

СРАВНЕНИЕ ДВУХ ПОДХОДОВ К АДАПТИВНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ СИГНАЛАМИ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ РАДИОМАЯКОВ

¹А.В. Тимченко, ²И.А. Павлов, ²А.М. Падохин, ¹Ф.С. Бессараб

¹Калининградский филиал Института Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия

aleksandr.timchenko77@gmail.com

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

COMPARISON OF TWO APPROACHES TO IONOSPHERIC ADAPTIVE MODELING BASED ON THE RADIO SOUNDING WITH LOW ORBITAL BEACONS

¹A.V. Timchenko, ²I.A. Pavlov, ²A.M. Padokhin, ¹F.S. Bessarab

¹West department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia

aleksandr.timchenko77@gmail.com

²Lomonosov Moscow State University, Russia

Аннотация. С использованием модели NeQuick2 и синтезированных с ее помощью на основе реальной геометрии эксперимента по низкоорбитальному радиопросвечиванию данных проведено сравнение двух подходов к адаптивному моделированию ионосферы — тихоновской и статистической регуляризации. Показано, что результаты ионосферных реконструкций, полученные с помощью этих подходов, существенно зависят от геометрии расположения приемных пунктов и задания начального приближения — фоновой модели ионосферы. Вместе с тем метод статрегуляризации обладает определенным преимуществом и позволяет учесть в алгоритме реконструкции влияние шумов измерений, а также статистических характеристик оценок параметров ионосферы, полученных в рамках фоновой модели.

Ключевые слова: ионосфера, адаптивное моделирование, регуляризация, радиопросвечивание, NeQuick2.

Abstract. We use simulated with NeQuick2 model data of low orbital radiosounding to test two different approaches to ionospheric adaptive modeling, e.g., Tikhonov and statistical regularization. We show that results of both approaches depend significantly on the geometry of the experiment and the choice of the initial state – ionospheric background model. At the same time, statistical regularization provides the advantage to balance the contribution of both measurements and background model to the final solution based on their variance-co variance properties.

Keywords: ionosphere, adaptive modeling, regularization, remote sensing, NeQuick2.

ВВЕДЕНИЕ

Возможность получения данных о пространственно-временной изменчивости ионосферы важна для различных прикладных задач: загоризонтной радиолокации, КВ-связи, спутниковой навигации. На современном этапе развития техники спутникового зондирования можно получать информацию о радиопросвечивании ионосферы в широком диапазоне положений приемопередающих систем, что может быть использовано для решения обратной задачи восстановления распределения электронной концентрации в ионосфере. Эта задача сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма I рода, которое, в свою очередь, может быть сведено к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) [Куницын и др., 2006]. В связи с большим числом, но ограниченным диапазоном направлений радиопросвечивания эта СЛАУ относится к классу некорректно поставленных задач и для ее решения необходимо применять методы регуляризации. Одним из вариантов может быть регуляризация по Тихонову, результатом применения которой является квазирешение с минимальной нормой или с минимальной нормой отклонения от начального приближения. Если помимо данных наблюдений имеется модель среды, описывающая некоторое среднее распределение искомого параметра и его статистические характеристики, то для получения квазирешения можно использовать метод статрегуляриза-

ции. Целью настоящей работы является сравнение этих двух подходов в задаче восстановления двумерных, высотно-широтных распределений электронной концентрации в ионосфере по данным радиопросвечивания сигналами низкоорбитальных спутниковых радиомаяков.

ДАННЫЕ И МЕТОД

Для сопоставления двух методов регуляризации в задаче о спутниковом радиопросвечивании ионосферы использовались псевдоданные наблюдений, полученные для реальной геометрии проведения эксперимента с помощью эмпирической модели NeQuick2 [Nava et al., 2008]. Для каждого луча зондирования спутник—приемник вычислялось наклонное полное электронное содержание TEC на основе распределения электронной концентрации n_e , заданной моделью, согласно формуле

$$TEC(\beta, \tau_i) = \int_0^{h_0} \frac{n_e(h, \tau)(R+h)dh}{\sqrt{R^2(\sin\beta)^2 + 2Rh + h^2}}, \quad (1)$$

где h_0 — высота спутника; τ_i — координата приемника; h — высота; τ — координата спутника; R — радиус Земли; β — угол возвышения спутника. Дополнительно к псевдонаблюдениям, полученным по формуле (1) добавлялся гауссов шум с нулевым средним и дисперсией, зависящей от угла возвышения спутника. Пример модельного распределения n_e (NeQuick2, сентябрь,

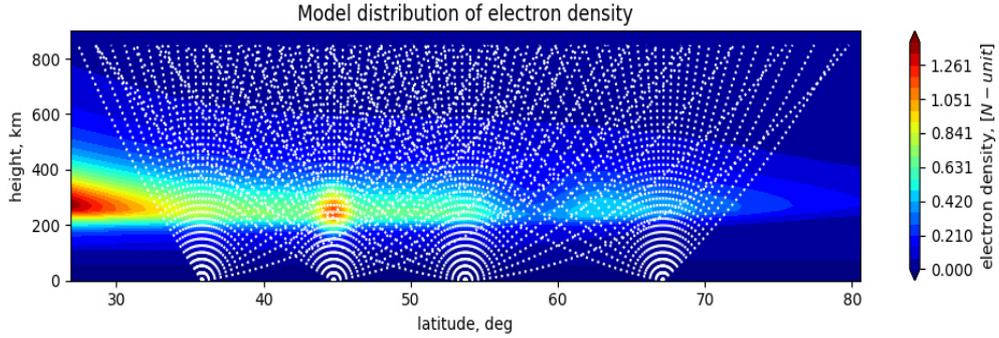


Рис. 1. Высотно-широтное распределение электронной плотности для получения псевдоданных радиопросвечивания. Пунктирными линиями даны лучи спутник—приемник

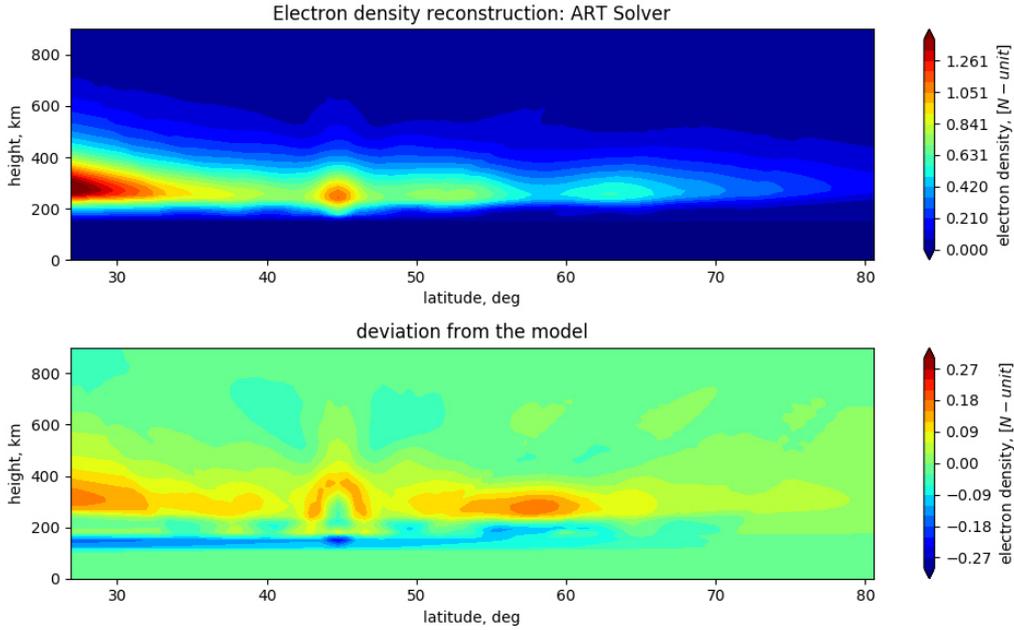


Рис. 2. Реконструкция модельного (см. рис. 1) распределения электронной плотности (вверху) и отклонение от него (внизу), полученные с использованием алгоритма ART

12 UT, $long=20^\circ$, $F10.7=90$ s.f.u.) с двумя дополнительными неоднородностями, геометрия расположения приемных пунктов и лучей спутник—приемник показана на рис. 1.

При решении обратной задачи интегральное уравнение (1) может быть сведено к СЛАУ вида $Ax=b$ относительно значений электронной концентрации в узлах регулярной сетки, разбивающей область реконструкции на конечные элементы. Применение тихоновской регуляризации к полученной СЛАУ эквивалентно поиску квазирешения итерационным методом ART, сходящимся к квазирешению с минимальной нормой отклонения от начального приближения

$$\hat{x}^{k+1} = \hat{x}^k + \frac{b_i - \langle A^i \hat{x}^k \rangle}{\langle A^i A^i \rangle}, \quad (2)$$

где \hat{x}^k — оценка квазирешения на k -м шаге, b_i и A_i — i -й элемент и i -я строка вектора наблюдений и матрицы системы соответственно. В качестве начального приближения может быть использована также модель NeQuick2, но без дополнительных неодно-

родностей, взятая, например, для другого уровня солнечной активности, задаваемой параметром $F10.7$.

В случае использования статистической регуляризации квазирешение \hat{x} рассматриваемой СЛАУ ищется в виде

$$\hat{x} = x_0 + K(b - Ax_0), \quad (3)$$

$$K = PA^T (R + APA^T)^{-1},$$

где P — ковариационная матрица априорной оценки вектора состояния системы x_0 ; R — ковариационная матрица вектора наблюдений b . В качестве x_0 аналогично предыдущему случаю можно использовать модель NeQuick2. Важным моментом является задание ковариационных матриц P и R . В данной работе мы используем выражение для ковариационных матриц

$$R = \text{diag}(\sigma_0^2 / \sin^2(\beta)), \quad (4)$$

где σ_0 — среднеквадратичное отклонение (СКО) шума при наблюдении в зенит с типичным значением 0.05 TECu. Данная зависимость хорошо воспроизводит экспериментальную картину шумов наблюдений

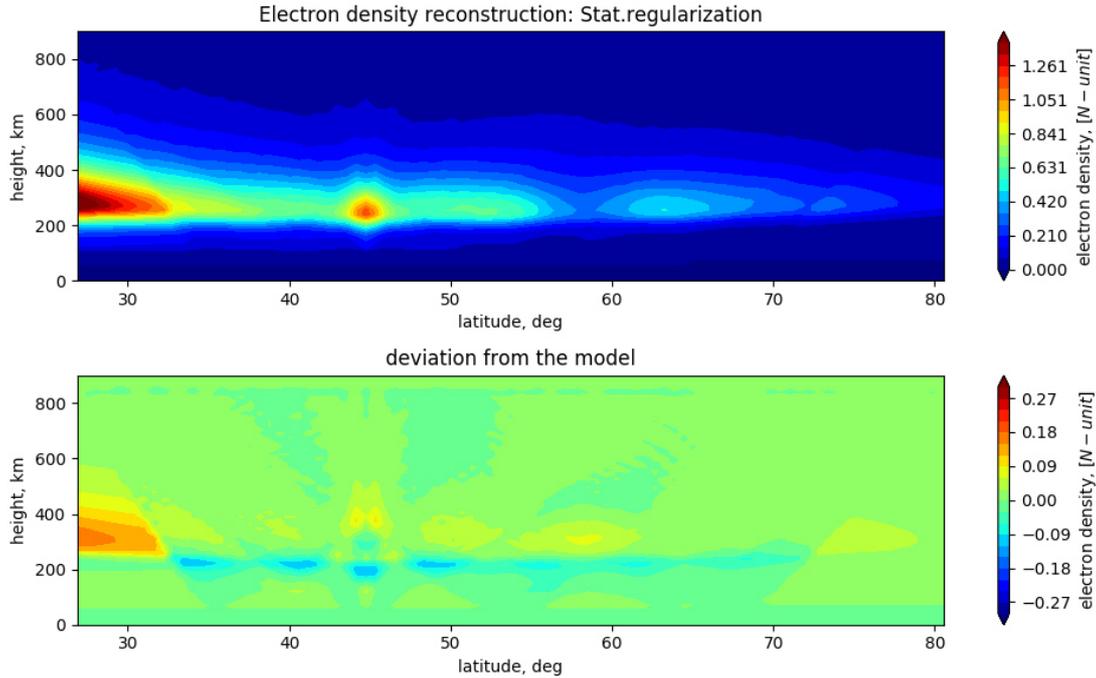


Рис. 3. То же, что на рис. 1, с использованием статрегуляризации

в экспериментах по радиопросвечиванию ионосферы. Заметим, что сама модель NeQuick2 не дает оценок дисперсии электронной концентрации, поэтому при построении ковариационной матрицы P мы использовали достаточно простое соотношение

$$P = \text{diag}(\sigma^2 n_c^2 / n_{c\text{max}}^2), \quad (5)$$

т. е. СКО электронной концентрации пропорционально самой электронной концентрации и нормировано на максимум электронной концентрации в F2-слое. Заметим также, что (3) совпадает с выражением стадии коррекции для фильтра Калмана — таким образом, разработанные в настоящей работе подходы могут быть в дальнейшем использованы и в задачах ассимиляции данных в физические модели ионосферы, например ГСМ ТИП [Кореньков и др., 1993, Bessarab et al., 2012].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Остановимся на результатах применения двух описанных методов регуляризации к задаче адаптивного моделирования двумерных, высотно-широтных распределений электронной концентрации в ионосфере по данным низкоорбитального радиопросвечивания. По синтезированным псевдонаблюдениям восстанавливалось распределение электронной концентрации, показанное на рис. 1. В качестве начального приближения использовалась модель NeQuick2 для того же момента времени и координат, без дополнительно внедренных неоднородностей и с другим уровнем солнечной активности ($F10.7=100$ s.f.u.). Результаты адаптивного моделирования, полученные двумя рассматриваемыми методами приведены на рис. 3. На верхних панелях показаны непосредственно реконструкции, на нижних — отклонение от восстанавливаемой модели.

Хорошо видно, что оба алгоритма успешно восстанавливают две искусственно заданные неоднородности в F2-слое. Вместе с тем для рассматриваемой геометрии эксперимента ошибки реконструкции методом ART несколько больше, и в целом, результаты, полученные методом ART, более чувствительны к выбору начального приближения. Статрегуляризация, в свою очередь, обладает большей гибкостью за счет возможности учета веса наблюдений и априорной оценки электронной концентрации на основе их ковариационных матриц. Отметим, что из-за недостатка в рассмотренной схеме зондирования квазигоризонтальных лучей, оба рассмотренных метода будут иметь очевидные проблемы с восстановлением неоднородностей, локализованных вне F2-слоя, что может быть решено добавлением в задачу радиозатменных данных или данных вертикального зондирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе псевдонаблюдений, полученных на основе модели NeQuick2, проведено сравнение двух методов адапционного моделирования ионосферы по данным низкоорбитального радиопросвечивания, использующих тихоновскую и статрегуляризацию. Показано, что статрегуляризация может давать лучшие результаты реконструкций по сравнению с итерационными алгоритмами типа ART при учете статхарактеристик наблюдений и фоновой модели ионосферы. В дальнейшем планируется дополнить рассматриваемую схему адапционного моделирования данными вертикального зондирования и радиозатменных экспериментов для улучшения высотного разрешения получаемых ионосферных сечений.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантом Российского научного фонда № 21-17-00208.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Намгаладзе А.А. и др. Модельные расчеты ионосферных параметров для условий 19 марта 1988 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1993. Т. 33, № 1. С. 63–68.

Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. *Радиотомография ионосферы*. М.: Физматлит, 2006.

Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko M.V., et al. Modeling the effect of sudden stratospheric warming within the thermosphere—ionosphere system. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012. Vol. 90. P. 77–85.

Nava B., Coisson P., Radicella S.M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008. Vol. 70, no. 15. P. 1856–1862. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.01.015](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.01.015).