

Построение трехпараметрической модели структуры квазара по остаточным невязкам геодезических РСДБ-наблюдений

© А. Б. Сербин, С. Л. Курдубов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Важность учета структуры квазара обусловлена тем, что ее наличие вызывает появление структурной задержки в РСДБ-наблюдениях. Однако, на сегодняшний день, ни один центр анализа РСДБ-наблюдений не учитывает структурную задержку при обработке РСДБ-наблюдений, что вносит погрешность в определяемые параметры. Ранее в работах многих авторов было показано, что использование классических карт радиояркости не приводит к улучшению ситуации, вследствие изменчивости структуры квазаров и особенностей алгоритмов построения карт радиояркости.

Данная статья посвящена исследованию возможности построения моделей структуры радиояркости квазаров с использованием измеренных задержек. В работе при моделировании структуры радиояркости квазара используются остаточные невязки, полученные в результате уравнивания геодезических РСДБ-наблюдений.

Вклад структурной задержки проявляется в невязках в виде значительных систематических отклонений при построении графика зависимости невязок данного радиоисточника от звездного времени. Соответственно корректный учет структурной задержки должен приводить к устранению этих систематических отклонений и уменьшению СКО невязок. Критерием корректности построенной модели является максимально возможное уменьшение СКО невязок после вычитания из них построенной модели структурной задержки.

Предлагается алгоритм, основанный на методах Монте-Карло и градиентного спуска, в котором структура квазара представляется в виде набора дельта-функций, каждая из которых характеризуется тремя параметрами.

Было показано, что параметры модели, построенной по остаточным невязкам, существенно зависят от длины базовой линии, на которой проводились наблюдения, потому что угловое разрешение базы интерферометра обратно пропорционально длине базовой линии.

Ключевые слова: структурная задержка, внегалактический радиоисточник, групповая задержка, карта радиояркости, РСДБ, ионосферно-свободная комбинация задержек.

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

Для цитирования: Сербин А. Б., Курдубов С. Л. Построение трехпараметрической модели структуры квазара по остаточным невязкам геодезических РСДБ-наблюдений // Труды ИПА РАН. 2025. Вып. 72. С. 37–41.

<https://doi.org/10.32876/AppI Astron.72.37-41>

Three-Parameter Model Building of the Quasar Structure Based on Geodetic VLBI Observation Residuals

A. B. Serbin, S. L. Kurdubov

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

Abstract

The importance of taking into account the quasar structure is due to the fact that its presence causes a structural delay in VLBI observations. However, the structural delay is not taken into account during processing VLBI observations, so it introduces an error in the parameters being determined. Previously, many authors have shown that the use of classical radio brightness maps does not improve the situation due to the variability of the quasar structure and the features of the algorithms for constructing radio brightness maps.

This paper is devoted to studying the possibility of constructing models of the quasar radio brightness structure using measured delays. In this research, when modeling the quasar radio brightness structure, the residuals obtained as the result of processing geodetic VLBI observations are used.

The contribution of the structural delay appears in the residuals in the form of significant systematic deviations when constructing a graph of the residual dependence on sidereal time. Accordingly, correct accounting of the structural delay should lead to the elimination of these systematic deviations and a decrease in the standard deviation of the residuals. The criterion for the correctness of the constructed model is the maximum possible decrease in the standard deviation of the residuals after subtracting the constructed model of the structural delay from them.

An algorithm based on Monte Carlo and gradient descent methods is proposed, when modelling the quasar structure is represented as a set of delta functions, all of which are characterized by three parameters.

It was shown that the parameters of the model constructed from the residuals significantly depend on the baseline length since the angular resolution of the interferometer base is inversely proportional to the length of the baseline.

Keywords: structural delay, extragalactic radio source, group delay, radio brightness map, VLBI, ionosphere-free combination of delays.

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

For citation: Serbin A. B., Kurdubov S. L. Three-parameter model building of the quasar structure based on geodetic VLBI observation residuals // Transactions of IAA RAS. 2025. Vol. 72. P. 37–41.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.72.37-41>

Введение

Наличие у внегалактических радиоисточников протяженной структуры является причиной появления дополнительного вклада в групповую задержку, называемого структурной задержкой ([Charlot, 1990](#)). Неучет структурной задержки приводит к тому, что она вносит погрешность в значения параметров, определяемых при помощи РСДБ ([Anderson, 2018](#)). На сегодняшний день структурную задержку не учитывают при обработке РСДБ-наблюдений, что связано с невозможностью использования карт радиояркости вследствие изменчивости структуры квазаров ([Charlot, 2002](#)). Кроме того, ранее было показано ([Курдубов, 2023](#)), что построенные карты радиояркости не пригодны для корректного вычисления структурной задержки даже для наблюдений вблизи даты построения карты.

В качестве альтернативы может быть использован метод параметризации структурной задержки ([Sovers, 1998](#)). Так, в работе В. С. Губанова и И. Ф. Суркиса было предложено использовать двухкомпонентную модель структуры квазара, зависящую от трех параметров, которые можно периодически уточнять из обработки РСДБ-наблюдений ([Губанов, 2002](#)).

Одним из возможных вариантов построения модели структурной задержки без использования карт радиояркости квазаров является использование остаточных невязок, полученных в результате обработки геодезических РСДБ-наблюдений. Данные невязки содержат усредненную информацию о наиболее стабильных частях структуры радиояркости квазара ([Курдубов, 2023](#)), следовательно могут быть использованы для ее моделирования без использования карт радиояркости. Ранее такой подход был продемонстрирован О. А. Титовым и Ю. Р. Лопез ([Titov, 2018](#)). Мы предлагаем развитие данного подхода путем создания алгоритма, в котором строится трехкомпонентная модель структуры радиояркости квазара по остаточным невязкам РСДБ-наблюдений.

Алгоритм моделирования структуры квазара

В рамках моделирования квазар представляется трехкомпонентной моделью, где компонентами являются дельта-функции, характеризуемые тремя параметрами: спектральная плотность по-

тока (FL, мЯн), склонение (DX, мс дуги) и прямое восхождение (DY, мс дуги) относительно центра радиояркости квазара. Структурная задержка вычисляется по формулам для модели дельта-функций ([Charlot, 1990, с. 1311](#)). Так как величина структурной задержки зависит от соотношения спектральной плотности потока для разных дельта-функций, то параметры первой дельта-функции, описывающей центр радиояркости квазара, фиксируются со значениями $FL = 1$, $DX = 0$, $DY = 0$. Параметры других дельта-функций определяются при помощи методов Монте-Карло и градиентного спуска. Критерием правильности найденных параметров служит максимальное уменьшение СКО разности невязок и структурной задержки, рассчитанной по ним.

Исходные данные

При помощи алгоритма, описанного выше, было проведено исследование остаточных невязок, полученных в результате обработки наблюдений, проведенных в ходе эксперимента CONT14 Международной РСДБ-службы для геодезии и астрометрии (IVS). Обработка наблюдений проводилась при помощи программного пакета QUASAR. Для анализа был выбран квазар 0014+813, так как он является одним из наиболее ярких квазаров во Вселенной с выраженной протяженной структурой. Для моделирования были отобраны базовые линии, для которых имелось приемлемое для моделирования число невязок (более 50). По данным невязкам для каждой из выбранных баз были построены модели структуры квазара. Рассматриваемые невязки — остаточные невязки ионосферно-свободных комбинаций задержек в X- и S-диапазонах ([Sanz Subirana, 2013, р. 115](#)). В статье ([Курдубов, 2023, с. 15](#)) было показано, что вклад задержек в S-диапазоне существенно меньше, чем в X, поэтому в наших вычислениях вкладом диапазона S в невязки можно было пренебречь.

Моделирование с использованием одной базы

При анализе построенных моделей было выяснено, что модели, разработанные для одних базовых линий не всегда применимы для других. На рис. 1–4 продемонстрированы зависимости изменения СКО невязок для отдельных базовых линий после вычитания из них структурных задержек,

Длина базовой линии WESTFORD–WETTZELL: 5998 км

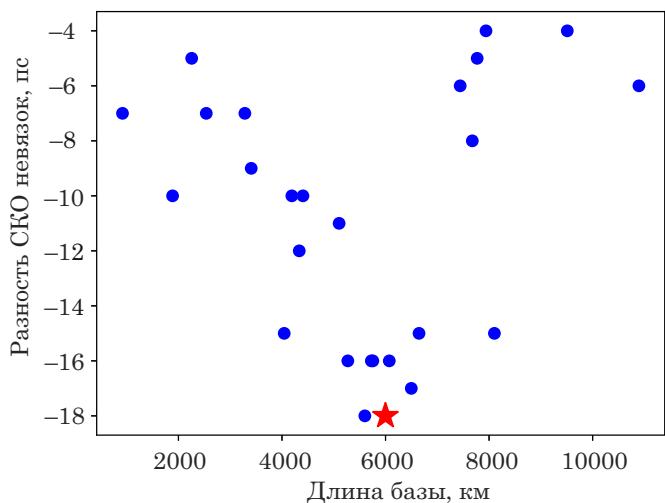


Рис. 1. Зависимость изменения СКО невязок для базовой линии WESTFORD – WETTZELL после применения к ним моделей, полученных для других базовых линий (звездочкой отмечен результат применения модели для базовой линии WESTFORD – WETTZELL)

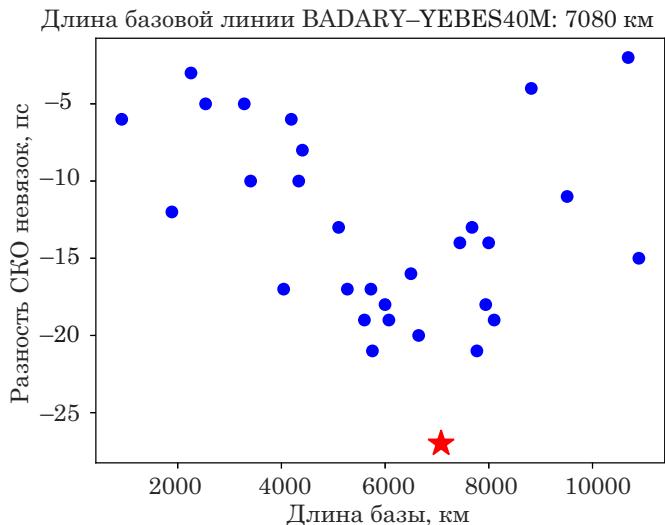


Рис. 2. Зависимость изменения СКО невязок для базовой линии BADARY – YEBES40M после применения к ним моделей, полученных для других базовых линий (звездочкой отмечен результат применения модели для базовой линии BADARY – YEBES40M)

рассчитанных по моделям для других базовых линий, где звездочкой отмечены результаты применения моделей для тех базовых линий, невязки для которых анализируются. Из приведенных графиков видно, что СКО невязок, полученных для отдельной базовой линии, наибольшим образом уменьшается в том случае, если применяемая модель получена по невязкам для базовых линий близких к ней по длине.

Длина базовой линии TSUKUB32–YEBES40M: 9511 км

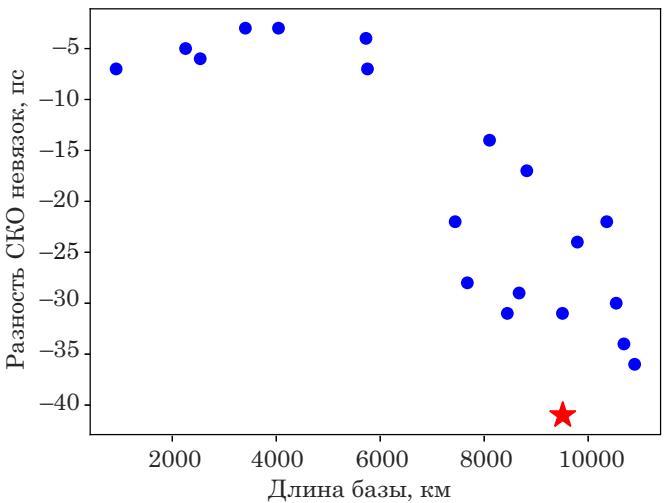


Рис. 3. Зависимость изменения СКО невязок для базовой линии TSUKUB32 – YEBES40M после применения к ним моделей, полученных для других базовых линий (звездочкой отмечен результат применения модели для базовой линии TSUKUB32 – YEBES40M)

Длина базовой линии KOKEE–YEBES40M: 10688 км

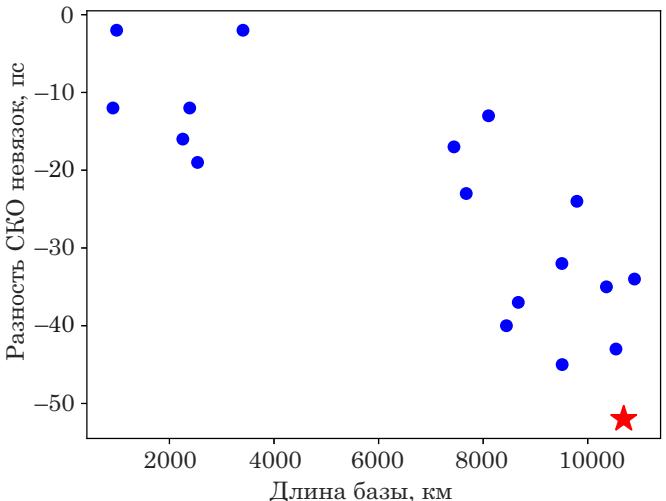


Рис. 4. Зависимость изменения СКО невязок для базовой линии KOKEE – YEBES40M после применения к ним моделей, полученных для других базовых линий (звездочкой отмечен результат применения модели для базовой линии KOKEE – YEBES40M)

Моделирование с использованием нескольких баз

С целью увеличения точности искомых параметров была проведена попытка моделирования по нескольким базовым линиям одновременно. Для этого базовые линии наиболее близкие по длине были объединены в группы по три в каждой. После чего для каждой из групп было проведено моделирование, в ходе которого одновременно использовались невязки для всех базовых линий в группе. В результате моделирования было

выяснено, что параметры, полученные для разных групп близки в том случае, если базовые линии в обеих группах близки по длине, что показано в табл. 1. Это можно объяснить тем, что угловые разрешения базовых линий в таких группах близки, следовательно вклад в структурную задержку вносится структурой квазара примерно одинакового масштаба. Тем не менее параметры, полученные при использовании базовых линий из данных групп по-отдельности, сильно различаются даже для базовых линий внутри каждой группы, что продемонстрировано в табл. 2. Это можно объяснить как влиянием ориентации базовой ли-

нии, так и существенной ролью случайных отклонений, содержащихся в невязках. Помимо этого, влияние на результат может оказывать и то, что не для всех базовых линий наблюдается полное покрытие невязками всего двадцатичетырехчасового интервала звездного времени.

Анализируя вышесказанное, можно сделать вывод, что для моделирования структуры квазара предпочтительно использовать одновременно несколько базовых линий близких по длине, так как в случае одновременного использования базовых линий с различной ориентацией структура квазара определяется точнее.

Таблица 1
Параметры моделей, полученных при одновременном использовании трех базовых линий

Базовая линия	Длина базовой линии, км	DX, мс дуги	DY, мс дуги	FL, мЯн
KOKEE — WETTZELL	10357	0.8	−0.8	0.2
KOKEE — ONSALA60	9793			
TSUKUB32 — YEBES40M	9511			
TSUKUB32 — WESTFORD	9506	0.7	−0.7	0.2
MATERA — TSUKUB32	8819			
BADARY — WESTFORD	8672			
TSUKUB32 — WETTZELL	8445	0.3	−1.0	0.1
KOKEE — NYALES20	8103			
BADARY — KOKEE	7997			
ONSALA60 — TSUKUB32	7940	0.2	−1.1	0.1
WESTFORD — ZELENCHK	7770			
KOKEE — WESTFORD	7676			

Таблица 2
Параметры моделей, полученных при использовании базовых линий по отдельности

Базовая линия	Длина базовой линии, км	DX, мс дуги	DY, мс дуги	FL, мЯн
KOKEE — WETTZELL	10357	−0.5	0.3	0.5
KOKEE — ONSALA60	9793	0.9	−0.7	0.2
TSUKUB32 — YEBES40M	9511	0.1	0.4	0.4
TSUKUB32 — WESTFORD	9506	0.8	−0.7	0.3
MATERA — TSUKUB32	8819	0.5	−1.0	0.1
BADARY — WESTFORD	8672	0.6	−0.7	0.2
TSUKUB32 — WETTZELL	8445	0.7	−0.7	0.2
KOKEE — NYALES20	8103	−0.4	0.5	0.2
BADARY — KOKEE	7997	−0.5	−1.1	0.1
ONSALA60 — TSUKUB32	7940	0.8	−1.1	0.1
WESTFORD — ZELENCHK	7770	0.1	−1.1	0.1
KOKEE — WESTFORD	7676	0.0	0.5	0.2

Заключение

В данной работе был предложен алгоритм моделирования структуры распределения радиояркости квазаров по остаточным невязкам, полученным при уравнивании геодезических РСДБ-наблюдений, и была проведена проверка применимости данного алгоритма.

В результате проверки предложенного алгоритма было показано, что для более точного моделирования структуры квазара следует одновременно использовать данные с нескольких базовых линий близких по длине. При таком подходе учитывается то, что вклад в структурную задержку для баз разной длины вносится структурой квазара разного масштаба. Это обусловлено тем, что угловое разрешение базовой линии зависит от ее длины. Также использование нескольких базовых линий с различной ориентацией позволяет более точно моделировать структуру квазара, чем при использовании одной базовой линии. В будущем планируется включить полученные модели в программный пакет QUASAR и уточнять параметры моделей непосредственно при уравнивании РСДБ-наблюдений.

В дальнейшем предлагается включить полученные модели в программный пакет QUASAR и уточнять параметры моделей непосредственно при уравнивании РСДБ-наблюдений.

Литература

Губанов, В. С., Суркис, И. Ф. Обработка РСДБ-наблюдений: Программный пакет QUASAR. I. Редукция данных наблюдений. // Сообщения Института прикладной астрономии РАН. 2002. №. 141. С. 1–33.

Курдубов С. Л., Сербин А. Б. Учет структуры радиоисточника при обработке геодезических РСДБ-наблюдений на примере источника 0014+813 // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 66. С. 11–21.

Anderson J. M., Xu M. H. Source structure and measurement noise are as important as all other residual sources in geodetic VLBI combined // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2018. Vol. 123, no. 11. P. 10,162–10,190.

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.

Sovers O. J., Fanselow J. L., Jacobs C. S. Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results // Reviews of Modern Physics. 1998. Vol. 70. doi: 10.1103/RevModPhys.70.1393

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. A., Lopez Y. R. Two-component structure of the radio source 0014+ 813 from VLBI observations within the CONT14 program // Astronomy Letters. 2018. Vol. 44. P. 139–148.