

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.317.335.3:551.578.465

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-1-34-47>

Метод оценки состояния снежно-ледяного покрова по углу Брюстера

В. Г. Машков , В. А. Малышев, П. А. Федюнин

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", Воронеж, Россия

 mvgblaze@mail.ru

Аннотация

Введение. Наиболее сложным и опасным этапом полета вертолета является посадка. Разработка системы обеспечения ее безопасности – в настоящий момент одна из приоритетных задач, решением которой занимается значительное число фирм в нашей стране и за рубежом. Посадка на неподготовленные (необорудованные) площадки со снежно-ледяным покровом может быть вызвана необходимостью доставки подразделений, грузов и боеприпасов в боевых условиях, поисково-спасательными операциями, эвакуацией пострадавших и т. д.

Цель работы. Разработка метода дистанционной идентификации состояния снежно-ледяного покрова по результатам наклонного зондирования подстилающей поверхности радиосигналом с вертикальной поляризацией.

Материалы и методы. Численное моделирование в среде MatLab коэффициентов отражения Френеля эхосигналов с вертикальной поляризацией в интервале зондирования от 40 до 90° в рабочем диапазоне частот при решении прямой и обратной задач реконструкции параметров слоев снежно-ледяного покрова.

Результаты. Получены интервалы значений угла Брюстера, при котором значение коэффициента отражения Френеля от границ раздела слоев снежно-ледяного покрова минимально. Так, для сухого снега – 47...55°, сухого фирна – 55...58° и сухого льда – 58...61°. Методическая погрешность определения диэлектрической проницаемости слоев по углам Брюстера составляет не более 3 %. Разрешающая способность по глубине при использовании сверхширокополосного ЛЧМ-сигнала с частотой от 2 до 8 ГГц составляет около 4 см.

Заключение. Значение погрешности оценки измеренных значений относительной диэлектрической проницаемости и глубин k слоев при возрастании значений СКО уровня шума от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1 по 100 реализациям каждого с вероятностью 0.95 не превышает 10 %. Это свидетельствует о правомерности использования данного метода, реализация которого позволяет автоматизировать процесс оценки возможности выполнения посадки, тем самым снизив время принятия решения и повысив уровень безопасности.

Ключевые слова: состояние снежно-ледяного покрова, подстилающая поверхность, диэлектрическая проницаемость, идентификация слоев, наклонное зондирование

Для цитирования: Машков В. Г., Малышев В. А., Федюнин П. А. Метод оценки состояния снежно-ледяного покрова по углу Брюстера // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 1. С. 34–47. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-34-47

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Статья поступила в редакцию 30.10.2020; принята к публикации после рецензирования 23.01.2021; опубликована онлайн 25.02.2021



A Method for Assessing the State of the Snow and Ice Cover by the Brewster Angle

Viktor G. Mashkov✉, Vladimir A. Malyshev, Pavel A. Fedyunin

Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy
named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", Voronezh, Russia

✉mvglaze@mail.ru

Abstract

Introduction. Landing is the most challenging and dangerous part of the helicopter flight. The development of systems facilitating safe landing is a priority task for both Russian and foreign engineering companies. Landing on unprepared sites covered with snow and ice may be determined by the need to deliver cargo and ammunition in combat conditions, during search and rescue operations, evacuations of victims, etc.

Aim. Development of a method for remote assessment of the snow and ice cover based on the results of oblique sensing of the underlying surface with a radio signal with vertical polarization.

Materials and methods. In the MatLab environment, the authors conducted numerical simulations of Fresnel reflection coefficients of echo signals with vertical polarization in the 40–90 degree sensing range in the operating frequency range when solving the direct and inverse problem of reconstruction of the parameters of snow and ice layers.

Results. Intervals of the Brewster angle values were obtained-at which the value of the Fresnel reflection coefficient from the boundaries of the snow and ice cover takes minimal. Thus, was found to be – 47...55°, – 55...58° and – 58...61° for dry snow, dry firm and dry ice, respectively. The depth resolution when using an ultra-wideband LFM signal with a frequency from 2 to 8 GHz is about 4 cm. The methodological error in determining the dielectric permittivity of layers by the Brewster angle comprises not more than 3 %.

Conclusion. The error in determining the relative permittivity and the depth of k layers under an increase in the RMS values of the noise level from 3.8 to 4.8 with a step of 0.1 for 100 implementations of each with a probability of 0.95 does not exceed 10 %, which confirms the validity of this method. The implementation of which allows you to automate the process of evaluating the possibility of a safe landing, thereby reducing the decision-making time and increasing the level of safety.

Keywords: snow and ice cover, underlying surface, permittivity, layer identification, oblique sensing

For citation: Mashkov V. G., Malyshev V. A., Fedyunin P. A. A Method for Assessing the State of the Snow and Ice Cover by the Brewster Angle. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 1, pp. 34–47. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-34-47

Conflict of interest. The authors declare no obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Submitted 30.10.2020; accepted 23.01.2021; published online 25.02.2021

Введение. Дистанционное зондирование подстилающей поверхности места посадки воздушного судна вертолетного типа (ВСВТ) [1] в виде снежно-ледяного покрова, представляющего собой многослойную структуру, для оценки его состояния – едва ли не единственно оправданный способ с точки зрения выполнения безопасной посадки на неподготовленные (необорудованные) площадки. Задача оценки состояния снежно-ледяного покрова сводится, во-первых, к идентификации его слоев (снег, фирн, лед), поскольку количество слоев снежного и ледяного покрова, формируемых в естественной

среде, будет различным, что связано с их формированием в процессе снегопадов, оттепелей, похолоданий и т. д., определяющихся комплексом гидрометеорологических условий; во-вторых, к определению глубины снежного и толщины ледяного покрова, что является ключевым фактором при принятии решения на посадку ВСВТ на неподготовленную (необорудованную) снежно-ледяную площадку [2].

Посадка на водоем с глубиной снежного покрова выше допустимой или с толщиной ледяного покрова ниже допустимой в соответствии с типом ВСВТ может привести к проваливанию под снег,

лед или к опрокидыванию ВСВТ¹ днем и ночью, в простых и сложных метеоусловиях (туман, дымка, дождь, снег, запыленность или задымленность атмосферы), а также в условиях поднятого снега его вращающимся винтом [5–7].

Вычисление комплексной относительной диэлектрической проницаемости материалов с потерями в СВЧ-диапазоне [8–11] основано на измерении зависимости коэффициента отражения Френеля плоского образца материала от угла падения в пределах $\theta = 40 \dots 90^\circ$, когда электрическое поле волны параллельно плоскости падения, после чего по графику зависимости коэффициента отражения Френеля от угла падения определяют угол Брюстера θ_B , а относительную комплексную диэлектрическую проницаемость ε образца материала или участка поверхности земли рассчитывают по формуле $\varepsilon = (\operatorname{tg} \theta_B)^2$.

Поскольку снежно-ледяной покров представляет собой многослойную структуру с различными плотностями, долями содержания воды и собственными структурами, важно определить границы раздела слоев "воздух–снег" (air–snow), "снег–лед" (snow–ice), "лед–вода" (ice–water). Получить пики эхосигналов от границ раздела слоев снежно-ледяного покрова в результате контраста комплексных относительных диэлектрических проницаемостей слоев не всегда возможно, поскольку если снег неоднородный, уплотняющийся к низу так, что на границе $s-i$ $\varepsilon_s \approx \varepsilon_i$, то отражение от границы $s-i$ вообще отсутствует [3]. Но, как правило, снежный покров имеет слои с различными комплексными относительными диэлектрическими проницаемостями, увеличивающимися в глубину. Это связано с их уплотнением в процессе снегопадов, оттепелей, похолоданий и т. д., что позволяет получать эхосигналы от границ раздела слоев снежно-ледяного покрова. При этом, например, для пресноводного льда (при $\lambda = 3$ см) амплитуда эхосигнала от границы $i-w$ будет больше, чем от границы $s-i$. Такое наблюдается при толщине ледяного покрова менее 1.6 м^4 .

На территории Российской Федерации толщина ледяного покрова на реках и озерах изменяется от 0.1 м в южных районах до 3 м в полярной зоне Сибири и до 4 м на наледных участках рек

Восточной Сибири. В большинстве случаев, особенно для сильносоленых морских льдов, толщина не превышает 2 м^4 .

Прямая задача. Зависимость коэффициента отражения Френеля с вертикальной поляризацией R_v от комплексной относительной диэлектрической проницаемости среды ε_r и угла зондирования в пределах $\theta = 40 \dots 90^\circ$ имеет ярко выраженный минимум значений по сравнению с зависимостью коэффициента отражения Френеля с горизонтальной поляризацией R_h .

Коэффициент отражения [4] от границ раздела слоев снежно-ледяного покрова определяется [9] углом зондирования и относительной диэлектрической проницаемостью соответствующего слоя:

$$R_{v1,2} = \frac{\left\{ \varepsilon_{r2} \cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_{r1} \left[\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1} (\sin \theta_1)^2 \right]} \right\}}{\left\{ \varepsilon_{r2} \cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_{r1} \left[\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1} (\sin \theta_1)^2 \right]} \right\}};$$

$$R_{v2,3} = \frac{\left\{ \varepsilon_{r3} \cos \theta_2 - \sqrt{\varepsilon_{r2} \left[\varepsilon_{r3} - \varepsilon_{r2} (\sin \theta_2)^2 \right]} \right\}}{\left\{ \varepsilon_{r3} \cos \theta_2 + \sqrt{\varepsilon_{r2} \left[\varepsilon_{r3} - \varepsilon_{r2} (\sin \theta_2)^2 \right]} \right\}};$$

$$\dots$$

$$R_{vi,i+1} = \frac{\left\{ \varepsilon_{ri+1} \cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon_{ri} \left[\varepsilon_{ri+1} - \varepsilon_{ri} (\sin \theta_i)^2 \right]} \right\}}{\left\{ \varepsilon_{ri+1} \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_{ri} \left[\varepsilon_{ri+1} - \varepsilon_{ri} (\sin \theta_i)^2 \right]} \right\}}, \quad (1)$$

где θ_1 – угол зондирования;

$$\theta_2 = \arcsin \left(\sin \theta_1 / \sqrt{\varepsilon_{r2}} \right);$$

$$\theta_i = \arcsin \left(\sin \theta_1 / \sqrt{\varepsilon_{ri}} \right).$$

Суммарный коэффициент отражения (1) от снежно-ледяного покрова без учета многократных отражений между границами слоев определяется по рекуррентной формуле [9]:

$$R_{vi,k} = \frac{R_{vi,i+1} + R_{vi+1,k} \exp \left(-j4\pi h_{ri+1} / \lambda \sqrt{\varepsilon_{ri+1}} \right)}{1 + R_{vi,i+1} R_{vi+1,k} \exp \left(-j4\pi h_{ri+1} / \lambda \sqrt{\varepsilon_{ri+1}} \right)}, \quad (2)$$

где h_{ri+1} – глубина $(i+1)$ -го слоя; λ – длина волны зондирующего сигнала; k – количество слоев СЛП; $R_{vi,i} = 0$, $k \neq i$, $k \neq i+1$.

¹ Приказ Минтранса РФ от 31 июля 2009 г. № 128 «Об утверждении Федеральных авиационных правил "Подготовка и

выполнение полетов в гражданской авиации РФ"». URL: <https://base.garant.ru/196235/> (дата обращения 27.10.2020)

Скорость распространения электромагнитной волны (ЭМВ) в снежно-ледяном покрове ниже скорости распространения в воздухе и зависит от его плотности, доли содержания воды и структуры. Для сухого снега (**dry snow**) $v_{ds} = 278.1...212.7$ м/мкс, сухого фирна (**dry firn**) $v_{df} = 212.7...189.0$ м/мкс и сухого льда (**dry ice**) $v_{di} = 189.0...167.9$ м/мкс. Эти значения весьма заметно изменяются в зависимости от доли содержания воды (для чистой воды (**pure water**) $v_{pw} = 32.74...41.97$ м/мкс), преимущественной ориентировки и формы включений льда и воздуха в снеге [6, 12], поэтому необходимо учитывать изменения длины волны при прохождении слоев снежно-ледяного покрова.

Учитывая эти изменения в (2), получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{v1,3} = \frac{R_{v1,2} + R_{v2,3} \exp(\gamma_{r1})}{1 + R_{v1,2} R_{v2,3} \exp(\gamma_{r1})}; \\ R_{v1,4} = \frac{R_{v1,2} + R_{v2,4} \exp(\gamma_{r1})}{1 + R_{v1,2} R_{v2,4} \exp(\gamma_{r1})}; \\ R_{v2,4} = \frac{R_{v2,3} + R_{v3,4} \exp(\gamma_{r2})}{1 + R_{v2,3} R_{v3,4} \exp(\gamma_{r2})}; \\ R_{v1,5} = \frac{R_{v1,2} + R_{v2,5} \exp(\gamma_{r1})}{1 + R_{v1,2} R_{v2,5} \exp(\gamma_{r1})}; \\ R_{v2,5} = \frac{R_{v2,3} + R_{v3,5} \exp(\gamma_{r2})}{1 + R_{v2,3} R_{v3,5} \exp(\gamma_{r2})}; \\ R_{v3,5} = \frac{R_{v3,4} + R_{v4,5} \exp(\gamma_{r3})}{1 + R_{v3,4} R_{v4,5} \exp(\gamma_{r3})}; \\ \dots \end{array} \right.$$

где $\gamma_1 = -j \frac{4\pi h_{r2}}{\lambda \sqrt{\epsilon_{r2}}}$; $\gamma_2 = -j \frac{4\pi h_{r3}}{\lambda \sqrt{\epsilon_{r3}}}$; ...;

$\gamma_i = -j \frac{4\pi h_{ri+1}}{\lambda \sqrt{\epsilon_{ri+1}}} = -j \frac{4\pi H_{ri+1}}{\epsilon_{ri+1}}$; $H_{ri+1} = \frac{h_{ri+1}}{\lambda_{ri+1}}$ – относительная глубина $(i+1)$ -го слоя;

$\lambda_{ri+1} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{ri+1}}}$ – длина волны в слое.

Если зондирующий сигнал падает на границу раздела двух диэлектриков под углом θ_1 , равным

углу Брюстера θ_B , то отраженный θ_1' и преломленный θ_2 сигналы перпендикулярны: $\theta_1' + \theta_2 = 90^\circ$ (рис. 1). При этом отраженный сигнал будет полностью поляризованным в плоскости, перпендикулярной плоскости падения (отсутствует), а степень поляризации преломленного луча будет максимальной.

Согласно закону Снеллиуса для волны с углом падения θ_1 и углом преломления θ_2 на границе двух диэлектриков для исследуемых сред ($\mu = 1$: снег, фирн, лед) справедливо равенство

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1} = \frac{\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1}}, \quad (3)$$

где n_2, n_1 – показатели преломления первого и второго слоев среды; $n_{2,1}$ – показатель преломления границы раздела первого и второго слоев; ϵ_1 и ϵ_2 – относительные диэлектрические проницаемости первого и второго слоев соответственно.

Угол Брюстера

$$\theta_B = \arctg(n_{2,1}) = \arctg\left(\frac{\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1}}\right).$$

Угол Брюстера для i -й границы раздела слоев, при котором отсутствует отраженный сигнал с вертикальной поляризацией от i -й границы раздела слоев:

$$\theta_{B1,i+1} = \arctg(n_{i+1,1}),$$

где $n_{i+1,1} = n_{i+1}/n_1$ – показатель преломления i -й границы раздела слоев. Тогда

$$\theta_{B1,i+1} = \arctg\left(\frac{n_{i+1}}{n_1}\right) = \arctg\left(\frac{\sqrt{\epsilon_{i+1}}}{\sqrt{\epsilon_1}}\right), \quad (4)$$

при этом угол зондирования первого слоя подстилающей поверхности $\theta_{B1,i+1} \neq \theta_{B1,k}$. Показатель преломления i -й границы раздела слоев возрастает в глубину с ростом плотности снежного покрова.

Согласно предложенному методу зондирование радиосигналом с вертикальной поляризацией контролируемого участка снежно-ледяного покрова в пределах $\theta = 40...90^\circ$ позволяет определить зависимость коэффициентов отражения Френеля $R_{vi,i+1}$.

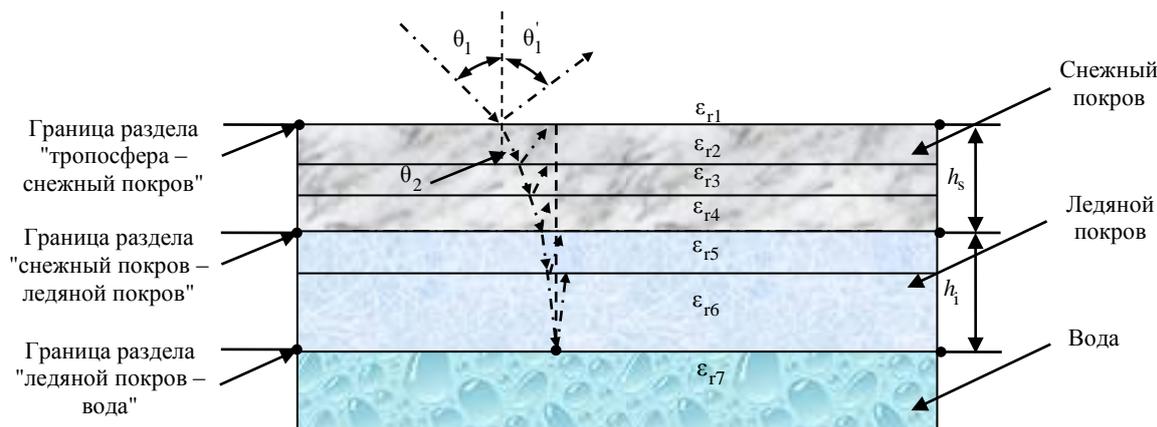


Рис. 1. Преломление ЭМВ в снежно-ледяном покрове

Fig. 1. EMW refraction in snow-ice cover

$(i, i + 1)$ -границ раздела слоев от угла падения радиоволны (рис. 1).

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента отражения Френеля $R_{vi,i+1}$ для слоев с различными комплексными относительными диэлектрическими проницаемостями от угла зондирования в интервале $\theta = 40 \dots 90^\circ$. Увеличение электрической проводимости для морской воды ($\epsilon_{r7} = 74 - j$) объясняется наличием солености $S_{sw} = 35$ г/кг.

Таким образом, интервалам плотностей снежно-ледяного покрова будут соответствовать интервалы углов Брюстера. Так для сухого снега (**dry snow**) $\rho_{ds} = 100 \dots 500$ кг/м³ ($\epsilon'_{ds} = 1.162 \dots 1.984$) – $\theta_{Bds} = 47 \dots 55^\circ$, сухого фирна (**dry firm**) $\rho_{df} = 500 \dots 700$ кг/м³ ($\epsilon'_{df} = 1.984 \dots 2.510$) – $\theta_{Bdf} = 55 \dots 58^\circ$, сухого льда (**dry ice**) $\rho_{di} = 700 \dots 917$ кг/м³ ($\epsilon'_{di} = 2.510 \dots 3.179$) – $\theta_{Bdi} = 58 \dots 61^\circ$. С увеличением содержания влаги значения углов Брюстера смещаются к значениям для воды. Для морской воды с $\epsilon'_{sw} = 74$ (sea water) и соленостью $S_{sw} = 35$ г/кг это $\theta_{Bsw} = 83^\circ$, а для чистой (талой) воды с $\epsilon'_{pw} = 87$ (pure water) – $\theta_{Bpw} = 84^\circ$.

Глубины слоев снежно-ледяного покрова измеряют следующим образом.

Геометрические параметры слоев снежно-ледяного покрова. Зондирование контролируемого участка снежно-ледяного покрова осуществляется

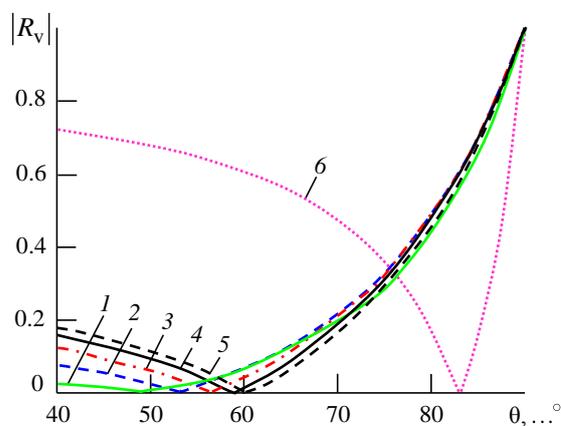


Рис. 2. Графики зависимостей коэффициента отражения Френеля $R_{vi,i+1}$ для слоев с комплексными

относительными диэлектрическими проницаемостями: 1 – $\epsilon_{r2} = 1.3 - j0.0008$, 2 – $\epsilon_{r3} = 1.8 - j0.0008$, 3 – $\epsilon_{r4} = 2.3 - j0.0008$, 4 – $\epsilon_{r5} = 2.8 - j0.0008$, 5 – $\epsilon_{r6} = 3.1 - j0.0008$, 6 – $\epsilon_{r7} = 74 - j$ от угла зондирования в интервале $\theta = 40 \dots 90^\circ$

Fig. 2. The dependence of the coefficient of Fresnel reflectior $R_{vi,i+1}$ for layers with complex relative permittivity:

1 – $\epsilon_{r2} = 1.3 - j0.0008$, 2 – $\epsilon_{r3} = 1.8 - j0.0008$, 3 – $\epsilon_{r4} = 2.3 - j0.0008$, 4 – $\epsilon_{r5} = 2.8 - j0.0008$, 5 – $\epsilon_{r6} = 3.1 - j0.0008$, 6 – $\epsilon_{r7} = 74 - j$

from the sounding angle in the interval $\theta = 40 \dots 90^\circ$ линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) сигналом [13, 14], реализующим частотный принцип определения глубин слоев снежно-ледяного покрова, основанный на выделении частоты биения разностного сигнала, получаемого при перемножении принятого и зондирующего (опорного) сигналов.

Передающее устройство формирует ЛЧМ-сигнал с частотой

$$f_{\text{тх}}(t) = f_0 + \alpha t_m, \forall 0 < t_m < T_m, \quad (5)$$

где $f_0 = 2$ ГГц – начальная частота; $\alpha = 600$ ГГц/с – скорость изменения частоты (крутизна ЛЧМ-сигнала); t_m – время в течение отдельного периода модуляции ЛЧМ-сигнала (быстрое время), а $T_m = 10$ мс – период модуляции (ЛЧМ-сигнала). Прием эхосигналов выполняется приемным устройством с частотой

$$f_{\text{тх}}(t) = f_0 + \alpha(t_m - \tau), \forall \tau < t_m < T_m. \quad (6)$$

При этом необходимо отметить требование к формированию ЛЧМ-сигнала в передающем устройстве: постоянная амплитуда сигнала на выходе и высокая линейность частотно-временной зависимости.

Принятый эхосигнал от границ раздела слоев снежно-ледяного покрова содержит информацию о толщине слоев $h_{i\tau}$ и имеет временную задержку $\tau_{i\tau}$, определяемую выражением

$$\tau_{i\tau} = 2h_{i\tau} / v_{i\tau}, \quad (7)$$

где $v_{i\tau}$ – скорость распространения ЭМВ (рис. 3) в i -м слое снежно-ледяного покрова [6, 11].

Частотная составляющая биения f_b непосредственно связана с задержкой эхосигнала (7) и является разницей (5) и (6):

$$f_b = f_{\text{тх}} - f_{\text{тх}} = \alpha \tau_{i\tau} = 2h_{i\tau} B / (v_{i\tau} T_m), \quad (8)$$

где B – ширина полосы ЛЧМ-сигнала.

Глубины слоев снежно-ледяного покрова определяются возникающей разностью расстояний из (8), которые проходят зондирующие сигналы:

$$h_{i\tau} = f_b v_{i\tau} T_m / (2B)$$

при нормальном зондировании к подстилающей поверхности.

Суммарная временная задержка (рис. 4), без учета многослойности снежного и ледяного покрова, τ_d до границы раздела сред "лед–вода" $\tau_{i\text{w}}$ в общем виде определяется так:

$$\tau_d = \tau_{i\text{w}} = \tau_{\text{ас}} + \tau_s + \tau_i = \frac{2h_a}{c} + \frac{2h_s}{v_s} + \frac{2h_i}{v_i},$$

где $\tau_{\text{ас}}$ – временная задержка до границы раздела среды "воздух–снег"; τ_s, τ_i – временные задержки в снежном и ледяном покровах соответственно; h_a – расстояние от ВСВТ до границы раздела сред "воздух–снег"; h_s – глубина снежного покрова; h_i – толщина ледяного покрова; c, v_s, v_i – скорости распространения ЭМВ в свободном пространстве, снеге и льде соответственно.

Для повышения точности измерения глубины снежного и толщины ледяного покрова, при восстановлении структуры подстилающей поверхности (реконструкции параметров слоев [15]) необходимо учитывать скорость распространения ЭМВ [6, 11] в каждом слое среды (7).

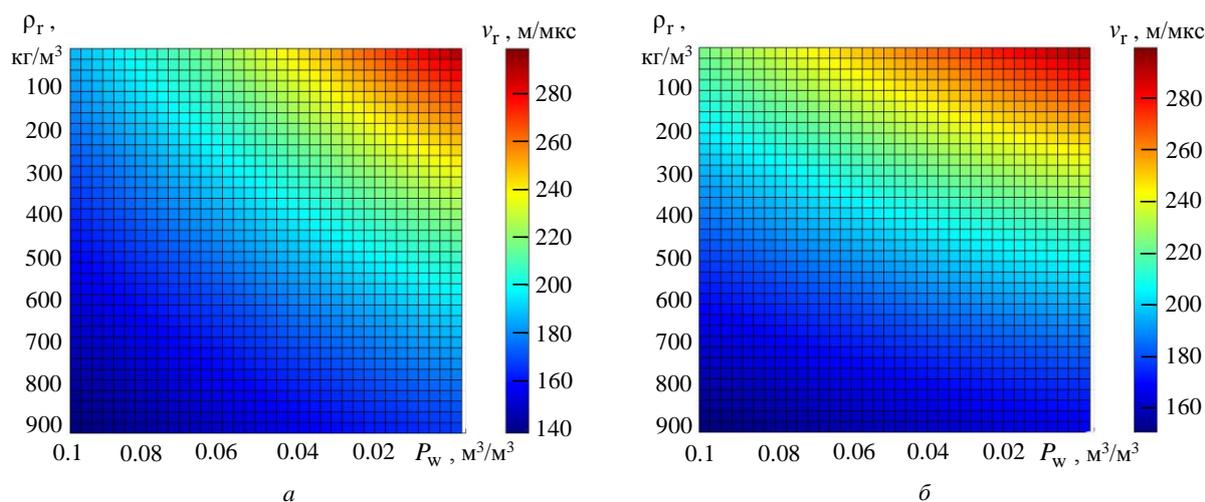


Рис. 3. Двумерное распределение скорости распространения ЭМВ в среде v_r (снег, фирн, лед) от плотности среды ρ_r и доли содержания воды $P_w = 0..0.1$ для $f = 2$ ГГц (а) и $f = 8$ ГГц (б) при $t_r = 0$ °С

Fig. 3. Two-dimensional distribution of the EMW propagation velocity in the medium v_r (snow, firm, ice) on the density of the medium ρ_r and the proportion of water content $P_w = 0..0.1$ for $f = 2$ ГГц (а) and $f = 8$ ГГц (б) at $t_r = 0$ °С

Задержка сигнала до границы раздела сред "снежный покров – ледяной покров" определяется выражением

$$\tau_{si} = \tau_{as} + \tau_s.$$

Разрешающая способность по глубине FM-CW радиолокатора при использовании сверхширокополосного ЛЧМ-сигнала, перекрывающего С...S ($\lambda = 3.75 \dots 15$ см) диапазоны, с частотой от 2 до 8 ГГц ($B = 6$ ГГц) составляет около 4 см [13], что является хорошим показателем при определении возможности безопасной посадки воздушного судна вертолетного типа на неподготовленную площадку со снежно-ледяным покровом.

Последовательное увеличение угла зондирования, начиная с $\theta = 40^\circ$, приведет к последовательному уменьшению (пропаданию) каждого последующего пика эхосигнала с задержкой, определяемой частотой биения (разностью принятого и излученного сигналов) от последующей границы раздела слоев при соответствующих θ (рис. 4), поскольку плотность снежно-ледяного покрова возрастает по мере увеличения глубины, находясь в пределах от $\rho_f = 10$ кг/м³ – для свежеснежавшего снега до $\rho_f = 917$ кг/м³ – для сухого льда без воздушных включений.

Другими словами, прямое решение задачи можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} A &= \{ \varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \dots, \varepsilon_{rk}, h_{r1}, h_{r2}, \dots, h_{rk} \} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \{ R_{vmin1}, R_{vmin2}, \dots, R_{vmink}, \tau_{r1}, \tau_{r2}, \dots, \tau_{rk} \} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \{ \theta_{B1,2}, \theta_{B2,3}, \dots, \theta_{B(i+1,k)}, \tau_{1,2}, \tau_{2,3}, \dots, \tau_{i+1,k} \}. \end{aligned}$$

По заданным комплексным относительным диэлектрическим проницаемостям слоев снежно-ледяного покрова ε_{rk} и их толщинам h_{rk} получают минимальные коэффициенты отражения Френеля R_{vmink} и временные задержки для каждого слоя τ_{rk} . Это исходные данные для определения углов Брюстера $\theta_{B(i+1,k)}$ и временных задержек $\tau_{i+1,k}$ для каждой границы раздела слоев снежно-ледяного покрова.

Обратная задача восстановления электрофизических и геометрических параметров снежно-ледяного покрова (реконструкция параметров слоев). Сущность решения обратной

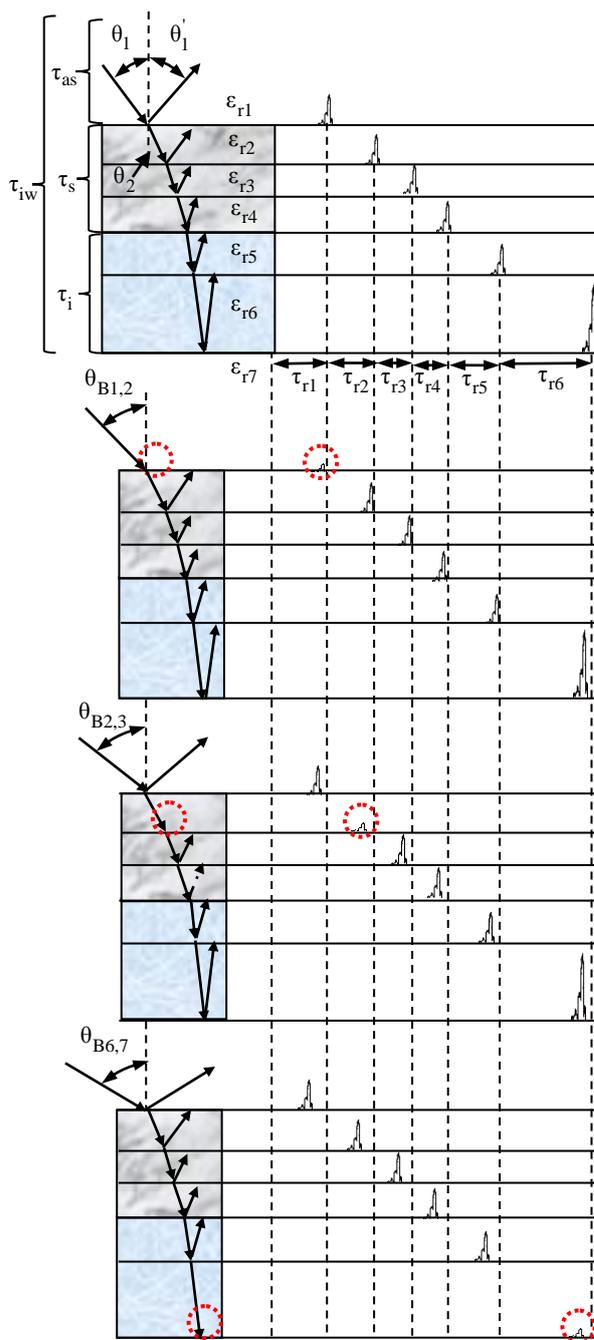


Рис. 4. Углы Брюстера для i -й границы раздела слоев снежно-ледяного покрова

Fig. 4. Brewster angles for the i -is boundary of the snow-ice cover layers

задачи по оценке диэлектрических проницаемостей отдельных слоев снежно-ледяного покрова на основе определения углов Брюстера заключается в следующем. Пусть объектом зондирования подстилающей поверхности является снежно-ледяной покров из k слоев, облучаемый ЛЧМ-сигналом с вертикальной поляризацией под углом в интервале от 40 до 90° .

На рис. 2 и 4 видно отсутствие отраженных сигналов (минимальное их значение) от границ раздела слоев, для сред с комплексными относительными диэлектрическими проницаемостями: $\varepsilon_{r2} = 1.3 - j0.0008$, $\varepsilon_{r3} = 1.8 - j0.0008$, $\varepsilon_{r4} = 2.3 - j0.0008$, $\varepsilon_{r5} = 2.8 - j0.0008$, $\varepsilon_{r6} = 3.1 - j0.0008$, $\varepsilon_{r7} = 74 - j$, соответствующими углам Брюстера $\theta_{Vi,i+1}$: $\theta_{B1,2} = 49^\circ$, $\theta_{B2,3} = 53^\circ$, $\theta_{B3,4} = 57^\circ$, $\theta_{B4,5} = 59^\circ$, $\theta_{B5,6} = 60^\circ$, $\theta_{B6,7} = 83^\circ$, в зависимости от угла зондирования в пределах $\theta = 40 \dots 90^\circ$.

По минимальному измеренному коэффициенту отражения Френеля $R_{vi,i+1}$ для $i, i+1$ -границы раздела слоев снежно-ледяного покрова последовательно определяются углы Брюстера $\theta_{Vi,i+1}$, что позволяет найти диэлектрическую проницаемость каждого последующего нижележащего слоя из (4):

$$\varepsilon_{ri+1} = \left(\operatorname{tg} \theta_{B1,i+1} \right)^2. \quad (9)$$

Другими словами, по измеренным минимальным коэффициентам отражения Френеля $R_{v\min i+1,k}$ и временным задержкам $\tau_{i+1,k}$ до границы раздела слоев снежно-ледяного покрова определяют углы Брюстера $\theta_{Vi+1,k}$ и время задержки τ_{rk} электромагнитной волны для каждого слоя. Выходными параметрами являются значения комплексной относительной диэлектрической проницаемости ε_{rk} и толщины каждого слоя h_{rk} . Кратко это можно представить в виде

$$B = \left\{ R_{v\min 1,2}, R_{v\min 2,3}, \dots, R_{v\min i+1,k}, \tau_{1,2}, \tau_{2,3}, \dots, \tau_{i+1,k} \right\} \Rightarrow \\ \Rightarrow \left\{ \theta_{B1,2}, \theta_{B2,3}, \dots, \theta_{B1,i+1,k}, \tau_{r1}, \tau_{r2}, \dots, \tau_{rk} \right\} \Rightarrow \\ \Rightarrow \left\{ \varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \dots, \varepsilon_{rk}, h_{r1}, h_{r2}, \dots, h_{rk} \right\}.$$

Методическая погрешность определения диэлектрической проницаемости слоев по углам Брюстера $\theta_{Vi,i+1}$ (см. рис. 2 и 4) при заданных расчетных значениях ε_{ri+1} , найденных по (1)

(например, полученные $\theta_{B1,2} = 49^\circ$, $\theta_{B2,3} = 53^\circ$, $\theta_{B3,4} = 57^\circ$, $\theta_{B4,5} = 59^\circ$, $\theta_{B5,6} = 60^\circ$ при отсутствии влаги) и определенных согласно (9), т. е. их оценка без учета воздействия шума, составляет не более 3 %, что подтверждает правомерность использования (9).

Для оценки погрешностей измерения диэлектрической проницаемости слоев [11], соответствующих реальной практической ситуации, к значениям углов Брюстера $\theta_{Vi,i+1}$ и времени задержки в каждом слое τ_{ri} добавили аддитивный гауссовский шум:

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

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 этого (7) и (9) примут вид

$$\begin{cases} \varepsilon_{ri+1\text{эксп}} = \left\{ \operatorname{tg} \left[\theta_{B1,i+1} + n(f_\xi) \right] \right\}^2; \\ h_{ri\text{эксп}} = \frac{\tau_{ri} v_{ri}}{2} + n(f_\xi). \end{cases}$$

На рис. 5 представлена зависимость измеренных значений относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{ri+1\text{эксп}}$ k слоев (рис. 5, а) и погрешности их оценки (рис. 5, б) при возрастании значений СКО уровня шума от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1 по 100 реализациям каждого, где 1 – $\varepsilon_{r2\text{эксп}}$, 2 – $\varepsilon_{r3\text{эксп}}$, 3 – $\varepsilon_{r4\text{эксп}}$, 4 – $\varepsilon_{r5\text{эксп}}$, 5 – $\varepsilon_{r6\text{эксп}}$.

На рис. 6 представлена зависимость измеренных значений глубин $h_{ri\text{эксп}}$ k слоев (рис. 6, а) и погрешности их оценки (рис. 6, б) при возрастании значений СКО уровня шума σ от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1, где 1 – $h_{r1\text{эксп}}$, 2 – $h_{r2\text{эксп}}$, 3 – $h_{r3\text{эксп}}$, 4 – $h_{r4\text{эксп}}$, 5 – $h_{r5\text{эксп}}$.

Анализ зависимостей на рис. 5 и 6 показывает, что погрешности оценок измеренных значений относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{ri+1\text{эксп}}$ и глубин $h_{ri\text{эксп}}$ k слоев при возрастании

СКО уровня шума σ от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1 по 100 реализациям каждого с вероятностью 0.95 не превышают 10 %, что свидетельствует о правомерности использования данного метода.

Полученные значения диэлектрических проницаемостей слоев ϵ_{ri+1} ($i+1$ -го слоя отождествляются с образцовыми значениями диэлектрических проницаемостей слоев $\epsilon_{v\Gamma\Delta}$, и оценивается состояние снежно-ледяного покрова по условию $\epsilon_{ri+1} = \epsilon_{v\Gamma\Delta}$: снежный покров, фирн, ледяной покров либо вода.

При отрицательных температурах $t = -1...-40$ °C действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости слоев ϵ_r (ϵ_s – снега (snow), ϵ_f – фирна (firn), ϵ_i – льда (ice)) с плотностью слоев $\rho_r = 100...917$ кг/м³ ($\rho_s = 100...500$ кг/м³; $\rho_f = 500...700$ кг/м³; $\rho_i = 700...917$ кг/м³) не зависит от $f = 1...10$ ГГц, а только от температуры t в небольших пределах. Действительная часть образцовых значений относительных диэлектрических проницаемостей влажных сред $\epsilon'_{v\Gamma\Delta}$ (для общей формулы трехкомпонентной среды): $\epsilon'_{vs\Delta}$ – снега (snow); $\epsilon'_{vf\Delta}$ – фирна (firn); $\epsilon'_{vi\Delta}$ – льда (ice); $\epsilon'_{pw\Delta}$ – чистой воды; $\epsilon'_{sw\Delta}$ – морской воды.

Например, при $t = -1...-40$ °C для снега как двухкомпонентной среды воздуха и льда действительная часть диэлектрической проницаемости $\epsilon'_{vs\Delta}$ находится между воздухом $\epsilon'_{va\Delta} = 1$ и льдом $\epsilon'_{vi\Delta} = 3.15$ (для сухого плотного льда без воздушных включений с $\rho_i = 917$ кг/м³ – $\epsilon'_{vi\Delta} = 3.20 \pm 0.02$), для фирна (плотно слежавшегося, зернистого и частично перекристаллизованного, обычно многолетнего снега, т. е. промежуточной стадии между снегом и глетчерным льдом) относительная диэлектрическая проницаемость приближается к значениям для льда. Для воды, находящейся под снежно-ледяным покровом при $t = 0$ °C, на частотах $f = 2...8$ ГГц наблюдается плавное снижение действительной части диэлектрической проницаемости для талой воды $\epsilon'_{pw\Delta} = 83.84...51.03$, для морской воды соленостью $S_{sw} = 35$ г/кг – $\epsilon'_{sw\Delta} = 74.97...48.42$ [6].

Значения действительной части диэлектрической проницаемости среды ϵ_r рассчитаны по формуле Г. Луэнга [6, 16–19] для таких сред с включениями воздуха и льда сферической формы

$$\epsilon_r = \left[v_i \left(\sqrt[3]{\epsilon_i} - 1 \right) + 1 \right]^3, \quad (10)$$

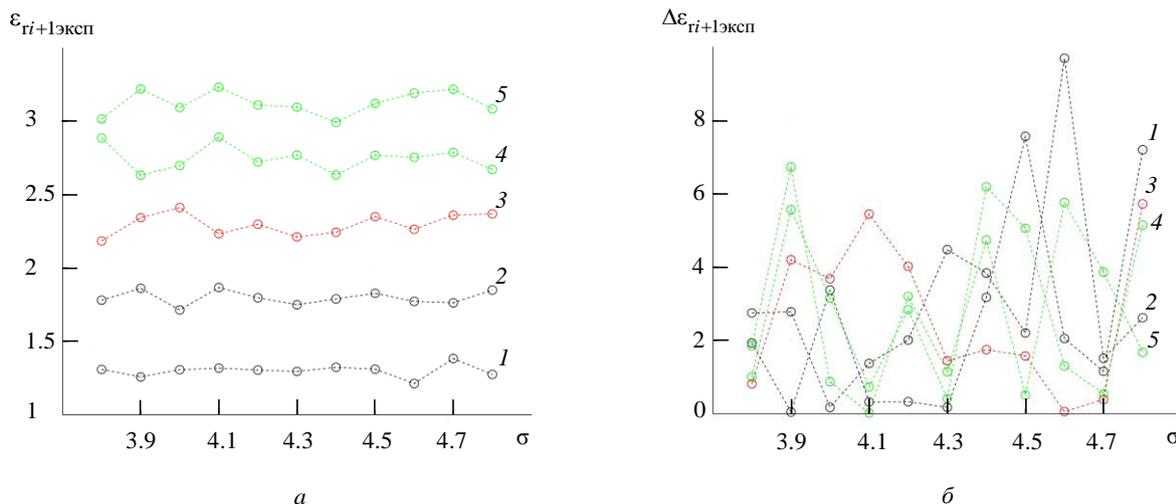


Рис. 5. Графики зависимостей измеренных значений относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{ri+1,эксп}$ k слоев (а) и погрешности их оценки $\Delta\epsilon_{ri+1,эксп}$ (б) при возрастании значений СКО уровня шума σ от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1

Fig. 5. Dependence of the measured values relative permittivity $\epsilon_{ri+1,эксп}$ k of layers (а) and errors in their estimation $\Delta\epsilon_{ri+1,эксп}$ (б) when the values of the noise level MSD increase σ from 3.8 to 4.8 in increments of 0.1

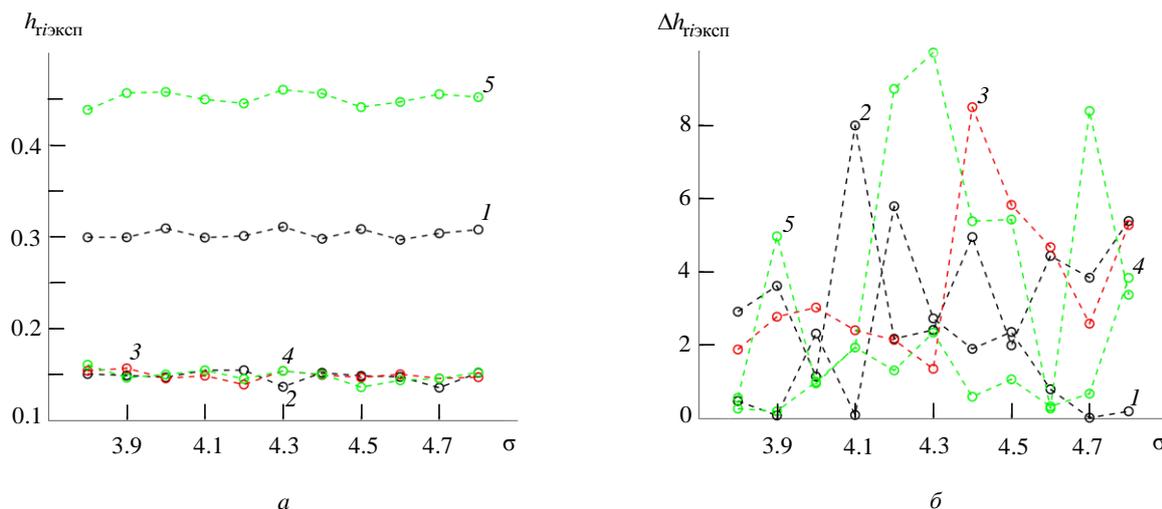


Рис. 6. Графики зависимостей измеренных значений глубин $h_{ГЭКСП}$ k слоев (а) и погрешности их оценки $\Delta h_{ГЭКСП}$ (б) при возрастании значений СКО уровня шума σ от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1

Fig. 6. Dependence of the measured values of the depths $h_{ГЭКСП}$ k of layers (a) and errors in their estimation $\Delta h_{ГЭКСП}$ (б) when the values of the noise level MSD increase σ from 3.8 to 4.8 in increments of 0.1

где $v_i = \rho_r / \rho_i$ – объемное содержание льда; ρ_r – плотность сухой среды (сухого (dry) снега ρ_{ds} , фирна ρ_{df} , льда ρ_{di}); $\rho_i = 917$ кг/м³ – плотность сухого льда без воздушных включений; ϵ'_i – действительная часть диэлектрической проницаемости льда.

При температуре $t = 0$ °С весомый вклад в диэлектрическую проницаемость будет вносить

влажность (доля содержания воды в слое) для двухкомпонентной смеси лед–вода с порами, заполненными водой:

$$\epsilon'_{vT} = \left[\sqrt[3]{\epsilon'_r} + P_w \left(\sqrt[3]{\epsilon'_w} - \sqrt[3]{\epsilon'_i} \right) \right]^3, \quad (11)$$

где P_w – общая доля содержания воды; ϵ'_i и ϵ'_w – относительные диэлектрические проницаемости

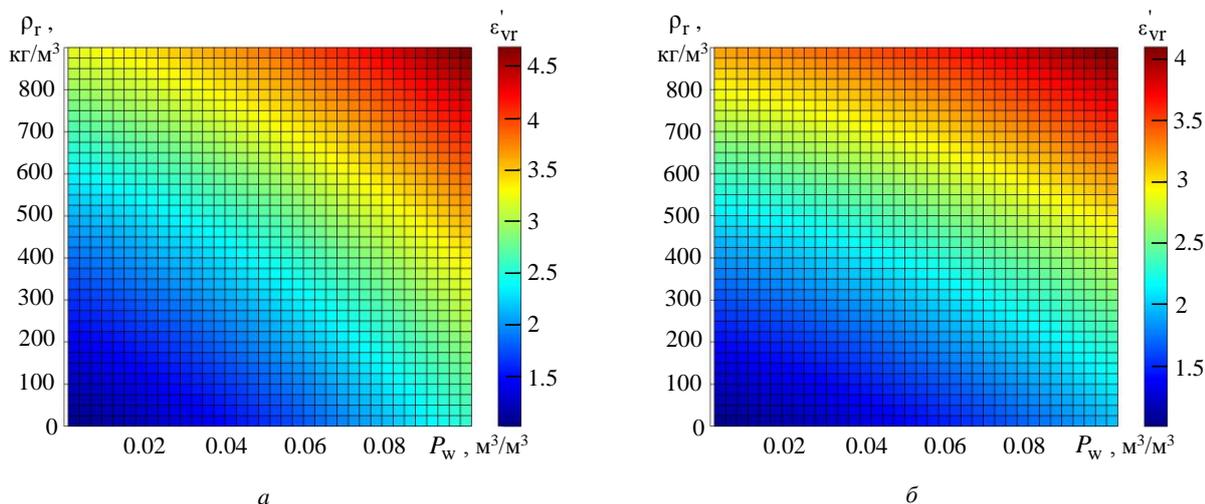


Рис. 7. Двумерное распределение действительной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости среды ϵ'_{vT} (снег, фирн, лед) от плотности среды ρ_r (10) и доли содержания воды (11) $P_w = 0..0.1$ для

$$f = 2 \text{ ГГц (а) и } f = 8 \text{ ГГц (б) при } t_r = 0 \text{ °С}$$

Fig. 7. Two-dimensional distribution of the real part of the complex relative permittivity of the medium ϵ'_{vT} (snow, firm, ice) on the density of the medium ρ_r (10) and the proportion of water content (11) $P_w = 0..0.1$ for

$$f = 2 \text{ ГГц (а) and } f = 8 \text{ ГГц (б) at } t_r = 0 \text{ °С}$$

льда и воды соответственно. Общая формула для трехкомпонентной среды [6, 16–19], состоящей из льда с включениями воды и воздуха, учитывающая частные случаи (10) и (11):

$$\varepsilon'_{VT} = \left[\sqrt[3]{\varepsilon'_T} (1 - P_{wa}) + P_w \left(\sqrt[3]{\varepsilon'_w} + P_{wa} - P_w \right) \right]^3,$$

где P_{wa} – общая доля содержания воды и воздуха.

На рис. 7 показано изменение действительной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости среды ε'_{VT} (правая шкала) в зависимости от доли содержания воды $P_w = 0 \dots 0.1$ (нижняя шкала) и плотности среды (снег, фирн, лед) ρ_T (левая шкала) при $t_T = 0^\circ\text{C}$ для частоты $f = 2$ ГГц (рис. 7, а) и $f = 8$ ГГц (рис. 7, б).

Таким образом, по диэлектрической проницаемости, полученной косвенным путем в результате наклонного зондирования подстилающей поверхности ЭМВ с вертикальной поляризацией, возможно восстановление параметров слоев снежно-ледяного покрова, в том числе плотности ρ_T и доли содержания воды P_w .

Повысить точность определения угла Брюстера для границ раздела слоев снежно-ледяного покрова, а следовательно, и вероятность правильной идентификации можно за счет использования на борту воздушного судна вертолетного типа гиростабилизированной платформы².

Заключение. Таким образом, получены интервалы значений угла Брюстера при наклонном зондировании радиоволной с вертикальной поляризацией в интервале от 40 до 90° , при котором значение коэффициента отражения Френеля от границ раздела слоев снежно-ледяного покрова будет минимальным. Так для сухого снега интервал значений угла Брюстера соответствует $47 \dots 55^\circ$, сухого фирна – $55 \dots 58^\circ$ и сухого льда – $58 \dots 61^\circ$.

Вероятность идентификации составляющих элементов структуры снежно-ледяного покрова возрастает, тем самым повышая уровень безопасности посадки воздушного судна вертолетного типа на неподготовленную площадку со снежно-ледяным покровом, за счет увеличения разрешающей способности по глубине, которая при использовании сверхширокополосного ЛЧМ-сигнала с частотой от 2 до 8 ГГц составляет около 4 см.

Погрешность определения диэлектрической проницаемости слоев (см. рис. 2 и 4) по углам Брюстера $\theta_{Bi,i+1}$ при заданных расчетных значениях

ε_{Ti+1} согласно формуле $\varepsilon_{Ti+1} = \left(\text{tg } \theta_{Bi,i+1} \right)^2$ составляет не более 3% .

Погрешность оценки измеренных значений относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{Ti+1\text{эксп}}$ и глубин $h_{Ti\text{эксп}}$ k слоев при возрастании СКО уровня шума σ от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1 по 100 реализациям каждого с вероятностью 0.95 не превышает 10% , что подтверждает правомерность использования данного метода.

Авторский вклад

Машков Виктор Георгиевич – разработка метода, проведение и анализ результатов численного моделирования параметров многослойной среды.

Малышев Владимир Александрович – расчет и анализ характеристик снежно-ледяного покрова.

Федюнин Павел Александрович – обработка и анализ полученных результатов.

Все авторы участвовали в обсуждении результатов и в подготовке статьи.

Author's contribution

Viktor G. Mashkov, development a method, numerical and analysis modeling parameters a multi-layer medium.

Vladimir A. Malyshev, calculation and analysis of snow-ice cover characteristics.

Pavel A. Fedyunin, processing and analysis of the results obtained.

All authors participated in the discussion of the results and preparation of the article.

² Гиростабилизированная платформа – устройство для пространственной стабилизации каких-либо объектов или приборов, а также для определения углов поворота основания, на котором оно установлено. Служит для устране-

ния влияния внешних воздействий, приводящих к выходу приборов, расположенных на платформе, из заданного положения. URL: <https://www.npo-karat.ru/page/16-56/> (дата обращения 27.10.2020)

Список литературы

1. Пат. RU 2707275 G01S 13/94. Способ выбора площадки для посадки воздушного судна вертолетного типа / В. Г. Машков, В. А. Малышев. Оpubл. 26.11.2019.
2. Пат. RU 2737761 G01S 13/94. Способ оценки возможности посадки воздушного судна вертолетного типа на водоем со снежно-ледяным покровом / В. Г. Машков, В. А. Малышев, Р. А. Прохорский. Оpubл. 02.12.2020.
3. Финкельштейн М. И., Лазарев Э. И., Чижов А. Н. Радиолокационные аэроледомерные съемки рек, озер, водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 112 с.
4. Канарейкин Д. Б., Павлов Н. Ф., Потехин В. А. Поляризация радиолокационных сигналов / под ред. В. Е. Дулевича. М.: Сов. радио, 1966. 440 с.
5. Машков В. Г., Малышев В. А. Модель управления посадкой воздушного судна вертолетного типа на неподготовленную заснеженную площадку // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7, № 4 (27). С. 1–10. doi: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.037
6. Малышев В. А., Машков В. Г. Скорость распространения электромагнитной волны в снежно-ледяной подстилающей поверхности // Радиотехника. 2020. Т. 84, № 3 (5). С. 40–54. doi: 10.18127/j00338486-202003(05)-05
7. Машков В. Г., Малышев В. А. Модель управления посадкой воздушного судна вертолетного типа на водоем со снежно-ледяным покровом // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8, № 3 (30). С. 1–9. doi: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.017
8. Пат. RU 2262718 G01S13/95 (2006.01). Способ измерения толщины снежного покрова / Е. Л. Шошин, А. М. Суханюк, И. И. Плюснин. Оpubл. 20.10.2005. Бюл. № 29.
9. 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 / А. С. Шостак, В. В. Загоскин, С. П. Лукьянов, А. С. Карауш // Журн. радиоэлектроники. 1999. № 11. URL: <http://jre.cplire.ru/mac/nov99/4/abstract.html> (дата обращения 07.12.2017)
10. Пат. RU 2613810 G01R 27/00 (2006.01). Способ измерения относительной комплексной диэлектрической проницаемости материала с потерями в СВЧ-диапазоне / Г. Г. Валеев. Оpubл. 21.03.2017. Бюл. № 9.
11. Пат. RU 2623668 G01R G01N (2006.01). Способ дистанционного определения относительной диэлектрической проницаемости среды под границей атмосфера-океан / А. С. Запевалов. Оpubл. 28.06.2017. Бюл. № 19.
12. Скорость распространения радиоволн в сухом и влажном снежном покрове / В. М. Котляков, Ю. Я. Мачерет, А. В. Сосновский, А. Ф. Глазовский // Лед и снег. 2017. Т. 57, № 1. С. 45–56. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-45-56
13. Sudarsan Krishnan B. E. Modeling and simulation analysis of an FMCW radar for measuring snow thickness / Electronics and communication engineering. University of Madras, 2000. 84 p.
14. Купряшкин И. Ф., Лихачев В. П., Рязанцев Л. Б. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. М.: Радиотехника, 2020. 288 с. doi: 10.18127/B9785931081915
15. Гринев А. Ю., Темченко В. С., Багно Д. В. Радары подповерхностного зондирования. Мониторинг и диагностика сред и объектов. М.: Радиотехника, 2013. 392 с.
16. Мачерет Ю. Я. Оценка содержания воды в ледниках по гиперболическим отражениям // Материалы гляциологических исследований. 2000. № 89. С. 3–10.
17. Глазовский А. Ф., Мачерет Ю. Я. Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований. М.: ГЕОС, 2014. 528 с.
18. Macheret Yu. Ya., Glazovsky A. F. Estimation of absolute water content in Spitsbergen glaciers from radar sounding data // Polar Research. 2000. Vol. 19, iss. 2. P. 205–216. doi: 10.3402/polar.v19i2.6546
19. Мачерет Ю. Я. Радиозондирование ледников / РАН, Ин-т географии. М.: Науч. мир, 2006. 389 с.

Информация об авторах

Машков Виктор Георгиевич – к. т. н. (2008) Тамбовского высшего военного авиационного инженерного училища радиоэлектроники (военного института), доцент (2017) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (Воронеж), докторант кафедры "Эксплуатации радиотехнических средств (обеспечения полетов)" Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (Воронеж). Автор 240 научных публикаций. Сфера научных интересов – подповерхностная радиолокация и радиовидение.

Адрес: Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", ул. Старых Большевиков, д. 54 А, Воронеж, 394064, Россия

E-mail: mvgblaze@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3406-7444>

Малышев Владимир Александрович – д. т. н. (2008) Тамбовского высшего военного авиационного инженерного училища радиоэлектроники (военного института), профессор (2017) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (Воронеж), профессор кафедры "Общевоеенных дисциплин" Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (Воронеж). Автор 280 научных публикаций. Сфера научных интересов – интеллектуальные информационно-измерительные системы.

Адрес: Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", ул. Старых Большевиков, д. 54 А, Воронеж, 394064, Россия
E-mail: vmalyshev@list.ru

Федюнин Павел Александрович – д. т. н. (2007) Тамбовского высшего военного авиационного инженерного училища радиоэлектроники (военного института), профессор (2010) Военного авиационного инженерного университета (Воронеж), почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации (2015), начальник кафедры "Управления воинскими частями связи и радиотехнического обеспечения авиации" Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (Воронеж). Автор более 300 научных публикаций. Сфера научных интересов – измерения параметров специальных сред и материалов в диапазоне СВЧ, прикладная техническая электродинамика.

Адрес: Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", ул. Старых Большевиков, д. 54 А, Воронеж, 394064, Россия
E-mail: fpa1@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6663-4362>

References

1. Mashkov V. G., Malyshev V. A. *Sposob vibora ploshadki dly posadki vozdušnogo sudna vertoletnogo tipa* [Method for selecting a landing site for a helicopter-type aircraft]. Patent RF, no. 2707275 G01S 13/94. Publ. 26.11.2019. (In Russ.)
2. Mashkov V. G., Malyshev V. A., Prohorskiy R. A. *Sposob ocenki vozmozhnosti posadki vozdušnogo sudna vertoletnogo tipa na vodoem so snezhno-ledyanym pokrovom* [Method for assessing the possibility of landing a helicopter-type aircraft on a body of water with snow and ice cover] Patent RF, no. 2737761 G01S 13/94. Publ. 02.12.2020. (In Russ.)
3. Finkel'shtejn M. I., Lazarev E. I., Chizhov A. N. *Radiolokacionnye aeroledomernye s'emki rek, ozer, vodohranilishch. L., Gidrometeoizdat*, 1984, 112 p. (In Russ.)
4. Kanarejkin D. B., Pavlov N. F., Potekhin V. A. *Polyarizatsiya radiolokacionnyh signalov*. Ed. V. E. Dulevicha. M., Sov. radio, 1966, 440 p. (In Russ.)
5. Mashkov V. G., Malyshev V. A. Model helicopter-type aircraft landing control on an unprepared snow-covered area. Modeling, optimization and information technology. 2019, no. 4 (27), pp. 1–10. doi: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.037 (In Russ.)
6. Malyshev V. A., Mashkov V. G. The speed electromagnetic wave propagation in the snow-ice underlying surface. Radioengineering. 2020, vol. 84, no. 3 (5), pp. 40–54. doi: 10.18127/j00338486-202003(05)-05 (In Russ.)
7. Mashkov V. G., Malyshev V. A. Model for controlling the landing of a helicopter-type aircraft on a reservoir with snow and ice cover. *Modelirovanie, optimizatsiya i informacionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technology]. 2020, no. 3 (30), pp. 1–9. doi: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.017 (In Russ.)
8. Shoshin E. L., Suchanek A. M., Plyusnin I. I. *Sposob izmereniya tolshchiny snezhnogo pokrova* [The method of measuring the snow cover thickness]. Patent RF, no. 2262718. Publ. 20.10.2005. (In Russ.)
9. Shostak A. S., Zagoskin V. V., Lukyanov S. P., Karaush A. S. *O vozmozhnosti opredeleniya dielektricheskoy pronicaemosti verhnih sloev podstilayushchih sred po izmennyemym koeffitsientam otrazheniya pri naklonnom zondirovanii ploskimi volnami vertikal'noj i gorizonta'noj polarizatsii v SVCH diapazone* // *Zhurnal radioelektroniki* [Radio electronics magazine]. 1999, no. 11. Available at: <http://jre.cplire.ru/mac/nov99/4/abstract.html> (date accessed 07.12.2017) (In Russ.)
10. Valeev G. G. *Sposob izmereniya otnositel'noj kompleksnoj dielektricheskoy pronicaemosti materiala s po-teryami v SVCH diapazone* [Method for measuring the relative complex permittivity of a material with losses in the microwave range]. Patent RF, no. 2613810. Publ. 21.03.2017. (In Russ.)
11. Zapevalov A. S. *Sposob distancionnogo opredeleniya otnositel'noj dielektricheskoy pronicaemosti sredy pod granicej atmosfera-okean* [Method for remote determination of the relative permittivity the medium under the atmosphere-ocean boundary]. Patent RF, no. 2623668. Publ. 28.06.2017. (In Russ.)

12. Kotlyakov V. M., Macheret Yu. Ya., Sosnovsky A. V., Glazovsky A. F. Speed of radio waves propagation in dry and wet snow cover. *Led i sneg* [Ice and Snow]. 2017, no. 57, iss. 1, pp. 45–56. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-45-56 (In Russ.)

13. Sudarsan Krishnan B. E. Modeling and simulation analysis of an FMCW radar for measuring snow thickness. Electronics and communication engineering. University of Madras, 2000, 84 p.

14. Kupryashkin I. F., Likhachev, V. P., Ryazantsev L. B. *Malogabaritnye mnogofunkcional'nye RLS s nepreryvnym chastotno-modulirovannym izlucheniem* [Small-sized multifunctional radars with continuous frequency-modulated radiation]. M., *Radiotekhnika*, 2020, 288 p. doi: 10.18127/B9785931081915 (In Russ.)

15. Grinev A. Yu., Temchenko V. S., Bagno D. V. *Radary podpoverhnostnogo zondirovaniya. Monitoring i diagnostika sred*

i ob'ektov [Subsurface sensing radars. Monitoring and diagnostics among objects]. M., *Radiotekhnika*, 2013, 392 p. (In Russ.)

16. Macheret Yu. Ya. Estimation of water content in glaciers by hyperbolic reflections. *Materialy glyaciologicheskikh issledovaniy* [Materials of glaciological research]. 2000, no. 89, pp. 3–10. (In Russ.)

17. Glazovsky A. F., Macheret Y. Ya. *Voda v lednikah. Metody i rezul'taty geofizicheskikh i distancionnykh issledovaniy*. [Water in glaciers. Methods and results of geophysical and remote sensing studies]. M., *GEOS*, 2014, 528 p. (In Russ.)

18. Macheret Yu. Ya., Glazovsky A. F. Estimation of absolute water content in Spitsbergen glaciers from radar sounding data. *Polar Research*. 2000, vol. 19, iss. 2, pp. 205–216. doi: 10.3402/polar.v19i2.6546

19. Macheret Yu. Ya. *Radiozondirovanie lednikov*. [Radioecho sounding of glaciers]. RAN, Institute of geography. M., Scientific World, 2006, 389 p. (In Russ.)

Information about the authors

Viktor G. Mashkov, Cand. Sci. (Eng.) (2008) Tambov higher military aviation engineering school of Radioelectronics (military Institute), docent (2017) Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" (Voronezh), Doctoral Student the Department "Operation radio equipment (flight support)" Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" (Voronezh). Author 230 scientific publications. Area of expertise: subsurface radar and radio vision.

Address: Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", 54A Starykh Bolshevikov St., Voronezh 394064, Russia

E-mail: mvglaze@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3406-7444>

Vladimir A. Malyshev, Dr. Sci. (Eng.) (2008) Tambov higher military aviation engineering school of radio electronics (military Institute), Professor (2017) Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" (Voronezh), Professor the Department "Common military discipline" Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" (Voronezh). Author 270 scientific publications. Area of expertise: intelligent information and measurement systems.

Address: Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", 54A Starykh Bolshevikov St., Voronezh 394064, Russia

E-mail: vmalyshev@list.ru

Pavel A. Fedyunin, Dr. Sci. (Eng.) (2007) Tambov higher military aviation engineering school of radio electronics (military Institute), Professor (2010) Military aviation engineering University (Voronezh), Honorary worker of higher professional education of the Russian Federation (2015), Head the Department "Management military units communication and radio engineering support aviation" Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" (Voronezh). Author of more than 300 scientific publications. Area of expertise: measurement of parameters of special media and materials in the microwave range, applied technical electrodynamics.

Address: Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", 54A Starykh Bolshevikov St., Voronezh 394064, Russia

E-mail: fpal@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6663-4362>
