

Гелиограф радиотелескопа УТР-2. III. Наблюдения

А. А. Коноваленко, А. А. Станиславский, А. А. Коваль, Э. П. Абранин

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

Статья поступила в редакцию 9 ноября 2010 г.

В третьей части описания гелиографа радиотелескопа УТР-2 показано, что каждый пиксель сигнала от соответствующего луча диаграммы направленности представляет собой кросс-корреляционный динамический спектр (время – частота – интенсивность), измеренный с помощью цифрового спектрального процессора в реальном времени. Данный гелиограф нового поколения позволяет получать изображения короны Солнца в частотном диапазоне $8 \div 33$ МГц с частотным разрешением 4 кГц, временным разрешением до 1 мс и динамическим диапазоном 90 дБ. В работе приведены результаты гелиографических наблюдений радиоисточников и короны Солнца, выполненные летом 2010 г.

Ключевые слова: радиотелескоп УТР-2, гелиограф, кросс-поляризационная функция, спектроанализатор, спокойное Солнце

1. Введение

Высокая активность Солнца часто сопровождается спорадическим радиоизлучением в метровом и декаметровом диапазонах [1, 2]. Некоторые его типы (I, II, III и IV) являются общими для этих диапазонов. Вместе с тем им присуща и своя специфика. Например, наиболее частые на метровых волнах всплески I типа практически не наблюдаются в декаметровом диапазоне. С другой стороны, короткоживущие стриа-всплески, дрейфующие пары, всплески IIIb типа встречаются только на частотах меньше 60 МГц, хотя последние, наряду со всплесками III типа, являются наиболее многочисленными событиями декаметрового излучения Солнца [3].

Начало систематического изучения декаметрового спорадического излучения Солнца было положено в работе [4]. С тех пор в понимании его природы был достигнут значительный прогресс. Вместе с тем теоретические представления о механизме и условиях генерации солнечных всплесков в большинстве случаев еще не дают адекватной картины. Поэтому продолжение анализа новых экспериментальных данных, в том числе на основе наблюдений с помощью гелиографа, весьма актуально.

В настоящей работе мы рассматриваем особенности работы приемно-регистрирующего блока гелиографа. Его основой служит цифровой многоканальный спектроанализатор (DSP). Здесь приведены предварительные результаты тестовых наблюдений с помощью рассматриваемого инструмента в летний период 2010 г. В заключение мы подводим итоги развития гелиографа и перспективы его дальнейшего применения в радиоастрономических наблюдениях в декаметровом диапазоне длин волн.

2. Применение DSP в гелиографе

Следует отметить, что еще в конце 90-х гг. наблюдения, проводимые на радиотелескопе УТР-2, осуществлялись только на шести фиксированных частотах. Это было препятствием для получения более всесторонней информации о регистрируемых событиях, а также приводило к заметному проигрышу многочастотным наблюдениям. Однако в последние годы возможности приемно-регистрирующего блока радиотелескопа были существенно расширены.

Одним из стандартных подходов к изучению нестационарных случайных сигналов мо-

жет служить мгновенный спектральный анализ [5], с помощью которого входной сигнал преобразуется в двумерную (частотно-временную) спектрограмму. Первые широкополосные цифровые спектральные приемники для низкочастотной радиоастрономии с фурье-анализом реального времени (DSP, Robin) были разработаны в совместном проекте Франции и Австрии [6, 7] и успешно внедрены на радиотелескопах NDA (Франция) и УТР-2 (Украина) [8]. С их помощью был получен большой объем новых результатов, в том числе в исследованиях Солнца, часть из которых представлена в работах [9-12]. Дальнейший прогресс цифровой и вычислительной техники, информационных и телекоммуникационных технологий позволил создать спектральные приемники с существенно лучшими параметрами [13, 14]. Входной сигнал в них оцифровывается с помощью высокоскоростного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а затем матрицей FPGA выполняется его обработка, в результате которой определяются спектры сигнала на временных интервалах, где сигнал можно считать квазистационарным. Полученные спектры записываются в виде матрицы чисел (частотные каналы – временные отсчеты начала соответствующих спектров) на винчестер персонального компьютера. Разработанное программное обеспечение осуществляет вывод графического интерфейса пользователя для выбора режима регистрации данных, отображения их после соответствующих преобразований в реальном времени, а также контроля ряда других параметров спектроанализатора.

В настоящее время в качестве приемно-регистрирующего устройства в гелиографе используется спектроанализатор DSPZ. Его основные характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры DSPZ

Частота выборки, МГц	66
Рабочая полоса частот, МГц	8 ÷ 33
Общее число частотных каналов	8192
Частотное разрешение, кГц	4
Временное разрешение, с	$2 \cdot 10^{-4} \div 1$
Динамический диапазон, дБ	117

Он может работать в трех разных режимах, называемых “Waveform”, “Spectrum” и “Correlation”. В первом из них поток данных после выхода одного и/или двух каналов АЦП записывается на запоминающее устройство персонального компьютера без каких-либо преобразований и анализа. Это простейший способ регистрации данных, последующая обработка которых полностью остается за пользователем. Но в этом случае необходимо обрабатывать (или записывать) огромный поток данных. Он составляет около 264 Мб/с, ведь частота оцифровки данных равна 66 МГц. В режиме “Spectrum” применяется оконное быстрое преобразование Фурье. Эта процедура переводит входной скалярный сигнал $x(\tau)$ в двумерную спектрограмму $P(t, f)$, по-другому ее еще называют динамическим спектром. Функция $P(t, f)$ является средней спектральной мощностью “оконного” сигнала:

$$P_n(t, f) = |X_n(t, f)|^2,$$

$$X_n(t, f) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} x_n(\tau) g(\tau-t) \exp(-i2\pi f \tau) d\tau, \tag{1}$$

где $n = 1, 2$ – номер входного канала, а $g(\tau-t)$ представляет собой “оконную” функцию. Временное окно $T = 2^m \cdot \Delta t$ связано с интервалом между двумя последовательными выборками входного сигнала Δt и выбором количества каналов спектрального анализа. Скорость потока данных составляет около 327 кб/с при временном разрешении 100 мс. В этом режиме обрабатываются два входных сигнала отдельно друг от друга, поэтому на выходе мы имеем два независимых потока данных, но в них отсутствует информации о фазе сигналов. Более широкие возможности для анализа данных появляются при использовании режима “Correlation”. Следует заметить, что и в режиме “Spectrum”, и в режиме “Correlation” определяется матрица спектральной плотности

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 & Z_{12} \\ Z_{21} & P_2 \end{bmatrix},$$

где $P_1, P_2 \in \mathbf{R}_+ \cup 0$ и $Z_{12}, Z_{21} \in \mathbf{C}$, но только в режиме “Correlation” она используется полностью. Эта матрица полезна в кросс-спектральном анализе, когда по комплексным спектрам сигналов $x_{1,2}(\tau)$ определяется их взаимная спектральная плотность

$$K(t, f) = Z_{12} = \langle X_1(t, f) X_2^*(t, f) \rangle,$$

где величины $X_{1,2}(t, f)$ вычисляются согласно (1), знак “*” означает комплексно-сопряженное значение, а угловые скобки указывают на усреднение по интервалам T_i . Анализ кросс-спектра позволяет проверить идентичность сигналов. Сама функция $K(t, f)$ комплексная и содержит информацию о соотношении фаз между принимаемыми сигналами. Поэтому ее удобно представить в экспоненциальном виде:

$$K(t, f) = |K(t, f)| \exp(-j\Phi(t, f)),$$

где модуль и фазовый угол определяются соотношениями:

$$|K(t, f)| = \sqrt{[\operatorname{Re}(K(t, f))]^2 + [\operatorname{Im}(K(t, f))]^2},$$

$$\Phi(t, f) = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{Im}(K(t, f))}{\operatorname{Re}(K(t, f))} \right),$$

а j – мнимая единица. Реальная часть функции взаимной спектральной плотности $\operatorname{Re}(K(t, f)) = C(t, f)$ называется коспектром, а мнимая ее часть $\operatorname{Im}(K(t, f)) = Q(t, f)$ – квадратурным спектром. Для понимания сути взаимной спектральной функции достаточно упомянуть, что коспектр $C(t, f)$ выделяет вклад колебаний разных частот в общий кросс-спектр при нулевом сдвиге между двумя сигналами. В то же время квадратурный спектр показывает вклад разных гармоник в общий кросс-спектр, когда гармоники первого сигнала $x_1(\tau)$ запаздывают на четверть периода по отношению к соответствующим гармоникам второго сигнала $x_2(\tau)$. При проведении наблюдений на радиотелеско-

пе УТР-2 на один вход DSPZ подается сигнал от антенны “Север–Юг” (N-S), а на другой – от антенны “Запад” (W), что позволяет сформировать в итоге карандашный луч диаграммы направленности для гелиографа.

Для режима “Correlation” выходными являются уже не два потока данных, как в режиме “Spectrum”, а четыре: спектры мощности каждого канала, а также действительная (коспектр) и мнимая (квадратурный спектр) части взаимного спектра. По ним можно найти функцию когерентности, значение которой изменяется от 0 (абсолютно разные сигналы) до 1 (сигналы идентичны). Поэтому и скорость потока данных при этом увеличивается в 2 раза. Во время летних наблюдений 2009 г. и частично 2010 г. с помощью гелиографа сначала использовался режим “Spectrum”. На входы DSPZ подавался сумма-разностный сигнал. Однако такой способ регистрации данных сопряжен с заметными потерями информации о спектрах мощности в отдельных антеннах и фазе сигнала. Вследствие этого в конце лета 2010 г. конфигурация гелиографа была изменена, и сигнал после коммутаторов антенн N-S и W поступал на соответствующие каналы DSPZ в обход сумма-разностного устройства. В такой ситуации целесообразно использовать для записи данных режим “Correlation” в виду вышеупомянутых его преимуществ и возможности при необходимости проводить усреднение по частотным каналам.

Итак, в настоящей конфигурации гелиографа с последовательным формированием и регистрацией элементов изображения к двум входам АЦП блока DSPZ подключаются выходы антенн N-S и W. Антенна N-S имеет пять выходов, соответствующих пяти лучам. Эти выходы подключаются к входу приемно-регистрирующего устройства (DSPZ) поочередно. В конце каждого цикла опроса лучей к обоим входам приемно-регистрирующего устройства вместо антенны подключается вспомогательный генератор шума, с помощью которого формируются разделительные дорожки (маркеры) на гелиограмме.

Приемно-регистрирующее устройство гелиографа выполняет функцию усиления и фильтрации принятых сигналов, создания карандашной диаграммы радиотелескопа и поэлементной регистрации изображения в области обзора.

3. Примеры наблюдений

На протяжении последнего десятилетия гелиографические наблюдения на телескопе УТР-2 в основном велись эпизодически и служили скорее для тестирования этого инструмента в процессе его модернизации. Результаты наблюдений позволили установить первоочередные пути усовершенствования аппаратной и программной части гелиографа. Кроме того, на большую часть этого времени приходился высокий уровень солнечной активности, и основной задачей солнечных наблюдений были радиоспектроскопические исследования всплесковой активности Солнца в декаметровом диапазоне длин волн (см., например, [9, 11, 12]).

Подведение итогов проведенной модернизации можно отнести к наблюдениям летом 2010 г., результаты которых мы собираемся привести в данном разделе. Эти исследования включали в себя ночные наблюдения космических источников 3С144 (Крабовидная туманность), 3С274 (Дева А), 3С405 (Лебедь А) и др. Для нашего гелиографа они являются точечными источниками радиоизлучения. Кроме того,

они имеют разную интенсивность на декаметровых волнах и по ним можно оценить чувствительность гелиографа в целом. Темп сопровождения источника выбирался равным 16 мин. За это время источник пересекал кадр гелиограммы от одного края до другого. Темп переключений фазовращателя быстрого сканирования был выбран такой, чтобы формирование кадра происходило за 2 мин. Этого вполне достаточно в рассматриваемом случае, когда изменения в положении источника обусловлены в основном суточным движением небесной сферы. При таких скорости формирования кадра и времени слежения за источником удавалось наблюдать прохождение источника от одного луча кадра к соседнему лучу в следующем кадре так, что он пересекал весь кадр (см. рис. 1, верхний и средний ряды), состоящий, напомним, из восьми положений пятерок лучей. В режиме DSPZ “Correlation” для каждого положения в кадре гелиографа удается сформировать карандашный луч диаграммы направленности.

После успешных наблюдений указанных радиоисточников аналогичный режим был при-

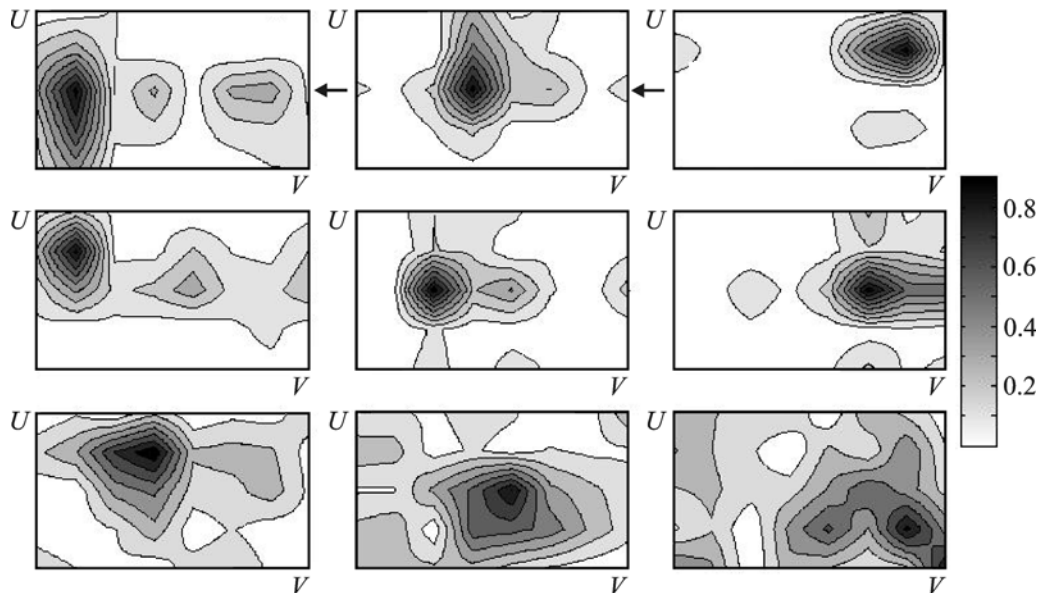


Рис. 1. “Грязные” карты источников 3С123 (верхний ряд), 3С348(средний) и короны Солнца (нижний ряд) на частоте ~ 21 МГц. На трех кадрах показано движение источников, наблюдаемое за счет суточного поворота небесной сферы (справа налево). На кадрах присутствует вклад боковых лепестков диаграммы направленности УТР-2. Интенсивность излучения нормирована к единице, фон вычтен (ноль). Черный цвет соответствует максимальной интенсивности, белый – минимальной

менен и для наблюдений спокойного Солнца. Этому была посвящена неделя в конце августа – начале сентября 2010 г. Корона Солнца для гелиографа декаметрового диапазона является протяженным источником радиоизлучения. Поэтому на гелиограмме он будет “размазан” по нескольким пикселям (напомним, что все изображение области обзора гелиографа состоит из $5 \times 8 = 40$ элементов или пикселей). Одна из основных задач гелиографа состоит в наблюдениях двумерных распределений яркости короны невозмущенного Солнца. Как известно, минимум 11-летнего цикла солнечной активности приходился на 2008 г., поэтому в близкие к минимуму годы возможны измерения плотности потока мощности спокойного Солнца. Примеры изображений короны Солнца, полученных во время наблюдений с 28 августа по 3 сентября 2010 г., показаны в нижнем ряду изображений на рис. 1, которые были зарегистрированы 29 августа в ~7:20 UT. Здесь приведены пока только “грязные” (присутствует вклад боковых лепестков диаграммы направленности УТР-2) карты, но на них четко видны перемещения короны (или наиболее яркой ее части) по кадру гелиографа из-за суточного движения небесной сферы, что говорит о достаточной чувствительности инструмента даже для одного частотного канала. Этот важный результат весьма обнадеживает и стимулирует дальнейшие наблюдения солнечной короны с помощью гелиографа радиотелескопа УТР-2.

Приведенный здесь анализ наблюдений с помощью гелиографа имеет демонстрационный характер. Построение изображений короны Солнца по данным указанных наблюдений на декаметровых волнах с их калибровкой, “чистой” изображения и сопоставлением с имевшими место солнечными событиями будет выполнено в отдельной работе.

4. Заключение

Особенности гелиографа декаметрового диапазона длин волн на базе радиотелескопа УТР-2 таковы, что его вполне можно назвать уникальным радиоастрономическим инструментом. Здесь достаточно упомянуть, что среди всех гелиографов в мире он работает на самых низких частотах для приема космического радиоизлучения. Во-вторых, он

сверхширокополосный, покрывает практически всю полосу от 10 до 30 МГц. В-третьих, его чувствительность, временное и частотное разрешения, динамический диапазон, пространственная селекция сигналов имеют рекордные значения в данном частотном диапазоне, и поэтому задачи, которые позволяет решать этот инструмент, не имеют аналогов в мире. Гелиограф уникален также тем, что позволяет получать изображения короны спокойного Солнца на расстояниях от двух до трех солнечных радиусов от центра Солнца практически без пропусков в (U, V) -плоскости за время порядка 1 с. Чувствительность гелиографа позволяет наблюдать пространственную эволюцию низкоконтрастных образований (тонкую структуру радиовсплесков, волокнистую структуру всплесков II типа и др.). Кроме того, его динамический диапазон дает возможность наблюдать их одновременно с яркими радиособытиями (сильными всплесками III типа или на фоне всплесков II и IV типов). Инструмент прошел длительный путь в своем развитии, и, оглядываясь назад, можно с полной уверенностью сказать, что достигнутый уровень характеристик гелиографа оправдал затраченные усилия.

Авторы благодарны С. В. Степкину и В. Л. Колядину за помощь и полезные советы при выполнении настоящей работы.

Литература

1. Krüger A. Introduction to Solar Radio Astronomy and Radio Physics. – Berlin: Springer, 1979. – 356 p.
2. Pick M. and Vilmer N. Sixty-five years of solar radio-astronomy: flares, coronal mass ejections and Sun-Earth connection // *Astron. Astrophys. Rev.* – 2008. – Vol. 16, No. 1-2. – P. 1-153.
3. Abranin E. P., Baselyan L. L., Goncharov N. Yu., Zaitsev V. V., Zinichev V. A., Rapoport V. O., and Tsybko Ya. G. Angular sizes of stria-burst sources in the range 24-26 MHz // *Sol. Phys.* – 1978. – Vol. 57, No. 1. – P. 229-235.
4. Ellis G. R. A. and McCulloch P. M. Frequency splitting of solar radio bursts // *Aust. J. Phys.* – 1967. – Vol. 20. – P. 583-594.
5. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
6. Kleewein P., Rosolen C., and Lecacheux A. New Digital Spectrometers for Ground-Based Decameter

- Radio Astronomy: in Planetary Radio Emissions IV / Ed. by H. O. Rucker, S. J. Bauer, and A. Lecacheux. – Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, 1997. – P. 349-357.
7. Lecacheux A., Rosolen C., Clerc V., Kleewein P., Rucker H. O., Boudjada M. Y., and Van Diel W. Digital techniques for ground-based low frequency radio-astronomy // Proc. SPIE. – 1998. Vol. 3357. – P. 533-542.
 8. Lecacheux A., Konovalenko A. A., and Rucker H. O. Using Large radio telescope at decameter wavelength // Planet. Space Sci. – 2004. – Vol. 52, Is. 15. – P. 1357-1374.
 9. Mel'nik V. N., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Stanislavsky A. A., Abranin E. P., Lecacheux A., Mann G., Warmuth A., Zaitsev V. V., Boudjada M. Y., Dorovskii V. V., Zaharenko V. V., Lisachenko V. N., and Rosolen C. Observations of solar type II bursts at frequencies 10-30 MHz // Sol. Phys. – 2004. – Vol. 222, No. 1. – P. 151-166.
 10. Мельник В. Н. Исследования радиоизлучения Солнца в Радиоастрономическом институте НАН Украины // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, специальный выпуск. – С. S54-S73.
 11. Чернов Г. П., Станиславский А. А., Коноваленко А. А., Абранин Э. П., Доровский В. В., Рукер Х. О. Тонкая структура радиовсплесков II типа в декаметровом диапазоне волн // Письма в АЖ. – 2007. – Т. 33, №3. – С. 221-232.
 12. Konovalenko A. A., Stanislavsky A. A., Abranin E. P., Dorovsky V. V., Mel'nik V. N., Kaiser M. L., Lecacheux A., and Rucker H. O. Absorption in Burst Emission // Sol. Phys. – 2007. – Vol. 245, No. 2. – P. 345-354.
 13. Kozhin R. V., Vinogradov V. V., and Vavriv D. M. Low-noise, high dynamic range digital receiver/spectrometer for radio astronomy applications // MSMW Symp. Proc. – Kharkov (Ukraine). – 2007. – P. 736-738.
 14. 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 // Astr. Astrophys. – 2010. – Vol. 510. – P. 16-28.

Геліограф радіотелескопа УТР-2. III. Спостереження

**О. О. Коноваленко,
О. О. Станиславський, А. О. Коваль,
Е. П. Абранін**

У третій частині опису геліографа радіотелескопа УТР-2 показано, що кожен піксель сигналу від відповідного променя діаграми спрямованості є крос-кореляційним динамічним спектром (час – частота – інтенсивність), вимірним за допомогою цифрового спектрального процесора у реальному часі. Даний геліограф нового покоління дозволяє отримувати зображення корони Сонця у частотному діапазоні $8 \div 33$ МГц з частотною та часовою роздільною здатністю 4 кГц та до 1 мс відповідно, та динамічним діапазоном 90 дБ. Наводяться результати геліографічних спостережень радіоджерел і корони Сонця, виконаних влітку 2010 р.

Heliograph of the UTR-2 Radio Telescope. III. Observations

**A. A. Konovalenko, A. A. Stanislavsky,
A. A. Koval, and E. P. Abranin**

The third part of the work dealt with the heliograph of the UTR-2 radio telescope description shows that every pixel from the signal received by the corresponding beam of the antenna pattern is the cross-correlation dynamic spectrum (time-frequency-intensity) measured by the digital spectrum processor in real time. This new generation heliograph allows the solar corona images within $8 \div 33$ MHz with the 4 kHz frequency resolution, time resolution to 1 ms, and for a 90 dB dynamic range. The illustrations of observations of solar corona and other radio sources made in summer of 2010 with the heliograph are demonstrated.