

УДК 621.371.252 : 621.372.09

К ВОПРОСУ О РАСПРОСТРАНЕНИИ КОРотких РАдиоволн в МАГНИТОСФЕРНЫХ КАНАЛАХ

Л. М. Ерухимов, З. Н. Кротова, В. П. Урядов

Рассмотрена задача о распространении пучка радиоволн в магнитосферном канале. Установлена связь диапазона частот, пропускаемых магнитосферным каналом с его параметрами. Показано, что на низких геомагнитных широтах ($\Phi_0 \leqslant 30^\circ$) возможно волноводное магнитосферное распространение КВ и УКВ сигналов.

В последнее время заметно возрос интерес к проблеме магнитосферного распространения коротких радиоволн. Это связано с новыми данными, получаемыми с помощью более усовершенствованной аппаратуры, позволяющей выделять слабые сигналы на фоне шумов [1], а также с расширением возможности проведения экспериментов такого рода в различных районах земного шара [2]. К настоящему времени накоплен достаточно обширный экспериментальный материал, свидетельствующий о возможности магнитосферного распространения коротких радиоволн. На наличие сильно вытянутых вдоль геомагнитного поля неоднородностей, способных канализировать радиоволны, указывают результаты исследования распространения декаметровых волн с помощью внешнего радиозондирования ионосферы [3]. Интересно отметить, что данные эксперимента по трансэкваториальному распространению УКВ сигналов, проведенного в магнитосопряженных точках на низких геомагнитных широтах, в определенной мере связываются автором [4] с возможностью канализирования энергии вдоль неоднородностей, вытянутых по силовым линиям геомагнитного поля. В этой связи определенный интерес представляют вопросы, касающиеся теоретических оценок диапазона частот, пропускаемых таким каналом в зависимости от параметров магнитосферного «дакта». С методологической точки зрения для решения указанной задачи представляется целесообразным использовать аналогию с распространением волн в оптических волноводах [5, 6], роль которых в нашем случае могут играть «дакты», образуемые вытянутыми вдоль геомагнитного поля неоднородностями пониженной концентрации с поперечными размерами $\sim 0,1 \div 1$ км [7]. Кроме неоднородностей естественного происхождения неоднородности такого масштаба образуются при искусственном воздействии мощного радиоизлучения на F-область ионосферы и, как отмечено в [8], могут служить «затравочными» для волноводного магнитосферного распространения радиоволн.

В координатах Мак-Илвайна распространение радиоволн вдоль магнитной силовой линии описывается волновым уравнением [6, 8]

$$\Delta E + \epsilon_0(\omega^2/c^2)(1 + \Delta\epsilon/\epsilon_0 + 2y/r_y + 2x/r_x)E = 0. \quad (1)$$

Ось z направлена вдоль оси канала, т. е. вдоль геомагнитного поля, ось y ортогональна оси z в плоскости магнитной силовой линии, ось x ортогональна осям z и y ; r_y, r_x — радиусы кривизны канала. В случае липольного магнитного поля [9]

$$r_y = \frac{R_0 \cos \Phi (1 + 3 \sin^2 \Phi)^{3/2}}{3 \cos^2 \Phi_0 (1 + \sin^2 \Phi)}, \quad r_x = \infty. \quad (2)$$

Здесь R_0 — радиус Земли, Φ_0 — геомагнитная широта пересечения магнитосферного «дакта» с поверхностью Земли, Φ — текущая геомагнитная широта, связанная с координатой z следующим выражением [10]:

$$z = \frac{R_0}{2 \cos^2 \Phi_0} \left\{ \left[\sqrt{\left(4 - 3 \frac{R_0 + h}{R_0} \cos^2 \Phi_0 \right) \left(1 - \frac{R_0 + h}{R_0} \cos^2 \Phi_0 \right)} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{\sqrt{3}} \ln \left(\sqrt{1 - \frac{(R_0 + h)}{R_0} \cos^2 \Phi_0} + \sqrt{\frac{4 - 3[(R_0 + h)/R_0] \cos^2 \Phi_0}{3}} \right) \right] - \right. \\ \left. - \left[\sin \Phi \sqrt{1 + 3 \sin^2 \Phi} + \frac{1}{\sqrt{3}} \ln \left(\sin \Phi + \sqrt{\frac{1 + 3 \sin^2 \Phi}{3}} \right) \right] \right\}, \quad (3)$$

где h — высота предполагаемого возбуждения магнитосферного «дакта».

Удержание волн в канале определяется главным образом зависимостью $\Delta \epsilon$ от y , поэтому в дальнейшем полагаем

$$\Delta \epsilon = \Delta \epsilon(y, z) = -4\pi e^2 \Delta N(y, z) / m \omega (\omega \pm \omega_H), \quad (4)$$

а возмущение электронной концентрации плазмы в неоднородности зададим в форме [8]:

$$\Delta N(y, z) = -\Delta N_0(z) (1 - y^2/a^2). \quad (5)$$

Согласно [8] ширина «дакта» равна

$$a = a_{m, \phi} \cos^3 \Phi / \sqrt{1 + 3 \sin^2 \Phi}, \quad (6)$$

где $a_{m, \phi}$ — ширина «дакта» в плоскости магнитного экватора.

В приближении параболического уравнения (параметры «дакта» медленно изменяются вдоль оси канала) для гауссова падающего пучка, следуя [5], можно получить уравнение для смещения по оси y центра пучка при его распространении вдоль оси z :

$$\frac{d^2 p_y}{dz^2} + \frac{k_2(z)}{k_0(z)} p_y + \frac{1}{2} \frac{k_1(z)}{k_0(z)} = 0, \quad (7)$$

где для коротких волн ($\omega > \omega_H$)

$$k_0 = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0(z)}, \quad k_1 = -2 \frac{\omega}{c} \frac{\sqrt{\epsilon_0(z)}}{r_y(z)}, \\ k_2 = \frac{\omega}{c} \frac{1}{a^2(z) \sqrt{\epsilon_0(z)}} \frac{4\pi e^2 \Delta N_0(z)}{m \omega^2}, \quad \epsilon_0 = 1 - \frac{\omega_0^2(z)}{\omega^2}. \quad (8)$$

Уравнение (7) можно использовать для определения предельной частоты, удерживаемой в магнитосферном «дакте».

На ЭВМ был проведен численный расчет диапазона начальных углов $\Delta \theta$, удерживаемых в канале до критической точки над магнитным экватором, в зависимости от частоты, возмущения концентрации плазмы в неоднородности $\sqrt{\langle (\Delta N/N)^2 \rangle}$ для ряда значений геомагнитной широты Φ_0 .

Модель изменения электронной концентрации во внешней ионосфере взята в виде [10]

$$N[z(\Phi)] = \alpha \left(\frac{\cos \Phi_0}{\cos \Phi} \right)^6 \exp \left(\frac{\cos^2 \Phi_0}{\cos^2 \Phi} \right). \quad (9)$$

По такому же закону принято и изменение с z возмущения концентрации в плазме $\Delta N[z(\Phi)]$.

Результаты счета представлены на рис. 1, 2.

На рис. 1 для «дакта» с $\Phi_0 = 40^\circ$ для фиксированной частоты $f = 10 \text{ МГц}$ показана зависимость интервала углов $\Delta\theta$, удерживаемых в канале, от возмущения электронной концентрации $\sqrt{\langle (\Delta N/N)^2 \rangle}$.

Рис. 2 иллюстрирует частотную зависимость интервала углов $\Delta\theta$ для нескольких значений Φ_0 . Следует отметить, что основной интерес представляет верхняя предельная частота, удерживаемая в магнитосферном «дакте», поэтому в расчетах начальное значение частоты принято равным 10 МГц . Эта частота превышает нижнюю критическую частоту, пропускаемую магнитосферным волноводом и равную в нашем случае $f_{kp} \sim 0,6 \text{ МГц}$ [11].

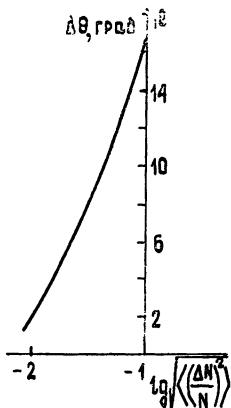


Рис. 1.

Рис. 1. $h = 400 \text{ км}$, $a_{m,0} = 0,5 \text{ км}$, $f = 10 \text{ МГц}$, $\Phi_0 = 40^\circ$, $\alpha = 10^5 \text{ см}^{-3}$.
Рис. 2. $h = 400 \text{ км}$, $a_{m,0} = 0,5 \text{ км}$, кривая 1 — $\Phi_0 = 30^\circ$, 2 — $\Phi = 40^\circ$,
3 — $\Phi_0 = 50^\circ$ при $\alpha = 10^5 \text{ см}^{-3}$, $\delta N = \sqrt{\langle (\Delta N/N)^2 \rangle} = 5 \cdot 10^{-2}$, кривая 4 —
 $\Phi_0 = 30^\circ$ при $\delta N = 7 \cdot 10^{-2}$, $\alpha = 3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$.

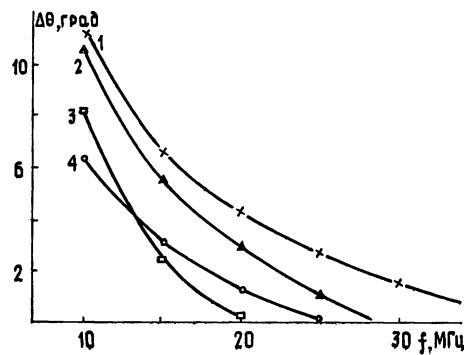


Рис. 2.

Как видно из рис. 2, для умеренных значений поперечного градиента электронной концентрации плазмы в неоднородности $\delta N = 5 \cdot 10^{-2}$ «дакт» на низких геомагнитных широтах ($\Phi_0 \leqslant 30^\circ$) удерживает сравнительно высокие частоты ($f \geqslant 30 \text{ МГц}$), захватывающие УКВ диапазон, что согласуется с [12].

Для сравнения на том же рисунке для «дакта» с $\Phi_0 = 30^\circ$ приведена частотная зависимость углов $\Delta\theta$ для уменьшенного (в 3,3 раза) значения электронной концентрации в точке возбуждения магнитосферного канала. Видно, что значение электронной концентрации вдоль канала играет существенную роль для удержания КВ сигналов.

В заключение заметим, что влияние кривизны магнитной силовой трубы и других параметров канала на удержание коротких волн в магнитосферных «дактах» может быть частично скомпенсировано за счет рассеяния радиоволн. Рассеяние будет способствовать канализации энергии вдоль «дакта», если на участке канала длиной L эффективный угол рассеяния будет равен изменению угла направления силовой труб-

ки. Используя результаты работы [13], можно показать, что величина угла рассеяния*

$$\theta_p \approx \sqrt{2} a s_0 / L \quad (10)$$

равна изменению угла направления силовой трубы на участке «дакта» длиной $L \sim 50 \div 100$ км. Здесь s_0 — набег фазы волны при распространении вдоль трубы.

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1) Установлена связь спектра частот, пропускаемых магнитосферным «дактом», в зависимости от его параметров, что дает возможность сопоставления с экспериментальными данными, а также позволяет решать обратную задачу определения параметров канала, ответственного за магнитосферное распространение КВ и УКВ сигналов.

2) Показано, что на низких геомагнитных широтах ($\Phi_0 \leq 30^\circ$) при умеренных значениях поперечного градиента электронной концентрации возможно канализирование УКВ сигналов в магнитосферных «дактах» и их трансэкваториальное распространение.

Полученные результаты могут быть использованы для интерпретации некоторых особенностей распространения декаметровых и метровых волн в солнечной короне.

Анализ амплитудных и временных характеристик сигналов, распространяющихся в магнитосферных «дактах», с учетом рассеяния предполагается рассмотреть в следующей статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Grossi M. D., Padula-Pintos V. H. — J. Geophys. Res., 1971, 76, № 16, p. 3755.
2. Букин Г. В. — Геомагнетизм и аэрономия, 1978, 18, № 3, с. 440.
3. Muldrew D. B. — Canad. J. Phys., 1967, 45, p. 3935.
4. Mc Namara L. F. — Austr. J. Phys., 1973, 26, № 4, p. 521.
5. Casperson L. W. — Appl. Opt., 1973, 12, № 10, p. 2434.
6. Унгер Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. — М.: Мир, 1980.
7. Бенькова Н. П., Букин Г. В., Гоцакова Л. С., Яшин Ю. Я. — Геомагнетизм и аэрономия, 1978, 18, № 3, с. 448; Иванова Л. С. Диссертация, Горький, ГГУ, 1980.
8. Гуревич А. В. — Геомагнетизм и аэрономия, 1979, 19, № 3, с. 462.
9. Mladonsky R. F., Hellweil R. A. — J. Geophys. Res., 1962, 67, p. 2207.
10. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. — М.: Наука, 1972.
11. Марков Г. Т., Петров Б. М., Грудинская Г. П. Электродинамика и распространение радиоволн. — М.: Сов. радио, 1979.
12. Nielson D. L., Crochet M. — Rev. Geophys. Space Phys., 1974, 12, № 4, p. 688.
13. Ерухимов Л. М., Шпиро П. И. — Изв. вузов — Радиофизика, 1981, 24, № 4, с. 443.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
10 июня 1981 г.

TO THE PROBLEM OF SHORT RADIO WAVE PROPAGATION IN MAGNETOSPHERE CHANNELS

L. M. Erukhimov, Z. N. Krotova, V. P. Uryadov

A problem is considered on propagation of the radio wave beam in the magnetosphere channel. A relation is stated between the frequency range transmitted by the magnetosphere channel and its parameter. It is shown that at low geomagnetical latitudes ($\Phi_0 \leq 30^\circ$) the waveguide magnetospheric propagation of SW and VHF signals is possible

* Соотношение (10) получено в приближении $\mu = ka^2/L \lesssim 1$, $s_0^2 \gtrsim 1$ [13].