

УДК 551.510 535

О ФОРМЕ СПЕКТРА НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ В НАПРАВЛЕНИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Л. М. Ерухимов, В. И. Косолапенко, А. М. Лerner, Е. Н. Мясников

Методом просвечивания ионосферы сигналами орбитальных ИСЗ впервые измерена форма спектра неоднородностей электронной концентрации полярной ионосферы вдоль направления геомагнитного поля \mathbf{H} . Показано, что спектральная плотность имеет характерный масштаб «обрезания» $l_{\parallel} \sim 5 \div 15$ км вдоль \mathbf{H} . В плоскости, ортогональной \mathbf{H} , для измеряемых масштабов 100 м $\lesssim l_{\perp} \lesssim 1$ км турбулентность изотропна и имеет степенной закон убывания спектральной плотности.

Важной задачей при исследовании ионосферных неоднородностей является определение спектра флуктуаций электронной концентрации $\Phi_N(\mathbf{x})$. Измерения $\Phi_N(\mathbf{x})$ основаны либо на эффекте сцинтиляций при просвечивании ионосферы сигналами ИСЗ [1, 2], либо проводятся непосредственно с помощью приборов, установленных на борту ИСЗ [3–5]. При этом измеряемой величиной является одномерная спектральная плотность $\Phi_N(x_x = 2\pi/l_x)$, вдоль направления x движения ИСЗ при $v_c \gg v_h$ или вдоль направления дрейфа неоднородностей, если $v_h \gg v_c$ (v_c — скорость движения спутника, v_h — скорость дрейфа неоднородностей). При просвечивании ионосферы сигналами орбитальных ИСЗ спектр флуктуаций принимаемого сигнала при условии малых значений индекса мерцаний $F = \sqrt{\langle \Delta A^2 \rangle / \langle A \rangle^2}$ ($\Delta A, A$ — соответственно флюктуирующая и постоянная части амплитуды) и для волновых чисел неоднородностей $x_x > x_\phi$, где $x_\phi = \sqrt{k_0/r}$ — «масштаб» первой зоны Френеля, связан следующим образом со спектром флуктуаций электронной концентрации [6]:

$$\Phi_A(x_x) \propto \int \Phi_N(x_x, x_y, 0) dx_y, \quad (1)$$

x_x, x_y — волновые числа неоднородностей в плоскости «фазового экрана». Таким образом, определение $\Phi_N(\mathbf{x})$ является обратной задачей, поэтому результаты этих измерений не всегда могут быть однозначно интерпретированы.

Полученные в настоящее время данные о неоднородной структуре F -области ионосферы указывают на то, что трехмерный спектр $\Phi_N(\mathbf{x})$ наиболее часто является степенной функцией в широкой области масштабов и может быть описан следующими моделями:

$$\Phi_N(\mathbf{x}) \propto (x_{\perp}^2 + \gamma x_{\parallel}^2)^{-p/2}; \quad (2)$$

$$\Phi_N(\mathbf{x}) = \Phi_N(x_{\parallel}) \Phi_N(x_{\perp}) \propto |x_{\perp}|^{-p} \exp\left(-\frac{x_{\parallel}^2 l_{\parallel}^2}{4}\right), \quad (3)$$

x_{\perp}, x_{\parallel} — волновые числа неоднородностей соответственно поперек и вдоль силовых линий геомагнитного поля \mathbf{H} . Коэффициент γ в (2)

характеризует степень вытянутости неоднородности, отвечающей заданному волновому числу κ_{\perp} ; масштаб l_{\parallel} в (3) соответствует минимальному размеру флюктуаций вдоль \mathbf{H} . Обе формы (2) и (3) отвечают анизотропным неоднородностям, вытянутым вдоль направления \mathbf{H} , однако наличие «масштаба обрезания» спектра в (3) фактически указывает на то, что спектральная плотность при $\kappa_{\perp} \gg 2/l_{\parallel}$ является двумерной, в то время как форма (2) трехмерная во всем диапазоне измеряемых масштабов.

В настоящей работе предложен метод экспериментальной проверки вида спектра $\Phi_N(\mathbf{x})$ неоднородностей F -слоя ионосферы и по результатам наблюдения мерцаний сигналов ИСЗ на частоте 400 МГц в районе арх. Шпицберген показано, что для $100 \text{ м} \leq l_{\perp} \leq 1 \text{ км}$ спектральная плотность имеет вид, близкий к (3), а масштаб «обрезания» имеет величину $l_{\parallel} \approx 5 \div 15 \text{ км}$.

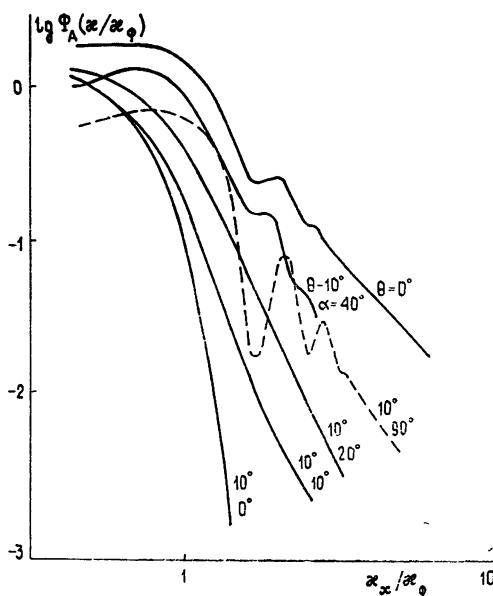


Рис. 1.

При просвечивании неоднородностей сигналами орбитальных ИСЗ возможность проверки формы спектра связана с измерениями спектральной плотности флюктуаций амплитуды сигнала $\Phi_A(\kappa_x)$ для различных положений плоскости «фазового экрана» относительно направления \mathbf{H} . При этом, как нетрудно показать, спектр амплитудных флюктуаций сигнала $\Phi_A(\kappa_x)$ в случае, когда форма спектра $\Phi_N(\mathbf{x})$ описывается (2), для $\kappa_x \gg \kappa_{\phi}$ пропорциональна κ_x^{-p+1} и не зависит от положений ИСЗ. Вместе с тем для модели (3) спектральная плотность $\Phi_A(\kappa_x)$ пропорциональна κ_x^{-p+1} только при значениях углов θ между плоскостью «фазового экрана» и полем \mathbf{H} таких, что $\sin \theta < \sin \theta^* = l_{\perp}^*/\pi l_{\parallel}$, и в диапазоне $\kappa_{\phi} < \kappa_{\perp} < \kappa_{\perp}^* \left(\kappa_{\perp}^* = \frac{2\pi}{l_{\perp}^*} \right)$. Для значений же углов $\theta > \theta^*$ и $\kappa_{\perp} > \kappa_{\perp}^*$ $\Phi_A(\kappa_x)$ должен быть пропорционален $\Phi_N(\kappa_x, 0, 0)$, т. е. κ_x^{-p} .

Пример, иллюстрирующий зависимость $\Phi_A(\kappa_x)$ от углов θ и α , для модели (3) приведен на рис. 1. Отметим, что если неоднородности находятся в плоскости орбиты спутника ($\alpha = 0$), то имеет место гаус-

сово «обрезание» спектра флюктуаций $\Phi_A(x)$. Однако, как видно из расчетов, даже при наличии малого отклонения от этого положения «обрезание» отсутствует и наблюдается только эффективное укрупнение наклона спектра.

В течение ноября и декабря 1979 г. был проведен цикл наблюдений за сигналами ИСЗ «Транзит» в районе арх. Шпицберген. Сигналы на частоте 400 МГц принимались на три антенны, разнесенные в направлениях север — юг и восток — запад на расстоянии ~ 200 м.

Геометрия магнитного поля Земли в районе пункта наблюдения была следующей: наклонение составляло $\sim 82^\circ$, магнитное склонение $\sim 0^\circ$. Так как орбиты используемых ИСЗ были близки к полярным, то для достаточно высоких зенитных углов ИСЗ силовые линии магнитного поля находились примерно в плоскости орбиты.

Эксперимент показал, что при прохождении сигнала спутника вблизи направления магнитного поля наблюдается резкое увеличение как интенсивности, так и частоты флюктуаций сигнала. Последнее хорошо видно из рис. 2, на котором приведен пример записи амплитуды принимаемого сигнала на частоте 400 МГц при прохождении ИСЗ вблизи направления $\theta = 0$.



Рис. 2.

Характерные длительности таких зон «сильных мерцаний» для различных пролетов ИСЗ составляли $\Delta t \approx 8 \div 16$ с, что соответствует угловым размерам $\Delta\theta_{\text{в}}/2 \approx 1,7 \div 3,4^\circ$. Этот эффект наблюдался только при пролетах спутника, для которых максимальный угол места β луча зрения на ИСЗ превышал значения $\beta > 87^\circ$.

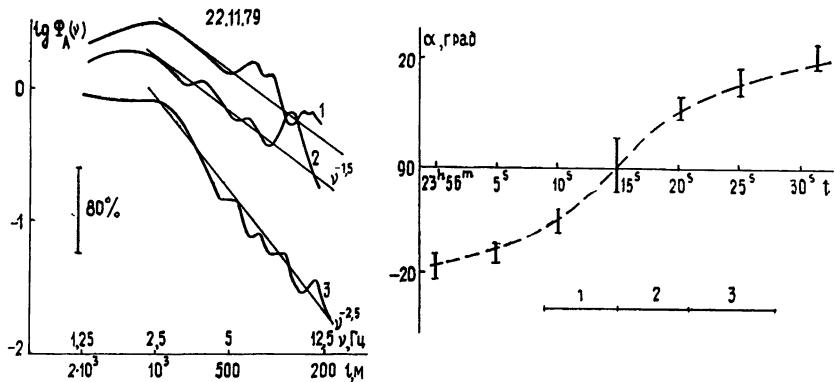


Рис. 3.

На рис. 3 приведены результаты измерений ориентации дифракционной картины на поверхности Земли, полученные с помощью пространственно-разнесенного приема сигналов при пересечении зоны «сильных мерцаний», и построены ненормированные спектры флюктуаций амплитуды сигнала для трех последовательных временных интервалов. Как следовало из геометрии эксперимента, направлению дифракционной картины вблизи значения $\alpha \approx 90^\circ$ соответствовали минимальные углы θ . Для интервалов времени 1 и 2, отмеченных на рис. 3,

было выполнено условие $\theta < 3 \div 4^\circ$. Спектры 1 и 2, соответствующие минимальным углам θ , имеют степенной вид $\Phi_A(x_x) \propto x_x^{-p_1}$ с показателем степени $p_1 \approx 1,4 \div 1,5$. Для больших углов θ с магнитным полем (спектр 3 соответствует интервалу времени 3 на рис. 3) показатель степени равен $p_1 \approx 2,5$. На рис. 4 приведены данные других пролетов: спектр 1 получен для $\theta \leq 2^\circ$, имеет показатель $p_1 \approx 1,8$, спектр 2 построен в течение того же пролета при $\theta \approx 20^\circ$. В этом случае направление дифракционной картины было близко к направлению движения спутника, поэтому на флуктуации сигнала существенную роль оказал масштаб неоднородностей вдоль магнитного поля. Видно, что вблизи $x_x \approx x_\phi$ наклон спектра увеличивается. Спектр 3 построен примерно в то же время, что и 1 и 2 для другого пролета ИСЗ, максимальный угол места которого составлял $\beta_m \approx 55^\circ$. В течение этого сеанса на протяжении всего времени спектральные характеристики сигнала существенно не менялись и $\Phi_A(x_x)$ имел характерную степенную зависимость, представленную на рисунке (показатель степени спектра 3 — $p_1 \approx 2,7$).

Таким образом, изменение показателя степени спектров флуктуаций амплитуды $\Phi_A(x_x)$ на величину, близкую единице, в диапазоне малых углов луча на ИСЗ с направлением магнитного поля свидетельствует о наличии масштаба «образования» спектра l_{\parallel} вдоль H .

Определить величину l_{\parallel} можно, измерив значения l_{\perp}^* и θ^* , для которых происходит изменение показателя степени спектра на единицу, в частности, если показатель p_1 изменяется во всем диапазоне измеряемых масштабов $x_x > x_\phi$, то $l_{\parallel} \approx l_{\perp\phi}/\pi \sin \theta$. Подставляя в данную оценку характерные угловые размеры области «сильных мерцаний», получим $l_{\parallel} \approx 5 \div 15 \text{ км}$.

В заключение заметим, что наряду с рассмотренными моделями спектров возможно существование «одномерного» спектра неоднородностей, который имеет степенную зависимость только в одном направлении, например x_x , однако приведенные выше данные, свидетельствующие об измерении показателя степени спектра на единицу при $\theta > \theta^*$, указывают в то же время на тот факт, что $\Phi_N \propto |x_{\perp}|^{-p}$, т. е. имеет степенной вид в плоскости, ортогональной H ($x_{\perp}^2 = x_x^2 + x_y^2$).

Таким образом, при просвечивании ионосферы сигналами ИСЗ, по-видимому, почти всегда выполняется условие $\theta > \theta^*$, следовательно, $\Phi_A(x_x) \propto \Phi_N(x_x, 0, 0)$ и измеряемый показатель степени равен показателю p степенного спектра неоднородностей.

Авторы выражают свою благодарность А. В. Рахлину, Ю. С. Коробкову, А. Ф. Беленову, В. С. Короткову, оказавшим большую помощь в организации экспедиции на арх. Шпицберген, А. А. Солоничеву, принимавшему участие в проведении эксперимента, и Н. Н. Новиковой за помощь при обработке данных.

ЛИТЕРАТУРА

- Crane R. K. — J. Geophys. Res., 1978, 83, № A5, p. 2091.
- Getmantsev G. G., Eroukhimov L. M. — Solar Terr. Phys., 1969, 5, p. 13

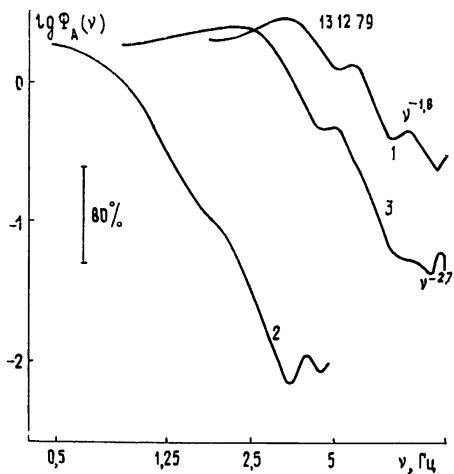


Рис. 4.

- 3 Dyson P. L., McClure Y. P., Hunson W. B. — J. Geophys. Res., 1974, 79, p. 1497.
4. Гдалевич Г. Л., Озеров В. Д. и др. Тезисы докладов II Всесоюзного совещания по проблеме «Неоднородная структура ионосферы». — Ашхабад: 1979.
5. Темегин М. — J. Geophys. Res., 1979, 84, № A10, p. 5935.
6. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику Ч II. Случайные поля. — М.: Наука, 1978.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
7 апреля 1980 г.

THE SPECTRUM FORM OF IRREGULARITIES IN HIGH LATITUDE IONOSPHERE IN THE DIRECTION OF THE GEOMAGNETIC FIELD

L. M. Erukhimov, V. I. Kosolapenko, A. M. Lerner, E. N. Myasnikov

The spectrum form of electron density irregularities of the auroral ionosphere along the direction of the geomagnetic field \mathbf{H} has been measured for the first time by a radioscillation method using orbital satellite signals. It is shown, that the spectral density has the characteristic scale of «cutoff» $l_{\parallel} \sim 5 \div 15$ km along \mathbf{H} . In the plane orthogonal to \mathbf{H} for measured scales of 100 m $\lesssim l_{\perp} \lesssim 1$ km the turbulence is isotropic and the spectral density decreases according to the power law.

Аннотации депонированных статей

УДК 513.82

ФЛУКТУАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН, ОТРАЖЕННЫХ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

B. П. Аксенов, B. A. Банах, B. L. Миронов

В приближении марковского случайного процесса проведено исследование флюктуаций интенсивности оптических волн, отраженных плоским зеркалом в турбулентной атмосфере. В предельных случаях слабых и сильных флюктуаций получены асимптотические формулы для относительной дисперсии интенсивности плоской и сферической волн при отражении от «точечного» и «безграничного» плоского зеркала. Показано, что в условиях сильных флюктуаций интенсивности эффект усиления флюктуаций максимальен в случае рассеяния неограниченных волн на точечном отражателе. При отражении волн от безграничного зеркала этот эффект оказывается асимптотически малым.

Статья депонирована в ВИНТИ,
регистр. № 2359-81. Деп. от 21 мая 1981 г.
