

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ДЕКОДИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ

А.Е. Потапов,

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, a.potapov.2017@stud.nstu.ru

Научный руководитель: А.Б. Колкер, кандидат технических наук,
доцент

В статье рассматривается разработка программного модуля для реализации алгоритма декодирования цифровых голограмм в реальном времени. Данный модуль будет использоваться в экспериментальной установке, предназначенной для исследования голографии. Основной особенностью разрабатываемого модуля является использование графического процессора для реализации алгоритма пошагового фазового сдвига - PSI и преобразования Френеля.

The article discusses the development of a software module for the implementation of the algorithm for decoding digital holograms in real time. This module will be used in an experimental setup designed to research holography. The main feature of the developed module is the use of a graphics processor to implement the step-by-step phase shift algorithm - PSI and Fresnel transform.

Введение. Голография – это метод регистрации произвольного колебательного процесса, позволяющий зафиксировать как амплитуду, так и фазу колебания, а затем воспроизвести их в любой удобный момент времени.

Основной особенностью цифровой голографии является то, что анализ, синтез и математическое преобразование происходит за счет средств вычислительной техники. Но для качественного проведения анализа цифровых голограмм необходимо обрабатывать большое количество цифровых голограмм за короткий промежуток времени. В разрабатываемом приложении используется графический процессор, архитектура которого нацелена на параллелизм исполняемых инструкций. Такой подход позволяет значительно понизить временные траты на декодирование цифровых голограмм. Для проведения анализа применяют метод пошагового вазового сдвига (PSI) и преобразование Френеля [1].

Описание алгоритмов декодирования цифровых голограмм.

Первым этапом декодирования цифровых голограмм является определение значений амплитуды и фазы по картинам интенсивности, полученные на этапе регистрации цифровой голограммы. Для этого этапа используется алгоритм пошагового фазового сдвига — PSI [2]. Его формула представлена ниже.

$$\vec{I} = I_0 \vec{R} + (I_0 V \cos \varphi) \vec{C} - (I_0 V \sin \varphi) \vec{S} \quad (1)$$

При помощи формулы 1 можно получить математическую модуль голограммы вида:

$$G(x, y) = a_p(x, y) \exp^{-i\varphi_p(x, y)} \quad (2)$$

где

$$a_p(x, y) = \frac{1}{|\vec{C} \vec{S}^\perp|} \sqrt{(\vec{I} \vec{S}^\perp)^2 + (\vec{I} \vec{C}^\perp)^2} \quad (3)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\vec{I} \vec{C}^\perp}{\vec{I} \vec{S}^\perp}\right) \quad (4)$$

Следующим этапом является дискретное преобразование Френеля, его формула представлена ниже. Данное преобразование позволяет приближать цифровую голограмму на расстояние d [1].

$$\begin{aligned} \Gamma(r, s) = & -\exp\left\{i \frac{\pi}{\lambda d} \left[\left(\Delta \xi \left(r - \frac{N_x}{2}\right)\right)^2 + \left(\Delta \eta \left(s - \frac{N_y}{2}\right)\right)^2 \right]\right\} * \\ & * \mathfrak{I} \left(b_1(k, l) \exp\left\{i \frac{\pi}{\lambda d} \left[\left(\Delta \xi \left(k - \frac{N_x}{2}\right)\right)^2 + \left(\Delta \eta \left(l - \frac{N_y}{2}\right)\right)^2 \right]\right\} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Реализация программного модуля. Большинство расчетов выполняются на центральном процессоре (ЦП). Основной акцент при производстве процессора ставится на времени выполнения инструкции, которое складывается из количества тактов, за которое выполняется инструкция. Чем меньше длительность одного такта, тем быстрее процессор выполняет инструкции. Но при использовании процессора необходимо учитывать ограничение по объему памяти и скорости его обработки процессором. Данное ограничение можно компенсировать

использованием графического процессора для проведения математических расчетов.

Универсальные вычисления на графических процессорах (GPGPU) — это использование графического процессора (GPU), для выполнения вычислений в приложениях, которые традиционно обрабатываются центральным процессором (CPU). Таким образом, графические процессоры могут обрабатывать гораздо больше изображений и графических данных в секунду, чем традиционные процессоры. Перенос данных в графическую форму с последующим использованием графического процессора для их сканирования и анализа может привести к значительному ускорению вычислений. В данной работе рассматривается использование графического процессора для реализации алгоритмов PSI и дискретного преобразования Френеля (номер формулы).

В качестве графического процесса декодирования цифровых голограмм используется видеокарта Nvidia GeForce GTX 1070. Для управления графическим процессором используется библиотека OpenGL. Основным достоинством этой библиотеки является простой программный интерфейс взаимодействия (API) и поддержка большого числа графических процессоров и операционных систем. Кроме этого, библиотека OpenGL позволяет программировать графический конвейер. Такая возможность реализуется через создание специальных программ - шейдеров, которые работают на том или ином этапе графического конвейера. Графическая библиотека OpenGL позволяет реализовывать вычислительный шейдер (*compute shader*). Этот шейдер реализует технологию GPGPU и используется для вычисления произвольной информации.

Вычислительный шейдер выполняется над рабочим пространством или вычислительным пространством (*compute space*). Под этим термином понимается область памяти, с которой работает программа вычислительного шейдера. В данной работе под рабочее пространство составляет изображения, полученные на первом этапе, и целевое изображение, в которое записывается результат второго этапа. Рабочее пространство обрабатывается при помощи рабочих групп (*work group*) – наименьшее количество вычислительных операций, которые может выполнять пользователь [3]. Каждая рабочая группа состоит из

нитей (поток в терминах OpenGL), которые и производит сами вычисления, параллельно с остальными нитями одной и той же группы.

Первый этап декодирования цифровых голограмм, описанный в предыдущем пункте, реализуется за счет фрагментарного шейдера. В память графического процессора записываются 4 изображения, полученные на этапе регистрации картин интенсивности.

Затем эти изображения преобразуются по алгоритму PSI а амплитудную и фазовую составляющие, которые записываются в отдельные текстурные объекты в памяти графического процессора.

Следующим этапом является преобразование Френеля, описанного в предыдущем пункте. В основе данного преобразования лежит обычное двумерное быстрое преобразование Фурье и двумерное БПФ для четного количества точек. Выбор того или иного БПФ зависит от размеров изображений, полученных на первом этапе. Если ширина или высота не являются степенями 2, то будет использоваться двумерное БПФ для четного количества точек. Его реализация происходит в вычислительном шейдере (*compute shader*). Согласно формуле 5 сначала производится умножение на экспоненту, затем производится обычное двумерное БПФ или БПФ с четным количеством точек. На последнем шаге полученное значение вновь умножается на экспоненту.

Двумерное БПФ выполняется над полученными ранее амплитудными и фазовыми составляющими. Исходные изображения делятся на 4 группы по оси y в терминах использования вычислительного шейдера OpenGL. В каждой группе используется 1024 параллельно работающие нити (потoki в терминах вершинного шейдера). Каждая нить реализует используемый алгоритм БПФ над строками исходных матриц амплитуды и фазы, полученные на первом этапе. После этого происходит аналогичная операция, но уже над столбцами.

Заключение. В результате были разработаны алгоритмы регистрации и восстановления цифровых голограмм на основе C++ и OpenGL. C++ используется для управления. Основные вычислительные операции реализуются на графическом процессоре с помощью OpenGL.

Реализован метод получения цифровых математических голограмм с использованием метода фазовых сдвигов и метод

преобразования Френеля на графическом ускорителе NVIDIA GTX 1070.

Время восстановления изображения из четырех голограмм менее секунды при размере голограмм 6000x4000 пикселей при использовании графического ускорителя NVIDIA GTX 1070. Время расшифровки на компьютере около 5 минут.

Литература:

1. Гужов В.И. Компьютерная голография: монография. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 270 с
2. В. И. Гужов, С. П. Ильиных, С. В. Хайбуллин. Восстановление фазовой информации на основе методов пошагового фазового сдвига при малых углах между интерферирующими пучками // Автометрия. - 2017. - Т. 53, № 3. - С. 101 — 106.
3. The OpenGL® Graphics System: A Specification (Version 4.6 (Core Profile) - May 5, 2022 [Электронный ресурс]. Режим доступа-
<https://registry.khronos.org/OpenGL/specs/gl/glspec46.core.pdf>,
(дата обращения 30.10.2022).