ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГАРМОНИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ЮПИТЕРА В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

Шапошников В.Е.¹, Зайцев В.В.¹, Симонова Т.В.²

¹Институт прикладной физики, Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный университет, Нижний Новгород, Россия

INTERPRETATION OF HARMONIC STRUCTURE IN JOVIAN DECAMETRIC RADIATION

Shaposhnikov V.E.¹, Zaitsev V.V.¹, Simonova T.V.²

¹Institute of applied physics, Nizhny Novgorod, Russia

²University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

Possible interpretation of the observed harmonic structure in Jovian decametric radiation is considered. The interpretation is based on the effect of double plasma resonance (DPR) on ion cyclotron harmonics. According to the proposed model, in the upper ionosphere of Jupiter in those regions of an extended source where the DPR condition with one of the harmonics of the ion cyclotron frequency is satisfied, ion cyclotron waves are effectively excited at the frequency of the lower hybrid resonance. The observed electromagnetic radiation with a quasi-harmonic structure arises due to the scattering of ionic cyclotron waves by suprathermal electrons. Based on the VIP4 magnetic field model, the longitudes at which the source of the discussed burst of radiation can be located are determined. Estimates of the plasma density and its height distribution in the source are obtained.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-349-352

На динамических спектрах Ио-связанного декаметрового радиоизлучения наблюдалась структура, пример которой приведен на рис. 1, в форме квази-эквидистантных полос повышенной и пониженной яркости, дрейфующих синхронно во времени [1]. Эта структура очень похожа на структуру, обнаруженную в спектре широкополосного километрового радиоизлучения Юпитера (bКОМ) во время полета КА «Кассини» [2], и на «зебра структуру» (ZP) в солнечном радиоизлучении (см., например, [3] и приведенную там литературу).

Рис. 1.

Общепринято, что декаметровое радиоизлучение Юпитера генерируется благодаря электронному циклотронному мазеру на частотах вблизи локальной циклотронной частоты электронов.

Однако в рамках электронного циклотронного мазера получить излучение с квазигармонической структурой типа «зебра» не представляется возможным.

Теоретические работы, в которых обсуждается происхождение «зебра структуры», в основном относятся к солнечному радиоизлучению. Наиболее развитая теория происхождения «зебра структуры» в солнечном радиоизлучении основана на эффекте двойного плазменного резонанса (DPR) на гармониках электронной циклотронной частоты. В физике плазмы двойным плазменным резонансом на электронных циклотронных гармониках называется совпадение частоты верхнего гибридного резонанса $f_{UH} = \sqrt{f_{Be}^2 + f_{Le}^2}$ с одной из гармоник электронной циклотронной частоты sf_B . Здесь f_{Le} и f_{Be} – ленгмюровская и циклотронная частота электронов, соответственно, s – номер циклотронной гармоники. Однако привлечение этого эффекта для объяснения «зебра структуры» в декаметровом излучении Юпитера не представляется возможным. Для реализации эффекта DPR на электронных циклотронных гармониках необходимо, чтобы электронная ленгмюровская частота существенно превышала электронную циклотронную частоту, $f_{Le} \gg f_{Be}$. В большей части магнитосферы Юпитера, в том числе и области генерации декаметрового радиоизлучения с «зебра структурой», это условие не выполняется. Здесь справедливо обратное неравенство $f_{Le} \ll f_{Be}$.

В работе [4] для формирования «зебра структуры» в километровом радиоизлучении Юпитера, в источнике которого также выполняется условие $f_{Le} \ll f_{Be}$, был предложен эффект двойного плазменного резонанса на ионных циклотронных гармониках. Двойным плазменным резонансом на ионных циклотронных гармониках называется совпадение частоты нижнего гибридного резонанса с одной из гармоник ионной циклотронной частоты. В случае, когда $f_{Le}^2 \ll f_{Be}^2$ и $f_{pi}^2 \gg f_{Bi}^2$ условие двойного плазменного резонанса на ионных циклотронных гармониках принимает вид $f_{pi} \approx sf_{Bi}$ [4]. Эффект DPR заключается в эффективном возбуждении за счет циклотронной неустойчивости (инкремент возрастает примерно на один-два порядка) ионных циклотронных волн, распространяющихся почти поперек магнитного поля. Возрастание инкремента происходит в узком интервале частот $\Delta f \ll f$, расположенным над частотой циклотронной гармоники $sf_{Bi} \approx f_{pi}$ [5]. Конверсия возбужденных ионных циклотронных волн в быстрые необыкновенные волны (декаметровое радиоизлучение Юпитера соответствует необыкновенной моде) происходит при рассеянии на потоках надтепловых электронных с энергиями $\gtrsim 20$ кэВ. Заметим, что при рассеянии не происходит заметного уширения «зебра» полос. В выходящем из области источника излучения будут преобладать электромагнитные волны, соответствующие необыкновенной моде, с частотами в узком интервале частот вблизи локальной электронной циклотронной частоты, $f \approx f_{Be} + f_{Le}^2/f_{Be}$ [5]. Обсуждаемый нами всплеск относится к Ио-связанному излучению. Источник этого всплеска излучения, располагается в на L-оболочках магнитного поля, проходящих через спутник Ио. Для опреде-

ленности мы приняли $L = 6$. В качестве модели магнитного поля мы взяли модель VIP4 [6]. Интервал частот, в котором наблюдалось излучение с зебра-структурой в момент времени, отмеченный вертикальной линией на рис. 1, составляет примерно $\approx 23 - 25$ МГц и соответствует интервалу локальных электронных циклотронных частот вблизи «поверхности» планеты (уровень, где давление равно 1 бар). Точное значение долготы источника неизвестно. Источник может располагаться на магнитных силовых линиях, проходящих через спутник Ио, а также на силовых линиях, проходящих через след спутника на орбите, протяженность которого может достигать 100° по долготе. Принимая во внимание особенности диаграммы направленности источника и величину магнитного поля вдоль следа Ио вблизи «поверхности» планеты, что источник располагается вблизи долготы (магнитная долгота) $\lambda_s \approx 195^\circ$.

Рис. 2.

Рис. 3.

На рисунке 2 приведен пример схемы генерации излучения с «зебра» структурой в предположении, что источник располагается вдоль силовых линий на долготе $\lambda_s = 195^\circ$, а номера гармоник ионной циклотронной частоты s изменяются от 2 до 5. На рисунке штрих-пунктирной и пунктирными линиями представлена зависимость, соответственно, электронной циклотронной частоты f_{Be} и гармоник ионной циклотронной частоты sf_{Bi} от расстояния $r = R/R_J$ (R_J – радиус Юпитера) от центра планеты вдоль активной магнитной трубки. Горизонтальными линиями в верхней части рисунка отмечены наблюдаемые частоты (f_{zp}) эмиссионных полос «зебра» структуры. Поскольку ожидаемые частоты «зебра структуры» в предлагаемой модели мало отличаются от локальной электронной циклотронной, то точки пересечения горизонтальных линий f_{zp} со штрихпунктирной линией f_{Be} указывают положения областей двойного плазменного резонанса в активной магнитной силовой трубке. Пересечения точечных вертикальных прямых с пунктирными линиями sf_{Bi} определяют частоты ионных циклотронных гармоник и локальную плазменную ионную частоту f_{pi} в областях двойного плазменного резонанса. В случае $s = 2 - 5$ распределение

плотности плазмы вдоль активной магнитной трубки, расположенной на долготе $\lambda_s = 195^\circ$, показано на рисунке 3. Точками отмечены значения плотности плазмы, полученные благодаря нашей модели. Нижняя граница источника располагается на высоте $h \approx 2100 \text{ km}$, где концентрация плазмы примерно равна 10^5 см^{-3} . Пунктирной линией показана аппроксимирующая кривая $\propto \exp(-\frac{rR_J}{H})$ с масштабом высоты $H \approx 1000 \text{ km}$.

В предлагаемой схеме генерации номер ионных циклотронных гармоник, на которых происходит ДПР являются свободным параметром. На рисунке 3 приведено распределение плазмы также для случая, когда в формировании всплеска участвуют ионные циклотронные гармоники с номерами $s = 5 - 8$. Из рисунка видно, что для реализации двойного плазменного резонанса на более высоких гармониках, плотность плазмы в источнике должна быть выше: для $s = 5 - 8$ плотность плазмы на высоте $h \approx 2100 \text{ km}$ должна достигать величины $\approx 2,7 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$. Для $s = 5 - 8$ пунктирной линией показана аппроксимирующая кривая $\propto \exp(-\frac{rR_J}{H})$ с масштабом высоты $H \approx 2000 \text{ km}$.

В нашей работе на основе эффекта ДПР на ионных циклотронных гармониках предложена схема генерации декаметрового излучения Юпитера с тонкой частотной структурой в виде квазигармонических полос излучения. Как это следует из предложенной схемы, источники располагаются в верхней ионосфере, нижняя граница источника находится на высоте $\approx 2100 \text{ км}$ над «поверхностью» планеты. Концентрация плазмы на этих высотах составляет $\approx (1 - 3) \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ и уменьшается с высотой с характерным масштабом приблизительно равным $1000 - 2000 \text{ км}$. Полученные величины достаточно хорошо согласуются с данными измерения ионосферной плазмы, полученными на КА “Voyager 2” и “Galileo” [7, 8].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №20-12-00268).

Литература

1. *Panchenko, M., et al. // Astron. Astrophys., 2018, 610, id.A69, doi:10.1051/0004-6361/201731369*
2. *Kurth, W.S., et al. // 2001. in Planetary Radio Emission V, eds. H.O. Rucker, M.L. Kaiser, and Y. Leblanc, pp. 15–32, Austrian Academy of Sciences Press, Graz.*
3. *Chernov, G.P. // Space Sci. Rev., 2006, 127, 195–326, doi:10.1007/s11214-006-9141-7.*
4. *Zlotnik, E.Ya., Shaposhnikov, V.E., Zaitsev, V.V. // J. Geophys. Res., 2016, 121, 5307–5318, doi:10.1002/2016JA022655.*
5. *Shaposhnikov, V.E., Zaitsev, V.V., Litvinenko, G.V. // J. Geophys. Res., 2018, 123, 9395–9405, doi: 10.1029/2018JA026064.*
6. *Connerney, J.E.P. et al. // J. Geophys. Res., 1998, 103, A6, 11929–11940.*
7. *Hinson, D.P. et al. // Geophys. Res. Lett., 1997, 24, 2107–2110.*
8. *Hinson, D.P., Twicken J.D. and Karayel E.T. // J. Geophys. Res., 1998, 103, 9505–9520.*