

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **045154**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2023.10.31**

(21) Номер заявки  
**202391996**

(22) Дата подачи заявки  
**2021.10.29**

(51) Int. Cl. **H01Q 5/20** (2015.01)  
**G01S 11/02** (2010.01)  
**G01J 3/28** (2006.01)  
**G06F 16/20** (2019.01)

---

(54) **СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ КАТАЛОГА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ  
РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ БЛАЗАРОВ**

---

(43) **2023.09.11**

(86) **PCT/RU2021/000473**

(87) **WO 2023/075632 2023.05.04**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ СПЕЦИАЛЬНАЯ  
АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ  
ОБСЕРВАТОРИЯ РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК (RU)**

(56) CN-U-206848371  
CN-A-107144741  
CN-A-113285224  
CN-A-105577197  
CN-A-113742088

(72) Изобретатель:

**Сотникова Юлия Владимировна,  
Удовицкий Роман Юрьевич,  
Муфахаров Тимур Васильевич, Власюк  
Валерий Валентинович, Мингалиев  
Марат Габдуллович, Цыбулев Петр  
Григорьевич (RU)**

---

(57) Изобретение относится к области формирования системы обработки, хранения и интеллектуального анализа данных астрономических измерений. Технический результат - повышение эффективности методов наблюдательной радиоастрономии за счет повышения точности абсолютных измерений, учета и минимизации влияния систематических ошибок измерений одного инструмента (телескопа) и влияния переменности нетеплового радиоизлучения объектов на результат. Результат достигается за счет методов обработки и систематизации многочастотных одновременных измерений. Заявляемый способ интегрирует в этот процесс этапы применения: методов контроля систем радиотелескопа - изменения эффективной площади и ширины главного лепестка диаграммы направленности антенны путем оперативного измерения вторичных калибровочных стандартов; метода устранения избыточного шума путем применения цифрового фильтра с бесконечной импульсной характеристикой на основе фильтра Баттерворта с нулевой фазовой характеристикой; методов интеллектуального и статистического анализа широкодиапазонных измерений; методов измерения мгновенных непрерывных радиоспектров объектов и долговременных кривых блеска; регламентирует способ создания распределенной файловой системы для надежного хранения данных наблюдений и резервного копирования результатов, экспорта данных между вычислительными узлами системы.

---

**B1**

**045154**

**045154**

**B1**

Заявленный способ разработан в рамках государственного контракта Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2022-1227 от 13.10.2022 г. и № 075-15-2020-778 от 30.09.2020 г.

### **Область техники**

Изобретение относится к области формирования системы обработки, хранения и интеллектуального анализа данных астрономических измерений. Способ предназначен для использования коллективами астрофизиков в научных исследованиях в качестве ключевого инструмента для решения задач наблюдательной радиоастрономии, требующих: (1) массовой обработки данных измерений широкополосных радиометров континуума с помощью специализированных алгоритмов; (2) использования методов автоматических расчетов параметров нетеплового радиоизлучения объектов по их мгновенным измерениям на радиотелескопе РАТАН-600 на частотах 1.1, 2.3, 4.7, 8.2, 11.2 и 22.3 ГГц с привлечением данных внешних каталогов для больших выборок блазаров, полученных в крупных обзорах и в программах мониторинга индивидуальных объектов в радиодиапазоне.

### **Предшествующий уровень техники**

Существующие средства обработки и представления астрономических данных, находящиеся в открытом доступе, суммируют многочастотные измерения, полученные одновременно на разных инструментах или измерения с одного инструмента на одной частоте. Такие средства не предоставляют доступ к текущим широкодиапазонным и одновременным данным радионаблюдений, а предоставляют изображения спектров/кривых блеска или доступ к уже опубликованным данным измерений. Аналогом изобретения является способ формирования каталога Multi-frequency Catalogue of Blazars, раскрытый в работах

Massaro и др. [1-2] (оригинальный текст на <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009A%26A...495..691M/abstract> с доступной pdf-версией), Massaro и др., 2015Ap&SS.357...75M (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015Ap%26SS.357...75M/abstract>).

Каталог содержит классификацию 3651 блазара, основанную на наблюдательных данных в радио, оптике и гамма-диапазонах, содержит их измерения из опубликованных данных крупных обзоров, предоставляет сервис для построения и анализа кривых SED (spectral energy distribution). Процесс публикации каталога включает стандартные этапы разработки базы данных и программы, подходящих для загрузки и обработки получаемых данных. Каталог размещен на <https://www.asdc.asi.it/bzcat/>.

Аналогами предложенного способа является группа каталогов (<https://www.ssdsc.asi.it/>) на портале Центра данных Space Science Data Center (SSDC) Итальянского космического агентства ASI (Italian Space Agency), представляющем многофункциональный центр научных операций, обработки и архивирования данных, обеспечивающем поддержку научных космических миссий. Система реализует доступ к опубликованным данным крупных обзоров неба в высокоэнергетических диапазонах электромагнитного спектра (Swift, AGILE, Fermi, NuSTAR и AMS), проводит кросс-идентификацию объектов в разных каталогах, подключает внешние каталоги, реализует фильтрацию измерений по эпохам наблюдений, конструирует кривые SED и рассчитывает их характеристики.

К недостаткам вышеуказанных каталогов относятся: отсутствие одновременных измерений на нескольких частотах см-диапазона, отсутствие широкодиапазонных измерений блазаров в радиоконтинууме, отсутствие возможности построения кривых блеска объектов каталога, отсутствие возможности построения радиоспектров объектов каталога.

Такие измерения используются астрофизиками для построения полной картины переменности нетеплового излучения активных ядер галактик (АЯГ), для определения временных задержек периодов активности и корреляции процессов на разных частотах, для выявления связи электромагнитного излучения в различных областях объектов. Подключаемые внешние радиокаталоги в указанных системах суммируют измерения с разных инструментов в разные эпохи наблюдений, что не позволяет исключить влияния систематических ошибок отдельных измерений и переменности исследуемых объектов на результат.

### **Раскрытие сущности изобретения**

Процесс обработки континуальных измерений радиоисточников, оценки характеристик их нетеплового излучения состоит из стандартных этапов: первичная обработка сырых радиометрических данных, применение алгоритмов повышения отношения сигнал/шум, локализация источника, измерение амплитуды и полуширины отклика, калибровка и расчет спектральной плотности потока, расчет спектральных характеристик радиоизлучения.

Заявляемый способ интегрирует в этот процесс этапы применения: методов контроля систем радиотелескопа - изменения эффективной площади и ширины главного лепестка диаграммы направленности антенны путем оперативного измерения вторичных калибровочных стандартов; метода устранения избыточного шума путем применения цифрового фильтра с бесконечной импульсной характеристикой на основе фильтра Баттерворта с нулевой фазовой характеристикой; методов интеллектуального и статистического анализа широкодиапазонных измерений; методов измерения мгновенных континуальных радиоспектров объектов и долговременных кривых блеска; регламентирует способ создания распределенной файловой системы для надежного хранения данных наблюдений и резервного копирования результатов, экспорта данных между вычислительными узлами системы. За счет предложенной архитектуры реализуются: оперативная обработка больших массивов радиоастрономических измерений одновре-

менно на шести частотах (1.1, 2.3, 4.7, 8.2, 11.2 и 22.3 ГГц), оценка статистических радиосвойств больших выборки блазаров, сценарии настраиваемой обработки с учетом состояния систем радиотелескопа, актуализация характеристик объектов с учетом их текущего состояния, хранение долговременных измерений вторичных калибровочных стандартов. Предложенная архитектура обеспечивает высокий уровень сохранности данных, их оперативного управления и возможность независимых вычислений отдельных узлов системы.

Задачей заявляемого изобретения является создание способа формирования многочастотного каталога измерений параметров радиоизлучения блазаров для автоматизации научных исследований в астрофизике.

Технический результат, достигаемый при использовании заявляемого изобретения, заключается в повышении эффективности методов наблюдательной радиоастрономии за счет повышения точности абсолютных измерений, учета и минимизации влияния систематических ошибок измерений одного инструмента (телескопа) и влияния переменности нетеплового радиоизлучения объектов на результат. Главным результатом способа является массовость, многочастотность и одновременность измерений.

Отличительной особенностью построения способа является архитектура системы обработки, осуществляющей многопоточковую обработку и калибровку широкополосных данных радиометров континуума и статистический анализ данных астрономических наблюдений. Ядром системы является набор РНР-модулей, которые активируются через веб-интерфейс и выполняют задачи, связанные с запуском внешних программ обработки сигналов, с взаимодействием с пользователем через визуализацию процесса и представления результатов, с взаимодействием с базой данных системы через MySQL-сервер.

Технический результат достигается за счет единой архитектуры системы и использования распределенной файловой системы. Для каждого из шагов процесса обработки и анализа астрономических данных - подготовка сырых данных, фильтрация, удаление линейных составляющих фона, векторное сложение одномерных сканов, локализация и детектирование радиоисточника, калибровка, расчет спектральной плотности потока, кросс-идентификация объектов, экспорт внешних каталогов, расчет спектральных характеристик - реализованы соответствующие алгоритмы в системе обработки многочастотных одномерных астрономических измерений и представления данных в интерактивном каталоге блазаров.

Заявленный способ формирования каталога блазаров включает следующие этапы.

а) Автоматизированная многопоточковая система оценки параметров радиоисточников, наблюдаемых на радиометрах континуума радиотелескопа РАТАН-600. Представляет собой комплекс программного обеспечения (ПО), объединяющий программные компоненты штатного пакета обработки наблюдений РАТАН-600 в среде Linux - FADPS [3] и ПО, разработанное авторами. Алгоритмы обработки данных реализованы на языках C и C++. В системе использована СУБД MySQL для универсальности доступа к исходным и появляющимся в процессе обработки наблюдений данным, а также для хранения конфигурации системы, информации о калибровочных объектах, характеристик радиотелескопа и радиометров, хранения полученных результатов. Связь системы обработки с СУБД организована с использованием языка РНР. Для взаимодействия с системой пользователю предоставлен веб-интерфейс. В процессе обработки наблюдатель задает входной массив данных, а также контролирует все последующие этапы обработки: оценку качества наблюдательного материала, оценки параметров калибровочных радиоисточников, получение калибровочных характеристик радиотелескопа и оценки параметров исследуемых объектов. Оценка параметров радиоисточников содержит шаги: локализация радиоисточника; вычитание линейного тренда и фоновой кривой более высокого порядка; фильтрация для повышения отношения уровня сигнал/шум путем применения разработанного цифрового фильтра с бесконечной импульсной характеристикой на основе фильтра Баттерворта с нулевой фазовой характеристикой; весовое векторное усреднение одномерных сканов; детектирование сигнала; расчет амплитуды и полуширины гауссова отклика неподвижного радиотелескопа на прохождение радиоисточника через диаграмму направленности; расчет калибровочных зависимостей на всех частотах измерений, представляющих усредненную за время цикла наблюдений суммарную зависимость калибровочного коэффициента за атмосферное поглощение и эффективной площади телескопа, контроль параметров антенных и приемных систем по измерениям вторичных калибровочных стандартов [4-7], абсолютные измерения объектов по спектральной плотности потока.

б) Формирование каталога блазаров путем экспорта полученных измерений в виде экваториальных координат объектов, эпох измерений, значений спектральных плотностей потоков. Отождествление объектов сформированного каталога блазаров с объектами каталогов радиоастрономических обзоров и опубликованных индивидуальных измерений объектов на основе кросс-идентификации координат с заданным окном поиска.

в) Интерактивный расчет спектральных индексов (средних и по индивидуальным эпохам наблюдений) и индекса переменности на заданных частотах. Данный этап включает следующие шаги: интерактивный расчет радиосветимости на основе полученной средней спектральной плотности потока и спектрального индекса на 4.7 ГГц; расчет статистики параметров выборки блазаров: количество измерений, красное смещение, звездная величина, радиосветимость и радиопоток; построение квазиодновременных радиоспектров с учетом данных внешних каталогов, построение многочастотных кривых блеска, фильт-

рация графических изображений по временным периодам; реализация экспорта данных главной таблицы каталога с базовыми параметрами базаров, включающими измерения из литературы, данных измерений РАТАН-600, данных внешних каталогов, данных расчетов спектральных индексов и индексов переменности.

г) Реализация универсального доступа к исходным и появляющимся в процессе обработки данным, к данным для хранения конфигурации системы, информации о калибровочных объектах, характеристик радиотелескопа и радиометров, хранения полученных результатов. Сохранение в распределенной файловой системе результатов промежуточных и финальных вычислений спектральных плотностей потоков, координат и эпох наблюдений, графических файлов результатов, сформированного каталога, содержащего значения атрибутов объектов.

Этапы а)-г) повторяются многократно для каждого цикла наблюдений для каждой частоты измерений этапы воспроизводятся одновременно.

К преимуществам предложенного способа организации каталога относится возможность получить максимально полную информацию об объектах каталога в радиодиапазоне, благодаря организации доступа к базам данных NED, SIMBAD, VizieR и CATS. Это позволяет оценить эволюцию объекта на масштабах времени 20-30 лет. Предложенный способ формирования каталога нацелен на получение, анализ и систематизацию многочастотных измерений параметров радиоизлучения базаров, полученных на частотах 1.1, 2.3, 4.7, 8.2, 11.2 и 22.3 ГГц одновременно, выполненных с использованием одного инструмента, что позволяет исключить влияние систематических ошибок измерений на полученный результат. К достоинству данного каталога можно отнести представление измерений плотностей потоков в виде кривых блеска и радиоспектров, что позволяет визуально оценить поведение объекта. Представленные в каталоге интерактивные расчеты спектральных индексов и индексов переменности основаны на измерениях, сделанных одновременно (3-5 минут) на шести частотах, что дает преимущество исключать влияние переменности радиоизлучения на получаемые параметры радиоизлучения.

#### **Краткое описание чертежей**

Сущность изобретения поясняется чертежами, где:

на фиг. 1 представлена структура программного обеспечения автоматизированной системы оценки параметров радиоисточников по наблюдениям на радиотелескопе РАТАН-600;

на фиг. 2 представлена структурная схема системы обработки и формирования каталога параметров радиоизлучения базаров;

на фиг. 3 представлена схема алгоритма обработки одномерного скана измерений широкополосного радиометрического комплекса.

На фигурах приняты следующие обозначения:

- 1 - пользовательский интерфейс на основе веб-браузера;
- 2 - клиентский сервер, на котором иницируется обработка;
- 3 - ядро сервера системы в виде набора РНР-модулей, которые активируются пользователем через вебинтерфейс и выполняют процедуры обработки (4);
- 4 - этапы обработки - запуск внешних программ обработки сигнала, взаимодействие с пользователем;
- 5 - MySQL-сервер для формирования и обработки запросов;
- 6 - встроенная в систему база данных, содержащая набор таблиц со списками и параметрами радиоисточников, подлежащих обработке в текущем сеансе; с информацией из FITS-заголовков входных файлов; физические параметры радиоастрономических объектов: экваториальные координаты, альтернативное имя, красное смещение, звездная величина, тип АЯГ; система идентифицирует объекты входного набора данных с объектами этой таблицы по координатам с окном 30×30 секунд по прямому восхождению и склонению; таблица параметров калибровочных объектов; таблица параметров антенны и радиометров; таблица со служебными константами, используемыми при реализации алгоритмов обработки: значения рабочих окон записей, окон вычитания линейного и нелинейного фона и др.;
- 7 - экспорт исходных данных наблюдений из архива наблюдательных данных в виде многочастотного RFLX формата [8];
- 8 - создание входного набора данных - списка объектов в заданном интервале дат и времени с учетом конфигурации антенны (сектор радиотелескопа, номер вторичного зеркала) с учетом авторства наблюдательной программы и требуемого частотного диапазона наблюдений;
- 9 - создание набора системных опций, которые используются при исполнении алгоритмом обработки сигнала, такие, как критерии для определения ложных по оценке наблюдаемого времени кульминации объекта и полуширины гауссового отклика, ввод дополнительных ошибок измерений при необходимости, режим процедуры детектирования сигнала по единичному измерению и по усредненному;
- 10 - блок последовательных операций обработки цифрового радиоастрономического сигнала;
- 10.1 - локализация источника на одномерной записи путем выделения заданного окна относительно расчетного положения объекта;
- 10.2 - вычитание линейных составляющих фона одномерного скана на масштабе всего наблюдения;
- 10.3 - вычитание составляющих фона второго или третьего порядка на масштабе выделенного окна места локализации источника;

10.4 - применение фильтра нижних частот (на основе фильтра Баттерворта) для повышения отношения сигнал/шум;

10.5- определение амплитуды сигнала методом гаусс-анализа;

11 - оценка параметров антенной и приемных систем по обработке калибровочных источников, таких, как ширина главного лепестка диаграммы направленности ДН телескопа, изменение эффективной площади со временем, измерение хода усиления радиометров;

12 - расчет калибровочных зависимостей на всех частотах измерений;

13 - расчет средних и/или единичных значений спектральных плотностей потоков за цикл на всех частотах измерений и их ошибок, средних эпох наблюдений, построение мгновенных радиоспектров и кривых блеска объектов, создание и запись таблицы измерений объектов для экспорта в базу данных интерактивного каталога BLcat;

14 - загрузка экспортной таблицы в каталог на [www.sao.ru/blcat/](http://www.sao.ru/blcat/), интерактивный расчет параметров радиоизлучения объектов на заданных частотах;

15 - отождествление объектов таблицы этапа (14) с объектами внешних каталогов путем кросс-идентификации экваториальных координат с заданным окном;

16 - отождествление объектов таблицы этапа (14) с объектами базового списка блазаров путем кросс-идентификации экваториальных координат с заданным окном;

17 - интерактивное построение радиоспектров и кривых блеска на нескольких частотах, визуализация, подключение внешних каталогов;

18 - интерактивное построение гистограмм распределения величин из главной таблицы каталога, расчет статистики, визуализация;

19 - создание набора данных для экспорта.

#### **Осуществление изобретения**

Для однозначной трактовки положений настоящей заявки ниже приведены основные определения, используемые при описании изобретения.

Блазары - активные ядра галактик, релятивистский джет которых направлен близко по лучу зрения наблюдателя [9], благодаря этому блазары детектируются во всем диапазоне электромагнитного спектра - от радиоволн до гамма-лучей.

Спектральная плотность потока - мощность излучения в интервале частот 1 Гц, принимаемая площадью 1 м<sup>2</sup> за единицу времени, единица измерения Янский, 1 Ян = 10<sup>-26</sup> Вт/ м<sup>2</sup> Гц.

Антенная температура - величина, характеризующая мощность электромагнитного излучения, принимаемого антенной, эквивалентная температуре абсолютно черного тела, которое на выходе приемной системы дает такую же мощность излучения, как исследуемый объект.

Диаграмма направленности телескопа (ДН) - зависимость мощности принимаемого сигнала от направления.

RFLEX файл - RATAN-FLEX файл, где FLEX (FLexible EXchange) - формат гибкого обмена данными, является многочастотным форматом, когда в одном файле хранятся данные, полученные на разных радиометрах.

F-формат является подмножеством FITS-формата данных и представляет собой одномерный массив (временной ряд), соответствующий одному наблюдению на одной длине волны одним радиометром (в отличие от "многочастотного" RFLEX-формата данных).

FADPS - штатный пакет модулей для обработки данных широкополосных радиометров континуума [3].

Вторичные калибровочные стандарты - внегалактические радиоисточники, используемые для абсолютной привязки шкалы спектральных плотностей потоков, которые характеризуются стационарным радиоизлучением с известной с высокой точностью спектральной плотностью потока, поляризацией и линейными размерами.

Калибровка измерений по спектральной плотности потока - набор коэффициентов, которые используются при пересчете антенных температур в единицы спектральной плотности потока на высоте исследуемого объекта на каждой частоте. Калибровочная кривая фактически отражает изменение эффективной площади телескопа от высоты.

Радиосветимость - количество энергии, испускаемое объектом за единицу времени в радиодиапазоне в единичном интервале частот, ед. измерения Вт/Гц.

Спектральный индекс - показатель степени  $\alpha$  в выражении  $S(\nu) \sim \nu^{-\alpha}$ , характеризующий изменение спектральной плотности потока космического объекта  $S(\nu)$  с изменением частоты  $\nu$ . Связан с показателем энергетического спектра в распределении электронов по энергиям  $N(E) = \text{const } E^{-\gamma}$  в теории синхротронного излучения, где  $\gamma = (\alpha - 1)/2$ .

Активные ядра галактик (АЯГ) - внегалактические радиоисточники, большая доля нетеплового электромагнитного излучения которых определяется вкладом ядра. Происходящие в них процессы мощного энерговыделения не объясняются активностью находящихся в них отдельных звезд и газово-пылевых комплексов.

Базовая обработка радиометрического сигнала содержит основные этапы: система регистрации производит оценку амплитуды калибровочного сигнала для каждого радиометра. Для учета нестабильности усиления радиометров применяется калибровка сигнала радиометра, которая заключается в подаче калибровочного сигнала с постоянной мощностью на вход радиометра путем включения калибровочного генератора шума (ГШ) в начале и в конце наблюдения каждого радиоисточника. Мощность ГШ постоянна и известна в градусах эквивалентной шумовой температуры (в градусах Кельвина, К). В конце каждого наблюдения система регистрации производит оценку величины  $A_{ГШ}$  (в отсчетах АЦП) - отклика радиометра на калибровочный сигнал с амплитудой  $T_{ГШ}$  (К). Пары чисел  $A_{ГШ}$  и  $T_{ГШ}$  записываются в заголовок RFLX-файла для каждого радиометра. В дальнейшем эти оценки применяются для калибровки усиления радиометров и перевода данных в натуральную шкалу единиц - эквивалентную шумовую температуру в градусах Кельвина. Также, система регистрации производит вычисление среднего звездного времени, соответствующего наблюдению, полученному в атомной шкале ТАИ, и выражает время начала наблюдения и временной интервал между отсчетами в шкале среднего звездного времени. Атомная шкала времени поддерживается синхронизацией по спутниковой системе GPS.

Ниже представлено пошаговое описание заявляемого способа, описание схемы устройства, реализуемого данного способа.

Исследование нетеплового излучения космических объектов требует их оперативных измерений одновременно на нескольких частотах в момент активности, высокой точности абсолютных измерений, наличия равномерных временных рядов. Это связано с повышенным интересом к блазарам в свете установления связи активных ядер галактик и внегалактических источников нейтрино сверхвысоких энергий (PeV). Для исследования физики такой связи получение информации о нетепловом радиоизлучении блазаров на частотах от МГц до десятков ГГц является крайне актуальной задачей астрономии.

Для реализации способа производится цифровая обработка астрономического сигнала широкополосных радиометров континуума РАТАН-600 для измерений параметров радиоисточников. Структура ПО системы автоматизированной оценки параметров радиоисточников объединяет программные компоненты штатного пакета обработки континуальных измерений FADPS [3] и программное обеспечение, разработанное авторами. Структура ПО системы обработки схематично показана на фиг. 1. Для реализации выбрана архитектура "клиент-сервер", обработка инициируется пользователем на клиентской стороне через веб-интерфейс (блок 1, фиг. 1) и выполняется на стороне Apache-сервера (блок 2, фиг. 1). Архитектура реализует централизованное сопровождение ПО на сервере. В случае необходимости в роли и клиента, и сервера может выступать один и тот же компьютер. Основным ядром сервера системы (блок 3, фиг. 1) является набор РНР-модулей, которые активируются пользователем через веб-интерфейс и выполняют все задачи, связанные с процедурой: запуск внешних программ обработки сигналов, взаимодействие с пользователем через Apache-сервер - визуализация процесса обработки (блок 4, фиг. 1) и представления результатов, взаимодействие через MySQL-сервер (блок 5, фиг. 1) с базой данных системы (блок 6, фиг. 1).

Встроенная в систему база данных содержит набор таблиц:

Входной набор данных - список радиоисточников, подлежащих обработке в текущем сеансе; хранит всю информацию, полученную из FITS-заголовков входных файлов; ключевым полем таблицы являются уникальные имена источников, определяемые координатами и датой наблюдений;

Известные радиоисточники - физические параметры радиоастрономических объектов базы данных системы: координаты, альтернативное имя, красное смещение, звездная величина в R фильтре и тип АЯГ; система идентифицирует объекты Входного набора данных с объектами этой таблицы по координатам с окном 30×30 секунд по прямому восхождению и склонению;

Параметры калибровочных объектов;

Параметры антенны и радиометров;

Служебные константы, используемые при реализации алгоритмов обработки: значения рабочих окон записей, окон вычитания линейного и нелинейного фона, ширина полосы среза фильтра низких частот.

Обработка цифрового сигнала наблюдательных данных производится ядром системы в блоке 4, фиг. 1.

На начальном этапе оценки параметров радиоисточников в систему импортируются "сырые" наблюдательные данные радио континуума (блок 7, фиг. 2), представляющие собой многочастотные RFLX файлы. Для построения окончательного сигнала радиометра при первичной обработке выполняется его синтез в виде полусуммы двух одномерных временных рядов, каждый из которых соответствует одному полупериоду модуляции радиометра [10].

На следующем этапе определяется входной набор данных, блок 8 (фиг. 2) - содержит синтез выходных сигналов радиометров согласно их текущей архитектуре, пересчет координат и привязка временной шкалы на эпоху J2000 для объектов, заполнение таблицы базы данных системы параметрами заголовков F-файлов, формирование директорий для физического хранения исходных и промежуточных данных и окончательных результатов. На этом этапе производится автоматическая идентификация радиоисточников по координатам с заданной точностью с таблицей известных объектов. Формируется список калибровочных источников наблюдательного цикла путем идентификации объектом со списком Калибровоч-

ных источников в базе данных системы.

Дальнейшая обработка сводится к получению параметров для двух логических подмножеств: калибровочных радиоисточников и исследуемых объектов. Для автоматизированной процедуры при обращении к каждому одномерному скану измерений из таблиц данных с системными константами считываются (блок 9, фиг. 2) параметры для реализации каждого действия алгоритма обработки.

Массивы двух подмножеств (исследуемые и калибровочные объекты) направляются в одну и ту же автоматическую процедуру (блок 10, фиг. 2) оценки указанных параметров, которая включает: выделение участка записи, содержащего радиоисточник (блок 10.1, фиг. 3), выделение на выбранном участке линейного тренда (блок 10.2, фиг. 3), а также фоновой кривой более высокого порядка (блок 10.3, фиг. 3). При обработке устраняется избыточный шум путем применения фильтра (блок 10.4, фиг. 3) низких частот (ФНЧ), в качестве которого применен цифровой фильтр с бесконечной импульсной характеристикой на основе фильтра Баттерворта с нулевой фазовой характеристикой. Свойство нулевой фазовой характеристики ФНЧ обеспечивается путем двукратной фильтрации сигнала фильтром вдвое меньшего порядка, причем перед вторым шагом фильтрации производится "обращение времени" массива данных. После ФНЧ-фильтрации производится аппроксимация отклика на источник гауссианой (блок 10.5, фиг. 3). В результате для всех объектов получены искомые оценки параметров: амплитуды (антенная температура  $T_{a,v}$ ) и полуширины гауссова отклика на всех шести длинах волн одновременно  $i_x$ . Все полученные на данном этапе обработки оценки параметров источников заносятся в базу данных системы для использования их на следующем этапе обработки. Для калибровочных источников полученные значения вносятся в отдельную таблицу и производится расчет калибровочных зависимостей на шести частотах для данного цикла (блок 11, фиг. 2).

Программное обеспечение для данного этапа обработки автоматизирует процесс вызова необходимых методов и подготовки входных данных для них, а также хранение промежуточных и выходных результатов. При этом графический интерфейс отображает всю необходимую информацию: таблицы с оценками параметров радиоисточников, исходные и обработанные сигналы радиоисточников.

После определения основных характеристик радиоисточников (дата, антенная температура, спектральная плотность потока) полученные значения записываются в базу и формируется файл экспорта для электронного каталога VLcat (блок 14, фиг. 2), который загружается в каталог пользователем.

Процедура калибровки измерений по спектральной плотности потока детально раскрывается. Калибровка амплитуды исследуемых объектов (блок 11, фиг. 2) по спектральной плотности потока излучения производится на основе наблюдений вторичных калибровочных радиоисточников. Список калибровочных объектов, значения спектральных плотностей потоков, поправки на линейную поляризацию и угловой размер хранятся в базе данных системы и могут актуализироваться администратором системы. Для РАТАН-600 эффективная площадь  $A_{eff,v}(h)$  зависит от высоты наблюдаемого источника.

Наблюдаемая спектральная плотность потока  $S_{v,vis}$  определяется из известного соотношения:

$$S_{v,vis} = 2kT_{a,v} / A_{eff,v}(h) = g_v(h)T_{a,v}$$

где

$$g(h) = 2kA_{eff,v}(h)$$

здесь  $T_{a,v}$  - антенная температура,  $k$  - постоянная Больцмана,  $g(h)$  - коэффициент, отражающий изменение эффективной площади антенны с высотой  $h$ . При построении калибровочных кривых видимый поток  $S_{v,vis}$  от калибровочного радиоисточника пересчитывается к истинному радиопотоку  $S$  согласно формуле:

$$S = g_1 g_2 S_{v,vis}$$

где коэффициент  $g_1$  - учитывает угловые размеры, а коэффициент  $g_2$  - поляризацию калибровочных источников. Коэффициенты рассчитываются заранее (или заимствуются из литературы) и вносятся в базу данных системы. Учет поляризации калибровочного источника производится согласно известной формуле:

$$g_2 = (1-p)/2 + p \cos^2(\psi/2)$$

Здесь  $\psi$  - угол между плоскостью поляризации источника и антенны на сфере Пуанкаре. Величина  $g_2$  является коэффициентов связи волны от источника с антенной. Для источников, поляризованных только линейно  $\Psi = 2(\lambda_a - \lambda_i)$ , где  $a$  и  $i$  - позиционные углы поляризации источника антенны. В случае, когда исследуемые источники не являются точечными, вводится поправка на "конечность" размеров источника, которая принимает значения больше 1 (угловые размеры источника больше размеров ДН телескопа ( $\varphi_i \gg \varphi_F$ )). Для источника с гауссовым распределением радиояркостности при аппроксимации гауссианой такая поправка  $K$  определяется соотношением:

$$K = \sqrt{\left[1 + \left(\frac{\varphi_{ix}}{\varphi_{Fx}}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{\varphi_{iy}}{\varphi_{Fy}}\right)^2\right]}$$

где  $\varphi_{ix}$  и  $\varphi_{iy}$  - горизонтальный и вертикальный угловые размеры источника,  $\varphi_{Fx}$  и  $\varphi_{Fy}$  - горизонтальный и вертикальный угловые размеры диаграммы, которые можно определить по известным точечным

источникам.

Полученные калибровочные кривые для выбранной конфигурации радиотелескопа и для всех длин волн применяются при пересчете антенных температур в плотности потоков для всех исследуемых объектов данного наблюдательного сета (блок 13, фиг. 2), согласно формуле:

$$S_{v,i} = K \bar{g}_v(h) T_{a.v,i}$$

где индекс "i" относится к параметрам исследуемого объекта.

Суммарная погрешность измерений спектральной плотности потока учитывает погрешность определения антенной температуры при аппроксимации кривой прохождения источника гауссианой, ошибку оценки калибровочной кривой, ошибку определения антенной температуры по эталонному источнику шумовой мощности в радиометре. Общая относительная среднеквадратичная ошибка спектральной плотности потока определяется из соотношения:

$$\frac{\sigma_t}{S_v} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_c}{g_v(h)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{T_{a.v}}\right)^2}$$

где t - значение абсолютной погрешности спектральной плотности потока S, c - стандартная ошибка калибровочной кривой, составляющая 2-15% на разных углах в зависимости от длины волны, m - стандартная ошибка измерения антенной температуры T<sub>a,v</sub>, g<sub>v</sub>(h) - функция зависимости калибровочного коэффициента от высоты установки антенны на частоте.

Система обработки предоставляет информацию о параметрах антенной системы, таких как полуширина главного лепестка ДН, изменение эффективной площади A<sub>eff,v</sub> со временем и параметры радиометрического комплекса (блок 9, фиг. 2). Для измерений параметров антенной системы (блок 12, фиг. 2) используются наблюдения двенадцати стандартных точечных калибровочных объектов. Ежедневные измерения калибровочных объектов позволяют своевременно выявлять отклонение экспериментальных значений указанных величин от расчетных на каждой высоте.

Также система обработки графически представляет нормированные значения сигнала калибровки и среднего уровня сигнала для каждого из радиометров полной мощности, что позволяет оперативно реагировать на возможные неисправности в радиометрах.

При постоянном калибровочном сигнале и переменном усилении в радиометре напряжение на выходе радиометра полной мощности можно записать в форме:

$$V_{sys}(t) = kT_{sys} B \gamma G(t)$$

где полное усиление G(t) меняется со временем. Здесь k - постоянная Больцмана, T<sub>sys</sub> - температура система "радиотелескоп+радиометр", B - СВЧ-полоса радиометра, - вольт-ваттная характеристика квадратичного детектора. При включении постоянного калибровочного сигнала V<sub>calib</sub> напряжение на выходе радиометра получает добавку равную:

$$V_{calib}(t) = kT_{calib} B \gamma G(t)$$

Эта величина напряжения измеряется во время процедуры калибровки радиометра. Если зафиксировать в произвольный момент времени t=t<sub>0</sub> значение V<sub>calib</sub>(t) (назовем его V<sub>calib,0</sub>) - это напряжение будет соответствовать какому-то конкретному усилению, назовем его G<sub>0</sub>. Тогда для любого другого момента времени можно записать:

$$V_{calib}(t) = kT_{calib} B \gamma G_0 g(t) = V_{calib,0} g(t)$$

где g(t) - переменная часть усиления, где:

$$\frac{V_{calib}(t)}{V_{calib,0}} = g(t)$$

демонстрирует относительные изменения усиления со времени (относительно усиления G<sub>0</sub>). Усиление в радиометре является функцией температуры окружающей среды. Гладкое поведение этой кривой говорит об отсутствии неисправностей в системе калибровки радиометра. Суточный ход отслеживается на кривой относительного уровня сигнала радиометра полной мощности. Тогда выражение для измеряемого напряжения на выходе радиометра полной мощности с учетом изменений температуры системы "радиотелескоп+радиометр" (ΔT<sub>sys</sub>) и усиления со временем:

$$V_{sys}(t) = kT_{sys}(t) B \gamma G(t)$$

Так же, как и для построения кривой относительного усиления, фиксируется момент времени t<sub>0</sub>, которому соответствует усиление G<sub>0</sub> и температура системы T<sub>sys,0</sub> и выходное напряжение радиометра V<sub>sys,0</sub>=kT<sub>sys,0</sub>BγG<sub>0</sub>. Тогда в любой другой момент времени усиление G(t) будет равно G<sub>0</sub>g(t), а температура системы будет равна T<sub>sys,0</sub>+T<sub>sys</sub>(t). При подстановке в формулу для V<sub>sys</sub> этих зависимостей и делении полученных выражений на V<sub>sys,0</sub> окончательно получается:

$$\frac{V_{sys}(t)}{V_{sys,0}} = \left(1 + \frac{\Delta T_{sys}(t)}{T_{sys,0}}\right) g(t)$$

Из этого выражения видно, что относительные изменения уровня сигнала радиометра полной мощности отражают произведение  $T_{sys}(t)g(t)$ . Измерения хода усиления радиометра представляются вместе с измерениями физической температуры в приемной кабине вторичного зеркала и позволяют численно оценить температурную зависимость усиления радиометров (около 1.1% на 1 °C в рабочем температурном диапазоне радиометров 10-30 °C). Оценки параметров систем телескопа позволяют повысить точность измерений радиоисточников.

Алгоритмы систематизации и обработки параметров нетеплового радиоизлучения блазаров каталога VLcat. На стадии загрузки экспортного файла с рассчитанными значениями спектральных плотностей потоков блазаров на шести частотах и средними эпохами измерений таблица измерений записывается в базу данных каталога, производится отождествление (блок 15, фиг. 2) объектов таблицы с объектами базового списка блазаров (из каталога Roma-BZCAT) путем кросс-идентификации экваториальных координат с заданным окном; также производится отождествление (блок 16, фиг. 2) объектов таблицы с объектами внешних каталогов путем кросс-идентификации экваториальных координат с заданным окном. Внешние каталоги отбираются из базы данных NED (<https://ned.ipac.caltech.edu/>), CATS ([www.sao.ru/cats](http://www.sao.ru/cats)) и Vizier (<https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>).

Интерактивное построение радиоспектров и кривых блеска на 6-ти частотах РАТАН-600 осуществляется на этапе обращения пользователя к разделу Поиск данных (Data explorer, блок 17, фиг. 2), на этом этапе визуализация и подключение внешних каталогов осуществляется в отдельном окне, данные внешних каталогов доступны для скачивания в виде текстовых файлов.

Объекты таблицы блазаров, экспортированные из системы обработки записываются в Главную таблицу каталога с актуализацией среднего значения спектральной плотности потока и радиосветимости (блок 18, фиг. 2). Параметры блазаров отображаются в колонках Главной таблицы с возможностью фильтрации, расчета и визуализации статистики по колонкам (блок 19 - создание набора данных для экспорта).

Структура каталога.

Текущая версия каталога включает более 1600 блазаров всех типов, реализует расчет параметров их нетеплового радиоизлучения, статистику по выборке блазаров, оперативный доступ к данным измерений РАТАН-600, данным измерений внешних каталогов, экспорт данных. Список объектов с основными параметрами и измерениями РАТАН-600 представлен в онлайн формате. Интерактивно производится расчет величин спектральных индексов и амплитуды переменности на шести частотах, радиосветимости объектов на частоте 4.7 ГГц. Каталог состоит из двух основных частей.

Главная таблица отображает (блок 17, фиг. 3) количество циклов наблюдений на РАТАН-600, экваториальные координаты (на эпоху J2000.0) и имя блазара, красное смещение (NED database), звездную величину в R-фильтре (NED), среднее значение спектральной плотности потока на частоте 4.7 ГГц, рассчитанное из измерений РАТАН-600, среднее значение радиосветимости, тип блазара (BL Lac, BL Lac candidates, BL Lac.g.dom, FSRQ (flat spectrum radio quasars), blazars uncertain type). На базе Главной таблицы работает статистика по колонкам: сортировка, расчет медианных, средних значений с СКО (среднеквадратическое отклонение) по подвыборкам, построение распределений величин. По выбранным объектам рассчитываются спектральные индексы и амплитуды переменности, доступен экспорт Главной таблицы и расчетных величин в форматах csv, latex и raw text.

Вторая часть каталога (блок 18, фиг. 2) суммирует многочастотные измерения спектральных плотностей потоков, полученные на частотах 1.1, 2.3, 4.7, 7.7/8.2, 11.2 и 21.7/22.3 ГГц на РАТАН-600 одновременно. Для измерений приведены средние наблюдательные эпохи, рассчитанные в системе автоматизированной обработки астрономического сигнала для данных широкополосных радиометров континуума РАТАН-600. В этой части каталога интерактивно формируются континуальные радиоспектры и кривые блеска радиоизлучения блазаров, полученные на РАТАН-600, подключаются измерения в радиоконтинууме из внешних опубликованных каталогов, производится фильтрация данных по эпохам измерений и экспорт внешних данных (блок 19).

Список объектов и их параметры из Главной таблицы доступен для экспорта (блок 19, фиг. 3) в различных форматах (csv, latex, raw) при нажатии кнопки "Export the main Table and RATAN-600 data". В этом разделе рассчитываются квазиодновременные спектральные индексы блазаров по данным РАТАН-600, считаются средние спектральные индексы и индекс переменности на выбранных частотах. Расчеты доступны для экспорта (блок 19, фиг. 3). Данные РАТАН-600 доступны в форме спектров радиоконтинуума и кривых блеска, таблиц плотностей потоков при нажатии на кнопки "Data Explorer" или "Export the main Table and RATAN-600 data".

Спектральные индексы рассчитываются по формуле:

$$\alpha = \frac{\log S_2 - \log S_1}{\log \nu_2 - \log \nu_1}$$

где  $S_1$  и  $S_2$  - спектральные плотности потоков на частотах  $\nu_1$  и  $\nu_2$ . В случае нескольких эпох измерений

предварительно рассчитываются средние значения плотностей потоков. Индекс переменности на различных частотах рассчитывается по формуле [11]:

$$Var_S = \frac{(S_i - \sigma_i)_{max} - (S_i + \sigma_i)_{min}}{(S_i - \sigma_i)_{max} + (S_i + \sigma_i)_{min}}$$

где  $S_{max}$  и  $S_{min}$  - максимальная и минимальное значение плотности потока за все эпохи измерений;  $\sigma_{S_{max}}$  и  $\sigma_{S_{min}}$  - их среднеквадратические ошибки.

Спектральный индекс может быть рассчитан как для единственной наблюдательной эпохи на РАТАН-600, так и для полного периода наблюдений как усредненный индекс. Производится оценка монохроматической радиосветимости на частоте 4.7 ГГц:

$$P_{4.7} = 4\pi D_L^2 S_{4.7} (1+z)^{-\alpha-1}$$

где  $S_{4.7}$  - измеренная плотность потока на 4.7 ГГц,  $z$  - красное смещение,  $\alpha$  - средний спектральный индекс на 4.7 ГГц и  $D_L$  - фотометрическое расстояние. Для расчета расстояний яркости мы использовали  $\Lambda$ CDM космологию с  $H_0=67.74$  км/с<sup>-1</sup>Мпк<sup>-1</sup>,  $\Omega_m=0.3089$ . Неопределенности параметров ( $\alpha$ ,  $Var_S$  и  $P_{4.7}$ ) рассчитываются как корень квадратный из суммы квадратов относительных ошибок параметров, включенных в формулу.

Заявленный способ разработан в рамках государственного контракта Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2022-1227 от 13.10.2022 г. и № 075-15-2020-778 от 30.09.2020 г.

### Промышленная применимость

Таким образом, описанный способ позволяет создавать каталоги измерений параметров радиоизлучения блазаров, которые могут быть использованы коллективами астрофизиков в научных исследованиях в качестве ключевого инструмента для решения задач наблюдательной радиоастрономии.

Источники информации.

1. Massaro E., Giommi P., Leto C., Marchegiani P., Maselli A., Perri M., Piranomonte S., Scavi S., «Roma-BZCAT: a multifrequency catalogue of blazars», A&A, 495, 691, 2009.
2. Massaro E., Maselli A., Leto C., Marchegiani P., Perri M., Giommi P., Piranomonte S., «The 5th edition of the Roma-BZCAT. A short presentation», Ap&SS, 357, 75M, 2015.
3. Verkhodanov O.V., «Multiwave Continuum Data Reduction at RATAN-600», Astronomical Data Analysis Software and Systems VI, A.S.P. Conference Series, 125, 46, 1997.
4. Ott M., Witzel A., Quirrenbach A., Krichbaum T.P., Standke K.J., Schalinski C.J., Hummel C.A., «An updated list of radio flux density calibrators», A&A, 284, 331P, 1994.
5. Baars J.W.M., Genzel R., Pauliny-Toth I.I.K., Witzel A., «The absolute spectrum of Cas A; an accurate flux density scale and a set of secondary calibrators.», A&A, 61, 99, 1977.

6. Perley R.A., Butler B.J., «An Accurate Flux Density Scale from 1 to 50 GHz», *ApJS*, 204, 19, 2013.
7. Perley R.A., Butler B.J., «An Accurate Flux Density Scale from 50 MHz to 50 GHz», *ApJS*, 230, 7P, 2017.
8. Verkhodanov O.V., Kononov V.K., Majorova E.K., and Tsybulev P.G., Report No. 233, SAO RAS, Spec. Astrophys. Observ., Nizhnij Arkhyz, 1994.
9. Urry C. M., Padovani P., «Unified schemes for radio-loud active galactic nuclei», *PASP*, 107, 803, 1995.
10. Tsybulev P.G., «New-generation data acquisition and control system for continuum radioastronomic observations with RATAN-600 radio telescope: Development, observations, and measurements», *Astrophysical Bulletin* 66, 109, 2011.
11. Aller M.F., Aller H.D., and Hughes P.A., «Pearson-Readhead Survey Sources: Properties of the Centimeter-Wavelength Flux and Polarization of a Complete Radio Sample», *ApJ*, 399, 16, 1992.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ формирования каталога блазаров включает следующие этапы:

получение наблюдательных данных радиоконтинуума в виде многочастотных RFLEX файлов;  
 первичная обработка сигнала радиометра путем его синтеза в виде полусуммы двух одномерных временных рядов, каждый из которых соответствует одному полупериоду модуляции радиометра;  
 создание входного набора данных, содержащего список объектов в заданном интервале дат и времени с учетом конфигурации антенны, наблюдательной программы и требуемого частотного диапазона наблюдений;

цифровая обработка астрономического сигнала с помощью автоматизированной многопоточковой системы оценки параметров радиоисточников, наблюдаемых на радиометрах континуума радиотелескопа РАТАН-600, которая представляет собой комплекс программного обеспечения; процесс обработки включает следующие этапы: оценку качества наблюдательного материала, оценку параметров калибровочных радиоисточников, получение калибровочных характеристик радиотелескопа и оценку параметров исследуемых объектов; причем оценка параметров радиоисточников содержит шаги: локализация радиоисточника; вычитание линейного тренда и фоновой кривой более высокого порядка; фильтрация для повышения отношения уровня сигнал/шум путем применения цифрового фильтра с бесконечной импульсной характеристикой на основе фильтра Баттерворта с нулевой фазовой характеристикой; весовое векторное усреднение одномерных сканов; детектирование сигнала; расчет амплитуды и полуширины гауссова отклика неподвижного радиотелескопа на прохождение радиоисточника через диаграмму направленности; расчет калибровочных зависимостей на всех частотах измерений, представляющих усредненную за время цикла наблюдений суммарную зависимость калибровочного коэффициента за атмосферное поглощение и эффективной площади телескопа, контроль параметров антенных и приемных систем по измерениям вторичных калибровочных стандартов, абсолютные измерения объектов по спектральной плотности потока;

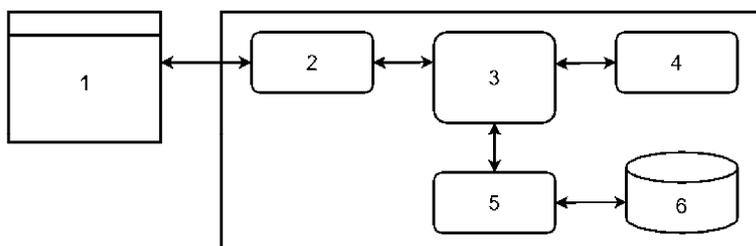
формирование каталога блазаров путем экспорта полученных измерений в виде экваториальных координат объектов, эпох измерений, значений спектральных плотностей потоков; отождествление объектов сформированного каталога блазаров с объектами каталогов радиоастрономических обзоров и опубликованных индивидуальных измерений объектов на основе кросс-идентификации координат с заданным окном поиска;

интерактивный расчет спектральных индексов: средних и по индивидуальным эпохам наблюдений и индекса переменности на заданных частотах, включающий следующие шаги: интерактивный расчет радиосветимости на основе полученной средней спектральной плотности потока и спектрального индекса на 4.7 ГГц; расчет статистики параметров выборки блазаров: количество измерений, красное смещение, звездная величина, радиосветимость и радиопоток; построение квазиодновременных радиоспектров с учетом данных внешних каталогов, построение многочастотных кривых блеска, фильтрация графических изображений по временным периодам; реализация экспорта данных главной таблицы каталога с базовыми параметрами блазаров, включающими измерения из литературы, данных измерений РАТАН-

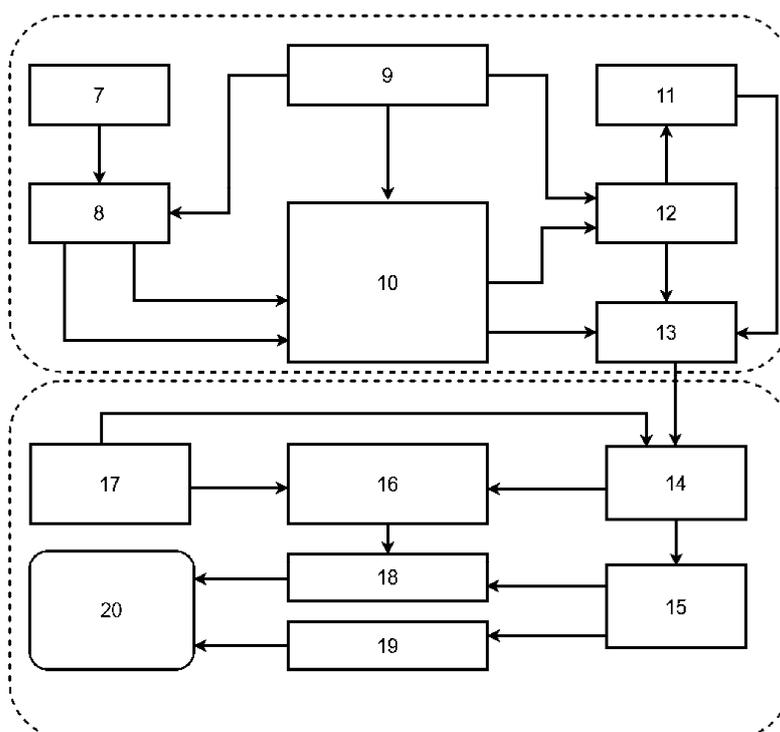
600, данных внешних каталогов, данных расчетов спектральных индексов и индексов переменности;

обеспечение универсального доступа к исходным и появляющимся в процессе обработки данным, к данным для хранения конфигурации системы, информации о калибровочных объектах, характеристик радиотелескопа и радиометров, хранения полученных результатов; сохранение в распределенной файловой системе результатов промежуточных и финальных вычислений спектральных плотностей потоков, координат и эпох наблюдений, графических файлов результатов, сформированного каталога, содержащего значения атрибутов объектов;

причем этапы способа повторяются многократно для каждого цикла наблюдений; для каждой частоты измерений этапы воспроизводятся одновременно.

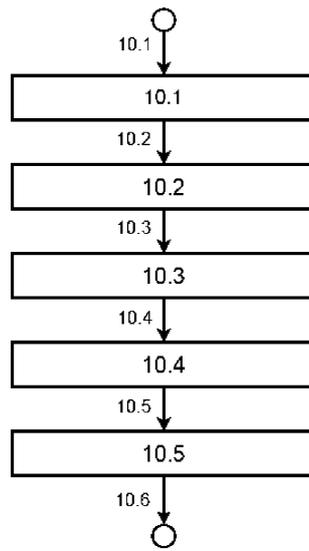


Фиг. 1



Фиг. 2

045154



Фиг. 3



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2

---