

Анализ применимости изотропного приближения в задаче частотно-углового зондирования ионосферы

В. Г. Галушко, Г. В. Литвиненко

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4
E-mail: gallitv@rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 7 октября 2002 г.

В работе исследуется влияние магнитного поля Земли на точность восстановления вертикального профиля электронной концентрации ионосферы методом частотно-углового зондирования ионосферы (ЧУЗИ). Оценивается область применимости изотропного приближения в задаче ЧУЗИ в зависимости от длины радиотрассы и ее ориентации относительно вектора магнитного поля Земли. Даются рекомендации по использованию частотно-угловых зависимостей обыкновенных и необыкновенных магнитоионных волн при восстановлении профиля электронной концентрации ионосферы методом ЧУЗИ в изотропном приближении. Справедливость полученных в работе результатов иллюстрируется расчетами для реальных экспериментальных данных.

У роботі досліджується вплив магнітного поля Землі на точність відновлення вертикального профіля електронної концентрації іоносфери методом частотно-кутового зондування іоносфери (ЧКЗІ). Оцінюється область застосовності ізотропного наближення в задачі ЧКЗІ в залежності від довжини радіотраси та її орієнтації відносно вектора магнітного поля Землі. Даються рекомендації щодо використання частотно-кутових залежностей звичайних та незвичайних магнітоіонних хвиль при відновленні профіля електронної концентрації методом ЧКЗІ в ізотропному наближенні. Справедливість отриманих в роботі результатів ілюструється розрахунками для реальних експериментальних даних.

Введение

Ионосфера Земли оказывает существенное влияние на работу систем радиосвязи, радионавигации, радиолокации, передачи энергии и т. д. В связи с этим разработка новых методов исследования и диагностики ионосферной плазмы была и остается одной из актуальных задач современной радиофизики. В работе [1] была предложена методика восстановления вертикального профиля электронной концентрации ионосферы $N_e(z)$ в случае плоскослойной изотропной среды по измерениям частотной зависимости углов прихода $\alpha(\omega)$ квазимонохроматических сигналов на наклонных односкачковых радиотрассах. Метод получил

название “частотно-угловое зондирование ионосферы” (ЧУЗИ). Как было показано, в приближении геометрической оптики обратная задача сводится к решению интегрального уравнения Абея. Исследование устойчивости разработанного алгоритма показало, что для обеспечения точности восстановления $N_e(z)$, характерной для современных ионозондов [2], погрешность измерения углов прихода $\Delta\alpha$ должна лежать в пределах $\pm 0.5^\circ$. Для проверки эффективности предложенной методики восстановления $N_e(z)$ в работе [1] приведены результаты синхронных экспериментов по частотно-угловому и вертикальному зондированию ионосферы вблизи трассы распространения. Частотно-угловые характерис-

тики измерялись с помощью фазированной антенной решетки декаметрового радиотелескопа УТР-2 [3]. Сопоставление полученных данных свидетельствует о том, что параметры среды, восстановленные двумя методами, в большинстве случаев достаточно хорошо согласуются друг с другом.

Тем не менее для некоторых радиотрасс наблюдалось существенное различие восстановленных профилей $N_e(z)$, что, по-видимому, связано с пренебрежением анизотропными свойствами ионосферы. Целью настоящей работы является исследование влияния магнитного поля Земли на точность восстановления $N_e(z)$ методом ЧУЗИ и определение области применимости изотропного приближения в задаче частотно-углового зондирования ионосферы.

1. Методика расчета

При падении на анизотропную ионосферу линейно-поляризованная электромагнитная волна расщепляется на две, в общем случае эллиптически поляризованные, нормальные волны – обыкновенную (“o”) и необыкновенную (“x”). Распространение o- и x-волн от передатчика к приемнику происходит вдоль разных траекторий, степень отличия которых для заданных геомагнитных параметров определяется в основном длиной радиотрассы и ее ориентацией относительно магнитного поля Земли, \vec{H}_0 . Поэтому область применимости изотропного приближения в задаче частотно-углового зондирования оценивалась следующим образом. Для некоторого набора профилей $N_e(z)$ (восстановленных в [1], а также соответствующих стандартной модели дневной и ночной ионосферы) рассчитывались углы прихода обеих магнитоионных волн, α_p^o и α_p^x , как функции длины трассы распространения, D , угла ψ_H между горизонтальной проекцией вектора геомагнитного поля и плоскостью падения волны и угла γ_{H_0} между \vec{H}_0 и осью z (см. рис. 1). Полученные данные сравнивались с результатами расчета углов прихода для изотропной ионосферы, α'' . Область применимости изотропного приближения

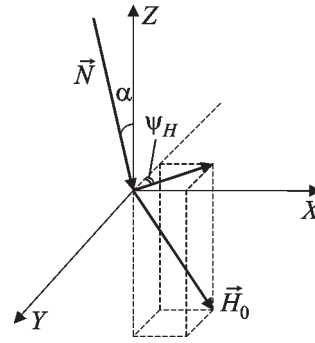


Рис. 1. Геометрия задачи

определялась как область значений D , ψ_H и γ_{H_0} , в которой величины $\Delta\alpha^{o,x} = |\alpha_p^{o,x} - \alpha''|$ находятся в пределах допустимой погрешности измерений углов прихода (0.5°). Действительно, в этом случае профиль электронной концентрации восстанавливается с достаточно высокой точностью (см. [1]) и, следовательно, влиянием магнитного поля Земли можно пренебречь.

Задача расчета траектории решалась в следующей постановке. Без учета поглощения показатель преломления анизотропной ионосферы описывается формулой Эпплтона-Хартри [4]:

$$n_{o,x}^2 = 1 - X \left\{ 1 - \frac{Y^2 \sin^2 \gamma}{2(1-X)} \pm \left[Y^2 \cos^2 \gamma + \frac{Y^4 \sin^4 \gamma}{4(1-X)^2} \right]^{1/2} \right\}^{-1}, \quad (1)$$

где $X = \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$, $Y = \frac{\omega_H}{\omega}$, $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi e^2 N_e(z)}{m}}$ – плазменная частота электронов, $\omega_H = \frac{eH_0}{mc}$ – гирочастота электронов, e и m соответственно заряд и масса электрона, c – скорость света в вакууме, γ – угол между нормалью \vec{N} к волновому фронту и вектором магнитного поля Земли. Верхний знак “+” в выражении (1) соответствует обыкновенной волне, а нижний “-” – необыкновенной.

Для расчета частотно-угловых характеристик $\alpha_p^{o,x}(\omega)$ необходимо построить траекто-

рии o - и x -компонент в магнитоактивной ионосфере. Для этого воспользуемся алгоритмом, предложенным в [5]. Геометрия задачи показана на рис. 1, волна распространяется вдоль оси x . Известно, что направление потока энергии (вектор Умова-Пойнтинга) волны в анизотропной плазме не совпадает с направлением волновой нормали \vec{N} . Показатели преломления обыкновенной и необыкновенной волн различны, отклонения траекторий этих волн от их волновых нормалей противоположны по знаку и имеют разную абсолютную величину. Смещение лучей относительно волновой нормали происходит в плоскости, содержащей волновую нормаль и вектор магнитного поля. Соответственно, траектории o - и x -лучей различны и описываются вектором групповой скорости $\vec{U} = \frac{d\omega}{d\vec{k}}$, где \vec{k} – волновой вектор. Уравнения траекторий в декартовой системе координат имеют вид:

$$\frac{dx}{d\omega} = \frac{dy}{d\omega} = \frac{dz}{d\omega}, \quad (2)$$

или

$$\frac{dx}{\chi_1} = \frac{dy}{\eta_1} = \frac{dz}{\rho_1}, \quad (3)$$

где χ_1, η_1, ρ_1 – угловые коэффициенты вектора \vec{U} (косинусы углов с осями x, y, z). Введем обозначения: $\chi_{H_0}, \eta_{H_0}, \rho_{H_0}$ – угловые коэффициенты вектора магнитного поля \vec{H}_0 ; χ, η, ρ – угловые коэффициенты вектора волновой нормали \vec{N} . Таким образом, имеем: $\vec{U} \equiv \vec{U}(\chi_1, \eta_1, \rho_1)$, $\vec{U} \equiv \vec{U}(\chi_1, \eta_1, \rho_1)$, и $\vec{N} \equiv \vec{N}(\chi, \eta, \rho)$.

В [5] было показано, что для определения искомых угловых коэффициентов вектора групповой скорости $\vec{U} \equiv \vec{U}(\chi_1, \eta_1, \rho_1)$ необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{vmatrix} \chi_1 & \eta_1 & \rho_1 \\ \chi_{H_0} & \eta_{H_0} & \rho_{H_0} \\ \chi & 0 & \rho \end{vmatrix} = 0,$$

$$\chi_1 \chi + \rho_1 \rho = \cos(\vec{N}\vec{U}), \quad (4)$$

$$\chi_1^2 + \eta_1^2 + \rho_1^2 = 1,$$

$$\text{где } \cos(\vec{N}\vec{U}) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1 - \rho^2}{n^2} \left(\frac{\partial n}{\partial \rho} \right)^2}}.$$

Первое уравнение системы (4) показывает, что вектор групповой скорости \vec{U} всегда лежит в плоскости (\vec{N}, \vec{H}_0) . Параметры $\chi_{H_0}, \eta_{H_0}, \rho_{H_0}$, входящие в (4), определяются по справочным данным для соответствующих географических координат. Неизвестные угловые коэффициенты волновой нормали χ, η и ρ вычисляются следующим образом.

Запишем их в виде $\chi = \sin \alpha(z), \eta = 0, \rho = \cos \alpha(z)$, где $\alpha(z)$ – угол падения волны на слой в вертикальной плоскости. Равенство η нулю следует из того, что нормаль к фронту волны остается всюду параллельной плоскости падения. В любой текущей точке траектории z угол $\alpha(z)$ определяется из закона Снеллиуса:

$$\sin^2 \alpha(z) n^2(z, \gamma) = \sin^2 \alpha(z_0), \quad (5)$$

где z_0 – высота начала ионосферного слоя. Косинус угла γ определяется по формуле:

$$\cos \gamma = \chi_{H_0} \sin \alpha(z) + \rho_{H_0} \cos \alpha(z). \quad (6)$$

Численно решая уравнение (5) для обеих магнитоионных волн на всем пути распространения, находим значения $\alpha(z)$ и, следовательно, угловые коэффициенты вектора $\vec{N} = \vec{N}(\chi, 0, \rho)$.

После того как система уравнений (4) полностью определена, вычисляются параметры χ_1, η_1, ρ_1 вектора \vec{U} для всех значений z и затем строятся траектории o - и x -волн в магнитоактивной ионосфере. Заметим, что за пределами ионосферного слоя, т. е. в нашем рассмотрении, когда $z \in [0, z_0]$, для каждой из волн выполняется соотношение $\rho_1 = \cos \alpha(z_0) = \rho$.

2. Обсуждение результатов

Результаты численных расчетов показывают, что для коротких радиотрасс ($D \leq 60$ км) при любой ориентации трассы относительно вектора магнитного поля Земли величины $\Delta\alpha^{o,x}$ превышают допустимую погрешность измерений и, следовательно, при восстановлении параметров ионосферы необходимо учитывать анизотропные свойства плазмы. На рис. 2 в качестве примера приведена зависимость $\Delta\alpha^x = |\alpha_p^x - \alpha^u|$ от длины трассы D для фиксированных параметров $\psi_H = 10^\circ, \gamma_{H_0} = 20^\circ$. Кривая $\Delta\alpha^o$ не приводится, т. к. имеет аналогичный характер, а ее значения в каждой точке не превышают соответствующих величин $\Delta\alpha^x$. Из рисунка видно, что для $D \leq 60$ км разность $\Delta\alpha^x > 0.5^\circ$. Таким образом, в случае коротких трасс для решения задачи частотно-углового зондирования ионос-

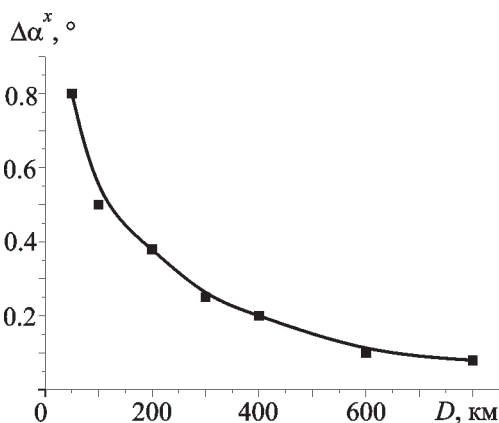


Рис. 2. Зависимость $\Delta\alpha^x = |\alpha_p^x - \alpha^u|$ от длины радиотрассы D для фиксированных параметров $\psi_H = 10^\circ, \gamma_{H_0} = 20^\circ$

феры не рекомендуется использовать изотропное приближение, т. к. это может приводить к существенным погрешностям восстановления профиля электронной концентрации.

Ориентация радиотрассы относительно направления вектора магнитного поля Земли также оказывает существенное влияние на величины $\Delta\alpha^{o,x}$. В частности, оказалось, что при $\gamma_{H_0} \geq 70^\circ$ и $\psi_H \geq 70^\circ$ значение $\Delta\alpha^{o,x} > 0.5^\circ$ для любой длины трассы, и, следовательно, влияние магнитного поля Земли также необходимо учитывать. Приведенные на рис. 3 графики для необыкновенной волны (при $D = 552$ км) наглядно демонстрируют, что если ψ_H и γ_{H_0} больше 70° , отличие углов прихода в изотропном и анизотропном случаях становится значительным. Такой же результат получается и для o -волны.

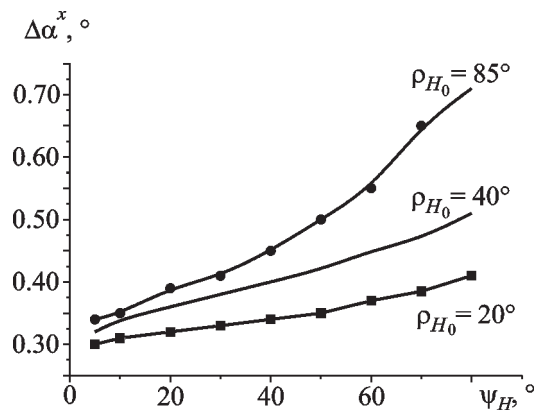


Рис. 3. Зависимость $\Delta\alpha^x = |\alpha_p^x - \alpha^u|$ от угла ψ_H для различных значений γ_{H_0}

Результаты численных расчетов показывают, что в подавляющем большинстве случаев частотно-угловые зависимости, полученные в изотропном приближении, лежат между аналогичными кривыми для o - и x -волн. Кроме того, для трасс длиной $D > 60$ км и углов $\psi_H \in [0^\circ, 11^\circ]$ величина $\Delta\alpha^o = |\alpha_p^o - \alpha^u| \sim 0^\circ$, что связано с выполнением условий квазипродольного распространения волн. Эти обстоятельства могут быть использованы для повышения точности восстановления профиля электронной концентрации методом ЧУЗИ в

изотропном приближении. Например, если в экспериментах наблюдается четкое разделение магнитоионных волн, то для восстановления $N_e(z)$ методом ЧУЗИ можно использовать либо частотно-угловую зависимость вида $\alpha^u = (\alpha^o + \alpha^x)/2$, либо, при выполнении условий квазипродольного распространения, зависимость, соответствующую обыкновенной волне.

Расчетные результаты были сопоставлены с наблюдательными данными, полученными в экспериментах по частотно-угловому зондированию ионосферы на нескольких среднеширотных радиотрассах.

На рис. 4 (кривая 2) приведена функция $\alpha^u(\omega)$, полученная по результатам измерений частотной зависимости углов прихода в вертикальной плоскости на радиотрассе Судак-Харьков ($D = 552$ км). Восстановленный по α^u в изотропном приближении профиль электронной концентрации $N_e(z)$ затем использовался для построения траекторий магнитоионных волн и вычисления α_p^o и α_p^x (см. рис. 4). При расчетах были заданы гирочастота электронов $\omega_H = 1.4$ МГц и угол $\psi_H = 0^\circ$. Из рисунка видно, что кривые α^u и α_p^o практически совпадают, значения $\Delta\alpha^o$ не превышают 0.1° . Радиотрасса Судак-Харьков проходит в области магнитного меридиана ($\psi_H = 0^\circ$, $\gamma_{H_0} = 20^\circ$), и, следовательно, реализуются условия квазипродольного распрост-

ранения лучей. Отличие угла прихода для необыкновенной компоненты, $\Delta\alpha^x$, также мало и не превышает 0.5° . Исходя из полученных в работе оценок можно утверждать, что в данном случае погрешность восстановления профиля электронной концентрации $N_e(z)$ методом ЧУЗИ в изотропном приближении не существенна. Этот результат хорошо согласуется с данными синхронных экспериментов по вертикальному зондированию ионосферы вблизи трассы распространения.

Заключение

В работе на основе численных расчетов определена область применимости изотропного приближения при частотно-угловом зондировании ионосферы в зависимости от длины радиотрассы и ее ориентации относительно магнитного поля Земли. Даны рекомендации по использованию частотных зависимостей углов прихода магнитоионных волн, α^o и α^x , с целью уточнения параметров профилей электронной концентрации ионосферы, восстановленных методом ЧУЗИ в изотропном приближении. Полученные в работе численные результаты подтверждены расчетами на основе реальных экспериментальных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Украинского научно-технологического центра (УНТЦ) в рамках проектного соглашения № 827с.

Литература

1. В. Г. Галушко. О возможности частотно-углового зондирования ионосферы. Изв. вузов. Радиофизика. 1991, **34**, №7, с. 850-853.
2. В. W. Reinish. Modern Ionosondes, in Modern Ionospheric Science. Edited by H. Kohl, R. Ruster, and K. Schlegel. EGS. 1996, pp. 440-458.
3. С. Я. Брауде, А. В. Мень, Л. Г. Содин. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2. Антенны. Москва, Связь, Вып. 25, 1978.
4. Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе. Физика ионосферы. Москва, Наука, 1988, 527 с.
5. Я. Л. Альперт. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. Москва, Наука, 1972, 563 с.

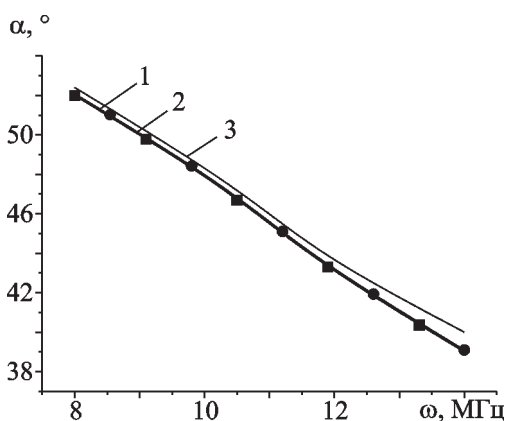


Рис. 4. Расчетные частотно-угловые зависимости α^u , α_p^o и α_p^x для радиотрассы Судак-Харьков ($D = 552$ км, $\psi_H = 0^\circ$, $\gamma_{H_0} = 20^\circ$)

**Analysis of Applicability
of Isotropic Approximation
in a Problem of Frequency-and-Angular
Sounding of Ionosphere**

V. G. Galushko, and G. V. Litvinenko

In the present work the Earth's magnetic field influence on the accuracy of the vertical electron density profile recovering by the frequency-and-angular sounding method (FASI) is investigated.

The domain of applicability of an isotropic approximation in the FASI problem as a function of radiopath length and its orientation relatively to the Earth magnetic field vector is estimated. Recommendations for the electron ionospheric density recovering by the FASI method in the isotropic approximation using the frequency-and-angular dependences of the ordinary and extraordinary magnetoionic waves are given. Validity of the obtained results is illustrated by the real experimental data processing.