

## ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВОЙ СТРУКТУРЫ МЕРЦАЮЩИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ НА ЧАСТОТЕ 111 МГц

© 2019 г. С. А. Тюльбашев\*, И. В. Чашей, Е. А. Григорьева

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,

Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пушкино, Россия

Поступила в редакцию 23.09.2018 г.; после доработки 13.12.2018 г.; принята к публикации 17.12.2018 г.

Получены оценки угловых размеров и компактностей 53 мерцающих радиоисточников, наблюдавшихся на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц. Оценки параметров угловой структуры источников выполнены с помощью нового метода, основанного на использовании комбинации индекса мерцаний и коэффициента асимметрии статистического распределения флуктуаций интенсивности. На основе анализа наблюдательных данных для турбулентности солнечного ветра найдена оценка коэффициента асимметрии мерцаний точечного источника. Проведено сравнение разных способов оценки угловых размеров источников по наблюдениям межпланетных мерцаний. Показано, что предложенная методика применима к источникам с угловыми размерами до  $1''$ . Точность оценки угловых размеров и компактностей источников составляет около 40%.

DOI: 10.1134/S0004629919060069

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для оценок угловых размеров компактных радиоисточников в настоящее время используются два метода: интерферометрические измерения и наблюдения межпланетных мерцаний. В случае интерферометрии для наблюдения радиоисточника используется не менее двух телескопов, угловое разрешение системы зависит от расстояния (базы) между телескопами. Этот способ оценки углового размера “*de facto*” является стандартом для дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн и позволяет реализовывать угловое разрешение от долей секунды до долей миллисекунды. В метровом диапазоне также есть работающие интерферометры, например LOFAR (<http://www.astron.nl/lofar-telescope/lofar-telescope>), LWA (<http://lwa.phys.unm.edu/>), MWA (<http://www.mwatelescope.org/>) и другие, но угловое разрешение этих систем заметно хуже, от долей угловой минуты до долей угловой секунды. Основная проблема использования интерферометрических методов в метровом и декаметровом диапазонах — влияние ионосферы (рефракция и мерцания), которое приводит к угловому смещению наблюдаемых источников и ограничению времени когерентного накопления.

По этим причинам на низких частотах можно исследовать лишь относительно сильные источники.

Мерцания или флуктуации плотности потока компактного радиоисточника возникают в результате дифракции радиоволн при прохождении излучения через турбулентную среду. В радиоастрономии исследуются межзвездные и межпланетные мерцания для компонентов источников, имеющих угловой размер меньше углового размера зоны Френеля ( $a_{Fr} = (z/k)^{1/2}$ ), где  $z$  — расстояние до модулирующего слоя,  $k$  — волновое число). Исследование межзвездных мерцаний пульсара PSR B1133+16 дало до сих пор непревзойденное, в том числе и интерферометрическими методами, угловое разрешение ( $10^{-8}$ )” [1].

Межпланетные мерцания радиоисточников обнаружены в 1964 г. [2]. В метровом диапазоне длин волн межпланетные мерцания наблюдаются, если в зондирующем радиои источнике есть детали с размером  $<1-2''$ . Характерные параметры мерцаний зависят как от параметров турбулентности модулирующего излучение солнечного ветра, так и от угловых размеров радиои источника. Угловые размеры источника из наблюдений мерцаний можно оценить по зависимости индекса мерцаний от элонгации [3], по спектру мощности мерцаний [4, 5],

\*E-mail: [serg@prao.ru](mailto:serg@prao.ru)

по коэффициенту асимметрии [6, 7], по мерцаниям в области насыщения [8].

Полученные оценки угловых размеров могут быть использованы как для исследования физических параметров компактных внегалактических источников [9], так и для исследования межпланетной плазмы (скорости, выбросов корональной массы) [10].

Начиная с 2013 г. на Большой синфазной антенне (БСА ФИАН) по программе исследований межпланетной плазмы проводится ежедневный мониторинг неба, перекрывающий  $50^\circ$  по склонению [11]. Основная цель мониторинга — поиск крупномасштабных возмущений в межпланетной плазме. Так как при прохождении возмущения усиливается уровень мерцаний радиоисточников на луче зрения, на котором находится возмущение, регистрация усиления говорит о возмущении в плазме солнечного ветра в данном направлении. Ежедневно наблюдается около 5000 мерцающих радиоисточников. В течение года с учетом смещения оптимальных для наблюдений мерцаний элонгаций наблюдается 15 000–20 000 разных мерцающих источников. Для поиска возмущений площадка обзора разбивается на пиксели размером  $3^\circ \times 3^\circ$ . Оценки показывают [12, 13], что внутри такого пикселя в наблюдениях на радиотелескопе БСА ФИАН может находиться до 10 мерцающих радиоисточников. Подавляющая часть мерцающих источников не имеет оценок угловых размеров и предполагается, что каждый пиксель представляет собой среднестатистический источник со средним угловым размером и усредненной плотностью потока [11, 14]. Вся наблюдаемая в обзоре площадка представляет собой примерно 2000 усредненных мерцающих псевдоисточников.

Очевидно, что при использовании “пиксельного” подхода угловое разрешение для наблюдаемых деталей возмущений не лучше  $3^\circ$ . В принципе, работая с индивидуальными источниками, наблюдаемыми на БСА ФИАН, можно улучшить это разрешение примерно до  $1^\circ$ , но нужно знать индивидуальные особенности источника, а именно его угловые размеры и отношение плотности потока, сосредоточенной в компактном (мерцающем) компоненте, к полной плотности потока, то есть знать компактность источника.

В настоящей работе исследуется возможность использования коэффициента асимметрии для массовых оценок угловых размеров источников и плотностей потока компактных компонентов, чтобы увеличить угловое разрешение при детектировании и исследовании крупномасштабных возмущений в солнечном ветре. Информация об угловой структуре компактных источников имеет и самостоятельный астрофизический интерес как для анализа физических свойств индивидуальных

источников, так и для изучения статистики источников с использованием в задачах космологической направленности.

## 2. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Пусть полный поток источника равен  $I$ , а поток мерцающего компонента  $xI$ , где  $x$  — параметр, характеризующий компактность источника (доля мерцающего потока). Тогда максимальное значение индекса мерцаний, определяемого как:

$$m^2 = \langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle / \langle I \rangle^2 \quad (1)$$

будет равно

$$m_{\max} = xm_0, \quad (2)$$

где  $m_0$  — максимальное значение индекса мерцаний, отнесенное к мерцающему компоненту, а  $m_{\max}$  — значение индекса мерцаний в максимуме зависимости от элонгации источника. Максимальное значение индекса мерцаний точечного источника равно 1. Практические наблюдения показали, что в метровом диапазоне длин волн угловые размеры всегда ограничены снизу рассеянием в межзвездной среде [15].

Индекс мерцаний источника с конечным угловым размером  $\theta_0$  будет меньше 1 за счет влияния собственного углового размера (либо из-за эффекта рассеяния), причем подавление мерцаний зависит от соотношения между угловым размером источника и угловым размером зоны Френеля  $\theta_{\text{Fr}}$ . Для степенного спектра турбулентности индекс мерцаний источника с угловым размером  $\theta_0$  и гауссовым распределением яркости определяется следующим соотношением [4, 5]

$$m_0^2 = \int C(z) dz \int q^{-n} \sin^2(q^2 z / 2k) \times \quad (3) \\ \times \exp(-q^2 z^2 \theta_0^2 / 2) d\mathbf{q},$$

где  $z$  — расстояние от наблюдателя до рассеивающего слоя,  $C(z)$  — зависящая от  $z$  структурная константа,  $\mathbf{q}$  — двумерная пространственная частота в перпендикулярной к лучу зрения плоскости,  $n$  — показатель степени,  $\sin^2(q^2 z / 2k)$  — фильтр Френеля,  $k$  — волновое число радиоволны,  $\exp(-q^2 z^2 \theta_0^2 / 2)$  — Фурье-преобразование распределения яркости источника. Вводя обозначение  $\xi = qa_{\text{Fr}} (a_{\text{Fr}} = (z/k)^{1/2})$  — френелевский масштаб получаем из (3):

$$m_0^2 = 2\pi (a_{\text{Fr}})^{n-2} \int C(z) dz \times \quad (4) \\ \times \int \xi^{1-n} \sin^2(\xi^2 / 2) \exp(-\xi^2 \theta_0^2 / 2 a_{\text{Fr}}^2) d\xi,$$

где  $\theta_{\text{Fr}} = a_{\text{Fr}}/z$  — угловой размер зоны Френеля. В случае точечного источника с  $\theta_0 = 0''$  максимальное значение индекса мерцаний  $m_0 = 1$ . Уменьшение индекса мерцаний за счет конечного углового размера источника зависит от параметра  $\theta_0^2/\theta_{\text{Fr}}^2$ , значение которого отнесено к положению эффективно модулирующего слоя среды (для плазмы солнечного ветра это область, локализованная вблизи прицельной точки луча зрения). Учитывая (4), для максимального значения индекса мерцаний можно принять эмпирическое соотношение

$$m_0^2 = [1 + (\theta_1^2/\theta_{\text{Fr}}^2)]^{-1}, \quad (5)$$

где  $\theta_1$  — некоторое эффективное значение углового размера, которое, как можно предположить, пропорционально  $\theta_0$ :

$$\theta_0 = \beta\theta_1. \quad (6)$$

Поскольку соотношение (5) носит эмпирический характер, коэффициент пропорциональности  $\beta$  следует определять на основе данных о мерцаниях источников с известными угловыми размерами. При этом значение  $\beta$  может быть различным для различных модельных распределений яркости.

Ранее предпринимались немногочисленные попытки определения угловых размеров источников из их мерцаний на межпланетной/межзвездной плазме с использованием коэффициента асимметрии статистического распределения флуктуаций интенсивности [6, 7]. Коэффициент асимметрии статистического распределения мерцаний

$$\gamma = \langle (I - \langle I \rangle)^3 \rangle / [\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle]^{3/2} \quad (7)$$

не зависит от протяженного компонента (гало) и связан только с компактной составляющей (ядро) и, как показано в работе [16], пропорционален индексу мерцаний:

$$\gamma = Am_{\text{max}} = A_0 m_0, \quad (8)$$

где  $A_0$  — значение коэффициента пропорциональности, численно совпадающего с коэффициентом асимметрии для компактного (точечного) источника при максимальном индексе мерцаний  $m_0 = 1$ . В указанных работах величина коэффициента  $A_0$  задавалась априорно. Теоретические значения  $A_0$ , вычисленные для различных моделей турбулентности нейтральной атмосферы и различных режимов мерцаний, заключены в пределах  $3/2 \leq A_0 \leq 3$  [17, 18]. Значение  $A$  должно быть определено для индивидуального источника по данным измерений мерцаний. Реальное значение величины  $A_0$  для межпланетной плазмы неизвестно и будет определено ниже на основании анализа данных наблюдений. Отметим, что значение  $A_0$  не зависит от используемого диапазона радиоволн при условии, что характеристики турбулентности солнечного ветра в просвечиваемых источниками областях для разных

частот одни и те же. Если известны  $A$  и  $A_0$ , то по ним можно определить параметр компактности  $x = A_0/A$ . Исходя из (2), (5–8), имеем для углового размера мерцающей составляющей:

$$\theta_0 = \beta\theta_1 = \beta\theta_{\text{Fr}}[(A_0/Am_{\text{max}})^2 - 1]^{1/2}. \quad (9)$$

Оценим влияние шумов на оценки параметров источников, полученные с использованием коэффициента асимметрии. Пусть измеряемые флуктуации потока излучения представляют собой сумму мерцаний  $\delta I$  и шумов  $\delta n$ ,

$$I - \langle I \rangle = \delta I + \delta n, \quad (10)$$

причем  $\langle \delta I \rangle = \langle \delta n \rangle = 0$ . Предположим, что статистическое распределение шумов является нормальным с коэффициентом асимметрии, равным нулю. Тогда из соотношения (7) находим измеряемый коэффициент асимметрии

$$\gamma' = \gamma[1 + (\langle \delta n^2 \rangle / \langle \delta I^2 \rangle)]^{-3/2}, \quad (11)$$

где  $\gamma$  — коэффициент асимметрии мерцаний. Измеряемый коэффициент пропорциональности между асимметрией и индексом мерцаний с учетом шумов будет равен

$$A' = A[1 + (\langle \delta n^2 \rangle / \langle \delta I^2 \rangle)]^{-5/4}, \quad (12)$$

где  $A$  — значение коэффициента без учета шумов. Значение параметра компактности

$$x' = A_0/A' = x[1 + (\langle \delta n^2 \rangle / \langle \delta I^2 \rangle)]^{5/4} \quad (13)$$

за счет шумов увеличивается по сравнению с истинным значением  $x$ , увеличение описывается множителем в квадратной скобке (13). Для сильных источников с  $\langle \delta n^2 \rangle \ll \langle \delta I^2 \rangle$  влиянием шумов можно пренебречь. Вопрос о возможности использования метода для слабых источников с  $\langle \delta n^2 \rangle \sim \langle \delta I^2 \rangle$  требует специального рассмотрения.

Ниже для определения искоемых параметров источников  $x$  и  $\theta_0$  будет применена следующая итерационная процедура: задается некоторое исходное значение  $A'_0 = 3$  (см., например, [18]), для выборки источников с помощью измеренных значений  $A$  определяются величины  $\theta_1$  и  $x$ , далее по совокупности данных определяется реальное значение  $A_0$ , после чего снова находятся  $\theta_1$  и  $x$ , а для нахождения коэффициента  $\beta$  используются опубликованные данные по сильным источникам. Такая схема позволяет по измеренным величинам  $m$  и  $\gamma$  получить оценки  $\theta_0$  и  $x$ .

### 3. ПАРАМЕТРЫ УГЛОВОЙ СТРУКТУРЫ ВЫБОРКИ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Для апробации предлагаемого метода и его реализации на конкретной выборке источников из опубликованного каталога на частоте 81.5 МГц [19]

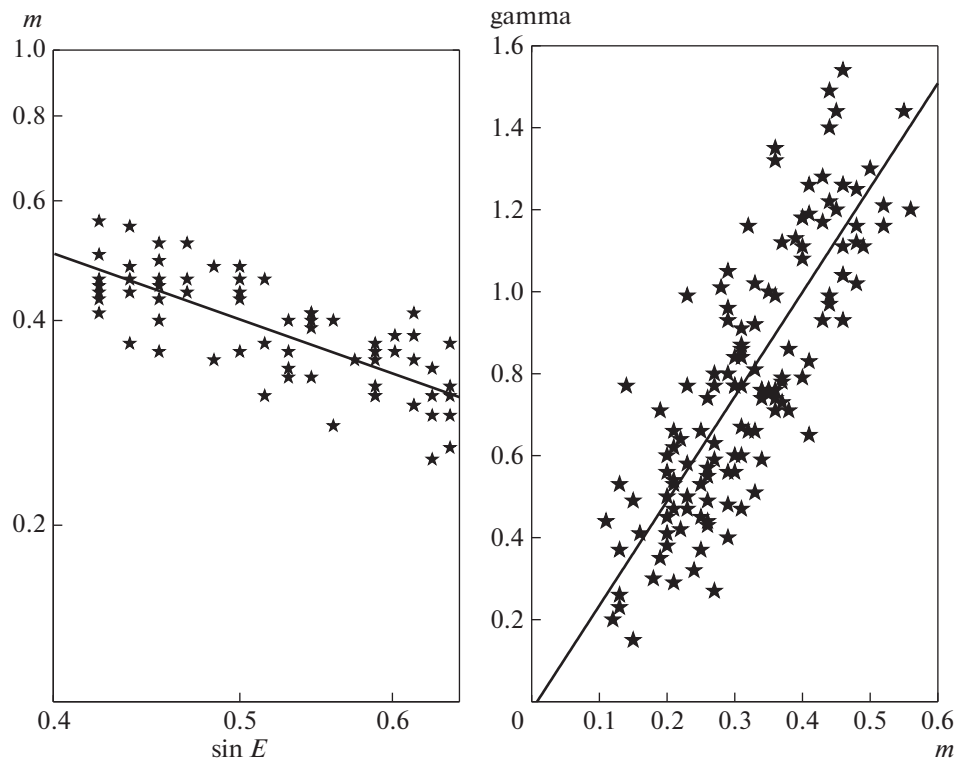


Рис. 1. Зависимость индекса мерцаний от элонгации (а) и коэффициента асимметрии от индекса мерцаний (б) для квазара 3С 48.

выбрано 68 компактных радиоисточников, показывающих наиболее сильные мерцания и расположенных в площадке, на которой проводятся ежедневные мониторинговые наблюдения на радиотелескопе БСА ФИАН,  $0^{\text{h}} < \alpha < 24^{\text{h}}$  и  $-8^{\circ} < \delta < +42^{\circ}$  [11]. Наблюдения, результаты которых анализируются ниже, проводились на центральной частоте 110.5 МГц в полосе 2.5 МГц при постоянной времени 0.1 с. Для каждого источника оценивался коэффициент асимметрии и индекс мерцаний. Оценки делались для элонгаций  $25^{\circ} < \varepsilon < 60^{\circ}$ , исключались оценки с  $m < 0.1$  [16]. В работе [20] было показано, что ионосферные мерцания могут вносить вклад в индекс мерцаний, относящийся к межпланетным мерцаниям. Для исключения этого вклада использовались оценки индекса мерцаний, сделанные на 3-секундных отрезках, а затем проводилось усреднение индексов мерцаний по всем отрезкам. Аналогичная процедура проводилась для зависимости коэффициента асимметрии от индекса мерцаний. После вписывания степенной функции в зависимость  $m$  от  $\sin(\varepsilon)$  и линейной функции в зависимость  $\gamma$  от  $m$  оценивались  $m_{\text{max}}$  и  $A$ . Для каждого из выбранных источников было получено от нескольких десятков до нескольких сотен оценок индекса асимметрии и индекса мерцаний.

Методика разрабатывается в том числе и для работы со слабыми мерцающими источниками.

У таких источников мерцания зачастую будут видны лишь на элонгациях  $20^{\circ} < \varepsilon < 25^{\circ}$ , т.е. в переходной зоне между ненасыщенными и насыщенными мерцаниями. Поэтому для проверки работоспособности методики для части отобранных нами источников, имеющих наблюдения в переходной области, были сделаны те же оценки параметров. Сравнение извлекаемых параметров покажет применимость разрабатываемого метода при работе в области насыщенных мерцаний. Очевидно, что для наблюдаемых мерцаний в области насыщения вписывание логарифмической прямой не имеет практического смысла и поэтому брались медианные значения  $m$  и  $\gamma$  для всех точек переходной зоны. Полученные оценки позволяли находить  $A$  и  $m_{\text{max}}$ .

Рассмотрим пошаговое применение методики на примере источника 3С 48 с известной угловой структурой. Для работы были взяты данные за 2014–2017 гг. Оцениваем индекс мерцаний для элонгаций от  $25^{\circ}$  до  $60^{\circ}$ , строим зависимость индекса мерцаний от элонгации (рис. 1а), вписываем логарифмическую прямую и находим максимальный ожидаемый индекс мерцаний для элонгации  $25^{\circ}$  ( $m_{\text{max}} = 0.49$ ). На тех же элонгациях оцениваем коэффициент асимметрии и строим зависимость  $\gamma$  от индекса мерцаний (рис. 1б). Вписывая прямую в эту зависимость, получаем значение коэффициента асимметрии как коэффициента тангенса

**Таблица 1.** Оценки параметров, извлекаемых по формулам (2–9) для квазара 3С 48

Элонгации	$m_{\max}$	$A$	$\Theta_1, ''$	$x$	$m_0$
25°–60°	0.49	2.49	0.83	1.20	0.40
20°–25°	0.45	2.79	0.80	1.07	0.42

угла наклона вписанной прямой ( $A = 2.49$ ). Для оценок в зоне насыщения извлекались медианные значения. В зависимостях исключены оценки  $m$ ,  $\gamma$ , имеющие большие погрешности. Линейная аппроксимация позволяет оценить  $m_{\max}$  и  $A$ .

Оценки параметров радиоисточника 3С 48 по формулам 2–9 приведены в табл. 1. В первом столбце приведены элонгации, в пределах которых делались оценки параметров. В столбцах со второго по шестой содержатся извлеченные оценки параметров: индекс мерцаний в максимуме ( $m_{\max}$ ); наблюдаемый коэффициент асимметрии ( $A$ ); оценка углового размера источника ( $\theta_1$ ), рассчитанная с учетом углового размера зоны Френеля, равного  $0.37''$  (для частоты 111 МГц) и при  $A_0 = 3$ ; компактность источника ( $x = A_0/A$ ); индекс мерцаний, относящийся к компактному компоненту ( $m_0$ ). Статистические ошибки определения параметров составляют порядка 10–15% для  $m_{\max}$  и  $m_0$  и порядка 25–30% для  $A$ ,  $\Theta_1$ ,  $x$ .

В целом получаемые значения для режима насыщенных и не насыщенных мерцаний совпадают в пределах ошибок. Обратим внимание на то, что значение компактности  $x$  превышает единицу, что говорит о необходимости уточнения величины  $A_0$ . Угловой размер источника 3С 48 оказался  $0.83''$  для области элонгаций больше  $25^\circ$  и  $0.80''$  для элонгаций меньше  $25^\circ$ . В то же время квазар 3С 48 — один из активно исследуемых источников, имеющий оценки углового размера, полученные как интерферометрическими способами, так и из исследований его мерцающего компонента. В работах [21, 22, 23] угловой размер 3С 48 по наблюдениям в метровом диапазоне длин волн оценен примерно в  $0.33''$ , что существенно меньше полученной нами оценки. Ниже это различие в оценках угловых размеров 3С 48 будет рассмотрено в деталях.

Аналогичная работа по извлечению угловых размеров источников с использованием коэффициента асимметрии была проведена для всей выборки из 68 источников. Для каждого источника при построении зависимости  $m(\varepsilon, \theta)$  и оценке  $\gamma$  использовалось от нескольких десятков до нескольких сотен оценок. Результаты этой работы приведены в Приложении 1 и отражены на рис. 2 и 3.

На рис. 2 показана зависимость  $A(\theta)$ , т.е. от извлеченных оценок угловых размеров. На левом и правом рисунках, имеющих между собой явное сходство, видно, что существует выраженная граница, проходящая на уровне  $A \approx 1.5$ –2. На этом же рис. 2 видно, что есть разрыв в оценках угловых размерах источников, приходящийся на угловые размеры  $1.5$ – $2''$ . Очевидно, что чем больше угловые размеры источника, тем меньше коэффициент асимметрии и для источников очень больших угловых размеров он должен быть равен нулю. Можно ожидать, что граница  $1.5$ – $2''$  — это граница, показывающая, до каких угловых размеров применяемая методика будет работоспособной. Граница разделения в оценках параметров мерцающих радиоисточников, имеющих разные угловые размеры, наблюдается также и в других зависимостях, например, в зависимости максимального индекса мерцаний от углового размера как для области слабых, так и для области насыщенных мерцаний (см. рис. 3).

Рис. 2 показывает, что принятое исходное значение  $A_0 = 3$ , по-видимому, не соответствует действительности. Естественно предположить, что эта граница соответствует минимальным значениям  $A = A_0$ , т.е. источникам с максимальной компактностью. Делая дальнейшие оценки, будем предполагать, что  $A_0 = 2$  и в этом случае значения компактности  $x = A_0/A$  не будут превышать единицы и противоречить здравому смыслу. Так как значение  $A_0$  не может быть меньше 1.5, то возможная систематическая ошибка оценок угловых размеров и компактностей источников не превышает 25%. Следующая итерация оценок угловых размеров и компактностей источников была сделана в предположении, что коэффициент пропорциональности точечного источника  $A_0 = 2$  для всех источников из Приложения 1. Результаты этого пересчета помещены в Приложение 2 и представлены на рис. 4 и 5. В целом рис. 4 и 5 повторяют рис. 2 и 3. Видно, что граница, разделяющая источники разных угловых размеров, сместилась со значений  $1.5$ – $2''$  на границу в районе угловой секунды.

Для извлечения коэффициента  $\beta$  (уравнения (6) и (9)) было проведено сравнение оценок угловых размеров, полученных с использованием описанной выше методики, и из зависимостей индекс мерцаний от элонгации, полученных в работе [21]. Наблюдения в работе Джанардхана [21] были сделаны на частоте 103 МГц, что близко к нашей частоте наблюдений (111 МГц), поэтому можно ожидать близость получаемых угловых размеров. Заметим также, что угловой размер источника 3С 48 ранее оценивался по спектрам мощности в наблюдениях

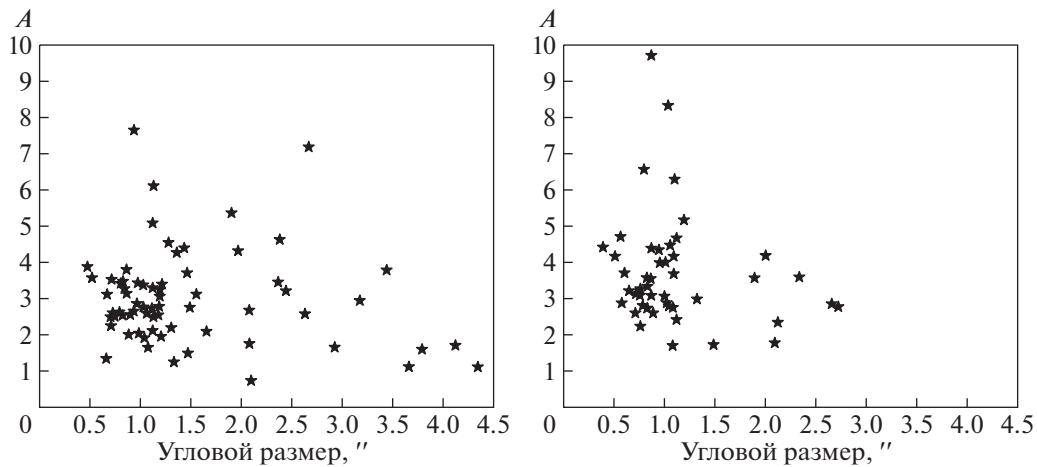


Рис. 2. Зависимость коэффициента  $A$  от извлеченных угловых размеров источников ( $\theta_1$ ) для элонгаций  $25^\circ$ – $60^\circ$  (а) и  $20^\circ$ – $25^\circ$  (б) при предполагаемом значении  $A_0 = 3$ .

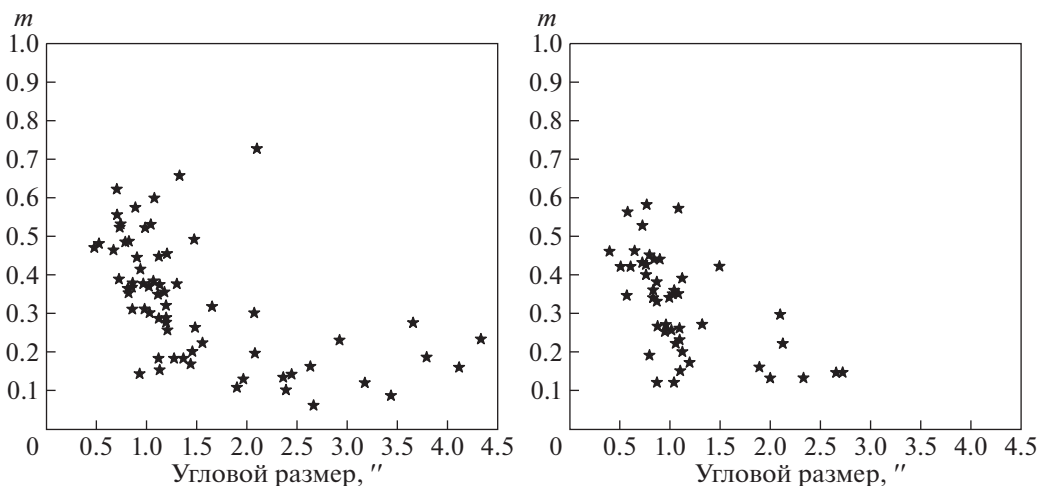


Рис. 3. Зависимости максимального значения индекса мерцаний источников от их угловых размеров для режимов слабых (а) и насыщенных (б) мерцаний.

на 111 МГц [24]. Извлеченный угловой размер ( $\theta = 0.33''$ ) по спектрам мощности мерцаний совпадает с оценкой углового размера Джанардхана ( $\theta = 0.35''$ ). Всего в нашей выборке оказалось 11 источников, совпадающих с источниками из [21]. Информация по этим источникам помещена в табл. 2. В первом столбце таблицы дано название источника, в столбцах 2–5 оценки угловых размеров и среднеквадратичные ошибки оценок для элонгаций  $25$ – $60^\circ$  и  $20$ – $25^\circ$ . Пропуски в табл. 2 для элонгаций  $20$ – $25^\circ$  у источников ЗС 273 и ЗС 287 говорят об отсутствии соответствующих наблюдений.

Оценки углового размера на частотах 103 МГц и 111 МГц представлены на рис. 6. По вертикальной оси располагаются оценки угловых размеров на 103 МГц [21], по горизонтальной оси оценки, полученные на 111 МГц (Приложение 2).

Вновь, как и на рис. 2 и 4, из зависимости выпадают источники больших ( $>1''$ ) угловых размеров ЗС 273, ЗС 298, ЗС 459. Они не использовались для оценки  $\beta$ . Оставшиеся оценки коэффициента  $\beta$ , полученные для элонгаций  $20$ – $25^\circ$  и  $25$ – $60^\circ$  были усреднены. Получено, что  $\beta = 0.80$  и  $\sigma_\beta = 0.11$ , что говорит о статистических погрешностях оценок углового размера источника примерно 15%. Коэффициент  $\beta$  позволяет сделать пересчет угловых размеров всех источников выборки, а формула (8) — пересчитать корректные значения компактности. В табл. 3 приведены оценки параметров источников, полученные усреднением значений на элонгациях  $20$ – $25^\circ$  и  $25$ – $60^\circ$  для источников, имеющих оценки угловых размеров  $<1''$ . В первом столбце дано название источника, во втором и третьем — оценки наблюдаемого индекса мерцаний на элонгации  $25^\circ$  и индекса мерцаний, рассчитанного

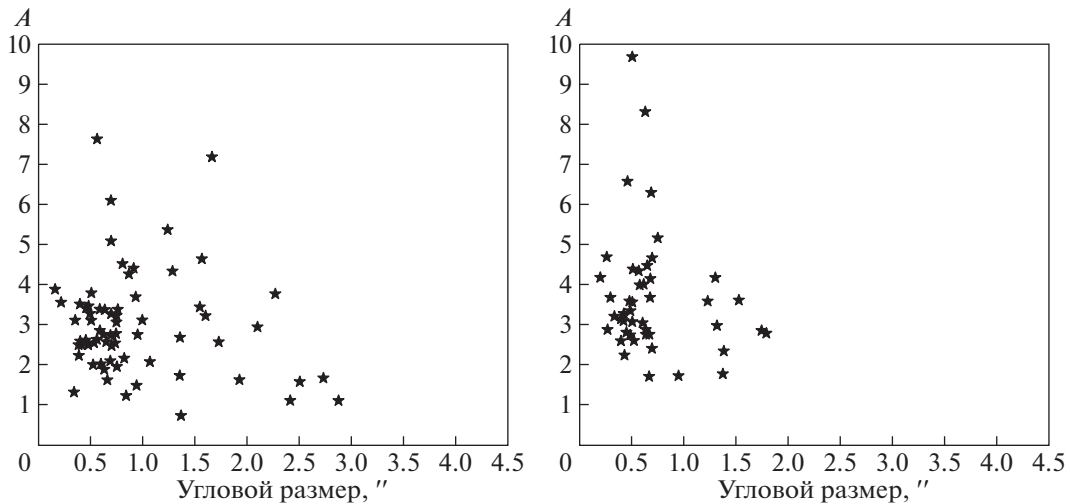


Рис. 4. Зависимость коэффициентов  $A$  от угловых размеров источников для элонгаций  $25^\circ\text{--}60^\circ$  (а) и  $20^\circ\text{--}25^\circ$  (б) в предположении  $A_0 = 2$ .

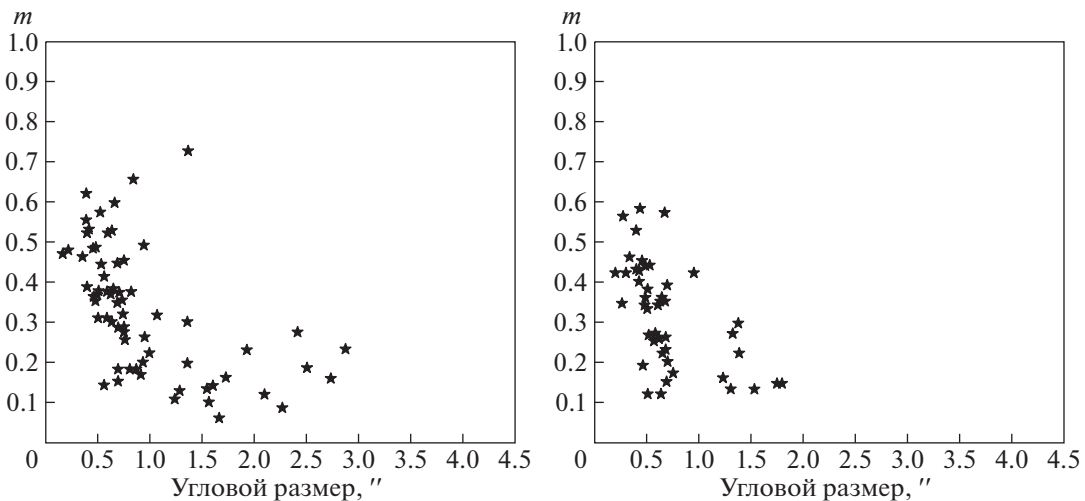


Рис. 5. Зависимости максимального значения индекса мерцаний источников от их угловых размеров для режимов слабых (а) и насыщенных (б) мерцаний в предположении  $A_0 = 2$ .

с учетом углового размера источника. В четвертом столбце приведена оценка углового размера источника, а в пятом — оценка его компактности.

Учет коэффициента  $\beta$  приводит к уменьшению оценок угловых размеров источников, полученных на частоте 111 МГц, что проиллюстрировано на рис. 7 оценками из табл. 3 по источникам с угловыми размерами меньше  $1''$ . Если коэффициент  $\beta$  подобран правильно, то угловые размеры источников, определенные по наблюдениям на частотах 103/111 МГц, с учетом ошибок их определения должны лечь по обе стороны от прямой равных угловых размеров.

Из рис. 7 видно, что для 8 из 9 источников отклонения, приходящиеся по обе стороны от средней линии, не велики. Медианное значение этих

отклонений равно 20%, что близко к ошибке определения коэффициента  $\beta$ . Однако для источника ЗС 119 оценка углового размера на 103 МГц равна  $0.72''$ , а на частоте 111 МГц —  $0.26m(\varepsilon)$ . Отличие угловых размеров почти в 3 раза явно находится за пределами возможных ошибок. Анализ интерферометрических наблюдений источника ЗС 119, проведенный в [22], показывает, что по данным до частоты 600 МГц источник имеет многокомпонентную структуру, общий размер которой порядка  $0.2''$ , половина энергии из этой структуры идет от компонента с угловым размером  $<0.05''$ . Оценка углового размера ЗС 119, сделанная по спектру мощности мерцаний по наблюдениям на частоте 102 МГц [15], тоже равна  $0.2''$ . Наша оценка углового размера,

**Таблица 2.** Оценки угловых размеров по наблюдениям на 111 и 103 МГц при  $A_0 = 2$

Источник	$\Theta_{111(25-60^\circ)}, ''$	$\Delta\theta''$	$\Theta_{111(20-25^\circ)}, ''$	$\Delta\theta''$	$\theta_{103}$
3C 2	0.691	0.286	0.484	0.660	0.49
3C 48	0.482	0.067	0.456	0.161	0.35
3C 119	0.390	0.109	0.275	0.141	0.72
3C 222	0.498	0.245	0.516	0.279	0.33
3C 237	0.589	0.213	0.636	0.416	0.58
3C 273	1.570	0.709			0.55
3C 287	0.455	0.103			0.45
3C 298	0.9576	0.0924	1.3272	0.4416	0.59
3C 446	0.357	0.156	0.611	0.607	0.25
3C 459	1.361	0.223	1.536	0.888	0.41
СТА21	0.390	0.131	0.6041	0.0653	0.21

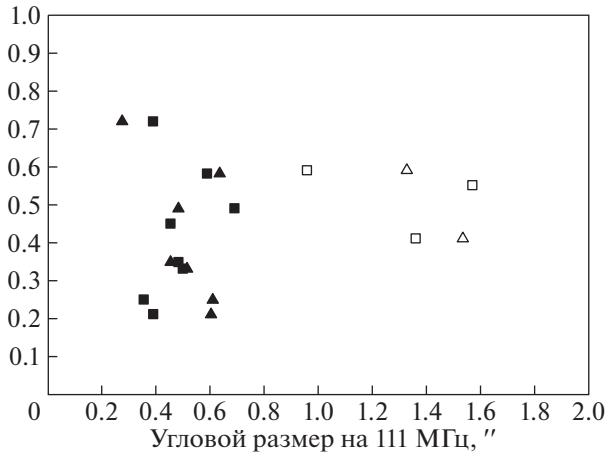
полученная с использованием индекса асимметрии близка к этим значениям.

Величина статистических ошибок оценок углового размера источника и его компактности зависит от количества точек, использованных для построения зависимостей  $m(\varepsilon)$  и  $\gamma(m)$ , и в целом эти погрешности не превосходят 30%. Максимальные статистические ошибки связаны с количеством оценок индекса мерцаний и коэффициента асимметрии, которые удалось извлечь из первичных

данных. В частности, в табл. 3 можно увидеть, что компактность у некоторых из источников больше единицы. Для этих источников недостаточно данных, ошибки индекса мерцаний могут достигать 100%, и поэтому компактности тоже определены с большими погрешностями. В любом случае можно утверждать, что для таких источников компактность близка к единице.

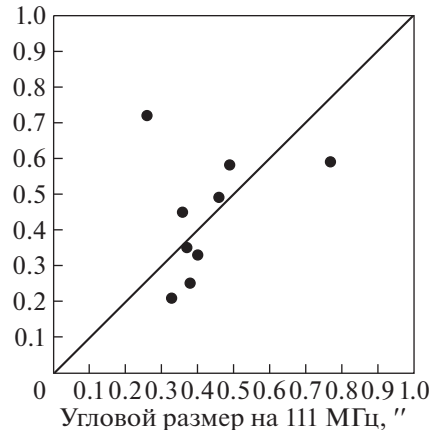
Использованная выше методика оценки угловых размеров и компактностей радиоисточников после извлечения  $A_0$  и  $\beta$  может быть сведена к простой схеме, представленной на рис. 8.

Угловой размер на 103 МГц, ''



**Рис. 6.** Оценки угловых размеров мерцающих радиоисточников из табл. 2 на 103 МГц по вертикальной и на 111 МГц по горизонтальной шкале. Закрашенные значки — источники с угловыми размерами меньше 1''. Незакрашенные значки — источники с угловым размером больше 1''. Показаны оценки, полученные на элонгациях 25°–60° (квадраты) и на элонгациях 20°–25° (треугольники).

Угловой размер на 103 МГц, ''



**Рис. 7.** По вертикальной оси отложены угловые размеры источников, определенные на частоте 103 МГц, по горизонтальной — на частоте 111 МГц. Диагональ, идущая из нижнего левого угла в верхний правый угол, показывает равные угловые размеры источников по наблюдениям на 103/111 МГц.



Таблица 3. Основные параметры источников, имеющих угловые размеры меньше 1''

Источник	$m_{\max}$	$m_0$	$\Theta_0$	$x$	Источник	$m_{\max}$	$m_0$	$\Theta_0$	$x$
3C 2	0.34	0.54	0.46	0.638	3C 298	0.27	0.38	0.77	0.701
3C 3	0.40	0.38	0.71	1.036	3C 299	0.37	0.50	0.50	0.732
3C 23	0.30	0.50	0.52	0.595	3C 446	0.40	0.61	0.38	0.653
3C 26	0.33	0.37	0.74	0.892	3C 454	0.42	0.47	0.55	0.894
3C 43	0.21	0.43	0.62	0.491	3C 460	0.17	0.33	0.83	0.512
3C 48	0.47	0.62	0.37	0.758	3C 466	0.48	0.63	0.36	0.769
3C 49	0.25	0.49	0.53	0.520	4C 14.41	0.47	0.91	0.13	0.517
3C 67	0.35	0.59	0.41	0.603	4C 14.82	0.47	0.73	0.27	0.641
3C 93.1	0.14	0.40	0.68	0.353	4C 21.48	0.37	0.46	0.57	0.810
3C 119	0.56	0.74	0.26	0.749	4C 21.53	0.14	0.55	0.45	0.263
3C 138	0.35	0.63	0.36	0.556	4C 24.46	0.65	0.40	0.68	1.649
3C 154	0.09	0.35	0.79	0.259	4C 25.03	0.27	0.51	0.50	0.532
3C 161	0.18	0.41	0.65	0.443	4C 28.57	0.39	0.68	0.32	0.572
3C 173	0.28	0.52	0.48	0.525	4C 29.56	1.10	0.72	0.28	1.521
3C 186	0.26	0.48	0.54	0.554	4C 29.64	0.30	0.50	0.51	0.598
3C 190	0.16	0.45	0.58	0.356	4C 29.69	0.38	0.49	0.53	0.784
3C 213.1	0.41	0.60	0.39	0.680	4C 31.33	0.36	0.60	0.39	0.590
3C 222	0.37	0.59	0.40	0.634	4C 32.44	0.60	0.48	0.53	1.234
3C 225	0.21	0.41	0.66	0.516	4C 33.21	0.44	0.56	0.44	0.790
3C 236	0.19	0.54	0.46	0.344	4C 36.13	0.27	0.46	0.57	0.597
3C 237	0.36	0.51	0.49	0.704	4C 37.24	0.45	0.87	0.17	0.520
3C 241	0.44	0.61	0.38	0.716	OE 131	0.46	0.47	0.55	0.986
3C 258	0.49	0.64	0.36	0.771	OF 247	0.55	0.63	0.36	0.875
3C 263.1	0.16	0.42	0.63	0.376	СТА 21	0.60	0.67	0.33	0.901
3C 275	0.31	0.59	0.41	0.529	СТА 102	0.65	0.39	0.70	1.670
3C 286	0.36	0.61	0.38	0.589	4C 12.50	0.53	0.50	0.51	1.063
3C 287	0.48	0.63	0.36	0.771					

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Одним из основных способов оценки угловых размеров компактных радиоисточников в метровом диапазоне длин волн из наблюдений их мерцаний является построение зависимостей индекса мерцаний от элонгации ( $m(\varepsilon)$ ) и вписывание в полученные зависимости модельных кривых ( $m(\varepsilon, \theta)$ ) [3]. В работе [3] выполнены численные расчеты зависимости индекса мерцаний от абсолютного уровня турбулентности для источников разных угловых размеров. Зависимости включают режим слабых мерцаний, режим насыщения и режим перехода

от слабых мерцаний к насыщенным. Вычисления проведены для модели тонкого фазового экрана, поэтому максимальное значение индекса мерцаний для источников с разными угловыми размерами достигается при одном и том же значении безразмерного параметра, соответствующего абсолютному уровню турбулентности. Следует, однако, отметить ограниченную применимость результатов [3], поскольку использованная модель не в полной мере отражает реальные свойства модулирующей радиоизлучение межпланетной плазмы. Во-первых, при расчетах принимался показатель сте-

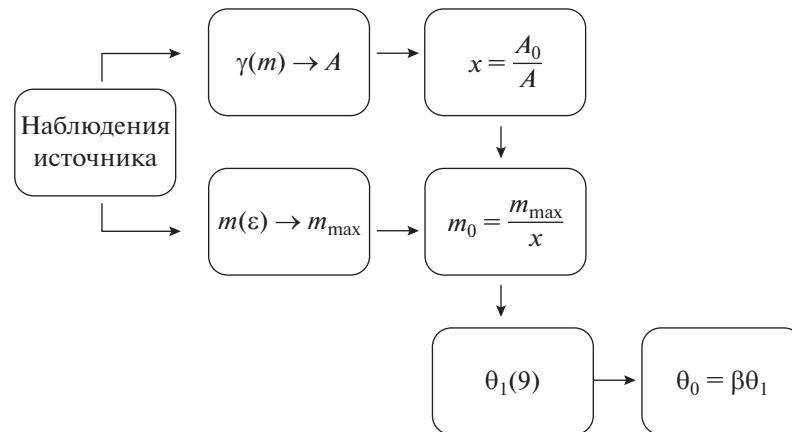


Рис. 8. Схема работы с индивидуальными источниками при известных значениях  $A_0$  и  $\beta$ .

пени пространственного спектра турбулентности, равный 3. Многочисленные измерения показывают, что на самом деле спектр турбулентности в области сформировавшегося солнечного ветра более крутой и имеет показатель степени, близкий к 3.6 [23]. Во-вторых, модель тонкого экрана может быть использована только для источников с достаточно малыми угловыми размерами. Мерцания источников с угловыми размерами, превосходящими угловой размер зоны Френеля, чувствительны к распределению плазмы вдоль луча зрения.

В приложении к реальным данным основная проблема использования, описанного выше способа оценки угловых размеров связана с тем, что реальные источники состоят из компактного и протяженного компонентов. Методика рассчитана на работу с компактным компонентом. Однако нам *a priori* неизвестен вклад от гало в интегральную плотность потока, и поэтому нужно предпринимать дополнительные шаги для оценки компактности.

Вторым основным способом оценки угловых размеров источников является вписывание модельных кривых в спектр мощности мерцаний [4, 5]. При моделировании перебираются возможные угловые размеры источника, скорости солнечного ветра и возможные индексы турбулентности среды. К сожалению, три параметра можно варьировать так, что в экспериментальные точки вписываются разные наборы извлекаемых значений. Помимо этого, как показали наши практические работы, необходимо, чтобы отношение сигнала к шуму в спектре мощности было выше 10. То есть этим методом можно оценить угловые размеры лишь достаточно сильных источников. Отдельной большой проблемой для метрового диапазона длин волн является учет ионосферы. Как показано в работах [23, 24], ионосферные мерцания дают дополнительную подложку на спектре мощности, и на практике тяжело учесть вклад этих мерцаний в спектр. Формально можно увеличить отношение

сигнала к шуму в спектре мощности усреднением спектров мощности источника за разные дни. Однако скорость солнечного ветра, определяемая по источнику, меняется день ото дня, и поэтому точка изгиба спектра мощности приходится все время на разные частоты. Это не позволяет проводить корректные усреднения спектров.

В работе [8] предложен метод оценки углового размера мерцающего компонента источника по наблюдениям в близкой к Солнцу области сильных мерцаний. Этот способ основан на связи характерной частоты временного спектра межпланетных мерцаний в режиме насыщения с угловым размером источника и скоростью солнечного ветра. Угловой размер определяется по измерению частоты излома в дифракционной части спектра мерцаний. Доля мерцающего компонента в полном потоке источника может быть определена по максимальному значению индекса мерцаний. Данный метод не требует предположений о показателе степени спектра турбулентности плазмы, кроме того, достаточно наблюдений лишь в области перехода от насыщенных мерцаний к слабым, а не во всем диапазоне элонгаций. Также данный метод не использует абсолютного значения максимума зависимости  $m(\varepsilon)$ , которое может меняться от года к году. Существенный недостаток метода состоит в том, что элонгации менее  $20^\circ$  достижимы лишь для 10–20% источников северной полусферы. На настоящий момент времени этот способ апробирован лишь на одном источнике.

Разработка практической методики оценки угловых размеров источников с использованием коэффициента асимметрии проведена в данной работе. Точность оценки извлекаемых параметров источников, а именно их угловых размеров и оценок компактности не хуже, чем 30%. При оценках этих параметров можно использовать оценки индекса мерцаний и коэффициента асимметрии в зоне насыщенных мерцаний. Заметим, что зона

насыщенных мерцаний совпадает с максимумом в зависимости  $m(\varepsilon)$ , а для слабых источников это единственное место, где их можно обнаружить как компактные объекты. Одиночные измерения индекса асимметрии имеют большие погрешности, но оценки можно усреднять и тем самым уменьшать погрешности. Фактически данный способ не столько дополняет другие способы оценок угловых размеров и компактностей источников, сколько дает для многих из мерцающих источников единственную возможность оценить эти параметры.

Наибольший эффект в приложении к поиску возмущений в межпланетной плазме даст совместное использование предложенного метода и способа оценки скорости солнечного ветра с помощью спектров мощности. Угловые размеры, оцененные при помощи рассмотренного метода, могут позволить избежать неоднозначностей при вписывании теоретического спектра мощности в спектр мощности конкретного источника, полученный в данный день. Извлеченные угловые размеры можно считать неизменными и использовать, так как в метровом диапазоне речь идет об угловых размерах в доли угловой секунды и размерах компактных деталей в десятки килопарсек. Таким образом, использование углового размера приведет к однозначному восстановлению спектрального индекса турбулентности и наблюдаемой скорости солнечного ветра из спектров мощности и позволит строить ежедневную карту скорости движения плазмы, имеющую высокое угловое разрешение.

Использованный для выборки каталог [19] содержит более 1000 мерцающих источников, но построен для более низкой частоты. Кроме того, в этом каталоге отсутствуют оценки компактности, а угловые размеры источников оценены с большой неопределенностью. В настоящей работе из каталога [19] взяты только координаты источников.

## 5. ВЫВОДЫ

Разработана методика оценки угловых размеров мерцающих радиоисточников и их компактностей, основанная на анализе комбинации индекса мерцаний и коэффициента асимметрии. Использованный подход позволяет одновременно оценить угловые размеры и степень компактности источников. Предполагается, что в перспективе выборка источников будет существенно расширена за счет включения более слабых источников. Оценки параметров угловой структуры источников получены с достаточно высокой точностью. Действительно, возможные систематические ошибки в оценках углового размера ( $\theta_0$ ), связанные с определением коэффициента пропорциональности ( $A_0$ ) между оценкой индекса мерцаний в максимуме ( $m_0$ ) и коэффициентом асимметрии ( $\gamma$ ), а также ошибки

оценок компактности источника ( $x$ ) не превосходят 25%. Статистические ошибки углового размера, связанные с оценкой коэффициента пропорциональности  $\beta$ , не превосходят 15%. Общая ошибка углового размера и компактности источника будет также связана со статистическими ошибками, зависящими от количества и качества оценок индекса мерцаний и коэффициента асимметрии, должна определяться независимо в каждом случае. Поскольку типичная статистическая оценка погрешности углового размера и компактности менее 30%, то общая ошибка из-за возможных систематических и статистических погрешностей не превосходит 40%. Достигнутая точность существенно превышает точность оценок угловых размеров каталога [19].

Из полученных результатов следует, что методика применима для компактных радиоисточников, угловой размер которых не превосходит одной угловой секунды на частоте 111 МГц.

Применение разработанной методики к мерцающим радиоисточникам, массово обнаруживаемым на антенне БСА ФИАН, позволит улучшить угловое разрешение наблюдаемых деталей крупномасштабных возмущений солнечного ветра типа выбросов корональной массы и коротирующих структур.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН “Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей”, подпрограмма “Астрофизические объекты как космические лаборатории”.

### ПРИЛОЖЕНИЕ 1. $A_0 = 3$

В первом столбце таблицы название исследуемого источника, в столбцах 2–6 и 7–11 извлеченные значения компактности  $x$ ,  $m_{\max}$ ,  $A$ ,  $\theta_1$ . В столбцах 2–7 приведены оценки на элонгациях  $25^\circ$ – $60^\circ$  градусов, в столбцах 7–11 эти оценки сделаны для элонгаций  $20^\circ$ – $25^\circ$ . Пустые ячейки в столбцах 7–11 указывают на отсутствие наблюдений источников на элонгациях  $20^\circ$ – $25^\circ$ .

### ПРИЛОЖЕНИЕ 2. $A_0 = 2$

В первом столбце таблицы — название исследуемого источника, в столбцах 2–6 и 7–11, извлеченные значения компактности  $x$ ,  $m_{\max}$ ,  $A$ ,  $\theta$  для элонгаций  $25^\circ$ – $60^\circ$  и  $20^\circ$ – $25^\circ$  соответственно. Пустые ячейки в колонках 7–11 указывают на отсутствие наблюдений источников на элонгациях  $20^\circ$ – $25^\circ$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Источник	$m_{\max}$	$A$	$\theta$	$x$	$m_0$	$m_{\max}$	$A$	$\theta$	$x$	$m_0$
3с2	0.346	2.716	1.114	1.105	0.313	0.340	3.554	0.835	0.844	0.403
3с3	0.375	2.160	1.309	1.389	0.270	0.420	1.702	1.496	1.762	0.238
3с13	0.134	3.418	2.371	0.878	0.153					
3с23	0.319	2.760	1.196	1.087	0.294	0.270	3.963	0.962	0.757	0.357
3с26	0.301	1.734	2.080	1.730	0.174	0.360	2.750	1.050	1.091	0.330
3с43	0.198	3.684	1.465	0.814	0.243	0.220	4.460	1.061	0.673	0.327
3с48	0.487	2.490	0.832	1.205	0.404	0.450	2.787	0.798	1.077	0.418
3с49	0.256	3.378	1.221	0.888	0.288	0.250	4.320	0.952	0.694	0.360
3С67	0.377	3.104	0.866	0.966	0.390	0.330	3.530	0.871	0.850	0.388
3С 93.1	0.159	1.670	4.123	1.797	0.089	0.120	9.667	0.876	0.310	0.387
3с94	0.161	2.562	2.638	1.171	0.138					
3С119	0.553	2.480	0.714	1.210	0.457	0.560	2.857	0.582	1.050	0.533
3с125	0.128	4.307	1.972	0.697	0.183	0.130	4.154	2.007	0.722	0.180
3с138	0.353	2.524	1.182	1.189	0.297	0.345	4.667	0.577	0.643	0.537
3с154	0.060	7.160	2.670	0.419	0.143	0.120	8.292	1.045	0.362	0.332
3с161	0.183	4.513	1.281	0.665	0.276					
3С173	0.285	3.257	1.129	0.921	0.309	0.265	4.359	0.880	0.688	0.385
3с186	0.273	3.215	1.201	0.933	0.292	0.255	4.000	1.016	0.750	0.340
3с190	0.152	6.091	1.135	0.493	0.308	0.170	5.147	1.204	0.583	0.292
3с191	0.139	3.201	2.448	0.937	0.148	0.145	2.828	2.662	1.061	0.137
3С 213.1	0.413	2.633	0.945	1.139	0.362	0.400	3.250	0.764	0.923	0.433
3с222	0.365	3.254	0.852	0.922	0.396	0.380	3.053	0.876	0.983	0.387
3с225	0.222	3.097	1.560	0.969	0.229	0.200	4.650	1.126	0.645	0.310
3с230	0.274	1.092	3.663	2.748	0.100	0.350	2.743	1.087	1.094	0.320
3с236	0.183	5.062	1.130	0.593	0.309	0.190	6.553	0.805	0.458	0.415
3с237	0.375	2.824	0.974	1.062	0.353	0.350	2.857	1.039	1.050	0.333
3с241	0.444	2.524	0.911	1.189	0.374	0.425	3.059	0.764	0.981	0.433
3с258	0.521	2.006	0.989	1.496	0.348	0.460	3.185	0.656	0.942	0.488
3С263.1	0.169	4.380	1.440	0.685	0.247	0.150	6.267	1.113	0.479	0.313
3с270.1	0.231	1.095	4.346	2.739	0.084					
3с273	0.099	4.615	2.391	0.650	0.152					
3с275	0.310	3.778	0.867	0.794	0.390					
3с286	0.363	3.395	0.816	0.884	0.410					
3с287	0.484	2.594	0.796	1.156	0.419					
3с293	0.106	5.354	1.906	0.560	0.189					
3с298	0.2614	2.74	1.49	1.095	0.239	0.27	2.96	1.33	1.012	0.267
3с299	0.368	2.733	1.031	1.098	0.336					
3с324	0.118	2.919	3.179	1.028	0.115					

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Окончание

Источник	$m_{\max}$	$A$	$\theta$	$x$	$m_0$	$m_{\max}$	$A$	$\theta$	$x$	$m_0$
3с446	0.463	3.100	0.675	0.968	0.478	0.340	3.029	1.005	0.990	0.343
3с454	.446	2.090	1.123	1.435	0.311	0.390	2.385	1.126	1.258	0.310
3с459	0.196	2.664	2.083	1.126	0.174	0.130	3.577	2.341	0.839	0.155
3с460	0.183	4.254	1.370	0.705	0.259	0.160	3.563	1.898	0.842	0.190
3с466	0.530	2.486	0.751	1.207	0.439	0.440	2.716	0.846	1.105	0.398
4С 14.41	0.470	3.870	0.482	0.775	0.606	0.460	4.402	0.401	0.681	0.675
4с14.82	0.521	2.572	0.735	1.166	0.447	0.420	3.667	0.614	0.818	0.513
4с17.94	0.316	2.057	1.657	1.458	0.216	0.295	1.746	2.107	1.718	0.172
4с21.48	0.373	2.470	1.138	1.214	0.307					
4с21.53	0.143	7.617	0.940	0.394	0.364					
4с24.46	0.655	1.213	1.337	2.473	0.265					
4с25.03	0.310	3.387	0.982	0.886	0.350	0.230	4.130	1.100	0.726	0.317
4с28.57	0.387	3.497	0.726	0.858	0.451					
4с29.56	1.103	1.315	0.665	2.282	0.484					
4с29.63	0.085	3.754	3.445	0.799	0.106					
4с29.64	0.299	3.342	1.038	0.898	0.333					
4С29.69	0.382	2.550	1.071	1.176	0.324					
4с31.25	0.122	1.129	7.973	2.657	0.046	0.145	2.759	2.730	1.088	0.133
4с31.33	0.352	3.452	0.829	0.869	0.405	0.360	3.333	0.841	0.900	0.400
4с32.44	0.596	1.620	1.080	1.851	0.322					
4С33.21	0.452	1.934	1.206	1.552	0.291	0.430	3.128	0.732	0.959	0.448
4с34.09	0.230	1.619	2.932	1.853	0.124	0.220	2.318	2.129	1.294	0.170
4С36.13	0.288	3.046	1.203	0.985	0.292	0.260	3.654	1.100	0.821	0.317
4с37.24	0.480	3.551	0.532	0.845	0.568	0.420	4.143	0.516	0.724	0.580
OE 131	0.490	1.478	1.478	2.029	0.241	0.440	2.580	0.899	1.163	0.378
OF 247	0.574	1.990	0.892	1.508	0.381	0.525	2.581	0.725	1.162	0.452
OQ323	0.185	1.565	3.800	1.917	0.096					
СТА21	0.619	2.215	0.714	1.354	0.457	0.580	2.224	0.771	1.349	0.430
СТА102	0.726	0.712	2.101	4.215	0.172	0.570	1.684	1.087	1.781	0.320
4с12.50	0.528	1.882	1.047	1.594	0.331					

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Источник	$m_{\max}$	$A$	$\theta$	$x$	$m_0$	$m_{\max}$	$A$	$\theta$	$x$	$m_0$
3c2	0.346	2.716	0.691	0.736	0.469	0.340	3.554	0.484	0.563	0.604
3c3	0.375	2.160	0.829	0.926	0.405	0.420	1.702	0.959	1.175	0.358
3c13	0.134	3.418	1.557	0.585	0.230					
3c23	0.319	2.760	0.749	0.725	0.440	0.270	3.963	0.580	0.505	0.535
3c26	0.301	1.734	1.359	1.153	0.261	0.360	2.750	0.645	0.727	0.495
3c43	0.198	3.684	0.937	0.543	0.365	0.220	4.460	0.652	0.448	0.491
3c48	0.487	2.490	0.482	0.803	0.606	0.450	2.787	0.456	0.718	0.627
3c49	0.256	3.378	0.766	0.592	0.432	0.250	4.320	0.572	0.463	0.540
3C67	0.377	3.104	0.508	0.644	0.586	0.330	3.530	0.512	0.567	0.582
3C 93.1	0.159	1.670	2.735	1.198	0.133	0.120	9.667	0.516	0.207	0.580
3c94	0.161	2.562	1.737	0.781	0.207					
3C119	0.553	2.480	0.390	0.806	0.686	0.560	2.857	0.275	0.700	0.800
3c125	0.128	4.307	1.286	0.464	0.275	0.130	4.154	1.310	0.481	0.270
3c138	0.353	2.524	0.739	0.792	0.445	0.345	4.667	0.271	0.429	0.805
3c154	0.060	7.160	1.670	0.279	0.215	0.120	8.292	0.640	0.241	0.498
3c161	0.183	4.513	0.809	0.443	0.413					
3C173	0.285	3.257	0.701	0.614	0.464	0.265	4.359	0.519	0.459	0.578
3c186	0.273	3.215	0.753	0.622	0.439	0.255	4.000	0.619	0.500	0.510
3c190	0.152	6.091	0.705	0.328	0.462	0.170	5.147	0.755	0.389	0.438
3c191	0.139	3.201	1.609	0.625	0.222	0.145	2.828	1.753	0.707	0.205
3C 213.1	0.413	2.633	0.567	0.760	0.543	0.400	3.250	0.429	0.615	0.650
3c222	0.365	3.254	0.498	0.615	0.594	0.380	3.053	0.516	0.655	0.580
3c225	0.222	3.097	1.003	0.646	0.344	0.200	4.650	0.699	0.430	0.465
3c230	0.274	1.092	2.426	1.832	0.150	0.350	2.743	0.671	0.729	0.480
3c236	0.183	5.062	0.702	0.395	0.464	0.190	6.553	0.462	0.305	0.622
3c237	0.375	2.824	0.589	0.708	0.529	0.350	2.857	0.636	0.700	0.500
3c241	0.444	2.524	0.542	0.792	0.561	0.425	3.059	0.429	0.654	0.650
3c258	0.521	2.006	0.600	0.997	0.522	0.460	3.185	0.341	0.628	0.733
3C263.1	0.169	4.380	0.920	0.457	0.371	0.150	6.267	0.690	0.319	0.470
3c270.1	0.231	1.095	2.884	1.826	0.126					
3c273	0.099	4.615	1.570	0.433	0.228					
3c275	0.310	3.778	0.509	0.529	0.585					
3c286	0.363	3.395	0.470	0.589	0.615					
3c287	0.484	2.594	0.455	0.771	0.628					
3c293	0.106	5.354	1.241	0.374	0.284					
3c298	0.2614	2.7397	0.9576	0.730	0.358	0.270	2.963	1.3272	0.675	0.400
3c299	0.368	2.733	0.630	0.732	0.503					
3c324	0.118	2.919	2.102	0.685	0.172					

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Окончание

Источник	$m_{\max}$	$A$	$\theta$	$x$	$m_0$	$m_{\max}$	$A$	$\theta$	$x$	$m_0$
3с446	0.463	3.100	0.357	0.645	0.717	0.340	3.029	0.611	0.660	0.515
3с454	0.446	2.090	0.697	0.957	0.466	0.390	2.385	0.699	0.839	0.465
3с459	0.196	2.664	1.361	0.751	0.261	0.130	3.577	1.536	0.559	0.232
3с460	0.183	4.254	0.872	0.470	0.388	0.160	3.563	1.235	0.561	0.285
3с466	0.530	2.486	0.420	0.805	0.659	0.440	2.716	0.493	0.736	0.597
4С 14.41	0.470	3.870	0.168	0.517	0.909					
4с14.82	0.521	2.572	0.406	0.778	0.671	0.420	3.667	0.304	0.545	0.770
4с17.94	0.316	2.057	1.070	0.972	0.325	0.295	1.746	1.378	1.146	0.258
4с21.48	0.373	2.470	0.708	0.810	0.461					
4с21.53	0.143	7.617	0.564	0.263	0.546					
4с24.46	0.655	1.213	0.848	1.649	0.397					
4с25.03	0.310	3.387	0.594	0.590	0.526	0.230	4.130	0.680	0.484	0.475
4с28.57	0.387	3.497	0.399	0.572	0.677					
4с29.56	1.103	1.315	0.349	1.521	0.725					
4с29.63	0.085	3.754	2.280	0.533	0.159					
4с29.64	0.299	3.342	0.636	0.598	0.500					
4С29.69	0.382	2.550	0.659	0.784	0.486					
4с31.25	0.122	1.129	5.310	1.771	0.069	0.145	2.759	1.799	0.725	0.200
4с31.33	0.352	3.452	0.480	0.579	0.608	0.360	3.333	0.490	0.600	0.600
4с32.44	0.596	1.620	0.666	1.234	0.483					
4С33.21	0.452	1.934	0.756	1.034	0.437	0.430	3.128	0.404	0.639	0.672
4с34.09	0.230	1.619	1.935	1.235	0.186	0.220	2.318	1.392	0.863	0.255
4С36.13	0.288	3.046	0.754	0.657	0.438	0.260	3.654	0.680	0.547	0.475
4с37.24	0.480	3.551	0.225	0.563	0.852	0.420	4.143	0.208	0.483	0.870
OE 131	0.490	1.478	0.946	1.353	0.362	0.440	2.580	0.533	0.775	0.567
OF 247	0.574	1.990	0.528	1.005	0.571	0.525	2.581	0.399	0.775	0.678
OQ323	0.185	1.565	2.517	1.278	0.144					
СТА21	0.619	2.215	0.390	0.903	0.686	0.580	2.224	0.435	0.899	0.645
СТА102	0.726	0.712	1.373	2.810	0.258	0.570	1.684	0.671	1.188	0.480
4с12.50	0.528	1.882	0.642	1.063	0.497					

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Т. В. Смирнова и В. И. Шишов, Письма в Астрон. журн. **15**, 443 (1989).
2. A. Hewish, P. F. Scott, and D. Wills, Nature **203**, 1214 (1964).
3. M. Marians, Radio Science **10**, 115 (1975).
4. В. И. Шишов и Т. Д. Шишова, Астрон. журн. **55**, 411 (1978).
5. В. И. Шишов и Т. Д. Шишова, Астрон. журн. **56**, 613 (1979).
6. G. Bourgois and C. Creynet, Astron. and Astrophys. **21**, 25 (1972).
7. В. И. Шишов, Т. В. Смирнова и С. А. Тюльбашев, Астрон. журн. **82**, 281 (2005).
8. А. В. Глянецев, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей и В. И. Шишов, Астрон. журн. **90**, 557 (2013).

9. В. С. Артюх, Труды ФИАН **189**, 223 (1988).
10. M. M. Bisi, A. R. Breen, B. V. Jackson, R. A. Fallows, A. P. Walsh et al., *Solar Physics* **265**, 49 (2010).
11. В. И. Шишов, И. В. Чашей, В. В. Орешко и др., *Астрон. журн.* **93**, 1045 (2016).
12. В. С. Артюх и В. И. Шишов, *Астрон. журн.* **62**, 542 (1982).
13. В. С. Артюх и С. А. Тюльбашев, *Астрон. журн.* **73**, 661 (1996).
14. I. V. Chashei, V. I. Shishov, S. A. Tyul'bashev, et al., *Solar Physics* **290**, 2577 (2015).
15. В. С. Артюх и Т. В. Смирнова, *Письма в Астрон. журн.* **15**, 797 (1989).
16. В. И. Шишов и С. А. Тюльбашев, В. С. Артюх и др., *Астрон. вестник* **39**, 375 (2005).
17. R. P. Mercier, *Proc. Cambridge Philos. Soc.* **58**, 382 (1962).
18. В. И. Татарский *Распространение волн в турбулентной атмосфере* (М.: Наука, 1967).
19. A. Purvis, S. J. Tappin, W. G. Rees, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **229**, 589 (1987).
20. I. V. Chashei, S. A. Tyul'bashev, V. I. Shishov, and I. A. Subaev, *Space Weather* **14**, 682, (2016).
21. P. Janardhan and S. K. Alurkar, *Astron. and Astrophys.* **269**, 119 (1993).
22. В. С. Артюх, С. А. Тюльбашев и П. А. Черников, *Астрон. журн.* **76**, 3 (1999).
23. С. К. Глубокова, С. А. Тюльбашев, И. В. Чашей и В. И. Шишов, *Астрон. журн.* **90**, 639 (2013).
24. S. K. Glubokova, I. V. Chashei, and S. A. Tyul'bashev, *Advances in Astron. and Space Physics* **2**, 164 (2012).