

РАДИОАСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

УДК 523.985.7-77

В. В. ДОРОВСКИЙ¹, В. Н. МЕЛЬНИК¹, А. А. КОНОВАЛЕНКО¹,
И. Н. БУБНОВ¹, А. А. ГРИДИН¹, Н. В. ШЕВЧУК¹,
И. С. ФАЛЬКОВИЧ¹, А. А. КОВАЛЬ¹, Б. П. РУТКЕВИЧ¹,
А. П. РЕЗНИК¹, Х. О. РУКЕР², М. ПАНЧЕНКО², А. С. БЕЛОВ¹,
А. Д. ХРИСТЕНКО¹, Г. В. КВАСОВ¹, С. Н. ЕРИН¹

¹ Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: melnik@ian.kharkov.ua

² Институт космических исследований Австрийской академии наук,
Шмидльштрассе, 6, г. Грац, 8042, Австрия
E-mail: helmut.rucker@oeaw.ac.at

НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО U-ВСПЛЕСКА В ПОЛОСЕ ЧАСТОТ 10–70 МГц С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОТЕЛЕСКОПА ГУРТ

Приведены результаты первых наблюдений спорадического радиоизлучения Солнца в полосе частот 10–70 МГц с помощью создаваемого в настоящее время Гигантского украинского радиотелескопа ГУРТ. Наблюдения в такой широкой полосе частот значительно повысило вероятность регистрации гармонических пар всплесков, т. е. всплесков, генерируемых на первой и второй гармониках электронной плазменной частоты.

Анализируется солнечный U-всплеск, зарегистрированный 8 августа 2012 г., который наблюдался в излучении основной (25 МГц) и второй (50 МГц) гармоник плазменной частоты. Определены основные параметры всплеска, среди которых наибольший интерес представляет опережение прихода второй гармоники относительно первой, которое составило 7.5 с. Предложена модель формирования разности времен прихода, в которой источник всплеска находится внутри магнитной арки с повышенной плотностью плазмы. В таком случае задержка формируется при распространении поперечной волны внутри арки за счет разницы в групповых скоростях волн на частотах первой и второй гармоник.

Ключевые слова: Гигантский украинский радиотелескоп, солнечные U-всплески, гармоническое отношение, время задержки, групповая скорость, высокие корональные арки

1. Введение

Солнечные U-всплески известны с 1958 г. [1] и в общем считаются разновидностью всплесков III типа, так как и у первых, и у вторых один и тот же агент возмущения (поток субрелятивистских электронов) и один и тот же механизм излучения (плазменный) [2]. Но в отличие от всплесков III типа, источники которых движутся вдоль открытых силовых магнитных линий, пучки электронов, ответственных за генерацию U-всплесков движутся по закрытым силовым

магнитным линиям – аркам, формируя на плоскости частота–время динамический спектр в форме латинской литеры U. При этом частота поворота конкретного U-всплеска определяется высотой арки, вдоль которой распространяются субрелятивистские электроны. Несмотря на то что арочные структуры имеют высоты от долей радиуса Солнца до нескольких радиусов, U-всплески в основном регистрируют в метровом и декаметровом диапазонах [1, 3]. Это свидетельствует о том, что условия для генерации электромагнитного излучения в арках создаются преимущественно на гелиоцентрических высотах примерно $(1.2 \div 5)R_{\odot}$, где R_{\odot} – радиус Солнца.

Известно, что при плазменном механизме излучения возможна генерация всплесков как

© В. В. Доровский, В. Н. Мельник, А. А. Коноваленко,
И. Н. Бубнов, А. А. Гридин, Н. В. Шевчук,
И. С. Фалькович, А. А. Коваль, Б. П. Руткевич,
А. П. Резник, Х. О. Рукер, М. Панченко, А. С. Белов,
А. Д. Христенко, Г. В. Квасов, С. Н. Ерин, 2013

на основной, так и на второй гармонике локальной плазменной частоты [4]. С точки зрения теории отношение частот всплесков, соответствующих первой и второй гармоникам в фиксированный момент времени, должно равняться 2 [4]. Наблюдения, однако, показывают, что для всех типов солнечных всплесков это отношение в подавляющем большинстве случаев находится в пределах $1.6 \div 1.8$, и всегда меньше 2 [5]. В случае со всплесками, спектры которых имеют наклон в плоскости частота–время, таких как, например, всплески III типа, данный диапазон значений отношения частот гармоник может быть связан как с реальным отношением частот первой и второй гармоник в точке излучения в один и тот же момент времени, так и с временной сдвижкой гармонически связанных всплесков. Однако для таких всплесков однозначно определить время запаздывания гармоник друг относительно друга по результатам наблюдений не представляется возможным в силу отсутствия на их динамических спектрах характерных точек, идентифицируемых как по частоте, так и по времени. Всплески U типа, имеющие хорошо идентифицируемую точку поворота, дают уникальную возможность оценить как реальное отношение частот гармоник, так и временную задержку между гармониками отдельно.

В настоящей работе приводятся результаты анализа параметров гармонической пары U-всплесков, зарегистрированной 8 августа 2012 г. Впервые наблюдения проводились на одной секции нового Гигантского украинского радиотелескопа (ГУРТ) [6, 7] в полосе частот $10 \div 70$ МГц. Определено отношение частот поворота всплесков на основной и второй гармониках плазменной частоты, а также время задержки прихода первой гармоники относительно второй. Высказано предположение, что наблюдаемая задержка прихода первой гармоники вызвана разностью групповых скоростей поперечных волн, соответствующих первой и второй гармоникам, в окрестностях области генерации, т. е. внутри арки.

2. Наблюдения

В 2012 г. впервые были проведены кратковременные сеансы наблюдений спорадического радиоизлучения Солнца в режиме сопровождения при

помощи одной секции радиотелескопа нового поколения ГУРТ, создаваемого на базе телескопа УТР-2 на территории радиоастрономической обсерватории им. С. Я. Брауде Радиоастрономического института НАН Украины в рамках целевой программы Национальной академии наук Украины.

Секция ГУРТ (рис. 1) является экспериментальной и представляет собой квадратную активную антенную решетку, состоящую из 5 рядов вдоль линии восток–запад по 5 диполей в каждом ряду. Расстояние между центрами диполей вдоль и поперек рядов равно 3.75 м. Все диполи, входящие в состав решетки, расположены на высоте 1.6 м над землей и ориентированы под углом 45° к меридиану.

Основные параметры антенной решетки:

- частотный диапазон – $10 \div 70$ МГц;
- сектор электрического сканирования – $\pm 70^\circ$ от зенита по обеим координатам;
- размеры решетки – 18.75×18.75 м;
- ширина диаграммы направленности на средней частоте диапазона (40 МГц) – $20^\circ \times 20^\circ$;
- превышение антенной температуры галактического фона над шумовой температурой антенного усилителя – > 9 дБ;
- динамический диапазон антенного усилителя – > 90 дБ относительно 1 мкВ.

Регистрация радиоизлучения велась с помощью цифрового спектрополяриметра DSPZ, имеющего два независимых канала с рабочей полосой $0 \div 33$ МГц. Для записи солнечного радиоизлучения во всей рабочей полосе радиотелескопа ГУРТ была использована схема, при которой один из двух каналов DSPZ вел регистрацию в полосе $10 \div 33$ МГц, а второй – в полосе $33 \div 66$ МГц. Полученные таким образом динамические спектры половинной ширины объединялись в один с помощью соответствующего программного обеспечения.

Несмотря на существенно меньшую, чем у УТР-2, эффективную площадь секции ГУРТ и ее широкую диаграмму направленности, в течение наблюдательной сессии были зарегистрированы как обычные всплески III типа, так и их разновидности, такие как солнечные U-всплески. Проведение наблюдений в широкой полосе частот $10 \div 70$ МГц резко повысило вероятность регистрации гармонически связанных пар всплесков.



Рис. 1. Секция ГУРТ на фоне южного плеча радиотелескопа УТР-2

Из всех наблюдавшихся в течение 14 дней всплесков наибольший интерес представляет U-всплеск, зарегистрированный 8 августа 2012 г. в верхней части частотного диапазона радиотелескопа. Всплеск имел хорошо развитую спадающую ветвь и частоту поворота 50 МГц. Максимальное превышение потока всплеска над уровнем фонового излучения наблюдалось в точке поворота и составило 17 дБ. Одновременно в нижней части частотного диапазона радиотелескопа также был зарегистрирован U-всплеск с частотой поворота около 25 МГц и превышением интенсивности над фоном 6 дБ (рис. 2). Двукратная разница между частотами поворота этих всплесков, а также почти одновременное их наблюдение указывает на то, что данные всплески могут являться гармонически связанной парой всплесков.

Наличие на динамическом спектре хорошо различимых точек поворота делает эту пару всплесков исключительно ценной с точки зрения возможности оценки реального гармонического отношения и реальной временной задержки прихода излучения первой гармоники относительно второй.

Одновременные наблюдения, выполнявшиеся на радиотелескопе УТР-2, показали превышение

сигнала над фоном для первой гармоники около 15 дБ на частоте 27 МГц. При этом поток радиоизлучения не превышал $3 \cdot 10^{-21} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$ (или 30 солнечных единиц потока, с. е. п.). Очевидно, что меньшее превышение всплеска над уровнем фона при наблюдениях на секции ГУРТ объясняется ее меньшей эффективной площадью (более широкой диаграммой направленности).

Скорости частотного дрейфа восходящих ветвей всплеска на обеих гармониках были несколько меньше, чем у окружающих всплесков III типа, что характерно для этого типа всплесков [8, 9]. Так, для первой гармоники скорость частотного дрейфа по данным наблюдений на ГУРТ и УТР-2 составила около -2.5 МГц/с (частота 31 МГц), а скорость дрейфа второй гармоники – около -7 МГц/с (частота 63 МГц). В обоих случаях наблюдаемые скорости дрейфа соответствуют радиальной скорости источника в короне (для модели короны Баумбаха–Аллена) $(0.11 \div 0.12)c$, где c – скорость света.

3. Обсуждение

Детальный анализ данной гармонической пары всплесков показывает, что в формировании видимого отношения частот первой и второй гармо-

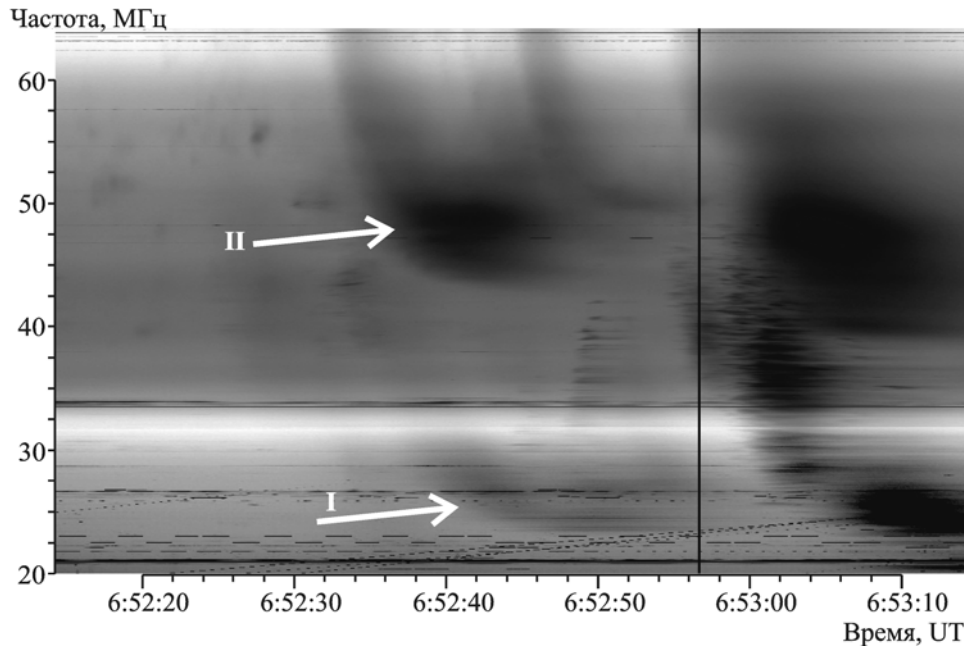


Рис. 2. U-всплеск с гармонической структурой: I – первая гармоника, II – вторая гармоника

ник решающий вклад вносит запаздывание прихода первой гармоники относительно второй. В обсуждаемом случае частоты точек поворота гармонических компонент равны соответственно 25 и 50 МГц. При этом изменение знака частотного дрейфа второй гармоники происходит на 7.5 с раньше, чем первой. Поскольку плазменный механизм излучения предполагает формирование основной и второй гармоник одновременно в одном и том же месте, наблюдаемая задержка может возникнуть при распространении электромагнитной волны от источника к наблюдателю.

Как известно, U-всплески связаны с потоками электронов, распространяющимися вдоль корональных арок. Изображения, полученные коронографом COR2, установленном на космическом аппарате “СТЕРЕО-A”, показывают, что во время регистрации всплеска наблюдались корональные арки с высотами 4–5 радиусов Солнца. Видимость самих арок в оптическом диапазоне (рис. 3) свидетельствует о том, что плотность и, вполне вероятно, температура плазмы внутри петли выше, чем в окружающей короне.

Таким образом, можно предположить, что источник U-всплеска находился внутри корональной арки с повышенной плотностью и температу-

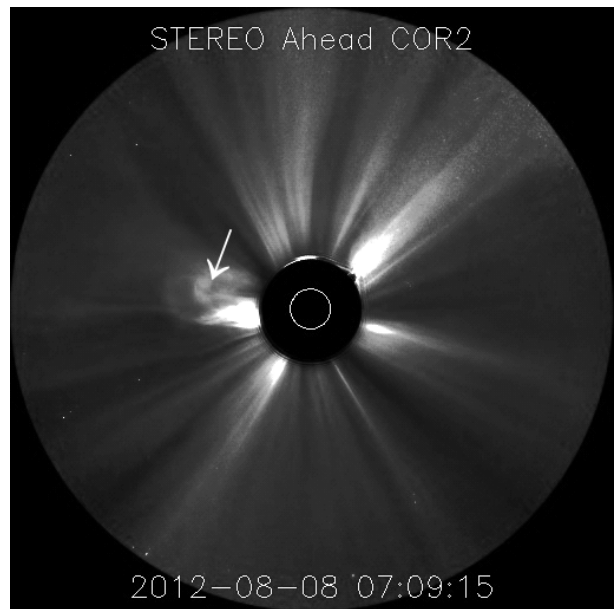


Рис. 3. Петлевые структуры (отмечены стрелкой), полученные на коронографе COR2, установленном на космическом аппарате “СТЕРЕО-A”

рой плазмы, а значит на значительно бóльшей гелиоцентрической высоте, чем обычный всплеск III типа на той же частоте излучения. В этом случае временная задержка первой гармоники относительно второй будет формироваться в основном при распространении электромагнитных

волн от источника до границы петли, т. е. там, где групповая скорость волны на частоте первой гармоники заметно меньше групповой скорости волны на частоте второй гармоники. За пределами петли, где плотность плазмы намного ниже, групповые скорости волн, соответствующих обоим гармоникам, можно считать приблизительно равными скорости света.

В общем случае время, требуемое электромагнитной волне для выхода за пределы магнитной петли, определяется как

$$t = \int_R^{R+\Delta R} \frac{dr}{V_{gp}(r)},$$

где R – гелиоцентрическая высота источника U-всплеска (высота петли), ΔR – толщина петли, r – текущее расстояние от поперечной волны до Солнца, V_{gp} – групповая скорость волны. Очевидно, что общее время прохождения петли поперечной волной будет зависеть от толщины петли и от профиля зависимости групповой скорости от расстояния до Солнца. Зависимость групповой скорости электромагнитной волны от расстояния определяется в свою очередь профилем плотности плазмы вдоль направления распространения. Очевидно, что поперечная волна, которая генерируется на частоте первой гармоники, равной электронной плазменной частоте, будет иметь меньшую групповую скорость, и, следовательно, ей потребуется больше времени для выхода за пределы петли.

Параметры плазмы внутри петли, при которых может формироваться наблюдаемая временная задержка первой гармоники относительно второй, будут определены в последующих работах.

4. Выводы

В настоящей работе представлен один из результатов первых наблюдений спорадического радиоизлучения Солнца с помощью радиотелескопа нового поколения ГУРТ в режиме сопровождения источника. Показано, что созданная секция нового радиотелескопа, состоящая из 5×5 турникетных вибраторов, может использоваться для регистрации потоков солнечного радиоизлучения в несколько десятков солнечных единиц потока. Регистрация гармонической пары U-всплесков

стала возможной благодаря широкой рабочей полосе радиотелескопа 10 ÷ 70 МГц.

Анализ динамического спектра U-всплеска показал наличие заметного запаздывания излучения первой гармоники относительно второй. Предложен механизм формирования временной задержки, при котором источник U-всплеска движется вдоль магнитной арки с повышенной плотностью плазмы, а временная задержка формируется за счет разницы групповых скоростей поперечных волн на частотах первой и второй гармоник при распространении их в теле магнитной петли.

Работа выполнена в рамках международного проекта SOLSPANET (F9P7-People-2010-IRSES).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maxwell A. and Swarup G. A New Spectral Characteristic in Solar Radio Emission // Nature. – 1958. – Vol. 181, Is. 4601. – P. 36–38.
2. Suzuki S. and Dulk G. A. Bursts of Type III and Type V. In: Solar radiophysics: Studies of emission from the sun at metre wavelengths (A87-13851 03-92). – Cambridge, New York: Cambridge University Press. – 1985. – P. 289–332.
3. Stone R. G. and Fainberg J. A U-Type Solar Radio Burst Originating in the Outer Corona // Sol. Phys. – 1971. – Vol. 20, Is. 1. – P. 106–111.
4. Melrose D. B. Plasma emission: A Review // Sol. Phys. – 1987. – Vol. 111, Is. 1. – P. 89–101.
5. Stewart R. T. Harmonic ratios of inverted-U type III bursts // Sol. Phys. – 1974. – Vol. 39, Is. 2. – P. 451–458.
6. Karlsson R., Rucker H. O., Mann G., Konovalenko A. A., Breitling F., Dorovskyy V. V., and Vocks C. Combined Radio Observations with LOFAR and the Giant Ukrainian Radio Telescope // Proc. of the 7th International Workshop on Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (PRE VII). – Graz (Austria). – September 15-17, 2010. – P. 513–520.
7. Bubnov I. N., Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Rucker H. O., Gridin A. A., Kalinichenko N. N., Reznik A. P., Stepin S. V., Mukha D. V., Dorovskyy V. V., and Lecacheux A. Tests of an Active, Broad-band Antenna Array // Proc. of the 7th International Workshop on Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (PRE VII). – Graz (Austria). – September 15-17, 2010. – P. 533–539.
8. Aschwanden M. J., Bastian T. S., Benz A. O., and Brosius J. W. Decimetric solar type-U bursts: VLA and PHOENIX observations // Astrophys. J. – 1992. – Vol. 391. – P. 380–392.
9. Fokker A. D. Trajectories followed by U-like solar radio bursts // Sol. Phys. – 1970. – Vol. 11, Is. 1. – P. 92–103.

*В. В. Доровський¹, В. М. Мельник¹, О. О. Коноваленко¹,
І. М. Бубнов¹, А. О. Грідін¹, М. В. Шевчук¹,
І. С. Фалькович¹, А. О. Коваль¹, Б. П. Руткевич¹,
О. П. Резник¹, Г. О. Рукер², М. Панченко², О. С. Белов¹,
О. Д. Христенко¹, Г. В. Квасов¹, С. М. Єрін¹*

¹Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна
²Інститут космічних досліджень Австрійської
академії наук,
Шмідльштрассе, 6, м. Грац, 8042, Австрія

СПОСТЕРЕЖЕННЯ СОНЯЧНОГО U-СПЛЕСКА У СМУЗІ ЧАСТОТ 10–70 МГц З ВИКОРИСТАННЯМ РАДІОТЕЛЕСКОПА ГУРТ

Наведені результати перших спостережень спорадичного сонячного радіовипромінювання в смузі частот 10 ÷ 70 МГц за допомогою наразі створюваного Гігантського українського радіотелескопу ГУРТ. Спостереження в такій широкій смузі частот значно підвищило вірогідність реєстрації гармонічних пар сплесків, тобто сплесків, генерованих на першій та другій гармоніках електронної плазмової частоти.

Аналізується сонячний U-сплеск, зареєстрований 8 серпня 2012 р., що спостерігався у випромінюванні основної (25 МГц) та другої (50 МГц) гармонік плазмової частоти. Визначено основні параметри сплеску, серед яких найбільший інтерес має випередження приходу другої гармоніки відносно першої, що становило 7.5 с. Запропоновано модель формування різниці у часі приходу, в якій джерело сплеску знаходиться усередині магнітної арки з підвищеною щільністю плазми. В такому разі затримка формується з поширенням поперечної хвилі усередині арки за рахунок різниці у групових швидкостях хвиль на частотах першої та другої гармонік.

*V. V. Dorovskyy¹, V. M. Melnyk¹, A. A. Konovalenko¹,
I. N. Bubnov¹, A. A. Gridin¹, N. V. Shevchuk¹,
I. S. Falkovych¹, A. A. Koval¹, B. P. Rutkevych¹, A. P. Reznik¹,
H. O. Rucker², M. Panchenko², A. S. Belov¹,
A. D. Khrystenko¹, G. V. Kvasov¹, S. N. Yerin¹*

¹Institute of Radio Astronomy, National Academy
of Sciences of Ukraine,
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine
²Institut für Weltraumforschung der Österreichischen
Akademie der Wissenschaften,
6, Schmiedlstrasse, Graz, 8042, Austria

OBSERVATIONS OF THE TYPE U BURST IN WITHIN 10–70 MHz WITH THE GURT RADIO TELESCOPE

The results of the first observations of solar sporadic radio emission within 10 – 70 MHz with the Giant Ukrainian Radio Telescope (GURT), now under construction, are presented. Observations in such a wide range of frequencies allowed considerable increase of the probability of harmonic pairs recording, where a harmonic pair means the pair of bursts generated at the fundamental and second harmonics of the electron plasma frequency.

The solar U-burst observed on 8 August, 2012 is analyzed. It was recorded at the fundamental (25 MHz) and second (50 MHz) harmonics of plasma frequency. The burst's key features have been determined. Among these, the time delay between the fundamental and harmonic emissions was of especial interest. The fundamental emission delayed for 7.5 s with respect to the harmonic. The model of occurrence of such a delay is proposed, in which the emission source is located inside the magnetic loop containing the plasma of increased density. In this case, the delay appears due to the difference in group velocities of electromagnetic waves at fundamental and harmonic frequencies.

Стаття постуила в редакцію 15.04.2013