

УДК 523.9

Мониторинг солнечной активности в радиодиапазоне станциями Службы Солнца “KRIM”

А.Е. Вольвач, Ю.Ф. Юровский, К.В. Самисько, С.А. Самисько, И.В. Якубовская

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
volvach@craocrimea.ru

Поступила в редакцию 1 октября 2016 г.

Аннотация. Радиоастрономический диагностический комплекс, созданный на базе радиотелескопа РТ-22 и трех малых радиотелескопов, интегрирован во Всемирную службу мониторинга солнечной активности, которая включает 14 наземных станций в кооперации с орбитальными обсерваториями. Это дало доступ к 24-часовому ежедневному объему информации в широком диапазоне длин волн о событиях, которые происходят на Солнце и влияют на земные процессы.

Четыре робот-радиотелескопа КрАО, объединенные в Службу Солнца “KRIM”, ведут наблюдения Солнца в режиме мониторинга и алертов. Данные радиомониторинга солнечной активности сохраняются в цифровом виде и выставляются на сайты мировой службы Солнца в реальном времени.

Регулярное текущее обслуживание и модернизация радиотелескопов, предназначенных для осуществления Службы Солнца в КрАО, а также ежедневные наблюдения Солнца позволили получить высококачественные данные о свойствах солнечной активности. Описываются аппаратура и методика наблюдений динамических спектров радиоизлучения Солнца. Предлагается метод исключения влияния свойств антенны на измеряемый сигнал путем использования известного спектра радиоизлучения спокойного Солнца.

MONITORING OF SOLAR ACTIVITY IN RADIO RANGE BY STATIONS OF SUN SERVICE “KRIM”, by *A.E. Volvach, Yu.F. Yurovsky, K.V. Samisko, S.A. Samisko and I.V. Yakubovskaya*. Radio astronomy diagnostic system, based at the radio telescope RT-22 and three small radio telescopes, is integrated into the World Solar Service e-CALLISTO, which includes 14 ground stations in cooperation with the orbital observatory. It gave access to 24-hour daily volume of information in a wide range of wavelengths of the events that occur on the Sun and affect terrestrial processes.

Four robotic telescopes of CrAO combined in “KRIM” Sun Service carry out solar observations in the mode of monitoring and alerts. Solar radio (monitoring) data are stored in a digital form and are exposed to the world solar service sites in real time.

Regular ongoing maintenance and modernization of radio telescopes, designed for Sun Service in the Crimean Astrophysical Observatory, as well as daily solar observations have provided high-quality data about the properties of the solar activity. The equipment and technique of observations of the dynamic spectra of solar radio emission are described. In order to exclude the influence of antenna effects on the measured signals a method based on the known spectrum of the quiet radio emission of the Sun was proposed.

Ключевые слова: Солнце, радиоизлучение

1 Введение

Солнечные вспышки сопровождаются увеличением уровня ионизирующей радиации, прекращением радиосвязи, изменением озонового слоя, усилением интенсивности космических лучей и т. д. Корпускулярный поток вызывает магнитные бури и полярные сияния. Поэтому дистанционные системы контроля и управления, радиационная обстановка в ближнем космосе, навигация, системы посадки самолетов, радиосвязь и другие виды технической деятельности человечества подвержены влиянию солнечной активности. В связи с этим прогнозирование “космической погоды” имеет большое значение. Для получения систематических данных о состоянии солнечной активности в Крымской астрофизической обсерватории были сконструированы и длительное время эксплуатируются радиотелескопы сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов волн (рис. 1).



Рис. 1. Радиотелескопы Службы Солнца Крымской астрофизической обсерватории



Рис. 2. Радиотелескоп на волны 3 и 5 см



Рис. 3. Радиотелескоп на волны 10 и 12 см в радиопрозрачном куполе

Радиотелескопы РТ-2 на длины волн 3 и 5 см (рис. 2) и РТ-3 на 10.2 и 12 см (рис. 3) размещены под радиопрозрачными куполами диаметром 6 м и представляют собой параллактические поворотные устройства с электрическим приводом по часовому углу, на которых укреплены параболические зеркала диаметром 2.5 м и 3 м с совмещенными облучателями на эти вол-

ны. Применяются радиометры модуляционного типа прямого усиления. Полоса пропускания каждого канала около 40 МГц, постоянная времени равна 1 с. Точность регистрации потока (ширина шумовой дорожки) определяется тропосферными флуктуациями и составляет около 0.2 % потока Солнца. Сигнал дискретизируется на 1024 уровня (кванта) и запись осуществляется в цифровом виде с частотой отсчетов 1 Гц в дежурном режиме и с частотой 100 Гц в течение всплеска радиоизлучения для регистрации тонкой структуры события.



Рис. 4. Антенна радиоспектрографа

Современные средства регистрации и передачи данных позволяют автоматизировать процесс наблюдений и осуществлять экспресс-диагностику солнечных вспышек в режиме реального времени. Для обеспечения этой возможности была модернизирована система управления антенной радиотелескопа РТ-3. Разработана и изготовлена цифровая схема наведения телескопа на Солнце, приспособленная для проведения автоматических наблюдений без участия наблюдателя.

2 Радиоспектрограф CALLISTO

В связи со значительным влиянием солнечной активности на техносферу и биосферу Земли Европейское космическое агентство (ESA) по рекомендации Комитета ООН по мирному использованию космического пространства (ООН, 2005) инициировало создание сети наземных наблюдательных станций для круглосуточного мониторинга состояния солнечной активности. Для исполнения рекомендации ООН Швейцарский институт астрономии (ETHZ, Цюрих) разработал радиоприемную часть спектрографа (Бенц и др., 2005) и помог оснастить им ряд обсерваторий, распределенных по долготе по всему земному шару для обеспечения круглосуточных наблюдений Солнца в течение 24 часов. К настоящему времени такой проект реализован в 14 странах, в том числе в отделе радиоастрономии и геодинамики КрАО (рис. 4). Созданная мировая сеть станций получила название e-CALLISTO (Бенц и др., 2009). Все пункты наблюдений автоматически передают по интернету в режиме реального времени получаемые данные и результаты сохраняются в Центральной базе данных в Цюрихе. Туда же поступает астрофизиче-

Мониторинг солнечной активности в радиодиапазоне...

ская информация со спутника RHESSI и из Национальной администрации по океану и атмосфере США (NOAA) со спутника GOES. Участники сети имеют свободный доступ к этой базе данных и к программному обеспечению для селекции и предварительной обработки результатов наблюдений любой станции.

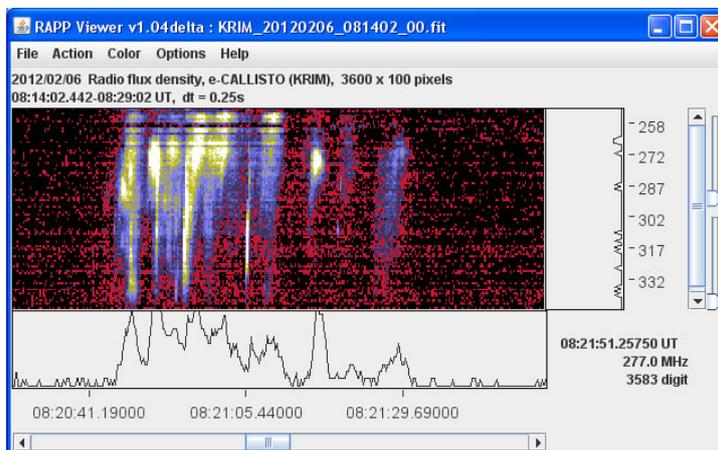


Рис. 5. Динамический спектр радиовсплеска

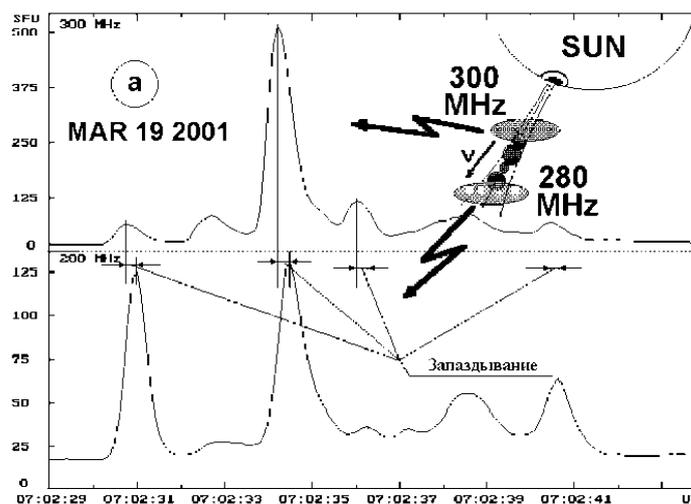


Рис. 6. Запаздывание излучения на разных частотах характеризует скорость движения вспышечного возмущения

Вспышечное возмущение распространяется во внешние слои короны и генерирует при этом радиоизлучение понижающейся частоты, что дает динамический спектр, описывающий изменение интенсивности и частоты излучения со временем (рис. 5). По характеру спектра можно определить скорость распространения возмущения, генерируемую полосу частот, интенсивность энерговыделения и другие сведения о физических условиях в солнечной короне. Для его регистрации служит радиоспектрограф CALLISTO, для которого разработана и изготовлена широкополосная антенна, являющаяся разновидностью синфазной решетки, состоящей из 116 диполей и имеющей полосу пропускания от 250 до 350 МГц (Юровский, 2013).

По запаздыванию метрового излучения относительно сантиметрового определяется момент прихода корпускулярного потока на Землю (рис. 6). Интенсивность всплесков позволяет оценить ожидаемый масштаб геофизических возмущений.

2.1 Совершенствование методики наблюдения динамических спектров

Приемники сети Мировой сети e-CALLISTO обладают приблизительно одинаковыми характеристиками, однако наблюдаемые на разных станциях спектры искажены различием свойств приемных антенн, которые не поставлялись вместе с приемником. Так как для астрофизических исследований желательно регистрировать процесс накопления энергии накануне вспышки (предвестник), т. е. отклонение уровня излучения от невозмущенного состояния, то в отделе радиоастрономии и геодинамики КРАО была разработана и изготовлена антенна в виде синфазного антенного полотна, эффективность которой обеспечивает возможность наблюдения спектра спокойного Солнца. Любая антенна обладает неравномерным усилением в диапазоне частот, поэтому был разработан способ исключения этой неравномерности.

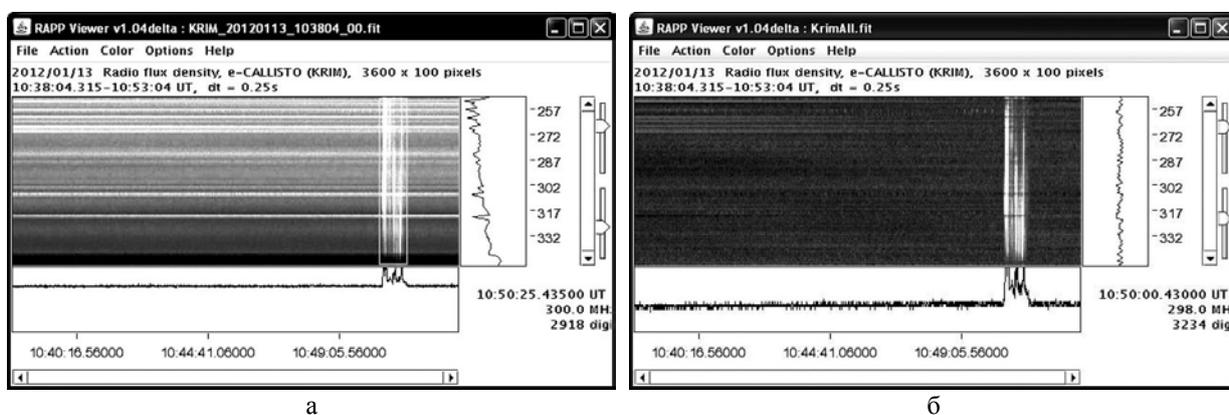


Рис. 7. а – исходная запись динамического спектра на станции KRIM. б – спектр после исключения вариаций эффективности антенны

Количество элементов антенны было принято равным 16-ти и они были размещены в виде равномерной двумерной решетки 4×4 элемента. При этом эффективность антенны позволяет регистрировать изменение уровня спокойного Солнца на 10 %.

Как известно, усиление антенны $K_A \approx 4\pi/\lambda^2 D^2$ зависит от длины волны, что приводит к искажению наблюдаемого спектра. Следовательно, для корректной астрофизической интерпретации данных необходимо устранить из данных наблюдений неравномерность эффективности антенны $A_{ef}(f)$. Ее величину можно определить путем сравнения эталонного спектра с реально наблюдаемым выходным сигналом спектрографа. В качестве эталонного спектра $S_{et}(f)$ можно принять известный спектр излучения невозмущенного Солнца, описываемый выражением $S_{et}(f) = 0.06 f$ SFU/MHz (Шимабокуро, 1980). Отношение интенсивности эталонного спектра к наблюдаемому сигналу будет характеризовать эффективность антенны $A_{ef}(f) = S_{et}(f)/S(f)$. Умножение каждого наблюдаемого значения динамического спектра на эффективность $A_{ef}(f)$ исключает из получаемых данных неравномерность усиления антенны.

Всесторонние испытания антенны показали, что ее эффективность соответствует расчетной величине (рис. 7а), а исключение вариаций интенсивности сигнала, возникающих из-за неравномерной эффективности антенны в диапазоне частот, устраняет погрешности измерения динамического спектра (рис. 7б), что способствует корректной астрофизической интерпретации результатов наблюдений.

Мониторинг солнечной активности в радиодиапазоне...

Как видно из рис. 7, запись всплеска 13 января 2012 г. на станции “KRIM” имела неравномерную по частоте интенсивность спектра в предвсплесковый интервал времени (невозмущенное Солнце) и содержала горизонтальные полосы локальных радиопомех. После исключения вариаций эффективности антенны измеряемый спектр невозмущенного Солнца стал равномерным. Существенно уменьшилась также видимость локальных помех.

2.2 Поворотное устройство и система наведения антенны на Солнце

Антенна установлена на параллактической монтировке, имеющей две оси вращения. Одна из них направлена на полюс мира, составляя с плоскостью горизонта угол, равный географической широте места установки телескопа $45^{\circ}44'$. Вторая ось ей перпендикулярна и лежит в плоскости небесного экватора. Оси позволяют поворачивать телескоп и направлять его в нужную точку неба с заданными координатами в пределах часового угла $-6h < h < +6h$ и $+90^{\circ} > \delta > -40^{\circ}$ по склонению. Для слежения за суточным движением Солнца антенна поворачивается часовым механизмом вокруг полярной оси со скоростью один оборот за сутки.

Электронное устройство наведения управляется цифровыми сигналами, вырабатываемыми выходным устройством CALLISTO по командам ЭВМ и обеспечивает сопровождение Солнца по часовому углу и быстрый возврат антенны в точку восхода Солнца по окончании дневных наблюдений. Утром управляющий компьютер вычисляет момент прохождения Солнца через точку восхода с учетом уравнения времени, в вычисленный момент включает сопровождение антенны и режим наблюдений динамического спектра. Таким образом, спектрограф работает в автоматическом режиме ежедневных наблюдений Солнца без вмешательства оператора (робот-телескоп).

Так как ширина диаграммы направленности антенны зависит от принимаемой частоты, то усиление антенны в полосе частот оказывается переменным. Кроме того, из-за погрешности согласования волновых сопротивлений в антенном фидере возможно возникновение отраженной волны. На входе приемника она суммируется с падающей волной с учетом разности фаз, зависящей от текущей частоты. На некоторых частотах эти волны оказываются противофазными, и сигнал на входе приемника уменьшается. Этот эффект можно назвать зависимостью эффективности антенны от частоты $A_{эф}(f)$.

3 Наблюдения Солнца и цифровой архив результатов

Форма солнечной короны изменяется в соответствии с 11-летним циклом активности. Следовательно, для анализа этих изменений необходимы длительные однородные наблюдения радиопотока. Спорадическое радиоизлучение активных областей (медленно меняющаяся компонента) и вспышек (радиовсплески) может быть уверенно зарегистрировано из-за своей нерегулярности лишь при систематических наблюдениях.

В течение одного года проводится около 360 дней (около 3600 часов) наблюдений текущего состояния солнечной активности на частотах 2.5, 2.85, 6.0, 10.0 ГГц и в диапазоне 250–350 МГц (более 1080 записей ежедневных потоков радиоизлучения Солнца). Полученные данные включены в цифровой архив Службы Солнца и опубликованы на интернет-странице КрАО и сайте-зеркале http://krimradiosun.at.ua/Solar_Radio.htm. Пример дневных наблюдений показан на рис. 8. На сантиметровых и дециметровых волнах в этот день Солнце было “спокойным”, а на метровых наблюдалась шумовая буря.

3.1 Публикация графических результатов наблюдений в интернете

Начиная с 1983 г. сведения о солнечных радиовсплесках записываются в КрАО в цифровом виде. Научная ценность материала возросла, так как появилась возможность его автоматиче-

ской обработки на ЭВМ, но затруднился отбор событий из-за их большого количества и отсутствия наглядного графического представления. Это обстоятельство побудило нас к созданию архива иллюстраций. Для обеспечения доступа к ним графическая часть архива данных размещена на интернет-странице КрАО (раздел Solar Radio Patrol) и на сайте-зеркале http://krimradiosun.at.ua/Solar_Radio.htm. Для этого разработана и используется программа систематического пополнения коллекции иллюстраций ежедневно после окончания дневных наблюдений.

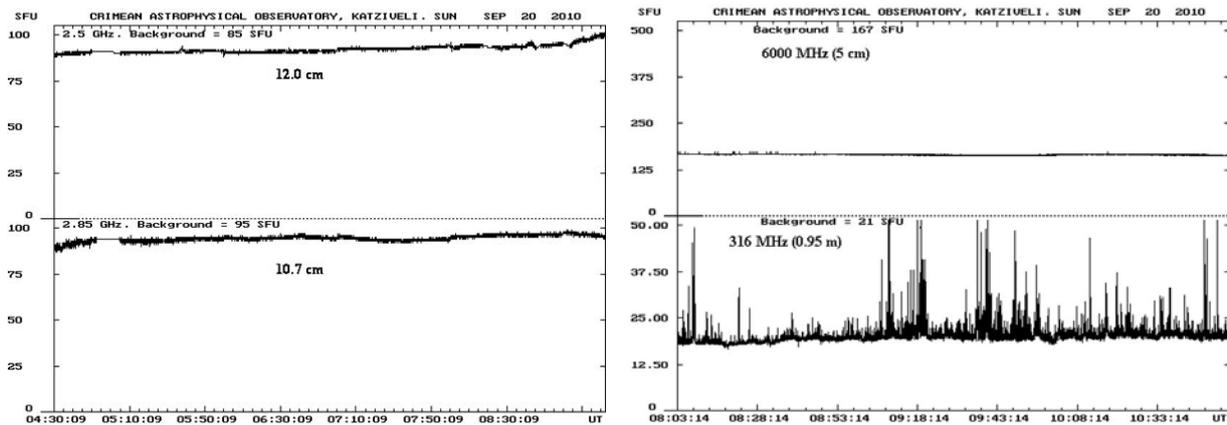


Рис. 8. Пример дневных наблюдений радиоизлучения Солнца на 4-х частотах

3.2 Цифровой архив данных, хранящихся в Отделе радиоастрономии и геодинамики КрАО

Архив содержит электронную базу данных о радиоизлучении Солнца на дециметровых и метровых волнах за период с 1983 г. по 2016 г. включительно и программное обеспечение (СУБД-систему управления базой данных). Особенностью архива является представление данных не только в виде наглядных графиков, но и в виде цифровых массивов, что дает возможность производить необходимую математическую обработку данных (вычисление спектров, функций взаимной корреляции, распределений и т. д.). Программа обзора архива позволяет выбирать события по признакам (дата, поток, тип и т. д.), просматривать их целиком или по частям на экране и выводить в буферный файл для дальнейшей обработки (http://krimradiosun.at.ua/Solar_Radio.htm).

4 Заключение

Регулярное текущее обслуживание и модернизация радиотелескопов, предназначенных для осуществления Службы Солнца в КрАО, а также ежедневные наблюдения Солнца позволили получить высококачественные данные о свойствах солнечной активности. Описано совершенствование методики наблюдения динамических спектров. На их основе проведен анализ природы происхождения тонкой структуры динамических спектров солнечных всплесков радиоизлучения. Эти новые сведения позволяют улучшить достоверность прогноза и диагностики последствий солнечных вспышек.

Благодарности. Авторы признательны М.М. Позднякову за изготовление металлоконструкций антенны и ее поворотного устройства. Работа частично поддержана грантом РФФИ (проект № 15-02-05498).

Литература

Бенц и др. (Benz A.O., Monstein C., Meyer H.) // Solar Phys. 2005. V. 226. P. 143.

Бенц и др. (Benz A.O., Monstein C., Meyer H., et al.) // Earth Moon Planet. 2009. V. 104. P. 277.

ООН (United Nations A/AC.105/856, General Assembly, Committee on the Peaceful Uses of Outer Space) // Report on the United Nations/European Space Agency/National Aeronautics and Space Administration of the United States of America Workshop on the International Heliophysical Year 2007. Abu Dhabi and Al-Ain. United Arab Emirates. 20–23 November 2005.

Шимабокуро (Shimabukuro F.I.) // Red. O. Wait. M: Publisher "Mir". 1980.

Юровский Ю.Ф. // Кинем. и физ. небесн. тел. 2013. Т. 29. № 6. С. 68.