

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, Фрязино, 141190, Московская обл., 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 приёме излучения на ортогональных поляризациях при вертикальном угле приёма 55°. Контраст радиояркой температуры подсвечивающего излучения в зеркальном направлении создавался за счёт последовательной замены излучения атмосферы на излучение чёрного тела при термодинамической температуре приземного слоя атмосферы. Выполнены поляризационные измерения теплового излучения слоя сухого свежеснежного покрова, помещённого последовательно на поверхность металлического листа, керамической плитки и двух чёрных тел с термодинамической температурой приземного слоя атмосферы и жидкого азота. С использованием экспериментальных данных измерения коэффициента зеркального отражения вычислены значения коэффициента экстинкции снега, лежащего на поверхности 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

Одобрена к печати: 21.07.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-38-48

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 отражённого 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 либо 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 (Способ..., 1984), что для осуществления таких измерений в натуральных условиях достаточно использовать два эталона, один из которых может быть чёрным телом (ЧТ), 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 на-

турных условиях такие измерения осуществляются с использованием вариаций вертикального поглощения безоблачной атмосферы в её окнах прозрачности (Способ..., 1985), на двух частотах вблизи линий поглощения атмосферы (Способ..., 1991), в лабораторных условиях в камере с «холодной» подсветкой (Голунов, 2018; Golunov, Varabanenkov, 2012).

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 объёмного 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*.

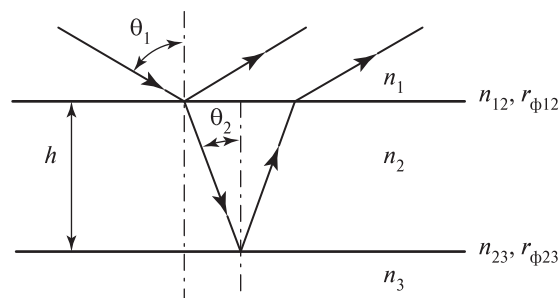


Рис. 1. Зеркальное отражение плоской волны от плоского слоя

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

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

где \tilde{R} — суммарный коэффициент отражения, обусловленный всеми выходящими из слоя в обратном направлении потоками рассеянного (диффузного) излучения; $R_{\text{кор}123}(\theta_1, h)$ — коэффициент зеркального отражения интенсивности падающего пространственно-когерентного излучения:

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

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

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

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:

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

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

где $n_{ij} = n_j/n_i$ — показатель преломления границы, «гор» и «верт» — горизонтальная и вертикальная поляризация соответственно.

Рассмотрим случай слоя сухого снега с плоской поверхностью раздела и однородными профилями его термодинамической температуры и структуры. В предположении равенства значений термодинамической температуры слоя снега и подстилающей среды их результирующая радиояркая температура с учётом отношения (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 свёрткой бистатической индикатрисы рассеяния снега и угловой зависимости радиояркой температуры атмосферы.

Целью настоящей 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 счёт использования в качестве эталонов двух чёрных тел, одно из которых находилось в термодинамическом равновесии с исследуемым объектом, другое — с жидким азотом. При этом строго выполнялись 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 (чёрные тела, слои снега, образцы подстилающей поверхности) имели идентичные формы поверхности и её 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 $T_a^* = \text{const}$, 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 радиояркой температуры T_a чистой атмосферы приводит к изменению радиояркой температуры T_a^* . Задача решается, если при

измерении T_2 вместо атмосферы с температурой излучения T_{a2} использовать дополнительное чёрное тело (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) получим:

$$T_2(\theta_1, h) = [1 - R_{\text{кор123}}(\theta_1, h) - \tilde{R}(h)]T_0 + R_{\text{кор123}}(\theta_1, h)T_0 + \tilde{R}(h)T_a^*, \quad (9)$$

и тогда

$$R_{\text{кор123}}(\theta_1, h) = \frac{T_1(\theta_1, h) - T_2(\theta_1, h)}{T_{a1}(\theta_1) - T_0}. \quad (10)$$

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

$$R_{\text{кор123}}(\theta_1, h) = \frac{u_1(\theta_1, h) - u_2(\theta_1, h)}{u_{a1}(\theta_1) - u_0}. \quad (11)$$

Таким образом, для измерения $R_{\text{кор123}}$ достаточно обеспечить выполнение условий калибровки «искусственной Луны» без необходимости абсолютных измерений радиояростной температуры исследуемых образцов.

Методика измерения коэффициента отражения плоских образцов подстилающей поверхности

Коэффициент отражения плоской поверхности среды с постоянной по объёму комплексной диэлектрической проницаемостью измеряется достаточно просто методом относительных измерений при использовании двух эталонов: ЧТ 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 интенсивность излучения образца, ЧТ 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 приёмной антенны использовалась диэлектрическая линза диаметром 0,2 м при фокусном расстоянии 0,4 м. Радиометр вместе с линзой размещался внутри поглощающего короба, что способствовало стабилизации температуры излучения бокового фона рупорного облучателя линзы. Схема измерений показана на *рис. 2* (см. с. 42).

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 поочерёдно 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.

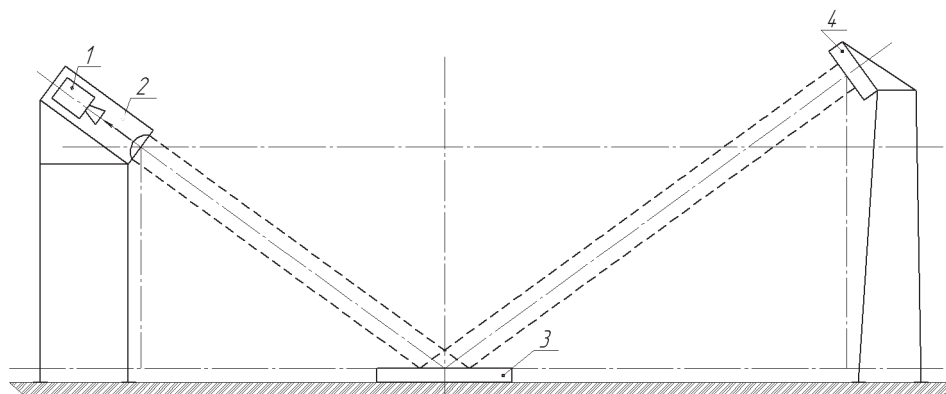


Рис. 2. Схема измерения зеркальной составляющей отражения снега:
1 — радиометр; 2 — поглощающий короб с линзой; 3 — исследуемый образец; 4 — ЧТ

Все вышеперечисленные образцы и оба ЧТ имели прямоугольную форму при поперечных и продольных размерах 0,4 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 чёрные тела поочерёдно устанавливались на одно и то же место на измерительном столе. Дополнительное ЧТ, предназначенное для создания зеркальной «тёплой» 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 отражённый луч антенны.

Результаты измерений

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

В табл. 1 приведены результаты измерения радиояркостной температуры чистой атмосферы и слоя 4-суточного свежеснежавшего снега толщиной 0,04 м и объёмной плотностью $\rho_v = 0,177$ при термодинамической температуре -2°C , лежащего на поверхностях ЧТ, керамики и металлического листа. Все перечисленные среды находились в термодинамическом равновесии со снегом и приземным слоем атмосферы, т. е. при температуре -2°C .

Таблица 1. Измеренные значения радиояркостной температуры чистой атмосферы и слоя снега

Поляризация	Снег на чёрном теле, К	Снег на керамике, К	Снег на металле, К	Чистая атмосфера, К
Вертикальная	255	250	130	44
Горизонтальная	248	219	116	42
Поляризационная разность	7	31	14	2

Использованный радиометр имел чувствительность, которая позволила реализовать точность измерения не хуже 2 К.

Радиояркостная температура чистой атмосферы, как известно, не зависит от вида поляризации. В нашем случае радиометром принималось излучение атмосферы, отражённое металлическим листом. В связи с этим, как показано в работе (Зражевский и др., 2006), на частоте 94 ГГц может возникать ошибка до 2 К в результатах измерения радиояркостной тем-

пературы, обусловленная применением, с одной стороны, приближения Релея–Джинса при калибровочной процедуре, с другой — металла с конечной проводимостью. Вероятнее всего, именно по этой причине, как следует из *табл. 1*, поляризационная разность радиояркой температуры атмосферы оказалась равной максимально возможной ошибке измерений.

Из *табл. 1* следует также, что поляризационная разность радиояркой температуры во всех случаях отличается от нуля, при этом её наибольшее значение соответствует случаю расположения слоя снега на керамике. Этого 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 $R_{k\text{ верт}} = 0,03...0,04$, а при горизонтальной $R_{k\text{ гор}} = 0,3...0,31$. Из расчётов, выполненных на основе формул Френеля (4)–(5), следует, что показатель преломления керамики $n_k = 2,13...2,18$.

Проблема учёта преломления в снеге

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

$$n_2 = 1 + 0,83\rho_v. \quad (13)$$

В соответствии с отношением (9) показатель преломления исследуемого снега при $\rho_v = 0,177$ принимает значение $n_2 = 1,147$. Коэффициенты отражения поверхности снега на вертикальной и горизонтальной поляризации, 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 расчётов, приведены в *табл. 2*.

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

Поляризация	θ_2 , град		n_{23}		$r_{\phi 23}$ (слой снега на керамике)	
	С учётом преломления	Без учёта преломления	С учётом преломления	Без учёта преломления	С учётом преломления	Без учёта преломления
Вертикальная	45,575	55	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 расчёта коэффициентов зеркального отражения по соотношению (6) и коэффициента экстинкции снега по соотношению, следующему из формулы (2):

$$k_e = \frac{1}{2h \cdot \sec \theta_2} \left\{ \ln \left[R_{\text{кор}123}(\theta_1) - r_{\phi 12}(\theta_1) \right] - \ln \left\{ \frac{[(1 - r_{\phi 12}(\theta_1))^2 r_{\phi 23}(\theta_2) + R_{\text{кор}123}(\theta_1) - r_{\phi 12}(\theta_1)] r_{\phi 12}(\theta_1) r_{\phi 23}(\theta_2)}{+ [R_{\text{кор}123}(\theta_1) - r_{\phi 12}(\theta_1)] r_{\phi 12}(\theta_1) r_{\phi 23}(\theta_2)} \right\} \right\}. \quad (14)$$

Результаты обработки экспериментальных данных приведены в *табл. 3*.

Таблица 3. Экспериментальные значения коэффициента зеркального отражения и расчётные значения коэффициента экстинкции снега с учётом преломления

Поляризация	Снег на чёрном теле	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 *табл. 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 два раза) между значениями k_e , рассчитанными при учёте эффектов преломления для керамической и металлической подстилающей поверхности. 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 (14).

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

$$k_e = \frac{1}{2h \cdot \sec \theta_1} \left\{ \ln [R_{\text{кор}123}(\theta_1) - r_{\phi 12}(\theta_1)] - \ln \left[\begin{aligned} & [(1 - r_{\phi 12}(\theta_1))^2 r_{\phi 13}(\theta_1) + \\ & + [R_{\text{кор}123}(\theta_1) - r_{\phi 12}(\theta_1)] r_{\phi 12}(\theta_1) r_{\phi 13}(\theta_1)] \end{aligned} \right] \right\}. \quad (15)$$

Результаты расчётов по формуле (15) приведены в *табл. 4*.

Таблица 4. Экспериментальные значения коэффициента зеркального отражения и расчётные значения коэффициента экстинкции снега без учёта преломления

Поляризация	Снег на керамике		Снег на металле	
	$R_{\text{кор}123}$	$k_e, \text{см}^{-1}$	$R_{\text{кор}123}$	$k_e, \text{см}^{-1}$
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 расчёта преломления и отражения электромагнитных волн в случайных плотных дискретных средах существует со времён 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 (Барабаненков, 1975; Розенберг, 1959; 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 стёкла, эмульсии, лаки и т. п.). К примерам таких сред следует отнести также лёд 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 ($n = 1 + \delta$, $\delta \ll 1$). Альбедо границы раздела двух рассеивающих сред с одинаковой связующей средой (одна из сред может быть нерассеивающей) 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 её 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 г. 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 настоящей работе исследован 4-суточный свежеснежный покров на длине волны 3,2 мм. Можно было 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 свежеснежный покров сформирован из снежинок, размер которых в рассматриваемом случае соизмерим с длиной волны. Здесь 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 объёмную плотность ($\rho_v = 0,177$), следует рассматривать как случайную среду с частицами, соизмеримыми с длиной волны.

Сухой снег относится в соответствии с вышеприведённой 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 тёплой зимы в сезоне 2019/2020 гг. в Подмоскovie оказалось невозможным провести более широкий комплекс экспериментальных исследований.

Заключение

Разработан метод измерения коэффициента зеркального отражения теплового излучения снежного покрова, основанный на создании контраста радиояркостной температуры подсвечивающего излучения в зеркальном направлении. Метод реализован на частоте 94 ГГц

при приёме излучения на ортогональных поляризациях при вертикальном угле приёма 55° . Контраст радиояркой температуры подсвечивающего излучения в зеркальном направлении создавался за счёт последовательной замены излучения атмосферы на излучение чёрного тела при термодинамической температуре приземного слоя атмосферы.

Выполнены поляризационные измерения теплового излучения слоя сухого 4-суточного свежеснежного покрова, помещённого последовательно на поверхность металлического листа, керамической плитки и двух чёрных тел с термодинамической температурой приземного слоя атмосферы и жидкого азота. С использованием экспериментальных данных измерения коэффициента зеркального отражения вычислены значения коэффициента экстинкции снега, лежащего на поверхности 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 Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № А18-05-00427).

Литература

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.* Тепловое излучение сухого однородного снежного покрова в диапазоне ММВ // *Успехи современной радиоэлектроники.* 2002. № 6. С. 35–44.
3. *Голунов В. А.* Лабораторная методика экспериментального исследования закономерностей микроволнового теплового излучения сухого снежного покрова // *Журн. радиоэлектроники.* 2018. № 10. 13 с. DOI: 10.30898/1684-1719.2018.10.15. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct18/15/text.pdf>.
4. *Голунов В. А., Хохлов Г. И.* Показатель степени частотной зависимости интенсивности обратного рассеяния микроволнового излучения в сухом снеге и искусственных снегоподобных средах // *Журн. радиоэлектроники.* 2017. № 9. 16 с. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/6/text.pdf>.
5. *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.
6. *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.
7. *Розенберг Г. В.* Абсорбционная спектроскопия диспергированных веществ // *Успехи физ. наук.* 1959. Т. 69. Вып. 1. С. 57–104.
8. Способ измерения излучательных характеристик естественных покровов: а. с. 1267865 СССР / Голунов В. А. Приоритет 19.10.84.
9. Способ измерения коэффициента излучения естественных покровов: а. с. 1363937 СССР / Голунов В. А. Приоритет 22.11.85.
10. Способ определения излучательной способности природных объектов: а. с. 1670649 СССР / Швецов А. А. № 30. 1991.
11. *Цейтлин Н. М.* Антенная техника и радиоастрономия. М.: Советское радио, 1976. 352 с.
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 // *Proc. Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS).* Moscow, Russia. 19–23 August 2012. P. 1415–1418.
13. *Tsang L., Kong J. A.* Scattering of electromagnetic waves: Advanced Topics. Wiley-Interscience, 2001. 413 p.

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

V. A. Golunov

*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino Branch
Fryazino 141190, Moscow Region, Russia
E-mail: golsnow@mail.ru*

A method for measuring the specular reflection from snow cover based on the contrast of the brightness temperature of the illuminating radiation in the specular direction has been developed. 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

Accepted: 21.07.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-38-48

References

1. Barabanenkov Yu. N., *Mnogokratnoe rasseyanie voln na ansamble chastits i teoriya perenosa izlucheniya* (Multiple scattering of waves by ensemble of particles and the radiative transport), *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1975, Vol. 117, Issue 1, pp. 49–78.
2. Golunov V.A., *Teplovoe izluchenie sukhogo odnorodnogo snezhnogo pokrova v diapazone MMV* (Thermal emission from dry homogeneous snow cover in the MM wave range), *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2002, No. 6, pp. 35–44.
3. Golunov V.A., *Laboratornaya metodika eksperimental'nogo issledovaniya zakonmernosti mikrovolnovogo teplovogo izlucheniya sukhogo snezhnogo pokrova* (Laboratory method of experimental study of the regularities of microwave thermal radiation of dry snow cover), *Zhurnal radioelektroniki*, 2018, No. 10, 13 p., DOI: 10.30898/1684-1719.2018.10.15, available at: <http://jre.cplire.ru/jre/oct18/15/text.pdf>.
4. 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), *Zhurnal radioelektroniki*, 2017, No. 9, 16 p., available at: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/6/text.pdf>.
5. Golunov V.A., Korotkov V.A., Sukhonin E. V., *Effekty rasseyaniya pri izlucheni millimetrovnykh voln atmosfery i snezhnym pokrovom* (Scattering effects upon emission of millimeter waves from the atmosphere and snow cover), *Itogi nauki i tekhniki, Ser. "Radiotekhnika"*, Moscow: VINITI, 1990, Vol. 41, pp. 68–136.
6. 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.
7. Rozenberg G.V., *Absorbtsionnaya spektroskopiya dispergirovannykh veshchestv* (Dispersion absorption spectroscopy), *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1959, Vol. 69, Issue 1, pp. 57–104.
8. *Sposob izmereniya izluchatel'nykh kharakteristik estestvennykh pokrovov* (The method of measuring the radiative characteristics of natural covers), a. s. No. 1267865 SSSR, Golunov V.A., 19.10.1984.

9. *Sposob izmereniya koeffitsienta izlucheniya estestvennykh pokrovov* (The method of measuring the emissivity of natural covers), a. s. No. 1363937 SSSR, Golunov V. A., 22.11.1985.
10. *Sposob opredeleniya izluchatel'noi sposobnosti prirodnykh ob'ektov* (The method for determining the emissivity of natural objects), a. s. No. 1670649 SSSR, Shvetsov A. A., No. 30, 1991.
11. Tseitlin N. M., *Antennaya tekhnika i radioastronomiya* (Antenna technology and radio astronomy), Moscow: Sovetskoe radio, 1976, 352 p.
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, *Proc. Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS)*, Moscow, Russia, 19–23 Aug. 2012, pp. 1415–1418.
13. Tsang L., Kong J. A., *Scattering of electromagnetic waves: Advanced Topics*, Wiley-Interscience, 2001, 413 p.