

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА НА ДЕКАМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

*Предложен комплекс аппаратуры для определения угловых характеристик источников, связанных с солнечным радиоизлучением на декаметровых волнах. Метод измерений основан на интерферометрическом подходе с использованием секционной структуры радиотелескопа УТР-2. Описана простая методика наблюдений и обработки данных, не требующая калибровок антенны. Проведены наблюдения спокойного Солнца и всплесков его спорадической активности, позволившие определить как угловые размеры источников, так и их взаимное положение.*

*Ключевые слова:* интерферометр, угловой размер, Солнце, всплески III типа

### 1. Введение

Солнечное радиоизлучение интенсивно исследуется много лет с помощью как наземных, так и космических радиотелескопов. Наиболее часто в наблюдениях определяются временные и спектральные характеристики излучения и гораздо реже его угловая структура. В то же время пространственные характеристики излучения как спокойного Солнца, так и его спорадического компонента весьма важны для построения моделей физических процессов, происходящих в солнечной короне. Особенно мало таких исследований проведено в декаметровом диапазоне – на самых длинных волнах, допускающих проведение наблюдений с поверхности Земли.

Угловой размер объекта можно определить с помощью радиотелескопа с остронаправленной антенной. При сканировании лучом антенны на выходе радиотелескопа получают изображение в виде свертки распределения яркости наблюдаемого радиоисточника с диаграммой направленности антенны. Антенное сглаживание приводит к тому, что ширина измеренного отклика становится больше истинных размеров источника. Для определения истинного размера объекта ширина луча радиотелескопа должна быть существенно меньше угловых размеров источника. Ширина диаграммы направленности радиотелескопа УТР-2 на частоте 25 МГц составляет 25'. Для сравнения: измерения на УТР-2, проведенные в 1976–1977 гг. [1], показали, что угловой диаметр спокойного Солнца на декаметровых волнах приблизительно равен 1° на частоте 25 МГц и увеличивается с понижением

частоты [2], а угловые размеры источников, связанных со всплесками спорадического излучения различного типа на этой частоте, составляют около 20' [3]. Очевидно, что угловые размеры исследуемых объектов в этом случае сравнимы с шириной диаграммы направленности телескопа и для определения истинных размеров источников солнечного излучения методом сканирования нужно учитывать эффект сглаживания.

Антенна радиотелескопа УТР-2, как и другие антенны-решетки, применяемые в низкочастотной радиоастрономии, имеет существенный уровень боковых лепестков. При этом радиометры корреляционного типа, используемые для устранения влияния галактического фона, приводят к знакопеременному характеру этих лепестков. Двумерная картина боковых лепестков такой антенны сложна и заметно изменяется в зависимости от ориентации луча телескопа, что затрудняет учет антенного сглаживания. Так, например, модельный расчет [1] показал, что при малом диаметре источника ширина одномерного скана УТР-2 на частоте 25 МГц, как и следовало ожидать, больше истинного размера объекта, однако при увеличении диаметра до 1°, что соответствует размеру спокойного Солнца на этой частоте, влияние боковых лепестков приводит к тому, что ширина отклика становится меньше истинного размера.

Исследование угловой структуры солнечных всплесков затрудняется их кратковременностью, поэтому требуется применение многолучевых антенн или быстрое сканирование источника лучом телескопа. Для УТР-2 разработан солнечный гелиограф, где используются оба принципа. Сигналы пяти ножевых лучей, сформированных

антенной Север–Юг (С–Ю), перемножаются с сигналом антенны Запад–Восток (З–В), образуя пятёрку карандашных лучей, которые быстро перемещаются в пространстве с помощью фазовращателя, включенного на выходе второй антенны [4]. Таким параллельно-последовательным способом формируется матрица лучей, покрывающая исследуемый объект. Очевидно, что распределение боковых лепестков отдельных лучей такой матрицы не идентично, что дополнительно затрудняет учет антенного сглаживания.

Альтернативным методом сканирования, где размеры источника определяются по ширине отклика, является интерферометрический подход, в котором угловые размеры объекта при заданной длине базы интерферометра находят по амплитуде отклика калиброванного интерферометра. Такие эксперименты в декаметровом диапазоне были проведены, например, в 1975 г. с помощью шести интерферометров с базами от 19 до 1240 м [5]. Антеннами этих интерферометров служили полуволновые вибраторы, что обусловило невысокую чувствительность инструментов, позволившую, однако, наблюдать мощные солнечные всплески.

Очевидной проблемой солнечной радиоастрономии декаметрового диапазона является высокий уровень искусственных помех, характерный для наблюдений, проводимых в дневное время. Это вынуждает применять узкие полосы пропускания в приемной аппаратуре, что дополнительно ограничивает чувствительность.

В статье описан интерферометрический комплекс, предназначенный для определения угловой структуры источников солнечного радиоизлучения. Комплекс создан на основе оборудования сети интерферометров УРАН и использует принципы обработки сигнала, применяющиеся в этой сети [6]. В качестве антенн интерферометров используются отдельные секции радиотелескопа УТР-2. Определены возможности этого комплекса по измерению угловых размеров радиоисточников, предложена методика обработки сигналов, упрощающая калибровку инструмента, приведены результаты первых наблюдений.

## 2. Структура и параметры интерферометрического комплекса

Антенные решетки С–Ю и З–В радиотелескопа УТР-2 состоят из отдельных секций, которые управляются одновременно. Каждая из восьми сек-

ций антенны С–Ю содержит 180 вибраторов, скомпонованных в шесть рядов, вытянутых вдоль направления север–юг, по 30 вибраторов в каждом. Антенна З–В состоит из четырех секций по 150 вибраторов в каждой, образующих шесть рядов, вытянутых в направлении запад–восток, в каждом из которых 25 вибраторов. Благодаря разному расстоянию между вибраторами в направлениях север–юг и запад–восток секции обеих антенн разнесены на одинаковое\* расстояние 225 м. Секции каждой решетки имеют одинаковую схему распределенного усиления и фазирования. Сигналы с их выходов поступают на последний этаж фазирования радиотелескопа, который формирует суммарные диаграммы направленности решеток, однако выходные сигналы каждой секции также доступны для использования [7].

Приемно-регистрирующее устройство, используемое в интерферометрах УРАН, имеет четыре независимых канала с полосой регистрации сигналов в каждом из них 250 кГц [6]. После предварительной фильтрации, усиления и преобразования частоты в аналоговой части приемника и аналогово-цифрового преобразования сигналы поступают в компьютер, где осуществляется их цифровая фильтрация и регистрация. Одной из задач цифровой фильтрации является автоматическое подавление узкополосных помех искусственного происхождения в режиме реального времени, причем разрешающая способность фильтра составляет около 100 Гц. Широкополосные помехи импульсного характера, например от грозных разрядов, устраняются при окончательной обработке полученных записей. Сохраненные на жестком диске сигналы могут быть обработаны в программном корреляторе с целью получения корреляционных функций для любой пары приемных каналов.

Сочетание секционной структуры антенны УТР-2 и многоканального приемника УРАН позволяет образовать несколько интерферометрических пар с длинами баз при приеме из зенитного направления от 225 до 675 м в направлении запад–восток и до 1575 м в направлении север–юг. Четыре части антенны З–В формально образуют шесть интерферометрических пар,

\*Здание обсерватории УТР-2 расположено между четвертой и пятой секциями антенны С–Ю, поэтому расстояние между ними на 52 м больше.

однако эквидистантное расположение секций позволяет иметь только три базы разной длины. Антенна С–Ю в сочетании с четырехканальным приемником позволяет получить одновременно шесть баз разной длины из семи возможных для восьми разнесенных на одинаковое расстояние секций.

Для формирования аппаратного комплекса солнечного интерферометра были использованы два четырехканальных приемника УРАН, что дает возможность проводить наблюдения одновременно на двух частотах декаметрового диапазона с помощью одной из решеток УТР-2 либо на одной частоте с помощью двух решеток. Для более удобного совместного использования двух приемников в них были объединены местные гетеродины, системы синхронизации и управления. Соответствующие изменения были сделаны и в программном обеспечении, осуществляющем регистрацию сигналов и их последующую обработку. Структурная схема такого восьмиканального комплекса аппаратуры и его подключение к секциям антенны С–Ю показаны на рис. 1 для двухчастотного режима наблюдений.

При таком подключении каналов приемника к секциям УТР-2 формируются шесть баз различной длины, кратной расстоянию между секциями, из семи возможных (исключая пятикратное расстояние), хотя возможны и другие схемы, реализующие иной набор баз. При проведении наблюдений с помощью антенны 3–В входы приемников подключаются ко всем секциям антенны, при этом реализуются все возможные базы для этой решетки.

Чтобы установить возможности таких интерферометров по определению размеров источников солнечного радиоизлучения, построим зависимости нормированной функции видности  $\gamma_n$  от длины базы интерферометра, рассчитанные для источника с гауссовым распределением яркости в соответствии с известным выражением

$$\gamma_n = \exp\left(-\left(\frac{\pi\theta L}{2\sqrt{\ln 2}\lambda}\right)^2\right), \quad (1)$$

где  $L$  – проекция базы интерферометра на плоскость источника,  $\theta$  – угловой диаметр источника по половинной яркости,  $\lambda$  – длина волны.

Видимое склонение Солнца изменяется по мере движения Земли по орбите, достигая максимума  $\approx 23.5^\circ$  в середине июня. В соответствии с этим меняется и проекция  $L$ , входящая в (1). Для интерферометров, расположенных вдоль параллели (антенна 3–В), проекция базы при пересечении источником местного меридиана кратна геометрическому разнесу секций 225 м и уменьшается не более чем на 15 % при смещении источника в пределах 2 часов от меридиана и до  $0^\circ$  по склонению. Для интерферометров, составленных из секций антенны С–Ю, проекция расстояния между соседними секциями на плоскость источника равна 200 м в июне и уменьшается в другие месяцы, однако возрастает при отклонении источника от меридиана. Расчетные зависимости  $\gamma_n$  на частоте 25 МГц от длины базы интерферометра и размера источника показаны на рис. 2. Значками на кривых отмечены длины баз ин-



Рис. 1. Структурная схема солнечного интерферометра

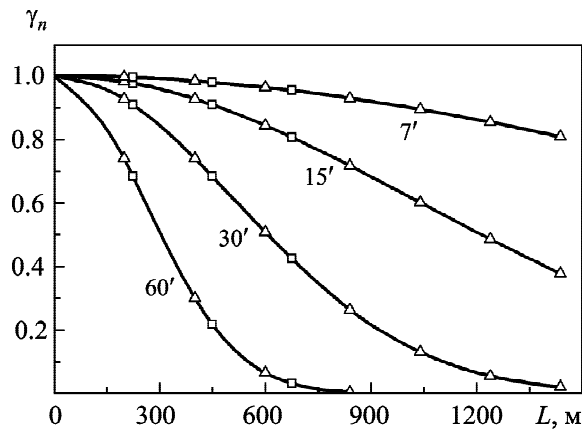


Рис. 2. Зависимость нормированной функции видности от углового размера (указан у кривых) источника и длины базы интерферометра на частоте 25 МГц. Отмечены длины баз интерферометров, образованных секциями антенны 3–В (квадраты) и С–Ю (треугольники)

терферометров, составленных из секций антенн С–Ю и 3–В, соответствующие моменту пересечения местного меридиана Солнцем при максимальном склонении. Наибольший размер источника на рисунке приблизительно равен угловому диаметру спокойного Солнца на частоте 25 МГц, а наименьший выбран таким, чтобы функция видности на наибольшей базе антенны С–Ю была на 20 % меньше ее значения на самой короткой базе. Очевидно, что угловой размер как протяженного, порядка  $1^\circ$ , так и достаточно компактного,  $7'$ , источника может быть надежно измерен с помощью такого инструмента.

Отметим, что при использовании метода сканирования источник с диаметром  $7'$  вызовет увеличение ширины диаграммы направленности радиотелескопа УТР-2 менее чем на 4 %.

Существенным является также тот факт, что секции решеток УТР-2 имеют достаточно широкую диаграмму направленности в направлении максимального размера антенны (более  $4^\circ$  по полю), которая мало искажает наблюдаемое распределение яркости Солнца. Влияние такой диаграммы приведет лишь к небольшому уменьшению измеряемой плотности потока спокойного Солнца и, как будет показано ниже, не отразится на точности определения угловых характеристик источников. Однако для устранения эффекта спутывания, вызываемого влиянием близких мощных радиоисточников, большая ширина диаграммы направленности должна учитываться при планировании наблюдений.

Таким образом, особенности конструкции антенны радиотелескопа УТР-2 в сочетании с возможностями приемно-регистрирующего комплекса интерферометров УРАН позволяют использовать интерферометрический метод для измерения угловых размеров как спокойного Солнца, так и источников, связанных со всплесками его спорадической активности, с диаметрами вплоть до нескольких угловых минут.

### 3. Методика обработки

Угловую структуру можно исследовать, сравнивая экспериментальную зависимость функции видности объекта от длины базы интерферометра  $\gamma(L)$  с модельным расчетом для источников с разным распределением яркости. Угловой размер однокомпонентного источника с известным законом распределения яркости можно определить по значению нормированной функции видности на одной базе. При гауссовом распределении яркости справедливо выражение (1), из которого может быть найден диаметр источника по половинной яркости:

$$\theta = \frac{2\lambda\sqrt{\ln 2}}{\pi L} \sqrt{-\ln \gamma_n}.$$

Нормированная величина  $\gamma_n = \gamma/\gamma_0$  определяется как отношение функции видности интерферометра на данной базе к функции видности, измеренной с помощью интерферометра с “нулевой” базой, на которой источник не разрешен. Заметим, что, измерив функцию видности на двух произвольных базах, можно определить угловой размер как

$$\theta = \frac{2\lambda\sqrt{\ln 2}}{\pi} \sqrt{\frac{\ln(\gamma_1/\gamma_2)}{(L_2^2 - L_1^2)}}, \quad (2)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – длины баз интерферометров,  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – измеренные на этих базах функции видности. Очевидно, что использование интерферометра с “нулевой” базой является частным случаем выражения (2).

При этом как применение выражения (2), так и анализ зависимостей  $\gamma(L)$  предполагают постоянство параметров интерферометра при изменении длины базы. При использовании неподвижных интерферометров параметры их антенных систем

должны быть тщательно прокалиброваны. Процедура калибровки интерферометров в декаметровом диапазоне достаточно сложна и для сети УРАН, использующей антенны с разной конструкцией и эффективной площадью, описана в [8]. Однако, если антеннами интерферометра являются секции телескопа УТР-2, обладающие близкими характеристиками в пределах каждой из его решеток, методика наблюдений может быть существенно упрощена.

Мощность сигнала на выходе каждого из каналов интерферометра (на входах коррелятора) определяется излучением исследуемого источника и галактическим фоном, а также собственными шумами приемного устройства. Считая, что последняя составляющая может быть измерена и вычтена из суммарного сигнала, можно записать

$$P_n = \iint_{\Omega} \eta K A(\theta, \varphi) D(\theta, \varphi) [B_s(\theta, \varphi) + B_b(\theta, \varphi)] d\Omega, \quad (3)$$

где  $P$  – спектральная мощность сигнала,  $\eta$  – КПД системы фазирования антенны,  $K$  – коэффициент передачи приемника,  $A$  – максимальное значение эффективной площади антенны в заданном направлении,  $D$  – нормированная диаграмма направленности по мощности,  $B_s$  и  $B_b$  – распределения яркости источника и галактического фона,  $\theta$  и  $\varphi$  – зенитный угол и угол места,  $d\Omega$  – элемент телесного угла. Отметим, что КПД  $\eta$  разных секций УТР-2 несколько различаются и могут дискретно изменяться от скана к скану из-за изменения потерь в системе взаимного фазирования секций, в которой используются кабели большой длины.

Первое слагаемое в (3) при интегрировании по телесному углу источника, как известно, сводится к произведению спектральной плотности потока излучения объекта  $S$  на коэффициент передачи телескопа в данном направлении:

$$P_s = \iint_{\Omega_s} \eta K A(\theta_s, \varphi_s) D(\theta_s, \varphi_s) B_s(\theta, \varphi) d\Omega = \eta K A(\theta_s, \varphi_s) D(\theta_s, \varphi_s) S, \quad (4)$$

где  $\theta_s$  и  $\varphi_s$  определяют направление на источник.

Во втором слагаемом интегрирование проводится по всей небесной сфере,

$$P_b = \eta K \iint_{4\pi} A(\theta, \varphi) D(\theta, \varphi) B_b(\theta, \varphi) d\Omega,$$

и при неоднородном фоне мощность принятого сигнала зависит от коэффициента направленного действия антенны. Однако, поскольку решетки секций УТР-2 имеют одинаковые направленные свойства, интеграл  $P = \iint_{4\pi} A(\theta, \varphi) D(\theta, \varphi) B_b(\theta, \varphi) d\Omega$ , равный мощности сигнала фона на выходе телескопа без учета КПД, одинаков для секций и

$$P_b = \eta K P. \quad (5)$$

Мощность сигнала на выходе коррелятора интерферометра, ковариация его входных напряжений  $P_c = \overline{U_1 U_2}$ , определяется сигналом (4), принятым антеннами от дискретного источника. При одинаковых свойствах направленности секций, образующих интерферометр,

$$P_c = \gamma_n S A(\theta_s, \varphi_s) D(\theta_s, \varphi_s) \sqrt{\eta_1 K_1 \eta_2 K_2}, \quad (6)$$

где нормированная функция видности  $\gamma_n$  определяется коэффициентом корреляции входных напряжений, наведенных дискретным источником, а индексы 1 и 2 относятся к двум каналам интерферометра.

Коэффициенты передачи используемых приемников достаточно стабильны и могут быть определены в процессе стандартной калибровки. Однако КПД антенного тракта  $\eta$  определить сложнее, он различен для разных секций и зависит от точности компенсации потерь в длинных кабелях линий задержки взаимного фазирования секций, следовательно может изменяться при смене ориентации луча. Для упрощения калибровки наблюдений можно определить коэффициент корреляции сигналов (3), принятых антеннами интерферометра:

$$R = \frac{P_c}{\sqrt{P_1 P_2}} = \frac{P_c}{\sqrt{(P_s + P_b)_1 (P_s + P_b)_2}}.$$

Используя (4), (5) и (6), а также учитывая одинаковость свойств направленности секций, запишем это выражение, опуская для краткости зависимость от  $\theta_s$  и  $\varphi_s$ ,

$$R = \frac{\gamma_n A D S \sqrt{\eta_1 K_1 \eta_2 K_2}}{\sqrt{(\eta_1 K_1 A D S + \eta_1 K_1 P)(\eta_2 K_2 A D S + \eta_2 K_2 P)}} = \frac{\gamma_n A D S}{A D S + P}. \quad (7)$$

Таким образом, коэффициент корреляции  $R$  пропорционален нормированной функции видности и не зависит не только от КПД антенн, но и от коэффициентов усиления приемников, поэтому может быть использован для построения экспериментальных зависимостей  $R(L) \sim \gamma_n(L)$ .

Время прохождения источника через диаграмму направленности секции составляет более 10 мин, следовательно для спорадических всплесков с длительностью несколько десятков секунд значение диаграммного множителя можно считать постоянным. Однако при наблюдениях континуального излучения Солнца необходимо учитывать изменение  $R$  за время десятиминутного скана из-за влияния  $D(\theta, \varphi)$ . В то же время отношение коэффициентов корреляции (7), полученных с помощью интерферометров с разными базами, составленными из секций УТР-2, не зависит от диаграммного множителя и равно отношению нормированных функций видности источника. Если зависимость  $\gamma(L)$  близка к расчетной кривой для источника с гауссовым распределением яркости, то это отношение может быть использовано для определения углового размера по формуле (2). В этом случае при наблюдениях спокойного Солнца можно определять его текущий размер, не производя корректировок на множитель диаграммы.

#### 4. Результаты наблюдений

Для экспериментальной проверки возможностей такого инструмента в течение четырех дней мая 2014 г. были проведены наблюдения радиоизлучения Солнца с использованием секций антенны З–В, а в последующие три дня с помощью интерферометров, образованных из решетки С–Ю. Выходные сигналы приемников оцифровывались и после цифровой фильтрации, обеспечивающей устранение узкополосных помех и ограничение полосы до 250 кГц, сохранялись в виде отсчетов с тактом 2 мкс. Одновременно производились определение и регистрация средней мощности входных сигналов в интервале 16 мс. Перемножение записанных сигналов производилось в программном корреляторе УРАН с накоплением выходных данных в течение тех же 16 мс. Выходной сигнал коррелятора вместе со средними мощностями сигналов использовался для определения

комплексного коэффициента корреляции  $R$  в этих интервалах.

С целью проверки принципов обработки сигналов и калибровки оборудования после каждого двух десятиминутных сканов Солнца регистрировался один скан радиоисточника ЗС144 (Крабовидная туманность). Этот радиоисточник на декаметровых волнах имеет поток излучения около 3000 Ян и достаточно компактен, чтобы не разрешаться интерферометрами, составленными из секций УТР-2. В период проведения наблюдений видимое склонение Солнца практически совпадало со склонением этого объекта, а разница координат по прямому восхождению составляла около одного часа.

На рис. 3 представлены два соседних скана, записанных 28 мая 2014 г. с помощью интерферометра, составленного из двух соседних секций антенны З–В. Здесь показана нормированная на мощность принятых сигналов зависимость от времени амплитуды выходного сигнала коррелятора интерферометра, т. е. временная зависимость коэффициента корреляции принятых антеннами сигналов  $R(t)$ , задаваемого выражением (7). Первый скан соответствует записи спокойного Солнца с отдельными всплесками спорадического излучения небольшого уровня, а второй получен при ориентации луча на источник ЗС144. Существенные флуктуации уровня сигналов последнего вызваны мерцаниями сигнала на неоднородностях электронной концентрации ионосферы. На скане, соответствующем приему радиоизлучения Солнца, такие мерцания подавлены ввиду большой протяженности источника. Отметим также изменение среднего уровня сигналов из-за влияния диаграммы направленности секции.

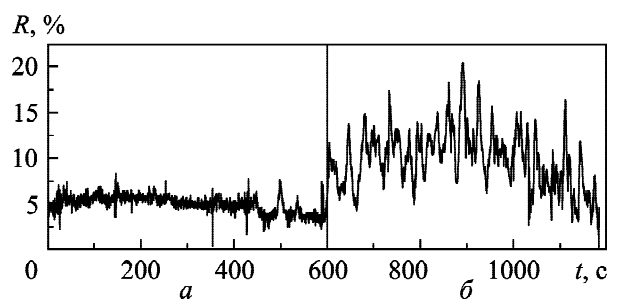


Рис. 3. Временная зависимость модуля коэффициента корреляции сигналов, принятых от Солнца (а) и от радиоисточника ЗС144 (б) на частоте 25 МГц, с помощью интерферометра с базой около 225 м

Как и следовало ожидать, наблюдения Крабовидной туманности показали независимость коэффициента корреляции принимаемых интерферометром сигналов от длины базы. Кроме проверки функционирования инструмента такие наблюдения были использованы для его амплитудной калибровки, поскольку плотность потока излучения ЗС144 на декаметровых волнах хорошо известна по результатам наблюдений на УТР-2 и УРАН. Так как Солнце и ЗС144 наблюдались при одних и тех же положениях луча антенны и, следовательно, одинаковых значениях КПД системы фазирования, потоки радиоизлучения от солнечных источников определялись сравнением с излучением этого калибровочного источника без дополнительных поправок.

Период проведения наблюдений соответствовал активной части солнечного цикла, тем не менее на ряде сканов не наблюдалось всплесков спорадического излучения. Такие наблюдения мы условно относим к излучению спокойного Солнца. Этот термин применяют к тепловой компоненте излучения и определяют ее поток обычно в минимуме солнечной активности, когда спорадическое нетепловое излучение практически отсутствует. В данных наблюдениях плотность потока излучения в различные дни наблюдений, определенная посредством сравнения с излучением Крабовидной туманности, изменялась от 1600 до 2350 Ян, что в  $1.8 \div 2.5$  раза превышает значения, соответствующие минимуму солнечной активности [1]. В то же время средний угловой диаметр по половинной яркости солнечной короны на частоте 25 МГц, определенный по нескольким сканам интерферометров, составленных из секций антенны 3–В, оказался приблизительно равен  $50'$  (экваториальное сечение Солнца), а с помощью решетки С–Ю –  $45'$  (полярное сечение), что хорошо согласуется с данными [1], полученными в период минимума солнечной активности. Для иллюстрации наблюдений радиоизлучения “спокойного Солнца” на рис. 4 (серия кривых 1) приведены модули коэффициента корреляции для трех баз интерферометров антенны 3–В. Сплошная кривая соответствует наименьшей базе, равной разному соседних секций, штриховая получена при удвоенной базе, а пунктирная – утроенной. На рисунке показаны аналогичные зависимости, полученные при наблюдении ЗС144 (серия кривых 2). Уменьшение коэффициента корреляции с увеличением длины базы,

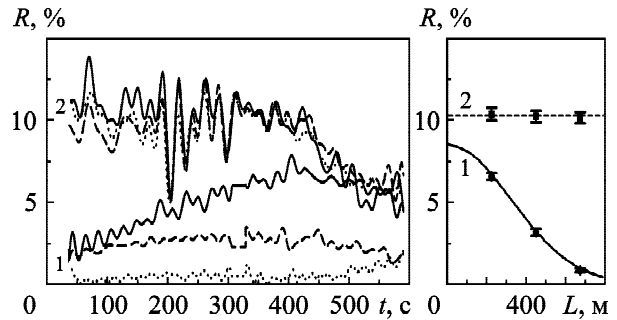
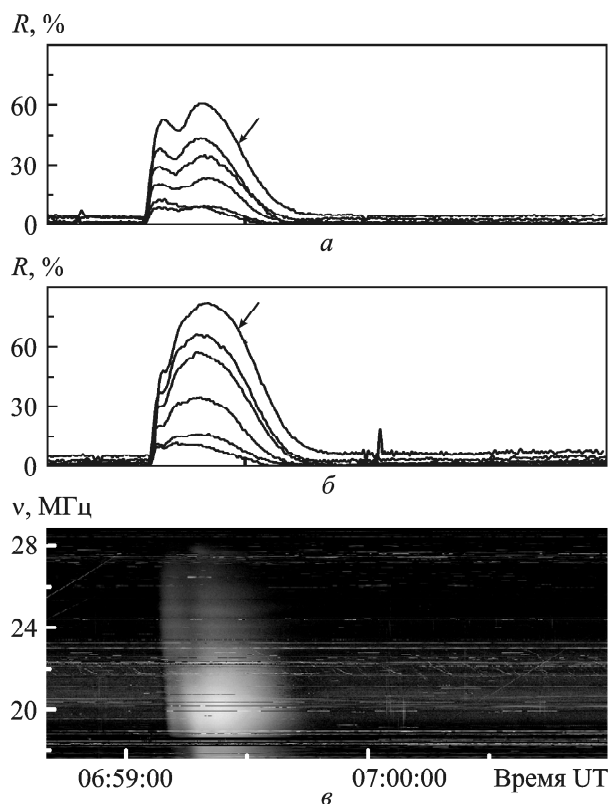


Рис. 4. Экспериментальные зависимости коэффициента корреляции от времени (слева) и длины базы (справа), полученные при наблюдении спокойного Солнца (1) и Крабовидной туманности (2) на интерферометрах антенны 3–В

очевидное для трех кривых 1, соответствует протяженному источнику – тепловой компоненте излучения Солнца, а для более компактной Крабовидной туманности экспериментальные зависимости, кривые 2, практически совпадают. Более наглядно это показано в правой части рисунка, где построена зависимость среднего за скан коэффициента корреляции от длины базы после устранения влияния диаграммы направленности на уровень принимаемого сигнала. Экспериментальные точки 2, полученные при наблюдении ЗС144, демонстрируют отсутствие зависимости, а измерения, связанные с Солнцем, (точки 1) хорошо совпадают с расчетной зависимостью для гауссова источника с угловым диаметром  $48'$ , показанной на правой панели сплошной кривой.

В описываемом эксперименте наблюдались также многочисленные случаи увеличения интенсивности принимаемого излучения, вызванного как широкополосными помехами земного происхождения, так и солнечными явлениями. Для того чтобы отличать всплески спорадического излучения Солнца от помех в данных наблюдениях, одновременно проводилась регистрация принимаемого излучения с помощью широкополосных цифровых приемников DSP-Z [9]. Анализ спектров сигналов, полученных с их помощью, позволял идентифицировать всплески и определять их тип.

Одна такая характерная запись – часть десятиминутного скана, содержащая мощный всплеск III типа, – приведена на рис. 5. Здесь показаны корреляционные функции для всех шести баз интерферометров, сформированных из секций антенны С–Ю, полученные на частотах 25 МГц (рис. 5, а) и 20 МГц (рис. 5, б). Верхняя кривая на



**Рис. 5.** Временные зависимости коэффициента корреляции при наблюдении всплеска III типа на интерферометрах С–Ю на частотах 25 МГц (а), 20 МГц (б) и динамический спектр всплеска (в). Стрелками отмечены кривые, соответствующие самой короткой базе

обеих панелях соответствует самой короткой базе, а каждая последующая демонстрирует уменьшение коэффициента корреляции, т. е. частичное разрешение источника, связанного со всплеском, по мере роста длины базы. Анализ зависимости коэффициента корреляции от длины базы позволил определить угловой размер источника, который составил 23' и 28' на частотах 25 и 20 МГц соответственно. На рис. 5, в приведена спектрограмма, полученная в диапазоне от 17 до 28.5 МГц с помощью цифрового приемника DSP-Z.

Необходимо отметить, что высокая чувствительность предлагаемого инструмента, которая определяется большой эффективной площадью секций УТР-2, используемых в качестве антенн интерферометров, и широкой полосой принимаемых сигналов, позволяет исследовать всплески солнечной активности с плотностью потока, сравнимой с потоком излучения спокойного Солнца. При этом необходимо иметь в виду, что во время всплеска функции видности, измеряемые

интерферометрами с недостаточно большими базами, будут определяться не только источником, связанным со всплеском, но и неразрешенной протяженной тепловой составляющей солнечного излучения, т. е. двумя источниками с разными размерами и, в общем случае, с различными координатами центров. При наблюдении мощных всплесков влиянием вклада спокойного Солнца можно пренебречь, а при определении параметров менее интенсивных всплесков необходимо использовать данные наиболее длинных баз антенны С–Ю, на которых, как показано на рис. 2, протяженный источник Солнца разрешен и наблюдается только более компактный объект, связанный со всплеском.

Комплексный выходной сигнал программного коррелятора позволяет определить не только амплитуду, но и фазу коррелированного излучения, представляющую собой разность фаз сигналов, принятых от источника антеннами интерферометра. Для определения положения наблюдаемого объекта измеряемая фаза должна быть прокалибрована, т. е. привязана к опорному источнику, который наблюдается попеременно с исследуемым. На дециметровых волнах влияние ионосферной рефракции и особенности применяемых антенн решеток, в которых фаза принятого сигнала меняется при смене ориентации луча, существенно усложняют фазовую калибровку. К тому же в этом диапазоне фазовая информация существенно искажается сильным влиянием ионосферных неоднородностей, вводящих дополнительную задержку в сигналы, принятые антеннами интерферометра. Эти факторы приводят к тому, что в исследованиях структуры радиоисточников на интерферометрах УРАН информация о фазе функции видности не используется. Однако в рамках описываемого эксперимента ситуация существенно отличается. В случае одновременного наблюдения протяженной тепловой компоненты и более компактного короткого всплеска, т. е. на тех базах, где диск Солнца не разрешен, фазовую информацию можно использовать. Непрерывное излучение Солнца в этом случае служит калибровочным источником – фазовым репером. При возникновении всплеска, положение источника которого не совпадает с фазовым центром Солнца, фаза комплексного сигнала на выходе коррелятора определяется суммой векторов сигналов двух



источников, а после окончания всплеска фаза вновь определяется протяженным репером. Если амплитуда всплеска существенно превышает излучение тепловой компоненты, положение его источника относительно фазового центра Солнца может быть прямо определено по разности фаз. Важно также, что ионосферные искажения существенно меньше проявляются на коротких базах УТР-2, а рефракция одинаково воздействует на излучение спокойного Солнца и всплеск на его фоне. На рис. 6, *a* показан модуль, а на рис. 6, *б* – фаза коэффициента корреляции, полученные интерферометром с базой равной удвоенному разнесу секций антенны С–Ю (426 м в данном случае), для того же скана, что приведен на рис. 5 (показана полная десятиминутная запись).

Компенсация вращения Земли (так называемых остановов лепестков интерференционной картины) здесь для наглядности не сделана, и наклонная кривая на графике фазы определяется перемещением Солнца относительно базы интерферометра. В момент появления всплеска, положение источника которого не совпадает с фазовым центром Солнца, фаза изменяется и теперь соответствует его положению, поскольку интенсивность всплеска более чем на порядок превышает интенсивность излучения протяженного компонента. Скачок фазы может быть пересчитан в угловое изменение координат в соответствии с соотношением

$$\sin(\Delta\theta) = \frac{\Delta\phi\lambda}{2\pi L},$$

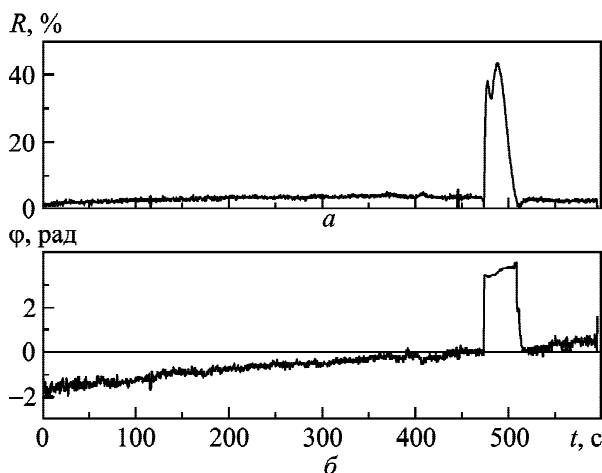


Рис. 6. Модуль (*a*) и фаза (*б*) коэффициента корреляции на частоте 25 МГц при наблюдении всплеска III типа

где  $\Delta\theta$  – разность угловых координат центра Солнца и источника, связанного со всплеском;  $\Delta\phi$  – скачок фазы, рад. В данном случае эта разность координат оказалась равной  $\approx 53'$ . При таком уровне отношения сигнал/шум, как на рис. 6, вполне надежно можно определить изменение фазы на порядок меньшее показанного на рисунке. Следовательно, точность определения координат таких источников относительно центра Солнца составляет около  $5'$ . Информация об изменении фазы коэффициента корреляции может быть использована для корректного определения функции видности и угловых размеров источников всплесков небольшой интенсивности на тех базах, где Солнце не разрешено, и выходной сигнал коррелятора представляет собой сумму двух векторов.

## 5. Выводы

1. Разработан аппаратно-программный комплекс для интерферометрического определения угловых параметров солнечного излучения. При разработке были использованы особенности секционного построения решеток радиотелескопа УТР-2 и возможности приемной аппаратуры УРАН.

2. Проведены методические наблюдения компактного для данных интерферометров радиоисточника 3С144, подтвердившие работоспособность комплекса.

3. Проведены пробные наблюдения источников радиоизлучения Солнца на двух частотах декаметрового диапазона. Определены угловые размеры спокойного Солнца и источников, связанных со всплесками спорадической активности, согласующиеся с наблюдениями на радиогелиографе УТР-2.

4. Показана возможность определения относительного положения источников всплесков.

5. В связи с удобством, точностью и информативностью таких измерений можно рекомендовать развитие предложенной методики с использованием широкополосных цифровых приемников DSP-Z, применяемых на УТР-2. Это позволит определять корреляционные зависимости и угловые параметры солнечного излучения на любой частоте в диапазоне работы этих приемников с нужной шириной полосы. Для сокращения аппаратных расходов можно регистрировать выходные сигналы только трех выбранных секций УТР-2 и использовать выражение (3) для определения углового размера объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрагин Э. П., Базелян Л. Л. Дециметровое излучение спокойного Солнца: Препр. / Институт радиофизики и электроники АН УССР; № 304. – Харьков: 1986. – 32 с.
2. Браженко А. И., Коваль А. А., Коноваленко А. А., Станиславский А. А., Абрагин Э. П., Доровский В. В., Мельник В. Н., Ваццишин Р. В., Французенко А. В., Борысюк О. В. Особенности континуального излучения верхней короны Солнца в дециметровом диапазоне радиоволн // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – Т. 17, № 1. – С. 3–14.
3. Абрагин Э. П., Базелян Л. Л., Гончаров Н. Ю., Зайцев В. В., Зиничев В. А., Рапопорт В. О., Цыбко Я. Г. Об угловых размерах источников солнечных радиовсплесков в дециметровом диапазоне // Астрономический журнал. – 1975. – Т. 52. – С. 993–998.
4. Станиславский А. А., Абрагин Э. П., Коноваленко А. А., Коваль А. А. Гелиограф радиотелескопа УТР-2. I. Общая схема // Радиофизика и радиоастрономия. – 2011. – Т. 16, № 1. – С. 5–14.
5. Chen H. S.-L. and Shawhan S. D. Structure and evolution of solar radio bursts at 26.4 MHz // Sol. Phys. – 1978. – Vol. 57, Is. 1. – P. 205–227.
6. Рашковский С. Л., Белов А. С., Иванов А. С., Лозинский А. Б., Шепелев В. А. Новый аппаратурно-программный комплекс УРАН // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – Т. 17, № 3. – С. 207–217.
7. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп дециметрового диапазона волн УТР-2 // Антенны. – Москва: Связь. – 1978. – Вып. 26. – С. 3–14.
8. Рашковский С. Л., Шепелев В. А., Инютин Г. А., Ваццишин Р. В. Измерение плотности потока излучения радиоисточников в интерферометрической сети УРАН // Радиофизика и радиоастрономия. – 2013. – Т. 18, № 4. – С. 291–300.
9. Ryabov V. B., Vavriv D. M., Zarka P., Ryabov B. P., Kozhin R., 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. – id. A16.

В. О. Шепелев

Радиоастрономічний інститут НАН України,  
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ ПАРАМЕТРІВ ДЖЕРЕЛ  
РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ СОНЦЯ  
НА ДЕКАМЕТРОВИХ ХВИЛЯХ

Запропоновано комплекс апаратури для визначення кутових характеристик джерел, пов'язаних із сонячним радіовипромінюванням на дециметрових хвилях. Метод вимірювань ґрунтується на інтерферометричному підході з використанням секційної структури радіотелескопа УТР-2. Описано просту методику спостережень та обробки даних, що не вимагає калібрувань антени. Виконано спостереження спокійного Сонця і сплесків його спорадичної активності, що дозволили визначити як кутові розміри джерел, так і їх взаємне розташування.

V. A. Shepelev

Institute of Radio Astronomy,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

DETERMINATION OF ANGULAR PARAMETERS  
OF THE SOURCES OF SOLAR RADIO EMISSION  
AT DECI-METER WAVELENGTHS

Facilities for measurement of angular characteristics of the sources associated with solar radio emission at decimeter wavelengths have been developed. The measurement method is based on the interferometer approach using the sectional structure of the UTR-2 radio telescope. A simple method of observation and data reduction is described which does not require antenna calibration. The observations of the quiet Sun and bursts of its sporadic activity have been made that enables to determine the angular size of sources and their relative position.

Статья поступила в редакцию 22.01.2015