

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 551.51

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ТРОПОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ В РАДИОНАВИГАЦИИ¹

© 2024 г. Д. М. Караваев^{а, *}, Г. Г. Щукин^{а, б}

^аВоенно-космическая академия имени А. Ф. Можайского,

Ждановская ул., 13, Санкт-Петербург, 197198 Российская Федерация

^бМуромский институт (филиал) Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,

ул. Орловская, 23, Муром Владимирской обл., 602264 Российская Федерация

*E-mail: vka@mil.ru

Поступила в редакцию 28.10.2023 г.

После доработки 28.10.2023 г.

Принята к публикации 25.04.2024 г.

Исследован метод наземной сверхвысокочастотной (СВЧ) радиометрии для определения обусловленной водяным паром атмосферы тропосферной задержки для задач тропосферной коррекции в радионавигации. Экспериментально исследована с применением СВЧ-радиометров временная изменчивость компонент тропосферной задержки в Ленинградской области при различных метеорологических условиях. Показана возможность совершенствования методов тропосферной коррекции на основе применения метода наземной СВЧ-радиометрии.

Ключевые слова: радионавигация, СВЧ-радиометр, влагозапас атмосферы, полная тропосферная задержка, обусловленная водяным паром тропосферная задержка

DOI: 10.31857/S0033849424060118, **EDN:** IYXTY

ВВЕДЕНИЕ

Развитие высокоточной радионавигации требует совершенствования методов коррекции эффектов при распространении радионавигационных сигналов не только в ионосфере, но и в тропосфере Земли [1, 2]. Эти эффекты обусловлены изменчивостью метеорологических параметров атмосферы вдоль трассы распространения радионавигационных сигналов. Известно, что наземные сверхвысокочастотные (СВЧ) радиометры позволяют получать информацию о метеорологических параметрах атмосферы (влагозапас атмосферы, водозапас облаков, профили температуры и влажности воздуха) практически в режиме непрерывных измерений с высоким пространственным разрешением [3–9]. В связи с повышением требований к точности координатных определений в радионавигации, актуально развивать возможности оперативного учета переменного вклада водяного пара в полную тропосферную задержку для совершенствования методов тропосферной коррекции [10–17].

Ранее в работах [5, 9, 12, 17, 18] рассматривались вопросы применения метода наземной СВЧ-радиометрии для определения метеорологических параметров облачной атмосферы, в частности влажностного зондирования атмосферы и определения обусловленной водяным паром тропосферной задержки.

Цель данной работы – обобщить и продолжить эти исследования для изучения метода СВЧ-радиометрии при коррекции модели оценивания тропосферной задержки [16, 18, 19].

1. МЕТОД СВЧ-РАДИОМЕТРИИ ДЛЯ ТРОПОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ

1.1. Модель оценивания тропосферной задержки

При распространении радионавигационного сигнала протяженность радиотрассы между спутником и приемником на поверхности Земли превышает геометрическую длину трассы. Эта разница, именуемая тропосферной задержкой, определяется распределением коэффициента преломления среды вдоль трассы распространения сигнала. Тропосферная задержка в зенитном направлении (при угле места $\theta = 90^\circ$), определяется с помощью следующего интеграла:

¹Работа была доложена на XXVIII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» (23–26 мая 2023 г., Йошкар-Ола).

$$dL_{\text{троп}}(\theta = 90^\circ) = \int_0^\infty [n(z) - 1] dz = \int 10^{-6} N(z) dz, \quad (1)$$

где $n(z)$ – коэффициент преломления среды на высоте z ; $N(z)$ – индекс рефракции на высоте z . В общем случае следует рассматривать величину тропосферной задержки как сумму компонентов

$$dL_{\text{троп}} = dL_{\text{гидр}} + dL_{\text{пар}} + dL_{\text{обл}} + dL_{\text{осад}} + dL_{\text{лед}} + dL_{\text{аэр}}, \quad (2)$$

где $dL_{\text{гидр}}$ – «сухая» (или гидростатическая) компонента; $dL_{\text{пар}}$ – компонента, обусловленная водяным паром; $dL_{\text{обл}}$ – компонента, обусловленная вкладом жидкокапельных облаков; $dL_{\text{осад}}$ – компонента, обусловленная вкладом осадков; $dL_{\text{лед}}$ – компонента, обусловленная вкладом кристаллических облаков; $dL_{\text{аэр}}$ – компонента, обусловленная вкладом аэрозолей. Первые два члена в соотношении (2) вносят основной вклад в тропосферную задержку. Однако мощные конвективные облака и осадки также могут вносить дополнительный вклад в полную тропосферную задержку (до нескольких сантиметров).

Угловая зависимость тропосферной задержки описывается выражением

$$dL_{\text{троп}}(\theta) \approx m_{\text{гидр}}(\theta) L_{\text{гидр}}(\theta = 90^\circ) + m_{\text{пар}}(\theta) L_{\text{пар}}(\theta = 90^\circ), \quad (3)$$

где $m_{\text{гидр, пар}}(\theta)$ – функции, определяющие зависимость соответственно гидростатической и «влажной» компонент задержки от угла места.

Величина «сухой» компоненты в зенитном направлении оценивается по выражению

$$dL_{\text{гидр}}(\theta = 90^\circ) = 10^{-6} \int_{z=0}^\infty K_1 T(z)^{-1} p_c(z) Z_r^{-1} dz, \quad (4)$$

где p_c – давление сухого воздуха; $T(z)$ – термодинамическая температура воздуха; K_1 – коэффициент, $K_1 = 76.607$ К/гПа; Z_r^{-1} – корректирующий коэффициент.

Обусловленная водяным паром компонента тропосферной задержки в зенитном направлении определяется соотношением

$$dL_{\text{гидр}}(\theta = 90^\circ) = 10^{-6} \int_{z=0}^\infty [K_2 T(z)^{-1} + K_3 T(z)^{-2}] e(z) Z_p^{-1} dz, \quad (5)$$

где $e(z)$ – парциальное давление водяного пара; $K_{2,3}$ – коэффициенты, $K_2 = -6.007$ К/гПа, $K_3 = 3.747 \times 10^5$ К²/гПа.

Используя выражения (4) и (5) можно определить компоненты $dL_{\text{гидр}}$ и $dL_{\text{пар}}$ по данным стандартных аэрологических наблюдений, которые

проводятся каждые 12 ч. «Сухая» компонента составляет около 90% величины полной тропосферной задержки (например, для пос. Воейково Ленинградской обл. гидростатическая задержка составляет около 2.3 м). Обусловленная водяным паром компонента тропосферной задержки может достигать величины 0.43 м в тропической зоне земного шара и уменьшается до ~0.003 м в полярной области. Особенностью является тот факт, что эта компонента задержки является сильно изменчивой как в пространстве, так и во времени, что определяет трудности ее оценивания с помощью простых статистических моделей тропосферы.

Следует отметить, что в годовом цикле изменчивости тропосферной задержки основную роль играет изменчивость содержания водяного пара. Причем в теплый период это проявляется наиболее отчетливо: с одной стороны, уменьшаются синоптические вариации «сухой» компоненты, с другой – увеличивается влагозапас атмосферы и его вариации. Отрицательная корреляция компонент $dL_{\text{гидр}}$ и $dL_{\text{пар}}$ в Ленинградской обл., по всей видимости, обусловлена высокой повторяемостью циклонов в осенне-зимний период. Таким образом, основная проблема тропосферной коррекции связана с необходимостью точного определения тропосферной задержки, обусловленной водяным паром.

1.2. Определение тропосферной задержки, обусловленной водяным паром

Метод СВЧ-радиометрии позволяет определять обусловленную водяным паром тропосферную задержку, которая детерминированным образом связана с влагозапасом атмосферы [9,20]:

$$dL_{\text{пар}}(\theta = 90^\circ) = b_1 Q,$$

$$b_1 = 10^{-6} [K_2 + K_3 T_{\text{ср}}^{-1}] \rho_0 R_w Z_n^{-1}. \quad (6)$$

где $R_w = R/M_w$, R – универсальная газовая постоянная, 287.054 Дж/(кг К); M_w – молекулярная масса; $\rho_0 = 1$ г/м³; $T_{\text{ср}}$ – «средняя температура» определяется по выражению

$$T_{\text{ср}} = \left[\int_0^\infty T(z)^{-2} e(z) dz \right]^{-1} \int_0^\infty T(z)^{-1} e(z) dz. \quad (7)$$

Полная тропосферная задержка в зенитном направлении может быть определена на основе СВЧ-радиометрических измерений влагозапаса атмосферы Q и водозапаса облаков W из соотношения

$$dL_{\text{троп}}(\theta = 90^\circ) = dL_{\text{гидр}}(\phi, h, p_c) + b_1 Q + b_2 W, \quad (8)$$

где b_i – коэффициенты регрессии; ϕ, h – широта и высота наблюдательной станции.

Влагозапас атмосферы Q и водозапас облаков W определяются по результатам измерений характеристик радиотеплового излучения атмосферы вблизи линии поглощения водяного пара 22.235 ГГц с помощью регрессионных уравнений [3,9,17]:

$$\begin{aligned} Q &= a_0 + a_1\tau(f_1) + a_2\tau(f_2), \\ W &= b_0 + b_1\tau(f_1) + b_2\tau(f_2), \end{aligned} \quad (9)$$

где a_j, b_j — коэффициенты регрессии, полученные по данным радиозондирования атмосферы и эмпирическим моделям облаков; $\tau(f_k)$ — оптическая толщина атмосферы при частоте f_k , определяемая по результатам измерений радиоярких температур атмосферы на частотах около 22.235 ГГц и в «окне» прозрачности атмосферы 30...38 ГГц. Уравнения (9) некорректно использовать при наличии осадков или когда приближение рэлеевского поглощения в облаках не выполняется.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования параметров атмосферы с применением метода СВЧ-радиометрии проводились в течение ряда лет в Ленинградской области при различных метеорологических условиях, в настоящее время продолжают [21].

В наших экспериментах применялся классический двухчастотный вариант СВЧ-радиометра влажностного зондирования при частотах каналов около 20.7...22.23 и 31...36 ГГц. Полоса усиления радиометрических приемников составляла

200...500 МГц. Использовались антенны с шириной луча 7...9 град по уровню половинной мощности. Дискретность измерений составляла 5...1000 с. Наземные СВЧ-радиометры использовались для исследования влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков [5,9,17]. Далее полученные данные интерпретировались для исследования обусловленной водяным паром тропосферной задержки в зените.

СВЧ-радиометрические исследования показали, что величина $dL_{\text{пар}}$, как правило, изменялась в диапазоне от 0.01 до 0.30 м. Средние значения и средние квадратические отклонения тропосферной задержки, обусловленной водяным паром, составляли для июля соответственно 0.162 и 0.037 м, а для января — 0.053 и 0.019 м. На рис. 1 представлен пример временного хода обусловленной водяным паром тропосферной задержки в мае 2007 г. Видно, что величина $dL_{\text{пар}}$ изменялась в интервале от 0.024 до 0.22 м, причем наибольшие значения $dL_{\text{пар}}$ составляли около 0.22 м.

Применяемые наземные СВЧ-радиометры позволяли диагностировать вариации $dL_{\text{пар}}$ в широком интервале временных масштабов (включая микро-, мезо-, синоптические). СВЧ-радиометры позволяют регистрировать изменения $dL_{\text{пар}}$, существенно отличающиеся при различных метеорологических условиях. Например, в условиях антициклона могут отмечаться незначительные суточные вариации $dL_{\text{пар}}$ (около 0.01 м и менее). Особенно значительные изменения $dL_{\text{пар}}$ связываются с вариациями влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков при прохождении атмосферных фронтов циклонов.

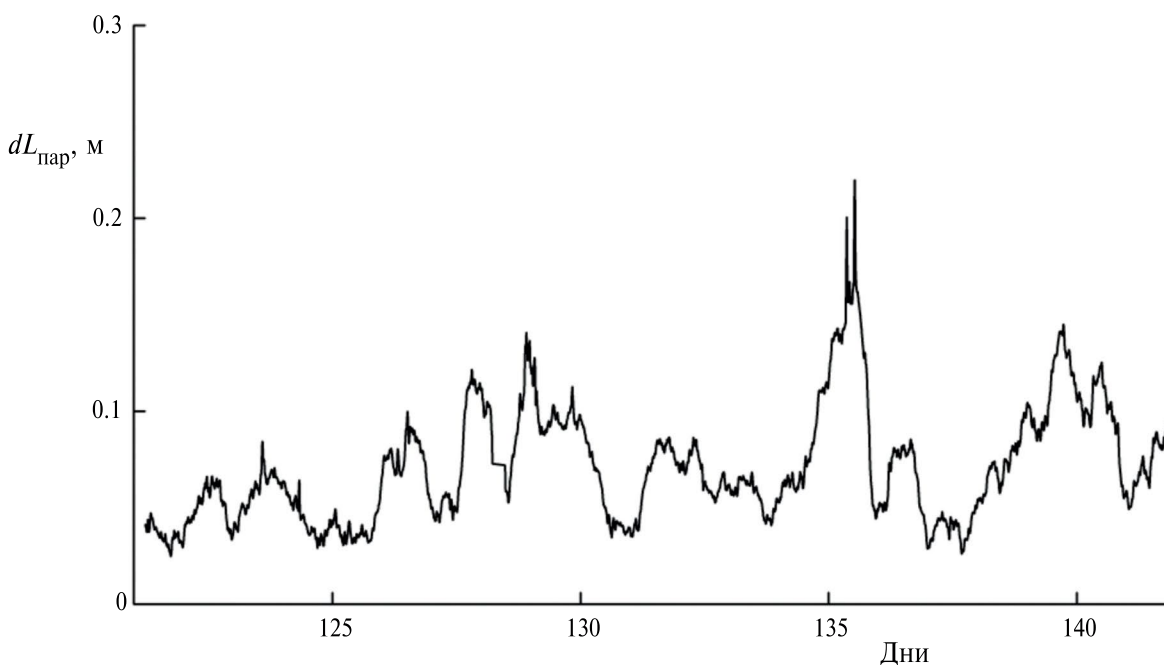


Рис. 1. Временной ход обусловленной водяным паром тропосферной задержки по данным, полученным СВЧ-радиометром в мае 2007 г. (пос. Воейково Ленинградской обл.).

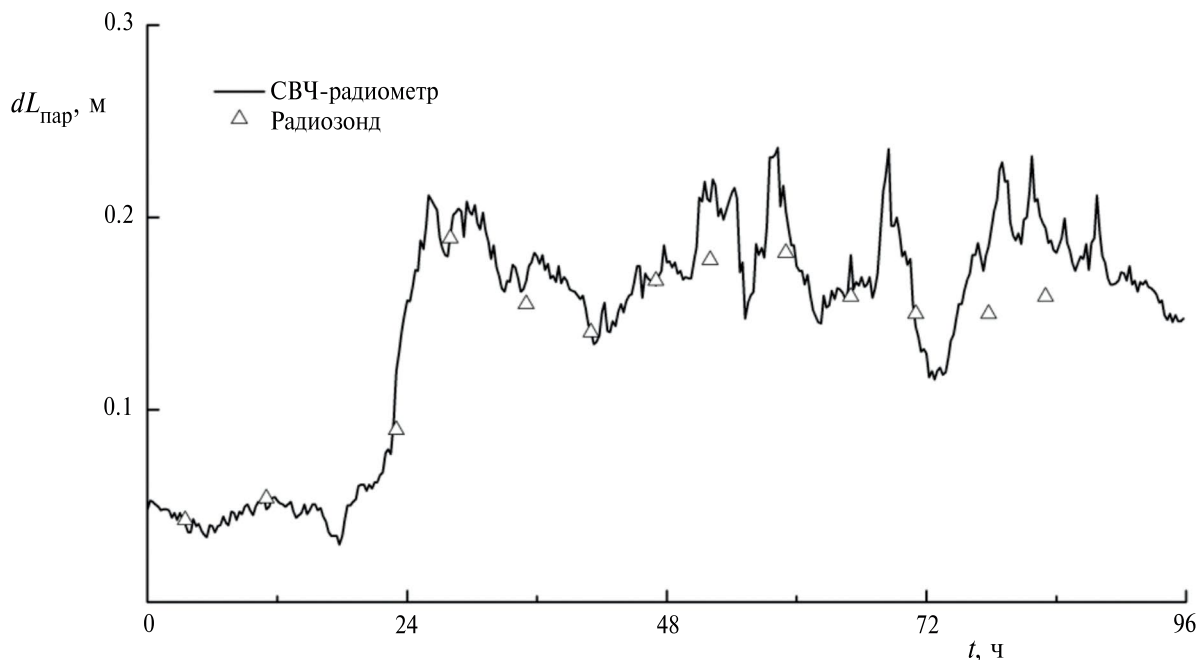


Рис. 2. Временной ход обусловленной водяным паром тропосферной задержки по данным, полученным судовым СВЧ-радиометром 16...19 апреля 1990 г. над Северной Атлантикой (46 с.ш., 48 з.д., теплый фронт).

На рис. 2 представлен пример временного хода обусловленной водяным паром тропосферной задержки в апреле 1990 г. в районе Северной Атлантики (48 с.ш., 46 з.д.). Видно, что величина $dL_{\text{пар}}$ изменялась в интервале от 0,04 до 0,24 м. При прохождении теплого фронта 16 апреля регистрировались значительные изменения $dL_{\text{пар}}$ со скоростью около 0,07 м/ч. Данные СВЧ-радиометра согласуются с данными радиозондирования атмосферы.

В качестве примера на рис. 3 показан временной ход $dL_{\text{пар}}$ по данным СВЧ-радиометрических измерений 10–12 июня 2018 г. Видно, что величина $dL_{\text{пар}}$ изменялась в интервале от 0,07 до 0,18 м. Вклад облаков в полную задержку $dL_{\text{обл}}$ в период наблюдений оценивается величиной менее 0,003 м. Метеоусловия 10–12 июля определялись прохождением двух циклонов и связанных с ними теплых и холодных атмосферных фронтов.

В экспериментах, проводимых в 2018 и 2020 гг., был использован двухчастотный СВЧ-радиометр водяного пара (частоты 20,7 и 31,4 ГГц), разработанный в Институте прикладной астрономии РАН [22].

В качестве примера на рис. 4 показан временной ход обусловленной водяным паром тропосферной задержки в период с 9 по 14 сентября 2020 г. при прохождении атмосферных фронтов. Изменения $dL_{\text{пар}}$ по данным СВЧ-радиометрических измерений в период наблюдений составляли от 0,06 до 0,02 м. Полученные данные СВЧ-радиометра по влагозапасу атмосферы качественно согласуются с данными радиозондирования в пос. Воейково.

При прохождении фронта окклюзии 9 сентября (см. рис. 4, 253-й день) наблюдался рост влагозапаса атмосферы, соответственно, величина $dL_{\text{пар}}$ менялась в интервале от 0,09 до 0,21 м. Влияние облаков $dL_{\text{обл}}$ оценивается на уровне менее 0,003 м. На следующий день 10 сентября (254-й день) наблюдалось прохождение через станции наблюдений спирали фронта окклюзии. Затем, 11 сентября (255-й день) величина $dL_{\text{пар}}$ уменьшается до $\sim 0,07$ м, что объясняется уменьшением влагозапаса атмосферы при прохождении холодного фронта. Вклад облаков в задержку $dL_{\text{обл}}$ оценивается величиной менее 0,001 м. При прохождении теплого фронта 12 сентября (256-й день) регистрировался рост влагозапаса атмосферы, соответственно, $dL_{\text{пар}}$ увеличивается до 0,2 м. Вклад облаков в тропосферную задержку $dL_{\text{обл}}$ в отдельные моменты времени оценивается величиной около 0,003 м. При прохождении холодного фронта 13 сентября (257-й день) влагозапас атмосферы уменьшается, что влечет уменьшение $dL_{\text{пар}}$ до 0,07 м. Кратковременно вклад облаков в задержку $dL_{\text{обл}}$ достигает 0,003 м. В условиях безоблачной атмосферы 14 сентября (258-й день) наблюдались незначительные вариации $dL_{\text{пар}}$ в интервале от 0,07 до 0,1 м.

Таким образом, эксперименты продемонстрировали возможности применения наземных СВЧ-радиометров для получения оперативных данных о влагозапасе атмосферы, водозапасе облаков и обусловленной водяным паром тропосферной задержки.

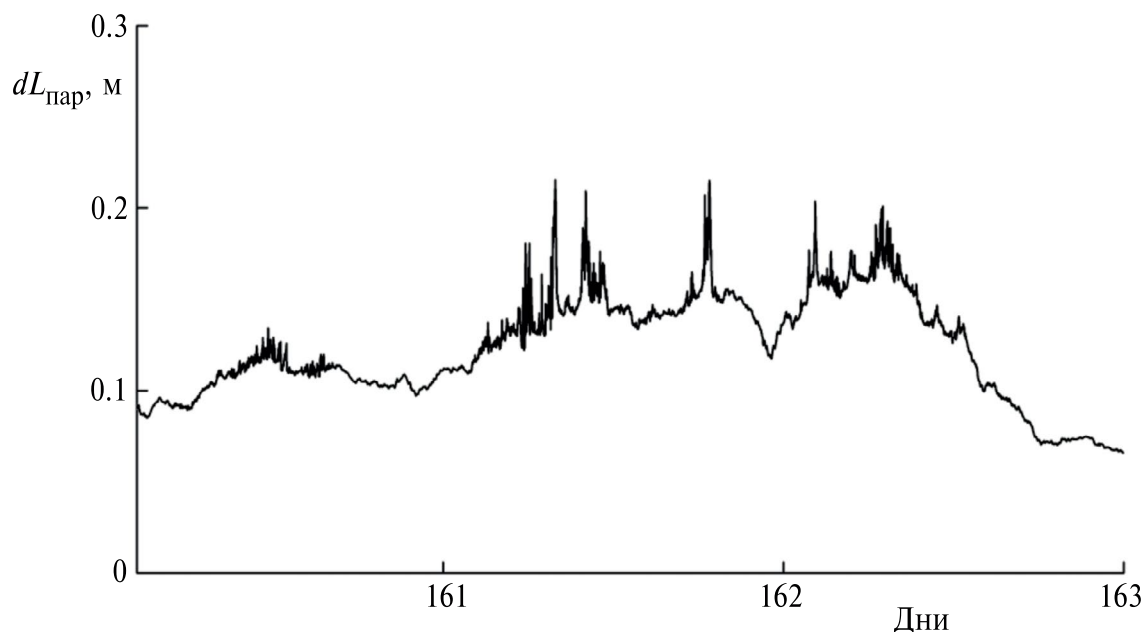


Рис. 3. Временной ход обусловленной водяным паром тропосферной задержки по данным, полученным СВЧ-радиометром 10...12 июня 2018 г. в пос. Лехтуси Ленинградской области (теплый, холодный фронты).

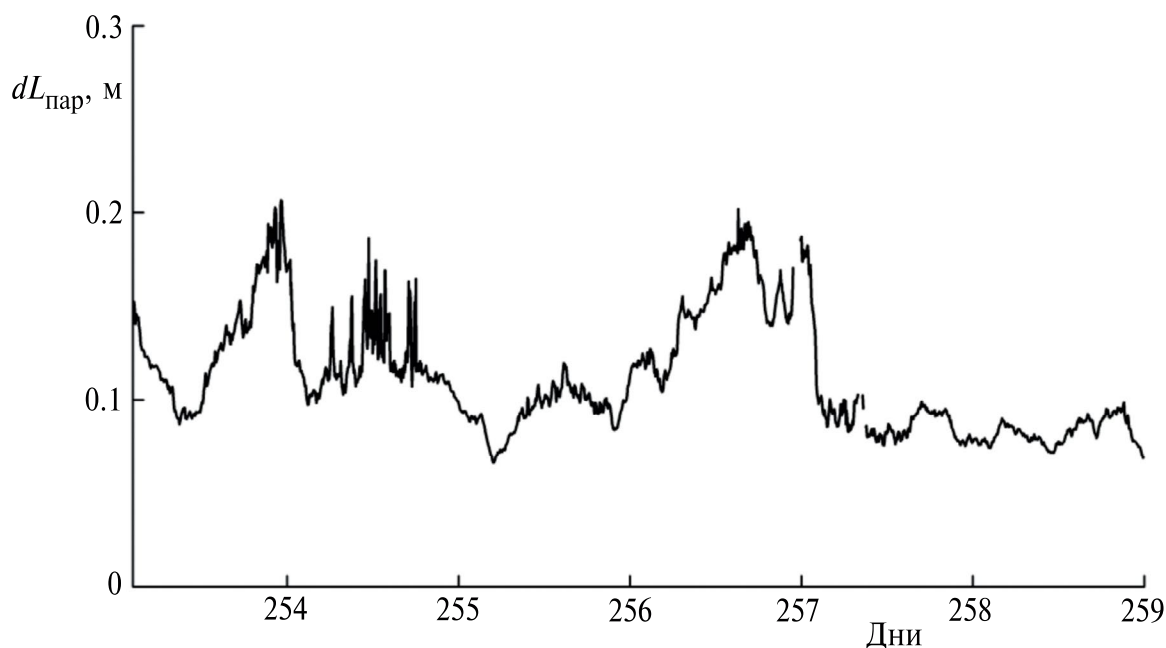


Рис. 4. Временной ход обусловленной водяным паром тропосферной задержки по данным, полученным СВЧ-радиометром 9...14 сентября 2020 г., Санкт-Петербург (прохождение атмосферных фронтов циклона).

3. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Один из методов коррекции влияния тропосферы на распространение радионавигационных сигналов основан на модели NRLMSISE00 и модели влажности воздуха в соответствии с ГОСТ

26352–84 [1, 2]. Однако модели тропосферной задержки, основанные на использовании статистических моделей для метеопараметров атмосферы, не воспроизводят мезомасштабные и синоптические вариации состояния атмосферы, не обеспечивают требования миллиметрового уровня точности тропосферной коррекции. Например, при проведении сравнительных экспе-

риментов было обнаружено, что разница между средними значениями модельных расчетов и измеренной задержки составила 0.04 м, а среднеквадратическое отклонение равно 0.03 м. Для совершенствования метода тропосферной коррекции представляются необходимыми следующие направления исследований.

1. Апробация применения глобальных моделей атмосферы для оценивания тропосферной задержки — интерес вызывают современные технологии оперативного гидродинамического моделирования метеорологических полей и тропосферной задержки с высоким пространственным и временным разрешением [23].

2. Развитие прецизионных методов и средств измерения тропосферной задержки, обеспечивающих непрерывный контроль параметров тропосферы вдоль трассы распространения радиосигналов в реальном времени. Среди эффективных современных методов измерения тропосферной задержки можно выделить метод СВЧ-радиометрии. Этот метод позволяет определять:

а) влагозапас атмосферы и водозапас облаков, а также обусловленную водяным паром тропосферную задержку по измерениям характеристик собственного нисходящего радиотеплового излучения атмосферы на частотах около 22.23 ГГц;

б) профили температуры и влажности воздуха, водозапас облаков, а также полную тропосферную задержку по измерениям характеристик собственного нисходящего радиотеплового излучения атмосферы около 22...60 ГГц с погрешностью миллиметрового уровня.

Дальнейшие комплексные эксперименты по испытанию новых измерительных комплексов, совершенствованию наукастинга (nowcasting) метеорологических параметров атмосферы и моделей атмосферы продолжаются с применением разрабатываемых радиофизических средств [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован метод наземной СВЧ-радиометрии для измерения обусловленной водяным паром тропосферной задержки радионавигационных сигналов. На основе экспериментальных исследований характеристик влагосодержания атмосферы, полученных по данным наземных СВЧ-радиометров влажностного зондирования атмосферы, сделаны оценки вариаций обусловленной водяным паром атмосферы тропосферной задержки при различных метеоусловиях. Применение наземных СВЧ-радиометров влажностного зондирования атмосферы перспективно для задач высокоточной тропосферной коррекции задержки радионавигационных сигналов.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-19-00378).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Готюр И. А., Караваев Д. М., Краснов В. М. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 40. № 3. С. 223.
2. Готюр И. А., Девяткин А. М., Караваев Д. М. и др. // Тр. XXIV Всерос. научн. конф. "Распространение радиоволн". Иркутск, 29 июня-5 июля 2014. Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2014. Т. 4. С. 195.
3. Степаненко В. Д., Шукин Г. Г., Бобылев Л. П., Матросов С. Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1987.
4. Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry / Ed. M. A. Janssen. New York: J. Wiley and Sons, 1993.
5. Караваев Д. М., Шукин Г. Г. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 12. С. 1122. doi.org/10.1134/S1024856016030076.
6. Rose T., Crewell S., Lohnert U., Simmer C. // Atmos. Res. 2005. V. 75. № 3. P. 183. doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.12.005
7. Гайкович К. П., Кадыгров Е. Н., Косов А. С., Троицкий А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1992. Т. 35. № 2. С. 130.
8. Ware R., Carpenter R., Guldner J., Liljegren J. et al. // Radio Sci. 2003. V. 38. № 4. P. 8079. doi.org/10.1029/2002RS002856.
9. Караваев Д. М., Шукин Г. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 12. С. 942.
10. Elgered G. Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry / Ed. M. A. Janssen. N.Y.: J. Wiley and Sons, 1993. P. 215.
11. Solheim F. S., Vivekanandan J., Ware R. H., Rocken C. // J. Geophysical Research. 1999. V. 104. № D8. P. 9663.
12. Шукин Г. Г., Караваев Д. М. // Труды ИПА. 2012. Вып. 23. С. 411.
13. Караваев Д. М., Кулешов Ю. В., Сахно И. В. и др. // Тр. III Всерос. научн. конф. "Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля природной среды". С.-Петербург, 16–18 апреля 2014. С. 183.
14. Ильин Г. Н., Троицкий А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60. № 4. С. 326.
15. Кутуза Б. Г. // РЭ. 1974. Т. 19. № 4. С. 665.
16. Караваев Д. М., Шукин Г. Г. // Радиотехнич. и телекоммуникац. системы. 2013. № 2. С. 48.

17. Караваев Д. М., Кулешов Ю. В., Шукин Г. Г. // РЭ. 2023. Т. 68. № 6. С. 615.
18. Караваев Д. М., Кулешов Ю. В., Шукин Г. Г. // Тр. XXVI Всерос. научн. конф. "Распространение радиоволн". Казань, 1–6 июля 2019. Казань: изд-во Казан. гос. унта, 2019. Т. 2. С. 275.
19. Караваев Д. М., Шукин Г. Г. // Тр. XXVIII Всерос. научн. конф. "Распространение радиоволн". Йошкар-Ола. 16–19 мая 2023. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2023. С. 648.
20. Караваев Д. М., Шукин Г. Г., Свиридов В. С. // Навигация и гидрография. 2017. Т. 49. С. 38.
21. Кулешов Ю. В., Шукин Г. Г., Готюр И. А. и др. // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2018. Вып. 662. С. 186.
22. Быков В. Ю., Ильин Г. Н., Караваев Д. М., Шукин Г. Г. // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2021. Вып. 680. С. 205.
23. Ривин Г. С. Современные системы мезомасштабного прогноза погоды: состояние и перспективы: 80 лет Гидрометцентра России. М.: Триада ЛТД, 2010.

STUDY OF ULTRA HIGH FREQUENCY RADIOMETRIC SOUNDING METHOD FOR TROPOSPHERIC CORRECTION IN RADIO NAVIGATION

D. M. Karavaev^{a, *}, G. G. Shchukin^{a, b}

^a*Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg,
Zhdanovskaya Str., 13, St.-Petersburg, 197198 Russian Federation*

^b*Murom Institute (branch) of the Vladimir Civil Servant University
named after. Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov,
Orlovskaya Str., 23 Murom, 602264 Russian Federation*

*E-mail: vka@mil.ru

Received October 28, 2023, revised October 28, 2023, accepted April 25, 2024

The method of ground-based microwave radiometry for determining the tropospheric delay caused by atmospheric water vapor for tropospheric correction in radio navigation is investigated. The temporal variability of tropospheric delay components in the Leningrad Region under various meteorological conditions was experimentally investigated using microwave radiometers. The possibility of improving tropospheric correction methods based on the use of the method of ground-based microwave radiometry is shown.

Keywords: radio navigation, microwave radiometer, water vapor, total tropospheric delay, wet delay