

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ

М.А. Волков¹, А.Д. Гомонов², А.В. Гурин¹, М.В. Швец²

¹Мурманский арктический университет; e-mail: volkovma@mauniver.ru

²Полярный геофизический институт

Аннотация

Двухчастотные данные навигационных систем *GPS* и *GLONASS* используются для восстановления распределения электронной концентрации в ионосфере. Значения *TEC*, рассчитанные по данным со спутников, применяются для решения обратной задачи - восстановления электронной концентрации. Неизвестную функцию распределения концентрации над точкой наблюдения в ионосфере задаем в виде произведения $f(z) \varphi(x,y)$, z, x, y – координаты, направленные вверх от точки наблюдения за навигационными спутниками, на юг и на восток. Высотное распределение $f(z)$ моделируется параболическим слоем, $\varphi(x,y)$ -двумерным разложением неизвестной функции в ряд Тейлора. Интегрирование функции распределения вдоль линии радиолуча от точки наблюдения до спутника дает значение *TEC*. При аппроксимации $\varphi(x,y)$ полиномом третьего порядка по x, y получаем 10 неизвестных параметров, для определения которых необходимы данные 10 спутников. Используются навигационные данные и данные наблюдений спутников в *RINEX* формате. В работе исследуются временные изменения электронной концентрации по данным наблюдения обсерватории в Мурманске.

Введение

Фазовые измерения с низкоорбитальных спутников и двухчастотные фазовые измерения, получаемые со спутников различных навигационных систем, используются для реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере [1-4]. В этих работах решаются обратные задачи восстановления электронной концентрации по интегральным данным, таким как интегральное электронное содержание ионосферы вдоль траектории радиолуча спутник- приемник. Из-за отсутствия рефракции эта траектория – прямая линия, что упрощает интегрирование электронной концентрации вдоль радиолуча. Электронная концентрация задается в виде некоторых базисных функций с неизвестными параметрами. В результате приходится иметь дело с системой линейных уравнений с неизвестными параметрами. Эта система может состоять из большого числа уравнений и, как правило, недоопределена. Число уравнений меньше количества параметров. Для решения таких недоопределенных систем в томографии используют итерационные методы алгебраической реконструкции, например, ART или SIRT. Еще одной важной задачей, которую приходится решать при реконструкции, это регуляризация решения. Необходимо добавлять дополнительные ограничения, чтобы избежать маловероятных решений, появления резких градиентов и даже неустойчивостей. В отличие от радиотомографии на низкоорбитальных спутниках данные задачи не являются планарными, реконструкция проводится в трехмерном пространстве. В данных работах не исследуется динамика ионосферы, она считается неизменной, используются спутниковые данные за множество временных отсчетов. В настоящей работе предложен метод восстановления электронной концентрации ионосферы в данный момент времени, используя одновременные данные нескольких спутников.

Описание метода реконструкции электронной концентрации

Для реконструкции электронной концентрации используются двухчастотные абсолютные фазовые данные в формате *Rinex*. Файлы наблюдений и навигации в формате *Rinex* включают секундные значения фазовой задержки сигналов на двух частотах, значения псевдодальностей, эфемериды спутников. Расчет интегрального электронного содержания *TEC* выполняется по фазовым данным как менее зашумленным. *TEC* связан с электронной концентрацией n_e интегралом вдоль прямой s спутник – приемник:

$$TEC = \int n_e(s) ds, \quad (1)$$

и изменением фазы:

$$TEC = \frac{1}{40.3} \left(\frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \cdot (\lambda_1 \cdot L_1 - \lambda_2 \cdot L_2 - N_1 \lambda_1 + N_2 \lambda_2), \quad (2)$$

где L_1, L_2 – фазовые измерения на частотах f_1, f_2 ; λ_1, λ_2 – соответствующие им длины волн; $N_{1,2}$ – неизвестные целые числа, связанные с неоднозначностью фазовых измерений.

Для двухчастотных измерений значения $N_{1,2}$ с округлением до целого рассчитываются следующим образом [5]:

$$N_1 = L_1 + \frac{f_1^2 + f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \frac{P_1}{\lambda_1} - \frac{2f_1 f_2}{f_2^2 - f_1^2} \frac{P_2}{\lambda_2},$$

$$N_2 = L_2 + \frac{2f_1 f_2}{f_2^2 - f_1^2} \frac{P_1}{\lambda_1} - \frac{f_1^2 + f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \frac{P_2}{\lambda_2},$$

где $P_{1,2}$ – псевдодальности.

В работах по томографии ионосферы с использованием высокоорбитальных спутников обрабатываются данные наблюдений за период в несколько часов (3-4 часа), время движения спутника от горизонта до горизонта. Для изучения процессов длительностью от нескольких минут до десятков минут такой подход некорректен. В работе проводится реконструкция по минутным данным, полученным по всем наблюдаемым в данный момент времени спутникам *GPS* и *Glonass*. Приемник спутниковых навигационных сигналов расположен в г. Мурманск (ПГИ). Используется декартовая система координат с началом в точке приема сигнала, ось x направлена на юг, ось y на восток, z -вверх. Ионосфера считается плоской. Электронная концентрация восстанавливается в окрестности точки наблюдения, в области с поперечными (x, y) размерами 200×200 км. Координаты спутников, вычисленные по эфемеридам, пересчитываются в локальные координаты x, y, z и определяются направления на спутники, вдоль этих направлений проводится интегрирование в (1):

$$ds = dz / \cos \alpha,$$

где α -угол между осью z и направлением на спутник.

Распределение n_e задается базисной функцией третьего порядка по x, y и второго порядка по z :

$$n_e(x, y, z) = \left(1 - \left(\frac{z - z_0 - h}{h} \right)^2 \right) (c_1 x^3 + c_2 x^2 + c_3 x + c_4 y^3 + c_5 y^2 + c_6 y + c_7 y^2 x + c_8 y x^2 + c_9 x y + c_{10}), \quad (3)$$

где h – полуширина параболического слоя ионосферы, z_0 – высота нижней границы ионосферы, c_{1-10} – неизвестные параметры.

Выражение (3) следует рассматривать как разложение распределения электронной концентрации в ряд Тейлора по x, y в окрестности точки наблюдения для параболического высотного профиля концентрации ионосферы. Корректность решение обратной задачи зависит от сходимости этого ряда. Вдоль радиолуча спутник – приемник $x = k_x z, y = k_y z$ и выражение (3) принимает вид:

$$n_e(x, y, z) = \left(1 - \left(\frac{z - z_0 - h}{h} \right)^2 \right) ((c_1 k_x^3 + c_4 k_y^3 + c_7 k_y^2 k_x + c_8 k_y k_x^2) z^3 + (c_2 k_x^2 + c_5 k_y^2 + c_9 k_x k_y) z^2 + (c_3 k_x + c_6 k_y) z + c_{10}) \quad (4)$$

Для нахождения 10 неизвестных параметров c_i необходимо 10 спутников, в работе используются данные по всем наблюдаемым спутникам *GPS* и *Glonass* в количестве 15-16 аппаратов. Часть спутников отбраковываются из-за малых углов наблюдения с горизонтом, другая часть спутников из-за сбоя данных как фазовых, так и эфемерид. Спутники *Glonass* имеют большой угол наклона орбитальной плоскости и могут наблюдаться вблизи зенита, поэтому сначала отбираются спутники *Glonass*, затем *GPS*.

Результаты восстановления электронной концентрации

На рис. 1 представлены созвездие отобранных спутников *GPS, Glonass* в системе координат x, y, z и реконструированное распределение электронной концентрации в горизонтальном сечении ионосферы в

максимуме параболического слоя по фазовым данным от 07.02.2025 12.15.00 UTC при следующих значениях параметров параболического слоя $h = 200$ км, $z_0 = 80$ км. Были выполнены расчеты для следующих моментов времени 12.15, 12.16, 12.17, 12.18, 12.20 UTC. На рис. 2 показаны зависимости электронной концентрации в этом сечении в направлении север-юг при $y = 0$ для моментов времени 12.15, 12.16, 12.18, 12.20. Как видно из рис. 1, наблюдается сильный градиент изменения электронной концентрации, преимущественно направленный на северо-восток, что может указывать на присутствие ионосферного провала. В течение этого времени созвездие отобранных спутников и их положение практически не менялось, что говорит о достоверности получаемых данных. Изменения распределения концентрации на рис. 2 носят колебательный характер, т.е. можно говорить о наблюдении возмущения, распространяющегося в ионосфере.

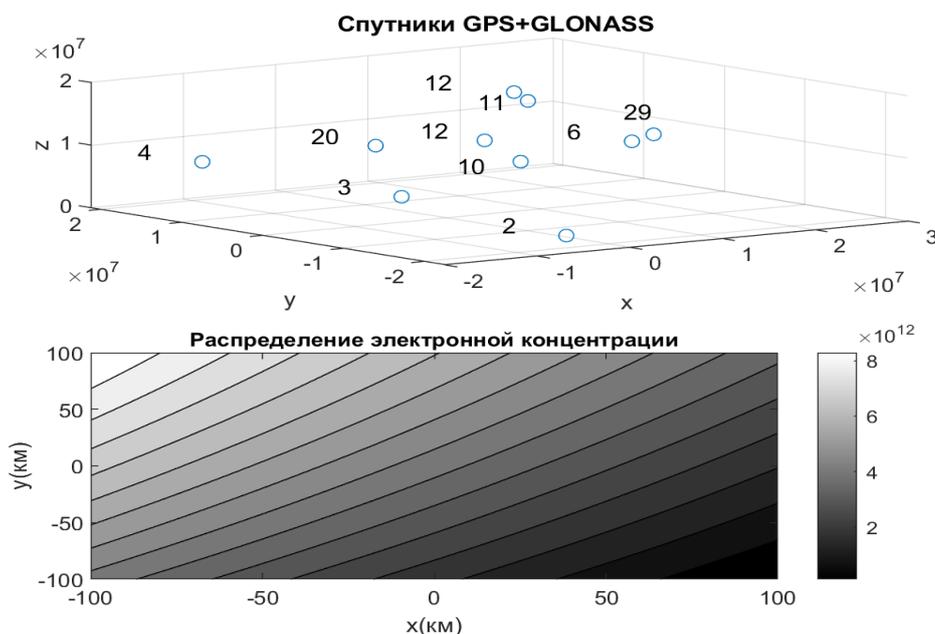


Рисунок 1. Созвездие спутников, отобранных для расчетов на 07.02.2025 12.15.00 UTC, значения координат x , y , $z \times 10^7$ м, нумерация спутников совпадает для разных навигационных систем; распределение электронной концентрации в горизонтальном сечении ионосферы, проходящем через максимум параболического слоя, концентрация электронов указана в m^3 .

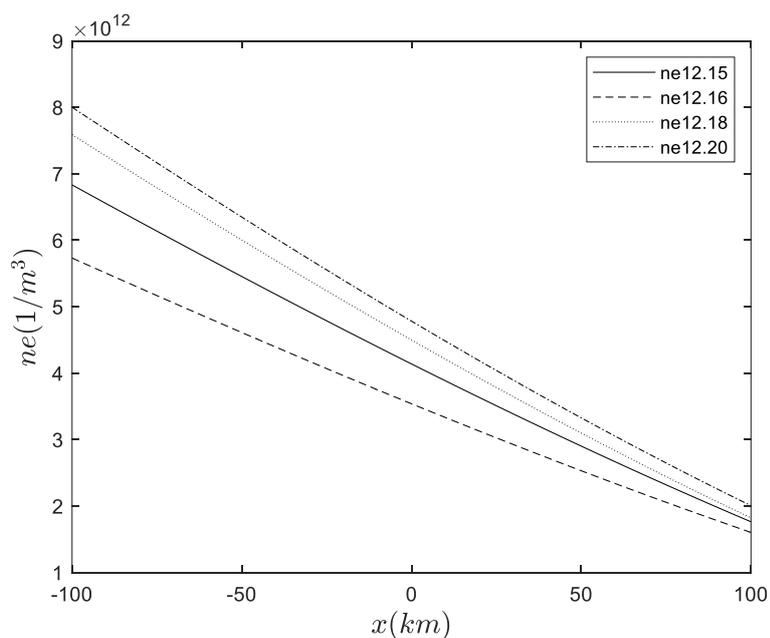


Рисунок 2. Распределения электронной концентрации в зависимости от координаты x при $y = 0$ и $z = z_0 + h$ для моментов времени 12.15, 12.16, 12.18, 12.20 UTC.

Выводы

Предложенный в работе метод восстановления электронной концентрации, как показали расчеты, позволяет обнаруживать в ионосфере возмущения с характерными временами в несколько минут. Это дает инструмент для изучения таких возмущений, используя данные спутниковых навигационных систем. Учет сферичности ионосферы должен улучшить точность и надежность реконструкции электронной концентрации. Для надежности решения необходимо также использовать метод регуляризации решений и увеличить базу используемых спутников.

Литература

1. Куницын В.Е., Андреева Е.С., Кожарин М.А., Нестеров И.А. Радиотомография ионосферы с применением высокоорбитальных навигационных систем. Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2005. №1. С.74–84.
2. Vierinen J., Norberg J., Lehtinen M.S., Amm O., Roininen L., Väänänen A., Erickson P.J., McKay-Bukowski D. Beacon satellite receiver for ionospheric tomography. Radio Science. 2014. V. 49. P. 1141–1152. doi:10.1002/2014RS005434
3. Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Markkanen M., Lehtinen M., Nygren T. Stochastic inversion in ionospheric radiotomography. Radio Science. 1997. V. 32, N. 6. P. 2359–2372.
4. Austen J.R., Franke S.J., Liu C.H. Ionospheric imaging using computerized tomography. Radio Science. 1988. V. 23. N. 3. P. 299–307.
5. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo, and more. 2008. Springer Wien New-York.