

Многолучевая интерферометрия от сигналов навигационных спутников в слоистых структурах лесных массивов и льдов пресноводных водоёмов

Д. В. Харламов¹, В. Г. Подопригора^{2,3}, М. Ю. Реушев^{1,3},
Д. С. Макаров^{1,4}, Е. Н. Васильев⁴

¹ Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, 660036, Россия
E-mail: ikivt@yandex.ru

² Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, Красноярск, 660036, Россия

³ Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия

⁴ Институт вычислительного моделирования СО РАН
Красноярск, 660036, Россия

Представлены результаты серии измерений амплитудно-временной зависимости интерференционного поля сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) диапазона L1 ($\lambda \approx 0,19$ м) при отражении от слоистых сред: снежно-ледового покрова пресноводного озера в зимне-весенний период и вблизи лесного массива. По результатам измерений выполнены: первичная выборка данных измерений с использованием облачного сервиса, последующая обработка данных путём быстрого фурье-преобразования (БФП) и дальнейший анализ результатов с помощью методик, применяемых в многолучевой ГНСС-рефлектометрии. Для анализа полученных рефлектограмм использована модель многолучевой интерференции в слоистых средах, для чего привлечена схема геометрической оптики. Это позволило, используя коэффициенты пропускания и отражения Френеля, рассчитать амплитуду и фазу волн, пришедших наряду с прямым сигналом на приёмную антенну. В дополнение к экспериментальным данным в работе представлены результаты вычислительного моделирования динамики снежно-ледового покрова, что позволило определить его температурный режим, состояние, другие термодинамические характеристики. Моделирование проведено на основе численного решения задачи Стефана в обобщённой постановке с учётом локальных климатических данных. Это позволило не только оценить текущее состояние слоёв, но и спрогнозировать их динамическое развитие с использованием метеорологических прогнозов. Результаты исследования могут применяться для мониторинга состояния ледового покрова от становления до таяния, а также лесных массивов с целью анализа их влажности, пожароопасности и густоты посадки.

Ключевые слова: ГНСС-рефлектометрия, сигналы навигационных спутников, слоистые среды, ледовые покровы, лес, диэлектрическая проницаемость, вычислительное моделирование

Одобрена к печати: 10.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-51-60

Введение

Известно, что метод многолучевой ГНСС-рефлектометрии (глобальные навигационные спутниковые системы) представляется перспективным способом для мониторинга состояния земных покровов, позволяющим в реальном времени восстанавливать электрофизические параметры исследуемого объекта (Кашкин..., 2023; Jin et al., 2014). Рефлектометрические измерения отражённых средой радиосигналов частоты диапазона L1 характеризуются высоким пространственно-временным разрешением и чувствительностью. Регистрируемый приёмником сигнал, прошедший и отражённый слоистой средой, вследствие рассеяния и поглощения искажается, и характер этих искажений, обусловленный электрофизическими характеристиками среды, содержит данные о параметрах зондируемого объекта.

Метод основан на регистрации приёмником интерференционного поля, сформированного в результате суперпозиции прямой электромагнитной волны, распространяющейся от навигационного спутника (НС) (диапазон L1, длина волны $\lambda \approx 0,19$ м) к приёмной антенне,

с волнами, отражёнными от слоистой структуры объекта (снег, лёд, вода или воздух, лесной полог и почва) (Васильев и др., 2022; Кашкин..., 2023; Макаров и др., 2019; Сорокин и др., 2020). На *рис. 1* приведена схема формирования сигнала, регистрируемого навигационным приёмником при отражении от слоистой поверхности с толщиной d .

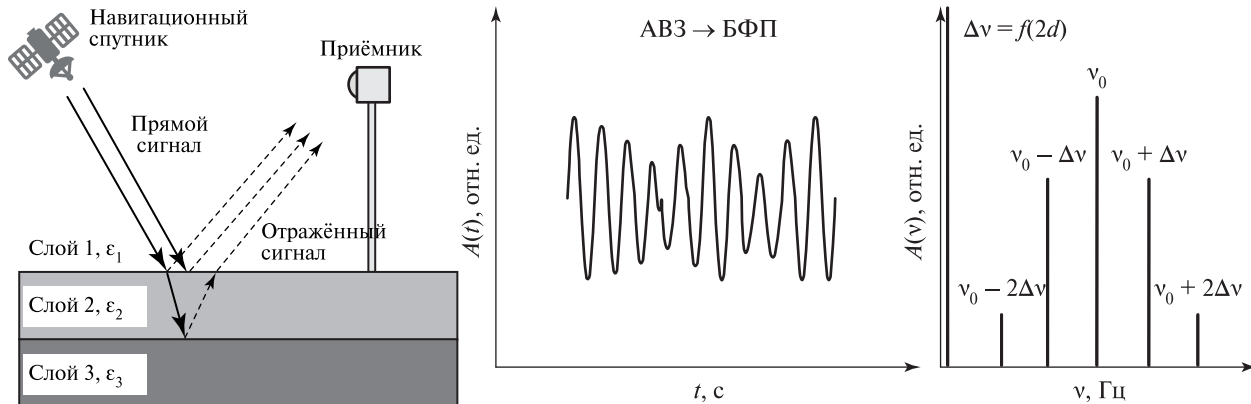


Рис. 1. Схема формирования сигнала, регистрируемого навигационным приёмником, амплитудно-временная зависимость $A(t)$ и результат быстрого фурье-преобразования $A(\nu)$

Как можно видеть из *рис. 1*, вследствие отражений от слоевых поверхностей зондируемого объекта в плоскости приёмной антенны формируется интерференционная картина, аналогичная известной из оптики интерференции в тонких плёнках. Реальные земные поверхности со слоевой структурой, прозрачной для навигационных сигналов, имеют шероховатости. Шероховатости, сравнимые с длиной волны навигационных сигналов, приводят к появлению в спектре интерференционных полос диффузной компоненты.

Для описания многолучевой интерференции слоистых поверхностей можно использовать модель геометрической оптики, позволяющую рассчитать амплитуду и фазу волн, пришедших на приёмник после отражения от слоёв. Амплитуда U_i волны, отражённой от i -го слоя ($i = 1, 2, 3$) и приходящей на приёмник, представлена следующим выражением:

$$U_i = R_{i,i+1} \prod_{k=1}^{k=i} T_{k-1,k} T_{k,k-1} e^{-2\alpha_k d_k},$$

где $T_{k-1,k}$ и $R_{i,i+1}$ — коэффициенты Френеля пропускания и отражения i -го и k -го слоёв; $\alpha_k = 2\pi\lambda |\text{Im}(\epsilon_k)|$ — коэффициенты ослабления в k -м слое; λ — длина волны; $d_k = H/\cos(\theta_k)$, H_k и θ_k — толщина и угол падения луча в k -м слое.

Вследствие зависимости диэлектрической проницаемости структурных слоёв зондируемых объектов от температуры, влажности и качества поверхности, формирование интерференционного поля также зависит от этих параметров, что позволяет использовать данный метод для определения макрофизических характеристик: толщины и плотности льда, объёмного содержания воды, влажности древостоя, коэффициентов погонного ослабления и т. д.

Цель данной работы заключается в исследовании взаимодействия сигналов навигационных спутников со слоистыми структурами льда и леса с целью мониторинга их состояния.

Рефлектометрия ледового покрова пресноводного водоёма

Проведена серия экспериментов по регистрации рефлектограмм ледового покрова пресноводного водоёма, покрытого снегом, в период декабрь 2022 г. — апрель 2023 г. на тестовой площадке вблизи Красноярска (оз. Бугач, координаты установки антенны: $56^\circ 03' 48,2''$ с. ш., $92^\circ 43' 37,7''$ в. д.). Съёмка выполнялась по классической схеме (Макаров и др., 2019) с высотой приёмной антенны на уровне 3,2 м. Регистрация сигналов от НС проводилась четырёх-

канальным приёмником-регистратором ГЛОНАСС/GPS (Глобальная навигационная спутниковая система, *англ.* GLONASS/*англ.* Global Positioning System — система глобального позиционирования), модель НСРП-04 (Россия, Красноярск), и антенной с правокруговой поляризацией. Обновление данных измерений во время каждого сеанса проходило с частотой 1 Гц. Временной интервал сеанса записи составлял около 90 мин.

Предварительная обработка данных проводилась облачным сервисом первичной обработки (Малимонов и др., 2022). С помощью сервиса были отобраны наиболее информативные сеансы измерений с фильтрацией по следующим критериям: диапазон азимута движения НС — от 20 до 180°, угол места восхождения НС над горизонтом — в диапазоне от 10 до 40°.

Параллельно во время каждого сеанса ручным способом измерялась толщина и фиксировалось состояние структуры ледового покрова. Примеры амплитудно-временных зависимостей (АВЗ) рефлектограмм $A(t)$, полученных во время сеансов измерений, показаны на *рис. 2*. Результаты измерений структуры покрова приведены в *таблице*.

Параметры ледовых покровов

Дата сеанса	Толщина льда, м	Толщина снега, см
07.12.2022	0,4	4–5
16.02.2022	0,65	5–6
05.04.2023	0,88	0–3
21.04.2023	0,68–0,78	1,5–4

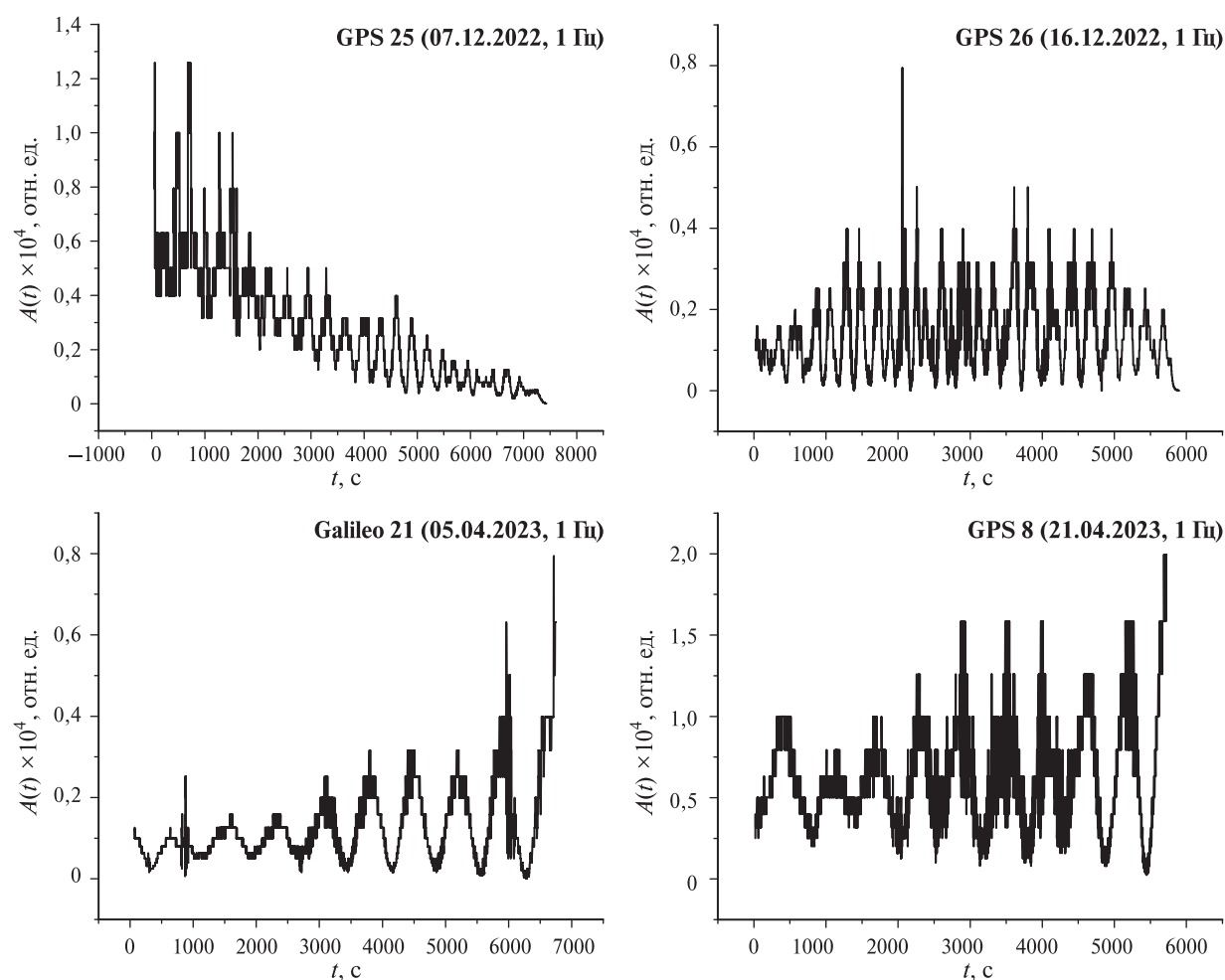


Рис. 2. Примеры АВЗ рефлектограмм, полученных во время сеансов от навигационных спутников

Амплитудно-временные зависимости, полученные во время сеансов рефлектометрии, были обработаны с помощью стандартного пакета программ Origin 9.6 с использованием быстрого фурье-преобразования (БФП) ($A(t) \rightarrow A(\nu)$). Для показанных на рис. 2 примеров спектры $A(\nu)$ приведены на рис. 3.

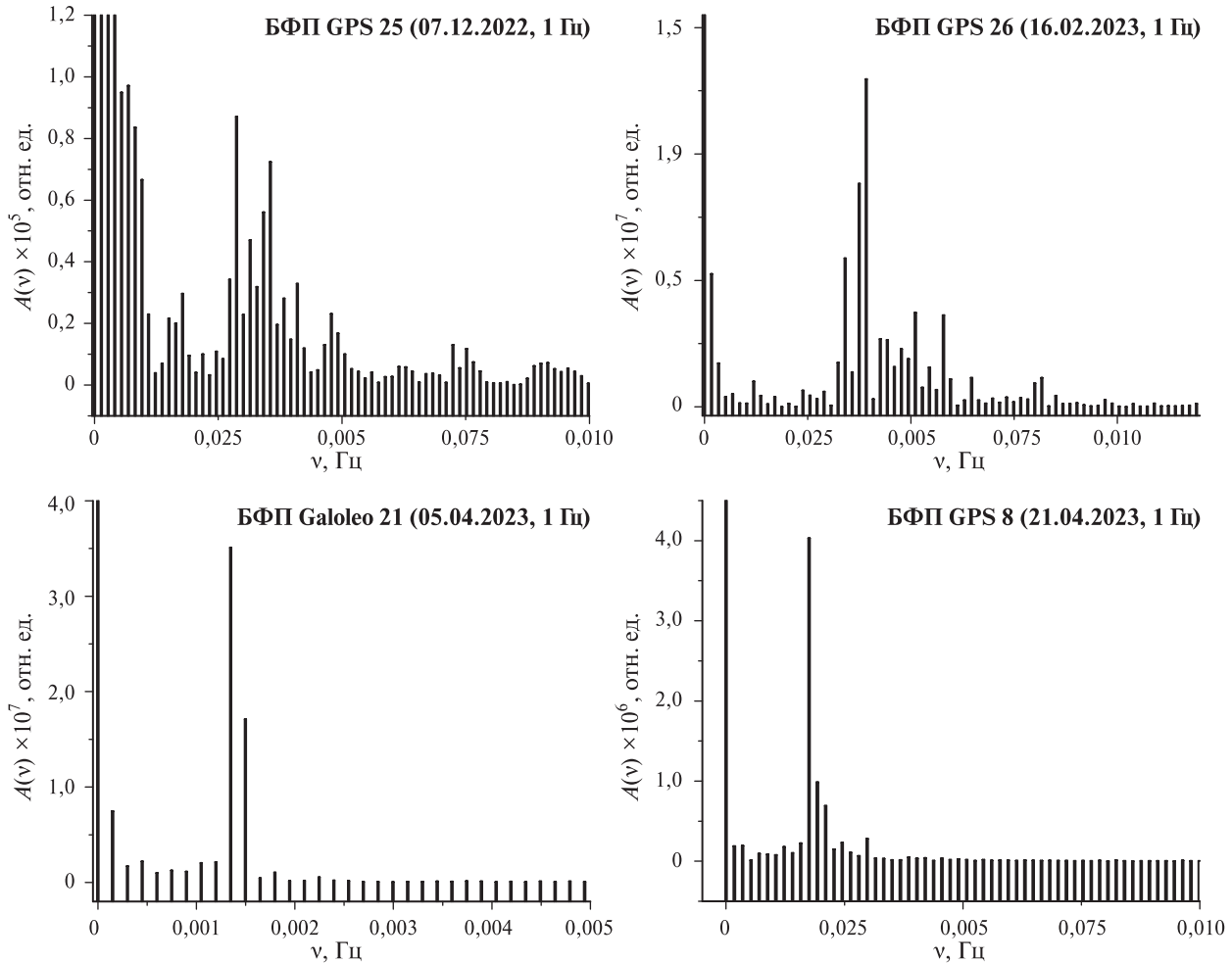


Рис. 3. Результаты обработки рефлектограмм, полученных с помощью БФП от навигационных спутников

На рис. 3 видно, что при различной толщине льда и снега на его поверхности спектры рефлектограмм отличаются друг от друга.

Моделирование динамики ледового покрова и анализ интерференционного поля

Дополнительная информация о температурном режиме и состоянии ледового покрова, полезная при анализе результатов ГНСС-рефлектометрии льда, может быть получена с использованием вычислительного моделирования. Моделирование динамики ледового покрова водоёма проведено на основе численного решения задачи Стефана. Задача представлена в обобщённой формулировке, когда теплота фазового перехода «лёд – вода» учитывается в величине эффективной теплоёмкости среды:

$$c_s(z)\rho(z)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\Lambda(z) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + q_v(z), \quad (1)$$

где c_s , ρ — удельная эффективная теплоёмкость и плотность среды; T — температура; Λ — коэффициент теплопроводности; t — время; z — вертикальная координата, направленная вниз относительно поверхности водоёма; q_v — мощность объёмного теплового источника, обусловленного поглощением солнечного излучения в глубине водоёма. Неоднородность коэффициентов c_s , ρ и Λ связана с наличием фазового перехода и различием теплофизических свойств сред (воды, льда и снега). На поверхности водоёма задаются граничные условия, которые позволяют учитывать теплообмен с окружающей средой для текущего состояния поверхности водоёма (вода, лёд или снег).

$$\left[\Lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right]_{z=0} = q_c + q_a - q_s - q_e, \quad (2)$$

где q_c — тепловой поток, обусловленный конвективным теплообменом поверхности водоёма (воды, льда или снега) с атмосферным воздухом; q_a — длинноволновое излучение атмосферы, поступающее на поверхность водоёма; q_e , q_s — тепловые потери за счёт испарения и собственного излучения поверхности водоёма. Также на поверхность падает поток коротковолнового солнечного излучения, часть его отражается от поверхности, остальное излучение проникает в глубинные слои водоёма, где поглощается и приводит к тепловыделению q_v в объёме среды.

В обобщённой формулировке задачи Стефана добавочная теплоёмкость, обусловленная скрытой теплотой фазового перехода, задаётся в виде гладкой функции в узком температурном интервале ($T^* - \Delta T$, $T^* + \Delta T$), в котором среда имеет переходное состояние влажного льда, одновременно присутствуя в твёрдой и жидкой фазах. В расчётах задавалась температура фазового перехода $T^* = 0$ °С и $\Delta T = 0,1$ °С. Алгоритм решения задачи теплопроводности (1), (2) и соотношения для определения граничных тепловых потоков в формуле описаны в работах (Васильев, 2022; Васильев, Деревянко, 2018).

Моделирование проведено для условий оз. Бугач, при этом использованы климатические данные в виде таблиц среднесуточных значений (температура воздуха, скорость ветра, влажность, поток солнечной радиации) холодного периода (октябрь 2022 г. — апрель 2023 г.) метеостанции Минино, которая расположена вблизи этого водоёма. На *рис. 4* приведены временные зависимости среднесуточной температуры атмосферного воздуха (красная линия).

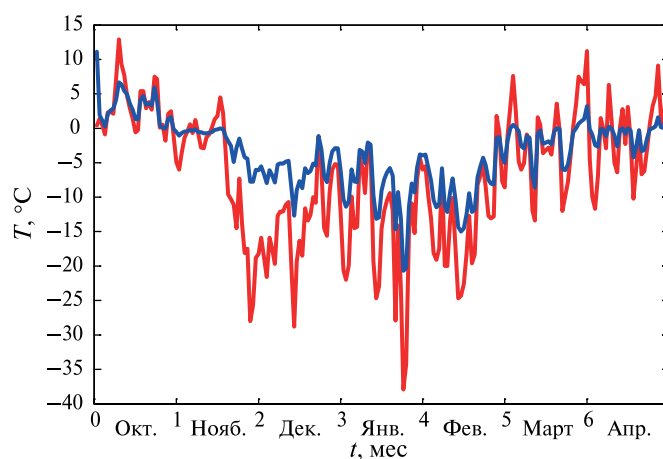


Рис. 4. Зависимости от времени температуры атмосферного воздуха (красная линия) и поверхности льда (синяя линия) при высоте снежного покрова 5 см

Температурное состояние водоёма в холодный период года зависит от климатических условий, наличия снега и его толщины, величины потока солнечного излучения, оптических и теплофизических свойств воды, льда и снега. С наступлением холодного периода с отрицательной температурой водная поверхность покрывается слоем льда, при выпадении осадков на нём появляется снежный покров. Наличие снега оказывает существенное влияние на

тепловой баланс и температурный режим водоёма вследствие изменения оптических характеристик его поверхности и появления дополнительного термического сопротивления между воздухом и льдом. Рассчитанная температура поверхности льда при наличии слоя снега 5 см (синяя линия) существенно отличается от температуры атмосферного воздуха (см. рис. 4).

Изменение состояния верхнего слоя водоёма в холодный период года представлено на рис. 5. На рисунке приведены сплошными линиями изолинии, соответствующие значениям $T^* - \Delta T$, T^* , $T^* + \Delta T$, также отображены области, которые отвечают различным температурным диапазонам и состояниям среды. Области 1 (вода), 2 (лёд) и 3 (влажный лёд) относятся к диапазонам $T > T^* + \Delta T$, $T < T^* - \Delta T$ и $T^* - \Delta T < T < T^* + \Delta T$ соответственно. В начале рассматриваемого периода (октябрь) верхний слой водоёма состоит полностью из воды. В течение холодного периода (ноябрь – февраль) идёт практически монотонное нарастание толщины ледового покрова. В марте и апреле периодически происходят оттепели. С наступлением оттепелей толщина слоя, соответствующая состоянию «влажного льда», резко увеличивается, при этом слой влажного льда может достигать верхней границы ледового покрова. Подтаивание и увлажнение льда вызвано снижением отвода теплоты во внешнюю среду, объёмным тепловыделением за счёт поглощения солнечного излучения и тепловым потоком со стороны дна.

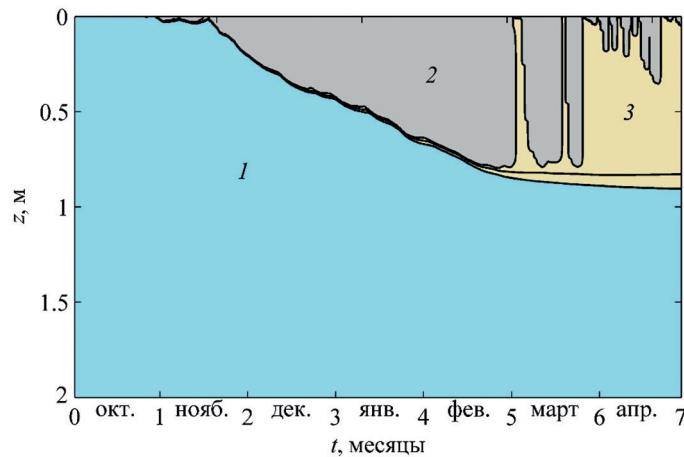


Рис. 5. Изменение состояния водоёма в холодный период: 1 — вода, 3 — лёд, 4 — влажный лёд

Как известно, коэффициенты отражения, пропускания, затухания сигналов определяются величинами действительной ϵ' и мнимой ϵ'' комплексной диэлектрической проницаемости. Эта проницаемость для пресноводного льда зависит от влажности, плотности, температуры и структуры. Вышеприведённые расчёты показали наличие в периоды оттепелей внутри ледового покрова слоя влажного льда. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ_s структуры «лёд – вода» от влажности можно описать выражением (Ulaby et al., 1986):

$$\epsilon_s = \left[\epsilon_i^{1/3} + W \left(\epsilon_w^{1/3} - \epsilon_i^{1/3} \right) \right]^3,$$

где ϵ_i и ϵ_w — диэлектрические проницаемости плотного льда и воды соответственно; W — объёмное содержание влаги.

Тестовая площадка характеризовалась следующими параметрами: высота антенны $H_0 = 3$ м; диэлектрическая проницаемость воздуха $\epsilon_0 = 1$; слой снега — толщина $H_1 = 0,1$ м, диэлектрическая проницаемость с усреднённой по вертикали плотности $\epsilon_s = 1,389 - (2 \cdot 10^{-4})j$ ($j = \sqrt{-1}$); слой льда — $H_2 = 0,44$ м, $\epsilon_i = 2,93 - (8 \cdot 10^{-4})j$; вода — $\epsilon_w = 82 - 2,5j$. Для реального снежно-ледового покрова тестовой площадки была рассчитана амплитуда для разных углов падения θ_0 . Так, при $\theta_0 = 45^\circ$: $U_0 = 0,082$, $U_1 = 0,1678$, $U_2 = 0,2527$; при $\theta_0 = 75^\circ$: $U_0 = 0,083$, $U_1 = 0,1282$, $U_2 = 0,1778$. Из геометрии эксперимента легко рассчитать запаздывание сигнала,

приходящего на приёмник от i -го слоя, и фазу волны. Зависимость запаздывания от глубины слоя при разных углах падения для указанных параметров снежно-ледовой структуры приведена в работе (Reushev et al., 2023).

Таким образом, моделирование процесса позволяет, во-первых, прогнозировать этапы формирования слоёв льда с разной влажностью, во-вторых — рассчитывать амплитуду и фазу волн, формирующих на приёмной антенне интерференционную картину.

Рефлектометрия лесного полога

Исследовался участок соснового леса (координаты: $55^{\circ}59'31,4''$ с.ш., $92^{\circ}45'56,5''$ в.д.) со средней высотой деревьев 18 м и средним расстоянием между ними 2,8 м. Приёмник BM-609 UBX-M9140 (Shenzhen Beitian Communication Co., Ltd., China) с правокруговой поляризацией в интервале азимутальных углов (20 – 120°) и углов возвышения (20 – 50°) в течение 1 ч регистрировал сигналы НС в виде АВЗ с координатной привязкой на высоте 30 м от подстилающей поверхности лесного массива. Частота обновления данных измерений АВЗ составляла 20 Гц. В качестве примера на *рис. 6а* приведена рефлектограмма лесного массива в виде АВЗ. На *рис. 6б* показан спектр частот АВЗ рефлектограммы, полученный путём обработки АВЗ с использованием быстрого фурье-преобразования.

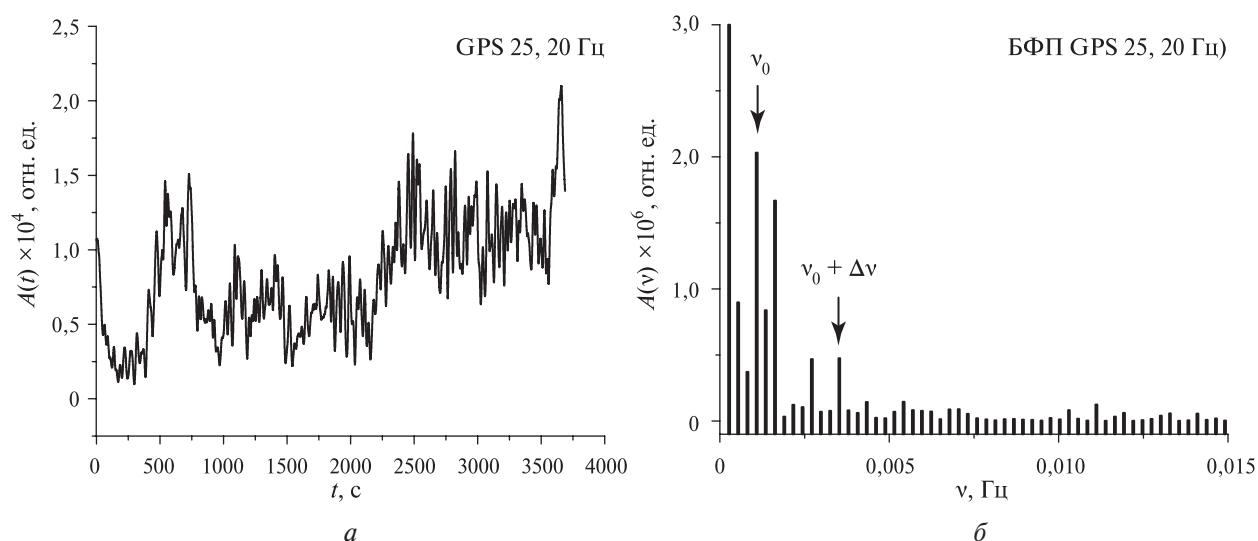


Рис. 6. Амплитудно-временная зависимость (а) и быстрое фурье-преобразование (б) лесного массива

Как видно из *рис. 6*, в спектре рефлектограммы вблизи основной частоты ν_0 , обусловленной интерференцией прямого луча сигнала НС и отражённого от подстилающей поверхности $\nu_0 + \Delta\nu$, выражена и диффузная составляющая спектра, огибающая которой описывается выражением:

$$S(\nu) = S_0 \exp(-\alpha\nu + \beta) + C,$$

где S_0 — максимальное значение функции $S(\nu)$; α , β и C — коэффициенты, зависящие от характеристик поглощения сигналов НС в лесном массиве.

Для объяснения полученных рефлектограмм было проведено численное моделирование процессов рассеяния и поглощения на элементах растительности и границах слоёв лесного массива.

При моделировании предполагалось, что коэффициенты рассеяния могут быть вычислены как в дискретной модели, так и в приближении сплошной среды (Попов, 2015). При этом влияние ориентационной упорядоченности и анизотропии дерева на коэффициенты рассеяния учитывалось аналогично тому, как это сделано в работе (Сорокин и др., 2020).

Для расчёта параметров сигнала НС, прошедших сквозь слои древостоя и отражённых от границ раздела, была использована модель многолучевой интерференции в рамках геометрической оптики. При моделировании использовалась трёхслойная модель «воздух (1) – древостой (2) – почва (3)» со значениями диэлектрической проницаемости $\epsilon_1 = 1,0$; $\epsilon_2 = 1,01 - (2 \cdot 10^{-4})j$; $\epsilon_3 = 2,79 - 0,16j$. Рассчитывались запаздывание фазы волны и амплитуда.

Кроме процессов рассеяния и поглощения на элементах растительности на отражённое поле оказывает влияние взаимодействие сигнала НС с границами раздела фаз: «воздух – кроны», «кроны – стволы» и «стволы – почва». Границы раздела фаз имеют шероховатые поверхности. В работе (Lérondel, Romestain, 1999) приведено выражение для таких поверхностей:

$$\bar{R}_i = \exp\left(-\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2\right) \frac{R_{i,i+1} + R_{i+1,i+2} e^{S} e^{j2\psi}}{1 + R_{i,i+1} R_{i+1,i+2} e^{S} e^{j2\psi}},$$

где σ – среднее квадратическое отклонение высот неровностей почв; $r_{i,i+1}$ – коэффициенты отражения Френеля от границы i -го и $(i+1)$ -го слоёв; ϵ_i и ϵ_{i+1} – диэлектрические проницаемости слоёв; ψ – фаза, зависящая от толщины слоя; S – корреляционный фактор поверхностной шероховатости, зависящий от стандартного отклонения высоты неровностей границы раздела между слоями (Karam et al., 1992).

Дальнейшие расчёты показали, что в отражённом от лесного массива сигнале НС, помимо когерентных волн из первой зоны Френеля, присутствует и слабая диффузная компонента, обусловленная отражением от крупномасштабных неровностей границ раздела крон с воздухом и эффектами вторичного рассеяния между элементами лесной растительности. При увеличении плотности древостоя увеличивается затухание сигналов НС и когерентное рассеяние снижается. Измерение шероховатостей подстилки даёт средние параметры $\sigma = 0,02 - 0,025$ м, что меньше рабочей длины волны $\lambda = 0,19$ м для диапазона L1. Поэтому в отсутствие топографических эффектов некогерентная компонента значительно меньше когерентной. С учётом приведённых значений σ коэффициент отражения в диапазоне углов возвышения ($70 - 20^\circ$) уменьшается с 0,22 до 0,04.

Таким образом, выполненные расчёты позволили качественно объяснить поведение АВЗ и, соответственно, спектр частот, полученных в результате обработки АВЗ с помощью БФП.

Заключение

Методы ГНСС-рефлектометрии, включающие приборные измерения в сочетании с численным моделированием, позволяют оперативно получать информацию о макрофизических характеристиках слоистых структур ледовых и лесных покровов. Для описания результатов ГНСС-рефлектометрии льда и леса и расчёта параметров сигналов НС, прошедших сквозь слои и отражённых от них, была использована модель многолучевого отражения в рамках геометрической оптики (Jin et al., 2014). Численное моделирование на качественном уровне (совпадение порядка 30 %) подтвердило результаты экспериментальных исследований. Дополнительная информация о динамике ледового покрова может быть получена на основе вычислительного моделирования, которое позволяет как определять температуру и состояние льда на текущий момент времени, так и давать оценку на будущий период на основе метеорологических прогнозов.

Сочетание методов рефлектометрии и вычислительного моделирования приземных слоёв даёт возможность не только оценить текущее состояние этих слоёв, но и спрогнозировать их динамическое развитие с использованием метеорологических прогнозов.

Подобная информация может быть использована для различных видов хозяйственной деятельности: мониторинга ледовых переправ, противопожарной диагностики лесных массивов и т. д.

Литература

1. Васильев Е. Н. Моделирование динамики ледового покрова пресноводного водоема // Журн. Сибирского федер. ун-та. Математика и физика. 2022. Т. 15. № 6. С. 753–762. DOI: 10.17516/1997-1397-2022-15-6-753-762.
2. Васильев Е. Н., Деревянко В. А. Динамика фазовых превращений в тепловом аккумуляторе системы терморегулирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25. № 3. С. 481–488.
3. Васильев Е. Н., Макаров Д. С., Сорокин А. В. Моделирование динамики ледовых покровов и ГНСС рефлектометрия в мониторинге состояния льда // Журн. Сибирского федер. ун-та. Техника и технологии. 2022. Т. 15. № 2. С. 261–271. DOI: 10.17516/1999-494X-0389.
4. Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Симонов К. В., Кашкина Л. В., Перетокин С. А., Дергунов А. В., Кабанов А. А., Одинцов Р. В., Мацулев А. Н., Мальканова А. В., Сорокин А. В., Подопригора В. Г., Реушев М. Ю., Макаров Д. С., Харламов Д. В., Пономарев Е. И., Швецов Е. Г., Зувев Д. В., Миронов В. А., Кругляков А. С. Прикладные аспекты исследования геосфер с использованием спутниковых технологий: монография. Красноярск: Сибирский федер. ун-т, 2023. 256 с.
5. Макаров Д. С., Харламов Д. В., Сорокин А. В. Использование сигналов навигационных спутников для мониторинга земных покровов // Сибирский журн. науки и технологий. 2019. Т. 20. № 1. С. 8–19. DOI: 10.31772/2587-6066-2019-20-1-8-19.
6. Малимонов М. И., Макаров Д. С., Харламов Д. В. Облачный сервис первичной обработки, визуализации, фильтрации и сохранения данных с четырехканального приемника-регистратора сигналов навигационных спутников в частотном диапазоне L1. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022667433. Рег. 20.09.2022.
7. Попов В. И. Распространение радиоволн в лесах. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 392 с.
8. Сорокин А. В., Подопригора В. Г., Макаров Д. С. и др. Ориентационная упорядоченность элементов дерева в модели диэлектрической проницаемости древостоя // Изв. высш. учеб. заведений. Физика. 2020. Т. 63. № 2(746). С. 50–54. DOI: 10.17223/00213411/63/2/50.
9. Jin S., Cardellach E., Xie F. GNSS Remote Sensing. N. Y.; L.: Springer Dordrecht Heidelberg, 2014. 286 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7482-7.
10. Karam M. A., Fung A. K., Lang R. H. et al. A microwave scattering model for layered vegetation // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. Universities Space Research Association. 1992. V. 30. P. 201–234. DOI: 10.1109/36.158872.
11. Lérondel G., Romestain R. Fresnel coefficients of a rough interface // Applied Physics Letters. 1999. V. 74. No. 19. P. 2740–2742.
12. Reushev M. Yu., Podoprighora V. G., Makarov D. S. et al. Interaction of satellite navigation signals with forest and snow-ice layers // Russian Physics J., 2023. V. 66. No. 6. pp. 706–711. DOI: 10.1007/s11182-023-02996-z.
13. Ulaby F., Moore R., Fung A. Microwave Remote Sensing: Active and Passive. V. 3. From Theory to Applications. Norwood, Massachusetts: Artech House, 1986. 1120 p.

Multiple-beam interferometry from navigation satellite signals in layered structures of forests and ice of freshwater reservoirs

D. V. Kharlamov¹, V. G. Podoprighora^{2,3}, M. Yu. Reushev^{1,3},
D. S. Makarov^{1,4}, E. N. Vasil'ev⁴

¹ Science Center SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia
E-mail: ikivt@yandex.ru

² Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia

³ Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia

⁴ Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia

The paper presents the results of a series of measurements of the amplitude-time dependences of the interference field of signals from navigation satellites in the L1 range ($\lambda \approx 0.19$ m) when reflected from layered media: the snow-ice cover of a freshwater lake in the winter-spring period and near a forest.

Based on the measurement results, the following was performed: an initial sampling of measurement data using a cloud service, subsequent data processing using fast Fourier transform and further analysis of the results using techniques of multi-beam GNSS reflectometry. To analyze the obtained reflectograms, a model of multibeam interference in layered media was used, for which a geometric optics scheme was used. This made it possible, using the Fresnel coefficients of transmission and reflection, to calculate the amplitudes and phases of the waves that arrived along with the direct signal to the receiving antenna. In addition to experimental data, the paper presents the results of computational modeling of the dynamics of snow and ice cover, which made it possible to determine its temperature regime, state, and other thermodynamic characteristics. The simulation was carried out based on the numerical solution of the Stefan problem in a generalized formulation, taking into account local climate data. This made it possible to assess not only the current state of these layers, but also to predict their dynamic development using meteorological forecasts. The results of the study can be used to monitor the state of ice cover from formation to melting, as well as forest areas in order to analyze their humidity, fire hazard and planting density.

Keywords: GNSS reflectometry, navigation satellite signals, layered media, ice covers, forest, dielectric constant, computational modeling.

Accepted: 10.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-51-60

References

1. Vasil'ev E. N., Modeling of the Ice Cover Dynamics of a Freshwater Reservoir, *J. Siberian Federal University. Mathematics and Physics*, 2022, Vol. 15, No. 6, pp. 753–762, DOI: 10.17516/1997-1397-2022-15-6-753-762.
2. Vasil'ev E. N., Derevyanko V. A., The dynamics of phase changes in a heat storage of thermal control system for onboard radio-electronic equipment, *Thermophysics and Aeromechanics*, 2018, Vol. 25, No. 3, pp. 461–467. DOI: 10.1134/S0869864318030125.
3. Vasil'ev E. N., Makarov D. S., Sorokin A. V., Modeling of ice cover dynamics and GNSS reflectometry in ice condition monitoring, *J. Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2022, Vol. 15, No. 2, pp. 261–271 (in Russian), DOI: 10.17516/1999-494X-0389.
4. Kashkin V. B., Rubleva T. V., Simonov K. V., Kashkina L. V., Peretokin S. A., Dergunov A. V., Kabanov A. A., Odintsov R. V., Matsulev A. N., Malkanova A. V., Sorokin A. V., Subregion V. G., Reushev M. Yu., Makarov D. S., Kharlamov D. V., Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Zuev D. V., Mironov V. A., Kruglyakov A. S., *Prikladnye aspekty issledovaniya geosfer s ispol'zovaniem sputnikovykh tekhnologii: monografiya* (Applied aspects of geosphere research using satellite technologies: monograph), Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2023, 256 p. (in Russian).
5. Makarov D. S., Kharlamov D. V., Sorokin A. V., Using signals of navigation satellites in the monitoring of the earth covers, *Siberian J. Science and Technology*, 2019, Vol. 20, No. 1, pp. 8–19, DOI: 10.31772/2587-6066-2019-20-1-8-19.
6. Malimonov M. I., Makarov D. S., Kharlamov D. V., *Oblachnyi servis pervichnoi obrabotki, vizualizatsii, fil'tratsii i sokhraneniya dannykh s chetyrekhkanal'nogo priemnika-registratora signalov navigatsionnykh sputnikov v chastotnom diapazone L1* (Cloud service for primary processing, visualization, filtering and saving data from a four-channel receiver-recorder of navigation satellite signals in the L1 frequency range), Certificate of state registration of software No. 2022667433 (RU), Reg. 20.09.2022 (in Russian).
7. Popov V. I., *Rasprostraneniye radiovoln v lesakh* (Radio wave propagation in forests), Moscow: Hotline – Telecom, 2015, 392 p. (in Russian).
8. Sorokin A. V., Podoprighora V. G., Makarov D. S. et al., Orientation ordering of tree elements in the dielectric permittivity model of a forest stand, *Russian Physics J.*, 2020, Vol. 63, No. 2, pp. 238–243, DOI: 10.1007/s11182-020-02026-2.
9. Jin S., Cardellach E., Xie F., *GNSS Remote Sensing*, New York; London: Springer Dordrecht Heidelberg, 2014, 286 p., DOI: 10.1007/978-94-007-7482-7.
10. Karam M. A., Fung A. K., Lang R. H. et al., A microwave scattering model for layered vegetation, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, Universities Space Research Association, 1992, Vol. 30, pp. 201–234, DOI: 10.1109/36.158872.
11. Lérondel G., Romestain R., Fresnel coefficients of a rough interface, *Applied Physics Letters*, 1999, Vol. 74, No. 19, pp. 2740–2742.
12. Reushev M. Yu., Podoprighora V. G., Makarov D. S. et al., Interaction of satellite navigation signals with forest and snow-ice layers, *Russian Physics J.*, 2023, Vol. 66, No. 6, pp. 706–711, DOI 10.1007/s11182-023-02996-z.
13. Ulaby F., Moore R., Fung A., *Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Vol. 3. From Theory to Application*, Norwood, Massachusetts: Artech House, 1986, 1120 p.