

Рефракция радиоволн на плазменных неоднородностях коронального выброса массы (по радиозатменным данным аппарата Mars Express)

В.Е. Андреев

Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук, 141190, г. Фрязино, Московская обл., пл. Б.А. Введенского, д.1, e-mail: v.e.andreev@gmail.com

Оценки углов рефракции радиоволн ДМ- и СМ-диапазонов, прошедших через СМЕ, показали, что их величина не превышает 0.45 угловых секунд. Величина угла рефракции зависит от частоты сигналов, от скорости пересечения СМЕ трассы радиосвязи и плотности плазмы СМЕ.

Evaluation of the angles of refraction of DM - and CM-ranges, passed through the CME showed that their value does not exceed 0.45 arc seconds. The angle of refraction depends on the frequency of the signals, the speed of the CME crossing radiowaves tracks and plasma density of the CME.

Радиозондирование околосолнечной плазмы проводилось на углах элонгации $\pm 10^\circ$, что соответствует прицельным расстояниям, примерно, $\rho = \pm 40R_s$ (R_s – радиус Солнца), право-циркулярно поляризованными радиосигналами сантиметрового (8.4 ГГц) и дециметрового (2.3 ГГц) диапазонов с космического аппарата Mars Express (MEX) в режиме «когерента» в августе - октябре 2004 года. Во время пяти сеансов (всего проведено около 40 сеансов) было зафиксировано просвечивание плазменных облаков корональных выбросов (coronal mass ejection – CME) (рис.1) [1,2]. Одним из пунктов приёма радиосигналов на Земле был пункт DSS63 (Madrid), данные из которого анализируются в работе.

Целью работы является получение оценок величин углов рефракции радиоволн, проходящих через СМЕ.

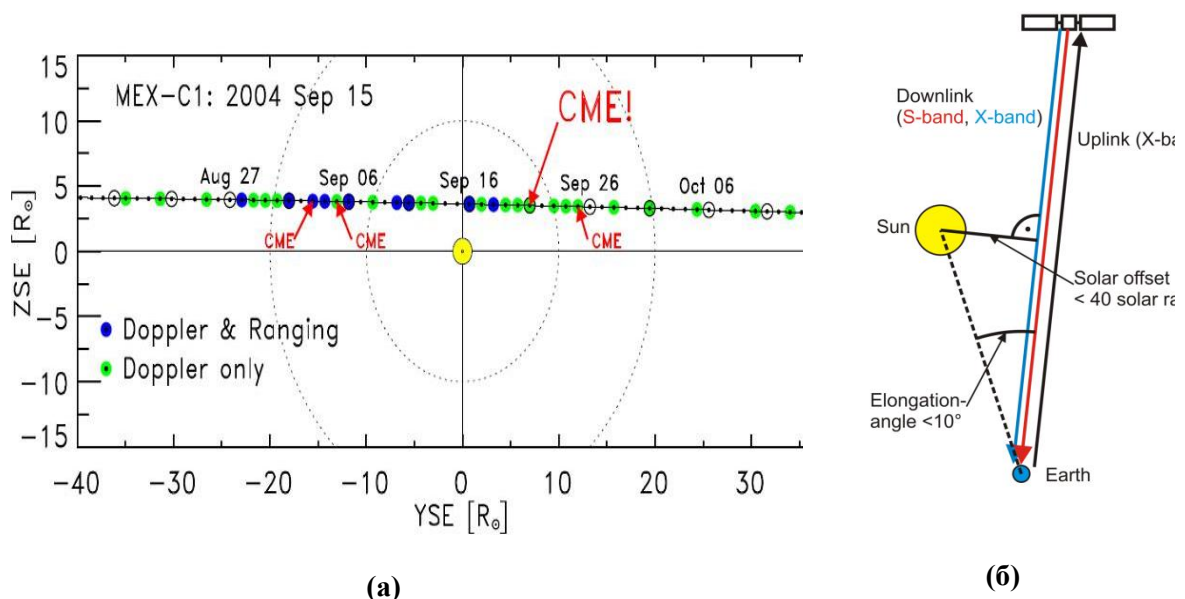


Рис. 1а. Показаны позиции МЕХ на фоне неба Земли по отношению к Солнцу. На рис. 1б приведена геометрия радиозондирования. Показаны трассы связи между Землёй и космическим аппаратом и обратно в режиме «когерента» (two-way mode). (Рисунки взяты из работы [2], Bird М.К.)

Из геометрии эксперимента следует, что плазменные неоднородности пересекали трассы излучения как «вверх» (от Земли к МЕХ – «uplink»), так и «вниз» (от МЕХ к Земле – «downlink»). Для выявления влияния плазмы на конкретной трассе использована методика, принятая в работах [1-3].

С Земли «вверх» излучался высокостабильный сигнал СМ-диапазона (f_{up}), из которого на борту когерентно формировались два сигнала СМ- и ДМ-диапазонов умножением f_{up} на коэффициенты $k_x = 880/749$ и $k_s = 240/749$. Сигналы затем излучались «вниз» и принимались на Земле. Составив из частот принятых радиосигналов соответствующие приведенные частоты $df_{Sdown}(t)$ и $df_{Xdown}(t)$, получаем в первом приближении влияние плазменных неоднородностей на сигналы на трассах «вниз»:

$$df_{Sdown}(t) = \frac{121}{112} [f_S(t) - \frac{k_S}{k_X} \cdot f_X(t)] = \frac{40.31 \cdot 10^6}{c \cdot f_{S0}} \cdot \frac{dN_{e\ down}(t)}{dt};$$

$$df_{Xdown}(t) = \frac{121}{112} \cdot \frac{k_S}{k_X} \cdot [f_S(t) - \frac{k_S}{k_X} \cdot f_X(t)] = \frac{40.31 \cdot 10^6}{c \cdot f_{X0}} \cdot \frac{dN_{e\ down}(t)}{dt},$$

где $f_S(t)$ и $f_X(t)$ величины частот, принятых на Земле радиосигналов,
 f_{S0} и f_{X0} номинальные частоты радиосигналов, излучаемых «вниз»,
 c – скорость света в вакууме.

Величина $\frac{dN_{e\ down}(t)}{dt}$ является зависимостью от времени скорости изменения интегральной плотности плазмы вдоль трассы распространения радиоволн и измеряется в hexem/s (1 hexem = 1 TECU = 10^{12} sm⁻²) (см. рис. 2а, серая кривая). Фильтрация высокочастотных шумов указанной зависимости проводилась вейвлетом Хаара. Родительская вейвлет функция Хаара выглядит следующим образом [6]:

$$\Psi(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq 1/2 \\ -1, & \frac{1}{2} \leq x \leq 1 \\ 0, & x \notin [0,1] \end{cases}$$

Зависимость $\frac{dN_{e\ down}(t)}{dt}$, полученная после фильтрации, на рисунке 2а показана сплошной красной кривой с точками.

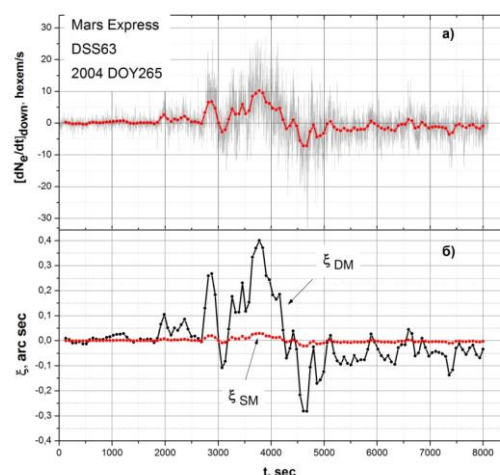


Рис. 2а. Зависимость от времени скорости изменения интегральной плотности плазмы вдоль трассы распространения радиоволн (верхняя половина рисунка).

Сплошная красная кривая с точками была получена после фильтрации экспериментальных данных вейвлетом Хаара. На рис. 2б показаны зависимости угла рефракции радиоволн ДМ- и СМ-диапазонов от времени

Рефракция радиоволны, проходящей через плазменные неоднородности, например, ионосферы планет, характеризуется углом рефракции – ξ . Предположим, угол рефракции $\xi \ll 1$, среда сферически симметричная, а плазменная неоднородность движется перпендикулярно к трассе и пересекает её со скоростью V_{\perp} . Тогда, следуя работам [4,5], можем записать для каждой радиотрассы «вниз»:

$$\xi_{DM}(t) = \frac{c}{f_{s_0} \cdot V_{\perp}} df_{S_{down}}(t) \quad \text{и} \quad \xi_{SM}(t) = \frac{c}{f_{x_0} \cdot V_{\perp}} df_{X_{down}}(t)$$

Подставляя известные значения в указанные формулы, получаем зависимости величин углов рефракции от времени, которые приведены на рисунке 2б. Известно [4,5], что $\xi \sim 1/f^2$. Следовательно, $\frac{\xi_{DM}(t)}{\xi_{SM}(t)} \sim \left(\frac{f_{x_0}}{f_{s_0}}\right)^2 = \left(\frac{11}{3}\right)^2 \cong 13.44$, что является ориентиром проверки правильности вычислений.

Проведены оценки углов рефракции радиоволн ДМ- и СМ-диапазонов, прошедших через 4 СМЕ, выявленные в работах [1,2]. Результаты работы сведены в таблицу 1. Максимумы $\frac{dN_{e\ down}(t)}{dt}$ и углов рефракции получены из отфильтрованных вейвлетом Хаара кривых.

Таблица 1.

2004 г., сентябрь	DOY	$\langle \rho \rangle^a$, Rs	V_{\perp}^b , km/s	$ \xi _{\max}$, arc sec	$\left \frac{dN_e}{dt} \right _{\downarrow \max}$, hexem/s	$\left(\frac{\xi_{DM}}{\xi_{SM}} \right)_{\max}^2$
03	247	15.376	737	0.021	0.98	13.487
19	263	6.249	650	0.056	2.33	13.453
21	265	8.458	400 ^c	0.401	10.18	13.451
25	269	13.429	446	0.018	0.51	13.429

^aСреднее прицельное расстояние за сеанс связи.

^b Оценка линейной скорости СМЕ, приведённая в [1], полученное из данных LASCO. (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2004_09/univ2004_09.html)

^c Оценка скорости СМЕ, найденная в [2], полученное из данных MEX.

Обсуждение

Плазменное облако СМЕ, движущееся от Солнца в межпланетное пространство, имеет разные формы, например, на снимках аппарата SOHO можно видеть структуры, похожие на расширяющиеся спирали (helical), каната (flux rope), круассана (croissant) [1]. Кроме этого СМЕ сопровождается ударной волной. За фронтом ударной волны возможно образование полости, обеднённой электронами по сравнению с окружающей СМЕ плазмой. Далее находится область, образованная движением СМЕ через окружающую плазму подобно бульдозеру, который уплотнил плазму окружающей среды (увеличивается концентрация электронов) и за которой также возможно образование полости. После прохождения СМЕ через данную область околосолнечного пространства, в ней остается возмущённая область плазмы окружающей среды и частиц СМЕ. Соответственно, при прохождении радиоволн через представленную структуру СМЕ они будут претерпевать рефракцию с разным знаком.

Действительно, зависимость на рисунке 2б указывает на такую возможность. Рассмотрим подробнее данную кривую с точки зрения зондирования сложной структуры СМЕ. На интервале времени (1800 – 2700) сек (1-интервал) радиоволны пересекали возмущённую область окружающей СМЕ плазмы, сравнимой с плазмой на интервале времени (4800 - 8000) сек. На интервале времени (2700 – 3000) сек (2-интервал) – уплотнённую плазменную область, возможно образованную за счёт

действия ударной волны на окружающую плазму. На интервале времени (3000 - 3200) сек (3-интервал) – полость, обеднённую по сравнению с окружающей плазмой область. На интервале времени (3200 - 4250) сек (4-интервал) – область СМЕ, обогащённую плазмой за счет эффекта бульдозера. На интервале времени (4250 - 4800) сек (5-интервал) – возмущённую область плазмы СМЕ с полостью. На интервале времени (4800 - 8000) сек (6-интервал) – возмущённую область плазмы околосолнечной среды после прохождения через неё СМЕ.

Предположим, что все области СМЕ двигались как единое целое. В этом случае можно оценить поперечное сечение (толщину) каждой области СМЕ, как $d = V_{\perp} \cdot \Delta t_i$, где Δt_i – длительность зондирования конкретной области СМЕ. Известно [8], СМЕ облако – расширяющееся облако, сечение которого чаще всего представляют эллипсом, перпендикулярным к плоскости эклиптики. Соотношение сторон этого эллипса можно оценить по формуле [8]:

$$\chi = \frac{R \left(\frac{r_0}{L_0} \right)}{r_0 + A(R - L_0)},$$

где $R = 8.458 R_s$ – текущее расстояние от Солнца до СМЕ; например, $r_0 = 1 R_s$, $L_0 = 2 R_s$, $A = 0.1$ – отношение скорости расширения СМЕ к скорости движения СМЕ.

При этих условиях $\chi \approx 2.58$.

Нас интересует сечение СМЕ в проекции на плоскость зондирования. Так как трёхмерная картина рассматриваемого СМЕ нам неизвестна, то предположим, что облако СМЕ будет представлять на плоскости зондирования также эллипс с тем же соотношением сторон и с упомянутой сложной структурой внутри эллипса. В этом случае можно оценить протяжённость каждой области СМЕ - q .

В работе [7] приводится оценка изменения частоты радиоволны – Δf , прошедшей через поток плазмы с градиентом электронной концентрации, движущейся перпендикулярно к трассе радиозондирования со скоростью - V_{\perp} :

$$\Delta f = \frac{\Delta N_{\max} V_{\perp} q}{f c d_1},$$

где d_1 – расстояние от границы потока до максимума электронной концентрации,

ΔN_{\max} – максимум электронной концентрации в потоке. В этом случае из значений угла рефракции и величины изменения частоты радиосигнала можно оценить максимальную концентрацию электронов, например, в интервалах 2 и 4 по формуле:

$$\Delta N_{\max} = \frac{\xi_{DM\max} f_{S_0}^2 d_1}{40.31 \cdot 10^6 q},$$

здесь $d_1 = d/2$.

Оценки, полученные в результате упомянутых рассуждений сведены в таблицу 2.

Таблица 2

интервал, i	Δt_i , сек	$d \cdot 10^4$, км	$q \cdot 10^4$, км	$\Delta N_{\max} \cdot 10^4$, см ⁻³
2	300	12	30.96	3.2
3	200	8	20.64	
4	1050	42	108.36	4.9
5	550	22	56.76	

Концентрация электронов в окружающей СМЕ плазме по модели Аллена-Баумбаха (Allen-Baumbach model) на расстоянии $8.458 R_s$ равен ~ 5300 см⁻³. Поэтому можно предположить, что в силу соизмеримости углов рефракции при прохождении радиоволн полостей и в более насыщенных плазмой областей СМЕ (см. рис. 26),

концентрация электронов в полостях должна быть, по крайней мере, на порядок меньше концентрации электронов в окружающей плазме.

Заключение

Полученные результаты показывают, что через радиотрассы связи с космическими аппаратами могут проходить СМЕ с плотной плазмой, которые могут вызвать заметную рефракцию радиоволн ДМ-диапазона. Зависимость угла рефракции от времени прохождения радиосигналов через СМЕ указывает на сложную структуру плазмы СМЕ.

Работа выполнена при частичной поддержке программы Фундаментальных исследований президиума РАН "Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные и взрывные процессы в астрофизике"

Литература

1. Pätzold M. et al. // Solar Physics. 2012. V. 279. P. 127-152.
2. Pätzold M. et al. // Planetary and Space Science. 2016. V. 127. P. 44-90.
3. Wohlmut R. et al. // Radio Science. 1997. V. 32. No.2. P. 617-628.
4. Яковлев О.И. Распространение радиоволн в космосе. М. Наука. 1985. 216 с.
5. Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Спутниковый мониторинг Земли. М.: Книжный дом «Либроком».2010. 208 с.
6. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Пресс. 2004. 400 с.
7. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. М. «Связь». 1969. 155 с.
8. Savani N.P. et al. // The Astrophysical Journal. 2011. 731:109 (6pp)