

УДК 535.36, 621.396.11

ОСОБЕННОСТИ РАССЕЯНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СУХОМ ПУШИСТОМ СНЕГЕ

В. А. Голунов, С. В. Маречек, Г. И. Хохлов

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д.1

Статья поступила в редакцию 30 мая 2018 г.

Аннотация. На частотах 22,2; 37,5; 60 и 94 ГГц измерены зависимости полных коэффициентов отражения и пропускания слоя сухого пушистого и мелкозернистого снега от толщины слоя. Экспериментальные зависимости полных коэффициентов отражения и пропускания от толщины слоя аппроксимированы соотношениями двухпотоковой теории Кубелки-Мунка. Выполнен анализ частотной зависимости коэффициента обратного рассеяния диффузной интенсивности. Установлено, что сильное влияние на интенсивность обратного рассеяния могут оказывать кластеры частиц льда, составляющих снежинки. Влияние кластеров проявляется через аномальные частотные зависимости полного коэффициента отражения полубесконечного слоя снега и коэффициента обратного рассеяния.

Ключевые слова: сухой снежный покров, тепловое излучение, микроволны, обратное рассеяние, частотная зависимость, кластеры.

Abstract. Dependences of reflectivity and transmissivity of the fluffy and fine-grained snow layer on the layer thickness were measured at frequencies of 22.2; 37.5; 60 and 94 GHz. The measurements were performed under indoor conditions using artificial "cold" illumination of the investigated snow specimens. The snow specimens were loaded into cylindrical metal containers with a diameter of 0.2 m and a length of up to 1 m. Two structures of fluffy snow with average values of a bulk density of 0.2 ... 0.3, one fine-grained structure and one structure of medium-grained snow were investigated. The experimental dependences of the reflectivity and transmissivity on the layer thickness were approximated by the Kubelka-Munch equations. The frequency dependence of the Kubelka-Munch scattering coefficient is

analyzed. It has been established that clusters of ice particles that make up snowflakes can strongly influence on the intensity of scattering. The effect of clusters is appeared as the anomalous frequency dependences of the reflectivity of a semi-infinite snow layer and the Kubelka-Munch scattering coefficient. The anomalous effect is that, firstly, the reflectivity of the semi-infinite layer of fluffy snow at a frequency of 22.5 GHz is higher than at 37.5 and 60 GHz, and secondly, the exponent of the frequency dependence of the Kubelka-Munch scattering coefficient is higher the higher the frequency of radiation. In the case of Rayleigh scattering, the exponent of the frequency dependence is known to be 4, whereas in the case of the fluffy snow it does not exceed a value of 3 even in the 60 to 94 GHz range.

Key words: dry snow cover, thermal emission, microwaves, backscattering, frequency dependence, clusters.

1. Введение

В настоящее время исследованию излучательных свойств снежного покрова уделяется значительное внимание во многих странах мира, включая США, Канаду, Швейцарию, Финляндию. Одной из целей исследований является разработка алгоритмов восстановления водного эквивалента и толщины снежного покрова при зондировании из космоса (см., например, [1-10]). Несмотря на то, что исследования активно проводятся в течение последних 40-50-ти лет, до сих пор не разработаны надежные вышеуказанные алгоритмы. Одной из основных причин этому, с нашей точки зрения, является крайне ограниченная база наземных экспериментальных данных для таких величин, как спектральные характеристики коэффициентов обратного рассеяния и коэффициентов ослабления некогерентного излучения в зависимости от основных параметров структуры снега, т.е. объемной плотности и характерного размера частиц льда.

Действительно, подавляющее количество публикаций связано с результатами обработки спутниковых данных, при этом, как правило, используются параметры снежных структур на тестовых участках, крайне

ограниченных в сравнении с пространственным разрешением зондирующих систем. Измеряемой величиной при пассивном зондировании является радиояркостьная температура. Однако, наблюдаемый снежный покров представляет собой, как правило, слоистую среду, в которой каждый слой имеет уникальный набор параметров структуры снега. Следовательно, измеренная радиояркостьная температура такого снежного покрова является величиной, интегрированной по неоднородным профилям параметров структуры снега. В этом случае интерпретация результатов измерений возможна, если известны характеристики переноса излучения в каждом слое. Очевидно, что такие характеристики могут быть получены только при исследованиях излучения однородных структур, т.е. с помощью наземных измерений.

Наиболее цитируемыми публикациями, содержащими результаты наземных измерений характеристик переноса излучения в сухом снежном покрове, являются [11-15]. В [11] приводятся экспериментальные данные по экстинкции (т.е. ослаблению пространственно-когерентного излучения) на частотах 18...90 ГГц для снега с размерами частиц 0,2...1,6 мм и плотностью 0,17...0,30 г/см³. Показано, что на частотах 18, 35 и 60 ГГц экспериментальные значения экстинкции удовлетворительно согласуются с расчетами по теории сильных флуктуаций, но на частоте 94 ГГц для крупнозернистого снега теоретические значения значительно выше экспериментальных. В дальнейшем эти экспериментальные данные были использованы для разработки модели излучения снега HUT [15], основанной на эффекте существенного доминирования интенсивности рассеяния в переднюю полусферу. В [16] показано, что модель HUT некорректно описывает пару основных величин: полные коэффициенты отражения и пропускания слоя снега. Кроме того, отметим, что интенсивность рассеяния вперед в отличие от интенсивности рассеяния назад крайне слабо влияет на яркость теплового излучения снега. Это обусловлено тем, что интенсивность рассеяния вперед определяется влиянием крупномасштабных неоднородностей, в то время как интенсивность рассеяния

назад –мелкомасштабными неоднородностями [17]. Таким образом, коэффициент экстинкции, определяемый как сумма коэффициентов поглощения и рассеяния, лишь косвенно характеризует яркость теплового излучения, особенно, на высоких частотах из-за доминирования рассеяния вперед. Подтверждением этому служит значительный разброс значений показателя степени частотной зависимости коэффициента экстинкции, вычисленных по приведенным в [11] экспериментальным данным. Диапазон разброса настолько велик, что не позволяет получить надежную оценку частотного показателя степени [16].

Существенными величинами для описания теплового излучения являются коэффициенты поглощения и обратного рассеяния. Характеристики этих коэффициентов изучались в [12] с помощью радиометров и двухпоточковой модели Кубелки-Мунка [18,19] на частотах 11...94ГГц для 20-ти структур снега. Основой эксперимента были измерения радиояркой температуры однородного слоя снега толщиной до 0,1м, помещенного последовательно на поверхности черного тела (ЧТ) и металлического листа. Коэффициенты поглощения и обратного рассеяния восстанавливались по экспериментальным данным с помощью разработанного алгоритма. В результате обработки экспериментальных данных в [12] утверждается, что коэффициент обратного рассеяния зависит от частоты с показателем степени, равным 2,55, в то время как экспериментальные значения показателя степени заполняют достаточно широкий интервал 1,75...3,32.

Частотная зависимость коэффициента обратного рассеяния изучалась также в работах [16,20,21]. В [16] экспериментальное исследование выполнено в диапазоне частот 22,2...94ГГц для четырех структур снега при размерах частиц 1...4мм, а в [20] – на частотах 37,5; 60 и 94ГГц для пяти мелкозернистых структур с размерами частиц до 1мм. В этих статьях не ставилась задача отыскания единственного значения частотного показателя степени для всех возможных структур снега. Наоборот, на основе анализа экспериментальных данных в [16, 20] установлено, что вид и параметры частотной зависимости для

каждой модельной величины определяются как структурой снега, так и интервалом частот, на которых осуществляется зондирование покрова. Более того, в [20] впервые экспериментально обнаружено сильное влияние кластеров на рассеяние миллиметровых волн в сухом мелкозернистом снеге, вследствие которого частотные зависимости ослабления и рассеяния значительно слабее теоретических, рассчитанных в приближении теории сильных флуктуаций.

Целью настоящей работы является изучение рассеивающих свойств сухого пушистого снега, в котором также могут проявляться эффекты рассеяния на кластерах.

2. Аппаратура и методика измерений

Измерения выполнены на частотах 22,2; 37,5; 60 и 94 ГГц с использованием радиометрического стенда и методики, описанных в [22]. В стенде использовалась искусственная «холодная» подсветка исследуемых образцов, что позволило измерять характеристики ослабления и излучения снега в лабораторных условиях. Для каждой исследованной структуры снега измерялись полные коэффициенты отражения R и пропускания t

Образцы самосформировавшихся структур снега аккуратно (т.е. при минимальных нарушениях структур) изымались из выбранного слоя снежного покрова, укладывались друг на друга до достижения требуемой толщины, после чего путем «ввинчивания» измерительных цилиндрических металлических контейнеров диаметром 0,2м в их толщу оказывались внутри этих контейнеров. Максимальная длина измерительного цилиндра составляла 1м, поэтому для увеличения толщины образцов снега цилиндры со снегом состыковывались. К сожалению, свежавыпавший снег легко уплотнялся под действием собственного веса, поэтому образцы разной толщины могли отличаться средними значениями объемной плотности снега.

3. Модель излучения снега

Для восстановления параметров переноса излучения в исследованных образцах снега использована двухпотоковая теория Кубелки-Мунка [18,19].

В соответствии с теорией Кубелки-Мунка полные коэффициенты отражения R_{KM} и пропускания t_{KM} , как функции толщины слоя h , определяются следующими соотношениями:

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

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

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

4. Результаты исследования

Для каждой структуры снега измерялись полные коэффициенты отражения R и пропускания t теплового излучения как функции толщины h слоя снега. Затем экспериментальные данные аппроксимировались соответствующими соотношениями двухпоточковой теории Кубелки-Мунка. В результате аппроксимации определялись анализируемые в дальнейшем значения модельных коэффициентов K , S , R_0 .

Ниже проводится сравнительный анализ экспериментальных данных для двух структур пушистого и двух структур зернистого снега. Параметры рассматриваемых структур снега представлены в таблице 1.

Таблица 1

№ структуры	дата	параметры снежных структур			
		вид снега	ρ_v	d , мм	$t^{\circ}\text{C}$
1	08.12.16г.	пушистый	0,2...0,25	-	-3
2	13.12.16г.	пушистый	0,25...0,3	-	-13
3	07.03. 18.	мелкозернистый	0,26...0,3 1	< 1	-8
4	29.03.18г.	среднезернистый	0,3...0,34	≈ 1	-5

На рис.1а,б,в показаны измеренные на частотах 22,2; 37,5 и 94 ГГц графики зависимостей $R(h)$, $t(h)$, а также средней объемной плотности ρ_V образцов снега в зависимости от их длины для свежевывавшего пушистого снега и того же снега через 5 суток (в соответствии с таблицей 1 структуры 1 и 2).

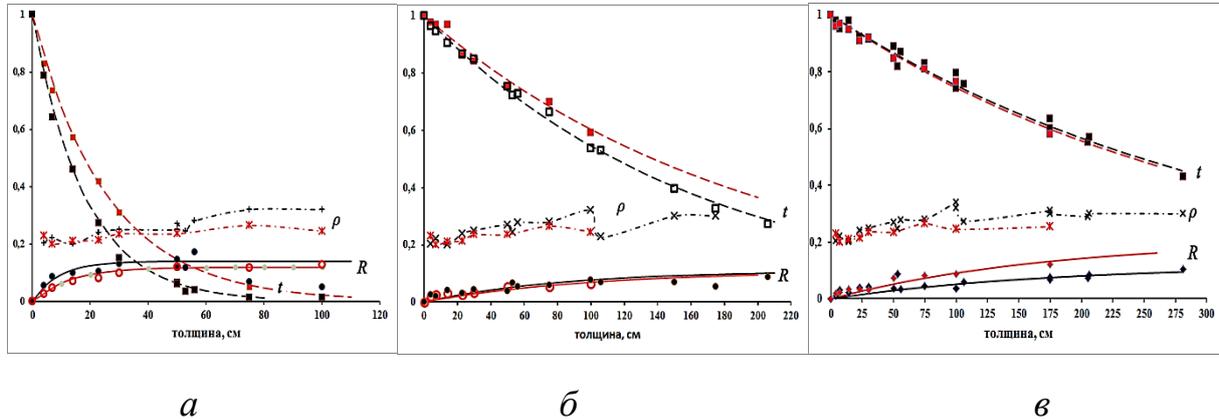


Рис.1 Экспериментальные (символы) и аппроксимационные зависимости полных коэффициентов отражения R (сплошные линии) и пропускания t (пунктирные линии) от толщины слоя сухого пушистого снега (структура 1 – красный цвет, структура 2 – черный цвет) на частотах : а – 94ГГц; б – 37,5ГГц, в – 22,2ГГц. Пунктир – графики средней объемной плотности образцов снега.

Погодные условия между измерениями в период 08.12-13.12.16г. были достаточно стабильными при температуре воздуха $-3...-13^{\circ}\text{C}$, вследствие чего структура 1 исходного снежного покрова не могла существенно измениться. Тем не менее, некоторые изменения в свойствах структуры обнаружались в том, что при загрузке в измерительные цилиндры снег легче уплотнялся под воздействием собственного веса. В результате средние значения объемной плотности снега в цилиндрах для структуры 2 оказались выше в сравнении со структурой 1, особенно, в цилиндрах, высота которых превышала 0,5м.

Аппроксимационные значения модельных величин (K , S , α , R_0) для рассматриваемых структур снега приведены в таблице 2 (к сожалению, измерения характеристик излучения структур 3,4 на частоте 60 ГГц не проводились).

Таблица 2

модельные величины	№ структуры снега	f , ГГц			
		22,2	37,5	60	94
R_0	1	0,21	0,1	0,1	0,125
	2	0,12	0,11	0,1	0,14
	3	0,12	0,13	-	0,3
	4	0,21	0,24	-	0,42
K , см ⁻¹	1	0,0018	0,004	0,0117	0,03
	2	0,0022	0,0048	0,0156	0,0416
	3	0,0027	0,007	-	0,08
	4	0,0035	0,01	-	0,095
S , см ⁻¹	1	0,0012	0,0011	0,0027	0,092
	2	0,0007	0,0013	0,0038	0,0157
	3	0,0008	0,0024	-	0,1
	4	0,002	0,008	-	0,24

Сравнивая соответствующие графики, показанные на рис.1 а,б,в, и аппроксимационные значения модельных величин для структур 1,2, приходим к следующим выводам:

- в случае структуры 1 значение R_0 тем выше, чем ниже частота, что следует рассматривать как аномальную частотную зависимость;
- значения коэффициента рассеяния S для структуры 1 практически одинаковы на частотах 22,2 и 37,5 ГГц, что тоже следует рассматривать как аномалию;
- изменения в значениях коэффициента обратного рассеяния на рассматриваемых частотах при переходе от структуры 1 к структуре 2 оказались наиболее неоднозначными: если на частоте 37,5 ГГц величина S незначительно увеличилась, то на частоте 22,2 ГГц наблюдается ее

снижение почти вдвое, а на частоте 94ГГц – наоборот, увеличение более, чем в 1,5 раза;

- коэффициент поглощения K для структуры 2 на всех частотах выше, чем для структуры 1, что следовало ожидать; поскольку плотность снега со структурой 2 выше.

В сравнении со случаем пушистого снега значения модельных величин K , S для структур 3,4 мелко- и среднезернистого снега, во-первых, выше, во-вторых, монотонно возрастают при увеличении как частоты, так и размера зерна, что согласуется с теорией Ми [19].

5. Обсуждение результатов

Частотная зависимость ослабления и рассеяния электромагнитных волн в сухом снежном покрове изучалась экспериментально [11,12] и теоретически [23], а также обсуждалась в ряде работ [6, 7, 24, 25]. Ввиду отсутствия строгой теории рассеяния в плотных случайных дискретных слабо поглощающих средах с размерами частиц, соизмеримыми с длиной волны, целью экспериментальных исследований являлось определение вида и параметров аппроксимационной зависимости коэффициентов экстинкции и рассеяния от частоты.

По аналогии с [23] частотную зависимость коэффициента обратного рассеяния в случае снега определим в виде:

$$\frac{S(f_1)}{S(f_2)} = \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^\eta \quad (3)$$

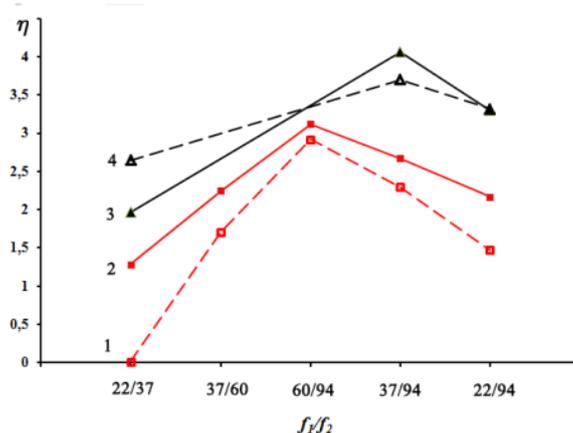
где f выражена в ГГц. Тогда значение показателя степени η частотной зависимости можно вычислить по соотношению, следующему из (3):

$$\eta = \lg[S(f_1) / S(f_2)] / \lg(f_1 / f_2) \quad (4)$$

Для рассматриваемых структур снега на рис.2 приведены значения частотного показателя степени η , вычисленные по формуле (4) для пар частот

22,2/37,5; 37,5/60, 60/94, 37,5/94 и 22,2/94 с использованием экспериментальных данных для коэффициента обратного рассеяния S , представленных в таблице 2.

Как известно [19], при релеевском рассеянии и в приближении теории сильных флуктуаций показатель степени частотной зависимости $\eta=4$. Из рис.2 следует, что в рассматриваемых структурах снега рассеяние с частотным показателем степени $\eta \approx 4$ наблюдается только на высоких частотах и только в случае мелкозернистого снега, в то время как на низких частотах его значение заметно ниже. Наиболее сильно это проявляется для структур 1,2 пушистого снега.



1,2 – пушистый снег (структуры 1,2); 3 – мелкозернистый снег (структура 3);
4 – среднезернистый снег (структура 4).

Рис.2. Частотный показатель степени для различных интервалов частот и снежных структур.

Эффект возрастания частотного показателя степени при повышении частоты для снега ранее был экспериментально обнаружен и обсуждался в [20]. Этот эффект интерпретировался как влияние кластеров частиц льда. Влияние кластеров предсказано также теоретически [23] при учете липкости частиц.

Влияние кластеров проявляется в том, что волны на различных частотах рассеиваются на неоднородностях с отличающимися масштабами, а именно: излучение с длиной волны, существенно превышающей размеры частиц, рассеивается на их кластерах, а при соизмеримости длины волны и размеров частиц – на частицах.

Снежинки, образующие пушистый снег, являются, как правило, шестиугольными пластинами или звездочками с разнообразной тонкой структурой. Размеры отдельных снежинок могут быть весьма различными. Наибольшие линейные размеры обычно имеют игольчатые звезды (их радиус достигает 4...5 мм). Снежинки, соединяясь между собой, могут также выпадать в виде хлопьев, при этом размеры хлопьев могут достигать значений свыше 1 см.

С точки зрения объемного рассеяния, в зависимости от диапазона волн отдельная снежинка может рассеивать как мелкая частица и как частица с многомасштабными неоднородностями.

Пушистый снег состоит из более мелких частиц льда, чем мелкозернистый снег. Тем не менее, из сравнения значений частотного показателя степени (см. рис.2), следует, что рассеяние высокочастотного излучения в пушистом снеге заметно слабее, чем в мелкозернистом. Это означает, что в пушистом снеге доминирующую роль при рассеянии излучения на всех рассматриваемых частотах играют кластеры, масштабы которых определяются частотой излучения.

К настоящему времени за рубежом выполнен ряд исследований частотной зависимости интенсивности рассеяния микроволнового излучения в снеге [11-15, 23-26]. В основном, исследовались коэффициенты экстинкции $k_e = k_a + k_s$ и рассеяния $k_s = S + a$, где k_a , S и a – соответственно коэффициенты поглощения, обратного рассеяния и рассеяния вперед. В соответствии с теорией Ми, при увеличении параметра d/λ сильно возрастает доминирование интенсивности рассеяния вперед над интенсивностью обратного рассеяния, т.е. возрастает параметр a/S . В связи с этим возникает вопрос: каким образом перераспределение интенсивности между обратным и передним полупространствами влияет на яркостную температуру снежного покрова? Для ответа на этот вопрос рассмотрим выражение для радиояркостной температуры T снежного покрова толщиной h в приближении равенства термодинамических

температур снега и почвы и пренебрежимо малого влияния границ атмосфера-снег и снег-почва [27]:

$$T(h) = (1 - R(h))T_c + R(h)T_a^*,$$

где T_c – термодинамическая температура снега, T_a^* – яркостная температура подсвечивающего излучения атмосферы. Отсюда следует, что радиояркостная температура снежного покрова зависит только от коэффициента отражения слоя, т.е. от интенсивности обратного рассеяния. Конечно, при учете влияния границ покрова интенсивность рассеяния вперед учитывать необходимо, но ее роль в формировании теплового потока не существенна.

Таким образом, для пассивного дистанционного зондирования снежного покрова существенным является исследование частотной зависимости коэффициента обратного рассеяния, а не коэффициентов экстинкции k_e и рассеяния k_s . В этом направлении за рубежом выполнены достаточно широкие исследования, результаты которых представлены в [12-14]. Однако, влияния кластеров на микроволновое рассеяние обнаружено не было. Это связано, по-видимому, с использованным методом экспериментального исследования [12]. Метод заключался в том, что измерялась радиояркостная температура слоя снежного покрова, помещенного последовательно на поверхности черного тела и плоского металлического отражателя. Абсолютная калибровка при этом осуществлялась по излучению атмосферы. Алгоритм обработки экспериментальных данных основывался на двухпоточковой теории Кубелки-Мунка. Основным недостатком метода являются измерения для каждой структуры снега только при одной толщине слоя, равной 0,1м. В случае свежеснегавшего и мелкозернистого снега такой подход не обеспечивает необходимой точности при восстановлении модельных величин, поскольку их эффективная толщина излучающего слоя на частотах 20...37 ГГц существенно больше, чем 0,1м (см. рис.1).

5. Заключение

В результате выполненного исследования характеристик микроволнового рассеяния в сухом пушистом снеге установлено, что на частотах 22,2 и 37,5 ГГц сильное влияние на интенсивность обратного рассеяния могут оказывать кластеры частиц льда, составляющих снежинки. Влияние кластеров проявляется через аномальные частотные зависимости полного коэффициента отражения полубесконечного слоя снега и коэффициента обратного рассеяния.

Литература

1. Foster, J. L., D. K. Hall, A. T. C. Chang, and A. Rango. An overview of passive microwave snow research and results. // *Rev. Geophys.* 1984. Vol. 22. Issue 2. P. 195-208. doi.org/10.1029/RG022i002p00195
2. Hallikainen, M. Retrieval of snow water equivalent from Nimbus-7 SMMR data: Effect of land-cover categories and weather conditions // *IEEE J. of Oceanic Engineering.* 1984. Vol. OE-9. No. 5. P. 372-376.
3. Chang, A. T. C., J. L. Foster, and D. K. Hall. Nimbus-07 SMMR derived global snow cover parameters // *Ann. Glaciol.* 1987. Vol.9. P. 39-44.
4. Kelly, R. E. J. and Chang, A. T. C. Development of a passive microwave global snow depth retrieval algorithm for Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) and Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS (AMSR-E) data // *Radio Sci.* 2003. Vol. 38. No.4. P.8076. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2002RS002648>
5. Tedesco, M., Pulliainen, J. T., Pampaloni, P. and Hallikainen, M. T. () Artificial neural network based techniques for the retrieval of SWE and snow depth from SSM/I data // *Remote Sens. of Environment.* 2004. Vol. 90. P. 76-85.
6. Roy, V., Goïta K., Royer A., Walker A. E., Goodison B. E., Snow water equivalent retrieval in a Canadian boreal environment from microwave measurements using the TKK snow emission model. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* // 2004. Vol. 42. No. 9. P. 1850–1859.

7. Kontu, A., Pulliainen J. Simulation of space borne microwave radiometer measurements of snow cover using in situ data and brightness temperature modeling // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2010. Vol. 48. No.3. P. 1031–1044.
8. Clifford D. Global estimates of snow water equivalent from passive microwave instruments: history, challenges and future developments. // Intern. J. Remote Sens. 2010. Vol. 31. No.14. P. 3707—3726.
9. Tedesco M, Reichle R, Low A, Markus T, Foster JL. Dynamic approaches for snow depth retrieval from space-borne microwave brightness temperature. // IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.. 2010. Vol. 48. No/4. P. 1955–1967.
10. Tedesco M., Jeyaratnam J. A New Operational Snow Retrieval Algorithm Applied to Historical AMSR-E Brightness Temperatures // Remote Sens. 2016, 8, 1037. DOI: [10.3390/rs8121037](https://doi.org/10.3390/rs8121037)
11. Hallikainen M. T., Ulaby F. T. and Deventer T. E. V. Extinction behavior of dry snow in the 18-to-90 GHz range. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1987. Vol.GE-25. No.6. P.737-745.
12. Wiesmann A., Mätzler C. Weise T. Radiometric and structural measurements of snow samples // Radio Sci. 1998. V.33. P.273-279.
13. Mätzler C. and A. Wiesmann. Extension of the Microwave Emission Model of Layered Snowpacks to Coarse-Grained Snow // Remote Sens. of Environment. 1999. Vol. 70. No. 3. P.317-325.
14. C. Matzler. Relation between grain-size and correlation length of snow // J. Glaciol. 2002. Vol. 48. No. 162. P. 461–466.
15. Pulliainen J.T., Grandell J., Hallikainen M.T. HUT snow emission model and its applicability to snow water equivalent retrieval. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1999. Vol. GE-37. No. 3. P.1378-1390.
16. Голунов В.А., Кузьмин А.В., Скулачев Д.П., Хохлов Г.И. Результаты экспериментального исследования частотной зависимости ослабления, рассеяния и поглощения миллиметровых волн в сухом снежном покрове //Радиотехника и электроника. 2017. Т.62. №9. С. 857-865.

17. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч.2. Случайные поля. М.: Наука, 1978.
18. Kubelka P., Munk F. Ein beitrage zur optic der farbansstriche //Z. Tech. Phys. 1931. V. 11a. Pp. 593-601.
19. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т.1. М. Мир. 1981. 280с.
20. Голунов В.А., Кузьмин А.В., Скулачев Д.П., Хохлов Г.И. Экспериментальные спектры ослабления, рассеяния и поглощения миллиметровых волн в сухом свежеснеге. Журнал радиоэлектроники. ISSN 1684-1719. 2016, №9. Электронный ресурс. <http://jre.cplire.ru/jre/sep16/4/text.pdf>.
21. В. А. Голунов, Г. И. Хохлов. 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>
22. Golunov V. A., Varabanenkov Yu.N. Radiometric methods of measurement of the total reflectivity, the total transmissivity and the coherent transmissivity of a weakly absorbing random discrete medium layer in the millimeter wavelengths range // Proc. Progress in Electromagnetics Research Symp. Moscow, Russia, August 19-23. 2012. P.1415-1418.
23. Chen, C.-T., L. Tsang, J. Guo, A. T. C. Chang, and K.-H. Ding, Frequency dependence of scattering and extinction of dense media based on three-dimensional simulations of Maxwell's equations with applications to snow // IEEE Trans.Geosci. Remote Sens. 2003. Vol.41. P. 1844–1852.
24. Tedesco M., Kim E. J. Intercomparison of electromagnetic models for passive microwave remote sensing of snow // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2006. Vol. GE-44. No.10. P. 2654-2664.

25. Kontu, A., Pulliainen J. Simulation of spaceborne microwave radiometer measurements of snow cover using in situ data and brightness temperature modeling // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2010. V.48. №3. P.1031–1044.
26. Rutter, N., Sandells M., Derksen C., et. al. Snow stratigraphic heterogeneity within ground-based passive microwave radiometer footprints: Implications for emission modeling // J. Geophys. Res. Earth Surf. 2014. V.119. No.3. P.1-16. DOI: [10.1002/2013JF003017](https://doi.org/10.1002/2013JF003017).
27. Голунов В.А. Тепловое излучение сухого однородного снежного покрова в диапазоне ММВ // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2002. № 6. С. 35 - 44.

Для цитирования:

В. А. Голунов, С. В. Маречек, Г. И. Хохлов. Особенности рассеяния микроволнового излучения в сухом пушистом снеге. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun18/2/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.6.2