

Проект радиоинтерферометра РИФ-32

Столяров В.А.^{*1,2,3}, Мингалиев М.Г.^{2,3} и Сотникова Ю.В.²

¹Cavendish Laboratory, University of Cambridge, UK

²Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН

³Казанский Федеральный Университет

1 апреля 2019 г.

Аннотация

В статье рассматривается проект системы апертурного синтеза для радиоастрономических наблюдений РИФ-32 (**Р**адио**И**нтер**Ф**ерометра — 32). Инструмент из 32-х антенн планируется установить на территории САО РАН, где уже существует необходимая инфраструктура и есть кадровый потенциал для реализации такого проекта. Ядро радиоинтерферометра будет находится на территории РАТАН-600 и прилегающих участках, с длиной базы до 2.5 км. Отдельные антенны будут вынесены на ВНП (длина базы до 24 км). Также возможна установка одной антенны на территории радиоастрономической обсерватории «Зеленчукская» (длина базы 5 км).

1 Введение

В настоящее время в России не существует радиоинтерферометра с компактным заполнением (u, v) плоскости. Единственный радиоинтерферометр «Квазар» состоит из трёх инструментов, разнесённых на несколько тысяч километров (Приозерск, Зеленчукская, Бадары), которые включены в сеть VLBI. В мире существует небольшое число инструментов предлагаемого типа, таких как VLA (США), ASKAP (Австралия), MeerKAT (ЮАР), а также более мелких, таких как AMI (Великобритания), получение наблюдательного времени на которых для российских астрономов затруднено. MeerKAT и ASKAP, которые являются наиболее близкими аналогами предлагаемого инструмента, расположены в Южном полушарии, как и проектируемый радиоинтерферометр SKA. В Северном полушарии единственным аналогичным инструментом является VLA. Расположенный в Европе LOFAR работает на более низких частотах, и не может заменить собой предлагаемый интерферометр, хотя и даёт в перспективе возможность проведения совместных наблюдений в широком частотном диапазоне.

Список задач, который можно решать на инструменте этого класса, довольно обширен. Сюда входят исследования эпохи реионизации, пульсарные исследования, наблюдения нашей Галактики, созвездия каталога далёких объектов на космологических красных смещениях.

*vlad@sao.ru

Предлагаемый инструмент будет единственным в России, где возможно решение всех этих задач.

В случае быстрой реализации проекта ввод инструмента в эксплуатацию возможен в 2023-2025 гг. Как показывает практика, время жизни радиоастрономических инструментов такого класса составляет порядка 50 лет. Предполагается, что инструмент SKA, где будут использованы аналогичные антенны производителя SETC54 (Китай), будет работать 50-60 лет после завершения строительства.

2 Актуальность проблемы

3 Описание инструмента

3.1 Технические характеристики

Таблица 1: Технические характеристики РИФ–32

Тип инструмента	радиоинтерферометр
Количество антенн	32
Тип антенны	Схема Грегори, первичное зеркало 18x15 метров, вторичное зеркало 5 x 4.7 метров
Диапазон частот	0.35 — 15.0 ГГц
Чувствительность, A_{eff}/T_{sys}	200-220 m^2/K
Ширина полосы анализа	До 1 ГГц
Количество спектральных каналов	До 32768
Тип приёмников	криогенный
Длина базы	0.1 – 25 км
Максимальное разрешение	0.165 угл. сек.

3.2 Размещение и конфигурация РИФ–32

3.2.1 Размещение антенн

Наиболее оптимальное место для размещения антенн с точки зрения логистики, коммуникаций и охраны – участок к югу от РАТАН-600, вытянутый вдоль трассы Р265. Его длина составляет порядка 2.5 км, ширина от 500 м до 1 км. Предполагается, что отдельные антенны будут вынесены на ВПП (длина базы до 23 км). Также возможна установка одной антенны на территории радиоастрономической обсерватории «Зеленчукская» (длина базы 5 км, Рис. 1).

3.2.2 Регулярная конфигурация

Антенны располагаются по прямым линиям в виде рукавов (лучей) из центра инструмента (Рис. 2а). В случае РАТАН-600 данный вариант неоптимален, т.к. из-за геометрии площадки доминирует компонента, расположенная по направлению Север-Юг, что неоптимально с точки зрения апертурного синтеза и приводит к существенным артефактам при работе алгоритма CLEAN.

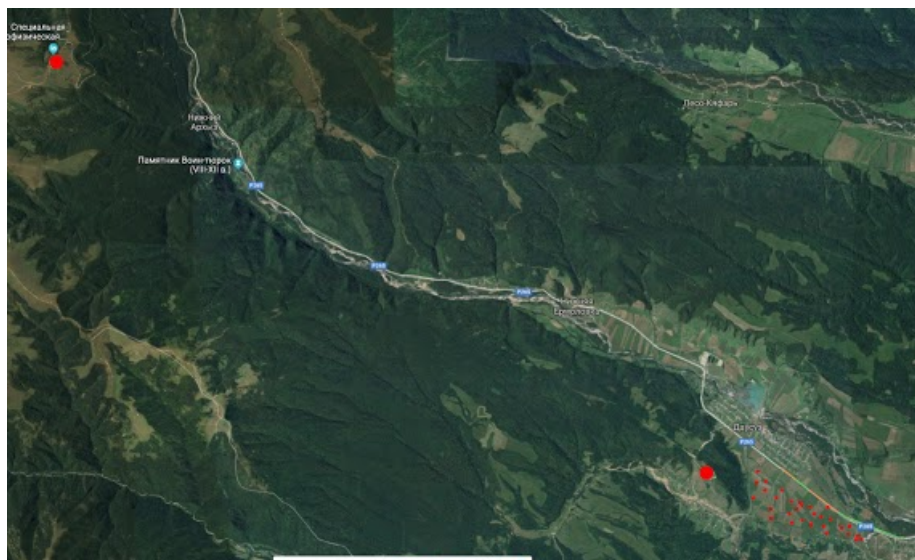


Рис. 1: Размещение антенн в "длинной" конфигурации. Основная группа антенн располагается вблизи РАТАН-600, одна антенна на территории р/а "Зеленчукская" (базы до 5 км), вторая - на ВПП (базы до 23 км). Антенны обозначены красными метками.

3.2.3 Случайная конфигурация

Антенны располагаются по результатам моделирования Монте-Карло, с оптимизацией баз по равномерности заполнения uv -плоскости (Рис. 2b). В этом случае результаты восстановления изображения методом CLEAN значительно лучше, хотя геометрия площадки всё равно влияет на заполнение (u,v) плоскости.

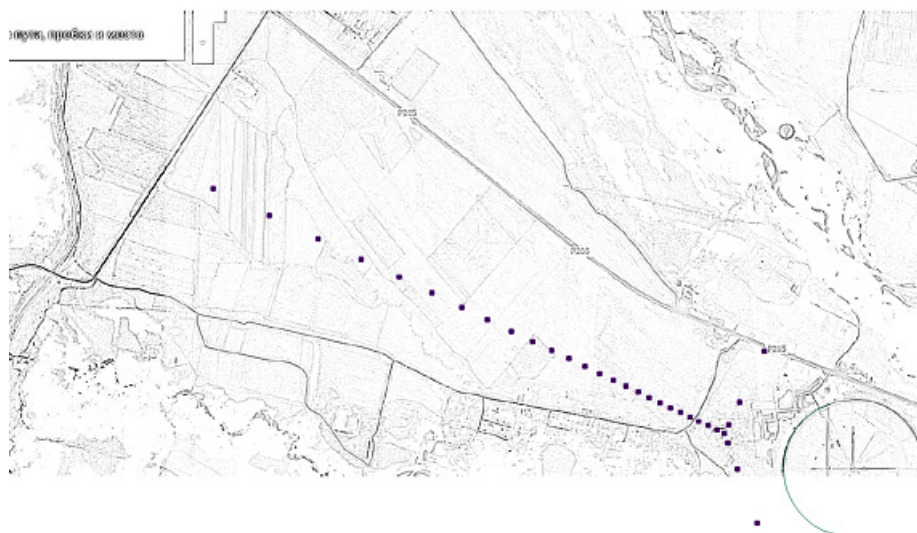
4 Научные задачи

4.1 Внегалактический нейтральный водород HI

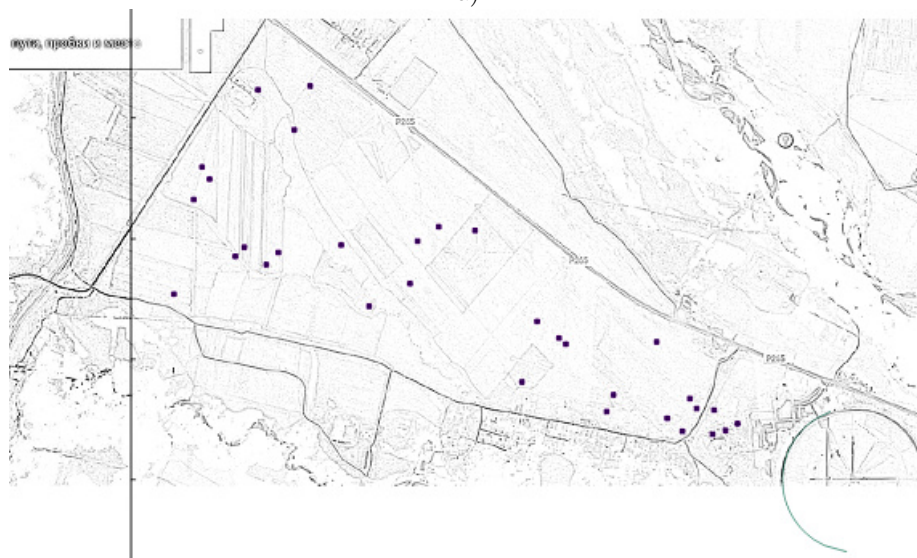
Наблюдения порядка миллиона галактик в линии нейтрального водорода на 70% небесной сферы до красных смещений 0.3-0.4 дадут возможность лучше понять процессы формирования и эволюции галактик в ближней Вселенной.

Проведение глубокого обзора HI позволит провести прямые наблюдения HI в эмиссии на красных смещениях до $z = 0.4$ для большого числа галактик (порядка одного миллиона). Это даст возможность исследовать эволюцию барионной и тёмной материи, а также особенности звездообразования и образования галактик.

Наблюдения распределения HI с высоким разрешением у нескольких сотен ближайших галактик, что позволит лучше понять внутреннюю динамику галактик, а также процессы звездообразования. Эти данные могут быть скомбинированы с инфракрасными и UV наблюдениями, что даст возможность лучше понять эволюцию галактик и процессы в межзвёздной среде. Чувствительность таких наблюдений



a)



b)

Рис. 2: Варианты расположения антенн РИФ-32: а) пример лучевого (регулярного) расположения антенн на территории, прилегающей к РАТАН-600, север справа, б) Пример случайного (нерегулярного) расположения антенн на территории, прилегающей к РАТАН-600, север справа.

на предлагаемом инструменте будет лучше чем достигнутая в обзоре The HI Nearby Galaxy Survey (THINGS, VLA). Кроме того, эти наблюдения будут полезны в свете обзоров молекулярной и пылевой компоненты межзвёздной среды, которые проводились КА Hershel.

4.2 Наблюдения излучения в континууме

Регистрация синхротронного излучения от более 50 млн галактик позволит уточнить детали эволюции и формирования галактик в течение длительного космологического времени, кроме того такие наблюдения помогут провести ключевые космологические тесты.

Большинство обзоров галактик (ATLAS, ELAIS, GOODS, COSMOS) проводились в оптическом и инфракрасном диапазонах, где велико поглощение за счёт пыли. Предлагаемый обзор в радиодиапазоне не только решит эту проблему, но и даст возможность получить информацию об активных ядрах галактик (AGN), недоступную в других диапазонах.

4.3 Наблюдения в поляризации

Наблюдения поляризованного излучения от более чем полумиллиона галактик даст возможность построить карты меры вращения (RM) с разрешением порядка 5 угл. минут, что в свою очередь позволит исследовать эволюцию магнитных полей в галактиках на протяжении длительного космологического времени.

4.4 Изучение Галактики

Инструмент даст возможность изучения эволюции межзвёздной среды в нашей Галактике, а также происходящих в ней химических и физических процессов.

4.5 Эксперименты РСДБ

Возможно объединение данного радиоинтерферометра с другими аналогичными инструментами в рамках системы Радиоинтерферометра со Сверхдлинными Базами для наблюдений интенсивных высокоэнергетических астрофизических явлений с высокими разрешением.

4.6 Пульсары

Проведение специальных обзоров позволит обнаружить и измерить порядка 1000 новых радиопульсаров. Поисковые наблюдения на частотах больше 10 ГГц позволят обнаружить несколько сотен новых радиопульсаров, некоторые из которых обращаются вокруг сверхмассивной чёрной дыры в центре Галактики. Результаты этих наблюдений могут быть интегрированы с международную программу по регистрации низкочастотных гравитационных волн.

4.7 Транзиентные и быстропеременные явления

Инструмент даст возможность обнаружения изучения в радиодиапазоне быстропеременных и транзиентных явлений, таких как гамма-

всплески, сверхновые, быстрые радио всплески (FRB) и быстропеременные радиоисточники.

5 Моделирование наблюдений и тест алгоритма CLEAN

Моделирование проводилось в пакете NRAO CASA v.5.4, на центральной частоте $f_c = 13$ ГГц, при ширине диапазона $\Delta f = 1$ ГГц. Общее время наблюдения составляло $t_{int} = 12$ часов. Шум приёмников не учитывался. В алгоритме CLEAN использовались типовые настройки [2].

Для целей моделирования был подготовлен тестовый FITS-файл на основе изображений Hubble Ultra Deep Field 2014 [3] размером 2048x2048 пикселей, 3.4 x 3.4 угл. минуты, с разрешением 0.1 угл. сек/пиксель. Модельные координаты фазового центра были $\alpha = 05^h 30^m$, $\delta = 22^\circ 00' 00''$ (Рис. 3).

5.1 Результаты восстановления CLEAN для различных конфигураций

Моделирование проводилось для нескольких конфигураций инструмента, как со случайным размещением антенн, так и с линейным (регулярным). Рассматривались конфигурации с 16-ю и 32-мя антеннами.

5.1.1 Случайное расположение, 32 антенны

На Рис. 4 приведены результаты восстановления исходной площадки с помощью алгоритма CLEAN, покрытие (u,v)-плоскости и синтезированная диаграмма направленности для двух вариантов случайного расположения 32-х антенн, с длиной базы до 2.5 км ("короткая" конфигурация, Рис. 2b) и до 23 км ("длинная" конфигурация, дополнительные антенны на ВНП и на территории obs. "Зеленчукская").

Очевидно, что именно такое размещение антенн, особенно в "длинной" конфигурации с дополнительной антенной на ВНП, является наиболее оптимальным с точки зрения уровня артефактов на восстановленном изображении с помощью нелинейной методики CLEAN. Хотя конфигурация с вынесенной на ВНП антенной характеризуется наиболее неравномерным покрытием (u,v)-плоскости, наличие большой базы помогает лучше восстанавливать точечные источники. Кроме того, наличие вынесенных за пределы ядра инструмента антенн (outriggers) даёт больше возможностей для калибровки всего инструмента.

5.1.2 Случайное расположение, 16 антенн

Аналогичное моделирование проводилось для усеченной конфигурации инструмента, с числом антенн, равным 16ти, результаты приведены на Рис. 5.

По результатам моделирования видно, что уменьшение количества антенн и, как следствие, уменьшение количества баз ($N_{base} = N_{ant} \times (N_{ant}-1)/2$) приводит к появлению артефактов и резкому ухудшению качества восстановленного изображения.

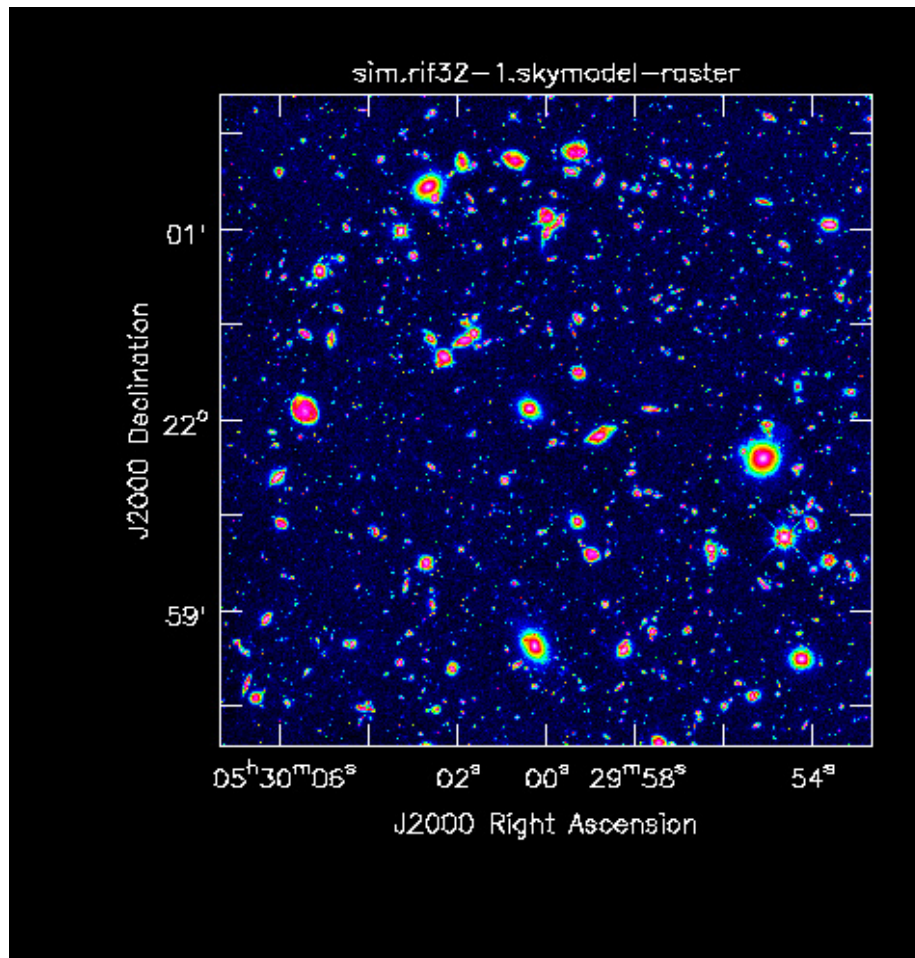


Рис. 3: Тестовая площадка размером 2048x2048 пикселей, что соответствует 3.4 x 3.4 угл. минуты. Разрешение 0.1 угл. сек/пиксель.

5.1.3 Регулярное расположение, 32 антенны

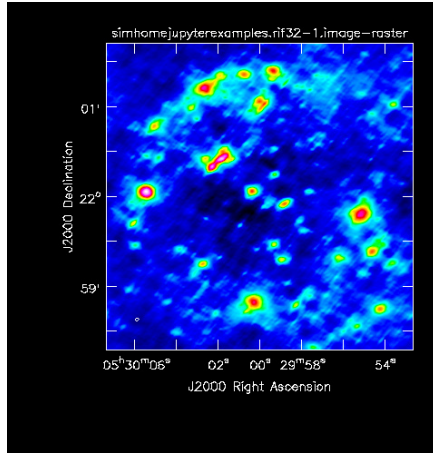
На Рис. 6 показаны результаты для регулярного расположения 32-х антенн (Рис. 2а) в "коротком" и "длинном" вариантах.

6 Заключение

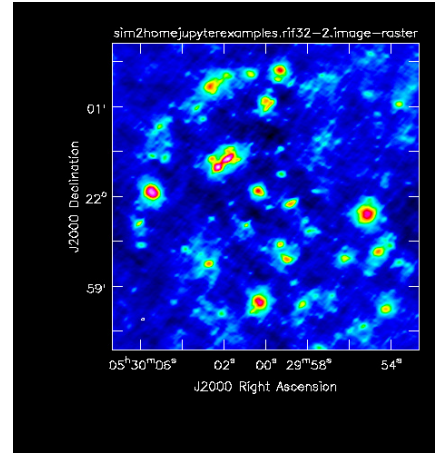
Благодарности

Список литературы

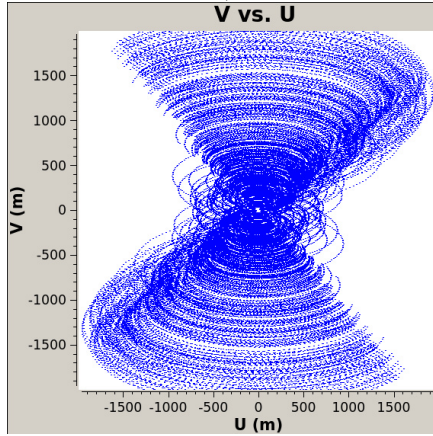
- [1] Jon B. Hagen, *Radio-frequency electronics. Circuits and application*, Second ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2009
- [2] Simulation Guide for New Users (CASA 4.2), [https://casaguides.nrao.edu/index.php/Simulation_Guide_for_New_Users_\(CASA_4.2\)](https://casaguides.nrao.edu/index.php/Simulation_Guide_for_New_Users_(CASA_4.2)), NRAO, USA, 2011
- [3] Hubble Ultra Deep Field 2014, http://hubblesite.org/image/3380/news_release/2014-27, STSI, USA, 2014



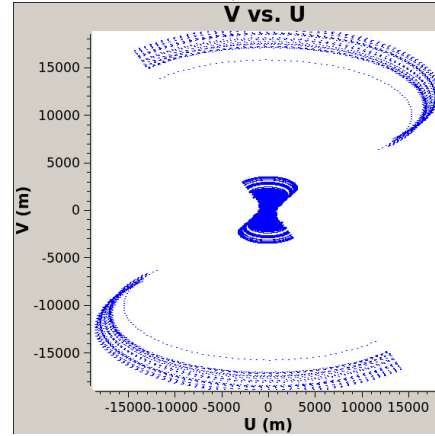
a)



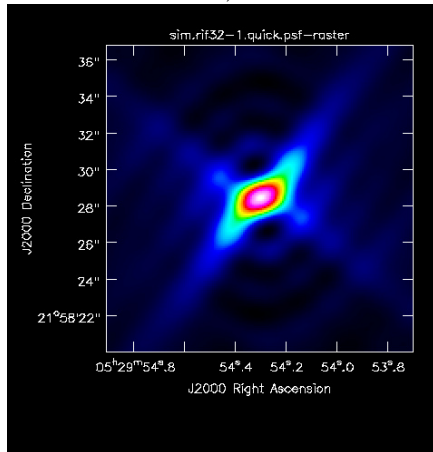
d)



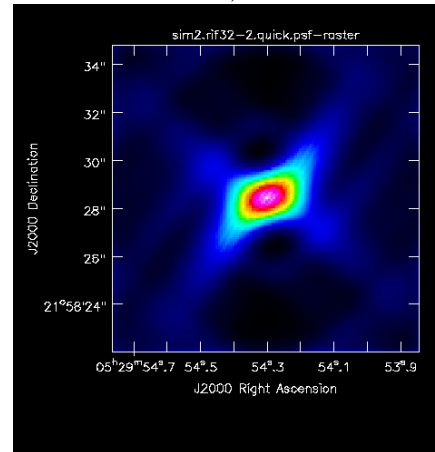
b)



e)

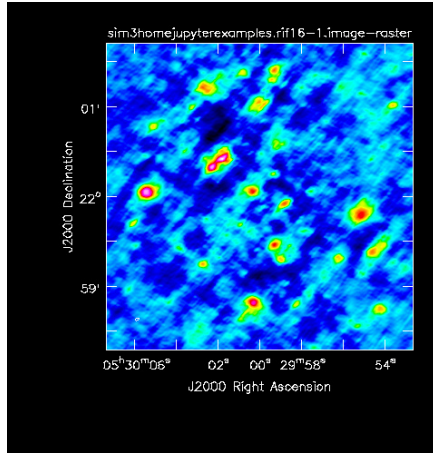


c)

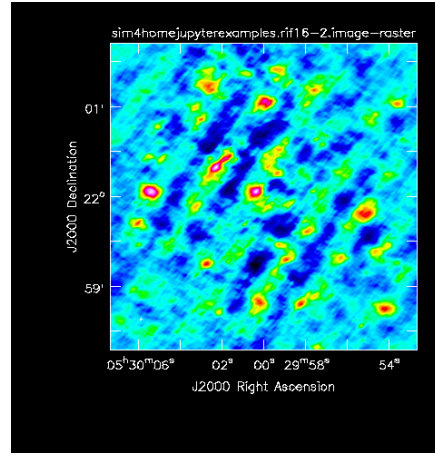


f)

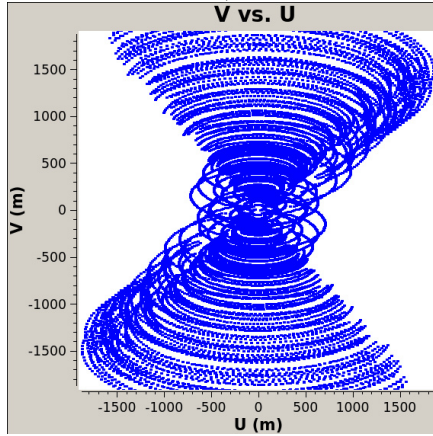
Рис. 4: Результаты восстановления изображения алгоритмом CLEAN при моделировании наблюдений тестовой площадки. Случайная конфигурация, длина базы до 2.5км, $N_{ant} = 32$: а) восстановленное изображение, б) покрытие uv-плоскости, в) синтезированная диаграмма направленности. Случайная конфигурация, длина базы до 23км, дополнительные антенны размещены в Хусе и на ВНП: д) восстановленное изображение, е) покрытие uv-плоскости, ф) синтезированная диаграмма направленности.



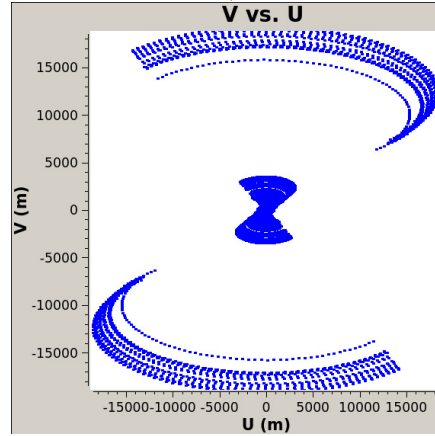
a)



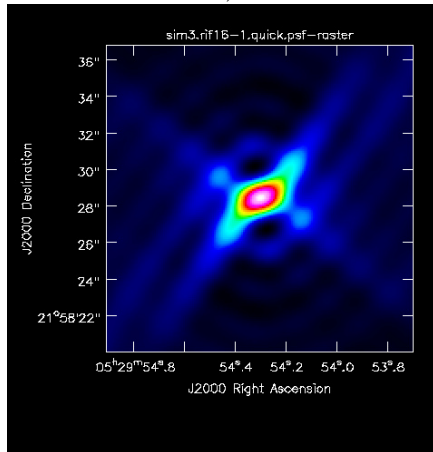
d)



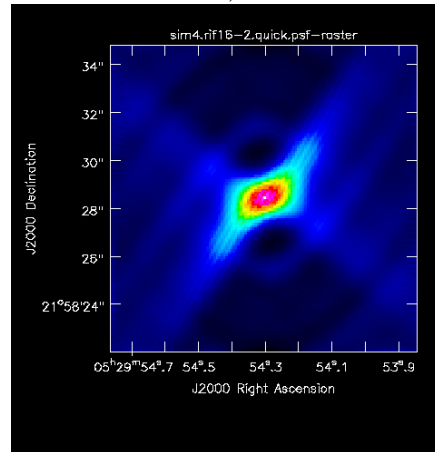
b)



e)



c)



f)

Рис. 5: Результаты восстановления изображения алгоритмом CLEAN при моделировании наблюдений тестовой площадки. Случайная конфигурация, длина базы до 2.5км, $N_{ant} = 16$: а) восстановленное изображение, б) покрытие uv-плоскости, в) синтезированная диаграмма направленности. Случайная конфигурация, длина базы до 23км, дополнительные антенны размещены в Хусе и на ВНП: д) восстановленное изображение, е) покрытие uv-плоскости, ф) синтезированная диаграмма направленности.

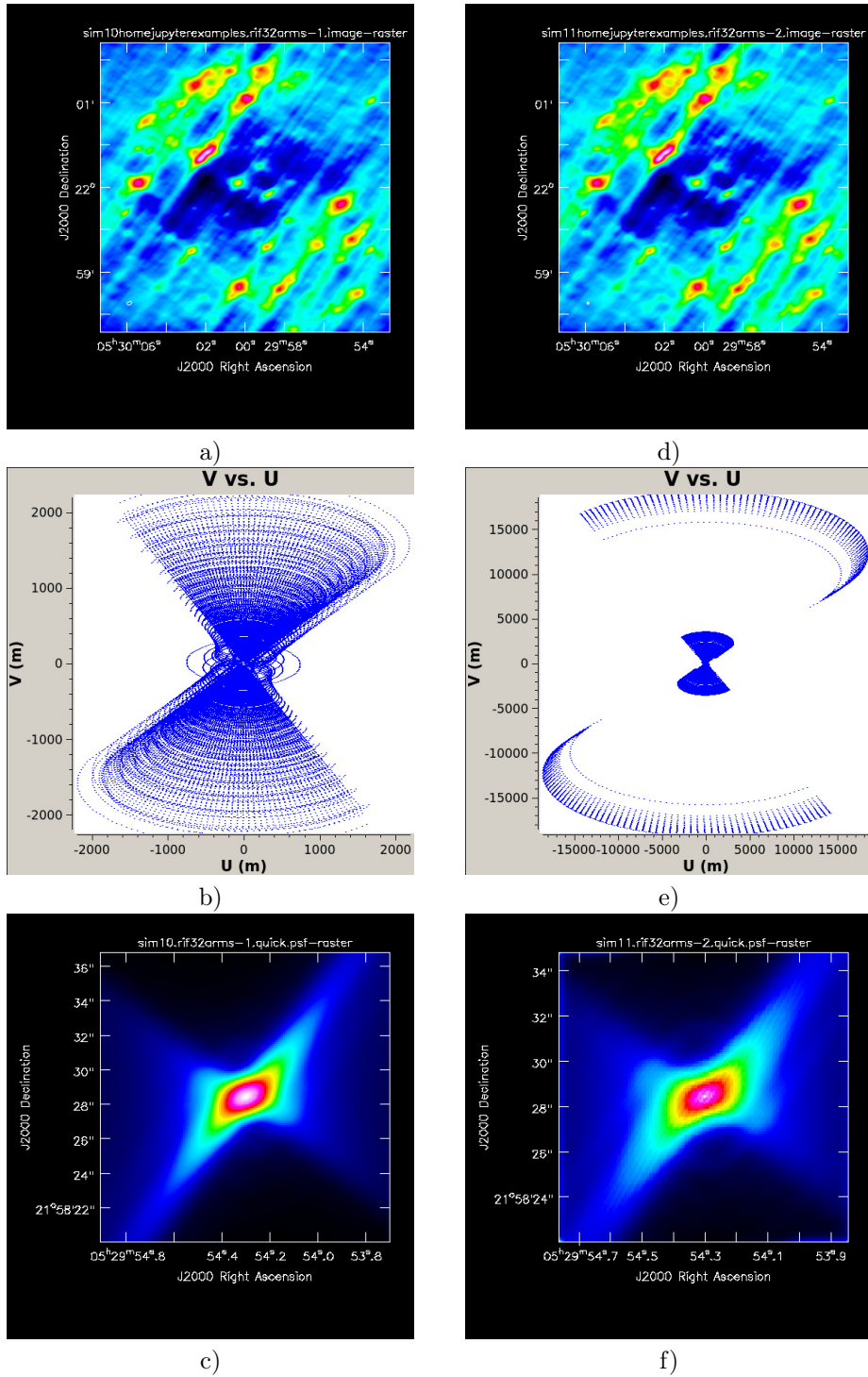


Рис. 6: Результаты восстановления изображения алгоритмом CLEAN при моделировании наблюдений тестовой площадки. Линейная конфигурация, длина базы до 2.5км, $N_{ant} = 32$: а) восстановленное изображение, б) покрытие uv-плоскости, в) синтезированная диаграмма направленности. Линейная конфигурация, длина базы до 23км, дополнительные антенны размещены в Хусе и на ВНП: д) восстановленное изображение, е) покрытие uv-плоскости, ф) синтезированная диаграмма направленности.