

УДК 535.36, 621.396.11

ПОКАЗАТЕЛЬ СТЕПЕНИ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СУХОМ СНЕГЕ И ИСКУССТВЕННЫХ СНЕГОПОДОБНЫХ СРЕДАХ

В. А. Голунов, Г. И. Хохлов

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, 141190, пл. Введенского, 1, Фрязино, Московская область

Статья поступила в редакцию 6 сентября 2017 г.

Аннотация. На частотах 22,2; 37,5; 60 и 94 ГГц измерены зависимости полных коэффициентов отражения и пропускания слоя снега и искусственных снегоподобных сред от толщины слоя, размеров и объемной плотности частиц. Экспериментальные зависимости полных коэффициентов отражения и пропускания от толщины слоя аппроксимированы соотношениями двухпоточковой теории Кубелки-Мунка. Выполнен анализ частотной зависимости коэффициента обратного рассеяния диффузной интенсивности. Установлено, что частотный показатель степени зависит от параметров рассеивающей структуры. Для структур с размерами частиц, превосходящих 1 мм, он уменьшается при увеличении частоты, достигая минимума на интервале 60...94 ГГц. При значениях объемной плотности мелкозернистого снега ниже 0,25 частотный показатель степени, наоборот, увеличивается при повышении частоты из-за влияния кластеров. Независимо от размеров частиц частотный показатель степени увеличивается при их уплотнении, особенно на интервале значений объемной плотности 0,4...0,6.

Ключевые слова: плотные случайные дискретные среды, микроволны, обратное рассеяние, частотная зависимость, размер частиц, объемная плотность, кластеры.

Abstract. At frequencies of 22.2; 37.5; 60 and 94 GHz, the dependences of reflectivity and transmissivity of the snow layer and artificial snow-like media on the

layer thickness, size and volume density of the particles were measured. The experimental dependences of the reflectivity and transmissivity on the layer thickness were approximated by the relations of the two-flux Kubelka-Munch theory. The frequency dependence of the backscattering coefficient is analyzed. It is established that the frequency exponent depends on the parameters of the scattering structure. For structures with particle sizes exceeding 1 mm, the frequency exponent decreases with increasing frequency, reaching a minimum in the interval 60 ... 94 GHz. At values of the volume density of fine-grained snow below 0.25, the frequency exponent, on the contrary, increases with increasing frequency due to the influence of clusters. Regardless of the particle size, the frequency exponent increases with increasing volume density, especially on the range of volume density values of 0.4 ... 0.6.

Key words: dense random discrete media, microwaves, backscattering, frequency dependence, particle size, volume density, clusters.

1. Введение

Исследование закономерностей объемного рассеяния в плотных случайных дискретных средах актуально в связи с развитием методов активного и пассивного дистанционного зондирования таких сред, как снежный покров, биообъекты, жидкие кристаллы [1-5]. Несмотря на то, что это направление исследований развивается начиная с середины прошлого века [6,7], к настоящему времени теория рассеяния электромагнитных волн в слабо поглощающих плотных случайных дискретных средах при размерах частиц, соизмеримых с длиной волны, находится пока в стадии формирования. В связи с этим наиболее эффективными методами исследования закономерностей объемного рассеяния в таких средах являются, с одной стороны, численное моделирование на основе точного решения уравнений Максвелла [3,8], с другой стороны, методы эмпирического исследования, основанные на разработке моделей излучения рассеивающих сред [9-13] и контролируемых экспериментах [10, 14-17].

Из природных сред наиболее сложно контролировать структуру снежного покрова. Липкость частиц льда в снеге, разнообразие их форм и размеров, обусловленное метаморфизмом снега в случайно изменяющихся погодных условиях, существенно ограничивают возможности контролируемого эксперимента. Альтернативным способом изучения закономерностей рассеяния в плотных случайных средах является использование искусственных случайных дискретных сред, параметры которых можно целенаправленно варьировать в широких пределах и надежно контролировать [10, 14-18].

Цель данной работы – на основе сопоставления результатов экспериментального исследования частотных зависимостей интенсивности обратного рассеяния микроволнового излучения в сухом снежном покрове и искусственных средах выявить те свойства рассеяния в снеге, которые невозможно в полной мере исследовать непосредственно в экспериментах со снегом. Это относится, главным образом, к исследованию зависимости частотных характеристик рассеяния от объемной плотности частиц.

2. Методика измерений и характеристика исследованных образцов

Методика и схема измерений описаны в [19]. Суть их в следующем. Исследуемые образцы снега или искусственных сред загружались в металлические цилиндры диаметром 0,2м с пенопластовыми основаниями. «Холодная» подсветка образцов создавалась в металлической камере, в основании которой находилось черное тело, охлаждаемое жидким азотом. В противоположных торцах камеры размещались соответственно диэлектрическая линза диаметром 0,2м и рупорный облучатель в ее фокусе. Образцы и калибровочные эталоны устанавливались вплотную к линзе. В качестве эталонов использовались рассеивающий металлический отражатель и два черных тела, одно из которых охлаждалось жидким азотом. Все эталоны имели диаметр 0,2м.

Такой радиометрический стенд позволяет измерять зависимости полных коэффициентов отражения R и t от толщины плоского слоя исследуемых образцов на длинах волн 3,2мм, 5мм, 8мм и 1,35см [20,21].

Искусственные среды представляли собой смеси диэлектрических частиц (гравий, полиэтилен и полистирол) и гранулированного пенопласта при плотности пенопласта $\rho < 0,05 \text{ г/см}^3$. Образцы искусственных сред формировались путем равномерного заполнения измерительных цилиндров пенопластовыми гранулами и рассеивающими частицами при заданном их объемном соотношении. Оценки действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей диэлектрической проницаемости указанных материалов представлены в таблице 1. Они основаны на экспериментальных данных, приведенных в [1, 22]. Для сравнения в таблице 1 приведены также диэлектрические параметры пресноводного льда [9] при $t = -1^\circ\text{C}$.

Таблица 1

	Материал	$\lambda = 1,35 \text{ см}$		$\lambda = 8 \text{ мм}$		$\lambda = 3,2 \text{ мм}$	
		ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
1	гравий	-	-	5-6	$10^{-2}-10^{-1}$	-	-
2	полиэтилен	2,3	$2,3 \cdot 10^{-4}$	2,3	$2,6 \cdot 10^{-4}$	2,3	$3 \cdot 10^{-4}$
3	полистирол	2,5	$2 \cdot 10^{-3}$	2,5	$4 \cdot 10^{-3}$	2,5	$9 \cdot 10^{-3}$
4	лёд	3,15	$3 \cdot 10^{-3}$	3,15	$3 \cdot 10^{-3}$	3,0	$6 \cdot 10^{-3}$

Видно, что материалы существенно отличаются друг от друга значениями ϵ'' , причем наиболее прозрачным является полиэтилен, а наиболее поглощающим - гравий. По диэлектрическим параметрам наиболее близким ко льду является полистирол.

Можно показать, что при равномерном распределении частиц в пространстве существует детерминированная взаимосвязь между объёмной плотностью частиц ρ_v , их размерами d и характерным размером пустот между ними. Если в пустоты между частицами помещать сферы диаметром D , то можно получить следующее аппроксимационное соотношение: $\frac{d}{D} = \frac{4(1-\rho_v)}{1+2\rho_v}$ [10]. Это означает, что частицы будут тем равномернее распределены по объёму, чем сильнее выполняется неравенство $d_n < D$, где d_n - размер пенопластовых гранул. Именно этот критерий соблюдался при создании рассматриваемых искусственных сред. Нарушение этого критерия, как будет

показано ниже, может приводить к проявлению эффекта, связанного с образованием кластеров.

3. Модели излучения снега

К настоящему времени для описания характеристик излучения снежного покрова широко используются следующие модели: двухпотоковая теория Кубелки-Мунка [23], FIRE (FIRE - аббревиатура Fryazino Institute of Radioengineering and Electronics) [10], MEMLS (Microwave Emission Model of Layered Snowpacks) [11] и HUT (Helsinki University of Technology) [12].

Модель HUT разработана для сред, в которых интенсивность рассеяния вперед существенно превосходит интенсивность обратного рассеяния. Некорректность этой модели отмечалась в [21,24].

Модель MEMLS разработана для расчета яркостной температуры слоистого снежного покрова, но в случае однослойного покрова она сводится к двухпотоковой теории Кубелки-Мунка. Модели FIRE и Кубелки-Мунка имеют крайне слабые количественные взаимные расхождения при расчете полных коэффициентов отражения и пропускания слоя сухого снега при одних и тех же значениях исходных параметров (коэффициентов поглощения и рассеяния) [21]. Однако, в случае более слабо поглощающих сред (например, искусственные среды с полиэтиленовыми гранулами) более предпочтительно использовать модель Кубелки-Мунка.

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.

Из (1),(2) следует, что зависимости $R_{KM}(h)$ и $t_{KM}(h)$ полностью описываются двумя параметрами: K и S . Далее анализируются частотные зависимости только коэффициента обратного рассеяния диффузной интенсивности $S(f)$, полученные в результате аппроксимации экспериментальных зависимостей $R(h)$ и $t(h)$ соотношениями (1) и (2).

4. Результаты исследования

Для аппроксимации частотной зависимости модельных величин, таких, как S , используется, как правило [8,20,21], функция вида:

$$q = p_q f^\eta \quad (3)$$

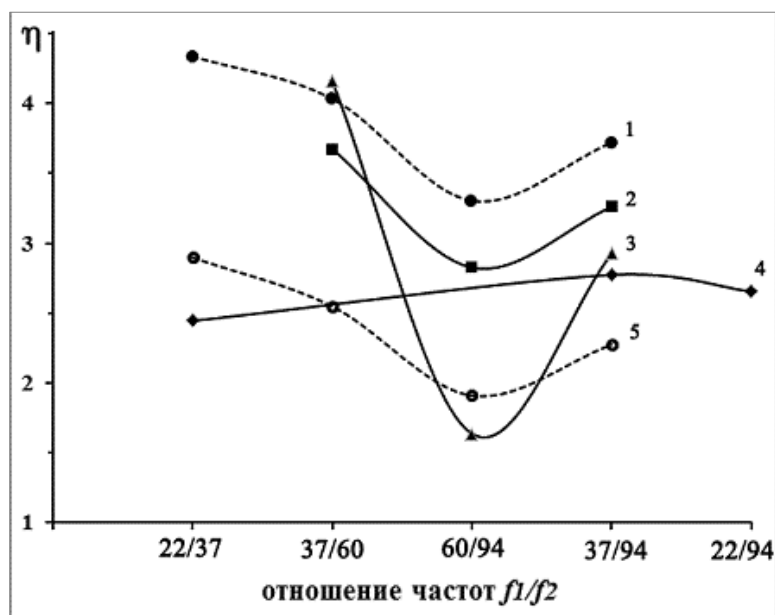
где в рассматриваемом случае $q=S$, f выражена в ГГц, p_q и η - некоторые эмпирические параметры, зависящие не только от модельных величин, но и от структуры снега. Для оценки показателя степени η на интервале частот $f_1...f_2$ использовалось соотношение, следующее из (3):

$$\eta = \log[q(f_1)/q(f_2)] / \log(f_1 / f_2) \quad (4)$$

Расчеты, выполненные с применением теории Ми для рассеивающих независимо друг от друга шаровидных частиц диаметром 1,2мм, показали, что $\eta=4$ [8]. Такое же значение частотный показатель степени имеет, как известно, при рассеянии Релея. Однако, в плотных случайных дискретных средах, включая сухой снежный покров, наблюдается уменьшение значений η [2,3]. Для решения задач пассивного дистанционного зондирования важно изучить зависимости η от частотного интервала $f_1...f_2$, от размеров частиц льда и объемной плотности снега.

Рассмотрим частотные зависимости коэффициента обратного рассеяния, экспериментально полученные для искусственных сред и сухого снежного покрова.

На рис.1 показаны графики зависимости показателя степени η коэффициента обратного рассеяния для сухого снежного покрова со средне- и крупно-зернистыми структурами. Кроме того, на этом рисунке показаны графики $\eta(f_1/f_2)$ рассчитанные для коэффициента рассеяния $k_s(f)$ методом Монте-Карло для шаровых частиц диаметром 1,2мм ($\epsilon' = 3,2$, $\epsilon'' = 0$) при $\rho_v = 0,2$ и значениях коэффициента липкости частиц $\tau = 0,1$ и $\tau = 0,5$ (отметим, что коэффициент рассеяния k_s является суммой коэффициентов прямого и обратного рассеяния).



1,2 - расчет [8] для непоглощающих частиц $d=1,2$ мм при $\rho_v=0,2$ соответственно при $\tau=0,5$ и $\tau=0,1$;

2 – среднезернистый снег $d=1 \dots 2$ мм, $\rho_v=0,47$;

3 – крупнозернистый снег $d=2 \dots 4$ мм, $\rho_v=0,46$

4 – среднезернистый снег с самосформировавшейся структурой $d=1 \dots 2$ мм, $\rho_v=0,26$.

Рис.1. Частотный показатель степени для различных интервалов частот и снежных структур.

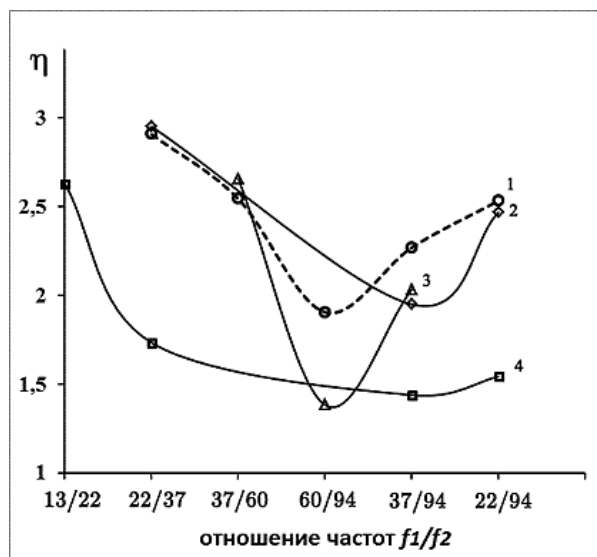
Из представленных экспериментальных данных следует, что показатель степени η зависит как от вида снежной структуры, так и от интервала частот.

Видно, что на интервале частот 60...94ГГц показатель степени минимален. Отсутствие минимума на этих частотах в случае самосформировавшейся структуры среднезернистого снега (кривая 4 на рис.1) объясняется тем, что для этой структуры измерения на частоте 60ГГц не проводились.

С учетом этого замечания из сравнения графиков 4 и 5 можно заключить, что результаты расчетов [8], выполненных методом Монте-Карло для шаровых частиц диаметром $d=1,2$ мм ($\epsilon'=3,2$, $\epsilon''=0$) при $\rho_v=0,2$ и значениях коэффициента липкости частиц $\tau=0,1$, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными для среднезернистого снега $d=1...2$ мм при $\rho_v=0,26$. Аналогичное соответствие форм зависимостей наблюдается при сравнении графика 1, рассчитанного при $d=1,2$ мм ($\epsilon'=3,2$, $\epsilon''=0$, $\rho_v=0,2$, $\tau=0,5$) [8], с графиком 2, полученным экспериментально для среднезернистого снега при $d=1...2$ мм, $\rho_v=0,47$. При коэффициенте липкости $\tau=0,5$ частицы слабо липкие [8], поэтому они достаточно равномерно распределены в объеме среды без образования кластеров. То же самое относится к снегу при $\rho_v=0,47$ [20].

Таким образом, из проведенного анализа расчетных и экспериментальных данных, показанных на рис.1, следует, что частотный показатель степени, определенный для частотного интервала $f_1...f_2$, в микроволновом диапазоне, тем меньше, чем выше частоты f_1, f_2 . Аналогичный вывод следует из экспериментальных данных, полученных для полиэтиленовых смесей с размерами гранул 3мм и показанных на рис.2 при значениях объемной плотности 0,25 и 0,6.

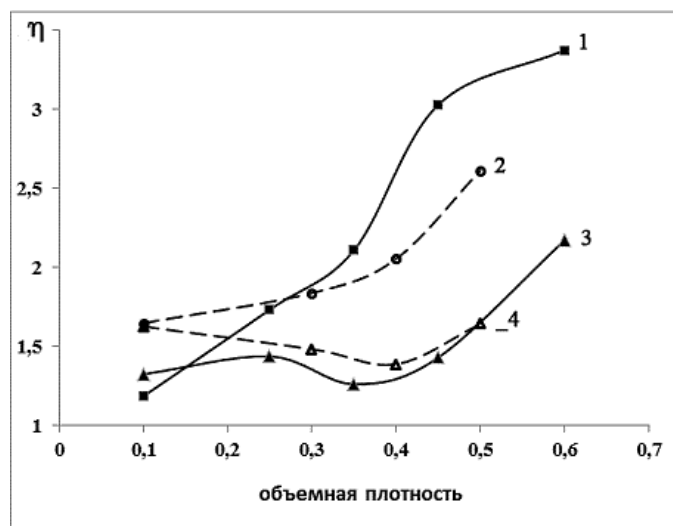
Кроме того, на основе анализа рассмотренных данных можно предположить, что частотный показатель степени уменьшается также при уплотнении снега. Для проверки этого предположения рассмотрим частотные зависимости коэффициента рассеяния S , экспериментально полученные для искусственных сред. На рис.3 показаны графики зависимости частотного показателя степени η от объемной плотности полиэтиленовых и полистирольных смесей при размере частиц 3мм для двух пар частот: 22,5 и 37,5 ГГц, 37,5 и 94ГГц. Видно, что на всем исследованном интервале частот



1 - непоглощающие шары $d=1,2\text{мм}$ при $\rho_v=0,2$ и $\tau=0,1$ (расчет [8])

2,3 - полиэтиленовая смесь при $\rho_v=0,6$ и $\rho_v=0,25$, размеры гранул 3мм

Рис.2. Частотный показатель степени на различных интервалах частот для коэффициента обратного рассеяния S в искусственных рассеивающих структурах.

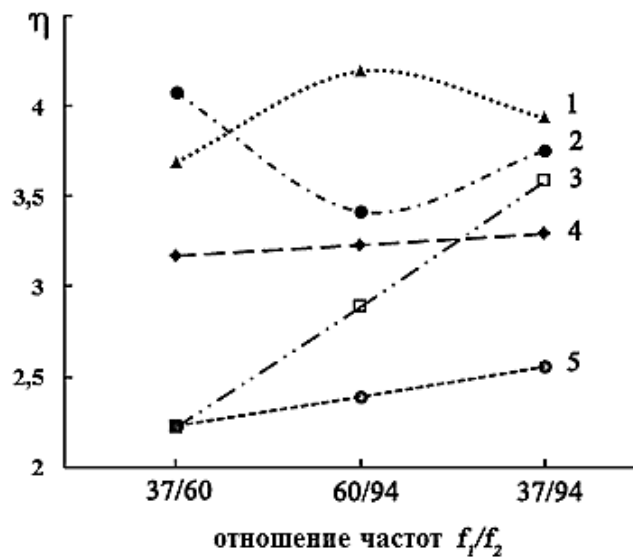


1,2 - пара частот 22,2 и 37,5 ГГц

3,4 - 37,5 и 94 ГГц.

Рис.3. Частотный показатель степени для коэффициента обратного рассеяния S от объемной плотности полиэтиленовых (сплошные линии) и полистирольных (пунктирные линии) смесей. Характерный размер частиц 3мм.

показатель степени η с увеличением объемной плотности возрастает, особенно на интервале $\rho_v=0,4...0,6$. Это может быть связано с тем, что при увеличении объемной плотности уменьшается радиус корреляции неоднородностей [27]. Действительно, при объемной плотности 0,6 дискретную среду можно рассматривать не как диэлектрические гранулы в воздухе, а как воздушные полости в диэлектрической среде. Из геометрического рассмотрения для простейшей кубической упаковки частиц следует, что размеры воздушных полостей при $\rho_v=0,52$ более чем вдвое меньше диаметра частиц.



1 – 0,26...0,29; 2 – 0,48...0,53; 3- 0,2...0,24;
4 – 0,34...0,4; 5 – 0,21

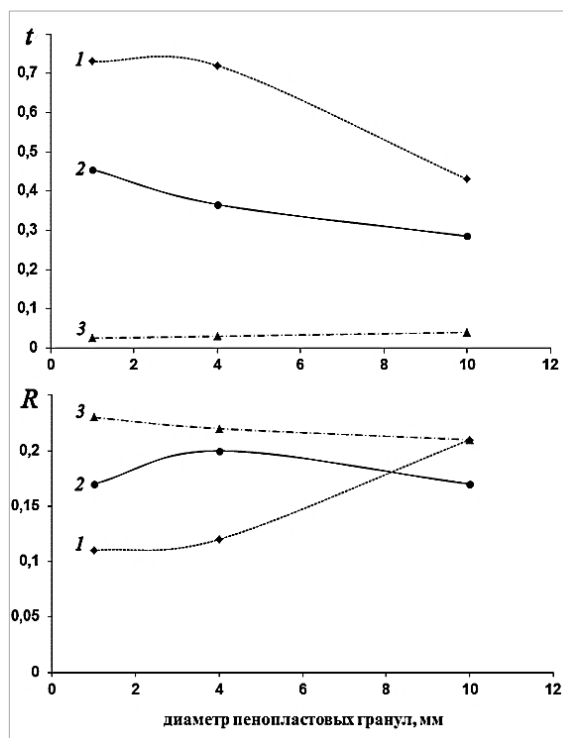
Рис.4. Частотный показатель степени на различных интервалах частот для мелкозернистого снега ($d < 1$ мм) при указанных значениях объемной плотности

Далее рассмотрим закономерности рассеяния в средах с мелкими частицами, размеры которых не превышают 1 мм.

На рис.4 показаны графики частотного показателя степени для мелкозернистых структур снега с объемной плотностью от 0,21 до 0,53.

В случае мелкозернистого снега частотный показатель степени, как видно, тоже сильно зависит от объемной плотности снега. Однако, имеется существенное отличие: при низких значениях объемной плотности

мелкозернистого снега (графики 3 и 5 на рис.4) частотный показатель степени может достигать минимума не на высоких (как в рассмотренном выше случае), а на более низких частотах. Проявление этого эффекта связано с влиянием кластеров частиц льда, образующихся именно при низких значениях объемной плотности [20].



1 – 22,2ГГц, 2 – 37,5ГГц, 3 – 94ГГц.

Рис.5. Полные коэффициенты пропускания t и отражения R слоя гравия толщиной 0,03м при объемной плотности частиц 0,3 с размерами 0,5...1мм.

Достаточно сильное влияние кластеров подтверждается результатами следующего эксперимента. В качестве рассеивающих частиц использовался гравий с размерами 0,5...1мм. Были созданы три образца смеси гравия и пенопластовых гранул с объемной плотностью частиц гравия 0,3. Толщина образцов была одинаковой и составляла 0,03м. Образцы отличались тем, что при их формировании использовались пенопластовые гранулы различных размеров, а именно: в первом образце использовались гранулы со средним размером 1мм, во втором – 4мм, и в третьем – 11мм. На рис.5 показаны графики измеренных на частотах 22,5ГГц, 37,5 и 94ГГц зависимостей полных

коэффициентов отражения и пропускания от среднего размера пенопластовых гранул.

Видно, что во-первых, наблюдается зависимость полных коэффициентов отражения и пропускания от размеров гранул пенопласта, во-вторых, эта зависимость тем сильнее, чем ниже частота излучения.

При интерпретации указанных зависимостей заметим, что увеличение размеров пенопластовых гранул приводит к перераспределению частиц гравия в пространстве с образованием локальных неоднородностей их объемной плотности: уплотнение частиц в одном месте сопровождается их разрежением в другом месте. Это означает, что в среде появились неоднородности с масштабами, более крупными в сравнении с размерами частиц. При локальном уплотнении частиц усиливается их коррелированность, вследствие чего изменяются их рассеивающие свойства [6]. Именно такие группы частиц называются кластерами. Известно [1,2], что наиболее сильное влияние на рассеяние кластеры оказывают при $d/\lambda < 1$, что подтверждается графиками на рис.4 и 5.

Таким образом, рассеивающие свойства случайных дискретных сред с малыми относительно длины волны размерами частиц сильно зависят от пространственного распределения (или упаковки) этих частиц.

5. Заключение

В данной работе для зернистых структур снега и искусственных снегоподобных сред рассмотрены результаты исследования частотной зависимости коэффициента обратного рассеяния диффузной интенсивности, полученные при аппроксимации экспериментальных данных соотношениями двухпоточковой теории Кубелки-Мунка. В качестве основной характеристики частотной зависимости коэффициента обратного рассеяния диффузной интенсивности использовался частотный показатель степени, определенный для частотных интервалов 22,2...37,5ГГц, 37,5...60ГГц и 60...94ГГц.

Получены следующие результаты:

- частотный показатель степени зависит как от вида снежной структуры, так и от интервалов частот (т.е. от частоты);
- для структур с размерами частиц, превосходящих 1мм, показатель степени уменьшается при увеличении частоты, достигая минимума на интервале 60...94ГГц;
- при значениях объемной плотности мелкозернистого снега ниже 0,25 частотный показатель степени, наоборот, увеличивается при повышении частоты;
- экспериментально показано, что рассеивающие свойства случайных дискретных сред с малыми относительно длины волны размерами частиц сильно зависят от пространственного распределения (упаковки) этих частиц;
- частотный показатель степени для всех рассмотренных структур увеличивается при их уплотнении, особенно, на интервале значений объемной плотности 0,4...0,6.

Кроме того, следует отметить, что с полученными в работе экспериментальными данными удовлетворительно согласуются результаты численного решения уравнений Максвелла методом Монте-Карло для трехмерной случайной плотной среды с учетом липкости частиц [8]. В связи с этим на фоне отсутствия строгой теории рассеяния в плотных случайных дискретных слабо поглощающих средах при размерах частиц, соизмеримых с длиной волны, подход, развитый в [8], является весьма перспективным для исследования излучательных свойств сухого снежного покрова. Однако, его дальнейшее развитие невозможно без проведения дополнительных экспериментальных исследований для установления связи коэффициента липкости с объемной плотностью и размерами частиц льда.

Литература

1. Ulaby F. T., Moore R. K., A. K. Fung. Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Vol. 3, Artech House, Norwood, MA, 1986. 1065p.

2. Tsang L., Kong J. A., Ding K. H. Scattering of Electromagnetic Waves. Vol. 1: Theories and Applications. Wiley-Interscience. New York. 2000. 426p.
3. Tsang L., Kong J. A., Ding K. H., C. O. Ao. Scattering of Electromagnetic Waves. Vol. 2: Numerical Simulations. Wiley-Interscience. New York. 2001. 700p.
4. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т.1. М. Мир. 1981. 280с.
5. Cox S.J., Reshetnyak V.Yu., Sluckin T.J. Effective medium theory of light scattering in polymer dispersed liquid crystal films // J. Phys. D: Appl. Phys. 1998. Vol.31. No.14. P.1611-1625.
6. Розенберг Г. В. Абсорбционная спектроскопия диспергированных веществ // Успехи физ. наук. 1959. Т. 69. Вып. 1. С. 57-104.
7. Барабаненков Ю.Н. Многократное рассеяние волн на ансамбле частиц и теория переноса излучения // Успехи физ. наук. 1975. Т.117. Вып.1. С. 49-78.
8. Chen C.-T., Tsang L., Guo J., et. al. 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. And Remote Sens. 2003. Vol.41. No.8. P.1844-1852.
9. Голунов В.А., Коротков В.А., Сухонин Е.В. Эффекты рассеяния при излучении миллиметровых волн атмосферой и снежным покровом. Итоги науки и техники, сер. Радиотехника. Т.41, М., ВИНТИ. 1990. С.68-136.
10. Голунов В. А., Коротков В. А., Соколов А. В. Отражение и пропускание миллиметровых волн слоем случайной дискретной среды // Электромагнитные волны и электронные системы. 1997. Т. 2. № 1. С. 39-46.
11. Wiesman A., Mätzler C. Microwave emission model of layered snowpacks // Remote Sens. of Environment. 1999. Vol. 70. P. 307-316.

12. Pulliainen J.T., Grandell J., Hallikainen M.T. HUT snow emission model and its applicability to snow water equivalent retrieval. // IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens. 1999. Vol. GE-37. No. 3. P.1378-1390.
13. Голунов В.А. Тепловое излучение сухого однородного снежного покрова в диапазоне ММВ // Успехи современной радиоэлектроники. 2002. № 6. С. 35-44.
14. Ishimaru A., Kuga Y. Attenuation constant of a coherent field in a dense distribution of particles // J. Opt. Soc. Am. 1982. Vol.72. No.10. P. 1317-1320.
15. Beard, C. L., Kays T. H., Twersky V. Scattering by randomly distribution of spheres vs. concentration // IEEE Trans. Antennas and Propag. 1967. Vol. AP-15. No.1. P. 99–118.
16. Hawley S.M., Kays T.H., Tversky V. Comparison of distribution functions from scattering data on different sets of spheres // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1967. V. Vol. AP-15. No.1. P. 118-135.
17. Varadan V.K., Bringi V.N., Varadan V.V. and Ishimaru A. Multiple scattering theory for waves in discrete random media and comparison with experiments // Radio Science. 1983. Vol.18. No.3. P. 321 – 327.
18. Голунов В.А. Когерентное ослабление электромагнитных волн в слабо поглощающих плотных случайных дискретных (снегоподобных) средах // Радиотехника и электроника. 2015. Т.60. №1. С.31-37.
19. 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.
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: электронный журнал. 2016. №9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep16/4/text.pdf>

21. Голунов В.А., Кузьмин А.В., Скулачев Д.П., Хохлов Г.И. Результаты экспериментального исследования частотной зависимости ослабления, рассеяния и поглощения миллиметровых волн в сухом снежном покрове // Радиотехника и электроника. 2017. Т.62. №9. С. 857-865.
22. Андреев Г.А., Голунов В.А., Соколов А.В. Рассеяние и излучение миллиметровых радиоволн природными образованиями. Итоги науки и техники, сер. Радиотехника. Т.20. М., ВИНТИ. 1980. С.39-106.
23. Kubelka P. New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. Part I. // J. Opt. Soc. Am. 1948. Vol. 38. No.5. P. 448-457.
24. Pan J., Durand M., Sandells M., et al. Differences between the HUT snow emission model and MEMLS and their effects on brightness temperature simulation // IEEE Trans. on Geosci. And Remote Sens. 2016. Vol. 54. Issue 4. P. 2001 – 2019. DOI: [10.1109/TGRS.2015.2493505](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2493505).
25. Roy, V., Goïta K., Royer A., et. al. Snow water equivalent retrieval in a Canadian boreal environment from microwave measurements using the TKK snow emission model // IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing. 2004. V.GE-42. No. 9. P. 1850.–1859
26. Tedesco M., Kim E. J. Intercomparison of electromagnetic models for passive microwave remote sensing of snow // IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing. 2006. V. GE-44. No.10. P. 2654-2664.
27. Stogryn A. Correlation functions for random granular media in strong fluctuation theory // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing. 1984. Vol. GE-22. No.2. P.150-154.

Ссылка на статью:

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>