

РАССЕЯНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СУХОМ СЛОИСТОМ СНЕГЕ

Голунов В.А.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, <http://fire.relarn.ru>
Фрязино 141190, Московская область, Российская Федерация

Поступила 19.04.2019, принята 24.04.2019

Представлена членом-корреспондентом РАЕН Р.П. Быстровым

Обсуждается проблема применимости двухпоточковой теории Кубелка-Мунка к описанию излучательных характеристик снежного покрова. Показано, что поскольку микроволновое тепловое излучение снега принимается радиометрами с пространственно-когерентным входом, то это эквивалентно облучению рассеивающих сред пространственно-когерентным и, как правило, узконаправленным источником, а рассеянное излучение принимается бесконечно протяженным площадным приемником. Рассматривается проблема применимости известных формул для расчета коэффициентов отражения и пропускания многослойного снежного покрова, поскольку условия применимости этих формул и теории Кубелки-Мунка совпадают. Более того, рассматриваемые формулы не учитывают отражение потоков на границах между слоями. В снежном покрове отражающие границы обусловлены скачком показателя преломления, возникающим из-за разности значений объемной плотности снега в соседних слоях. Измеренные на частотах 22,2, 31, 37,5 и 94 ГГц значения коэффициентов отражения и пропускания однослойного и многослойного снега сопоставлялись с их расчетными значениями. Показано, что, во-первых, измеренные зависимости коэффициентов отражения и пропускания от толщины однослойного снега удовлетворительно аппроксимируются соответствующими формулами теории Кубелки-Мунка. Во-вторых, расхождения между расчетными и измеренными значениями вышеуказанных коэффициентов для двух-, трех- и четырехслойного снега практически не выходят за пределы грубой погрешности измерений. Обнаруженное экспериментально пренебрежимо малое влияние границ интерпретируется тем, что при расчетах используются значения коэффициентов отражения и пропускания, измеренные для каждого из складываемых слоев. В этих значениях уже содержатся вклады отражений рассеянных потоков на межслойных границах, из которых наиболее важными в стопе снега являются внешние границы первого и последнего слоя. Показана целесообразность создания основанного на экспериментальных данных и двухпоточковой модели Кубелки-Мунка банка данных характеристик микроволнового излучения однородного (однослойного) сухого снежного покрова при широком наборе параметров его структуры. В этом случае становится возможным достаточно просто и точно прогнозировать яркостные характеристики слоистого снежного покрова.

Ключевые слова: микроволновое излучение, объемное рассеяние, двухпоточковая модель, слоистый снежный покров, эксперимент.

УДК 535.36; 621.396.11

СОДЕРЖАНИЕ

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. ВВЕДЕНИЕ (39) 2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ (41) 3. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ТЕОРИИ КУБЕЛКИ-МУНКА ДЛЯ ОДНОСЛОЙНЫХ РАССЕИВАЮЩИХ СРЕД (41) 4. КОЭФФИЦИЕНТЫ ОТРАЖЕНИЯ И ПРОПУСКАНИЯ СЛОИСТОГО СНЕГА (43) 5. СНЕГ С ВЕРХНЕЙ КОРКОЙ (44) | <ol style="list-style-type: none"> 6. СНЕГ НА СИЛЬНО РАССЕИВАЮЩЕМ СЛОЕ (45) 7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ (46) 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (47) <p>ЛИТЕРАТУРА (47)</p> <p>1. ВВЕДЕНИЕ</p> <p>Актуальность исследований глобальных характеристик снежного покрова, таких, как границы протяженности и пространственное</p> |
|---|---|

распределение водного эквивалента и толщины покрова, обусловлена тем, что снежный покров является важной частью криосферы, которая оказывает глубокое влияние на глобальное изменение климата и энергетический баланс. Одним из способов исследования снежного покрова является метод микроволнового пассивного дистанционного зондирования из космоса. Радиофизической основой метода является спектральная зависимость интенсивности теплового излучения сухого (т.е. не тающего) снежного покрова от его плотности и толщины. Эта зависимость обусловлена эффектом объемного рассеяния микроволнового излучения на частицах льда снежного покрова.

К настоящему времени существует множество алгоритмов восстановления параметров снежного покрова при зондировании из космоса, которые, однако, не обеспечивают необходимую точность восстановления. Основными причинами являются, с одной стороны, крайне широкий диапазон возможных значений параметров структуры снега и слоистость снежного покрова, с другой стороны, ограниченность условий применимости разработанных строгих теоретических методов к описанию эффектов объемного рассеяния микроволнового излучения в снежном покрове.

Разработанные алгоритмы восстановления снежного покрова основаны исключительно на моделях, использующих различные приближения переноса излучения в рассеивающих средах. Тема объемного рассеяния неразрывно связана с развитием оптики. Наверно, не существует ни одной природной среды, в которой не присутствовали бы объемные рассеиватели, в связи с чем в свое время бытовал термин «мутные» среды [1, 2].

Основы теории переноса излучения были заложены в середине прошлого века Амбарцумяном, Соболевым и Чандрасекаром [3-5]. К концу 50-х годов, как следует из известного обзора Розенберга [1], в связи с бурным развитием методов оптической спектроскопии на тему мутных сред было опубликовано почти 1000 работ. В радиодиапазоне развитие исследований эффектов объемного развития связано с освоением сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн, когда обнаружилось сильное

влияние осадков и облаков на радиолокационные сигналы и каналы связи. Но наиболее сильное, можно сказать, экстремальное рассеяние обнаружилось именно в сухом снежном покрове на миллиметровых волнах [6].

На первый взгляд, наиболее эффективным для расчета интенсивности излучения снежного покрова является метод уравнения переноса излучения (УПИ) [1, 7]. Однако, для его применения необходимо точно рассчитать индикатрисы рассеяния единицы объема, что возможно только с помощью строгих теоретических методов, справедливых, как правило, только для слабо рассеивающих сред.

В связи с этим как в оптике, так и в микроволновом диапазоне широко применяется двухпоточная теория Кубелки-Мунка [8, 9]. Многочисленные исследования показали, что эта теория хорошо согласуется с экспериментальными результатами, полученными при диффузном освещении рассеивающих сред [1, 9]. Строгая реализация условий применимости двухпоточной теории Кубелки-Мунка возможна, например, при использовании специального стенда с интегрирующими зеркальными сферами и площадными детекторами [10].

При пассивной локации тепловое излучение рассеивающего объекта и подсвечивающее его излучение окружающего пространства приближенно можно рассматривать соответствующими условиям применимости теории Кубелки-Мунка. Однако, прием микроволнового теплового излучения осуществляется радиометрами, имеющими, как правило, одномодовый волноводный вход. Это означает, что такие радиометры являются пространственно-когерентными приемниками. Следовательно, при радиометрических измерениях отражения и пропускания слоя рассеивающей среды можно считать, что в соответствии с принципом взаимности слой облучается пространственно-когерентным пучком (в лучшем случае коллимированным), а рассеянное излучение принимается бесконечно протяженным площадным приемником. Таким образом, при микроволновых радиометрических измерениях условия применимости теории Кубелки-Мунка нарушаются. Известны различные подходы

сочетать ослабление когерентной интенсивности с теорией Кубелки-Мунка [9-12]. Поскольку строгое решение этой задачи возможно только с помощью решения векторного уравнения переноса излучения, то все варианты, связанные с использованием теории Кубелки-Мунка, являются приближенными. Основным их недостатком являются неточные значения коэффициентов поглощения и рассеяния, восстановленные по результатам измерений коэффициентов отражения и пропускания рассеивающего слоя [1, 10]. Этот недостаток имеет значение, если основная цель измерений заключается именно в восстановлении указанных величин, например, при спектральном анализе порошковых сред [1]. Для решения задач пассивного дистанционного зондирования снежного покрова достаточно, чтобы модель описывала с необходимой точностью экспериментальные зависимости коэффициентов отражения и пропускания от толщины рассеивающего слоя при эмпирических значениях коэффициентов поглощения и рассеяния.

К настоящему времени подобные модели излучения снега в микроволновом диапазоне разработаны [13-15], но для их успешного практического применения требуется более детальное экспериментальное подтверждение и дальнейшее развитие.

Одной из решаемых проблем моделей, основанных на теории Кубелки-Мунка, является учет влияния границ слоистой среды [16]. При распространении плоской волны в рассеивающих средах формируются, как известно [16], прямые и обратные потоки рассеянного излучения. Интенсивность их отражения от поверхности раздела сред определяется одновременно индикатрисами рассеяния, диэлектрическими свойствами сред и шероховатостями поверхности раздела. Для реального слоистого снежного покрова учесть все многократно отраженные поверхностями разделов и многократно перерассеянные слоями потоки с помощью приближенных моделей возможно только при определенных допущениях. В рамках теории Кубелки-Мунка выведены формулы для расчета коэффициентов отражения и пропускания многослойной рассеивающей среды [17, 18], которые не учитывают границ и справедливы так же, как теория Кубелки-Мунка, при

диффузном облучении.

Цель данной работы состоит в экспериментальной оценке применимости теории Кубелки-Мунка для расчета полных коэффициентов отражения и пропускания теплового излучения слоистого снежного покрова. Новизна данного исследования состоит в том, что применяются оригинальные методика и радиометрическая установка [19, 20], позволяющие измерять указанные выше коэффициенты как для отдельных слоев снега, так и для их совокупности. До настоящего времени такие измерения не проводились.

2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Подробное описание методики и реализующего ее радиометрического стенда приведено в [20]. Здесь отметим, что измерения полных коэффициентов отражения и пропускания слоя снега (и искусственных снегоподобных сред) осуществлялись в лабораторном помещении. Образцы сред загружались в металлические цилиндры диаметром 0.2 м и высотой от 0.01 до 1 м. Основания цилиндров закрывались пенопластовыми пластинами толщиной 0.005 м, а боковые поверхности имели теплоизоляционные оболочки. Для коллимации приемного пучка использовалась диэлектрическая линза диаметром 0.2 м при фокусном расстоянии 0.4 м. При измерениях образцы устанавливались вплотную к линзе. С другой стороны линзы имелась металлическая замкнутая камера, в основании которой помещалось охлаждаемое жидким азотом черное тело, необходимое для создания «холодной» яркостной подсветки образцов. В данной работе приводятся результаты измерений на частотах 22.2, 31, 37.5 и 94 ГГц. Систематически проводимая калибровка радиометров с установкой эталонов вплотную к линзе и разработанный алгоритм относительных измерений обеспечили надежный учет изменений радиояркостного фона и радиояркостной температуры эталонов.

3. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ТЕОРИИ КУБЕЛКИ-МУНКА ДЛЯ ОДНОСЛОЙНЫХ РАССЕИВАЮЩИХ СРЕД

Радиояркостная температура восходящего теплового излучения снежного покрова,

сформированного на поверхности почвы, в пренебрежении эффекта влияния их поверхности раздела можно записать в виде:

$$T(h) = [1 - R(h) - t(h)]T_s + t(h)T_g + R(h)T_a^*, \quad (1)$$

где R и t – полные коэффициенты отражения и пропускания слоя снега толщиной h , T_s и T_g – термодинамические температуры снега и почвы, T_a^* – радиояростная температура подсвечивающего излучения окружающей среды. В соответствии с теорией Кубелки-Мунка коэффициенты отражения и пропускания определяются следующими соотношениями:

$$R_{KM}(h) = \frac{R_0[1 - \exp(-2\alpha_{KM}h)]}{1 - R_0^2 \exp(-2\alpha_{KM}h)}, \quad (2)$$

$$t_{KM}(h) = \frac{(1 - R_0^2) \exp(-\alpha_{KM}h)}{1 - R_0^2 \exp(-2\alpha_{KM}h)}, \quad (3)$$

где $R_0 = 1 + \frac{K}{S} - \sqrt{\frac{K^2}{S^2} + 2\frac{K}{S}}$ – коэффициент отражения полубесконечного слоя, $\alpha_{KM} = \sqrt{K(K+2S)}$, K и S – соответственно коэффициенты ослабления, поглощения и рассеяния диффузной интенсивности.

Обработка экспериментальных данных, полученных ранее для достаточно однородного снега [21-23], показала, что соотношения (2) и (3) весьма удовлетворительно аппроксимируют измеренные зависимости коэффициентов отражения $R(h)$ и пропускания $t(h)$. На рис. 1а,б показаны используемые в дальнейшем графики измеренных на частотах 22.2 ГГц (рис. 1а) и 37.5 ГГц (рис. 1б) и аппроксимированных соотношениями (2), (3) зависимостей $R(h)$ и $t(h)$ для образцов снега, взятых из разных

Таблица 1.

Значения модельных величин, использованные при аппроксимации экспериментальных данных на рис. 1а,б.

№ п/п	модельные величины	частота, ГГц			
		22.2		37.5	
		номера кривых		номера кривых	
		1,4	2,3	1,4	2,3
1	K, 1/см	0.0073	0.004	0.015	0.012
2	S, 1/см	0.0064	0.0033	0.0115	0.0063
3	α , 1/см	0.00121	0.0065	0.0239	0.0172
4	R_0	0.248	0.239	0.228	0.178

слоев неоднородного снежного покрова. Аппроксимационные значения модельных величин приведены в табл. 1.

Как следует из представленных данных, вследствие неоднородной структуры снега наблюдается определенный разброс экспериментальных значений коэффициентов отражения и пропускания. В связи с этим для каждой частоты подобраны два семейства аппроксимационных зависимостей, показанных на рис. 1а,б в виде сплошных и пунктирных линий. Из сопоставления экспериментальных данных с аппроксимационными кривыми видно, что в исследованных образцах имеются два вида снега с отличающимися структурами, одна из которых является доминирующей.

Таким образом, анализ данных, показанных на рис. 1, подтверждает способность теории Кубелки-Мунка удовлетворительно описывать функциональные зависимости коэффициентов отражения и пропускания слоя снега от его толщины в микроволновом диапазоне.

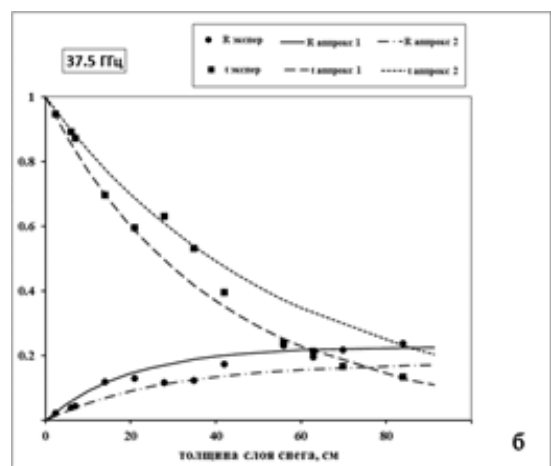
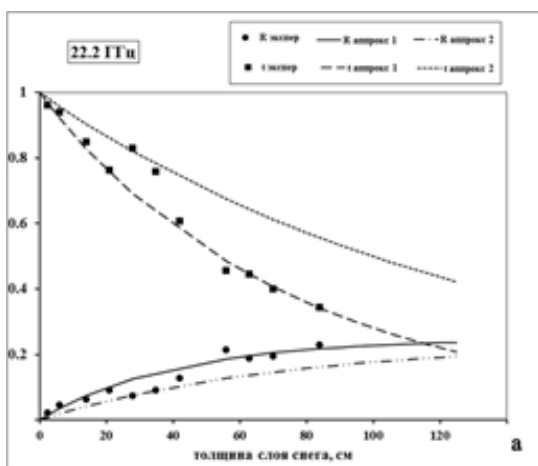


Рис. 1. Экспериментальные и аппроксимационные зависимости коэффициентов пропускания и отражения на частотах 22.2 ГГц (а) и 37.5 ГГц (б).

4. КОЭФФИЦИЕНТЫ ОТРАЖЕНИЯ И ПРОПУСКАНИЯ СЛОИСТОГО СНЕГА

Для расчета коэффициентов отражения и пропускания при диффузном облучении рассеивающей среды, состоящей из n слоев, в [17, 18] получены следующие формулы:

$$R_{1,2,3,\dots,n} = R_1 + \frac{t_1^2 R_{2,3,\dots,n}}{1 - R_1 R_{2,3,\dots,n}}, \quad (4)$$

$$t_{1,2,3,\dots,n} = \frac{t_1 t_{2,3,\dots,n}}{1 - R_1 R_{2,3,\dots,n}}, \quad (5)$$

где R_i и t_i – коэффициенты отражения и пропускания первого слоя, а $R_{2,3,\dots,n}$ и $t_{2,3,\dots,n}$ – следующих $(n-1)$ слоев. Величины $R_{2,3,\dots,n-1}$, $t_{2,3,\dots,n-1}$ и следующие $R_{i,i+1,\dots,n-1}$, $t_{i,i+1,\dots,n-1}$, где $i = 3, 4, \dots, n-1$, вычисляются аналогичным образом.

Формулы (4), (5) получены в [17, 18] для таких однородных слоев, коэффициенты отражения и пропускания которых не зависят от выбора облучаемой поверхности. Кроме того, как отмечено в [1], эти формулы строго выполняются только при неизменности угловой структуры поля во всей толще слоев и на их границах. Следовательно, во всех других случаях эти формулы являются приближенными. Задача экспериментального исследования, таким образом, состоит в оценке возможностей применения формул (4) и (5) для расчетов коэффициентов отражения и пропускания слоистого снежного покрова при узконаправленном приеме его теплового излучения.

Для исследования отражения и пропускания слоистого снега использовались образцы снега

при различных значениях толщины (от 0.2 до 1 м) и объемной плотности снега (0.2...0.48). Использование образцов толщиной до 1 м позволяло обеспечить достаточно большие разности коэффициентов отражения и пропускания складываемых слоев на частотах 22...37.5 ГГц.

На рис. 2а и 2б показаны результаты измерений коэффициентов отражения и пропускания двух-, трех- и четырехслойного снега на частотах 22.2, 31 и 37.5 ГГц. По оси абсцисс отложены экспериментальные значения, а по оси ординат – расчетные. На обоих рисунках штрихпунктирные линии соответствуют функции $y = x$, а пунктирные линии – функции $y = x + 0.03$ на рис. 2а, и $y = x + 0.04$ - на рис. 2б. Видно, что подавляющее количество данных находятся между пунктирными линиями. Абсолютная погрешность измерений для слоистой среды грубо оценена на основе флуктуационной чувствительности радиометров как не хуже 0.04, что удовлетворительно соответствует интервалам между пунктирными линиями. Однако, как следует из анализируемых графиков, наблюдается незначительное положительное смещение расчетных значений относительно измеренных. Можно предположить, что источником смещения расчетных данных является влияние границы между слоями, обусловленной разностью значений их объемной плотности и, что более существенно, пенопластовыми пластинами в основаниях измерительных цилиндров. Каждая пластина имеет толщину

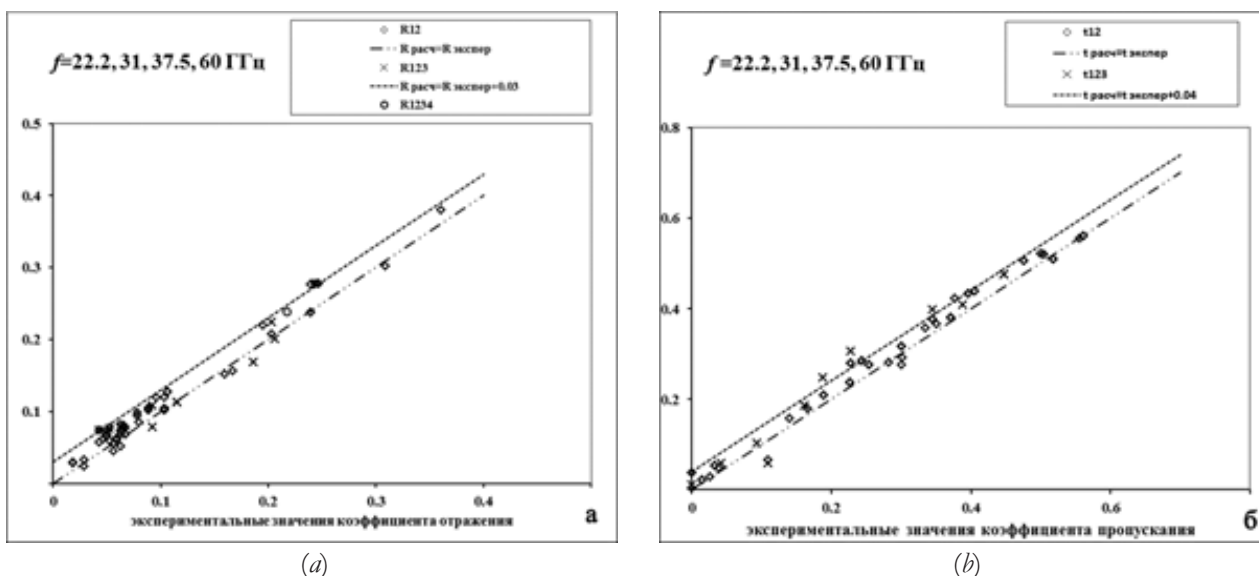


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные значения коэффициентов отражения (а) и пропускания (б) слоистого снега.

5 мм, поэтому между слоями при их смыкании возникает нерассеивающий и непоглощающий слой толщиной 10 мм. Из общего рассмотрения переноса излучения следует, что всякое отражение на границах рассеивающего слоя приводит к уменьшению его полных коэффициентов пропускания и отражения. Следовательно, поскольку в используемых формулах (4), (5) эффекты отражения на границах не учтены, постольку расчетные значения коэффициентов оказались выше экспериментальных.

5. СНЕГ С ВЕРХНЕЙ КОРКОЙ

Рассмотрим типичный случай, когда в результате оттепели и последующего замораживания на поверхности снега образуются корки. Они отличаются от соседнего слоя более высокими значениями объемной плотности и, как правило, более крупной структурой снега. Толщина корки может быть различной.

На рис. 3а,б показаны графики зависимостей полных коэффициентов пропускания и отражения от толщины корки, слоя снега и слоя снега с верхней коркой для излучения с частотой 37.5 ГГц. В табл. 2 приведены значения их объемной плотности и модельных величин, полученных в результате аппроксимации измеренных значений коэффициентов отражения и пропускания с помощью формул (1) и (2).

Из табл. 2 следует, что тепловые потери и интенсивность рассеяния в корке в 2-3 раза выше, чем в подкорковом снеге. Эта разница в данном случае обусловлена, в основном, более крупной структурой снега в корке, поскольку, как показано

Таблица 2.

Объемная плотность и аппроксимационные значения модельных величин для корки и снега

структура	ρ_v	$K, \text{см}^{-1}$	$S, \text{см}^{-1}$	$\alpha_{\text{км}^2}, \text{см}^{-1}$	R_0
корка	0.32...0.37	0.017	0.024	0.0332	0.323
снег	0.28...0.3	0.01	0.0075	0.0158	0.225

в [24], при значениях объемной плотности зернистого снега 0.2...0.4 интенсивность рассеяния практически постоянна.

В табл. 3 и табл. 4 приведены результаты расчетов и измерений на частотах 31 и 37.5 ГГц коэффициентов отражения и пропускания двухслойной среды, образованной рассмотренными выше коркой и снегом.

В результате анализа табличных данных обнаруживается превосходящая грубую погрешность разница между расчетными и измеренными значениями коэффициента пропускания для корок со снегом при толщине слоя снега 0.76 м. Для интерпретации этого эффекта используем данные измерений коэффициентов отражения и пропускания на частоте 94 ГГц, показанные на рис. 4. На этой частоте рассеяние в снеге настолько сильнее, чем на частотах ниже 37 ГГц, что толщина отражающего слоя на порядок меньше. По этой причине на частоте 94 ГГц проявляются неоднородности структуры образцов в их приповерхностном слое.

Так, из рис. 4 следует, что образец снега толщиной 0.76 м имел наименьший коэффициент отражения в сравнении с другими образцами. Это означает, что снег в этом образце, по крайней мере, в верхнем слое толщиной

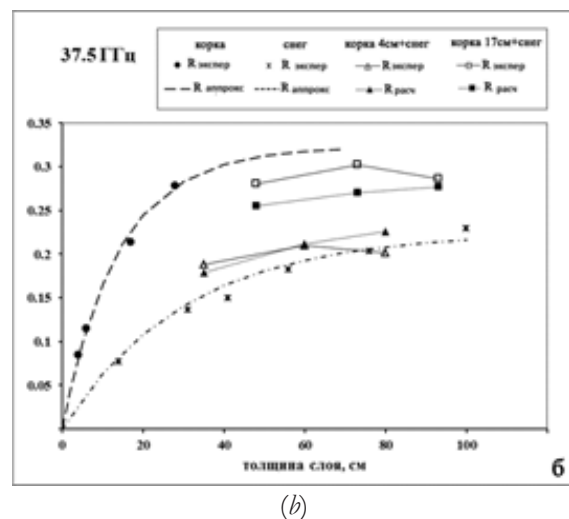
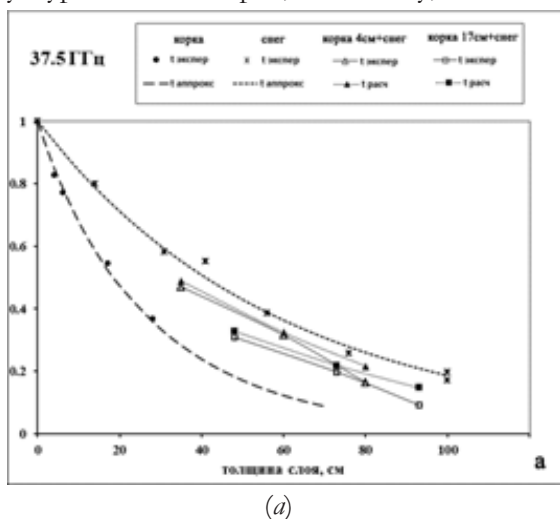


Рис. 3. Графики зависимости коэффициентов пропускания (а) и отражения (б) корки, снега и корки со снегом.

Таблица 3.

Расчетные и измеренные на частоте 37.5 ГГц значения коэффициентов отражения и пропускания корки со снегом.

толщина корки, см	суммарная толщина, см	толщина слоя снега, см	$R_{расчет}$	$R_{изм}$	$t_{расчет}$	$t_{изм}$
4	35	31	0.18	0.19	0.49	0.47
	60	56	0.21	0.21	0.32	0.32
	80	76	0.23	0.20	0.22	0.16
17	48	31	0.26	0.28	0.33	0.31
	73	56	0.27	0.30	0.22	0.2
	93	76	0.28	0.29	0.15	0.09

до 0.3 м, имел более мелкую структуру. Если бы весь снег в образце имел такую мелкую структуру, то она проявилась бы на более низких частотах через заметные отклонения измеренных данных от аппроксимационных кривых на рис. 3. Однако, как видно на рис. 3, указанные отклонения ничтожны. Следовательно, в образце снега толщиной 0.76 м имеется локальная неоднородность структуры, вследствие которой возникает дополнительная ошибка при расчете коэффициента пропускания по формуле (4). Подтверждением этого факта являются данные, полученные для частоты 31 ГГц и приведенные в табл. 4. И в этом случае, как видно из табл. 4, самая большая ошибка в расчетных данных коэффициента пропускания получена для образца снега толщиной 0.76 м.

Таким образом, при расчетах коэффициентов отражения и пропускания по формулам (3) и (4), действительно, из-за неоднородности складываемых слоев могут возникать дополнительные ошибки [18].

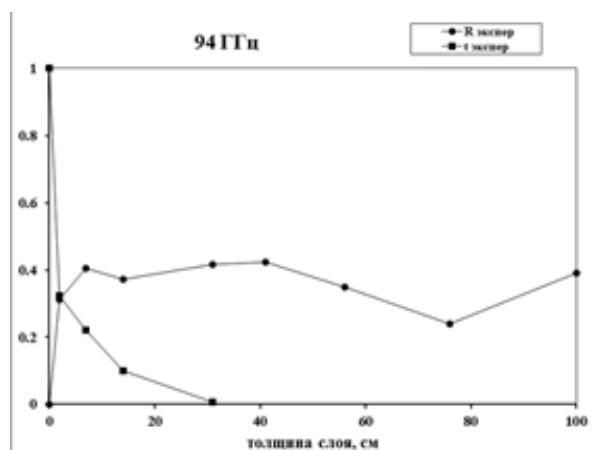


Рис. 4. Экспериментальные значения коэффициентов отражения и пропускания снега на частоте 94 ГГц.

Таблица 4.

Расчетные и измеренные на частоте 37.5 ГГц значения коэффициентов отражения и пропускания корки со снегом.

толщина корки, см	толщина слоя снега, см	$R_{расчет}$	$R_{изм}$	$t_{расчет}$	$t_{изм}$
6	56	0.16	0.17	0.44	0.44
	76	0.18	0.16	0.38	0.32
	100	0.22	0.22	0.28	0.27
17	56	0.22	0.23	0.36	0.35
	76	0.23	0.22	0.31	0.25
	100	0.25	0.26	0.23	0.22

6. СНЕГ НА СИЛЬНО РАССЕИВАЮЩЕМ СЛОЕ

Рассмотрим другой типичный случай, когда в основании снежного покрова вследствие метаморфизма образуется сильно рассеивающие фирновый снег или глубинный иней. При постановке следующего эксперимента был сделан акцент не только на сильное различие в рассеивающих свойствах складываемых слоев, но также и на сильное различие их показателей преломления для усиления влияния границы. Для оценки показателя преломления n_c сухого снега предложен ряд формул [25], приводящих, как показал анализ, к близким количественным результатам. Одна из них для интервала $\rho_V < 0.4$ имеет простой вид:

$$n_c = 1 + 83\rho_V \quad (6)$$

В соответствии с (6) при изменении объемной плотности снега в характерном для него интервале $\rho_V = 0.2 \dots 0.4$ показатель преломления принимает значения $n_c = 1.166 \dots 1.332$. Следовательно, показатель преломления границы раздела двух слоев снега при их объемных плотностях соответственно 0.2 и 0.4 составит $n = 1.14$. При уменьшении разности плотностей снега в соседних слоях показатель преломления границы будет еще ниже. Таким образом, приведенные количественные оценки показывают, что граница между слоями снега является настолько мягкой, что возникает предположение о ее пренебрежимо слабом влиянии на рассеяние.

В связи с этим при проведении эксперимента слой снега размещался на поверхности слоя мраморной крошки с объемной плотностью 0.6. Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости мрамора примерно вдвое выше, чем у льда [26], поэтому граница между снегом и мраморной крошкой

более жесткая, чем между слоями снега.

Графики расчетных и экспериментальных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания слоя снега, лежащего на поверхности слоя мраморной крошки толщиной 0.01 м, и слоя снега без подложки показаны на рис. 5. Измерения выполнены на частотах 22.2 и 37.5 ГГц. При измерениях использовался снег, характеристики которого были приведены выше в табл. 1 и на рис. 1.

Из рис. 5 видно, что рассеивающие свойства снега и мраморной крошки отличаются существенно, вследствие чего коэффициенты отражения и пропускания снега при замене подложки изменяются тоже существенно.

Из анализа представленных данных следует также, что расчетные и измеренные значения коэффициентов отражения и пропускания снега на подложке из мраморной крошки согласуются между собой удовлетворительно. Максимальные расхождения между ними наблюдаются для коэффициента отражения на частоте 37.5 ГГц, но составляют не более 0.03, что согласуется с диаграммами рассеяния на рис. 2а,б.

7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из результатов выполненного исследования следует, что влияние границ складываемых слоев снега пренебрежимо мало. Такой вывод, на первый взгляд противоречит как простым физическим представлениям, так строгой теории. Действительно, влияние границ проявляется в том, что при отражении на границах потоки прямого и обратного рассеянного излучения

ослабляются, при этом увеличиваются тепловые потери при их многократном отражении внутри слоев. В результате коэффициенты отражения и пропускания уменьшаются и тем сильнее, чем жестче границы. В соответствии с этими представлениями при расчетах результирующих коэффициентов отражения и пропускания слоистых сред, действительно, крайне необходимо пользоваться формулами, учитывающими влияние границ.

Однако, такой подход справедлив только в теоретическом плане при решении прямой задачи расчета излучения рассеивающей среды. В проведенном же исследовании используются результаты прямых измерений коэффициентов отражения и пропускания отдельных слоев снега, и в значениях этих коэффициентов уже содержатся вклады от влияния границ. При сложении слоев внешние границы первого и последнего слоев остаются неизменными, а влияние внутренних границ ослабляется из-за уменьшения их относительных показателей преломления и за счет их положения в поглощающей толще слоистой среды.

Приближенные методы решения прямой задачи расчета излучения снежного покрова предложены в ряде работ [13-15]. Наиболее детально разработанной представляется модель MEMLS (Microwave Emission Model of Layered Snowpacks) излучения снежного покрова [13]. В MEMLS снежный покров рассматривается как набор горизонтальных слоев. Каждый слой характеризуется толщиной, радиусом корреляции частиц, плотностью, содержанием

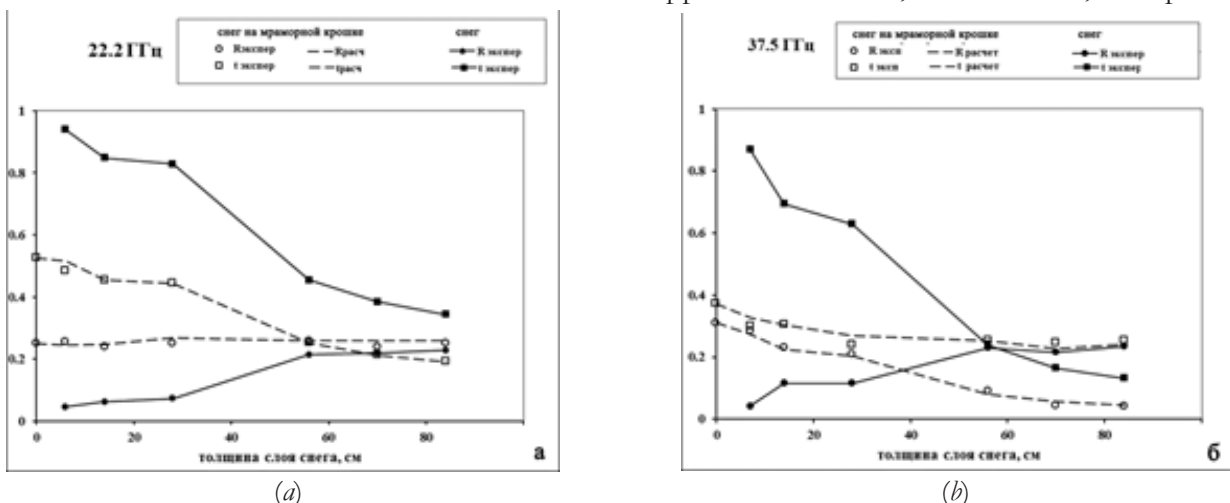


Рис. 5. Коэффициенты отражения и пропускания слоя снега без подложки и на мраморной крошке на частотах 22.2 ГГц (а) и 37.5 ГГц (б).

жидкой воды и температурой. Границы между слоями предполагаются плоскими. Предложенный алгоритм учета многократного переотражения границами и перерасеяния между слоями основан на шести-поточковой модели переноса излучения, которая в случае однослойного снега сводится к двухпоточковой теории Кубелка-Мунка. Для расчета итогового результата - коэффициента излучения слоистого покрова – используется множество приближенных формул и эмпирических параметров. К сожалению, вследствие ограниченного объема эмпирических данных, полученных для однослойного снега с различными структурами, разработанные модели, как показано, например, в [27], пока не могут достаточно точно воспроизводить радиояркие температуры реального снежного покрова.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования показано, что, во-первых, измеренные зависимости коэффициентов отражения и пропускания от толщины однослойного снега удовлетворительно аппроксимируются соответствующими формулами теории Кубелки-Мунка. Во-вторых, расхождения между рассчитанными по формулам Кубелки и измеренными значениями вышеуказанных коэффициентов для двух-, трех- и четырехслойного снега практически не выходят за пределы грубой погрешности измерений.

Результаты, полученные в данной работе и в предыдущих работах с участием автора [21-23], позволяют предположить, что для прогнозирования интенсивности излучения сухого снежного покрова достаточно в рамках двухпоточковой теории Кубелки-Мунка создать банк экспериментальных значений коэффициентов поглощения и рассеяния для достаточно широкого набора параметров структуры снега.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шифрин КС. *Рассеяние света в мутной среде*. М.- Л., 1951, 288 с.
2. Розенберг ГВ. Абсорбционная спектроскопия диспергированных веществ. *УФН*, 1959, 69(1):57-104.
3. Амбарцумян ВА. Новый способ расчета рассеяния света в мутной среде. *Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз.*, 1942, 3:97-103.
4. Чандрасекар С. *Перенос лучистой энергии*. М., ИЛ, 1953, 432 с.
5. Соболев ВВ. *Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет*. М., Гостехиздат, 1956, 391 с.
6. Зинченко НС., Усиков АЯ. Отражение радиоволн миллиметрового диапазона от слоя снега. *Изв. вузов. Радиофизика*, 1960, 3(4):614-618.
7. Барабаненков ЮН. Многократное рассеяние волн на ансамбле частиц и теория переноса излучения. *УФН*, 1975, 117(1):49-78.
8. Kubelka P., Munk F. Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche. *Z. Tech. Phys.*, 1931, 11a:593-601.
9. Исимару А. *Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т.1*. М., Мир, 1981, 280 с.
10. Roy A., Ramasubramaniam R., Gaonkar HA. Empirical relationship between Kubelka-Munk and radiative transfer coefficients for extracting optical parameters of tissues in diffusive and nondiffusive regimes. *J. of Biomedical Optics*, 2012, 17(11):115006.1-115006.6.
11. Mudgett PS, Richards LW. Multiple scattering calculations for technology. *J. Appl. optics.*, 1971, 10(7):1485-1502.
12. Thennadil SN. Relationship between the Kubelka-Munk scattering and radiative transfer coefficients. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, 25(7):1480-1485.
13. Wiesman A, Mätzler C. Microwave emission model of layered snowpacks. *Rem. Sens. of Environ.*, 1999, 70(3):307-316.
14. Pulliainen JT, Grandell J, Hallikainen MT. HUT snow emission model and its applicability to snow water equivalent retrieval. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 1999, GE-37(3):1378-1390.
15. Löwe H, Picard G. Microwave scattering coefficient of snow in MEMLS and DMRT-ML revisited: the relevance of sticky hard spheres and tomography-based estimates of stickiness. *The Cryosphere*, 2015, 9:2101-2117; www.the-cryosphere.net/9/2101/2015/.
16. Orchard SE. Reflection and transmission of light by diffusing suspensions. *J. Optic. Soc. Am.*, 1969, 59(12):1584-1597.
17. Kubelka P. New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. Part I. *J. Opt. Soc. Am.*, 1948, 38(5):448-457.
18. Kubelka P. New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. Part II. *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, 44(4):330-335.
19. Golunov VA., Barabanenkov YuN. 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. (PIERS-2012)*, Moscow, Russia, August 19-23, 2012, p.1415.
20. Голунов В.А. 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>.
 21. 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, 62(9):857-865.
 22. Голунов В.А., Хохлов Г.И. Показатель степени частотной зависимости интенсивности обратного рассеяния микроволнового излучения в сухом снеге и искусственных снежоподобных средах. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*, 2017, 9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/6/text.pdf>.
 23. 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>.
 24. Голунов В.А. Когерентное ослабление электромагнитных волн в слабо поглощающих плотных случайных дискретных (снежоподобных) средах. *Радиотехника и электроника*, 2015, 60(1):31-37.
 25. 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*, М., ВИНТИ, 1990, 41:68-136.
 26. Шуваев А.Н., Гензе Д.А. Диэлектрическая и электрическая проницаемость грунтов нарушенной структуры. *Вестник ТГАСУ*, 2011, 1:200-206.
 27. Tedesco M., Kim E.J. Intercomparison of electromagnetic models for passive microwave remote sensing of snow. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2006, 44(10):2654-2666.

Голунов Валерий Алексеевич

к.ф.-м.н.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Фрязино 141190, Московская область, Россия

golsnow@mail.ru

MICROWAVE SCATTERING IN DRY LAMINATED SNOW

Valery A. Golunov

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazino branch, <http://fire.relarn.ru>

Fryazino 141190, Moscow Region, Russian Federation

golsnow@mail.ru

Abstract. The problem of the applicability of the two-stream Kubelka-Munk theory to the description of the radiative characteristics of snow cover is discussed. It is shown that since the microwave thermal radiation of snow is received by radiometers with a spatially coherent input, this is equivalent to the irradiation of scattering media by a spatially coherent and, as a rule, narrowly directed source, and the scattered radiation is received by an infinitely long areal receiver. The problem of the applicability of the known formulas for calculating the reflection and transmission coefficients of multilayer snow cover is considered, since the conditions for the applicability of these formulas and the Kubelka-Munk theory coincide. Moreover, the considered formulas do not take into account the reflection of flows at the boundaries between the layers. In the snow cover, the reflecting boundaries are caused by a jump in the refractive index due to the difference in the values of the bulk density of snow in adjacent layers. Measured at frequencies of 22.2, 31, 37.5 and 94 GHz, the values of the reflection and transmission coefficients of single-layer and multi-layer snow were compared with their calculated values. It is shown that, firstly, the measured dependences of the reflection and transmission coefficients on the thickness of single-layer snow are satisfactorily approximated by the corresponding formulas of the Kubelka-Munk theory. Secondly, the discrepancies between the calculated and measured values of the above factors for two-, three- and four-layer snow practically do not go beyond the limits of coarse measurement error. The experimentally observed negligibly small effect of the boundaries is interpreted by the fact that the calculations use the values of the reflection and transmission coefficients measured for each of the folded layers. These values already contain contributions from the reflections of scattered fluxes on the interlayer boundaries, of which the outer boundaries of the first and last layer are most important in the snow stack. The feasibility of creating a database of microwave radiation characteristics of a uniform (single-layer) dry snow cover with a wide set of parameters of its structure based on experimental data and a two-stream Kubelka-Munk model is shown. In this case, it becomes possible to simply and accurately predict the brightness characteristics of the layered snow cover.

Keywords: microwave emission, volume scattering, two-stream model, layered snow cover, experiment

UDC 535.36; 621.396.11

Bibliography - 27 references

RENSIT, 2019, 11(1)39-48

Received 19.04.2019, accepted 24.04.2019

DOI: 10.17725/rensit.2019.11.039