

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА ГРАФИЧЕСКОМ ПРОЦЕССОРЕ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ

М. Ю. БАЛАНОВ, Г. В. КОРОВИН, А. А. ПАК

*„НИИ КС имени А. А. Максимова“ – филиал АО „ГКНПЦ им. М. В. Хруничева“,
141091, Московская область, г. Королев, Россия
E-mail: niiks@khrunichev.com*

Рассматривается способ ускорения вычислений, выполненных при моделировании радиолокационной системы с синтезированной апертурой на графическом процессоре с параллельной архитектурой. Моделирование осуществляется с использованием точечной модели подстилающей поверхности. Алгоритм моделирования предполагает предварительный расчет отраженных сигналов с увеличенной частотой дискретизации и последующую аппроксимацию полученных результатов для расчета голограммы модели местности. Показано, что предельное время синтеза голограммы определяется произведением числа процессов в блоке на число блоков в решетке. Сочетание указанных параметров должно выбираться исходя из архитектуры графического ускорителя. Моделирование выполнялось на GPU NVIDIA Tesla K20 с использованием CUDA. В результате исследований подтверждена эффективность применения графического ускорителя для моделирования РЛИ РСА. Так, при формировании голограммы для модели местности 100×100 точек получен более чем двадцатикратный выигрыш по времени по сравнению с выполнением расчетов на процессоре общего назначения.

Ключевые слова: радиолокационные системы, синтезированная апертура, моделирование, параллельные вычисления, оптимизация вычислений

Предметом исследования в настоящей работе являются радиолокационные станции (РЛС) с синтезированной апертурой (РСА) [1—10], размещаемые на космических аппаратах (КА). Эти станции обеспечивают получение информации различного назначения с использованием средств дистанционного зондирования земли (ДЗЗ). Постоянное совершенствование способов обработки сигналов требует предварительной отработки схемотехнических решений в системах с РЛС РСА в лабораторных условиях. Часто первым этапом такой отработки является компьютерное моделирование, требующее большого количества однотипных вычислений, которые могут быть выполнены параллельно, например, на графическом ускорителе. При этом для повышения эффективности вычислений необходимо решать задачу уменьшения объема повторяющихся операций в различных потоках.

Рассмотрим коротко работу РЛС РСА. Математическое описание процесса формирования голограммы в РЛС РСА антенны будет вполне адекватным реальным условиям получения траекторного сигнала, если рассматривать РСА как линейную систему. Основной характеристикой линейной стационарной системы является ее импульсная характеристика (ИХ), или применительно к РСА, — реакция системы на одиночный точечный отражатель. Следовательно, описание сигнала, отраженного от одиночного точечного отражателя и регистрируемого в бортовом устройстве, обеспечивает в конечном итоге синтез радиолокационного изображения. Голограмма представляет собой промежуточное описание радиолокационного изображения в бортовом устройстве. Голограмма, полученная в результате облучения участка

местности с расположенными на ней объектами, представляет собой суперпозицию сигналов элементарных отражателей.

Классическое описание сигнала РЛС с РСА предполагает рассмотрение процесса приема сигнала при перемещении носителя по азимуту с постоянной скоростью относительно точечного отражателя. Движение трансформируется в изменение фазы сигнала, отраженного от каждой точки этой поверхности и пропорционального расстоянию от фазового центра антенны (ФЦА) до этой точки. Рассматриваемая модель РЛС излучает линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал электромагнитного колебания с длиной волны λ , полосой частот ΔF и длительностью τ . Тогда его перемещение в пространстве относительно облучаемой поверхности приводит к фазовой модуляции отраженного от точечного отражателя сигнала $s(t)$ по азимутальной координате, комплексная огибающая которого имеет следующий вид [1]:

$$\dot{s}(t) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} r(t) + \frac{\pi \Delta F}{\tau} t^2 + \varphi_0 \right\}, \quad t < |\tau/2|. \quad (1)$$

Здесь $r(t)$ — удвоенное значение разницы текущего расстояния между носителем и точечным отражателем и минимального расстояния между носителем и точечным отражателем. Время облучения определяется шириной диаграммы направленности антенны и ограничено временем когерентного накопления (синтезирования). В выражении не учитывается конкретная форма диаграммы направленности, приводящая к амплитудной модуляции сигнала. Время t связано с перемещением носителя относительно точки на земле и определяется его относительной скоростью V_p .

В РЛС РСА, расположенных на КА и выполняющих задачи ДЗЗ, происходит миграция отклика от точечного элемента $s(t)$ по дальности, что приводит к задержке сигнала t_{az} при приеме по краям диаграммы направленности антенны. В текущий момент азимутального времени сигнал по наклонной дальности описывается своей комплексной огибающей зондирующего импульса, отличной от (1). Относительно траверзного положения ($r = r_0$) импульс ЛЧМ сдвинут по дальности на величину миграции сигнала t_m . Текущее значение t_m является функцией азимутального времени и повторяет закон изменения текущего расстояния до цели

$$t_m = 2(r(t_{az}) - r_0) / c \approx \frac{V_p^2 t_{az}^2}{r_0 c}; \quad \text{в траверзном положении относительно цели } t_m = 0 \text{ и принимает}$$

максимальное значение на краях интервала синтеза.

Синтезирование апертуры предполагает сжатие сигнала по азимуту. Рассматриваемое в этом случае время назовем азимутальным t_{az} , его часто называют медленным временем [1, 4, 8], в отличие от времени, связанного с распространением сигнала в свободном пространстве, называемого быстрым (обозначим t_r). Время t_r описывает процесс формирования сигнала РСА по наклонной дальности. Рассмотрение двух координат связано с особенностью формирования голограммы: по дальности (быстрое время, определяемое скоростью света — c) и азимуту (медленное время, определяемое скоростью носителя — V_p). В общем случае процесс формирования траекторного сигнала РСА описывается двумерным интегральным соотношением.

В цифровой РСА дискретный сигнал в координатах „азимут — наклонная дальность“ образуется путем дискретизации принимаемого сигнала с частотой зондирования f_p и частотой аналого-цифрового преобразования f_{ADC} :

$$\dot{s}(k, n) = \dot{s}(t_{az}, t_r) \Big|_{t_{az} = \frac{k}{f_p}, t_r = \frac{n}{f_{ADC}}} \quad (2)$$

В процессе моделирования РЛС РСА формируется двумерный массив отсчетов голограммы (2) на основе суммы откликов отдельных точечных отражателей [4, 8]. Модель местности представляет собой массив комплексных коэффициентов отражения точечных отражателей,

имитирующий реальную картину местности. Фаза отраженного сигнала для различных отражателей распределена независимо по равномерному закону в интервале от $(0, 2\pi]$.

Сложность формирования голограммы модели местности повышается экспоненциально с ростом размерности массива точечных отражателей. При этом необходимо отметить, что каждый элемент (2) матрицы голограммы может быть получен независимо от остальных элементов, это позволяет реализовать алгоритм расчета матрицы голограммы в параллельном виде на графическом ускорителе.

Единичный элемент голограммы представляет собой сумму сигналов, отраженных от элементарных отражателей модели местности. В классическом понимании голограмма [1] представляет собой сумму отсчетов отраженных от элементарных отражателей ЛЧМ-сигналов. Изображение участка местности получается путем двумерной свертки голограммы с опорной матрицей, представляющей собой результат отражения сигнала от точечного отражателя.

В разработанном алгоритме принятый отраженный сигнал пропускается через согласованный с ЛЧМ-сигналом фильтр, а результат обработки записывается в матрицу голограммы. Таким образом, голограмма не содержит компонентов ЛЧМ-сигнала.

Для ускорения вычислений используется аппроксимация выходного сигнала, согласованного с ЛЧМ-сигналом фильтра. Перед началом расчета голограммы алгоритм определяет отклик согласованного фильтра на одиночный ЛЧМ-сигнал с увеличенной частотой дискретизации $10f_{ADC}$. В процессе расчета голограммы алгоритм выбирает ближайший предварительно рассчитанный отсчет выходного сигнала фильтра и принимает его за истинный отсчет отраженного сигнала. Это позволяет существенно сократить вычисления, поскольку исчезает необходимость расчета свертки отраженного сигнала в согласованном фильтре для каждого отражателя.

С целью проверки разработанного алгоритма были выполнены расчеты времени формирования голограммы для точечной модели участка местности, представленной на рис. 1, а. Результат свертки голограммы модели приведен на рис. 1, б. Моделирование выполнялось на GPU NVIDIA Tesla K20 с использованием средств CUDA.

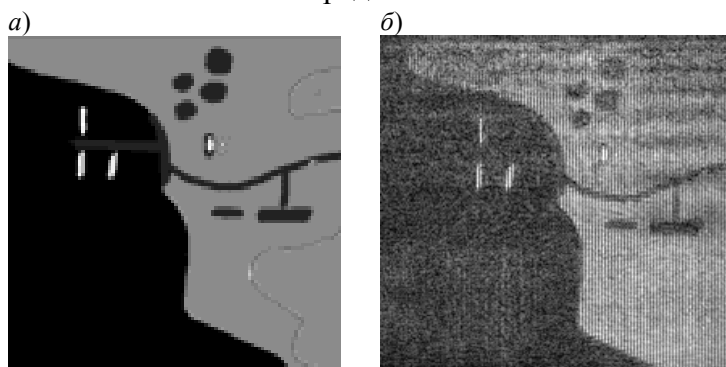


Рис. 1

Важнейшими параметрами при выполнении параллельных вычислений на графическом ускорителе являются число выполняемых потоков BlockDim для одного блока вычислений и число блоков выполнения GridDim в графическом ускорителе. Произведение этих двух параметров определяет общее число параллельно выполняемых процессов в графическом ускорителе, другими словами это общее количество одновременно выполняемых параллельных вычислений.

Время синтеза голограммы является критически важным параметром при моделировании систем РСА и составляет большую часть общего времени моделирования. На рис. 2 приведены результаты оценки времени синтеза голограммы t_s для выбранной модели при различных параметрах среды параллельных вычислений GridDim(N).

Для используемого графического ускорителя общее количество параллельно выполняемых процессов в одном блоке ограничено $N = 768$. Из приведенных на рис. 2 результатов следует, что при синтезе голограммы РСА необходимо использовать как можно больше процессов в блоке. При этом нижняя граница общего числа блоков в вычислителе определяется числом процессов, выполняемых единичным блоком.

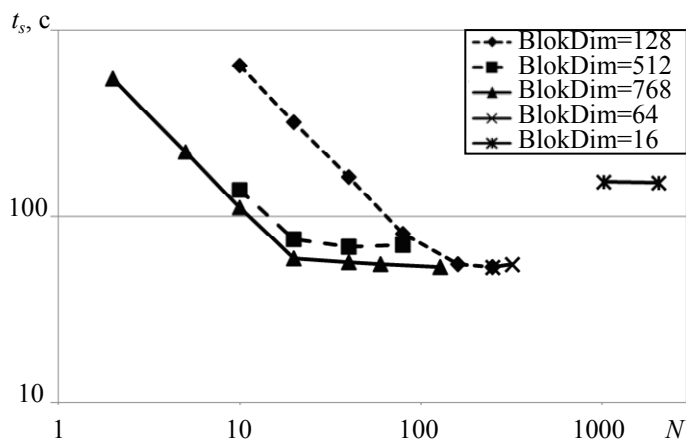


Рис. 2

На рис. 3 приведены результаты оценки времени синтеза голограммы в зависимости от общего числа процессов n , выполняемых на графическом ускорителе для различных размерностей среды выполнения программы. Из результатов следует, что для выбранного аппаратного обеспечения существует предельное общее число исполняемых одновременно процессов — около 16 384, по достижении которого время формирования голограммы перестает уменьшаться. Аппаратные ресурсы параллельной среды исполнения полностью исчерпываются.

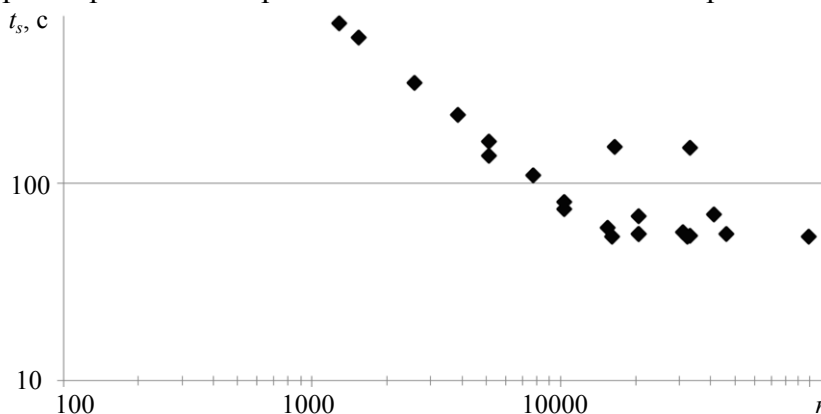


Рис. 3

Для достижения максимальной производительности требуется выбрать максимально возможное количество исполняемых процессов на блок, при этом общее число исполняемых процессов в блоке не должно превышать предельной величины. Таким образом, в результате проведения исследований подтверждена эффективность применения графического ускорителя для моделирования РЛИ РСА. Так, при формировании голограммы для модели местности 100×100 точек получен более чем двадцатикратный выигрыш по времени по сравнению с выполнением расчетов на процессоре общего назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
2. Прокис Дж. Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. 791 с.

3. Плющев В. А. Результаты разработки и направления развития многочастотных авиационных комплексов РСА // Наукоемкие технологии. 2004. № 8—9. С. 88—100.
4. Токарева О. С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: Учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 148 с.
5. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
6. Замятин А. В., Марков Н. Г. Анализ динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли. М.: Физматлит, 2007. 176 с.
7. Joseph J. Fundamental of Remote Sensing. Hyderabad: Universities Press, 2011. 490 p.
8. Lillesand T. M., Kiefer R. W., Chipman J. W. Remote Sensing and Image Interpretation. New Delhi: Wiley India Pvt. Ltd, 2011. 758 p.
9. Jensen J. R. Remote Sensing of the Environment. Pearson Education, 2007. 592 p.
10. Волосюк В. К., Кравченко В. Ф. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации. М.: Физматлит, 2008. 703 с.

Сведения об авторах

- | | |
|------------------------------------|---|
| Михаил Юрьевич Баланов | — канд. техн. наук; „НИИ КС имени А. А. Максимова“ – филиал АО „ГКНПЦ им. М. В. Хруничева“; ведущий научный сотрудник;
E-mail: dp940@mail.ru |
| Геннадий Викторович Коровин | — канд. воен. наук; „НИИ КС имени А. А. Максимова“ – филиал АО „ГКНПЦ им. М. В. Хруничева“; директор программ;
E-mail: korovin@niiks.com |
| Андрей Александрович Пак | — канд. техн. наук; „НИИ КС имени А. А. Максимова“ – филиал АО „ГКНПЦ им. М. В. Хруничева“; ведущий научный сотрудник;
E-mail: dp940@mail.ru |

Поступила в редакцию
26.02.18 г.

Ссылка для цитирования: Баланов М. Ю., Коровин Г. В., Пак А. А. Высокопроизводительный алгоритм моделирования радиолокационной системы дистанционного зондирования Земли на графическом процессоре с параллельной архитектурой // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 7. С. 618—623.

HIGH-PERFORMANCE ALGORITHM FOR SIMULATION OF THE EARTH REMOTE SENSING RADAR SYSTEM ON A GRAPHICS PROCESSOR WITH PARALLEL ARCHITECTURE

M. Yu. Balanov, G. V. Korovin, A. A. Pak

A. A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch
of Khrunichev State Research and Production Space Center JSC,
141091, Moscow Region, Korolev, Russia
E-mail: niiks@khrunichev.com

Methods of calculation acceleration in modeling radar systems with synthetic aperture on the GPU parallel architecture are considered. The simulation is based on a point model of the underlying surface. The modeling algorithm assumes preliminary calculation of the reflected signals with the increased sampling rate and subsequent approximation of obtained results to derive a hologram of the district model. It is shown that the time limit for hologram synthesis is defined as the product of number of processes in the block and the number of blocks in the lattice. The combination of these parameters is to be selected based on the architecture of the graphics accelerator. Results of simulations carried out on NVIDIA Tesla K20 GPU using CUDA are presented. Efficiency of the graphic accelerator application for modeling the RLS RSA is confirmed. Thus, in the case of a hologram for a 100×100 points model, the time gain is more than twenty times compared to calculations performed with a general-purpose processor.

Keywords: radar systems, synthesized aperture, modeling, parallel computing, optimization of calculations

REFERENCES

1. Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. *Radiolokatsionnyye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Space-Based Radar Earth Observation Systems), Moscow, 2010, 680 p. (in Russ.)
2. Proakis J.G. *Digital Communications*, NY, McGraw-Hill Book Co., 1983, 608 p.
3. Plyushchev V.A. *Journal Science Intensive Technologies*, 2004, no. 8–9, pp. 88–100 (in Russ.)
4. Tokareva O.S. *Obrabotka i interpretatsiya dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Processing and Interpretation of Earth Remote Sensing Data), Tomsk, 2010, 148 p. (in Russ.)
5. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*, Prentice Hall, 2008, 954 p.
6. Zamyatin A.V., Markov N.G. *Analiz dinamiki zemnoy poverkhnosti po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (The Analysis of Dynamics of the Land Surface According to Remote Sensing of Earth), Moscow, 2007, 176 p. (in Russ.)
7. Joseph J. *Fundamental of Remote Sensing*, Hyderabad: Universities Press, 2011, 490 p.
8. Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W. *Remote Sensing and Image Interpretation*, New Delhi, Wiley India Pvt. Ltd., 2011, 758 p.
9. Jensen J.R. *Remote Sensing of the Environment*, Pearson Education, 2007, 592 p.
10. Volosyuk V.K., Kravchenko V.F. *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya i radiolokatsii* (Statistical Theory of Radio Engineering Systems of Remote Sensing and Radar-Location), Moscow, 2008, 703 p. (in Russ.)

Data on authors

Mikhail Yu. Balanov	—	PhD; A. A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of Khrunichev State Research and Production Space Center JSC; Leading Researcher; E-mail: dp940@mail.ru
Gennady V. Korovin	—	PhD; A. A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of Khrunichev State Research and Production Space Center JSC; Programs Director; E-mail: korovin@niiks.com
Andrey A. Pak	—	PhD; A. A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of Khrunichev State Research and Production Space Center JSC; Leading Researcher; E-mail: dp940@mail.ru

For citation: Balanov M. Yu., Korovin G. V., Pak A. A. High-performance algorithm for simulation of the Earth remote sensing radar system on a graphics processor with parallel architecture. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 7. P. 618–623 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-7-618-623