

Метод и результаты пассивного измерения зеркальной составляющей отражения снежного покрова в миллиметровом диапазоне волн

В. А. Голунов

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Московская обл., Фрязино, 141190, Россия
E-mail: golsnow@mail.ru*

Разработан метод измерения коэффициента зеркального отражения теплового излучения снежного покрова, основанный на создании контраста радиояркой температуры подсвечивающего излучения в зеркальном направлении. Метод реализован на частоте 94 ГГц при приеме излучения на ортогональных поляризациях при вертикальном угле приема 55° . Контраст радиоярких температур подсвечивающего излучения в зеркальном направлении создавался за счет последовательной замены излучения атмосферы на излучение черного тела при термодинамической температуре приземного слоя атмосферы.

Выполнены поляризационные измерения теплового излучения слоя сухого свежеснежного покрова, помещенного последовательно на поверхности металлического листа, керамической плитки и двух черных тел с термодинамическими температурами приземного слоя атмосферы и жидкого азота. Используя экспериментальные данные измерения коэффициента зеркального отражения, вычислены значения коэффициента экстинкции снега, лежащего на поверхностях керамической плитки и металлического листа. Вычисления выполнены в рамках двух альтернативных моделей, одна из которых учитывает эффективный показатель преломления снега, а другая не учитывает. Оказалось, что только в рамках последней модели значения коэффициента экстинкции не зависели от вида подстилающей среды. Это означает, что излучение на частоте 94 ГГц в исследованном снеге не преломляется.

Ключевые слова: снег, миллиметровые волны, тепловое излучение, зеркальное отражение, преломление

Введение

При распространении электромагнитных волн в плотных случайных дискретных средах существенную роль играют, как известно (Розенберг, 1959), эффекты когерентного рассеяния, определяющие основные свойства теплового излучения сред, включая поляризационные характеристики отраженного излучения.

В общем случае, методы измерения коэффициента отражения электромагнитных волн основаны на «подсвечивании» исследуемой среды. Подсветка может осуществляться с помощью монохроматических и широкополосных генераторов или источников теплового излучения. В данной работе рассматриваются только методы, в которых используются источники микроволнового теплового излучения. В качестве таких источников могут использоваться природные среды (например, атмосфера), космические тела (например, Солнце) или искусственно охлаждаемые или нагреваемые тела.

Выбор источника излучения определяется, как правило, особенностями исследуемой среды, условиями решаемой задачи и возможностями реализации требуемых измерений. Наиболее простым случаем является измерение коэффициента зеркального отражения нерассеивающих сред с плоскими поверхностями раздела. Показано (Голунов, 1984), что для осуществления таких измерений в натуральных условиях достаточно использовать два эталона, один из которых может быть черным телом, а второй – плоским металлическим отражателем. Если среды являются рассеивающими, т.е. имеют широкие индикатрисы рассеяния, то, как правило, требуется измерить полный (интегральный) коэффициент отражения. В натуральных условиях такие измерения осуществляются с использованием вариаций вертикального поглощения безоблачной атмосферы в ее окнах прозрачности (Голунов, 1985), на двух частотах вблизи линий поглощения атмосферы (Швецов, 1988), в лабораторных условиях в камере с «холодной» подсветкой (Golunov, Varabanenkov, 2012; Голунов, 2018).

Новой задачей является пассивное измерение зеркальной составляющей отражения сред с широкими индикатрисами рассеяния. К таким средам относится, например, сухой снежный покров при зондировании в микроволновом диапазоне. Необходимость таких измерений обусловлена тем, что при решении задач пассивного дистанционного зондирования снежного покрова востребованы поляризационные характеристики его излучения. Особая актуальность исследования факторов, влияющих на интенсивность зеркального отражения, связана с отсутствием строгой теории объемного рассеяния в сухом снеге при размерах частиц льда, соизмеримых с длиной волны, и при рассеянии на кластерах мелких частиц.

Исходные соотношения

Пусть на плоский слой сухого снега с однородной структурой толщиной h , лежащий на гладкой поверхности подстилающей среды, падает плоская волна с единичной интенсивностью, как показано на рис.1.

Коэффициент отражения слоя снега при вертикальном угле наблюдения θ_1 и произвольной линейной поляризации может быть представлен в виде (Голунов, 2002):

$$R_{123}(\theta_1, h) = R_{\text{kor}123}(\theta_1, h) + \tilde{R}(h), \quad (1)$$

где \tilde{R} - суммарный коэффициент отражения, обусловленный всеми выходящими из слоя в

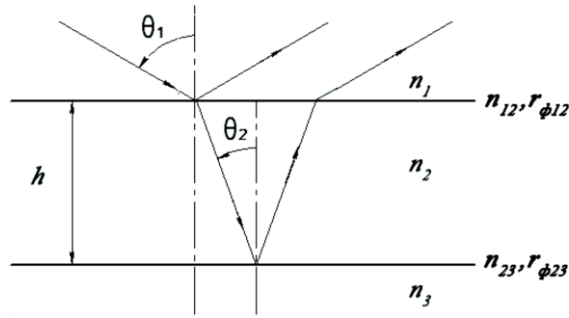


Рис. 1. Зеркальное отражение плоской волны от плоского слоя

обратном направлении потоками рассеянного (диффузного) излучения,

$$R_{\text{кор}123}(\theta_1, h) = r_{\phi12}(\theta_1) + \frac{[1 - r_{\phi12}(\theta_2)]^2 r_{\phi23}(\theta_2) \exp(-2k_{e2}h \sec \theta_2)}{1 - r_{\phi12} r_{\phi23} \exp(-2k_{e2}h \sec \theta_2)} \quad (2)$$

- коэффициент зеркального отражения интенсивности падающего пространственно-когерентного излучения, $r_{\phi12}$ и $r_{\phi23}$ – квадраты модулей коэффициентов отражения Френеля для верхней и нижней поверхностей раздела соответственно, k_{e2} – коэффициент экстинкции снега (т.е. погонный коэффициент ослабления интенсивности падающего излучения), углы θ_1 и θ_2 связаны законом Снеллиуса:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (3)$$

n_1 и n_2 – показатели преломления верхней и промежуточной сред соответственно. Поскольку показатель поглощения снега $m_2 \ll n_2$, то $r_{\phi12}$ и $r_{\phi23}$ можно рассчитать по следующим формулам:

$$r_{ij\text{гор}}(\theta) = \left(\frac{\cos \theta_i - \sqrt{n_{ij}^2 - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{n_{ij}^2 - \sin^2 \theta_i}} \right)^2 \quad (4)$$

$$r_{ij\text{верт}}(\theta) = \left(\frac{n_{ij}^2 \cos \theta_i - \sqrt{n_{ij}^2 - \sin^2 \theta_i}}{n_{ij}^2 \cos \theta_i + \sqrt{n_{ij}^2 - \sin^2 \theta_i}} \right)^2 \quad (5)$$

где $n_{ij} = n_j/n_i$ – показатель преломления границы, «гор» и «верт» означают горизонтальную и вертикальную поляризации соответственно.

Рассмотрим случай слоя сухого снега с плоскими поверхностями раздела и однородными профилями его термодинамической температуры и структуры. В

предположении равенства термодинамических температур слоя снега и подстилающей среды их результирующая радиояркая температура с учетом (1) запишется в виде (Голунов, 2002):

$$T(\theta_1, h) = [1 - R_{\text{кор}123}(\theta_1, h) - \tilde{R}(h)]T_0 + R_{\text{кор}123}(\theta_1, h)T_a(\theta_1) + \tilde{R}(h)T_a^*, \quad (6)$$

где T_0 – термодинамическая температура снега, $T_a(\theta_1)$ радиояркая температура нисходящего излучения атмосферы при угле зеркального отражения, T_a^* – радиояркая температура атмосферы, определяемая сверткой бистатической индикатрисы рассеяния снега и угловой зависимости радиояркой температуры атмосферы.

Целью данной работы является разработка и реализация методики экспериментального определения величины $R_{\text{кор}123}$.

Методика измерения радиояркой температуры снега

Измерение радиояркой температуры снега возможно только при выполнении абсолютной калибровки радиометрического комплекса. Поскольку в микроволновом диапазоне выполняются условия приближения Релея-Джинса, то выходной сигнал радиометра имеет линейную зависимость от радиояркой температуры объекта. Это означает, что для абсолютной калибровки достаточно иметь два эталонных уровня радиояркости. В нашем исследовании такие уровни создавались за счет использования в качестве эталонов двух черных тел, одно из которых находилось в термодинамическом равновесии с исследуемым объектом, другое – с жидким азотом. При этом строго выполнялось условия «искусственной Луны» (Цейтлин, 1976), состоящие в том, чтобы эталоны и объект имели равные угловые размеры и размещались поочередно в одном и том же месте. Первое условие обеспечивалось тем, что все исследуемые объекты (черные тела, слои снега, образцы подстилающей поверхности) имели идентичные формы поверхности и ее размеры.

Методика измерения зеркального отражения

Из соотношения (6) следует, что, если выполнить два измерения радиояркой температуры T_1, T_2 при двух отличающихся значениях T_{a1} и T_{a2} соответственно, но при $T_a^* = \text{constant}$, то

$$T_1(\theta_1, h) - T_2(\theta_1, h) = R_{\text{кор}123}(\theta_1, h)[T_{a1}(\theta_1) - T_{a2}(\theta_1)], \quad (7)$$

откуда следует

$$R_{\text{кор}123}(\theta_1, h) = \frac{T_1(\theta_1, h) - T_2(\theta_1, h)}{T_{a1}(\theta_1) - T_{a2}(\theta_1)} \quad (8)$$

Однако, в натуральных условиях изменение радиояркостной температуры T_a чистой атмосферы приводит к изменению радиояркостной температуры T_a^* . Задача решается, если при измерении T_2 вместо атмосферы с температурой излучения T_{a2} использовать дополнительное черное тело (далее ДЧТ). Действительно, если использовать ДЧТ при термодинамической температуре T_0 , то при пренебрежимо малом его влиянии на величину T_a^* (а это выполняется при его достаточно малом угловом размере в сравнении с угловой шириной индикатрисы рассеяния снега),

$$T_2(\theta_1, h) = [1 - R_{\text{кор}123}(\theta_1, h) - \tilde{R}(h)]T_0 + R_{\text{кор}123}(\theta_1, h)T_0 + \tilde{R}(h)T_a^* \quad (9)$$

и тогда

$$R_{\text{кор}123}(\theta_1, h) = \frac{T_1(\theta_1, h) - T_2(\theta_1, h)}{T_{a1}(\theta_1) - T_0} \quad (10)$$

С учетом линейной зависимости выходного сигнала радиометра u от радиояркостной температуры объекта соотношение (10) преобразуется к виду:

$$R_{\text{кор}123}(\theta_1, h) = \frac{u_1(\theta_1, h) - u_2(\theta_1, h)}{u_{a1}(\theta_1) - u_0} \quad (11)$$

Таким образом, для измерения $R_{\text{кор}123}$ достаточно обеспечить выполнение условий калибровки «искусственной Луны» без необходимости абсолютных измерений радиояркостной температуры исследуемых образцов.

Методика измерения коэффициента отражения плоских образцов подстилающей поверхности

Коэффициент отражения плоской поверхности среды с постоянной по объему комплексной диэлектрической проницаемостью измеряется достаточно просто методом относительных измерений при использовании двух эталонов: черного тела при

термодинамической температуре исследуемого образца и плоского металлического отражателя (Голунов, 1984). При выполнении вышеперечисленных условий метода «искусственной Луны» коэффициент отражения образца R вычисляется на основе результатов измерений следующим образом:

$$R = \frac{u_{\text{чТ}} - u}{u_{\text{чТ}} - u_{\text{м}}}, \quad (12)$$

где u , $u_{\text{чТ}}$ и $u_{\text{м}}$ – отклики выходного сигнала радиометра на интенсивности излучения образца, черного тела и металлического листа соответственно.

В соответствии с этой методикой были измерены поляризационные коэффициенты отражения керамической плитки, использованной в качестве плоской подстилающей среды при рассматриваемых ниже измерениях коэффициента отражения снега.

Измерительный комплекс

Методика реализована с помощью двухполяризационного радиометра на частоте 94 ГГц. В качестве приемной антенны использовалась диэлектрическая линза диаметром 0,2 м при фокусном расстоянии 0,4 м. Радиометр вместе с линзой размещались внутри поглощающего короба, что способствовало стабилизации температуры излучения бокового фона рупорной облучателя линзы. Схема измерений показана на рисунке 2.

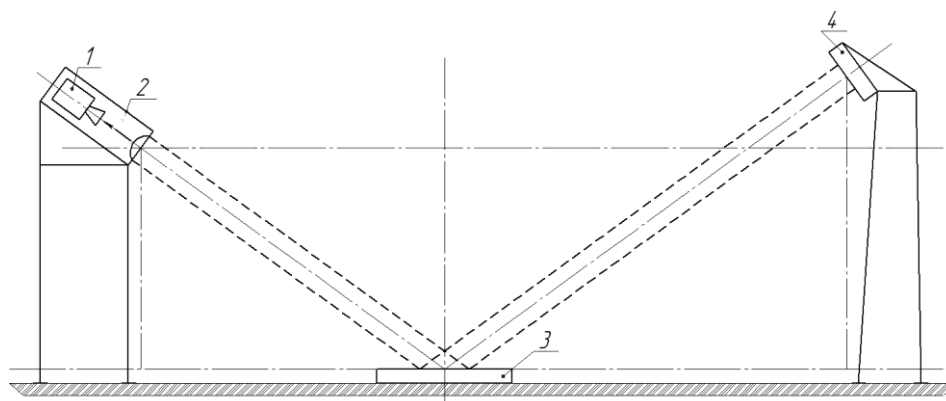


Рис.2. Схема измерения зеркальной составляющей отражения снега:

1 – радиометр, 2 – поглощающий короб с линзой, 3 – исследуемый образец, 4 – черное тело (ДЧТ).

Тепловое излучение исследуемых образцов принималось при угле 55° от надира. Расстояние от линзы до образцов вдоль луча составляло 1,5 м. В качестве исследуемого объекта использовался слой снега, помещаемый поочередно на металлический лист, песчаный грунт, керамическую плитку и ЧТ. Калибровка относительных и абсолютных измерений осуществлялась с помощью двух ЧТ, одно из которых имело равную со снегом термодинамическую температуру, а другое охлаждалось жидким азотом. Все выше перечисленные образцы и оба ЧТ имели прямоугольную форму при поперечных и продольных размерах 0,4 м и 0,6 м соответственно. Размеры сечения пучка антенны в плоскости образцов были в 1,5 раза меньше размеров образцов. При измерениях все образцы и черные тела поочередно устанавливались на одно и то же место на измерительном столе. Дополнительное ЧТ (ДЧТ), предназначенное для создания зеркальной «теплой» подсветки, имело круглую форму диаметром 0,5 м. При измерениях оно либо отсутствовало, либо устанавливалось перпендикулярно зеркальному лучу на расстоянии 2,05 м от образцов вдоль луча и полностью перекрывало отраженный луч антенны.

Результаты измерений

Был исследован достаточно однородный образец 4-х суточного свежеснегавшего снега, вырезанный из снежного покрова при минимальных нарушениях его структуры. Этот образец помещался в прямоугольный лоток с основанием из натянутой лавсановой пленки толщиной 40 мкм. Такой лоток позволял устанавливать образец снега на поверхности различных сред без нарушения граничных условий.

В таблице 1 приведены результаты измерения радиоярких температур чистой атмосферы и слоя 4-х суточного свежеснегавшего снега толщиной 0,04 м и объемной плотностью $\rho_v=0,177$ при термодинамической температуре -2°C , лежащего на поверхностях ЧТ, керамики и металлического листа. Все перечисленные среды

Таблица 1. Измеренные значения радиоярких температур чистой атмосферы и слоя снега

<i>Поляризация</i>	<i>Снег на ЧТ</i>	<i>Снег на керамике</i>	<i>Снег на металле</i>	<i>Чистая атмосфера</i>
Вертикальная	255К	250К	130К	44К
Горизонтальная	248К	219К	116К	42К
Поляризационная разность	7К	31К	14К	2К

находились в термодинамическом равновесии со снегом и приземным слоем атмосферы, т.е. при температуре -2°C . Использованный радиометр имел чувствительность, которая позволила реализовать точность измерения не хуже 2K .

Радиояркость чистоты атмосферы, как известно, не зависит от вида поляризации. В нашем случае радиометром принималось излучение атмосферы, отраженное металлическим листом. В связи с этим, как показано в (Зражевский и др. 2006), на частоте 94 ГГц может возникать ошибка до 2K в результатах измерения радиояркости температуры, обусловленная применением, с одной стороны, приближения Релея-Джинса при калибровочной процедуре, с другой стороны, металла с конечной проводимостью. Вероятнее всего, именно по этой причине, как следует из таблицы 1, поляризационная разность радиояркости температуры атмосферы оказалась равной максимально возможной ошибке измерений.

Из таблицы 1 следует также, что поляризационная разность радиояркости температур во всех случаях отличается от нуля, при этом ее наибольшее значение соответствует случаю расположения слоя снега на керамике. Это следовало ожидать, поскольку при угле 55° коэффициенты отражения плоской поверхности керамики, в отличие от ЧТ и металла, зависят от вида поляризации. Действительно, в результате измерений коэффициентов отражения R_k керамики с использованием соотношения (11), получено, что при вертикальной поляризации $R_{\text{кверт}}=0,03\dots 0,04$, а при горизонтальной - $R_{\text{гор}}=0,3\dots 0,31$. Из расчетов, выполненных на основе формул Френеля (4)-(5), следует, что показатель преломления керамики $n_k=2,13\dots 2,18$.

Проблема учета преломления в снеге

Для расчета показателя преломления n_2 снега используют различные эмпирические формулы (Голунов, Коротков, Сухонин, 1990), приводящие, однако, к близким результатам. Воспользуемся наиболее простой из них:

$$n_2 = 1 + 0.83\rho_v \quad (12)$$

В соответствии с (9) показатель преломления исследуемого снега при $\rho_v=0,177$, $n_2=1,147$. Коэффициенты отражения поверхности снега на вертикальной и горизонтальной поляризациях, рассчитанные по формулам (4) и (5), имеют пренебрежимо малые

значения: $r_{\phi 12 \text{верт}}=0,001$ и $r_{\phi 12 \text{гор}}=0,028$. Другие данные, необходимые для нижеследующих расчетов, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Исходные данные для расчетов коэффициента зеркального отражения по формуле (2)

Поляризация	θ_2		n_{23}		$r_{\phi 23}$ (слой снега на керамике)	
	С учетом преломления	Без учета преломления	С учетом преломления	Без учета преломления	С учетом преломления	Без учета преломления
Вертикальная	45 ⁰ ,575	55 ⁰	1,85...1,9	2,13...2,18	0,028...0,032	0,02...0,022
Горизонтальная					0,175...0,186	0,3...0,31

Далее, учитывая эффекты преломления в снеге, выполним анализ результатов расчета коэффициентов зеркального отражения по соотношению (6) и коэффициента экстинкции снега по соотношению, следующему из (2):

$$k_e = \frac{1}{2h \sec \theta_2} \left\{ \ln [R_{\text{кор}123}(\theta_1) - r_{\phi 12}(\theta_1)] - \right. \\ \left. - \ln \left\{ [(1 - r_{\phi 12}(\theta_1))^2 r_{\phi 23}(\theta_2) + [R_{\text{кор}123}(\theta_1) - r_{\phi 12}(\theta_1)] r_{\phi 12}(\theta_1) r_{\phi 23}(\theta_2)] \right\} \right\} \quad (13)$$

Результаты обработки экспериментальных данных приведены в таблице 3.

Таблица 3. Экспериментальные значения коэффициента зеркального отражения и расчетные значения коэффициента экстинкции снега с учетом преломления

Поляризация	Снег на ЧТ	Снег на керамике		Снег на металле	
	$R_{\text{кор}123}$	$R_{\text{кор}123}$	$k_e, \text{см}^{-1}$	$R_{\text{кор}123}$	$k_e, \text{см}^{-1}$
вертикальная	0	0,034	0	0,366	0,088
горизонтальная	0	0,113	0,038...0,044	0,361	0,089

Из таблицы 3 следует, что, во-первых, в случае, когда слой снега лежал на поверхности ЧТ, коэффициент зеркального отражения от поверхности снега на обеих поляризациях оказался практически нулевым. Во-вторых, в случае, когда слой снега лежал на поверхности керамики, вычисленное значение k_e для вертикальной поляризации тоже оказалось практически нулевым, но это связано со слабым отражением от поверхности керамики и ошибками измерений. В-третьих, на горизонтальной поляризации наблюдается сильное расхождение (больше, чем в 2 раза) между значениями k_e , рассчитанными при учете эффектов преломления для керамической и металлической подстилающих поверхностей. Это расхождение существенно превосходит ошибки измерений. Очевидно, коэффициент экстинкции определяется только структурой снега и

не может зависеть от свойств подстилающей поверхности. Следовательно, причина расхождения может быть связана с некорректностью формулы (13).

В качестве альтернативного варианта рассмотрим результаты расчета k_e без учета преломления падающего излучения в снеге, т.е. при $\theta_1=\theta_2$ и $r_{\phi 23}=r_{\phi 13}$:

$$k_e = \frac{1}{2h \sec \theta_1} \left\{ \ln [R_{\text{кор}123}(\theta_1) - r_{\phi 12}(\theta_1)] - \right. \\ \left. - \ln \left\{ [(1 - r_{\phi 12}(\theta_1))^2 r_{\phi 13}(\theta_1) + [R_{\text{кор}123}(\theta_1) - r_{\phi 12}(\theta_1)] r_{\phi 12}(\theta_1) r_{\phi 13}(\theta_1)] \right\} \right\} \quad (14)$$

Результаты расчетов по формуле (14) приведены в таблице 4.

Таблица 4. Экспериментальные значения коэффициента зеркального отражения и расчетные значения коэффициента экстинкции снега без учета преломления

<i>Поляризация</i>	<i>Снег на керамике</i>		<i>Снег на металле</i>	
	$R_{\text{кор}123}$	$k_e, \text{см}^{-1}$	$R_{\text{кор}123}$	$k_e, \text{см}^{-1}$
вертикальная	0,034	-	0,363	0,073
горизонтальная	0,113	0,07...0,0726	0,361	0,073

Видим, что в этом случае значения коэффициента экстинкции снега практически не зависят от вида подстилающей поверхности.

Таким образом, результаты измерений зеркальной составляющей отражения сухого снега на частоте 94 ГГц приводят к существенному расхождению с закономерностями преломления и отражения, свойственными сплошным нерассеивающим средам.

Обсуждение результатов

Проблема корректного расчета преломления и отражения электромагнитных волн в случайных плотных дискретных средах существует со времен начала развития оптической спектроскопии (Розенберг, 1959). При размерах частиц, малых в сравнении с длиной волны, проблема решена с помощью введения таких величин, как эффективный показатель преломления, эффективное действующее поле, эффективный тензор диэлектрической проницаемости (Розенберг, 1959; Барабаненков, 1975; Tsang, Kong, 2001), которые зависят от формы, размера, плотности и показателя преломления частиц, а также от статистических свойств их пространственного распределения.

Проблема отражения и преломления света на границе рассеивающей среды наиболее подробно рассмотрена в обзоре (Розенберг, 1959). Рассмотрение основано на

разделении сред на две категории, отличающиеся видом связующей среды. К первой категории отнесены бинарные смеси, в которых рассеивающие частицы погружены в среду, идентичную с граничащей средой (например, воздух). К этой категории относится также граничащий с атмосферой снег, как смесь льда и воздуха). Ко второй категории отнесены среды, в которых связующие и граничащие среды отличаются (например, молочные стекла, эмульсии, лаки и т.п.). К примерам таких сред следует отнести также лед с пузырьками воздуха.

Показано, что в случае крупных частиц в средах первой категории эффективные показатели преломления для явлений отражения и преломления оказываются различными и существенно зависящими от угла падения. Формулы Френеля при этом получаются только как предельный случай при переходе к квазиоднородной молекулярной среде с индикатрисой рассеяния Релея, но только для случая малого показателя преломления среды ($n=1+\delta$, $\delta \ll 1$). Альbedo границы раздела двух рассеивающих сред с одинаковой связующей средой (одна из сред может быть не рассеивающей) заведомо равно нулю (во всяком случае, вне области зеркального отражения). Кроме того, отмечено, что эффект зеркального отражения становится ощутимым только при очень больших вертикальных углах (или при очень малых углах скольжения).

В случае второй категории сред существование границы между связующим веществом двухфазной рассеивающей среды и ограничивающей ее однофазной нерассеивающей средой обуславливает существование резко выраженных граничных эффектов (отражение, преломление), характер которых существенно зависит от вида поверхности (гладкой или шероховатой) и описывается формулами Френеля.

Таким образом, уже к 1960 году в оптике была заложена основа для прогнозирования эффектов преломления и отражения в случайных плотных дискретных средах с крупными частицами. С тех пор и до настоящего времени теория многократного рассеяния волн в плотных случайных дискретных средах, включая снежный покров, успешно развивалась только в приближении мелких частиц (Tsang, Kong, 2001).

В данной работе исследован 4-х суточный свежеснеговывпавший снег на длине волны 3,2 мм. Можно было бы ожидать, что рассеивающие частицы такого снега намного меньше длины волны, и поэтому к нему применимо приближение эффективного показателя преломления. Следовательно, должны были наблюдаться соответствующие эффекты преломления и отражения.

Однако, свежеснеговывпавший снег сформирован из снежинок, размер которых в рассматриваемом случае соизмерим с длиной волны. В этом случае снежинки следует

рассматривать как кластеры, рассеяние на которых, как известно (Tsang, Kong, 2001), может быть существенно сильнее, чем на образующих их мелких частицах. Этот эффект проявляется тем сильнее, чем ниже плотность снега (Голунов, Хохлов, 2017). Таким образом, исследованный снег, имевший достаточно низкую объемную плотность ($\rho_v=0,177$), следует рассматривать как случайную среду с частицами, соизмеримыми с длиной волны.

Сухой снег относится в соответствии с вышеприведенной классификацией к средам первой категории, имеющим связующую среду, идентичную с граничащей средой. Следовательно, интенсивность зеркального отражения от его поверхности становится значимой только при очень больших вертикальных углах. Если рассеивающие частицы соизмеримы или больше длины волны, то введение эффективного показателя преломления не имеет строгого обоснования. Следовательно, справедливость закона Снеллиуса может быть проверена только методом экспериментального исследования.

Результаты данной работы показали, что в исследованном снеге излучение на частоте 94 ГГц не преломляется и отражается от плоской подстилающей поверхности как от границы воздух-подстилающая поверхность. Для определения границ применимости закона Снеллиуса к описанию зеркального отражения от слоя сухого снега требуется выполнить более широкие и глубокие экспериментальные исследования. К сожалению, из-за аномально теплой зимы в сезоне 2019-2020 г. в Подмосковье оказалось невозможным выполнить более широкий комплекс экспериментальных исследований.

Заключение

Разработан метод измерения коэффициента зеркального отражения теплового излучения снежного покрова, основанный на создании контраста радиояркой температуры подсвечивающего излучения в зеркальном направлении. Метод реализован на частоте 94 ГГц при приеме излучения на ортогональных поляризациях при вертикальном угле приема 55° . Контраст радиоярких температур подсвечивающего излучения в зеркальном направлении создавался за счет последовательной замены излучения атмосферы на излучение черного тела при термодинамической температуре приземного слоя атмосферы.

Выполнены поляризационные измерения теплового излучения слоя сухого 4-х суточного свежеснежного снега, помещенного последовательно на поверхности

металлического листа, керамической плитки и двух черных тел с термодинамическими температурами приземного слоя атмосферы и жидкого азота. Используя экспериментальные данные измерения коэффициента зеркального отражения, вычислены значения коэффициента экстинкции снега, лежащего на поверхностях керамической плитки и металлического листа. Вычисления выполнены в рамках двух альтернативных моделей, одна из которых учитывает эффективный показатель преломления снега, а другая не учитывает. Оказалось, что только в рамках последней модели значения коэффициента экстинкции не зависели от вида подстилающей среды. Это означает, что излучение на частоте 94 ГГц в исследованном снеге не преломляется.

Работа выполнена по государственному заданию ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН при финансовой поддержке РФФИ (грант № А18-05-00427).

Список литературы

1. *Барабаненков Ю.Н.* Многократное рассеяние волн на ансамбле частиц и теория переноса излучения // *Успехи физ. наук.* 1975. Т.117. Вып.1. С. 49-78.
2. *Голунов В.А.* Способ измерения излучательных характеристик естественных покровов: А.с. № 1267865 А СССР, МПК G 01 J 5/52. Приоритет 19.10.84 г.
3. *Голунов В.А.* Способ измерения коэффициента излучения естественных покровов: А.с. № 1363937 А1 СССР // МПК G 01 J 5/52. Приоритет 22.11.85 г.
4. *Голунов В.А.* Тепловое излучение сухого однородного снежного покрова в диапазоне ММВ. // *Успехи современной радиоэлектроники.* 2002. № 6. С. 35-44.
5. *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> DOI 10.30898/1684-1719.2018.10.15
6. *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. Т.41. С. 68-136.
7. *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>
8. *Зражевский А.Ю., Голунов В.А., Гапонов С.С., Новичихин Е.П., Терентьев Е.Б., Чернушич А.П.* Особенности и возможности поляризационного стереорадиовидения в ММ диапазоне волн // *Радиотехника.* 2006. № 5. С. 19-29.
9. *Розенберг Г.В.* Абсорбционная спектроскопия диспергированных веществ // *Успехи физ. наук.* 1959. Т. 69. Вып. 1. С. 57-104.
10. *Цейтлин Н.М.* Антенная техника и радиоастрономия. М.: Советское радио. 1976. 352 с.

11. *Швецов А.А.* Способ определения излучательной способности природных объектов: А.с. 1670649 А1 СССР // Б. И. 1991 № 30. С. 15.
12. *Golunov V.A., Barabanenkov 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 // PIRS Proceedings. Moscow. Russia. August 19-23. 2012. P. 1415-1418.
13. *Tsang L., Kong J.A.* Scattering of electromagnetic waves: New York, Advanced Topics. Wiley-Interscience, 2001. 413 p.

Method and results of passive measurement of the specular component of snow cover reflection in the millimeter wave range

V.A. Golunov

*Fryazino Branch, Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, RAS,
Fryazino, Moscow oblast, 141190, Russia*

E-mail: golsnow@mail.ru

A method has been developed for measuring the specular reflection from snow cover, based on the contrast of the radio brightness temperature of the illuminating radiation in the specular direction. The method is implemented at an incidence angle of 55° using a radiometer operating at 94 GHz and receiving both vertically and horizontally polarized radiation. The contrast of the radio brightness temperatures of the illuminating radiation in the specular direction is created by successively replacing atmospheric radiation with blackbody radiation at ambient temperature.

As the object under study, a fresh snow layer is used. The volume density of the snow sample is 0.177, the thickness is 0.04 m, the thermodynamic temperature is 271 K, the transverse size is 0.4 m, and the longitudinal size is 0.6 m. The sample is placed alternatively on a metal sheet, sandy soil, ceramic tile, blackbody at ambient temperature, and blackbody at liquid nitrogen temperature.

Using the experimental data of measuring the specular reflection coefficient, the values of the extinction coefficient of the snow lying on the surfaces of ceramic tiles and metal sheets are calculated. The calculations are performed within the framework of two alternative models, one of which takes into account the effective refractive index of snow, and the other does not. It is shown that only within the framework of the latter model the values of the extinction coefficient do not depend on the type of underlying medium. This means that radiation at 94 GHz does not refract at the air-snow and snow- underlying environment boundaries.

Keywords: snow, millimeter waves, thermal radiation, specular reflection, refraction

1. Barabanenkov Yu.N. Mnogokratnoe rasseyanie voln na ansamble chastic i teoriya perenosa izlucheniya (Multiple scattering of waves by ensemble of particles and the radiative transport), *Uspekhi fiz. Nauk*, 1975, Vol. 117, Issue 1, pp. 49-78.
2. Golunov V.A. Sposob izmereniya izluchatel'nykh karakteristik estestvennykh pokrovov (The method of measuring the radiative characteristics of natural covers), *Avtorskoe svidetel'stvo*, No 1267865, A1 SSSR MPK G 01 J 5/52, Prioritet 19.10.84.
3. Golunov V.A. Sposob izmereniya koeffitsienta izlucheniya estestvennykh pokrovov (The method of measuring the emissivity of natural covers), *Avtorskoe svidetel'stvo*, No 1363937 A1 SSSR /, MPK G 01 J 5/52. Prioritet 22.11.1985.
4. Golunov V.A. Teplovoe izluchenie suhogo odnorodnogo snezhnogo pokrova v diapazone MMV (Thermal emission from dry homogeneous snow cover in the MM wave range), *Uspehi sovremennoj radioelektroniki*, 2002, No. 6, pp. 35-44.
5. Golunov V.A., Barabanenkov 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, *PIERS Proceedings*. Moscow. Russia. August 19-23, 2012, pp. 1415-1418.
6. Golunov V.A. Laboratornaya metodika eksperimental'nogo issledovaniya zakonomernosti mikrovolnovogo teplovogo izlucheniya suhogo snezhnogo pokrova (Laboratory method of experimental study of the regularities of microwave thermal radiation of dry snow cover), *Electronic scientific journal "Zhurnal radioelektroniki"*, 2018, No. 10, available at: <http://jre.cplire.ru/jre/oct18/15/text.pdf> DOI [10.30898/1684-1719.2018.10.15](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.10.15)
7. Golunov V.A., Korotkov V.A., Sukhonin E.V. Effekty rasseyaniya pri izluchenii millimetrovykh voln atmosferoi i snezhnym pokrovom (Scattering effects upon emission of millimeter waves from the atmosphere and snow cover), *Itogi nauki i tekhniki, ser. Radiotekhnika*, M., VINITI, 1990, Vol. 41, pp. 68-136.
8. Golunov V.A., Khokhlov G.I. Pokazatel' stepeni chastotnoi zavisimosti intensivnosti obratnogo rasseyaniya mikrovolnovogo izlucheniya v sukhom snege i iskusstvennykh snegopodobnykh sredakh (The exponent of the frequency dependence of microwave backscattering from dry snow and artificial snow-like media), *Electronic scientific journal "Zhurnal radioelektroniki"*, 2017, No. 9, available at: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/6/text.pdf>
9. Zrazhevskii A.Yu., Golunov V.A., Gaponov S.S., Novichikhin E.P., Terent'ev E.B., Chernushich A.P. Osobennosti i vozmozhnosti polarizatsionnogo stereoradiovideniya v MM diapazone voln (Features and capabilities of polarized stereo radio vision in the MM wavelength range), *Radiotekhnika*, 2006, No. 5, pp. 19-29.
10. Rozenberg G.V. Absorbtsionnaya spektroskopiya dispergirovannykh veshchestv (Dispersion absorption spectroscopy), *Uspekhi fiz. nauk*, 1959, Vol. 69, Issue 1, pp. 57-104.
11. Tseitlin N.M., *Antennaya tekhnika i radioastronomiya* (Antenna technology and radio astronomy), Moscow: Sovetskoe radio, 1976. 352 p.
12. Shvetsov A.A. Sposob opredeleniya izluchatel'noi sposobnosti prirodnykh ob'ektov (The method for determining the emissivity of natural objects), *Avtorskoe svidetel'stvo*, No. 1670649 A1 SSSR, *Byulleten' izobretenii*, 1991, No. 30, p. 15.
13. Tsang L., Kong J.A. *Scattering of electromagnetic waves*: New York, Advanced Topics. Wiley-Interscience, 2001. 413 p.