

Применение итерационного метода к восстановлению параметров активных солнечных образований по наблюдениям в 3-мм диапазоне

А. В. Антонов, Ю. М. Герасимов, Н. В. Руженцев

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4
E-mail: ruzh@rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 20 марта 2002 г.

Рассматривается метод повышения разрешения солнечных наблюдений на малых радиотелескопах с целью определения пространственно-энергетических параметров активных образований на солнечном диске. Предложен алгоритм применения нелинейного итерационного метода восстановления изображений. Проведен анализ влияния шумов на качество восстановления изображений. Рассмотрены результаты обработки реальных наблюдений.

Розглядається метод збільшення розділення сонячних спостережень на малих радіотелескопах з метою визначення просторово-енергетичних параметрів активних утворень на сонячному диску. Запропоновано алгоритм застосування нелінійного ітераційного методу відновлення зображень. Проведено аналіз впливу шумів на якість відновлення зображень. Розглянуто результати обробки реальних спостережень.

Введение

Изучение процессов, происходящих на поверхности Солнца и в его атмосфере, представляет огромный астрофизический интерес, поскольку Солнце является единственной звездой, на которой возможно непосредственное, детальное наблюдение подобных процессов. Интерес к таким исследованиям возрастает в годы высокой солнечной активности, когда наиболее полно проявляется все многообразие солнечной деятельности. Для этого периода характерно появление на диске Солнца активных образований (АО), являющихся источником нестационарного излучения. Расшифровка протекающих процессов возможна на основе анализа параметров излучения АО, измеряемых, для полноты картины, в максимально возможном частотном диапазоне. В этом аспекте важны наблюдения в мм диапазоне, в котором регистрируется излучение поверх-

ности Солнца и его нижней атмосферы в той пространственной области, где реализуются разнообразные механизмы передачи основного потока солнечной энергии. Главными параметрами АО, изучаемыми в солнечной радиоастрономии, являются пространственные и энергетические характеристики, их временные эволюции, а также корреляционные связи с данными в других диапазонах электромагнитного излучения. В мм диапазоне АО характеризуются высокой интенсивностью излучения. Судя по размерам солнечных пятен, над которыми, в основном, развиваются АО, наиболее информативны наблюдения, проводимые с высоким угловым разрешением, порядка угловой минуты. В 3-мм диапазоне такое разрешение возможно получить на радиотелескопах с эффективным диаметром парабооида порядка 20 м. В то же время необходимые исследования АО могут быть выполнены на малых радиотелескопах [1], если

к обработке результатов наблюдений применить известные методы восстановления изображения [2], дающие эффект сверхразрешения.

Целью работы является анализ возможностей использования некоторых методов восстановления изображения применительно к задаче определения пространственно-энергетических параметров АО на поверхности Солнца; определение условий реализации методов, обеспечивающих высокое качество восстановления; оценка влияния шумов и определение оптимальных параметров режима восстановления.

1. Алгоритмы восстановления радиоизображения Солнца

Рассмотрим возможности и недостатки некоторых методов восстановления применительно к задаче определения параметров АО на поверхности Солнца.

Получаемое радиотелескопом изображение Солнца является результатом регистрации распределения антенной температуры $T_a(\vec{r})$ в фокальной плоскости параболоида, которое возникает в процессе свертки пространственного распределения яркостной температуры источника $T_s(\vec{r}')$ и диаграммы направленности (ДН) радиотелескопа по мощности $A(\vec{r})$:

$$T_a(\vec{r}) = \iint T_s(\vec{r}') A(\vec{r} - \vec{r}') d\vec{r}', \quad (1)$$

где \vec{r}' – вектор элементов поверхности источника, \vec{r} – вектор элементов изображения источника в фокальной плоскости радиотелескопа.

Решение обратной задачи – восстановление исходного изображения – проводится в частотной области. При этом интегральное уравнение (1) преобразуется с помощью теоремы о свертке следующим образом:

$$T_a(\vec{\nu}) = T_s(\vec{\nu}) A(\vec{\nu}). \quad (2)$$

Здесь $\vec{\nu}$ – вектор пространственных частот,

соответствующих вектору \vec{r} ; $T_a(\vec{\nu})$ – спектр пространственных частот на выходе радиотелескопа; $T_s(\vec{\nu})$ – аналогичный спектр распределения яркостной температуры; $A(\vec{\nu})$ – нормированная спектральная характеристика ДН – аппаратная функция радиотелескопа. Последняя определяется автокорреляционной функцией распределения поля по апертуре антенны. Для параболического рефлектора аппаратная функция максимальна на нулевой частоте, убывает с ростом частоты и обращается в нуль на граничной частоте $|\vec{\nu}_{гр}|$, определяемой эффективным размером параболоида. Аппаратная функция $A(\vec{\nu})$ является фильтром, искажающим регистрируемый спектр пространственных частот. Восстановление исходного спектра в пределах $|\vec{\nu}_{гр}|$ проводится инверсной фильтрацией функции $T_a(\vec{\nu})$:

$$T_s(\vec{\nu}) = T_a(\vec{\nu}) / A(\vec{\nu}). \quad (3)$$

Подобное восстановление улучшает качество изображения, но не повышает разрешающей способности. Кроме того, его недостатком является то, что при восстановлении импульсных протяженных объектов, к которым относится Солнце, в их изображении появляются значительные осцилляции, маскирующие АО. Это происходит из-за обрезания восстановленного спектра на частоте $|\vec{\nu}_{гр}|$. Осуществить восстановление спектра за пределами $|\vec{\nu}_{гр}|$, т. е. достичь сверхразрешения, позволяют известные нелинейные методы восстановления [2]. Получению сверхразрешения способствует введение ограничений, сужающих класс возможных решений. Результаты восстановления, получаемые различными нелинейными методами с учетом влияния отношения сигнал/шум на точность восстановления, практически эквивалентны. Рассмотрим особенности применения нелинейного итерационного метода к задаче восстановления АО на поверхности Солнца, поскольку в этом методе достаточно просто учитывается априорная информация.

Изначально итерационный метод является преобразованным в итерационную процедуру

линейным методом инверсной фильтрации на основании равенства:

$$\frac{1}{A(\vec{v})} = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} [1 - A(\vec{v})]^k.$$

В соответствии с этим уравнение (3) принимает вид:

$$T_{\text{я}}(\vec{v}) = T_{\text{а}}(\vec{v}) + T_{\text{а}}(\vec{v}) \sum_{k=1}^{\infty} [1 - A(\vec{v})]^k. \quad (4)$$

Процедура восстановления $T_{\text{я}}(\vec{v})$ проводится путем последовательной коррекции спектра $T_{\text{а}}(\vec{v})$ с помощью разностного члена $(1 - A(\vec{v}))$ в частотном диапазоне, ограниченном $|\vec{v}_{\text{гр}}|$. При этом $(k + 1)$ -ое решение связано с k -м решением следующим образом:

$$T_{\text{я}}^{k+1}(\vec{v}) = T_{\text{а}}(\vec{v}) + T_{\text{я}}^k(\vec{v})[1 - A(\vec{v})]. \quad (5)$$

Другая запись выражения (5) –

$$T_{\text{я}}^{k+1}(\vec{v}) = T_{\text{я}}^k(\vec{v}) + [T_{\text{а}}(\vec{v}) - T_{\text{я}}^k(\vec{v})A(\vec{v})], \quad (6)$$

показывает, что процесс восстановления на каждом шаге итерации заключается в добавлении к предыдущему значению спектра $T_{\text{я}}^k(\vec{v})$ разности значений исходного спектра $T_{\text{а}}(\vec{v})$ и предыдущего спектра, пропущенного через фильтр аппаратной функции $A(\vec{v})$.

Сходимостью процесса можно управлять введением весового коэффициента λ , регулирующего вклад указанной разности. При этом выражение (5) приобретает вид:

$$T_{\text{я}}^{k+1}(\vec{v}) = \lambda T_{\text{а}}(\vec{v}) + [1 - \lambda A(\vec{v})]T_{\text{я}}^k(\vec{v}). \quad (7)$$

Максимальное значение λ следует из условия устойчивости решения: $|1 - \lambda A(\vec{v})| \leq 1$. Поскольку максимальное значение нормированной аппаратной функции равно 1, $\lambda_{\text{max}} \leq 2$. Вычисления, выполняемые в соответствии с алгоритмом (7), являются ите-

рационной версией линейной инверсной фильтрации.

Для получения сверхразрешения в итерационный процесс вычисления достаточно включить пороговое ограничение, отражающее априорную информацию. Если она касается энергетических или пространственных характеристик изображения объекта, то их учет обеспечивается введением в итерационный процесс восстановления пороговой контролирующей функции F . В результате получим:

$$T_{\text{я}}^{k+1}(\vec{r}) = \left\{ T_{\text{я}}^k(\vec{r}) + \lambda [T_{\text{а}}(\vec{r}) - T_{\text{я}}^k(\vec{r}) * A(\vec{r})] \right\} F, \quad (8)$$

где знак “*” означает операцию свертки, а функция F принимает значение 0 либо 1 в зависимости от соответствия каждой точки ансамбля $T_{\text{я}}^{k+1}(\vec{r})$ априорным условиям.

2. Особенности восстановления изображения Солнца с помощью итерационного алгоритма

Возможности итерационного алгоритма с нелинейным оператором ограничения (8) и качество восстановления изображения Солнца оценим методом математического моделирования применительно к радиотелескопу РТ-2 [1], разработанному и изготовленному в Радиоастрономическом институте НАН Украины, г. Харьков. Его параболический рефлектор диаметром 2 м обеспечивает на рабочей длине волны 3.2 мм формирование ДН шириной 7.5' на уровне половинной мощности. Точность наведения ДН и сопровождения источника излучения не менее 0.7'. Флуктуационная чувствительность радиометра – 0.2 К.

Моделирование выполним в одномерном варианте, который не ограничивает общности полученных результатов. Центральное сечение модели спокойного Солнца представим в виде столообразной функции с угловым размером 32' и яркостной температурой $6 \cdot 10^3$ К. В модели активного Солнца разместим на центральном сечении его спокойного состояния АО

гауссова вида с шириной на уровне половинной мощности $1'$, взаимным разносом b' и яркостной температурой, превышающей соответственно на 40 и 50 % значения яркостной температуры спокойного Солнца. Модель активного Солнца и её свертка показаны на рис. 1. Восстановление модели спокойного Солнца, сглаженной ДН радиотелескопа, в соответствии с итерационным алгоритмом (8), в котором оператор ограничений контролирует известный размер солнечного диска, дает хорошее определение его границ и среднего значения яркостной температуры. Однако на поверхности восстановленной модели наблюдаются возникающие у ее границ осцилляции, которые не устраняются при увеличении числа итераций.

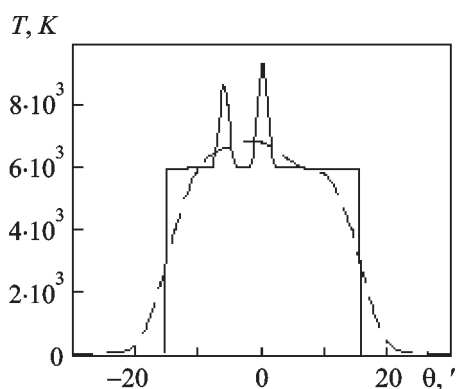


Рис. 1. Модель активного Солнца с двумя АО (сплошная линия) и её свертка (пунктирная линия)

Возникающие осцилляции могут быть сопоставимы с АО и исказить результаты восстановления их энергетических и пространственных параметров. Это демонстрирует рис. 2, на котором представлен результат восстановления сглаженной ДН модели активного Солнца с помощью того же алгоритма с тем же оператором ограничений при максимальном значении λ , равном 2, и количестве итераций $k = 10^4$. Результат восстановления АО неудовлетворителен. Оператор ограничений на размер солнечного диска позволяет восстановить только его границы, генерируя

при этом паразитные осцилляции, и не влияет на процесс восстановления АО. Результат восстановления соответствует обычной линейной инверсной фильтрации без сверхразрешения.

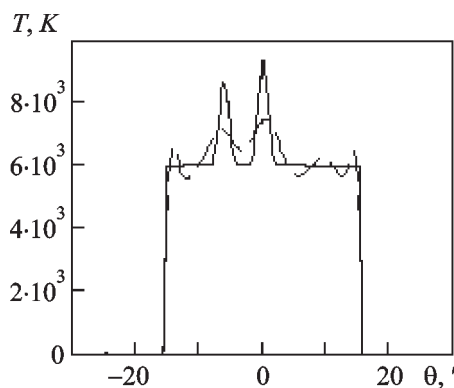


Рис. 2. Результат восстановления изображения активного Солнца при прямом применении итерационного метода с ограничением по пространственному размеру (исходная модель – сплошная линия)

Аналогичные результаты по восстановлению АО получены при учете другой априорной информации – неотрицательности восстановленного изображения. Следовательно, прямое применение нелинейного итерационного алгоритма не позволяет восстановить АО на поверхности солнечного диска.

Для решения поставленной задачи необходимо применить нелинейный оператор, контролирующий восстановление АО. Он может отражать априорную информацию о превышении значений интенсивности АО над уровнем интенсивности спокойного Солнца. При этом нет необходимости в восстановлении границ солнечного диска, поскольку его размер известен, тем более что этот процесс приводит к появлению паразитных осцилляций, маскирующих АО. Реализация такого подхода возможна, если учесть, что свертка изображения активного Солнца и ДН является линейной суммой сверток изображений спокойного Солнца и АО на его поверхности.

Следовательно, при вычитании из результирующей свертки вклада спокойного Солнца выделяется свертка АО, которую можно восстановить рассмотренным нелинейным итерационным алгоритмом, в котором оператор ограничений контролирует неотрицательность решения, т. е. отсутствие в решении точек, лежащих ниже уровня спокойного Солнца.

Результат восстановления АО по данному алгоритму при тех же значениях λ и k приведен на рис. 3, где для сравнения пунктиром показаны свертка АО и ДН радиотелескопа. Полученный результат свидетельствует о достижении высокой степени разрешения и высоком качестве восстановления предложенным алгоритмом.

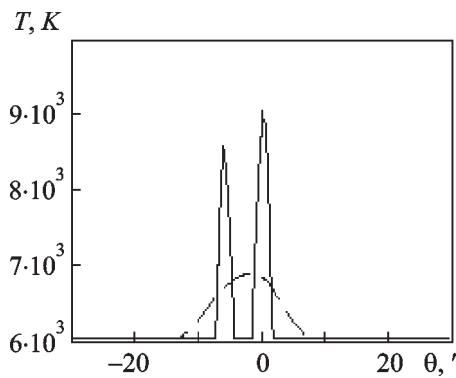


Рис. 3. Результат восстановления АО (сплошная линия) по свертке (пунктирная линия) итерационным методом с ограничением на неотрицательность решения

3. Влияние шумов

Реальные записи солнечного изображения неизбежно содержат аддитивный аппаратный шум. Можно считать, что спектральная плотность шума N равномерна в широкой полосе частот, значительно превышающей полосу частот аппаратной функции. С учетом шума реальный спектр записи изображения $T_a'(\vec{v})$ можно представить как

$$T_a'(\vec{v}) = T_a(\vec{v}) + N.$$

Соответственно итерационный процесс восстановления (5) примет вид:

$$T_a^{k+1}(\vec{v}) = T_a(\vec{v}) + T_a^k(\vec{v})[1 - A(\vec{v})] + N + N^k [1 - A(\vec{v})]. \quad (9)$$

Согласно (9) процесс итерационного восстановления спектра изображения сопровождается усилением спектральных составляющих аддитивного шума. В пределах полосы аппаратной функции составляющие шума возрастают от N , вблизи нулевых частот, до величины kN на граничной частоте, когда $k \gg 1$. На частотах выше $\vec{v}_{гр}$ усиление шума не зависит от частоты, и его выходное значение равно $(k + 1)N$.

Для итерационного процесса с ускоряющим множителем λ спектральный уровень результирующего шума в пределах полосы аппаратной функции меняется от N до λkN (при $k \gg 1$), а за её пределами равен $(\lambda k + 1)N$. Усиленный шум ухудшает качество восстановленного изображения. Поэтому важно уменьшить его исходное значение в спектре $T_a'(\vec{v})$ на частотах вблизи и выше $\vec{v}_{гр}$.

С этой целью можно применить сглаживающий множитель $R(\vec{v})$ для $T_a'(\vec{v})$ в виде [2]:

$$R(\vec{v}) = \frac{|A(\vec{v})|^2}{|A(\vec{v})|^2 + \alpha Q}, \quad (10)$$

где $Q = (\vec{v})^{2p}$, параметр p — целое положительное число, определяющее скорость убывания $R(\vec{v})$ при подходе к $\vec{v}_{гр}$; α — регулирующий параметр.

Введение в итерационный процесс восстановления ограничений на неотрицательность решений, приводящее к расширению спектра восстанавливаемых частот изображения, приводит также к расширению шумового спектра.

Увеличение числа итераций повышает точность восстановления изображения и одновременно увеличивает в нём шумовую компонен-

ту за счёт усиления исходного аддитивного шума. Поэтому для каждого исходного значения отношения сигнал/шум существует оптимальное число итераций, обеспечивающее наилучшее качество восстановления. Определить его можно численным методом, решая задачу восстановления с помощью предложенного выше итерационного алгоритма с присутствием в сглаженном изображении нормального шума, обеспечивающего анализируемое отношение сигнал/шум. Качество восстановления K изображения определим как отношение среднеквадратичных отклонений от исходной модели изображения свертки АО и восстановленного изображения АО. Предварительную фильтрацию аддитивного шума выполним с параметрами $p = 4$ и $\alpha = 8 \cdot 10^{-19}$, которые дают наилучшие результаты.

Расчетные зависимости K от количества итераций k при $\lambda = 2$ приведены на рис. 4. Здесь кривые 1...6 получены при отношении сигнал/шум, равном соответственно 20, 50, 100, 200, 500 и 1000. Приведенные кривые определяют оптимальное число итераций для различных значений отношения сигнал/шум. С ростом отношения сигнал/шум количество оптимальных итераций и K возрастают. Необходимо отметить, что полученные резуль-

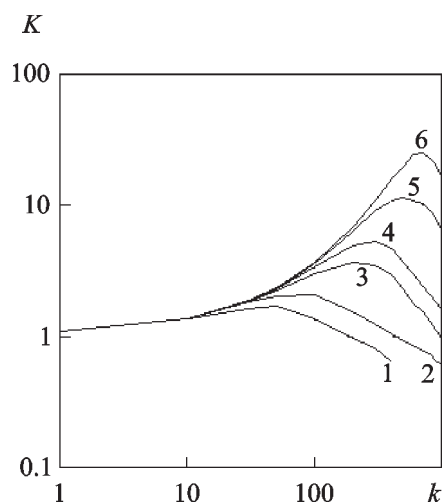


Рис. 4. Зависимость качества восстановления АО от количества итераций k при различных отношениях сигнал/шум

таты по качеству восстановления, если они ограничены шумами, можно улучшить. Для этого выходное изображение следует сгладить по методу текущего среднего с размером интервала усреднения, не искажающим изображение АО. При этом появляется возможность реализовать большее число итераций, обеспечивая тем самым более высокое качество изображения. Корректность применения указанного усреднения следует из выражения (9), которое показывает взаимную независимость процессов восстановления изображения и усиления шумовой компоненты.

4. Восстановление активных образований по радиоастрономическим наблюдениям солнечного излучения

Рассмотренный алгоритм восстановления изображения применяется для определения параметров АО на солнечном диске по данным радиоастрономических наблюдений на радиотелескопе РТ-2.

Картографирование солнечного диска с низким разрешением позволяет судить о наличии на его поверхности достаточно мощных АО. Для детального исследования их параметров необходимо выполнить ортогональные сечения АО с частотой пространственных отсчетов, позволяющей реализовать повышенные разрешающей способности, достигаемой методами нелинейной обработки. Выделение реальной свертки АО проводится посредством вычитания из полученных результатов сканирования соответствующих сечений свертки модели спокойного Солнца и ДН РТ-2. Вычитание проводится после взаимного совмещения границ указанных функций и их амплитудного выравнивания в области регистрации минимальной температуры. Полученная свертка АО восстанавливается итерационным методом с ограничением на неотрицательность решения. По восстановленным ортогональным сечениям определяются размеры и координаты АО на солнечной поверхности.

Яркостная температура АО определяется путем коррекции его наблюдаемой температуры исходя из значений увеличения восста-

новленной амплитуды относительно сглаженного значения в ортогональных сечениях.

Результат восстановления параметров АО покажем на примере обработки записей ортогональных сечений по склонению и прямому восхождению, проведенных через центр солнечного диска 24.09.2000 соответственно в 9:10 UT и 9:45 UT и представленных на рис. 5 и 6 кривыми 1 [3]. На рисунках текущее время и амплитудные значения обоих сечений представлены в отсчетах регистрирующего прибора – АЦП. Вид записи свидетельствует о наличии в центральной области Солнца АО, приводящего к интегральному повышению яркостной температуры на 6 % относительно уровня спокойных областей. Проведенное восстановление изображения этой области, представленное на рис. 5 и 6 кривыми 2, указало на присутствие в ней АО, размеры которого на уровне половинной интенсивности не более 1.4' по прямому восхождению и 2.2' по склонению. Центр АО расположен на 0.9' левее центра Солнца и на 0.5' выше его. Восстановленная яркостная температура АО равна $13 \cdot 10^3$ К. Определенный интерес в солнечных исследованиях вызывает связь АО с солнечными магнитными пятнами, которая характеризуется их взаимным положением и размерами. На рис. 7 приведены результаты такого сопоставления. Здесь показана магнитограмма солнечного диска, полученная в Stanford

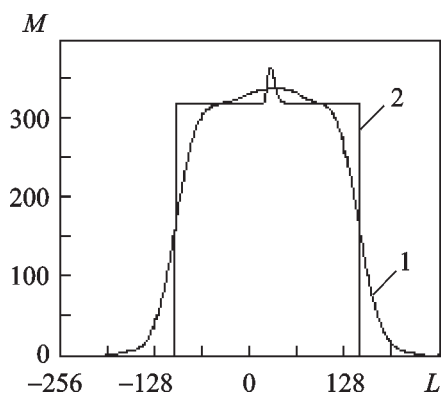


Рис. 5. Запись центрального сечения Солнца по склонению (кривая 1) 24.09.00 в 09:10 UT и результат его восстановления (кривая 2) (L – текущее время, M – амплитуда записи в отсчетах АЦП)

Lockheed Institute for Space Research [4] 24.09.2000 в 8:00 UT. На неё, с учетом изменения взаимного положения образований из-за разницы времени наблюдений, светлым эллипсом нанесен контур выделенного АО на уровне половинной интенсивности. Приве-

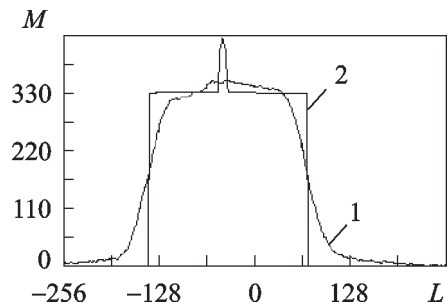


Рис. 6. Запись центрального сечения Солнца по прямому восхождению (кривая 1) 24.09.00 в 09:45 UT и результат его восстановления (кривая 2)

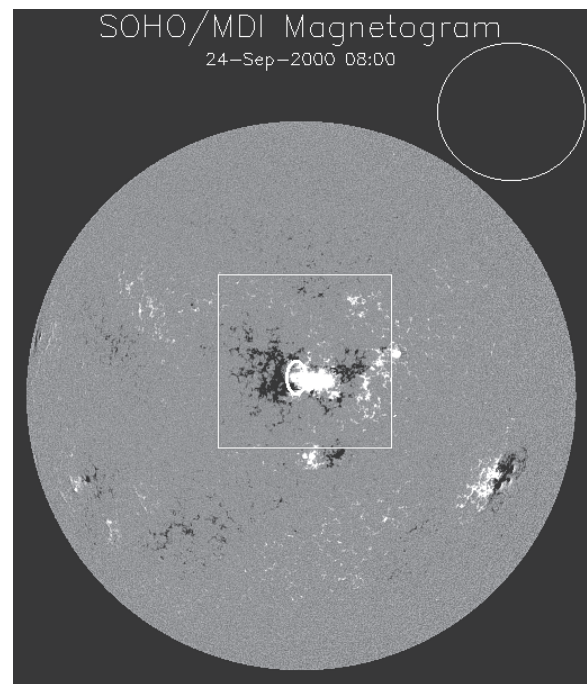


Рис. 7. Расположение выделенного АО (светлый эллипс) на магнитограмме солнечного диска [4]. В углу приведена ДН РТ-2 на уровне половинной мощности

денная картина показывает, что АО в 3-мм диапазоне накрывает арку магнитной трубки, связывающей противоположные полюсы магнитных пятен.

Заключение

В результате проведенных исследований предложен алгоритм нелинейной обработки солнечных наблюдений, позволяющий повысить их разрешение. Эффективность использования этого алгоритма демонстрируется на примере восстановления изображения АО на поверхности Солнца по данным наблюдений с низким угловым разрешением на радиотелескопе Радиоастрономического института НАН Украины РТ-2. При этом уверенно выделяются энергетические и пространственные характеристики АО. При реализации нелинейного итерационного метода восстановления изображения АО в качестве априорной информации используются сведения о ДН радиотелескопа, размере диска и яркостной температуре спокойного Солнца.

Литература

1. Yu. V. Karelin, L. N. Litvinenko, N. V. Ruzhentsev, V. S. Sulima, V. P. Churilov. Turkish Journal of Physics. 1994, **9**, pp. 1038-1040.
2. Г. И. Василенко, А. М. Тараторин. Восстановление изображений. Москва, Радио и связь, 1986, 304 с.
3. A. V. Antonov, V. P. Churilov, Yu. M. Gerasimov, Yu. V. Karelin, N. V. Ruzhentsev. Proc. of The Fourth Int. Symp. "Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves". Kharkov, Ukraine, 2001, pp. 798-800.
4. <http://sohowww.nascom.nass.gov/data/summary/gif/>

Application of Iterative Method to Reconstruction of Parameters of Fissile Solar Derivations from Observations at 3-mm Wave Band

A. V. Antonov, Yu. M. Gerasimov,
N. V. Ruzhentsev

The method for raising the resolution of solar observations using small aperture radio telescopes is considered. The main purpose of the method is definition of spatial – energetical parameters of fissile derivations on solar disc. The algorithm of application of non-linear iterative method of restoring the radio images is offered. The analysis of influence of noise on quality of restoring the solar radio images is carried out. The results of processing the real observations are surveyed.