

ПЕРВЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДВУХ ИСТОЧНИКОВ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

Д.А. Жданов, В.Г. Занданов

FIRST MICROWAVE SPECTRAL OBSERVATION OF TWO SOURCES DURING THE SOLAR FLARE EVENT

D.A. Zhdanov, V.G. Zandanov

Впервые микроволновые спектры двух источников получены одиночной антенной. Мы рассмотрели солнечную вспышку, произошедшую 29 июня 2012 г. в 04:13 UT. Интерферометрические данные ССРТ показали наличие двух микроволновых источников – основного и удаленного. Микроволновый спектр был получен на спектрополяриметре 4–8 ГГц.

We present the first microwave spectral observations of two sources obtained single dish antenna. The event was occurred 29 June 2012 in 04:13 UT. Obtained SSRT interferometric observations showed availability two source both the main source and the remote source. The microwave spectrum was obtained from 4–8 GHz spectropolarimeter.

Введение

В настоящее время бурно развивается новое направление в солнечной физике – динамическая изображающая радиоспектроскопия (см., например, [Lesovoi et al., 2012; Yan et al., 2009]). Изображающие микроволновые инструменты дают принципиально новые представления о процессах, происходящих во время солнечных вспышек, и методы измерения параметров вспышечной плазмы [Bastian et al., 1998]. Использование таких инструментов позволит отслеживать траектории распространения электронных пучков вдоль корональных петель [Chen et al., 2013]. Известны события, в которых после основного микроволнового всплеска наблюдался удаленный вторичный микроволновый всплеск [Nakajima et al., 1985; Hanaoka, 1996, 1999]. Причиной возникновения таких всплесков наиболее вероятно могут быть быстрые электроны, распространяющиеся вдоль корональных петель со скоростями порядка 0.3 скорости света [Kai, 1969]. Подтверждением этой теории служат наблюдения метровых всплесков III типа с прямым и/или обратным дрейфом во время всплесков [Tang, Moore, 1982]. В этой работе мы детально проанализировали солнечную вспышку, произошедшую 29 июня 2012 г. Используя данные ССРТ и спектрополяриметра 4–8 ГГц [Zhdanov, Zandanov, 2011], мы впервые получили микроволновые спектры для двух пространственно разнесенных источников.

Наблюдения

Солнечная вспышка класса C4.6 произошла 29 июня 2012 г. в активной области 11515, максимум рентгеновского потока, по данным GOES, зарегистрирован в 04:14:08 UT. Перед началом вспышки двумерные наблюдения на ССРТ показывали наличие двух ярких радиоисточников, расположенных в направлении восток–запад. Во время всплеска одномерные наблюдения на ССРТ в направлении восток–запад (EW) показывали наличие двух источников – восточного (S_e) и западного (S_w), угловое расстояние между которыми составляло 44 угл. сек. В то же время в направлении север–юг (NS) источники не разрешались. По данным спектрополяриметра 4–8 ГГц, микроволновый спектр всплеска имел сложную

структуру. Микроволновое излучение сопровождалось жестким рентгеновским излучением (HXR) с энергией до 100 кэВ, профиль HXR с временным разрешением 64 мс получен с космического аппарата Fermi. По данным космического аппарата RHESSI, существовал только один источник HXR, который совпадал с микроволновым источником S_e . Используя магнитограмму HMI (SDO), мы определили, что источник S_w расположен вблизи лидирующего магнитного пятна положительной полярности. Кроме того, в диапазоне от 400 до 80 МГц на спектрографе Callisto обнаружены группы всплесков III типа, дрейфующих в сторону низких частот.

Анализ

Рассмотрим временные профили быстроменяющихся компонент HXR, S_e - и S_w -источников [Lin, Johns, 1993; Costa, Rosal, 2005], представленные на рис. 1. Кривая S_e совпадает пик в пик с кривой HXR, пики имеют крутые фронты роста и спада. Наоборот, временной профиль кривой быстроменяющейся компоненты удаленного источника сильно сглажен. Тем не менее общий профиль кривой S_w в некоторой степени схож с профилем кривой S_e . Это можно было бы объяснить тем, что генерация микроволнового излучения в S_e - и S_w -источниках вызвана одной популяцией электронов. В самой деле, угловое расстояние между источниками составляет около 44 угл. сек. С учетом проекционного эффекта отметить, что вспышка расположена близко к восточному лимбу ($-628''$, $-307''$), реальное расстояние между источниками S_e и S_w может достигать 74 угл. сек. В результате рассеяния на кулоновских столкновениях происходит уширение первоначального распределения электронов. Профиль микроволнового излучения, соответствующего такому распределению, будет иметь сглаженную форму. Отсутствие удаленного рентгеновского источника может объясняться сильным магнитным полем вблизи источника S_w .

Мы оценили время пролета пучка электронов с энергиями 100 кэВ от источника S_e к источнику S_w по возможной огромной корональной петле. В приближении того, что петля имеет форму идеальной полуокружности, при расстоянии между источниками около 55 Мм время пролета составит около 1 с.

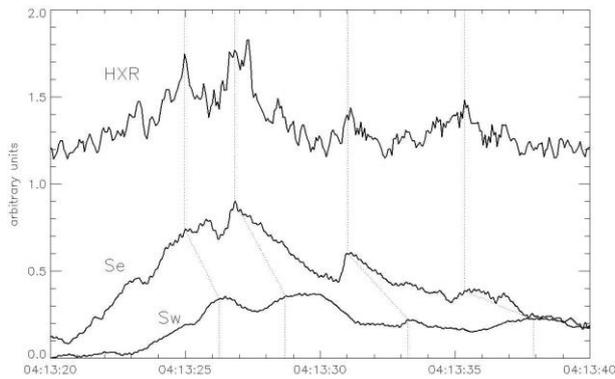


Рис. 1. Временные профили быстроменяющихся компонент излучения: жесткий рентген с энергиями 30–100 кэВ (HXR), микроволновые источники S_e и S_w (5.7 ГГц). Пунктирными линиями показаны главные пики.

Однако для электронов с энергиями 10 кэВ на преодоление того же расстояния уже потребуется более 2.5 с. В расчетах мы учитываем спиральную траекторию полета электронов, а также спиральность магнитных силовых линий введением коэффициента 0.54 [Aschwanden, 1998]. Оценки времени пролета не противоречат наблюдениям, поскольку задержки между главными пиками на временных профилях источников S_e и S_w составляют около 2–3 с.

На рис. 2 представлены динамические микроволновые спектры, полученные на спектрополяриметре 4–8 ГГц. Видно, что спектры быстроменяющихся компонент круговых поляризаций (левой – LCP, правой – RCP) различаются как по временному ходу, так и по спектру. Мы заметили, что извлеченный из динамического спектра LCP временной профиль на частоте 5.7 ГГц совпадает с временным профилем источника S_e , в то время как извлеченный из динамического спектра RCP временной профиль на частоте 5.7 ГГц совпадает с временным профилем источника S_w . Заметим, что временные профили источников получены также на частоте 5.7 ГГц (рабочая частота ССРТ). Более того, при детальном рассмотрении мы видим, что пики временного профиля источника S_e совпадают по времени со всплесками не только на динамическом спектре LCP, но также и на RCP-спектре, т. е. излучение быстроменяющейся компоненты источника S_e слабо поляризовано или не поляризовано вовсе. С другой стороны, пики временного профиля источника S_w ясно видны только на динамическом спектре RCP и не видны в спектре LCP, т. е. излучение быстроменяющейся компоненты источника S_w имеет правую поляризацию, что соответствует X-моду излучения. Кроме того, широкополосные всплески, отнесенные к первичному источнику S_e , имеют более жесткий спектр, чем всплески, имеющие отношение к источнику S_w . Изменение жесткости спектра согласуется с высказанным выше предположением о дисперсии электронного пучка.

Заключение

Анализ события показал, что наиболее вероятным сценарием возникновения вторичного микроволнового источника является распространение ускоренных электронов, возникающих в результате присоединения магнитных силовых линий при эрупции, вдоль корональной петли. В самом деле, задержки между

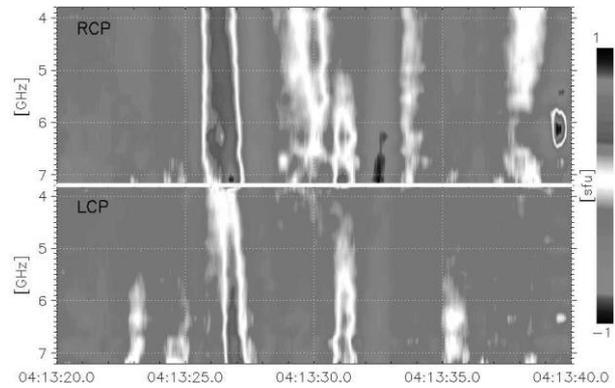


Рис. 2. Динамические микроволновые спектры быстроменяющихся компонент, полученные на спектрополяриметре 4–8 ГГц. Вверху – RCP-компонента, внизу – LCP-компонента.

пиками первичного источника и удаленного источника и их форма хорошо объясняются распространением электронных пучков с энергиями менее 100 кэВ. Мы впервые показали, что с помощью спектральных наблюдений, сделанных одной антенной, с перекрывающимися двумерными наблюдениями (ССРТ), можно выделить спектры двух солнечных источников. Такие спектральные наблюдения позволили нам утверждать, что широкополосные всплески удаленного источника вызваны менее энергичными электронами, чем всплески, имеющие отношение к первичному источнику. Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Aschwanden M.J. Deconvolution of directly precipitating and trap-precipitating electrons in solar flare hard X-rays. I. Method and tests // *Astrophys. J.* 1998. V. 502. P. 455–467.
 Bastian T.S., Benz A.O., Gary D.E. Radio emission from solar flares // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1998. V. 36. P. 131–188.
 Chen B., Bastian T.S., et al. Tracing electron beams in the sun's corona with radio dynamic imaging spectroscopy // *Astrophys. J. Lett.* V. 763. P. 21–27.
 Costa J.E.R., Rosal A.C. Microwave emission from the trapped and precipitated electrons in solar burst // *Astronom. Astrophys.* 2005. V. 436. P. 347–353.
 Hanaoka Y. Flares and plasma flow caused by interacting coronal loops // *Solar Phys.* 1996. V. 165, Iss. 2. P. 275–301.
 Hanaoka Y. High-energy electrons in double-loop flares // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 1999. V. 51. P. 483–496.
 Kai K. Correlated bursts at distant sources on the Sun // *Proc. Astron. Soc. Australia.* 1969. V. 1. P. 186–187.
 Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V. The multifrequency siberian radioheliograph // *Solar Phys.* 2012. V. 280, iss. 2. P. 651–661.
 Lin R.P., Johns C.M. Two accelerated electron populations in the 1980 June 27 solar flare // *Astrophys. J. Lett.* 1993. V. 417. P. 53–56.
 Nakajima H., et al. Microwave and X-ray observations of delayed brightenings at sites remote from the primary flare locations // *Astrophys. J.* 1985. V. 288. P. 806–819.
 Tang F., Moore R.L. Remote flare brightenings and type III reverse slope bursts // *Solar Phys.* 1982. V. 77. P. 263–276.
 Yan Y., et al. The Chinese Spectral Radioheliograph–CSRH // *Earth, Moon, and Planets.* 2009. V. 104, iss. 1–4. P. 97–100.
 Zhdanov D.A., Zandanov V.G. Broadband microwave spectropolarimeter // *Cent. Eur. Astrophys. Bull.* 2011. V. 35. P. 223–228.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия