

УДК 537.87:523

ДЕКАМЕТРОВЫЕ РАДИОИМПУЛЬСЫ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ

А.Н. Афанасьев

DECAMETER RADIO PULSES IN THE SOLAR CORONA

A.N. Afanasiev

В работе рассматривается проблема формирования солнечных декаметровых радиовсплесков IIIд-типа с эхо-компонентами. С помощью численного моделирования исследуется средний профиль солнечного радиоимпульса, прошедшего через корональную плазму. Показано, что при наличии в случайно-неоднородной короне регулярных крупномасштабных неоднородностей электронной плотности локализованного типа возникает регулярная многолучевость, приводящая к появлению в среднем амплитудно-временном профиле импульса нескольких эхо-компонент с достаточно большими задержками.

The paper examines the problem of formation of solar decameter type IIIд radio bursts with echo-components. By means of numerical modeling the mean profile of a solar radio pulse that has passed through the coronal plasma is studied. It is shown that when there are regular large-scale inhomogeneities of electron density in a randomly-inhomogeneous corona, regular multipathing occurs and produces some echo-components at the mean time-amplitude profile of the pulse, with sufficiently large time delays.

Одним из видов спорадического солнечного радиоизлучения, наблюдаемого в декаметровом диапазоне длин волн, являются всплески спектрального типа IIIд. В результате измерений, выполненных на радиотелескопе УТР-2, было установлено [1], что излучение всплесков IIIд-типа генерируется на второй гармонике локальной плазменной частоты короны. Кроме того, было обнаружено, что при приближении источника всплесков к центральному солнечному меридиану возникает временное расщепление всплеска и формируется его дополнительная компонента. Задержка этой компоненты относительно предварительного всплеска зависит от гелиодолготы источника и достигает своего максимального значения, когда источник находится вблизи центрального солнечного меридиана. Возникновение дополнительной компоненты всплеска и изменение величины задержки с гелиодолготой источника качественно можно объяснить на основе простой модели точечного импульсного радиои источника, находящегося в сферически-симметричной короне и изотропно излучающего на второй гармонике локальной плазменной частоты [2]. В рамках такой модели дополнительная (эхо-) компонента всплеска возникает вследствие прихода в пункт приема (с некоторой задержкой) импульса, первоначально не направленного в сторону Земли и отраженного при рефракции в сферически-симметричной короне. При этом теоретические оценки показывают [1], что максимальная задержка эхо-всплеска (соответствующая положению источника вблизи центрального солнечного меридиана) на частоте $f = 25$ МГц составляет около 3 с. Однако, согласно записям амплитудно-временных профилей радиоимпульсов, сделанным на УТР-2 [1], максимальная задержка эхо-всплеска на данной частоте составляет приблизительно 7–8 с. Кроме того, в амплитудно-временных профилях могли наблюдаться несколько эхо-компонент [3], задержки между которыми составляли около 5 с. Эти экспериментальные факты не объясняются в рамках вышеупомянутой простой модели [2], основанной на условии сферически-симметричной короны. Опираясь на позиционные наблюдения декаметровых всплесков IIIд-типа, в

работе [4] авторы высказали предположение о том, что эхо-сигнал формируется не просто вследствие отражения от более глубокого слоя сферически-симметричной короны, а вследствие сильной регулярной рефракции радиоизлучения на неких крупномасштабных корональных структурах, находящихся на высотах средней короны.

В настоящей работе для выяснения возможного механизма формирования IIIд-всплесков с эхо-компонентами выполнено численное моделирование среднего амплитудно-временного профиля декаметрового радиоимпульса, прошедшего через неоднородную солнечную корону, с учетом рассеяния на турбулентных неоднородностях и сильной регулярной рефракции на крупномасштабных неоднородностях электронной плотности.

Рассматривался двумерный случай. Для расчетов была введена полярная гелиоцентрическая система координат и предполагалось, что корональный источник радиовсплеска является изотропным, точечным и излучает на второй гармонике локальной плазменной частоты импульс малой длительности. Геометрия задачи показана на рис. 1. Используя известные физические представления о неоднородной структуре околосолнечной плазмы, мы рассматривали следующую модель регулярной (без случайных неоднородностей) короны:

$$\begin{aligned}
 N_e(r, \psi) = & N_0(r) + \alpha N_0(r) \exp \left[- \left(\frac{r - r_d}{R_d} \right)^2 \right] \times \\
 & \times \left\{ \operatorname{th} [\gamma_1 (\psi + L_d)] - \operatorname{th} [\gamma_1 (\psi - L_d)] \right\} + \\
 & + \beta N_0(r) \exp \left[- \left(\frac{r - R_s}{R_{st}} \right)^2 \right] \times \\
 & \times \left\{ \operatorname{th} [\gamma_2 (\psi - (\psi_{st1} - L_{st}))] - \operatorname{th} [\gamma_2 (\psi - (\psi_{st1} + L_{st}))] \right\} + \\
 & + \beta N_0(r) \exp \left[- \left(\frac{r - R_s}{R_{st}} \right)^2 \right] \times \\
 & \times \left\{ \operatorname{th} [\gamma_2 (\psi - (\psi_{st2} - L_{st}))] - \operatorname{th} [\gamma_2 (\psi - (\psi_{st2} + L_{st}))] \right\},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где первое слагаемое описывает распределение электронной концентрации в сферически-симметрич-

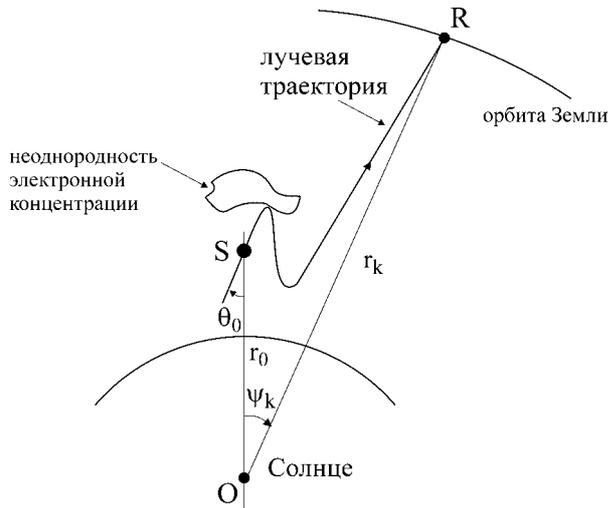


Рис. 1. Геометрия задачи. Источник излучения расположен в точке S с координатами $(r_0, 0)$; пункт приема – в точке R с координатами (r_k, ψ_k) ; θ_0 – начальный угол выхода излучения.

ной короне, второе слагаемое задает крупномасштабное локализованное возмущение электронной плотности, а два последних слагаемых характеризуют структуры типа корональных стримеров. В формуле (1) введены следующие обозначения: α, β – соответственно интенсивности крупномасштабного возмущения и стримера; r_d – расстояние между возмущением и центром Солнца; L_d, R_d – угловая и радиальная полуширины возмущения; ψ_{st1}, ψ_{st2} – угловые координаты 1-го и 2-го стримеров; L_{st}, R_{st} – угловая и радиальная полуширины стримера; R_s – радиус фотосферы Солнца; γ_1, γ_2 – коэффициенты, характеризующие величины градиентов электронной плотности в крупномасштабных неоднородностях. Изменение параметров данной модели позволяет рассмотреть множество вариантов расположения этих регулярных неоднородностей. Турбулентные неоднородности короны описывались в работе пространственной функцией корреляции, фурье-преобразование от которой соответствует степенному спектру неоднородностей [5].

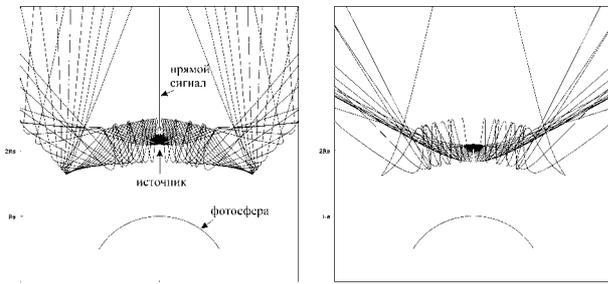


Рис. 2. Траектории радиоизлучения в солнечной короне. Левая панель соответствует сектору начальных углов выхода $-90^\circ \leq \theta_0 \leq 90^\circ$ (лучи испускаются во внешнее пространство), правая панель соответствует сектору $90^\circ < \theta_0 < 270^\circ$ (лучи первоначально направлены вглубь короны). Соответственно, орбита Земли расположена в верхней части рисунка. Параметры модели (1) имеют следующие значения: $\alpha = 2, \beta = 5, r_d = 2.5 R_s, L_d = 20^\circ, L_r = 5 \cdot 10^{-2} R_s, \psi_{st1} = -40^\circ, \psi_{st2} = 40^\circ, L_{st} = 10^\circ, R_{st} = 5 R_s$. Источник расположен на высоте $2.1 R_s$ и излучает на частоте $f = 25$ МГц.

Сначала для модели регулярной короны (1) рассчитывались траектории радиоволн точечного источника, излучающего на второй гармонике локальной плазменной частоты. В качестве примера на рис. 2 показаны траектории радиоизлучения для случая, когда источник расположен под крупномасштабным локализованным возмущением короны. Как видно, в корональной плазме в присутствии крупномасштабных регулярных неоднородностей электронной концентрации формируется достаточно сложная траекторная картина. Крупномасштабное возмущение электронной концентрации, расположенное над источником, препятствует свободному выходу радиоизлучения из короны во внешнее пространство. Таким образом, радиоизлучение из некоторого сектора начальных углов выхода излучения θ_0 распространяется между крупномасштабным возмущением и глубинным уровнем короны, как в некотором рефракционном волноводе, и тем самым приобретает временную задержку относительно прямого сигнала (направленного в сторону Земли). Для того чтобы радиоизлучение, вышедшее из этого волновода, попало в пункт приема на Земле, достаточно присутствия в околосолнечной плазме корональных стримеров.

Анализ распространения радиоизлучения в короне с регулярными неоднородностями электронной плотности удобно проводить с помощью построения дистанционно-угловых характеристик (ДУХ). ДУХ представляет собой зависимость угловой координаты ψ_k точки пересечения траектории излучения с орбитой Земли от начального угла выхода излучения θ_0 . ДУХ, рассчитанная для таких же значений параметров модели (1), при которых были получены траектории на рис. 2, имеет сильноосциллирующий характер (рис. 3). Это указывает на возникновение регулярных каустик и многолучевости, когда сигнал может приходиться в пункт приема по нескольким траекториям. Кроме того, на графике ДУХ хорошо видны выделенные участки (т.е. те участки, где расчетные точки расположены близко друг к другу). Такие участки можно рассматривать как свидетельство формирования устойчивых «мод» распространения радиоизлучения, отвечающих определенным секторам начальных углов выхода θ_0 . Указанные «моды» соответствуют формирующимся эхо-компонентам радиовсплеска.

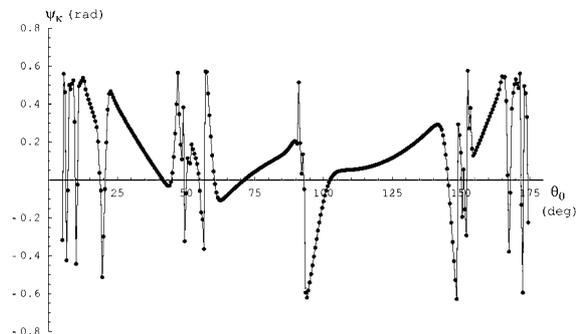


Рис. 3. Дистанционно-угловая характеристика $\psi_k(\theta_0)$. Вследствие симметричности рассчитанной траекторной картины относительно прямой, соединяющей источник и центр Солнца, на графике показан только сектор углов $0^\circ \leq \theta_0 \leq 180^\circ$. Кроме того, здесь не показаны участки, соответствующие прямому сигналу ($\theta_0 \leq 5^\circ$) и сигналу, отраженному в глубине короны и затем прошедшему сквозь крупномасштабное возмущение ($\theta_0 \leq 175^\circ$).

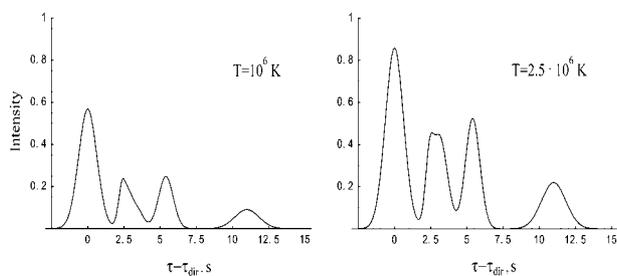


Рис. 4. Средние профили радиоимпульса ($f = 25$ МГц) в пункте приема на Земле для случая $\psi_k = 0$ (т.е. когда источник, с точки зрения наблюдателя, находится на центральном солнечном меридиане) с учетом рассеяния и поглощения за счет столкновений в солнечной короне; τ_{dir} – время распространения прямого сигнала; T – температура короны. Значения параметров регулярных неоднородностей такие же, как для рис. 2. Значения параметров турбулентных неоднородностей составляют: внутренний масштаб турбулентности $q_0 = 5 \cdot 10^3$ км; внешний масштаб турбулентности $l_0 = 10^6$ км; возмущение концентрации $\Delta N/N = 1\%$.

Далее рассчитывались амплитудно-временные профили импульса радиовсплеска, прошедшего неоднородную корону. В условиях, когда формируются регулярные каустики и многолучевость, для корректного расчета профиля радиоимпульса, принятого на Земле, необходимо привлекать интегральные представления волнового поля. Ранее в работе [6] на основе представления волнового поля в виде разложения по парциальным волнам (метода интерференционного интеграла) было получено выражение для среднего профиля радиоимпульса, прошедшего через неоднородную (с регулярными и случайными неоднородностями) солнечную корону. В отличие от геометрикооптического приближения, это выражение справедливо в условиях образования регулярных и случайных каустик и многолучевости и было использовано для расчетов в данной работе.

Помимо эффектов рефракции и рассеяния радиоизлучения, в расчетах амплитудно-временных профилей импульса учитывалось также поглощение, обусловленное соударениями.

Расчетные средние профили радиоимпульса для различных температур короны приведены на рис. 4. Можно видеть, что для рассматриваемой модели регулярной короны в пункте приема, расположенном на Земле, может сформироваться профиль радиоимпульса с несколькими эхо-компонентами.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

Солнечные декаметровые радиовсплески IIIд-типа с эхо-компонентами могут формироваться за счет сильной регулярной рефракции на крупномасштабных локализованных неоднородностях электронной плотности, расположенных в окрестности источника в рассеивающей и поглощающей короне. Тем самым выполненное численное моделирование свидетельствует в пользу интерпретации эхо-компонент, предложенной в работах [1, 3, 4].

Наблюдаемые задержки эхо-компонент от 3 с и более могут быть объяснены сложным механизмом распространения радиоизлучения в «поперечном» рефракционном канале, образующемся в средней короне вследствие присутствия крупномасштабных неоднородностей электронной плотности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 03-02-16229, 04-02-39003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абринин Э.П., Базелян Л.Л., Цыбко Я.Г. Параметры динамического спектра солнечных декаметровых радиовсплесков IIIд-типа с эхо-компонентами // Астрон. журн. 1996. Т. 73, № 6. С. 939–946.
2. Riddle A.C. On the observation of scattered radio emission from sources in the solar corona // Solar Phys. 1974. V. 35, N 1. P. 153–189.
3. Абринин Э.П., Базелян Л.Л., Цыбко Я.Г. Квазипериодическая структура солнечных радиовсплесков IIIд-типа с эхо-компонентами // Изв. вузов. Радиофизика. 1997. Т. 40, № 9. С. 1073–1085.
4. Абринин Э.П., Базелян Л.Л., Цыбко Я.Г. Амплитудные профили солнечных радиовсплесков IIIд-типа с эхо-компонентой и глобальная дислокация их элементарных квазимонохроматических источников // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43, № 12. С. 1027–1043.
5. Afanasiev A.N. The energy spectrum of spacecraft radio signals in the caustic shadow zone of the Sun: A new diagnostic of the solar coronal plasma // J. Atm. Solar-Terrest. Phys. 2005. V. 67. P. 1002–1013.
6. Afanasiev A.N., Altyntsev A.T. Effects of strong regular refraction in the solar radio pulse structure in spike events // Solar Phys. 2005. (in press).