

УДК 621.396.77

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССОРА**

**Л. Ф. Купченко, В. Д. Карлов, О. А. Гурин, А. С. Рыбьяк, Н. В. Слабунова**

*Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, вул. Сумська 77/79, г. Харьков,  
61023, Украина*

*E-mail: kupch@meta.ua*

Поступила в редакцию 09 июня 2017 г.

Экспериментально исследуется процесс управляемой динамической спектральной фильтрации оптических изображений отличающихся различными спектральными свойствами. Аппаратная функция акустооптического процессора формировалась на основе априорных сведений о спектральных свойствах объекта и фона таким образом, чтобы обеспечить подавление спектральных составляющих излучения фона. Источниками оптического излучения служили три полупроводниковых лазера, работающих в диапазонах красного, зеленого и синего участков спектра. В качестве элементов имитирующих геометрические и спектральные свойства отражающих поверхностей объекта и фона использовались зеркала и абсорбционные светофильтры. Количественная оценка спектральной фильтрации изображений объекта и фона осуществлялась с использованием амплитудно-пространственных характеристик на выходе пространственного фотоприемника.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** динамическая спектральная фильтрация, акустооптическая фильтрация изображений.

Експериментально досліджується процес керуваної динамічної спектральної фільтрації оптичних зображень, що відрізняються різними спектральними властивостями. Апаратна функція акустооптичного процесора формувалася на основі априорних відомостей про спектральні властивості об'єкта і фону таким чином, щоб забезпечити зменшення спектральних складових випромінювання фону. Джерелами оптичного випромінювання служили три напівпровідникових лазера, що працюють в діапазонах червоної, зеленої та синьої частини спектра. У якості елементів, що імітують геометричні та спектральні властивості поверхонь об'єкта та фону використовувалися міри і вбирні світлофільтри. Кількісна оцінка спектральної фільтрації зображень об'єкта та фону здійснювалася з використанням амплітудно-просторових характеристик на виході просторового фотоприймача.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** динамічна спектральна фільтрація, акустооптична фільтрація зображень.

The process of controlled dynamic spectral filtration of optical images characterized by different spectral properties is studied experimentally. The hardware function of the acousto-optic processor was formed on the basis of a priori information about the spectral properties of object and background in a way to provide the suppression of spectral components of optical radiation background. As the sources of optical radiation three semiconductor lasers operating in the red, green and blue spectral regions were used. As the elements imitating the geometric and spectral properties of the reflecting surfaces of the object and background, test pattern and absorption filters were used. Quantitative estimation of the spectral images filtration of object and background was carried out using the amplitude-spatial characteristics at the output of the spatial photodetector.

**KEYWORDS:** dynamic spectral filtration, acousto-optical filtration of images.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Спектральная фильтрация изображений (изображающая спектроскопия) используется для обнаружения и идентификации объектов, для визуализации и анализа их структуры. Отличительная черта спектральных изображений состоит в том, что структурные особенности наблюдаемого объекта могут проявляться путем изменения контраста изображений полученных в определенных спектральных интервалах [1]. Для спектральной селекции изображений используются перестраиваемые широкоапертурные акустооптические светофильтры, которые позволяют формировать изображения объектов в широком спектральном интервале.

Динамическая фильтрация в оптико-электронных системах является дальнейшим развитием принципов изображающей спектроскопии и представляет собой управляемую спектральную

фильтрацию. Отличие от видеоспектрометров состоит в том, что в оптико-электронных системах с динамической спектральной фильтрацией устройство селекции разлагает принятое излучение в спектр, и обеспечивает управляемое изменение коэффициента пропускания спектральных составляющих, таким образом, чтобы обеспечить максимальное подавление излучения фона [2].

Спектральной фильтрации изображений посвящены работы [3], в которых показано, что пространственное разрешение определяется линейной и угловой апертурой акустооптического фильтра, а также длиной волны светового излучения. Определены пути уменьшения оптических aberrаций и хроматических смещений изображений, обусловленных акустооптическим взаимодействием.

Экспериментальным исследованиям динамической спектральной фильтрации посвящена работа [4]. Предполагалось, что спектральные свойства входных сигналов принадлежащих "объекту" либо "фону" постоянны по всей исследуемой поверхности, поэтому для имитации входных сигналов использовались абсорбционные светофильтры с постоянными спектральными свойствами по всей апертуре. Эффективность процесса спектральной фильтрации определялось по величине контраста сигналов принадлежащих объекту и фону, до и после фильтрации. Однако вопросы спектральной фильтрации изображений не исследовались.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящей статье экспериментально исследуется процесс управляемой спектральной фильтрации оптических изображений с использованием акустооптического спектрометра. В эксперименте в качестве элементов имитирующих геометрические и спектральные свойства отражающих поверхностей "объекта" и "фона" использовались миры и пространственно совмещенные с ними абсорбционные светофильтры, а источниками оптического излучения служили три полупроводниковых лазера, работающих в диапазонах красного, зеленого и синего участков спектра.

Для разрешения одного элемента изображения с размером  $A_1$  оптическая система акустооптического спектрометра должна обладать угловой апертурой  $\Delta\theta \geq \lambda/A_1$ , которая, в основном определяется расходимостью акустического пучка. Если в оптической схеме используется телескоп с увеличением  $M$ , то требование к угловой апертуре записывается в виде  $\Delta\theta \geq M\lambda/A_1$ . Увеличение телескопа выбирается из условий сопряжения размеров изображения с линейной апертурой акустооптического процессора  $A = Ma$ . Максимальное число разрешаемых элементов изображения определяется отношением  $N = A/A_1$  и равно  $N \leq \Delta\theta a/\lambda$ .

Таким образом, максимальное число разрешаемых по критерию Релея элементов изображения акустооптическим спектрометром определяются его угловой апертурой в основном определяемой расходимостью звукового пучка  $\Delta\theta$  линейной апертурой  $a$ , а также длиной волны света.

Эффективность процесса спектральной фильтрации изображений определялось по величине пространственно-контрастных характеристик принадлежащих "объекту" и "фону" до и после фильтрации.

Повышения контраста изображений  $K$  обеспечивается путем уменьшения коэффициента пропускания для спектральных составляющих принадлежащих фону – В с минимальным уменьшением коэффициента пропускания для спектральных составляющих объекта – Т.

$$K = \frac{T - B}{T + B}. \quad (1)$$

Процесс спектральной фильтрации будем исследовать с использованием векторного представления оптического излучения, при котором спектральные составляющие сигнала представляются в виде векторов в многомерном спектральном пространстве, величина которых определяет спектральную яркость оптического сигнала.

Математической основой спектральной селекции фоновой компоненты является операция вычисления скалярного произведения равного нулю, что реализуется при перпендикулярном расположении векторов фона и фильтра. Вектор фильтра вычисляется с использованием априорных сведений о спектральных характеристиках вектора объекта и вектора фона на основании следующего выражения [2].

$$\vec{F} = \frac{\vec{T} - N \cdot \vec{B}}{\|\vec{T} - N \cdot \vec{B}\|}, \quad (2)$$

где  $N = \frac{\vec{T}^T \cdot \vec{B}}{\vec{B}^T \cdot \vec{B}}$  - проекция вектора объекта на вектор фона.

Акустооптические процессоры различают на когерентные и некогерентные. В когерентных процессорах осуществляются линейные преобразования относительно комплексной амплитуды светового поля, а в некогерентных выполняют линейные преобразования относительно интенсивности поля. Поэтому сигналы на входе некогерентных акустооптических процессоров полученные в результате решений не могут принимать отрицательных значений.

Действительно в многомерном спектральном пространстве вектор фильтра будет иметь, по крайней мере, одну отрицательную координату. Это означает, что интенсивность излучения в некотором спектральном интервале имеет отрицательное значение. Так как интенсивность светового излучения может иметь только положительное значение, то для реализации спектральной фильтрации необходимо использовать операцию вычитания изображений, полученных путем пропускания через фильтры, характеристики которых описываются векторами  $\vec{F}^+$  и  $\vec{F}^-$ .

Значения этих векторов формируются при разложении вектора фильтра  $\vec{F}$  на два вектора с положительными координатами. При формировании вектора фильтра  $\vec{F}^+$  положим все отрицательные значения координат, отображающих отрицательное значение спектральных составляющих равными нулю. При формировании вектора фильтра  $\vec{F}^-$  положим все координаты, имеющие положительные значения, равными нулю, а отрицательные значения со знаком плюс. Например, если вектор фильтра имеет вид  $\vec{F} = [F_1 \ -F_2 \ -F_3]^T$ , то векторы  $\vec{F}^+$  и  $\vec{F}^-$  необходимо представить следующим образом:  $\vec{F}^+ = [F_1 \ 0 \ 0]^T$ ,  $\vec{F}^- = [0 \ F_2 \ F_3]^T$ .

В работе [5] показано, что акустооптические светофильтры с изменяемым коэффициентом пропускания можно рассматривать как элемент акустооптического процессора. Управляемая спектральная фильтрация изображений в таком процессоре реализуется как математическая операция вычисления «скалярного умножения вектора фильтра на вектор фона», что можно также представить в виде попарного произведения проекций векторов фона и фильтра и последующего их суммирования. Физической реализацией этой операции является дифракция оптического излучения на многочастотной управляемой по амплитуде ультразвуковой волне. Оптический сигнал на выходе системы представляет собой не что иное, как результат произведения сигнала на входе и коэффициента пропускания. При этом управление величиной дифракционной эффективности осуществляется путем изменения амплитуды звуковой волны.

На рис.1 в трехмерном пространстве изображено расположение векторов объекта и фона, обеспечивающих спектральную фильтрацию сигнала фона акустооптическим процессором. Показано,

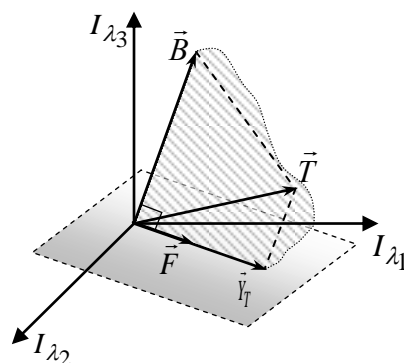


Рис. 1. Векторное представление сигналов объекта, фона и фильтра

что вектор, иллюстрирующий спектральные свойства объекта занимает произвольное положение, а вектор фона и фильтра ортогональны. Скалярное произведение векторов объекта и фильтра отлично от нуля  $(\vec{T} \cdot \vec{F}) \neq 0$  и характеризуют величину сигнала на выходе акустооптического процессора.

Для реализации операции умножения в оптических процессорах используются элементы с управляемой прозрачностью. В акустооптике понятие “управляемая прозрачность” связано с дифракционной эффективностью акустооптического взаимодействия, которая представляет собой отношение квадратов амплитуды дифракционной составляющей напряженности электрического поля  $E_1$  к напряженности электромагнитного излучения, попадающего на входной зрачок оптической системы  $E$  [6]:

$$\eta = \left| \frac{E_1}{E} \right|^2 = \frac{1}{1 + \gamma_1^2} \sin^2 \left( \frac{\Delta n}{n} \frac{kl}{2} \sqrt{1 + \gamma_1^2} \right), \quad (3)$$

где  $\gamma_1 = \varepsilon/q$  – отношение параметра расстройки  $\varepsilon = 1 + 2k \sin \theta / k_0$  к параметру Рытова  $q = (\Delta n/n) \cdot (k/k_0)^2$ ;  $\Delta n/n$  – относительное изменение показателя преломления среды вызванное ультразвуком.

Выражение (3) справедливо, в случае выполнения условия брэгговского синхронизма, когда свет падает на фронт ультразвуковой волны под углом Брэгга  $\sin \theta_B = k_0/2k$  и обеспечивается объемное взаимодействие света с ультразвуком, т. е. когда параметр Клейна-Кука  $Q = k_0^2 l / k \geq 1$ , где  $k$  и  $k_0$  – волновые числа света и звука,  $l$  – длина акустооптического взаимодействия.

Управление величиной дифракционной эффективности, достигается путём изменения амплитуды звуковой волны, связанной с величиной относительного изменения коэффициента преломления соотношением [1]

$$\frac{\Delta n}{n} = \sqrt{\frac{M_2 P_{ак}}{lb}}, \quad (4)$$

где  $M_2$  – коэффициент акустического качества среды;  $P_{ак}$  – акустическая мощность,  $l$  и  $b$  – размеры возбуждателя ультразвука.

В оптических процессорах математическая операция суммирования осуществляется путем пространственного сложения нескольких световых лучей. В акустооптическом процессоре это обеспечивается сложением дифракционных составляющих образовавшихся в результате брэгговской дифракции на многочастотной ультразвуковой волне.

Угловое положение дифракционных компонент связано с проекциями волновых векторов света на оси координат  $k_1 = k \cdot \cos \theta$ ,  $k_2 = k \cdot \sin \theta$  с волновым числом звука  $k_0$  соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{k_2 + k_0}{k_1} \approx \frac{\lambda \cdot f_0}{v_0}, \quad (5)$$

где  $f_0$  и  $v_0$  – частота и скорость звука,  $\lambda$  – длина волны света.

Соответственно световые компоненты с различными длинами волн, дифрагируя на многочастотном ультразвуке складываются на границе звукового поля в единый световой пучок, что и обеспечивает операцию сложения.

Из приведенных соотношений следует, что контрастность изображения формируемого на выходе акустооптического процессора зависит, от аппаратной функции (вектора фильтра) вычисленной на основе априорных сведений о спектральных характеристиках изображения объекта и фона, а также от соответствия аппаратной функции спектральным свойствам цели и фона.

Целью статьи является исследование процесса управляемой динамической фильтрации оптических изображений, отличающихся различными спектральными свойствами и при различных значениях аппаратной функции.

## ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Методика проведения эксперимента состояла в следующем:

1. В акустооптическом спектрометре обеспечивался брэгговский режим акустооптического взаимодействия многочастотной ультразвуковой волны с лазерным излучением красного, зеленого и синего участков спектра при фиксированном угле взаимодействия света и звука.

2. Устанавливалась количественная зависимость между дифракционной эффективностью акустооптического спектрометра и величиной высокочастотного напряжения на его входе, для каждой из трех компонент полихроматического лазерного излучения и соответствующей ей высокочастотной составляющей.

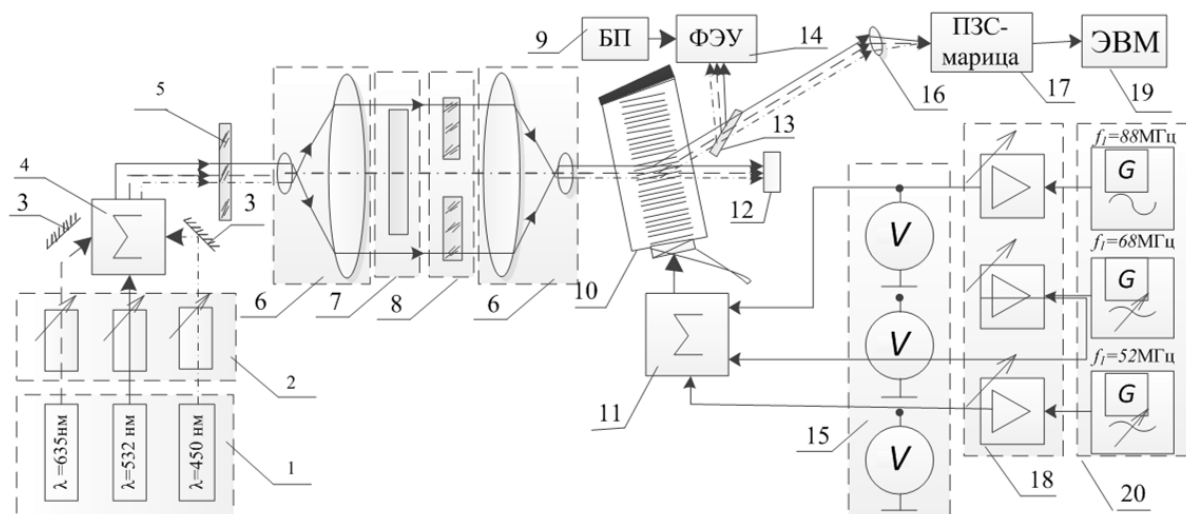
3. Вычислялась аппаратная функция (вектор фильтра) акустооптического спектрометра с использованием выражения (2) для двух изображений отличающихся по спектральным характеристикам.

4. Определялась относительное значение частотных составляющих управляющего сигнала с использованием пространственного положения вектора фильтра и вычислялась величина напряжения высокочастотных генераторов.

5. Оптическое излучение с выхода акустооптического спектрометра регистрировалось матричным фотоприемником и отображалось на экране ЭВМ, что позволило результаты спектральной фильтрации изображений представить в виде амплитудно-пространственных характеристик.

Структурная схема экспериментальной установки, представленная на рис.2, включает следующие функциональные устройства:

- оптического канала формирования изображения;
- акустооптического процессора;
- канала обработки изображений.



- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 1. Лазерный блок                   | 11. Сумматор напряжения                 |
| 2. Атенюаторы                      | 12. Поглотитель светового излучения     |
| 3. Направляющие зеркала            | 13. Полупрозрачное зеркало              |
| 4. Смеситель оптического излучения | 14. Приемник излучения ФЭУ              |
| 5. Матовое стекло                  | 15. Блок вольтметров                    |
| 6. Телескопическая система         | 16. Объектив                            |
| 7. Транспарант                     | 17. Матричный прибор с зарядовой связью |
| 8. Светофильтры                    | 18. Блок регулировки                    |
| 9. Блок питания ФЭУ                | 19. Электронно-вычислительная машина    |
| 10. Акустооптический фильтр        | 20. Блок генераторов высокой частоты    |

Рис.2. Структурная схема экспериментальной установки по исследованию спектральной фильтрации оптических изображений

Оптический канал формирования изображения состоял из следующих элементов: источник и формирователь оптического излучения, включающий три полупроводниковых лазера, работающих в диапазонах красного, зеленого и синего участков спектра (1); аттенюаторы (2); зеркала (3); смеситель (4)

матовое стекло (5); устройство формирования оптических сигналов, включающее телескопическую систему (6); транспарант (7); два сменных абсорбционных светофильтра (8).

Акустооптический процессор включал в себя: акустооптический модулятор на кристалле парателлурита (10), обеспечивающий дифракционную эффективность до 30-50%, три высокочастотных генератора (20) с широкополосными двухкаскадными усилителями напряжения (18) формирующих управляющие сигналы на частотах  $f_1 = 52\text{МГц}$ ,  $f_2 = 68\text{МГц}$ ,  $f_3 = 68\text{МГц}$ , а в качестве сумматора напряжения (11) применялся трехканальный телевизионный сплиттер.

Канал обработки изображений включал в себя: ПЗС матрицу (17) для преобразования пространственного светового излучения в электрический сигнал, ПВЭМ (19) для регистрации изображения и ФЭУ-51 (14) для измерения суммарного оптического излучения.

В соответствии с целью статьи проведено четыре эксперимента по спектральной фильтрации, в которых исследовались амплитудно-пространственные характеристики изображений на выходе акустооптического спектрометра при различных спектральных характеристиках светофильтров отображающих спектральные свойства «объекта» и «фона». Спектральные характеристики светофильтров СС-6, СС-2, ОС-11 и ЖЗС-6, которые были использованы в четырех экспериментах для имитации спектральных характеристик «объекта» и «фона» представлены на рис. 3.

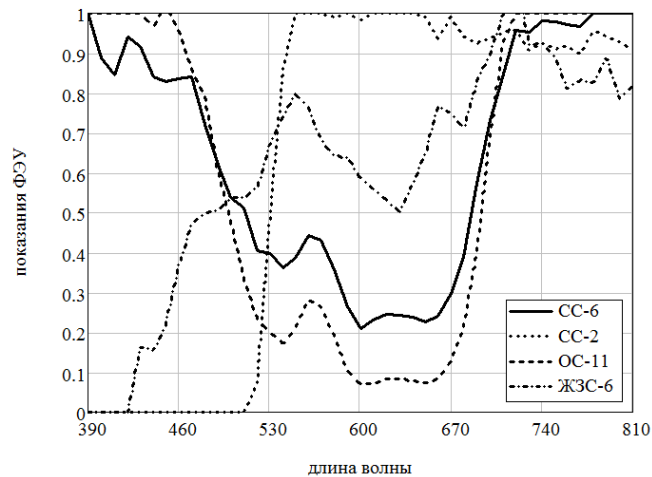


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропускания абсорбционных светофильтров СС-6, СС-2, ОС-11 и ЖЗС-6 от длины волны

В первом и втором экспериментах использовались светофильтры существенно отличающихся по спектральным характеристикам для «фона» оранжевый светофильтр ОС-11 и «объекта» синий светофильтр СС-2.

В первом эксперименте исследовались свойства дифрагированных на многочастотном ультразвуке оптических изображений при равенстве амплитуд частотных составляющих ультразвука. Это соответствовало отсутствию управляющего сигнала. В этом случае изображения на выходе акустооптического спектрометра отображающие яркостные свойства пространственных составляющие «фона» и «объекта» примерно одинаковые (см. рис.4а).

Во втором эксперименте в соответствии со спектральными характеристиками «фона» и «объекта» вычислялась аппаратная функция, обеспечивающая минимальный коэффициент пропускания для спектральных составляющих принадлежащих «фону». Из сравнительного анализа амплитудно-пространственных характеристик (рис. 4б) следует, что в результате спектральной фильтрации удалось существенно уменьшить сигнал принадлежащий «фону» и некоторым уменьшением сигнала «объекта».

В третьем эксперименте осуществлялась спектральная фильтрация изображений спектральные характеристики, которых отличались незначительно. Для отображения спектральных свойств изображений использовались синие светофильтры СС-6 и СС-2. Анализ амплитудно-пространственных характеристик показал, что, во-первых, на выходе акустооптического спектрометра сформирован сигнал, средняя величина которого меньше чем в первых двух экспериментах, а во-вторых, в этом случае удалось лишь частично подавить сигнал принадлежащих «фону». По-видимому, это объясняется малым числом управляемых каналов спектральной фильтрации необходимым в данном случае.

В четвертом эксперименте аппаратная функция не соответствовала спектральному составу управляющего сигнала обеспечивающего селекцию. В эксперименте аппаратная функция была рассчитана для фильтрации спектральных составляющих принадлежащих светофильтру ОС-11, а в качестве сигнала принадлежащих «фону» использовался светофильтр ЖЗС-6. Результаты исследований представлены на рис.4г из анализа, которых следует, что в процессе спектральной фильтрации удалось лишь частично уменьшить величина излучения принадлежащих «фону».

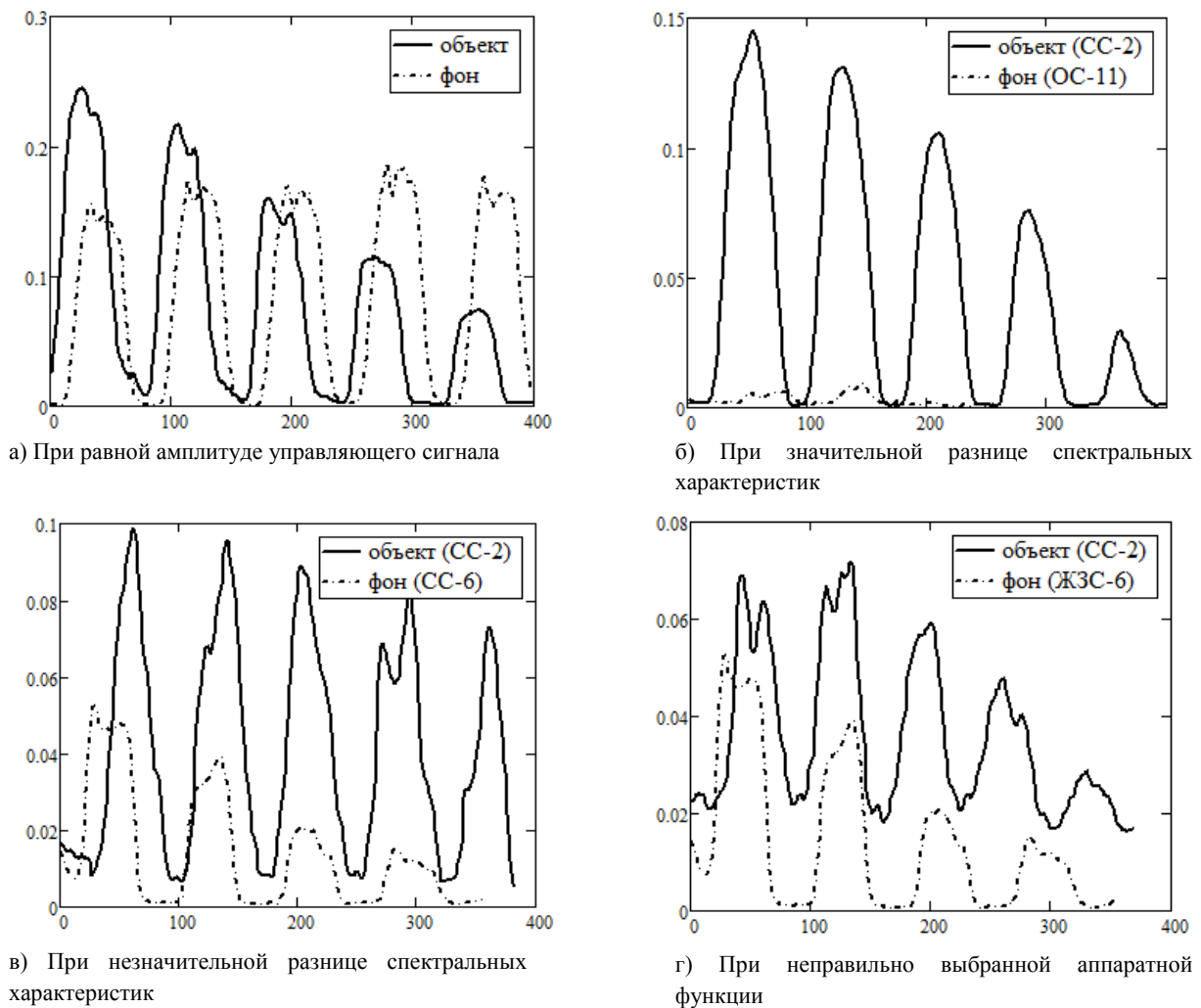


Рис. 4. Амплитудно-пространственные характеристики изображений объекта и фона

## ВЫВОДЫ

Исследована динамическая спектральная фильтрация оптических изображений с различными спектральными свойствами с использованием акустооптического процессора. К особенностям физического эксперимента следует отнести применение в качестве источников излучения трех лазеров красного, зеленого и синего участков спектра и многочастотной управляемой по амплитуде ультразвуковой волны. Показано, что эффективная спектральная селекция цветных изображений обеспечивается в случае, когда спектральные характеристики изображений существенно отличаются. Если спектральные характеристики изображений отличаются незначительно, то эффективную селекцию изображения обеспечить не удастся, что, по-видимому, объясняется малым числом управляемых каналов спектральной фильтрации используемых в эксперименте.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.И.Балакший, В.Н.Парыгин, Л.Е.Чирков. Физические основы акустооптики. – М.: Радио и связь. 1985. – 285 с.
2. Купченко Л. Ф. Динамическая спектральная фильтрация оптического излучения в оптоэлектронных системах / Л. Ф. Купченко, А. С. Рыбьяк // Электромагнитные волны и электронные системы. – Международный научно-технический журнал. – М.: Радиотехника, 2011. – Т.16, Вып. 4. – С. 32 – 43.
3. Акустооптические процессоры спектрально типа // Под ред. В.В. Проклова, В.Н. Ушакова. Монография, – М.: Радиотехника, 2012. – 192 с.
4. Купченко Л.Ф., Гурин О.А., Рыбьяк А.С., Вдовенков В.Ю. Экспериментальные исследования процесса динамической спектральной фильтрации с использованием взаимодействия лазерного излучения с многочастотной акустической волной // Прикладная радиоэлектроника. – 2016. – Т. 15, №2, – С.100-104.
5. Купченко Л.Ф., Слабунова Н.В., Гурин О.А. Акустооптический процессор в оптоэлектронной системе, обеспечивающий динамическую спектральную фильтрацию // Прикладная радиоэлектроника. – 2016. – Т. 15, №4. – С.359-361.
6. Акустооптические эффекты при сильном взаимодействии. Теория и эксперимент (Метод непрерывных дробей при решении акустооптических задач) Под ред. Л.Ф. Купченко: Монография. – Х.:ООО «ЭДЕНА» 2009.–264.