

Д.В. КОТОВ, н.с., Институт ионосферы, Харьков

ОЦЕНИВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ, СВЯЗАННЫХ С НЕУЧЕТОМ КОНЕЧНОСТИ ВЕЛИЧИНЫ ДЕБАЕВСКОГО РАДИУСА ЭКРАНИРОВАНИЯ

За результатами моделювання розв'язання прямої та зворотної задач радіофізики оцінено методичні похибки визначення параметрів іоносферної плазми, які пов'язані з неврахуванням кінцевої величини дебаєвського радіусу екранування. Зроблено висновок про те, що у загальному випадку найбільші систематичні похибки виникають при визначенні концентрації електронів. Менш значні похибки притаманні оцінкам температури електронів. Додаткові похибки визначення температури іонів та відносного вмісту іонів є незначними.

По результатам моделирования решения прямой и обратной задач радиофизики оценены методические погрешности определения параметров ионосферной плазмы, связанные с неучетом конечности дебаевского радиуса экранирования. Сделано вывод о том, что в общем случае максимальные систематические погрешности возникают при определении концентрации электронов. Оценки температуры электронов характеризуются меньшими значениями погрешностей. Дополнительные погрешности определения температуры ионов и относительного содержания ионов незначительны.

Methodological error of the ionospheric plasma parameters determining associated with neglecting finite size of Debye length are estimated as a result of modeling of direct and inverse radiophysical problems. It was concluded that in general the largest systematic errors arise in the electron density determining. Less significant errors inherent in estimates of electron temperature. Additional error of determining the ion temperature and ion fractions is negligible.

Введение. Известно [1], что форма спектра некогерентно рассеянного (НР) сигнала зависит не только от значений основных параметров плазмы (концентрации электронов N , температуры ионов T_i и электронов T_e , относительного содержания ионов различных сортов и т. д.), но и от соотношения значений дебаевского радиуса экранирования и длины используемой радиоволны. Дебаевский радиус увеличивается с уменьшением N и ростом T_e [1], что приводит к искажению оценок параметров плазмы, определяемых по измеренному спектру НР сигнала или по его автокорреляционной функции (АКФ). Общий характер таких искажений для радара НР Института ионосферы был исследован в [2] для отдельно взятого случая, когда были заданы высотные распределения параметров плазмы, соответствующие некоторым гелиогеофизическим условиям. Дальнейшее развитие методик анализа экспериментальных данных, обусловившее значительное снижение вклада других составляющих в общее смещение получаемых оценок параметров плазмы, сделало целесообразным проведение более детального анализа характера и величин погрешностей, возникающих вследствие недооценки величины дебаевского радиуса.

Цель статьи – оценивание погрешностей определения параметров ионосферной плазмы, дополнительно возникающих вследствие неучёта конечности величины дебаевского радиуса, и построение зависимостей таких погрешностей от величины концентрации электронов при существенно различных состояниях ионосферы.

Моделирование. Значения параметров плазмы, для которых проводилось решение прямой (с учётом конечности дебаевского радиуса) и обратной (полагая, что длина волны значительно превосходит дебаевский радиус, как это принимается при анализе экспериментальных данных) радиофизических задач, выбирались с учётом их граничных величин, определённых по результатам исследований и предоставляемых моделями ионосферы.

Моделирование АКФ проводилось по формуле, которая используется в стандартном пакете обработки данных GUISDAP Европейской ассоциации по некогерентному рассеянию EISCAT [3]. Данная формула, в отличие от использовавшейся в работе [2], является более общей и даёт более точные результаты при наличии в плазме лёгких ионов (гелия и водорода), что характерно для рассматриваемой области – внешней ионосферы.

В результате моделирования были получены зависимости абсолютных погрешностей определения температур ионов ΔT_i и электронов ΔT_e , относительного содержания ионов гелия $N(\text{He}^+)/N$ и водорода $N(\text{H}^+)/N$ от величины концентрации электронов в диапазоне от $5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ до $2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

На рисунке представлены полученные зависимости погрешностей. Значения параметров T_i , T_e , $N(\text{He}^+)/N$ и $N(\text{H}^+)/N$, для которых проводились расчёты, соответствуют характерным условиям для ночной и дневной внешней ионосферы.

Дополнительно была получена формула, позволившая рассчитать зависимости отношения оценки N^* к истинному значению N :

$$\frac{N^*}{N} = \frac{\left(1 + T_e^*/T_i^*\right) \int_0^{\infty} W(\omega, N) d\omega}{\left(1 + T_e/T_i\right) \int_0^{\infty} W(\omega, N_0) d\omega}.$$

Здесь T_i^* , T_e^* – оценки температур ионов и электронов, $W(\omega, N)$ – энергетический спектр НР сигнала, N_0 – значение концентрации электронов, при котором дебаевский радиус может считаться пренебрежимо малым по сравнению с длиной волны.

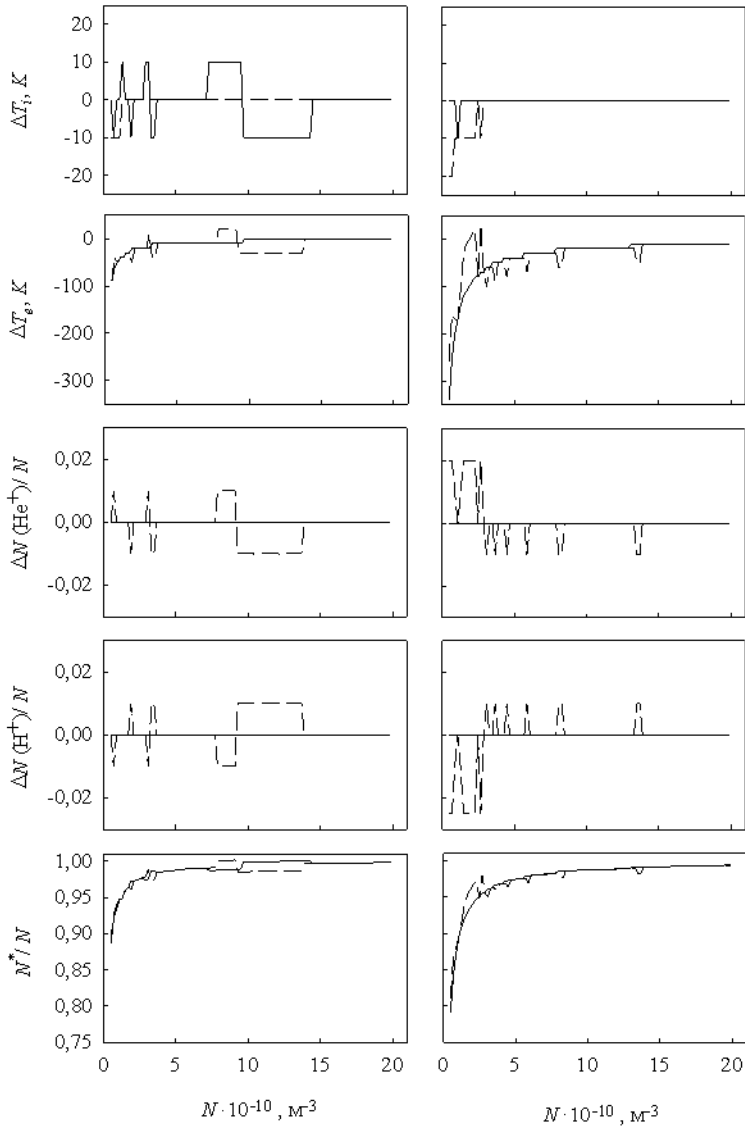


Рис. Зависимости погрешностей основных параметров ионосферной плазмы от значений концентрации электронов N при величине $N(\text{He}^+)/N = 0.1$ для значений температур $T_i = 1500 \text{ K}$, $T_e = 1500 \text{ K}$ (графики слева) и $T_i = 1500 \text{ K}$, $T_e = 3000 \text{ K}$ (графики справа). Сплошные кривые соответствуют значениям $N(\text{H}^+)/N = 0.2$, пунктир – $N(\text{H}^+)/N = 0.8$.

Обсуждение результатов. Детальное рассмотрение результатов моделирования позволяет сделать следующие основные выводы.

Для всех рассмотренных условий погрешности определения температуры ионов, дополнительно возникающие из-за недооценки величины дебаевского радиуса, пренебрежимо малы (не более 1 %). Эти результаты хорошо согласуются с данными, полученными в работе [2].

Дополнительные погрешности оценок температуры электронов также качественно и количественно подобны полученным в работе [2]. Хорошо видно, что величина ΔT_e увеличивается с ростом T_e . Таким образом, относительная погрешность определения T_e примерно постоянна, практически не зависит от ионного состава и достигает 10 % при величине $N = 5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$.

Погрешности определения относительных содержаний ионов не превышают 2.5 % и в несколько раз меньше оценок, полученных в работе [2], хотя значения концентрации электронов, используемые при расчётах в [2], везде превышают величину $5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$. Можно предположить, что расхождения в оценках погрешностей объясняются тем, что мы использовали более корректную формулу [3].

Таким образом, оценки параметров $N(\text{He}^+)/N$ и $N(\text{H}^+)/N$, получаемые в предположении пренебрежимой малости дебаевского радиуса, в большей части диапазона возможных значений N и T_e можно считать несмещёнными.

Иначе обстоит дело с абсолютными концентрациями ионов, которые определяются как произведение относительного содержания и концентрации электронов. Очевидно, что оценки $N(\text{He}^+)$ и $N(\text{H}^+)$, как и соответствующие оценки N , занижены до 20 % по сравнению с истинными значениями.

Выводы. Полученные по результатам моделирования зависимости погрешностей оценок основных параметров ионосферной плазмы позволяют оценить степень смещённости этих оценок в условиях текущих измерений. Априорная информация о качественных и количественных характеристиках смещений позволит принять решение о целесообразности внесения соответствующих поправок в полученные оценки, либо же о необходимости повторного расчёта параметров с учётом зависимости нормированной АКФ НР сигнала от величины концентрации электронов.

Список литературы: 1. Эванс Дж.В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // ТИИЭР. – 1969. – Т. 57, № 4. – С. 139 – 175. 2. Гринченко С.В. Определение ионосферных параметров по автокорреляционной функции некогерентно рассеянного сигнала при учёте конечности дебаевского радиуса // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 2000. – Вып. 103. – С. 20 – 23. 3. Dougherty J.P., Farley D.T. A theory of incoherent scatter of radio waves by a plasma // Journal of Geophysical Research. – 1963. – V. 66, № 19. – P. 5473 – 5486.

Поступила в редакцию 29.06.2011