-свободных комбинаций структурных задержек $L(s)$, вычисленных по формулам (1–6). Задержка в диапазоне S даёт существенно меньший вклад в ионосферно-свободную комбинацию, что можно оценить, представив формулу (6) в виде

$$\tau_{iono-free} = \tau'_S + \tau'_X, \text{ где } \tau'_S = \frac{\tau_S f_S^2}{f_S^2 - f_X^2} \text{ и } \tau'_X = -\frac{\tau_X f_X^2}{f_S^2 - f_X^2}.$$

Тогда оценку относительного вклада S и X диапазонов в невязки r можно получить в следующем виде:

$$\left| \frac{\tau'_S}{\tau'_X} \right| = \frac{\tau_S f_S^2}{f_S^2 - f_X^2} / \frac{\tau_X f_X^2}{f_S^2 - f_X^2} = \frac{\tau_S f_S^2}{\tau_X f_X^2} \sim \frac{f_S^2}{f_X^2} \sim \left(\frac{2.4}{8.3} \right)^2 \approx 0.08.$$

Здесь в качестве f_S и f_X брались середины интервалов частот, в которых проводились наблюдения. С учетом незначительного вклада задержки в диапазоне S в невязках $r(s)$ при вычислении $L(s)$ менялись только FITS-файлы с картами в X-диапазоне, а файл с картой в S-диапазоне оставался одинаковым и был взят за 29.07.2018.

Из графика на рис. 3а видно, что зависимости $L(s)$, построенные по различным картам, сильно отличаются друг от друга, даже для карт, полученных в пределах нескольких месяцев, что приводит к большому разбросу разности $r-L$ на рис. 3б. Различие проявляется и в том, что отдель-

Таблица 1

СКО разности $r-L$ при использовании всех гауссиан (σ) и разность $\sigma - \sigma_0$, где σ_0 — СКО невязок r ;

$$\sigma_0 = 76 \text{ пс}$$

Дата получения изображения в диапазоне X	σ , пс	$\sigma - \sigma_0$, пс	Число гауссиан в файле
08.04.2018	60	-16	267
02.06.2018	47	-29	671
29.07.2018	86	10	361
25.08.2018	63	-13	360
16.10.2018	63	-13	331
10.02.2019	59	-17	427

ные изображения могут значительно уменьшать СКО невязок, другие уменьшают их незначительно или даже увеличивают, что видно из табл. 1. Данный эффект может быть связан с тем, что карты источников являются недостаточно точными для вычисления по ним структурной задержки, а также с изменчивостью источника. Однако то, что зависимости $L(s)$ в основном укладываются в полосу точек $r(s)$, и СКО разности $r-L$ меньше начального для большинства изображений, подтверждает предположение о том, что невязки r содержат в себе структурную задержку. Это позволяет использовать невязки r для корректировки карт.

Алгоритм корректировки карты с использованием результатов геодезических наблюдений на примере источника 0014+813

Описание алгоритма

В предыдущем разделе было показано, что существующие карты не позволяют построить модель структурной задержки, которую можно было бы использовать на практике, так как задержки,

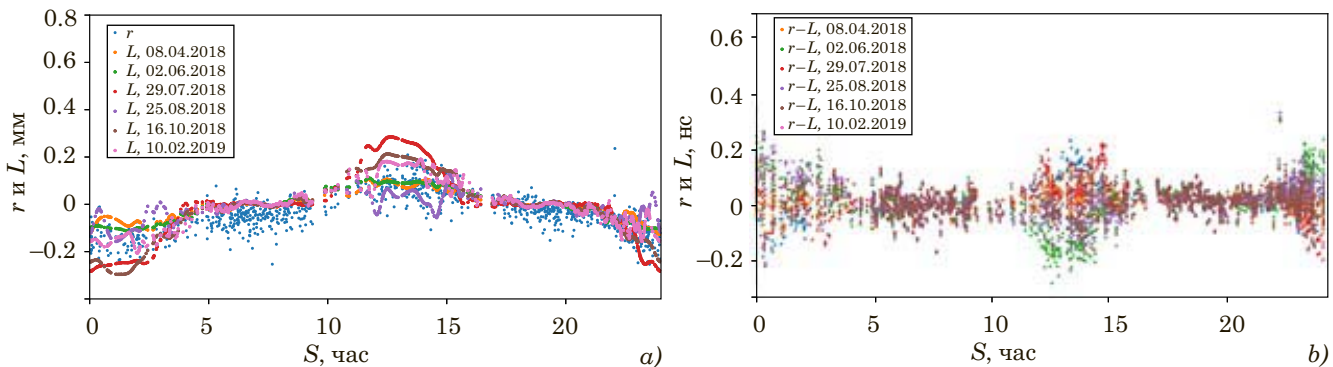


Рис. 3. Графики: а) зависимостей от звёздного времени для невязок r и ионосферно-свободной комбинации L и б) графики разностей $r-L$

вычисленные по разным картам, сильно различаются. Для корректировки карт была написана программа, находящая структурные элементы источника, учёт которых уменьшает СКО невязок r на максимальную величину.

В первой части программы, в предположении, что наиболее яркие части источника являются наиболее стабильными, находится нижняя граница значений максимумов функций Гаусса. В качестве критерия для нахождения этой границы используется уменьшение СКО невязок на максимальную величину. На первой итерации используется гауссиана с самым большим значением максимума, на каждой следующей итерации добавляется гауссиана с наибольшим значением максимума из числа ранее не использованных. Таким образом, осуществляется перебор всех гауссиан из каждого FITS-файла.

Работа первой части программы состоит из двух этапов. На первом этапе происходит отбор гауссиан из S-файла. На каждой итерации вычисляется величина τ'_S и находится СКО разности $r - \tau'_S$. Программа сохраняет значение τ'_S , давшее наименьшее СКО разности $r - \tau'_S$, далее — τ'_{S1} . На втором этапе по очереди рассматриваются X-файлы. На каждой итерации вычисляется величина τ'_X , находится СКО разности $r - \tau'_X - \tau'_{S1}$ и сохраняются значения τ'_X , соответствующие наименьшему СКО. Так же на обоих этапах сохраняются нижние границы для максимумов гауссиан, учёт которых даёт наибольшее уменьшение СКО.

Таким образом, первая часть программы отбирает гауссианы, описывающие самую яркую и наименее изменчивую часть источника. Однако этого недостаточно, так как другие гауссианы также могут содержать информацию о стабильных компонентах структуры источника. Поэтому была

написана вторая часть программы, в которой к отобранным в первой части гауссианам на каждой итерации по очереди добавляются отброшенные ранее гауссианы. В случае если они увеличивают СКО разности $r - \tau'_X - \tau'_S$, они не учитываются при вычислении структурной задержки на следующей итерации, а если уменьшают, то учитываются.

Вторая часть программы также состоит из двух этапов. На первом этапе по очереди рассматриваются X-файлы. На каждой итерации вычисляется величина τ'_X и находится СКО разности $r - \tau'_X - \tau'_{S1}$, где τ'_{S1} берётся из первой части программы. Программа сохраняет массивы значений τ'_X , при использовании которых было получено наименьшее СКО разности $r - \tau'_X - \tau'_{S1}$. На втором этапе находятся такие гауссианы из S-файла, чтобы рассчитанные по ним τ'_S давали наименьшее СКО разностей $r - \overline{\tau'_X} - \tau'_S$, где $\overline{\tau'_X}$ — усреднённые по всем файлам τ'_X . Затем снова повторяются действия для X-файлов, описанные на первом этапе, но уже с использованием новых значений τ'_S . Указанные этапы чередуются до тех пор, пока добавление новых гауссиан не будет приводить к уменьшению СКО разности $r - L$, где $L = \tau'_X + \tau'_S$.

Результаты

Результаты применения алгоритма корректировки к различным картам радиояркости квазара 0014+813 представлены в табл. 2 и 3.

Из табл. 2 видно, что использование функций Гаусса с наибольшими значениями максимума и игнорирование других гауссиан при расчёте ионосферно-свободных комбинаций структурных задержек (первая часть программы) существенно уменьшает СКО невязок для всех изображений

Таблица 2

СКО разности $r - L$ (σ) и разность $\sigma - \sigma_0$, где σ_0 — СКО невязок r ; $\sigma_0 = 76$ пс

Дата получения изображения в диапазоне X	Первая часть программы			Вторая часть программы			Число гауссиан в файле
	σ , пс	$\sigma - \sigma_0$, пс	Число использованных гауссиан	σ , пс	$\sigma - \sigma_0$, пс	Число использованных гауссиан	
08.04.2018	46	-30	12	43	-33	120	267
02.06.2018	46	-30	49	43	-33	341	671
29.07.2018	51	-25	6	44	-32	192	361
25.08.2018	49	-27	14	44	-32	164	360
16.10.2018	46	-30	6	43	-33	166	331
10.02.2019	47	-29	6	43	-33	196	427

Таблица 3

Сравнение СКО разности $r - L$, рассчитанной по всем гауссианам (σ_1) и по отобранным гауссианам (σ_2)

Дата получения изображения в диапазоне X	σ_1 , пс	σ_2 , пс	$\sigma_2 - \sigma_1$, пс
08.04.2018	60	43	-17
02.06.2018	47	43	-4
29.07.2018	86	44	-42
25.08.2018	63	44	-19
16.10.2018	63	43	-20
10.02.2019	59	43	-16

источника. Учёт менее ярких структурных элементов источника (вторая часть программы) также уменьшает СКО невязок, но слабее.

В табл. 3 приведено сравнение СКО невязок, полученных при использовании всех гауссиан, и СКО невязок, полученных с использованием отобранных гауссиан. Наблюдается существенное уменьшение СКО невязок во втором варианте, по сравнению с первым.

Из рис. 4а видно, что зависимости $L(s)$, построенные по различным изображениям, имеют существенно меньший разброс по сравнению с данными на рис. 3а. На рис. 4б в зависимости разности $r-L$ от звёздного времени наблюдается исчезновение систематических отклонений, присутствующих на рис. 3б, что говорит о возможности использования данных невязок для определения структурной задержки.

На рис. 5–11 приведены изображения для разных дат, построенные по всем гауссианам (исходные изображения) и по отобранным гауссианам (модельные изображения). Сравнивая исходные изображения в диапазоне X, приведённые на рис. 6а–11а, можно заметить, что они значительно

различаются, однако на четырёх картах, приведённых на рис. 7а и рис. 9а–11а видны схожие элементы структуры, которые сохраняются и в модельных изображениях. Так же, при сравнении исходных изображений с модельными, видно, что наиболее яркие части источника сохраняются после применения алгоритма отбора гауссиан. При этом наблюдается частичное исчезновение менее ярких и удалённых от центра источника элементов карты, которые могут быть обусловлены как изменчивостью источника, так и влиянием помех.

Изображение за 29.07.2018 на рис. 8 сильно отличается от изображений за другие даты отсутствием выраженной протяжённой структуры при $x \in (-5 \text{ мс}; 5 \text{ мс})$, $y \in (-10 \text{ мс}; 5 \text{ мс})$ и наличием большого числа структурных элементов, удалённых от центра. Это является единственным изображением, для которого использование всех гауссиан дало увеличение СКО в табл. 1. Возможно, это связано с его неточностью, так как изображения за 02.06.18. на рис. 13 и за 25.08.18 на рис. 14, полученные на месяц раньше и на месяц позже, обладают схожей с другими изображениями протяжённой структурой.

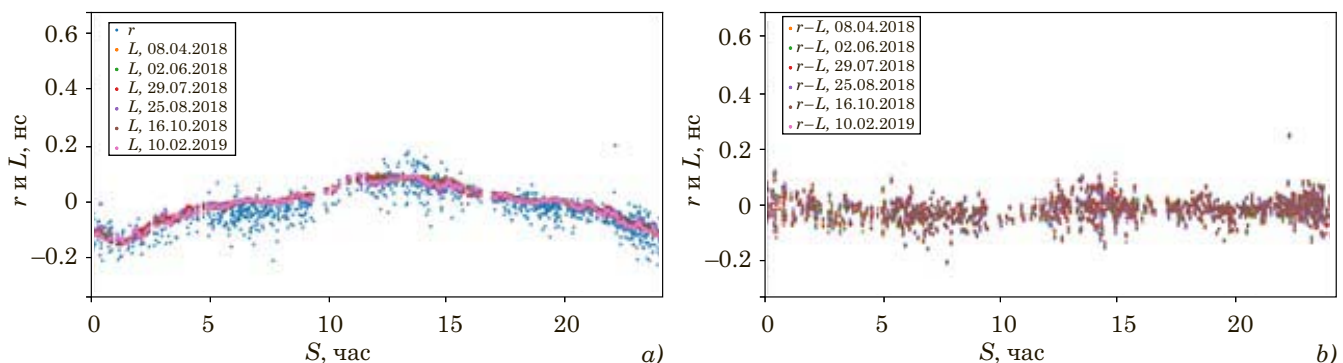


Рис. 4. Графики: а) зависимостей от звёздного времени для невязок r и ионосферно-свободной комбинации L и б) графики разностей $r - L$

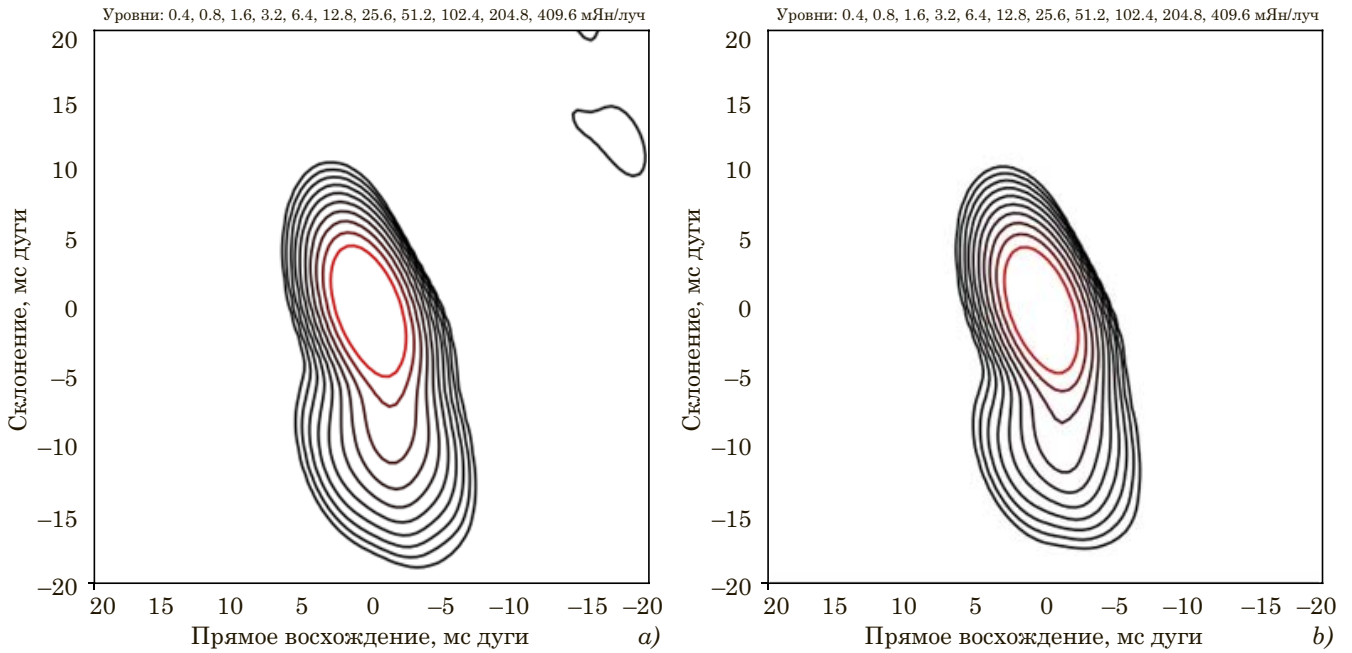


Рис. 5. Изображение источника 0014+813 в диапазоне S за 29.07.2018: *a)* построенное по всем гауссианам; *b)* построенное по отобранным гауссианам; по осям отложено прямое восхождение и склонение относительно координат источника в каталоге

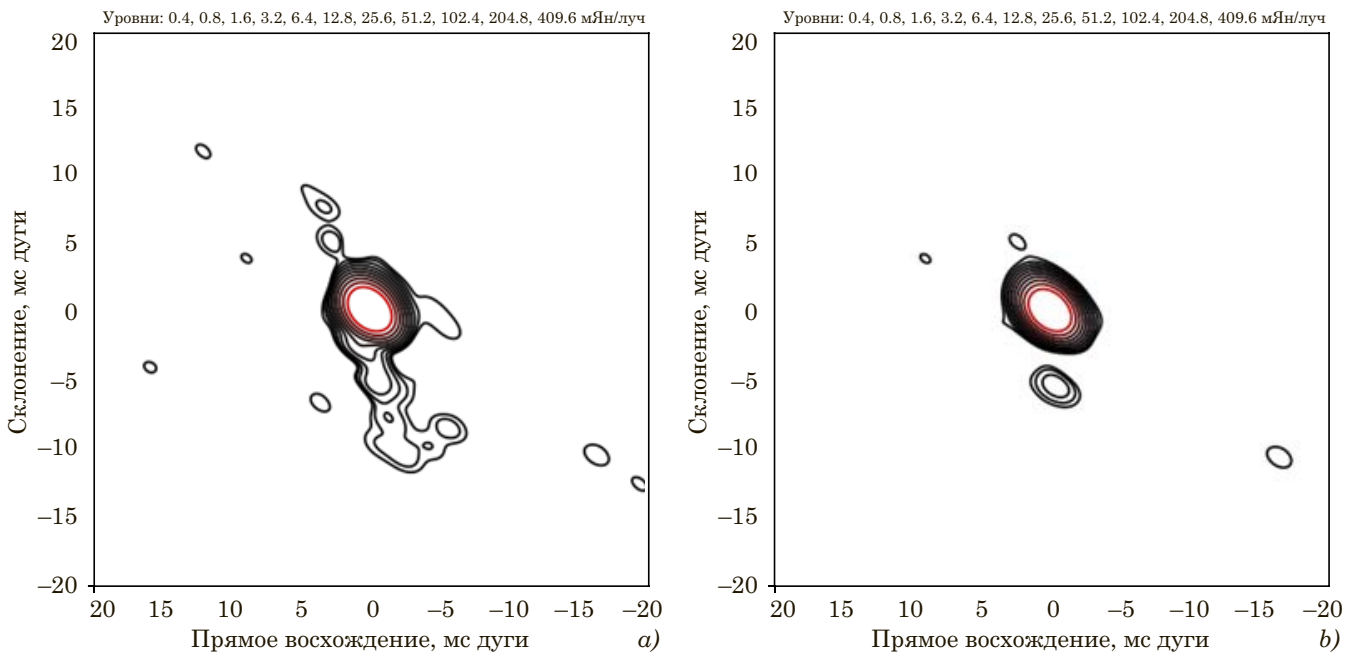


Рис. 6. Изображение источника 0014+813 в диапазоне X за 08.04.2018: *a)* построенное по всем гауссианам; *b)* построенное по отобранным гауссианам; по осям отложено прямое восхождение и склонение относительно координат источника в каталоге

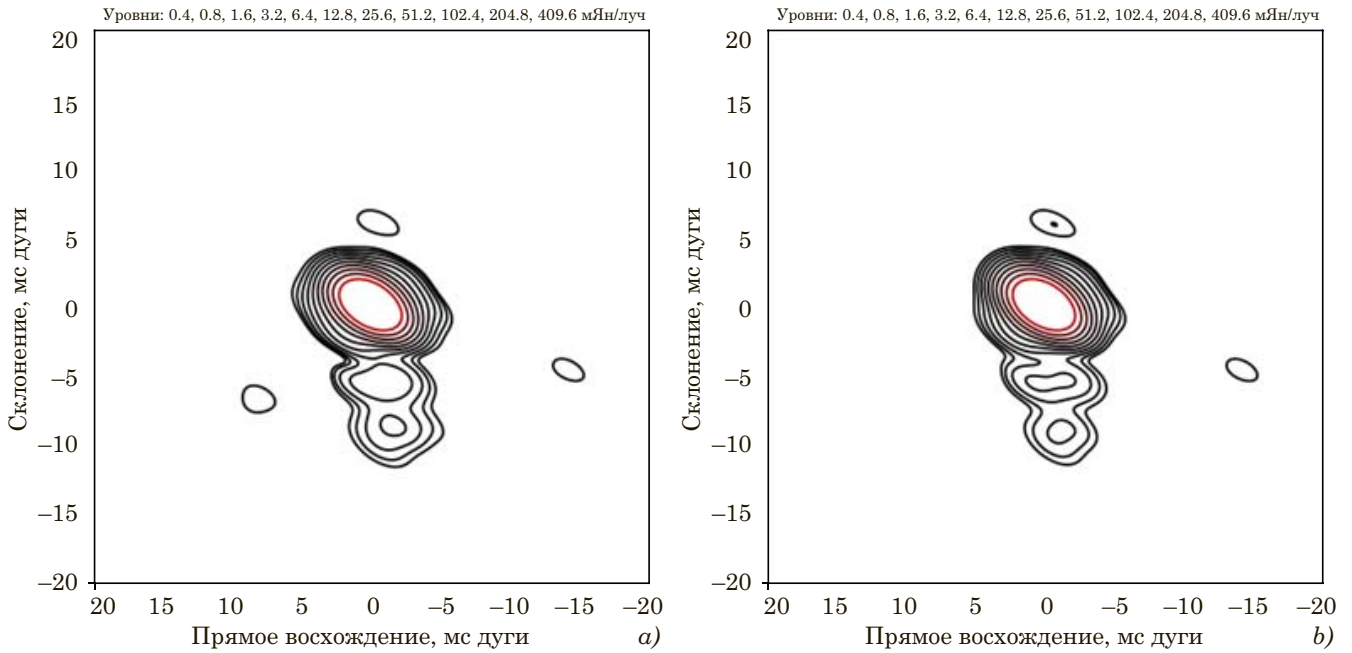


Рис. 7. Изображение источника 0014+813 в диапазоне X за 02.06.2018: *a)* построенное по всем гауссианам; *b)* построенное по отобраным гауссианам; по осям отложено прямое восхождение и склонение относительно координат источника в каталоге

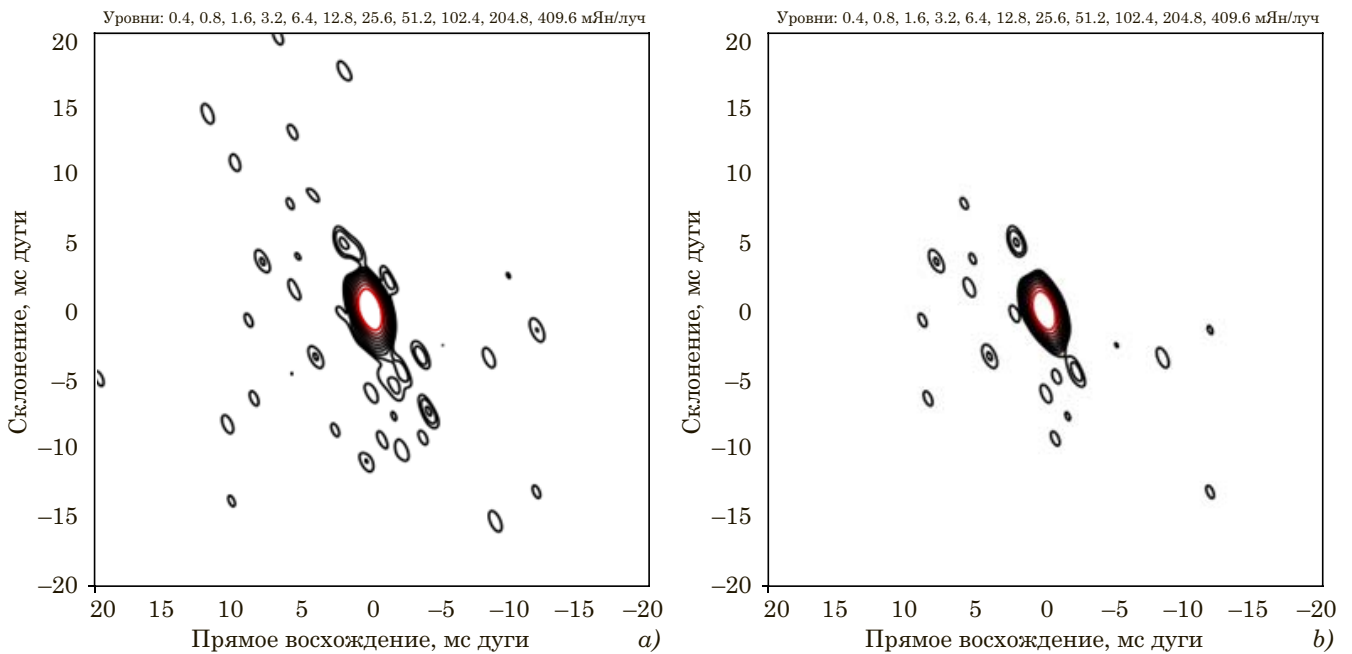


Рис. 8. Изображение источника 0014+813 в диапазоне X за 29.07.2018: *a)* построенное по всем гауссианам; *b)* построенное по отобраным гауссианам; по осям отложено прямое восхождение и склонение относительно координат источника в каталоге

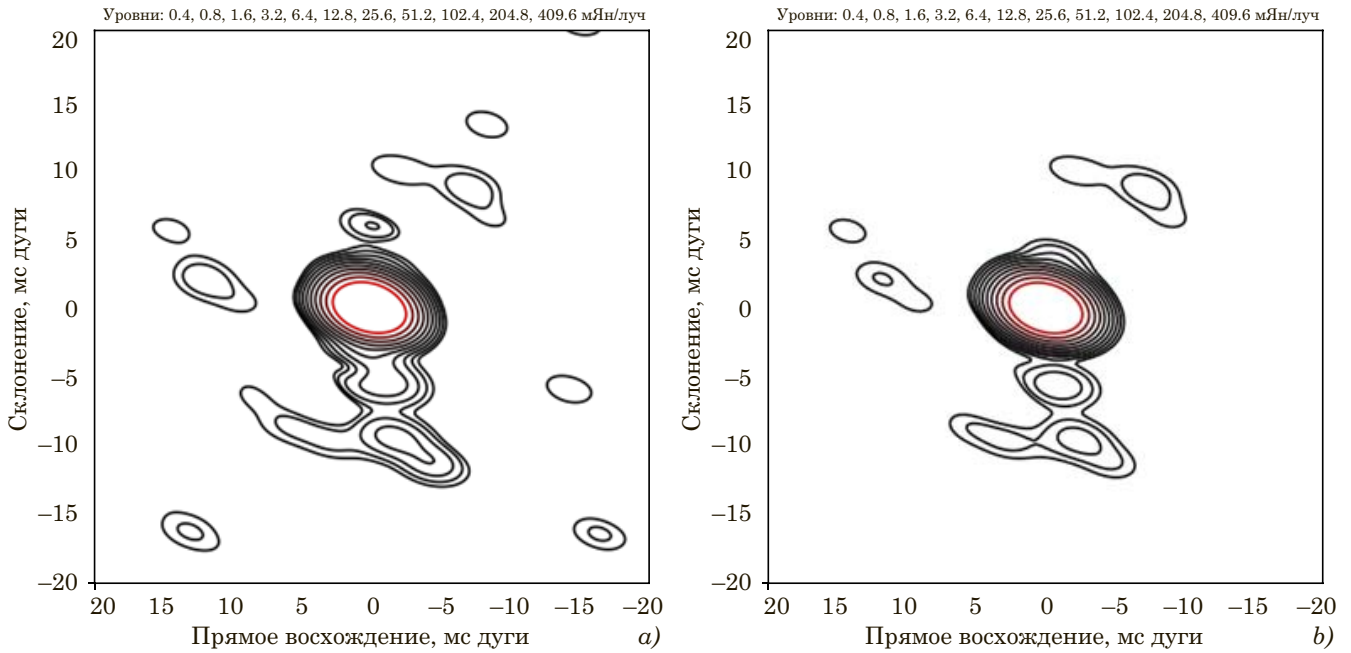


Рис. 9. Изображение источника 0014+813 в диапазоне X за 25.08.2018: *a)* построенное по всем гауссианам; *b)* построенное по отобранным гауссианам; по осям отложено прямое восхождение и склонение относительно координат источника в каталоге

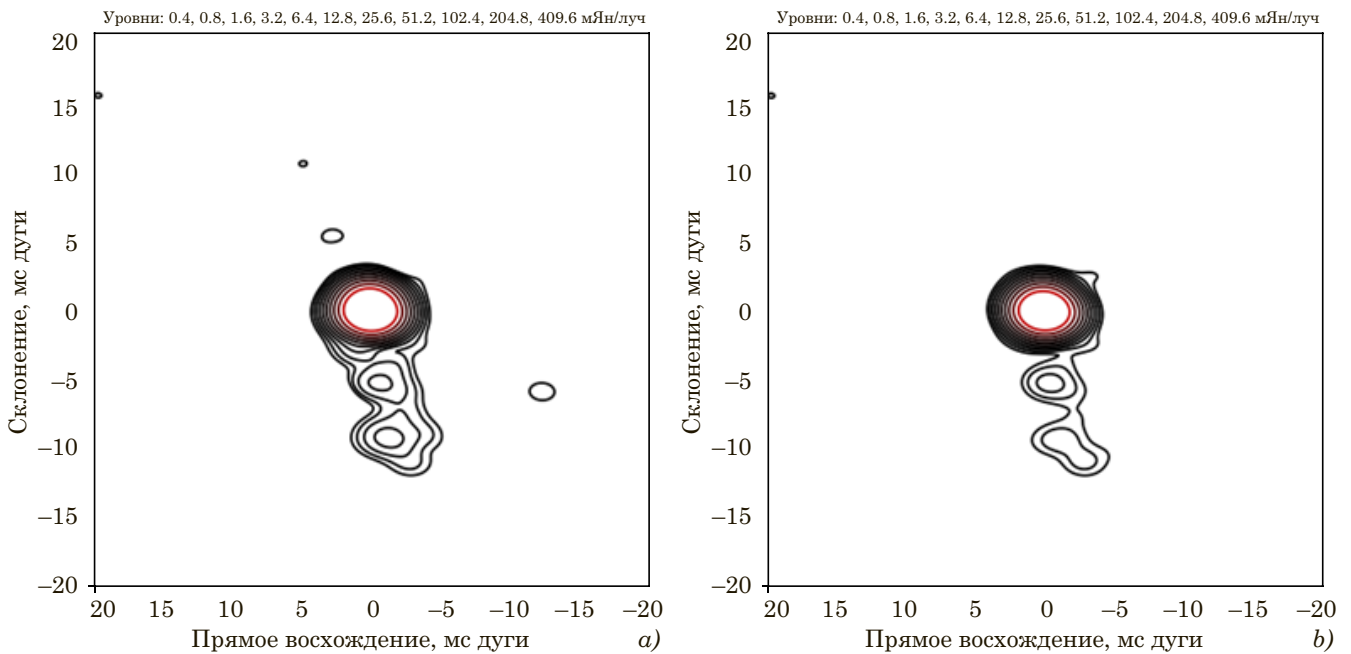


Рис. 10. Изображение источника 0014+813 в диапазоне X за 16.10.2018: *a)* построенное по всем гауссианам; *b)* построенное по отобранным гауссианам; по осям отложено прямое восхождение и склонение относительно координат источника в каталоге

Заключение

В работе было показано, что использование всех структурных элементов карт радиояркости квазаров не позволяет правильно вычислить структурную задержку. Дальнейший анализ показал, что использование наиболее ярких структур-

ных элементов квазара уменьшает различие между графиками структурной задержки, построенными по картам за разные даты, следовательно, позволяет построить более точную модель структурной задержки.

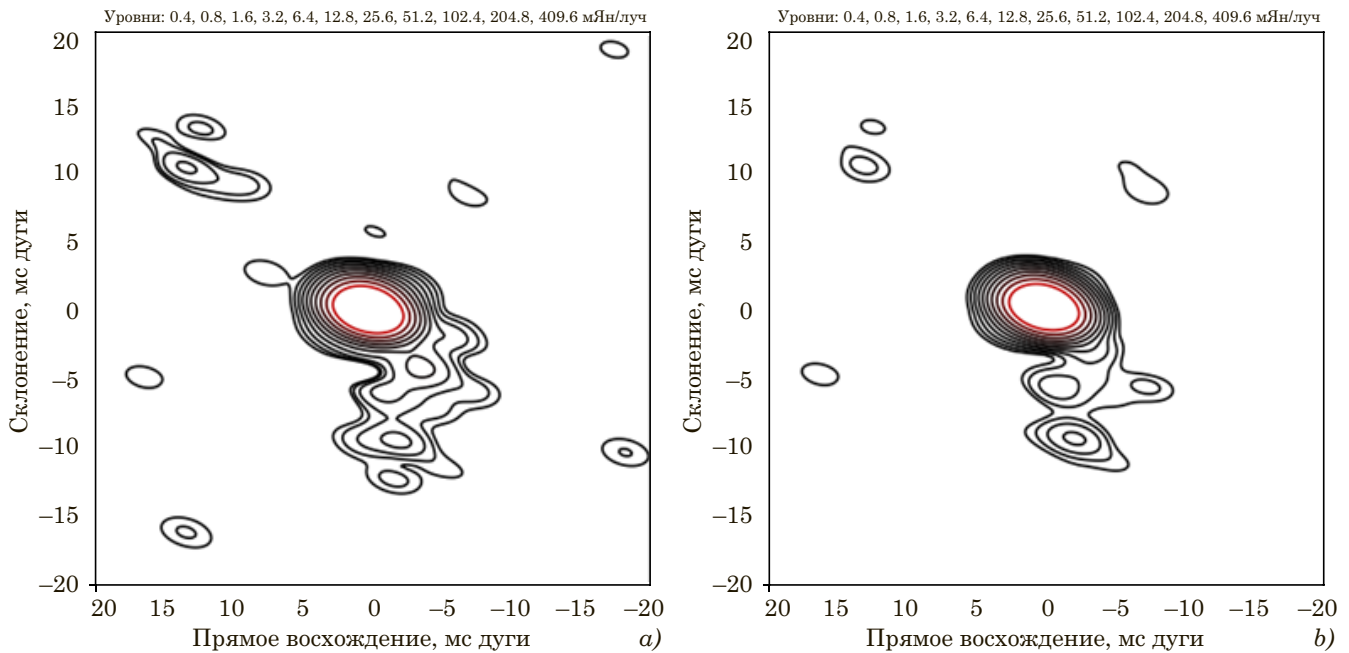


Рис. 11. Изображение источника 0014+813 в диапазоне X за 10.02.2019: а) построенное по всем гауссианам; б) построенное по отобраным гауссианам; по осям отложено прямое восхождение и склонение относительно координат источника в каталоге

Для анализа была написана программа, находящая гауссианы, использование которых максимально сближает графики структурной задержки, построенные по различным картам. В программе использовались остаточные невязки задержек, полученные после уравнивания геодезических РСДБ-наблюдений, существенный вклад в которые вносится структурной задержкой.

Исследование карт радиояркости квазара 0014+813 при помощи разработанной программы показало, что СКО остаточных невязок существенно уменьшается после вычитания из них ионосферно-свободных комбинаций структурных задержек, рассчитанных по наиболее ярким компонентам изображений радиоисточника. Это позволяет использовать данные невязки для построения карт радиояркости.

Литература

Губанов В. С. Обобщенный метод наименьших квадратов. Теория и применение в астрометрии. СПб.: Наука, 1997. 318 с.

Институт прикладной астрономии РАН [Электронный ресурс]. URL: <http://iaaras.ru> (дата обращения: 20.09.2022).

Anderson J., Xu M. Source structure and measurement noise are as important as all other residual sources in geodetic VLBI combined // *Journal of Geophysical Research*. 2018. Vol. 123, no. 11. P. 162–190.

Charlot P. Modeling radio source structure for improved VLBI data analysis // *International VLBI Service*

for Geodesy and Astrometry: General Meeting Proceedings. 2002. P. 233–242.

Charlot P. Radio-source structure in astrometric and geodetic very long baseline interferometry // *The Astronomical Journal*. 1990. Vol. 99. P. 1309–1326.

Fey A., Charlot P. VLBA observations of radio reference frame sources. II. Astrometric suitability based on observed structure // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 1997. Vol. 111, no. 1. P. 95–142.

Ghisellini G., Foschini L., Volonteri M., et al. The blazar S5 0014+813: a real or apparent monster? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*. 2009. Vol. 399, no. 1. P. 24–28.

Hirabayashi H., Hirose H., Kobayashi H., et al. Overview and initial results of the very long baseline interferometry space observatory program // *Science*. 1998. Vol. 281, no. 5584. P. 1825–1829.

Kuhr H., Liebert J. W., Strittmatter P. A., et al. The most luminous quasar: S5 0014+81 // *Astrophysical Journal*. 1983. Vol. 275. P. 33–37.

Sanz Subirana J., Juan Zornoza J. M., Hernández-Pajares M. GNSS Data Processing. Volume I: Fundamentals and Algorithms. Noordwijk: ESA Communications, 2013. 238 p.

Titov O., Lopez Yu. Two-component structure of the radio source 0014+813 from VLBI observations within the CONT14 Program // *Astronomy Letters*. 2018. Vol. 44, no. 3. P. 139–148.

The Astrogeo VLBI FITS image database [Электронный ресурс]. URL: http://astrogeo.org/vlbi_images/ (дата обращения: 23.08.2023).

Xu M. H., Anderson J. M., Heinkelmann R., et al. Structure effects for 3417 celestial reference frame radio source // *The Astronomical Journal Supplement Series*. 2019. Vol. 242, no. 1.