

Применение метода микроволновой радиометрии для контроля «влажной» компоненты задержки радиосигналов в тропосфере

Д. М. Караваев, Г. Г. Щукин

ВКА имени А. Ф. Можайского; 197082, С-Петербург, Ждановская, 13; dm.karavaev@mail.ru

Метод микроволновой радиометрии применен для контроля задержки и ослабления радиосигналов в тропосфере. Представлены некоторые результаты экспериментальных исследований вариаций «влажной» компоненты задержки и полного ослабления радиоволн в атмосфере на основе данных микроволнового радиометра, работающего вблизи линии водяного пара (22ГГц и 36ГГц). Получены предварительные статистические оценки «влажной» компоненты задержки радиосигналов в атмосфере для различных сезонов года Северо-Западного региона РФ.

Experimental studies of variations of «wet» delay and total zenith attenuation of radio waves in the atmosphere based on data, derived from the microwave radiometer (22GHz and 36GHz). Statistical estimates of the "wet" components of the delay of radio signals in the atmosphere for different seasons of the North-West region of Russia are obtained.

Радиосигналы радиотехнических систем при распространении в атмосфере земли испытывают ослабление и задержку за счет влияния газов атмосферы, облаков и осадков, аэрозолей и других возможных компонентов. При повышении требований к точности координатных измерений возникает проблема учета эффектов распространения радиоволн в тропосфере земли радиосигналов космических навигационных систем. Для ряда задач радиоастрономии, и др. наиболее важным аспектом задачи является коррекция быстрых изменений задержки и ослабления радиосигналов в тропосфере земли. Известно, что одним из методов оперативного контроля задержки и ослабления радиосигналов в атмосфере является метод микроволновой радиометрии. Этот метод получил развитие в начале 60-х годов [1] и нашел применение в метеорологии для определения профилей температуры и влагосодержания атмосферы [2]. Метод микроволновой радиометрии позволяет оперативно контролировать наиболее изменчивую «влажную» компоненту задержки сигналов в атмосфере, что важно для разработки методов коррекции влияния атмосферы на радиоастрономические наблюдения РСБН-сети. В работе приводятся некоторые результаты экспериментальных исследований задержки радиосигналов и ослабления атмосферы с помощью средств и метода микроволновой радиометрии.

Исходные положения

Радиохарактеристики атмосферы, определяющие условия распространения радиосигналов в тропосфере определяются коэффициентом преломления воздуха или комплексной диэлектрической проницаемостью воздуха. При этом ослабление в атмосфере зависит от мнимой части коэффициента преломления, а задержка определяется вещественной частью коэффициента преломления среды распространения. Задержка радиосигнала в единицах длины в зенитном направлении определяется как [5,7,8]:

$$L_{atm}(90) = \int_0^{\infty} [n(z) - 1] dz = \int 10^{-6} N(z) dz, \quad (1)$$

где: $n(z)$ - коэффициент преломления атмосферного воздуха на высоте z ; $N(z)$ - индекс рефракции. В случае облачной атмосферы индекс рефракции определяется вкладом гидростатической, «влажной» компонентами, а также вкладом гидрометеоров, а задержка радиосигналов в зените находится из соотношения:

$$L_{atm}(90) = \int \left[K_1 \frac{p_d(z)}{T(z)} + K_2 \frac{e(z)}{T(z)} + K_3 \frac{e(z)}{T^2(z)} + K_4 w(z) \right] dz, \quad (2)$$

где: $e(z)$ - парциальное давление водяного пара; $p_d(z)$ - давление сухого воздуха; $T(z)$ - абсолютная температура воздуха; $w(z)$ - водность облака; K_i - коэффициенты, полученные в лабораторных исследованиях [5,7,8].

Полное ослабление в тропосфере (в зенитном направлении) определяется суммой различных компонент [2]: поглощения в атмосферных газах (водяном паре, кислороде) и ослабления в жидкокапельных облаках и осадках:

$$\gamma(f, 90) = k_\gamma \int [\alpha_{wv}^n(f, z) + \alpha_{ox}^n(f, z) + \alpha_{cl}^o(f, z) + \alpha_r^o(f, z)] dz, \quad (3)$$

где: α_{wv}^n - коэффициент поглощения в водяном паре атмосферы; α_{ox}^n - коэффициент поглощения в кислороде; α_{cl}^o - коэффициент ослабления в облаках; α_r^o - коэффициент ослабления в осадках; k_γ - коэффициент, равный 4.343. Для определения поглощения и ослабления по известным профилям метеопараметров в атмосфере [2].

Полное ослабление атмосферы в зенитном направлении $\gamma(f, \theta)$ в [дБ] может быть определено из результатов измерений радиояркостной температуры атмосферы $T_b(f, \theta)$, как это следует из уравнения переноса радиотеплового излучения, используя следующее соотношение [2]:

$$\gamma(f, \theta) = k_\gamma \ln \left[(T_{ef}(f, \theta) - T_s)(T_{ef}(f, \theta) - T_b(f, \theta))^{-1} \right], \quad (4)$$

где: T_s - космическое излучение, 2.75К; T_{ef} - эффективная температура атмосферы.

Погрешность оценки интегрального ослабления при абсолютных измерениях радиояркостных температур определяется погрешностью измерения радиояркостной температуры, погрешностью оценки эффективной температуры атмосферы и составляет около 5% (для атмосферы, содержащей слоистообразные облака) и достигает 15...20% (для атмосферы, содержащей конвективные облака или осадки).

Использование микроволновых радиометров позволяет определять профили температуры и влажности в атмосфере, влагозапас атмосферы [2], следовательно, определять профиль индекса рефракции и задержку радиосигналов в тропосфере. Используя статистику аэрологических данных для конкретного географического места можно получить простое соотношение для оценки задержки сигналов в тропосфере земли на основе измерений влагозапаса атмосферы и приземного давления, которое имеет вид:

$$L_{atm}(90) = b_0 + b_1 P_0 + b_2 Q + b_3 W, \quad (5)$$

где: b_i - коэффициенты регрессии, получаемые на основе статистического ансамбля; P_0 - приземное давление из стандартных метеорологических измерений у земли; Q - влагозапас атмосферы; W - водозапас облаков, полученные из результатов радиометрических измерений характеристик радиотеплового излучения атмосферы.

Основное внимание в работе уделяется исследованиям «влажной» компоненты задержки L_q , которая является наиболее изменчивой компонентой. Причем L_q возможно эффективно определять с помощью двухчастотного радиометра (центральные частоты 21ГГц и 36ГГц). В соответствии с этим методом, «влажная» компонента задержки (в случае облачной атмосферы без осадков) может быть определена из соотношения, связывающего влажную компоненту задержки с результатами измерений характеристик нисходящего радиотеплового излучения атмосферы на выбранных частотах:

$$L_q = a_0 + a_1 \tau(f_1) + a_2 \tau(f_2), \quad (6)$$

где: $\tau(f)$ - оптическая толщина атмосферы на частоте f ; a_i - коэффициенты регрессии (часто используются их среднеклиматические значения, полученные по данным аэрологического зондирования атмосферы и моделям облачной атмосферы).

Результаты эксперимента

Экспериментальные исследования нисходящего радиотеплового излучения атмосферы проводились в течении ряда лет с применением наземного двухчастотного радиометра, работающего на частотах 21 ГГц и 36,5 ГГц [6]. Эти эксперименты проводились в различных регионах, как над океаном, так и над сушей. Одной из задач экспериментов являлось исследование временной изменчивости полного поглощения в атмосфере, влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков и «влажной» компоненты задержки радиосигналов в различных регионах при различных метеоусловиях. В качестве примера, на рис.1 приведен временной ход «влажной» компоненты задержки зените для теплого и холодного периодов года в Ленинградской области. Как следует из экспериментов, L_q как правило, составляла не более 30 см.

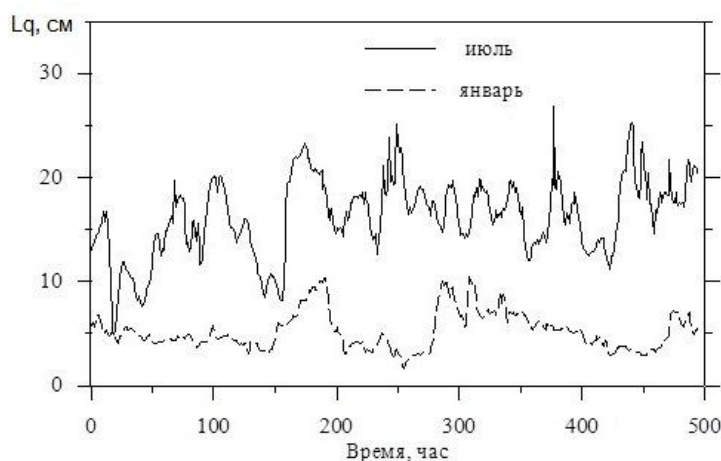


Рис.1. Временная изменчивость «влажной» компоненты задержки в зените.

Таблица 1. Средние значения «влажной» компоненты задержки (в зените) в атмосфере и их СКО для различных сезонов года.

Характеристика	Апрель, (48°С,46°З)	Июль, (60°С,31°В)	Октябрь, 60°С,31°В)	Январь, (60°С,31°В)
L_q , см	11.41	16.24	8.06	5.33
σ_{L_q} , см	5.52	3.71	3.24	1.98

Для исследования временных (пространственных) вариаций радиохарактеристик, связанных с флуктуациями метеопараметров атмосферы, часто используется аппарат структурных функций [3,4]. Для описания временных структурных функций «влажной» компоненты задержки сигналов в тропосфере в широком диапазоне пространственно-временных масштабов может быть использована модель, обсуждаемая в [9]. Выявлены регулярный сезонный ход «влажной» компоненты задержки и синоптически-обусловленная составляющая в изменениях L_q . В таблице 1. представлены средние значения и средние квадратические отклонения «влажной» составляющей задержки для января, октября и июля (Ленинградская область) и апреля (Северная Атлантика). Эти данные отражают сезонную изменчивость «влажной» компоненты задержки в атмосфере в зените. Как показали эксперименты, значительные вариации «влажной» компоненты задержки и ослабления могут наблюдаться в области атмосферных фронтов и в период развития мощных конвективных облаков (грозы). В качестве примера на рис.2 показаны временные вариации интегрального ослабления в зенитном направлении на длинах волн 4 мм, 6 мм, 8 мм, 14 мм в области теплового фронта циклона над океаном в период с 16 по 19 апреля 1990г. Значительные вариации

ослабления более 4 дБ при длине волны 6 мм и более 6 дБ при длине волны 4 мм связаны с вариациями водозапаса облаков. Изменения «влажной» компоненты задержки при прохождении фронта составляли около 7 см/час.

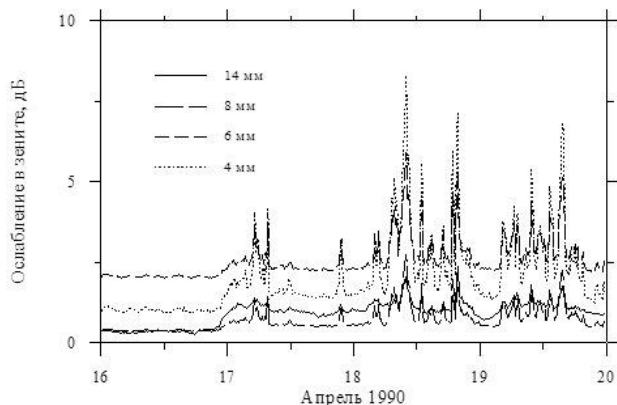


Рис.2. Временная изменчивость ослабления в зените на различных длинах волн в области атмосферного фронта.

В качестве примера на рис.3 приводится пример временной изменчивости «влажной» компоненты задержки в области мощного грозового фронта, наблюдаемого в Ленинградской области 14 июля 2008г.

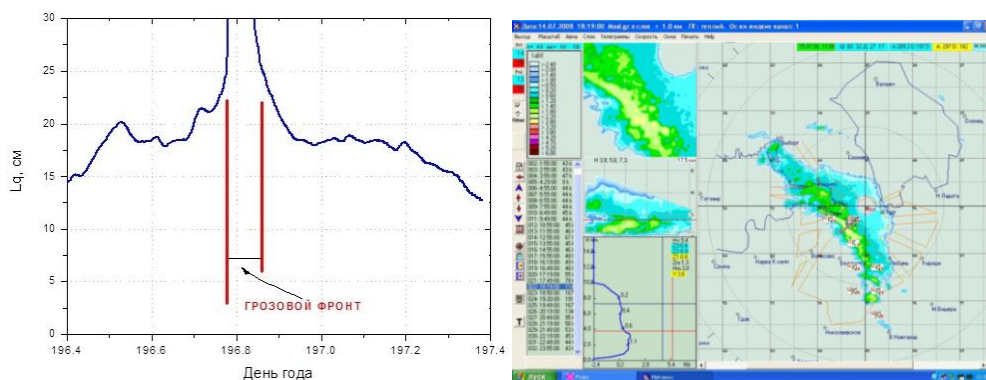


Рис.3. Временная изменчивость «влажной» компоненты задержки в области мощного грозового фронта (слева); карта радиолокационной отражаемости МРЛ-5 (справа).

Сравнительные эксперименты показывают удовлетворительное согласие радиометрических измерений «влажной» составляющей задержки в зените с данными аэрологического зондирования, СКО (радиометр-радиозонд) не превышают 13 мм.

В качестве примера на рис. 4 приводятся интегральные функции распределения ослабления в зените на длинах волн 8 мм и 14 мм для Северной Атлантики. Как видно из рисунка ослабление в атмосфере в зенитном направлении не превышало уровня 9 дБ при длине волны 8 мм и уровня 5...6 дБ при длине волны 14 мм с вероятностью 99.9%.

Перспективные направления дальнейших исследований связаны с внедрением технологии наукастинга и сверхкраткосрочного прогноза условий распространения радиоволн в атмосфере на основе применения численных схем мезомасштабного прогноза и алгоритмов усвоения разнородной метеорологической информации

(спутниковой информации, метеорологических радиолокаторов, микроволновых радиометров, сетевых метеорологических станций).

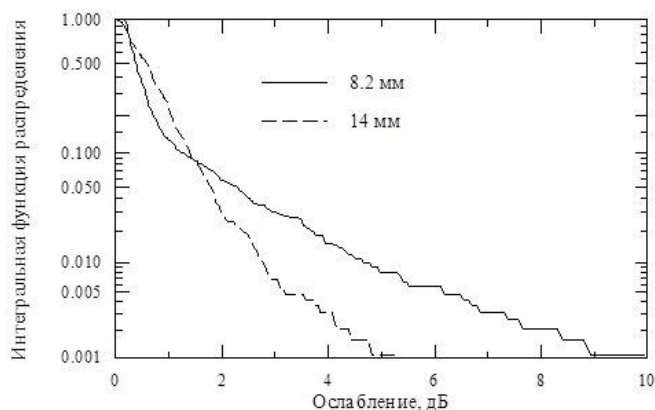


Рис.4. Интегральные функции распределения ослабления в зените.

Заключение

Продемонстрированы возможности метода микроволновой радиометрии для решения задачи оперативного контроля полного ослабления и наиболее изменчивой «влажной» компоненты задержки радиосигналов в тропосфере земли. Выявлены аномальные изменения радиохарактеристик атмосферы в области атмосферных фронтов и в период развития мощных конвективных (грозовых) облаков. Получены статистические оценки задержки радиосигналов в различные сезоны для Ленинградской области.

Литература

1. Рабинович Ю. И., Щукин Г. Г. Определение водяного пара в атмосфере по измерениям радиотеплового излучения // Труды ГГО. 1968. Вып. 222. С. 62-73.
2. Степаненко В. Д., Щукин Г. Г., Бобылев Л. П., Матросов С. Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 287 С.
3. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.:Наука.1967. 548 С.
4. Кутуза Б.Г. Особенности флуктуаций микроволнового излучения атмосферы. // Успехи современной радиоэлектроники. №1.2003, С.36-43.
5. Алексеев В.А., Гайкович К.П., Наумов А.П. – В сб.: Тезисы докладов 13 Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. Ч.2.-М.:Наука, 1981, С.80.
6. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Применение методов СВЧ-радиометрии для диагноза содержания жидкокапельной влаги в облаках // Труды НИЦ ДЗА, "Прикладная метеорология", 2004.вып.5 (553). С. 99-120.
7. Bevis M., Besinger St., Herring Th. GPS-meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global position system. Journal of Geophysical Research. 1992.Vol.97.№ D14.PP.-15787-15801.
8. Elgered G. Tropospheric radio-path delay from ground-based microwave radiometry," in Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry, M. Janssen, Ed. New York: Wiley, 1993, pp. 215–258.
9. Stotskii A.A. Path length fluktuations through the Earth troposphere: turbulent model and data of observations. Proceeding of the symposium Refractions of transatmospheric signals in geodesy. Niderlands. 1992, PP.179-182.