

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МНОГОЧАСТОТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНОЙ

Л.Ф. Купченко, О.А. Гурин, А.С. Рыбьяк, В.Ю. Вдовенков

Разработана методика экспериментальных исследований процесса динамической спектральной фильтрации с использованием взаимодействия полихроматического лазерного излучения с много-частотной акустической волной. В ходе экспериментального исследования использовался макет оптико-электронной системы, в которой для управления спектральным коэффициентом пропускания использовался акустооптический модулятор. Источниками оптического излучения служили три полупроводниковых лазера, работающих в диапазонах красного, зеленого и синего участков спектра, а в качестве элементов, имитирующих спектральные свойства отражающих поверхностей объекта и фона, использовались абсорбционные светофильтры. Аппаратная функция управляемого устройства спектральной селекции формировалась таким образом, чтобы обеспечивать подавление спектральных составляющих излучения фона с минимальным ослаблением оптического сигнала объекта.

Ключевые слова: динамическая спектральная фильтрация, брэгговская дифракция полихроматического лазерного излучения на многочастотном ультразвуке.

ВВЕДЕНИЕ

Основной проблемой при построении оптико-электронных приборов является определение наилучших способов и приемов обработки полезных сигналов при наличии помех, создаваемых окружающим фоном и средой распространения. При решении подобного класса задач используют определенное описание образов (совокупность обрабатываемых сигналов), составляющих отличительные признаки объектов. Наиболее часто используемыми группами признаков являются геометрические, спектральные, энергетические и динамические.

При обнаружении объектов по спектральным признакам отсутствует необходимость в высокой разрешающей способности, т. к. при этом для обнаружения достаточно использовать только один элемент разрешения. Поэтому использование спектральных, а не пространственных признаков объектов в оптико-электронных системах (ОЭС), иногда, оказывается предпочтительнее.

Спектральная фильтрация оптического излучения лежит в основе нового научного направления в оптоэлектронике – изображающей спектроскопии. Здесь под спектральной фильтрацией оптического излучения понимают регистрацию изображений объектов в узких спектральных диапазонах. Это позволяет наблюдать в изображениях различные фрагменты, которые отличаются спектральной яркостью.

Оптико-электронные системы, реализующие принципы изображающей спектроскопии, получили

название изображающие спектрометры или видео-спектрометры. В таких системах принятое оптическое излучение после разложения в спектр преобразуется с помощью приемника излучения в электрические сигналы, а затем подвергается обработке в последетекторной области.

Динамическая спектральная фильтрация в ОЭС является дальнейшим развитием принципов изображающей спектроскопии и представляет собой согласованную оптимальную обработку оптического излучения в преддетекторной области. В отличие от видеоспектрометров в таких ОЭС диспергирующее устройство выполняет две функции. Во-первых, разлагает принятое излучение в спектр, а во-вторых, обеспечивают управляемое изменение коэффициента пропускания каждой спектральной составляющей, таким образом, чтобы обеспечить максимальное подавление излучения фона с минимальным ослаблением оптического сигнала объекта [1].

Эти задачи возможно решить с использованием дифракции светового излучения на многочастотном ультразвуке, что обеспечивает разложение принятого излучения на спектральные составляющие, и позволяет изменять их дифракционную эффективность (коэффициент пропускания) путем изменения амплитуды частотных компонент ультразвуковой волны в соответствии с управляющим сигналом.

Целью статьи является экспериментальное исследование принципов динамической спектральной фильтрации с использованием взаимодействия

полихроматического лазерного излучения с много-частотной акустической волной в интересах повышения контраста изображения объекта на выходе ОЭС.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При разработке макета оптико-электронной системы на основе дифракции светового излучения на много-частотном ультразвуке нас будут интересовать свойства акустооптического взаимодействия и, в частности, зависимость величины дифракционной эффективности от амплитуды акустического поля; ограничения, связанные с предельными значениями дифракционной эффективности, которые приводят к возникновению нелинейных искажений; зависимость угловой дисперсии (дифракции света на ультразвуковой волне) от параметров акустооптического взаимодействия (частоты ультразвуковой волны и длины волны светового излучения).

В эксперименте будет использоваться режим брэгговской дифракции, когда свет падает на фронт ультразвуковой волны под углом Брэгга $\sin \theta_B = -k_0/2k$, где k_0 и k – волновые числа ультразвука и света соответственно. После преобразования получим выражение удобное для практического использования

$$2 \cdot n \cdot V_0 \sin \theta_B = f_0 \cdot \lambda, \quad (1)$$

из которого следует, что произведение λ – длины световой волны на f_0 – частоту ультразвуковой волны при постоянных скорости распространения звука V_0 и угле взаимодействия света и звука θ_B – величина постоянная. Здесь n – показатель преломления среды взаимодействия.

Выражение для дифракционной эффективности (отношения квадратов дифрагированной световой волны E_1 к падающей E_0), описывающее взаимодействие плоских световых и ультразвуковых волн в широком диапазоне расстроек относительно условий брэгговского синхронизма, имеет следующий вид [2]:

$$|\eta_1|^2 = \left| \frac{E_1}{E_0} \right|^2 = \frac{1}{1 + \gamma^2} \sin^2 \left(\frac{\Delta n}{n} \frac{kl}{2} \sqrt{1 + \gamma^2} \right), \quad (2)$$

где $\gamma = \varepsilon/2q$; $q = \frac{\Delta n}{n} \left(\frac{k}{k_0} \right)^2$ – параметр Рытова;

$\varepsilon = 1 + \frac{2k \sin \theta}{k_0}$ – параметр расстройки, характеризующий отличие параметров и геометрии акустооптического взаимодействия от условий брэгговского синхронизма; $\Delta n/n$ – относительное изменение амплитуды коэффициента преломления среды под действием звука; l – длина взаимодействия света с ультразвуком.

При дифракции света на многочастотном звуке дифракционное световое поле адекватно отражает набор спектральных компонент в акустооптическом

сигнале только при небольшом значении дифракционной эффективности [3].

Из выражения (1) следует, что максимальная дифракционная эффективность будет при достижении аргумента синуса следующего значения:

$$\frac{\Delta n}{n} \frac{kl}{2} \sqrt{1 + \gamma^2} = \frac{\pi}{2}. \quad (3)$$

Будем считать, что если частота анализируемого сигнала соответствует частоте, обеспечивающей условие брэгговского синхронизма, и, следовательно, параметр $\gamma = 0$, то предельные значения величины изменения $\Delta n/n$ можно определить из условия $\Delta n/n = \pi/kl$.

В работе [4] приведена зависимость изменения $\Delta n/n$ от величины акустической мощности $P_{ак}$ в звукопроводе и геометрических размеров возбудителя ультразвука l и b , а также от свойств материала звукопровода, который обычно характеризуется коэффициентом M_2 – параметром акустооптического качества. Эта зависимость имеет следующий вид:

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

При акустооптическом взаимодействии угловое положение дифракционных компонент первого порядка связано с проекциями волнового вектора света $k_2 = k \sin \theta$, $k_1 = k \cos \theta$ на оси координат и волновым числом звука k_0 соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{k_2 + k_0}{k_1}. \quad (5)$$

Можно показать, что при взаимодействии монохроматического света с многочастотным звуком претерпевают рассеяние те составляющие светового излучения, для которых выполняются условия брэгговского синхронизма с одной из частотных составляющих звукового поля. Существенно, что при дифракции монохроматического света на много-частотном звуке пространственные дифракционные компоненты светового излучения с различными длинами волн на выходе звукового поля образуют в пространстве единый световой пучок.

2. ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Настоящая статья посвящена экспериментальным исследованиям макета оптико-электронной системы с динамической спектральной фильтрацией и развивает экспериментальные исследования, результаты которых изложены в работе [1].

Структурная схема экспериментальной установки, представленная на рис.1, включает следующие элементы и устройства:

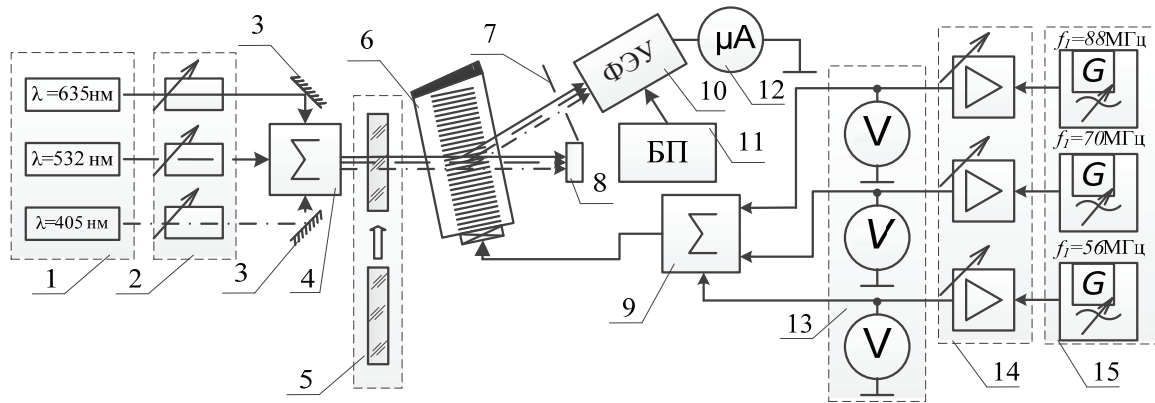


Рис 1. Структурная схема экспериментальной установки

- | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1. Лазерный блок | 6. Акустооптический модулятор | 11. Блок питания (БП) ФЭУ |
| 2. Атенуаторы | 7. Диафрагма | 12. Микроамперметр |
| 3. Направляющие зеркала | 8. Поглотитель светового излучения | 13. Блок вольтметров; |
| 4. Смеситель оптического излучения | 9. Сумматор напряжения | 14. Блок регулировки напряжения ВЧ |
| 5. Блок сменных светофильтров | 10. Приемник излучения ФЭУ | 15. Блок генераторов ВЧ |

- источник оптического излучения, в качестве которого использовались три полупроводниковых лазера, работающих в диапазонах красного, зеленого и синего участков спектра;

- формирователей оптических сигналов подлежащих селекции, в качестве которых использовались два сменных абсорбционных светофильтра с известными спектральными коэффициентами пропускания;

- акустооптический модулятор МЛ-201 на основе стекла ТФ-7, в котором возбуждалась продольная акустическая волна;

- три высокочастотных генератора Г4-107;

- три усилителя напряжений, которые обеспечивали требуемую величину высокочастотного напряжения на возбудителе ультразвука акустооптического модулятора в соответствии с расчетными значениями;

- приемник излучения, в качестве которого использовался фотоэлектронный умножитель ФЭУ-51, ток на выходе которого регистрировался микроамперметром.

Методика проведения эксперимента включала следующие этапы.

Этап 1. Определялась частота генераторов из условий брэгговского синхронизма (1) таким образом, чтобы произведение длины волны каждого из трех лазеров на частоту звука была постоянна $f_0 \cdot \lambda = const$.

Этап 2. Измерялся коэффициент пропускания (дифракционная эффективность) акустооптического модулятора в диапазонах красного, зеленого и синего участков спектра при выполнении брэгговского синхронизма для каждого из спектральных каналов и фиксированном значении высокочастотного напряжения на его входе.

Этап 3. Измерялся коэффициент пропускания абсорбционных светофильтров в каждом из трех

спектральных каналов, и вычислялось значение контрастности оптических сигналов до управляемой фильтрации. Для этого устанавливалась постоянная величина амплитуд высокочастотных сигналов каждого из генераторов, а затем последовательно устанавливались абсорбционные светофильтры, обладающие различной величиной коэффициента пропускания «объект», «фон-1» и «фон-2» и регистрировался ток на выходе ФЭУ для каждого спектрального канала отдельно.

Этап 4. Вычислялась аппаратная функция (вектор фильтра) с использованием выражения

$$\vec{F} = \frac{\vec{T} - N\vec{B}}{\|\vec{T} - N\vec{B}\|}, \quad (6)$$

где вектор \vec{T} отображает спектральный коэффициент пропускания светофильтра «объект» в трехмерном спектральном пространстве, а вектор \vec{B} – спектральный коэффициент пропускания светофильтра «фон»; $N = \vec{T}^T \vec{B} / \vec{B}^T \vec{B}$ – коэффициент, пропорциональный величине проекции вектора объекта \vec{T} на вектор фона \vec{B} ; $\|\bullet\|$ – норма (длина) вектора [1].

Этап 5. В соответствии с вычисленной аппаратной функцией акустооптического модулятора устанавливались амплитуды высокочастотных управляющих сигналов каждого из трех генераторов, обеспечивающие требуемую величину коэффициента пропускания акустооптического модулятора в каждом из спектральных каналов.

Этап 6. Измерялись суммарные значения токов на выходе приемника излучения, величины которых пропорциональны световым потокам соответствующих светофильтров «объект» и «фон», используемых в эксперименте, и вычислялось значение контрастности оптических сигналов на выходе ОЭС.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эффективность спектральной фильтрации определялась путем сравнения контраста объекта и фона до проведения спектральной фильтрации и по ее окончании. Контраст объекта и фона определялся с использованием следующего соотношения:

$$K = (T - B) / (T + B), \quad (7)$$

где T и B – суммарные значения токов на выходе приемника излучения, пропорциональные световым потокам прошедшим соответствующие светофильтры «объект» или «фон».

В процессе проведения эксперимента исследовались два набора («объект» – «фон») абсорбционных светофильтров, отличающихся спектральными коэффициентами пропускания. В первом случае в качестве «объекта» использовался синий светофильтр СС-6, а в качестве «фона» – оранжевый светофильтр ОС-11. Спектральные характеристики пропускания используемых абсорбционных светофильтров приведены на рисунке 2. Из анализа графиков видно, что спектральные коэффициенты пропускания пары светофильтров СС-6 – ОС-11 существенно отличаются.

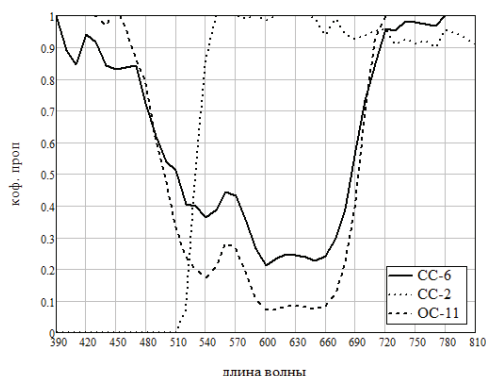


Рис. 2. Коэффициенты пропускания для трех абсорбционных светофильтров

Во втором случае в качестве «фона» использовался светофильтр СС-2, спектральные характеристики пропускания которого в значительно меньшей степени отличаются от характеристик светофильтра СС-6, выполняющего роль «объекта».

Для определения начального контраста устанавливалась постоянная величина амплитуд высокочастотных сигналов каждого из генераторов, и регистрировался ток на выходе ФЭУ в каждом спектральном канале отдельно, пропорциональный световому потоку, прошедшему соответствующий светофильтр (СС-6 «объект», ОС-11 «фон-1», СС-2 «фон-2»).

Результаты измерений представлены в таблицах 1, 2. Среднее значение контраста для двух светофильтров СС-6 и ОС-11 без управляемой фильтрации составило – 0,33, а для светофильтров СС-6 и СС-2 – 0,35.

Далее осуществлялся процесс спектральной фильтрации, позволяющий обеспечить максимальную величину спектрального коэффициента пропускания акустооптического модулятора для одного из абсорбционных светофильтров. Результаты вычисления контраста при спектральной фильтрации представлены в таблицах 1 и 2. Средний контраст объекта для первого набора светофильтров составил 0,95, а для второй – 0,88.

Таблица 1

№ п/п	Суммарный ток ФЭУ без фильтрации, мкА		Суммарный ток ФЭУ с фильтрацией, мкА	
	СС-6	ОС-11	СС-6	ОС-11
1.	136	233	71	0
2.	109	218	71	1
3.	88	156	101	0
4.	117	330	71	4
5.	95	150	81	2
<I>	109	217	79	2
<K>	-0,33		0,95	

Таблица 2

№ п/п	Суммарный ток ФЭУ без фильтрации, мкА		Суммарный ток ФЭУ с фильтрацией, мкА	
	СС-6	СС-2	СС-6	СС-2
1.	297	117	65	5
2.	180	87	20	0
3.	240	102	46	6
4.	204	117	75	0
5.	194	117	25	3
<I>	223	108	46,2	2,8
<K>	0,35		0,88	

Сравнение контраста излучений двух светофильтров, регистрируемых без фильтрации и при наличии согласованной фильтрации, показал, что в результате спектральной селекции удается повысить контраст примерно в два – три раза.

ВЫВОДЫ

Экспериментально установлена возможность создания управляемого селективирующего устройства, позволяющего обеспечить различный спектральный коэффициент пропускания для двух оптических сигналов, отличающихся по спектральному составу. В ходе эксперимента спектральная селекция обеспечивалась путем изменения амплитуды частотных компонент ультразвуковой волны в соответствии с управляющим сигналом при дифракции полихроматического лазерного излучения на многочастотном ультразвуке.

Эффективность процесса фильтрации определялась по величине контраста до фильтрации и после фильтрации. Экспериментально установлено, что при наличии трех спектральных каналов селекции удается повысить контраст на выходе в несколько раз.

Показано, что величина контраста изображения «объекта» на выходе зависит от различия спектральных характеристик пропускания двух абсорбционных светофильтров. Например, при существенном различии величина контраста составила – 0,95, а при относительно близких характеристиках светофильтров величина контраста составила – 0,88.

Литература

- [1] 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.
- [2] 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 с.
- [3] Высокоэффективная акустооптическая дифракция света на многочастотном звуке в геометрии неаксиального дефлектора / С. Н. Антонов, А. В. Вайнер, В. В. Проклов, Ю. Г. Резвов // Журнал технической физики. – 2008. – С. 79–83.
- [4] В.И. Балакиев, В.Н. Парыгин, Л.Е. Чирков. Физические основы акустооптики.-М.: Радио и связь. 1985. – 285 с.

Поступила в редколлегию 31.05.2016



Купченко Леонид Федорович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры, Харьковский университет Воздушных Сил. Научные интересы: акустооптика, акустоэлектроника, изображающая спектроскопия, оптико-электронные системы.



Гурин Олег Александрович, адъюнкт, Харьковский университет Воздушных Сил. Научные интересы: акустооптика, акустоэлектроника, оптикоэлектронные системы, изображающая спектроскопия.



Рыбьяк Анатолий Степанович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Харьковский университет Воздушных Сил. Научные интересы: изображающая спектроскопия, акустоэлектроника, акустооптика, оптико-электронные системы, .



Вдовенко Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, Харьковский университет Воздушных Сил. Научные интересы: изображающая спектроскопия, акустооптика, акустоэлектроника, оптико-электронные системы.

УДК 681.78

Експериментальні дослідження процесу динамічної спектральної фільтрації з використанням взаємодії лазерного випромінювання з багаточастотною акустичною хвилею/ Л.Ф. Купченко, О.О. Гурін, А.С. Риб'як, В.Ю. Вдовенков// Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журн.-нал. – 2016. – Том 15., №2 – С. 100 – 104.

Розроблено методику експериментальних досліджень процесу динамічної спектральної фільтрації з використанням взаємодії поліхроматичного лазерного випромінювання з багаточастотною акустичною хвилею. В ході експериментального дослідження використовувався макет оптико-електронної системи, в якій для управління спектральним коефіцієнтом пропускання використовувався акустооптичний модулятор. Джерелами оптичного випромінювання служили три напівпровідникових лазера, що працюють в діапазонах червоного, зеленого і синього ділянок спектра, а як елементи, що імітують спектральні властивості відбивальних поверхонь об'єкта і фону, використовувалися абсорбційні світлофільтри. Апаратна функція керованого пристрою спектральної селекції формувалась так, щоб забезпечити заглушення спектральних складових випромінювання фону з мінімальним ослабленням оптичного сигналу об'єкта.

Ключові слова: динамічна спектральна фільтрація, бреггівська дифракція поліхроматичного лазерного випромінювання на багаточастотному ультразвуці.

Лл.: 02. Табл.: 02. Бібліогр.: 04 найм.

UDC 681.78

Experimental researches of dynamic spectral filtration using laser radiation interaction with multifrequency acoustic wave/ L.F. Kupchenko, O.A. Goorin, A.S. Rybiak, V.Yu.Vdovenkov// Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2016. – Vol. 15, № 2. – P. 100 – 104.

The paper describes the technique of experimental researches of the dynamic spectral filtering using polychromatic laser radiation interaction with a multifrequency acoustic wave. The experimental research is based on applying the layout of electro-optical systems, in which an acousto-optic modulator was used to control the spectral transmittance. Optical radiation sources were three semiconductor lasers operating in the bands of red, green and blue portions of the spectrum, as well as elements simulating the spectral properties of the reflective surfaces of the object and the background are used as absorption filters. The hardware function of a managed spectral selection device was formed in such a way as to ensure the suppression of spectral components of the background radiation with minimal attenuation of the optical signal of the object.

Keywords: dynamic spectral filtering, Bragg diffraction of polychromatic laser radiation on multifrequency ultrasound

Fig.: 02. Tab.: 02. Ref.: 04 items.