

УДК 621.371.25

## О РОЛИ РАКУРСНОГО РАССЕЯНИЯ НА АВРОРАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ В СКОЛЬЗЯЩЕМ МЕХАНИЗМЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

*С. Н. Матюгин, В. П. Урядов*

Рассмотрено влияние ракурсного рассеяния радиоволн на магнитно-ориентированных неоднородностях авроральной ионосферы на вывод энергии из ионосферного волнового канала. Получено хорошее согласие результатов расчета зоны оптимального приема сигналов, рассеянных на анизотропных неоднородностях южной авроральной области, с экспериментальными данными по приему обратных сигналов.

Как показано в работах [1–3], рассеяние радиоволн на анизотропных магнитно-ориентированных неоднородностях естественного или искусственного происхождения может играть определенную роль в вопросах захвата энергии в ионосферный волновой канал (ИВК) или вывода ее из ИВК на Землю. При этом, как известно, энергия, рассеянная на сильно вытянутых неоднородностях, мала везде, за исключением направлений, удовлетворяющих условию зеркального радиоотражения и образующих так называемый конус ракурсного рассеяния. Очевидно, что в направлениях, совпадающих с зеркальными, возможно значительное уменьшение потерь энергии при захвате или при выводе радиоволн из ИВК по сравнению со случаем изотропного рассеяния. Хорошо известно, что в естественных условиях анизотропное рассеяние имеет место на авроральных широтах [4, 5], причем ответственные за этот эффект неоднородности расположены на высотах ИВК. В данной работе рассматривается возможное влияние ракурсного рассеяния радиоволн на магнитно-ориентированных неоднородностях авроральной ионосферы на вывод энергии из ИВК при объяснении широтного хода вероятности приема обратных сигналов (ОС) на научно-исследовательском судне (НИС) «Боровичи» в экспедиции 1971–1972 гг. [6].

В работе [2] исследовалась возможность вывода ОС из ИВК на трассе Москва — Атлантика [6] за счет многократного рассеяния радиоволн на неоднородностях с масштабами  $l \sim 0,3\text{--}1,5$  км. При этом отмечалось, что роль выхода ОС из-за рассеяния должна возрастать для трассы, несколько отличающейся от дуги большого круга Москва — НИС и «углубляющейся» в северную и южную авроральные области\*. Эта трасса показана на рис. 1 (задержка ОС на такой трассе увеличивается примерно на 4 мс относительно расчетной [6]). Распространение КВ сигналов на такой трассе энергетически более выгодно, так как захвату радиоволн в ИВК в этом случае способствует отрицательный градиент электронной концентрации, а сама трасса проходит по менее освещенным областям ионосферы, чем трасса Москва — НИС, и скользящая мода испытывает еще и меньшее поглощение (см. [2]).

\* Вероятность появления неоднородностей с  $l \sim 0,3\text{--}1,5$  км велика в авроральных областях и спадает при приближении к экватору [7].

Местоположение НИС в дни приема ОС отмечено на рис. 1 крестиками. Для того, чтобы ОС, распространяющиеся по «отклоненной» трассе, могли приниматься на НИС, помимо «доворота» луча в вертикальной плоскости (для вывода энергии из ИВК) необходим также «доворот» и в азимутальной плоскости (см. рис. 1). Рассеяние радиоволн на изотропных неоднородностях может обеспечить углы «доворота» в азимутальной плоскости до  $\sim 18^\circ$ . Этого вполне достаточно при небольших (меньше  $10^\circ$ ) отклонениях к северу трассы прохождения ОС от дуги большого круга Москва—НИС. На рис. 1 это отклонение составляет  $\sim 20^\circ$ . В этом случае необходимый «доворот» энергии в азимутальной плоскости в области вывода радиоволн из ИВК может осуществляться за счет ракурсного рассеяния на анизотропных магнитно-ориентированных неоднородностях [2].

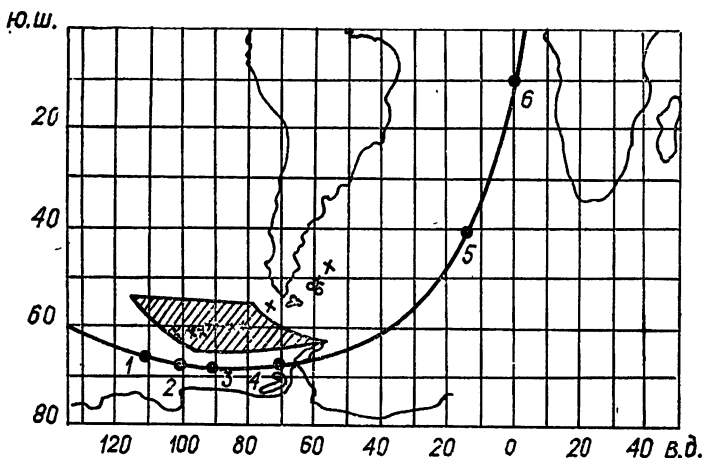


Рис. 1.

На ЭВМ был проведен расчет кривых пересечения конусом зеркального рассеяния поверхности Земли для элементов рассеивающих объемов, расположенных в точках 1—6 на трассе (см. рис. 1) на высоте 200 км. Расчет производился по известным геометрическим формулам для предельной осциллирующей моды с критическим углом к горизонтالي [8]\*\*. Параметры магнитного поля в точках 1—6 определялись из [9]. Расчет кривых пересечения конуса с Землей стандартен (см., например, [3]) и в настоящей работе не приводится.

Результаты расчета показали, что, вообще говоря, выход из ИВК ОС из-за ракурсного рассеяния может иметь место во всех рассматриваемых точках. Но, во-первых, интенсивное ракурсное рассеяние имеет место на авроральных и субавроральных широтах (см., например, [4, 5]). Во-вторых, оказалось, что из-за геометрии трассы и ориентации магнитного поля угловые размеры кривых пересечения конуса с Землей, определяемые из точек рассеяния, уменьшаются на экваторе (точки 5, 6) почти в два раза по сравнению с точками 1—4, что также может привести к уменьшению вероятности приема ОС при приближении НИС к экватору. Таким образом, учитывая сказанное выше, выход ОС из ИВК за счет ракурсного рассеяния наиболее вероятен в точках 1—4. Так как анизотропные магнитно-ориентированные неоднородности

\* Действительно, при  $l = 150$  м,  $\lambda = 15$  м и набега фазы  $s_0 \sim 10$  флуктуации углов прихода составляют  $\Delta\theta = \lambda s_0 / \pi l \sim 18^\circ$ .

\*\* Принятые в расчетах исходные данные характерны для волноводного распространения в ионосферных каналах.

родности фактически распределены вдоль всего рассматриваемого участка трассы, то обарзуется некоторая область, в которой, в принципе, наиболее вероятен прием ОС из-за ракурсного рассеяния (область заштрихована на рис. 1). Эта область попадает именно в те районы (широта расположения НИС  $\varphi \sim 60^\circ S$ , длина трассы 16—18 тыс. км), где вероятность приема ОС была максимальна [6] (см. рис. 1). Таким образом, хорошее совпадение экспериментальных данных по приему ОС с результатами расчета возможных зон оптимального приема сигналов, рассеянных на анизотропных неоднородностях авроральной ионосферы, дает основание считать, что, по крайней мере, в отдельных случаях выход ОС из ИВК в эксперименте [6] связан с ракурсным рассеянием на магнитно-ориентированных неоднородностях.

В заключение приведем численные оценки эффективности вывода энергии из ИВК за счет ракурсного рассеяния радиоволн на неоднородностях авроральной области и сравним их с экспериментальными данными по приему ОС.

Мощность  $P_s$ , принятую за счет рассеяния радиоволн на вытянутых магнитно-ориентированных неоднородностях полярной ионосферы, можно записать в виде  $P_s = S_1 \sigma A / 4\pi r^2$ , где  $S_1$  — плотность потока энергии в ИВК в области вывода радиоволн из канала,  $\sigma$  — эффективный поперечник ракурсного рассеяния,  $A$  — площадь приемной антенны (горизонтальный диполь),  $r$  — расстояние от области вывода энергии из канала до приемного пункта. С другой стороны, для мощности  $P_0$  прямого сигнала, принимаемого на ту же антенну, что и ОС, можно записать выражение в виде  $P_0 = S_2 A$ , где  $S_2$  — плотность потока энергии прямого сигнала в месте расположения приемной антенны.

Возьмем отношение

$$\frac{P_s}{P_0} = \frac{S_1 \sigma}{S_2 4\pi r^2}. \quad (1)$$

Для оценки  $S_1/S_2$  воспользуемся тем обстоятельством, что захват радиоволн в ИВК может происходить за счет регулярной рефракции на отрицательном градиенте электронной концентрации, а трасса ОС смещена на неосвещенную сторону [2]. Тогда разумно предположить, что отношение  $S_1/S_2$  будет определяться разницей в потерях за счет поглощения ОС при его распространении в ИВК и прямого сигнала, распространяющегося скачковым способом. По данным [10] на трассах протяженностью 16—18 тыс. км поглощение радиоволн в ИВК может оказаться на 40 дБ ниже, чем в наземном волноводе. Величину  $\sigma$  определим, используя приведенное в [11] выражение (1.14) для эффективного поперечника рассеяния. Принимая вертикальный и горизонтальный размеры области, дающей основной вклад в амплитуду ОС при ракурсном рассеянии, приближенно равными  $100 \times 100$  км, для ночных условий авроральной ионосферы ( $f_N \sim 4,8$  МГц,  $(\Delta N/N)^2 \sim 10^{-3}$ ) находим  $\sigma \sim 2,5 \cdot 10^8$  м<sup>2</sup>. Подставляя в (1)  $S_1/S_2 \sim 10^4$  и  $\sigma \sim 10^8$  м<sup>2</sup>, для  $r \sim 700$  км, получим  $P_s/P_0 \sim 0,4$ . В рамках приближенного расчета это значение согласуется с наблюдавшимися в эксперименте [6] величинами отношений интенсивностей обратных  $I_s$  и прямых  $I_0$  сигналов  $0,3 \leq I_s/I_0 \leq 2$ .

Авторы выражают благодарность Е. А. Бенедиктову и Л. М. Ерухимову за полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. В. Пудовкин, А. И. Успенский, в сб. Вопросы распространения коротких радиоволн, ИЗМИРАН, т. 2, 101 (1974).
2. Л. М. Ерухимов, С. Н. Матюгин, В. П. Урядов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 18, № 9, 1297 (1975).

3. А. В. Гуревич, Е. Е. Цедиллина, Геомagnetизм и аэрономия, № 6, 1005 (1975).
4. H. F. Bates, Results of the HF Forward and Backscatter Program, Final Report, Geophysical Institute of the University of Alaska, College, 1966.
5. G. Lange-Hesse, Ionospheric Radio Communication, Ed. by Kusten Folkestad Plenum Press, 1968, p. 174.
6. Г. В. Букин, В. С. Караванов и др., Геомagnetизм и аэрономия, 15, 467 (1975).
7. Л. М. Ерухимов, О. И. Максименко, в сб. Дрейфы и неоднородности в ионосфере, изд. Наука, М., 41 (1973).
8. А. В. Гуревич, Л. М. Ерухимов, В. Ю. Ким, В. П. Урядов, Е. Е. Цедиллина, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 18, № 9, 1305 (1975).
9. Н. В. Адам, Н. П. Бенъкова, В. П. Орлов, Н. К. Осипов, Л. О. Тюртина, Геомagnetное поле Земли эпохи 1955 г., ИЗМИРАН, М., 1964.
10. А. В. Гуревич, Геомagnetизм и аэрономия, 11, 961 (1971).
11. Н. Д. Филипп, Рассеяние радиоволн анизотропной ионосферой, изд. Штиинца, Кишинев, 1974.

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию  
5 марта 1976 г.

### THE ROLE OF FORESHORTENED SCATTERING BY AURORAL INHOMOGENEITIES IN A SLIDE MECHANISM OF RADIO WAVE PROPAGATION

*S. N. Matyugin, V. P. Uryadov*

The influence of foreshortened radiowave scattering by magneto-oriented inhomogeneities of the auroral ionosphere upon the energy output from the ionosphere wave channel is considered. A good agreement is obtained between the results of calculations of the zone of optimal reception of signals scattered by anisotropic inhomogeneities of the south auroral region and experimental data on the reception of back signals.

---