

Vision — программное обеспечение для визуализации результатов корреляционной обработки РСДБ-данных

© М. С. Зорин, А. С. Кумейко, В. О. Кен

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

После проведения корреляционной обработки РСДБ-данных возникает необходимость анализа полученных результатов. При этом форму корреляционного отклика, его основные параметры и спектральные характеристики сигнального тракта удобно представлять в графическом виде. На сегодняшний день существуют программы пост-процессорной обработки, с помощью которых можно осуществлять вычисление параметров корреляционного отклика, однако они не дают наглядного представления о внешнем виде отклика и стабильности его параметров в течение времени наблюдения. После использования таких программ пользователю требуется дополнительно производить визуализацию результатов и, в случае необходимости, оценку флуктуаций параметров. Целью данной работы являлось создание многофункционального программного обеспечения (ПО), позволяющего создавать удобные графические отчеты по результатам корреляционной обработки РСДБ-наблюдений на корреляторе RASFX.

В процессе достижения этой цели при разработке ПО на языке Python использовался аппарат математического анализа для осуществления вычислений параметров корреляционного отклика и их последующей визуализации.

Результатом работы является разработанное авторами ПО Vision, предназначенное для создания отчетов по результатам обработки РСДБ-наблюдений на корреляторе RASFX. Vision осуществляет чтение выходных данных коррелятора RASFX, вычисление параметров корреляционного отклика: задержки в корреляционном окне, частоты интерференции, отношения сигнал-шум и оценку флуктуаций параметров отклика внутри отдельных сканов сеансов наблюдений. Итог работы Vision — построение изображений и графиков измеренных характеристик и представление их в виде PDF-отчета по сеансу наблюдений. Отчеты включают в себя все построенные графики и вычисленные значения для каждого частотного канала всех сканов сеанса наблюдений. Также в Vision реализована возможность создания отчетов по результатам синтеза частотных каналов. Создаваемые отчеты могут использоваться для анализа результатов корреляционной обработки РСДБ-данных по всему сеансу наблюдений или для представления конкретных интересующих результатов по отдельным сканам.

Ключевые слова: RASFX, задержка в корреляционном окне, корреляционный отклик, корреляционная обработка, визуализация, РСДБ-данные, постпроцессорная обработка.

Контакты для связи: Зорин Михаил Сергеевич (ms.zorin@iaaras.ru).

Для цитирования: Зорин М. С., Кумейко А. С., Кен В. О. Vision – программное обеспечение для визуализации результатов корреляционной обработки РСДБ-данных // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 58. С. 30–35.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.58.30-35>

Vision — Software for Visualizing the Results of VLBI Data Correlation Processing

M. S. Zorin, A. S. Kumeyko, V. O. Ken

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

Abstract

After the correlation processing of very long baseline interferometry (VLBI) data is done, it is necessary to analyze the results. The surface of a fringe and its main parameters, as well as spectral characteristics of a signal path, can be conveniently presented in a user-friendly graphical form. Today, there are several special software packages which are used to calculate parameters of the fringe. But such packages do not provide information about the fringe surface and stability of its parameters during the observation time. After using such software, there is a necessity to visualize the results of correlation processing and evaluate fringe parameters. In order to analyze the results of correlation processing, we have elaborated multifunctional post-processing software for generating user-friendly graphical reports based on RASFX correlator output data.

The authors used methods of imperative programming in Python for software elaboration, as well as mathematical statistics for the fringe parameters calculation and visualization. The algorithms and mathematical methods are presented.

The elaborated multifunctional software called Vision can be used for generating reports on VLBI observation sessions by the RASFX correlation processing results. Vision reads RASFX output data and calculates parameters of a fringe such as residual delay, delay rate and signal-to-noise ratio (SNR). Vision also provides the ability to estimate fringe phase

and SNR within individual scans of an observation session. The output of *Vision* is a PDF-report on the observation session with calculated parameters and figures. These reports provide all data needed to analyze the results of correlation processing for each frequency channel during each scan. It is also possible to generate reports based on bandwidth synthesis results.

Keywords: RASFX, residual delay, fringe, correlation processing, visualization, VLBI data, postprocessing.

Contacts: Michael S. Zorin (ms.zorin@iaaras.ru).

For citation: Zorin M. S., Kumeiko A. S., Ken V. O. *Vision* — software for visualizing the results of VLBI data correlation processing // Transactions of IAA RAS. 2021. Vol. 58. P. 30–35.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.58.30-35>

Введение

После проведения корреляционной обработки РСДБ-наблюдений возникает необходимость анализа полученных результатов. При этом для полноты представления данных о проведенном сеансе наблюдений может быть недостаточно информации об основных вычисленных параметрах корреляционного отклика: задержке в корреляционном окне, частоте интерференции и отношении сигнал-шум (ОСШ). Необходимо также иметь возможность оценивать форму отклика и спектральные характеристики сигнального тракта. На сегодняшний день существуют такие программы пост-процессорной обработки как *HOPS* ([Haystack Observatory Postprocessing System](#)) и *PIMA* ([Petrov, 2011](#)), с помощью которых возможно визуализировать результаты корреляционной обработки, однако они не позволяют создавать отчеты по сеансам наблюдений и не дают в достаточно наглядном виде представления о форме отклика и флуктуациях его параметров внутри отдельных сканов. С целью создания удобных графических отчетов, содержащих всю информацию о проведенных сеансах РСДБ-наблюдений по результатам обработки на корреляторе *RASFX* ([Суркис, 2018](#)), разработано многофункциональное ПО *Vision*. ПО разработано на языке *Python* и позволяет создавать отчеты, предоставляющие информацию как о каждом частотном канале всех сканов сеанса наблюдений, так и по результатам синтеза частотных каналов.

Работа с *Vision*

Vision осуществляет чтение выходных данных программного коррелятора *RASFX* и на их основе производит вычисление параметров корреляционного отклика: задержки в корреляционном окне, частоты интерференции, ОСШ и оценку флуктуаций параметров внутри сканов наблюдений. Итогом работы *Vision* является построение изображений и графиков измеренных характеристик и представление их в виде PDF-отчета по сеансу наблюдений.

После создания отчета пользователь получает доступ не только к созданному отчету, но и к построенным графикам в виде EPS-изображений. Эти изображения могут использоваться пользова-

телем при написании научных работ или для представления отдельных интересных результатов.

Для построения графиков на основе текстовых файлов в *Vision* используется программа *Gnuplot* ([Williams, 2020](#)), сведение данных в PDF-отчет осуществляется средствами библиотеки *Python FPDF* ([FPDF for Python](#)).

Вычисление параметров корреляционного отклика

Вычисление параметров корреляционного отклика и его дальнейшее построение производится с использованием алгоритма преобразования Фурье с дробным показателем степени, позволяющего с точностью до дробного отсчета определить положение максимума дискретного сигнала ([Зорин, 2020](#)). Алгоритм заключается в поиске максимума корреляционной функции путем ее домножения на комплексную экспоненту, содержащую дробное значение отсчета. Алгоритм подразумевает несколько последовательных проходов с постоянным уменьшением области поиска максимума и шага ее прохода.

Взаимнокорреляционный спектр на выходе коррелятора *RASFX* представляет собой двумерный массив, каждая строка которого соответствует времени, а каждый столбец — частоте. Для получения корреляционного отклика на основе такого двумерного массива производится вычисление двумерного преобразования Фурье. Описанный алгоритм преобразования Фурье с дробным показателем степени применяется последовательно ко всем столбцам и строкам массива, т. е. производится вычисление двумерного преобразования Фурье с использованием одномерного:

$$\sum_{u=1}^{N-1} \sum_{v=1}^{M-1} G_{uv} e^{2\pi j \left[\frac{mu}{M} + \frac{nv}{N} \right]} = \sum_{u=1}^{N-1} \left[\sum_{v=1}^{M-1} G_{uv} e^{2\pi j \frac{mv}{M}} \right] e^{2\pi j \frac{nu}{N}},$$

где M и N — размеры двумерного массива, G_{uv} — отсчеты массива, u и v — номера отсчетов, соответствующие времени и частоте.

ОСШ отклика вычисляется с использованием формулы:

$$SNR = \frac{A - m}{\sigma} \cdot \sqrt{2 - \frac{\pi}{2}},$$

где A — амплитуда корреляционного отклика, m — средний уровень амплитуды шумовой подложки, σ — СКО шума, для вычисления которых из двумерного массива, содержащего корреляционный спектр, вырезается область с главным лепестком.

Величина случайной составляющей ошибки определения задержки корреляционного отклика, как правило, составляет порядка 7–15 пс. Оценка случайной составляющей ошибки производилась по формуле (Томпсон, 2003, с. 331)

$$\sigma_{\tau} = \frac{2\sqrt{3}}{2\pi B \cdot SNR},$$

где B — ширина полосы пропускания (МГц). Установленная авторами точность вычисляемой *Vision* задержки в корреляционном окне составляет десятые доли пс. Таким образом, *Vision* осуществляет вычисление значения задержки в корреляционном окне с точностью не ниже случайной составляющей ошибки определения задержки корреляционного отклика.

Полные и краткие отчеты по сеансам наблюдений

Vision предоставляет возможность формировать 3 типа отчетов по сеансам наблюдений. Полные и краткие отчеты, содержащие информацию о каждом частотном канале всех сканов внутри сеанса наблюдений, могут использоваться в случаях, когда не производится синтез частотных каналов. Отчеты по результатам синтеза предоставляют информацию о синтезированных полосах частот для каждого скана. При этом все 3 типа отчетов включают следующие разделы:

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences

Vision software

Report on the r5230a session

Report mode: full

Observation day: 2021.08.18

Report creation day: 2021.09.22

Clock frequency: 1024 MHz

Correlator: RASFX

1. Титульный лист с основной информацией о проведенном сеансе наблюдений: названием и датой его проведения (рис. 1a).

2. Раздел *Summary*, в котором в виде таблицы приведены рассчитанные параметры корреляционного отклика по каждому скану: задержка в корреляционном окне, частота интерференции, ОСШ (рис. 1b).

3. Графические результаты обработки для каждого скана.

Полные отчеты содержат графики зависимости амплитуды корреляционного отклика от задержки в корреляционном окне и частоты интерференции, трехмерное изображение отклика, спектральные характеристики и графики зависимостей ОСШ и фазы отклика от длительности скана. Графики сопровождаются вычисленными значениями параметров отклика. Также приводятся значения СКО ОСШ и фазы отклика внутри скана и частоты интерференции, вычисленной методом наименьших квадратов по линейному наклону фазы. Для вычисления СКО и осуществления метода наименьших квадратов используется библиотека *Python NumPy* (*NumPy*). На одной странице полного отчета размещается информация об одном частотном канале каждого обработанного *Vision* файла. Вверху страницы помещается заголовок, содержащий название обработанного файла, время его проведения и название частотного канала. На рис. 2 приведен фрагмент полного отчета, полученного по результатам обработки сеанса наблюдений R5230a, проведенного на РСДБ-сети «Квазар-КВО» 18 августа 2021 г. на радиотелескопах РТ-13 в обсерваториях «Бадарь», «Светлое» и «Зеленчукская» с регистрацией полосы пропускания шириной 512 МГц.

SUMMARY

(italics indicates that fringe does not exist)

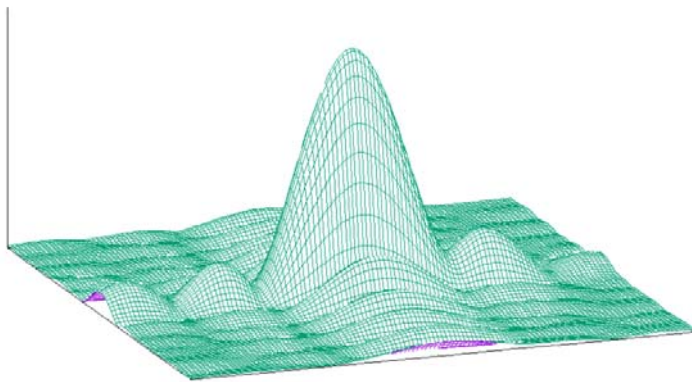
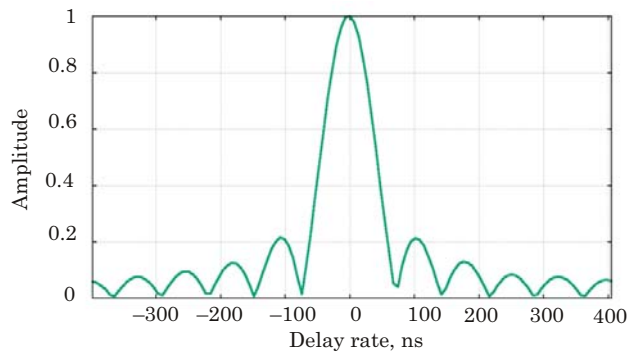
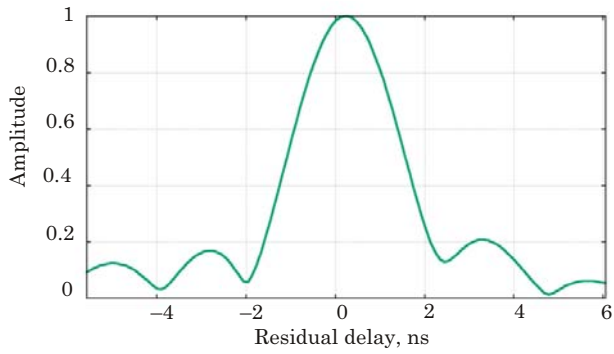
File	Source	Channel freq, MHz	Residual delay, ns	Delay rate, mHz	SNR
r5230a_230-0244a_bvsw.base	0420-014	S1 (2675.8 MHz)	-10.6152	-0.3089	53.65
		X1 (9103.6 MHz)	-8.5596	-0.3089	288.15
r5230a_230-0244a_bvzv.base	0420-014	S1 (2675.8 MHz)	5.2062	-1.6167	59.09
		X1 (9103.6 MHz)	-2.1285	-0.6915	290.25
r5230a_230-0244a_swzv.base	0420-014	S1 (2675.8 MHz)	16.007	-1.3523	83.9
		X1 (9103.6 MHz)	6.4185	-0.6358	515.54
r5230a_230-0305_bvsw.base	0059+581	S1 (2675.8 MHz)	-8.2187	-0.4038	148.01
		X1 (9103.6 MHz)	-5.6738	-3.1053	235.09
r5230a_230-0305_bvzv.base	0059+581	S1 (2675.8 MHz)	7.1691	0.21	98.59
		X1 (9103.6 MHz)	0.2355	-1.8899	198.9
r5230a_230-0305_swzv.base	0059+581	S1 (2675.8 MHz)	15.4933	0.6759	98.25
		X1 (9103.6 MHz)	5.9191	0.8785	382.68
r5230a_230-0403a_bvsw.base	0059+581	S1 (2675.8 MHz)	-7.5449	-1.7692	79.28
		X1 (9103.6 MHz)	-5.1269	-1.9735	237.01
r5230a_230-0403a_bvzv.base	0059+581	S1 (2675.8 MHz)	7.6573	-1.9735	73.53
		X1 (9103.6 MHz)	0.7364	-4.1518	208.18
r5230a_230-0403a_swzv.base	0059+581	S1 (2675.8 MHz)	15.4115	-0.612	111.26
		X1 (9103.6 MHz)	5.8702	-1.9735	381.33

a)

b)

Рис. 1. Отображение результатов работы *Vision*, полученных после обработки сеанса наблюдений R5230a, РТ-13: a — фрагмент титульного листа, b — фрагмента раздела *Summary*

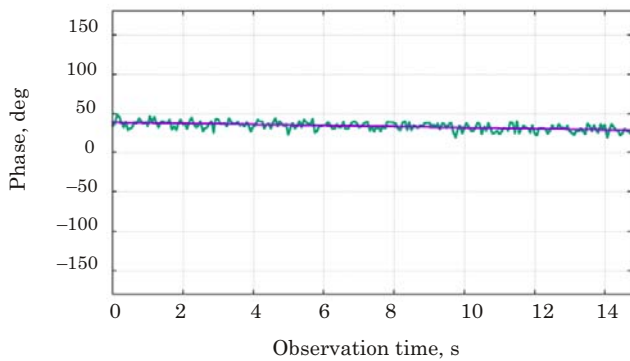
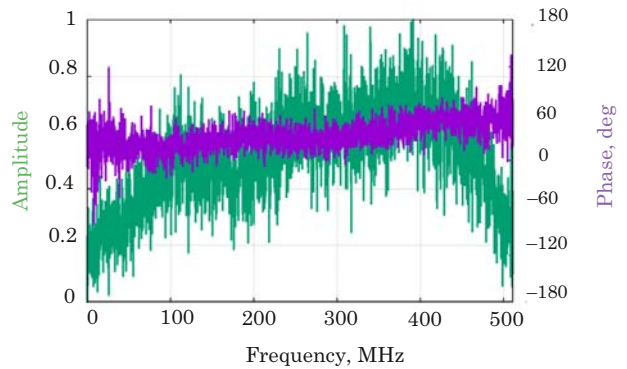
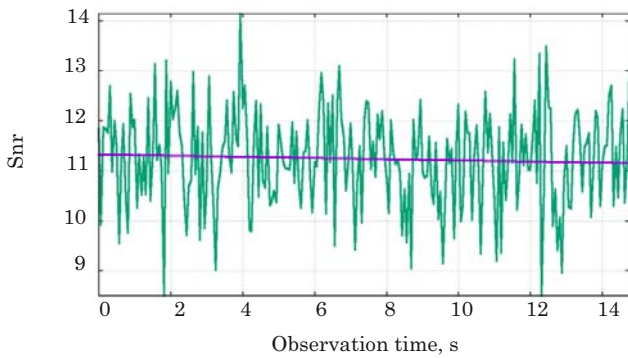
File: r5230a_230-0305_bvzv.base, time: 2021.08.18 03:05:26
 Channel: X1 (9103.6 MHz)



Residual delay: 0.2355 ns
 Delay rate: -0.8899 mHz
 SNR: 198.9

Time domain
 Accumulation period: 0.0625 s

Frequency domain
 Bandwidth: 512 MHz



Delay rate by phase slope: -1.9947 mHz
 Phase STD: 5.37 deg
 SNR STD: 0.99

Рис. 2. Отображение результатов работы *Vision*, полученных после обработки сеанса наблюдений R5230a, РТ-13: фрагмент полного отчета. Скан наблюдений 230-0305, база «Бадарь» – «Зеленчукская», частотный диапазон X

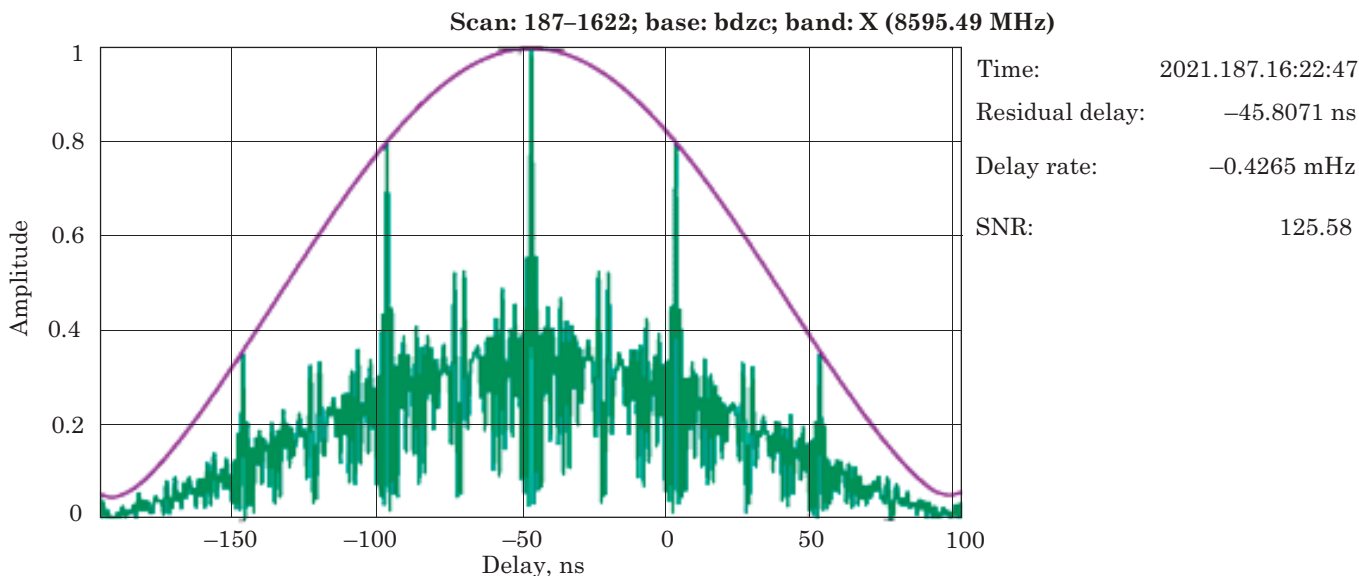


Рис. 3. Отображение результатов работы *Vision*, полученных по результатам обработки сеанса наблюдений R13505, РТ-32: фрагмент отчета по результатам синтеза частотных каналов. Скан наблюдений 187-1622, база «Бадарь» – «Зеленчукская», частотный диапазон X

Краткие отчеты содержат только графики зависимости амплитуды отклика от задержки в корреляционном окне и частоты интерференции и спектральные характеристики. Такие отчеты позволяют размещать на одной странице информацию о 4 частотных каналах одного скана наблюдений.

Отчеты по результатам синтеза частотных каналов

В *Vision* также реализована возможность создания отчетов по результатам синтеза частотных каналов совместно с разработанным в ИПА РАН ПО *VERS*. *VERS* осуществляет синтез и калибровку каналов по опорному источнику наблюдений, проводившихся на радиотелескопах РТ-32 РСДБ-комплекса «Квazar-КВО» в полосе пропускания 8 или 16 МГц. По ключу запуска ПО генерируются файлы с взаимнокорреляционными функциями и выходными данными обработки, которые далее считываются *Vision* для создания PDF-отчетов.

В отчетах по результатам синтеза частотных каналов содержатся графики зависимости амплитуды синтезированного отклика от задержки в корреляционном окне и вычисленные параметры отклика. Также приводится информация о названии и времени проведения скана, базе и частотном диапазоне. На рис. 3 приведен фрагмент отчета по синтезированным данным, полученным по результатам обработки ПО *VERS* сеанса наблюдений R13505, проведенного на РСДБ-сети «Квazar-КВО» 6 июля 2021 г. на радиотелескопах РТ-32 в обсерваториях «Бадарь» и «Зеленчукская» в частотной полосе с шириной 16 МГц.

Таким образом, помимо отчетов, содержащих информацию о каждом частотном канале всех сканов внутри сеанса наблюдений, *Vision* позволяет формировать отчеты по результатам синтеза частотных каналов, если синтез производился.

Заключение

Разработано многофункциональное ПО *Vision*, позволяющее по результатам корреляционной обработки РСДБ-наблюдений на корреляторе *RASFX* создавать графические отчеты, содержащие графики, изображения и рассчитанные параметры, необходимые для анализа проведенного сеанса РСДБ-наблюдений. Доступно 3 типа отчетов. Краткие отчеты предоставляют основную информацию о каждом частотном канале всех сканов внутри сеанса наблюдений. Полные отчеты предоставляют больше информации и позволяют, помимо основных характеристик корреляционного отклика и сигнального тракта, оценить флуктуации параметров внутри отдельных сканов. Также реализована возможность создания отчетов по результатам синтеза частотных каналов.

Благодарность

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квazar-КВО», ЦКП «Суперкомпьютерный центр «Высокопроизводительные вычисления в радиоастрометрии и космической геодезии».

Литература

Зорин М. С., Кен В. О. Программное обеспечение для анализа стабильности сигналов в приемно-регистрирующей аппаратуре радиотелескопа по результа-

там обработки сигналов фазовой калибровки // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 53. С. 3–8.

Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О. и др. Радиоинтерферометрический коррелятор на графических процессорных устройствах // Приборы и техника эксперимента. 2018. Вып. 6. С. 8–16.

Томпсон А. Р., Моран Дж. М., Свенсон Дж. У. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. М.: Физматлит, 2003. 331 с.

FPDF for Python [Электронный ресурс]. URL: <https://pyfpdf.readthedocs.io/en/latest> (дата обращения: 15.09.2021).

Haystack Observatory Postprocessing System (HOPS) [Электронный ресурс]. URL: [https://www.haystack.mit.](https://www.haystack.mit.edu)

[edu/haystack-observatory-postprocessing-system-hops](https://www.haystack.mit.edu/haystack-observatory-postprocessing-system-hops) (дата обращения: 22.09.2021).

NumPy [Электронный ресурс]. URL: <https://numpy.org> (дата обращения: 15.09.2021).

Petrov L., Kovalev Y. Y., Fomalont E. B., Gordon D. The very long baseline array galactic plane survey — VGaPS // The Astronomical Journal. 2011. Vol. 142, no. 2. P. 35.

Williams T., Kelley C. Gnuplot 5.4. An Interactive Plotting Program. 2020 [Электронный ресурс]. URL: http://www.gnuplot.info/docs_5.4/Gnuplot_5_4.pdf (дата обращения: 15.09.2021).