

УДК 629.783 EDN ODAJ CZ

## Имитационное моделирование отраженного сигнала океанографического радиовысотомера

**О. В. Нестеров**, к. т. н., [contact@spacecorp.ru](mailto:contact@spacecorp.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**В. С. Полишкар**ов, к. т. н., с. н. с., [contact@spacecorp.ru](mailto:contact@spacecorp.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Решение задачи получения оценки точностных характеристик орбитального океанографического радиовысотомера в ходе проведения его наземных испытаний предполагает формирование копии отраженного сигнала, которая должна с высокой точностью воспроизводить характеристики реального ответного сигнала радиовысотомера. К таким характеристикам относятся задержка распространения сигнала от фазового центра антенны радиовысотомера до среднего уровня морской поверхности и обратно, форма огибающей отраженного сигнала, соответствующая профилю отражающей поверхности (типу и высоте волн), ширине и форме диаграммы направленности антенны радиовысотомера и связанной с ней площадью облучаемой поверхности. Для обеспечения требуемых характеристик отраженного сигнала при его формировании в режиме реального времени важно выбрать модель сигнала, которая, с одной стороны, может быть реализована на доступных вычислительных средствах, а с другой стороны, может обеспечить имитацию измеряемых радиовысотомером геодезических характеристик с точностью, позволяющей оценить его инструментальную погрешность. В статье приведены сравнительные результаты формирования сигнала свертки с использованием модели Брауна и факетной модели.

**Ключевые слова:** радиовысотомер, наземные испытания, имитатор отраженного сигнала, сигнал свертки, модель Брауна, факетная модель

**Для цитирования:** Нестеров О. В., Полишкар В. С. Имитационное моделирование отраженного сигнала океанографического радиовысотомера. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2025. Т. 12. № 2. С. 72–79.

## Simulation of the Reflected Signal of an Oceanographic Radio Altimeter

**O. V. Nesterov**, *Cand. Sci. (Engineering)*, [contact@spacecorp.ru](mailto:contact@spacecorp.ru)

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

**V. S. Polishkarov**, *Cand. Sci. (Engineering)*, Senior Researcher, [contact@spacecorp.ru](mailto:contact@spacecorp.ru)

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The solution to the problem of obtaining an estimate of the accuracy characteristics of an orbital oceanographic radio altimeter during its ground tests involves the formation of a copy of the reflected signal, which should reproduce the characteristics of the real response signal of the radio altimeter with high accuracy. Such characteristics include the delay in signal propagation from the phase center of the radio altimeter antenna to the average sea level and back, the shape of the envelope of the reflected signal corresponding to the profile of the reflecting surface (type and height of waves), the width and shape of the radiation pattern of the radio altimeter antenna and the associated area of the irradiated surface. To ensure the required characteristics of the reflected signal when forming it in real time, it is important to choose a signal model that, on the one hand, can be implemented on available computing tools, and on the other hand, ensure the imitation of the geodetic characteristics measured by the radio altimeter with an accuracy that allows estimating its instrumental error. The article presents comparative results of the formation of a convolution signal using the Brown model and the facet model.

**Keywords:** radio altimeter, ground testing, echo simulator, convolution signal, Brown model, facet model

**For citation:** Nesterov O. V., Polishkarov V. S. Simulation of the Reflected Signal of an Oceanographic Radio Altimeter. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2025. Vol. 12. No. 2. P. 72–79. (in Russian)

Большая часть поверхности Земли покрыта водой и от состояния океанов напрямую зависит жизнь людей на континентах. Это определяет необходимость постоянного изучения и контроля глобальной водной поверхности. Исследования поверхности океан востребованы в различных областях науки. Их результаты применяются в геодезии, океанографии, изучении рельефа морского дна, для исследования характеристик гравитационного поля, морских течений, приливов, глобального климата, погоды и много другого [1, 2].

Океан исследуется одновременно с помощью широкого спектра средств, включая морские и воздушные суда, буи, зонды и конечно средства космического базирования. Изучение океана из космоса отличается оперативностью и непрерывностью получения большого объема измерительной информации о глобальных акваториях вне зависимости от погодных условий, дня и ночи [3, 4].

Для эффективного решения задач спутниковой океанографии необходимо использование на борту космического аппарата (КА) целого комплекса технических средств, позволяющих в результате вторичной обработки определять среднюю высоту отражающей морской поверхности относительно опорного эллипсоида, высоту волн, а также скорость и направление ветра. Одним из ключевых приборов космического океанографического аппарата является высокоточный радиовысотомер — измеритель высоты волн (ВРВ). Требования к показателям точности измерений ВРВ весьма высоки, типовая флуктуационная аппаратная погрешность измерения высоты находящихся в настоящее время на орбите радиовысотомеров составляет 1–3 см, при том что высота орбиты может приближаться к 1000 км.

Требования по обеспечению прецизионной точности ВРВ необходимо учитывать при выборе метода измерений, типа и структуры зондирующих сигналов, диапазонов рабочих частот, метода обработки отраженного сигнала, подходов к схемотехническим и конструкторским решениям, а также и к объему и методам наземных испытаний при экспериментальной отработке изделий. Конечно, испытания ВРВ продолжаются и на орбите с использованием специальных полигонов калибровки, лазерных дальномеров, транспондеров и много другого, но прежде чем перейти к этой фазе проверок,

необходимо максимально полно оценить характеристики ВРВ на земле [5].

В наземных условиях распространение радиоволн на трассе КА–поверхность–КА, как и отражение от морской поверхности в определенных диапазонах возможных значений, необходимо имитировать специальными средствами контроля. К таким средствам относится имитатор отраженного сигнала (ИОС). Основные задачи ИОС сводятся к приему зондирующего сигнала от ВРВ, его задержке на время распространения, наложению на задержанный отклик сигнала, имитирующего отражение от морской поверхности. Этот отраженный сигнал эквивалентен сигналу радиовысотомера, образуемому после первого преобразования частоты с использованием сигнала гетеродина с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Его часто называют сигналом свертки.

В соответствии с задачами в состав ИОС должен входить приемник запросного сигнала, выполняющий оценку времени его прихода, формирователь временного интервала задержки, имитирующий распространение сигнала от КА до отражающей поверхности и обратно, синтезатор ответного сигнала, квадратурный модулятор и формирователь комплексного сигнала свертки. Укрупненная структурная схема ИОС приведена на рис. 1.

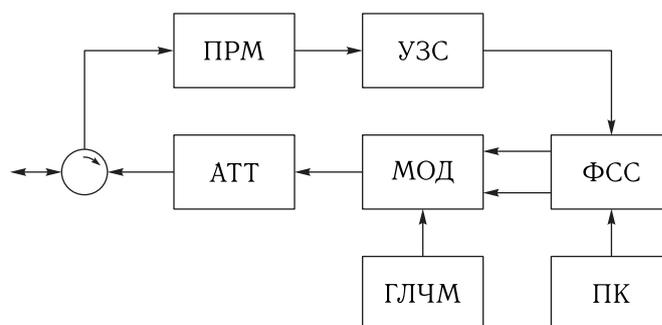


Рис. 1. Структурная схема ИОС  
Fig. 1. Structural diagram of the reflected signal simulator

Здесь ПРМ — приемник запросного сигнала радиовысотомера, УЗС — устройство задержки сигнала, АТТ — аттенуатор, МОД — модулятор, ФСС — формирователь сигнала свертки, ГЛЧМ — генератор сигнала с линейной частотной модуляцией, ПК — персональный компьютер.

Основные требования к точностным характеристикам составных частей имитатора следующие:

1. Случайная составляющая погрешности оценки времени прихода зондирующего сигнала — не более 10 пс (СКЗ).
2. Случайная составляющая погрешности формирования интервала задержки — не более 10 пс (СКЗ).
3. Флюктуация фазы формирователя ответного сигнала — не более 3 град. (СКЗ).
4. Ошибка имитации высоты, связанная с неточностью модели отражения — не более 0,1 см.

Подробнее остановимся на формирователе сигнала свертки. Под сигналом свертки понимают сигнал разностной частоты, образующийся в приемнике радиовысотомера после перемножения отраженного сигнала с сигналом ЛЧМ гетеродина. Этот сигнал содержит всю необходимую информацию о состоянии морской поверхности. Спектр этого сигнала оцифровывается на борту КА и передается на наземные станции приема измерительной информации для последующей обработки. Структура спектра сигнала свертки определяется условиями отражения запросного сигнала.

Рассмотрим последовательные трансформации спектра при усложнении вида отражающей поверхности. Наиболее просто спектр этого сигнала будет выглядеть при отражении от точечной зеркальной цели. Если не принимать во внимание наличие шумов и помех, то спектр, вычисленный на интервале длительности запросного сигнала, будет содержать единственную спектральную составляющую, частота которой определяется расстоянием от фазового центра антенны до точечной цели. На практике

из-за конечной ширины диаграммы направленности антенны ВРВ в отраженный сигнал войдут отражения от огромного множества зеркальных точек, дальность до которых будет возрастать от минимального значения по направлению вертикали к поверхности до максимального значения по наклонным трассам облучения на краю диаграммы направленности. При этом спектр сигнала свертки из единственной составляющей преобразуется в широкий спектр частот с огибающей, повторяющей форму диаграммы направленности антенны. Необходимо отметить, что образовавшийся спектр не является симметричным относительно средней частоты. Низкочастотная часть спектра будет иметь резкий спад, не характерный для высокочастотной части. Резкий спад объясняется тем фактом, что расстояние, меньших, чем расстояние по вертикали от ВРВ до отражающей поверхности, нет. Последнее утверждение справедливо для плоской шероховатой поверхности, но не подходит для взволнованной морской поверхности. В последнем случае имеем расстояния, которые отличаются от расстояния до среднего уровня поверхности как в большую сторону (до впадин волн), так и в меньшую (до их гребней). В итоге спектр сигнала свертки (без учета шумов) приобретает вид, представленный на рис. 2. Наклон и ширина низкочастотного склона связана с высотой волн. Точка по уровню 0,5 от максимума соответствует среднему уровню океана.

Полезно иметь в виду, что для ЛЧМ сигналов, изменение их частоты связано постоянным коэффициентом с временем. Это полезное свойство приводит к тому, что форма спектра сигнала свертки в частотной области будет повторять форму

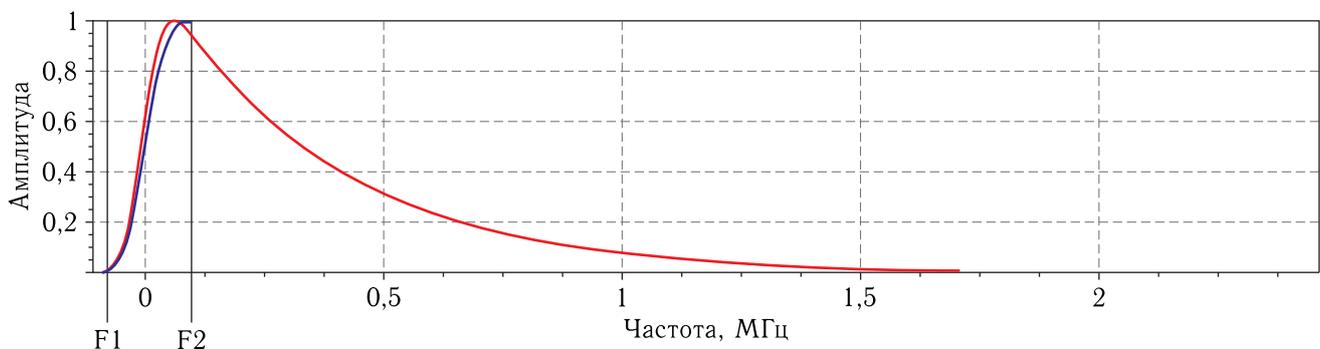


Рис. 2. Огибающая спектра сигнала свертки  
Fig. 2. The envelope of the convolution signal spectrum

отраженного импульсного сигнала во временной области при длительности зондирующего импульса, равной обратной величине от девиации частоты ЛЧМ сигнала. Это позволяет при анализе отраженных сигналов ВРВ в равной степени использовать как временное, так и частотное представление сигналов.

Сигнал свертки можно использовать для решения обратной задачи — формирования отраженного от морской поверхности сигнала. В этом случае синтезированный сигнал свертки необходимо перемножить с сигналом ЛЧМ генератора для переноса в область рабочего диапазона частот ВРВ. Этот подход и предлагается использовать в ИОС.

Формирование сигнала свертки возможно несколькими способами. Это определяется выбором модели отраженного сигнала. В настоящее время для описания сигнала, отраженного от взволнованной поверхности, широко используется модель Брауна, основанная на свертке трех функций — зондирующего сигнала, отражения от плоской шероховатой поверхности и распределения возвышения точек морской поверхности относительно среднего уровня, а также фацетная модель, в которой отраженный сигнал образуется суммированием большого числа парциальных сигналов от отражающих точек, расположенных на морской поверхности [6].

В модели Брауна отраженный сигнал свертки описывается следующей функцией:

$$S_H(f) = \exp\left(\frac{b^2\mu^2}{4} - b\frac{f - f_{\text{нр}}}{k}\right) \left(0,5 - \Phi\left(\frac{b\mu}{2} - \frac{f - f_{\text{нр}}}{k\mu}\right)\right),$$

$$\text{где } b = \frac{c}{hB^2}, \quad B^2 = \frac{a_{\text{ш}}^2 \Theta_0^2}{5,55a_r^2 \left(1 - 5,55\frac{\Theta_s^2}{\Theta_0^2}\right) + \Theta_0^2},$$

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{\pi\Delta f_c^2} + 2\left(\frac{2\sigma_z}{c}\right)^2},$$

$f_{\text{нр}}$  — номинал промежуточной частоты,  $k = \Delta f_c/T_{\text{и}}$  — скорость изменения частоты заполнения ЛЧМ зондирующего импульса,  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\xi^2) d\xi$  — модифицированный интеграл вероятности,  $\Theta_s$  — угол между осью антенны и вертикалью,  $\Theta_0$  — ширина ДНА радиовысотомера;

$h$  — высота орбиты КА;  $a_r$  — коэффициент шероховатости морской поверхности;  $\sigma_z$  — среднеквадратичная ордината морских волн.

При использовании фацетной модели отраженный сигнал может быть представлен так:

$$P(t) = \frac{P_{\text{изл}}\lambda^2 G_0^2 |K_0|^2 cD}{64\pi^2 H^3 a_{\text{ш}}^2 \Delta f_c} \cdot e^{-5,55\frac{\theta_s^2}{\theta_0^2}} \times e^{\frac{b^2\mu^2}{4} - b(t-t_{\phi})} \cdot \left[0,5 - \Phi\left(\frac{b\mu}{2} - \frac{t-t_{\phi}}{\mu}\right)\right],$$

где  $\mu = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{\pi}\Delta f_c}\right)^2 + 2\sigma^2}$  — параметр, характеризующий влияние высоты морских волн на форму фронта отраженного сигнала,  $H$  — расстояние от ВРВ до среднего уровня морской поверхности.

При выборе модели для использования в имитаторе отраженного сигнала рассматривались следующие критерии:

- согласованность характеристик сигналов ИОС с характеристиками реальных сигналов орбитальных радиовысотомеров (Jason-3);
- временные и аппаратные затраты на цифровое формирование сигнала свертки;
- обеспечение режима формирования сигнала ИОС в реальном масштабе времени;
- возможность изменять характеристики отражающей поверхности в ходе испытаний;
- возможность оперативно управлять параметрами зондирующего сигнала.

Первый способ на основе модели Брауна отличается простотой в вычислительном плане и гибкостью управления уровнем зашумленности получаемой реализации. Последняя особенность важна на ранних этапах проектирования и настройки как отдельных аппаратных узлов высотомера, так и комплексной настройки прибора в целом. На рис. 3 приведена реализация свернутого отраженного сигнала в частотной области, полученная с использованием модели Брауна. Для сравнения на рис. 4 представлена типовая реализация свернутого отраженного импульса, полученного с КА «Jason-3». Уровень зашумленности соответствует мерному интервалу 50 миллисекунд.

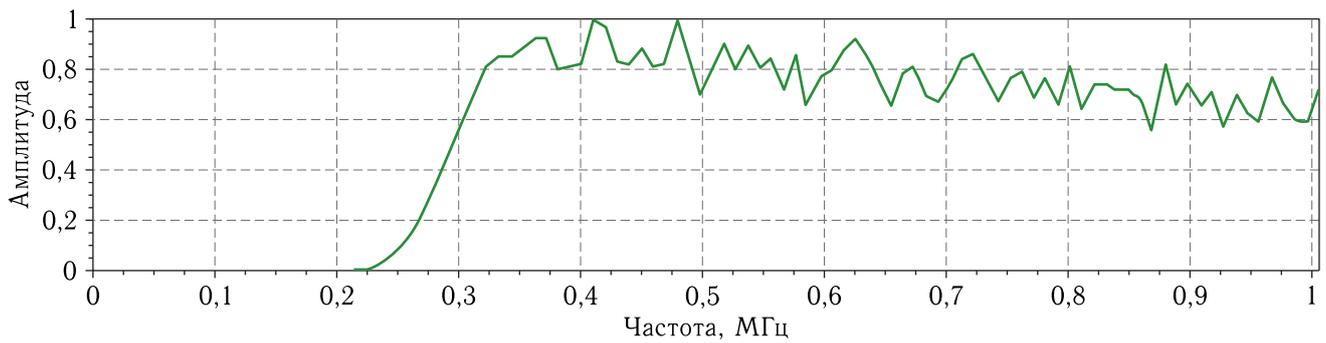


Рис. 3. Типовая реализация спектра имитационного сигнала свертки (способ 1)  
 Fig. 3. Typical implementation of the spectrum of the simulated convolution signal (method 1)

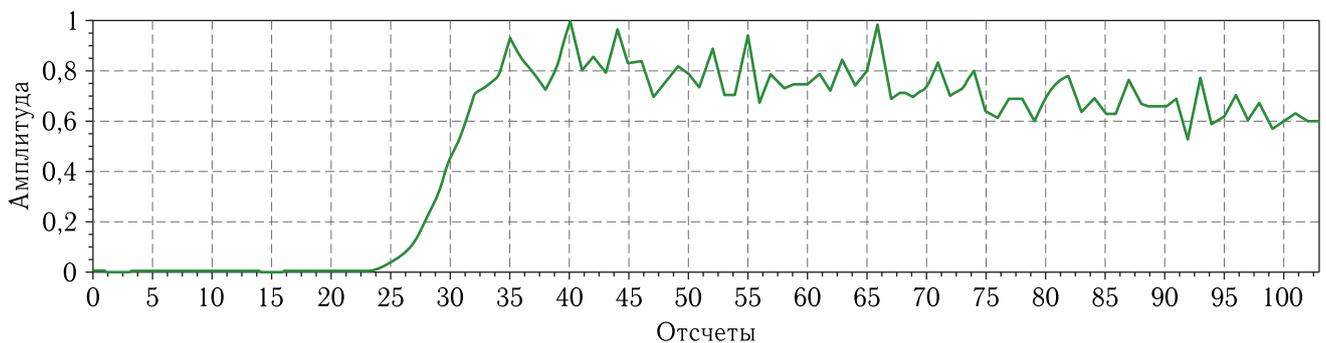


Рис. 4. Типовая реализация спектра реального сигнала свертки (Jason-3)  
 Fig. 4. Typical implementation of the spectrum of a real convolution signal (Jason-3)

Параметры значащей высоты волн, отклонения антенны от надира и дисперсия шума подобраны для визуальной идентичности. Реализация получена путем аддитивного наложения на идеализированный свернутый импульс гауссового шума. Оценки параметров  $\Theta_s$  и  $H_{3\%}$  в процессе решения обратной задачи совпадают с точностью не хуже 1–3 процента. Процедура моделирования свернутого отраженного сигнала в С-диапазоне практически идентична.

Программная реализация имитатора свернутого отраженного сигнала способом 2 на основе фацетной модели принципиально отличается по структуре, вычислительной сложности и получаемым результатам. Физико-математические аспекты данной модели подробно изложены в [7]. Алгоритм, реализующий способ 2, состоит из 5 этапов:

1. Формируется 2-мерная сетка с размером ячеек 200–250 м.

Размер ячеек и сетки в целом определяется исходя из требуемой точности реализации модели, с учетом высоты пролета КА и ширины диаграммы

направленности антенны высотомера. Практически сетка  $160 \times 160$  элементов с размером ячеек 250 м дает удовлетворительное качество получаемых реализаций в Ку-диапазоне. Этот этап моделирования выполняется однократно.

2. В узлах сформированной сетки рассчитывается уровень взволнованности подстилающей (морской) поверхности. Исследовались две модели, имитирующие волнение моря. Первая — реализация алгоритма Майлза–Филлипса, описывающая генерацию ветровых волн на плоской морской поверхности [8–10], вторая — реализация шума Перлина, являющаяся гауссовым шумом, подвергнутым 2-мерной пространственной низкочастотной фильтрации [11, 12]. Примеры результатов моделирования приведены на рис. 5 и 6.

В случае применения модели Майлза–Филлипса параметры модели задаются непосредственно в физических величинах, характеризующих направление и скорость ветра, атмосферное давление и пр. Сложность модели Майлза–Филлипса

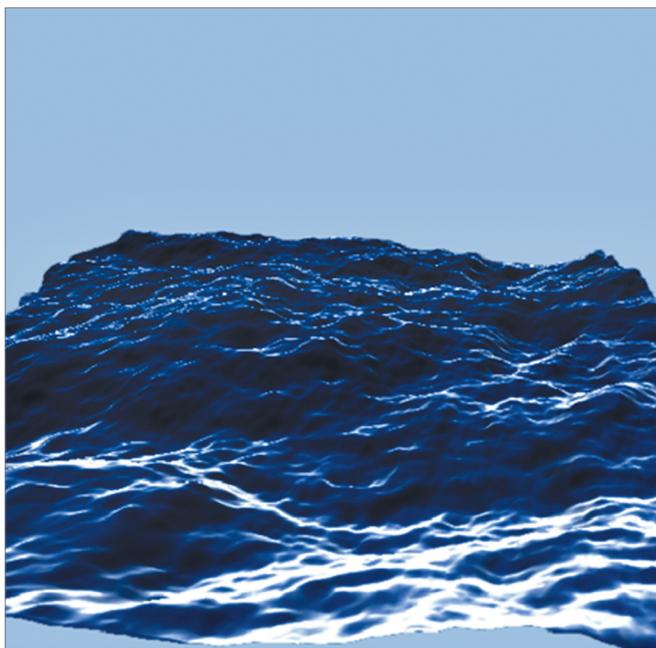


Рис. 5. 3-мерная реализация модели Майлза–Филлипса  
Fig. 5. 3-dimensional implementation of the Miles–Phillips model

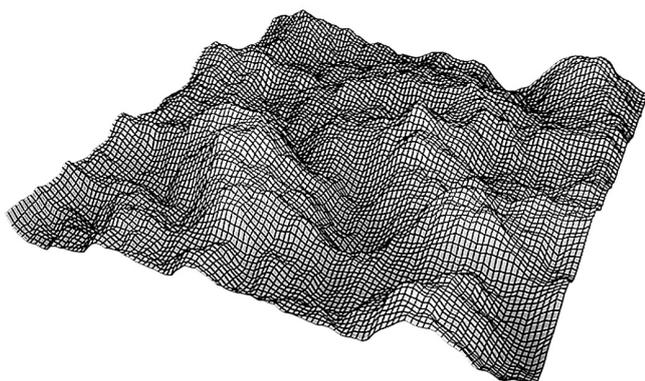


Рис. 6. 3-мерная реализация сеточной модели шума Перлина  
Fig. 6. 3-dimensional implementation of the Perlin noise mesh model

требует применения специализированных вычислительных устройств, таких как графические процессорные системы в режиме неграфических вычислений. Для модели Перлина характеристики гауссового шума и параметры фильтрации подбираются эмпирически, исходя из «качественной» идентичности результата заказанным параметрам взволнованности морской поверхности. Обновление значений в узлах сетки производится с учетом скорости

и направления движения КА по отношению к поверхностному участку и с учетом взаимной корреляции смежных генерируемых импульсов. Последнее имеет принципиальное значение для уровня зашумленности результирующего свернутого импульса.

3. Для каждого узла сетки рассчитываются амплитуда, фаза и частота синтезируемого импульса. Исходными данными являются спектральный профиль и длительность зондирующего импульса. Спектральный профиль учитывает АЧХ приемопередающего тракта высотомера. Этот этап выполняется однократно для каждого зондирующего импульса.

4. Рассчитываются отсчеты на временной оси с шагом, соответствующим разрешающей способности анализатора спектра свернутого отраженного импульса.

5. Для полученной временной реализации выполняется дискретное обратное преобразование Фурье.

Анализ результатов моделирования показал, что наиболее трудоемким в вычислительном плане является этап 4 (90–95 % от общего объема вычислений).

Результаты моделирования приведены на рис. 7–9.

На рис. 9 виден спад в окрестности 2,5 МГц. Причиной является усеченная площадь пятна засветки, ограниченная размером сетки. Для устранения этого эффекта необходимо в 1,5 раза увеличить размер моделируемого пятна. При этом пропорционально площади пятна возрастают вычислительные затраты.

Моделирование проводилось с использованием следующих вычислительных ресурсов:

CPU — Intel i9740x (ядро SKYLAKE с поддержкой AVX512);

GPU NVIDIA 2080 GTX (PCIe 16.3).

### Краткие выводы:

1. Способ 1 весьма умерен по вычислительным затратам, обеспечивает приемлемые по качеству результаты, пригоден для формирования свернутых отраженных импульсов на всех этапах проектирования высотомера.

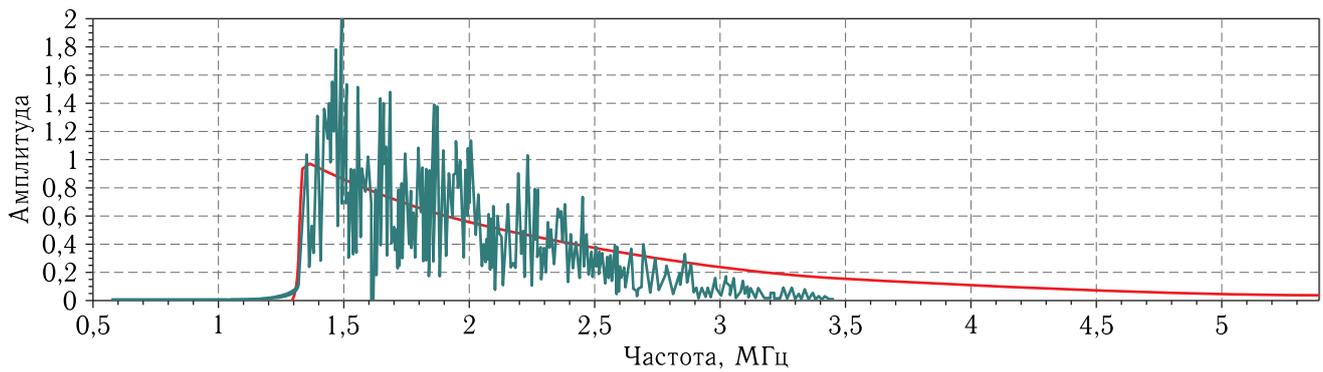


Рис. 7. Генерация спектра одиночного свернутого отраженного импульса в Ku-диапазоне. Красная кривая — «идеализированный» импульс

Fig. 7. Generation of the spectrum of a single folded reflected pulse in the Ku-band. The red curve is the “idealized” pulse

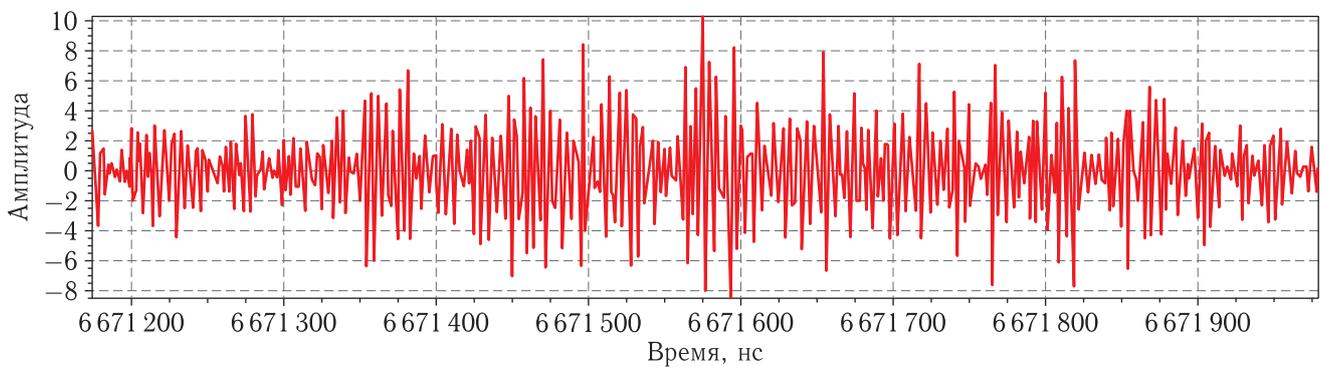


Рис. 8. Типовой фрагмент отраженного импульса во временной области

Fig. 8. Typical fragment of a reflected pulse in the time domain

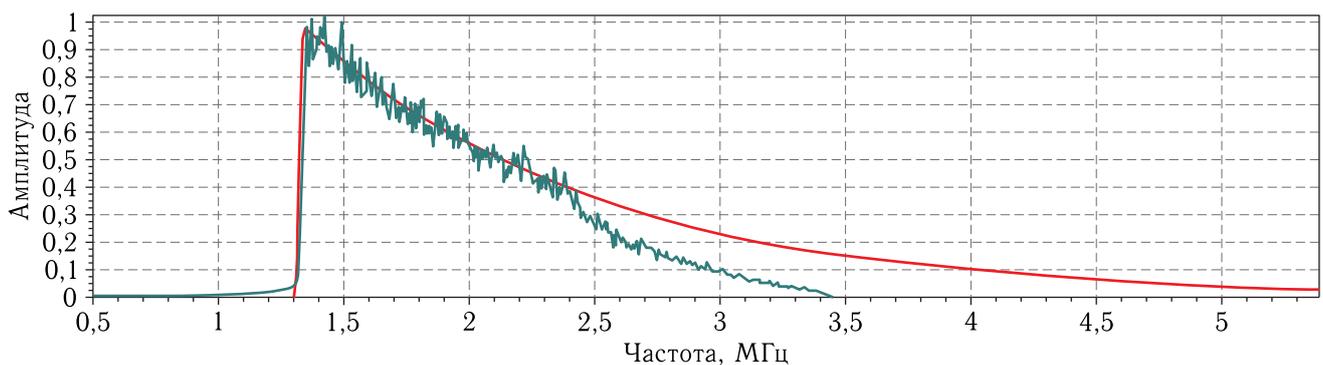


Рис. 9. Результаты моделирования спектра свертки с осреднением 50 миллисекунд

Fig. 9. Results of modeling the convolution spectrum with 50 millisecond averaging

2. Способ 2 несоизмеримо более трудоемкий в вычислительном плане. В ходе исследований удалось добиться генерации отраженных свернутых импульсов в Ku-диапазоне в реальном времени без применения GPU, только с применением архитектуры AVX512 с программной реализацией этапа 4 на ассемблере (запас вычислительных ресурсов примерно 40%). Применение технологии

Intrinsic увеличивает вычислительные затраты в 2,5–4 раза. Применение GPU с программной платформой OpenCL позволило получить в реальном времени реализации несвернутых импульсов для С- и Ки-диапазонов (загрузка вычислительных ресурсов составляет примерно 85–90%). Проблематичным представляется передача результатов моделирования несвернутых отраженных сигналов из GPU в устройство формирования радиосигналов. Причиной является ограниченная реальная пропускная способность интерфейса PCIe 16.3 на уровне 2,4–2,6 Гбайт/с для вышеуказанного GPU с учетом динамики информационного обмена. Проблема может быть решена формированием несвернутого сигнала непосредственно в устройстве генерации радиосигналов.

3. По результатам исследования установлено, что для реализации свертки отраженного сигнала в настоящее время предпочтительно использовать способ 1.

## Список литературы

1. *Сутырина Е.Н.* Океанология: Учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. 192 с.
2. *Robert H. Steward.* Introduction to Physical Oceanography Department of Oceanography Texas A & M University, 2008.
3. *Кочеткова Е.С., Козлов И.Е., Дайлидиене И., Смирнов К.Г.* Спутниковые методы в океанографии: Учеб. пособие. СПб.: Изд. РГГМУ, 2014. 92 с.
4. *Кузьмин А.В., Репина И.А., Садовский И.Н., Селунский А.Б.* Микроволновые радиометрические исследования морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015, т. 12, № 5. С. 76–97.
5. *Лангеман И.П., Куприянов А.О., Морозов Д.А., Кузнецов Д.А., Леве Д.Е., Шамрова А.Д.* Геодезическое обеспечение эксперимента по абсолютной калибровке высокоточного радиовысотомера // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2021, т. 65, № 5. С. 505–516.
6. *Баскаков А.И., Жутяева Т.С., Лукашенко Ю.И.* Локационные методы исследования объектов и сред: Учеб. для вузов / Под ред. проф. А.И. Баскакова. М.: ИЦ «Академия», 2009. 403 с.
7. *Баскаков А.И.* Прецизионный океанографический радиовысотомер космического базирования. Учеб. пособие. М.: Изд. МЭИ(ТУ), 1994.
8. *Филлипс О.М.* Динамика верхнего слоя океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 319 с.
9. *Miles J.W.* On the generation of surface by shear flow. Part 2 / J. Fluid Mechanics. Part I, 1957, vol. 3. P. 185–204; Pt. II, 1959, vol. 6. P. 568–582; Pt. III, 1959, vol. 6. P. 583–538; Pt. IV, 1960, vol. 13. P. 433–448; Pt. V, 1967, vol. 30. P. 163–175.
10. *Miles J.W.* A note the interaction between surface wave and wind profile // J. Fluid Mechanics, 1965, vol. 22, № 4.
11. *Ebert, Musgrave, Peachey, Perlin, Worley.* Texturing & Modeling: A Procedural Approach, Third Edition, Morgan Kaufman, 2003.
12. *Ken Perlin.* An Image Synthesizer // Computer Graphics magazine, July 1985, vol. 19, Iss. 3.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 30.04.2024  
Дата принятия рукописи  
в печать 29.05.2025