УДК 537.876:551.51

АНАЛИЗ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ИНДЕКСА РЕФРАКЦИИ В ТРОПОСФЕРЕ ПО СИГНАЛАМ СПУТНИКОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А. Р. Низамеев ¹, Г. М. Тептин^{1,2}

¹ Казанский федеральный университет;
² Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН, г. Казань, Россия

Представлены результаты исследования высотной структуры индекса рефракции радиоволн сетью из семи наземных приёмников систем GPS и ГЛОНАСС, расположенных в г. Казань. Исследованы различные варианты сетки вокселей (элементарных объёмов). Проведён анализ результатов, полученных без усреднения и с учётом усреднения за некоторый промежуток времени. Для проверки результатов проведено сравнение с данными радиозонда. Даны рекомендации по выбору сетки вокселей.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение атмосферы методом радиотомографии широко используются в современных радиофизических исследованиях. В том числе, одним из актуальных вопросов является исследование пространственно-временной неоднородной структуры тропосферы.

В Западной Европе, США и Японии проведены обширные исследования, посвящённые трёхмерному распределению содержания водяного пара в нижних слоях атмосферы с помощью наземных приёмных станций глобальных навигационных спутниковых систем. Например, в работах [1– 5] изучается метод радиотомографии и выполняется обработка спутниковых данных для расчёта параметров атмосферы. В русскоязычной литературе представлены публикации по исследованию тропосферы с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГЛОНАСС) [6– 9], но мало работ по изучению тропосферы с помощью радиотомографии. В отличие от вышеупомянутых публикаций мы в своей работе применили метод радиотомографии для небольшой сети приёмников г. Казань и использовали для расчётов только одночастотные измерения, что существенно сокращает затраты на используемое оборудование. Подробнее этот метод описан в работе [10].

Наиболее важной особенностью данной работы является исследование влияния выбора сетки вокселей (элементарных объёмов) при использовании метода радиотомографии. В работах [11, 12] показаны несколько вариантов сеток вокселей при решении подобного рода задач, но не рассматриваются особенности выбора структуры вокселей. Целью данной работы является демонстрация этих особенностей и определение критериев построения структуры вокселей при решении задачи восстановления индекса рефракции тропосферы.

1. ПРИНЦИП GPS-ТОМОГРАФИИ

На распространение радиосигнала от спутника до приёмной станции существенное влияние оказывают различные области атмосферы, в том числе тропосфера. Задержка радиосигнала Δ может быть вычислена следующим образом [1, 13]:

$$\Delta = 10^{-6} \int_{\text{спутник}}^{\text{антенна}} N \, \mathrm{d}s, \tag{1}$$

где $N = 10^6 (n-1)$ — индекс рефракции тропосферы, ds — элемент пути радиолуча, n — показатель преломления среды.

Для нахождения пространственного распределения индекса рефракции радиоволн в тропосфере нами был исследован и применён метод радиотомографии. В данном методе используется дискретизация атмосферы по вокселям (элементарным объёмам в виде параллелепипеда) [1]. Для каждого вокселя вводится постоянный неизвестный индекс рефракции.

Дискретизируя интеграл (1), получим следующее выражение для задержки радиолуча в тропосфере L_j :

$$L_{j} = 10^{-6} \sum_{i} N_{i} \Delta S_{i,j}.$$
 (2)

Здесь N_i — индекс рефракции *i*-го вокселя, $\Delta S_{i,j}$ — длина пути радиолуча в *i*-м вокселе для *j*-го уравнения, *j* — номер спутника.

В работе используется геоцентрическая прямоугольная гринвичская система координат, начало которой расположено в центре Земли, ось z проходит через усреднённое положение северного полюса, ось x направлена в точку пересечения гринвичского меридиана с экватором, ось y дополняет систему до правой.

В качестве примера в статье приведены расчёты по данным 18 августа 2009 года. В дальнейшем при расчётах указано время измерений (UTC) в вышеуказанные сутки.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В статье приводятся результаты расчётов высотного профиля индекса рефракции по данным 7 наземных приёмных станций глобальной навигационной сети спутниковых систем, которые расположены в г. Казань и его окрестностях. Геометрия измерений и схема расположения приёмников с радиозондом приведена на рис. 1. Исследованная область тропосферы приведена на рис. 1*а*. Спутники на рис. 1 не показаны, чтобы не загромождать схему. Число слоёв в сетке вокселей во всех случаях равняется 16, количество вокселей в слое для каждого конкретного случая будет указываться.

В каждый момент времени одна приёмная станция фиксирует в среднем сигнал с 8 спутников, каждый из которых обеспечивает отдельное радиоизмерение. Таким образом, 7 приёмных станций



Рис. 1. Геометрия измерений: исследуемая область тропосферы (*a*) и расположение приёмных станций и радиозонда в плоскости координат *xy* (*б*). Пунктирной линией на панели (*б*) обозначены границы исследуемой области, кружками — расположение приёмных станций, звёздочкой — координаты запуска радиозонда

А. Р. Низамеев, Г. М. Тептин

414



Рис. 2. Зависимость индекса рефракции N от высоты h в момент времени 00:00:10 UTC (a), за промежутки времени 00:00:05÷00:00:10 UTC (δ) и 00:00:05÷00:00:15 UTC (a). Радиоизмерения записывались с интервалом 5 с: в промежутке (δ) проведены два измерения, в промежутке (a) — три

в один момент времени могут предоставлять 50÷60 радиоизмерений, каждое из которых даёт возможность составить отдельное уравнение в системе (2).

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСРЕДНЕНИЯ ПО ВРЕМЕНИ

Усреднение за счёт накопления данных измерений сигналов спутников глобальных навигационных систем за некоторый промежуток времени позволяет решать задачу для более сложной структуры вокселей. Если рассматривать данные только за один момент времени, то данных набора приёмных станций недостаточно для составления системы уравнений (2). Для повышения точности восстановления индекса рефракции для каждого вокселя необходимо, чтобы число уравнений было не меньше числа вокселей [1]. Накопление данных за короткий промежуток времени позволяет увеличить число уравнений, но при этом получается результат, усреднённый за некоторый временной период. При расчётах в данной статье усреднение проводится за короткий промежуток времени (не более 15 с): горизонтальная скорость ветра на разных высотах в тропосфере имеет порядок 10 м/с [10], а рассматриваемая область имеет размеры в несколько десятков километров.

Для выяснения применимости такого подхода мы провели сравнение расчётов высотного профиля индекса рефракции без накопления и с накоплением данных. При этом была выбрана структура из 32 вокселей (2 столбца и 16 слоёв). Результаты сравнения представлены на рис. 2.

Сравним результаты, полученные по данным за один момент времени 00:00:10 UTC (см. рис. 2*a*) и путём усреднения за период 00:00:05÷00:00:15 UTC (рис. 2*a*). Из рис. 2 следует, что усреднение по данному интервалу времени незначительно влияет на восстановленный профиль. Таким образом, профиль индекса рефракции, восстановленный по усреднённым данным за некоторый промежуток времени, может служить решением для момента времени, который приходится на середину этого промежутка.

Приведём некоторые количественные оценки. Для проверки полученного решения в качестве эталона использовались данные радиозонда. Оценивался коэффициент корреляции между высотным профилем индекса рефракции тропосферы, полученным методом радиотомографии, и профилем, полученным по данным радиозонда. Под среднеквадратическим отклонением будем подразумевать среднеквадратическое отклонение значений индекса рефракции, рассчитанных по методу радиотомографии, от значений, полученных по данным радиозонда. В 00:00 UTC среднеквадратическое отклонение составило 18,85, а коэффициент корреляции 0,89. При накоплении данных за некоторый промежуток времени корреляция ухудшалась: для различных промежутков усреднения коэффициент корреляции не превысил 0,86, а среднеквадратическое отклонение достигало значения 40,80.

В 12:00 UTC коэффициент корреляции для расчётов без усреднения по времени составил 0,97, при усреднении не превышал 0,93. Среднеквадратическое отклонение в обоих случаях было практически одинаковым: 15,23 без усреднения и 15,02 при усреднении.

Таким образом, поскольку коэффициент корреляции заметно выше без усреднения измерений независимо от времени суток, следует по возможности использовать измерения индекса рефракции для дециметровых радиоволн без усреднения даже по малому отрезку времени измерений методом радиотомографии.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ СЕТКИ ВОКСЕЛЕЙ

Метод усреднения даёт возможность рассматривать структуры с больши́м числом вокселей. Для начала этот подход был опробован на структуре из 4 столбцов. Далее типы структур мы будем описывать комбинацией $V_X \times V_Y \times V_Z$, где V_X , V_Y и V_Z — количество вокселей (элементарных объёмов) по осям x, y и z соответственно. В данном примере используется структура $2 \times 2 \times 16$ (64 вокселя).

Для этой структуры также выделим столбец вокселей и исследуем высотный профиль индекса рефракции (все измерения проведены в 00:00 UTC).

Результат представлен на рис. За. Профиль индекса рефракции оказался более гладким, чем в случае сетки из двух столбцов.

Такое поведение индекса рефракции характерно для симметричного распределения вокселей по осям x и y (далее такую сетку будем называть сеткой с симметричным слоем). В данном примере слой представлен четырьмя вокселями (2 по оси x и 2 по оси y). Здесь мы не приводим картину изменения индекса рефракции для сетки, состоящей из слоёв с 9 вокселями: она аналогична ситуации с четырьмя вокселями. На основании этого можно сделать вывод о большей гладкости вертикального профиля при его восстановлении при помощи сетки с симметричным слоем.

При использовании несимметричных слоёв (т. е. слоёв с различным числом вокселей по осям x и y поведение вертикального профиля индекса рефракции изменяется). Для примера, рассмотрим структуру из 6 столбцов ($3 \times 2 \times 16 = 96$ вокселей); результаты расчётов с использованием данной сетки вокселей представлены на рис. 36. Если рассмотреть две несимметричные сетки (с двумя и шестью вокселями в слое), то наблюдается следующее: уменьшение размеров вокселей (увеличение числа вокселей при заданном объёме исследуемого участка тропосферы) привело к уменьшению разброса значений индекса рефракции. Мы предполагаем, что это явление можно объяснить следующим образом: при восстановлении профиля в качестве первого приближения используется средний многолетний профиль индекса рефракции тропосферы, а решение системы (2) ищется в виде отклонения от первого приближения. Таким образом, вклады разных вокселей

могут иметь различные знаки. Абсолютное значение отклонения зависит от того, какой длины путь проходит радиолуч внутри вокселя. Для больших вокселей разброс должен получиться больше, что можно наблюдать для сетки из двух столбцов.

Рассмотрим поведение профиля индекса рефракции при повороте секущих плоскостей внутри области, из которой формируется набор вокселей. Конкретно, сравним результаты для структуры из 32 вокселей $1 \times 2 \times 16$, и для структуры 2 × 1 × 16, полученной из первой структуры поворотом вертикальной плоскости внутри области на 90°. Заметим, что рассматриваемая область тропосферы и количество вокселей при этом не меняются. Для обоих случаев характерны два столбца вокселей, что даёт возможность построить для каждого из них два вертикальных



Рис. 3. Высотные профили индекса рефракции, восстановленные по симметричной (*a*) и по несимметричной (*б*) структуре вокселей

построить для каждого из них два вертикальных профиля индекса рефракции тропосферы (см. рис. 4).

Как видно из рис. 4, влияние поворота секущей плоскости на профиль индекса рефракции для данной местности оказалось существенным. Это объясняется тем, что восстановленные профили описывают разные точки структуры. Каждое рассчитанное значение индекса рефракции на кривой соответствует геометрическому центру вокселя. Из этого можно вывести один из критериев выбора сетки вокселей, наиболее точно описывающей изучаемую область тропосферы. Критерий может быть выбран на основании сравнения высотных профилей с данными радиозонда (см. далее).

Рассмотрим более сложный случай: структуры $3 \times 2 \times 16$ и $2 \times 3 \times 16$ из 96 вокселей. Для удобства анализа пронумеруем воксели в структуре. Наименьший номер присвоим вокселю с минимальными координатами узлов, далее увеличение происходит по оси x; при достижении



Рис. 4. Высотные профили индекса рефракции: для первого столбца вокселей структуры $1 \times 2 \times 16$ (*a*), второго столбца структуры $1 \times 2 \times 16$ (*b*), первого столбца структуры $2 \times 1 \times 16$ (*b*) и второго столбца структуры $2 \times 1 \times 16$ (*b*)

А. Р. Низамеев, Г. М. Тептин

2013

417



Рис. 5. Нумерация столбцов вокселей

последнего столбца на оси x переходим на один по оси y в направлении увеличения, ось z имеет наименьший приоритет в нумерации вокселей. Для наглядности на рис. 5 приведена структура $2 \times 2 \times 2$. Номер столбца вокселей будет совпадать с номером вокселя в нижнем слое.

Вертикальные профили индекса рефракции для первых столбцов структур $3 \times 2 \times 16$ и $2 \times 3 \times 16$, а также для второго столбца структуры $3 \times 2 \times 16$ и третьего столбца структуры $2 \times 3 \times 16$ представлены на рис. 6.

Отметим, что при повороте секущих плоскостей области вокселей для углового столбца со-

храняется относительно гладкая форма профиля, а для промежуточного столбца свойственно сохранение увеличенного разброса значений индекса рефракции.

5. ВЛИЯНИЕ УДАЛЁННОСТИ ИССЛЕДУЕМОЙ ОБЛАСТИ ОТ РАДИОЗОНДА

Оценим влияние удалённости исследуемой области от радиозонда. С практической точки зрения это может быть важно для оценки размера вокселей и масштаба их сетки.

Мы провели расчёты вертикального профиля индекса рефракции тропосферы с различными вариантами сетки вокселей (от двух до девяти вокселей в одном слое) при всевозможных вариантах вращения секущих плоскостей вокруг вертикальной оси. Это дало возможность построить ряд решений, упорядоченный по удалённости исследуемой точки (геометрического центра столбцов вокселей) от радиозонда. Изменение коэффициента корреляции между полученным решением и данными радиозонда при изменении дальности представлено на рис. 7.

Как можно видеть из рис. 7, для исследованной нами области оказалось, что расстояние между исследуемой точкой и радиозондом не влияет на корреляцию между результатами метода и данными радиозонда.



Рис. 6. Высотные профили индекса рефракции для углового столбца структуры $2 \times 3 \times 16$ (*a*), углового столбца структуры $3 \times 2 \times 16$ (*b*), промежуточного столбца структуры $2 \times 3 \times 16$ (*b*) и для промежуточного столбца структуры $3 \times 2 \times 16$ (*b*)

А. Р. Низамеев, Г. М. Тептин

418

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из рис. 7 видно, что коэффициенты корреляции существенно меньше при расстояниях примерно 12 и 26 км, которые соответствуют симметричной структуре 2 × 2 × 16. Данная сетка, наряду со структурой с двумя вокселями в слое, оказалась одной из наименее подходящих для наших условий.

Из результатов, полученных при различных вертикальных поворотах структуры вокселей, следует, что для угловых столбцов вокселей коэффициент корреляции получается несколько выme (0,99), чем для промежуточных столбцов (0,98). Для подтверждения этой особенности мы провели расчёты для 12:00 UTC и получили те же результаты с одним исключением: среднеквадратическое отклонение в полдень для обоих столбцов получалось выше, чем в полночь. Величина среднеквадратического отклонения в полночь составила для углового столбца вокселей 14,8, для не углового 28,3. Мы предполагаем, что эта особенность связана с преимущественным (западным) ветром в тропосфере.

Область исследований (размеры 59,1 км по оси x и 40,6 км по оси y, см. рис. 1(a) выбирается таким образом, чтобы в неё попадали все используемые приёмные станции. В результате должно получиться примерно одинаковое число пересечений радиолучей с каждым вокселем слоя. Поскольку вертикальные размеры слоёв различные, для всех вокселей одинаковое число пересечений подобрать не получится, поэтому достаточно ориентироваться на отдельно взятый слой.

Отметим, что вертикальные размеры вокселей увеличиваются с увеличением высоты по экспоненциальному закону; при решении задачи тем самым закладывается априорная информация о тропосфере [1, 14, 15]. Высота всей исследуемой области в нашем случае равна 15 км. Использование невысокой сетки (с высотой 1,5 км) с сохранением количества слоёв за счёт уменьшения их высоты приводит к неадекватному решению. Среднеквадратическое отклонение в некоторых случаях достигало 262,67, а коэффициент корреляции принимал отрицательное значение. Расчёты для 12:00 UTC демонстрировали аналогичную картину. Таким образом, невысокая сетка оказалась неприемлемой.



 $\begin{array}{c}
12 \ 000 \\
h, \ M \\
10 \ 000 \\
8 \ 000 \\
6 \ 000 \\
4 \ 000 \\
2 \ 000 \\
0 \\
50 \ 100 \ 150 \ 200 \ 250 \ 300 \ N
\end{array}$

Рис. 7. Изменение коэффициента корреляции K между полученным решением и данными радиозонда в зависимости от расстояния между исследуемой точкой и радиозондом R

Рис. 8. Высотный профиль индекса рефракции тропосферы, восстановленный при использовании оптимальной сетки вокселей. Круглыми маркерами показано решение, полученное радиотомографией, звёздочками — решение, полученное по данным радиозонда

При большом увеличении количества вокселей внутри слоя становится достаточно сложно судить о корректности решения. Данный аспект связан с тем, что чувствительность метода падает из-за уменьшения размеров вокселей, и восстановленный профиль стремится к первому приближению. В наших исследованиях эта особенность данного метода радиотомографии начала проявляться при использовании структуры $3 \times 3 \times 16$.

Наиболее оптимальными с точки зрения полученных результатов оказались структуры $2 \times 3 \times 16$ и $3 \times 2 \times 16$, при использовании которых коэффициент корреляции во всех случаях составлял примерно 0,98.

На рис. 8 показано решение, полученное при помощи радиотомографии с использованием сетки вокселей 3 × 2 × 16 с усреднением по времени за период от 00:00:05 до 00:00:15 UTC. Коэффициент корреляции для этого случая получился 0,99, среднеквадратическое отклонение — 14,89. Для наглядности на рис. 8 также приводится высотный профиль индекса рефракции тропосферы, полученный по данным радиозонда.

выводы

Мы провели сравнительный анализ индекса рефракции, полученного методом радиотомографии по радиоизмерениям сигналов спутников глобальных навигационных систем и по данным измерений радиозонда. В результате можно сформулировать следующие выводы.

1) Для более точных расчётов лучше использовать один фиксированный момент времени, т. к. это даёт бо́льшую точность. К усреднению данных стоит прибегать в случае недостатка приёмных станций, чтобы покрыть исследуемую структуру вокселей. При возможности лучше выбрать данные за другой момент времени (с достаточным числом данных), чем их накапливать за некоторый временной интервал.

2) Разброс значений индекса рефракции зависит от размеров вокселей в выбранной структуре.

3) Для диапазона расстояний от 9,3 до 32,4 км коэффициент корреляции между результатами описанного метода и данными радиозонда не зависит от расстояния.

4) Необходимо иметь в виду, что угловые столбцы вокселей дают более точное решение, чем промежуточные.

5) Для исследования приземной области тропосферы не следует выбирать невысокую мелкую сетку вокселей. Более подходящим решением будет увеличение количества слоёв в структуре вокселей при сохранении общей высоты сетки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 13-05-97054).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Troller M., Geiger A., Brockmann E., Bettems J.-M. // Adv. Space Res. 2006. V. 37. P. 2211.
- 2. Champollion C., Masson F., Bouin M.-N., et al. // Atmos. Res. 2005. V. 74. P. 253.
- 3. Hirahara K. // Earth, Planets and Space. 2000. V. 52. P. 935.
- 4. Ruffini G., Flores A., Rius A. // Geosci. Remote Sensing. 1998. V. 36. P. 143.
- 5. Troller M., Burki B., Cocard M., et al. // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. P. 2149.
- 6. Яковлев О.И. Космическая радиофизика. М.: Научная книга, 1998. 432 с.
- 7. Хуторова О.Г., Тептин Г.М., Васильев А.А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 1. С. 1.
- 8. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 336 с.

- 9. Радиевский А.В., Шагимуратов И.И. // Вест. Рос. гос. ун-та им. И. Канта. 2009. № 4. С. 96.
- 10. Низамеев А.Р., Тептин Г.М., Шлычков А.П. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского гос. политех. ун-та. 2012. № 4. С. 144.
- 11. Flores A., Ruffini G., Rius A. // Ann. Geophys. 2000. V. 18. P. 223.
- Flores A., Gradinarsky L. P., Elósegui P., et al. // Earth, Planets and Space. 2000. V. 52, No. 11. P. 941.
- Schuler T. On ground-based GPS tropospheric delay estimation. Munchen: Univ. der Bundeswehr, 2001. 364 p.
- 14. Nizameev A.R., Teptin G.M. // Environmental Radioecology and Appl. Ecology. 2011. V. 17, No. 2. P. 17.
- 15. Низамеев А. Р., Нефедьев Е. С., Низамеев И. Р., Тептин Г. М. // Вест. Казанского технол. ун-та. 2012. № 9. С. 27.

Поступила в редакцию 21 мая 2013 г.; принята в печать 28 июня 2013 г.

ANALYSIS OF RECOVERY OF THE VERTICAL REFRACTIVITY-INDEX PROFILE IN THE TROPOSPHERE USING THE SIGNALS FROM THE GPS SATELLITES

A. R. Nizameev and G. M. Teptin

We present the results of studying the altitude structure of the wave refractive index by a network of seven ground-based GPS and GLONASS receivers located in Kazan'. Various versions of the voxel (elementary volume) grid are studied. The results obtained without and with allowance for averaging for a certain time interval are analyzed. The results are checked by comparing with the radiosonde data. The recommendations for choosing the voxel grid are given.