



## Метод минимизации объема вычислений при имитации отражений радиоволн от земной поверхности

М. В. Орешкина<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-0965-2932](https://orcid.org/0000-0002-0965-2932), [oreskina.m@yandex.ru](mailto:oreskina.m@yandex.ru)

<sup>а</sup>Новосибирский государственный технический университет, К. Маркса пр., 20, Новосибирск, 630073, РФ

**Введение:** имитация отражений от поверхности Земли является важным этапом в процессе тестирования и оценки работоспособности радиолокационных станций. Для создания имитационной модели поверхности область, на которой планируется использовать радиолокационную станцию, разбивается на множество небольших участков. Каждый из этих участков рассматривается как точечный отражатель. Эхосигнал от области поверхности формируется как совокупность сигналов от точечных отражателей, входящих в нее, что требует значительных вычислительных ресурсов. **Цель:** обосновать методы минимизации объема вычислений при расчете отраженных от земной поверхности сигналов для имитационного моделирования работы радиолокационных станций. **Результаты:** моделирование отраженного от Земли сигнала сводится к вычислению свертки последовательности, описывающей структуру земной поверхности, и последовательности, описывающей зондирующий сигнал. Вычисление свертки эффективно по методу перекрытия с накоплением, где всю последовательность разделяют на несколько секций. Показано, что при вычислении частичных свертки с использованием преобразования Фурье гармоник, имеющие низкую энергетiku, могут быть проигнорированы без значительного влияния на точность вычислений. Для каждой из секций можно использовать различные методы минимизации в зависимости от свойств сигналов, отраженных от земной поверхности. Эти свойства зависят от удаленности рассматриваемого участка от радиолокационной станции. В зоне, расположенной близко к радиолокационной станции, вклад отражений от участков сильно зависит от их местоположения. Фактически отражения формируют только близлежащие участки. Получены выражения для оценки ошибок, которые возникают из-за пренебрежения отражениями от удаленных участков. Показано, что в зоне, находящейся на значительном расстоянии от радиолокационной станции, отражающие участки принимают точечный характер, что позволяет непосредственно вычислять свертку без применения быстрых алгоритмов. **Практическая значимость:** представленные методы минимизации вычислений могут быть использованы для разработки имитаторов эхосигналов.

**Ключевые слова** — отражения от поверхности Земли, эхосигнал, радиолокационная станция, математическое моделирование, имитация сигналов, полунатурное моделирование, минимизации объема вычислений, эффективность алгоритма.

**Для цитирования:** Орешкина М. В. Метод минимизации объема вычислений при имитации отражений радиоволн от земной поверхности. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 6, с. 12–19. doi:10.31799/1684-8853-2023-6-12-19, EDN: VDQNIЕ

**For citation:** Oreshkina M. V. Minimization technique for the amount of computation for land clutter simulation. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 6, pp. 12–19 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-6-12-19, EDN: VDQNIЕ

### Введение

Радиолокационная станция (РЛС) излучает электромагнитную энергию и принимает возвращающиеся сигналы для обнаружения объектов в этой среде [1, 2]. Помимо сигналов от целевых объектов, на вход приходят и мешающие отражения — эхосигналы от различных объектов окружающей среды, которые затрудняют обнаружение [1–4]. Идентификация и классификация объектов осуществляется с помощью специальных алгоритмов обнаружения.

Тестирование алгоритмов обнаружения РЛС занимает много времени, поскольку характеристики окружающей среды постоянно меняются. Распространенным методом тестирования является имитационное моделирование [3–7], при котором реальные элементы РЛС или систему в целом испытывают с использованием сигналов, генерируемых специальным устройством — имитатором. Точность результатов моделирования

зависит от точности применяемых математических моделей, включая модели помех, большая часть которых приходит от земной поверхности [3–10].

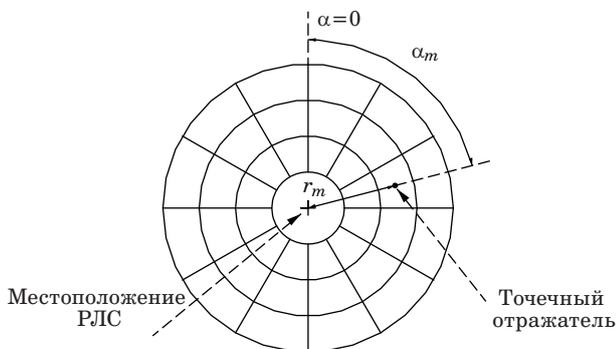
Помехи от земной поверхности могут присутствовать по всей зоне обзора РЛС. Их моделирование создает значительную нагрузку на вычислительные ресурсы имитатора, поскольку одна линия дальности может содержать тысячи независимых выборок помех [3, 4, 8]. Сложность моделирования отражений от Земли настолько высока, что возможно только их статистическое представление. Модель отражений от земной поверхности — это коррелированный случайный процесс. Он характеризуется функцией плотности распределения вероятности в сочетании с функцией спектральной плотности мощности. При моделировании более сложных корреляционных функций и функций плотности распределения вероятности необходима большая вычислительная мощность [3–12].

Ранее малая вычислительная мощность имитационных систем накладывала значительные ограничения на модели помех [3, 4]. Использовались модели отражений от однородной поверхности либо модели, имеющие грубые характеристики, подходящие только для РЛС с низким разрешением. Развитие радиолокационной техники приводит к тому, что требования к имитационным моделям растут, а модели, разработанные для РЛС с низким разрешением, становятся менее востребованными и их место занимают более детальные модели [12–20], поэтому становится актуальной разработка методов их имитации [3–5, 21]. Цель данной работы – обосновать методы минимизации объема вычислений при расчете отраженных от земной поверхности сигналов для имитационного моделирования работы РЛС.

### Имитация эхосигнала от земной поверхности

При имитации эхосигналов от земной поверхности исходное распределение отражающих свойств Земли задается в виде цифровой карты. Ее формируют путем разбиения поверхности на множество мелких участков с помощью специальной сетки (рис. 1). После разбиения поверхности на участки для каждого из них находят координаты точки в центре, которые соответствуют положению отсчета (точечного отражателя). Тип покрова и высота в этой точке определяют значение удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР), а также спектр доплеровских флуктуаций эхосигнала. Отражение от каждой из точек можно задать как

$$\dot{S}_{mn}(q) \sim \frac{\sqrt{\sigma_{mn}}}{D_{mn}^2} \exp(j\varphi_{\text{наб}}(D_{mn})) \times (x_{1mn}(q) + jx_{2mn}(q)), \quad (1)$$



■ **Рис. 1.** Сетка для формирования цифровой модели поверхности  
 ■ **Fig. 1.** Grid for forming digital surface model

где  $\varphi_{\text{наб}}(D_{mn}) = \frac{4\pi D_{mn} f_p}{c}$  – фазовый набег от фазового центра антенного массива до точки с  $\sigma_{mn}$  и обратно;  $D_{mn}$  – расстояние от фазового центра антенного массива до точки с  $\sigma_{mn}$ ;  $f_p$  – рабочая частота;  $c$  – скорость света;  $x_1(q), x_2(q)$  – независимые нормальные случайные процессы с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией (коэффициент корреляции между отсчетами  $x(q_n)$  и  $x(q_{n+1})$  зависит от типа покрова и силы ветра);  $j$  – мнимая единица;  $\sigma$  – массив эффективной поверхности рассеяния точек, имитирующей земную поверхность ( $\sigma_{mn}$  – элемент массива);  $m, n$  – порядковые номера точек по азимуту и углу места соответственно;  $q$  – номер итерации.

Используя выражение (1), комплексную огибающую сигнала, отраженного от земной поверхности, можно представить как

$$\dot{S}(t, q, \alpha_{00}, \theta_{00}) \sim \sum_{n=1}^N \dot{S}_\alpha(n, q, \alpha_{00}, \theta_{00}) \times \dot{S}_{\text{зонд}}(t - n\Delta\tau), \quad (2)$$

где

$$\dot{S}_\alpha(n, q, \alpha_{00}, \theta_{00}) \sim \sum_{m=1}^M \dot{S}_{mn}(q) F_\alpha(\alpha_m - \alpha_{00}) \times F_\theta(\theta(r_n) - \theta_{00});$$

$F_\alpha, F_\theta$  – диаграммы направленности в азимутальной и угломестной плоскости;  $\alpha_{00}, \theta_{00}$  – положение оси передающей антенны в азимутальной и угломестной плоскости;  $\dot{S}_{\text{зонд}}(t - n\Delta\tau)$  – комплексная огибающая зондирующего импульса;  $N, M$  – количество элементов по азимуту и дальности.

### Минимизация вычисления свертки при моделировании отражений от поверхности Земли

Количество необходимых для моделирования поверхности Земли точек ( $M$  и  $N$ ) зависит от структуры поверхности и разрешающей способности РЛС. Требования к шагу дискретизации подробно рассмотрены в работах [14, 15]. Зачастую необходимо моделировать несколько точек на ширину диаграммы направленности, поэтому расчет  $\dot{S}_\alpha$  занимает относительно мало вычислительных ресурсов, в то время как количество отсчетов, приходящихся на длину зондирующего импульса, может достигать нескольких тысяч. При этом типичной является ситуация, когда размер массива, описывающего земную поверхность, во много раз превышает размеры последовательностей

значений  $\dot{S}_{zond} : N \gg N_1$ , где  $N_1$  – количество отсчетов  $\dot{S}_{zond}$ .

В этом случае секционирование свертки по методу перекрытия с накоплением может значительно повысить эффективность вычислений [22]. Этот метод заключается в разделении одной последовательности на несколько частей и выполнении свертки для каждой части отдельно.

Рассмотрим вычисление свертки (2) по методу перекрытия с накоплением. Для этого исходную последовательность  $\dot{S}$  разбивают на секции длиной  $L + N_1 - 1$ , у которых есть участки перекрытия длиной  $N_1 - 1$ . Затем для каждой секции вычисляют циклическую свертку длиной  $L + N_1 - 1$  и отбрасывают последние  $N_1 - 1$  отсчетов. Полученные результаты объединяют в итоговую последовательность.

Число  $L$  удобно выбирать так, чтобы число  $L + N_1 - 1$  было степенью двойки. Тогда каждую из частичных свертки можно эффективно выполнять с помощью быстрых алгоритмов, значительно снижая вычислительную сложность [23].

Одним из наиболее эффективных методов для вычисления длинных свертки является алгоритм, основанный на использовании теоремы о свертке и быстром преобразовании Фурье [23]:

$$\dot{S}(t, q, \alpha_{00}, \theta_{00}) = \text{IFT}(\dot{G}_S), \quad (3)$$

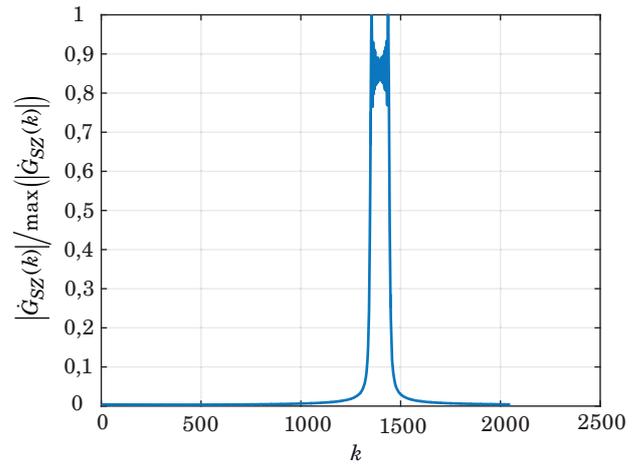
где  $\dot{G}_S$  – последовательность, каждый элемент которой:  $\dot{G}_S(k) = \dot{G}_{S\alpha}(k)\dot{G}_{SZ}(k)$ ;  $k$  – вещественная переменная, имеющая смысл пространственной частоты;  $\dot{G}_{S\alpha}(k)$ ,  $\dot{G}_{SZ}(k)$  – спектры функций  $\dot{S}_\alpha$ ,  $\dot{S}_{zond}$ ; IFT – обратное преобразование Фурье.

Спектр сигнала  $\dot{S}_{zond}$  обладает частотно-избирательными свойствами (рис. 2), поэтому произведение  $\dot{G}_{S\alpha}(k)\dot{G}_{SZ}(k)$  можно осуществлять не по всем частотам, а только для тех, что дают значительный вклад в спектр:

$$\dot{G}_S(k) = \begin{cases} \dot{G}_{S\alpha}(k)\dot{G}_{SZ}(k), & |\dot{G}_{SZ}(k)| \geq \varepsilon; \\ 0, & |\dot{G}_{SZ}(k)| < \varepsilon, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – порог, ниже которого значениями  $|\dot{G}_{SZ}(k)|/\max(|\dot{G}_{SZ}(k)|)$  допустимо пренебречь.

Порог  $\varepsilon$  определяет уровень ошибок, который признается допустимым и может задаваться, например, исходя из суммарной мощности составляющих, попадающих в отсекаемую часть спектров. При этом количество требуемых элементов зависит только от типа зондирующего импульса, поэтому заранее известно, для каких значений  $k$  нужно рассчитывать произведение, а для каких значение можно принять равным нулю. Такая минимизация позволяет сократить количество необходимых операций.



■ **Рис. 2.** Нормированный модуль спектра последовательности  $\dot{S}_{zond}$ , которую формируют 2048 отсчетов сигнала с линейно-частотной модуляцией, длительностью 20 мкс и девиацией 5 МГц

■ **Fig. 2.** Normalized modulus of the spectrum of a sequence  $\dot{S}_{zond}$ . The sequence  $\dot{S}_{zond}$  includes 2048 samples of a signal with linear frequency modulation, with parameters: duration is 20  $\mu$ s, deviation is 5 MHz

Для подтверждения полученных соотношений был проведен численный эксперимент. При анализе эхосигналов обычно рассматриваются их характеристики после прохождения через согласованный фильтр [1]:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{out}(t, q, \alpha_{00}, \theta_{00}) &= \\ &= \sum_{n=1}^N \dot{S}_\alpha(n, q, \alpha_{00}, \theta_{00}) \dot{S}_1(t - n\Delta\tau), \end{aligned} \quad (5)$$

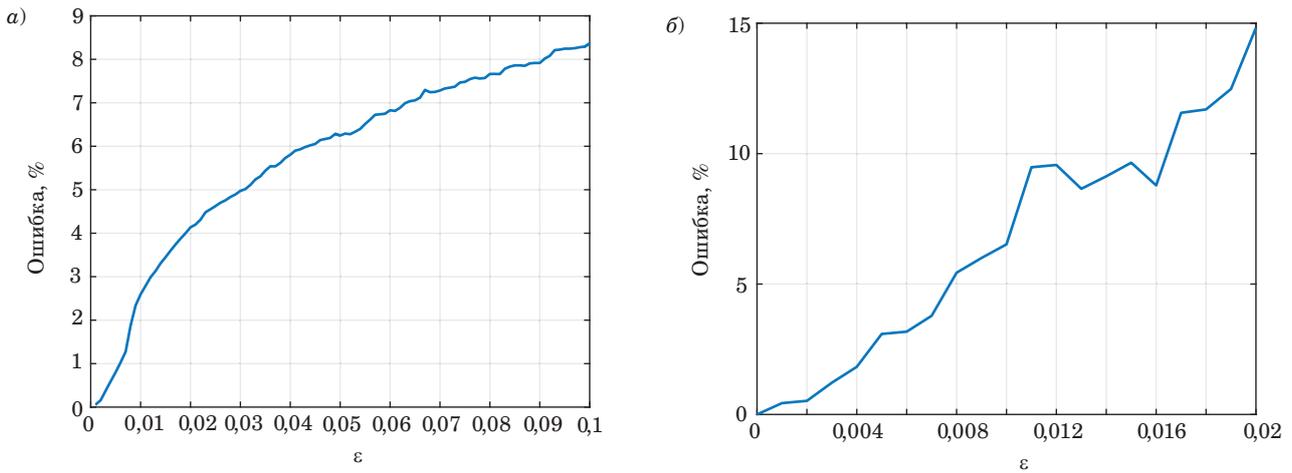
где  $\dot{S}_1(t) = \dot{S}_{zond}(t - n\Delta\tau) \times \bar{\dot{S}}_{zond}(t - n\Delta\tau)$ .

Графики зависимости среднего значения погрешности, возникающие при ограничении в спектре, представлены на рис. 3, а и б. Представлен пример для однородной (поверхность содержит один покров, затенения отсутствуют) и неоднородной (присутствуют несколько покровов, часть участков затенена) поверхности.

Другие возможности оптимизации связаны с распределением отражающих участков земной поверхности. Рассмотрим их более подробно.

### Отражения от области поверхности, расположенной вблизи РЛС

В прилегающей к РЛС области на отражения от земной поверхности значительно влияет множитель дальности  $1/D^2$ . Вклад отражающей точки в общую сумму (2) резко уменьшается с ростом дальности до нее, что позволяет пренебречь отражениями от более дальних точек. Поскольку участки области находятся возле РЛС, отраже-



■ **Рис. 3.** Зависимость среднего значения погрешности при моделировании от уровня ограничения спектра для однородной (а) и неоднородной (б) поверхности

■ **Fig. 3.** Dependence of the average value of the modeling error on the spectrum limiting level for a homogeneous surface (a) and a heterogeneous surface (б)

ния от нее должны быть рассчитаны первыми за относительно небольшой промежуток времени. Усечение последовательности точек, для каждой из которых необходимо сформировать комплексную случайную величину и рассчитать значение отражения по формуле (1), позволит сократить количество вычислений для расчета отраженного сигнала.

Рассмотрим, в каких случаях отражениями от более дальних точек можно пренебречь. Оценим параметры сигнала на выходе согласованного фильтра (5).

Поскольку  $x_1$  и  $x_2$  – гауссовы случайные процессы с нулевым математическим ожиданием, сигнал (5) тоже представляет собой центрированную гауссову случайную величину. Его дисперсия

$$D_s(t) \sim \sum_{n=1}^N \frac{\sigma_{mn}}{D_{mn}^4} \dot{S}_1^2(t - n\Delta\tau).$$

Обозначим длину усеченной последовательности  $K$ . В этом случае дисперсия

$$D_s(t, N_2) \sim \sum_{n=1}^{N_2} \frac{\sigma_{mn}}{D_{mn}^4} \dot{S}_1^2(t - n\Delta\tau).$$

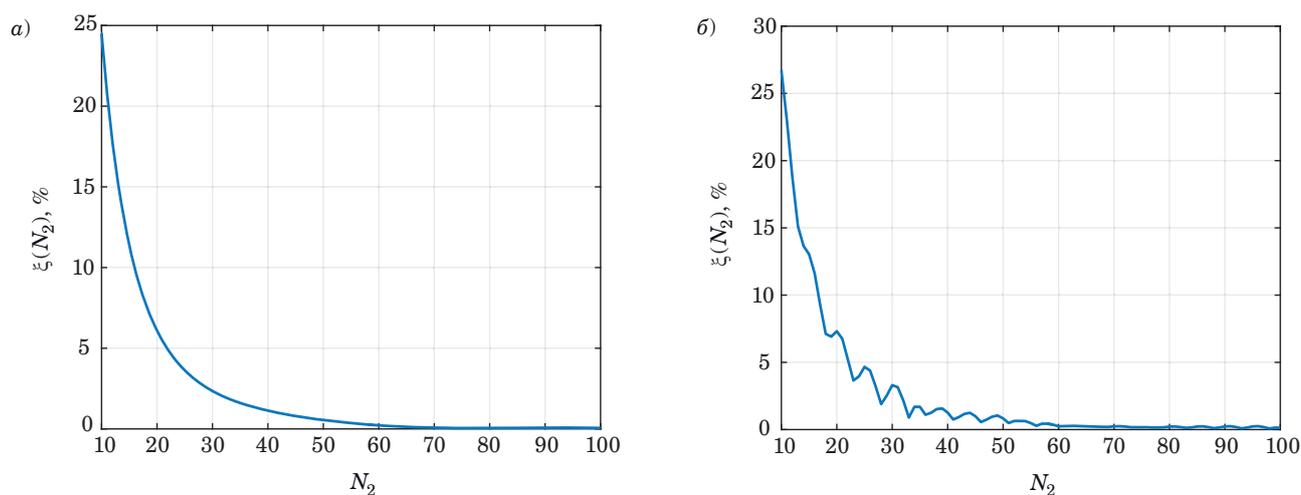
Для оценки этой величины используем выражение, показывающее относительную оценку:

$$\xi(N_2) = \left( \frac{D(t) - D(t, N_2)}{D(t)} \right) \cdot 100\% =$$

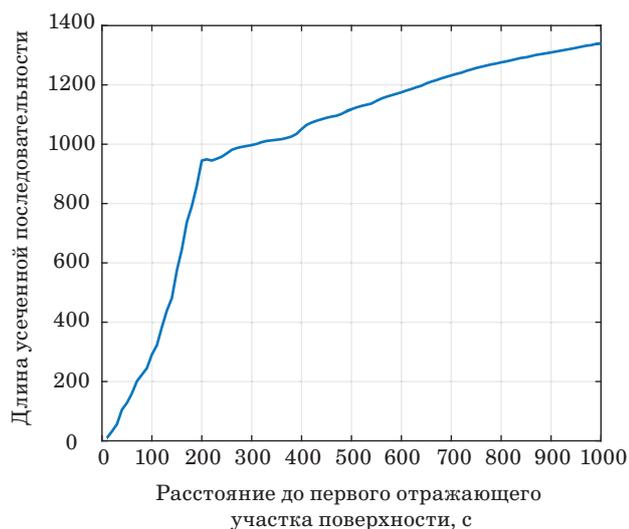
$$= \frac{\left( \sum_{m=1}^M F_\alpha(\alpha_m - \alpha_{00}) \sum_{n=N_1}^N \frac{\sigma_{mn}}{D_{mn}^4} \dot{S}_{zond}(t - n\Delta\tau) \right)}{\left( \sum_{m=1}^M F_\alpha(\alpha_m - \alpha_{00}) \sum_{n=1}^{N_2} \frac{\sigma_{mn}}{D_{mn}^4} \dot{S}_{zond}(t - n\Delta\tau) \right)} \times 100\%. \quad (6)$$

Рассмотрим значение выражения (6) для однородной (рис. 4, а) и неоднородной (рис. 4, б) поверхности. В качестве сигнала был использован сигнал с линейно-частотной модуляцией с частотой 10 ГГц, длительностью 20 мкс, девиацией 20 МГц. Количество отсчетов сигнала 2000. Первые сигналы РЛС начинает принимать от участков поверхности, находящихся в 10 м от станции. Значение  $K$  равно количеству отсчетов сигнала. Как видно из рис. 4, ошибка резко убывает с увеличением точек поверхности как для однородной, так и для неоднородной поверхности. И для расчета сигнала с погрешностью менее 1 % достаточно всего 50 точек.

Однако следует отметить, что такая зависимость характерна только для случая, когда РЛС принимает сигналы от близко расположенных участков. На рис. 5 представлена длина усеченной последовательности  $N_2$ , начиная с которой ошибка (6) не превышает 1 % в зависимости от расстояния до первого отражающего участка поверхности, от которого РЛС начинает принимать сигнал. Как видно из рисунка, значительный эффект можно достигнуть в случае, если РЛС принимает сигнал от участков, удаленных до 200 м.



■ **Рис. 4.** Зависимость ошибки (6) от количества задействованных отсчетов для моделирования однородной (а) и неоднородной (б) поверхности  
 ■ **Fig. 4.** Dependence of the error (6) on the number of samples involved for modeling a homogeneous surface (a) and a heterogeneous surface (b)

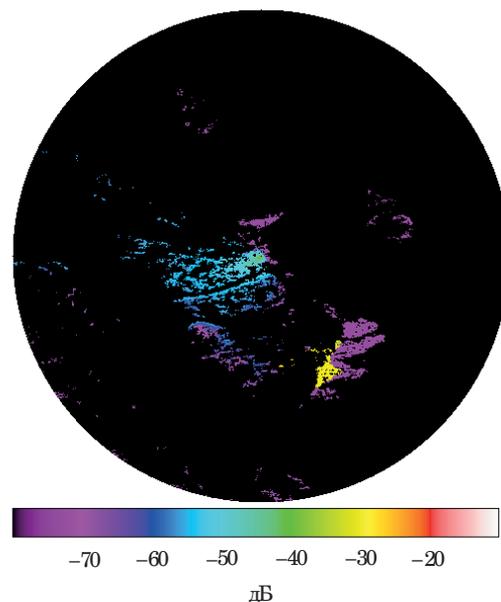


■ **Рис. 5.** Длина усеченной последовательности  $N_2$ , начиная с которой ошибка (6) не превышает 1 %  
 ■ **Fig. 5.** The length of the truncated sequence  $N_2$ , starting from which the error (6) does not exceed 1%

**Отражения от области поверхности, удаленной от РЛС**

Для отражений под малыми углами обзора типично, что основная часть отражений сосредоточена вблизи РЛС [3, 4]. С ростом дальности количество затененных участков возрастает, и отражающие участки имеют точечный характер (рис. 6). Причем с уменьшением высоты антенны количество затененных участков увеличивается [3].

Массив отражений (1) на больших дальностях представляет собой сильно разреженную



■ **Рис. 6.** Распределение отражающей способности по поверхности; максимальная дальность 30 км; уровень УЭПР показан цветом  
 ■ **Fig. 6.** Distribution of surface reflectivity; the maximum range is 30 km; the color shows NRCS level

матрицу. Поэтому более эффективно задавать ее как набор точечных участков. Такое задание, во-первых, значительно уменьшает размер массива  $\hat{S}$ , а во-вторых, позволяет осуществлять непосредственное вычисление выражения (2), так как алгоритм быстрой свертки на основе преобразования Фурье для этого случая не является эффективным [23].

## Методика моделирования отраженных сигналов с использованием методов минимизации вычислений

Рассмотрим основные этапы, которые необходимо предпринять для подготовки к моделированию отражений от земной поверхности.

**Этап 1. Определение рабочей области РЛС.**

Выбрать оптимальный диапазон для моделирования. Обычно этот диапазон ограничивается радиогоризонтом, однако при моделировании может быть выбран и меньший диапазон, в зависимости от распределения видимых областей поверхности.

**Этап 2. Задание распределения УЭПР по поверхности.**

Определить видимые и затененные участки поверхности, а также значения УЭПР. Эти данные, как правило, определяются с помощью топографической карты местности, данных о высотах поверхности и выбранной математической модели отражений.

**Этап 3. Подготовка данных для моделирования.**

Перед началом моделирования необходимо разделить поверхность на зоны в зависимости от характера отражения радиосигналов.

Зона 1 — область поверхности, расположенная в пределах 200 метров от РЛС. Для моделирования отражений от поверхности в этой зоне необходимо выбрать параметр  $N_2$ . Это можно сделать, руководствуясь формулой (6).

Зона 2 — область поверхности между зоной 1 и зоной 3. Для синтеза отражений в данной области нужно рассчитать спектр (4) в соответствии с выбранным порогом  $\epsilon$ .

Зона 3 — область поверхности, которую можно представить отдельными отражателями. Определить ее можно по соотношению площади видимых участков поверхности к общей площади выбранного кольца равной дальности.

После окончания предварительных расчетов можно переходить к вычислению комплексной

огибающей отраженного сигнала. Для каждой из зон применяют различные алгоритмы расчета. Так, для зоны 1 вычисление происходит по формуле (2), при этом вместо  $N$  точек используют ограниченное их количество —  $N_2$ . В зоне 2 эффективен расчет свертки (2) по методу перекрытия с накоплением. Зона 3 предполагает отражение сигнала, как если бы он взаимодействовал с точечными отражателями.

## Заключение

В работе рассмотрены возможности оптимизации алгоритмов синтеза отражений от поверхности Земли. Описанные методы позволяют уменьшить вычислительную сложность моделирования, тем самым уменьшив требования к мощности устройств для имитации отражений.

Развитие радиолокационных систем и технологий обнаружения ставит перед разработчиками имитационного оборудования задачу создания точных моделей отражений от объектов окружающей среды. Одним из сложных объектов для моделирования является земная поверхность. Ее имитация требует значительных вычислительных ресурсов, так как необходимо учитывать множество факторов и отражений. В связи с этим точность моделирования отраженного сигнала ограничена возможностями расчетов.

Таким образом, разработка и усовершенствование методов оптимизации моделирования становится одной из ключевых задач для достижения максимальной эффективности при имитации сигнала.

## Финансовая поддержка

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках реализации программы развития НГТУ, научный проект № С23-16.

## Литература

1. Richards M. A., Scheer M. A., Holm W. A. *Principles of Modern Radar*. Edison, SciTech Publishing, 2010. 962 p.
2. Melvin W. L., Scheer J. A. *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*. NY, SciTech Publishing, IET, Edison, 2013. 846 p.
3. Billingsley B. J. *Low Angle Radar Land Clutter Measurements and Empirical Models*. William Andrew Publishing, 2001. 719 p.
4. Kulemin G. P. *Millimeter-Wave Radar Targets and Clutter*. Artech House, 2003. 417 p.

5. Тырыкин С. В., Сабитов Т. И., Киселев А. В. *Специальные вопросы построения когерентных матричных имитаторов*. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2021. 232 с.
6. Xu G., Hao F., Chen J., Xiu C. Optimization of clutter simulation based on GPU. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 29501–29507. doi:10.1109/ACCESS.2020.2972941
7. Dang X., Chen Y., Wang C., Yin H., Xu H. Land clutter data generation using generative adversarial network. *IEEE MTT-S Intern. Conf. on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO)*, Hangzhou, China, 2020, pp. 1–3. doi:10.1109/NEMO49486.2020.9343606

8. Оreshkina M. V. Погрешность моделирования эхосигналов от поверхности Земли при дискретном задании ее отражающих свойств. *Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая*, 2019, № 4, с. 11–15. doi:10.21778/2218-5453201941115
9. Kim D., Park A. J., Suh U., Goo D., Kim D., Yoon B., Ra W., Kim S. Accurate clutter synthesis for heterogeneous textures and dynamic radar environments. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, vol. 58, iss. 4, pp. 3427–3445. doi:10.1109/TAES.2022.3151585
10. Ergezer H., Keskin M. F., Gunay O. Hardware-in-the-loop radar test simulator. *4th Intern. Conf. on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, Vienna, 2014, pp. 666–673. doi: 10.5220/0005034506660673
11. Hua Q., Hao C., Mo Z. Simulation and modeling of radar echo signal. *9th Intern. Conf. on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, Chongqing, 2012, pp. 1954–1957. doi:10.1109/FSKD.2012.6233930
12. Billingsley J. B., Farina A., Gini F. Statistical analyses of measured radar ground clutter data. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, no. 35, pp. 579–593. doi:10.1109/7.766939
13. Bokov A., Slizko V. Generation of radar ground clutter echoes with Jakes' Doppler spectrum on FPGA. *2022 Ural-Siberian Conf. on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*, Yekaterinburg, Russian Federation, 2022, pp. 136–140. doi:10.1109/USBREIT56278.2022.9923348
14. Никулин А. В., Белоруцкий Р. Ю. Замещение поверхности Земли дискретной моделью при имитации радиолокационных эхосигналов от нее. *Вопросы радиоэлектроники. Сер. Системы отображения информации и управления спецтехнологией*, 2012, № 4, с. 134–144.
15. Oreshkina M., Stepanov M., Kiselev A. Digital Earth surface maps for radar ground clutter simulation. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2022, vol. 33, iss. 2, pp. 340–344. doi:10.23919/JSEE.2022.000035
16. Liu Y., Li Z. Clutter simulation overview. *Proc. of 2017 2nd Intern. Conf. on Materials Science, Machinery and Energy Engineering*, 2017, no. 123, pp. 530–534.
17. Zhong T., Dong G., Wang R. A new adversarial hierarchy for SAR clutter generation. *CIE Intern. Conf. on Radar (Radar)*, Haikou, Hainan, China, 2021, pp. 1323–1326. doi:10.1109/Radar53847.2021.10028560
18. Dong Y. *Models of Land Clutter vs Grazing Angle, Spatial Distribution and Temporal Distribution. L-Band VV Polarisation Perspective*. Edinburgh, Systems Sciences Laboratory, 2004. 65 p.
19. Монаков А. А. Моделирование рассеянного шероховатой поверхностью радиосигнала методом стационарных точек. *Известия вузов России. Радиоэлектроника*, 2023, т. 26, № 3, с. 67–76. doi:10.32603/1993-8985-2023-26-3-67-76
20. Kim D., Park A. J., Suh U., Goo D., Kim D., Yoon B., Ra W.-S., Kim S. Accurate clutter synthesis for heterogeneous textures and dynamic radar environments. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, vol. 58, no. 4, pp. 3427–3445. doi:10.1109/TAES.2022.3151585
21. Yanovsky F., Prokopenko I., Rudiakova A., and Rhee H. Generalized computer model of sea, land and atmospheric clutter. *23rd Intern. Radar Symp. (IRS)*, Gdansk, Poland, 2022, pp. 431–436. doi:10.23919/IRS54158.2022.9905001
22. Nussbaumer H. G. *Fast Fourier Transform and Convolution Algorithms*. Springer-Verlag, 1981. 248 p.
23. Blahut R. E. *Fast Algorithms for Digital Signal Processing*. Addison-Wesley Publishing Company, 1985. 441 p.

UDC 621.37

doi:10.31799/1684-8853-2023-6-12-19

EDN: VDQNIIE

**Minimization technique for the amount of computation for land clutter simulation**M. V. Oreshkina<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-0965-2932, oreshkina.m@yandex.ru<sup>a</sup>Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marksa Pr., 630073, Novosibirsk, Russian Federation

**Introduction:** Land clutter simulation is an important step in testing and evaluating the performance of radar stations. A surface simulation model is an area within the radar field of view divided into many small sites. Each of these sites is a point reflector. The echo signal from the surface area is a set of signals from the point reflectors this area contains, which requires significant computing resources.

**Purpose:** To substantiate the techniques of minimizing the amount of computation when calculating reflected signals for the simulation of radar station operation. **Results:** The land clutter modeling requires the calculation of the convolution of the sequence describing the structure of the earth's surface and the sequence describing the probing signal. The calculation of the convolution is efficient according to the overlap-save method, where the entire sequence is divided into several sections. The study shows that when computing partial convolutions with the use of the Fourier transform, some harmonics have low energy and can be ignored without significantly affecting the accuracy of the calculations. The land clutter properties change depending on the distance of the particular area from the radar station. In an area which close to the radar station, the contribution of reflections from areas is highly dependent on their location. Reflections actually are formed only by nearby areas. We obtain the expressions for estimating the errors that arise due to the neglect of reflections from remote areas. At a considerable distance from the radar, the reflective areas take on a point character, which makes it possible to calculate the convolution without using fast algorithms. **Practical relevance:** The presented computational minimization techniques can be used to develop echo signal simulators.

**Keywords** — land clutter, echo signal, radar, mathematical modeling, signal simulation, hardware-in-the-loop simulation, minimization of the amount of computation, algorithm efficiency.

**For citation:** Oreshkina M. V. Minimization technique for the amount of computation for land clutter simulation. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 6, pp. 12–19 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-6-12-19, EDN: VDAQNIE

#### Financial support

The research was carried out with financial support within the framework of the development program of NSTU, scientific project No. S23-16.

#### References

- Richards M. A., Scheer M. A., Holm W. A. *Principles of Modern Radar*. Edison, SciTech publishing, 2010. 962 p.
- Melvin W. L., Scheer J. A. *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*. NY, SciTech Publishing, IET, Edison, 2013. 846 p.
- Billingsley B. J. *Low Angle Radar Land Clutter Measurements and Empirical Models*. William Andrew Publishing, 2001. 719 p.
- Kulemin G. P. *Millimeter-Wave Radar Targets and Clutter*. Artech House, 2003. 417 p.
- Tyrykin S. V., Sabitov T. I., Kiselev A. V. *Special'nye voprosy postroeniya kogerentnykh matrichnykh imitatorov* [Special issues of constructing coherent matrix simulators]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2021. 232 p. (In Russian).
- Xu G., Hao F., Chen J., Xiu C. Optimization of clutter simulation based on GPU. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 29501–29507. doi:10.1109/ACCESS.2020.2972941
- Dang X., Chen Y., Wang C., Yin H., Xu H. Land clutter data generation using generative adversarial network. *IEEE MTT-S Intern. Conf. on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO)*, Hangzhou, China, 2020, pp. 1–3. doi:10.1109/NEMO49486.2020.9343606
- Oreshkina M. V. Error of modeling echo signals from Earth surface arising due to discrete assignment of reflective properties. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Obshchetekhnicheskaya*, 2019, no. 4, pp. 11–15 (In Russian). doi:10.21778/2218-5453201941115
- Kim D., Park A. J., Suh U., Goo D., Kim D., Yoon B., Ra W., Kim S. Accurate clutter synthesis for heterogeneous textures and dynamic radar environments. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, vol. 58, iss. 4, pp. 3427–3445. doi:10.1109/TAES.2022.3151585
- Ergezer H., Keskin M. F., Gunay O. Hardware-in-the-loop radar test simulator. *4th Intern. Conf. on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, Vienna, 2014, pp. 666–673. doi:10.5220/0005034506660673
- Hua Q., Hao C., Mo Z. Simulation and modeling of radar echo signal. *9th Intern. Conf. on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, Chongqing, 2012, pp. 1954–1957. doi:10.1109/FSKD.2012.6233930
- Billingsley J. B., Farina A., Gini F. Statistical analyses of measured radar ground clutter data. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, no. 35, pp. 579–593. doi:10.1109/7.766939
- Bokov A., Slizkoy V. Generation of radar ground clutter echoes with Jakes' Doppler spectrum on FPGA. *2022 Ural-Siberian Conf. on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*, Yekaterinburg, Russian Federation, 2022, pp. 136–140. doi:10.1109/USBEREIT56278.2022.9923348
- Nikulin A. V., Beloruckij R. Yu. Replacing the earth's surface with a discrete model when simulating radar echoes from it. *Voprosy radioelektroniki. Seriya Sistemy otobrazheniya informacii i upravleniya spektikhnikoj*, 2012, no. 4, pp. 134–144 (In Russian).
- Oreshkina M., Stepanov M., Kiselev A. Digital Earth surface maps for radar ground clutter simulation. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2022, vol. 33, iss. 2, pp. 340–344. doi:10.23919/JSEE.2022.000035
- Liu Y., Li Z. Clutter simulation overview. *Proc. of 2017 2nd Intern. Conf. on Materials Science, Machinery and Energy Engineering*, 2017, no. 123, pp. 530–534.
- Zhong T., Dong G., Wang R. A new adversarial hierarchy for SAR clutter generation. *CIE Intern. Conf. on Radar (Radar)*, Haikou, Hainan, China, 2021, pp. 1323–1326. doi:10.1109/Radar53847.2021.10028560
- Dong Y. *Models of Land Clutter vs Grazing Angle, Spatial Distribution and Temporal Distribution. L-Band VV Polarization Perspective*. Edinburgh, Systems Sciences Laboratory, 2004. 65 p.
- Monakov A. A. Simulation of a radio signal scattered from a rough surface by the method of stationary points. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2023, vol. 26, no. 3, pp. 67–76 (In Russian). doi:10.32603/1993-8985-2023-26-3-67-76
- Kim D., Park A. J., Suh U., Goo D., Kim D., Yoon B., Ra W.-S., Kim S. Accurate clutter synthesis for heterogeneous textures and dynamic radar environments. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, vol. 58, no. 4, pp. 3427–3445. doi:10.1109/TAES.2022.3151585
- Yanovsky F., Prokopenko I., Rudiakova A., and Rhee H. Generalized computer model of sea, land and atmospheric clutter. *23rd Intern. Radar Symp. (IRS)*, Gdansk, Poland, 2022, pp. 431–436. doi:10.23919/IRS54158.2022.9905001
- Nussbaumer H. G. *Fast Fourier Transform and Convolution Algorithms*. Springer-Verlag, 1981. 248 p.
- Blahut R. E. *Fast Algorithms for Digital Signal Processing*. Addison-Wesley Publishing Company, 1985. 441 p.