

УДК 621.371.25

РЕФРАКЦИЯ РАДИОВОЛН НА ИСКУССТВЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ ИОНОСФЕРЫ: ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В. Б. Иванов, К. В. Свистунов

Методом траекторных расчетов исследуется распространение в ионосфере коротких радиоволн при наличии крупномасштабных неоднородностей, вызванных нагревом плазмы мощным передатчиком. Показано, что рефракция на искусственных возмущениях может приводить к изменению дальности радиотрасс, появлению рикошетирующих траекторий, фокусировке и дефокусировке излучения.

Возмущения ионосферы при воздействии мощного радиоизлучения наземного передатчика имеют весьма разнообразный характер и проявляются, в частности, в общем перераспределении плотности плазмы в облучаемой области. В работах [1-4] показана возможность влияния искусственных неоднородностей на распространение декаметровых радиоволн и представлены некоторые численные оценки такого влияния. В данной статье исследуется распространение волн с использованием специально разработанной модели искусственных возмущений [5]. Модель представляет собой алгоритм численного решения системы уравнений, описывающих состояние ионосферы с учетом дополнительного источника нагрева плазмы. В модель заложены реальные характеристики верхней атмосферы и ионизирующего излучения, и учтены все важнейшие механизмы формирования ионосферы, что позволяет говорить о достаточной количественной точности описания.

Невозмущенный и возмущенные $N(h)$ -профили, используемые в расчетах, представлены на рис. 1 и соответствуют ночной ионосфере (23^h 30^m LT) в средних широтах для равноденственного периода. Кривая 1 показывает невозмущенное распределение, а 2, 3 — возмущенные профили, сформированные в результате нагрева ионосферы в течение 6 минут передатчиком с эквивалентной мощностью 50 МВт при полном поглощении мощного излучения в области высот 285 и 300 км соответственно. В соответствии с характеристиками применяемых для нагрева ионосферы антенн возникающая искус-

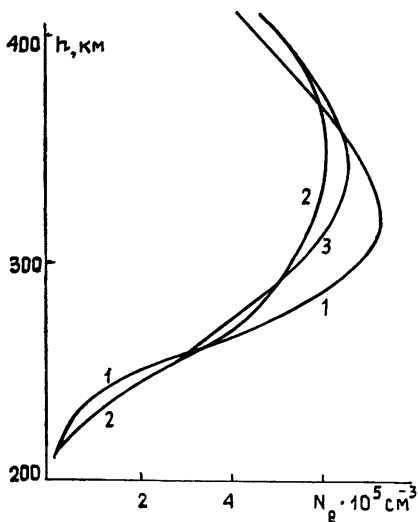


Рис. 1.

ственная неоднородность имеет горизонтальные размеры порядка 100 км, и распределение возмущения концентрации ΔN электронов в горизонтальной плоскости описывается формулой

$$\Delta N(x) = \Delta N_{\max} [1 + \cos(\pi x/90)]/2, \quad (1)$$

где x — расстояние от центра «пятна» ($x \leq 90$ км), ΔN_{\max} — максимальное возмущение.

Как видно из рис. 1, возмущения ΔN отрицательны вблизи уровня поглощения излучения и положительны выше и ниже зоны нагрева. Имеющее место изменение градиентов концентрации обуславливает дополнительную рефракцию лучей, проходящих через неоднородность.

Анализ траекторных расчетов основывается на изучении дистанционно-угловых характеристик, полученных из решения системы лучевых уравнений [6]

$$\frac{dR}{d\theta} = R \operatorname{ctg} \psi; \quad (2)$$

$$\frac{d\psi}{d\theta} = \frac{1}{2\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{d\theta} \operatorname{ctg} \psi - \frac{1}{2\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dR} - 1. \quad (3)$$

В соответствии с методикой, изложенной в [7], здесь рассчитывалась расходимость лучей в вертикальной плоскости (относительно распространения в свободном пространстве). Величина расходимости (фокусировки) определяется формулой

$$J = \frac{\sin \psi_0}{\sin \theta R \sin \psi \frac{dR}{d\psi_0}}. \quad (4)$$

Для вычисления J совместно с уравнениями (2) и (3) решались уравнения

$$\frac{dR'}{d\theta} = R' \operatorname{ctg} \psi - \frac{R\psi'}{\sin^2 \psi}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{d\theta} = & -\frac{1}{2\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{d\theta} \frac{\psi'}{\sin^2 \psi} + R' \operatorname{ctg} \psi \left[\frac{1}{2\varepsilon} \frac{d^2 \varepsilon}{d\theta dR} - \frac{1}{2\varepsilon^2} \frac{d\varepsilon}{d\theta} \frac{d\varepsilon}{dR} \right] \frac{1}{2\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dR} R' - \\ & - R R' \left[\frac{1}{2\varepsilon} \frac{d^2 \varepsilon}{dR^2} - \frac{1}{2\varepsilon^2} \left(\frac{d\varepsilon}{dR} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

В данной постановке задача является двумерной, R и θ — полярные координаты точки траектории, ψ — угол между касательной к траектории и вертикалью, ε — диэлектрическая проницаемость, $R' = dR/d\psi_0$, $\psi' = d\psi/d\psi_0$, ψ_0 — начальный угол излучения. Координата $x = R_0 \theta$ есть дальность по Земле.

Диэлектрическая проницаемость задавалась моделью в виде сеточной функции, между узлами которой применялась бикубическая сплайн-интерполяция.

С учетом результатов работы [8] о зависимости точности расчетов от величины шага интегрирования в расчетах использовался переменный шаг, обеспечивающий относительную ошибку в вычисляемых параметрах, не превышающую 1%.

Приводимые ниже результаты, за исключением специально оговоренного случая, соответствуют модели возмущения, представленной кривой 2 рис. 1.

Типичный вид искажения дистанционно-угловых характеристик искусственной неоднородностью представлен в правой части рис. 2. Здесь и далее сплошные линии относятся к невозмущенной ионосфере,

пунктирные — к ионосфере с неоднородностью. Рис. 2 соответствует распространению излучения с частотой f_0 , равной 19 МГц, при расстоянии от «пробного» до греющего передатчика l_s , равном 1400 км. Изменения дальности скачка распространения зависят от геометрии траектории (для данного ψ_0) относительно положения неоднородности.

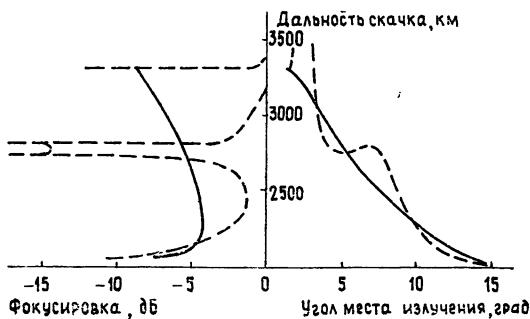


Рис. 2.

В частности, удлинение скачка возможно, если луч попадает в область искусственно увеличенного вертикального градиента на восходящем участке траектории или же в область пониженных градиентов на нисходящем участке. В левой части рисунка показана фокусировка излучения. Можно видеть, что образование искусственной неоднородности может как уменьшить, так и увеличить интенсивность излучения в зоне приема. Так, возможно значительное усиление излучения в областях многомодовости принимаемого сигнала (2700—2800 км на рис. 2). Характер рефракционных эффектов на искусственных неоднородностях соответствует тем представлениям, которые были развиты в [3, 4, 9], где исследовалось влияние неоднородностей на примере некоторых простых моделей. Аналогично [9] в представляемых расчетах было обнаружено, что максимальные искажения дистанционно-угловых характеристик имеют место, когда неоднородность локализована вблизи острия каустической поверхности.

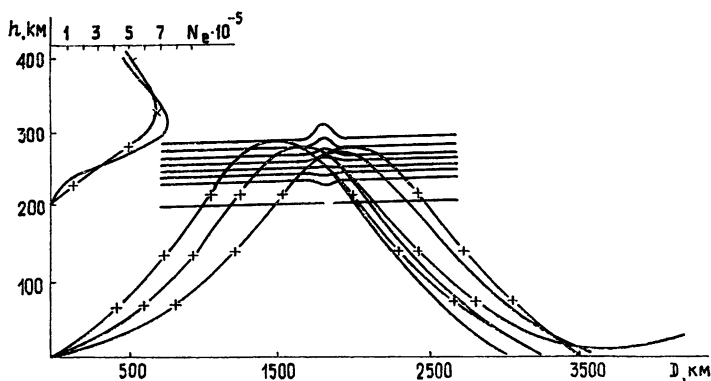


Рис. 3.

При определенных условиях (малые углы места) возмущенные дистанционно-угловые характеристики могут претерпевать разрывы, как это показано на рис. 2. Разрывы на дистанционно-угловых характеристиках связаны с уходом траекторий в рикошетирующие — «проскальзывающие» над поверхностью Земли. Ход лучей, соответствующий

щий рассматриваемому случаю, представлен на рис. 3. Здесь в левой части показаны невозмущенный и возмущенный (линия с маркерами) профили, в правой части — изолинии электронной концентрации для искусственной неоднородности и три луча, соответствующие углам места 1, 4 и 7°. Рис. 2, 3 иллюстрируют еще одну особенность, которая может возникать при развитии неоднородности: как можно видеть, на расстоянии 3300 км образуется «мертвая зона» для приема в силу того, что рефракция привела к увеличению дальности радиотрассы.

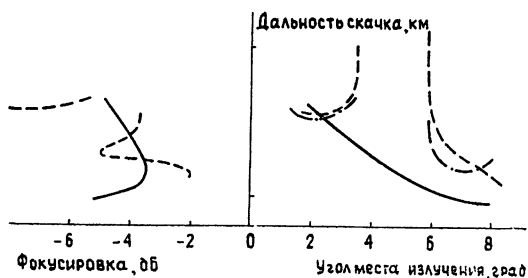


Рис. 4.

На рис. 4 дистанционно-угловые характеристики, соответствующие моделям возмущений, представленным на рис. 1 кривыми 2 и 3, что соответствует пунктирным и штрихпунктирным линиям рис. 4 ($f_0 = 23$ МГц, $l_s = 1800$ км). Расчеты показали, что максимальные возмущения траекторий реализуются, когда основная часть неоднородности находится ниже максимума слоя $F2$ на величину порядка 20—30 км. Из рис. 4 можно видеть, что неоднородность, расположенная непосредственно в максимуме слоя, оказывает меньшее влияние на траектории лучей. Кроме того, рис. 4 иллюстрирует возможность захвата в рикошетирующие траектории относительно широкого сектора углов. По всей вероятности сами по себе искусственные неоднородности не могут являться причиной запитки ионосферных волноводных каналов, поскольку высота «отрыва» рикошетирующих траекторий от Земли невелика (несколько десятков километров). Тем не менее при реализации естественных условий захвата в волноводные каналы эффективность его при наличии искусственных возмущений может увеличиваться.

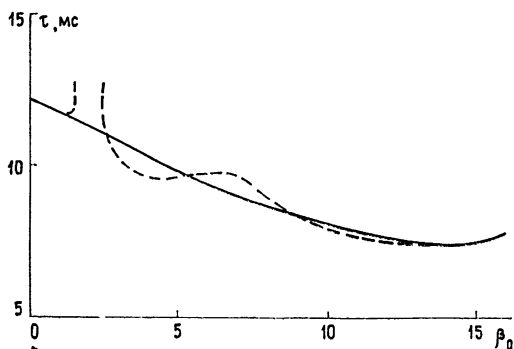


Рис. 5.

Следствием дополнительной рефракции на возмущениях является изменение углов прихода сигналов в зоне приема. Расчеты показали, что изменение углов прихода может быть значительным и достигать десятков процентов. На рис. 5 представлена зависимость группового

времени распространения сигнала от угла места. Как видно из рисунка, при распространении через искусственную неоднородность групповые задержки могут заметно изменяться, что, в частности, может быть обнаружено установками возвратно-наклонного зондирования возмущенной области.

Таким образом, приведенные исследования показывают, что дополнительная рефракция на искусственных неоднородностях ионосферы может оказывать существенное влияние на распространение радиоволн и приводить к достаточно разнообразным эффектам, которые могут быть использованы для решения практических задач радиосвязи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич А В, Цедилина Е. Е. — Геомагнетизм и аэрономия, 1975, 15, № 6, с. 1005
2. Гуревич А В., Цедилина Е. Е — Сверхдальнее распространение радиоволн. — М.: Наука, 1979.
3. Бенедиктов Е. А., Гетманцев Г. Г., Игнатьев Ю. А., Матюгин С. Н. — В сб.: Влияние мощного радиоизлучения на ионосферу. — Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1979, с. 29
4. Бенедиктов Е. А., Горохов Н. А., Игнатьев Ю. А., Матюгин С. Н., Митихин Ю. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 4, с. 502.
5. Поляков В. М., Иванов В. Б., Павлов Н. Н., Сидоров И. М. — В сб.: II Всесоюзное совещание по проблеме «Неоднородная структура ионосферы». — Ашхабад: Ылым, 1979, с. 62.
6. Терещенко В. Д. — В сб.: Морфология и физика полярной ионосферы. — Л.: Наука, 1971, с. 228
7. Сажин В. И., Тинин М. В. — В сб.: Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. — М.: Наука, 1979, вып. 35, с. 82.
8. Егоров И. Б., Егорова В. Н. — В сб.: Теоретическое и экспериментальное исследование распространения декаметровых радиоволн. — М.: ИЗМИРАН, 1976, с. 57.
9. Баранов В. А. Диссертация. — М., 1977.

Иркутский государственный
университет

Поступила в редакцию
4 апреля 1980 г.

REFRACTION OF RADIO WAVES BY ARTIFICIAL DISTURBANCES OF THE IONOSPHERE: A NUMERICAL EXPERIMENT

V. B. Ivanov, K. V. Svistunov

By the method of trajectory calculations a propagation of short radio waves in the ionosphere is investigated in the presence of large-scale irregularities due to a plasma heating by a powerful transmitter. It is shown that refraction by artificial disturbances may lead to variation of radio path distances, occurrence of ricochet trajectories, focusing and defocusing of the radiation.
