

Д.В. КОТОВ, к.ф.-м.н., н.с., Институт ионосферы, Харьков;
А.В. БОГОМАЗ, к.т.н., н.с., Институт ионосферы, Харьков

ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ ПЕРЕХОДА К ЛЁГКИМ ИОНАМ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Исследованы погрешности высоты перехода к лёгким ионам, измеряемой с помощью метода некогерентного рассеяния. Проведено моделирование решений прямой и обратной радиофизических задач. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что главный вклад в погрешность определения высоты перехода к лёгким ионам вносят статистические погрешности измерений относительных концентраций ионов водорода и гелия. Методические погрешности малы по сравнению со статистическими.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, высота перехода к лёгким ионам, моделирование, погрешности.

Введение. Одним из наиболее важных параметров, характеризующих ионный состав ионосферы Земли и используемых для моделирования распределения концентрации электронов N выше максимума ионизации ионосферы, является высота перехода к лёгким ионам H_T [1].

Высота H_T может быть определена по результатам измерений относительных концентраций лёгких ионов (водорода и гелия) – $N(\text{H}^+)/N$ и $N(\text{He}^+)/N$; на высоте H_T суммарная относительная концентрация лёгких ионов $N(\text{H}^+)/N + N(\text{He}^+)/N = 50\%$.

Метод некогерентного рассеяния (НР) [2, 3] в некоторых случаях позволяет определять относительные концентрации упомянутых ионов. Среди более чем десяти существующих в мире радаров НР только четыре способны измерять ионный состав вплоть до высоты H_T . Одним из этих радаров является радар НР Института ионосферы [3].

Радар НР Института ионосферы расположен вблизи Харькова (49.6° с.ш., 36.3° в.д.). Радар работает на частоте 158 МГц и использует параболическую антенну диаметром 100 м для излучения зондирующих радиоимпульсов в ионосферу и приёма НР сигнала [4]. Параметры ионосферной плазмы определяются по результатам решения обратной радиофизической задачи с использованием в качестве исходных данных измеренных автокорреляционных функций (АКФ) принятого сигнала [5].

Постановка задачи. Для исследования лёгких ионов приходится использовать простые длинные зондирующие радиоимпульсы (радар Института ионосферы излучает в ионосферу импульс длительностью около 650 мкс). Это вызвано необходимостью увеличить отношение сигнал/шум, которое может быть существенно меньше единицы для сигналов, рассеянных выше максимума ионизации ионосферы. Очевидно, что при этом ухудшается

высотная разрешающая способность определения параметров ионосферной плазмы (длительности 650 мкс соответствует высотное разрешение около 100 км). При этом возможно возникновение смещений оценок параметров $N(\text{H}^+)/N$ и $N(\text{He}^+)/N$ и, как следствие, смещения оценки высоты H_T . Также, поскольку НР сигнал является случайным процессом, даже при большом значении отношения сигнал/шум всегда присутствуют статистические погрешности оценок искомым параметров. Величина возможных смещений и статистических погрешностей определения H_T до настоящего времени не была исследована.

Цель настоящей статьи состоит в оценивании погрешностей определения высоты перехода к лёгким ионам H_T при использовании метода некогерентного рассеяния и длинных зондирующих радиоимпульсов.

Моделирование. Для оценивания возможных смещений относительных концентраций ионов водорода и гелия, обусловленных недостаточно высотной разрешающей способностью метода НР, проводилось моделирование решения прямой и обратной радиофизических задач.

Решение прямой радиофизической задачи состояло в моделировании “измеренной” АКФ НР сигнала $R^*(\tau, h)$ с учётом всех особенностей процесса НР и аппаратных характеристик радара НР [6, 7]:

$$R^*(\tau, h) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} d\theta dr R_{IS}(\theta, r) W_{\tau}(\theta, r). \quad (1)$$

Здесь $W_{\tau}(\theta, r) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} ds dr W_t(s, r) W_{t+\tau}(s+\theta, r)$ – двумерная функция

неопределённости (ДФН) АКФ НР сигнала [6–8], $W_{\tau}(s, r) = g(t-s)p\left(s - \frac{2r}{c}\right)$, $g(t)$ – импульсная характеристика радиоприёмного устройства радара НР, $p(t)$ – огибающая излучаемого в ионосферу радиоимпульса, $t = 2h/c$, h – высота, для которой моделируется “измеренная” АКФ, $R_{IS}(\theta, r)$ – АКФ НР сигнала, рассеянного на высоте r .

Для моделирования мы использовали импульсную характеристику фильтра, применяющегося в режиме исследования лёгких ионов, а также реальную огибающую излучаемого радиоимпульса [9]. Для расчёта АКФ $R_{IS}(\theta, r)$ использовались высотные распределения концентрации электронов, температур ионов и электронов, а также относительных концентраций ионов H^+ и He^+ , взятые из модели ионосферы International Reference Ionosphere-2012 (на рис. 1 приведен пример модельных распределений для зимнего солнцестояния при низкой солнечной активности в полночь по местному солнечному времени; данный вид высотных распределений является типичным). Мы

применили также дополнительное треугольное суммирование полученных АКФ $R^*(\tau, h)$ [6] подобно тому, как это делается при анализе экспериментальных данных.

Решение обратной радиофизической задачи с использованием рассчитанных “измеренных” АКФ НР сигнала $R^*(\tau, h)$ позволило получить “измеренные” оценки параметров ионосферной плазмы. При решении обратной задачи проводилось сравнение функций $R^*(\tau, h)$ с подвергнутыми треугольному суммированию функциями

$$R_M(\tau, h) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} d\theta dr R^*(0, r) \rho(\theta) W_{\tau}(\theta, r), \quad (2)$$

где $\rho(\theta)$ – теоретический коэффициент корреляции НР сигнала при заданных значениях параметров плазмы, которые считаются не зависящими от высоты. Подобный подход является промежуточным между так называемым “gated” анализом [10] и “full-profile” анализом [6, 7], поскольку для расчёта АКФ, которые затем сравниваются с измеренными функциями, мы используем ДФН (как это делается в работе [10]), но считаем при этом, что только мощность НР сигнала изменяется с высотой.

Результаты модельных исследований показывают, что вовлечение в расчёты измеренного высотного распределения $R^*(0, h)$ существенно уменьшает смещения оценок параметров ионосферной плазмы. Так, для температур ионов и электронов абсолютная величина смещений не превышают нескольких десятков кельвин для верхней ионосферы (без использования $R^*(0, h)$ погрешности достигают 100–200 К).

Абсолютная величина смещений оценок параметров $N(H^+)/N$ и $N(He^+)/N$ не превышает 1–2% (рис. 1), что существенно меньше величины статистических погрешностей (обычно около высоты H_T среднее квадратическое отклонение суммы относительных концентраций ионов H^+ и He^+ $\sigma_F \approx 10$ –15% при временном усреднении экспериментальных данных на интервале 15 минут).

Следовательно, при использовании модели измерительных преобразований (2) погрешность определения высоты H_T фактически определяется статистическим разбросом относительных концентраций ионов H^+ и He^+ . Оценим величину такой погрешности.

Как следует из рис. 1, высотная зависимость суммарной относительной концентрации ионов H^+ и He^+ является практически линейной в широком диапазоне значений около на которой $N(H^+)/N + N(He^+)/N = 50\%$ (около H_T). Это означает, что в первом приближении среднее квадратическое отклонение оценки высоты перехода к лёгким ионам $\sigma(H_T)$ может быть записано так:

$$\sigma(H_T) \approx \sigma_F \left(\frac{\partial(N(\text{H}^+)/N + N(\text{He}^+)/N)}{\partial h} \right)^{-1} \quad (3)$$

где $\frac{\partial(N(\text{H}^+)/N + N(\text{He}^+)/N)}{\partial h}$ – высотный градиент суммарной относительной концентрации лёгких ионов ($\approx 0,7-1$ % / км).

Тогда $\sigma(H_T) \approx 10-20$ км. Такая величина погрешности является вполне приемлемой, поскольку даже минимальные значения H_T превышают 450 км.

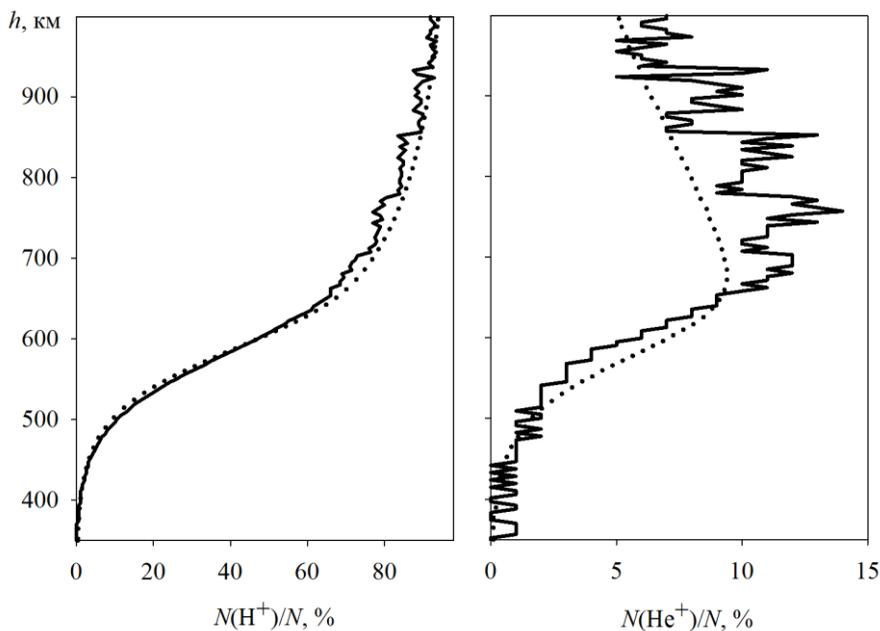


Рис. 1 – Модельные высотные профили относительных концентраций ионов водорода и гелия, использованные для решения прямой радиофизической задачи (точки) и результаты решения обратной радиофизической задачи (сплошная линия).

Выводы. Проведенные модельные исследования позволили оценить величину погрешности определения высоты перехода к лёгким ионам с помощью метода некогерентного рассеяния. Установлено, что использование длинного (650 мкс) зондирующего импульса не приводит к сколько-нибудь существенному смещению оценок высоты H_T , а статистическая погрешность оценки не превышает 20 км.

Список литературы: 1. Брюнелли Б. Е. Физика ионосферы / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе. – М.: Наука, 1988. – 528 с. 2. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн / Дж. В. Эванс // ТИИЭР. – 1969. – Т. 8. – № 4. – С. 139–175. 3. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния / В. И. Таран // Геоматнетизм и аэронавигация. – 2001. – Т. 41. – № 5. – С. 659–666. 4. Domnin I. F. Kharkiv incoherent scatter facility / I. F. Domnin, Ya. M. Chepurnyy, L. Ya. Emelyanov, S. V. Chernyaev, A. F. Kononenko, D. V. Kotov, O. V. Bogomaz, D. A. Iskra // Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Series: Radiophysics and Ionosphere. – 2014. – № 47 (1089). – P. 28–42. 5. Лысенко В. Н. Измерение параметров ионосферы средствами корреляционной обработки некогерентно рассеянного сигнала / В. Н. Лысенко // Радиофизика и электроника. – 2002. – Т. 7. – № 1. – С. 82–88. 6. Holt J. M. Optimal analysis of incoherent scatter radar data / J. M. Holt, D. A. Rhoda, D. Tetenbaum, A. P. van Eyken // Radio Science. – 1992. – Vol. 27, №. 3. – P. 435–447. 7. Hysell D. L. Full profile incoherent scatter analysis at Jicamarca / D. L. Hysell, F. S. Rodrigues, J. L. Chau, J. D. Huba // Ann. Geophys. – 2008. – № 26. – P. 59–75. 8. Сюсюк М. Н. Моделирование двумерной функции неопределённости радара некогерентного рассеяния / М. Н. Сюсюк, Д. В. Котов, А. В. Богомаз // Вестник Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”. – 2011. – № 44. – С. 81–84. 9. Котов Д. В. О влиянии огибающей излучаемого радиоимпульса на оценки плазменных температур, определяемых с помощью метода некогерентного рассеяния / Д. В. Котов, А. В. Богомаз, А. И. Лялюк, Д. А. Искра // Вестник НТУ «ХПИ». Автоматика и приборостроение. – Харьков. – 2014. – № 67 – С. 29–32. 10. Hysell D. L. Topside measurements at Jicamarca during solar minimum / D. L. Hysell, J. L. Chau, J. D. Huba. – Ann. Geophys. – 2009. – № 27. – P. 427–439.

Bibliography (transliterated): 1. Brjunelli B. E. *Fizika ionosfery* / B. E. Brjunelli, A. A. Namgaladze. – M.: Nauka, 1988. – 528 p. 2. Jevans Dzh. V. *Teoreticheskie i prakticheskie voprosy issledovanija ionosfery metodom nekogerentnogo rassejanija radiovoln* / Dzh. V. Jevans // ТИИЭР. – 1969. – V. 8. – No 4. – p. 139–175. 3. Taran V. I. *Issledovanie ionosfery v estestvennom i iskusstvenno vozvushhennom sostojanijah metodom nekogerentnogo rassejanija* / V. I. Taran // Geomagnetizm i aeronomija. – 2001. – V. 41. – No 5. – p. 659–666. 4. Domnin I. F. *Kharkiv incoherent scatter facility* / I. F. Domnin, Ya. M. Chepurnyy, L. Ya. Emelyanov, S. V. Chernyaev, A. F. Kononenko, D. V. Kotov, O. V. Bogomaz, D. A. Iskra // Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Series: Radiophysics and Ionosphere. – 2014. – No 47 (1089). – P. 28–42. 5. Lysenko V. N. *Izmerenie parametrov ionosfery sredstvami korreljacionnoj obrabotki nekogerentno rassejannogo signala* / V. N. Lysenko // Radiofizika i jelektronika. – 2002. – V. 7. – No 1. – p. 82–88. 6. Holt J. M. *Optimal analysis of incoherent scatter radar data* / J. M. Holt, D. A. Rhoda, D. Tetenbaum, A. P. van Eyken // Radio Science. – 1992. – Vol. 27, No. 3. – p.435–447. 7. Hysell D. L. *Full profile incoherent scatter analysis at Jicamarca* / D. L. Hysell, F. S. Rodrigues, J. L. Chau, J. D. Huba // Ann. Geophys. – 2008. – No 26. – P. 59–75. 8. Sjusjuk M. N. *Modelirovanie dvumernoj funkcii neopredel'nostii radara nekogerentnogo rassejanija* / M. N. Sjusjuk, D. V. Kotov, A. V. Bogomaz // Vestnik NTU “KhPI”. – 2011. – No 44. – p. 81–84. 9. Kotov D. V. *O vlijanii ogibajushhej izluchaemogo radioimpul'sa na ocenki plazmennyh temperatur, opredeljaemyh s pomoshh'ju metoda nekogerentnogo rassejanija* / D. V. Kotov, A. V. Bogomaz, A. I. Ljaljuk, D. A. Iskra // Vestnik NTU «KhPI». Avtomatika i priborostroenie. – Kharkov. – 2014. – No 67 – p. 29–32. 10. Hysell D. L. *Topside measurements at Jicamarca during solar minimum* / D. L. Hysell, J. L. Chau, J. D. Huba. – Ann. Geophys. – 2009. – No 27. – P. 427–439.

Надійшла (received) 22.05.2015