

Тимченко Л.И., Петровский Н.С., Кокряцкая Н.И., Губернаторов В.А.

**РАЗРАБОТКА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА СЕЧЕНИЙ ДЛЯ
КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ С
ПОСЛЕДУЮЩИМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ НА ПРОГРАММИРУЕМЫХ
ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ**

В статье рассматривается алгоритм вычисления координат и классификации изображений пятен лазерных пучков, а также техническая реализация устройства на базе программируемых логических схем (ПЛИС).

This article discusses an algorithm for calculating the coordinates and image classification spots of laser beams and the technical realization of devices based on programmable logic circuits (FPGA). In modern laser transmission systems through an atmosphere, laser ranging, as well as other areas of technology there is need for more precise correction of the laser beam. And the purpose of this work is development of parallel high-speed device of processing and classification of images.

Введение

Быстро возрастающие требования современных вычислительных сред стимулируют к разработке новых интеллектуальных методов передачи и обработки информации. Жесткие требования систем, обрабатывающих информацию в режиме реального времени, заставляют ученых регулярно создавать и обновлять системы передачи информации. В наше время большинство интернет каналов не способны обеспечить необходимый качественный обмен информацией между такими системами, что, в свою очередь, приводит к перегрузке данных каналов и созданию, так называемых, цифровых пробок. Одним из способов решения проблемы, передачи больших объемов информации, может быть применение оптоволоконного кабеля, но прокладывание кабеля данного типа, даже на небольшие расстояния, достаточно дорогое удовольствие. В то время как использование лазерных технологий [1-3] позволяет решить данную проблему и является одной из самых перспективных моделей передачи информации в ближайшем будущем. Большинство спутников передают информацию, например телевизионные программы, с помощью микроволнового излучения. В то же время передача информации с помощью лазера может происходить в сотни раз быстрее, что в свою очередь, существенно повлияет на пропускную способность канала передачи.

Для передачи информации с помощью лазера необходимо, чтобы спутник и принимающее устройство (ПУ) находились в определенной позиции. Положение линзы ПУ диаметром всего несколько сантиметров должно быть отрегулировано до тысячной доли градуса. В противном случае, передача информации просто не состоится.

Во время процесса отслеживания спутника принимающим устройством, происходящее на всех этапах работы системы, одной из основных задач является

классификация формы изображения пятна лазерного луча, а именно его геометрических характеристик, искажающихся, в свою очередь, под воздействием турбулентности и воздушных масс.

В свою очередь, сильно искаженные действием помех изображения могут, как значительно ухудшить результаты классификации, так и привести систему отслеживания в состояние неспособности адекватно реагировать на изменения положения отслеживаемого объекта.

Для решения задачи классификации и повышения точности определения центра пятенного объекта [4, 5] с помощью максимального использования его информационных признаков необходимо классифицировать кадры последовательности изображений пятен лазерных пучков, с целью фильтрации лазерной трассы от сильно искаженных действием помех изображений.

Известные методы анализа формы оптических объектов, например изложенных в работах [6-10], из-за сложности выполняемых операций в должной степени не позволяют простыми вычислительными средствами оценивать их форму.

Целью работы: является, решение научной задачи разработки простого в вычислительном плане, а, следовательно, быстродействующего метода классификации формы поверхности изображений пятен лазерных пучков с последующим его моделированием на ПЛИС.

В соответствии с основной задачей в статье решаются следующие подзадачи:

- разработка параллельного алгоритма, удовлетворяющего условиям по количеству и сложности применяемых операций;
- разработка устройства обработки и классификации изображений, позволяющего высвободить основной процессор от выполнения однотипных операций;
- разработка схемы устройства, имеющей существенно меньшую рабочую частоту, чем при использовании ЦСП (цифрового сигнального процессора), что позволяет уменьшить требования по ЭМС (электромагнитной совместимости);
- разработка модульного принципа построения устройства, что дает возможность применять его для обработки матриц с большим разрешением.

1. Метод сечений для контроля формы поверхности пятна излучения в реальном времени

При реализации подсистем контроля и обработки изображений в таких приборах как лазерные локаторы или лазерные системы передачи возникает ряд требований, влияющих на выбор метода и средств обработки:

1. Устройство должно иметь малый вес и габариты, а также не большое потребление энергии.
2. Обработка должна производиться в режиме реального времени.

Все это накладывает определенные ограничения на выбор алгоритмов и времени их выполнения. Одним из методов, позволяющих выполнять обработку и классификацию изображений с приемлемыми параметрами, является метод сечений для контроля формы поверхности пятна излучения [11] в реальном времени.

Алгоритм работы, по данному методу для кадра размером 128*128 элементов разложения (далее э.р.), следующий:

1) Находим на изображении точку с максимальной яркостью W_{\max} ;

2) Находим значения яркостей:

$$W_{0.75} = W_{\max} * 0,75 \text{ и } W_{0,5} = 0,5 * W_{\max}.$$

3) Находим площади поверхностей $S_{0.75}$ и $S_{0.5}$:

$$S_{0.75} = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \begin{cases} S_{0.75} + 1, w(f(x, y)) \geq w_{0.75} \\ S_{0.75}, w(f(x, y)) < w_{0.75} \end{cases},$$

$$S_{0.5} = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \begin{cases} S_{0.5} + 1, w(f(x, y)) \geq w_{0.5} \\ S_{0.5}, w(f(x, y)) < w_{0.5} \end{cases}, \quad (1)$$

где N - количество элементов разложения в строке (столбце) кадра, равное 128, $W(f(x,y))$ - значение яркости точки.

Далее находим коэффициент формы r :

$$r = S_{0.75}/S_{0.5}. \quad (2)$$

Экспериментально было установлено, что при $0.7 < r < 0.8$ изображение “хорошее”, в противном случае, переходим к пункту 1.

Находим центры изображения [12]:

$$x = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} w(f(x, y)) * x$$

$$y = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} w(f(x, y)) * y,$$

$$M = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} w(f(x, y)). \quad (3)$$

Где x, y – значения координат x, y соответственно; $w(f(x,y))$ - значение яркости точки; M - «масса» изображения (сумма яркостей всех точек изображения).

Данный алгоритм относительно прост при высокой производительности и позволяет применять его во встраиваемых системах. Впервые алгоритм был использован для данной задачи на базе сигнального процессора фирмы Texas Instruments TMS320C5510 [13] с тактовой частотой 200МГц, и проводит обработку одного изображения за 10мс. При этом на один элемент разложения затрачивается порядка 130 команд.

В тоже время в процессе работы выявились следующие недостатки: достаточно высокая частота требует повышенных требований по электромагнитной совместимости и уровню выполнения устройства, почти все процессорное время уходит на обработку изображений, что не позволяет возложить на процессор другие функции.

Также в настоящее время для повышения детализации изображения, возможно, использовать видео матрицы с большим разрешением. Расчет времени обработки одного кадра тем же процессором для работы, к примеру, с матрицей размерностью 256*256 э.р. можно произвести по формуле:

$$\tau = \frac{1}{F} * \sum_{i=1}^k n_i, \quad (4)$$

где F - частота процессора 200МГц, $k=130$ количество команд на э.р., n - количество э.р. в кадре ($256*256$ э.р.=65536 э.р.), то есть для обработки одного кадра необходимо:

$$\tau = \frac{1}{2*10^8} * 130 * 65536 = 42,5 * 10^{-2} \text{ мс.}$$

Время обработки τ показывает, что частота процессора недостаточна для обработки в реальном времени и потребует в четыре раза более мощного процессора. В случае же еще большей размерности матрицы потребность в повышении производительности увеличивается в геометрической прогрессии.

2. Разработка параллельного алгоритма для метода сечений

При более подробном изучении алгоритма можно сделать следующие выводы:

1. Большинство операций, используемых в алгоритме, являются простыми математическими операциями (умножение и сложение, сравнение и счет).

2. Также в некоторых формулах используются одни и те же переменные, (например, $w(f(x,y))$ в формулах 1 и 3), что предоставляет возможность их совместного использования.

Это позволяет сделать вывод о необходимости использования аппаратных средств вычисления построенных специально для реализуемого алгоритма, с помощью которых возможно построение параллельных вычислительных структур. Наиболее гибким инструментом для этого являются программируемые логические схемы (ПЛИС).

Параллельный алгоритм определения координат и классификации изображений пятен лазерных пучков представлен на рис.1.

И хотя сама блок-схема является последовательной, действия в каждом блоке вычисления выполняются одновременно, что дает экономию времени при выполнении однотипных действий.

В процессе разработки данного алгоритма был изменен порядок некоторых операций по сравнению с последовательным алгоритмом. Так согласно п.4 алгоритма вычисляется коэффициент формы и на основе этого принимается решение о вычислении координат. В параллельном же алгоритме координаты вычисляются одновременно с нахождением элемента разложения с максимальной яркостью W_{\max} . Это связано с тем, что в отличие от традиционного программирования, в ПЛИС элементы алгоритма занимают пространство схемы независимо от того будут ли они выполняться на определенном этапе или нет [14]. К тому же данный прием позволяет уменьшить количество итераций, проводимых над одним кадром изображения.

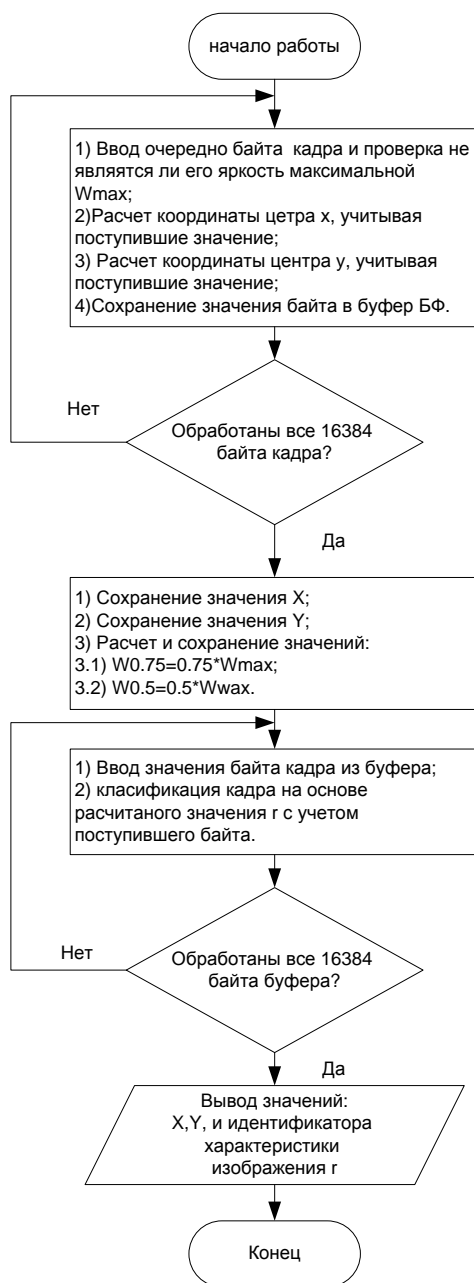


Рис. 1. Блок-схема параллельного алгоритма обработки изображений

Для простоты реализации алгоритм подразумевает построение на ПЛИС вычислительной части схемы, а управление процессом вычисления производится с помощью внешнего контроллера либо контроллерного ядра, встроенного в ПЛИС [15]. Блок схема устройства представлена на рис.2.

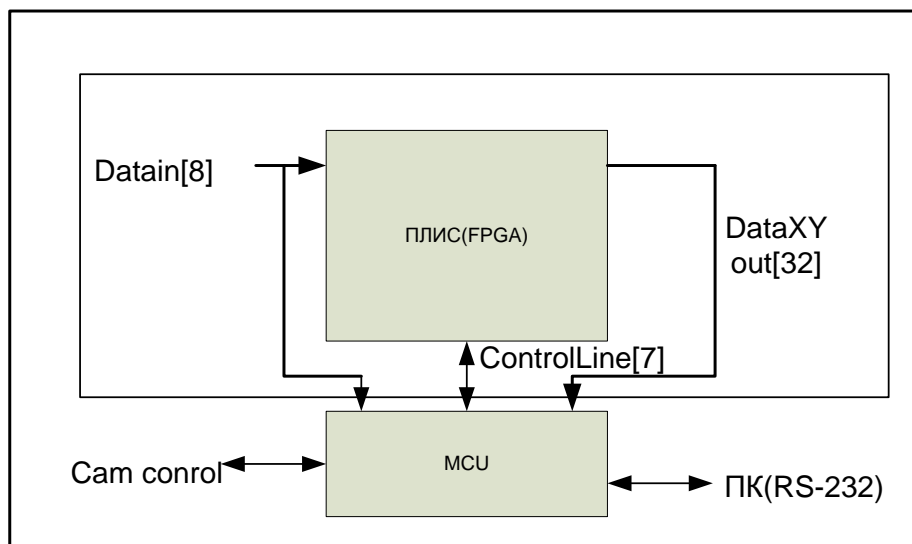


Рис. 2. Схема устройства обработки и классификации изображений

Где MCU- микроконтроллер;
 ПЛИС(FPGA) – программируемая логическая ИС, типа FPGA;
 Datain[8] – 8 разрядная шина входных данных (яркость пикселя);
 Cam control – шина управления камерой;
 ControlLine[7] – шина управления ПЛИС;
 DataXYout[32] – 32-х разрядная шина вывода значения координат XY;
 ПК(RS-232) – порт связи ПК или другими узлами системы (для примера использован интерфейс UART).

В данной схеме управлением камерой, ПЛИС и связью с ПК занимается контроллер (MCU), ПЛИС же занимается вычислением координат и характеристики изображения.

3. Моделирование параллельного алгоритма метода сечений на ПЛИС

В соответствии с параллельным алгоритмом схема подсистемы контроля и обработки изображений должна соответствовать следующим требованиям:

Иметь возможность модернизироваться в зависимости от применяемой видео матрицы.

Иметь модульную структуру для управления отдельными блоками и максимально сокращать время выполнения операций.

Таким требованиям соответствует схема, представленная на рис.3, и разработанная на базе программного пакета Quartus II 10.1 компании Altera. В пакете используется графический построитель и язык описания схем VHDL [16], применительно к обработке кадров изображений размером 128*128 э.р.

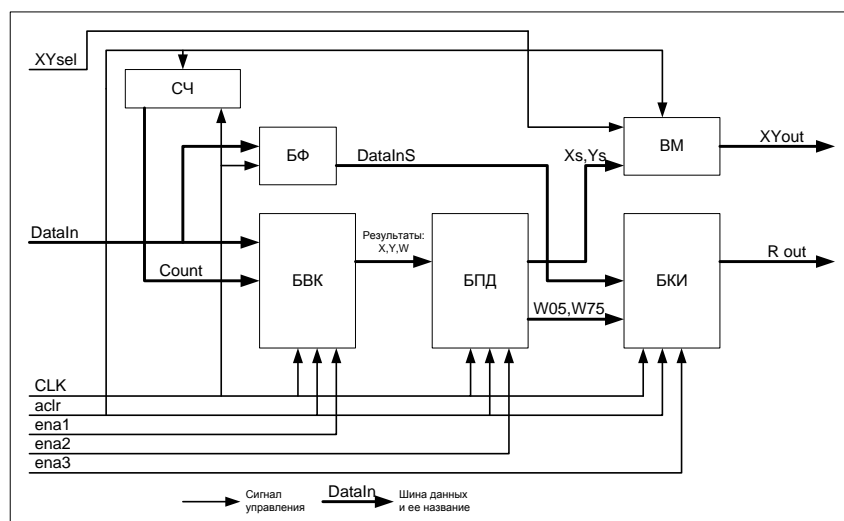


Рис. 3. Блок схема модуля ПЛИС

Устройство состоит из следующих блоков: БВК (блок вычисления координат) – блок рассчитывает значения X , Y , и максимальную яркость W_{\max} ; СЧ (счетчик) - который используется для предоставления блоку БВК координат входного байта (порядкового номера); БПД (блок промежуточного хранения данных)- сохраняет промежуточные значения X , Y , а также значений $W_{0,5}$ ($W_{0.5}$) и $W_{0,75}$ ($W_{0.75}$); БКИ (блок классификации изображений) - производит определение коэффициента формы r (классифицирует изображения на «хорошее» или «плохое»); БФ (буфер) – кольцевой буфер на 16384 байт, используется для хранения данных кадра во время работы схемы; ВМ (выходной мультиплексор) – асинхронный мультиплексор, дающий возможность последовательно выводить координаты X или Y .

В таблице 1 представлении внешние шины схемы:

Таблица 1

Наименование	Тип	Описание
Aclr	Вход	общая очистка схемы (сброс)
CLK	Вход	вход тактовой частоты;
ena1	Вход	разрешения работы БВК
ena2	Вход	разрешения работы БПД
ena3	Вход	вход разрешения работы БКИ блока
Rpin	Выход	вывод индикации «хорошее», «плохое» изображение
DataIn[8]	Вход	входная шина данных
DataY[32]	Выход	шина вывода данных X и Y
XYsel	Вход	вход выбора вых. координаты, «0»- X , «1»- Y

Схема работает следующим образом:

После появления сигнала на шине aclr «1» все регистры очищаются, и схема переводится в начальное состояние. Далее на вход шины ena1 подается сигнал логической “1” (что также попадает на вход записи блока БФ), на вход DataIn выставляется байт данных, после чего проходит тактовый импульс. По фронту

тактового импульса увеличивается значение счетчика СЧ, и данные записываются в буфер БФ. Операция повторяется 16384 тактов до полной обработки кадра размерностью 128*128 э.р., при этом на выходе блока БВК появляются значения координат X,Y и значения максимальной яркости W.

На следующем шаге на вход ena2 подаются сигнал логической “1”, а на вход ena1 – логического “0”, и далее приходит тактовый сигнал CLK, в результате чего данные X,Y,W записываются для хранения в блоке БПД.

Третий шаг это обнуление ena1, ena2, и подача на ena3 сигнала логической “1”, а далее на вход CLK приходит 16384 тактовых импульсов, в результате чего в блоке БКИ происходит сравнение значений яркости отдельного байта со значениями половины (W05) и ¼ максимальной яркости (W075), и определения площадей соответствующих срезов. Если их делимое (коэффициент формы γ) находится в допустимых границах, то изображение считается “хорошим”. Во время работы этого блока, для экономии времени, можно с выхода Dataху получить значение X и Y с помощью управляющего вывода XYsel (сигнал логического “0” - значение X, “1” - соответственно Y).

Далее необходимо сделать асинхронный сброс и схема готова к обработке нового кадра. Таким образом, продолжительность обработки кадра 32770 тактовых импульсов.

Моделирование схемы проводилось в среде ModelSim Altera 6.6. на базе микросхемы Cyclone II типа EP2C20Q240C8, в результате чего получены следующие результаты: кол-во логических элементов 2,454 / 18,752 (13 %), кол-во задействованных пинов – 47, fmax- 112MHz.

Таким образом, для реального устройства можно использовать микросхему меньшей емкости.

Диаграмма временных сигналов работы блока-модуля плис представлена на рис.6.

4. Обсуждение полученных результатов

Из диаграммы (рис. 4) можно заключить, что схема полностью статична и для работы ей необходимо $(2N+2)$ такта для обработки изображения (N- количество э.р.), зная, что первичная схема затрачивает $\tau = 10\text{мс}$ на кадр. Можно рассчитать необходимую частоту для схемы ПЛИС:

$$f = \frac{(2N+2)}{\tau}, \quad (5)$$
$$f = \frac{(2 * 16384 + 2)}{0,01} = 3,27 \text{ МГц}$$

Поскольку максимальная частота работы схемы 100МГц, то ее можно использовать для матриц вплоть до 512*512 э.р., не меняя микросхему на более дорогую и более быстродействующую.

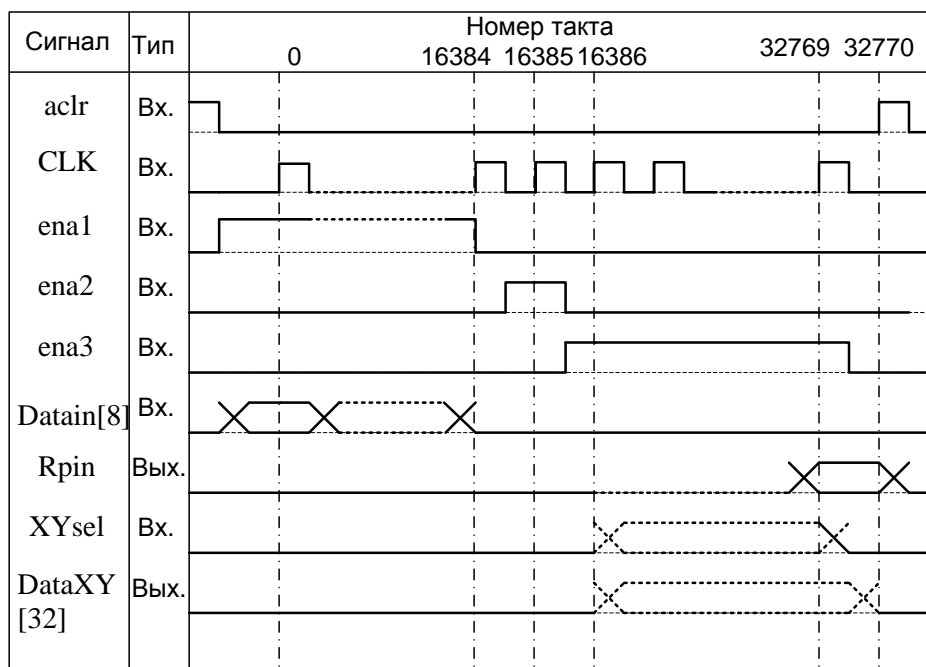


Рис. 4. Диаграмма сигналов модуля ПЛИС

Таким образом, данную схему становится возможным применять для улучшения характеристик лазерных систем передачи различных видов. Гибкость программирования ПЛИС позволяет создать такую подсистему с единым схемотехническим решением, а характеристики обработки изображений изменять путем перепрограммирования плис под целевую систему передачи.

Также сравнительно не большой объем площади, занимаемой разработанной схемой, относительно объема логических ячеек плис, позволяет сделать вывод, о необходимости провести исследование по встраиванию одной из широкодоступных архитектур процессоров. Что позволит исключить из схемы микроконтроллер (рис.1), и еще более упростит схему.

Разработанная схема, также может послужить основой для разработки подсистем прогнозирования характеристик пятенных изображений, необходимость которых возрастает с увеличением скорости и расстояния между системами передачи.

Выводы

1. Разработан метод сечений для классификации пятен лазерных пучков, не требующий выполнения трудоемких вычислительных операций.
2. Параллельный алгоритм, разработанный на основе метода сечений, удовлетворяет условиям по количеству и сложности операций.
3. Устройство обработки и классификации изображений позволяет высвободить основной процессор от выполнения однотипных операций.
4. Схема в базовом исполнении имеет рабочую частоту в 40 раз меньше, чем при использовании ЦСП, что позволяет уменьшить требования по ЭМС.

5. Устройство обработки выполнено модульно, что дает возможность применять его для матриц с большим разрешением.

Литература

1. J. M. Khosrofian and B. A. Garetz, "Measurement of a Gaussian laser beam diameter through the direct inversion of knife-edge data", *Appl. Opt.* 22, 3406–3410, 1983.
2. Kozhemyako V.P., Timchenko L.I., Poplavskyy A.A. et al. «Analysis of the methodological approaches in connection with the problem solving of extrapolation of object trajectory», *SPIE Symposium, USA*, vol. 5175, pp. 222–236, 2003.
3. N. G. Basov, E. M. Zemskov, Y. F. Kutaev, et al., "Laser control of near earth space and possibilities for removal of space debris from orbit with explosive photo-dissociation lasers with phase conjugation," in *Proceedings of GCL/HPL 98, SPIE Symposium, St-Petersburg, Russia*, Vol. 3574, pp. 219–228 (1998).
4. Giovanni Mana, Enrico Massa, and Alessandro Rovera, *Accuracy of Laser Beam Center and Width Calculations, Applied Optics*, Vol. 40, Issue 9, pp. 1378-1385, 2001.
5. D. A. Orlov and E. A. Neverova *Determination of the position of the center of a laser beam when the dynamic range of the matrix receiver is exceeded. Measurement Techniques. Volume 53, Number 10, 1140-1146.*
6. J. Magnes, M. Kinneberg, R. Khakurel, N. Melikechi, "Opto-mechanical Shape Analysis using Group Theory", *Appl. Opt.*, 49 (22), pp. 4188-4192, 2010.
7. A. Stalmashonak, G. Seifert, and H. Graener, «Optical three-dimensional shape analysis of metallic nanoparticles after laser-induced deformation», *Optics Letters*, Vol. 32, Issue 21, pp. 3215-3217, 2007.
8. Malcolm W. Wright, Keith E. Wilson, Joseph Kovalik, Abhijit Biswas and William T. Roberts, « A bidirectional low Earth orbit-to-ground optical link experiment», *SPIE Newsroom*, 3 p., 2011
9. Keith Wilson, «Safe laser-beam propagation for interplanetary links», *SPIE Newsroom*, 3 p., 2011.
10. Israel Gannot, M. Ben-David, A. Inberg, R. W. Waynant, «Beam shape analysis of waveguide delivered infrared lasers», *SPIE, Opt. Eng.* 41, 244, 2002.
11. Тимченко Л.И., Кутаев Ю.Ф., Герций А.А. и др. Система координатной привязки для нестационарных сигналов // *Известия РАН, сер. физическая.* - 2001. - №6, С. 886-890.
12. И.М.Журавель "Краткий курс теории обработки изображений"., [//exponenta.ru/imageprocess/book2](http://exponenta.ru/imageprocess/book2)
13. Тимченко Л.И., Свечников С.В., Кокряцкая Н.И. и др., «Параллельно-иерархические сети», монография, К., «Випол», 653 с.,2010.
14. Уэйкерли Дж., Проектирование цифровых устройств Т.2,М., «Постмаркет», 2002г, 515с.
15. Nios II Processor Reference, ALTERA, 2011,

http://www.altera.com/literature/hb/nios2/n2cpu_nii5v1.pdf

16. Бибило П.Н., Основы языка VHDL 3-е изд., М., «ЛКИ»,2007, 330с.