

О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДА ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ТРАЕКТОРИИ ЛУЧА В ГОРИЗОНТАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОМ ИОНОСФЕРНОМ СЛОЕ

М. В. Тинин

Применяя метод возмущений в траекторных расчетах, можно получить в геометрикооптическом приближении весьма простые выражения для вариаций углов прихода амплитуды, времени распространения и других характеристик радиоволны в неоднородной среде [1-4]. Однако использование этого метода для учета влияния горизонтальной неоднородности ионосферного слоя встречает определенные трудности, связанные с неустойчивостью квазикритических лучей* (например, луча Педерсена) [3, 4]. Покажем, что эти трудности могут быть преодолены, если вместо традиционной постановки траекторной задачи (см. работы [1-4]) как задачи Коши, т. е. с заданными начальными условиями, решать методом возмущений двухточечную (краевую) задачу, т. е. при фиксированных, заданных координатах источника и наблюдателя. С этой целью сравним

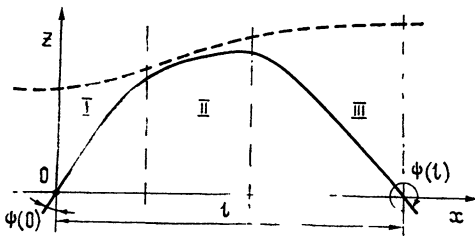


Рис. 1.

результаты, полученные с помощью метода возмущений при определении углов прихода в двухточечной постановке задачи [7] для больших расстояний l (рис. 1)**, с результатами применения к данной задаче метода пограничных функций [8], который, используя возможность при $l \rightarrow \infty$ раздельного описания траектории на участках подъема (I), скольжения (II) и спуска (III), дает асимптотическое (по l) решение данной задачи [9].

Пусть в почти однородной в направлении x среде с диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon(z, \nu x) \equiv \varepsilon(z, \tau) = \varepsilon(z, 0) + \nu x \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau}(z, 0) + O(\nu^2) \quad (1)$$

$$(\tau \equiv \nu x, \quad \nu \ll 1)$$

в точке с координатами $x = 0, z = 0$ расположен источник, а в точке $x = l, z = 0$ — наблюдатель. Используя приведенные в работе [7] результаты решения двухточечной траекторной задачи методом возмущений, можно получить параметры траектории луча в горизонтально-неоднородной ионосфере с диэлектрической проницаемостью (1). В частности, для угла прихода $\psi(l)$ в точке наблюдения имеем

$$\operatorname{ctg} \psi(l) = \operatorname{ctg} \bar{\psi}(l) + \frac{1}{2z'(l)\sin^2 \bar{\psi}(l)} \int_0^l z'(s) \left[s \frac{\partial^2 \ln \varepsilon(\bar{z}, 0)}{\partial z \partial x} - \operatorname{ctg} \bar{\psi} \frac{\partial \ln \varepsilon(\bar{z}, 0)}{\partial x} \right] ds, \quad (2)$$

где $\bar{z}(s), \bar{\psi}(s)$ — координата и угол траектории луча в плоскослоистой ионосфере с параметрами, равными параметрам ионосферы в сечении $x = 0, z'(s) = \partial \bar{z} / \partial \bar{\psi}(0)$.

Если задать ионосферный слой в виде параболического слоя с медленно меняющимися параметрами

$$\varepsilon = \varepsilon_m(\nu x) + \left[\frac{z - z_m(\nu x)}{d(\nu x)} \right]^2, \quad (3)$$

то при большой длине участка траектории внутри слоя ($l \gg \sin \psi(0)d$) выражение (2) примет вид

$$\operatorname{ctg} \psi(l) = - \sqrt{\frac{1 - \varepsilon_m(0)}{\varepsilon_m(0)}} + \frac{l}{2\varepsilon_m^{3/2}(0)\sqrt{1 - \varepsilon_m(0)}} \frac{\partial \varepsilon_m(0)}{\partial x} + \quad (4)$$

$$+ \frac{1}{\varepsilon_m(0)} \left\{ \frac{\partial z_m(0)}{\partial x} - \frac{z_m(0)}{2d(0)} \frac{\partial d(0)}{\partial x} \right\}.$$

* Здесь мы не касаемся вопросов, связанных с построением асимптотических приближений осциллирующих волноводных траекторий в горизонтально-неоднородной ионосфере [5, 6].

** Т. е. когда метод возмущений в традиционной постановке траекторной задачи как задачи Коши дает заведомо неверный (экспоненциально расходящийся) результат.

Сравнивая (4) с формулой для критического угла в горизонтально-неоднородном слое

$$\text{ctg } \psi_{\text{кр}}(L) = -\sqrt{\frac{1 - \varepsilon_m(L\nu)}{\varepsilon_m(L\nu)}} + \frac{1}{\varepsilon_m(L\nu)} \left\{ \frac{\partial z_m(L\nu)}{\partial x} - \frac{z_m(L\nu)}{2d(L\nu)} \frac{\partial d(L\nu)}{\partial x} \right\}, \quad (5)$$

полученной в работе [9] методом пограничных функций, можно убедиться (разлагая (5) в ряд по степеням ν) в эквивалентности (4) и (5) с точностью до членов $O[(L/L)^2]$, где L — наименьший из характерных масштабов изменения параметров слоя (3). Для плавно-неоднородного ионосферного слоя F отсюда следует, что применимость метода возмущений нарушается только для траекторий, у которых имеются участки внутри слоя длиной, превышающей несколько тысяч километров. Сильная расходимость таких лучей приводит к большому ослаблению поля [10]. Поэтому эти лучи не имеют большого практического значения за исключением некоторых случаев возбуждения ионосферных волноводов [11, 12]. Если исключить последние случаи, то полученные результаты говорят о возможности применения метода возмущений для описания скользящих (квазикритических) лучей в горизонтально-неоднородной ионосфере в двухточечной постановке траекторной задачи. Об этом же говорит численная проверка метода возмущений [13].

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Татарский, Распространение волн в турбулентной атмосфере, изд. Наука, М., 1967.
2. В. Д. Гусев, Н. А. Махмутов, А. Хури, Радиотехника и электроника, 19, № 9, 1809 (1974).
3. В. А. Баранов, Ю. А. Кравцов, Изв. вузов — Радиофизика, 18, № 1, 52 (1975).
4. В. А. Баранов, Автореферат диссертации, ИЗМИРАН, М., 1977.
5. М. В. Тинин, сб. Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца, вып. 39, изд. Наука, М., 1976, стр. 166.
6. М. В. Тинин, Изв. вузов — Радиофизика, 20, № 12, 1906 (1977).
7. М. В. Тинин, сб. Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца, вып. 41, изд. Наука, М., 1977, стр. 40.
8. А. Б. Васильева, В. Ф. Бутузов, Асимптотические разложения решений сингулярно возмущенных уравнений, изд. Наука, М., 1973.
9. М. В. Тинин, сб. Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца, вып. 44, изд. Наука, М., 1978, стр. 33.
10. В. М. Поляков, Ю. А. Семеней, М. В. Тинин, сб. Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца, вып. 29, изд. Наука, М., 1973, стр. 145.
11. В. И. Сажин, М. В. Тинин, Изв. вузов — Радиофизика, 18, № 9, 1389 (1975).
12. Ю. А. Кравцов, М. В. Тинин, Ю. Н. Черкашин, О механизмах дальнего распространения коротких радиоволн в ионосфере Земли, Препринт № 30 (229), ИЗМИРАН, М., 1978.
13. Н. Т. Афанасьев, М. В. Тинин, сб. Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца, вып. 46, изд. Наука, М., 1979.

Иркутский государственный университет

Поступила в редакцию
4 апреля 1979 г.

УДК 621.371.25

К ВОПРОСУ О ЗАТУХАНИИ ИОННО-ЗВУКОВЫХ ВОЛН В F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

А. В. Толмачева

В работе [1] было показано, что при воздействии на ионосферу мощного КВ излучения ниже точки отражения возникают искусственные периодические неоднородности, причем в F -области возникновение и исчезновение этих неоднородностей связано с возбуждением быстрозатухающего ионного звука с характерным временем релаксации ~ 20 — 30 мс.

Затухание ионного звука может быть связано с передачей энергии волн молекулам вследствие соударений с заряженными частицами (характерное время затухания $\tau_c \ll 0,2$ с), с поглощением этой энергии заряженными частицами (бесстолкновительное затухание с $\tau_r \sim 20$ мс) и, наконец, с уходом волн из исследуемой области (радиаци-