

УДК: 551.551

DOI: 10.26907/rwp29.2025.436-439

## КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ДАННЫХ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИИ И МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Д.М. Караваев<sup>1</sup>, Ю.В. Кулешов<sup>1</sup>, А.Н. Ефременко<sup>1</sup>, Г.Г. Щукин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 197198, г. Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, 13

E-mail: vka@mil.ru

<sup>2</sup>АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», 106234, г. Санкт-Петербург, Кожевенный пер., д.41

**Аннотация.** Рассмотрен метод оценивания тропосферной задержки радионавигационных сигналов на основе комплексного применения данных микроволновой радиометрии и моделей. Приведены результаты экспериментальных исследований атмосферы, выполненные в Ленинградской области с применением микроволновых радиометров водяного пара.

**Ключевые слова:** микроволновый радиометр; влагозапас атмосферы; тропосферная задержка

## INTEGRATION OF MICROWAVE RADIOMETRY AND MODELS FOR ESTIMATING THE TROPOSPHERIC DELAY OF RADIO NAVIGATION SIGNALS

D.M. Karavaev, Yu.V. Kuleshov, A.N. Efremenko, G.G. Shchukin

**Abstract.** A method for estimating the tropospheric delay of radio navigation signals based on the complex application of microwave radiometry data and models is considered. The results of experimental studies of the atmosphere carried out in the Leningrad region using microwave water vapor radiometers are discussed.

**Keywords:** microwave radiometer; water vapor; tropospheric delay

### Введение

Эффекты среды, связанные с естественной изменчивостью метеорологических параметров вдоль трассы распространения радионавигационных сигналов в тропосфере, вызывают соответствующие вариации задержки радионавигационных сигналов. Для задач тропосферной коррекции актуальным представляется применение комплексного метода на основе интеграции данных наземной микроволновой радиометрии и моделей тропосферной задержки [1-3]. Целесообразность такого подхода обусловлена с одной стороны, возможностью наземных микроволновых радиометров для получения информации о метеорологических параметрах атмосферы практически в режиме непрерывных измерений с высоким пространственным разрешением, с другой стороны, возможностями моделей атмосферы для описания регулярной составляющей тропосферной задержки. Методы тропосферной коррекции, основанные только на использовании статистических моделей для метеопараметров атмосферы, не воспроизводят мезомасштабные и синоптические вариации тропосферной задержки. Поэтому, представляет интерес метод оценивания тропосферной задержки на основе комплексного применения метода микроволновой радиометрии для оперативного контроля переменного вклада водяного пара в полную тропосферную задержку и моделей атмосферы для оценивания гидростатической компоненты тропосферной задержки.

Целью работы является исследование комплексного метода определения тропосферной задержки на основе данных микроволновых радиометров и моделей для гидростатической компоненты задержки, и анализ экспериментальных микроволновых радиометрических исследований влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков и тропосферной задержки радионавигационных сигналов при прохождении атмосферных фронтов в Ленинградской области.

### Методические вопросы определения тропосферной задержки

В общем случае полная зенитная тропосферная задержка рассматривается как сумма:

$$dL_{total\_trop} = dL_{hyd} + dL_{vap} + dL_{cloud} + dL_{other}, \quad (1)$$

где  $dL_{hyd}$  – гидростатическая компонента тропосферной задержки;  $dL_{vap}$  – компонента, обусловленная водяным паром;  $dL_{cloud}$  – вклад жидкокапельных облаков;  $dL_{other}$  – вклад осадков, кристаллических облаков, аэрозолей и других компонент.

Для условий Ленинградской области гидростатическая тропосферная задержка в зенитном направлении составляет около 2.3 м (или 88-98 % величины полной тропосферной задержки), ее среднее значение слабо меняется от сезона к сезону, вариации  $dL_{hyd}$  имеют выраженный сезонный ход. Вклад  $dL_{vap}$  в полную тропосферную задержку сильно изменчив, и имеет ярко выраженный сезонный ход, определяемый региональными особенностями климата. В годовом цикле изменчивости тропосферной задержки основную роль играет изменение влагозапаса атмосферы. Причем рост влагозапаса атмосферы и усиление его вариаций в теплый период приводит к соответствующему росту вариаций тропосферной задержки. В теплый период года  $dL_{vap}$  может достигать величины около 0.35 м в зените, а в холодный период может уменьшаться до 0.01 м. Выявлена отрицательная корреляция основных компонент тропосферной задержки, что по всей видимости, обусловлено климатическими особенностями региона Ленинградской области, высокой повторяемостью циклонов в осенне-зимний период.

Изменчивость величины  $dL_{vap}$  как в пространстве, так и во времени затрудняет возможность ее оценивания с требуемой точностью с помощью простых статистических моделей тропосферы. Поэтому необходимо привлекать специальные методы измерений величины  $dL_{vap}$  вдоль трассы распространения радиосигналов. В первую очередь рассматриваются возможности метода микроволновой радиометрии [3,4]. Известно, что методы наземной микроволновой радиометрии применяются для влажностного зондирования атмосферы из радиометрических измерений собственного радиотеплового излучения в областях спектра 18-26 ГГц, 31-37 ГГц, 75-95 ГГц, 150-183 ГГц, а также для температурного зондирования атмосферы в области частот около 50-60 ГГц. Также исследованы возможности комплексного метода определения профилей температуры, влажности воздуха, водозапаса облаков по измерениям характеристик собственного нисходящего радиотеплового излучения атмосферы с помощью многочастотных радиометров, работающих около центра линии водяного пара 22.235 ГГц и на склоне линии кислорода 51-58 ГГц. Практическую реализацию получил метод определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков из измерений характеристик собственного нисходящего радиотеплового излучения атмосферы около частоты 22.23 и в окне прозрачности 31-37 ГГц [3-5].

Для реализации метода оценивания полной тропосферной задержки представляет интерес комплексное применение метода микроволновой радиометрии для определения обусловленной водяным паром тропосферной задержки и модели для гидростатической компоненты задержки. Тогда, полная тропосферная задержка в зенитном направлении может быть определена на основе данных микроволновых радиометрических измерений влагозапаса атмосферы  $Q$  и водозапаса облаков  $W$  и модели гидростатической компоненты задержки из соотношения:

$$dL_{total\_trop} = dL_{hyd}^m(\varphi, \vartheta, h) + c_1 Q + c_2 W + \varepsilon, \quad (2)$$

где  $dL_{hyd}^m(\varphi, \vartheta, h)$  – гидростатическая задержка по модели  $m$ ;  $\varphi, \vartheta, h$  – координаты (широта, долгота, высота наблюдательной станции);  $c_i$  – коэффициенты;  $\varepsilon$  – погрешность метода. Влагозапас атмосферы  $Q$  и водозапас облаков  $W$  определяются используя соотношения [3-5]:

$$\begin{aligned} Q &= a_0 + a_1 \tau(v_1) + a_2 \tau(v_2) \\ W &= b_0 + b_1 \tau(v_1) + b_2 \tau(v_2) \end{aligned} \quad (3)$$

где:  $a_i, b_i$  – коэффициенты, полученные по аэрологическим данным о параметрах атмосферы (температура, давление, влажность) и полуэмпирическим моделям водности облаков. Оптическая толщины атмосферы  $\tau(v_i)$  определяется из измерений радиояркостных температур. Метод микроволновой радиометрии позволяет определять влагозапас атмосферы, и как следствие, обусловленную водяным паром тропосферную задержку, которая связана с величиной  $Q$  детерминированным образом [2]. Погрешность определения  $dL_{vap}$  при отсутствии осадков, при реализации погрешности измерения радиояркостных температур атмосферы не хуже 0.5К, составляет около 0.003 м. Также метод микроволновой радиометрии позволяет

определять водозапас облаков, и оценивать дополнительный вклад  $dL_{cloud}$  в тропосферную задержку.

Для оценивания гидростатической компоненты задержки могут использоваться статистические (климатические) модели атмосферы, результаты гидродинамического моделирования метеорологических полей, физико-статистические модели на основе измерений приземных метеопараметров. Лучшие результаты ожидаются при использовании комплексного метода, когда полная тропосферная задержка в зените определяется на основе данных микроволновых радиометрических измерений, данных приземных метеорологических параметров и моделей тропосферы. По предварительным оценкам применение комплексного температурно-влажностного микроволнового радиометрического зондирования атмосферы в областях спектра 22-58 ГГц позволит получать данные о профилях температуры и влажности воздуха, водности облаков в тропосфере Земли и уменьшить погрешность оценивания тропосферной задержки. Применение современных гидродинамических моделей атмосферы также вызывает интерес для оперативного получения глобального распределения метеорологических полей и тропосферной задержки с высоким пространственно-временным разрешением.

### Экспериментальные исследования и результаты

Экспериментальные исследования атмосферы с применением микроволновых радиометров проводились в Ленинградской области в течении ряда лет, позволили получить данные о временной изменчивости влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков при различных метеорологических условиях [5]. Полученные данные о влагозапасах атмосферы согласуются с данными аэрологического зондирования атмосферы. Данные по водозапасу облаков согласуются с эмпирическими моделями облаков, основанными на данных самолетного зондирования атмосферы. Применяемые наземные микроволновые радиометры позволяли регистрировать вариации обусловленной водяным паром тропосферной задержки в широком интервале временных (пространственных) от микро и мезо до синоптических масштабов. Получены оценки интенсивности вариаций  $dL_{vap}$  при различных метеорологических условиях. Например, в условиях антициклона могут отмечаться низкие суточные вариации  $dL_{vap}$  (около 0.01 м и менее). Особенно значительные изменения  $dL_{vap}$  (более 0.1 м) связываются с вариациями влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков при прохождении атмосферных фронтов циклонов.

В качестве примера на рис.1 показан временной ход полной зенитной тропосферной задержки в период с 09 по 14 сентября 2020 г. при прохождении атмосферных фронтов в Ленинградской области. В экспериментах применялся двух частотный (20.7 и 32 ГГц) микроволновый радиометр водяного пара Института прикладной астрономии РАН [6]. Величина  $dL_{vap}$  определялась по данным радиометра водяного пара, а  $dL_{hyd}$  на основе статистической модели для условий Ленинградской области. Как видно из рис.1, полная тропосферная задержка, составляла менее 2.51 м, а ее вариации за период наблюдений составляли более 0.1 м. При этом, величина  $dL_{vap}$  изменялась в интервале от 0.09 до 0.021 м. Такие вариации  $dL_{vap}$  обусловлены прохождением атмосферных фронтов. Так при прохождении фронта окклюзии 09 сентября (день 253 на рисунке) и теплого фронта 12 сентября (день 256) изменения  $dL_{vap}$  составляли около 0.1 м. В условиях безоблачной атмосферы 14 сентября (день 258) наблюдались изменения  $dL_{vap}$  от 0.07 до 0.1 м. Уменьшение полной задержки 11 сентября (255 день) объясняется уменьшением влагозапаса атмосферы при прохождении холодного фронта. Вклад облаков  $dL_{cloud}$  оценивается величиной менее 0.001 м, кратковременно значения  $dL_{cloud}$  могут достигать величины 0.003 м.

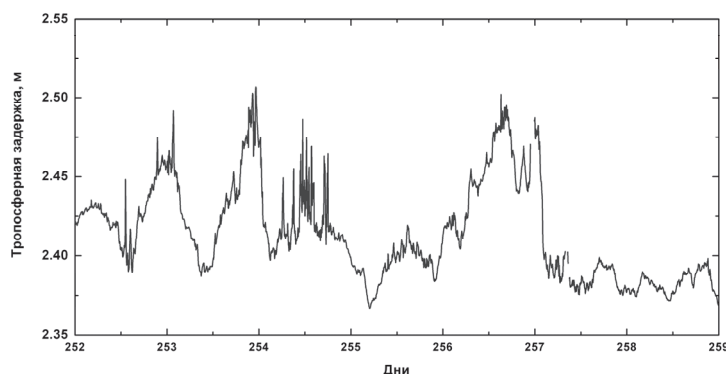


Рис 1. Пример временной изменчивости зенитной тропосферной задержки

Таким образом, эксперименты продемонстрировали эффективность применения наземных микроволновых радиометров для получения оперативных данных о влагозапасе атмосферы, водозапасе облаков, и обусловленной водяным паром тропосферной задержки и полной тропосферной задержки при различных метеоусловиях.

### Заключение

Рассмотрен метод оценивания полной тропосферной задержки радионавигационных сигналов на основе комплексирования данных микроволновой радиометрии и моделей для гидростатической тропосферной задержки. Исследования метода наземной микроволновой радиометрии показывает его эффективность для измерения обусловленной водяным паром тропосферной задержки радионавигационных сигналов. На основе экспериментальных данных микроволновых радиометров, получены оценки интенсивности вариаций обусловленной водяным паром и полной тропосферной задержки при различных метеоусловиях, при прохождении атмосферных фронтов в Ленинградской области.

### Список литературы

1. Караваев Д.М., Кулешов Ю.В., Щукин Г.Г. Коррекция модели оценивания тропосферной задержки радиосигналов по данным СВЧ- радиометрии // Распространение радиоволн: труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции (Йошкар Ола, 16–19 мая 2023): в 2-х т. – Т. 2. – С. 648–651.
2. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Исследование метода сверхвысокочастотного радиометрического зондирования для тропосферной коррекции в радионавигации // Радиотехника и электроника. – 2024. – Т. 69. – № 6. – С. 84–90.
3. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 253 с.
4. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Состояние и перспективы применения микроволновой радиометрии атмосферы // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – № 12. – С. 1122–1127.
5. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Определение содержания парообразной и жидкокапельной влаги из измерений микроволнового излучения атмосферы // Известия вузов. Радиофизика. – 2021. – Т. 64. – № 12. – С. 942–953.
6. Быков В.Ю., Ильин Г.Н., Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Пространственно-разнесенные измерения характеристик влагосодержания атмосферы с применением радиометров водяного пара в окрестности Санкт-Петербурга // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 680. – С. 205–209.