

## К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЗАПАЗДЫВАНИЯ В ВОДЯНОМ ПАРЕ И ОБЛАКАХ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОЙ СВЧ РАДИОМЕТРИИ

Д.П. Егоров, Б.Г. Кутуза

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,

125009, г. Москва, Моховая, 11, корп. 7

E-mail: dobrix95@gmail.com, kutuza@cplire.ru

**Аннотация.** Обсуждаются возможности использования данных наземной СВЧ радиометрии для оценки тропосферного запаздывания сигналов в условиях облачности. Проведен сравнительный анализ некоторых методов расчета, составляющих запаздывания в водяном паре и коллоидально-устойчивых облаках, в том числе для сигналов с частотой от 10 до более 300 ГГц.

**Ключевые слова:** фазовое запаздывание; задержка сигнала; водяной пар; жидкокапельные облака; влагосодержание и водозапас; яркостная температура; тропосфера

## ON ESTIMATING VAPOR AND CLOUD-INDUCED DELAYS FROM GROUND-BASED MICROWAVE RADIOMETRY DATA

D.P. Egorov, B.G. Kutuza

**Abstract.** The possibilities of using ground-based microwave radiometry data to estimate the tropospheric phase delay of signals under cloudy atmosphere conditions are discussed. A comparative analysis of some approaches for calculating the phase delay in a colloidally stable cloud, including for signals with a frequency from 10 to more than 300 GHz, is carried out.

**Keywords:** path and phase delays; water vapor; liquid water clouds; total water vapor; liquid water content; brightness temperature; troposphere

### Введение

Надежность и качество работы современных навигационных и коммуникационных систем напрямую зависит от точности и оперативности получения ими данных о тропосферном запаздывании. Переход к стандартам связи, предполагающим использование всё более высоких частотных диапазонов, предъявляет новые требования к точности моделей оценки запаздывания сигналов для достижения приемлемых показателей помехоустойчивости. В то же время для решения современных задач навигации уже требуется точность определения задержки (запаздывания) до 3 мм в зенитном направлении, тогда как получение данных предполагается в реальном времени [1]. Корректный расчет задержек также критически важен для радиоинтерферометрических наблюдений, в особенности при сверхдлинной базе. В данной работе рассмотрено влияние различных, на первый взгляд, незначительных изменений в методике расчета составляющих запаздывания в водяном паре и жидкокапельных облаках на их результирующие значения. Показано, однако, что эти изменения могут приводить к заметным расхождениям.

### Задержка в водяном паре

Под величиной  $d$  будем понимать задержку пути в единицах длины, а под  $\varphi$  – именно фазовое запаздывание, т.е. изменение фазы сигнала в радианах. Тогда при однократном прохождении атмосферы в её приближении как слоистой среды [2, 3]

$$d \text{ [см]} = 10^{-6} \cdot \sec \theta \cdot \int_0^H N(z) dz, \quad \varphi = \frac{2\pi}{\lambda \text{ [см]}} \cdot d, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $\theta$  – угол наблюдения от направления в зенит,  $N$  – суммарный по всем составляющим приведенный коэффициент преломления,  $H$  – верхняя граница атмосферы.

Коэффициент  $N$  в предположении отсутствия осадков есть сумма приведенных коэффициентов преломления в сухом воздухе  $N_a$ , в водяном паре  $N_q$  и жидкокапельной

составляющей  $N_w$ . Соответственно,  $d = d_a + d_q + d_w$ , а  $\varphi = \varphi_a + \varphi_q + \varphi_w$ . Формулы для расчета  $N_a$  и  $N_q$  можно найти в рекомендациях МСЭ [4]. Согласно последним уточнениям составляющую  $N_q = N_q(h)$  следует аппроксимировать как

$$N_q = 72 \cdot \frac{e}{T} + 3.75 \cdot 10^5 \cdot \frac{e}{T^2}, \quad e = \frac{\rho \cdot T}{216.7}, \quad (2)$$

где  $T$  – высотный профиль температуры воздуха (К),  $\rho$  – профиль абсолютной влажности ( $\text{г}/\text{м}^3$ ), высота  $h$  опущена. Отметим, что в отечественной литературе при этом используется приближение (для  $\rho$  в  $\text{г}/\text{м}^3$  и  $T$  также в К) [5]

$$\tilde{N}_q = \frac{1720 \cdot \rho}{T}. \quad (3)$$

Для точного определения  $N_a$  и  $N_q$  необходимо получить как можно более адекватные реальному состоянию атмосферы высотные распределения температуры, давления и влажности. В связи с этим следует подчеркнуть широкие возможности СВЧ радиометрии по восстановлению температурно-влажностных профилей [6]. С другой стороны, СВЧ радиометрический метод также позволяет довольно точно оценить текущие влагосодержание  $Q$  и водозапас  $W$  [7]. Если по какой-либо причине не удается восстановить влажностный профиль  $\rho = \rho(h)$ , но известна приповерхностная величина абсолютной влажности  $\rho_0$  ( $\text{г}/\text{м}^3$ ), то на практике хорошим приближением является [1]

$$\rho(h) = \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{\rho_0}{10 \cdot Q} \cdot h\right), \quad (4)$$

где  $h$  – высота в км, а  $Q$  – влагосодержание в  $\text{г}/\text{см}^2$ .

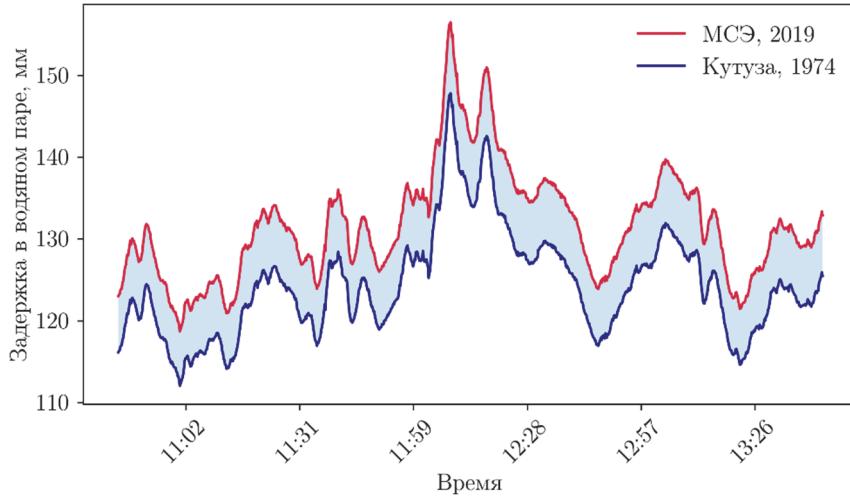


Рис. 1. Временной ход задержки в водяном паре (мм), рассчитанной согласно рекомендации МСЭ [4] и с использованием приближения [5]

На рис. 1 показан типовой для летнего периода пример временного хода составляющей задержки  $d_q$  в водяном паре. Временной ход восстановлен по данным о яркостных температурах, измеренных наземным СВЧ радиометром-спектром К-диапазона «P22М» [2] (сеанс от 09 июля 2019 г., 10:45–13:45 UTC+3, ясное небо сменяется облаками Cu med). Значения влагосодержания  $Q$  за указанный временной интервал, полученные как решение соответствующей обратной задачи [7], используются для оценки высотного профиля влажности по формуле (4). Температурный профиль  $T(h)$  рассчитывается в соответствии с моделью стандартной атмосферы. Приповерхностные температура  $T_0 = T(0)$  и влажность  $\rho_0$  регистрируются на близлежащей метеостанции. Красная кривая на рис. 1 отражает результат расчета задержки  $d_q$  с учетом подстановки (4) и температурного профиля в (2). Синяя кривая – с учетом подстановки

(4) и  $T(h)$  в (3). Невязка в значениях задержек, полученных этими двумя способами, варьируется здесь от 6.7 до 8.7 мм.

### Запаздывание в жидкокапельном облаке

Приведенный коэффициент преломления  $N_w$  в слое из облачных частиц пропорционален водности  $w$  (г/м<sup>3</sup>) данного слоя, т.е. количеству содержащейся в нем жидкокапельной влаги [3, 5]. Таким образом,

$$N_w(h) = k'_w \cdot w(h), \quad (5)$$

где  $k'_w$  – коэффициент пропорциональности, который зависит от температуры  $T$  слоя с высотой  $h$ , а также от длины волны  $\lambda$ , т.е.  $k'_w = k'_w(h) = k'_w(\lambda, T(h))$ . В общем случае [5]

$$k'_w(\lambda, T) = \frac{3}{2} \cdot \text{Re}(\alpha'), \quad \alpha' = \frac{\varepsilon(\lambda, T) - 1}{\varepsilon(\lambda, T) + 2}. \quad (6)$$

Здесь  $\alpha'$  – объемная поляризуемость сферической частицы (приведенная), а  $\varepsilon$  – комплексная диэлектрическая проницаемость воды, которую для выбранной длины волны  $\lambda$  при заданной температуре  $T$  можно найти с использованием «одномерной» (I) или же «двумерной» (II) моделей Дебая [2].

В области сравнительно низких частот,  $\nu < 10$  ГГц, упомянутые зависимости проявляются настолько слабо, что коэффициент  $k'_w$  можно считать постоянным и равным  $\sim 1.446$  м<sup>3</sup>/г [3]. Это происходит потому, что в электростатическом ( $\lambda \rightarrow \infty$ ) пределе  $\varepsilon$  вырождается в постоянную статическую диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_s \approx 81$ . Однако для частот  $\nu > 10$  ГГц такое упрощение представляется чрезмерным.

Радиометрическое восстановление профиля водности связано с большими трудностями, чем восстановление высотного распределения влажности  $\rho(h)$ . Тем не менее, как и с влажностью, профиль водности  $w(h)$  тоже может быть аппроксимирован по известной величине интегрального водозапаса  $W$ , см. [2, 8]. В свою очередь, по теореме о среднем

$$\int_0^H k'_w(\lambda, T(h)) \cdot w(h) dh \approx k'_w(\lambda, T(h^*)) \cdot \int_0^H w(h) dh = k'_w(\lambda, t_w) \cdot W, \quad (7)$$

где  $t_w = T(h^*)$  – эффективная температура облака [9].

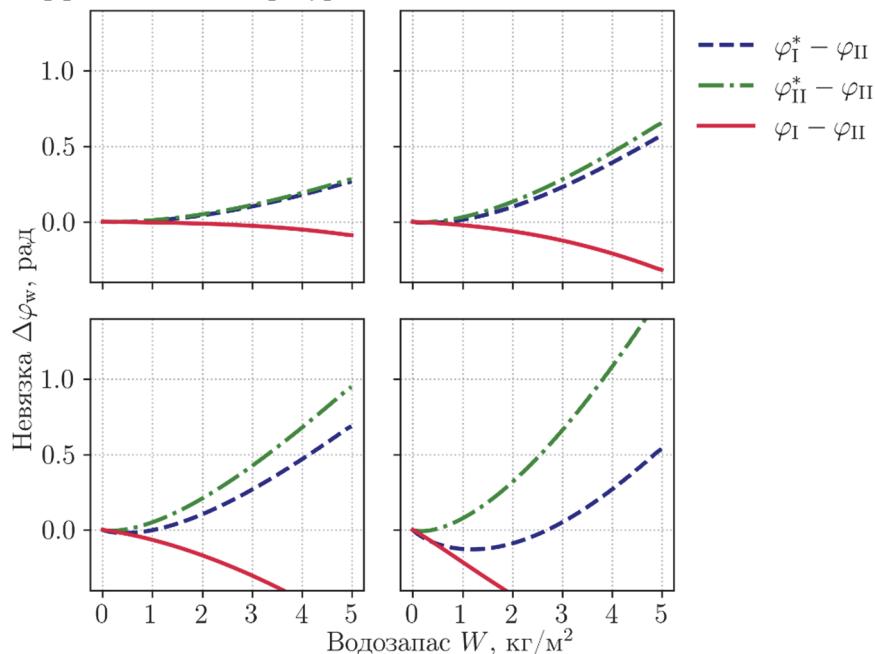


Рис. 2. Невязки в значениях жидкокапельной составляющей фазового запаздывания, рассчитанной с использованием различных подходов

В предположении, что температурный профиль соответствует модели стандартной атмосферы при  $T_0 = 15^\circ C$ , вычислим распределение  $k'_w(h)$  в (6) для набора частот 36, 60, 89 и 183 ГГц в двух вариантах – с использованием как (I) «одномерной», так и (II) «двумерной» моделей Дебая. Для заданного водозапаса  $W$  от 0 до 5 кг/м<sup>2</sup> промоделируем профили водности  $w(h)$  согласно [2] и произведем расчет жидкокапельной составляющей фазового запаздывания в этих двух вариантах (I и II), интегрируя (5) по высоте  $h$  от нуля до  $H = 50$  км. Полученные величины обозначим как  $\varphi_I$  и  $\varphi_{II}$ . Следуя приближению (7), упростим вычисления, считая температуру  $t_w$  постоянной и равной  $0^\circ C$ , что соответствует облачности со средней вертикальной протяженностью. Также произведем расчет фазового запаздывания в двух вариантах (I и II) и получим  $\varphi_I^*$  и  $\varphi_{II}^*$ , соответственно. На рис. 2 в зависимости от величины водозапаса  $W$  представлены невязки  $\varphi_I^* - \varphi_{II}$  (синяя кривая),  $\varphi_{II}^* - \varphi_{II}$  (зеленая кривая) и  $\varphi_I - \varphi_{II}$  (красная кривая).

### Заключение

Составляющая задержки в водяном паре, рассчитанная согласно рекомендации МСЭ [4], систематически превышает на 4–6% величину задержки, вычисленную с использованием приближения из [5]. При сравнительно низких частотах (до 10 ГГц) рассмотренные изменения в методике расчета жидкокапельной составляющей фазового запаздывания практически не влияют на её результирующие значения. Однако при увеличении частоты эти изменения постепенно проявляются и выражены тем больше, чем выше уровень водозапаса.

### Список литературы

1. Ильин Г.Н., Троицкий А.В. Определение тропосферной задержки радиосигнала радиометрическим методом // Известия вузов. Радиофизика. – 2017. – Т. LX, № 4. – С. 326–335.
2. Egorov D.P., Kutuza B.G. Vapor and Cloud Induced Phase Delays Estimated from GroundBased Microwave Radiometer-Spectrometer Data // IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC). – 2024. – Р. 16–20.
3. Solheim F.S., Vivekanandan J. Propagation delays induced in GPS signals by dry air, water vapor, hydrometeors, and other particulates // Journal of Geophysical Research. – 1999. – Vol. 104. – No. D8. – Р. 9663–9670.
4. The radio refractive index: its formula and refractivity data, Recommendation ITU-R P.453-14. – 2019. – URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.453-14-201908-I/en>
5. Кутуза Б.Г. Фазовое запаздывание радиоволн в неоднородной атмосфере // Радиотехника и электроника. – 1974. – Т. XIX. – С. 665–670.
6. Savorskiy V.P. et al. Enhancing the efficiency of the reconstruction of the temperature and humidity profiles of the cloud atmosphere by the data of satellite microwave spectrometers // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2020. – Vol. 65, no. 7. – Р. 792–799.
7. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. О двух подходах к определению влаго- и водозапаса атмосферы // Армандовские чтения, г. Муром. – 2024. – С. 257–265.
8. Войт Ф.Л., Мазин И.П. Водность кучевых облаков // Известия Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана. – 1972. – Т. 8. – № 11. – С. 1166–1176.
9. Аквилонова А.Б., Кутуза Б.Г. Радиотепловое излучение облаков // Радиотехника и электроника. – 1978. – Т. 23. – № 9. – С. 1792–1806.