

УДК 621.396.24+550.358

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ОТ ИСКУССТВЕННО ВОЗМУЩЕННОЙ ОБЛАСТИ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ**

*Г. С. Бочкарев, В. А. Еременко, Ю. А. Игнатьев,  
В. В. Кольцов, Л. А. Лобачевский, Б. Е. Лянной,  
С. Н. Матюгин, Ю. Н. Черкашин, П. Б. Шавин*

На основе решения задачи об отражении монохроматических волн от слабых периодических возмущений диэлектрической проницаемости среды и обобщения его на случай короткого радиоимпульса (представляемого в виде интеграла Фурье по монохроматическим волнам) дается качественное объяснение наблюдаемой в эксперименте сложной структуры сигналов обратного рассеяния от искусственно возмущенной области ионосферы.

В [1] экспериментальным путем на дальностях порядка ~ 600—700 км были зарегистрированы устойчивые сигналы обратного рассеяния (СОР) от искусственно возмущенной области ионосферы в виде треков, которые расщеплялись в процессе нагрева на 2—3 группы (рис. 1). Видно, что отмеченные треки локализованы на дальностях 610—680 км и в диапазоне частот порядка 12—14 МГц. Отмечается, что время появления и релаксации СОР составляло единицы минут.

22.10.82г.

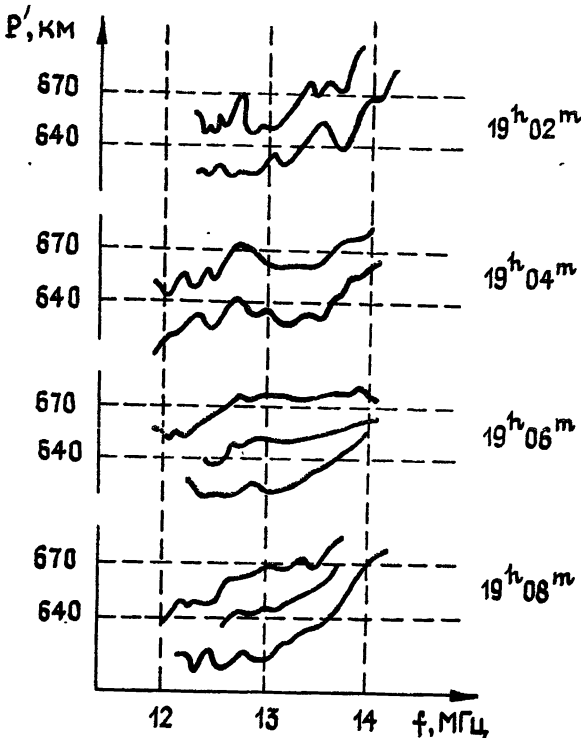


Рис. 1.

В [2] решена задача о дифракционном отражении волн от слабо-неоднородной среды, диэлектрическая проницаемость которой промодулирована периодической функцией от координат ( $\epsilon(y) = 1 + \delta \sin Ky$ ):. Причем постановка задачи такова, что волновой вектор  $k$  параллелен оси осцилляции диэлектрической проницаемости. Результатом решения явилась функциональная зависимость коэффициента отражения от частоты падающего излучения в условиях вблизи резонанса, графическое изображение которой приведено на рис. 2. Видно, что коэффициент отражения для монохроматической волны носит резонансный и одновременно сильно осциллирующий характер. Вместе с тем, из прямых экспериментальных измерений по ракурсному рассеянию (см., например, [3]) область взаимодействия (возмущенная область) мощной радиоволны при вертикальном облучении ионосферы и ионосферной плазмы, горизонтальные размеры которой контролируются диаграммой направленности мощного радиоизлучения, а размер по высоте по измерениям радиоизлучений с ИСЗ и космических источников может достигать десятков и сотен километров, содержит спектр неоднородностей с масштабами от сантиметров и единиц метра до километра и выше (см., например, [4]). В ряде работ показано, что такие неоднородности вытянуты вдоль магнитного поля Земли, что и обуславливает явление ракурсного рассеяния радиоволн, а величины возмущения диэлектрической проницаемости для имеющихсся нагревных комплексов могут достигать значений  $\Delta\epsilon \sim \Delta N/N \sim 0,1 \div 0,3$ . Однако, несмотря на малость абсолютного значения величины  $\Delta\epsilon$ , такие возмущения диэлектрической проницаемости в определенных представлениях при конкретных постановках задач могут приводить к заметным изменениям характеристик распространения (см. [5,1]).

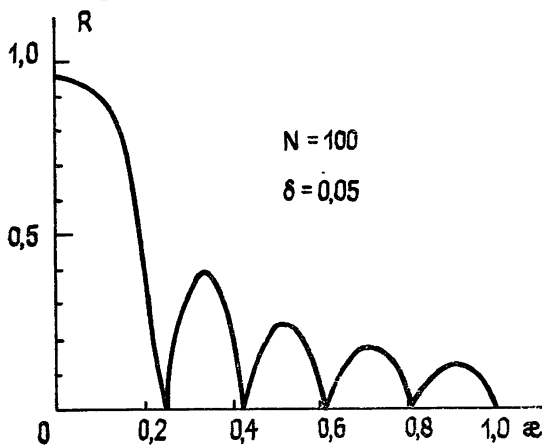


Рис. 2.

Согласно [6], рассчитанная в борновском приближении средняя интенсивность рассеянного на анизотропных неоднородностях поля достигает максимального значения в случае обратного отражения и безусловно зависит от частоты излучения. Геометрия же постановки эксперимента [1], когда волновой вектор  $k$  перпендикулярен вытянутым вдоль вектора магнитного поля Земли неоднородностям, совпадала с постановкой задачи, описанной в [2]. Поэтому привлечение результатов решения модельной задачи [2] для анализа полученных в результате экспериментальных наблюдений СОР [1] представляется достаточно обоснованным и обнадеживающим.

Ниже проводится обобщение решения задачи об отражении монохроматических волн от слабых периодических искусственных возмущений диэлектрической проницаемости среды [2] на случай короткого радиоимпульса, представляемого в виде интеграла Фурье по монохроматическим волнам. Проводится качественное сопоставление результатов расчета и эксперимента.

В эксперименте использовалось импульсное излучение. Следовательно, в нашей постановке задачи обратного отражения исследуемый радиосигнал можно представить в виде интеграла Фурье по монохроматическим волнам. Так, если падающая волна имеет вид

$$U_{\text{пад}} = \int G(\mu) e^{i\mu y} d\mu,$$

где  $\mu = k/K = 1/2 + \delta\kappa + \dots$ ,  $G(\mu)$  — фурье-образ падающего сигнала, то отраженный сигнал можно записать как

$$U_{\text{отр}} = \int G(\mu) R(\mu) e^{-i\mu y} d\mu. \quad (1)$$

Здесь в терминах [2]

$$R = U(0) - 1 = b_1 + b_2 = \frac{-\text{sh } \alpha}{8(\gamma \text{ ch } \alpha - i \kappa \text{ sh } \alpha)}. \quad (2)$$

имеет вид, приведенный на рис. 2, где

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{64} - \kappa^2}, \quad \kappa = \sqrt{\frac{1}{64} + \frac{m^2}{\delta^2 N^2}}, \quad m = 1, 2, 3, \dots,$$

$\delta$  — амплитуда флуктуаций неоднородностей,  $N$  — число полупериодов модели среды.

Далее, для огибающей  $f(y)$  выбранного трапецеидального импульсного излучения, в достаточной степени адекватно описывающего экспериментально изученные сигналы [1] (см. рис. 3)

$$f_{\text{пад}}(y) = \begin{cases} \frac{b+y}{b-a}, & -b < y < -a \\ \frac{b-y}{b+a}, & a < y < b \\ 1, & |y| \leq a \\ 0, & |y| \geq b \end{cases},$$

функция  $G$  имеет вид

$$G(\mu) = \frac{\cos(\mu a) - \cos(\mu b)}{\mu^2(b-a)^2}. \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1), легко получить форму отраженного импульсного излучения от заданной диэлектрической проницаемости среды.

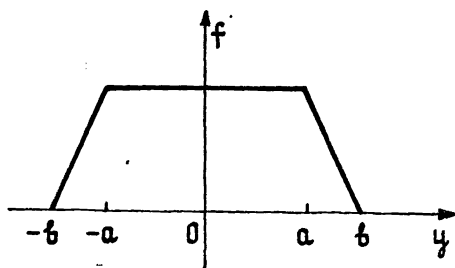


Рис. 3.

Расчет огибающей отраженного сигнала по формуле (1) проводился численно с использованием ЭВМ СМ-4 при следующих параметрах импульсного сигнала и среды:  $a=15$  км,  $b=19,5$  км (см. рис. 3),  $K=500$  км<sup>-1</sup>,  $\delta=0,1$ . Результаты расчета приведены на рис. 4. Видно, что огибающая отраженного сигнала достаточно

изрезана. Причем при разных исходных параметрах задачи (задание моделей регулярной среды и возмущения, характеристик импульсного сигнала, угла падения сигнала на возмущение) изложенный алгоритм позволяет получать разное количество максимумов поля, которые могут соответствовать числу треков в эксперименте.

Таким образом, на основе решения задачи об обратном отражении сигнала от искусственно возмущенной области ионосферы (в представлении ее возмущенной диэлектрической проницаемости некоторой периодической зависимостью) представляется возможным дать качественное объяснение результатов экспериментальных наблюдений сложной структуры СОР в рамках выбранной модели. Как было отмечено выше, возмущенная область содержит спектр неоднородностей от санти-

метров до километров и выше. Поэтому такая задача, по-видимому, должна решаться в более широкой постановке с учетом статистики неоднородностей. Однако представляется физически очевидным, что в рассмотренной постановке в любой момент времени возмущение представляет собой конкретную реализацию, описываемую рядом Фурье. Определяющий вклад в отраженное поле вносит вполне определенный член ряда, соответствующий резонансному отражению от периодической структуры. Отражения же от других масштабов дадут в результирующее поле некоторый «шумовой» вклад. По-видимому, такая трактовка формирования рассеянного поля укладывается в модельное представление отражения импульсного сигнала от периодически возмущенной области ионосферы, определяя многомодовую структуру СОР.

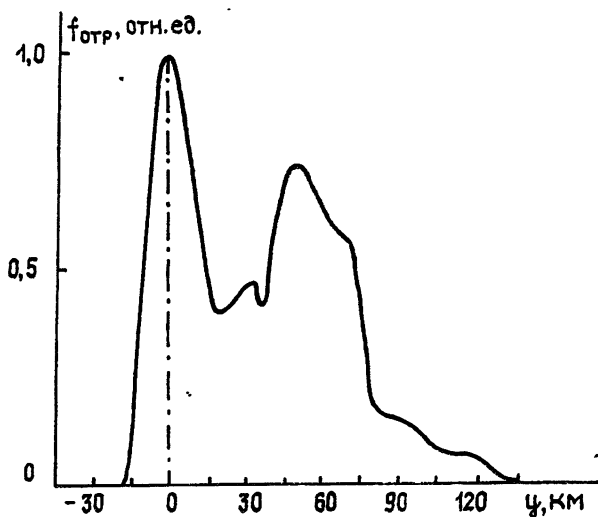


Рис. 4.

Следует заметить, что, имея экспериментальный материал по СОР, с помощью изложенного выше алгоритма численного моделирования можно, по-видимому, перейти к моделированию тонкой структуры искусственно возмущенной области ионосферы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бахметьева Н. В., Бенедиктов Е. А., Бочкарев Г. С. и др. — Геомагнетизм и аэронавигация, 1985, 25, № 2, с. 233
2. Бочкарев Г. С., Еременко В. А., Черкашин Ю. Н. В кн.: Распространение радиоволн в ионосфере. — М.: ИЗМИРАН, 1985, с. 5.
3. Ерухимов Л. М. Материалы Всесоюзного симпозиума. — М.: ИЗМИРАН, 1983, с. 27.
4. Ерухимов Л. М., Метелев С. А., Митякова Э. Е. и др. В кн.: Тепловые нелинейные явления в плазме. — Горький, ИПФ АН СССР, 1979, с. 7.
5. Попов А. В., Черкашин Ю. Н., Шанкин Ю. П. В кн.: Исследование сверхдальнего распространения коротких радиоволн. — М.: ИЗМИРАН, 1975, с. 71.
6. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. — М.: Наука, 1978. — 463 с.

Институт земного магнетизма, ионосферы  
и распространения радиоволн  
АН СССР

Поступила в редакцию  
17 июня 1985 г.,  
после доработки  
3 апреля 1986 г.

#### MODELLING OF THE BACK SCATTERING SIGNALS FROM AN ARTIFICIAL DISTURBED REGION OF THE UPPER IONOSPHERE

G. S. Bochkaryev, V. A. Eremenko, Yu. A. Ignat'ev, V. V. Kol'tsov,  
L. A. Lobachevskij, B. E. Lyannoj, S. N. Matyugin, Yu. N. Cherkashin,  
P. B. Shavin

Qualitative explanation of the complex structure of the back scattering signals from an artificial disturbed region observed in the experiment is given based on the solution of the problem of the monochromatic wave reflection from the weak periodical disturbances of the dielectric medium penetrability. A generalization of this solution is given for a short radio pulse (presented as Fourier integral of monochromatic waves).