СУБ-ТЕРАГЕРЦОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТУБЕРАНЦЕВ НА ЧАСТОТАХ 93 И 140 ГГц

Смирнова В.В.¹, Рыжов В.С.², Цап Ю.Т.¹

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия

SUB-TERAHERTZ OBSERVATIONS OF SOLAR PROMINENCES AT 93 AND 140 GHz

Smirnova V.V.¹, Ryzhov V.S.², Tsap Yu.T.¹

¹Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, Crimea, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

New sub-THz observations of a solar prominence obtained on March 30, 2021 at frequencies of 93 and 140 GHz were carried out based on the data of the RT-7.5 radio telescope operated by Bauman Moscow State Technical University. A new technique for prominence identification on the sub-THz intensity maps is proposed. The radio flux density of the analyzed prominence was calculated at frequencies of 93 and 140 GHz with values of 16 ± 4 s.f.u. and 34 ± 8 s.f.u., respectively. The minimum value of the prominence thickness along the line of sight (≈ 100 km), at which its emission becomes optically thick was estimated.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-241-244

Введение

Солнечные протуберанцы – холодные и плотные образования, окруженные горячей короной. На лимбе они имеют вид протяженных выступов разной формы, тогда как на солнечном диске они представляют собой темные волокна. Температура протуберанцев $\sim 10^4$ К, плотность варьируется в пределах $10^{10} - 10^{12}$ см⁻³ [1, 2]. Наблюдения в суб-терагерцовом (суб-ТГц) диапазоне дают возможность напрямую получать параметры плазмы протуберанцев на уровне хромосферы. Высота протуберанцев, оцененная по сантиметровым и миллиметровым наблюдениям, соответственно равна 3×10^{10} см [3] и $25 \pm 5 \times 10^8$ см [4].

Радиотелескоп РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана является единственным в России действующим инструментом, который ведет патрульные наблюдения Солнца в суб-ТГц диапазоне одновременно на частотах 93 и 140 ГГц. Диаграмма направленности антенны на частоте 93 ГГц составляет 2,5', на частоте 140 ГГц – 1,5', а временное инструмента разрешение достигает 0,25 с. [5].

Цель данной работы состояла в следующем: 1) провести анализ наблюдений протуберанца на частотах 93 и 140 ГГц, полученных с помощью нового метода выделения его на солнечном лимбе; 2) предложить ин-

терпретацию полученных результатов и провести диагностику этого магнитного образования.

Наблюдения и результаты

На рис. 1a и 1b представлены изображения протуберанца в линии $304 \text{ \AA}$ (AIA/SDO) и на частоте 93 ГГц [b] (РТ-7,5). Карты распределения интенсивности радиоизлучения были получены методом растрового сканирования диска Солнца в течение 12 минут. На исходной карте (рис. 1b) отклик от протуберанца очень слабый из-за определяющего вклада в мм-излучение фоновой компоненты.

Рис. 1. Изображение протуберанца в линии $304 \text{ \AA}$ [a] и на частоте 93 ГГц [b].

Для отождествления исследуемого протуберанца на радиоизображениях был предложен метод разложения исходной карты на концентрические «виртуальные» сканы. Данный метод позволяет эмпирически выделить источники на солнечном лимбе с учетом излучения диска.

Рис. 2. Пример «виртуальных» сканов, полученных из полной карты [a], и фрагмент этих же сканов с выделенным протуберанцем [b].

На рис. 2а представлен пример четырех концентрических сканов, полученный из полной карты солнечного диска. Путём математической обработки был получен 61 концентрический скан с радиальным шагом 6". Скан № 0 лежал на лимбе, скан № 60 имел радиус $R_{\text{sun}} + 6'$, где $R_{\text{sun}} = 16,3'$ – радиус солнечного диска. Каждый скан был сглажен гауссовым окном шириной 4° . Было выбрано опорное радиальное направление $w = 30^\circ$ (при отсчёте угла от северного полюса Солнца по часовой стрелке) и создан опорный скан. Из каждого скана была вычтена постоянная составляющая, определяемая из опорного скана при соответствующем расстоянии от лимба. Фрагменты сканов, соответствующие диапазону радиальных направлений $w = 30 \dots 80^\circ$, в которых наблюдался исследуемый протуберанец, показаны на рис. 2б.

Рис. 3. а – карты распределения плотности потока радиоизлучения: 93 ГГц (сверху) и 140 ГГц (снизу); б – интенсивность в линии $304 \text{ \AA}$ (изолинии соответствуют значениям плотности потока радиоизлучения протуберанца на частоте 93 ГГц); в – спектр плотности потока радиоизлучения протуберанца.

В результате анализа виртуальных сканов были получены карты распределения плотности потока радиоизлучения на частотах 93 и 140 ГГц, рис. 3а. Ошибки используемой методики с учетом параметров антенны составили $\sim 10\%$. На рис. 3б показано изображение диска Солнца в линии $304 \text{ \AA}$, на которое наложены контуры со значениями плотности потока протуберанца на частоте 93 ГГц. Плотность потока радиоизлучения на частоте 93 ГГц составляла 16 ± 4 с.е.п., на частоте 140 ГГц – 34 ± 8 с.е.п. Относительная погрешность оценки плотности потока радиоизлучения составила $\sim 23\%$. Спектр плотности потока исследуемого протуберанца представлен на рис. 3в.

Исходя из полученных результатов, можно оценить оптическую толщину наблюдаемого протуберанца, исходя из формулы Рэлея-Джинса, согласно которой интенсивность излучения

$$I = \frac{k_B T_b \nu^2}{c^2},$$

где T_b – яркостная температура, k_B – постоянная Больцмана, c – скорость света, ν – частота излучения.

Решение уравнения переноса излучения:

$$\frac{dT_b}{d\tau} = -T_b + T,$$

где $d\tau = k_{ff}dl$ – оптическая толщина источника вдоль луча длины dl и k_{ff} – коэффициент поглощения, полагая, эффективную температуру $T \approx const$, можно представить в виде

$$T_b = T(1 - e^{-\tau}).$$

Спектральный индекс потока радиоизлучения

$$\alpha = \frac{\log\left(\frac{F_{140}}{F_{93}}\right)}{\log\left(\frac{140}{93}\right)} = 1.9$$

предполагает, что излучение – оптически толстое. Поскольку

$$d\tau = k_{ff}dl = \frac{Kn_e^2}{T^{2/3}\nu^2}dl, \text{ где } K = 0.2 [6], \text{ то, как нетрудно показать, минимальная}$$

толщина l , при которой излучение протуберанца будет оптически толстым ($\tau > 1$), для концентрации электронов $n_e = 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $T = 10^4 - 10^5 \text{ К}$ составляет $\approx 100 \text{ км}$.

В работе [7] была выполнена диагностика протуберанца на длинах волн около 1 мм. Авторы получили значение оптической толщины 0.12 при заданной концентрации частиц 10^{10} см^{-3} . В работе [4] была оценена оптическая толщина на длине волны 8 мм $\tau = 0.32$. В нашем случае излучение протуберанца на частоте 93 ГГц является оптически толстым, что согласуется с результатами работы [7], но противоречит результатам работы [4]. На наш взгляд, это можно объяснить некорректной оценкой яркостной температуры протуберанца.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (N20-52-26006) и Минобрнауки (НИР №0831-2019-0006).

Литература

1. Pérez-León J.E., Hiriart D., Mendoza-Torres J.E. // RMAA, 2013, 49, 3.
2. Hillier A., Morton R.J., Erdélyi R. // ApJl, 2013, 779, 16.
3. Jeičič S., Heinzel P. // Proc. ASP, Conf. Ser., 2007, 368, 325.
4. Apushkinskii, G.P., Nesterov, N.S., Topchilo N.A., Tsyganov A.N. // Astron. Zh., 1990, 67, 1053.
5. Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Morgachev A.S., et al. // Adv. Space. Res., 2016, 57, 7, 1449.
6. Bastian, T.S., Ewell M.W., Zirin H. // ApJ, 1993, 418, 510.
7. Dulk G.A. // Annual Rev. Astron. Astrophys., 1985, 23, 169.