

# МОДЕЛИРОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ В РЕЖИМЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ НА ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВАХ

**С. К. Чернов, А. П. Карпенко**

*Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана  
Москва, Россия*

*E-mail: sergey.chernov.0@gmail.com, apkarpenko@mail.ru*

В статье рассматривается моделирование работы радиолокационной станции в режиме картографирования с использованием графических процессорных устройств. Предложен метод, основанный на стандартной технологии растеризации, позволяющий моделировать сканирование реальным лучом. Разработан алгоритм, реализующий данный метод. Выполнена программная реализация алгоритма. Приведены перспективы развития метода.

*Ключевые слова:* радиолокационные станции, РЛС, картографирование, графические процессорные устройства, ГПУ

## **Введение**

Радиолокационные станции (РЛС) авиационного базирования применяются для различных целей, в частности, для картографирования поверхности Земли в интересах геологии, топографии, разведки и т. д. При разработке авиационных тренажеров, полунатурных стендов возникает необходимость моделирования бортовых РЛС, в том числе в режимах картографирования.

Для моделирования бортовых РЛС применяют методы компьютерной графики – трассировку лучей, которая позволяет учитывать многократные переотражения [1], и растеризацию, менее требовательную к ресурсам [2]. Оба метода применяются для моделирования РЛС с синтезированной апертурой и не позволяют напрямую создать изображения, полученные сканированием реальным лучом. Этот недостаток не имеет непосредственного моделирование радиосигналов [3]. В данном методе посылается конусообразный луч, близкий к реальному радиолучу. Облучаемая поверхность состоит из множества небольших фасетов, эхо-сигналы от которых суммируются. Однако такой подход требует больших вычислительных затрат.

В данной работе предлагается подход на основе растеризации, близкий к подходу с непосредственным моделированием эхо-сигналов. Суть подхода состоит в суммировании отражения от участков поверхности, попавших при растеризации в разные пиксели. При этом можно сократить число фасетов и увеличить их размеры. Такой подход позволит получать более «естественные», по сравнению с растеризацией, изображения при сравнимых затратах.

Из-за высокой сложности отладки программ для ГПУ разумно сначала оценить пригодность предложенного подхода к практическому использованию. Цель данной работы – такая проверка. Необходимо решить следующие задачи: разработать алгоритм, реализующий метод; выполнить его программную реализацию, использующую преимущественно ЦПУ; исследовать производительность программы.

В работе дано описание предложенного метода и разработанного алгоритма, показан результат работы программы, реализующей алгоритм. Сделан вывод о целесообразности дальнейшей разработки.

## **Метод моделирования радиосигнала с растеризацией из положения РЛС**

Идея метода заключается в том, чтобы на основании данных о зондирующем сигнале, движении носителя, дальности до участка поверхности и его характеристиках вычислять параметры эхо-сигнала. Параметры зондирующего сигнала и движения носителя известны. Дальность до участка поверхности легко получить, считав значения, хранящиеся в буфере глубины ( $z$ -буфере) после растеризации кадра. Характеристики отражения поверхности, от которых зависит ее удельная эффективная площадь рассеяния (шероховатость, ориентация отражателей), предлагаем хранить в массиве данных, индекс поверхности в котором кодировать цветом текстуры поверхности.

Один кадр соответствует зондированию одним импульсом участка поверхности, попадающего в главный лепесток диаграммы направленности антенны. После растеризации кадра с разрешением, позволяющим обнаружить небольшие объекты, для каждого пикселя полученного изображения вычисляем эхо-сигнал. Все эхо-сигналы, попадающие в один элемент разрешения по дальности, суммируем и записываем в соответствующую этому элементу ячейку.

## **Алгоритм моделирования радиосигнала с растеризацией из положения РЛС**

Представленный алгоритм разработан для моделирования РЛС, для которой неважно доплеровское смещение частоты (неподвижных или не производящих последующую обработку сигнала), и поверхностей, отражение от которых не деполяризует сигнал. Таким образом, чтобы охарактеризовать изменение эхо-сигнала по сравнению с зондирующим сигналом, достаточно найти изменение его амплитуды.

### **Алгоритм цикла сканирования**

1) Подготавливаем рабочие текстуры: промежуточную, предназначенную для сохранения данных, на основе которых будем вычислять эхо-сигнал попиксельно, и конечную, в которую будем записывать суммарные параметры эхо-сигнала.

2) Помещаем камеру в позицию, в которой находится локатор. Углы обзора камеры настраиваем в соответствии с угловыми размерами главного лепестка диаграммы направленности антенны.

3) Ориентируем камеру так, чтобы в поле зрения попал нужный участок поверхности, т. е., поворачиваем по азимуту на угол  $\alpha - \frac{\beta}{2}$ , где  $\alpha$  – центр зоны обзора, а  $\beta$  – ее ширина. Индексу  $i_a$  столбца конечной текстуры, соответствующего данному углу, присваиваем нулевое значение.

4) Выполняем моделирование одного зондирующего импульса. На основе полученного промежуточного изображения вычисляем столбец  $i_a$  конечного изображения. Подробно алгоритм зондирования рассмотрим ниже.

5) Поворачиваем камеру по азимуту на некоторый угол или  $-\gamma$ , в зависимости от направления сканирования, а к индексу столбца  $i_a$  прибавляем или вычитаем еди-

ницу. Если сканирование всей зоны обзора завершено, меняем направление сканирования. Возвращаемся к шагу 4.

#### Алгоритм одного зондирующего импульса

1) Производим растеризацию изображения, попавшего в поле зрения камеры.  
2) Для каждого пикселя промежуточного изображения выполняем следующие действия.

а) По цвету пикселя вычисляем индекс поверхности. На основе типа и параметров поверхности, записанных по данному индексу, находим удельную эффективную площадь рассеяния (ЭПР) поверхности  $\sigma^0$ . Формулы для моделей разных типов поверхностей даны, например, в работе [4].

б) Находим площадь поверхности, попавшей в данный пиксель, по формуле

$$S = lw,$$

где

$$l = 2Dt \left( \frac{1}{2} \frac{\Psi_h}{H} \right) \frac{1}{c \cdot \theta},$$

$$w = 2Dt \left( \frac{\Psi_w}{2} \right) \frac{1}{W}.$$

Здесь  $D$  – расстояние до участка поверхности, попавшего в пиксель,  $\Psi_h$  и  $\Psi_w$  – угловые размеры главного лепестка диаграммы направленности антенны по высоте и ширине соответственно,  $H$  – число пикселей промежуточной текстуры в столбце,  $W$  – аналогичное число пикселей в строке,  $\theta$  – угол падения.

в) Находим ЭПР «под пикселем» по формуле

$$\sigma = \sigma^0 S.$$

г) Определяем канал по дальности, в который попадает эхо-сигнал от данного пикселя:

$$i_d = \left\lfloor \frac{D - D_{min} i_a Y}{D_{max} - D_{min} i_a} \right\rfloor,$$

где  $D_{min}$ ,  $D_{max}$  – ближняя и дальняя границы зоны обзора,  $Y$  – число каналов по дальности,  $\lfloor \bullet \rfloor$  – символ округления до ближайшего меньшего целого.

д) Вычисляем амплитуду сигнала:

$$E_{\Pi} = \frac{\sqrt{\sigma}}{4\pi D^2} E_{И},$$

где  $E_{И}$  – амплитуда зондирующего сигнала,  $E_{\Pi}$  – амплитуда эхо-сигнала.

е) Полученное значение добавляем в массив, содержащий значения эхо-сигналов:

$$E_{i_a i_d} = E_{i_a i_d} + E_{\Pi}.$$

Здесь  $i_a$ ,  $i_d$  – номера каналов по азимуту и дальности соответственно.

3) После вычисления столбца массива, содержащего значения сигналов, копируем его в соответствующий столбец конечной текстуры и нормируем.

## Реализация и результаты моделирования

Для отработки и отладки алгоритма разработана программа-прототип, в которой на ГПУ происходит только растеризация изображения, попавшего в поле зрения камеры, с сохранением в отдельных текстурах собственно изображения (карты типов поверхностей), z-буфера (карты дальностей) и карты углов падения. Все остальные шаги алгоритма выполняются на ЦПУ.

В качестве модельной выбрана мелкошероховатая поверхность, для которой удельная ЭПР определяется формулой [4]

$$\sigma^0 = 4 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \sigma_h^2 l_h^2 \left| (\dot{\epsilon} - 1) \frac{(\dot{\epsilon} - 1) s^2 \theta \pm \dot{\epsilon} n}{(\dot{\epsilon} c \theta + \sqrt{\dot{\epsilon} - s^2 \theta})^2} \right|^2 \cos^4 \theta \cdot e^{-\left( \frac{2\pi l_h}{\lambda} \right)^2 s^2 \theta^2},$$

где  $\dot{\epsilon} = \epsilon - j\sigma/g$  – комплексная диэлектрическая проницаемость материала поверхности,  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $g$  – проводимость,  $\lambda$  – длина волны,  $\sigma_h$  – среднеквадратическое отклонение поверхности,  $l_h$  – радиус пространственной корреляции,  $\theta$  – угол падения,  $j$  – мнимая единица.

Размеры главного лепестка диаграммы направленности антенны выбраны равными  $3 \times 4^\circ$ , размеры зоны обзора – равными  $60^\circ$  по азимуту, 35 км по дальности (ближняя граница – 35 км, дальняя – 70 км).

Размер промежуточной текстуры равен  $32 \times 4096$  пиксел ей. В результате угловое разрешение по азимуту составляет  $5'39''$ , по углу места –  $3,5''$ . Линейное разрешение на максимальной дальности равно 114 м по азимуту и 16 м по дальности. Такое разрешение, значительно превышающее конечное, необходимо, чтобы избежать пропуска небольших, но «ярких» объектов.

Размер конечной текстуры равен  $960$  пикселей. При этом разрешение по азимуту составляет  $1^\circ$ , а по дальности – 39 м.

Создан тестовый ландшафт (рис. 1), состоящий из базовой плоскости, набора округлых «холмов» высотой до трех километров и «поселков» размером  $10 \times 10$  домов.

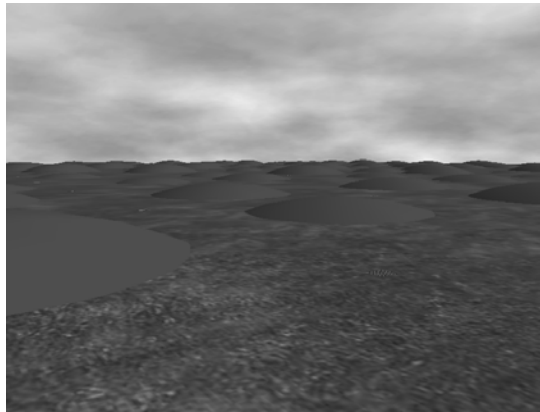


Рис. 1. Тестовый ландшафт

Полученное в результате моделирования радиолокационное изображение показано на рис. 2. Несмотря на высокую загруженность центрального процессора и канала обмена между ЦПУ и ГПУ, прототип показал производительность в 8,3 зондирующих импульсов в секунду (сканирование всей зоны обзора занимало 7,2 секунды).



Рис. 2. Смоделированное изображение

## Заключение

Полученные результаты позволяют прогнозировать высокую производительность метода после его параллельной реализации для ГПУ. При дальнейшей разработке необходимо учесть доплеровское смещение частоты, деполяризацию сигнала при отражении от поверхностей сложной формы, проработать возможность дальнейшей обработки сигнала: получение изображений методом доплеровского обужения луча, синтезированием апертуры.

## Библиографические ссылки

1. *Auer S., Hinz S., Bamler R.* Ray-Tracing Simulation Techniques for Understanding High-Resolution SAR Images // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2010. V. 48. № 3. P. 1445–1456.
2. *Balz T., Haala N.* Improved Real-Time SAR Simulation in Urban Areas // *Proceedings of the IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Denver*. 2006. P. 3631–3634.
3. *Franceschetti G., Migliaccio M., Riccoi D., Schirinzi G.* SARAS: A synthetic Aperture Radar (SAR) Raw Signal Simulator // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1992. V. 30. № 1. P. 110–123.
4. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007.