

УДК 535.391.4

**ВАРИАЦИИ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ КОЭФФИЦИЕНТА  
ОТРАЖЕНИЯ МИКРОВОЛН ОТ ВЛАЖНО-СЛОИСТОЙ ПОЧВЫ**

П. Н. Дагуров, А. В. Дмитриев, Т. Н. Чимитдоржиев,  
А. В. Базаров, А. К. Балтухаев, Ж. Б. Дымбрылов

Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: dpn@ipms.bscnet.ru

*Проведены численные расчеты зависимостей амплитуды и фазы коэффициента отражения микроволн от влажно-слоистой почвы. Показано, что слоистая структура почвы приводит к существенным вариациям как амплитуды, так и фазы коэффициента отражения.*

*Ключевые слова: влажная почва, слоистость, коэффициенты отражения Френеля.*

**VARIATIONS OF AMPLITUDE AND PHASE COEFFICIENT  
OF MICROWAVES REFLECTION OF THE MOIST BEDDED SOIL**

P. N. Dagurov, A. V. Dmitriev, T. N. Chymitdorzhiev,  
A. V. Bazarov, A. K. Baltukhaev, Zh. B. Dymbrylov

Institute of Physical Materials Science of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
6 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: dpn@ipms.bscnet.ru

*Numerical calculations of the amplitude and phase coefficient of microwave reflection of the moist layered soil were conducted. It is shown that the bedded structure of the soil leads to significant variations in amplitude and phase of the reflection coefficient.*

*Keywords: moist soil, bedding, Fresnel reflection coefficients.*

В настоящее время одним из эффективных методов дистанционного зондирования земной поверхности являются интерферометрические радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) космического базирования, которые позволяют выполнять пространственный мониторинг земной поверхности независимо от времени суток и при любой погоде [1]. Для получения корректных продуктов интерферометрической обработки радиолокационных изображений (РЛИ) необходимо с достаточной точностью восстанавливать изменение фазы отраженного сигнала [2]. Эта фаза, формируемая в результате отражения от земной поверхности, определяется не только длиной пройденного волной пути, но и аргументом (фазой) комплексного коэффициента отражения волны. Однако возможное влияние изменения фазы радиолокационных сигналов за время витками, например, в случае возникновения слоистой структуры влажности почвы, в методе радиолокационной интерферометрии обычно не учитывается. Отметим также, что в микроволновой радиометрии излучательная способность земных покровов в радиодиапазоне, определяется амплитудой коэффициента отражения, на которую, влияет слоистая структура [3].

Целью данной работы является исследование влияния слоистой структуры влажности почвы на вариации амплитуды и фазы отраженного сигнала. В работе [4] было рассмотрено влияние слоистой структуры влажности почвы на фазу коэффициента отражения мик-

роволн в  $L$ -диапазоне. В данной работе вариации амплитуды и фазы, вызываемые слоистостью почвы, исследуются и для других используемых в настоящее время радиолокационных диапазонов.

Электрические свойства почвы, от которых характеризуются комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП):

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - i \cdot \varepsilon_2, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_1$  – действительная часть  $\varepsilon$ ;  $\varepsilon_2$  – мнимая часть  $\varepsilon$ .

Коэффициенты отражения от поверхности раздела двух однородных сред определяются известными формулами Френеля. КДП почвы в общем случае является сложной функцией таких параметров как влажность почвы, частота излучения, температура, состав почвы. Для аналитического описания КДП обычно используются эмпирические и полуэмпирические модели. Наиболее существенное влияние на КДП оказывает влажность почвы, что связано с большим различием между диэлектрической проницаемостью сухой почвы ( $\varepsilon_1 = 2-3$ ) и воды ( $\varepsilon_1 = 81$ ). Существует ряд моделей диэлектрической проницаемости, учитывающих частотные зависимости и различные параметры почвы. Наиболее известными в настоящее время являются модели Добсона [5] и Миронова [6], причем последняя, например, принята в качестве базовой для космической миссии SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity).

\* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (госконтракт № 14.515.11.0030) и грантами РФФИ № 12-05-980622-p\_сибирь\_a, РФФИ № 13-08-01132.

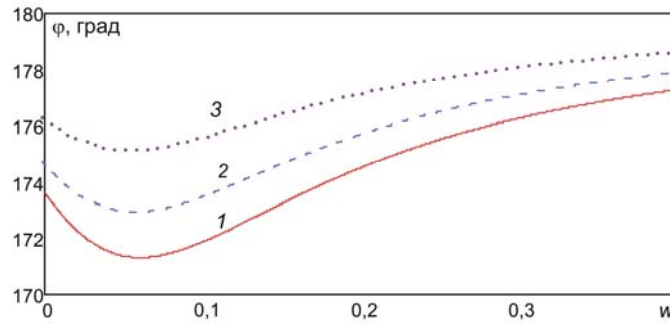


Рис. 1. Зависимости фазы коэффициента отражения от объемной влажности при различных углах падения  $\theta$  (кривая 1 –  $\theta = 0$ ; 2 –  $\theta = 40$ ; 3 –  $\theta = 60$ )

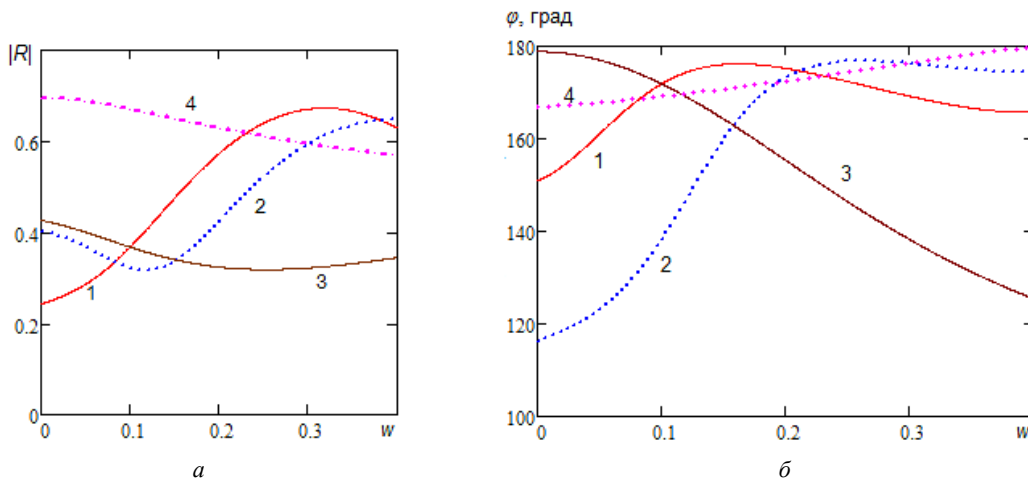


Рис. 2. Зависимости модуля (а) и фазы (б) коэффициента отражения волны с частотой 1,4 ГГц от объемной влажности для слоистой почвы при  $d = 2$  см (кривые 1 и 2 – изменяется влажность слоя, влажность нижнего полупространства равна 0,1 и 0,3 соответственно; кривые 3 и 4 – изменяется влажность нижнего полупространства, влажность слоя равна 0,1 и 0,3 соответственно)

Используем для оценок эмпирические зависимости, полученные в [7] для различных частот. Например, для частоты 1,4 ГГц

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= (2,862 - 0,012 \cdot S + 0,001 \cdot C) + \\ &+ (3,803 + 0,462 \cdot S - 0,341 \cdot C)w + \\ &+ (119,006 - 0,500 \cdot S + 0,633 \cdot C)w^2, \\ \varepsilon_2 &= (0,356 - 0,003 \cdot S - 0,008 \cdot C) + \\ &+ (5,507 + 0,044 \cdot S - 0,002 \cdot C)w + \\ &+ (17,753 - 0,313 \cdot S + 0,206 \cdot C)w^2, \end{aligned}$$

где  $C$  – процентное содержание глины;  $S$  – процентное содержание песка. Результаты расчетов фазы комплексного коэффициента отражения приведены на рис. 1.

Френеля  $\varphi$  в зависимости от объемной влажности почвы при различных значениях угла падения волны. Значения  $C$  и  $S$  слабо влияют на результаты расчетов. Кривые на рис. 1 получены при  $C = 0,13$  и  $S = 0,51$ .

Приведенные зависимости показывают, что увеличение влажности почвы до значения порядка 5 % при-

водит к неглубокому минимуму аргумента коэффициента отражения и при дальнейшем увеличении влажности значение аргумента растет и стремится к 180. Изменения аргумента в зависимости от изменений влажности не превышают 4–6.

В действительности случай однородной почвы является идеализацией. Более общей является ситуация, когда влажность изменяется по глубине и почва является слоистой средой. Слоистость может носить непрерывный или дискретный характер в зависимости от особенностей почвы. Рассмотрим для оценки влияния слоистой структуры влажности почвы на аргумент коэффициента отражения наиболее простой случай двухслойной среды. Пусть на почве, занимающей полупространство с одним значением влажности, лежит слой почвы толщиной  $d$  с другим значением влажности. Границы раздела между средами являются плоскими.

На рис. 2 представлены рассчитанные модули и фазы коэффициента отражения от такой двухслойной среды [8] при нормальном падении волны с частотой 1,4 ГГц на слой толщиной 2 см.

Приведенные данные показывают, что слоистость почвы приводит к заметным изменениям фазы коэф-

фициента ослабления, достигающим значений до 54 (кривая 4) в диапазоне изменений объемной влажности от 0 до 0,4. Отметим, что зависимости имеют довольно нерегулярный вид, модули и аргументы коэффициента отражения может, как возрастать с увеличением влажности, так и убывать или иметь немонотонный характер. Эти явления объясняются интерференционным характером формирования отраженной волны. Наименьшие изменения как амплитуды, так и фазы наблюдаются в случае, когда слой имеет постоянную влажность 0,3, а влажность нижележащего полупространства изменяется. Это объясняется тем, что в данной ситуации глубина проникновения в почву оказывается немногим больше 2 см. В случае влажности верхнего слоя, равной 0,1, также наблюдается слабое изменение амплитуды, однако изменения фазы значительны.

На рис. 3 приведены зависимости модуля и фазы коэффициента отражения от влажности почвы для частоты 5,4 ГГц (С-диапазон). Представленные данные также показывают существенные вариации как

амплитуды, так и фазы при изменении влажности почвы для двухслойной структуры. При этом существенным изменениям амплитуды могут соответствовать сравнительно небольшие колебания фазы (кривые 1). Контраст между менее влажным верхним слоем и более влажной нижележащей почвой приводит к значительному отклонению значения фазы от ее значения в случае однородной почвы.

Расчетные зависимости для частоты 9,65 ГГц (X-диапазон) представлены на рис. 4. Из приведенных зависимостей следует, что они носят такой же качественный характер, как и в С – диапазоне волн. Однако здесь контраст между сухим верхним слоем толщиной всего 5 мм и влажной почвой внизу приводит к еще большим вариациям фазы (больше 100°).

Таким образом, представленные результаты показывают, что при радарной интерферометрии, а особенно при дифференциальной интерферометрии, необходимо учитывать слоистую структуру влажности почвы, поскольку вариации фазы могут превышать 100°.

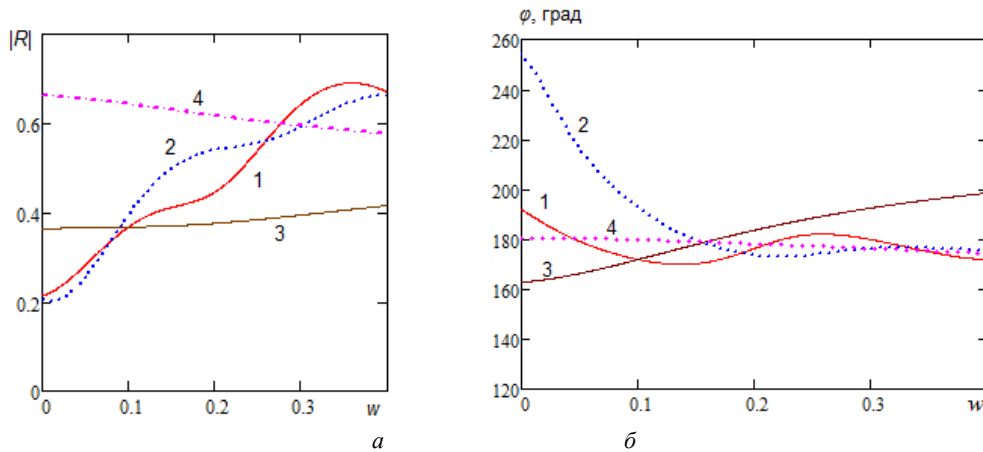


Рис. 3. Зависимости модуля (а) и фазы (б) коэффициента отражения волны с частотой 5,4 ГГц от объемной влажности для слоистой почвы при  $d = 1$  см (кривые 1 и 2 – изменяется влажность слоя, влажность нижнего полупространства равна 0,1 и 0,3 соответственно; кривые 3 и 4 – изменяется влажность нижнего полупространства, влажность слоя равна 0,1 и 0,3 соответственно)

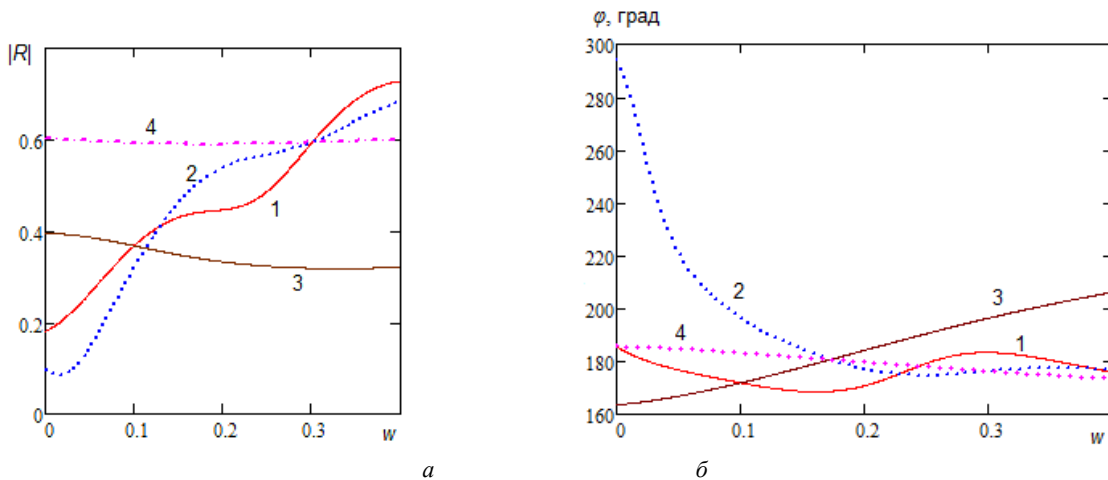


Рис. 4. Зависимости модуля (а) и фазы (б) коэффициента отражения волны с частотой 9,65 ГГц от объемной влажности для слоистой почвы при  $d = 0,5$  см (кривые 1 и 2 – изменяется влажность слоя, влажность нижнего полупространства равна 0,1 и 0,3 соответственно; кривые 3 и 4 – изменяется влажность нижнего полупространства, влажность слоя равна 0,1 и 0,3 соответственно)

### Библиографические ссылки

1. Richards J. A. Remote Sensing with Imaging Radar. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2009.
2. Оценка сезонных деформаций болотистых почв методами радиолокационной интерферометрии и геодезического нивелирования / Т. Н. Чимитдоржиев, П. Н. Дагуров, А. И. Захаров и др. // Криосфера Земли. 2013. Т. 17, № 1. С. 80–87.
3. Sharkov E. A. Passive Microwave Remote Sensing of Earth. Berlin ; Heidelberg ; New York : Springer-Verlag, 2003.
4. Влияние слоистой структуры влажности почвы на работу интерферометрических радиолокаторов с синтезированной апертурой / П. Н. Дагуров, А. В. Дмитриев, Ж. Б. Дымбрылов, Т. Н. Чимитдоржиев // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 8/2. С. 266–267.
5. Microwave dielectric behavior of wet soil-part II: Dielectric mixing models / M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, M. A. El-Rayes // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1985. Vol. 23, № 1. P. 35–46.
6. Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils / V. L. Mironov, M. C. Dobson, V. H. Kaupp et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2004. Vol. 42, № 4. P. 773–785.
7. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1: Empirical Models and Experimental Observations / M. T. Hallikainen, F. T. Ulaby, M. C. Dobson et al. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1985. Vol. 23, № 1. P. 25–34.

8. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М. : Наука, 1973.

### References

1. Richards J. A. Remote Sensing with Imaging Radar. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2009.
2. Chymitdorzhiev T. N., Dagurov P. N., Zakharov A. I., Tatkov G. I., Bykov M. E., Dmitriev A. V., Baldanov N. D., Muhorin E. A., Milheev E. U. Kriosfera Zemli, 2013. Vol. 17, № 1, pp. 80–87.
3. Sharkov E. A. Passive Microwave Remote Sensing of Earth. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2003.
4. Dagurov P. N., Dmitriev A. V., Dymbrylov J. B., Chimitdorzhiev T. N. Izvestia vuzov. Physics. 2012. Vol. 55. № 8/2. Pp. 266–267.
5. Dobson M. C., Ulaby F. T., Hallikainen M. T., El-Rayes M. A. Microwave dielectric behavior of wet soil-part II: Dielectric mixing models. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1985, vol. 23, no. 1, pp. 35–46.
6. Mironov V. L., Dobson M. C., Kaupp V. H., Komarov S. A., Kleshchenko V. N. Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2004, vol. 42, no. 4, pp. 773–785.
7. Hallikainen M. T., Ulaby F. T., Dobson M. C., M. C. El-Rayes M. C., Wu L. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1: Empirical Models and Experimental Observations. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1985, vol. 23, no.1, pp. 25–34.
8. Brehovskih L. M. Waves in в layer media. Moscow, Nauka, 1973.

© Дагуров П. Н., Дмитриев А. В., Чимитдоржиев Т. Н., Базаров А. В., Балтухаев А. В., Дымбрылов Ж. Б., 2013

УДК 535.391.4

### ОТРАЖЕНИЕ МИКРОВОЛН L-ДИАПАЗОНА ОТ СНЕЖНОГО ПОКРОВА\*

П. Н. Дагуров<sup>1</sup>, А. В. Дмитриев<sup>1</sup>, С. И. Добрынин<sup>1</sup>, Г. И. Татков<sup>2</sup>,  
Т. Н. Чимитдоржиев<sup>1</sup>, А. В. Базаров<sup>1</sup>, А. К. Балтухаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: dprn@ipms.bscnet.ru

<sup>2</sup>Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а

*Рассматривается отражение микроволн частотой 1,4 и 1,8 ГГц от структуры «снег–почва». Приведены результаты наземного экспериментального исследования по бистатической схеме. Проведено сравнение с расчетными результатами. Показано, что изменение высоты снежного покрова вызывает заметные вариации уровня отраженного поля. Установлено, что экспериментальные и расчетные результаты частично согласуются между собой. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения теоретических моделей активного и пассивного микроволнового дистанционного зондирования.*

*Ключевые слова:* микроволны, отражение, снег, слоистая структура.

\* Работа выполнена при частичной поддержке грантами РФФИ № 12-05-980622-р\_сибирь\_а, РФФИ № 13-08-01132, Интеграционными проектами СО РАН № 73 и № 144.