

УДК 520.8, 520.87, 520.872

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТОВ ASL И CASA

В. А. Зуга, А. Г. Рудницкий, С. Ф. Лихачев

В статье представлен краткий обзор программного пакета Astro Space Locator (ASL), разработанного Астрокосмическим Центром ФИАН. Данный программный пакет предназначен для обработки радиоинтерферометрических наблюдений. Приведены результаты сравнения работы алгоритмов восстановления изображения программ ASL и CASA. Для сравнения использовались данные наблюдений эффекта гравитационного линзирования, полученные на телескопе ALMA.

Ключевые слова: радиоастрон, РСДБ, гравитационные линзы, радиоинтерферометрия.

Введение. В рамках создания и запуска миссии “Радиоастрон” в Лаборатории математических методов обработки данных Астрокосмического центра ФИАН, был разработан программный пакет Astro Space Locator (ASL) [1] для посткорреляционной обработки и анализа данных, полученных с помощью радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Наземно-космический радиоинтерферометр “Радиоастрон” – 10-метровый космический радиотелескоп – был запущен в июле 2011 года для проведения радиоинтерферометрических наблюдений на сверхдлинных проекциях базы [2]. ASL является универсальным программным пакетом для редактирования и посткорреляционной обработки данных, а также для восстановления изображений источников на основе РСДБ наблюдений. В работе приводятся результаты сравнения алгоритмов восстановления изображений программных пакетов ASL и CASA [3]. В качестве данных, с помощью которых выполнялся сравнительный анализ, выступают наблюдения двух гравитационных линз со сложной пространственной структурой. Эти данные были получены с помощью наземного телескопа ALMA.

Астрокосмический центр ФИАН, 117997 Россия, Москва, Профсоюзная ул., д. 84/32; e-mail: vzuga@asc.rssi.ru, arud@asc.rssi.ru, slichach@asc.rssi.ru.

Обзор программного пакета ASL. Программный комплекс ASL ориентирован на обработку массивов коррелированных данных, полученных по методу апертурного синтеза в варианте радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), включая вариант наземно-космического РСДБ. Метод апертурного синтеза в рассмотренном варианте основан на измерениях функции видности интерференционных лепестков от удаленных несвязанных между собой телескопов. ASL предоставляет возможность пользователю выполнять операции синтеза лепестков и усреднения (оценка функции видности), визуального редактирования данных, одномерной сигнальной обработки данных (для каждой базы телескопов, частоты и поляризации), амплитудной калибровки, фазовой и амплитудной само калибровки. Комплекс позволяет провести все основные процедуры синтеза изображений, включая нахождение главного решения, методы очистки и самокалибровки, а также предоставлять промежуточные и окончательные результаты обработки в табличном и графическом виде. ASL является набором исполняемых подпрограмм, каждая из которых выполняет определенные функции:

1. ASL Imager – интерактивная программа восстановления изображений,
2. ASL Editor – интерактивный редактор РСДБ наблюдений,
3. ASL CalEdit – интерактивный редактор калибровочных данных формата ANTAB,
4. ASL Model – подпрограмма моделирования и симуляции РСДБ наблюдений,
5. Подпрограмма первичного поиска интерференционных лепестков,
6. Подпрограмма компенсации остаточных задержек fringe-fitting,
7. Подпрограмма калибровки данных РСДБ наблюдений (включает в себя: амплитудную, фазовую, bandpass калибровки и др.),
8. Подпрограмма многочастотного синтеза изображений,
9. Подпрограммы временного и частотного усреднения,
10. Подпрограммы конвертации данных: из формата UVX в IDI-FITS, из IDI-FITS в UVX, из UVF в UVX и наоборот.

Основным рабочим форматом всего комплекса является формат UVX. При этом существует полная совместимость с форматами международного стандарта коррелированных РСДБ данных IDI-FITS и UVF путем их конвертации в формат UVX с использованием соответствующих подпрограмм пакета.

Данные. Для сравнительного анализа алгоритмов восстановления изображения программных пакетов CASA и ASL были выбраны данные наблюдений двух гравитационных линз на телескопе ALMA. Гравитационные линзы являются отличным инструментом для сравнения качества работы подобных алгоритмов, так как имеют

сложную пространственную структуру с мелкими деталями. Откалиброванные данные двух экспериментов были скачаны из архива ALMA: 2011.0.00476.S (PI: G. Orellana) и 2011.0.00539.S (PI: D. Riechers). В первом эксперименте наблюдался источник HATLAS J142935.3–002836 (H1429–0028) – яркая субмиллиметровая галактика (SMG) с координатами $\alpha = 14^h 29^m 35.25^s$ (прямое восхождение, эпоха J2000.0), $\delta = -00^\circ 28' 35.5''$ (склонение, эпоха J2000.0), которая была отобрана для наблюдений по результатам обзора Herschel-ATLAS [4]. Наблюдения проводились на центральной частоте 243 ГГц. Целью этих наблюдений было подтвердить тот факт, что галактика является гравитационной линзой, а также исследовать ее свойства. В результате было установлено, что система состоит из спиральной галактики-линзы (красное смещение $z = 0.218$) и источника на заднем плане ($z = 1.027$) с приливным хвостом как у галактики Антенн [5]. Второй эксперимент является серией наблюдений различных галактик, отобранных по результатам обзора гравитационных линз, выполненного с помощью космической обсерватории Herschel [6]. Из этого эксперимента был выбран источник HADFS01 с координатами $\alpha = 04^h 41^m 53.88^s$ и $\delta = 54^\circ 03' 51.83''$ (эпоха J2000.0), как наиболее интересный с точки зрения наличия сложной пространственной структуры. Наблюдения этого источника выполнялись на частоте 336 ГГц.

Процедура сравнения. Процедура сравнения состояла из нескольких этапов:

1. Восстановление изображений источников с помощью алгоритма CLEAN в ASL;
2. Восстановление изображений источников с помощью алгоритма CLEAN в CASA;
3. Вычисление разностной карты между изображением, полученным в ASL и изображением, полученным в CASA.

Были восстановлены изображения обоих источников в ASL и CASA с помощью алгоритма CLEAN [7]. Параметры CLEAN выбирались таким образом, чтобы минимизировать разницу в интегральном потоке от изображений, полученных в ASL и в CASA. Условием было получение значений интегрального потока от источника с расхождением не более 5% между ASL и CASA.

Затем, разностная карта формировалась простым методом вычитания изображения, полученного в CASA, из изображения, полученного в ASL. Восстановленные изображения в формате FITS представляли собой распределение радиояркости источника в янских на заданном поле координатной сетки. Для получения разностной карты вычислялась разница потока в каждой точке этой сетки между изображением, полученным в ASL, и изображением, полученным в CASA.

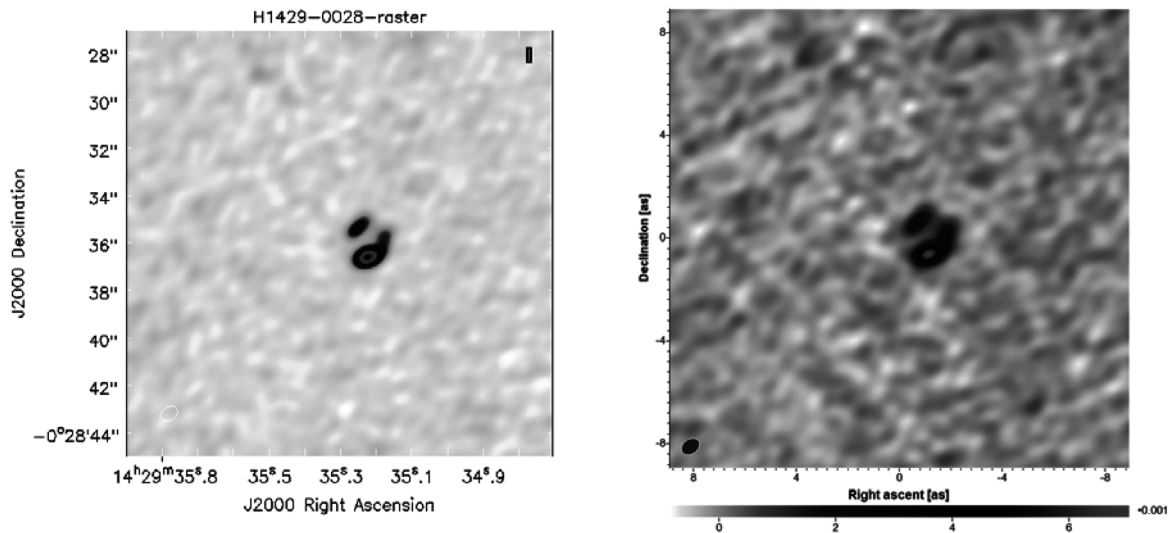


Рис. 1: Изображение источника H1429-0028, построенное в CASA.

Рис. 2: Изображение источника H1429-0028, построенное в ASL.

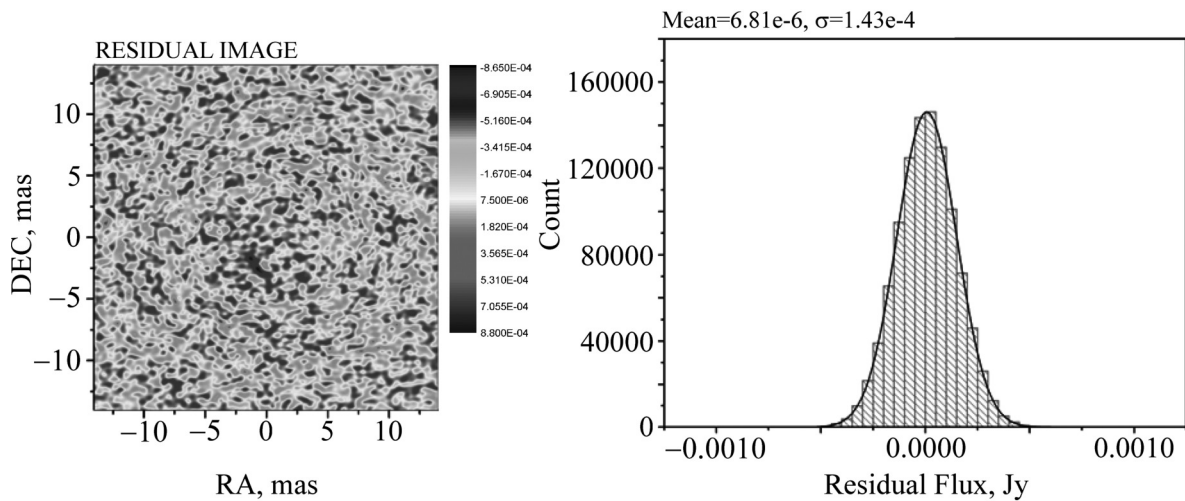


Рис. 3: Разностная карта.

Рис. 4: Статистическое распределение разностной карты.

Результаты. Для источника H1429-0028 были построены карты размером 256 на 256 пикселей с угловым разрешением 0.07 угловых секунд дуги, поток от источника в обоих случаях был порядка 0.01 Ян (рис. 1-4).

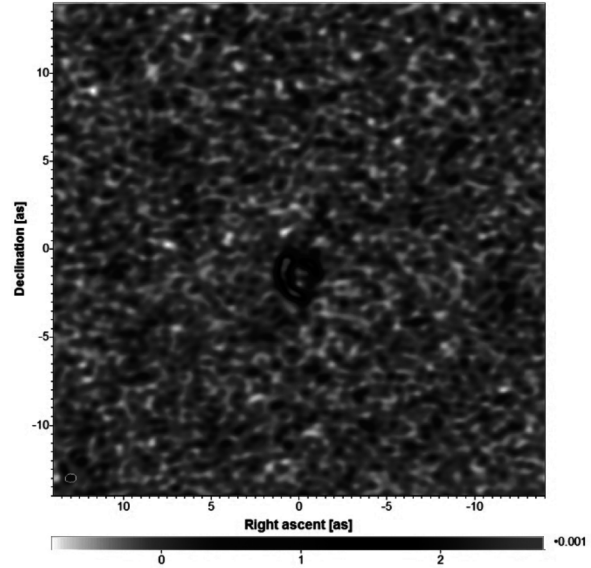
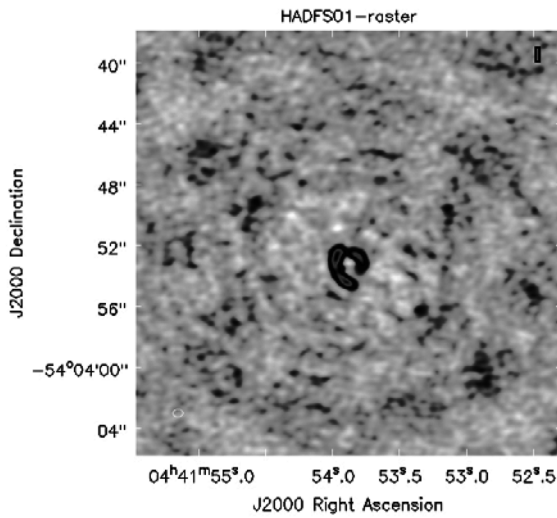


Рис. 5: Изображение источника HADFS01, построенное в CASA.

Рис. 6: Изображение источника HADFS01, построенное в ASL.

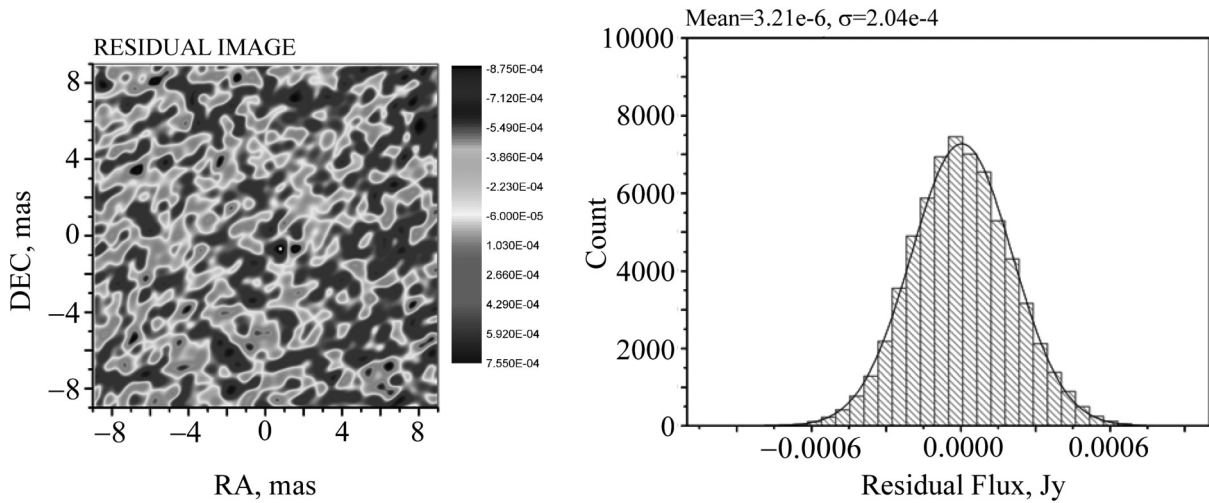


Рис. 7: Разностная карта.

Рис. 8: Статистическое распределение разностной карты.

Для источника HADFS01 были построены карты размером 1024 на 1024 пикселей с угловым разрешением 0.02737 угловых секунд дуги, поток от источника в обоих случаях был порядка 0.018 Ян (рис. 5–8).

Распределение радиояркости полученных разностных карт хорошо аппроксимируется функцией Гаусса. Это означает, что разностная карта содержит только шумовую составляющую, а исходные изображения (как в ASL, так и в CASA) были восстановлены с максимально возможной точностью. Для каждого источника были получены: среднее значение потока разностной карты и среднеквадратичное отклонение разностной карты. Для источника H1429–0028 – среднее значение составило $\langle a \rangle = 6.81 \cdot 10^{-6}$ Ян, а среднеквадратичное отклонение $\sigma = 1.43 \cdot 10^{-4}$ Ян, для источника HADFS01 – среднее значение составило $\langle a \rangle = 3.21 \cdot 10^{-6}$ Ян, среднеквадратичное отклонение $\sigma = 2.04 \cdot 10^{-4}$ Ян. Величина среднего значения потока для разностных карт находится на уровне ошибок измерений и составил $a \approx 1\%$ от интегрального потока исходных восстановленных изображений. Таким образом, можно сделать вывод о том, что программный пакет ASL дает сопоставимые результаты с CASA при восстановлении изображений методом CLEAN. ASL является современным и актуальным средством обработки РСДБ наблюдений как для уже существующих и функционирующих наземных и космических проектов, так и для таких перспективных проектов, как наземный РСДБ проект Event Horizon Telescope (EHT) [8] и космическая обсерватория миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов “Миллиметрон”, разрабатываемая под руководством Астрокосмического центра ФИАН [9].

Заключение. Показано, что программный пакет ASL может быть использован для восстановления изображений таких протяженных объектов, как гравитационные линзы, которые имеют сложную пространственную структуру. Для объектов данного класса особенно важна возможность точного восстановления таких деталей изображения, как, например, кольца Эйнштейна–Хвольсона.

Данная статья частично основана на результатах, полученных на обсерватории ALMA. Следующие данные использовались в настоящей статье: ADS/JAO.ALMA#2011.0.00476.S (PI G. Orellana) и 2011.0.00539.S (PI D. Riechers). ALMA является партнером ESO, NSF (США) и NINS (Япония), а также NRC (Канада), NSC и ASIAA (Тайвань), и KASI (Южная Корея), в сотрудничестве с Республикой Чили. Объединенная обсерватория ALMA находится под управлением ESO, AUI/NRAO и NAOJ.

The National Radio Astronomy Observatory (NRAO) является обсерваторией National Science Foundation, и действует в соответствии с договором о сотрудничестве Associated Universities, Inc (AUI).

Программный пакет ASL был разработан в Астрокосмическом Центре ФИАН в Лаборатории математических методов обработки данных.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Программный пакет Astro Space Locator: <http://asc-lebedev.ru/index.php?dep=6&page=2>
- [2] N. S. Kardashev et al., *Astronomy Reports* **57**(3), 153 (2013).
- [3] J. P. McMullin, B. Waters, D. Schiebel, et al., *CASA Architecture and Applications, Proceedings of XVI Astronomical Data Analysis Software and Systems Conference, ASP Conference Series*, **376**, 127 (2007).
- [4] S. Eales, L. Dunne, D. Clements, et al., *Publications of the Astronomical Society of Pacific* **122**(891), 499 (2010).
- [5] Hugo Messias, Simon Dye, Neil Nagar, et al., *Astronomy & Astrophysics* **568**, Article ID A92, 20 (2014).
- [6] Asantha Cooray, Jae Calanog, Julie L. Wardlow, et al., *Astrophysical Journal*, **790**(1), Article ID 40, 10 (2014).
- [7] J. A. Högbom, *Astronomy and Astrophysics Supplement* **15**, 417 (1974).
- [8] Проект Event Horizon Telescope: <http://www.eventhorizontelescope.org/>
- [9] Проект “Миллиметрон”: <http://www.millimetron.ru/>

Поступила в редакцию 22 декабря 2015 г.