

Использование фазовых динамических кросс-спектров для широкополосных радиоастрономических наблюдений: опыт применения на радиотелескопе УТР-2

В. Л. Колядин

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: vkoliadin@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 2 июня 2011 г.

В радиоастрономии при обработке результатов наблюдений широко используют динамические спектры, которые характеризуют распределение суммарной мощности принимаемого излучения по времени и частоте. В статье описана методика обработки наблюдений, которая расширяет возможности такого частотно-временного анализа за счет привлечения информации о разности фаз между сигналами субантенн, сформированных в пределах антенной системы радиотелескопа. Фазовые динамические спектры – зависимость фазы взаимного спектра двух сигналов от времени и частоты – формируют путем интерферометрической обработки и затем используют совместно с традиционными динамическими спектрами мощности. Такая методика реализована на радиотелескопе УТР-2, где используется на протяжении нескольких лет для визуального обнаружения излучения, отбраковки мешающих сигналов, принимаемых по боковым лепесткам, а также для различения источников всплесков, наблюдаемых в пределах главного луча. Наличие двух пар антенн с неколлинеарными базами позволяет определять направления прихода излучения в каждой точке плоскости время–частота. Возможности методики применительно к различным типам излучения проиллюстрированы примерами обработки данных наблюдений Солнца, Сатурна и вспыхивающих звезд.

Ключевые слова: радиоастрономия, радиотелескопы, фазовый спектр, динамический спектр, обработка сигналов, радиоинтерферометрия

1. Введение

Многие явления, изучаемые в радиоастрономии, характеризуются быстрым изменением параметров принимаемого шумового излучения. При наблюдении такого рода нестационарных явлений, или “транзиентов”, в достаточно широкой полосе частот часто используют динамические спектры (ДС) мощности, которые представляет собой сглаженную спектрограмму [1, 2] сигнала и характеризуют распределение его мощности по времени и частоте. Такие спектры анализируют в первую очередь визуально для выявления специфических особенностей конкретных явлений (см., например, [3, 4]). Процесс выделения на ДС представляющих интерес событий является трудоемким этапом

обработки, особенно при высоком временном разрешении. Поэтому его упрощение и ускорение представляет значительный практический интерес.

ДС мощности обычно формируют для суммарного сигнала от всей антенной системы, чтобы увеличить отношение мощности полезного сигнала к мощности шума, фона и мешающих сигналов. Однако ДС мощности имеют принципиальный недостаток – в них практически отсутствует информация о направлении прихода излучения. Известно, что такая информация может быть получена путем взаимной корреляционной обработки сигналов, принятых разнесенными в пространстве антеннами, что широко используется в радиоинтерферомет-

рии [5, 6]. Поэтому, если пожертвовать частью эффективной площади радиотелескопа и разбить его антенную систему на пары субантенн, то наряду с ДС мощности можно оценить и комплексный динамический кросс-спектр (или “взаимный спектр”) – зависимость комплексной корреляции двух сигналов от времени и частоты. Зависимость фазы такого кросс-спектра от времени и частоты, далее именуемая “фазовым ДС”, содержит информацию о направлении прихода сигнала.

Дополнение традиционных ДС мощности фазовыми ДС и их совместный анализ позволяют рассчитывать на извлечение дополнительной информации о направлении прихода излучения из результатов наблюдений. При использовании двух пар субантенн с неколлинеарными базовыми линиями появляется возможность количественного оценивания обеих угловых координат в каждой точке плоскости время–частота. Заметим, что здесь и далее предполагается, что сигналы имеют характер широкополосных всплесков, которые разнесены во времени, т. е. проблема разрешения одновременно принимаемых сигналов не рассматривается.

Методика наблюдений, основанная на этой идее, была реализована автором на радиотелескопе УТР-2. Практическая ценность такого подхода изначально была неочевидна. Как показал анализ публикаций, фазовые ДС редко используются в радиоастрономии, и автору удалось найти лишь одну работу [7] в области радиоинтерферометрии, где использовались фазовые ДС. Поэтому реальная область практической применимости методики стала более понятной лишь по мере накопления практического опыта обработки результатов реальных наблюдений.

Первоначально методика была применена в 2008 г. при поиске спорадического излучения вспыхивающей звезды EV Lacertae для различения искомым и мешающих событий. Здесь под искомыми понимаются события с направлением прихода, близким к направлению наведения радиотелескопа, а под мешающими – с существенно отличающимся. При обработке наблюдений было замечено, что фазовый ДС эффективен и в случае визуального обнаружения искомым событий на плоскости время–частота. С тех пор методика используется при

наблюдениях на УТР-2 при исследованиях спорадического излучения различных объектов. Наряду с обнаружением излучения и отбраковкой мешающих событий методика применяется для быстрого визуального различения полезных событий с разными угловыми координатами в пределах главного луча.

Цель статьи – описание методики и накопленного опыта по ее использованию, а также иллюстрация возможностей методики на примере обработки результатов реальных наблюдений Солнца, Сатурна и вспыхивающих звезд, которые представляют качественно различные типы спорадического радиоизлучения.

2. Основная идея и базовые соотношения

Разобьем апертуру радиотелескопа на две пары субантенн таким образом, чтобы базовые линии, соединяющие фазовые центры субантенн каждой пары, были неколлинеарны, а лучше – ортогональны. Для максимизации чувствительности желательно, чтобы площадь каждой субантенны составляла половину полной площади антенной системы радиотелескопа. Субантенны разных пар могут пересекаться. Например, первая пара субантенн может быть образована северной и южной половинами полной антенной системы, вторая – западной и восточной. Поскольку обработка для каждой пары субантенн проводится независимо, рассмотрим процедуру первичной обработки лишь для одной пары.

Для формирования комплексного динамического кросс-спектра воспользуемся традиционной FX-схемой [6, 8], когда отсчеты сигналов сначала подвергаются дискретному фурье-преобразованию, затем комплексные амплитуды для каждого частотного канала перемножаются, а полученные произведения усредняются во времени. Такая обработка может быть реализована, например, путем формирования усредненных периодограмм:

$$\dot{R}_{12}(f, t) = \frac{1}{K} \sum_{k=-K/2}^{K/2} \dot{S}_1(f, t + \delta t \cdot k) \dot{S}_2^*(f, t + \delta t \cdot k), \quad (1)$$

где $\dot{S}_1(f, t)$ и $\dot{S}_2(f, t)$ – комплексные дискретные фурье-спектры сигналов 1-й и 2-й субантенн, сформированные на подынтервале длительностью δt с центром t ; * – знак комплексного сопряжения; f – центральная частота одного частотного канала шириной $\Delta f = 1/\delta t$, t – дискретное время с шагом $\Delta t = K\delta t$; K – количество усредненных спектров. Значения Δt и Δf определяют размер одного элемента разрешения по времени и частоте соответственно. Заметим, что значения $\dot{S}(f, t)$ для конкретной дискретной частоты f можно рассматривать как отсчеты комплексной огибающей $\dot{S}_f(t)$ узкополосной компоненты с центральной частотой f , а процедуру (1) – как формирование взаимной корреляции таких огибающих путем усреднения во времени. На практике в процедуре (1) для уменьшения взаимного влияния близких частотных каналов используют временные окна, а для снижения избыточной дисперсии оценки, вызванной умножением сигнала на функцию окна, используют перекрытие подынтервалов ([9], с. 194). Заметим также, что комплексный динамический кросс-спектр $\dot{R}_{12}(f, t)$ можно получить и согласно XF-схеме, т. е. сначала оценить взаимную корреляционную функцию сигналов двух субантенн во всей полосе частот, а затем вычислить ее фурье-образ [6]. Амплитуду и фазу комплексного кросс-спектра $\dot{R}_{12}(f, t)$ будем называть ДС взаимной мощности и фазовым ДС соответственно.

Сигнал, приходящий из дальней зоны антенной системы радиотелескопа, принимается двумя субантеннами с относительной задержкой $\Delta\tau_{12}$, определяемой следующим простым соотношением [6]:

$$\Delta\tau_{12} = \frac{\vec{D}_{12} \cdot \vec{\Theta}}{c}, \quad (2)$$

где \vec{D}_{12} – пространственный вектор, соединяющий фазовые центры антенн 1 и 2; $\vec{\Theta}$ – единичный вектор в направлении прихода; c – скорость света. Относительная задержка $\Delta\tau_{12}$ проявляется в значении фазы комплексного кросс-спектра следующим образом:

$$\Phi_{12}(f) = 2\pi f \Delta\tau_{12}, \quad (3)$$

т. е. значение фазы линейно зависит от частоты, а крутизна этой зависимости пропорциональна относительной задержке $\Delta\tau_{12}$; при нулевой задержке значение фазы равно нулю во всем диапазоне частот.

Заметим, что направление прихода $\vec{\Theta}$ в (3) и, следовательно, относительная задержка $\Delta\tau_{12}$ в общем случае зависят как от времени, так и от частоты. Например, положение “центра тяжести” солнечных всплесков III типа характеризуется удалением от поверхности Солнца и одновременным смещением по частоте вниз по мере развития этого типа событий во времени. Другой причиной зависимости направления прихода от частоты выступают различные эффекты распространения в среде с дисперсией, например, в ионосферной или межпланетной плазме.

Визуальный анализ и интерпретация фазового ДС существенно упрощается, если скомпенсировать фазовый сдвиг, соответствующий направлению наведения радиотелескопа. Для этого достаточно умножить значения комплексного кросс-спектра $\dot{R}_{12}(f, t)$, сформированные согласно процедуре (1), на фазовый множитель $\exp(-i\Phi_0(f))$, где $\Phi_0(f)$ – значение фазы, рассчитанное из соотношений (2) и (3) для заданного направления наведения радиотелескопа $\vec{\Theta}_0$. В этом случае излучение, приходящее с заданного направления, проявляется на фазовом ДС в виде однородных областей со значением фазы, близким к нулю во всем диапазоне частот. Отклонение от заданного направления проявляется в виде линейной зависимости фазы от частоты. Если сигнал отсутствует, то значения фазы распределены случайно по элементам фазового ДС, т. е. изображение имеет хаотичную структуру. Этот простой качественный критерий визуального обнаружения и различия событий на фазовых ДС далее будем называть “фазовым критерием”.

При необходимости с помощью фазового ДС можно выполнить и количественные угловые измерения для каждой точки плоскости время–частота. По наблюдаемому значению фазы Φ_{12} из соотношений (3) и (2) непосредственно вычисляется косинус угла θ между вектором \vec{D}_{12} базовой линии и вектором $\vec{\Theta}$. При использовании двух баз, т. е. двух неколлинеарных векторов \vec{D} , можно определить направление прихода $\vec{\Theta}$. Для этого две оси декартовой системы

координат, относительно которых определяются углы, удобно расположить в той же плоскости, что и векторы двух базовых линий. Это приводит к системе двух линейных уравнений относительно направляющих косинусов – компонент вектора Θ .

Заметим, что измерение углового положения в рамках данной статьи рассматривается лишь в пределах главного лепестка диаграммы направленности, т. е. в малом диапазоне углов. Поэтому проблема неоднозначности измерения фазы, вызванная ее цикличностью, здесь не возникает. Малость диапазона измеряемых углов θ позволяет также линеаризовать основные соотношения и рассматривать лишь малые отклонения фазы $\Delta\Phi$ и угла $\Delta\theta$ относительно их значений, соответствующих направлению наведения радиотелескопа. В этом случае $\Delta\Phi$ линейно зависит от $\Delta\theta$, а коэффициент пропорциональности определяется следующим соотношением:

$$S = \frac{d\Phi}{d\theta} = 2\pi \frac{d_{12}f}{c} \sin \theta_0, \quad (4)$$

где d_{12} – длина вектора базовой линии, θ_0 – угол между направлением наведения радиотелескопа и вектором базовой линии. Ошибка угловых измерений в этом случае будет пропорциональна ошибке измерения фазы с коэффициентом пропорциональности $1/S$. Поэтому при достаточно малом значении ошибки измерения фазы и/или достаточно большом значении S ошибка измерения угла может быть существенно меньше ширины диаграммы направленности радиотелескопа.

3. Вопросы практической реализации

Наиболее просто данная методика реализуется на радиотелескопах, ориентированных на апертурный синтез и построение радиоизображений. Такие радиотелескопы используют N антенных элементов – небольших антенных решеток или антенн с механическим сканированием, а первичными данными являются значения $\{\dot{r}_{ij}(f, t), i, j = 1, \dots, N\}$ комплексной межэлементной кросс-корреляции для каждого частотно-временного элемента разрешения

(f, t) [6, 10, 11]. В этом случае комплексный кросс-спектр $\dot{R}_{12}(f, t)$, определяемый выражением (1), может быть просто рассчитан из первичных данных $\{\dot{r}_{ij}(f, t)\}$ для произвольного разбиения всей антенной системы из N элементов на пару субантенн.

Для радиотелескопов, не использующих межэлементную корреляционную обработку, требуется формирование сигналов субантенн и их взаимная корреляционная обработка согласно процедуре (1) или эквивалентной.

Если обработки в реальном масштабе времени не требуется, то одним из вариантов реализации такого подхода является предварительная запись пар сигналов субантенн с их последующей обработкой на основе программной реализации процедуры (1). Однако такой подход проблематично реализовать на практике даже при умеренной ширине полосы сигналов в несколько десятков мегагерц из-за технических ограничений на максимальную скорость записи на жесткие диски.

Поэтому наиболее приемлемым подходом является реализация процедуры (1) в реальном масштабе времени и запись уже усредненных спектров, что позволяет снизить скорость записи данных и их объем до K раз по сравнению с записью самих сигналов. Поскольку архитектура универсальных компьютеров мало приспособлена к обработке данных в реальном масштабе времени, гораздо эффективнее использовать специализированные устройства. Такие устройства – спектральные корреляторы – используются в радиолокации и радиоастрономии сравнительно давно [12-14]. В настоящее время перспективными являются спектральные корреляторы, реализованные на основе FPGA-технологии [13, 14].

4. Геометрия антенн, аппаратура и методы

Дальнейшее изложение проиллюстрировано результатами радиоастрономических наблюдений, выполненных на крупнейшем в мире радиотелескопе УТР-2, который работает в диапазоне декаметровых волн. Радиотелескоп реализован на базе антенных решеток с широкополосной системой фазирования на основе кабельных линий задержки [15]. Диапазон ра-

бочих частот – $8 \div 32$ МГц. Геометрия антенной системы показана на рис. 1. Каждое из трех плеч телескопа – “Запад”, “Север”, “Юг” – состоит из 4 секций размером 225×55 м каждая. Все секции фазируются в заданном направлении во всей рабочей полосе частот. Общая площадь всех 12 секций – около 0.15 км^2 . Для реализации обсуждаемой методики важно, что сигналы от каждой из 12 секций доступны для отдельной обработки, т. е. легко можно сформировать различные субантенны путем суммирования сигналов секций. На рис. 1 показаны некоторые варианты разбиения апертуры радиотелескопа на субантенны и построения локальных интерферометров, включая пары интерферометров с ортогональными базовыми линиями.

Регистрация принимаемых сигналов осуществлялась с использованием цифровых спектральных корреляторов DSPZ, реализованных на основе FPGA-технологии [13, 14]. Такие корреляторы обеспечивают формирование динамического комплексного кросс-спектра $\hat{R}_{12}(f, t)$ пары входных сигналов, а также динамических спектров мощностей $P_1(f, t)$ и $P_2(f, t)$ сигнала

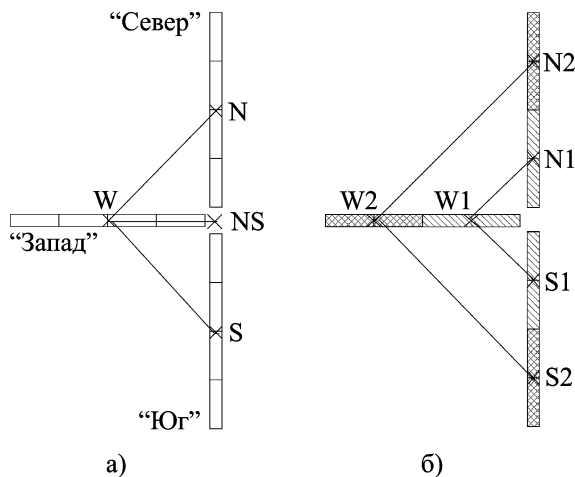


Рис. 1. Геометрия антенной системы радиотелескопа УТР-2 (показаны субантенны, их фазовые центры и базовые линии возможных интерферометров): а) – плечи радиотелескопа “Запад”, “Север”, “Юг”, их фазовые центры – W , N , S соответственно, фазовый центр полной антенны “Север–Юг” – NS ; б) – укороченные субантенны из двух секций каждая, фазовые центры ближних к центру субантенн – $W1$, $N1$, $S1$, дальних – $W2$, $N2$, $S2$

лов 1 и 2, реализуя процедуру вида (1) на основе скользящего быстрого преобразования Фурье с использованием временных окон с половинным перекрытием интервалов.

Штатный диапазон частот – $0 \div 33$ МГц при 8192 отсчетах спектра, частота дискретизации – 66 МГц. Частотное разрешение, т. е. ширина полосы одного частотного канала, составляет $\Delta f = 4$ кГц, временное разрешение – $\Delta t = 0.001 \div 0.1$ с, что соответствует усреднению $K = 8 \div 806$ спектров Фурье в соотношении (1).

Для описанных ниже наблюдений использовалась верхняя половина рабочего диапазона частот DSPZ, т. е. $16.5 \div 33.0$ МГц и, соответственно, 4096 частотных каналов. Это обусловлено плохой помеховой обстановкой на частотах ниже 16 МГц. Использовалось временное разрешение $\Delta t = 0.1$ с, что соответствует усреднению $K = 806$ спектров в процедуре (1). Регистрация данных проводилась с помощью штатной программы управления анализаторами DSPZ. Обработка и визуализация результатов наблюдений осуществлялась с использованием программных средств собственной разработки автора.

5. Примеры применения методики

5.1. Характерные фазовые спектры

При визуальном анализе фазовых ДС необходимо различать три основных типа ситуаций: а) сигнала нет; б) сигнал есть, но является мешающим, т. е. приходит с направления, существенно отличающегося от направления наведения радиотелескопа; в) сигнал есть и приходит с направления, близкого к направлению наведения радиотелескопа. Ниже приведены характерные фазовые ДС, соответствующие этим трем ситуациям.

На рис. 2 показаны фазовые ДС длительностью 2 мин (слева) и их сечения вдоль оси частот (справа). Моменты времени, соответствующие этим сечениям, показаны на фазовых ДС вертикальной линией, которая проходит через середину отображаемого временного интервала. При интерпретации этих спектров следует учитывать, что для сигналов, приходящих с направления наведения радиотелескопа, разность времен прихода в сере-

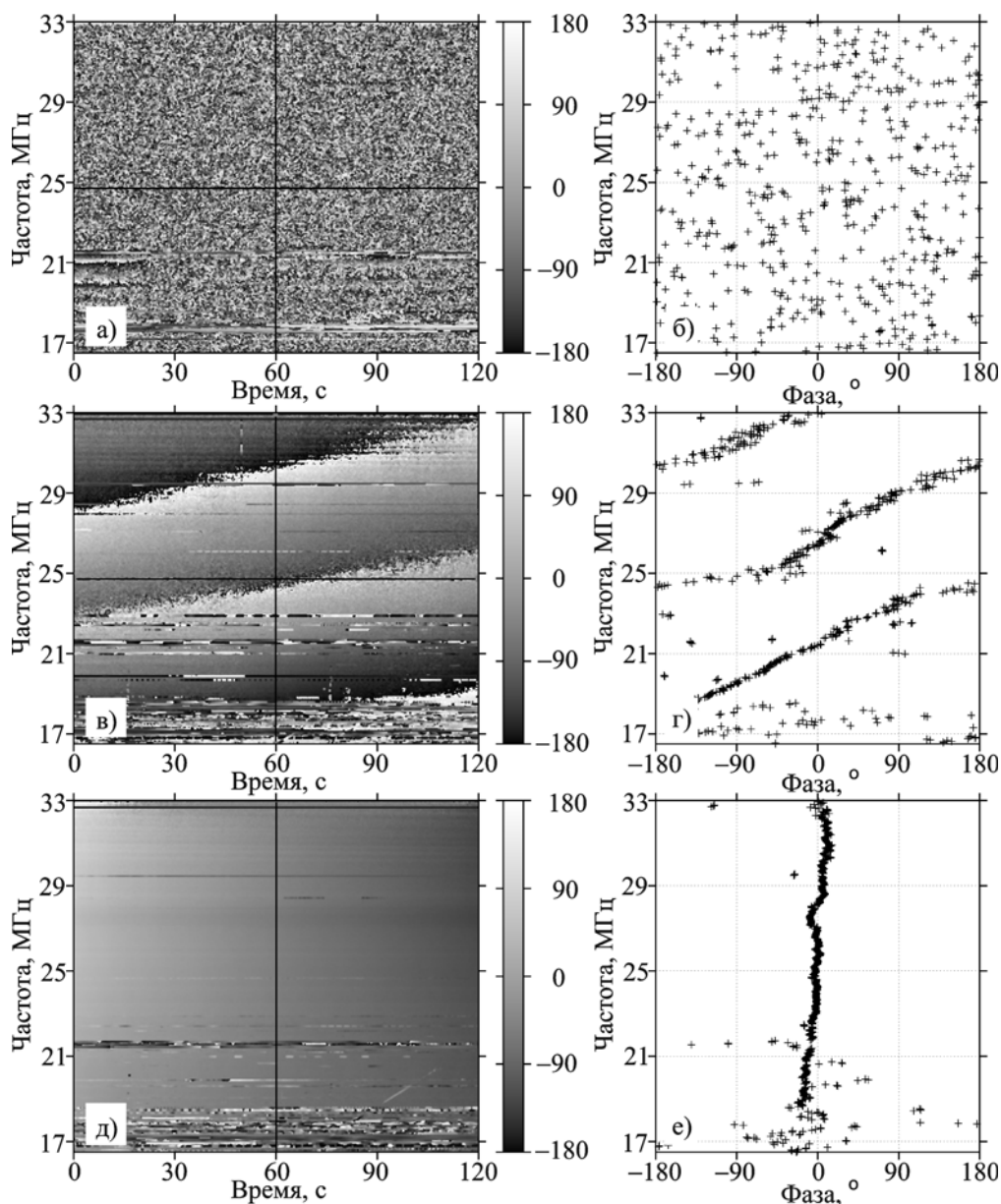


Рис. 2. Характерные фазовые ДС (слева) и их сечения (справа): а), б) – сигнал отсутствует; в), г) – источник 3C144 наблюдается по боковым лепесткам диаграммы направленности, отклонение от источника в центре интервала порядка 3° ; д), е) – источник 3C144 находится в луче радиотелескопа, центр временного интервала соответствует точному наведению на источник. Время наблюдения 3C144 – 24.03.2010 г. 14:45 UT. Шкала серого цвета отображает значения фазы в градусах

дине показанных интервалов скомпенсирована самим радиотелескопом, и поэтому для таких сигналов ожидается нулевое значение фазы во всем диапазоне частот.

Верхние панели на рис. 2 соответствуют случаю отсутствия полезного сигнала, когда антенна отключена и на вход спектрального коррелятора поступают лишь шумы аппаратуры; средние и нижние панели соответствуют

наблюдению сравнительно интенсивного источника 3C144. При наблюдениях 3C144 луч радиотелескопа был фиксирован относительно Земли и перемещался по небесной сфере только за счет ее вращения. Средние панели (рис. 2, в, г) соответствуют значительному отклонению луча радиотелескопа от направления на источник, т. е. приему по боковым лепесткам диаграммы направленности запад-

ной антенны. Нижние панели (рис. 2, д, е) соответствуют направлению на источник (луч радиотелескопа проходит через источник в середине временного интервала).

Заметим, что временные изменения структуры фазовых ДС обусловлены изменением углового положения источника относительно радиотелескопа из-за вращения Земли. Если бы такого изменения не было, то полосы на рис. 2, в были бы строго горизонтальны, а на рис. 2, д не было бы изменения яркости со временем.

Сравнение верхних, средних и нижних панелей рис. 2 иллюстрирует три основных типа ситуаций, различимых по фазовому критерию визуального обнаружения искомым событий:

- сигнал отсутствует – фазовый ДС выглядит хаотично, как на рис. 2, а и рис. 2, б;
- сигнал присутствует, но приходит с направления, существенно отличающегося от направления наведения радиотелескопа, – фазовый ДС линейно изменяется с частотой и из-за цикличности фазы имеет вид полос, как на рис. 2, в и рис. 2, г;
- сигнал присутствует и приходит с направления наведения радиотелескопа – фазовый ДС не зависит от частоты, как на рис. 2, д и рис. 2, е.

5.2. Наблюдения спорадического излучения Солнца

Спорадическое радиоизлучение Солнца отличается морфологически богатыми динамическими спектрами. Как правило, на плоскости время–частота наблюдаются разнообразные по форме, размерам и интенсивности структуры или “события”. Большинство типов событий, или “всплесков”, проявляются в широкой полосе частот и характеризуются частотным дрейфом – зависимостью времен начала и окончания события от частоты. Источники спорадического излучения находятся в области солнечной короны, угловой размер которой для анализируемого диапазона частот превышает 2° , а угловые размеры источника отдельного события существенно меньше. Поэтому представляет практический интерес различение отдельных событий по угловому положению их источников в короне. Здесь возникает также необходимость в отбраковке ложных событий, порожденных мешающими сигналами с существенно отличающимся направлением прихода.

На рис. 3 приведены ДС взаимной мощности и фазовые ДС, полученные по описанной выше методике при наблюдении Солнца на двух парах субантенн с ортогональными базовыми линиями. ДС взаимной мощности для обеих баз (рис. 3, а и рис. 3, в) практически совпадают, а фазовые ДС заметно различаются: на фазовом ДС на рис. 3, б значение фазы изменяется в пределах отображаемой время–частотной области существенно меньше, чем на фазовом ДС на рис. 3, г. Это различие объясняется тем, что угол между первой базой и направлением на Солнце был существенно меньше такого угла для второй базы. Из-за малого значения множителя $\sin \theta_0$ в соотношении (4) коэффициент пропорциональности S был также меньше. Поэтому отклонение углового положения источника от направления наведения радиотелескопа Θ_0 приводило к меньшему отклонению фазы от ее значения, соответствующего Θ_0 .

В начале интервала наблюдения на ДС взаимной мощности видны близкие по времени события $E1$ и $E2$. Каждое из них представляет собой почти вертикальную узкую область, заполненную небольшими светлыми пятнами. Затем следуют события $E3$ и $E4$ существенно большей длительности и с более равномерным распределением мощности по частоте. За ними следует событие $E5$ – почти вертикальная узкая область, заполненная небольшими светлыми пятнами. События $E1$ – $E5$ занимают почти весь диапазон анализируемых частот и характеризуются некоторым отрицательным частотным дрейфом, т. е. с понижением частоты событие начинается позже. Заметим, что на рис. 3 можно выделить и другие события, которые здесь не анализируются.

Анализ фазовых ДС на рис. 3 позволяет обнаружить особенности, которые не видны на ДС взаимной мощности. Прежде всего, из фазовых ДС видно, что большая часть показанной время–частотной области соответствует излучению солнечной короны, т. е. направлению прихода излучения близко к направлению наведения радиотелескопа (центр Солнца). Об этом свидетельствует отсутствие заметного изменения фазы с частотой на обоих фазовых ДС, подобно характерным спектрам на рис. 2, д. Исключение составляет область верхних частот, где поведение фазового ДС хаотично, подобно характерному ДС на рис. 2, а.

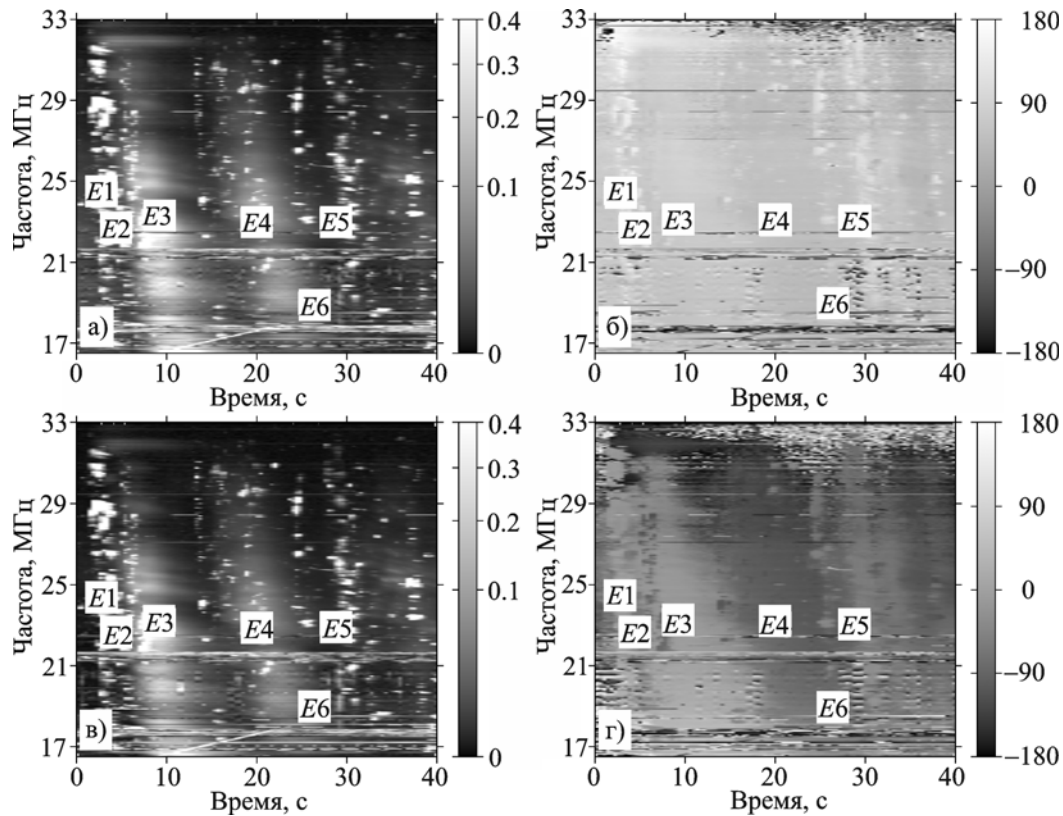


Рис. 3. ДС взаимной мощности (слева) и фазовые ДС (справа), полученные при наблюдении солнечной короны с использованием взаимно ортогональных баз $W2-N2$ (а) и (б) и $W2-S2$ (в) и (г). Отмечены события $E1-E5$, источники которых находятся в солнечной короне, занимающие почти весь диапазон частот, а также событие $E6$, вызванное мешающим сигналом в нижней трети диапазона. Время наблюдения – 28.03.2010 г. 11:37 UT. Шкала серого цвета возле ДС слева отображает значения взаимной мощности в относительных единицах, справа – значения фазы в градусах

Из-за спада амплитудно-частотной характеристики радиотелескопа в этой области доминируют аппаратные шумы.

Другое исключение составляет область события $E6$, заполненная горизонтальными полосами, как на фазовом ДС на рис. 2, в, но с существенно более быстрым изменением фазы с частотой. Это свидетельствует о наличии мешающего излучения, направление прихода которого значительно отличается от направления на центр Солнца. Пара других подобных событий также видна на фазовом ДС в нижней трети частотного диапазона. Заметим, что на ДС взаимной мощности события $E5$ и $E6$ практически неразличимы, и событие $E6$ выглядит как часть события $E5$. Хорошая различимость событий $E5$ и $E6$ на фазовом ДС иллюстрирует возможности методики по отбраковке событий, наблюдаемым по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны.

Визуальный анализ событий $E1$ и $E2$ на фазовых ДС обнаруживает различие в значении фазы кросс-спектра (элементы $E2$ темнее), т. е. различие в угловом положении их источников. Легко обнаруживается также тот факт, что события $E3$ и $E4$ существенно различаются по угловому положению, а события $E1$ и $E3$ не различаются. События $E1$ и $E3$, скорее всего, имеют один и тот же источник и представляют собой солнечный всплеск III–IIIb типа. Всплески этого типа встречаются достаточно часто; они образованы всплеском IIIb типа ($E1$), за которым следует всплеск III типа ($E3$). Событие $E2$, похожее на всплеск IIIb типа, хотя и расположено между событиями $E1$ и $E3$, имеет другой источник в короне. Из ДС взаимной мощности на рис. 3 извлечь такую информацию не представляется возможным. Этот пример иллюстрирует возможность методики по различению событий, наблюдаемых в главном

лепестке диаграммы направленности и имеющих близкие угловые координаты.

Приведем количественный пример оценивания углов прихода по фазовому ДС для событий $E3$ и $E4$. Компенсация изменения значений фазы за счет вращения Земли на интервале времени между двумя событиями и решение системы двух линейных уравнений, полученных из соотношений (2) и (3), позволили определить векторы направлений $\vec{\Theta}_{E3}$ и $\vec{\Theta}_{E4}$ для этих двух событий. Для частоты 25 МГц, например, значение угла между этими направлениями составляло порядка $10'$, что существенно меньше ширины диаграммы направленности.

Важно отметить, что ошибка угловых измерений и минимальное угловое расстояние между источниками событий, различимое по фазовым ДС, могут быть существенно меньше, чем ширина диаграммы направленности радиотелескопа. Например, для УТР-2 на частоте 25 МГц ширина диаграммы направленности порядка $30'$, а уровень флуктуаций фазы порядка 10° и меньше даже при средней помеховой обстановке. Погрешность измерения угла в S раз меньше фазовой ошибки (S определяется соотношением (4)). Для показанных на рис. 1 баз УТР-2 значения этого коэффициента лежат в пределах $S = 200 \div 400$. Поэтому для фазовой ошибки 10° погрешность определения угла составляет $1.5' \div 3'$, что как минимум на порядок меньше ширины диаграммы направленности.

5.3. Наблюдение спорадического излучения Сатурна

Спорадическое излучение Сатурна порождено электростатическими разрядами на этой планете (SED – Saturn Electrostatic Discharges) и существенно отличается от солнечного. На ДС мощности оно проявляется в виде коротких широкополосных всплесков без заметного частотного дрейфа, т. е. имеет вид вертикальных линий. Хотя космические аппараты (КА) регистрируют сигналы SED уже на протяжении 30 лет, их регистрация наземными средствами была впервые осуществлена лишь в 2006 г. на УТР-2 [16]. Основной проблемой при наземной регистрации является различение сигналов SED и мешающих сигналов наземного происхождения от молниевых разрядов и широкополосных помех. В работе [17] такое различение было выполнено статистическими методами посредством взаимной корре-

ляционной обработки времен наблюдения событий на УТР-2 и КА “Кассини”, находящемся на орбите Сатурна. Представляет самостоятельный интерес развитие методов обнаружения индивидуальных сатурнианских событий по одним лишь наземным наблюдениям, без привлечения данных КА на орбите Сатурна [17].

Использование фазовых ДС в предлагаемой методике позволило повысить надежность различения SED и сходных мешающих сигналов наземного происхождения при наблюдениях на УТР-2, особенно при одновременном использовании двух ортогональных базовых линий. Возможность такого различения обусловлена тем, что направления прихода сигналов наземных разрядов и помех существенно отличаются от направления на Сатурн.

На рис. 4 показан ДС взаимной мощности, на котором видны два слабых события: $E1$ – сигнал SED, и $E2$ – сигнал земной молнии, – а также два сечения фазового ДС вдоль оси частот для моментов времени, соответствующих этим событиям. На сечениях фазового ДС события уверенно различаются: для сатурнианского события $E1$ (см. рис. 4, б) значения фазы распределены в окрестности нуля в значительной части диапазона анализируемых частот, а для наземного $E2$ (рис. 4, в) – быстро изменяются с частотой, проходя более десятка полных циклов. Заметим, что сатурнианское происхождение событий подтверждалось независимыми методами, например, анализом двух каналов OFF (лучей 1 и 5 антенны “Север–Юг”, отклоненных от направления на Сатурн на -1° и 1°), в которых проявляются лишь мешающие сигналы, а также временным соответствием наблюдаемых событий интервалу, на котором излучающая область на Сатурне (сатурнианский шторм) видна с Земли.

Фазовые ДС позволяют не только различать искомые и мешающие события, но и непосредственно обнаруживать такие события даже в тех ситуациях, когда надежное обнаружение по ДС мощности проблематично. На рис. 5 показаны сечения ДС взаимной мощности и фазового ДС для трех последовательных элементов разрешения по времени: перед событием SED (рис. 5, а, б), во время события (рис. 5, в, г) и после него (рис. 5, д, е). Визуальное обнаружение события по фазовому спектру не представляет трудностей, по ДС взаимной мощности сделать это проблематично.

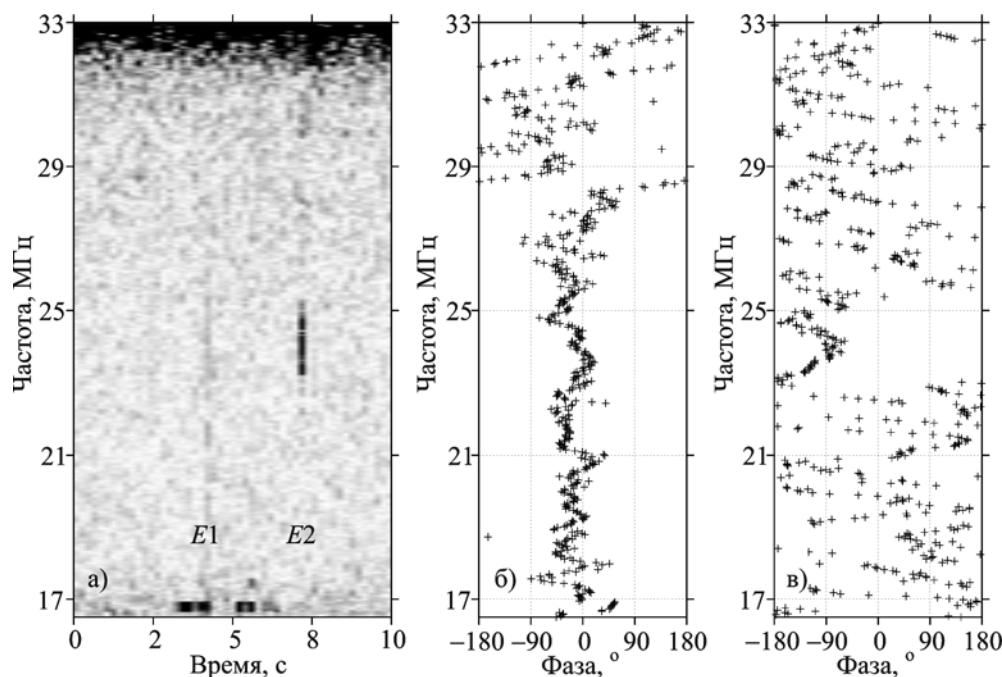


Рис. 4. Наблюдения SED – электростатических разрядов на Сатурне. На ДС взаимной мощности (а) видны событие SED (E1) и сигнал земной молнии (E2) в виде узких вертикальных линий. Сечения фазового ДС вдоль оси частот для события E1 показаны на панели (б), для события E2 – на панели (в). Фазовые спектры позволяют отличить искомое событие E1 от мешающего события E2. Время наблюдения – 03.03.2010 г. 00:34:20 UT

Здесь следует пояснить, почему вместо качественного фазового критерия нельзя воспользоваться строгими статистическими критериями обнаружения, которые хорошо развиты в радиолокации и основаны на сравнении мощности сигнала с пороговым значением. Основной проблемой является невозможность определить тот фоновый уровень взаимной или суммарной мощности, который соответствует отсутствию сигнала, и на его основе выбрать порог обнаружения. Из-за вклада многих дискретных источников, не разрешаемых радиотелескопом и проходящих через его диаграмму направленности, ДС мощности в отсутствие полезного сигнала имеет вид хаотически распределенных пятен, интенсивность и форма которых априорно не предсказуемы. Именно этот эффект, известный в радиоастрономии как эффект “спутывания” (англ. confusion), а не шум аппаратуры или галактический фон, выступает в качестве основного фактора, ограничивающего чувствительность большинства радиотелескопов. Поэтому на практике приходится использовать визуальное обнаружение событий на ДС.

5.4. Поиск слабого спорадического излучения

Описанная методика была изначально разработана автором для наблюдений, которые проводились в рамках исследовательской программы, ориентированной на поиск спорадического радиоизлучения вспыхивающих звезд AD Leonis и EV Lacertae на радиотелескопе УТР-2. С 2008 г. наблюдения по этой программе проводятся с использованием описанной выше методики, а фазовый критерий обнаружения искомых событий используется в качестве одного из основных.

В отличие от описанных выше наблюдений Сатурна ожидаемые события могут иметь существенно большую длительность – до 30 с, значительный частотный дрейф любого знака, а в отличие от солнечных всплесков – существенно меньшую интенсивность. Поиск спорадического излучения вспыхивающих звезд проводится на пределе чувствительности радиотелескопа. Поэтому используется полная антенна “Север–Юг” и, следовательно, одна база W–NS (см. рис. 1, а).

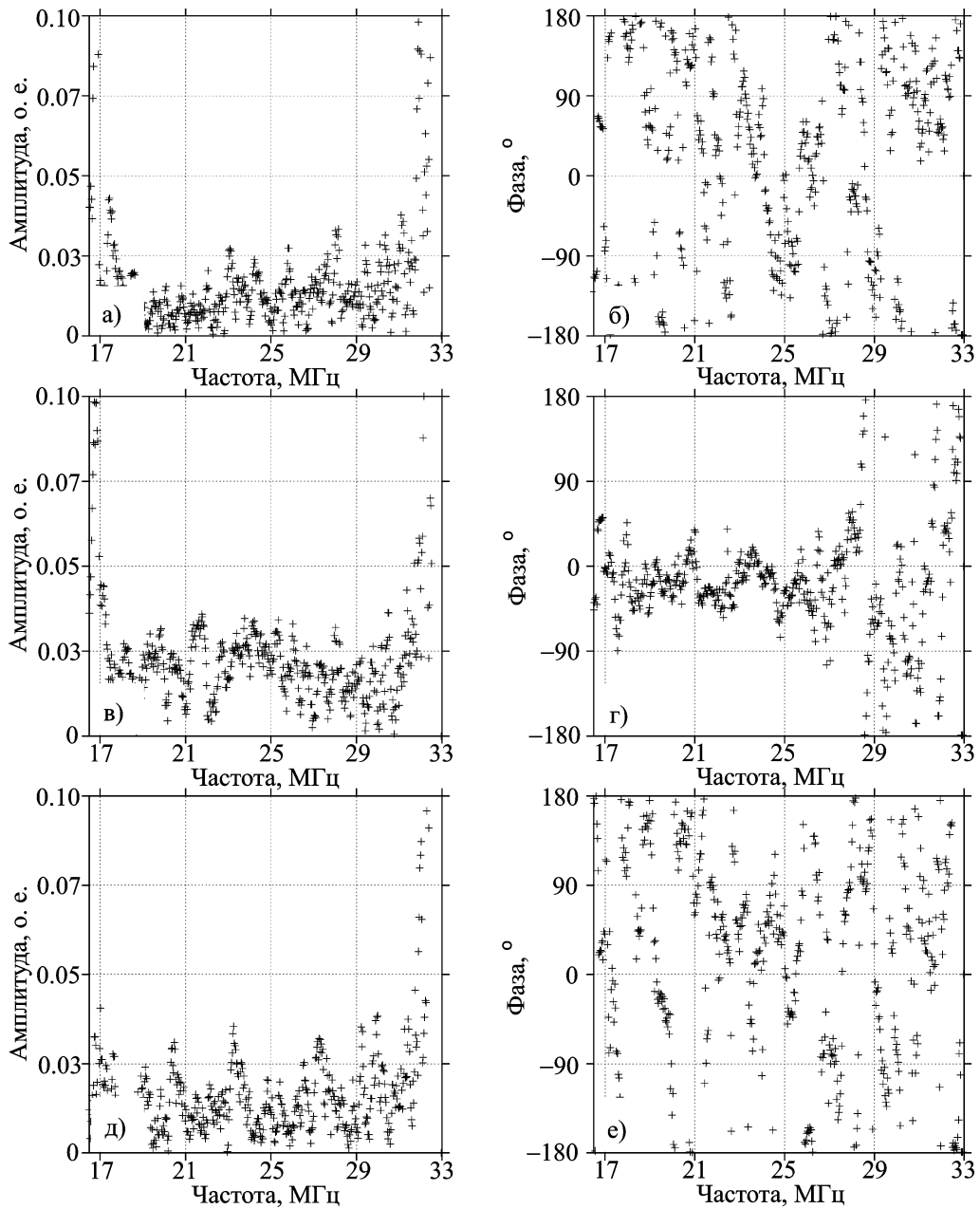


Рис. 5. Сравнение возможности визуального обнаружения коротких событий на ДС взаимной мощности (слева) и фазовых ДС (справа). Показаны сечения динамических спектров вдоль оси частот. Приведены сечения до (а) и (б), после (д) и (е) и во время наблюдения (в) и (г) события SED

Для отбраковки ложных событий (сигналов с других направлений) наряду с фазовым критерием применяется критерий ON-OFF. Для этого наряду с основным лучом, направленным на звезду (канал ON), используются два дополнительных луча, отклоненных от звезды на 1° в противоположных направлениях (каналы OFF). Искомые события должны наблюдаться

только в канале ON, но ни в одном из каналов OFF. Сигналы же от земных молний и широкополосных помех, приходящие по боковым лепесткам, обычно проявляются как в ON, так и в OFF каналах.

На рис. 6, а, б показаны фазовые ДС, соответствующие каналам ON и OFF. Наблюдаются два события – E1 и E2, которые обнаружи-

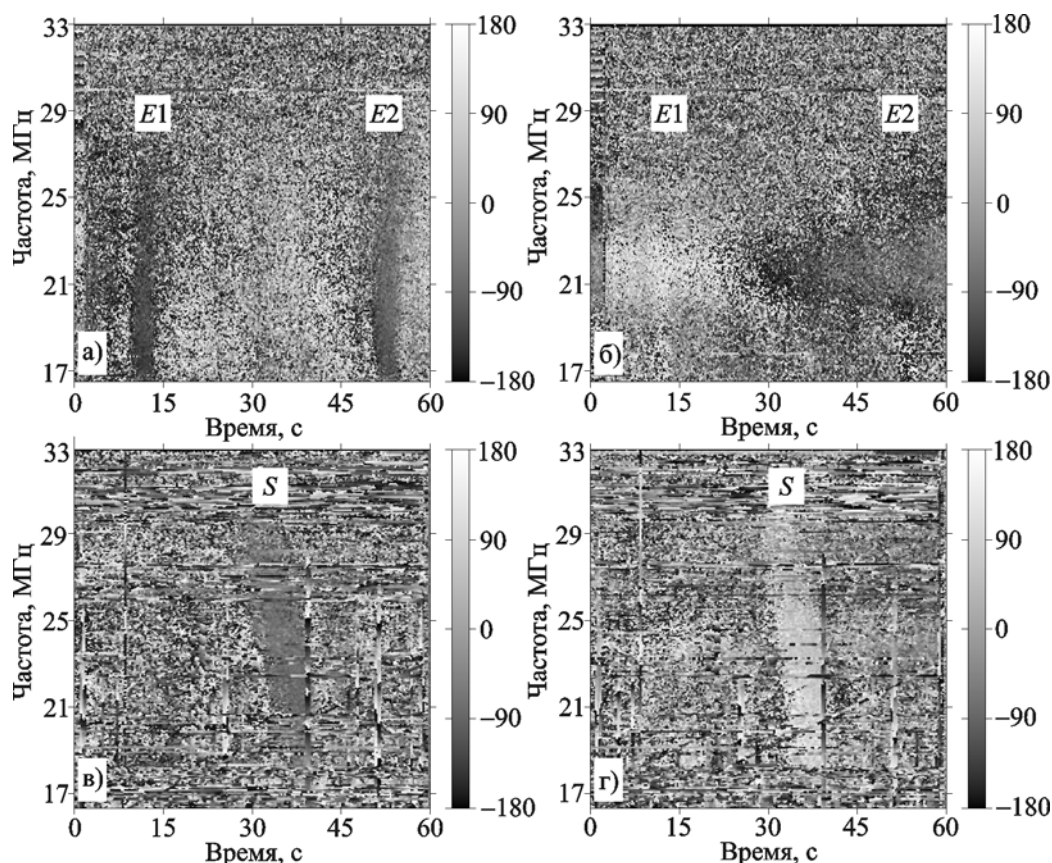


Рис. 6. Визуальное обнаружение слабого спорадического излучения по фазовым ДС. Панели а) и б) – наблюдение вспыхивающей звезды *AD Leonis* на базе *W-NS* (см. рис. 1): показаны фазовые ДС каналов *ON* (а) и *OFF* (б); в канале *ON* наблюдаются события *E1* и *E2*, которые не видны в канале *OFF*; время наблюдения 04.03.2010 г. 19:16 UT. Панели в) и г) – наблюдение Сатурна на ортогональных базах *W-N* (в) и *W-S* (г): событие *S* обнаруживается визуально на фазовых ДС для обеих баз; время наблюдения – 20.05.2010 г. 19:07 UT. Шкала серого цвета отображает значения фазы в градусах

ваются визуально в канале *ON* в виде однородно окрашенных областей без заметной зависимости фазы от частоты. Они имеют форму почти вертикальных полос в диапазоне частот 17 ÷ 26 МГц и длительность порядка нескольких секунд. В канале *OFF* эти участки плоскости время–частота не выделяются, что также свидетельствует в пользу их классификации как искомым событий.

Данная методика применяется также для экспериментального поиска новых видов спорадического излучения. Например, на рис. 6, в, г показаны фазовые ДС, полученные автором при наведении УТР-2 на Сатурн с использованием двух ортогональных баз – *W-N* и *W-S* (см. рис. 1, а). На обеих базах наблюдается событие, обозначенное на рис. 6 как *S*. Оно

имеет вид всплеска и занимает значительную часть частотного диапазона. Событие легко обнаруживается визуально на обоих фазовых ДС: в соответствующей событию время–частотной области значение фазы почти постоянно и потому событие выделяется зрительно на более хаотичном фоне. Такое поведение фазы для обеих баз свидетельствует о близости направления прихода излучения к направлению наведения радиотелескопа, т. е. на Сатурн.

5.5. Быстрое обнаружение источников стационарного излучения

В ходе испытания методики было замечено, что она полезна не только для анализа нестационарного излучения, но и при наблюдении стационарных источников, например, когда тре-

буется решить, наведен ли радиотелескоп на источник или нет. Традиционно эта задача решалась путем достаточно длительного сканирования, при котором направление наведения радиотелескопа фиксировано относительно Земли, а луч перемещается по небесной сфере за счет ее вращения. Изменение мощности выходного сигнала в процессе прохождения источника через диаграмму направленности радиотелескопа повторяет ее форму, что и является основным критерием обнаружения дискретного источника. Однако для такого анализа требуется не менее 10÷20 мин.

Сечения фазового ДС формируются за доли секунды и позволяют решить ту же задачу – обнаружить источник и убедиться в том, что нет заметных отклонений в наведении радиотелескопа. Визуализация сечений фазового ДС, выполняемая штатной программой управления DSPZ, позволяет принимать такие решения в реальном масштабе времени. Вид фазовых спектров для трех случаев – отсутствия источника в ДН, заметного отклонения и точного наведения – соответствует спектрам на рис. 2 (справа), которые легко различаются визуально.

6. Заключение

В статье рассмотрена возможность использования фазовых динамических спектров для анализа спорадического излучения в радиоастрономии. Предложенная методика основана на разбиении антенной системы радиотелескопа на субантенны и оценивании комплексного кросс-спектра их сигналов путем корреляционных интерферометрических измерений. Основная идея заключается в использовании фазовых динамических спектров, т. е. зависимости фазы комплексного кросс-спектра от времени и частоты, в дополнение к динамическим спектрам мощности.

Показано, что полученные таким путем фазовые динамические спектры могут быть использованы для визуального обнаружения спорадического излучения и различения источников всплесков по направлению прихода, а также для количественного оценивания их угловых координат. Работоспособность методики проиллюстрирована примерами обработки результатов наблюдений различных типов спорадического излучения на радиотелескопе УТР-2.

Автор выражает признательность рецензенту за детальный критический анализ и рекомендации, которые позволили существенно переработать структуру и текст статьи, А. А. Коноваленко за постоянное внимание к работе, обсуждение текущих результатов и консультации по особенностям радиотелескопа УТР-2, Н. Н. Калиниченко за консультативную помощь автору в его первых самостоятельных наблюдениях на УТР-2 в марте–апреле 2009 г., А. А. Станиславскому за конструктивную критику и обсуждение работы, а также всем участникам семинара отдела низкочастотной радиоастрономии РИ НАНУ за обсуждение работы и полезные замечания.

Литература

1. Cohen L. Time-Frequency Distributions - A Review // Proc. IEEE. – 1989. – Vol. 77, No. 7. – P. 941-981.
2. Бендат Д., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
3. Мельник В. Н. Исследования радиоизлучения Солнца в радиоастрономическом институте НАН Украины // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, специальный выпуск. – С. S54-S73.
4. Рябов Б. П. Спорадическое радиоизлучение Юпитера. Мультимасштабные динамические спектры // Радиофизика и радиоастрономия. – 2001. – Т. 6, №1. – С. 103-130.
5. Краус Д. Радиоастрономия. – М.: Сов. радио, 1973. – 456 с.
6. Томпсон А., Моран Д., Свенсон Д. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 624 с.
7. Desai K. M., Gwinn C. R., Reynolds J., King E. A., Jauncey D., Flanagan C., Nicolson G., Preston R. A., and Jones D. L. A speckle hologram of the interstellar plasma // Astrophys. J. – 1992. – Vol. 393, No. 2. – P. L75-L78.
8. Bunton J. SKA correlator advances // Exp. Astron. – 1992. – Vol. 17, No. 1-3. – P. 251-259.
9. Марпл-мл С. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
10. Very Long Baseline Interferometry and the VLBA // ASP Conf. Ser. – 1995. – Vol. 82.
11. Van der Schaaf K., Broekema C., Diepen G., and Meijeren E. The LOFAR central processing facility architecture // Exp. Astron. – 1992. – Vol. 17, No. 1-3. – P. 43-58.
12. Lecacheux A., Rosolen C., Clerc V., Kleewein P., Rucker H. O., Boudjahada M., and VanDriel W. Digital techniques for ground-based low frequency radioastronomy // Proc. SPIE. – 1998. – Vol. 3357. – P. 533-542.
13. Kozhin R. V., Vynogradov V. V., and Vavriv D. M. Low-noise, high dynamic range digital receiver/spectrome-

- ter for radio astronomy applications // Proc. MSMW'07 Symp. – Kharkiv (Ukraine). – 2007. – P. 736-738.
14. Ryabov V. B., Vavriv D. M., Zarka P., Ryabov B. P., Kozhin R. V., Vinogradov V. V. and Denis L. A low-noise, high-dynamic-range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz // Astron. Astrophys. – 2010. – Vol. 510, No. A16 – P. 1-13.
15. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // Антенны. – М.: Связь, 1978. – Вып. 26. – С. 3-14.
16. Konvalenko A. A., Lecacheux A., Rucker H. O., Fischer G., Abranin E. P., Kalinichenko N. N., Falkovich I. S., and Sidorchuk K. M. Ground-based decameter wavelength observations of Saturn electrostatic discharges // Geophys. Res. Abst. – 2007. – Vol. 9, No. 04792.
17. Захаренко В. В., Милостная К. Ю., Фишер Г., Коноваленко А. А., Зарка Ф., Гриссмейер Ж.-М., Рябов Б. П., Ваврив Д. М., Рябов В. Б., Рукер Х., Равье П., Сидорчук М. А., Цекони Б., Коффи А., Дени Л., Фабрис К., Кожин Р. В., Муха Д. В., Палье Л., Шнейдер И., Шевченко В. А., Виноградов В. В., Вебер Р., Николаенко В. С. Идентификация молний на Сатурне, зарегистрированных радиотелескопом УТР-2 и космическим аппаратом “Кассини” // Радиофизика и радиоастрономия. – 2010. – Т. 15, №4. – С. 361-368.

Використання фазових динамічних крос-спектрів для широкосмугових радіоастрономічних спостережень: досвід застосування на радіотелескопі УТР-2

В. Л. Колядин

У радіоастрономії при обробці результатів спостережень широко використовують динамічні спектри, які характеризують розподіл сумарної потужності прийнятого випромінювання за часом і частотою. У статті описана методика обробки спостережень, яка збагачує можливості такого частотно-часового аналізу за рахунок залучення інформації про різниці фаз між сигналами субантен, сформованих в межах антенної системи радіотелескопа. Фазові динамічні спектри – залежність фази взаємного спектра двох сигналів від часу і частоти – формують шляхом інтерферометричної обробки, а потім використовують разом з традиційними динамічними спектрами потужності. Така

методика реалізована на радіотелескопі УТР-2, де використовується впродовж декількох років для візуального виявлення випромінювання, відбракування заважаючих сигналів, прийнятих бічними пелюстками, а також для розрізнення джерел сплесків, що спостерігаються в межах головного променя. Наявність двох пар антен з неколінеарними базами дозволяє виміряти напрямок приходу випромінювання в кожній точці площини час–частота. Можливості методики стосовно різних типів випромінювання проілюстровано прикладами обробки даних спостережень Сонця, Сатурна та спалахуючих зірок.

Using Phase Dynamic Cross-Spectra for Wideband Radio Astronomy Observations: Experience from the UTR-2 Radio Telescope

V. L. Koliadin

Dynamic spectra characterize the distribution of the total power of the received signal over time and frequency. They are widely used in radio astronomy in analysis of observations. The paper describes a method that expands capabilities of such a time-frequency analysis via utilization of the phase difference between signals from two sub-antennas which are formed within the entire radio telescope antenna system. Phase dynamic spectra – the phase of the cross-spectrum of two signals as function of time and frequency – are formed by interferometric processing. Then, they are used for analysis together with the traditional dynamic spectra of power. This technique was implemented at the UTR-2 radio telescope. It has been used there for several years for visual detection of radio emission, for recognition of the interfering signals arriving from the antenna side lobes, as well as for differentiation of radio bursts observed within the main beam. If two pairs of antennas with non-collinear baselines are available, then the direction of arrival can be measured at each point of the time–frequency domain from the two phase dynamic spectra. The efficiency of this technique is illustrated by its application to qualitatively different types of sporadic radio emission – namely, the emission of the Sun, Saturn, and flare stars.