О РАСЩЕПЛЕНИИ ПОЛОС НА ДИНАМИЧЕСКИХ СПЕКТРАХ РАДИОВСПЛЕСКОВ II ТИПА

Цап Ю.Т.^{1,2}, Исаева Е.А.³, Копылова Ю.Г.²

¹КрАО РАН, п. Научный, Крым, Россия

²ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков, Украина

ON THE SPLITTING OF BANDS ON THE DYNAMIC SPECTRA OF TYPE II RADIO BURSTS

Tsap Yu.T.^{1,2}, Isaeva E.A.³, Kopylova Yu.G.²

¹Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea

²Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg

³Radio Astronomy Institute of the NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine

Based on the analysis of dynamic spectra of solar flare radiation in the meter wavelength range obtained with RSTN the evolution of the split parameters of type II solar radio bursts is considered. The relative band-splitting behaves non-monotonically and its values vary in a wide range from 0.1 to 3. This can be explained by the generation of electromagnetic waves near fundamental and second harmonics of plasma frequency and the density jump in the vicinity of a shock front. It has been shown that the joint action of these two mechanisms can result in the change of the relative band-splitting from 0 to 3. Diagnostics of the solar coronal plasma and magnetic field within the framework of a model suggested the relationship between the band-splitting and the density jump is discussed.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-427-430

В настоящее время не вызывает сомнений, что солнечные радиовсплески II типа генерируются в области фронта ударных волн [1–4]. Часто на динамических спектрах можно наблюдать две близко расположенные полосы, ведущие себя схожим образом как по интенсивности, так и скорости дрейфа на протяжении десятков минут [2–7]. По разным оценкам, в дециметровом и метровом диапазонах длин волн до 30% от общего числа событий обнаруживают расщепление на высокочастотную и низкочастотную компоненты с характерным значением отношения частот 1.9 ± 0.3 [8]. Усреднение характеристик частотного расщепления не всегда адекватно отражает природу рассматриваемого явления и может приводить к некорректным выводам. В связи с чем чрезвычайно плодотворным может оказаться изучение эволюции полос излучения радиовсплесков. Расщепление обычно характеризуют относительной величиной $b = (f_2 - f_1)/f_1$, где f_1 и f_2 – частоты, соответствующие низкочастотной (1) и высокочастотной (2) компоненте (см. также [5, 6]). Наблюдаемое расщепление ассоциируют с двумя механизмами. Если b близко к единице, то говорят об излучении на первой и второй гармониках в области, находящейся либо впереди, либо

позади фронта ударной волны [9]. Предполагается, что неравновесные электроны возбуждают ленгмюровские волны L вблизи фронта на частоте близкой к плазменной f_p , которые затем трансформируются в электромагнитные волны T . В результате их рассеяния ($L \rightarrow T(f_p) + S$) возбуждается первая гармоника, а вследствие слияния ($L + L' \rightarrow T(2f_p)$) – вторая, где S соответствует ионно-звуковой моде [3]. Если $b \ll 1$, то его связывают с генерацией электромагнитных волн на одной гармонике, но по обе стороны фронта ударной волны. Именно этот механизм обычно и привлекают для диагностики плазмы и магнитных полей в короне Солнца [4, 7, 9–12]. Хотя теоретические оценки свидетельствуют скорее в пользу более эффективной генерации ленгмюровских волн перед фронтом ударной волны [13], все же их нельзя считать до конца убедительными. Вследствие этого можно предположить, что солнечные радиовсплески II типа могут одинаково эффективно генерироваться на разных гармониках как впереди, так и позади фронта ударной волны. В настоящей работе проводится анализ наблюдаемой эволюции относительного расщепления полос b в метровом диапазоне длин волн, рассматриваются спектральные особенности солнечных радиовсплесков II типа и обсуждаются существующие механизмы генерации их тонкой спектральной структуры.

Мы использовали данные наблюдений, полученные с помощью наземной сети RSTN (*Radio Solar Telescope Network*). Анализировались оригинальные записи динамических спектров в диапазоне 25–180 МГц солнечного радиоспектрографа SRS (*Solar Radio Spectrograph*). Исследуемая выборка содержала 112 радиовсплесков II типа, связанных с протонными событиями, за период с 24.11.2000 по 20.12.2014.

Слева: динамический спектр радиовсплеска II типа события 31.05.2003, полученный с помощью радиоспектрографа SRS в Learmonth (Западная Австралия). Справа: зависимость относительного расщепления от времени для этого всплеска.

На рисунке представлен пример динамического спектра, в котором четко выделяются две частотные ветви. Для их аппроксимации использовалась регрессионная модель из работы [14]. Нулевой момент времени

принимался равным началу радиовсплеска на частоте 180 МГц для высокочастотной ветви. Ширина расщепления между полосами характеризовалась относительным расщеплением $b_i = (f_{i,2} - f_{i,1})/f_{i,1}$, где $f_{i,1}$ и $f_{i,2}$ – значения частот, соответствующие моменту времени t_i . На рисунке показаны характерные примеры зависимости b_i от времени t_i . Значения t_i определялись, исходя из шага по частоте, равного 10 МГц. Статистический анализ показал, что с течением времени b_i меняется в широких пределах от 0.1 до 3, и может вести себя немонотонным образом. Если последнее обстоятельство нетрудно связать, например, с изменением альвеновского числа Маха [9], то обнаруженный диапазон значений b_i требует более детального анализа.

Рассмотрим сначала наиболее важный случай, предположив, что генерация радиоизлучения происходит как впереди, так и позади фронта ударной волны на одной и той же гармонике, где электронная концентрация соответственно равна n_1 и n_2 . Поскольку при реализации плазменного механизма излучения частота электромагнитных волн $f \propto \sqrt{n}$, для относительного расщепления имеем формулу $b = \sqrt{n_2 / n_1} - 1$, которая лежит в основе метода диагностики солнечной короны [10]. Для ударных волн можно принять максимальное значение $n_2/n_1 = 4$ [12,15]. Если расщепление радиовсплесков II типа обусловлено разностью плотностей впереди и позади ударного фронта, то значения b будут заключены в промежутке от 0 до 1. Отметим, что $b \rightarrow 1$ в предельном случае, когда $n_2/n_1 \rightarrow 4$. Поэтому даже при $f_2/f_1 \approx 2$ не следует исключать, что излучение происходит на одной гармонике. Между тем рассматриваемая модель радиоизлучения не позволяет объяснить наблюдаемое на динамических спектрах расщепление компонент радиовсплесков II типа с $b \geq 1$.

Теперь рассмотрим случай, когда генерация электромагнитных волн может происходить на разных гармониках по обе стороны фронта ударной волны. Чтобы оценить максимальное значение b , будем считать, что генерация радиоизлучения происходит на второй гармонике позади фронта ударной волны, а на первой – впереди последнего. Принимая во внимание $n_2 > n_1$, имеем $b = 2\sqrt{n_2 / n_1} - 1$. При $n_2/n_1 = 4$, получим, что максимальное значение $b = 3$. Для оценки минимального значения b будем исходить из предположения, что генерация электромагнитного излучения на второй гармонике происходит впереди фронта, а на первой – позади его. В этом случае $b = \left| \sqrt{n_2 / n_1} / 2 - 1 \right|$. Знак модуля отражает тот факт, что на динамических радиоспектрах высокочастотная компонента может генерироваться как впереди, так и позади фронта ударной волны. Вновь полагая $n_2/n_1 = 4$, получим $b = 0$.

Таким образом, в случае генерации электромагнитных волн в разных областях относительно фронта ударной волны и на разных гармониках должно выполняться неравенство: $0 < b < 3$, что хорошо согласуется с

наблюдениями. Поскольку b может быть и гораздо меньше единицы, то его значение не может служить веским доводом в пользу связи наблюдаемого расщепления лишь со скачком плотности на фронте ударной волны. Поэтому метод диагностики плазмы и магнитного поля короны, предполагающий генерацию радиовсплесков II типа впереди и позади фронта ударной волны на одной гармонике [4, 7, 9–12], может приводить к некорректным выводам.

Из полученных результатов следует, что наблюдаемый на динамических спектрах метровых радиовсплесков II типа диапазон значений относительного расщепления полос b не удастся объяснить только изменением скачка плотности на фронте ударной волны. Приходится предполагать, что генерация всплесков может эффективно происходить не только впереди, но и позади фронта ударной волны. Определенный вклад способна вносить и неоднородность источника, приводящая к более сильному поглощению электромагнитных волн в низкочастотной или высокочастотной полосе излучения на первой гармонике [16]. Однако при таком подходе не удастся объяснить преобладание на динамических спектрах радиовсплесков II типа двухполосной структуры. При этом нельзя также исключать важную роль иных сценариев генерации радиовсплесков II типа. Вопрос о природе расщепления компонент солнечных радиовсплесков II типа требует дальнейших исследований.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ №18-02-00856-а, Минобрнауки (НИР №0831-2019-0006) и программы ПРАН П-12 “Вопросы происхождения и эволюции Вселенной”.

Литература

1. *Zheleznyakov, V.V.* Radio emission of the Sun and planets. – Oxford: Pergamon Press, 1970.
2. *Wild, J.P., Smerd, S.F.* // ARA&A, 1972, 10, 159.
3. *Nelson, G.J., Melrose, D.B.* Type II bursts. Eds. McLean, D.J., Labrum – N.R. 1985, p.333.
4. *Vasanth, V. et al.* // Solar Phys., 2014, 289, 251.
5. *Mann, G. et al.* // A&A, 1995, 295, 775.
6. *Mann, G., et al.* // A&AS, 1996, 119, 489.
7. *Zimovets, I. et al.* // A&A, 2012, 547, id.A6.
8. *Lengyel-Frey, D., Stone, R.G.* // J. Geophys. Res., 1989, 94, 159L.
9. *Vrsnak, B. et al.* // A&A, 2001, 377, 321.
10. *Smerd, S.F. et al.* // Proc. IAU Symp., 1974, 57, 389.
11. *Smerd, S.F. et al.* // ApL, 1975, 16, 23.
12. *Vrsnak, B. et al.* // A&A, 2002, 396, 673.
13. *Du, G. et al.* // ApJ, 2014, 793, P.L39.
14. *Isaeva, E.A., Tsap, Yu.T.* // Odessa Astron. Publ., 2017, 30, 222.
15. *Прут, Э.Р.* Солнечная магнитогидродинамика. – М: Мир, 1985. – 589 с.
16. *Melrose, D.B.* // Solar Phys., 1987, 111, 89.