

ОТРАЖЕНИЕ МИКРОВОЛН ОТ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ПОЧВЕ

Снежный покров на земной поверхности в общем случае представляет собой сложную неоднородную структуру, характеризующуюся зернистым составом с гранулами различных пространственных масштабов от нескольких микрометров до нескольких миллиметров. Снег также характеризуется слоистостью, обусловленной различными природными факторами и содержанием свободной воды во влажном снеге. В литературе мало экспериментальных данных по взаимодействию микроволн со снежным покровом, полученных при наземных условиях с известными условиями эксперимента. С целью экспериментального исследования отражения микроволн от сухого снежного покрова и сравнения с результатами расчета были проведены предварительные натурные наземные исследования отражения микроволн в L-диапазоне частот. В этом диапазоне размер объемных неоднородностей много меньше длины волны и снег обычно рассматривают как сплошную среду.

Условия эксперимента. Измерения проводились на трех участках земной поверхности, имеющих сравнительно ровную почву с размерами вертикальных неровностей приблизительно до ± 1 см (рис. 1) и расположенных в различной местности. Эксперименты выполнялись по бистатической схеме в диапазоне частот 1,2 – 1,8 ГГц. Излучающая и приемная антенны представляли собой измерительные рупорные антенны П6-23, направленные на точку зеркального отражения при угле падения 30° (рис. 2). Центры антенных апертур находились на высоте 1,7 – 2,5 м. Соответственно расстояния между центрами антенн составляло 2 – 2,9 м. Диаграммы направленности антенн имели ширину $30^\circ - 35^\circ$ в Е-плоскости и $28^\circ - 33^\circ$ в Н-плоскости. На почву на площадку между антеннами механическим способом накладывался сухой снег с целью образования покрова различной высоты, затем поверхность снега выравнивалась и проводилось измерение коэффициента отражения. Накладываемый снег предварительно перемешивался с целью получения однородного состава. Измеренная плотность снега после перемешивания находилась в пределах $0,28 - 0,32$ г/см³. Измерения проводились в феврале - марте 2018 г. при температурах воздуха $-8^\circ - -12^\circ\text{C}$. Почва находилась в мёрзлом состоянии.



а)



б)

Рис. 1. Вид почвы без снежного покрова; а) – участок 1, б) – участок 2

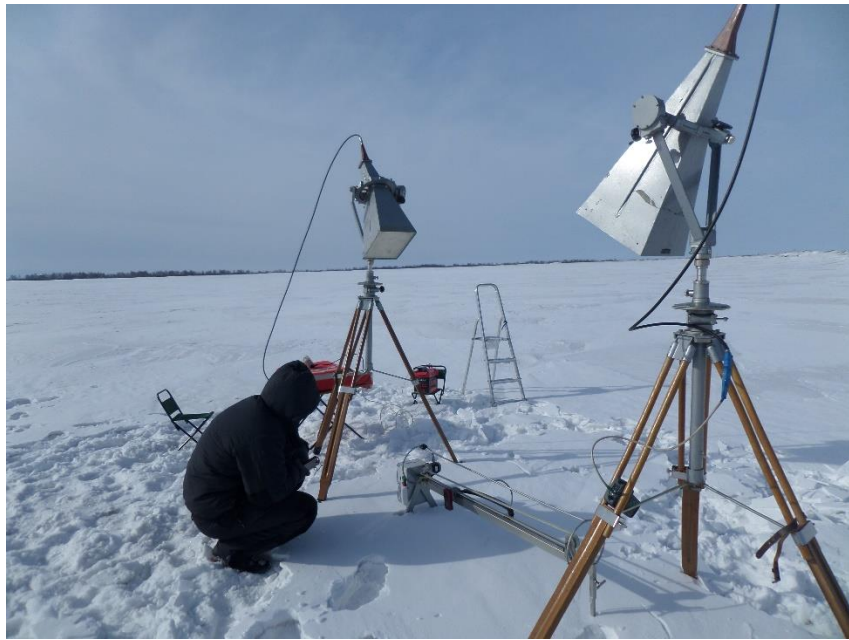
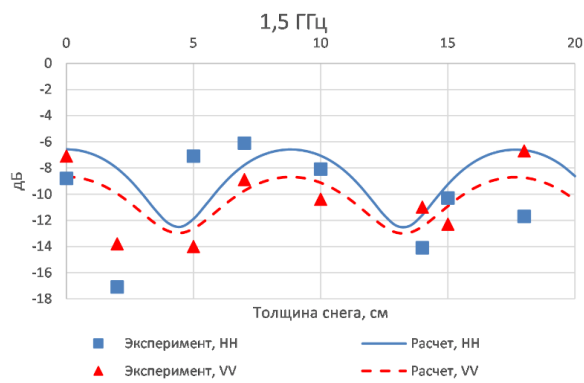
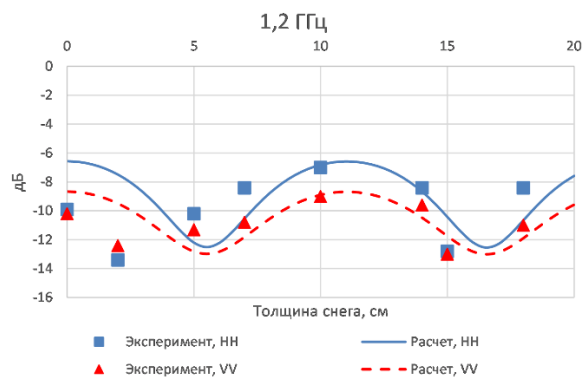


Рис. 2. Вид измерительной установки на поле со снежным покровом

Результаты измерений. На рис. 3 приведены экспериментальные и расчетные зависимости модуля коэффициента отражения от высоты снега на различных частотах при горизонтальной поляризации (НН) и вертикальной поляризации (VV) излучения, полученные на участке 1.



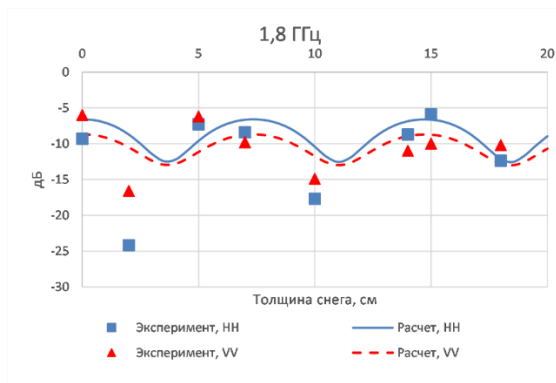
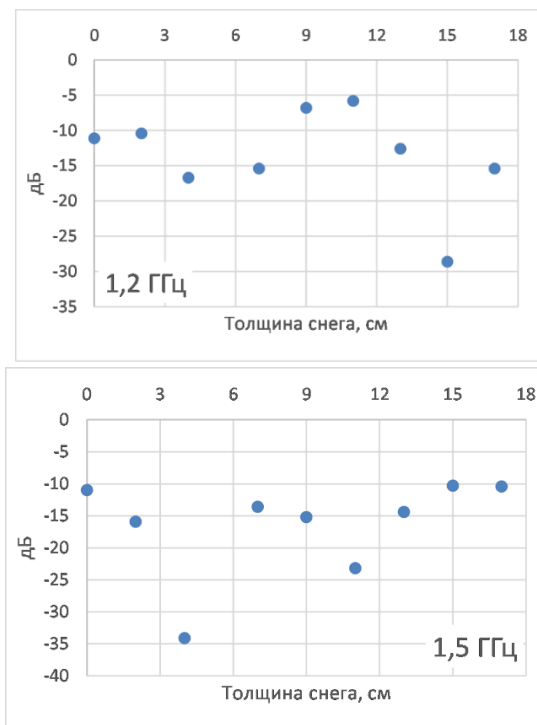


Рис. 3. Зависимости модуля коэффициента отражения от почвы со снежным покровом в зависимости от толщины снега на различных частотах и поляризациях (участок 1)

Из приведённых результатов следует, что наблюдаются достаточно существенные вариации уровня отраженного поля от высоты снежного слоя. Так, экспериментальные данные, приведенные на рис. 3 для частоты 1,8 ГГц, показали наличие вариаций уровня поля до 15 дБ. Интересно, что эти вариации вызываются слоем снега толщиной всего 2 см. Между тем, обычно полагают, что снег в L-диапазоне прозрачен и его влияние на взаимодействие микроволн этого диапазона частот земной поверхностью незначительно. Существенные колебания отраженного поля в зависимости от толщины снега также получены на участке 2 (рис. 4) и участке 3 (рис. 5).



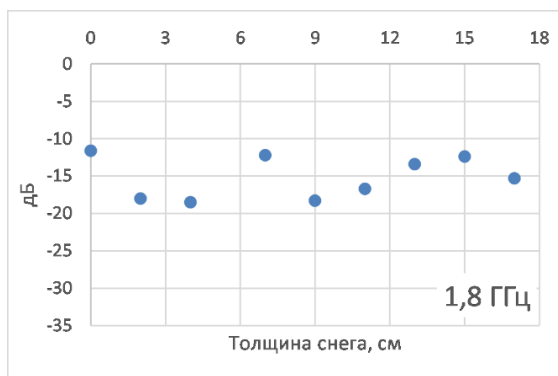
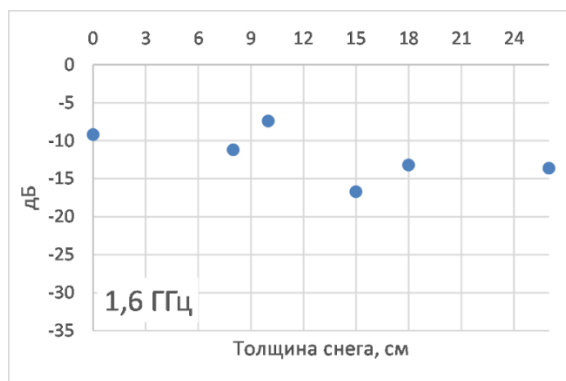
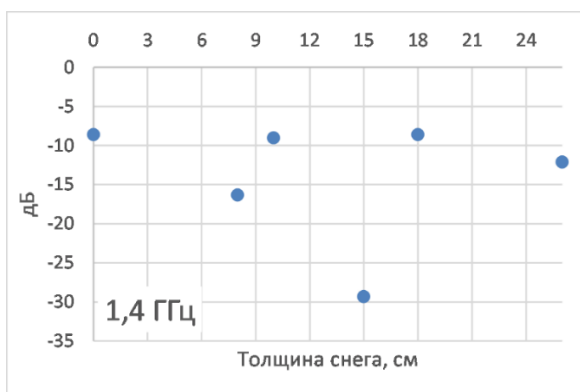
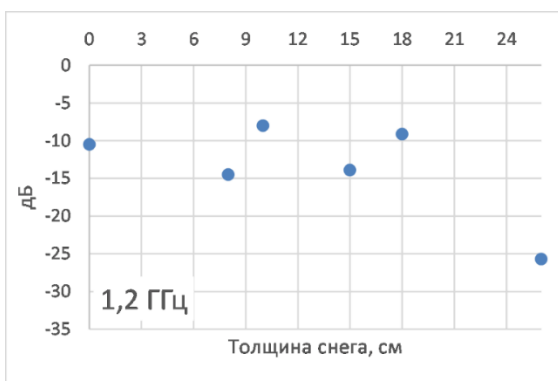


Рис. 4. Зависимости модуля коэффициента отражения от почвы со снежным покровом в зависимости от толщины снега на различных частотах и горизонтальной поляризации (участок 2)



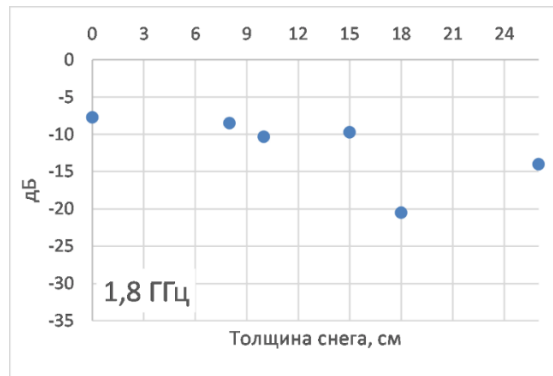


Рис. 5. Зависимости модуля коэффициента отражения от почвы со снежным покровом в зависимости от толщины снега на различных частотах и горизонтальной поляризации (участок 3)

Необходимо отметить, что зависимости коэффициента отражения от толщины снега на одинаковых частотах и поляризациях на разных участках земной поверхности различаются между собой. Это связано с тем, что каждый участок, вообще говоря, представляет собой отдельную случайную реализацию, несмотря на визуальную ровность поверхности и схожесть их между собой. Эксперименты показали, что изменение направления излучения и, соответственно, приема сигнала на одном и том же участке поверхности без снега приводит к изменениям коэффициента отражения, достигающих 3дБ. Поэтому для полного описания отражений от земной поверхности со снежным покровом и без него необходим статистический подход.

Расчеты. Для получения расчетных зависимостей будем считать почву и снежный покров однородными средами, характеризующимися своими комплексными диэлектрическими проницаемостями (КДП).

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'',$$

где ε' и ε'' - действительная и мнимая части КДП, соответственно.

В качестве КДП в микроволновом диапазоне используем полуэмпирическую формулу [1, 2]

$$\varepsilon_1 = 1 + 1,6\rho + 1,86\rho^3, \quad (1)$$

где ρ - плотность снега, г/см³. Значения ρ могут быть заключены в пределах от 0,02 - 0,25 для свежеснеженного снега и 0,3 - 0,5 перед периодом таяния.

Значения ε_2 для снега не превышают $10^{-4} \div 10^{-2}$ [1]. У мерзлой почвы в зависимости от состава и температуры согласно графическим зависимостям, приведенным в [3] $\varepsilon_1 = 4 \div 8$, $\varepsilon_2 = 0,1 \div 2$.

При расчетах амплитуды и фазы коэффициента отражения R от слоистых структур использовалась формула [4]

$$R = \frac{R_{12} + R_{23}e^{-2ik_2d}}{1 + R_{12}R_{23}e^{-2ik_2d}}, \quad (2)$$

где R_{12} , R_{23} - коэффициенты отражения Френеля на границах «воздух - снег» и «снег - почва», соответственно; k_2 - проекция волнового вектора в снеге на перпендикулярное поверхностям направление; d - толщина снежного слоя. Соответственно, цифра 1 обозначает воздух, 2 - снег, 3 - почву. Формула (2) получена для случая плоской волны, падающей на дискретно-слоистую среду с плоскими границами раздела.

Результаты расчетов для плотности снега $\rho = 0,3$ г/см³ приведены на рис. 3. Из них следует, что наблюдается качественное согласие с экспериментом. Причинами расхождений между расчетом и экспериментом могут являться случайный характер

поверхности отражающего участка, обусловленный, как шероховатостью поверхности, так и возможной объемной неоднородностью почвы. Кроме того, падающая на поверхность волна не является идеально плоской.

Однако и эксперименты, и расчеты показывают, что снежный покров даже малой толщины существенно влияет на отражение микроволн L-диапазона. Для большего понимания взаимодействия микроволн с реальными земными покровами необходимы дальнейшие исследования.

Литература

1. Matzler C. . Microwave permittivity of dry snow // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 1996, vol. 34, no. 2, pp. 573-581.
2. Wiesmann A., Matzler C. Microwave Emission Model of Layered Snowpacks // Remote Sensing of Environment, 1999, vol. 70, no. 3, pp. 307 -316.
3. Hallikainen M. T. et. al. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil – Part I: Empirical Models and Experimental Observations // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 1985, v.23, No 1, pp. 25–34.
4. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Изд-во «Наука», 1973.