

УДК 535.36, 621.396.11

ЛАБОРАТОРНАЯ МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ МИКРОВОЛНОВОГО ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СУХОГО СНЕЖНОГО ПОКРОВА

В. А. Голунов

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН, 141120, Московская область, Фрязино, пл. академика Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 10 октября 2018 г.

Аннотация. Развивается известная методика лабораторного измерения полных коэффициентов отражения, пропускания и коэффициента пропускания когерентной интенсивности образцов сухого снежного покрова в комнатных условиях. Основное отличие от известной методики состоит в том, что разработаны алгоритмы измерений и вычисления перечисленных выше коэффициентов, позволяющие корректно учесть разность термодинамических температур снега и комнаты. Алгоритм измерений дополнен операцией фиксации уровня выходного сигнала радиометров, соответствующего интенсивности теплового излучения черного тела, термодинамическая температура которого равна термодинамической температуре исследуемого образца снега. Кроме этого черного тела при калибровочных операциях используются еще три черных тела, два из которых охлаждаются жидким азотом, а термодинамическая температура третьего равна термодинамической температуре комнаты.

Методика реализуется с помощью стендовой установки с искусственной «холодной» тепловой подсветкой образцов снега. В качестве антенны радиометров используется тефлоновая линза диаметром 0.2м с фокусным расстоянием 0.4м. Образцы снега помещаются в металлические цилиндрические контейнеры с внешней боковой теплоизоляционной оболочкой. Уровень интенсивности подсветки определяется с помощью металлического эталона с широкой индикатрисой рассеяния.

Показано, что предложенная методика основана на относительных измерениях, т.е. без традиционной необходимости измерения абсолютных значений радиояркостных температур эталонов и исследуемых образцов.

Ключевые слова: микроволновое тепловое излучение, сухой снежный покров, методика измерений, коэффициент отражения, коэффициент пропускания, когерентная интенсивность.

Abstract. A well-known technique for measuring the total reflectivity, transmissivity, and coherent intensity transmittance of dry snow samples is developed for use under room conditions. The main distinction from the known technique is that new algorithms for measuring and calculating the coefficients listed above allow correctly to take into account the difference in the thermodynamic temperatures of the snow and the room.

The measurement algorithm is complemented by the operation of fixing the level of the output signal of radiometers corresponding to the intensity of the thermal radiation of a black body whose thermodynamic temperature is equal to the thermodynamic temperature of the snow sample of being examined. In calibration operations, in addition to this black body, three more black bodies are used, two of which are cooled by liquid nitrogen, and the thermodynamic temperature of the third is equal to the thermodynamic temperature of the room. Black bodies are made of a mixture of wood shavings and soot. The density of this mixture increases from the front to the back.

The method is implemented using a measuring system, the main component of which is a camera with artificial "cold" thermal illumination of snow samples. The intensity level of the illumination is determined by means of a metal reflector with a wide scattering indicatrix. The radiometer antenna is a Teflon lens 0.2 m in diameter with a focal length of 0.4 m. The snow samples are placed in metal cylindrical containers with an outer lateral thermal insulation shell.

It is shown that the proposed method is based on relative measurements, i.e. without the traditional need to measure the absolute values of the radio brightness temperatures of calibration bodies and samples.

Key words: microwave thermal radiation, dry snow cover, measurement technique, reflectivity, transmissivity, coherent intensity.

1. Введение

Экспериментальное исследование характеристик теплового излучения сухого снежного покрова в микроволновом диапазоне волн актуально в связи с разработкой алгоритмов дистанционного восстановления из космоса его влагозапаса и толщины. Необходимость создания базы экспериментальных данных указанных выше характеристик продиктована отсутствием строгой теории объемного рассеяния в слабопоглощающих плотных дискретных средах, в которых размеры частиц не существенно отличаются от длины волны.

Практическую значимость имеет обеспечение возможности измерения величин, наиболее полно характеризующих эффекты поглощения и рассеяния в исследуемой среде, а именно: полных (интегральных) коэффициентов отражения R и пропускания t , и коэффициента пропускания пространственно-когерентной интенсивности t_k .

Радиометрическое измерение только полных коэффициентов отражения и пропускания слоя снежного покрова в натуральных условиях возможно с использованием подложки из черного тела (ЧТ) и металлического листа [1,2] но затруднено из-за влияния нисходящего излучения атмосферы [1]. Известны также методы измерения коэффициента излучения покровов, основанные именно на зависимости их яркостной температуры от яркости чистой атмосферы [3,4].

Для измерения коэффициента пропускания пространственно-когерентной интенсивности в радиодиапазоне используется лишь классический метод, основанный на просвечивании исследуемой среды монохроматическим или широкополосным излучением активного генератора. Независимо от ширины полосы излучаемых частот такие источники являются пространственно-когерентными, поскольку характеризуются точечным (в пределах длины волны) фазовым центром. Известно [5], что если пространственно-когерентное излучение проходит сквозь случайный фазовый экран, то интенсивность

излучения за экраном будет являться случайной функцией пространственных координат (приемника). Следовательно, для измерения средней ослабленной интенсивности требуется выполнить определенные операции усреднения по ансамблю реализаций случайной среды. Аналогичная картина наблюдается при прохождении слоя сухого снега [6].

К настоящему времени существует единственный метод [7], позволяющий измерять все три основные величины теплового излучения рассеивающего слоя: полные коэффициенты отражения, пропускания и коэффициент пропускания пространственно-когерентного излучения. Метод включает использование искусственной тепловой «подсветки» для измерения R и тепловых источников для измерения t и t_k .

Пространственно-когерентные свойства тепловых источников всесторонне рассмотрены в классической литературе [5, 8, 9] и определяются как способность самосветящихся источников к интерференционному взаимодействию в двух точках приема, разнесенных в плоскости, перпендикулярной направлению на источник. Тепловой источник считается пространственно-когерентным, если выполняется условие:

$$\Delta\theta \ll \lambda / 2d, \quad (1)$$

где $\Delta\theta$ - угловой размер источника, d – расстояние между точками приема [5, 8, 9]. При увеличении углового размера способность излучения теплового источника к интерференционному взаимодействию ослабляется, что позволяет измерять коэффициент пропускания пространственно-когерентной интенсивности единственного образца со случайной структурой при усредняющем действии, эквивалентном усреднению по ансамблю структур.

Описанный вкратце выше метод [7] реализуется в комнатных условиях при термодинамическом равновесии исследуемых образцов и комнаты.

Цель работы – развитие этого метода для измерений коэффициента когерентного пропускания и полных коэффициентов отражения и пропускания слоя снежного покрова с термодинамической температурой, отличающейся от комнатной.

2. Радиометрический стенд комплексных измерений

Метод измерения величин R , t и t_k , описанный в [7], реализуется с помощью радиометрического измерительного стенда, схема которого показана на рис. 1.

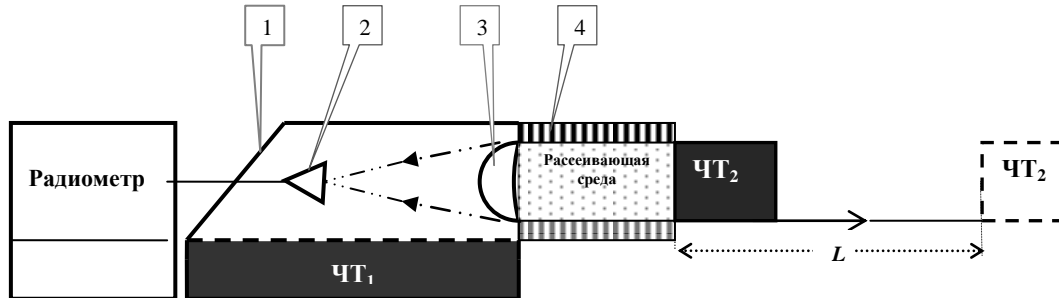


Рис.1. Схема стенда комплексных измерений: 1 – радиометрическая насадка, 2 – облучатель, 3 – линза, 4 – цилиндрическая оболочка.

Одной из основных задач, решаемых с помощью стенда, являлось обеспечение возможностей проведения необходимых радиометрических измерений внутри лабораторного помещения. Проблема таких измерений заключается в том, что внутри изотермической замкнутой полости отсутствуют какие-либо яркостные контрасты между находящимися в ней объектами, если те не имеют термодинамических контрастов. Объекты при этом могут существенно отличаться между собой диэлектрическими свойствами (например, металл, вода, черное тело). Вследствие этого в полости необходимо создать яркостную подсветку, при этом, поскольку объемно-рассеивающие среды имеют широкую индикатрису рассеяния, для корректного измерения R и t требуется обеспечить подсветку с однородным угловым яркостным спектром.

В связи с этим основным компонентом стенда является замкнутая камера подсветки, состоящая из металлической насадки, охлаждаемого жидким азотом черного тела $ЧТ_1$ в основании камеры и диэлектрической линзы на передней стенке камеры. Задняя стенка камеры наклонена относительно нормали под углом 45° . В ней имеется отверстие, через которое радиометр соединяется волноводом с рупором, фазовый центр которого совмещен с фокусом линзы.

Линза изготовлена из фторопласта. Фокусное расстояние линзы 0.4 м, диаметр – 0.2 м. В силу крайне слабой поглощательной способности фторопласта какие-либо тепловые потери в толще линзы практически отсутствуют. В связи с этим линза не только коллимирует приемный пучок, но является радиопрозрачным «окном» в камеру подсветки.

Вплотную к линзе с внешней стороны камеры устанавливается исследуемый образец, имеющий металлическую цилиндрическую оболочку, диаметр которой равен диаметру линзы. С обратной стороны образца устанавливается второе черное тело $ЧТ_2$, которое при измерениях t и t_k охлаждается жидким азотом и может перемещаться по направляющим вдоль оптической оси линзы. Это черное тело имеет форму диска с диаметром, равным диаметру линзы.

3. Основные соотношения

Яркостную температуру T частично прозрачного слоя изотермической среды в приближении Релея-Джинса можно записать в виде:

$$T = (1 - R - t)T_{сн} + RT_R^* + tT_t^*, \quad (2)$$

где $T_{сн}$ – термодинамическая температура слоя, T_R^* и T_t^* – яркостные температуры подсвечивающего излучения соответственно с одной и другой стороны образца.

Полные (интегральные) коэффициенты отражения и пропускания слоя определяются в виде [1]:

$$R(\vartheta, \phi) = \sec \vartheta \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} g(\vartheta, \phi; \vartheta_0, \phi_0) \cos \vartheta_0 \sin \vartheta_0 d\vartheta_0 \quad (3)$$

$$t(\vartheta, \phi) = \sec \vartheta \int_0^{2\pi} d\phi \int_{-\pi/2}^0 g(\vartheta, \phi; \vartheta_0, \phi_0) \cos \vartheta_0 \sin \vartheta_0 d\vartheta_0 \quad (4)$$

- $g(\Omega, \Omega_0)$ – индикатриса рассеяния, $\Omega_0 = \Omega(\vartheta_0, \phi_0)$ и $\Omega = \Omega(\vartheta, \phi)$ - направления соответственно падения и рассеяния излучения.

Яркостные температуры подсвечивающего излучения T_R^* и T_t^* определяются следующими свертками:

$$T_R^*(\Omega) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} g^*(\vartheta, \varphi; \vartheta_0, \varphi_0) T_R(\vartheta_0, \varphi_0) \cos \vartheta_0 \sin \vartheta_0 d\vartheta_0, \quad (5)$$

$$T_t^*(\Omega) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{-\pi/2}^0 g^*(\vartheta, \varphi; \vartheta_0, \varphi_0) T_t(\vartheta_0, \varphi_0) \cos \vartheta_0 \sin \vartheta_0 d\vartheta_0, \quad (6)$$

где $T_R(\vartheta_0, \varphi_0)$ и $T_t(\vartheta_0, \varphi_0)$ - угловые яркостные спектры подсвечивающего излучения, g^* - нормированная индикатриса рассеяния [1]. Поскольку измерения проводятся в комнатных условиях, то

$$T_t(\vartheta_0, \varphi_0) = T_k \quad (7)$$

Иная ситуация возникает в камере искусственной подсветки, в которой из-за влияния металлической насадки частично возникают потоки многократно отраженного излучения. Эти потоки из-за тепловых потерь при отражении от металла, температура которого существенно выше, чем охлаждаемого жидким азотом ЧТ₁, увеличивают яркостную температуру и искажают угловую структуру подсвечивающего излучения. В целях определения этой яркостной температуры используется металлический эталон с двух масштабной неровной поверхностью. Диаметр эталона равен диаметру линзы. Эталон выполнен из алюминиевой мятой фольги с выпуклостями диаметром 40...50мм. Вследствие усредняющего действия достаточно широкой индикатрисы рассеяния металлического эталона принимается, что

$$T_R(\vartheta_0, \varphi_0) = T_{мэ} \quad (8)$$

4. Методики измерений полных коэффициентов отражения и пропускания

Измерения величин R и t выполняются с использованием черных тел ЧТ₁ и ЧТ₂, охлажденных жидким азотом, т.е. их яркостная температура ~77К.

Для каждого образца снега сначала выполняются калибровочные операции, сводящиеся к последовательной фиксации эталонных яркостных температур:

$$T_1 = T_{ЧТк}, \quad (9)$$

$$T_2 = T_{ЧТ2}, \quad (10)$$

$$T_3 = T_{мэ}, \quad (11)$$

$$T_4 = T_{чТсн}, \quad (12)$$

где индексы «чТ_к» и «мэ» относятся соответственно к черному телу при комнатной температуре и металлическому эталону, $T_{чТсн}$ - яркостная температура черного тела, находящегося в термодинамическом равновесии с исследуемым снегом.

Вслед за этим фиксируются яркостные температуры образца снега при двух значениях яркостной температуры подсвечивающего излучения T_i^* :

$$T_5 = (1 - R - t)T_4 + RT_3 + tT_1 = T_{сн} - R(T_{сн} - T_{мэ}) - t(T_{сн} - T_{чТк}), \quad (13)$$

$$T_6 = (1 - R - t)T_4 + RT_3 + tT_2 = (1 - R - t)T_{сн} + RT_{мэ} + tT_{чТ2}, \quad (14)$$

В соответствии с (2) и (7)-(14) искомые значения R и t вычисляются следующим образом:

$$R = \frac{T_4 - T_5 - t(T_4 - T_1)}{(T_4 - T_3)} = \frac{T_{чТсн} - T_5 - t(T_{чТсн} - T_{чТк})}{(T_{чТсн} - T_{мэ})} \quad (15)$$

$$t = \frac{T_5 - T_6}{(T_1 - T_2)} = \frac{T_5 - T_6}{(T_{чТк} - T_{чТ2})} \quad (16)$$

Далее, если использовать линейную зависимость выходного напряжения радиометра u от яркостной температуры T принимаемого излучения в виде:

$$u = c_1 T + c_2, \quad (17)$$

где c_1 , c_2 – некоторые постоянные коэффициенты, то соотношения (15) и (16) преобразуются к виду:

$$R = \frac{u_4 - u_5 - t(u_4 - u_1)}{(u_4 - u_3)} \quad (18)$$

$$t = \frac{u_5 - u_6}{(u_1 - u_2)} \quad (19)$$

Соотношения (18) и (19) показывают, что при измерениях R и t нет необходимости использовать метод абсолютных измерений яркостных температур исследуемых образцов. Более того, не требуется точная информация о значениях термодинамических температур эталонов.

Достаточным условием является постоянство этих значений в процессе измерений каждой из величин R , t .

Таким образом, методика позволяет исключать тренды в изменениях термодинамических температур комнаты и эталонов посредством регулярной фиксации выходных напряжений $u_1 \dots u_4$ при исследованиях излучения каждого образца снега.

5. Методика измерения коэффициента пропускания пространственно-когерентной интенсивности

Методика измерения коэффициента пропускания пространственно-когерентной интенсивности реализуется также с помощью стенда комплексных измерений, схема которого показана на рис.1. Процесс измерений состоит в том, что фиксируется уровень $u(L)$ выходного сигнала радиометра в зависимости от расстояния L между образцом и охлажденным жидким азотом черным телом ЧТ₂. Перемещение ЧТ₂ осуществляется при этом вдоль оптической оси линзы.

Искомое значение коэффициента пропускания $t(L)$ определяется по формуле:

$$t(L) = \frac{u_1 - u(L)}{u_1 - u_0(L)}, \quad (20)$$

где u_1 и $u_0(L)$ – выходные напряжения, соответствующие яркостным температурам комнаты и холодного излучения ЧТ₂ при отсутствии исследуемого образца между линзой и ЧТ₂. При изменении расстояния L изменяется угловой размер ЧТ₂. С учетом дискообразной формы используемого ЧТ₂ диаметром d его угловой размер определяется очевидным соотношением:

$$\Delta\theta = 2\arctg(d / 2L) \quad (21)$$

В соответствии с (4) коэффициент пропускания рассеивающим образцом излучения круглого черного теплового источника с угловым размером (21) при $\vartheta = 0$ запишется в виде:

$$t(0, \Delta\theta) = 2\pi \int_{-\Delta\theta/2}^0 g(0, \Omega_0) \cos \vartheta_0 \sin \vartheta_0 d\vartheta_0 \quad (22)$$

При $\Delta\theta \rightarrow 0$, т.е. когда протяженный источник превращается в точечный, из (22) получим выражение для коэффициента пропускания пространственно-когерентной интенсивности в следующем виде:

$$t_k = \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} t(0, \Delta\theta) \quad (23)$$

Возможности измерения коэффициента пропускания пространственно-когерентной интенсивности с помощью точечного теплового источника на практике ограничены энергетическим потенциалом. В связи с этим реализуется, как правило, измерение коэффициента пропускания, усредненного в пределах заданного углового размера источника излучения. Возможна также реализация алгоритма (23) методом экстраполяции экспериментальных данных, например, при линейной зависимости $t(\Delta\theta)$ [7].

Таким образом, с помощью одного и того же радиометрического стенда обеспечивается измерение трех важнейших радиофизических характеристик рассеивающего слоя: интегральных коэффициентов отражения R и пропускания t , а также коэффициента пропускания пространственно-когерентного излучения t_k . При этом следует особо выделить, что величина t_k измеряется, во-первых, при усреднении эффектов когерентного взаимодействия, во-вторых, при тех же параметрах приемной аппаратуры (т.е. полосе частот и ширине диаграммы направленности), что и величины R и t . Эти два обстоятельства обеспечивают корректность сопоставления таких характеристик рассеивающего слоя, как $R(h)$, $t(h)$ и $t_k(h)$.

6. Конструкция черных эталонов

Черные тела изготовлены из смеси сажистой древесной стружки и воздуха. Охлаждаемые жидким азотом смеси в эталонах ЧТ₁ и ЧТ₂ помещались в мешки из лавсановой пленки и размещались в емкостях с металлизированными алюминиевой фольгой внутренними и теплоизолированными пенопластом толщиной 40мм внешними боковыми

стенками. Лицевые стенки черных эталонов изготовлены только из лавсановой пленки и пенопласта толщиной 10мм.

Ввиду того, что сажа (углерод) имеет высокие значения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости, использовалась смесь с объемным содержанием стружки, монотонно увеличивающимся по толщине эталона, которая составляла 40мм.

7. Технические особенности проведения исследования закономерностей излучения сухого снежного покрова в охлажденном лабораторном помещении

При проведении исследований в лабораторном помещении [] особое внимание уделялось решению следующих задач:

1. Обеспечению термодинамической однородности исследуемых образцов снега и равенства термодинамических температур снега и черного эталона $ЧТ_{\text{сн}}$.
2. Предотвращению таяние снега и образования конденсата влаги на торцевых пенопластовых стенках измерительных цилиндров.

Первая из указанных задач решена с помощью уличных пассивных термостатов, в которых заготовленные образцы снега и черный эталон $ЧТ_{\text{сн}}$ выдерживались в течение 18...20 часов. При температуре приземного слоя атмосферы, близкой к 0°C , внутрь термостатов помещались емкости с жидким азотом, испарение которого способствовало стабилизации отрицательных значений внутренней температуры термостатов.

Принудительное охлаждение лабораторного помещения позволяло значительно понизить комнатную температуру лишь при низких температурах наружного воздуха. При погодных условиях, близких к оттепели, комнатная температура составляла $7...9^{\circ}\text{C}$. В связи с этим для сохранения исходной термодинамической температуры образцов снега в процессе измерений использована теплоизоляционная оболочка на внешней поверхности измерительных цилиндров.

8. Заключение

В результате выполненного исследования развита методика измерений коэффициента когерентного пропускания, интегральных коэффициентов отражения и пропускания слоя сухого снежного покрова в комнатных условиях. Показано, что введение в процедуру относительной калибровки радиометров дополнительной операции регистрации отклика на излучение черного тела, находящегося в термодинамическом равновесии с исследуемыми образцами снега, позволяет корректно измерять указанные выше коэффициенты. Разработанная методика успешно использована при выполнении экспериментального исследования частотной зависимости коэффициента обратного рассеяния в сухом снежном покрове на частотах 22.5, 37.5, 60 и 94 ГГц [10-12].

Литература

1. Голунов В.А., Коротков В.А., Сухонин Е.В. Эффекты рассеяния при излучении миллиметровых волн атмосферой и снежным покровом. Итоги науки и техники, сер. Радиотехника. Т.41. М.: ВИНТИ. 1990. С.68-136.
2. Wiesmann A., Mätzler C. Weise T. Radiometric and structural measurements of snow sample. Radio Sci. 1998. Vol. 33. No.2, pp. 273-279.
3. Голунов В.А. Способ измерения коэффициента излучения естественных покровов. А. с. № 1417593, приоритет 06.05.86 г.
4. Швецов А.А., Коротаев Д.В., Федосеев Л.И. Дистанционное зондирование земных покровов в линии излучения кислорода на длине волны 2,5 мм. Изв. ВУЗов – Радиофизика, 2005, т. 48, № 10–11, с. 905 – 916.
5. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. II – Случайные поля. М., Наука, 1978. 463 с.
6. Hallikainen M. T., Ulaby F. T., Deventer T. E. V. Extinction behavior of dry snow in the 18-to-90 GHz range. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1987. Vol. GE-25, No. 6, pp.737-745.

7. Golunov V. A., Varabanenkov Yu.N. Radiometric methods of measurement of the total reflectivity, the total transmissivity and the coherent transmissivity of a weakly absorbing random discrete medium layer in the millimeter wavelengths range // Proc. Progress in Electromagnetics Research Symp. Moscow, Russia, August 19-23. 2012. P.1415-1418.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., Наука, 1970. 720с.
9. Ландсберг Е.С. Оптика. М., Наука, 1976. 928с.
10. Голунов В.А., Кузьмин А.В., Скулачев Д.П., Хохлов Г.И. Результаты экспериментального исследования частотной зависимости ослабления, рассеяния и поглощения миллиметровых волн в сухом снежном покрове // Радиотехника и электроника. 2017. Т.62. №9. С. 857-865.
11. Голунов В. А., Хохлов Г. И. Показатель степени частотной зависимости интенсивности обратного рассеяния микроволнового излучения в сухом снеге и искусственных снегоподобных средах // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/6/text.pdf>
12. Голунов В. А., Маречек С. В., Хохлов Г. И. Особенности рассеяния микроволнового излучения в сухом пушистом снеге // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun18/2/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2018.6.2

Для цитирования:

В. А. Голунов. Лабораторная методика экспериментального исследования закономерностей микроволнового теплового излучения сухого снежного покрова. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct18/15/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.10.15