

Метод дистанционного определения состояния плоскостлой среды по поляризационным отношениям обратного рассеяния

В. Г. Машков[✉], А. Е. Милях, В. И. Рябев

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

[✉]myvblaze@mail.ru

Аннотация

Введение. Уровень безопасности при осуществлении различного рода деятельности на снежно-ледяном покрове водоема напрямую зависит от того, насколько точно можно определить его состояние. Например, когда требуется посадить вертолет на необорудованную и неразведанную заснеженную площадку или на замерзший водоем, чтобы перевезти грузы, людей, эвакуировать пострадавших или провести поисково-спасательные работы. Возможность удаленно выявлять характеристики слоев снежно-ледяного покрова и воссоздавать их структуру позволяет принять решение, можно ли сажать вертолет в выбранном месте или нужно искать альтернативную площадку, которая будет соответствовать необходимым требованиям. От этого будет зависеть уровень безопасности посадки воздушного судна.

Цель работы. Разработка неинвазивного метода исследования плоскостлой среды посредством изучения поляризационных отношений сигналов обратного рассеяния – с вертикальной и горизонтальной поляризациями – в рамках работы радиолокационной системы подповерхностного зондирования, размещенной на борту вертолета.

Материалы и методы. Для моделирования работы радиолокационной системы, предназначенной для подповерхностного зондирования, применялась платформа Engage и язык программирования Julia.

Результаты. Создан инновационный метод, позволяющий дистанционно оценивать характеристики плоскостлой среды. В основе подхода – анализ поляризационных характеристик сигналов обратного рассеяния от границ раздела слоев плоскостлой среды с вертикальной и горизонтальной поляризациями. Выявлены диапазоны соотношений поляризационных характеристик сигналов обратного рассеяния, которые коррелируют с различными плотностями слоев снежно-ледяного покрова при определенных углах.

Заключение. Разработка неинвазивного метода исследования плоскостлых сред посредством изучения поляризационных характеристик обратнорассеянного радиосигнала открывает новые возможности в оценке снежно-ледяного покрова. Благодаря этому подходу становится возможным автоматизировать процедуру анализа пригодности неподготовленных и неразведанных заснеженных площадок или водоемов со снежно-ледяным покровом для посадки вертолетов. Отличительная черта предложенного метода заключается в его способности распознавать все слои в многослойной среде, в то время как существующие методы, как правило, ограничиваются анализом лишь приповерхностного слоя.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, наклонное зондирование, подстилающая поверхность, поляризационное отношение, состояние снежно-ледяного покрова, плоскостлая среда

Для цитирования: Машков В. Г., Милях А. Е., Рябев В. И. Метод дистанционного определения состояния плоскостлой среды по поляризационным отношениям обратного рассеяния // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 2. С. 49–63.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-49-63

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.12.2025; принята к публикации после рецензирования 18.02.2026; опубликована онлайн 30.04.2026



Method for Remote Assessment of Planar Layered Media by Polarization Backscattering Relations

Viktor G. Mashkov , Aleksandr E. Milyah, Viktor I. Ryabev

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

 mvgblaze@mail.ru

Abstract

Introduction. The safety of conducting activities on the snow and ice cover of a reservoir depends directly on the accuracy of its condition assessment. This is particularly important when landing a helicopter on unequipped and unexplored snow-covered areas or frozen water bodies for transporting goods and people, evacuating victims, or conducting search and rescue operations. The ability to remotely assess the characteristics of snow and ice layers and reconstruct their structure makes it possible to conclude whether the selected site is suitable for helicopter landing or whether an alternative site, which meets the necessary requirements, should be selected. Ultimately, this determines the safety of aircraft landing.

Aim. Development of a non-invasive method for assessing planar layered media based on polarization relationships of backscattering signals with vertical and horizontal polarizations within a helicopter-mounted subsurface sensing radar system.

Materials and methods. The Engee platform and the Julia programming language were used to simulate the operation of a radar system for subsurface sensing.

Results. An innovative method for remote assessment of the characteristics of planar layered media is proposed. The approach is based on analyzing the polarization properties of backscattered signals from the interfaces of layers within a planar layered medium, using both vertical and horizontal polarizations. Specific ranges of polarization backscattering ratios that correlate with varying densities of snow and ice layers at particular incidence angles are identified.

Conclusion. The proposed non-invasive method for analyzing planar layered media based on polarization characteristics of backscattered radio signals opens up new possibilities for the assessment of snow and ice cover. This approach makes it possible to evaluate unprepared and unexplored snow-covered sites, as well as reservoirs covered with snow and ice, for helicopter landing. A distinctive feature of the proposed method lies in its ability to detect and characterize all layers within a multilayer environment, compared to existing methods that are limited to analyzing exclusively the near-surface layer.

Keywords: permittivity, oblique sensing, underlying surface, polarization attitude, snow and ice cover state, planar layered medium

For citation: Mashkov V. G., Milyah A. E., Ryabev V. I. Method for Remote Assessment of Planar Layered Media by Polarization Backscattering Relations. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 2, pp. 49–63.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-49-63

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 16.12.2025; accepted 18.02.2026; published online 30.04.2026

Введение. В настоящее время в различных областях – как в военном деле, так и в гражданской сфере – все шире используются радиолокационные системы, функционирующие на основе непрерывного частотно-модулированного сигнала. Хотя несколько ранее интерес к подобным технологиям немного угас, сейчас ситуация изменилась благодаря существенному

уменьшению размеров и стоимости электронных компонентов. Это позволило разработать компактные радиолокаторы с непрерывным излучением, которые находят применение в авиации, автомобильной промышленности, в сфере беспилотных летательных аппаратов и робототехники, успешно решая разнообразные радиолокационные задачи [1].

Одним из перспективных направлений является разработка радиолокационных систем подповерхностного зондирования, которые устанавливаются на воздушные суда вертолетного типа (ВСВТ) [2–4]. Такие системы незаменимы при поиске места и осуществлении посадки на неподготовленные площадки, покрытые снегом [5], в том числе на водоемы со снежно-ледяным покровом [6]. Эти поверхности представляют собой плоскостойкую среду, и использование радиолокационных технологий позволяет обеспечить требуемый уровень безопасности посадки.

Применение сверхширокополосного непрерывного линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала для дистанционного зондирования поверхности обладает рядом преимуществ по сравнению с импульсным методом [1]: излучение сигнала большей длительностью на порядки; мощность излучения единицы ватт при сохранении требуемой разрешающей способности; не требуются мощные импульсные усилители с высоковольтными источниками питания и т. д. Кроме того, полоса пропускания зондирующих сигналов от 1 ГГц не обязательна к полосе оцифровываемых частот (единицы и десятки мегагерц) аналого-цифровых преобразователей и нет необходимости blankирования приемника во время излучения передатчика. Это дает возможность наблюдать объекты и участки местности, расположенные на близком расстоянии, т. е. устраняет проблему "мертвой зоны". К другим преимуществам можно отнести высокую радиотехническую скрытность и помехозащищенность системы.

Сверхширокополосный ЛЧМ-сигнал позволяет фиксировать пики эхосигналов, отраженных от границ слоев плоскостойкой среды, благодаря различиям в диэлектрической проницаемости этих слоев [7]. Анализируя временную задержку эхосигналов, можно определить толщину слоев. Амплитуды эхосигналов, полученные при наклонном зондировании с вертикальной и горизонтальной поляризациями, позволяют косвенно установить диэлектрическую проницаемость слоев снежно-ледяного покрова и идентифицировать их.

При принятии решения о посадке ВСВТ на неразведанную заснеженную площадку или на замерзший водоем необходимо учитывать ре-

альное состояние снежно-ледяного покрова, поскольку это напрямую влияет на уровень безопасности. Оценивается, к какому типу относится каждый слой покрова и его высота (толщина). Например, для вертолета Ми-8АМТШ с максимальной взлетной массой 13 000 кг допустимая глубина снежного покрова не должна превышать 50 см, а толщина ледяного покрова должна быть не менее 39.7 см при использовании колесного шасси и не менее 36.1 см – при лыжном [8].

Цель описываемой работы – разработка неинвазивного метода исследования плоскостойкой среды посредством изучения поляризационных отношений сигналов обратного рассеяния – с вертикальной и горизонтальной поляризациями – в рамках работы радиолокационной системы подповерхностного зондирования, размещенной на борту вертолета. Итоговая задача – определять уровень безопасности посадки на поверхность, в том числе покрытую снегом и льдом, будь то суша или водоем.

Значительный вклад в развитие радиополяриметрии, достаточно широко описанный в отечественных и зарубежных источниках, внесли такие ученые, как В. Бернер, В. В. Богородский, В. Е. Дулевич, Д. Б. Канарейкин, З. Кжиш, Ш. Клауд, А. И. Козлов, Е. Крогагер, Л. П. Лигтхарт, А. И. Логвин, Е. Люнебург, В. А. Мелитицкий, Н. Ф. Павлов, С. И. Поздняк, В. А. Потехин, В. А. Сарычев, В. Н. Татарин, Е. Потье, Дж. Сайярда; в развитие подповерхностного зондирования – Л. А. Беховых, В. Ф. Борулько, Л. М. Бреховских, А. Ф. Глазовский, А. Ю. Гринев, В. М. Котляков, Э. И. Лазарев, Ю. Я. Мачерет, Н. Т. Ничипоренко, С. В. Попов, М. И. Финкельштейн, А. Н. Чижов, А. Д. Фролов и другие (без претензий на полноту перечисления).

В [9, 10] представлен метод косвенного определения относительной диэлектрической проницаемости приповерхностного слоя, расположенного у границы "тропосфера – подстилающая поверхность", при использовании техники наклонного зондирования в определенном диапазоне углов от 25 до 75°.

Рассмотрим ситуацию, когда объектом исследования выступает плоскостойкая среда, состоящая из N слоев и представляющая собой снежно-ледяной покров. Для его изучения применяется метод наклонного зондирования

с помощью непрерывного сигнала, частота которого линейно изменяется, при этом используются сигналы с вертикальной и горизонтальной поляризациями.

После приема эхосигналов на тех же поляризациях определяется их отношение и по полученным значениям рассчитывается комплексная относительная диэлектрическая проницаемость (КОДП) каждого из нижележащих слоев снежно-ледяного покрова.

Далее, используя данные о косвенных измерениях относительной диэлектрической проницаемости слоев и соотношениях обратного рассеяния отраженных радиосигналов (с вертикальной и горизонтальной поляризациями), проводится сопоставление с расчетными (образцовыми) значениями. При достижении условия сходимости алгоритма устанавливается тождество, которое позволяет провести идентификацию слоев плоскостройной среды.

В основе неинвазивного метода исследования плоскостройной среды лежит следующий физический принцип: при проведении наклонного зондирования в определенном диапазоне углов (от 25 до 75°) наблюдается закономерность – интенсивность обратного рассеяния эхосигналов находится в прямой зависимости от значения спектральной плотности $\Xi(\vec{K}_{\text{Вгн}})$, которая отражает распределение высот неровностей поверхности над однородным диэлектрическим полупространством. Это соответствует волновому числу $2k \sin \theta = 2\pi/d$, где θ – угол падения радиоволны на границу слоев; d – интервал шероховатостей на поверхности. Зависимость обусловлена резонансным (брэгговским) механизмом рассеяния [9], который позволяет охарактеризовать диэлектрические свойства слоев плоскостройной среды [11].

Суть явления заключается в том, что рассеяние радиоволн происходит главным образом для тех спектральных составляющих, которые соответствуют определенному интервалу шероховатостей d на поверхности. Распространение резонансных составляющих поля поверхностных волн по плоской поверхности описывается выражением [9]

$$\sigma^{\text{pp}0}(k_{\text{гн}}, \theta, \varepsilon_{\text{гн}}) = 8k_{\text{гн}}^4 |G^{\text{pp}}(\theta, \varepsilon_{\text{гн}})|^2 \Xi(\vec{K}_{\text{Вгн}}), \quad (1)$$

где $\sigma^{\text{pp}0}$ – нормированное сечение обратного рассеяния; pp – тип поляризации (vv – вертикальная и hh – горизонтальная); $k_{\text{гн}}$ – волновое число радиоволны; $|G^{\text{pp}}(\theta, \varepsilon_{\text{гн}})|^2$ – геометрический коэффициент (зависящий от вида pp, угла падения радиоволны на границу слоев θ , диэлектрических проницаемостей $\varepsilon_{\text{гн}}$ слоев плоскостройной среды); $\Xi(\vec{K}_{\text{Вгн}})$ – спектр поверхности; $\vec{K}_{\text{Вгн}}$ – волновой вектор резонансной компоненты.

Отметим, что тип поляризации не влияет на $k_{\text{гн}}$. Спектр $\Xi(\vec{K}_{\text{Вгн}})$ позволяет количественно оценить амплитуду вертикально и горизонтально поляризованных эхосигналов, а их отношение определяется комбинацией трех ключевых параметров: диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{\text{гн}}$, углом зондирования θ и рабочей частотой f [9].

Диэлектрическая проницаемость каждого последующего нижнего слоя $\varepsilon_{\text{гн}}$ вычисляется на основе анализа поляризационных отношений эхосигналов $P_{\text{гн}}$, зарегистрированных с вертикальной и горизонтальной поляризациями, с учетом θ и f .

Прямая задача. В процессе исследования вычисления проводились с использованием программного обеспечения MATLAB. На основе анализа данных, полученных при изучении обратного рассеяния радиосигналов, определялась комплексная относительная диэлектрическая проницаемость слоев плоскостройной среды. Результаты исследования визуализированы на рис. 1, а расчетные данные получены по формуле (1). При этом учитывались поляризационные отношения радиосигналов $P_{\text{гн}}$ – как с вертикальной $\sigma_{\text{гн}}^{\text{vv}0}$ (рис. 2, а), так и с горизонтальной $\sigma_{\text{гн}}^{\text{hh}0}$ (рис. 2, б) поляризациями:

$$P_{\text{гн}} = \frac{\sigma_{\text{гн}}^{\text{vv}0}}{\sigma_{\text{гн}}^{\text{hh}0}} = \frac{|G_{\text{гн}}^{\text{vv}}(\theta, \varepsilon_{\text{гн}})|^2}{|G_{\text{гн}}^{\text{hh}}(\theta, \varepsilon_{\text{гн}})|^2}, \quad (2)$$

где фигурируют параметры, представляющие собой нормированные значения сечения обратного рассеяния $\sigma_{\text{гн}}^{\text{vv}0}$ и $\sigma_{\text{гн}}^{\text{hh}0}$, которые были

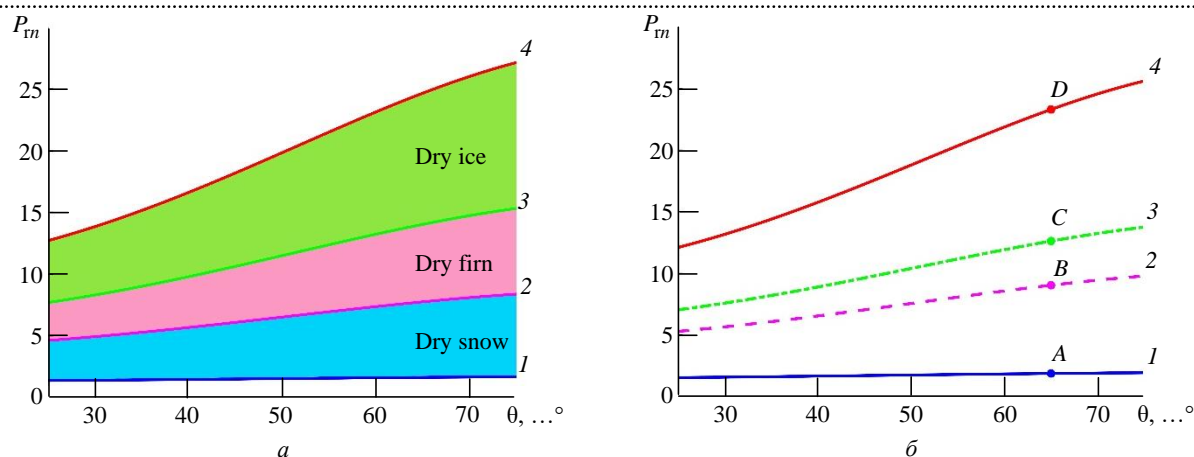


Рис. 1. Графики зависимостей поляризационного отношения P_m обратного рассеяния сигналов: a – с вертикальной σ^{vv0} , полученных по (2), (3); b – горизонтальной σ^{hh0} , полученных по (2), (4), поляризациями от угла зондирования в пределах $\theta = 25...75^\circ$

Fig. 1. Dependence of polarization ratio P_m of signal backscattering: a – with vertical σ^{vv0} , obtained by Eqs. (2) and (3); b – with horizontal σ^{hh0} , obtained by polarizations from the sensing angle within $\theta = 25...75^\circ$ using Eqs. (2) and (4)

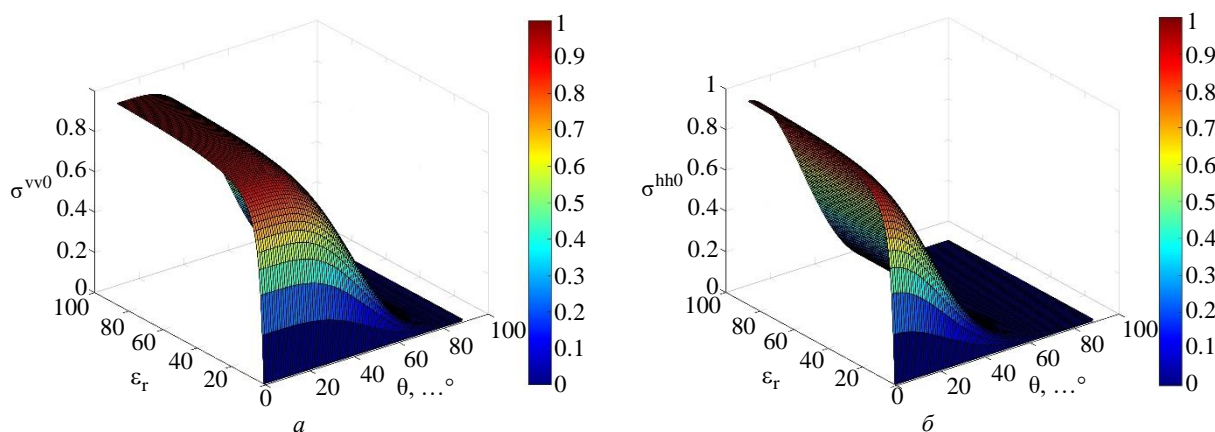


Рис. 2. Нормированное сечение обратного рассеяния с вертикальной σ^{vv0} (а) и горизонтальной σ^{hh0} (б) поляризациями в зависимости от ϵ_r и θ

Fig. 2. Normalized backscatter cross section with vertical σ^{vv0} (a) and horizontal σ^{hh0} (b) polarizations depending on ϵ_r and θ

зафиксированы при измерении на вертикальной (vv) и горизонтальной (hh) поляризациях. Также в формуле присутствует величина n , отражающая число пиков эхосигнала, – она соответствует количеству границ раздела слоев в плоскостной среде, характеризующейся различными комплексными относительными диэлектрическими проницаемостями. Эти границы образуются в снежно-ледяном покрове.

Кроме того, в выражении учитываются геометрические коэффициенты $|G_{rn}^{vv}(\theta, \epsilon_{rn})|^2$,

$|G_{rn}^{hh}(\theta, \epsilon_{rn})|^2$, зависящие от θ , ϵ_{rn} , θ и f [9]:

$$|G_{rn}^{vv}(\theta, \epsilon_{rn})|^2 = \cos^4 \theta \frac{(\epsilon_{rn} - 1) [\epsilon_{rn} (1 + \sin^2 \theta) - \sin^2 \theta]}{[\epsilon_{rn} \cos \theta + \sqrt{\epsilon_{rn} - \sin^2 \theta}]^2}; \quad (3)$$

$$|G_{rn}^{hh}(\theta, \epsilon_{rn})|^2 = \cos^4 \theta \frac{\epsilon_{rn} - 1}{[\epsilon_{rn} \cos \theta + \sqrt{\epsilon_{rn} - \sin^2 \theta}]^2}. \quad (4)$$

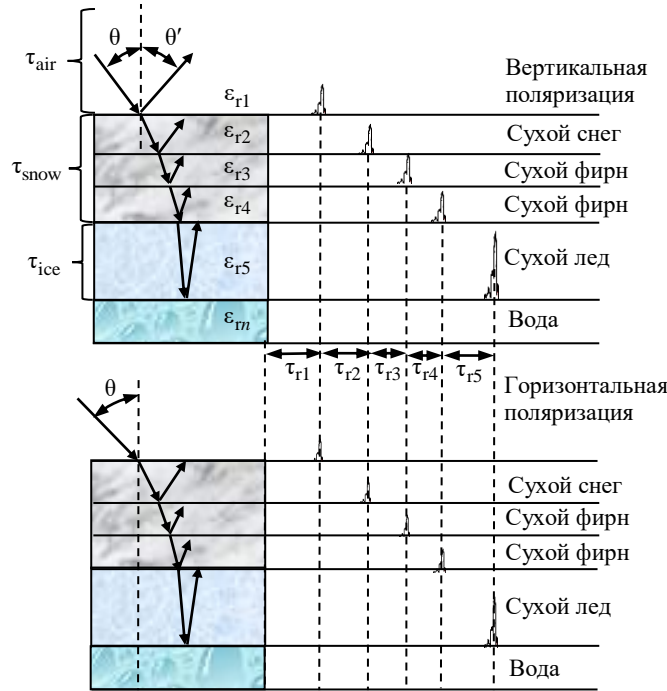


Рис. 3. Отраженные радиосигналы с вертикальной и горизонтальной поляризациями для n -й границы раздела слоев снежно-ледяного покрова
 Fig. 3. Reflected radio signals with vertical and horizontal polarization for the n -th boundary of the snow-ice cover layers

Еще один важный параметр – это угол зондирования исследуемого участка плоскостной среды $\theta = 25...75^\circ$. Его значение определяется с учетом резонансного (брэгговского) механизма рассеяния [9].

Выполненные вычисления показали, что существует соответствие между диапазонами плотностей снежно-ледяного покрова и интервалами значений поляризационных отношений при обратном рассеянии сигналов (рис. 3).

В качестве иллюстрации можно рассмотреть такие материалы, как сухой снег (dry snow) с плотностью $\rho_{ds} = 100...500 \text{ кг/м}^3$ ($\epsilon_{ds} = 1.16...1.98$) – $P_{rn} = 1.68...7.80$ (интервалы между линиями 1 и 2 на рис. 1), сухой фирн (dry firn) $\rho_{df} = 500...700 \text{ кг/м}^3$ ($\epsilon_{df} = 1.98...2.51$) – $P_{rn} = 7.80...14.07$ (интервалы между линиями 2 и 3) и сухой лед (dry ice) $\rho_{di} = 700...917 \text{ кг/м}^3$ ($\epsilon_{di} = 2.51...3.18$) – $P_{rn} = 14.07...24.69$ (интервалы между линиями 3 и 4). Если обратиться к поляризационным отношениям (см. рис. 1), то можно увидеть, что при $\theta = 65^\circ$ точки (A) – $P_{r2} = 1.8613$, (B) – $P_{r3} = 9.0212$, (C) – $P_{r4} =$

$= 12.6012$ и (D) – $P_{r5} = 23.2799$ соотносятся следующим образом: вариант 1 – $\epsilon_{r2} = 1.2 - j0.0008$ соответствует сухому снегу; вариант 2 – $\epsilon_{r3} = 2.1 - j0.0008$ – сухому фирну; вариант 3 – $\epsilon_{r4} = 2.4 - j0.0008$ – также сухому фирну; а вариант 4 – $\epsilon_{r5} = 3.1 - j0.0008$ – сухому льду.

При повышении уровня влажности показатели поляризационных соотношений P_{rn} , связанных с обратным рассеянием сигналов, демонстрируют существенный рост, приближаясь к характеристикам, типичным для водной среды. Например, в случае морской воды (sea water, $\epsilon'_{sw} = 74$) соленостью $S_{sw} = 35 \text{ г/кг}$ – это $P_{rn} = 17\,949$, а в ситуации с пресной (талой) водой (pure water, $\epsilon'_{pw} = 87$) – $P_{rn} = 24\,854$.

Решение прямой задачи можно представить в формализованном виде следующим образом:

$$\begin{aligned}
 A &= \{ \epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, \dots, \epsilon_{rn}, h_{r1}, h_{r2}, \dots, h_{rn} \} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \{ \sigma_{r1}^{vv0}, \sigma_{r2}^{vv0}, \dots, \sigma_{rn}^{vv0}, \sigma_{r1}^{hh0}, \dots, \\
 &\dots, \sigma_{r2}^{hh0}, \dots, \sigma_{rn}^{hh0}, \tau_{r1}, \tau_{r2}, \dots, \tau_{rn} \} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \{ P_{r1,2}, P_{r2,3}, \dots, P_{ri+1,n}, \tau_{r1,2}, \tau_{r2,3}, \dots, \tau_{ri+1,n} \}.
 \end{aligned}$$

По заданным $\varepsilon_{\Gamma n}$ и $h_{\Gamma n}$ рассчитываются нормированные сечения обратного рассеяния с учетом вида поляризации $\sigma_{\Gamma n}^{vv0}$, $\sigma_{\Gamma n}^{hh0}$ и задержки эхосигналов для каждого последующего слоя при вертикальном зондировании в надир (без учета угла наклонного зондирования):

$$\tau_{\Gamma n} = 2h_{\Gamma n}/v_{\Gamma n}. \quad (5)$$

В (5) используется параметр, отражающий скорость распространения электромагнитной волны $v_{\Gamma n}$ в конкретном n -слое. С его помощью можно определить поляризационные соотношения $P_{\Gamma i+1,n}$ для сигналов, рассеянных обратно. Сигналы с вертикальной поляризацией $\sigma_{\Gamma n}^{vv0}$ рассчитываются с применением (2) и (3), а с горизонтальной $\sigma_{\Gamma n}^{hh0}$ – с помощью (2) и (4). Кроме того, для каждой границы между слоями плоскостройной среды вычисляются временные задержки $\tau_{\Gamma i+1,n}$.

Обратная задача. Процесс решения обратной задачи, направленной на выявление электрофизических и геометрических характеристик плоскостройной среды, заключается в анализе комплексной относительной диэлектрической проницаемости ее слоев. Для этого определяются поляризационные соотношения обратного рассеяния сигналов, причем рассматриваются сигналы как с вертикальной, так и с горизонтальной поляризациями.

Рассмотрим ситуацию, когда объектом исследования выступает плоскостройная среда, состоящая из N слоев и представляющая собой снежно-ледяной покров. Для изучения такой среды применяется метод наклонного зондирования в интервале от 25 до 75°, используется непрерывный ЛЧМ-сигнал с вертикальной и горизонтальной поляризациями. Получают соотношения нормированных сечений обратного рассеяния $P_{\Gamma i+1,n}$ на границе i -го и $(i+1)$ -го слоев плоскостройной среды для сигналов с вертикальной $\sigma_{\Gamma i+1,n}^{vv0}$ и горизонтальной $\sigma_{\Gamma i+1,n}^{hh0}$ поляризациями.

Последовательно рассчитывается значение комплексной относительной диэлектрической

проницаемости $\varepsilon_{\Gamma n}$ нижележащего слоя по формулам (2)–(4). При этом учитывается порядковый номер слоя в структуре покрова ($n = 2, 3, \dots, N$):

$$\varepsilon_{\Gamma n} = \frac{\sqrt{P_{\Gamma i+1,n} + \sin^2 \theta}}{1 + \sin^2 \theta}. \quad (6)$$

Решение обратной задачи можно представить в формализованном виде следующим образом:

$$\begin{aligned} B &= \left\{ \sigma_{\Gamma 1,2}^{vv0}, \sigma_{\Gamma 2,3}^{vv0}, \dots, \sigma_{\Gamma i+1,n}^{vv0}, \sigma_{\Gamma 1,2}^{hh0}, \sigma_{\Gamma 2,3}^{hh0}, \dots, \right. \\ &\quad \left. \sigma_{\Gamma i+1,n}^{hh0}, \tau_{\Gamma 1,2}, \tau_{\Gamma 2,3}, \dots, \tau_{\Gamma i+1,n} \right\} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \left\{ P_{\Gamma 1,2}, P_{\Gamma 2,3}, \dots, P_{\Gamma i+1,n}, \tau_{\Gamma 1}, \tau_{\Gamma 2}, \dots, \tau_{\Gamma n} \right\} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \left\{ \varepsilon_{\Gamma 1}, \varepsilon_{\Gamma 2}, \dots, \varepsilon_{\Gamma n}, h_{\Gamma 1}, h_{\Gamma 2}, \dots, h_{\Gamma n} \right\}. \end{aligned}$$

На основе проанализированных нормированных сечений, отражающих обратное рассеяние сигналов с вертикальной $\sigma_{\Gamma i+1,n}^{vv0}$ и горизонтальной $\sigma_{\Gamma i+1,n}^{hh0}$ поляризациями, а также учитывая задержку сигнала $\tau_{\Gamma i+1,n}$ до границы раздела i -го и $(i+1)$ -го слоев, определяются соотношения $P_{\Gamma i+1,n}$ и задержки $\tau_{\Gamma n}$ для каждого нижележащего слоя плоскостройной среды. Получают значения комплексных относительных диэлектрических проницаемостей $\varepsilon_{\Gamma n}$ и толщин слоев $h_{\Gamma n}$.

Для определения состояния слоев плоскостройной среды измеренные значения комплексной относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\Gamma n}$ сравнивают с заранее рассчитанными эталонными показателями $\varepsilon_{\Gamma \Delta}$.

На основании совпадения $\varepsilon_{\Gamma n} = \varepsilon_{\Gamma \Delta}$ значений действительной и мнимой частей комплексной относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\Gamma n} = \varepsilon'_{\Gamma n} - j\varepsilon''_{\Gamma n}$, $\varepsilon_{\Gamma \Delta} = \varepsilon'_{\Gamma \Delta} - j\varepsilon''_{\Gamma \Delta}$ можно установить состояние слоев снежно-ледяного покрова водоема.

Действительная $\varepsilon'_{\Gamma n}$ и мнимая $\varepsilon''_{\Gamma n}$ части КОДП n -слоя трехкомпонентной среды сравниваются с заданными значениями для различных влажных сред: $\varepsilon_{\Gamma \Delta}^{\text{сн}} -$ снега; $\varepsilon_{\Gamma \Delta}^{\text{ф}} -$ фирна; $\varepsilon_{\Gamma \Delta}^{\text{л}} -$ льда; $\varepsilon_{\Gamma \Delta}^{\text{пр}} -$ пресной (pw) и $\varepsilon_{\Gamma \Delta}^{\text{мр}} -$ морской воды (sw).

Примечательно, что при температурах ниже нуля ($t = -1... -40$ °С) действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости слоев ε'_r (ε'_s – снега (s); ε'_f – фирна (f); ε'_i – льда (i)) 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 определяется в основном температурой t , причем зависимость эта проявляется лишь в небольших пределах.

Для вычисления значений действительной части КОДП среды ε'_r были использованы расчеты по формуле, предложенной Г. Луэнгом [11–14]. Расчеты проведены для сред, содержащих сферические включения воздуха и льда:

$$\varepsilon'_r = \left\{ v_1 \left[(\varepsilon'_i)^{1/3} - 1 \right] + 1 \right\}^3. \quad (7)$$

В формуле учитывается объемное содержание льда $v_1 = \rho_r / \rho_i$, плотность сухой среды ρ_r (сухой снег ρ_{ds} ; фирн ρ_{df} ; лед ρ_{di} (без воздушных включений $\rho_i = 917$ кг/м³)), действительная часть КОДП льда ε'_i .

Двухкомпонентная смесь при $t = 0$ °С состоит из льда и пор, заполненных водой:

$$\varepsilon'_{vr} = \left[\varepsilon'_r^{1/3} + P_w \left(\varepsilon'_w^{1/3} - \varepsilon'_i^{1/3} \right) \right]^3. \quad (8)$$

Существенную роль играет общее содержание воды в смеси P_w , а также действительная часть КОДП для льда ε'_i и воды ε'_w соответственно.

В общем случае с учетом (7) и (8) для льда с вкраплениями воды и воздуха [11–14] формула

$$\varepsilon'_{vr} = \left[\varepsilon'_r^{1/3} (1 - P_{wa}) + P_w \left(\varepsilon'_w^{1/3} + P_{wa} - P_w \right) \right]^3$$

содержит P_{wa} – совокупную долю воды и воздуха в составе.

Анализ погрешности определения КОДП слоев по поляризационным отношениям P_{rn} нормированных сечений обратного рассеяния сигналов σ^{pp0} (см. рис. 1, а) показывает довольно неплохие результаты. При применении предложенной формулы (6) для оценки ε_{rn} (без учета шума

и при использовании расчетных параметров в условиях отсутствия влаги, как описано в выражениях (2)–(4)), методическая погрешность не превышает 1%. Это подтверждает обоснованность применения (6) в данных условиях.

В процессе имитационного моделирования для анализа погрешности измерения КОДП слоев [15–18] учитывалось многообразие случайных факторов, характерных для реальных практических условий. С целью моделирования искажений в результатах измерений к значениям поляризационных отношений P_{rn} нормированных сечений обратного рассеяния сигналов σ^{vv0} , σ^{hh0} и задержкам τ_{ri} в каждом слое плоскостройной среды добавлен аддитивный некоррелированный гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и определенным уровнем дисперсии:

$$\begin{cases} P_{ri,i+1 \text{ exp}} = P_{ri,i+1} + n(f_\xi); \\ \tau_{rn \text{ exp}} = \tau_{rn} + n(f_\xi). \end{cases}$$

Воздействие шума $n(f_\xi)$ на ξ -е измерение обусловлено ошибками измерительного комплекса и другими экспериментальными погрешностями, а также неточностями, связанными с адекватностью выбранной электродинамической модели реальной физической ситуации.

С учетом этого факта формулы (5) и (6) примут вид

$$\begin{cases} \varepsilon_{rn \text{ exp}} = \frac{\sqrt{P_{ri+1,n}(\theta) + n(f_\xi)} + \sin^2 \theta}{1 + \sin^2 \theta}; \\ h_{ri \text{ exp}} = \frac{\tau_{ri} v_{ri}}{2} + n(f_\xi). \end{cases}$$

Графики зависимостей КОДП $\varepsilon_{ri+1 \text{ exp}}$ N слоев представлены на рис. 4, а, погрешности их оценки – на рис. 4, б. Имитационное моделирование предполагало по 100 реализаций для каждого значения: 1 – $\varepsilon_{r2 \text{ exp}}$; 2 – $\varepsilon_{r3 \text{ exp}}$; 3 – $\varepsilon_{r4 \text{ exp}}$; 4 – $\varepsilon_{r5 \text{ exp}}$ с увеличением СКО уровня шума σ от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1.

Графики зависимостей измеренных значений глубин $h_{ri \text{ exp}}$ N слоев представлены на рис. 5, а, погрешности их оценки $\Delta h_{ri \text{ exp}}$ – на

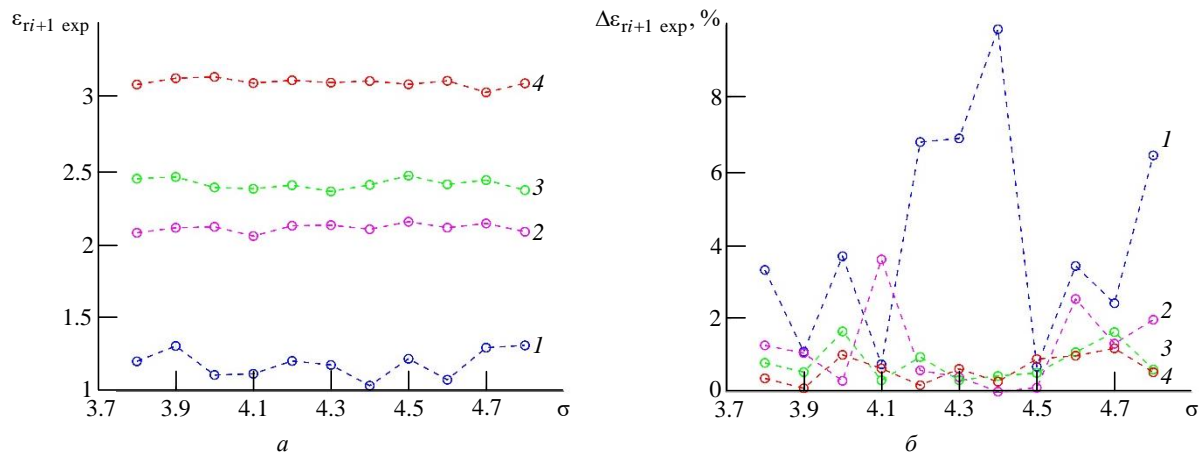


Рис. 4. Измеренные значения КОДП $\varepsilon_{ri+1 \text{ exp}}$ N слоев (а) и погрешности их оценки $\Delta\varepsilon_{ri+1 \text{ exp}}$ (б) при увеличении СКО уровня шума σ от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1

Fig. 4. Measured values of complex relative permittivity $\varepsilon_{ri+1 \text{ exp}}$ for N layers (a) and the errors of their estimation $\Delta\varepsilon_{ri+1 \text{ exp}}$ (b) upon an increase in RMS from 3.8 to 4.8 in increments of 0.1

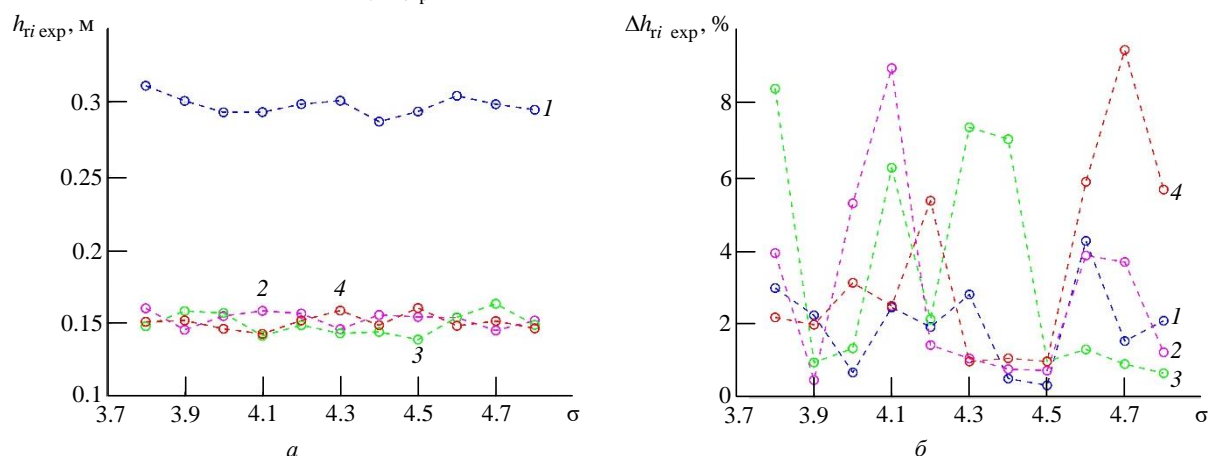


Рис. 5. Измеренные значения глубин $h_{ri \text{ exp}}$ N слоев (а) и погрешности их оценки $\Delta h_{ri \text{ exp}}$ (б) при увеличении СКО уровня шума σ от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1

Fig. 5. Measured depth values $h_{ri \text{ exp}}$ for N layers (a) and the errors of their estimation $\Delta h_{ri \text{ exp}}$ (b) upon an increase in RMS from 3.8 to 4.8 in increments of 0.1

рис. 5, б. Имитационное моделирование предполагало по 100 реализаций для каждого значения: 1 – $h_{r2 \text{ exp}}$; 2 – $h_{r3 \text{ exp}}$; 3 – $h_{r4 \text{ exp}}$; 4 – $h_{r5 \text{ exp}}$ с постепенным увеличением СКО уровня шума σ от 3.8 до 4.8 с шагом в 0.1.

Анализ графиков зависимостей (рис. 4 и 5) показал целесообразность применения данного метода, поскольку уровень погрешностей при оценке измеренных значений КОДП $\varepsilon_{ri+1 \text{ exp}}$ и глубин $h_{ri \text{ exp}}$ N слоев с вероятностью 0.95 не превышает 10 %.

Внедрение гиросtabilизированной платформы на борту ВСВТ открывает возможности для более точной идентификации слоев снежно-

ледяного покрова. Это достигается за счет более точного расчета угла зондирования поверхности в месте предполагаемой посадки. Расчет осуществляется на основе анализа поляризационных отношений обратного рассеяния сигналов как с вертикальной, так и с горизонтальной поляризациями.

Благодаря усовершенствованию радиолокационной системы подповерхностного зондирования в системе управления посадкой ВСВТ можно будет с большей достоверностью определять структуру снежно-ледяного покрова. Это, в свою очередь, позволит обойтись без присутствия членов экипажа или спасателей на посадочной площадке. В результате повысится уровень безопасности посадки ВСВТ на неподготовленные площадки, покрытые снегом и

льдом, а также улучшатся условия для транспортировки грузов. Неинвазивный метод исследования плоскостойкой среды станет ключевым фактором повышения эффективности и безопасности выполняемых мероприятий.

Модель функционирования радиолокационной системы подповерхностного зондирования. Принцип работы радиолокационной системы подповерхностного зондирования основан на использовании сверхширокополосного непрерывного сигнала с линейной частотной модуляцией. При сканировании исследуемого участка, представляющего собой плоскостойкую среду, на различных частотах система улавливает эхосигналы, отраженные от границ слоев. Это становится возможным благодаря различиям в значениях комплексных относительных диэлектрических проницаемостей этих слоев [19].

Передающее устройство генерирует непрерывный ЛЧМ-сигнал [1, 7, 20]:

$$f_{tx}(t) = f_0 + \alpha t_m, \quad 0 < t_m < T_m,$$

где f_0 – начальная частота ЛЧМ-сигнала; α – крутизна ЛЧМ-сигнала; t_m – время отдельного периода модуляции; T_m – период модуляции ЛЧМ-сигнала. В рамках исследования проводится наклонное зондирование снежно-ледяного покрова – конкретного примера плоскостойкой среды.

В приемное устройство поступают отраженные эхосигналы [1, 7, 20]:

$$f_{rx}(t) = f_0 + \alpha(t_m - \tau_{rn}), \quad \tau_{rn} < t_m < T_m,$$

где τ_{rn} – временная задержка до границ разде-

ла слоев, определяемая выражением (5) [1, 7, 11, 20, 21].

Частота биения f_b , зависящая от временной задержки эхосигнала и ширины полосы ЛЧМ-сигнала B [7, 11, 20], определяется выражением

$$f_b = f_{tx} - f_{rx} = \alpha \tau_{rn} = 2h_{rn} B / (v_{rn} T_m).$$

Толщина слоев плоскостойкой среды вычисляется по выражению [7, 11, 20]

$$h_{rn} = f_b v_{rn} T_m / (2B),$$

из разницы расстояний (см. рис. 3) при распространении электромагнитной волны. Последовательное зондирование под разными углами (в диапазоне от 25 до 75°) позволяет четко выделить отдельные слои в структуре плоскостойкой среды.

Моделирование функционирования радиолокационной системы подповерхностного зондирования выполнено с помощью платформы Enge на языке Julia, предназначенной для различных математических вычислений и динамического моделирования. Непрерывный сигнал с линейной частотной модуляцией формируется в приемопередающем тракте в блоке FMCW (Frequency-Modulated Continuous Wave) (рис. 6) с характеристиками: $f_0 = 2$ ГГц – начальная частота; $f_1 = 8$ ГГц – конечная частота; $\alpha = 600$ ГГц – крутизна ЛЧМ-сигнала; $T_m = 10$ мс – период модуляции ЛЧМ-сигнала; полоса пропускания низкочастотного фильтра 4...400 кГц; частота дискретизации $f_s = 5$ МГц. Выбор такого сигнала обусловлен, прежде всего, простотой

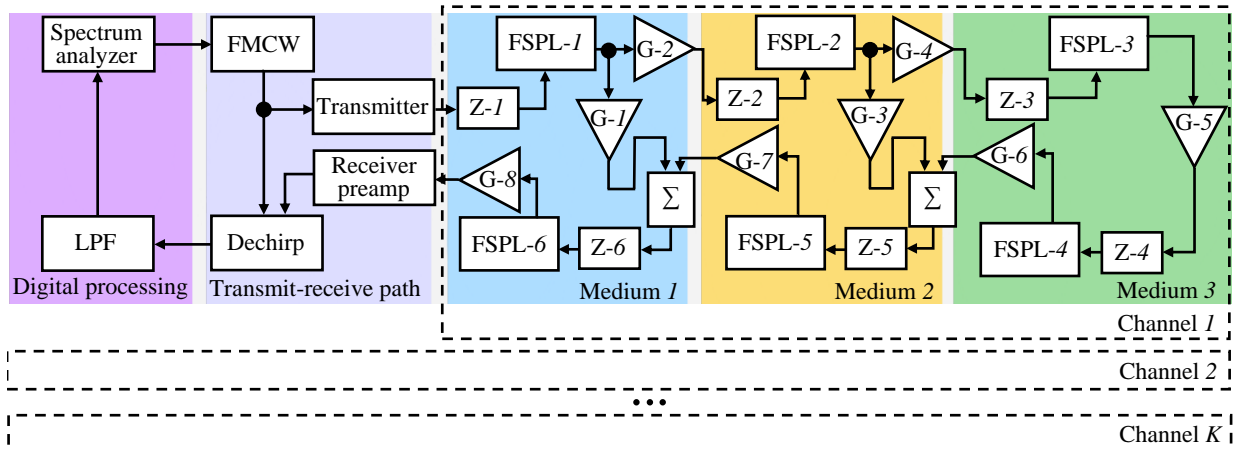


Рис. 6. Модель функционирования радара подповерхностного зондирования

Fig. 6. Simulation of subsurface sensing radar operation

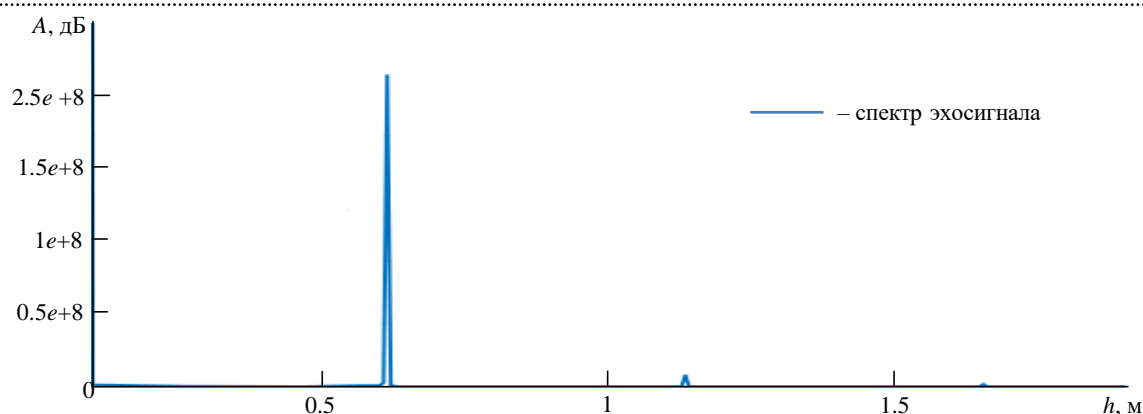


Рис. 7. Спектральная составляющая эхосигнала в зависимости от глубины проникновения

Fig. 7. Spectral component of echo signals depending on penetration depth

его формирования и демодуляции, при этом ширина спектра может достигать сотен мегагерц и даже единиц гигагерц, а после демодуляции не превышает десятков мегагерц. С выхода блока FMCW для усиления сигнал поступает на вход блока передатчика (Transmitter).

Число каналов разрабатываемой радиолокационной системы подповерхностного зондирования определяется количеством видов поляризаций зондируемых и принимаемых ("вертикальная–вертикальная", "горизонтальная–горизонтальная", "вертикальная–горизонтальная", "горизонтальная–вертикальная") сигналов Channel 1, Channel 2, ..., Channel K. В данном случае используется 2 канала сигналов "вертикальная–вертикальная", "горизонтальная–горизонтальная". Сформированный в блоке передатчика Transmitter сигнал проходит через 3 условные среды Medium 1, Medium 2, Medium 3. В их состав входят однотипные блоки: задержки (Z-1–Z-6); затухания эхосигнала Free Space Path Loss (FSPL-1–FSPL-6); усиления сигнала (G-1–G-8); сложения (Σ). Это позволяет имитировать затухание мощности, выраженное в децибелах (дБ), и задержку эхосигнала при распространении в различных средах [22]. Эхосигналы проходя среды (Medium 1–3) поступают на входы сумматоров и далее на блок предусилителя приемника (Receiver preamp), который уменьшает уровень шума и искажений сигнала. Блок Dechirp выполняет роль квадратурного смесителя для получения разностного сигнала.

С блока Dechirp сигнал через блок фильтра нижних частот (LPF) поступает на анализатор спектра (Spectrum analyzer) для визуализации

работы модели. Таким образом, имитируется отраженный от границ раздела сред эхосигнал в виде спектральных частот, поляризационное отношение амплитуд которых будет исходным для идентификации слоя, а временная задержка – для определения глубины слоя плоскостойкой среды (рис. 7).

В ходе исследования, описанного в [7], были проведены фактические измерения толщины снежного покрова, расположенного поверх морского льда. Анализ полученных данных продемонстрировал, что при применении непрерывного сверхширокополосного сигнала с линейной частотной модуляцией, характеризующегося полосой в 6 ГГц и начальной частотой в 2 ГГц (что соответствует диапазону 3.75...15 см), удастся достичь разрешающей способности по глубине примерно в 4 см.

Результаты. На основании предшествующего анализа можно сделать следующие выводы:

1. Разработан инновационный подход для дистанционной оценки состояния плоскостойких сред. Он базируется на изучении соотношения поляризационных характеристик сигналов обратного рассеяния с вертикально и горизонтально ориентированными поляризациями. Метод предполагает решение обратной задачи для воссоздания структуры многослойной среды: через анализ полученных данных косвенным путем вычисляются комплексная относительная диэлектрическая проницаемость и глубина каждого последующего нижележащего слоя, после чего проводится их идентификация.

2. Установлены диапазоны соотношений поляризационных характеристик сигналов обратного рассеяния для вертикальной и горизон-

тальной поляризации, которые коррелируют с диапазонами плотностей слоев снежно-ледяного покрова при определенных углах. Это дает возможность дистанционно оценить состояние плоскостной среды, представленной снежно-ледяным покровом, и восстанавливать его электрофизические и геометрические параметры.

3. Анализ показал, что методическая погрешность при косвенном вычислении комплексной относительной диэлектрической проницаемости слоев с использованием соотношений поляризационных характеристик сигналов обратного рассеяния (с учетом выражений (2)–(4) и предложенного выражения (6)) не превышает 1 %.

4. При использовании метода наклонного зондирования с применением сверхширокополосного непрерывного линейно-частотно-модулированного сигнала в диапазоне от 2 до 8 ГГц достигается разрешающая способность по глубине примерно 4 см.

Заключение. Разработка неинвазивного метода исследования плоскостных сред посредством изучения поляризационных характеристик обратнорассеянного радиосигнала от-

крывает новые возможности в оценке снежно-ледяного покрова. Благодаря этому подходу становится возможным детально выявлять структурные элементы покрова, что, в свою очередь, позволяет автоматизировать процедуру анализа пригодности неподготовленных и неразведанных заснеженных площадок или водоемов со снежно-ледяным покровом для посадки вертолетов. Такая автоматизация критически важна для оптимизации логистических операций – транспортировки грузов и людей, эвакуации пострадавших, проведения поисково-спасательных миссий и других задач.

Применение данной технологии позволяет существенно сократить время, необходимое для принятия решения о посадке, и в значительной мере повысить уровень безопасности подобных мероприятий.

Отличительная черта предложенного метода – способность распознавать все слои в многослойной среде [23], в то время как существующие методы, как правило, ограничиваются анализом лишь приповерхностного слоя [9, 10, 24, 25].

Список литературы

1. Купряшкин И. Ф., Лихачев В. П., Рязанцев Л. Б. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. М.: Радиотехника, 2020. 288 с.
2. Машков В. Г., Малышев В. А., Прохорский Р. А. Концепция обеспечения безопасной посадки воздушного судна вертолетного типа военного назначения // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 16. С. 76–89.
3. 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. С. 1–10. doi: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.037
4. 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. С. 1–9. doi: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.017
5. Пат. RU 2707275. Способ выбора площадки для посадки воздушного судна вертолетного типа / В. Г. Машков, В. А. Малышев. Оpubл. 26.11.2019. Бюл. № 33.
6. Пат. RU 2737761. Способ оценки возможности посадки воздушного судна вертолетного типа на водоем со снежно-ледяным покровом / В. Г. Маш-

- ков, В. А. Малышев, Р. А. Прохорский. Оpubл. 02.12.2020. Бюл. № 34.
7. Sudarsan Krishnan. Modeling and simulation analysis of an FMCW radar for measuring snow thickness. URL: https://itc.ku.edu/research/thesis/documents/sudarsan_krishnan_thesis.pdf (дата обращения: 15.01.2025).
8. 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: 15.01.2025).
9. Пат. RU 2623668. Способ дистанционного определения относительной диэлектрической проницаемости среды под границей атмосфера-океан / А. С. Запелов. Оpubл. 28.06.2017. Бюл. № 19.
10. Пинчук А. Н. Влияние поляризации зондирующего радиосигнала на эффективность выделения отклика надводной цели // Наука и образование. МГТУ им. Баумана. 2015. № 3. С. 140–152. doi: 10.7463/0315.0760670
11. 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
12. Глазовский А. Ф., Мачерет Ю. Я. Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований. М.: ГЕОС, 2014. 528 с.

13. Macheret Ju. Ja., Glazovsky A. F. Estimation of absolute water content in Spitsbergen glaciers from radar sounding data // *Polar Research*. 2000. Vol. 19, № 2. P. 205–216.

doi: 10.1111/j.1751-8369.2000.tb00344.x

14. Мачерет Ю. Я. Оценка содержания воды в ледниках по гиперболическим отражениям // *Материалы гляциологических исследований*. 2000. № 89. С. 3–10.

15. Гринев А. Ю., Темченко В. С., Багно Д. В. Радары подповерхностного зондирования. Мониторинг и диагностика сред и объектов. М.: Радиотехника, 2013. 391 с.

16. 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. С. 39–45.

doi: 10.32446/0368-1025it.2019-9-39-45

17. Федюнин П. А., Казьмин А. И., Манин В. А. СВЧ-способ дефектоскопии радиопоглощающих покрытий и устройство для его реализации // *Контроль. Диагностика*. 2017. № 11. С. 32–39.

doi: 10.14489/td.2017.11.pp.032-039

18. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.

19. Пат. RU 2262718. Способ измерения толщины снежного покрова / Е. Л. Шошин, А. М. Суханюк, И. И. Плюснин. Оpubл. 20.10.2005. Бюл. № 29.

20. Машков В. Г. Метод дистанционной идентификации состояния снежно-ледяного покрова по отношениям коэффициентов отражения Френеля // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*. 2020. Т. 23, № 5. С. 46–56.

doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-5-46-56

21. 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

22. Машков В. Г., Мальшев В. А. Обеспечение безопасной посадки воздушного судна вертолетного типа в условиях недостаточной информативности закабинной обстановки. М.: Радиотехника, 2022. 304 с.

23. Пат. RU 2852744. Устройство выбора площадки при посадке по-вертолетному / В. Г. Машков, А. Е. Милях. Оpubл. 15.12.2025. Бюл. № 35.

24. 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. С. 1–12.

25. Пат. RU 2613810. Способ измерения относительной комплексной диэлектрической проницаемости материала с потерями в СВЧ-диапазоне / Г. Г. Валеев. Оpubл. 21.03.2017. Бюл. № 9.

Информация об авторах

Машков Виктор Георгиевич – доктор технических наук (2023), доцент (2017), доцент 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 360 научных работ. 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. 54А, Воронеж, 394064, Россия

E-mail: mvglaze@mail.ru

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

Милях Александр Евгеньевич – инженер специальных радиотехнических систем (2018, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина"), адъюнкт 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 14 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. 54А, Воронеж, 394064, Россия

E-mail: j.milyah@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-6949-3671>

Рябев Виктор Иванович – инженер автоматизированных систем управления (2012, Военная академия воздушно-космической обороны им. Маршала Советского Союза Г. К. Жукова), адъюнкт 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 28 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. 54А, Воронеж, 394064, Россия

E-mail: ryabev@list.ru

<https://orcid.org/0009-0009-6911-3497>

References

1. Kuprjashkin I. F., Lihachev V. P., Rjazancev L. B. *Malogabaritnye mnogofunkcional'nye RLS s nepreryvnym chastotno-modulirovannym izlucheniem* [Small-Sized Multifunctional Radars with Continuous Frequency-Modulated Radiation]. Moscow, *Radiotekhnika*, 2020, 288 p. (In Russ.)
2. Mashkov V. G., Malyshev V. A., Prohorskiy R. A. The Military Helicopter Type Aircraft Safe Landing Providing Concept. *Vozdushnokosmicheskie sily. Teoriya i praktika*. 2020, no. 16, pp. 76–89. (In Russ.)
3. Mashkov V. G., Malyshev V. A. Model Helicopter-Type Aircraft Landing Control on an Unprepared Snow-Covered Area. Modeling, Optimization and Information Technology. 2019, vol. 7, no. 4, pp. 1–10. (In Russ.) doi: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.037
4. Mashkov V. G., Malyshev V. A. Model Helicopter-Type Aircraft Landing Control on a Water Body with Snow-Ice Cover. Modeling, Optimization, and Information Technology. 2020, vol. 8, no. 3, pp. 1–9. (In Russ.) doi: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.017
5. Mashkov V. G., Malyshev V. A. *Sposob vybora ploshhadki dlja posadki vozdushnogo sudna vertoletnogo tipa* [The Method of Selecting a Landing Site for a Helicopter-Type Aircraft]. Pat. RF, no. 2707275, 2019. (In Russ.)
6. Mashkov V. G., Malyshev V. A., Prohorskiy R. A. *Sposob ocenki vozmozhnosti posadki vozdushnogo sudna vertoljotnogo tipa na vodojom so snezhno-ledjanym pokrovom* [A Method for Assessing the Possibility of Landing a Helicopter-Type Aircraft on a Body of Water with Snow and Ice Cover]. Pat. RF, no. 2737761, 2020. (In Russ.)
7. Sudarsan Krishnan. Modeling and simulation analysis of an FMCW radar for measuring snow thickness. Electronics and communication engineering. Available at: https://itc.ku.edu/research/thesis/documents/sudarsan_krishnan_thesis.pdf (accessed: 15.01.2025).
8. The Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated July 31, 2009 No. 128 "On approval of the Federal Aviation Regulations "Preparation and performance of flights in civil aviation of the Russian Federation". Available at: <https://base.garant.ru/196235/> (accessed: 15.01.2025).
9. Zapevalov A.S. *Sposob distancionnogo opredelenija odnositel'noj dijelektricheskoj pronicaemosti sredej pod granicej atmosfera-okean* [A Method for Remotely Determining the Relative Permittivity of a Medium under the Atmosphere-Ocean Boundary]. Pat. RF, no. 2623668, 2017. (In Russ.)
10. Pinchuk A.N. The Probing Radio Signal Polarization Effect on Separation Efficiency of Surface Target Response. Science and Education of the Bauman MSTU. 2015, no. 3, pp. 140–152. (In Russ.) doi: 10.7463/0315.0760670
11. 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. (In Russ.) doi: 10.18127/j00338486-202003(05)-05
12. Glazovskij A. F., Macheret Ju. Ja. *Voda v lednikah. Metody i rezul'taty geofizicheskikh i distancionnyh issledovanij* [Water in Glaciers. Methods and Results of Geophysical and Remote Studies]. Moscow, *GEOS*, 2014, 528 p. (In Russ.)
13. Macheret Ju. Ja., Glazovsky A. F. Estimation of Absolute Water Content in Spitsbergen Glaciers From Radar Sounding Data. Polar Research. 2000, vol. 19, no. 2, pp. 205–216. doi: 10.1111/j.1751-8369.2000.tb00344.x
14. Macheret Yu. Ya. Estimation of Water Content in Glaciers by Hyperbolic Reflections. Glaciological Research Materials. 2000, no. 89, pp. 3–10. (In Russ.)
15. Grinev A. Ju., Temchenko V. S., Bagno D. V. *Radary podpoverxnostnogo zondirovanija. Monitoring i diagnostika sred i ob'ektov* [Subsurface Sensing Radars. Monitoring and Diagnostics of Facility Environments]. Moscow, *Radiotekhnika*, 2013, 391 p. (In Russ.)
16. Kaz'min A. I., Fedjunin P. A. Restoration of the Structure of Electrophysical Parameters of Multilayer Dielectric Materials and Coatings Based on the Frequency Dependence of the Field Attenuation Coefficient of a Surface Electromagnetic Wave. Measurement Techniques. 2019, no. 9, pp. 39–45. (In Russ.) doi: 10.32446/0368-1025it.2019-9-39-45
17. Fedjunin P. A., Kaz'min A. I., Manin V. A. Microwave Method of Flaw Detection of Radio-Absorbing Coatings and a Device for Its Implementation. Testing. Diagnostics. 2017, no. 11, pp. 32–39. (In Russ.) doi: 10.14489/td.2017.11.pp.032–039
18. Brehovskih L. M. *Volny v sloistyh sredah* [Waves in Layered Media]. Moscow, *Nauka*, 1973, 343 p. (In Russ.)
19. Shoshin E. L., Suhanjuk A. M., Pljusnin I. I. *Sposob izmerenija tolshhiny snezhnogo pokrova* [The Method of Measuring the Thickness of the Snow Cover]. Pat. RF, no. 2262718, 2005. (In Russ.)
20. Mashkov V. G. Method for Remote State Identification Snow-Ice Cover by the Ratio of Fresnel Reflection Coefficients. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 5, pp. 46–56. (In Russ.) doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-5-46-56
21. Kotljakov V. M., Macheret Ju. Ja., Sosnovskij A. V., Glazovskij A. F. Speed of Radio Wave Propagation in Dry and Wet Snow. Ice and Snow. 2012, vol. 57, no. 1, pp. 45–56. (In Russ.) doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-45-56
22. Mashkov V. G., Malyshev V. A. *Obespechenie bezopasnoj posadki vozdushnogo sudna vertoletnogo tipa v usloviyah nedostatochnoj informativnosti zakabinnoj obstanovki* [Ensuring of Helicopter Type Aircraft Safety Landing Under the Conditions of Insufficient External Information Content]. Moscow, *Radioelekhnika*, 2022, 304 p. (In Russ.)
23. Mashkov V. G., Milyah A. E. *Ustrojstvo vybora ploshhadki pri posadke po-vertolyotnomu* [Helicopter Landing Site Selection Device]. Pat. RF, no. 2852744, 2025. (In Russ.)

24. Shostak A. S., Zagoskin V. V., Luk'janov S. P., Karaush A. S. On the Possibility of Determining the Dielectric Constant of the Upper Layers of the Underlying Media from the Measured Reflection Coefficients During Inclined Sounding by Plane Waves of Vertical and Horizontal Polarization in the Microwave Range. *J. of Radio Electronics*. 1999, no. 11, pp. 1–12. (In Russ.)

25. Valeev G. G. *Sposob izmerenija odnositel'noj kompleksnoj dijelektricheskoy pronicaemosti materiala s poterjami v SVCh diapazone* [A method for Measuring the Relative Complex Dielectric Constant of a Material with Losses in the Microwave Range]. Pat. RF, no. 2613810, 2017. (In Russ.)

Information about the authors

Viktor G. Mashkov, Dr Sci. (Eng.) (2023), Associate Professor (2017), Associate Professor of the Department of Operation radio equipment (flight support) of Military Educational-Research Centre "Air Force of Air Force Academy n. a. Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin" (Voronezh). The author of 360 scientific publications. Area of expertise: subsurface radar and radio vision.

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

E-mail: mvgblaze@mail.ru

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

Aleksandr E. Milyah, Engineer of Special Radio Engineering Systems (2018, Military Educational-Research Center "Air Force of Air Force Academy n. a. Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin"), adjunct of the Department of Operation radio equipment (flight support) of Military Educational-Research Centre "Air Force of Air Force Academy n. a. Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin" (Voronezh). The author of 14 scientific publications. Area of expertise: subsurface radar and radio vision.

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

E-mail: j.milyah@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-6949-3671>

Viktor I. Ryabev, Engineer of Automated Control Systems (2012, Marshal of the Soviet Union G. K. Zhukov Military Academy of Aerospace Defense), adjunct of the Department of Operation radio equipment (flight support) of Military Educational-Research Centre "Air Force of Air Force Academy n. a. Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin" (Voronezh). The author of 28 scientific publications. Area of expertise: subsurface radar and radio vision.

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

E-mail: ryabev@list.ru

<https://orcid.org/0009-0009-6911-3497>
