

УДК 537.86; 621.317.335.3

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.33.2.002](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.33.2.002)

Оценка точности реконструкции электрофизических и геометрических параметров поляриметрическим методом многослойных диэлектрических сред

В.Г. Машков, В.А. Малышев

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
Воронеж, Российская Федерация*

Резюме. Разработка методов количественной интерпретации результатов контроля электрофизических и геометрических параметров многослойной среды является одной из важнейших проблем оценки ее состояния и имеет как практическое, так и теоретическое значение. Представлены результаты исследования потенциальной информативности метода дистанционной идентификации состояния снежно-ледяного покрова по отношениям коэффициентов отражения Френеля, использующего сверхширокополосный линейно-частотно-модулированный сигнал при реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных диэлектрических сред. Представлена оценка точности реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных диэлектрических сред, учитывающая значения электрофизических и геометрических параметров слоев среды, уровень шума в измерительных данных и ширину полосы частот измерений. Приведены результаты имитационного моделирования реконструкции относительных диэлектрических проницаемостей и толщин многослойной среды в виде снежно-ледяного покрова при различных значениях среднего квадратического отклонения уровня шума в поляризационных отношениях измеренных коэффициентов отражения электромагнитной волны. Установлено, что точность реконструкции электрофизических параметров слоев снежно-ледяного покрова уменьшается с увеличением уровня шума, а также с уменьшением диэлектрической проницаемости и толщины слоев. Согласно результатам имитационного моделирования и экспериментального исследования многослойной диэлектрической среды в виде снежно-ледяного покрова, при ширине полосы частот измерений 6 ГГц погрешности оценок диэлектрических проницаемостей и толщин слоев составляют не более 10 % с доверительной вероятностью 0,95 при среднем квадратическом отклонении уровня шума 3,8-4,8.

Ключевые слова: снежно-ледяной покров, подповерхностное зондирования, численное моделирование, диэлектрическая проницаемость, многослойная среда.

Для цитирования: Машков В.Г., Малышев В.А. Оценка точности реконструкции электрофизических и геометрических параметров поляриметрическим методом многослойных диэлектрических сред. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2021;9(2). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=934> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.002

Estimation of the accuracy of reconstruction of electrophysical and geometric parameters by the polarimetric method of multilayer dielectric medium

V.G. Mashkov, V.A. Malyshev

*Military Educational-Research Centre of Air Force «Air Force Academy named
after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin»,
Voronezh, Russian Federation*

Abstract: The development of methods for quantitative interpretation of the results of monitoring the electrophysical and geometric parameters of a multilayer medium is one of the most critical problems

in assessing its state, both practical and theoretical value. The paper presents the results of a study of the potential informativeness of the method for remote identification of the state of snow-ice cover by the ratio of Fresnel reflection coefficients, using an ultra-wideband linear-frequency-modulated signal in the reconstruction of electrophysical and geometric parameters of multilayer dielectric medium. An estimation of the accuracy of reconstruction of electrophysical and geometric parameters of multilayer dielectric medium is presented, considering the values of electrophysical and geometric parameters of the medium layers, the noise level in the measurement data, and the measurement bandwidth. The results of simulation modeling of the reconstruction of the relative permittivity and thickness of a multilayer medium in the form of snow-ice cover at different values of the mean square deviation of the noise level in the polarization relations of the measured reflection coefficients of the electromagnetic wave are described. It is found that the accuracy of reconstruction of the electrophysical parameters of the layers of snow-ice covers reduces with the increasing noise level, as well as with decreasing permittivity and layer thickness. The results of experimental studies confirm the adequacy of the developed simulation model. The presented model allows us to quantify the potential accuracy of electrophysical parameters of multilayer dielectric medium reconstruction for a specific measuring complex that implements the multi-frequency method of electromagnetic waves. Experimental studies and simulation results of a multi-layer dielectric medium in the form of snow-ice cover have demonstrated the theoretical possibilities of obtaining the relative permittivity and thickness of individual layers with a relative error of no more than 10 %, with a measurement band of 6 GHz and an RMS of the noise level of 3.8–4.8.

Keywords: snow and ice cover, subsurface sounding, numerical modeling, permittivity, multilayer medium.

For citation: Mashkov V.G., Malyshev V.A. Estimation of the accuracy of reconstruction of electrophysical and geometric parameters by the polarimetric method of multilayer dielectric medium. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(2). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=934> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.002 (In Russ).

Введение

Формируемый в естественной среде снежно-ледяной покров состоит из нескольких слоев с различными плотностями, долями содержания воды и собственными структурами, уплотняющихся к низу в процессе снегопадов, оттепелей, похолоданий, определяемых рядом гидрометеорологических условий.

Толщина ледяного покрова на реках и озерах, находящихся на территории Российской Федерации, изменяется от 10 сантиметров в южных районах до 3 м в полярной зоне Сибири, а на реках Восточной Сибири достигает 4 м. В большинстве своем и, в особенности, сильносоленых морских льдов толщина не превышает 2 м [1].

Точность оценки состояния снежно-ледяного покрова определяется точностью определения их электрофизических и геометрических параметров (ЭФГП), в частности, при посадке воздушного судна вертолетного типа на неподготовленную заснеженную площадку или водоем со снежно-ледяным покровом. Толщина снежного покрова более 50 сантиметров, а ледяного менее допустимого значения для конкретного типа воздушного судна может привести проваливанию под снег, лед, опрокидыванию вертолета при посадке днем и ночью, в простых и сложных метеоусловиях (туман, дымка, дождь, снег, запыленность или задымленность атмосферы), а также в условиях поднятой с грунта пыли или снега его вращающимся винтом [2].

Таким образом, разработка новых методов определения ЭФГП многослойных диэлектрических сред, с целью идентификации их слоев, а также обнаружение в них неоднородностей является актуальной научной задачей.

В общем случае, реальные подповерхностные структуры и слои снежно-ледяного покрова в значительной степени неоднородны, поэтому весьма сложно учесть их параметры при моделировании для исследований [3]. Для выбранного класса задач в

качестве основных электродинамических моделей выбираются плоскостроистая ($\varepsilon(z) = \varepsilon_{\text{ср}i}$, $\sigma(z) = \sigma_{\text{ср}i}$) или квазистроистая среда: $\varepsilon(x, y, z) = \varepsilon_{\text{ср}i}$, $\sigma(x, y, z) = \sigma_{\text{ср}i}$, $z_i(x, y) < z < z_{i+1}(x, y)$, где $i = 1, 2, \dots, n$, $z = z_i(x, y)$ и $z = z_{i+1}(x, y)$ – ограничивающие i -й слой переменной толщины $h_{\text{ср}i}(x, y) = z_{i+1}(x, y) - z_i(x, y)$, $z_0 = 0$ и $z_n = \infty$. Для упрощения вычислений полагается $\varepsilon_{\text{ср}i}$ между $z = z_i(x, y)$ и $z = z_{i+1}(x, y)$ постоянной и однородной в x и y направлениях по осям.

Для проведения численного моделирования снежно-ледяной покров с профильным распределением диэлектрической проницаемости представлен в виде многослойной системы (Рисунок 1). Фактически, каждый его слой, например, снега или фирна – смесь двухкомпонентной среды воздуха и льда либо трех компонентой, включающей воздух, лед и воду. При этом полагают, что геометрические размеры составляющих его частиц, расположенных в однородной среде существенно меньше минимальной длины волны, определяемой характеристиками зондирующего сигнала. Так же малым является линейный размер частиц по сравнению с толщиной слоя снежно-ледяного покрова и шириной луча («пятном») антенны РЛС подповерхностного зондирования на границах слоев. Исходя из этого каждый слой может быть описан эквивалентной комплексной относительной диэлектрической проницаемостью (КОДП) среды. Плавное изменение электрофизических свойств вдоль структуры, позволяет использовать модель в виде плоскостроистых (квазистроистых) сред в пределах ширины луча диаграммы направленности антенны [4].

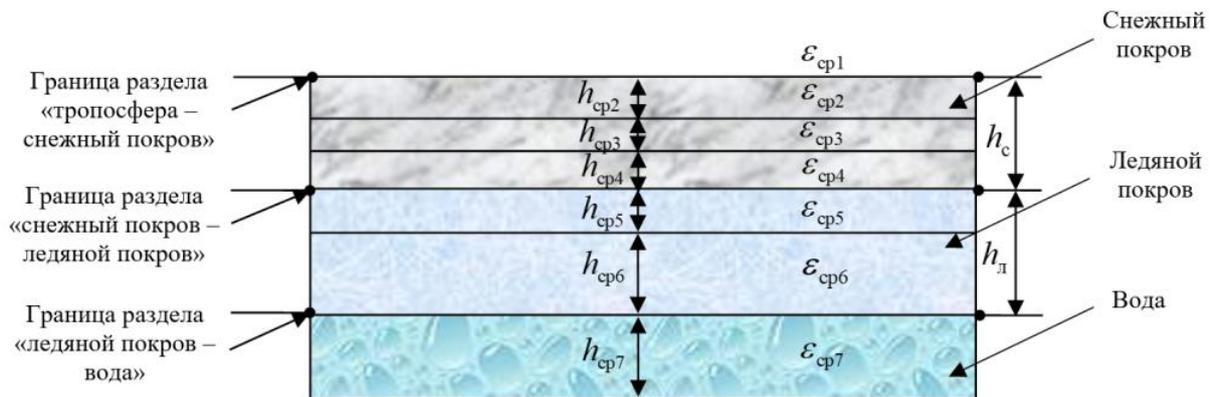


Рисунок 1 – Структура снежно-ледяного покрова
Figure 1 – Snow and ice cover structure

Для повышения эффективности оценки ЭФГП многослойных диэлектрических материалов в работах [5–10] применен метод квазирешений в рамках многочастотной (широкополосной) СВЧ-интроскопии. В качестве информативного параметра для оценки ЭФГП слоев при этом используют комплексный коэффициент отражения $\hat{R}(f, \xi)$, где f – частота зондирующего сигнала; $\xi = \{\varepsilon_{\text{ср}1}, \dots, \varepsilon_{\text{ср}k}, H_{k+1}, \dots, H_{2k}\}$, $i = 1, \dots, 2k$ – $2k$ -мерный вектор, описывающий электрофизические и геометрические параметры k -слойной среды; $\varepsilon_{\text{ср}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость среды; $H_{k+1} = (h_{k+1}/\lambda)_{k+1}, \dots, H_{2k} = (h_{2k}/\lambda)_{2k}$ – относительные толщины слоев k -слойной среды; h_{k+1}, \dots, h_{2k} – толщины слоев среды; λ – длина волны зондирующего сигнала.

Для оценки точности и достоверности реконструкции ЭФГП многослойной среды в виде снежно-ледяного покрова водоема методом дистанционной идентификации состояния снежно-ледяного покрова по отношениям коэффициентов отражения Френеля [11], где в качестве информативного параметра используется $\dot{R}(f, \xi)$, определяемый в результате наклонного зондирования линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) сигналом с вертикальной и горизонтальной поляризацией, что позволяет косвенно определить электрофизические параметры, учтем частотную дисперсию ЭФГП [4–10].

Цель работы – численное исследование и экспериментальная проверка потенциальных возможностей метода дистанционной идентификации состояния снежно-ледяного покрова по отношениям коэффициентов отражения Френеля по точности реконструкции ЭФГП многослойных диэлектрических сред в зависимости от значений их ЭФГП, уровня шума измерительных данных и ширины спектра (девиации) ЛЧМ-сигнала.

Постановка прямой задачи

Решение прямой задачи изложенной в [11] кратко можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} A &= \{ \varepsilon_{cp1}, \varepsilon_{cp2}, \dots, \varepsilon_{cpm}, h_{cp1}, h_{cp2}, \dots, h_{cpm} \} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \{ R_{cp1}^{BB}, R_{cp2}^{BB}, \dots, R_{cpm}^{BB}, R_{cp1}^{GT}, R_{cp2}^{GT}, \dots, R_{cpm}^{GT}, \tau_{cp1}, \tau_{cp2}, \dots, \tau_{cpm} \} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \{ P_{cp1,2}, P_{cp2,3}, \dots, P_{cpi+1,m}, \tau_{cp1,2}, \tau_{cp2,3}, \dots, \tau_{cpi+1,m} \}. \end{aligned}$$

По заданным комплексным относительным диэлектрическим проницаемостям слоев снежно-ледяного покрова ε_{cpm} и их толщинам h_{cpm} , получают коэффициенты отражения Френеля с вертикальной R_{cpm}^{BB} , горизонтальной R_{cpm}^{GT} поляризацией и временные задержки для каждого слоя τ_{cpm} . Что является исходными данными для определения поляризационных отношений коэффициентов отражения Френеля по мощности $P_{cpi+1,m}$ и временных задержек $\tau_{cpi+1,m}$ для каждой границы раздела слоев снежно-ледяного покрова.

Обратная задача восстановления электрофизических и геометрических параметров снежно-ледяного покрова (реконструкция параметров слоев)

Сущность решения обратной задачи [12–20] по оценке диэлектрических проницаемостей отдельных слоев снежно-ледяного покрова на основе определения поляризационных отношений коэффициентов отражения Френеля заключается в следующем.

Пусть объектом зондирования подстилающей поверхности является снежно-ледяной покров из m слоев, облучаемый ЛЧМ-сигналом под наклоном в интервале от 25 до 45 градусов электромагнитной волной одновременно с горизонтальной и вертикальной поляризацией.

На Рисунке 2 [11] виден рост поляризационных отношений коэффициентов отражения Френеля по мощности P_{cpm} сигналов с вертикальной и горизонтальной поляризациями с ростом угла зондирования.

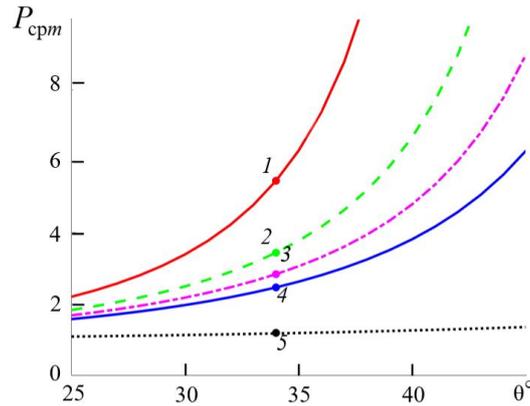


Рисунок 2 – Графики зависимости отношения коэффициентов отражения Френеля по мощности $P_{срм}$ сигналов с вертикальной и горизонтальной поляризациями:

1 – $\varepsilon_{ср2} = 1,2 - j0,0008$, 2 – $\varepsilon_{ср3} = 1,9 - j0,0008$, 3 – $\varepsilon_{ср4} = 2,5 - j0,0008$, 4 – $\varepsilon_{ср5} = 3,2 - j0,0008$,
5 – $\varepsilon_{ср6} = 74 - j$ в зависимости от угла зондирования в пределах $\theta = 25^\circ \dots 45^\circ$

Figure 2 – Graphs of the dependence of the ratio of the Fresnel reflection coefficients on the power of signals with vertical and horizontal polarizations: 1 – $\varepsilon_{ср2} = 1,2 - j0,0008$, 2 – $\varepsilon_{ср3} = 1,9 - j0,0008$,
3 – $\varepsilon_{ср4} = 2,5 - j0,0008$, 4 – $\varepsilon_{ср5} = 3,2 - j0,0008$, 5 – $\varepsilon_{ср6} = 74 - j$ depending on the sensing angle within $\theta = 25^\circ \dots 45^\circ$

По измеренным коэффициентам отражения Френеля сигналов с горизонтальной $R_{срi+1,m}^{гг}$ и вертикальной $R_{срi+1,m}^{вв}$ поляризацией для $i, i + 1$ границы раздела слоев снежно-ледяного покрова определяются их отношения $P_{срi+1,m}$.

Последовательное определение КОДП каждого последующего слоя $\varepsilon_{срm}$, где $m = 2, 3, \dots, M$ – номер слоя снежно-ледяного покрова, осуществляется по формуле:

$$\varepsilon_{срm} = \left[1 + \frac{4\sqrt{P_{срm}(\theta)}}{(1 - \sqrt{P_{срm}(\theta)})^2} \sin(\theta)^2 \right] \text{tg}(\theta)^2, \quad (1)$$

что соответствует графикам Рисунка 2 [11] зависимости

$$P_{срm} = \frac{|R_{срm}^{гг}|^2}{|R_{срm}^{вв}|^2}, \quad (2)$$

где $|R_{срm}^{гг}|^2$, $|R_{срm}^{вв}|^2$ – коэффициенты отражения Френеля по мощности (отражательная способность) измеренные на горизонтальной и вертикальной поляризациях соответственно; m – количество пиков эхо-сигнала (границ раздела слоев снежно-ледяного покрова с разными КОДП).

То есть, по измеренным коэффициентам отражения Френеля сигналов с горизонтальной $R_{срi+1,m}^{гг}$, вертикальной $R_{срi+1,m}^{вв}$ поляризацией и временным задержкам $\tau_{срi+1,m}$ до границы раздела слоев снежно-ледяного покрова для $i, i + 1$ границы раздела слоев снежно-ледяного покрова определяются их отношения $P_{срi+1,m}$ и время задержки $\tau_{срm}$ электромагнитной волны для каждого слоя. Выходными параметрами являются

значения КОДП $\varepsilon_{срm}$ и толщины каждого слоя $h_{срm}$.

Кратко это можно представить в виде

$$B = \left\{ R_{ср1,2}^{ГГ}, R_{ср2,3}^{ГГ}, \dots, R_{срi+1,m}^{ГГ}, R_{ср1,2}^{ББ}, R_{ср2,3}^{ББ}, \dots, R_{срi+1,m}^{ББ}, \tau_{ср1,2}, \tau_{ср2,3}, \dots, \tau_{срi+1,m} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left\{ P_{ср1,2}, P_{ср2,3}, \dots, P_{срi+1,m}, \tau_{ср1}, \tau_{ср2}, \dots, \tau_{срm} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left\{ \varepsilon_{ср1}, \varepsilon_{ср2}, \dots, \varepsilon_{срm}, h_{ср1}, h_{ср2}, \dots, h_{срm} \right\}.$$

Для идентификации слоев снежно-ледяного покрова производится установление тождественности полученных значений КОДП слоев $\varepsilon_{срm}$ с заданными расчетными (образцовыми) значениями КОДП слоев $\varepsilon_{в.ср\Delta}$ по условию $\varepsilon_{срi+1} = \varepsilon_{в.ср\Delta}$: «снег», «фирн», «лед» либо «вода».

Решение обратной задачи реконструкции ЭФП снежно-ледяного покрова в виде «снега», «фирна», «льда» и «воды» осуществляется посредством косвенного определения КОДП каждого последующего нижележащего слоя с разрешением по действительной части, например, при $\theta = 34^\circ$ для $\varepsilon_{ср7} = 1,07 - j0,0008$ с поляризационным отношением $P_{ср7} = 6,401$, для $\varepsilon_{ср8} = 1,08 - j0,0008$ с поляризационным отношением $P_{ср8} = 6,312$, соответствующей 10^{-2} .

Методическая погрешность определения КОДП слоев по поляризационным отношениям коэффициентов отражения Френеля по мощности $P_{срm}$ сигналов с горизонтальной и вертикальной поляризациями (Рисунок 2) при заданных расчетных значениях $\varepsilon_{срi+1}$ (например, полученные при $\theta = 34^\circ$ соответствующие поляризационные отношения выглядят следующим образом: 1 – $P_{ср2} = 5,4553$, 2 – $P_{ср3} = 3,4396$, 3 – $P_{ср4} = 2,8381$, 4 – $P_{ср5} = 2,4668$, 5 – $P_{ср6} = 1,1923$, что соответствует: $\varepsilon_{ср2} = 1,2 - j0,0008$, $\varepsilon_{ср3} = 1,9 - j0,0008$ – сухому снегу, $\varepsilon_{ср4} = 2,5 - j0,0008$ – сухому фирну, $\varepsilon_{ср5} = 3,2 - j0,0008$ – сухому льду при отсутствии влаги, $\varepsilon_{ср6} = 74 - j$ – морской воде соленостью $S_{мв} = 35$ г/кг) построенных по формуле (2) и определенных согласно формулы (1), то есть их оценка без учета воздействия шума, составляет не более 1,5 %, что говорит о правомерности использования формулы (1).

Для оценки погрешностей измерения КОДП слоев [3, 5, 7, 14, 21–28], соответствующих реальной практической ситуации, к значениям поляризационных отношений коэффициентов отражения Френеля по мощности $P_{срm}$ сигналов с горизонтальной и вертикальной поляризациями и времени задержки в каждом слое $\tau_{срi}$ добавили аддитивный гауссовский шум

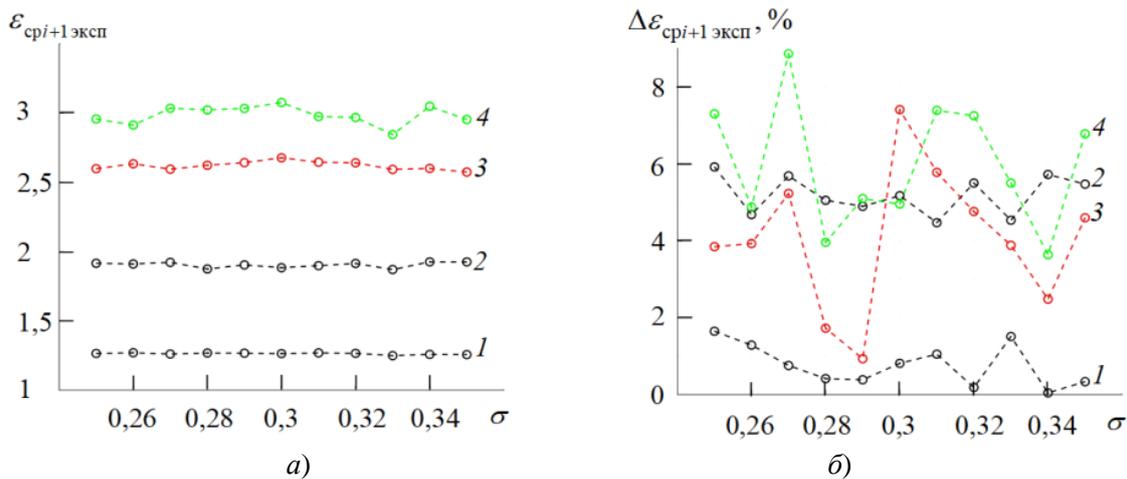
$$\begin{cases} P_{срi,i+1\text{эксп}} = P_{срi,i+1} + n(f_\xi); \\ \tau_{срi\text{эксп}} = \tau_{срi} + n(f_\xi), \end{cases}$$

где $n(f_\xi)$ – шум воздействующий на ξ -е измерение, обусловленный как погрешностью комплекса измерения и другими экспериментальными погрешностями при проведении эксперимента, так и достоверностью выбранной электродинамической модели реальной физической ситуации.

С учетом $\tau_{срi} = 2h_{срi}/V_{срi}$ и (1) примут вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{\text{ср}i+1\text{эксп}} = \left[1 + \frac{4\sqrt{P_{\text{ср}m}(\theta) + n(f_{\xi})}}{\left(1 - \sqrt{P_{\text{ср}m}(\theta) + n(f_{\xi})}\right)^2} \sin(\theta)^2 \right] \text{tg}(\theta)^2; \\ h_{\text{ср}i\text{эксп}} = \frac{\tau_{\text{ср}i} V_{\text{ср}i}}{2} + n(f_{\xi}). \end{array} \right.$$

На Рисунке 3 представлена зависимость измеренных значений относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{ср}i+1\text{эксп}}$ m слоев (Рисунок 3а) и погрешности их оценки (Рисунок 3б) при возрастании значений СКО уровня шума от 0,25 до 0,35 с шагом 0,01 по 100 реализациям каждого, где 1 – $\varepsilon_{\text{ср}2\text{эксп}}$, 2 – $\varepsilon_{\text{ср}3\text{эксп}}$, 3 – $\varepsilon_{\text{ср}4\text{эксп}}$, 4 – $\varepsilon_{\text{ср}5\text{эксп}}$, 5 – $\varepsilon_{\text{ср}6\text{эксп}}$.



а) измеренных значений относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{ср}i+1\text{эксп}}$ m слоев; б) погрешности их оценки $\Delta\varepsilon_{\text{ср}i+1\text{эксп}}$

Рисунок 3 – Графики зависимостей при возрастании значений СКО уровня шума σ от 0,25 до 0,35 с шагом 0,01

а) the measured values of the relative permittivity $\varepsilon_{\text{ср}i+1\text{эксп}}$ m of the layers;

б) the errors of their estimation $\Delta\varepsilon_{\text{ср}i+1\text{эксп}}$

Figure 3 – Graphs of dependencies with increasing values Noise level RMS ratio from 0.25 to 0.35 in increments of 0.01

На Рисунке 4 представлена зависимость измеренных значений глубин $h_{\text{ср}i\text{эксп}}$ m слоев (Рисунок 4а) и погрешности их оценки (Рисунок 4б) при возрастании значений СКО уровня шума σ от 0,25 до 0,35 с шагом 0,01, где 1 – $h_{\text{ср}1\text{эксп}}$, 2 – $h_{\text{ср}2\text{эксп}}$, 3 – $h_{\text{ср}3\text{эксп}}$, 4 – $h_{\text{ср}4\text{эксп}}$, 5 – $h_{\text{ср}5\text{эксп}}$.

Анализ зависимостей Рисунок 3 и 4 показывает, что значение погрешностей оценки измеренных значений КОДП $\varepsilon_{\text{ср}i+1\text{эксп}}$ и глубин $h_{\text{ср}i\text{эксп}}$ m слоев при возрастании значений СКО уровня шума σ от 0,25 до 0,35 с шагом 0,01 по 100 реализациям каждого с вероятностью 0,95 не превышает 10 %, что говорит о правомерности использования данного метода.

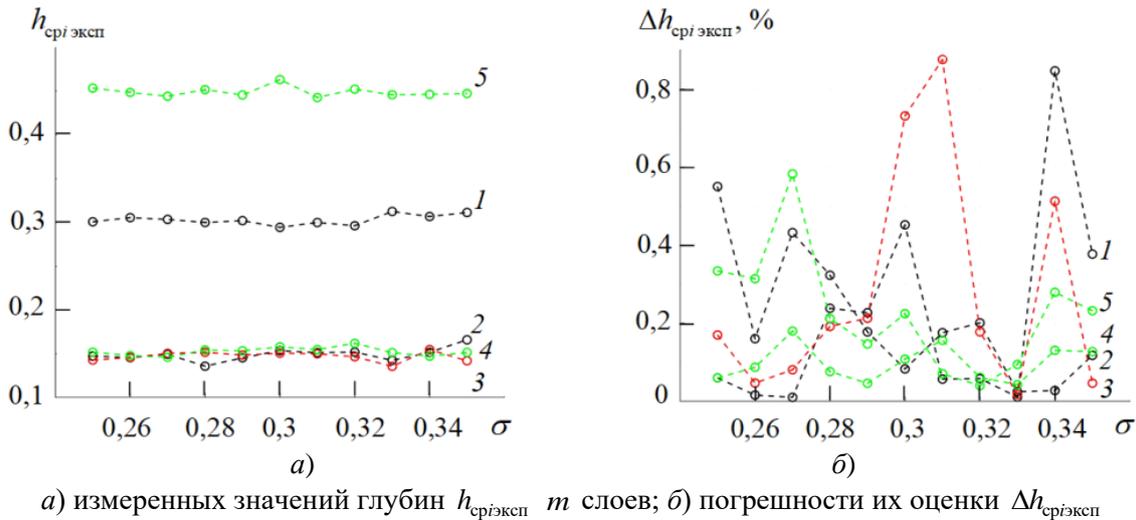


Рисунок 4 – Графики зависимостей при возрастании значений
СКО уровня шума σ от 0,25 до 0,35 с шагом 0,01

a) the measured values of the depth $h_{срiэксп}$ m of the layers; б) the errors of their estimation $\Delta h_{срiэксп}$

Figure 4 – Graphs of dependencies with increasing values
Noise level RMS ratio from 0.25 to 0.35 in increments of 0.01

Заключение

Таким образом, методическая погрешность определения диэлектрической проницаемости слоев по поляризационным отношениям коэффициентов отражения Френеля по мощности $P_{срm}$ сигналов с горизонтальной и вертикальной поляризациями (Рисунок 2) при заданных расчетных значениях $\varepsilon_{срi+1}$ построенных по формуле (2) и определенных согласно формулы (1) без учета воздействия шума, составляет не более 1,5 %, что говорит о правомерности использования формулы (1).

Таким образом, дистанционная идентификация составляющих элементов структуры снежно-ледяного покрова [11] позволяет автоматизировать процесс оценки возможности выполнения посадки, тем самым снизив время принятия решения и повысив уровень безопасности. В отличие от известных методов идентификации приповерхностного слоя [29–32] осуществляется идентификация слоев многослойной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Финкельштейн М.И., Лазарев Э.И., Чижов А.Н. *Радиолокационные аэроледомерные съемки рек, озер, водохранилищ*; под ред. Финкельштейн М.И. Ленинград: Гидрометеоиздат. 1984.
2. Приказ Минтранса РФ от 31 июля 2009 г. № 128 «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации». Доступно по: <https://base.garant.ru/196235/> (дата обращения 11.03.2021).
3. Гринев А.Ю., Темченко В.С., Багно Д.В. *Радары подповерхностного зондирования. Мониторинг и диагностика сред и объектов*: Монография. М.: Радиотехника. 2013.
4. Pennock S.R., Redfern M.A. *Optimising Multihead Configurations for Depth Determination in Ground Penetrating Radar*. Proc. of the European Conference on Antennas and Propagation. 06–10 Nov. 2006, Eu-CAP, Nice, France. 2006.

5. Казьмин А.И., Федюнин П.А. Оценка точности реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных диэлектрических покрытий многочастотным радиоволновым методом поверхностных медленных электромагнитных волн. *Измерительная техника*. 2020;8:51–58. Доступно по: <https://izmt.ru/kurilka/admin/izmt/2020/8/19550188055f6b45e294ec9.pdf>. DOI: 10.32446/0368-1025it.2020-8-51-58 (дата обращения 11.03.2021).
6. Mikhnev V.A., Nyfors E., Vainkainen P., *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1997;45(9):1405–1410. DOI:10.1109/8.623130
7. Mohamed Abou-Khousa, Zoughi R., *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. 2007;56(4):1107–1113. DOI:10.1098/rspa.2009.0664
8. Борулько В.Ф., Дробахин О.О., Славин И.В. *Многочастотные СВЧ неразрушающие методы измерения параметров слоистых диэлектриков*. Днепропетровск: Изд-во ДГУ. 1982.
9. Андреев М.В., Борулько В.Ф., Дробахин О.О. Применение концепции квазирешения для определения параметров слоистых диэлектрических структур по данным измерений характеристик отражения на многих частотах. Ч. I. *Дефектоскопия*. 1995;12:41–50.
10. Ахметшин А.М., Славин В.И., Тихий В.Г., Платонов Е.Д. Идентификация слоистых диэлектрических структур методом параметрической оптимизации в многочастотной СВЧ интроскопии. *Дефектоскопия*. 1983;12:57–65.
11. Машков В.Г. Метод дистанционной идентификации состояния снежно-ледяного покрова по отношениям коэффициентов отражения Френеля. *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*. 2020;23(5):46–56. Доступно по: <https://re.eltech.ru/jour/article/view/467>. DOI:10.32603/1993-8985-2020-23-5-46-56 (дата обращения 11.03.2021).
12. Бровенко А.В., Вертий А.А., Мележик Н.П., Мележик П.Н., Поединчук А.Е. Одномерные обратные задачи электромагнитного зондирования слоистых диэлектрических сред. *Прикладная радиофизика*. 2015;6(20)(4):92–97.
13. Денисова Н.А., Резвов А.В. Обратная задача отражения электромагнитных волн для слоисто-неоднородного полупространства с вещественной диэлектрической проницаемостью без дисперсии. *Известия вузов. Радиофизика*. 2012;LV(5):369–379. Доступно по: https://radiophysics.unn.ru/sites/default/files/papers/2012_5_369.pdf (дата обращения 11.03.2021).
14. Авдоченко Б.И., Задорин А.С., Замотринский В.А., Ильиных А.А., Круглов Р.С., Литвинов Р.В., Шибельгут А.А. *Восстановление диэлектрической проницаемости слоистой среды по частотной зависимости коэффициента отражения методом минимизации регуляризирующего функционала: сборник докладов ТУСУРа*. Воронеж, июнь 2007 г. Воронеж: ТУСУРа. 2007:5–9.
15. Батраков Д.О., Симачев А.А. Восстановление профиля диэлектрической проницаемости плоскостройной среды с учетом дисперсии при частотном зондировании. *Вестник Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. Серия Радиофизика и Электроника*. 2009;883:45–49.
16. Coen S. Inverse scattering of a layered and dispersionless dielectric half-space, *IEEE Trans. Antennas Propagat*. 1981;29:726–732.
17. Balanis G.N. Inverse scattering: Determination of inhomogeneities in sound speed, *J. Math. Phys*. 1982;23:2562–2568.
18. Денисова Н.А., Степанова С.А. Обратная задача восстановления диэлектрической проницаемости с разрывным профилем. *ЖВММФ*. 1999;39(7):1180–1187.
19. Авдоченко Б.И., Задорин А.С., Замотринский В.А., Ильиных А.А. и др. Восстановление диэлектрической проницаемости слоистой среды по частотной

- зависимости коэффициента отражения методом минимизации регуляризирующего функционала. *Доклады ТУСУР*. 2007;1:5–8.
20. Резвов А.В., Денисова Н.А. *О реконструкции профиля показателя преломления слоисто-неоднородной диэлектрической среды по амплитудному и энергетическому коэффициентам отражения*. Доступно по: http://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/pdf/S3_19.pdf (дата обращения 18.02.2021).
 21. Казьмин А.И., Федюнин П.А. Восстановление структуры электрофизических параметров многослойных диэлектрических материалов и покрытий по частотной зависимости коэффициента ослабления поля поверхностной электромагнитной волны. *Измерительная техника*. 2019;9:39–45. Доступно по: <https://izmt.ru/kurilka/admin/izmt/2019/9/21123204785da0565c919c8.pdf>. DOI:10.32446/0368-1025it.2019-9-39-45 (дата обращения 18.02.2021).
 22. Федюнин П.А., Казьмин А.И., Манин В.А. СВЧ-способ дефектоскопии радиопоглощающих покрытий и устройство для его реализации. *Контроль. Диагностика*. 2017;11:32–39. Доступно по: <http://www.td-j.ru/index.php/current-issue-rus/1526-032-039>. DOI:10.14489/td.2017.11.pp.032–039 (дата обращения 18.02.2021).
 23. Бреховских Л.М. *Волны в слоистых средах*. М.: Наука. 1973.
 24. Карпов И.Г. Аппроксимация экспериментальных распределений радиолокационных сигналов с использованием модернизированных распределений Пирсона. *Радиотехника*. 2003;5:56–61.
 25. Поздняк С.И., Мелитицкий В.А. *Введение в статистическую теорию поляризации радиоволн*. М.: Сов. радио. 1974.
 26. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2020618468 Российская Федерация. *Идентификация слоев снежно-ледяного покрова по поляризационным отношениям коэффициентов отражения Френеля*. Машков В.Г., (RU); правообладатель Машков В.Г. № 2020615405; заявл. 26.05.2020; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.07.2020.
 27. Александров П.Н. *Теоретические основы георадарного метода*: Монография. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2017.
 28. Guido Valerio, David R. Jackson, Alessandro Galli. *Proceedings of the Royal Society*. 2010;466:2447–2469. DOI:10.1098/rspa.2009.0664
 29. Шостак А.С., Загоскин В.В., Лукьянов С.П., Карауш А.С. О возможности определения диэлектрической проницаемости верхних слоев подстилающих сред по измеренным коэффициентам отражения при наклонном зондировании плоскими волнами вертикальной и горизонтальной поляризации в СВЧ диапазоне. *Журнал радиоэлектроники*. 1999.
 30. Патент РФ № 2613810, МПК G01R 27/00 (2006.01). *Способ измерения относительной комплексной диэлектрической проницаемости материала с потерями в СВЧ диапазоне*. Валеев Г.Г.; заявитель и патентообладатель Валеев Г.Г. Заявка № 2015142390 от 06.10.2015. Оpubл. 21.03.2017. Бюл. № 9.
 31. Патент РФ № 2623668, МПК G01N 27/06 (2006.01) G01R 27/26 (2006.01). *Способ дистанционного определения относительной диэлектрической проницаемости среды под границей атмосфера-океан*. Запевалов А.С.; заявитель и патентообладатель МГИ РАН. Заявка № 2015156757 от 28.12.2015. Оpubл. 28.06.2017. Бюл. № 19.
 32. Пинчук А.Н. Влияние поляризации зондирующего радиосигнала на эффективность выделения отклика надводной цели. *Наука и образование*. МГТУ им. Баумана. 2015;3:140–152. Доступно по: <http://engineering-science.ru/doc/760670.html>. DOI:10.7463/0315.0760670 (дата обращения 18.02.2021).

REFERENCES

1. Finkelstein M.I., Lazarev E.I., Chizhov A.N. *Radar aeroleodomic surveys of rivers, lakes, reservoirs*; ed. by Finkelstein M.I. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1984. (In Russ)
2. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation no. 128 of July 31, 2009 "On Approval of the Federal Aviation Regulations" Preparation and Execution of flights in Civil Aviation of the Russian Federation". Available at: <https://base.garant.ru/196235/> (accessed 11.03.2021). (In Russ)
3. Grinev A.Y., Temchenko V.S., Bagno D.V. *Radars of subsurface sounding. Monitoring and diagnostics among the features of the Monograph*. M.: Radio Engineering. 2013. (In Russ)
4. Pennock S.R., Redfern M.A. *Optimising Multihead Configurations for Depth Determination in Ground Penetrating Radar*. Proc. of the Euro-pean Conference on Antennas and Propagation. 06–10 Nov. 2006, Eu-CAP, Nice, France. 2006.
5. Kazmin A.I., Fedyunin P.A. Evaluation of the accuracy of reconstruction of electrophysical and geometric parameters of multilayer dielectric coatings by the multi-frequency radio-wave method of surface slow electromagnetic waves. *Measuring equipment*. 2020;8:51–58. Available at: https://izmt.ru/kurilka/admin/izmt/2020/8/19550188055f6b45e29_4ec9.pdf. DOI: 10.32446/0368-1025it.2020-8-51-58 (In Russ) DOI: 10.32446/0368-1025it.2020-8-51-58 (accessed 11.03.2021).
6. Mikhnev V.A., Nyfors E., Vainkainen P., *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1997;45(9):1405–1410. DOI:10.1109/8.623130
7. Mohamed Abou-Khousa, Zoughi R., *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. 2007;56(4):1107–1113. DOI:10.1098/rspa.2009.0664
8. Borulko V.F., Drobakhin O.O., Slavin I.V. *Multi-frequency microwave non-destructive methods for measuring parameters of layered dielectrics*. Dnepropetrovsk: DSU Publishing House. 1982. (In Russ)
9. Andreev M.V., Borulko V.F., Drobakhin O.O. Application of the quasi-solution concept for determining the parameters of layered dielectric structures based on measurements of reflection characteristics at many frequencies. Part I. *Flaw detection*. 1995;12:41–50. (In Russ)
10. Akhmetshin A.M., Slavin V.I., Tikhy V.G., Platonov E.D. Identification of layered dielectric structures by parametric optimization in multi-frequency microwave microscopy. *Flaw detection*. 1983;12:57–65. (In Russ)
11. Mashkov V.G. Method of remote identification of the state of the snow-ice cover by the relations of the Fresnel reflection coefficients. *Izv. vuzov Rossii. Radio electronics*. 2020;23(5):46-56. Available at: <https://re.eltech.ru/jour/article/view/467>. DOI:10.32603/1993-8985-2020-23-5-46-56 (In Russ) DOI:10.32603/1993-8985-2020-23-5-46-56 (accessed 11.03.2021).
12. Brovchenko A.V., Vertiy A.A., Melezhik N.P., Melezhik P.N., Duelchuk A.E. One-dimensional inverse problems of electromagnetic sounding of layered dielectric media. *Applied Radiophysics*. 2015;6(20)(4):92–97. (In Russ)
13. Denisova N.A., Rezvov A.V. The inverse problem of reflection of electromagnetic waves for a layered-inhomogeneous half-space with a real permittivity without dispersion. *Izvestiya vuzov. Radiophysics*. 2012;LV(5):369–379. Available at: https://radiophysics.unn.ru/sites/default/files/papers/2012_5_369.pdf (accessed 11.03.2021). (In Russ)
14. Avdochenko B.I., Zadorin A.S., Zabolinsky V.A., Ilyin A.A., Kruglov R.S., Litvinov R.V., Sialkot A.A. *Restoring the dielectric permittivity of the layered medium in the frequency dependence of the reflection coefficient by minimizing the regularizing functional: the*

- collection of reports of TUSUR*. Voronezh, June 2007 Voronezh: TUSUR. 2007:5–9. (In Russ)
15. Batrakov D.O., Simachev A.A. Restoration of the profile of the dielectric permittivity of a planar-layered medium taking into account the dispersion in frequency sounding. *Bulletin of the V.N. Karazin Kharkiv National University. Radiophysics and Electronics Series*. 2009;883:45–49. (In Russ)
 16. Coen S. Inverse scattering of a layered and dispersionless dielectric half-space, *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 1981;29:726–732.
 17. Balanis G.N. Inverse scattering: Determination of inhomogeneities in sound speed, *J. Math. Phys.* 1982;23:2562–2568.
 18. Denisova N.A., Stepanova S.A. The inverse problem of restoring the dielectric constant with a discontinuous profile. *ZHVMMF*. 1999;39(7):1180–1187. (In Russ)
 19. Avdochenko B.I., Zadorin A.S., Zamotrinsky V.A., Ilinykh A.A., etc. Restoration of the dielectric permittivity of a layered medium from the frequency dependence of the reflection coefficient by minimizing the regularizing functional. *Reports of TUSUR*. 2007;1:5–8. (In Russ)
 20. Rezvov A.V., Denisova N.A. *On the reconstruction of the profile of the refractive index of a layered-inhomogeneous dielectric medium by the amplitude and energy reflection coefficients*. Available at: http://www.mivlgu.ru/conf/ormand_2012/pdf/S3_19.pdf (accessed 18.02.2021). (In Russ)
 21. Kazmin A.I., Fedyunin P.A. Restoration of the structure of electrophysical parameters of multilayer dielectric materials and coatings according to the frequency dependence of the attenuation coefficient of the field of a surface electromagnetic wave. *Measuring equipment*. 2019;9:39–45. Available at: <https://izmt.ru/kurilka/admin/izmt/2019/9/21123204785da0565c919c8.pdf>. DOI:10.32446/0368-1025it.2019-9-39-45 (In Russ) DOI:10.32446/0368-1025it.2019-9-39-45 (accessed 18.02.2021).
 22. Fedyunin P.A., Kazmin A.I., Manin V.A. SHF-method of flaw detection of radio-absorbing coatings and a device for its implementation. *Diagnostics*. 2017;11:32–39. Available at: <http://www.td-j.ru/index.php/current-issue-rus/1526-032-039>. DOI:10.14489/td. 2017.11. pp.032-039 (In Russ) DOI:10.14489/td. 2017.11. pp.032–039 (accessed 18.02.2021).
 23. Brekhovskikh L.M. *Waves in layered medium*. M.: Nauka. 1973:343. (In Russ)
 24. Karpov I.G. Approximation of experimental distributions of radar signals using modernized Pearson distributions. *Radiotekhnika*. 2003;5:56–61. (In Russ)
 25. Pozdnyak S.I., Melititsky V.A. *Introduction to the statistical theory of radio wave polarization*. Moscow: Sov. radio. 1974:479. (In Russ)
 26. Certificate of official registration of the computer program no. 2020618468 Russian Federation. *Identification of snow-ice cover layers by the polarization relations of Fresnel reflection coefficients*. Mashkov V.G., (RU); copyright holder Mashkov V.G. no. 2020615405; declared on 26.05.2020; registered in the Register of Computer Programs on 29.07.2020. (In Russ)
 27. Alexandrov P.N. *Theoretical foundations of the georadar method*: Monograph. Moscow: FIZMATLIT, 2017. (In Russ)
 28. Guido Valerio, David R. Jackson, Alessandro Galli. Proceedings of the Royal Society. 2010;466:2447–2469. DOI:10.1098/rspa.2009. 0664
 29. Shostak A.S., Zagoskin V.V., Lukyanov S.P., Karaush A.S. On the possibility of determining the dielectric permittivity of the upper layers of underlying media from the measured reflection coefficients during oblique sounding by plane waves of vertical and horizontal polarization in the microwave range. *Journal of Radioelectronics*. 1999. (In Russ)

30. RF Patent no. 2613810, IPC G01R 27/00 (2006.01). *Method for measuring the relative complex permittivity of a material with losses in the microwave range*. Valeev G.G.; applicant and patent holder Valeev G.G. Application no. 2015142390 of 06.10.2015. Published on 21.03.2017. Byul. no. 9. (In Russ)
31. RF patent no 2623668, IPC G01N 27/06 (2006.01) G01R 27/26 (2006.01). *Method for determination of the relative dielectric constant of the medium under the edge of the atmosphere-ocean*. Zapevalov A.S.; applicant and patentee of MGI wounds. Application no. 2015156757 dated 28.12.2015. Published on 28.06.2017. Byul. no. 19. (In Russ)
32. Pinchuk A.N. Influence of the polarization of the sounding radio signal on the efficiency of the selection of the response of a surface target. *Nauka i obrazovanie*. Bauman Moscow State Technical University. 2015;3:140–152. Available at: <http://engineering-science.ru/doc/760670.html>. DOI:10.7463/0315.0760670 (In Russ) (accessed 18.02.2021).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Машков Виктор Георгиевич, кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: mvgblaze@mail.ru
ORCID: [0000-0002-3406-7444](https://orcid.org/0000-0002-3406-7444)

Viktor Georgievich Mashkov, Candidate Of Technical Sciences, Associate Professor, Doctoral Student Of The Department Military Educational-Research Centre Of Air Force «Air Force Academy Named After Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin», Voronezh, Russian Federation.

Мальшев Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: vamalyshv@list.ru

Vladimir Aleksandrovich Malyshev, Doctor Of Engineering, Professor, Professor Of The Department Military Educational-Research Centre Of Air Force «Air Force Academy Named After Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin», Voronezh, Russian Federation.