Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 5. С. 46–56
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 5, pp. 46–56

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.317.335.3:551.578.465 Оригинальная статья

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

Метод дистанционной идентификации состояния снежно-ледяного покрова по отношениям коэффициентов отражения Френеля

В. Г. Машков ✉

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. В настоящее время разработка систем безопасной посадки вертолетов как наиболее сложного и опасного этапа полета является одной 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. Ключевым фактором в принятии решения на посадку является информация о высоте снежного и глубине ледяного покрова. В данной статье предложена дистанционная идентификация состояния снежно-ледяного покрова, исключающая необходимость присутствия человека из числа экипажа или спасателей на посадочной площадке.

Цель работы. Разработка метода дистанционной идентификации состояния снежно-ледяного покрова, используемого в определении возможности выполнения безопасной посадки воздушного судна вертолетного типа на водоем со снежно-ледяным покровом.

Материалы и методы. Численное моделирование в среде MatLab поляризационного отношения коэффициентов отражения Френеля эхосигналов с вертикальной и горизонтальной поляризацией в интервале от 25 до 45°.

Результаты. Интервалы поляризационных отношений соответствуют интервалам плотностей слоев снежно-ледяного покрова для фиксированных углов. Так, например, при $\theta = 34^{o}$ для сухого снега $\rho_{ds} = 100...500$ кг/м^3 $\left(\varepsilon'_{ds} = 1.162...1.984\right)$ – $P_{rm} = 5.6915...3.3266$; сухого фирна $\rho_{df} = 500...700$ кг/м^3 $\left(\varepsilon'_{df} = 1.984...2.51\right)$ – $P_{rm} = 3.3266...2.8311$; сухого льда $\rho_{di} = 700...917$ кг/м^3 $\left(\varepsilon'_{di} = 2.51...3.179\right)$ – $P_{rm} = 2.8311...2.4753$. Решение обратной задачи реконструкции слоев осуществляется посредством косвенного определения комплексной относительной диэлектрической проницаемости каждого последующего нижележащего слоя с разрешением по действительной части 10^{-2}. Устанавливается тождественность полученных характеристик слоев снежно-ледяного покрова с расчетными (образцовыми) значениями.

Заключение. Дистанционная идентификация составляющих элементов структуры снежно-ледяного покрова позволяет автоматизировать процесс оценки возможности выполнения посадки, тем самым снизив время принятия решения и повысив уровень безопасности. В отличие от известных методов идентификации приповерхностного слоя осуществляется идентификация слоев многослойной среды.

Ключевые слова: состояние снежно-ледяного покрова, подстилающая поверхность, диэлектрическая проницаемость, наклонное зондирование, коэффициент отражения Френеля

Для цитирования: 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

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Статья поступила в редакцию 04.09.2020; принята к публикации после рецензирования 12.10.2020; опубликована онлайн 25.11.2020

© Машков В. Г., 2020

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 5. С. 46–56
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 5, pp. 46–56

Radar and Navigation

Original article

Method for Remote State Identification Snow-Ice Cover by the Ratio of Fresnel Reflection Coefficients

Viktor G. Mashkov ✉

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

✉mvgblaze@mail.ru

Abstract

Introduction. Currently, the development of safe helicopter landing systems as the most complex and dangerous stage of a flight is one of the priority tasks. A significant number of companies in Russia and abroad are engaged in its solution. Landing on unprepared (unequipped) sites with snow-ice cover may be caused by the need to deliver units, cargo and ammunition in combat conditions, search and rescue operations, evacuations of victims, etc. A key factor for a landing decision is information about the height of snow and about the depth of ice cover. In the paper remote identification of the state of snow-ice cover, excluding the need to present any person (crew member or rescue worker) on a landing site is proposed.

Aim. To develop a method for the remote identification of the state of snow-ice cover used to determine the possibility of a helicopter - type aircraft safe landing on a reservoir with snow-ice cover.

Materials and methods. Numerical simulation of echo signals Fresnel reflection coefficients polarization ratio was realized in MatLab. Vertical and horizontal polarizations in the range from 25 to 45 degrees were simulated.

Results. Intervals of polarization relations correspond to the interval density of snow-ice layers for fixed angles. For example, when $\theta = 34^{o}$ for dry snow $\rho_{ds} = 100...500$ kg/m^3 $\left(\varepsilon'_{ds} = 1.162...1.984\right)$ – $P_{rm} = 5.6915...3.3266$, dry firn $\rho_{df} = 500...700$ kg/m^3 $\left(\varepsilon'_{df} = 1.984...2.51\right)$ – $P_{rm} = 3.3266...2.8311$, dry ice $\rho_{di} = 700...917$ kg/m^3 $\left(\varepsilon'_{di} = 2.51...3.179\right)$ – $P_{rm} = 2.8311...2.4753$. A layer reconstruction inverse problem was solved by indirect determining of complex relative permittivity of each successive underlying layer with 10^{-2}. real part resolution. The identity of the obtained characteristics of snow-ice layers with calculated (standard) values was established.

Conclusion. Remote identification of components of a snow-ice cover structure allows one to automate the process of evaluating of landing possibility. Thereby it reduces a decision-making time and increases a level of safety. In contrast to the known methods of identification of the surface layer the identification of multilayer medium layers was carried out.

Keywords: state snow-ice cover, underlying surface, permittivity, inclined sensing, the coefficient of Fresnel reflection

For citation: Mashkov V. G. Method for Remote State Identification Snow-Ice Cover by the Ratio of Fresnel Reflection Coefficients. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 5, pp. 46–56. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-5-46-56

Conflict of interest. The author declares that there are no obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Submitted 04.09.2020; accepted 12.10.2020; published online 25.11.2020

Введение. При выполнении посадок на заснеженных, песчаных или пыльных площадках вокруг вертолета возникают снежные или пыльные вихри, ухудшающие видимость экипажу. В процессе выполнения посадки вертолет входит в снежное (пыльное) облако, при этом ухудшается видимость ориентиров, намеченных для посадки, с дальнейшим их исключением. Если видимость ориентиров (деталей рельефа) продолжает ухудшаться, снижение прекращают, выполняя зависание и раздувая снежное (пыльное) облако. После зависания экипаж продолжает снижение вертолета плавно с таким расчетом, чтобы к моменту ухудшения горизонтальной видимости была обеспечена надежная вертикальная видимость вплоть до момента приземления либо имелся визуальный

контакт с землей через переднее остекление. В противном случае запрещается вертикальное снижение и приземление, а также запрещается поиск ориентиров посредством перемещений вертолета у земной поверхности в стороны[1]. При посадке в условиях ограниченной видимости или возможного ее ухудшения командир экипажа должен быть в постоянной готовности к переходу на пилотирование по приборам.

На сегодняшний момент оценка возможности посадки воздушного судна вертолетного типа (ВСВТ) на заснеженную площадку заключается в определении глубины снежного покрова человеком, двигающимся по посадочной площадке[1]. Это может быть, например, бортовой техник либо человек из числа спасателей (рис. 1, *а*[2], 1, *б*[3]). При этом направление ветра и примерную его скорость у поверхности определяют по дыму выстрелом из ракетницы или сбросом дымовой шашки с ВСВТ. При отсутствии человека на посадочной площадке вероятность выбора площадки для безопасной посадки ВСВТ минимальна.

Посадка на неподготовленные (необорудованные) площадки может быть вызвана необходимостью доставки подразделений, грузов и боеприпасов в боевых условиях, поисково-спасательными операциями, эвакуацией пострадавших и т. д. Посадка на водоем со снежно-ледяным покровом (СЛП) требует дополнительного определения состояния льда. Дистанционная идентификация составляющих элементов структуры СЛП позволяет автоматизировать процесс оценки возможности посадки ВСВТ на такие площадки.

Эффективное сканирование радиосигналом сквозь снежную взвесь подстилающей поверхности зоны посадки ВСВТ в виде СЛП позволяет осуществлять дистанционное зондирование многослойной структуры. Задача оценки состояния СЛП сводится к идентификации его слоев в виде снега, фирна, льда, так как их количество и структура определяются формированием при воздействии целого комплекса гидрометеорологических условий с последующим определением глубины снежного и толщины ледяного покровов, являющихся ключевым звеном в принятии решения на посадку ВСВТ на неподготовленную (необорудованную) снежно-ледяную площадку [1–3]. Глубина снежного покрова выше допустимой или толщина ледяного покрова меньше допустимой в зависимости от типа ВСВТ может привести к проваливанию под снег, лед или к опрокидыванию ВСВТ 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[1].

Решение проблемы посадки ВСВТ на неподготовленные (необорудованные) заснеженные площадки или водоем со СЛП видится в разра-

а *б*

Рис. 1. Посадка на неподготовленную площадку: *а* – S-61 ВС США; *б* – МИ-8
Fig. 1. Landing on an unprepared platform: *a* – S-61 of the U.S. armed forces; *б* – the MI-8

[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/

[2] Сажаем вертолет вслепую: обзор технологий синтетического зрения. [Фото] URL: https://www.pvsm.ru/nauchno-populyarnoe/185283 (дата обращения 07.12.2019)

[3] На Ямале из-за метели задерживаются вертолетные рейсы. [Фото] URL: https://tass.ru/ural-news/4709945 (дата обращения 07.12.2019)

ботке системы управления посадкой (СУП) ВСВТ в таких условиях. Одним из элементов СУП является радиолокационная система зондирования подстилающей поверхности (РЛС ЗПП), позволяющая идентифицировать слои СЛП и сравнить измеренные значения глубин с пороговыми для принятия решения на посадку ВСВТ.

Идентификация слоев снежно-ледяного покрова. В [4, 5] комплексная относительная диэлектрическая проницаемость материалов с потерями в СВЧ-диапазоне измеряется косвенным путем по зависимости коэффициента отражения Френеля плоского образца материала от угла падения в пределах $\theta = 40...90^\circ$, 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 $\varepsilon = \left(\operatorname{tg}\theta_B\right)^2$.

В [6, 7] на основе облучения контролируемого участка морской поверхности СВЧ-радиоволнами на наклонной поляризации в интервале $\theta = 25...75^\circ$ регистрируют рассеянный назад сигнал, определяемый брэгговским механизмом рассеяния, одновременно на вертикальной и горизонтальной поляризациях, вычисляют поляризационное отношение нормированных сечений обратного рассеяния, измеренных на вертикальной σ^0_{vv} и горизонтальной σ^0_{hh} поляризациях, и рассчитывают относительную диэлектрическую проницаемость среды под границей "атмосфера–океан".

Снежно-ледяной покров представляет собой многослойную структуру с различными плотностями, долями содержания воды и собственными структурами. При определении границ раздела сред "воздух–снег" (air–snow), "снег–лед" (snow–ice), "лед–вода" (ice–water) для последующего вычисления глубины снежного и толщины ледяного покровов установление тождественности свойств (диэлектрической проницаемости) слоев является важным фактором при определении состояния СЛП.

Различие диэлектрических проницаемостей слоев позволяет получить пики эхосигналов от границ раздела слоев СЛП [8], за исключением случаев равномерного уплотнения снежного покрова таким образом, что на границе s–i $\varepsilon_s \approx \varepsilon_i$ и отражение от границы s–i вообще будет отсутствовать[4]. Обычно снежный покров имеет слои с различными комплексными относительным диэлектрическими проницаемостями, увеличивающиеся в глубину. Это связано с их уплотнением в процессе снегопадов, оттепелей, похолоданий и т. д., что позволяет получать эхосигналы от границ раздела слоев СЛП.

Суммарный коэффициент отражения Френеля от СЛП без учета многократных отражений между границами слоев при наклонном зондировании плоскими СВЧ-радиоволнами с вертикальной и горизонтальной поляризациями определяется по рекуррентной формуле [4]:

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

где h_{ri+1} – глубина $(i+1)$-слоя; λ – длина волны зондирующего сигнала; m – количество слоев СЛП;

$$R_{i,i} = 0,\ m \neq i,\ m \neq i+1,\ \ R_{i,i+1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{ri+1}} - \sqrt{\varepsilon_{ri}}}{\sqrt{\varepsilon_{ri+1}} + \sqrt{\varepsilon_{ri}}}.$$

Для вертикальной поляризации (vv – первый индекс зондирующего, второй – принятого радиосигнала) [4]:

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

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

Для горизонтальной поляризации (hh – первый индекс зондирующего, второй – принятого радиосигнала) [4]:

$$R_{hh\,i,i+1} = \frac{\left\{\sqrt{\varepsilon_{ri}}\cos\theta_i - \sqrt{\left[\varepsilon_{ri+1} - \varepsilon_{ri}\left(\sin\theta_i\right)^2\right]}\right\}}{\left\{\sqrt{\varepsilon_{ri}}\cos\theta_i + \sqrt{\left[\varepsilon_{ri+1} - \varepsilon_{ri}\left(\sin\theta_i\right)^2\right]}\right\}}. \quad (3)$$

Расчеты выполнялись в среде MatLab. На зависимости коэффициента отражения Френеля с вер-

[4] Финкельштейн М. И., Лазарев Э. И., Чижов А. Н. Радиолокационные аэроледомерные съемки рек, озер, водохранилищ. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 112 с.

тикальной поляризацией R_{vv}, рассчитанной по (2), от комплексной относительной диэлектрической проницаемостями среды ε_r и угла зондирования в пределах $\theta = 0...90^\circ$ наблюдается ярко выраженный провал значений (рис. 2, *а*), именуемый углом Брюстера, по сравнению с зависимостью коэффициента отражения Френеля с горизонтальной поляризацией R_{hh}, рассчитанной по (3) (рис. 2, *б*).

При восстановлении структуры СЛП (последовательном демонтаже слоев [8]) необходим учет скорости распространения электромагнитной волны (ЭМВ), поскольку она ниже скорости распространения в воздухе, в зависимости 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, т. е. эти показатели весьма заметно изменяются в зависимости от доли содержания воды, поскольку для чистой воды (pure water) $v_{pw} = 32.74\ldots41.97$ м/мкс, преимущественной ориентировки и формы включений льда и воздуха в снеге [3, 9].

Подставив в (1) длину волны в слое

$$\lambda_{ri+1} = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_{ri+1}}}$$

и относительную глубину $(i+1)$-слоя

$$H_{ri+1} = \frac{h_{ri+1}}{\lambda_{ri+1}},$$

получаем:

$$R_{i,m} = \frac{R_{1,2} + R_{2,3}\exp(\gamma_1) + R_{3,4}\exp(\gamma_1+\gamma_2) + \ldots}{1 + R_{1,2}R_{2,3}\exp(\gamma_1)R_{3,4}\exp(\gamma_1+\gamma_2)\times\ldots} \frac{\ldots + R_{i+1,m}\exp(\gamma_1+\gamma_2+\ldots+\gamma_i)}{\ldots\times R_{i+1,m}\exp(\gamma_1+\gamma_2+\ldots+\gamma_i)}, \quad (4)$$

где $\gamma_1 = -j\dfrac{4\pi h_{r2}}{\lambda\sqrt{\varepsilon_{r2}}}$; $\gamma_2 = -j\dfrac{4\pi h_{r3}}{\lambda\sqrt{\varepsilon_{r3}}}$; …;

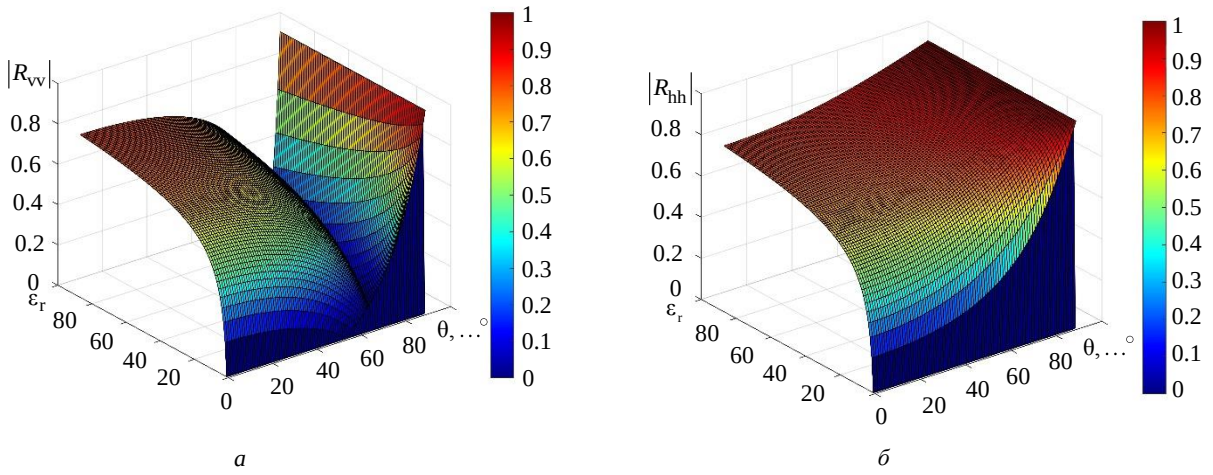
$$\gamma_i = -j\frac{4\pi h_{ri+1}}{\lambda\sqrt{\varepsilon_{ri+1}}} = -j\frac{4\pi H_{ri+1}}{\varepsilon_{ri+1}}.$$

Мощность отраженного сигнала от СЛП определяется формулой [10]:

$$P_r = \frac{P_{tx}\lambda^2 G^2 \left|R_{i,m}\right|^2}{(4\pi)^2 (2h)^2}, \quad (5)$$

где P_{tx} – мощность передающего устройства; λ – длина волны; G – коэффициент усиления антенны; h – высота ВСВТ.

На обеих поляризациях радиосигнал (5) в конкретный момент времени имеет одни и те же



а *б*

Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения Френеля (*а* – с вертикальной поляризацией R_{vv}; *б* – с горизонтальной поляризацией R_{hh}) от комплексной относительной диэлектрической проницаемости среды ε_r и угла зондирования в пределах $\theta = 0...90^\circ$

Fig. 2. Dependence of the Fresnel reflection coefficient (*a* – with vertical polarization R_{vv}; *б* – with horizontal polarization R_{hh}) on the complex relative permittivity the medium ε_r and the sensing angle within $\theta = 0...90^\circ$

параметры P_{tx}, λ, G, h, и, поскольку эта зависимость нивелируется при вычислении отношения коэффициентов отражения Френеля вертикально и горизонтально поляризованных сигналов, отношение будет определяться тремя параметрами: ε_{rm}, θ и f_{tx}. Выражение (5) не учитывает шероховатость слоев СЛП, поскольку радиоволна не зеркально отражается, а рассеивается под различными углами, но при вычислении отношений коэффициентов отражения Френеля вертикально и горизонтально поляризованных сигналов эта зависимость также нивелируется.

Согласно предложенному методу зондирование радиосигналом одновременно с вертикальной и горизонтальной поляризациями контролируемого участка СЛП в пределах $\theta = 25...45^\circ$ позволяет определить зависимость коэффициентов отражения Френеля с вертикальной $R_{vvi,i+1}$ и горизонтальной $R_{hh\,i,i+1}$ поляризациями, $(i, i+1)$-границы раздела слоев от угла падения радиоволны.

Относительные диэлектрические проницаемости слоев СЛП определяются из отношений коэффициентов отражения Френеля по мощности P_{rm} (рис. 3) сигналов с вертикальной поляризацией $\left|R_{vv(rm)}\right|^2$ (см. рис. 2, *а*), полученных по формулам (2), (4), и горизонтальной поляризацией $\left|R_{hh(rm)}\right|^2$ (см. рис. 2, *б*), полученных по формулам (3), (4):

$$P_{rm} = \frac{\left|R_{hh(rm)}\right|^2}{\left|R_{vv(rm)}\right|^2}, \qquad (6)$$

где $\left|R_{hh(rm)}\right|^2$, $\left|R_{vv(rm)}\right|^2$ – коэффициенты отражения Френеля по мощности (отражательная способность), измеренные на горизонтальной (hh) и вертикальной (vv) поляризациях соответственно; m – количество пиков эхосигнала (границ раздела слоев СЛП с разными относительными диэлектрическими проницаемостями), соответствующих количеству слоев СЛП.

Максимальный угол наклонного зондирования $\theta = 25...45^\circ$ контролируемого участка СЛП определяется меньшим угла Брюстера $\theta_B = 46^\circ$ для слоя СЛП с наименьшей относительной диэлектрической проницаемостью сухого снега (dry snow) – $\varepsilon_{rds} = 1.07 - j0.0008$.

На рис. 3 представлены отношения коэффициентов отражения Френеля по мощности P_{rm} для слоев с комплексными относительными диэлектрическими проницаемостями в зависимости от угла зондирования в пределах $\theta = 25...45^\circ$.

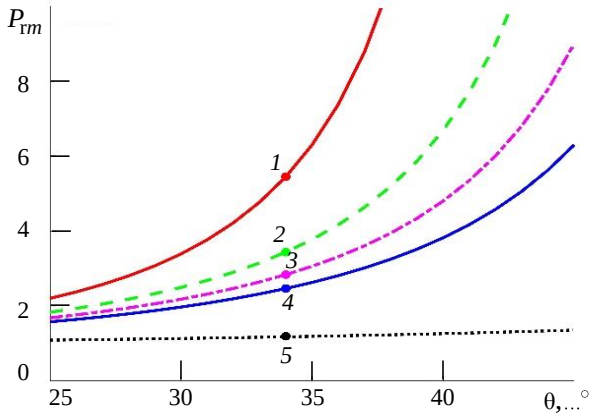


Рис. 3. Отношения коэффициентов отражения Френеля по мощности P_{rm} сигналов с вертикальной (полученных по формулам (2), (4)) и горизонтальной (полученных по формулам (3), (4)) поляризациями:
1 – $\varepsilon_{r2} = 1.2 - j0.0008$; *2* – $\varepsilon_{r3} = 1.9 - j0.0008$;
3 – $\varepsilon_{r4} = 2.5 - j0.0008$; *4* – $\varepsilon_{r5} = 3.2 - j0.0008$;
5 – $\varepsilon_{r6} = 74 - j$ в зависимости от угла зондирования в пределах $\theta = 25...45^\circ$

Fig. 3. The ratio of Fresnel reflection coefficients for the power P_{rm} signals from the vertical (obtained by formulas (2), (4)) and horizontal (obtained by formulas (3), (4)) polarization: *1* – $\varepsilon_{r2} = 1.2 - j0.0008$;
2 – $\varepsilon_{r3} = 1.9 - j0.0008$; *3* – $\varepsilon_{r4} = 2.5 - j0.0008$;
4 – $\varepsilon_{r5} = 3.2 - j0.0008$; *5* – $\varepsilon_{r6} = 74 - j$ depending on the sensing angle within $\theta = 25...45^\circ$

Последовательное определение диэлектрической проницаемости каждого последующего нижележащего слоя ε_{rm}, где $m = 2, 3, ..., M$ – номер слоя СЛП, осуществляется по формуле

$$\varepsilon_{rm} = \left[1 + \frac{4\sqrt{P_{rm}(\theta)}}{\left(1 - \sqrt{P_{rm}(\theta)}\right)^2}\sin(\theta)^2\right]\mathrm{tg}(\theta)^2, \qquad (7)$$

что соответствует графикам (рис. 3) зависимости (6).

Интервалам плотностей СЛП будут соответ-

ствовать интервалы отношений коэффициентов отражения Френеля по мощности P_{rm}. Так, например, при $\theta = 34^\circ$ для сухого снега (dry snow) $\rho_{ds} = 100\ldots500$ кг/м^3 $\left(\varepsilon'_{ds} = 1.162\ldots1.984\right)$ – $P_{rm} = 5.6915...3.3266$, сухого фирна (dry firn) $\rho_{df} = 500\ldots700$ кг/м^3 $\left(\varepsilon'_{df} = 1.984\ldots2.51\right)$ – $P_{rm} = 3.3266...2.8311$, сухого льда (dry ice) $\rho_{di} = 700\ldots917$ кг/м^3 $\left(\varepsilon'_{di} = 2.51\ldots3.179\right)$ – $P_{rm} = 2.8311\ldots2.4753$. С увеличением содержания влаги значения отношений коэффициентов отражения Френеля по мощности P_{rm} уменьшаются, стремясь к значениям для воды. Для морской воды $\varepsilon'_{sw} = 74$ (sea water) соленостью $S_{sw} = 35$ г/кг – $P_{rm} = 1.1923$, а для чистой (талой) воды с $\varepsilon'_{pw} = 87$ (pure water) – $P_{rm} = 1.1760$.

Для идентификации слоев СЛП устанавливается тождественность полученных значений диэлектрических проницаемостей слоев ε_{rm} с заданными расчетными (образцовыми) значениями диэлектрических проницаемостей слоев $\varepsilon_{vr\Delta}$ по условию $\varepsilon_{rm} = \varepsilon_{vr\Delta}$: "снежный покров", "фирн", "ледяной покров" либо "вода".

Расчетные (образцовые) значения диэлектрических проницаемостей слоев. Расчетные (образцовые) значения диэлектрических проницаемостей слоев СЛП $\varepsilon_{vr\Delta}$ как трехкомпонентной среды, состоящей из льда с включениями воды и воздуха, определяются по формуле

$$\varepsilon_{vr\Delta} = \varepsilon'_{vr\Delta} - j\varepsilon''_{vr\Delta},$$

где $\varepsilon'_{vr\Delta}$ и $\varepsilon''_{vr\Delta}$ – действительная и мнимая часть расчетных (образцовых) значений диэлектрических проницаемостей слоев СЛП.

Действительная часть расчетных (образцовых) значений относительных диэлектрических проницаемостей влажных сред $\varepsilon'_{vr\Delta}$: $\varepsilon'_{vs\Delta}$ – снега (snow), $\varepsilon'_{vf\Delta}$ – фирна (firn), $\varepsilon'_{vi\Delta}$ – льда (ice) определяется по формуле [3, 9, 11–13]:

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

где ε'_r (ε'_s – снега (snow), ε'_f – фирна (firn), ε'_i – льда (ice)) с плотностью слоя $\rho_r = 100\ldots917$ кг/м^3 ($\rho_s = 100\ldots500$ кг/м^3; $\rho_f = 500\ldots700$ кг/м^3; $\rho_i = 700\ldots917$ кг/м^3); ε'_w ($\varepsilon'_{pw\Delta}$ и $\varepsilon'_{sw\Delta}$ – чистой воды (pure water) и морской воды (sea water), определяемые дебаевской моделью); P_{wa} – общая доля содержания воды и воздуха; P_w – общая доля содержания воды.

Например, на графиках (см. рис. 3) при $\theta = 34^\circ$ соответствующие поляризационные отношения выглядят следующим образом: *1* – $P_{r2} = 5.4553$, *2* – $P_{r3} = 3.4396$, *3* – $P_{r4} = 2.8381$, *4* – $P_{r5} = 2.4668$, *5* – $P_{r6} = 1.1923$, что соответствует: $\varepsilon_{r2} = 1.2 - j0.0008$ – сухому снегу, $\varepsilon_{r3} = 1.9 - j0.0008$ – сухому снегу, $\varepsilon_{r4} = 2.5 - j0.0008$ – сухому фирну, $\varepsilon_{r5} = 3.2 - j0.0008$ – сухому льду, $\varepsilon_{r6} = 74 - j$ – морской воде соленостью $S_{sw} = 35$ г/кг.

Определение глубин слоев снежно-ледяного покрова. В основу определения глубин слоев СЛП заложен частотный принцип выделения частоты биения (разностного сигнала), получаемой при перемножении принятого и зондирующего (опорного) сигналов, с помощью быстрого преобразования Фурье с последующей оцифровкой и реализацией алгоритмов цифровой обработки. Зондирование контролируемого участка СЛП осуществляется линейно-частотным модулированным (ЛЧМ) сигналом, сформированным в передающем устройстве с частотой $f_{tx}(t)$ [10, 14], что позволяет получить эхосигналы от границ слоев СЛП на разных частотах [15]

$$f_{tx}(t) = f_0 + \alpha t_n, \ \forall\ 0 < t_n < T_n, \qquad (8)$$

где f_0 – начальная частота; α – скорость изменения частоты (крутизна ЛЧМ); t_n – длительность отдельного периода модуляции ЛЧМ-сигнала (быстрое время); T_n – период модуляции (ЛЧМ-сигнала) и прием эхосигналов приемным устройством с частотой [10, 14]

$$f_{rx}(t) = f_0 + \alpha\left(t_n - \tau\right), \ \forall\ \tau < t_n < T_n. \qquad (9)$$

Здесь τ – временная задержка принятого эхосигнала от границ раздела слоев СЛП.

Временная задержка τ_{rm} в m-слое принятого эхосигнала между границами раздела слоев СЛП пропорциональна глубине h_{rm} и определяется выражением

$$\tau_{rm} = 2h_{rm}/v_{rm}, \quad (10)$$

где v_{rm} – скорость распространения ЭМВ в m-слое [3, 9, 11–13].

Частотная составляющая биения f_b непосредственно связана с задержкой эхосигнала (10), являясь разницей выражений (8) и (9):

$$f_b = f_{tx} - f_{rx} = \alpha\tau_{rm} = 2h_{rm}B/(v_{rm}T_n), \quad (11)$$

где B – ширина полосы ЛЧМ-сигнала. Из (11) определяются глубины слоев СЛП, возникающие между разностью расстояний, которые проходят излученный и отраженный сигналы при зондировании подстилающей поверхности в надир, определяемые по формуле

$$h_{rm} = f_b v_{rm} T_n/(2B).$$

Полное время прохождения слоев СЛП в общем виде определяется по формуле

$$\tau_d = \tau_{iw} = \tau_{as} + \tau_s + \tau_i = 2h_a/c + 2h_s/v_s + 2h_i/v_i,$$

где τ_{as} – временная задержка до границы раздела среды "воздух–снежный покров"; τ_s, τ_i – временная задержка в снежном и ледяном покровах соответственно; h_a – расстояние от ВСВТ до границы раздела сред "воздух–снег"; h_s – высота снежного покрова; h_i – глубина ледяного покрова; v_s, v_i – скорости распространения электромагнитной волны в снеге и льде соответственно.

Результаты. Резюмируя изложенное, можно отметить следующее. Нормальное зондирование подстилающей поверхности в виде СЛП не показывает отличительных особенностей параметров принимаемых радиосигналов с вертикальной и горизонтальной поляризациями. При увеличении угла наклона зондирования с 25 до 45° наблюдается увеличение отношений коэффициентов отражения от границ раздела слоев с различными диэлектрическими проницаемостями.

Решение обратной задачи реконструкции слоев СЛП в виде снега, фирна, льда и воды осуществляется посредством косвенного определения комплексной относительной диэлектрической проницаемости каждого последующего нижележащего слоя с разрешением по действительной части, например при $\theta = 34^\circ$ для $\varepsilon_{r7} = 1.07 - j0.0008$ с поляризационным отношением $P_{r7} = 6.401$, для $\varepsilon_{r8} = 1.08 - j0.0008$ с поляризационным отношением $P_{r8} = 6.312$, соответствующей 10^{-2}.

Прием эхосигналов осуществляется на тех же поляризациях, и определяются отношения коэффициентов отражения радиосигналов в зависимости от угла падения на границы раздела слоев контролируемого участка с последующим вычислением относительной диэлектрической проницаемости каждого последующего нижележащего слоя СЛП. Далее следует установление тождественности вычисленных значений с расчетными (образцовыми) значениями относительных диэлектрических проницаемостей слоев СЛП с целью дистанционной идентификации состояния СЛП.

Сверхширокополосный сигнал с линейно-частотной модуляцией позволяет получить эхосигнал как от границ раздела "воздух–снег", "снег-лед", "лед–вода", так и от границ раздела слоев снежного и ледяного покровов на основе контраста их диэлектрических проницаемостей. Определение глубин слоев СЛП, реализующее частотный принцип, осуществляется посредством демодуляции, перемножением принятого и зондирующего (опорного) сигналов, выделением частоты биения (разностного сигнала) и оцифровки с последующей реализацией алгоритмов цифровой обработки сигналов.

Полоса 6 ГГц сверхширокополосного ЛЧМ-сигнала с частотой от 2 ГГц до 8 ГГц позволяет увеличить разрешающую способность по глубине до значения около 4 см [10]. При этом методическая погрешность определения относительной диэлектрической проницаемости слоев по отношениям коэффициентов отражения Френеля при заданных расчетных (образцовых) значениях относительной диэлектрической проницаемости и согласно предложенной формуле составляет не более 1.5 %.

Получены интервалы поляризационных отношений, соответствующих интервалам плотностей слоев СЛП для фиксированных углов. Так, например, при $\theta = 34^\circ$ для сухого снега $\rho_{ds} = 100\ldots500$ кг/м^3 $\left(\varepsilon'_{ds} = 1.162\ldots1.984\right)$ –

$P_{rm} = 5.6915...3.3266$, сухого фирна $\rho_{df} = 500\ldots700$ кг/м^3 $\left(\varepsilon'_{df} = 1.984\ldots2.51\right)$ – $P_{rm} = 3.3266...2.8311$, сухого льда $\rho_{di} = 700\ldots917$ кг/м^3 $\left(\varepsilon'_{di} = 2.51\ldots3.179\right)$ – $P_{rm} = 2.8311\ldots2.4753$.

Заключение. Таким образом, дистанционная идентификация составляющих элементов структуры снежно-ледяного покрова позволяет автоматизировать процесс оценки возможности выполнения посадки, тем самым снизив время принятия решения и повысив уровень безопасности. В отличие от известных методов идентификации приповерхностного слоя [4–7] осуществляется идентификация слоев многослойной среды в виде снежно-ледяного покрова водоема. Полученное значение методической погрешности определения относительной диэлектрической проницаемости слоев по отношениям коэффициентов отражения Френеля при заданных расчетных (образцовых) значениях и согласно предложенной формуле свидетельствует о правомерности использования данного метода при посадке ВСВТ на неподготовленную площадку со СЛП.

Список литературы

1. Машков В. Г., Малышев В. А. Модель управления посадкой воздушного судна вертолетного типа на неподготовленную заснеженную площадку // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. № 4 (27). С. 1–10. doi: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.037

2. Пат. RU 2707275 G01S 13/94 (2006.01). Способ выбора площадки для посадки воздушного судна вертолетного типа / В. Г. Машков, В. А. Малышев; опубл. 26.11.2019. Бюл. № 33.

3. Малышев В. А., Машков В. Г. Скорость распространения электромагнитной волны в снежно-ледяной подстилающей поверхности // Радиотехника. 2020. № 3 (5). С. 40–54. doi: 10.18127/j00338486-202003(05)-05

4. 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).

5. Пат. RU 2613810 G01R 27/00 (2006.01). Способ измерения относительной комплексной диэлектрической проницаемости материала с потерями в СВЧ диапазоне / Г. Г. Валеев; опубл. 21.03.2017. Бюл. № 9.

6. Пат. RU 2623668 G01R G01N (2006.01). Способ дистанционного определения относительной диэлектрической проницаемости среды под границей атмосфера-океан / А. С. Запевалов; опубл. 28.06.2017. Бюл. № 19.

7. Пинчук А. Н. Влияние поляризации зондирующего радиосигнала на эффективность выделения отклика надводной цели // Наука и образование. 2015. Т. 15, № 3. С. 140–152. doi: 10.7463/0315.0760670.

8. Гринев А. Ю., Темченко В. С., Багно Д. В. Радары подповерхностного зондирования. Мониторинг и диагностика сред и объектов. М.: Радиотехника, 2013. 392 с.

9. 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

10. 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.

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

12. Глазовский А. Ф., Мачерет Ю. Я. Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований. М.: ГЕОС, 2014. 528 с.

13. Macheret Yu. Ya., Glazovsky A. F. Estimation of absolute water content in Spitsbergen glaciers // Polar Research. 2000. Vol. 19, № 2. P. 205–216. doi: 10.3402/polar.v19i2.6546

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. Пат. RU 2262718 G01S13/95 (2006.01). Способ измерения толщины снежного покрова / Е. Л. Шошин, А. М. Суханюк, И. И. Плюснин; опубл. 20.10.2005. Бюл. № 29.

Информация об авторе

Машков Виктор Георгиевич – инженер по специальности "Радиоэлектронные системы" (2001, Тамбовский военный авиационный инженерный институт), кандидат технических наук (2008, Тамбовское высшее военное авиационное инженерное училище радиоэлектроники (военный институт)), доцент (2017, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (г. 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" (г. Воронеж). Автор 230 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" (г. Воронеж), ул. Старых Большевиков, д. 54А, г. Воронеж, 394064, Россия
E-mail: mvgblaze@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-3406-7444

References

1. Mashkov V. G., Malyshev V. A. Control model for landing a helicopter – type aircraft on an unprepared snow-covered platform. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technology]. 2019, no. 4 (27), pp. 1–10. (In Russ.). doi: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.037

2. Mashkov V. G., Malyshev V. A. *Sposob vybora ploshchadki dlya posadki vozdushnogo sudna vertoletnogo tipa* [Method for selecting a landing site for a helicopter-type aircraft]. Patent RF, no. 2707275, 2019. (In Russ.)

3. Malyshev V. A., Mashkov V. G. Speed of electromagnetic wave propagation in the snow-ice underlying surface. *Radiotekhnika* [Radioengineering]. 2020, no. 3 (5), pp. 40–54. (In Russ.). doi: 10.18127/j00338486-202003(05)-05

4. Shostak A. S., Zagoskin V. V., Lukyanov S. P., Karaush A. S. *O vozmozhnosti opredeleniya dielektricheskoj pronicaemosti verhnih sloev podstilayushchih sred po izmerennym koefficientam otrazheniya pri naklonnom zondirovanii ploskimi volnami vertikal'noj i gorizontal'noj polyarizacii 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.)

5. Valeev G. G. *Sposob izmereniya otnositel'noj kompleksnoj dielektricheskoj pronicaemosti materiala s poteryami v SVCH diapazone* [Method for measuring the relative complex permittivity of a material with losses in the microwave range]. Patent RF, no. 2613810, 2017. (In Russ.)

6. Zapevalov A. S. *Sposob distancionnogo opredeleniya otnositel'noj dielektricheskoj 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, 2017. (In Russ.).

7. Pinchuk A. N. Influence of polarization of the probing radio signal on the efficiency of surface target response selection. *Nauka i obrazovanie* [Science and education]. 2015, no. 3, pp. 140–152. (In Russ.). doi: 10.7463/0315.0760670

8. 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.)

9. 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 (1), pp. 45–56. (In Russ.). doi:10.15356/2076-6734-2017-1-45-56

10. 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.

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

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

13. Macheret Yu. Ya., Glazovsky A. F. Estimation of absolute water content in Spitsbergen glaciers. Polar Research. 2000, no. 19 (2), pp. 205–216. doi: 10.3402/polar.v19i2.6546

14. Kupreskic 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. (In Russ.). doi: 10.18127/B9785931081915

15. 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, 2005. (In Russ.)

Information about the author

Viktor G. Mashkov, Engineer specialty "Radio-Electronic systems" (2001, Tambov military aviation engineering Institute), candidate technical Sciences (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 Y. 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 Y. 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 professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin" (Voronezh), 54A Starykh Bolshevikov St., Voronezh 394064, Russia
E-mail: mvgblaze@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-3406-7444