

УДК 537.876+551.51

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ РАДИОСИГНАЛА РАДИОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Г. Н. Ильин¹, А. В. Троцкий^{2*}

¹ Институт прикладной астрономии РАН, г. Санкт-Петербург;

² Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

В работе представлен метод и алгоритм оперативного определения тропосферной задержки радиосигнала и разработанный на их основе радиометрический комплекс. Метод основан на измерении интенсивности теплового микроволнового излучения атмосферы на частотах $\nu_1 = 20,7$ ГГц, $\nu_2 = 32$ ГГц и $\nu_3 = 56,7$ ГГц и решении соответствующей обратной задачи относительно параметров атмосферы (температуры, давления, влажности и водности), которые полностью определяют величину тропосферной задержки радиосигнала. Выполнена экспериментальная проверка метода путём сравнения рядов задержек радиосигнала, полученных радиометрическим методом, с данными глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. Погрешность определения влажностной компоненты задержки радиосигнала, обусловленной водяным паром, составила около 3 мм.

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающие требования к точности решения навигационных задач требуют наличия данных о тропосферной задержке распространения радиосигнала в реальном времени. Оперативные данные о задержке используются для создания моделей среды распространения навигационных радиосигналов в высокоточном эфемеридно-временном обеспечении спутниковых систем ГЛОНАСС. Результаты измерений тропосферной задержки также используются при радиointерферометрических наблюдениях со сверхдлинной базой (РСДБ), проводимых с целью точного определения координат и времени и при решении навигационных задач в ближнем и дальнем космосе.

Под тропосферной задержкой принято понимать задержку распространения радиосигнала при прохождении нейтральной атмосферы, характеризующейся высотами $h \approx 0 \div 50$ км. Тропосферная задержка состоит из гидростатической («сухой») компоненты и компоненты, обусловленной наличием в тропосфере водяного пара (влажностной или «влажной»). «Сухая» компонента задержки определяется достаточно точно (с ошибкой примерно 1 мм) в силу того, что «сухая» часть тропосферы находится в гидростатическом равновесии и подчиняется законам для идеальных газов. На основе модельных представлений «влажная» компонента тропосферной задержки не может быть определена даже с точностью до нескольких сантиметров в силу большой изменчивости содержания водяного пара в тропосфере.

Отметим, что величина тропосферной задержки радиосигнала полностью определяется метеопараметрами атмосферы: высотными профилями температуры, влажности, давления и интегральной водностью облаков и осадков [1]. Все модельные методы определения рефракции и тропосферной задержки основаны на различных способах задания высотного распределения коэффициента преломления $n(h)$ [2–5]. Минимальная погрешность определения компоненты тропосферной задержки, обусловленной водяным паром, в этих моделях составляет около 20 мм (модель Наумова [5]). Для остальных моделей точность определения задержки в разы хуже. При

* troitskyav@nirfi.unn.ru

этом для решения современных задач навигации требуется точность определения задержки до 3 мм в зенитном направлении, а получение данных должно осуществляться в реальном времени.

Указанным требованиям удовлетворяет радиометрический метод определения рефракционных характеристик тропосферы (рефракции и тропосферной задержки радиосигнала) [6, 7]. Он основан на измерении собственного (теплого) излучения атмосферы в микроволновом диапазоне радиоволн. Интенсивность этого излучения полностью определяется основными метеопараметрами атмосферы: высотными профилями температуры, влажности, давления и водностью облаков. Указанные метеопараметры находятся из радиометрических данных путём решения соответствующих обратных задач и используются для расчёта профиля коэффициента преломления с последующим определением величины рефракции и тропосферной задержки радиосигнала.

В данной работе представлен метод и алгоритм определения тропосферной задержки радиосигнала в реальном времени на основе измерений интенсивности теплового микроволнового излучения атмосферы. Также приведены результаты измерений задержки, выполненных с помощью соответствующего радиометрического комплекса для частот излучения $\nu_1 = 20,7$ ГГц, $\nu_2 = 32$ ГГц и $\nu_3 = 56,7$ ГГц.

1. МЕТОД И АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ РАДИОСИГНАЛА

Атмосферу Земли можно считать смесью трёх нерассеивающих компонент — сухого воздуха с парциальным давлением P_c , водяного пара с парциальным давлением e и капельной воды в облаках с удельной водностью w , значения коэффициентов преломления n для каждой из этих компонент хорошо известны. Учитывая, что коэффициент преломления смеси газов подчиняется аддитивному закону, его можно записать в виде [1]

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = K_1 \frac{P_c}{T} + K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} + \frac{3}{2} w \left(\frac{\varepsilon_0 - 1}{\varepsilon_0 + 2} \right) = \\ = K_1 \frac{P}{T} + (K_2 - K_1) \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} + \frac{3}{2} w \left(\frac{\varepsilon_0 - 1}{\varepsilon_0 + 2} \right). \quad (1)$$

Здесь N — приведённый коэффициент преломления, $P = P_c + e$, T — абсолютная температура, ε_0 — статическая диэлектрическая проницаемость воды. Коэффициент K_1 характеризует «сухую» часть коэффициента преломления атмосферы, а коэффициенты K_2 и K_3 — «влажную». В соответствии с действующими рекомендациями ITU-R P.453-11 [8], коэффициенты в (1) имеют следующие численные значения: $K_1 = 77,6$ К/гПа, $K_2 = 72$ К/гПа, $K_3 = 3,75 \cdot 10^5$ К²/гПа, $\varepsilon_0 \approx 88$ для температуры облачных капель $T_{\text{обл}} = 273$ К. Выражение (1) справедливо для длин волн $\lambda \geq 1$ мм.

Тропосфера представляет собой неоднородную диэлектрическую среду; её коэффициент преломления и, следовательно, скорость распространения радиоволн в ней меняются с высотой. При этом коэффициент преломления тропосферы не зависит от частоты, вследствие чего фазовая и групповая скорость одинаковы: $c_{\text{ф}} = c_{\text{гр}} = c_0/n$. При измерении расстояний радиотехническими методами находят фазовое время прихода радиосигнала $t_{\text{ф}} = \int_0^h c_{\text{ф}}^{-1} dl = c_0^{-1} \int_0^h n dl$ и его задержку $\Delta t_{\text{ф}} = c_0^{-1} \int_0^h (n - 1) dl$, вызванную отклонением коэффициента преломления в атмосфере $n(h)$ от его значения 1 в вакууме. Сам же фазовый путь определяется как $L_{\text{ф}} = c_0 t_{\text{ф}} = \int_0^h n dl$, и, соответственно, разность между фазовым путём и геометрическим расстоянием записывается

как

$$\Delta l_{\Phi} = \int_0^L (n - 1) dl = 10^{-6} \int_0^L N dl, \quad (2)$$

где N определяется выражением (1). В литературе разность Δl_{Φ} обычно называется фазовой задержкой радиосигнала, хотя она имеет размерность длины.

В общем случае атмосфера рассматривается как сферически слоистая среда. Тогда элемент пути имеет вид $dl = \{1 - [n_0 r_0 / (nr)]^2 \sin^2 \theta\}^{-1/2}$, где $n_0 = n(h = 0)$, r_0 — радиус Земли, $r = r_0 + h$, θ — зенитный угол. Тогда согласно выражению (2) фазовая задержка радиосигнала Δl_{Φ} имеет вид

$$\Delta l_{\Phi}(\theta)[\text{см}] = 10^{-1} \int_0^{H_A[\text{км}]} \frac{N(h) dh}{\sqrt{1 - \left[\frac{1 + 10^{-6} N_0}{1 + 10^{-6} N(h)} \frac{r_0}{r_0 + h} \right]^2 \sin^2 \theta}}, \quad (3)$$

где $H_A \approx 50$ км — высота атмосферы. Вычисление фазовой задержки $\Delta l_{\Phi}(\theta)$ по формуле (3) требует применения численных методов. Зависимость $N(h)$ при этом рассчитывается либо по данным аэрологического зондирования, либо по значениям метеопараметров, восстановленных из результатов дистанционного радиометрического зондирования атмосферы [6, 7]. Выражение (3) справедливо до зенитных углов $\theta \leq 80^\circ$, когда искривлением луча, т. е. рефракцией, можно пренебречь.

Для большинства задач распространения радиоволн в земной атмосфере последнюю можно рассматривать как плоскостойкую среду. В этом случае элемент пути $dl = \sec \theta dh$, а фазовая задержка радиосигнала (2) имеет вид

$$\Delta l_{\Phi}[\text{см}] = 10^{-6} \sec(\theta) \int_0^{H_A[\text{км}]} N(h) dh. \quad (4)$$

Выражение (4) с учётом (1) можно привести к виду

$$\Delta l_{\Phi}[\text{см}] = \sec(\theta) \left(0,2279 P_0[\text{гПа}] + 0,109 Q[\text{г/см}^2] + \frac{1730}{T_{\text{cp}}[\text{К}]} Q[\text{г/см}^2] + 0,145 W[\text{кг/м}^2] \right), \quad (5)$$

где P_0 — приземное давление, Q — интегральное содержание водяного пара, W — интегральное водосодержание, T_{cp} — средневзвешенная (по высотному распределению абсолютной влажности $\rho(h)$) температура тропосферы,

$$T_{\text{cp}}[\text{К}] = 10Q[\text{г/см}^2] \left[\int_0^{H_T[\text{км}]} \frac{\rho(h)[\text{г/м}^3]}{T(h)[\text{К}]} dh \right]^{-1}. \quad (6)$$

Приближённо температуру T_{cp} можно оценить по регрессионному соотношению вида

$$T_{\text{cp}} = CT_0 + B, \quad (7)$$

где коэффициенты C и B рассчитываются по массиву данных аэрологического зондирования атмосферы.

В выражении (5) первый член является гидростатической, или «сухой», частью тропосферной задержки радиосигнала, а три последующих — «влажной». Более точное выражение для гидростатической части задержки с учётом несферичности Земли, приведено в работе [3]. В дальнейшем мы будем рассматривать только «влажную» часть тропосферной задержки радиосигнала. Тогда, учитывая, что на высоте тропосферы $h = H_T \approx 15$ км абсолютная влажность $\rho(H_T)$ примерно в 75 раз меньше приземных значений ρ_0 , можно считать, что на высотах $h > H_T = 15$ км абсолютная влажность $\rho(h > H_T) = 0$, а $\int_0^{H_T} \rho(h) dh = Q$.

Таким образом, для определения задержки, обусловленной водяным паром, необходимо знание следующих метеопараметров тропосферы: интегрального содержания водяного пара Q и жидкой воды W (основные параметры), высотного профиля температуры $T(h)$ и абсолютной влажности $\rho(h)$ (вспомогательные параметры). Комплексное определение указанных метеопараметров осуществляется дистанционными радиометрическими методами зондирования тропосферы в микроволновом диапазоне длин волн [7, 9]. Интегральные характеристики тропосферы Q и W определяются с помощью измерений интенсивности радиоизлучения (поглощения) атмосферы в линии поглощения водяного пара $\nu_1 \approx 22,235$ ГГц и окне прозрачности $\nu_2 \approx 30 \div 40$ ГГц решением системы линейных уравнений для измеренных значений поглощения $\tau(\nu_\alpha)$, $\alpha = 1, 2$, вида [10]

$$\tau(\nu_\alpha) = \tau_{O_2}(\nu_\alpha) + \bar{\varphi}_{H_2O}(\nu_\alpha)Q + \Psi_W(\nu_\alpha)W. \quad (8)$$

Поглощение в кислороде $\tau_{O_2}(\nu_\alpha)$ и эффективные значения удельного коэффициента поглощения в водяном паре $\bar{\varphi}_{H_2O}(\nu_\alpha)$ рассчитываются с помощью квантово-механической теории поглощения в кислороде [11] и водяном паре [12], а удельный коэффициент поглощения в капельной воде $\Psi_W(\nu_\alpha)$ — с использованием дипольной теории Дебая [10]. Дифференциальная характеристика тропосферы — профиль абсолютной влажности $\rho(h)$ — с достаточной для расчёта средней температуры T_{cp} (6) точностью определяется выражением

$$\rho[\text{г/м}^3] = \rho_0[\text{г/м}^3] \exp(-0,1\rho_0[\text{г/м}^3]h[\text{км}]/Q[\text{г/см}^2]), \quad (9)$$

где ρ_0 — приземное значение абсолютной влажности $\rho(h = 0)$.

Максимальная точность определения интегрального влагосодержания Q в выражении (8) реализуется на частотах $\nu_1 \approx 21$ ГГц и $\nu_2 \approx 23,2$ ГГц (левый и правый склон) линии поглощения водяного пара. Выбор одной из указанных частот (ν_1) в качестве рабочей частоты для определения Q связан с тем, что на этих частотах вариации измеряемой яркостной температуры атмосферы, обусловленные вариациями профиля влажности, $\delta T_{Я}(\rho)$, при $Q = \text{const}$ практически равны нулю [13]. При определении интегральной влажности Q вариации $\delta T_{Я}(\rho)$ являются «шумом», который в центре линии поглощения водяного пара достигает величины около 3 К, что соответствует ошибке определения задержки около 9 мм.

Профиль температуры тропосферы $T(h)$ находится из углового спектра яркостной температуры атмосферы в полосе поглощения молекулярного кислорода O_2 в районе частоты $\nu \approx 60$ ГГц решением обратной задачи [14]. Связь между измеренным угловым спектром яркостной температуры $T_{Я}(\theta)$ и профилем температуры $T(h)$ определяется нелинейным интегральным уравнением Фредгольма 1-го рода:

$$T_{Я}(\theta) = \int_0^{H_A} K(\nu, \theta, h, T)T(h) dh, \quad (10)$$

где

$$K = \frac{1}{\cos \theta} \gamma(h) \exp \left[\frac{-\int_0^h \gamma(h') dh'}{\cos \theta} \right] \quad (11)$$

— ядро интегрального уравнения (10), γ — коэффициент поглощения в атмосфере. После линеаризации и алгебраизации (т. е. перехода от интегрирования к суммированию) уравнение (10) решается методом статистической регуляризации [15, 16]. В результате решение даётся вектором

$$\delta \mathbf{T} = (\mathbf{K}^* \mathbf{V} \mathbf{K} + \mathbf{B}_{TT}^{-1})^{-1} \mathbf{K}^* \mathbf{V} \delta \mathbf{T}_Я, \quad (12)$$

где \mathbf{K} — матрица, получаемая при алгебраизации (10), \mathbf{V} — матрица ошибок наблюдений, \mathbf{B}_{TT} — автокорреляционная матрица температур, звёздочка обозначает транспонирование. Система (12) решается стандартными методами линейной алгебры.

Термическое зондирование тропосферы осуществляется на частоте $\nu_3 = 56,7$ ГГц при 8 зенитных углах в диапазоне $\theta = 0^\circ \div 86^\circ$. Эффективная высота термического зондирования составляет около 1,3 км. В этом слое формируется около 80% излучения атмосферы. Эффективное восстановление профиля температуры тропосферы $T(h)$ также осуществляется в диапазоне высот $h = 0 \div 1,3$ км. Среднее квадратическое отклонение (СКО) восстановления профиля $T(h)$ в интервале эффективных высот зондирования $h = 0 \div 1,3$ км составляет $0,3 \div 1,2$ °С, соответственно. Формально метод статистической регуляризации позволяет восстанавливать профиль $T(h)$ до высоты тропопаузы $h = 10 \div 12$ км. Возможность такого восстановления основана на использовании корреляционных связей температуры атмосферы в интервале высот эффективного зондирования с температурной в интервале высот $h = 1,3 \div 10$ км. Указанные связи задаются автокорреляционной матрицей \mathbf{B}_{TT} (12). При восстановлении профиля $T(h)$ температуры тропосферы в интервале высот $2 \div 10$ км СКО составляет $2 \div 3$ °С.

Использование восстановленного из радиометрических измерений профиля $T(h)$ для определения средневзвешенной температуры $T_{ср}$ приводит к ошибке (СКО) в определении $T_{ср}$ по формуле (6) около 2 °С, что соответствует ошибке определения «влажной» тропосферной задержки около 1 мм. При определении температуры $T_{ср}$ по регрессионному соотношению (7) СКО для $T_{ср}$ составляет примерно $3,7$ °С, что эквивалентно ошибке определения задержки около 2,3 мм. Приведённые оценки точности выполнены для летних условий наблюдения ($T_0 = 292$ К, $Q = 2,5$ г/см²).

Преимущество радиометрического метода определения $T_{ср}$ становится ещё более очевидным, когда в высотном распределении $T(h)$ имеет место приземная инверсия температуры или значительное отличие градиента температуры от влажно-адиабатического значения $7,5$ К/км. Отметим, что именно такие профили $T(h)$ с высокой точностью восстанавливаются по данным радиометрических измерений на частоте ν_3 . Так, например, при наличии приземной инверсии $T(h)$ с величиной $\Delta T = 5$ К на высоте $h \approx 0,5$ км (типичная летняя инверсия) ошибка радиометрического определения $T_{ср}$ составляет $-1,8$ К (ошибка определения «влажной» тропосферной задержки $+1$ мм), в то время как ошибка регрессионного метода определения $T_{ср}$ по формуле (7) равна $-5,8$ К (ошибка определения «влажной» тропосферной задержки $+3,8$ мм). В зимнее время величина приземной инверсии температуры может достигать значений $15 \div 20$ °С, при этом СКО определения «влажной» тропосферной задержки становится недопустимо высоким — более 10 мм.

Таблица 1. Технические характеристики радиометрического комплекса

Характеристики	канал 1	канал 2	канал 3
Рабочая частота, ГГц	20,75	32,0	56,7
Полоса пропускания, МГц	500	500	400
Эквивалентная шумовая температура, К	130	290	380
Флуктуационная чувствительность, К	0,05	0,06	0,08
Максимальная нестабильность коэффициента усиления, % (не более)	0,03	0,06	0,5
Погрешность измерения яркостной температуры, К	0,5	0,6	0,1
Ширина диаграммы направленности, градусы	6	6	2

2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА

Радиометрический аппаратно-программный комплекс разработан в ИПА РАН и предназначен для оперативного определения тропосферной задержки радиосигнала. В состав комплекса входят:

1) Двухканальный радиометр водяного пара, работающий на частотах $\nu_1 = 20,7$ ГГц и $\nu_2 = 32$ ГГц [17] и осуществляющий в реальном времени с шагом 10 с измерения интегрального содержания парообразной Q и жидкой W воды в атмосфере.

2) Работающий на частоте $\nu_3 = 56,7$ ГГц радиометр, с помощью которого каждые 5 мин определяется высотный профиль температуры тропосферы $T(h)$ и среднее по абсолютной влажности значение температуры тропосферы $T_{\text{ср}}$. Радиометр разработан на базе микроволнового температурного профилемера МТП-5 [18] и имеет модифицированное программное обеспечение.

3) Метеостанция МК-15 для определения приземных значений метеопараметров [19].

Радиометрические каналы комплекса выполнены по схеме модуляционного приёмника (радиометра) с малощумящими усилителями высокой частоты на входе. Радиометрический комплекс отличается высокой чувствительностью и долговременной стабильностью параметров. Наличие внутренних термостатируемых генераторов шума на основе волноводных согласованных нагрузок с разностью температур 25°C позволяет осуществлять непрерывную коррекцию дрейфа коэффициента передачи каналов радиометра водяного пара. Калибровка радиометрических данных и перевод их в шкалу абсолютных яркостных температур осуществляется методом атмосферных «разрезов» в диапазоне зенитных углов $\theta = 0^\circ \div 70^\circ$ [20, 21]. Калибровка радиометра водяного пара «разрезом» проводится только при ясной атмосфере. Опытная эксплуатация комплекса на интервале времени более года показала, что калибровочные константы для радиометра водяного пара остаются неизменными.

Калибровка радиометра на основе МТП-5 осуществляется по двум источникам радиоизлучения. Периодически измеряется яркостная температура излучения в направлении на горизонт с одновременной регистрацией наружной температуры. Яркостная температура горизонта на рабочей частоте профилемера равна термодинамической температуре окружающего воздуха на высоте расположения комплекса [14]. Другим источником калибровочного сигнала служит радиоизлучение согласованной нагрузки при температуре термостатирования сверхвысокочастотного (СВЧ) блока 40°C . Технические характеристики радиометрического комплекса приведены в табл. 1.

Тестирование комплекса осуществлялось сравнением радиометрических данных об интегральном влагосодержании Q и профилей температуры $T(h)$ с данными синхронного аэрологического

зондирования атмосферы. Такое сравнение проводилось на протяжении 2015 года в г. Долгопрудный Московской области на территории станции аэрологического зондирования «Центральная аэрологическая обсерватория». Результаты сравнения показали, что средняя разность значений влагосодержания, определённого на основе радиометрических и радиозондовых данных, не превосходила $0,05 \text{ г/см}^2$. При восстановлении профиля температуры в интервале высот $0 \div 1,3 \text{ км}$ СКО составило $0,2 \div 1,2^\circ\text{C}$, а на высотах 2; 5 и 10 км — 2,1; 2,6 и $3,1^\circ\text{C}$ соответственно.

Полученные характеристики определения Q и $T(h)$ соответствуют теоретическим оценкам и в пересчёте на величину задержки по формуле (5) приводят к ошибке около 3 мм.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Применение радиометрического метода определения тропосферной задержки радиосигнала, обусловленной водяным паром, и тестирование радиометрического комплекса проводились в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО»: «Бадары» (республика Бурятия) и «Зеленчукская» (Карачаево-Черкесская республика). Радиометрический комплекс обеспечивал в реальном времени получение данных о параметрах тропосферы и расчёт «влажной» тропосферной задержки. Ряды значений задержки сравнивались с данными о тропосферной задержке, полученными по результатам обработки сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Расчёт полной зенитной тропосферной задержки проводился в ИПА РАН с задержкой выдачи результата 24 час. Точность расчёта задержки оценивалась по аналогичным данным международной службы ГНСС [22]. Согласно [22] погрешность определения задержки для финального решения, публикуемого с задержкой три недели, составляет 4 мм.

Результаты анализа разности рядов задержек, полученных на интервале времени один год, показали, что погрешность радиометрического определения тропосферной задержки в среднем составляет около 4 мм и может изменяться в зависимости от сезона в пределах $2 \div 6 \text{ мм}$.

На рис. 1 и 2 на панелях *a* представлены типичные примеры результатов измерений «влажной» тропосферной задержки радиометрическим методом (сплошная линия) и по данным ГНСС (штриховая линия) в зенитном направлении. Разность полученных значений представлена на панелях *b*. Средняя величина разности (смещения) радиометрических значений задержки и значений, полученных по данным ГНСС, для летнего периода (см. рис. 1) составила 1,1 мм, при этом СКО = 4,1 мм. Для зимнего периода (см. рис. 2) средняя величина разности составила 1,7 мм, СКО = 2,7 мм.

Результаты измерений задержки характеризуются высокой внутренней сходимостью. Радиометрические данные более сглаженные, чем данные ГНСС. Избыточные, по сравнению с радиометрическими, флуктуации задержки, полученной по данным ГНСС, связаны с тем, что навигационный сигнал спутников приходит с различных направлений в пределах видимой полусферы. При этом навигационный сигнал проходит в тропосфере путь с длиной $l = H_T / \cos \theta$, который значительно больше радиометрического пути $l = H_T$, т. к. радиометрический угол наблюдения $\theta = 0$. Соответственно, навигационный сигнал пересекает большее число тропосферных неоднородностей концентрации водяного пара и жидкой воды, чем радиометрический сигнал. Ветровой перенос этих неоднородностей через линию визирования и обуславливает флуктуации задержки. Вследствие указанных обстоятельств частота появления флуктуаций в навигационном сигнале будет выше. Это приводит к некоторому увеличению дисперсии величины разности радиометрических значений задержки и значений, полученных по данным ГНСС. Для рассматриваемых рядов задержки такое увеличение СКО составляет 1,6 мм.

Исследования влияния приземных инверсий температуры на величину «влажной» тропосферной задержки проводились в зимний период 2016 года в обсерватории «Бадары». На рис. 3 пред-

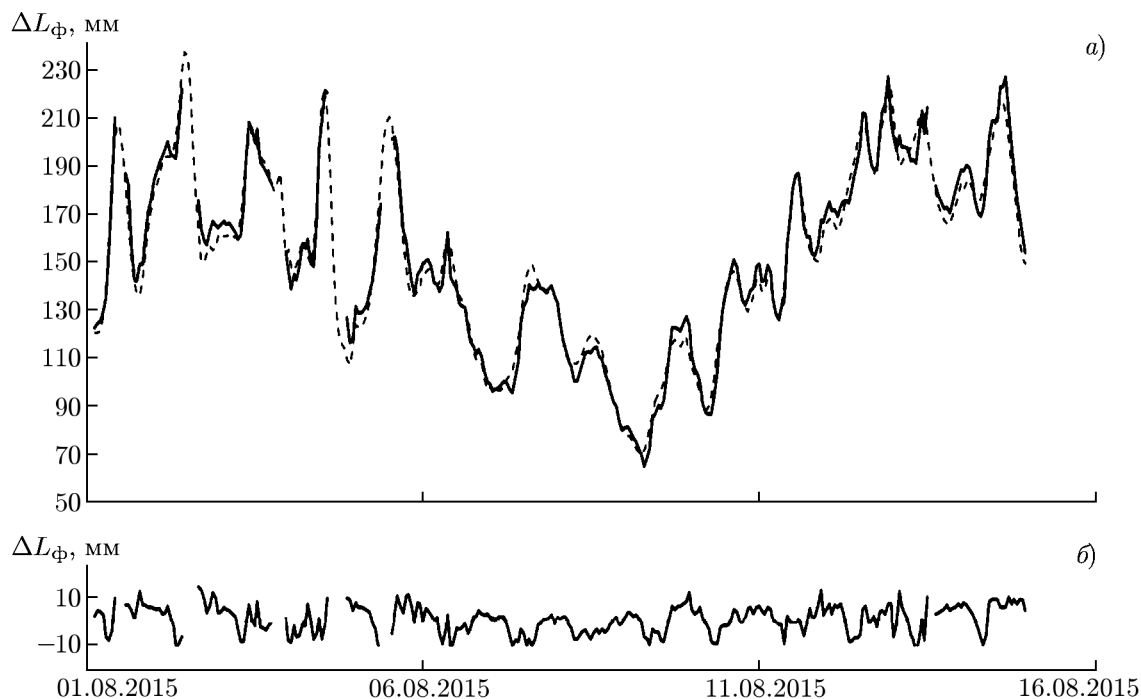


Рис. 1. Ряды значений тропосферной задержки радиосигнала. Обсерватория «Зеленчукская», лето 2015 года

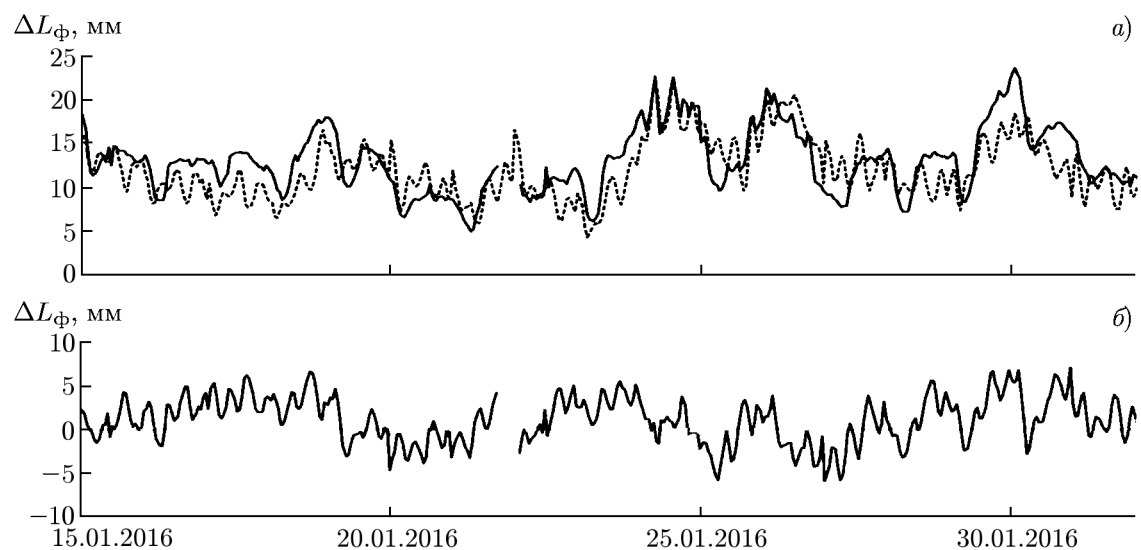


Рис. 2. Ряды значений тропосферной задержки радиосигнала. Обсерватория «Бадары», зима 2016 года

ставлен пример сравнения задержек, измеренных тремя способами: радиометрическим комплексом на частотах ν_1 , ν_2 и ν_3 с определением температуры T_{cp} по радиометрическим измерениям (6) (сплошная линия); радиометром водяного пара на частотах ν_1 и ν_2 с определением T_{cp} по регрессионному соотношению (7) (пунктирная линия); по данным ГНСС (штриховая линия). В рассматриваемой ситуации температурная стратификация имеет ярко выраженный инверсионный характер: приземная инверсия температуры $\Delta T \approx 7^\circ\text{C}$ на высоте $h \approx 0,9$ км на временном

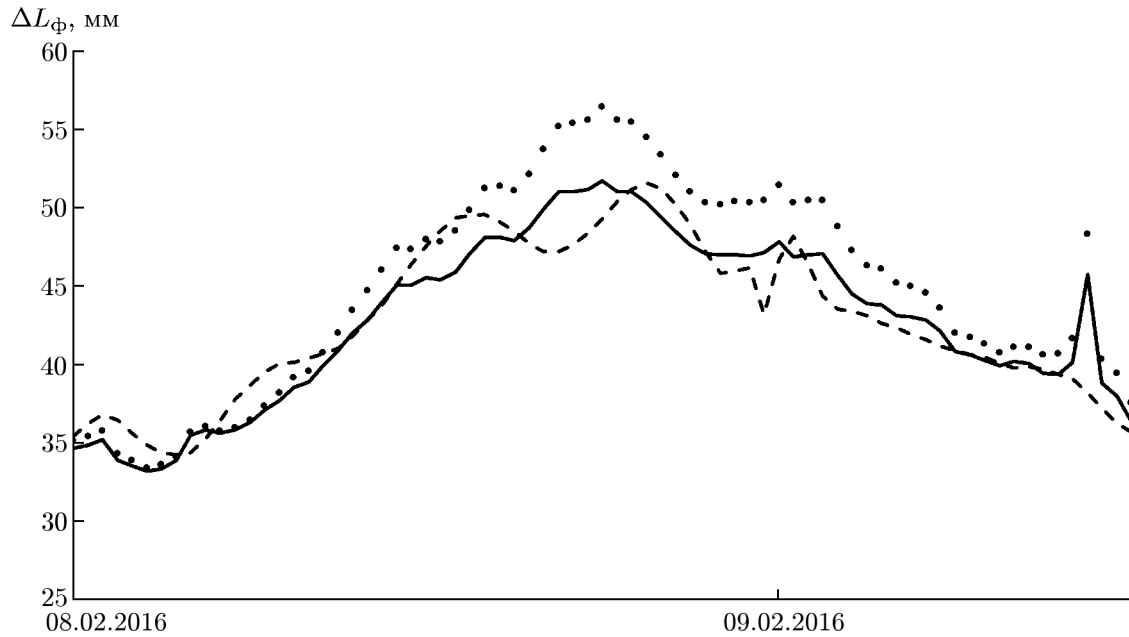


Рис. 3. Ряды значений тропосферной задержки радиосигнала при наличии температурной инверсии. Обсерватория «Бадары», зима 2016 года

интервале 14 час. Результаты сравнения свидетельствуют о том, что при наличии инверсии температуры систематическая ошибка определения задержки только радиометром водяного пара достигает примерно 6 мм, в то время как результаты измерения радиометрическим комплексом и по данным ГНСС практически совпадают (с точностью до флуктуаций).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны метод и алгоритм определения компоненты тропосферной задержки радиосигнала, обусловленной водяным паром, на основе измеряемой интенсивности теплового микроволнового излучения атмосферы. На основе указанного алгоритма разработан радиометрический комплекс и получены результаты для частот излучения $\nu_1 = 20,7$ ГГц; $\nu_2 = 32$ ГГц и $\nu_3 = 56,7$ ГГц.

Разработанный метод позволяет определять тропосферную задержку в реальном времени, практически при любых метеорологических условиях (кроме дождя) и при любых стратификациях метеопараметров тропосферы. Применение канала термического зондирования тропосферы на частоте $\nu_3 = 56,7$ ГГц позволило существенно (на $5 \div 10$ мм) повысить точность определения тропосферной задержки при наличии в стратификации приземных инверсий температуры и отклонений градиента температуры от влажноадиабатического.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бин Б. Р., Даттон Е. Дж. Радиометеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 363 с.
2. Колосов М. А., Шабельников Л. В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. М.: Советское радио, 1976. 220 с.
3. Saastamoinen J. // The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophys. Monogr. Ser. Vol. 15. American Geophysical Union: Washington, DC. 1972. P.247.

4. Hopfield H. S. // J. Geophys. Res. 1969. V. 74, No. 18. P. 4487.
5. Наумов А. П., Зиничева М. Б. // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25. С. 919.
6. Алёшин В. И., Наумов А. П., Плечков В. М., Троицкий А. В. // Тез. докл. XI Всес. конф. по распространению радиоволн, г. Горький 1975. Ч. 1. С. 103.
7. Волохов С. А., Кузнецова М. Г., Рассадковский В. А., Троицкий А. В. // Тез. Всес. конф. по рефракции электромагнитных волн в атмосфере, г. Томск, 1983. С. 244.
8. <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.453/en>.
9. Кузнецова М. Г., Рассадковский В. А., Троицкий А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1979. Т. 22, № 8. С. 938.
10. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 188 с.
11. Rosenkranz P. W. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 1988. V. 39, No. 4. P. 287.
12. Катков В. Ю. // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42, № 12. С. 1441.
13. Наумов А. П., Рассадковский В. А. // Изв. АН СССР. ФАО. 1978. Т. 14, № 7. С. 716.
14. Troitsky A. V., Gaikovich K. P., Gromov V. D., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1993. V. 31, No. 1. P. 116.
15. Турчин В. Ф., Козлов В. П., Малкевич М. С. // Успехи физ. наук. 1970. Т. 102, № 3. С. 345.
16. Троицкий А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29, № 8. С. 878.
17. Быков В. Ю., Ильин Г. Н., Стэмповский В. Г., Шишикин А. М. // Труды ИПА РАН. 2013. Вып. 27. С. 210.
18. Miller E. A., Kadygrov E. N., Troitsky A. V., Shaposhnikov A. N. // Proc. Fifth World Congress "Aviation in the XXI-st century", September 25–27, 2012, Kyiv, Ukraine. V. 2. Art. no. 3.7.120.
19. <http://www.typhoon.obninsk.ru/russian/technology/mk15.htm>.
20. Кисляков А. Г. // Радиотехника и электроника. 1968. Т. 13, № 7. С. 1161.
21. Yong H., Westwater E. R. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2000. V. 38, No. 3. P. 1260.
22. www.igs.org/products.

Поступила в редакцию 31 мая 2016 г.; принята в печать 8 октября 2016 г.

DETERMINING THE TROPOSPHERIC DELAY OF A RADIO SIGNAL BY THE RADIOMETRIC METHOD

G. N. Ilyin and A. V. Troitsky

We present a method and algorithm for real-time determination of the tropospheric delay of a radio signal and the radiometric complex developed on their basis. The method is based on the measurement of the atmospheric thermal microwave radiation intensity at the frequencies $\nu_1 = 20.7$ GHz, $\nu_2 = 32$ GHz, and $\nu_3 = 56.7$ GHz and solution of the corresponding inverse problem with respect to the atmospheric parameters (temperature, pressure, humidity, and water content) which completely determine the tropospheric delay of a radio signal. The method was experimentally tested by comparing the radio-signal delay series obtained by the radiometric method and the GLONASS/GPS data. The error of determining the wet component of the radio-signal delay was about 3 mm.